



## UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE ECOLE DOCTORALE : ED184 INSTITUT DE MATHÉMATIQUES DE MARSEILLE UMR 7373

Thèse présentée pour obtenir le grade universitaire de docteur

Discipline : Mathématiques Spécialité : Ingénierie côtière

Van Van THAN

#### Modélisation d'érosion côtière : application à la partie ouest du tombolo de Giens

Soutenue le 18 Septembre 2015 devant le jury :

Kim Dan NGUYEN Sylvain GUILLOU Yves LACROIX Didier LÉANDRI Jacques PIAZZOLA Trung Viet NGUYEN Professeur, Université de Paris Est Dr-HDR, Université de Caen Normandie Professeur, SEATECH Professeur, SEATECH Professeur, SEATECH Professeur, CKT

Rapporteur Rapporteur Directeur de thèse Examinateur Examinateur Examinateur

### Résumé

Le tombolo de Giens (tombolo) est situé sur la commune de Hyères (Var). Ce double tombolo est constitué de deux branches occidentale et orientale (tombolo Ouest/occidental et Est/oriental). Sur une côte à faible marée et vagues dominantes et saisonnières, la dynamique du tombolo a un caractère saisonnier. En été, les houles sont faibles, ce qui entraîne un bas niveau de sédimentation. En hiver, celles-ci entraînent un degré élevé de sédimentation. Actuellement, l'équilibre du tombolo est menacé par des phénomènes d'érosion marine. Celle-ci conduit au franchissement et à la destruction du cordon littoral et au dépôt des sables sur la route du sel et dans le canal de ceinture des marais des Pesquiers.

Depuis les années 50, le tombolo a été étudié sous diverses formes de recherches scientifiques et de projets par des cabinets d'ingénierie (commandes d'acteurs locaux), des associations (subventions) ou des laboratoires de recherche publics. Ces études portent sur : l'hydrodynamique ; la géomorphologie ; le transport sédimentaire ; l'évolution des herbiers de posidonie, des plages sableuses, et du trait de côte ; et la gestion, la réhabilitation, et la sauvegarde du tombolo.

Jusqu'à maintenant, la compréhension du régime hydrodynamique et du transport des sédiments dans le golfe de Giens est incomplète, et repose sur des techniques anciennes. De plus, la Ville de Hyères n'a pas réussi à mettre en place une solution efficace tant sur le plan technique qu'économique pour défendre la plage de l'Almanarre contre l'érosion marine et assurer la stabilité du rivage de cette plage.

L'objectif de cette thèse est la détermination des causes du phénomène d'érosion marine, et la production de propositions d'orientation pour la protection de la branche occidentale.

L'objectif principal de cette recherche est de comprendre le comportement morphologique du tombolo. L'intérêt particulier se concentre sur les principaux facteurs d'érosion tels que la caractéristique de marée, le régime des vagues, des vents et l'interaction entre tous ces facteurs qui influencent les changements morphologiques.

L'étude commence par la collecte et l'analyse de toutes les données disponibles, pour trouver des règles d'évolution du tombolo. Ce qui a pour but d'expliquer comment les processus hydrodynamique et de transport sédimentaire se produisent. Ensuite, le logiciel de modélisation MIKE, qui peut les modéliser, a été appliqué pour confirmer l'hypothèse et obtenir une meilleure connaissance de la dynamique à l'œuvre au tombolo occidental.

Ensuite, la thèse analyse et détermine les principaux agents affectant l'évolution du tombolo Ouest, tels que les houles, les courants, et les tempêtes. La mise en place du modèle numérisé de la branche occidentale permet d'obtenir une image complète du processus d'évolution du littoral. Il montre que la force de la houle est l'agent érosif le plus important pour le littoral ouest de Giens. De plus, les tempêtes, les sédiments, la nature du fond et les biocénoses (posidonies) jouent un rôle important dans la dynamique de l'érosion marine de ce littoral. Les autres facteurs tels que le courant, la surcote, le vent, et la marée, jouent un rôle faible ou moyen.

Nous avons couplé des facteurs simultanément : les houles, les courants côtiers, et les transports des sédiments pour les différents régimes des houles et des vents dans MIKE 21. La qualité de simulation du modèle de MIKE dans ce domaine est assez bonne. L'intégration d'un certain nombre de modules donne des résultats raisonnables, compatibles avec les phénomènes réels et les mesures réalisées. Ainsi, nous pouvons utiliser ce modèle pour calculer l'évolution du littoral à l'avenir et prévoir l'impact des solutions de protection envisagées sur l'évolution du littoral.

L'évolution du rivage est ensuite analysée sur le changement du trait de côte ainsi que le transport longitudinal des sédiments. Premièrement, l'outil DSAS est appliqué afin d'analyser la modification historique de la ligne du rivage. Deuxièmement, la capacité du transit sédimentaire est estimée en utilisant le modèle LITPACK.

Enfin, la possibilité de stabiliser le tombolo Ouest est discutée pour donner des suggestions sur les choix de solutions adaptées. Les modèles couplés nous permettent de calculer l'évolution hydrodynamique et morphologique au tombolo Ouest en présence des constructions de protection. Nous remarquons que le rechargement semble être incontournable pour la stabilisation de la plage. Cependant, le rechargement avec ou sans ouvrages ne suffit pas à arrêter définitivement le phénomène d'érosion marine au tombolo ouest. Les brise-lames semblent une protection efficace contre l'érosion marine, particulièrement efficace pour la zone nord. Ces solutions sont conformes à l'objectif fixé pour le problème de l'érosion au tombolo.

**Mots clés** : hydrodynamique, plage de l'Almanarre, modèle numérique, modèles couplés, évolution, érosion côtière, tombolo, rechargement des plages, brise-lames.

#### Abstract

The tombolo of Giens (tombolo) is located in the town of Hyères (Var). This double tombolo consists of two arrows: the Western and Eastern branch (western and eastern tombolo). On a low tide and dominant and seasonal waves coast, the dynamics of the tombolo is seasonal. In summer, the waves are low, resulting in a low level of sedimentation. In winter, the strongest waves cause a high level of sedimentation. Currently, the balance of the tombolo is fragilized by marine erosion. This leads to: the crossing and destruction of the sand dune; the sand depot on the Salt Road and the ceinture canal of the Pesquiers's marsh.

Since the 50s, the tombolo has been studied in various forms of scientific research and projects, by engineering firms (local actor's commands), associations (grants), or public research laboratories. These studies focus on hydrodynamics, geomorphology, sediment transport, changes in seagrass meadows, evolution of sandy beaches, evolution of the coastline and management, rehabilitation and preservation of the tombolo.

Until now, understanding the hydrodynamics and sediment transport in the Gulf is incomplete and based on old techniques. In addition, the City of Hyères failed to implement an effective solution both technically and economically to defend the Almanarre beach against sea erosion and ensure the stability of the shoreline.

The objective of this thesis is the determination of the causes of sea erosion phenomenon, and the production of policy proposals for the protection of the beach.

The main objective of this research is to understand the morphological behavior of the tombolo of Giens. The special interest focuses on key factors such as erosion characteristic of tide, wave climate, wind and the interaction of all these factors that influence morphological changes.

The study begins with the collection and analysis of all available data, to find evolution rules of tombolo of Giens. Which aims to explain how the hydrodynamic processes and sediment transport occur. Then MIKE modeling software that can model the currents, waves and sediment transport was applied to confirm the hypothesis and get a better understanding of the dynamics at work in the Western tombolo.

Then, the thesis analyzes and determines the factors affecting the evolution of the Western tombolo, such as the waves, currents, and storms. The establishment of a Western tombolo digitized model provides a complete picture of coastal evolution process. It shows that the strength of the swell is the most important erosive agent for the western coast of Giens. In addition, storms, sediment, bottom type, and biological communities (Posidonia) play an important role in the dynamics of beach erosion. Other factors such as current and sea surge, wind, and tide, have a small or negligible influence.

We coupled factors simultaneously: waves, coastal currents and sediment transport for different regimes of wave and wind in MIKE 21. MIKE simulation model quality in this area is quite good. The integration of a number of modules gives reasonable results, consistent with the real events and measurements. So we can use this model to calculate the evolution of the coastline in the future and predict the impact of proposed protection solutions on the evolution of the coastline.

The shoreline evolution is then analysed on the coastline change and the longitudinal sediment transport. Firstly, the DSAS tool is applied to analyse the historical shoreline change. Secondly, the sediment transport capacity is estimated by using a LITPACK model.

Finally, the possibility of stabilizing the Western tombolo is discussed to give suggestions on the choice of solutions. The coupled models allow us to calculate the hydrodynamic and morphologic changes in the Western tombolo in the presence of protective constructions. We note that silting seems to be unavoidable for the stabilization of the beach. However, it is not sufficient to stop the marine erosion phenomenon. Breakwaters seem to provide an efficient protection against coastal erosion, particularly effective for the northern area. These solutions are in line with the target set for the erosion problem in tombolo in this thesis.

**Keywords**: hydrodynamics, Almanarre beach, numerical model, coupled models, evolution, coastal erosion, tombolo, beach nourishment, breakwaters.

#### Remerciements

J'ai pu mener à bien cette thèse grâce à une bourse accordée par l'état vietnamien et par Campus France. Je les en remercie sincèrement.

A l'issue de la rédaction de ce travail de recherche, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ceux et à celles qui m'ont aidé tout au long de ces années.

Je suis reconnaissant à Madame Jacqueline COURTAUD, Monsieur Jean-Jacques BLANC, et Monsieur Alain JEUDY DE GRISSAC dont les thèses ont été le point de départ de mon travail de recherche.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur Yves LACROIX et Monsieur Pierre LIARDET pour leur aide concernant les travaux de ma thèse, et Monsieur Didier Léandri pour ses conseils sur le choix du logiciel de modélisation.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Kim Dan NGUYEN et Monsieur Sylvain GUILLOU pour avoir accepté de faire partie du jury de soutenance de ma thèse en qualité de rapporteurs. Je leurs suis reconnaissant pour les précieuses contributions et les remarques justifiées qu'ils ont apportées au manuscrit initial.

Je remercie également les Professeurs Trung Viet NGUYEN et Jacques PIAZZOLA qui me font l'honneur de participer au jury de cette thèse.

Cette recherche n'aurait pu être menée à bien sans l'appui d'Aix Marseille Universités, de l'école doctorale ED184, et de l'Institut de Mathématiques de Marseille (I2M). Je remercie particulièrement Madame Sonia ASSEUM et Madame BUFFET pour leur disponibilité et leur gentillesse.

Je remercie la mairie de Hyères les Palmiers qui m'a permis d'accéder aux travaux d'étude du tombolo de Giens, de confortement du cordon dunaire de la route du sel et aux relevés bathymétriques disponibles. Je remercie plus particulièrement le maire Monsieur Jean-Pierre Giran pour l'intérêt qu'il a manifesté pour ces travaux.

Je remercie DHI pour la mise à disposition des logiciels Mike 21 et Litpack ; USGS pour l'outil DSAS.

Je remercie la DDEM, notamment Monsieur Don. Je remercie également les organismes associés pour les sources suivantes :

GIS Posidonie pour les cartes de l'herbier de posidonies ;

EOL pour les données de mesures campagne au tombolo ; Evaluation diachronique de la bathymétrie ;

EMODnet pour relevés bathymétriques ;

SHOM pour les bathymétries de Litto3D de carte de nature du fond ; REFMAR pour toutes les données de marées ;

PSMSL pour toutes les données marégraphiques d'observation ;

CEREMA et CANDHIS du CETMEF pour les données de houle aux bouées ; ANEMOC du CETMEF pour les données de houle dans la zone d'étude à partir d'un modèle TOMAWAC ;

PREVIMER de l'IFREMER pour toutes les données de houle, de courant, de niveau et de salinité au format NETCDF ;

ECMWF et NCEP /NCAR (NOAA) pour toutes les données de vent, de houle. Météo-France pour les données d'observation de vent ;

ORGIMET et INFOCLIMAT pour les données de vent de SYNOP/METAR ;

WINDGURU pour toutes les données de vent du modèle GFS 0,5°;

DDE du Var pour les documents d'aménagements littoraux ;

IGN pour les données de traits de côtes ;

Direction de l'Environnement - Conseil Général du Var pour tous les données des lignes de rivage et des surfaces en érosion ou accrétion au CRIGE-PACA.

J'exprime ma gratitude à Monsieur MEULÉ pour l'acquisition des données de houle et de courant à la Capte et son rapport d'utilisation des géotextiles à la Capte ; à Monsieur Tony Lelièvre Professeur à l'école des Ponts Paris Tech, laboratoire CERMICS pour sa conférence ; à Madame Christine CLUS-AUBY, Secrétaire-Générale de l'EUCC-France pour son atelier en 2014 à Toulon ; à Monsieur Cemal ARDIL pour sa conférence ICMBO 2015 à Rome ; à Yves et Véronique qui me louent une chambre où j'ai internet et pour leurs précieux conseils et soutient tout au long de ces trois années ; à Madame CECCOTIE où j'ai logé la première année ; à Madame LE Thi Thanh Huong pour toute son aide durant ma vie en France.

Je suis reconnaissant à Monsieur LE Kim Truyen, Professeur à l'Université des Resources en Eau. Grâce à ses connaissances, son talent et sa gentillesse, j'ai pu rédiger ma thèse de maîtrise. Il m'a donné l'amour de la géographie, des océans et des littoraux.

Je remercie Madame Marie TROPINI secrétaire et Madame Odette Favennec mon professeur de français.

Un grand merci à l'université de Toulon où j'ai pu suivre des conférences, doctoriales et au CIRM où j'ai pu suivre la conférence du CEMRACS.

Je tiens à remercier particulièrement mes parents, mon frère, ma sœur et tous les membres de ma famille restés au Vietnam et surtout ma femme et mes enfants qui ont accepté qui je vienne en France pour plusieurs années.

Toulon, le 02 Octobre 2015

#### **THAN Van Van**

# Table des matières

Résumé	2
Abstract	4
Remerciements	6
Table des matières	8
Liste des abréviations	13
Lexique	16
Glossaire	17
Liste des figures	22
Liste des photos	33
Liste des tableaux	34
Introduction générale	38
Chapitre 1. Aperçu de la recherche sur l'évolution du littoral	42
1.1. Études sur l'évolution de la zone côtière dans le monde	42
1.1.1. Contexte scientifique international	42
1.1.2. Méthodes développées d'étude de l'évolution du littoral	43
1.2. Études sur l'évolution du littoral en France	48
1.2.1. Littoral français sur l'océan Atlantique Nord	48
1.2.2. Littoral méditerranéen français	48
1.3. Études en relation avec l'évolution du tombolo	49
1.4. Rappels sur les principaux forçages météo-marins	50
1.4.1. Rappels sur la houle	50
1.4.2. Rappels sur la tempête	53
1.5. Rappels sur le transport sédimentaire	54
1.5.1. Dérive littorale des sédiments	54
1.5.2. Transport transversal des sédiments	56
1.6. Erosion du littoral	57
1.6.1. Phénomène de l'érosion du littoral	57
1.6.2. Facteurs d'érosion côtière	59
1.6.3. Mesures de protection contre l'érosion marine	63
1.7. Conclusions	64
Chapitre 2. Acquisition et traitement des données disponibles	65

2.1. Site d'étude	65
2.2. Numérisation des documents fournis par la ville de Hyères	66
2.3. Données de terrain disponibles	67
2.3.1. Acquisition	67
2.3.2. Traitement	69
2.4. Données de forçages météo-marins disponibles	73
2.4.1. Acquisition	73
2.4.2. Traitement	94
2.5. Données d'évènements exceptionnels disponibles	96
2.5.1. Coups de mer	97
2.5.2. Tempêtes	97
2.5.3. Surcotes	98
2.6. Données de natures du fond et de biocénoses disponibles	98
2.6.1. Acquisition	99
2.6.2. Traitement	102
2.7. Conclusions	103
Chapitre 3. Analyse des principaux facteurs influençant l'évolution	du
littoral	105
3.1. Caractéristiques générales du secteur d'étude	105
3.1.1. Principales caractéristiques géographiques et morphologiq	ues 105
3.1.2. Principales caractéristiques climatiques	108
3.1.3. Principales caractéristiques des cours d'eau	114
3.1.4. Principales caractéristiques hydrodynamique	115
3.1.5. Principales caractéristiques d'évènements extrêmes	144
3.1.6. Principales caractéristiques de sédiments et biocénoses	152
3.2. Principaux facteurs influençant l'évolution littorale selon des raj	pports
a étude au tombolo Ouest	153 174
2.2.2. Influence de la géomembologie	154
3.2.2. Influence de la geomorphologie	154
3.2.3. Influence du courant sagittai	155
3.2.4. Influence du courant de derive	156
3.2.5. Influence de la noule	156
3.2.6. Influence de la tempete	157
3.2.7. Influence de la montee lente du niveau marin	15/
3.2.8. Influence du vent	158
3.2.9. Influence des differentes actions de l'homme	159
3.3. LONCIUSIONS	

Chapitre 4. Etude scientifique de base pour déterminer l'évolution littoral	n du 163
4.1. Problème de l'étude de l'évolution du secteur d'intérêt	163
4.1.1. Echelle régionale	164
4.1.2. Echelle locale	164
4.2. Choix des modèles couplés	165
4.3. Description des modèles de MIKE	167
4.3.1. Modèle de vague de MIKE	167
4.3.2. Modèle hydrodynamique de MIKE	174
4.3.3. Modèle de transport sédimentaire et de morphologie	176
4.3.4. Modèle couplé MIKE21/3 FM	182
4.4. Proposition de scénarios	183
4.4.1. Conditions normales	183
4.4.2. Conditions extrêmes	184
4.5. Indices d'efficacité statistique de la performance des modèles	186
4.5.1. Modèles SW et HD	186
4.5.2. Modèles ST	187
4.6. Modélisation de propagation de la houle	188
4.6.1. Domaine	188
4.6.2. Conditions aux limites	190
4.6.3. Configuration du modèle SW	194
4.6.4. Sensibilité au maillage régional	194
4.6.5. Calibration	195
4.6.6. Validation	197
4.6.7. Résultats sur les vagues	199
4.7. Modélisation hydrodynamique	
4.7.1. Configuration et conditions aux limites	210
4.7.2. Calibration	211
4.7.3. Validation	212
4.7.4. Résultats sur le régime hydrodynamique	214
4.8. Modèle couplé MIKE21/3 FM	
4.8.1. Domaine	221
4.8.2. Conditions aux limites	222
4.8.3. Sensibilité au maillage local	223
4.8.4. Calibration	224
4.8.5. Validation	226

4.8.6. Résultats	228
4.9. Conclusions	252
Chapitre 5. Evolution du rivage du tombolo Ouest	254
5.1. Choix d'outils pour la détermination de l'évolution du rivage	254
5.2. Description de l'outil DSAS	255
5.2.1. Mouvement net du trait de côte	255
5.2.2. Méthode des points extrêmes	255
5.2.3. Régression linéaire	255
5.2.4. Régression linéaire pondérée	256
5.2.5. Enveloppe du changement du trait de côte	256
5.2.6. Moindres carrés médians	256
5.2.7. Critères de qualité de l'évaluation de l'évolution de la ligne de	e la côte
	256
5.3. Description du modèle LITPACK	257
5.4. Détermination de l'évolution de la ligne du rivage	258
5.4.1. Méthodologie	258
5.4.2. Acquisition des positions de la ligne du rivage	259
5.4.3. Incertitude des données	261
5.4.4. Determination des périodes de calcul	263
5.4.5. Configuration de DSAS	264
5.4.6. Résultats sur l'évolution du trait de côte	265
5.5. Détermination de la capacité du transit sédimentaire	276
5.5.1. Domaine	276
5.5.2. Conditions limites	277
5.5.3. Calibration	277
5.5.4. Evaluation des capacités de transport sédimentaire	278
5.6. Evaluation des facteurs d'évolution du rivage du tombolo Ouest	281
5.6.1. Quantification de l'impact des facteurs	281
5.6.2. Classification des facteurs	284
5.7. Conclusions	285
Chapitre 6. Orientation et propositions de solutions de protection o	lu
	287
6.1. Solutions douces de protection du littoral contre l'érosion marine	au 287
6.1.1. Méthodes déjà mises en œuvre	288
6.1.2. Solutions douces irréalisables	290
6.1.3. Différentes solutions douces envisageables	291

6.1.4. Proposition des types de rechargement de la plage	297
6.2. Solutions dures de protection du littoral contre l'érosion marine	au
tombolo Ouest	
6.2.1. Méthode déjà mises en œuvre	300
6.2.2. Solutions dures irréalisables	301
6.2.3. Différentes solutions dures envisageables	303
6.2.4. Proposition des types de brise-lames et épis immergés	309
6.3. Solutions combinées de protection du littoral contre l'érosion m	arine au
tombolo Ouest	
6.4. Simulation des scénarios de la protection des côtes	313
6.4.1. Domaine	313
6.4.2. Evaluation de l'efficacité des solutions envisagées	314
6.4.3. Evaluation des coûts	322
6.5. Suggestions sur le choix de la solution globale de protection du t	ombolo
Ouest	325
6.6. Conclusions	327
Chapitre 7. Enseignements et perspectives	328
7.1. Enseignements	328
7.1.1. Sur les données d'entrée	328
7.1.2. Sur la modélisation numérique	329
7.2. Perspectives	329
Bibliographie	331
Index	
Notes	349
ANNEXES	1 -

# Liste des abréviations

Abréviation	Description		
ADCP	« Acoustic Doppler Current Profiler »		
ADV	« Acoustic Doppler Velocimetry »		
ANEMOC	Atlas Numérique d'Etats de mer Océanique et Côtier		
ASCII	« American Standard Code for Information Interchange »		
AZUR	Zone d'Azur dans le modèle de PREVIMER		
BAN	Base aéronavale		
BCEOM	Bureau Central d'Etudes pour l'Outre-Mer		
BSS	« Brier Skill Score » ou le score d'habileté de Brier		
CAD	AutoCAD Map 3D ou AutoCAD Civil 3D		
CANDHIS	Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ		
CEM	Centre d'Expérimentation de la Marine nationale		
СЕР	Modèle ECMWF (aussi appelé CEP) résolution 0,5° pour les 7/10		
	prochains jours		
CEPREL	Centre d'Étude de la prospection Économique à moyen et Long termes		
CEREMA	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la		
	mobilité et l'aménagement		
CERC	« Coastal Engineering and Research Center »		
CETMEF	Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales		
CETE	Centres d'Etudes Techniques de l'Equipement		
CFL	Condition CFL (condition de Courant, Friedrichs et Lewy), connue aussi		
	sous le nom de nombre de Courant.		
CFSR	« Climate Forecast System Reanalysis »		
СМ	« Cote marine », « Cartes Marines », un niveau de référence verticale		
CMS	« Coastal Modeling System »		
CNRS	Le Centre National de la Recherche Scientifique		
DDE du Var	Direction Départementale de l'Equipement du Var		
DFS	Type de fichier au format DFS dans MIKE21		
DHI	« Danish Hydraulic Institute », société de conseil internationale		
	indépendante et Organisation de la recherche		
ECORS	Etude et Caractérisation Opérationnelle des Routes et des Sols		
ECMWF	« European Centre for Medium-range Weather Forecasts »		
EDF	Électricité De France		
EFDC_Explorer	« Environmental Fluid Dynamics Code »		
EGB	« EMODnet Gridded Bathymetry »		
EMODnet	« European Marine Observation and Data Network »		
EOL	Etude et Observation du Littoral		
ERA	ERA Project de l'ECMWF		
ERAMM	Etude Recherche Aménagement en Milieu Marin		

FM	« Flexible Mesh »
GIS	« Geographic Information System »
GLOBAL	Zone du monde dans le modèle de PREVIMER
GLOBAL05_NOC	Zone du monde 0,5 degré dans le modèle de PREVIMER
<b>GRIB VIEWER</b>	Logiciel pour visualisation fichier au format GRIB
GTOPO30	Un Modèle Numérique de Terrain gratuit disponible sur le monde entier
HD	« HydroDynamic »
IARE	Institut des Aménagements Régionaux et de l'Environnement
ICAO	« International Civil Aviation Organisation » (Code OACI de l'aérodrome)
IC	Intervalle de confiance
IDV	« Integrated Data Viewer »
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
IGN	Institut National de l'Information Géographique et Forestière
IPSEAU	Ingérop Aix-en-Provence
KML et KMZ	Extensions du fichier dans Google Earth
KNMI	« Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut » (Institut royal
	météorologique des Pays-Bas)
Lambert 93	La projection conique conforme de Lambert, est la projection liée
	au système géodésique RGF93. Elle utilise deux parallèles sécants : 44°N
	et 49°N, le méridien de référence 3°E (Méridien de Greenwich), le
	parallèle d'origine 46°30' et les coordonnées d'origine
	(700 000 m, 6 600 000 m).
Lambert III Sud	IGN France ; LAMBERT III SUD, Mètre ; source : National Geographic
	Institute of France ; ellipsoïd : CLRK-IGN [Clarke 1880, Institut
	Geographique National (France)]
Landsat	Le programme Landsat est le premier programme spatial d'observation
	de la Terre
Largade	Nom du coup de mer à Hyères : coup de Largade
LEGOS	Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale
Lisp CAD	Un code AutoLISP avec l'AutoCAD
Litto3D	Litto3D est un projet commun au SHOM et à l'IGN permettant une
	description en 3 dimensions du littoral, notamment grâce à la
	technologie Lidar
LONG/LAT	Coordonnées géographiques
MARS3D	Système de modélisation de l'Environnement Côtier
MaxSea Viewer	Logiciel de Navigation maritime
McIDAS	« Man computer Interactive Data Access System »
MED	Zone de Méditerranée dans le modèle de PREVIMER
MEDNORD	Zone de Nord Méditerranée dans le modèle de PREVIMER
METAR	« Meteorological Aerodrome Report »
MIKE21	Un programme d'ordinateur qui simule les flux d'ameublement, les
	vagues, les sédiments et l'écologie dans les rivières, les lacs, les estuaires,
	les baies, les eaux côtières et les zones en deux dimensions. Il a été
	développé par DHI Water Environment Health.
MNT	Modèle Numérique de Terrain
	Modele Numerique de Terram

NCEP	« National Centers for Environmental Prediction »		
NCO	« NetCDF Operator »		
Ncview	Un navigateur visuel pour les fichiers au format netCDF.		
NetCDF	« Network Common Data Form »		
NOAA	« National Oceanic and Atmospheric Administration »		
OACI	Organisation de l'Aviation Civile Internationale		
ODV	« Ocean Data View »		
OMM	Organisation Météorologique Mondiale		
<b>OPHIURE III</b>	Un houlographe-courantographe		
ODS	« Operational Design System »		
Panoply	Une application multiplateforme qui trace des tableaux de géo-		
	quadrillage de netCDF, HDF et des ensembles de données GRIB.		
PNEC	Programme National d'Environnement Côtier		
QUEENS	Université Queens		
PREVIMER	Le projet PREVIMER est coordonné par l'Ifremer et le SHOM.		
Provence (200 m)	Zone de Provence dans le modèle de PREVIMER		
Accord RAMOGE	Saint-Raphaël à l'Ouest, Monaco et Gènes à l'Est.		
RLR	« Revised Local Reference »		
Saga	« System for Automated Geoscientific Analyses »		
SOGREAH	Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques		
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine		
SIG	Système d'Information Géographique		
SMS	« Surface-water Modeling System »		
Surfer	Une surface et le contour de cartographie programme du Golden		
	Software Inc.		
SYNOP	Synoptique, un codage de donnée adopté par l'OMM		
SW	« Spectral Wave »		
TGZ	« Tide Gauge Zero »		
TOMAWAC	Modèle de la propagation des ondes dans les zones côtières		
UTC	Temps Universel Coordonné		
VEM	Vive-Eau Moyenne		
WCT	« NOAA's Weather and Climate Toolkit » (Viewer and Data Exporter)		
WMO	« World Meteorological Organization »		
WGS 84	Coordonnées géographiques en WGS 84		
WindGURU	Un service de prévisions météorologiques		
Worldfile	Un format de fichiers texte dont le rôle est d'associer des coordonnées à		
	des images matricielles		
XYZ	Extension d'un fichier au format XYZ		

# Lexique

Prisme littoral	Etendue au sein de laquelle se manifestent des échanges	
	sédimentaires entre les petits fonds et la plage	
Trait de côte	Limite entre le continent et la zone maritime	
Estran	Etendue comprise entre le niveau de la plus haute mer et le niveau	
	de la plus basse mer	
Accrétion	Processus d'engraissement par apport naturel de sédiments	
Fetch	Longueur caractéristique d'un plan d'eau sur lequel le vent souffle	
	créant et propageant la houle	
Angle d'incidence	Angle que fait la houle avec le trait de côte	
Réfraction	Changements de vitesse et direction dus à la propagation d'une	
	onde en milieu hétérogène à variation lente	
Diffraction	Interaction de la propagation d'une onde avec un obstacle (ex.	
	Musoir d'une digue) qui modifie les caractéristiques de l'onde en	
	arrière de l'obstacle	
Coefficient de réflexion	Coefficient qui caractérise la réflexion d'une vague sur un ouvrage	
	à la frontière du modèle hydrodynamique	
Courant moyen	Vitesse et direction du courant moyenné sur une séquence de 17	
	minutes	
Dérive littorale	Courant parallèle à la côte provoqué au niveau du déferlement	
	lorsque l'angle d'incidence est oblique	
Jet de rive	Action de propagation des vagues sur l'estran après le déferlement	
Seiche	Oscillation périodique et lente d'un plan d'eau plus ou moins fermé	
	(Golfe, bassin portuaire,) sous l'effet d'une excitation extérieure	
	(Vent, pression,)	
Surcote	Elévation du niveau moyen au-dessus du niveau théorique	
	correspondant à la pression barométrique de référence (1013,5	
	hectopascals)	
Tombolo	Un tombolo est un cordon littoral de sédiments reliant deux étendues	
	terrestres	

## Glossaire

Symbole	Unité	Description
α	0	La direction dominante des vagues (angle entre les fronts de
		vagues et la ligne de la côte)
α		Le contrôle du taux de dissipation d'énergie
α		Un coefficient sans dimension
$\alpha_{BJ}$		Un paramètre constant de calibration
$\alpha_{drag}$		Une constante
$\hat{\alpha}_{PM}$		La valeur $\hat{\pmb{lpha}}$ pour le spectre de Pierson-Moskowitz
â		La raideur globale du champ d'onde
β		La pente du fond
$\beta$ , $\beta_1$ , $\beta_2$ , et $\beta_3$		Les coefficients
$\beta_{drag}$		Une constante
γ		Le taux de croissance
γ		Le paramètre de disjoncteur
ε		Le rapport de la densité de l'air à l'eau
θ	0	La direction de propagation de la houle (La direction d'onde,
		l'angle entre la direction de propagation des ondes et l'axe des x)
θ <sub>c</sub>		Le paramètre de Shields critique
θ <sub>c,0</sub>		Le paramètre de Shields critique sur le fond plat
θ'		La contrainte de cisaillement sans dimension (paramètre de
		Shields)
$\theta_{w}$	0	La direction des vents (l'angle entre la direction du vent et la
		normale à la côte)
κ		La constante de von Karman
λ		La concentration linéaire
μ		La hauteur critique sans dimension
μ		Un « facteur de ripple »
$\mu_d$		Un coefficient de frottement dynamique
μ <sub>s</sub>		Un coefficient de frottement statique ( $\mu_s = \tan \varphi_s$ , $\varphi_s = $ angle de
		repose)
η	m	La déformation de la surface libre
ν		La tolérance prescrite
Vt	m²/s	La viscosité turbulente verticale
ξ	1 ( 0	Un facteur sans dimension
ρ <sub>w</sub>	kg/m <sup>3</sup>	La densité de l'eau (masse volumique de l'eau)
ρ <sub>0</sub>	kg/m <sup>3</sup>	La densité de référence de l'eau
Δ		La densité relative du sédiment
ρ	kg/m³	La densité du sédiment

ρ <sub>s</sub>	kg/m <sup>3</sup>	La masse volumique du sédiment
Т		La contrainte totale de cisaillement
$\tau_{bx} et \tau_{by}$	$N/m^2$	Les composantes x et y des contraintes de cisaillement du fond
$\tau_{sx}$ et $\tau_{sy}$	N/m <sup>2</sup>	Les composantes x et y des contraintes de cisaillement du vent de
		surface
$\tau_s$	N/m <sup>2</sup>	La contrainte de cisaillement du vent
τ <sub>w</sub>	N/m <sup>2</sup>	La contrainte de cisaillement induite par les vagues
$\Phi_{\rm b}$		Le transport par charriage sans dimension
$\Psi_{b1}$		Le transport par charriage sans dimension dans le sens de
фь		Le transport par charriage sans dimension perpendiculaire à la
<b>₽</b> 02		direction movenne du courant
φ	0	La latitude géographique
φ(t)	0	La direction instantanée d'écoulement
$\psi$	0	L'angle entre le courant et la direction de pente (le flux est à un
		angle $\psi$ de la $\beta$ de la pente)
Ω	rad/s	La vitesse angulaire de révolution
σ	rad/s	La fréquence angulaire relative
ω	rad/s	La fréquence angulaire, la fréquence circulaire (fréquence
		angulaire absolue)
$\Delta f$ , $\Delta f_{+}$ , et $\Delta f_{-}$		La résolution spectrale discrète à $f_r,f_{r^+}$ et $f_{r^-}$ respectivement
$\overline{\mathbf{q}}_{b}$	m³/s/m	Le transport par charriage à la profondeur moyenne
Ē		La concentration moyenne temporelle
Ī	1/s	La fréquence moyenne
k	1/m	Le vecteur de nombre d'onde
k	rad/m	Un nombre d'ondes moyen
k	rad/m	L'amplitude de nombre d'onde (Le nombre d'onde)
Ū	m/s	Le vecteur de la vitesse du courant
$\overline{U}_{b}$	m/s	La vitesse des particules à la profondeur moyenne
Ū <sub>r</sub>	m/s	La vitesse d'écoulement à la profondeur moyenne dans la direction x
ū et v	m/s	Les composantes de la vitesse à la profondeur moyenne
$\vec{v}$	m/s	Le vecteur de la vitesse de propagation d'un groupe d'onde dans
		l'espace des phases à quatre dimensions
Α	m²/s	La viscosité turbulente horizontale
Α	m <sup>2</sup>	L'aire de la surface du sédiment de particules
Α		La quantité totale de matière en suspension par unité de largeur
Α		La dimension du niveau de référence
a <sub>b</sub>		L'amplitude du mouvement orbital des vagues (le déplacement orbital au fond)
В		Un coefficient de transport par charriage sans dimension
С	$m^{1/2}/s$	Le coefficient de résistance Chézy (Chezy resistance coefficient)
C'		Une constante numérique proportionnelle à C (Chézy resistance coefficient lié aux caractéristiques géométriques de la matière du

		fond)
C' <sub>ds</sub>		Le paramètre d'ajustement
Cd		Le coefficient de traînée
C <sub>ds</sub>		Un constant
C <sub>f</sub>	m/s	Le coefficient de frottement
Cm		Le coefficient de masse hydrodynamique
С	m/s	La vitesse de la phase
Cb		La concentration de référence de fond
Cg	m/s	L'ampleur de la vitesse de groupe
c <sub>x</sub> et c <sub>y</sub>	m/s	Les composants du c <sub>g</sub> de vitesse de groupe dans les directions x et y, respectivement
Cθ	m/s	La vitesse de propagation représentant l'évolution de l'action dans la direction $\theta$
Cφ	m/s	La célérité de l'onde (ou vitesse de phase)
d	m	La profondeur de l'eau
D	m	La taille du grain des sédiments
<b>d</b> <sub>50</sub>	m	La taille médiane des sédiments (le diamètre médian des grains)
d <sub>90</sub>	m	Le diamètre des grains où 90% de la masse d'un échantillon est constituée de particules plus petites.
Е	m²/s/rad	La densité de l'énergie (La signifie l'énergie par unité de surface)
Etot	N/m	L'énergie totale du spectre d'énergie (l'énergie des vagues totale)
EXP		La fonction exponentielle
f	1/s	La fréquence
f		Le paramètre de Coriolis
f <sub>c</sub>		Le coefficient de frottement pour le courant
f <sub>w</sub>		La constante du facteur de frottement des vagues
g	m/s <sup>2</sup>	L'accélération de la pesanteur (l'accélération moyenne de la gravité sur Terre)
GPD		« Generalized Pareto Distribution » (Loi de Pareto Généralisée)
h	m	La profondeur totale de l'eau
Н	m	La hauteur de la houle (amplitude des vagues)
H <sub>m</sub>	m	La hauteur de la vague maximale
H <sub>max</sub>	m	La hauteur maximale des vagues avant le déferlement
$H_{s}\text{, }H_{1/3}\text{, }etH_{13}$	m	La hauteur significative (Hauteur moyenne des vagues qui composent le top 33% de la hauteur des vagues)
H <sub>1/100</sub>	m	La hauteur moyenne du centième des vagues les plus hautes
H <sub>1/10</sub>	m	La hauteur moyenne des vagues qui composent le top 10% (hauteur moyenne du dixième des vagues les plus hautes)
Ι		La pente littorale de la surface de l'eau
I <sub>1</sub> et I <sub>2</sub>		Les intégrales d'Einstein
<b>k</b> <sub>N</sub>	m	Constante de la taille de rugosité géométrique
L	m	La longueur d'onde
Μ		Le nombre de Manning
m		Le paramètre d'ajustement
Ν		La densité de l'action $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$

n		Le paramètre d'ajustement
NASH (E)		Le Nash-Sutcliffe coefficient d'efficacité de modèle
р		La probabilité que toutes les particules d'une couche s'orientent
pa	$N/m^2$	La pression atmosphérique (Barometric pressure)
Q		Un facteur sans dimension
Qb		La fraction de vagues déferlantes
<b>q</b> <sub>b</sub>	m³/s/m	Le transport par charriage
<b>q</b> <sub>b1</sub>	m³/s/m	Le transport par charriage dans le sens de courant moyen
$\mathbf{q}_{\mathbf{b}2}$	m³/s/m	Le transport par charriage perpendiculaire à la direction
		moyenne du courant
q <sub>s</sub>	m³/s/m	Le transport par suspension
<b>q</b> <sub>tb</sub>	m³/s/m	Le transport total des sédiments
R		Un facteur d'échelle
r	m	La rugosité du fond
R <sup>2</sup> et R <sup>2</sup> -adjR		Le coefficient de détermination (ajusté)
RMAE		L'erreur absolue relative moyenne
RMSE		« Root-Mean-Squared Error » (Racine de l'erreur quadratique
		moyenne)
S	<b>‰</b>	La salinité
S		La densité spécifique des sédiments
S	N/s/m	La dissipation de l'énergie
S		Le moment du premier ordre du profil de concentration moyenne
		par rapport au niveau du fond
S <sub>bot</sub>	N/s/m	Dissipation de l'énergie des vagues dûe au frottement de fond
S <sub>ds</sub>	N/s/m	Dissipation de l'énergie des vagues dûe au moutonnement
S <sub>in</sub>	N/s/m	Génération d'énergie par le vent
S <sub>nl</sub>	N/s/m	Transfert d'énergie des vagues dûe à l'interaction non-linéaire
		vague-vague
S <sub>surf</sub>	N/s/m	Dissipation de l'énergie des vagues dûe au déferlement de la
		vague
S <sub>yx</sub> , S <sub>xy</sub> , S <sub>yy</sub> , et	m³/s²;	Des composantes du tenseur de rayonnement
S <sub>xx</sub>	N/m	
t	S	Le temps
Т	S	La période des vagues
Т	°C	La température
T <sub>max</sub> et T <sub>p</sub>	S	La période maximale (période de pic)
T <sub>s</sub> , T <sub>1/3</sub> , et T <sub>13</sub>	S	La période significative (valeur moyenne du tiers supérieur des
		périodes)
u	m/s	La vitesse du courant
U*	m/s	La vitesse de frottement du vent
u, v, et w	m/s	Les composantes de la vitesse dans le plan x, y, et z directions
u <sub>b</sub> et U <sub>b</sub>	m/s	La vitesse des particules (la valeur efficace (rms) de la vitesse
		orbitale au fond de la vague ou l'amplitude de la vitesse
		d'oscillation induit par les vagues au fond)
U <sub>f,c</sub>	m/s	La vitesse de cisaillement lié au courant

U <sub>f</sub> , wc	m/s	La vitesse de cisaillement sous les vagues et les courants combinés
II	mla	La vitage d'écoulement oscillent près du fond
U <sub>0</sub>	111/5	La vitesse d'écoulement oscinant pres du fond
Ur	m/s	La part de la vitesse d'écoulement dans la direction x
u <sub>s</sub> et v <sub>s</sub>	m/s	La vitesse par laquelle l'eau est déchargée dans l'eau ambiante
V	m <sup>3</sup>	Le volume de la particule de sédiment
V	m/s	La vitesse du vent
V	m/s	La vitesse moyenne sur la hauteur d'eau
w		La vitesse de sédimentation des sédiments en suspension
Х		Le rapport de l'énergie totale dans le train d'onde aléatoire à
		l'énergie dans un train d'ondes avec la hauteur maximale possible
		d'onde
x, y, et z	m	Les coordonnées cartésiennes
Уc	m	Le centre de concentration
$\mathbf{Z}_{0}$	m	La rugosité de la mer
Zc	m	La hauteur critique définie comme l'élévation au-dessus du
		niveau de la mer où la vitesse du vent est exactement égale à la
		vitesse de phase
<b>Z</b> Charnock		Le paramètre Charnock
Zob	m	L'effet des vagues de gravité-capillarité (peuvent être considérées
		comme rugosité du fond)
Z <sub>ow</sub>	m	L'effet de courtes vagues de gravité
Zwind	m	La hauteur au-dessus du niveau moven de la mer

# Liste des figures

Figure 1-1 : La propagation des vagues du large jusqu'à la côte50
Figure 1-2 : La propagation de la houle dans la zone proche de la côte51
Figure 1-3 : Zone de "surf" (au sens large)52
Figure 1-4 : Systèmes ouverts et fermés transport des sédiments (U.S. Army Corps of Engineers, 2002; Albers et von Lieberman, 2011)
Figure 1-5 : Schéma des changements du profil de plage dû aux tempêtes (U.S. Army Corps of Engineers, 2002)60
Figure 2-1 : Situation de la presqu'île de Giens (A), le tombolo (B) et la plage de l'Almanarre (C) (Source : Google Earth, PlagesMed)
Figure 2-2 : (A) Bathymétrie de la zone de Toulon à Cavalaire. (B) Profil du golfe de Giens à l'Almanarre (Source : portal.emodnet-bathymetry.eu)67
Figure 2-3 : (A) Technologies de mesures des topographies et bathymétries. (B) Bathymétrie du littoral hyérois à partir des données Litto3D (Source : IGN et SHOM).68
Figure 2-4 : Surface 3D de bathymétrie du tombolo occidentale à partir des données Litto3D (A) et à partir des données d'EOL en automne 2008 (B) (Lacroix et al., 2015a). 
Figure 2-5 : Trait de côte HISTOLITT® dans la base de données maritimes et littorales de SHOM (Source : data.shom.fr)69
Figure 2-6 : Description de la visualisation des données de terrain disponibles73
Figure 2-7 : Localisation de cinq stations météorologiques : La Mitre, Cap Cépet, Le Palyvestre, Île de Porquerolles et Île du Levant (Source : www.google.com/earth)74
Figure 2-8 : Données moyennes mensuelles (en haut) et annuelles (en bas) du niveau moyen de la mer (mm) par rapport au datum « Revised Local Reference » (RLR, voir la section 2.4.2.2. p. 95) à Toulon (Source : www.psmsl.org)
Figure 2-9 : (A) Localisation de la station marégraphique CSMSE à la Capte (Source : www.google.com/earth). (B) ADCP à la position 1 en rade de Toulon (Dufresne, 2014).
Figure 2-10 : Elévation du niveau marin du chenal de navigation en position 1 : mesuré par l'ADCP (rouge), par le marégraphe (noir) et modélisé par le modèle MARS3D (bleu) (Dufresne, 2014)77
Figure 2-11 : Hauteurs et périodes des vagues levées localement par les vents dans le golfe de Giens [d'après SOGREAH (1988d), ERAMM (2001), modifié]79
Figure 2-12 : Hauteur-direction réalisée à l'aide des observations faites à partir des observations des navires (KNMI) entre 1961 et 1980 (ERAMM, 2001)79

Figure 2-13 : Fréquence des hauteurs de houle (240 à 60 degrés Nord sens des aiguilles d'une montre) au Cap Cépet de 1968 à 1979 (A) et à Porquerolles entre 1955 et 1979 (B) [d'après SOGREAH (1988d), ERAMM (2001), modifié]80
Figure 2-14 : Nombre de jours (A et B) et fréquence (C et D) des hauteurs d'agitation à l'Almanarre pendant la période de 1977 à 1980 (A et C) et au "Passe-pied" et Sud pendant la période de 1975 à 1980 (B et D) [d'après ERAMM (2001), modifié]81
Figure 2-15 : Nombre de mesures de la campagne du houlographe 08301 (Source : CANDHIS, modifié)
Figure 2-16 : Hauteur des vagues ( $H_{1/3}$ et $H_{1/100}$ ) au cap Cépet du 5 au 7 Janvier 1994 (Novel, 1995)
Figure 2-17 : (A) Positionnement du houlographe (coordonnées WGS84 : 6° 07,602' E, 43° 04,444' N) (Source : www.google.com/earth). (B) Rose des houles mesurées par OPHIURE III à la côte en Novembre 2000 (Lacroix et al., 2015a)
Figure 2-18 : Hauteur (A) et direction (B) de la houle à l'Almanarre en Novembre 2000. 
Figure 2-19 : Localisation des stations de mesure des courants de SCAPT1 à SCAPT5 (5-1 et 5-2) à la Capte
Figure 2-20 : Rose des houles à la Capte de Juillet à Décembre 2009 (Meulé, 2010)85
Figure 2-21 : (A) Positionnement du houlographe (Source : www.google.com/earth). (B) Rose des houles mesurées par OPHIURE III à la côte en Octobre 1999
Figure 2-22 : Hauteur (A) et direction (B) de la houle au Pradet en Octobre 199986
Figure 2-23 : Modèles Méditerranée (MEDNORD) avec la résolution 2' (A) (Source : www.previmer.org) et certains modèles opérationnels sur Previmer (B) (Rudy Magne et Fabrice Ardhuin, 2009)
Figure 2-24 : Points de sortie d'ANEMOC (Source : ANEMOC)
Figure 2-25 : Rose des courants moyens à l'Almanarre : (A) du 30 Octobre au 29 Novembre 2000 ; (B) du 04 au 10 Novembre 2000 (Lacroix et al., 2015a)
Figure 2-26 : Données de courant à La Capte : (A) Courants transversaux (noir) et longitudinaux (bleu). (B) Rose des courants à SCAPT4. 90
Figure 2-27 : Positions des courantomètres dans la rade de Toulon (A) et des mouillages aux exutoires du Las (orange) et de l'Eygoutier (vert) (B) (Dufresne, 2014). 
Figure 2-28 : Roses des courants à un mètre sous la surface (A et C) et à deux mètres au-dessus du fond (B et D) enregistrées aux positions 1 (A et B) l'été et aux positions 2 (C et D) l'hiver (Dufresne, 2014)91
Figure 2-29 : Roses des courants enregistrées entre Juin et Septembre 2011 (A et B) et entre Janvier et Avril 2012 (C et D), à un mètre sous la surface (A et C) et à deux mètres au-dessus du fond (B et D) (Dufresne, 2014)92
Figure 2-30 : Roses des courants de 0,50 mètre sous la surface (A) et de 1 mètre au- dessus du fond (B), près de l'exutoire du Las pour la période de Septembre 2013 à Mars 2014 (Dufresne, 2014)93

Figure 2-31 : Roses des courants de surface (A) et de fond (B), près de l'exutoire de l'Eygoutier pour la période du 30 Août 2013 au 8 Janvier 2014 (Dufresne, 2014)94
Figure 2-32 : Diagramme du datum RLR à Toulon (Source : www.psmsl.org)96
Figure 2-33 : Evolution des niveaux observés au port de Toulon entre 1982 et 1999 (ERAMM, 2001)
Figure 2-34 : (A) Zones couvertes de la cartographie des "Natures du fond". (B) Natures du fond dans le golfe de Giens (Source : data.shom.fr)
Figure 2-35 : Coupe de terrain réalisée à partir d'un sondage au milieu du tombolo ouest (Histoire de l'eau à Hyères, 2014a)
Figure 2-36 : Cartographie des biocénoses marines du tombolo of Giens (Egis Eau et Andromède Océanologie, 2010)102
Figure 3-1 : Carte marine dans le golfe de Giens (SHOM, 2014)106
Figure 3-2 : Profil de la plage de l'Almanarre à la borne B08
Figure 3-3 : Valeurs moyennes mensuelles des paramètres climatologiques (de Janvier (J) 1951 à Décembre (D) 1980) à la station BAN Hyères108
Figure 3-4 : Roses des vents à la station d'Hyères à partir des données observées SYNOP pour la période de 1999 à 2014 (A) et METAR pour la période de 2005 à 2014 (B)
Figure 3-5 : Percentiles des vitesses de vent annuel à 10 mètres à Hyères à partir des données observées : (A) SYNOP pour la période de 1999 à 2014. (B) METAR pour la période de 2005 à 2013
Figure 3-6 : Courantologie dans le golfe de Giens [d'après Jeudy De Grissac (1975), modifié]
Figure 3-7 : Courants sagittaux dans le golfe de Giens (SOGREAH, 1988d; Courtaud, 2000), modifié
Figure 3-8 : Courants de surface par vents d'Est et d'Ouest à proximité du tombolo (SOGREAH, 1988d; Paillard et al., 1993; Courtaud, 2000), modifié
Figure 3-9 : Fréquence (A) et dispersion mensuelle des niveaux marins (B) des événements extrêmes (supérieur à 0,653 mètres CM) à Toulon entre 1999 et 2014. 120
Figure 3-10 : Niveaux marins annuels à Toulon, à la Capte et au Port Ferréol121
Figure 3-11 : Evolution du niveau marin à Toulon (A) et au Port Ferréol2 (B)121
Figure 3-12 : Comparaison des niveaux marins journaliers entre les marégraphes de Toulon et de la Capte du 01 Janvier 1993 au 31 Décembre 1995
Figure 3-13 : Dispersion entre les niveaux marins à Toulon et à la Capte122
Figure 3-14 : Dispersion mensuelle des cotes marégraphiques : (A) à Toulon entre 1999 et 2014 ; (B) à la Capte pendant la période entre 1993 et 1995 [d'après Courtaud (2000), modifié]
Figure 3-15 : Dispersion entre les niveaux marins à MEDIT-2610 (A), à MEDIT-2185 (B), à Porquerolles (C) et ceux à Toulon

Figure 3-16 : Dispersion des hauteurs significatives et maximales ( $H_s$ et $H_{max}$ ) et des périodes significatives et maximales ( $T_s$ et $T_{max}$ ) des houles à Porquerolles pendant la période de 1992 à 1997 [d'après Courtaud (2000), modifié]
Figure 3-17 : Histogrammes des hauteurs (A et B) et périodes significatives (C et D) de houle au large de Porquerolles (Mesures du 14 Mai 1992 au 07 Juin 2011) (CEREMA, 2014)128
Figure 3-18 : Caractéristiques du climat des vagues en provenant d'Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ouest (de haut en bas) et son influence sur la morphodynamique du golfe de Giens
Figure 3-19 : Caractéristiques du climat des vagues en provenant d'Ouest et son influence sur la morphodynamique du golfe de Giens
Figure 3-20 : Roses des houles annuelles de 1999 (A) à 2002 (D) (de gauche à droite et de haut en bas)
Figure 3-21 : Roses des houles annuelles de 2003 (A) à 2012 (J) (de gauche à droite et de haut en bas)
Figure 3-22 : Rose des houles pour quatorze années (de 1999 à 2012) (Lacroix et al., 2015a)
Figure 3-23 : Variations saisonnières des hauteurs (A) et des énergies (B) des houles au large de Porquerolles de 1992 à 1997 [d'après Courtaud (2000), modifié]
Figure 3-24 : Comparaison des hauteurs (A) et périodes (B) de la houle calculée et mesurée sur 14 ans à Porquerolles138
Figure 3-25 : Comparaison des hauteurs (A) et périodes (B) de la houle calculée et mesurée en Janvier 2008 à Porquerolles138
Figure 3-26 : Comparaison des hauteurs (A) et périodes (B) de la houle calculée et mesurée en Juin 2008 à Porquerolles139
Figure 3-27 : Caractéristiques des clapots pour une longueur de surface libre sans obstacle de 10-15 kilomètres dans le golfe de Giens à partir des abaques de Bretschneider [d'après HYDRO M (1993), modifié]140
Figure 3-28 : Classification des coefficients de réfraction141
Figure 3-29 : Plan de houle de secteur Sud-Ouest (T = 7 secondes) : Point rouge : Kr > 1 ; Point magenta : 0,75 < Kr < 1 ; Point orange : 0,5 < Kr < 0,75 ; Point vert : 0,25 < Kr < 0,5 ; Point bleu : Kr < 0,25 [d'après Courtaud (2000), modifié]141
Figure 3-30 : Plan de houle de secteur Ouest (T = 7 secondes) [d'après SOGREAH (1988d), modifié]
Figure 3-31 : Dispersion entre la période de pic et la hauteur de la houle à l'Almanarre : (A) Limites observées non simultanées. (B) Limites observées simultanées. (C) Limites fonctionnelles non simultanées. (D) Limites fonctionnelles simultanées
Figure 3-32 : Hauteur (A) et période (B) de la houle enregistrée au large et à la côte au cours du mois de Novembre 2000 (ERAMM, 2001)144
Figure 3-33 : Dispersion des hauteurs (A) et périodes (B) de la houle à la côte (Almanarre) et de la houle au large (Porquerolles)144

Figure 3-34 : Régression linéaire entre la force moyenne du vent et la direction du vent (A) et entre la force moyenne du vent et la hauteur moyenne de la houle (B) des évènements extrêmes dont le niveau marin est supérieur à 0,653 mètres CM entre Figure 3-35 : Courbes des coups de mer entre 1992 et 1997......146 Figure 3-36 : (A) Hauteur des vagues au cap Cépet pendant la coup de « largade » du 05 Janvier 1994 à 15h UTC au 07 Janvier 1994 à 12h (Novel, 1995). (B) Evolution de la hauteur de la houle pendant la tempête du 13 Mai 1995 (CEREMA, 2014)......147 Figure 3-37 : (A) Courbes des coups de mer entre 1998 et 2012. (B) Dispersion des Figure 3-38 : (A) Graphique des tempêtes entre 1998 et 2012. (B) Dispersion des hauteurs H<sub>max</sub> et H<sub>1/3</sub> des houles pendant les tempêtes entre 1998 et 2012......149 Figure 3-39 : Comparaison des hauteurs (A, C, et E) et périodes (B, D, et F) de la houle calculée et mesurée pendant le coup de mer du 30 Novembre 2008 (A et B), la tempête du 21 Mars 2008 (C et D) et la tempête du 24 Janvier 2007 (E et F)......151 Figure 3-40 : Représentation des étages Infralittoral et Circalittoral du système littoral Figure 3-41 : Répartition des posidonies : (A) Dans le golfe de Giens (Egis Eau et Andromède Océanologie, 2011). (B) Dans la partie centrale du tombolo occidental Figure 3-42 : Zones d'érosions du littoral aux zones de départ de courants sagittaux : les indentations dans l'herbier de posidonie (A) et les trous dans les bathymétries (B) Figure 3-43 : Montée du niveau marin (Les Amis de la presqu'île de Giens, 2011; Petit Figure 3-44 : Emissaire en mer à la partie Nord du tombolo Ouest (Source : Figure 4-1 : Domaine de calcul à l'échelle régionale (A) et à l'échelle locale (B) (Lacroix Figure 4-2 : Roses des vents à 10 mètres à Hyères en 2008 à partir des données observées SYNOP (A) et METAR (B)......183 Figure 4-4 : Domaine de calcul et la bathymétrie à l'échelle régionale (A) et parties du MNT sur la côte du tombolo (B) (Lacroix et al., 2015a). Figure 4-5 : Roses des houles pendant le coup de mer d'Ouest du 11 Novembre 2007 (A) et le coup de mer de Sud-Ouest du 30 Novembre 2008 (B). ..... 192 Figure 4-6 : Roses des houles pendant la tempête d'équinoxe de printemps du 19 Mars Figure 4-7 : Roses des houles pendant la tempête d'Ouest du 13 Février 2007 (A) et la tempête de Sud-Ouest du 30 Octobre 2008 (B)......193 

Figure 4-9 : Comparaison entre les hauteurs significatives des houles mesurées et simulées à l'Almanarre en Novembre 2000. La courbe Hs(0) se compose des hauteurs significatives mesurées. Les courbes Hs(3) et Hs(6) se composent des hauteurs Figure 4-10 : Comparaison des hauteurs de la houle calculées (Courbes de Sim1 à Sim5) et mesurés (Courbe Obs) en Novembre 2000......196 Figure 4-11 : Critères statistiques (RMAE et RMSE) de la qualité des modèles SW en comparant les hauteurs des houles mesurées et simulées à l'Almanarre en Novembre Figure 4-12 : Critères statistiques (R<sup>2</sup> et NASH) de la qualité des modèles SW en comparant les hauteurs des houles mesurées et simulées à l'Almanarre en Novembre Figure 4-13 : Comparaison des hauteurs de la houle calculées et mesurées à la station Figure 4-14 : Comparaison des hauteurs de la houle calculées et mesurées au Pradet en Figure 4-15 : Comparaison des hauteurs de la houle calculées et mesurées au Pradet en Figure 4-16 : Qualité de la performance (RMAE et RMSE) durant la validation des modèles SW (La valeur de l'ID correspond à celle dans le tableau 4-8, p. 197)......198 Figure 4-17 : Qualité de la performance (R<sup>2</sup> et NASH) durant la validation des modèles Figure 4-18 : Hauteur moyenne (A et B) et période de pic (C et D) des vagues d'Ouest Figure 4-19 : Hauteur moyenne (A et B) et période de pic (C et D) des vagues d'Ouest annuelles sous l'action des vents de Nord-Ouest (A et C) et de Sud-Ouest (B et D) ..... 202 Figure 4-20 : Hauteur moyenne (A) et la période de pic (B) des vagues d'Ouest Figure 4-23 : Hauteur moyenne (A et B) et période de pic (C et D) des vagues Figure 4-24 : Hauteur moyenne (A et B) et période de pic (C et D) des vagues estivales Figure 4-25 : Magnitude des hauteurs de houle significatives (A) et courbes des Figure 4-26 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant la tempête Figure 4-27 : Hauteur moyenne (A) et la période de pic (B) des vagues en cas de Figure 4-28 : (A) Rose des houles simulées à l'Almanarre en 2008. (B) Rose des houles simulées à l'Almanarre (au Point 2) durant 35 ans de 1979 à 2014. (C) Les points

extraits de 5 mètres de profondeur le long du tombolo occidental (du Point 1 au Point 8)209
Figure 4-29 : Comparaison des niveaux marins simulés (courbes Sim1-4) et observés (courbe Obs) à Toulon pendant la période du 05 au 06 Novembre 2000
Figure 4-30 : Qualité de la performance durant la calibration des modèles HD : (A)RMAE et RMSE. (B) R² et NASH
Figure 4-31 : Indices d'efficacité statistiques des modèles HD durant le processus de validation tels que RMAE et RMSE (La valeur de l'ID correspond à celle dans le tableau 4-17, p. 213)
Figure 4-32 : Indices d'efficacité statistiques des modèles HD durant le processus de validation tels que R <sup>2</sup> et NASH (La valeur de l'ID correspond à celle dans le tableau 4-17, p. 213)
Figure 4-33 : Niveau marin maximal (A et B) et moyen (C et D) dans le cas de la houle d'Ouest sous l'action des vents d'Ouest (A et C) et d'Est (B et D)
Figure 4-34 : Magnitude des courants maximaux (A et B) et moyens (C et D) annuels dans le cas de la houle d'Ouest sous l'action des vents d'Ouest (A et C) et d'Est (B et D). 215
Figure 4-35 : Direction des courants moyens annuels dans le cas de la houle d'Ouest sous l'action des vents d'Ouest (A) et d'Est (B)
Figure 4-36 : Niveau marin maximal (A) et moyen (B) en cas de houle de Sud-Ouest. 
Figure 4-37 : Magnitude des courants maximaux (A) et moyens (B) annuels en cas de houle de Sud-Ouest
Figure 4-38 : Direction des courants annuels en cas de houle de Sud-Ouest
Figure 4-39 : Niveaux marins saisonniers en cas de vagues d'Ouest hivernale (A), vagues d'Ouest estivale (B), vagues de Sud-Ouest hivernale (C) et vagues de Sud-Ouest estivale (D)
Figure 4-40 : Niveau et vitesse des courants saisonniers en cas de vagues d'Ouest hivernale (A), vagues d'Ouest estivale (B), vagues de Sud-Ouest hivernale (C) et vagues de Sud-Ouest estivale (D)
Figure 4-41 : Magnitude des courants saisonniers en cas de vagues d'Ouest hivernale (A), vagues d'Ouest estivale (B), vagues de Sud-Ouest hivernale (C) et vagues de Sud-Ouest estivale (D)
Figure 4-42 : Direction des courants en cas de vagues d'Ouest hivernal (A), vagues d'Ouest estival (B), vagues de Sud-Ouest hivernal (C) et vagues de Sud-Ouest estival (D)
Figure 4-43 : Courants et niveaux de la mer pendant la tempête annuelle
Figure 4-44 : Cellules hydrosédimentaires (A) et maillage calculé (B) pour la zone d'étude (Lacroix et al., 2015a,b)

l'Almanarre en Novembre 2000. La courbe Hs(0) représente les hauteurs significatives

mesurées. La courbe Hs(4) expose les hauteurs significatives simulées en utilisant le maillage 4
Figure 4-46 : Différentes zones de rugosité de Manning dans la zone de modélisation avec posidonie (A) et sans posidonie (B) (Lacroix et al., 2015a)224
Figure 4-47 : Différentes zones de rugosité de Nikuradse dans la zone de modélisation avec posidonie (A) et sans posidonie (B) (Lacroix et al., 2015a)
Figure 4-48 : Différentes zones de taille de grain moyen $(d_{50})$ dans la zone de modélisation226
Figure 4-49 : Valeur du BSS de la calibration et de la validation
Figure 4-50 : Evolution des bathymétries mesurées par EOL - dans le polygone de B03 à B43 (A) et prédites par MIKE21/3 FM (B)227
Figure 4-51 : Hauteur médiane de la houle estivale (A) et hivernale (B)
Figure 4-52 : Période de pic de la houle estivale (A) et hivernale (B)
Figure 4-53 : Localisation des points d'extraction des climats de houle à la côte à -1 mètre (de E01 à E12) et -3 mètres (du Point 1 au Point 8) (Lacroix et al., 2015b)238
Figure 4-54 : Densité de l'énergie des houles à la borne B08 dans le scénario annuel : (A) Spectre de variance. (B) Spectre directionnel de variance
Figure 4-55 : Magnitude du niveau marin moyen estival (A) et hivernal (B)240
Figure 4-56 : Magnitude du courant moyen estival (A) et hivernal (B)
Figure 4-57 : Vitesse de changements bathymétriques en été (A) et en hiver (B)242
Figure 4-58 : Vitesse de changements bathymétriques annuelle
Figure 4-59 : Transport sédimentaire total en été (A) et en hiver (B)243
Figure 4-60 : Transport sédimentaire total annuel244
Figure 4-61 : Changements des bathymétries à la borne B08
Figure 4-62 : Evolutions annuelles des bathymétries à la borne B08
Figure 4-63 : Densité de l'énergie des vagues à la borne B08 pendant tempête de Sud- Ouest : (A) Spectre de variance. (B) Spectre directionnel de variance (Lacroix et al., 2015b)
Figure 4-64 : Niveau marin (A), vitesse du courant (B) et hauteur de la houle (C) pendant la tempête du 24 Janvier 2007249
Figure 4-65 : Vitesse de changements bathymétriques en mètre par jour (A) et transport sédimentaire total en mètre cube par seconde par mètre linéaire (B) pendant la tempête d'Ouest du 24 Janvier 2007 (Lacroix et al., 2015b)
Figure 4-66 : Changements des bathymétries à la borne B08 (Lacroix et al., 2015b). 252
Figure 4-67 : Evolution des bathymétries à la borne B08 (Lacroix et al., 2015b)252
Figure 5-1 : Méthodologie pour l'analyse des changements du trait de côte259
Figure 5-2 : Photographies aériennes pour le tombolo en 1971
Figure 5-3 : Profil saisonnier de la plage aux bornes B08 (A) et B11 (B) du tombolo occidental dans les observations saisonnières différentes de 2002 à 2003 (Serantoni et Lizaud, 2000-2010)

Figure 5-4 : (A) La position du trait de côte à différentes années (1920-2012). (B) Les transects générés le long de la côte et leurs positions relatives aux bornes terrestres.

Figure 5-10 : Profil de la plage à la borne B08......277

Figure 6-1 : Procédé Ecoplage© (Source : www.geodunes.fr)
Figure 6-2 : Rechargement sans ouvrage de pied : La Croissette à Cannes (Source : R.Bonnefille)
Figure 6-3 : Rechargement avec butées de pied : Port Canto à Cannes (Source : R.Bonnefille)
Figure 6-4 : Plage « suspendue » (Source : R.Bonnefille)
Figure 6-5 : Epi (A) et brise-lames (B) en géotextile pour la protection de la plage (Source : ACE Geosynthetics)295
Figure 6-6 : Evolution des bathymétries du rechargement sans ouvrages de B07 à B11 (Lacroix et al., 2015b)
Figure 6-7 : Evolution des bathymétries du rechargement sans ouvrages dans la zone de Nord à central du tombolo (Lacroix et al., 2015b)
Figure 6-8 : Evolution des bathymétries du rechargement avec ouvrages : (A et B) Alternative 3 - Rechargement avec une butée de pied.(C et D) Alternative 4 - Rechargement avec une butée de pied et un épi. (E) Alternative 5 - Rechargement avec 3 butées de pied. (F) Alternative 6 - Rechargement avec 3 butées de pied et 3 épis299
Figure 6-9 : Plage protégée par un ouvrage continu : île Canaries - Plage à marée (Source : R.Bonnefille)
Figure 6-10 : Digues partielles fixes : (A) Paroi oscillante. (B) Mur d'eau fixe (Source : wikhydro.developpement-durable.gouv.fr)
Figure 6-11 : Schéma simple du dos de chameau (Lajoie, 2008)
Figure 6-12 : Acripel dispositif d'atténuation de la houle et de protection du littoral : (A) Immergés partiellement. (B) Immergés totalement (Guevel et al., 1994)
Figure 6-13 : (A) Système ASB (Bougis et Degaie). (B) Atténuateur ASB-3000-12 au port de Nuisement : sortie d'usine Degaie à Pont/Sambre (Beynet et al., 2004)
Figure 6-14 : Champs de récifs artificiels (Source : Cépralmar)
Figure 6-15 : (A) Plage protégée par un ouvrage discontinu (brise-lames) en Camargue. (B) Un système d'épis en enrochement, perpendiculaires à la côte en Camargue (Source : Google Earth)
Figure 6-16 : Une proposition de protection de la plage de l'Almanarre [d'après Blanc (1973), modifié]
Figure 6-17 : (A) Alternative 7 avec 1 brise-lames immergé et 2 épis immergés. (B) Alternative 8 avec 5 brise-lames. (C) Alternative 9 avec 5 brise-lames + 3 épis (Lacroix et al., 2015b)
Figure 6-18 : (A) Alternative 10 avec 10 brise-lames. (B) Alternative 11 avec 10 brise- lames + 3 épis (Lacroix et al., 2015b)
Figure 6-19 : Maillage calculé pour le tombolo Ouest
Figure 6-20 : Evolution du volume pour chaque solution dans la condition annuelle (A) et tempétueuse (B) (Lacroix et al., 2015b)315

Figure 6-21 : Evolution du profil B08 des alternatives de 0 à 6 (A) et de 7 à 14 (B) après 8 jours dans la condition annuelle (Lacroix et al., 2015b)
Figure 6-22 : Evolution du profil B08 des alternatives de 0 à 6 (A) et de 7 à 14 (B) pendant la tempête (Lacroix et al., 2015b)
Figure 6-23 : Transports sédimentaires pour chaque solution dans la condition annuelle (A) et tempétueuse (B) (Lacroix et al., 2015b)
Figure 6-24 : Transport sédimentaire en mètres cube par an par mètre linéaire des alternatives de 0 à 6 (A) et de 7 à 14 (B) dans la condition annuelle (Lacroix et al., 2015b)
Figure 6-25 : Transport sédimentaire en mètres cube par an par mètre linéaire des alternatives de 0 à 6 (A) et de 7 à 14 (B) dans la condition tempétueuse (Lacroix et al., 2015b)
Figure 6-26 : Distribution d'énergie des houles dans la condition annuelle (A) et tempétueuse (B) (Lacroix et al., 2015b)
Figure 6-27 : Distribution d'énergie des houles de la zone Nord dans la condition annuelle (A) et tempétueuse (B) (Lacroix et al., 2015b)

## Liste des photos

## Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Evaluation des caractéristiques de la houle au large à partir des fetchs(ERAMM, 2001)
Tableau 2-2 : Corrélogramme $H_{m0}/T_p$ à la campagne 08301 – Porquerolles (042°58,000' N, 006°12,290' E), 90 mètres de profondeur dans la condition annuelle (Source : CANDHIS)83
Tableau 2-3 : Synthèse des mouillages des courantomètres (Dufresne, 2014)90
Tableau 2-4 : Paramètres statistiques des mesures de courant (Dufresne, 2014)93
Tableau 2-5 : Paramètres des houles au large à Porquerolles pendant les coups de merentre 1992 et 2012
Tableau 2-6 : Liste des tempêtes dans le golfe de Giens entre 1995 et 2008 (ERAMM, 2001; CEREMA, 2014; Lacroix et al., 2015a)97
Tableau 3-1 : Pente du littoral occidental de Giens (en pourcentage)107
Tableau 3-2 : Pluie journalière décennale (Courtaud, 2000)
Tableau 3-3 : Données statistiques sur le vent à 10 mètres à partir des données SYNOP pour 14 ans à Hyères
Tableau 3-4 : Données statistiques sur le vent annuel à 10 mètres à Hyères pour lapériode 1999 à 2014111
Tableau 3-5 : Données statistiques sur les vents estival et hivernal à 10 mètres à Hyères à partir des données observées SYNOP pour la période 1999 à 2014
Tableau 3-6 : Statistiques sur les variations des niveaux de la mer à Toulon
Tableau 3-7 : Dispersion entre les niveaux marins à Porquerolles, à MEDIT-2610, à MEDIT-2185 et ceux à Toulon
Tableau 3-8 : Hauteurs significatives et périodes significatives (Courtaud, 2000) 126
Tableau 3-9 : Distance des fetchs (Courtaud, 2000).
Tableau 3-10 : Effet de la hauteur et la direction de la houle sur la morphodynamique du tombolo (Porquerolles 08301) (calculé par notre script Matlab : waveStat.m)130
Tableau 3-11 : Comparaison statistique de houle entre 14 ans d'observation, année2000, année 2007 et année 2008.134
Tableau 3-12 : Statistique des houles dans de golfe de Giens (Porquerolles 08301) pendant 14 ans (calculé par notre script Matlab : waveStat.m, Annexe B, p 9 -)136
Tableau 3-13 : Effet de la hauteur et de la direction de la houle estivale sur la morphodynamique du tombolo (Porquerolles 08301) (calculé par notre script Matlab : waveStat.m, Annexe B, p 9 -)

Tableau 3-14 : Effet de la hauteur et de la direction de la houle hivernale sur la morphodynamique du tombolo (Porquerolles 08301) (calculé par notre script Matlab : waveStat.m, Annexe B, p 9 -)
Tableau 3-15 : Dispersion des hauteurs et des périodes de la houle calculée et mesurée.
Tableau 3-16 : Données climatologiques du 05 au 06 Janvier 1994 à la station Hyères – Le Palyvestre (Association Infoclimat, 2014)147
Tableau 3-17 : Caractéristiques des houles de tempête à partir de la bouée de la DCN.
Tableau 3-18 : Caractéristiques des houles au pic de tempête (CEREMA, 2014)
Tableau 3-19 : Données climatologiques du 13 Mai 1995 à la station Hyères – Le Palyvestre (Association Infoclimat, 2014)
Tableau 3-20 : Périodes de retour des hauteurs significatives maximales des vagues $H_{1/3max}$ (ERAMM, 2001)150
Tableau 3-21 : Périodes de retour des hauteurs de houle significatives (CEREMA,2014)150
Tableau 3-22 : Dispersion des hauteurs et des périodes de la houle calculée et mesurée.       152
Tableau 4-1 : Estimation des niveaux marins et hauteurs des houles extrêmes
Tableau 4-2 : Tableau récapitulatif des scénarios statistique et réel
Tableau 4-3 : Indicateurs de la qualité du modèle numérique [d'après van Rijn et al. (2003), modifié]
Tableau 4-4 : Configuration pour le scénario annuel
Tableau 4-5 : Configuration pour le scénario estival191
Tableau 4-6 : Configuration pour le scénario hivernal
Tableau 4-7 : Paramètres statistiques de la qualité des modèles en comparant les hauteurs des houles mesurées et simulées à l'Almanarre et au point MEDIT-2506195
Tableau 4-8 : Présentation de la validation du modèle
Tableau 4-9 : Influence de la variation du niveau de la mer sur les paramètres de la houle et sur le tenseur de rayonnement à l'Almanarre en cas de houle annuelle de Sud- Ouest au large
Tableau 4-10 : Influence de la direction des vents faibles sur la houle d'Ouest annuelle à l'Almanarre
Tableau 4-11 : Coefficient de transmission de la houle annuelle à l'Almanarre
Tableau 4-12 : Composantes du tenseur de rayonnement de la houle annuelle à l'Almanarre en cas de régimes d'Ouest et de Sud-Ouest des houles
Tableau 4-13 : Coefficient de transmission de la houle saisonnière à l'Almanarre205
Tableau 4-14 : Composantes du tenseur de rayonnement de la houle saisonnière à l'Almanarre en fonction des régimes d'Ouest et de Sud-Ouest des houles

Tableau 4-15 : Paramètres de la houle et coefficient de transmission des hauteurs et des périodes de la houle en cas d'événements extrême à partir du modèle SW
Tableau 4-16 : Composantes du tenseur de radiation maximal de la houle en casd'événements extrêmes à partir du modèle SW.208
Tableau 4-17 : Validation du modèle213
Tableau 4-18 : Niveaux marins et courants maximaux dans la zone du Nord du tombolo à partir du modèle HD
Tableau 4-19 : Indices d'efficacité statistiques du modèle en comparant les hauteurs mesurées et prédites des houles à l'Almanarre
Tableau 4-20 : Variables de la houle et tenseur de radiation à l'Almanarre en comptant la variation du niveau de la mer ou pas
Tableau 4-21 : Niveau marin et courant à l'Almanarre en intégrant la houle d'Ouest ou pas
Tableau 4-22 : Influence du vent sur le niveau marin et sur le courant
Tableau 4-23 : Influence du vent sur la houle
Tableau 4-24 : Influence du vent sur la morphologie
Tableau 4-25 : Influence du vent sur l'hydrodynamique sédimentaire dans la zone B.
Tableau 4-26 : Influence de la houle au large sur le niveau marin et courant
Tableau 4-27 : Influence de la houle au large sur la houle à la côte
Tableau 4-28 : Influence de la houle au large sur la morphologie
Tableau 4-29 : Influence des posidonies sur le niveau marin et courant
Tableau 4-30 : Influence des posidonies sur la houle à la côte
Tableau 4-31 : Influence des posidonies sur la morphologie
Tableau 4-32 : Etat de mer saisonnier et annuel au tombolo occidental
Tableau 4-33 : Spectre des houles décrit par la densité de l'énergie maximale des houles à la côte, la fréquence et la période de pic des houles à 1 mètre d'isobathes dans le scénario annuel (scénarios 1-2)
Tableau4-34 : Composantes du tenseur de radiation de la houle annuelle etsaisonnière à la profondeur de 4 mètres à l'Almanarre.239
Tableau 4-35 : Niveau marin et courant saisonniers et annuels au tombolo occidental.
Tableau 4-36 : Transport de sable et évolution du tombolo occidental
Tableau 4-37 : Hauteur, période et direction des houles en scénarios extrêmes
Tableau 4-38 : Spectre des houles décrite par la densité de l'énergie maximale des houles à la côte, la fréquence et la période de pic des houles à 1 mètre d'isobathes dans les scénarios extrêmes (Lacroix et al., 2015b)
Tableau 4-39 : Composantes du tenseur de radiation de la houle à l'Almanarre en cas de houles d'Ouest et de Sud-Ouest
Tableau 4-40 : Niveau marin et le courant en scénarios extrêmes
Tableau 4-41 : Transport de sable et évolution du tombolo Ouest
--
Tableau 5-1 : Photographies aériennes au tombolo de Giens à partir des organismes publics et privés (Courtaud, 2000)260
Tableau 5-2 : Incertitudes sur les lignes historiques du rivage de 1920 à 1998263
Tableau 5-3 : Tendances de changement de la ligne du rivage pour la zone A (Zone Nord) du tombolo occidental (les valeurs négatives et positives indiquent l'érosion et l'accrétion, respectivement)
Tableau 5-4 : Tendances de changement de la ligne du rivage pour la zone B (Zone Nord-central) du tombolo occidental270
Tableau 5-5 : Tendances de changement de la ligne du rivage pour la zone C (Zone Central) du tombolo occidental271
Tableau 5-6 : Tendances de changement de la ligne du rivage pour la zone D (Zone Sud) du tombolo occidental272
Tableau 5-7 : Prévisions des mouvements de la ligne de la côte occidentale au tombolo
Tableau 5-8 : Facteurs d'évolution du littoral occidental
Tableau 6-1 : Récapitulatif des travaux de confortement du cordon dunaire en partie Nord de la route du Sel (Source : Ville d'Hyères - Service Eau Littoral Properté, 2013). 
Tableau 6-2 : Scénario du rechargement sans ouvrages
Tableau 6-3 : Scénarios de rechargement avec ouvrages
Tableau 6-4 : Caractériques des scénarios de solution dure
Tableau 6-5 : Tableau récapitulatif des différents scénarios (Lacroix et al., 2015b)313
Tableau 6-6 : Les changements de volume (V) pour chaque solution
Tableau 6-7 : Transports sédimentaires (Q) pour chaque solution
Tableau 6-8 : Coefficient de dissipation dans les conditions annuelle et tempétueuse(Lacroix et al., 2015b)
Tableau 6-9 : Coûts d'installation et d'entretien (Méditerranée, 2006)
Tableau 6-10 : Coût des différentes solutions envisages (Lacroix et al., 2015b)
Tableau 6-11 : Critères pour choisir la solution de protection du tombolo Ouest(Lacroix et al., 2015b)
Tableau 6-12 : Comparaison des solutions de protection du tombolo Ouest (Lacroix et al., 2015b).   326

## **Introduction générale**

L'érosion marine est devenue un phénomène naturel important en France en particulier et dans le monde entier en général.

Environ 24,2% (soit 1 723 kilomètres) des côtes métropolitaines recule à cause de l'avancée de la mer. Au contraire, près de 10% (soit 678 kilomètres) des rivages avance vers la mer, particulièrement par sédimentation des argiles et limons (IFEN, 2007). Plusieurs zones littorales (environ 43,7%, soit 3115 kilomètres) sont stables (IFEN, 2007).

Environ 17,5% (soit 175 kilomètres sur un total de 718,8 kilomètres du littoral naturel) du littoral naturel total de Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) est touché par l'érosion côtière (ce résultat est calculé à partir des données <u>EUROSION</u> de 2004).

Le tombolo de Giens (tombolo) est situé sur la commune d'Hyères (Var). C'est un double tombolo. Ses coordonnées géographiques sont de 43,039615°N à 43,081654°N et de 6,125244°E à 6,156763°E. Il se situe sur la côte méditerranéenne française dans la partie Sud de la région PACA, entre le golfe de Giens et la rade d'Hyères. Ce double tombolo est constitué de deux branches occidentale et orientale (tombolo Ouest/occidental et Est/oriental). Elles sont presque parallèles à la direction Nord-Sud, reliant la presqu'île de Giens au continent. Cette presqu'île se situe sur le point Sud de la plage de l'Almanarre à Hyères. Cette plage se trouve sur le tombolo Ouest, longue de près de 4 kilomètres, le long de la route du Sel, et est constituée de sable et de petits galets.

Actuellement, l'équilibre du tombolo est menacé par des phénomènes d'érosion marine. Pour le tombolo, le manque de gestion globale des risques littoraux est un problème majeur (Courtaud, 2000).

Jusqu'à maintenant, la compréhension du régime hydrodynamique et du transport des sédiments dans le golfe de Giens est incomplète. Nous avons constaté qu'aucune recherche n'a été proposée relativement aux points suivants :

- la modélisation par couplage de l'hydrodynamique et du transport sédimentaire pour le tombolo Ouest ;
- la construction de modèles prévisionnels pour le recul du trait de côte du tombolo occidental ;
- la proposition de solutions globales efficaces pour protéger et stabiliser la branche occidentale contre l'érosion côtière.

De plus, la Ville de Hyères n'a pas réussi à mettre en place une solution efficace tant sur le plan technique qu'économique pour défendre la plage de l'Almanarre contre l'érosion marine et assurer la stabilité du rivage de cette plage.

Ainsi, il nous est apparu nécessaire de répondre aux différents points listés précédemment, afin de faire progresser la problématique de l'érosion côtière à l'Almanarre, vers une solution acceptable, tant techniquement, environnementalement, qu'économiquement. C'est là la problématique générale abordée dans cette thèse.

Notre travail poursuit et développe les études préexistantes sur la protection de la partie Nord du tombolo Ouest, études dûes à des cabinets d'ingénierie (commandes d'acteurs locaux) (SOGREAH, 1988a,b,c,d; ERAMM, 2000, 2001), à des associations (subventions) (DDE et CETE, 1992; Serantoni et Gutierrez, 1997; Serantoni et Lizaud, 2000-2010, 2006) ou des laboratoires de recherche publics (Blanc, 1956; Jeudy De Grissac, 1975; Courtaud, 2000).

Bien entendu, l'élaboration d'une solution définitive est difficile, ou alors représente un travail d'une ampleur qui dépasse celui accessible dans le simple cadre d'une thèse. Par contre, notre position a été de développer un outil intermédiaire, destiné à la communauté des acteurs impliqués dans la problématique, et évolutif.

Cet outil consiste en la mise en place d'une simulation numérique des phénomènes en jeux sur le site de l'Almanarre, l'outil numérique étant soigneusement calibré à partir des données géo-morpho-hydrodynamiques disponibles au sein des études préexistantes.

Pour sa mise en place, il nous a fallu, après avoir collecté toutes les études et mesures disponibles, sélectionner un outil numérique existant et reconnu par la collectivité scientifique comme performant pour la simulation de l'érosion côtière. Ensuite, nous avons dû numériser les données disponibles, formater l'outil numérique au cas particulier de la zone d'étude, puis enfin calibrer cet outil au regard des évolutions constatées.

Nous avons ensuite utilisé cet outil pour examiner quelques cas simples de constructions visant à la protection littorale. Notre souci a été constant de préserver le caractère réutilisable de l'outil. La thèse que nous présentons est constituée du présent manuscrit ainsi que d'une implémentation de notre modèle pour la zone d'étude dans le logiciel MIKE 21.

L'objectif de cette thèse est la détermination des causes du phénomène d'érosion côtière, et la production de propositions d'orientation pour la protection de la plage de l'Almanarre. Pour atteindre cet objectif, nous avons cherché à répondre aux questions suivantes :

(1) clarification des caractéristiques générales en site d'étude qui influencent l'évolution du littoral ;

(2) détermination des causes du phénomène d'érosion marine ;

(3) réalisation d'un modèle couplé en hydro-sédimentologique ;

(4) propositions d'orientation, évaluation, et sélection des solutions pour la protection de la plage. Nous les présentons dans les chapitres à suivre.

Dans le premier chapitre, nous travaillons sur l'aperçu de la recherche sur l'évolution du littoral : cas général et études préalables sur le site de l'Almanarre. Ce chapitre présentera les notions fondamentales, l'état de l'art des recherches côtières dans le monde, en France et du littoral du tombolo.

Dans le second chapitre, nous proposons l'acquisition et le traitement des données disponibles. Le second chapitre collecte des données de terrain, des forçages météomarins (vent, marée, courant, et houle, etc. ...), des évènements exceptionnels (coup de mer, tempête, et surcote, etc. ...), des natures du fond, et des biocénoses. Nous présentons dans ce chapitre les sources et les traitements numériques des données disponibles.

Puis le troisième chapitre propose l'analyse des principaux facteurs influençant l'évolution du littoral. Les facteurs hydrodynamiques sont les principaux facteurs influençant l'évolution du tombolo Ouest : marée, vagues, courant et transport sédimentaire. Le troisième chapitre se concentre sur l'analyse des facteurs principaux et l'évaluation de leur impact pour l'évolution du tombolo Ouest. Nous présentons dans ce chapitre les analyses des données disponibles.

Puis le quatrième chapitre fera l'étude de base scientifique pour déterminer l'évolution du littoral sur le site de l'Almanarre, de façon numérique. Il fera l'analyse du choix de modèle mathématique pour l'application au cas du tombolo, et décrira la création de bases de données disponibles qui seront utilisées dans le modèle. Certains modules du logiciel MIKE 21 sont choisis et appliqués à l'étude des processus hydrodynamiques concernant l'évolution du tombolo. Nous calibrerons et validerons le modèle dans le secteur d'étude, à l'aide des mesures disponibles identifiées. Ceci nous permettra de choisir les paramètres du modèle convenant au site d'étude du tombolo Ouest.

Ensuite, dans le cinquième chapitre, l'évolution du rivage est décrite par le déplacement de la ligne de côte et la dérive littorale des sédiments afin d'évaluer les facteurs d'évolution du rivage du tombolo Ouest. Premièrement, l'outil DSAS est appliqué afin d'analyser la modification historique du trait de côte. Ensuite, la capacité du transit sédimentaire est estimée en utilisant le modèle LITPACK. Enfin, nous faisons une classification des agents de changement des côtes de la branche occidentale.

Ensuite, dans le sixième chapitre, le modèle étant élaboré et calibré aux précédents chapitres, nous entreprenons de proposer quelques orientations et propositions de solutions pour la protection du littoral sur le site de l'Almanarre. Puis nous évaluons l'efficacité de chaque scénario pour la protection de la plage de l'Almanarre. Ce chapitre proposera enfin l'analyse globale pour trouver des solutions efficaces techniquement et économiquement. Il s'agit aussi ici de faire la preuve de la disponibilité de l'outil numérique que nous avons mis en place pour l'élaboration de différents scénarios d'intervention.

Enfin, le septième et dernier chapitre regroupe les conclusions et recommandations qui découlent naturellement des études qui le précèdent. Ce chapitre rappellera les problèmes existants, et les orientations d'études pour l'avenir.

# Chapitre 1. Aperçu de la recherche sur l'évolution du littoral

Le littoral a fait l'objet de nombreuses études sur son évolution. Les méthodes dans la recherche sur l'évolution du littoral sont variées. Les modèles numériques sont largement appliqués pour l'évaluation de cette évolution. L'érosion côtière est de plus en plus importante dans plusieurs pays à travers le monde. Elle est causée par des facteurs naturels et des influences anthropiques.

Ce chapitre a pour but de présenter un aperçu de la recherche sur l'évolution géomorphologique du littoral à trois échelles : dans le monde entier, en France, et au tombolo de Giens. Les bases des notions fondamentales sur la météo marine, l'hydrodynamique, et le transport sédimentaire sont rappelées. Les facteurs d'érosion côtière sont présentés. Ce chapitre introduira les techniques du génie côtier pour lutter contre l'érosion marine.

## 1.1. Études sur l'évolution de la zone côtière dans le monde

Nous allons d'abord présenter le contexte scientifique international dans lequel apparaîssent les travaux sur l'évolution morphologique. Puis nous passerons aux méthodes développées pour rechercher l'évolution du littoral.

## 1.1.1. Contexte scientifique international

Les recherches sur le littoral ont une longue histoire remontant à plus de 3 000 ans avant JC, dans le cadre de la construction d'installations portuaires pour le commerce. Pour ces travaux anciens nous ne pouvons pas à proprement parler de la notion d'étude de l'évolution de la bande côtière. Cependant ils ont contribué à fonder les principes de la discipline (Pham, 2012).

Au début du XX<sup>ème</sup> siècle, des études sur la construction de protections du littoral et sur les travaux de dragage sont apparues. Ces études ont jeté les bases théoriques, la méthodologie, et les principes généraux d'évolution du littoral à partir des données mesurées des caractéristiques du courant, de la houle et de la morphologie (Pham, 2012).

L'évolution du littoral a fait l'objet d'un grand nombre de travaux réalisés dans le

monde entier. Tout d'abord, les travaux reposant sur les données d'observation réalisés par Hom-ma et Sonu (1962) ont porté sur l'évolution tridimensionnelle des plages sableuses japonaises (Gouriou, 2007). Puis, Sonu (1973) a poursuivi ses travaux, en se basant sur l'observation de plages en Floride. Il a proposé une séquence tridimensionnelle d'évolution de plage (Gouriou, 2007).

A partir des années quatre-vingt, certains littoraux ont fait l'objet de suivis intensifs, par exemple, les plages microtidales des Etats-Unis, les plages mésotidales des Pays Bas, et les plages macrotidales d'Australie, etc. ... Des sites d'observation de la dynamique sédimentaire des plages sableuses ont réalisés, tels que le site d'Egmond et Terschelling aux Pays Bas, le site de Duck en Caroline du Nord aux Etats-Unis (Dehouck, 2006).

Concernant l'étude des hauts fonds et bancs de sable d'avant plage, les barres d'avant-plage se sont souvent retrouvées sur les plages sableuses microtidales (King et Williams, 1949; Short, 1991; Certain, 2002; Tessier et al., 2003; Brunel, 2013).

Certains auteurs ont étudié l'évolution des barres des plages mésotidales néerlandaises, tels Kroon (1994), Wijnberg (1995), et Wolf (1997). Deux types de barre sont distingués, tels que la barre interne (développée dans la zone intertidale) et la barre externe (développée à la limite de basse mer ou en zone subtidale) (Wijnberg et Kroon, 2002). En se basant sur les études existantes, nous notons que les barres subtidales se déplacent vers le large sous l'action des tempêtes (Ruessink et Terwindt, 2000; Gouriou, 2007).

# 1.1.2. Méthodes développées d'étude de l'évolution du littoral

Aujourd'hui, il existe différentes approches dans la recherche de l'évolution du littoral dans le monde. Les méthodes suivantes sont largement utilisées :

## 1.1.2.1. Méthodes de mesure et d'analyse diachronique de la topographie et de la bathymétrie

Pour l'évaluation quantitative et qualitative des caractéristiques de la dynamique côtière, les mesures de terrain de la zone d'étude sont réalisées selon la saison pendant quelques années afin de comparer et d'évaluer les évolutions du littoral (Pham, 2012).

Cette méthode est la plus ancienne. Grâce aux équipements de mesure, à la technologie de l'information et à l'ordinateur lors de la révision, l'analyse des données, nous pouvons obtenir des résultats presque plus réalistes que nature. Cependant, le degré de précision de cette méthode repose en grande partie sur celle des données de mesure, leur précision étant liée aux méthodes de mesure et aux appareils de mesure (Pham, 2012).

Pour l'évaluation de l'évolution du littoral, il est nécessaire d'avoir des données d'entrée à la modélisation des segments du littoral. Les données de terrain du littoral du présent et du passé, en tant que base pour une première étape, sont très importantes pour évaluer et comprendre les caractéristiques des modifications du littoral (Pham, 2012).

Plus tard, quand un modèle est établi, il nécessite également des données de l'évolution du littoral dans le passé pour vérifier et tester le modèle. Les données de terrain du littoral jouent un rôle important, les mesures de terrain sont indispensables.

#### 1.1.2.2. Méthodes statistiques

L'analyse de l'évolution du littoral à partir des données mesurées à l'aide de méthodes statistiques est significative (Dang et Pham, 2008). Avec cette méthode, certains facteurs naturels qui affectent le site d'étude ont été analysés afin de déterminer leurs comportements statistiques et les appliquer pour étudier l'évolution du littoral.

#### 1.1.2.3. Méthodes basées sur des modèles physiques

L'étude de l'évolution de l'érosion et de l'accrétion des zones côtières par les modèles physiques se concentre sur l'analyse du champ d'écoulement et l'impact des constructions dans les zones côtières (Pham, 2012).

Le modèle physique simulant le processus d'évolution du littoral comporte deux formes : modèle à fond en dur (fixe) et le modèle à fond dynamique. Le modèle à fond en dur décrit l'évolution de la plage, sans prise en compte des variations du fond pendant le processus de simulation, le fond est considéré comme fixe toute la durée de la simulation. Ces modèles ne prennent pas pleinement en compte l'influence des phénomènes de transport des sédiments sur la topographie du fond ainsi que sur le phénomène étudié dans le modèle. En revanche, le modèle à fond dynamique simule le processus d'évolution du littoral en tenant compte des effets du transport sédimentaire parallèle à la côte dû aux vagues et aux courants, donc la topographie du fond du modèle va changer dans le processus de simulation, c'est pourquoi nous l'appelons le modèle à fond dynamique. Chaque modèle aura son champ propre d'application, selon ses caractéristiques (Pham, 2012).

En raison de la nature complexe des processus hydrodynamiques côtiers, les résultats des recherches sur les modèles physiques ont une portée limitée en espace ainsi qu'en temps (Pham, 2012). Ces méthodes sont souvent coûteuses.

#### 1.1.2.4. Méthode de modèle mathématique

Aujourd'hui, la plupart des analyses d'impacts des ouvrages côtiers peuvent être faites par la simulation sur des modèles mathématiques. Avec le développement des capacités de l'ordinateur, grâce à une meilleure connaissance des phénomènes physiques et à la formalisation avancée de l'analyse numérique (codes de calculs), les modèles actuels permettent de résoudre simultanément (couplage), les équations hydrodynamiques et le transport des sédiments. Nous pouvons donc traiter plusieurs modèles complexes issus de la nature.

Les modèles mathématiques jouent un rôle de plus en plus important dans l'étude de l'évolution du littoral en particulier et dans les géosciences en général. Leur application permet de déterminer plus précisément les paramètres importants. Grâce à ces modèles, nous pouvons compléter notre compréhension de l'évolution du littoral.

Les modèles numériques sont utilisés pour simuler et déterminer les règles relatives à l'évolution telles que le transport sédimentaire, le processus d'évolution du rivage, la variation de niveau d'eau, et les houles des zones extracôtières et côtières. Le développement de la méthodologie et les progrès de l'industrie de la technologie de l'information ont ouvert de nouvelles perspectives pour l'étude de l'évolution du littoral par ces modèles. Les outils de recherche d'érosion, d'accrétion, et de déplacement du rivage par le modèle numérique de l'évolution morphologique en 2D/3D dans la zone du littoral sont de plus en plus complets. Ils permettent une simulation plus détaillée des phénomènes, plus de réalisme et une plus longue période de simulation.

Dans le domaine de l'évolution du littoral, les modèles mathématiques sont généralement classés en quatre catégories tels que les modèles de vague, de surcote, de transport des sédiments, et d'évolution du trait de côte.

#### a) Modèle de vague

Un modèle complet qui prend en compte toutes les propriétés physiques des vagues et peut être appliqué à tous les cas est trop compliqué. Par conséquent, pour sélectionner le modèle le plus approprié, il est nécessaire de comprendre l'importance relative des processus physiques.

Il existe deux grandes familles de modèles de vagues. Premièrement, le modèle de résolution de la phase prend en compte l'amplitude et la phase des composantes des houles. Secondement, le modèle de la phase moyenne tient compte seulement des moyennes des paramètres tels que le spectre, la hauteur, et la fréquence, etc. ... Si les caractéristiques de phase moyenne changent rapidement, il est généralement nécessaire d'utiliser une résolution de modèle mixte. Inversement, si les caractériques de la houle changent lentement, en général le modèle de phase moyenne est applicable. Les modèles de résolution de la phase nécessitent plus de temps de calcul.

#### b) Modèle de surcote

Le modèle de surcote est un modèle barotrope qui est forcé par les paramètres atmosphériques suivants : le vent (à 10 mètres), la pression atmosphérique (au niveau de la mer), et la marée. Il utilise les équations de Saint-Venant.

#### c) Modèle de transport de sédiments

Ce modèle utilise d'abord les équations hydrodynamiques des zones côtières qui peuvent être modélisées par les équations des eaux peu profondes à deux dimensions (l'équation de continuité et l'équation de mouvement décrit la conservation de l'impulsion). Il repose ensuite sur les formules de calcul du transport sédimentaire, les plus utilisées sont les formules du CERC (United States. Army. Corps of Engineers et Coastal Engineering Research Center (U.S.), 1984), de Bijker (1967), de Kamphuis (1991), et de QUEENS (IHE, Delft).

#### d) Modèle d'évolution du trait de côte

Le modèle mathématique procure un outil de simulation qui permet de visualiser plus en détails le processus de l'évolution du rivage naturel, à la fois en espace et en temps (Komar, 1989). Il existe deux méthodes utilisées pour élaborer des modèles mathématiques décrivant la morphologie du rivage. La première méthode consiste à utiliser des modèles de contour des profondeurs. Cette approche permet d'identifier la position des contours dans les zones extracôtières au fil du temps. La deuxième méthode est de construire une grille de calcul pour la zone d'étude et de déterminer les changements de terrain, le niveau d'eau et le courant pour chaque cellule de la grille au fil du temps.

Pour simuler l'évolution de la ligne du rivage, nous utilisons le modèle de contour. Ce modèle est divisé en 2 modèles : le modèle d'une ligne et le modèle de la ligne complexe.

#### i. Modèle d'une ligne

La plupart des modèles utilisent le modèle d'une ligne sous les hypothèses que le profil de la plage se déplace parallèlement à lui-même et le sable est transporté le long du rivage du profil (Source : <u>www.coastalwiki.org</u>). Ce modèle a été enrichi, le modèle mathématique de rivage en 3 dimensions complet a également été mis au point pour faire évaluer le transport sédimentaire horizontal et l'évolution du profil ainsi que de calculer le transport littoral des sédiments. Le modèle d'une ligne est le plus simple modèle de contour et il peut être utilisé pour simuler l'évolution du rivage au fil du temps.

#### ii. Modèle de la ligne complexe

Le modèle de la ligne complexe a été initié par Perlin & Dean (1978) et Perlin (1979). Il s'est intéressé aux phénomènes se produisant en présence d'une série de contours de profondeurs variables. Il peut fournir certains résultats en trois dimensions. Le modèle de la ligne complexe repose sur les mêmes hypothèses que le modèle d'une ligne [1.1.2.4. d) i], la seule différence est que la côte a été cartographiée par plus de lignes. Chaque ligne représente une coupe transversale de la plage (ou une surface en coupe transversale sur la plage). La forme de la section transversale à cette

plage serait autorisée à changer.

Très peu de recherches ont été faites pour développer l'analyse dans l'espace en trois dimensions de manière complète dans la zone côtière. Ce sont des modèles qui prennent en compte à la fois le transport transversal des sédiments et le transport sédimentaire parallèle à la côte. Ces modèles utilisent souvent la méthode de Bagnold pour déterminer le volume des sédiments transportés en utilisant les formules de Bowen (1980) et de Bailard et Inman (1981).

## **1.1.2.5.** Méthode de SIG (Système d'Information Géographique)

C'est une méthode de construction des cartes de profondeur pour évaluer les changements de terrain. A partir des mesures d'une enquête réelle dans une zone pendant différentes périodes, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) du site d'étude est construit. Le MNT est un modèle numérique d'élévation dans lequel la profondeur du terrain varie continûment. Les superpositions de MNT permettent de comprendre les changements de la topographie du fond au fil du temps selon la saison et l'année, de déterminer la plus grande érosion et accrétion, l'érosion et l'accrétion moyenne et le volume de l'érosion et de l'accrétion.

#### 1.1.2.6. Méthodes d'analyse par les photographies aériennes

L'utilisation de données de photographies aériennes multi-temps et le SIG permettent à l'aide d'un logiciel de traitement d'image et de cartes, d'étudier très efficacement les problèmes d'évolution du littoral, des dunes, la distribution de la concentration de sédiments, le mouvement des sédiments, la vitesse, l'état de la circulation, etc. ... Les photographies aériennes sont variées. Les ressources image sont principalement Landsat, SPOT, et ADEOS – AVENIR.

## 1.1.2.7. Méthode intégrée d'analyse

Dans de nombreux cas, l'application d'une certaine méthode donne généralement le détail des résultats, mais il est difficile d'évaluer les liens entre les questions et les résultats dans leur ensemble. Il faut pour cela avoir une approche globale. C'est la méthode intégrée d'analyse en examinant la relation entre les résultats des différentes méthodes de recherche pour trouver les règles, l'orientation générale. Cette méthode est particulièrement importante lors du choix des résultats ou d'une solution finale.

Dans la thèse nous utilisons les données disponibles pendant la période 1999-2012 pour la zone d'étude concernée ; nous utilisons le modèle intégré à MIKE21 afin de simuler et de déterminer les règles relatives à l'évolution du transport sédimentaire, au processus d'évolution du trait de côte, aux changements dans les niveaux d'eau, les marées, et les vagues dans les zones extracôtières et côtières. Nous utilisons la méthode SIG pour la construction de cartes de profondeur afin d'évaluer les changements de terrain.

## 1.2. Études sur l'évolution du littoral en France

La majorité des travaux français en morphodynamique côtière concernent des littoraux sableux. Nous allons d'abord porter l'attention sur l'évolution du littoral atlantique français. Les compréhensions sur le littoral méditerranéen français seront ensuite exposées.

## 1.2.1. Littoral français sur l'océan Atlantique Nord

La base de données morphologiques et hydrodynamiques est collectée dans le Programme National d'Environnement Côtier (PNEC) sur trois sites d'études des littoraux sableux de France, non ou peu anthropisés : le Truc Vert sur la côte aquitaine, Omaha Beach sur la côte normande, et Sète sur le littoral languedocien (Gouriou, 2007).

A partir de cette base de données, les modèles de formation des barres intertidales ont été réalisés à la plage du Truc Vert par De Melo Apoluceno (2003) et Desmazes (2005). Sénéchal (2003) a analysé l'évolution de l'énergie des vagues en zone de surf de cette plage. Puis, les processus hydro-morphodynamiques des plages sableuses a été simulé dans des conditions météo-marines réelles par Castelle (2004). L'évolution des barres intertidales de la plage d'Omaha Beach est modélisé par Stépanian (2002).

Des modèles morphodynamiques ont été réalisés sur les côtes du Finistère (plages de Porsmilin, Tregana, Corsen, et des Blancs Sablons) par Dehouck (2006) (Gouriou, 2007).

Il existe aussi certains projets qui recherchent l'évolution des plages sableuses. En effet, le projet international ECORS en 1983 a fait des expériences d'observations vidéos de la plage de Biscarrosse (Gouriou, 2007). En 2007, le projet national « Reliefs de la Terre » a porté sur la modélisation numérique et physique de l'évolution morphodynamique des littoraux sableux (Gouriou, 2007). Le projet régional dans le cadre du Réseau de Recherche Littoral Aquitain réalisé depuis 2006 a travaillé sur le flux de contaminants et l'évolution du trait de côte (Gouriou, 2007).

## 1.2.2. Littoral méditerranéen français

Les connaissances sur le littoral méditerranéen français sont très différentes selon les régions. Les études de plages rocheuses se sont relativement peu développées à l'échelle des dernières décennies. La photo-interprétation est appliquée pour déterminer l'évolution des plages sableuses (SDAGE RMC, 2005).

Il existe de nombreuses études sur l'évolution du rivage et de la dynamique sédimentaire en Languedoc-Roussillon (Barusseau et Saint-Guily, 1981; Barusseau et al., 1994; Akouango, 1997; Durand, 1999; Certain, 2002; Certain et Barusseau, 2004; Sabatier et al., 2004; Certain et Barusseau, 2005; Sabatier et al., 2009a; Sabatier et al., 2009b), et en Camargue (Suanez et Lippmann-Provansal, 1997; Bruzzi, 1998; Suanez et al., 1998; Suanez et Sabatier, 1999; Sabatier, 2001; Maillet, 2005; Samat, 2007). De plus, de nombreuses études privées (SOGREAH, BCEOM), et publiques (CETE et IPSEAU, Agence de l'Eau, et CEPREL) ont porté sur l'évolution des plages et l'aléa érosion dans le cas de Languedoc-Roussillon (Brunel, 2010). Les cordons dunaires isolés de nombreux étangs montrent les unités géomorphologiques principales du littoral du Languedoc-Roussillon (Durand, 1999; Certain, 2002; Brunel, 2010). La morphologie du littoral du Languedoc-Roussillon est classée en quatre grands types de systèmes littoraux (Durand, 1999; Certain, 2002).

Les modèles numériques couplés sont appliqués aux plages du Golfe de la Napoule, France, en utilisant le modèle de *Coastal Modeling System* (CMS). Les résultats montrent la dynamique sédimentaire et l'effet des conditions météo-marines extrêmes sur l'année 2006 (Brehin et al., 2011).

# 1.3. Études en relation avec l'évolution du tombolo

Dans les années 50, il faut surtout citer les travaux sédimentologiques de Blanc (1953) de la Station Marine d'Endoume. Puis, nous pouvons noter des travaux anciens sur la genèse et l'évolution du tombolo (Falsan, 1863; Parent; Léger et Blanchet, 1927) et les biocénoses (Pérès et Picard, 1964).

Depuis les années 70, plusieurs recherches sont apparues :

- Transport sédimentaire (Blanc, 1960, 1973, 1974a, 1975; Jeudy De Grissac, 1975; Blanc et Jeudy De Grissac, 1978; Blanc, 1980, 1982; SOGREAH, 1988b,c);
- Suivi de l'évolution des herbiers de posidonie (Nieri et al., 1992; Paillard et al., 1993);
- Dynamiques géomorphologiques (Courtaud, 2000) ;
- Suivi de l'évolution des plages sableuses (Serantoni et Lizaud, 2000-2010) ;
- Evolution du trait de côte (Bizien et al., 2004) ;
- Planification de la gestion de la branche occidentale (IARE, 1996) ;
- Un plan global pour la réhabilitation et la sauvegarde du tombolo (Serantoni et Gutierrez, 1997) ;

- Etude sur la protection de la partie Nord du tombolo occidental (SOGREAH, 1988a,d; Staiquly et Thibault, 1991; HYDRO M, 1993; ERAMM, 2001) ;
- Implantation d'Atténuateur de Houle en Géotextile à la Capte (Meulé, 2010; Meulé et al., 2010).

## **1.4. Rappels sur les principaux forçages météo-marins**

Les principaux forçages météo-marins se composent de la houle, de la tempête, du courant, et du niveau marin. Ils seront résumés brièvement afin de nous donner les compréhensions de base. Les rappels sur le niveau marin et sur le courant sont représentés dans les annexes C2, p. - 15 - et C3, p. - 17 -, respectivement.

## 1.4.1. Rappels sur la houle

Dans ce qui suit, nous présentons la propagation des vagues et les processus en eaux peu profondes tels que la diffraction, la réfraction, et la réflexion. Notre présentation a pour but de montrer les différents phénomènes dûs à l'action de la houle. Ceci nous permettra de mieux comprendre les modèles de vagues.

## 1.4.1.1. Propagation des vagues



Figure 1-1 : La propagation des vagues du large jusqu'à la côte.

Les vagues sont créées par le vent. Ils se propagent vers la côte. Ils sont classifiées en quatre domaines (Figure 1-1). Le premier, zone de génération des vagues par le vent où les vagues sont produites par le vent soufflant sur la mer et l'influence du fond sur les vagues peut être ignorée (Source : <u>www.shom.fr</u>). La deuxième, zone de propagation libre, où le vent est négligeable ou les vagues se propagent hors de la zone de génération (zone ventée), les vagues continuent à se propager librement et elles deviennent la houle (Source : <u>www.shom.fr</u>). La troisième, zone de transformation par l'effet du fond où ces vagues sont changées par l'influence du fond (Source : www.shom.fr). La quatrième, zone de déferlement à la côte où les effets de profondeur jouent un rôle important. L'interaction entre les houles et les constructions, telles que les brise-lames, les digues, les îles, et les récifs, etc. ... devrait être prise en compte. Les vagues déferlent sur la zone proche de la côte, dès que la profondeur est inférieure à environ 2 fois la hauteur des vagues (Source : www.shom.fr). Les vagues perdent leur énergie. Elles produisent les courants de dérive littorale ou les courants littoraux. Ces courants et les vagues sont responsables du transport sédimentaire sur les plages (Source : www.shom.fr).

En s'approchant de la plage, la houle parcourt les zones suivantes : la zone de "*shoaling*", le point de "cassure" et la zone de "*surf*" (Figure 1-2).

#### a) Zone des hauts-fonds ou la zone de "shoaling"

C'est la zone où a lieu une variation de la hauteur de la houle dûe à une variation de profondeur (Tourdiat et Chevalier, 1998). Les effets de frottement sur le fond jouent un rôle important dans la dissipation d'énergie. L'influence du vent sur la dissipation d'énergie est négligeable (Tourdiat et Chevalier, 1998).



Figure 1-2 : La propagation de la houle dans la zone proche de la côte.

#### b) Point de "cassure"

Le point de "cassure" (point de déferlement) est déterminé par les différents critères (Tourdiat et Chevalier, 1998). Premièrement, la profondeur de l'eau est estimée à 1,3 fois la hauteur des vagues en eaux profondes. Deuxièmement, le rapport entre la hauteur limite de la vague et la longueur (H/L) est de 0,142 (Mitchell, 1893) en eaux profondes (Tourdiat et Chevalier, 1998; Jarry, 2009). Troisièmement, Stokes (1980) a noté qu'un angle de crête (angle formé par les tangentes à la crête de la vague) est inférieur à 120 degrés (Tourdiat et Chevalier, 1998; Jarry, 2009). En outre, les autres critères tiennent compte de la profondeur de l'eau et de l'inclinaison de la vague (Tourdiat et Chevalier, 1998).

#### c) Zone de déferlement ou la zone de "surf"

Les vagues déferient dans la zone proche du rivage où la hauteur d'eau devient faible (Tourdiat et Chevalier, 1998). Le déferiement des vagues est un phénomène complexe. En effet, l'énergie des vagues reçue par le vent est dissipée : une partie de l'énergie est réfléchie vers la mer ; la plupart de l'énergie est dissipée en chaleur sur le rivage sous la forme d'un mouvement turbulent complexe (Tourdiat et Chevalier, 1998).



Figure 1-3 : Zone de "surf" (au sens large).

Nous pouvons également classifier la zone de déferlement en trois zones (Figure 1-3) (Tourdiat et Chevalier, 1998) : premièrement, la zone de transition entre les vagues non-déferlantes et déferlantes ; deuxièmement, c'est l'inner zone où les vagues déferlent ; troisièmement, la swash zone entre les niveaux de la marée basse et de la marée haute.

#### 1.4.1.2. Processus en eaux peu profondes

Si la houle pénètre dans les eaux peu profondes, ses paramètres changent. Les phénomènes physiques tels que la réflexion, la réfraction, la diffraction, l'effet d'eaux peu profondes, le déferlement, le frottement du fond, et la perméabilité sont appelés les processus en eaux peu profondes. Les paramètres de longueur L, de direction  $\theta$ , et de hauteur H de la houle incidente sont modifiés lors de sa propagation vers la côte.

En effet, tant que la profondeur est grande, la houle se propage sans déformation majeure. Cependant, à l'approche du rivage ou contre des ouvrages immergés ou émergés, la propagation de la houle se trouve modifiée. Dans ce qui suit, nous présentons brièvement les phénomènes cités précédemment.

#### a) Réflexion

La réflexion se produit quand : deux houles en sens inverse se rencontrent (Zaki et al., 2003) ou si la houle rencontre un obstacle vertical tels que falaise, cordons littoraux, jetée, et digue, etc. ... (Courtaud, 2000). La réflexion induit le « clapotis » qui est défini comme étant le mouvement produit par la réflexion de la houle frappant perpendiculairement un rivage (Zaki et al., 2003). La période du clapotis est supposée identique à la période des houles incidente et réfléchie (Zaki et al., 2003).

#### **b)** Réfraction

Quand la houle pénètre dans les fonds de profondeurs variables, certaines

caractéristiques (amplitude et célérité) de la houle sont modifiées à cause de la variation de la profondeur ; la période de la houle est conservée (Zaki et al., 2003). L'interaction entre le fluide et le fond marin provoque le phénomène de réfraction de la houle. Elle est prédominante dans la zone de shoaling. Les lignes de crêtes de la houle sont parallèles entre elles (Zaki et al., 2003). Près de la côte, la diminution de la profondeur conduit ces lignes à devenir parallèles aux isobathes (Blanc, 1971; Larras, 1979; Mayençon, 1992; Courtaud, 2000; Zaki et al., 2003).

#### c) Diffraction

Lorsqu'une houle arrive près d'obstacles émergés tels que des avancées rocheuses, des épis, des digues, des brise-lames, et des jetées, etc. ..., les lignes de crêtes ont tendance à s'incurver en contournant ces obstacles (Courtaud, 2000). Les houles s'atténuent rapidement dans les zones d'abri à l'arrière de ces ouvrages. L'amplitude des vagues peut varier considérablement par rapport à la période et la longueur de la vague (Zaki et al., 2003). Ce phénomène est connu sous le nom de diffraction de la houle.

#### d) Déferlement

Le déferlement se produit lorsque les vagues atteignent une cambrure limite et le profil des vagues devient instable (Zaki et al., 2003). Quand la vague se propage du large (profondeur infinie) vers la côte, elle subit plusieurs types de déferlement (Zaki et al., 2003). Trois types de déferlement sont distingués (Figure C-7, p. - 20 -) (Battjes, 1974). Le premier type est le déferlement glissant où la pente des vagues est faible. La vague se brise assez loin du rivage et forme des rouleaux d'écumes dont la taille dépend de la force de la houle (Khairi, 2013). Le second est le déferlement en "volute" ou "plongeant" où la pente est assez marquée. Les vagues gagnent en amplitude près de la côte (Khairi, 2013). Le troisième est le déferlement frontal (gonflant) où la pente des vagues est très marquée, la profondeur diminue très (Khairi, 2013) et la partie frontale du profil se gonfle (Zaki et al., 2003). A proximité du rivage, il y a des formations de rouleaux de déferlement résultants d'un déferlement répétitif des trains des crêtes (Zaki et al., 2003).

#### 1.4.2. Rappels sur la tempête

En météorologie marine, nous parlons de tempête lorsque les vents moyens varient de 89 à 117 kilomètres par heure (des rafales de 110 à 150 kilomètres par heure) correspondant à la force 10 de l'échelle Beaufort (Source : <u>meteofrance</u>).

Plusieurs définitions de seuils des tempêtes s'appuient sur des critères différents en fonction des auteurs et des sites étudiés (Brunel, 2010). D'abord, la valeur de 1,5 mètres de hauteur significative est choisie pour le seuil des tempêtes sur la côte orientale des Etats-Unis (Dolan et Davis, 1994; Fucella et Dolan, 1996; Brunel, 2010). Cette valeur correspond à la "mer agitée" dans l'échelle de Douglas (Tableau C-5, - 20 - ). Puis, dans le delta du Rhône, la tempête est décrite comme correspondant à l'association des hauteurs de houle significatives ( $H_s$ ) supérieures à 1 mètre, des vitesses du vent marin supérieures à 11 mètres par seconde (39,6 kilomètres par heure), et des surcotes supérieures à 0,4 mètre NGF (Bruzzi et Provansal, 1996; Bruzzi, 1998). Sur le littoral du Languedoc-Roussillon, Durand (1999) a proposé la définition de la tempête correspondant à l'association des hauteurs significatives  $H_s$  supérieures à 1,5 mètre, des vitesses de vent supérieures à 11 mètres par seconde, des surcotes supérieures à 0,3 mètre NGF, et une durée minimale de 24 h (Brunel, 2010). Enfin, Certain et Barusseau (2004) ont présenté les tempêtes morphologiques correspond à la hauteur significative supérieure à 4 mètres dans le cas du littoral du Languedoc-Roussillon (Brunel, 2010).

Les études présentées par SOGREAH (1988d), IARE (1996), et Courtaud (2000) ont utilisé un seuil de submersion situé entre 0,3 et 0,4 mètre NGF au tombolo. Nous utilisons également la valeur de 0,4 mètre NGF pour la surcote afin de déterminer la tempête.

## 1.5. Rappels sur le transport sédimentaire

La plupart des sédiments (plus de 90%) sont transportés en suspension, le reste est transporté près du fond en saltation. En raison des caractéristiques directionnelles, le transport des sédiments côtiers peut être divisé en transport transversal des sédiments (perpendiculaire à la côte) et dérive littorale des sédiments (parallèle à la côte). Le transport transversal des sédiments induit des changements morphologiques à court terme, par exemple en cas de tempête. La dérive littorale des sédiments provoque des changements morphologiques à long terme d'une partie côtière. Elle se produit dans une zone étroite de la côte. La direction et l'amplitude du transport des sables sont principalement déterminées par la hauteur, la direction et la période de la houle. En principe, sous l'effet de la houle incidente, les sédiments ont été transportés du large vers la côte et sous celui de la houle réfléchie, les sédiments ont été déplacés dans la direction opposée.

## 1.5.1. Dérive littorale des sédiments

Si la direction des houles incidentes n'est pas perpendiculaire à la côte, une forte composante parallèle à la côte est générée, conduisant aux courants de dérive littorale. Les sédiments transportés par ces courants constituent la dérive littorale des sédiments. Elle est le résultat direct des propriétés des sédiments et le courant de dérive généré par l'incidence de la houle oblique. Les houles associées aux courants côtiers sont les facteurs générateurs du transport côtier du sable.

Les courants de dérive littorale induits par les houles peuvent être superposés

avec des courants de marée parallèles à la côte. Même si la houle incidente est perpendiculaire à la côte, les courants de marée peuvent causer les dérives littorales des sédiments. La hauteur, la période, et l'angle d'incidence des houles contribuent au courant de dérive par le transfert de quantité de mouvement des houles déferlantes à la colonne d'eau littorale.

La dérive littorale des sédiments peut se voir très clairement lorsque la ligne de transport sédimentaire naturel est entravée par des constructions côtières telles que les barrages et les digues. Ces sédiments sont bloqués et ne peuvent se déplacer parallèlement à la côte. En conséquence, les phénomènes d'accrétion et d'érosion surviennent en amont et en aval de la construction, respectivement. Ce transit est souvent estimé par la quantité de sédiments déposés en amont de la digue, ou le barrage au large ou bien la masse accrétée dans l'estuaire et l'entrée du port, ou bien le taux d'érosion du trait de côte dans le secteur d'étude. Cette estimation indirecte consiste à plus ou moins décrire l'état du transit des sédiments, mais avec une précision relative.

Le transit des sédiments a lieu selon les deux directions opposées le long du littoral, selon la direction des vagues sur le rivage. Alors, deux méthodes d'estimation de la dérive littorale des sédiments sont définies. Le transport total des sédiments est la valeur absolue du transport net, il ne prend pas en compte la direction du transport. Le transport net des sédiments est défini comme le volume total de sable déplacé sous l'action des houles incidentes à la côte, en tenant compte de la différence de la direction des houles. Il est égal à la différence entre la quantité du transport des sédiments sur la direction positive et celle sur la direction négative. Il peut prendre une valeur positive, négative ou nulle. La variation de la taille moyenne des grains de sable de la plage et la composition de la plage sont souvent interprétées comme les preuves de la direction du transport net. En général, le diamètre moyen des sables diminue vers la direction de la dérive littorale des sédiments. Cependant, il y a plusieurs raisons qui causent la variation de la taille des grains de sable, telles que la transformation de l'énergie des houles parallèlement à la côte dûe à la topographie de la plage, ou l'échange de sable entre la côte et la mer quand le sable est transporté perpendiculairement à la côte. Par conséquent, parfois le champ de la distribution des variations de taille des sables peut ne pas constituer un indice clair afin de déterminer la direction du transport net.

Ces deux méthodes sont très importantes lors de l'analyse de l'évolution de la plage. En général, le transport net est beaucoup plus petit que le transport total venant de deux directions différentes. Pour certaines plages, le transport total peut être énorme, mais le transport net peut être proche de zéro.

Les estimations de la dérive littorale des sédiments doivent reposer sur des études analytiques de l'évolution du rivage prenant en compte le régime des houles et des courants dans le secteur d'étude sur une période assez longue. La tendance de l'évolution du littoral dans le site d'étude constitue une première validation pour ces estimations. Pour les plages dont la dérive littorale des sédiments est saisonnière, lors de l'analyse des signes de l'évolution du trait de côte, il est nécessaire d'examiner de façon plus approfondie les données des houles anciennes, les caractéristiques de la côte près du secteur d'étude et les effets de la source de sable de rivière sur l'évolution du rivage.

Les impacts des changements morphologiques de la plage induits par la dérive littorale des sédiments dépendent de l'unité physiographique côtière. Les systèmes ouverts et fermés de transport sédimentaire doivent être différenciés (Figure 1-4) (Albers et von Lieberman, 2011). La côte du tombolo occidental constitue un système fermé.



Figure 1-4 : Systèmes ouverts et fermés transport des sédiments (U.S. Army Corps of Engineers, 2002; Albers et von Lieberman, 2011).

#### 1.5.2. Transport transversal des sédiments

Contrairement aux études de la dérive littorale des sédiments, le transport transversal des sédiments a suscité l'intérêt depuis seulement environ une décennie (Trần et Van de Graaff, 2015). L'étude du transport transversal des sédiments laisse encore de nombreuses questions non élucidées. Ce point a motivé de nombreux chercheurs dans le domaine de l'ingénierie côtière, à la fois expérimentale et théorique. En principe, il n'est pas possible d'effectuer une description détaillée de la dérive littorale des sédiments sans le modèle du transport transversal des sédiments et de l'évolution du profil. Le modèle du transport sédimentaire dans le profil de plage calculera les changements du volume de transport parallèlement au profil de la plage.

Le transport transversal des sédiments est principalement déterminé par le régime des vagues (Silva et al., 2002). Ses mécanismes sont liés aux conditions internes et externes à la zone de déferlement. Son intensité à l'intérieur de cette zone est beaucoup plus grande que celle à l'extérieur de cette zone. Les phénomènes d'accrétion et d'érosion le long d'un profil de plage dépendent particulièrement du gradient et du sens du transport sédimentaire en chaque point du profil (Silva et al., 2002).

Sur les côtes naturelles, les marées et l'évolution des conditions de houle, qui varient quotidiennement, ainsi que de façon saisonnière, ne créent pas la formation d'un profil d'équilibre. Le profil de la plage réagit à chaque changement des paramètres de la houle avec la tentative de former un nouveau profil d'équilibre. Le résultat est un transport transversal des sédiments. Le transport sédimentaire vers la côte est induit par des houles longues et planes. Celui vers la mer se produit principalement lors des houles courtes et abruptes et conduit à l'érosion de la plage.

Pour une côte droite, les houles perpendiculaires à la côte induisent le transport de l'eau selon la direction des houles. Cela conduit à une surcote dans la zone de déferlement. Le gradient du niveau d'eau conduit à des courants vers le large qui se dirigent au fond. Ils sont en équilibre avec les courants vers la côte qui se déplacent à la surface. Si le gradient de niveau marin et les paramètres de la houle sont constants, un profil de la plage est formé, pour un système fermé (Figure 1-4).

Le transport transversal des sédiments joue un rôle important dans le développement du profil de la plage. Ce profil peut par contre varier considérablement dans l'année, même pendant une seule tempête.

## 1.6. Erosion du littoral

Nous allons, dans un premier temps, porter sur le phénomène de l'érosion du littoral. Puis, dans un deuxième temps, nous présenterons les facteurs d'érosion côtière.

## 1.6.1. Phénomène de l'érosion du littoral

L'érosion des plages s'inscrit dans le phénomène plus large d'érosion du littoral. Ce phénomène naturel s'est amplifié, de manière parfois catastrophique, depuis une vingtaine d'années. Dans le monde, 70% de plages ont tendance à reculer alors que seulement 10% s'engraissent (Paskoff, 2005). L'érosion du littoral affecte de nombreux pays en Europe. En effet, environ 20% des rivages sont touchées par l'érosion et sur 13% les processus de dépôt prédominent. La mer Baltique est la seule mer européenne où les processus de dépôt sont supérieurs aux processus d'érosion (Source : <u>wikhydro.developpement-durable.gouv.fr</u>).

Le littoral métropolitain est constitué de plusieurs milliers de kilomètres de plages, vasières, côtes rocheuses basses, estuaires et falaises qui reculent ou avancent et modifient ainsi les paysages côtiers (Colas, 2006). Les communes littorales maritimes accueillent 10% de la population métropolitaine et près de 7 millions de lits touristiques sur seulement 4% du territoire (IFEN, 2007). À cette très forte densité humaine correspond un très fort degré d'artificialisation des côtes. Environ 25% du littoral situé à moins de 500 mètres de la mer est urbanisé (tissu urbain, zones industrielles), soit 5 fois plus que la moyenne métropolitaine (IFEN, 2007). Par ailleurs, près de 35% des territoires proches de la mer sont des milieux naturels et des zones humides recelant une très grande richesse biologique (contre une moyenne de 6,5% au niveau métropolitain) : écosystèmes littoraux (dunes, marais, lagunes, et landes, ...), oiseaux d'eau nicheurs ou hivernants, et flore endémique, ... (IFEN, 2007).

La majorité des plages françaises est confrontée au phénomène d'érosion. Un quart du littoral métropolitain (24,2%), soit 1 723 kilomètres de côtes, recule sous l'action de la mer (IFEN, 2007). À l'inverse, 43,7% des côtes représentant un linéaire de 3 115 kilomètres sont stables et près de 10% du littoral est en extension et gagne des terres sur la mer, essentiellement par la sédimentation des argiles et limons (678 kilomètres) (IFEN, 2007). Selon IFEN (2007), près d'un cinquième du littoral est hors nomenclature (17,4%). Il s'agit essentiellement de zones portuaires et de digues qui fixent artificiellement les côtes mais aussi des estuaires (lignes virtuelles fixées dans le cadre du programme Erosion à 1 kilomètre de la côte) et des zones de remblais (IFEN, 2007). Enfin, le programme Erosion ne dispose pas d'informations suffisantes pour déterminer l'évolution de 5,1% du linéaire côtier métropolitain (IFEN, 2007).

Sur le linéaire côtier méditerranéen français, 50% des plages ont tendance à s'éroder (Colas, 2006), les plages les plus touchées étant celles d'Aquitaine et du Languedoc. Le Languedoc-Roussillon, qui comprend quatre départements ouverts sur la mer (Gard, Hérault, Aude et Pyrénées-Orientales), offre 76 kilomètres de linéaire côtier en cours d'érosion non contrôlée sur une totalité de 356 kilomètres. Le phénomène d'érosion côtière aux Saintes-Maries-de-la-Mer en Camargue entraîne un recul du trait de côte variant de 2,5 mètres par an et jusqu'à 12 mètres par an localement.

Les problèmes d'érosion du littoral touchent de plus en plus de personnes, avec l'augmentation de la densité de populations sur les littoraux. Face à ces enjeux, il est utile de localiser et de caractériser les phénomènes d'érosion du littoral. La majorité des plages a tendance actuellement à aller vers l'érosion, c'est-à-dire que le bilan sédimentaire est négatif pour un grand nombre de plages. Cela peut être expliqué par diverses causes, qui seront énumérées dans ce qui suit.

## 1.6.2. Facteurs d'érosion côtière

L'érosion marine résulte de nombreuses contraintes dûes aux facteurs naturels et/ou aux facteurs humains. Les principaux facteurs naturels sont les vagues, les courants, les tempêtes, les apports sédimentaires par les fleuves et/ou les dérives littorales, et l'élévation du niveau moyen des mers dûe au réchauffement, etc. ... Les activités humaines comprennent l'aménagement du littoral et l'urbanisation (Salman, 2004).

#### 1.6.2.1. Facteurs naturels d'érosion littorale

Les facteurs climatiques seront d'abord présentés. Nous parlerons ensuite des facteurs océaniques. Nous découvrirons enfin les facteurs de plage.

#### a) Facteurs climatiques

Les précipitations, dont le phénomène est renforcé sur les côtes, contribuent fortement, par l'écoulement ou l'infiltration, à faire évoluer les formes littorales.

Les rivages sont plus ventés que l'arrière-plage ; les régions littorales se caractérisent par la fréquence et la violence du vent (Van Heeswyck et al., 2012). Les vents influent sur la houle, le courant de surface et transportent également les sables. Ils peuvent influencer la dérive des littoraux et accroitre la cambrure des vagues (Van Heeswyck et al., 2012). S'ils s'opposent aux vagues, ils ralentissent les vagues et favorisent un engraissement des plages (Van Heeswyck et al., 2012). S'ils soufflent dans la même direction que les vagues, ils génèrent une cambrure plus importante des vagues et favorisent un amaigrissement des plages. Ils transportent les sédiments avant de les déposer plus loin (Van Heeswyck et al., 2012).

Aujourd'hui, tous les travaux s'accordent à dire qu'en relation avec le réchauffement climatique, la surface moyenne de la mer s'élève. Cette élévation est plus rapide depuis 1990 que durant les cinquante dernières années. Le phénomène n'est pas homogène sur le territoire et il se poursuivra encore pendant plusieurs siècles. En un siècle, la surface de la mer s'est élevée en moyenne de 15 centimètres, cette élévation étant plus faible sur les côtes d'Europe occidentale que sur les côtes américaines. À l'échéance de 2100, cette remontée devrait atteindre entre 0,2 et 0,6 mètre. La fonte des glaces des régions polaires pourrait engendrer des valeurs beaucoup plus fortes (Source : <u>www.developpement-durable.gouv.fr</u>). La remontée du niveau marin a été observée sur la majeure partie des plages françaises. Elle a été en moyenne de l'ordre de 1 à 1,5 millimètres par an durant le dernier siècle en France. Il est évident qu'elle joue un rôle dans le phénomène de recul des traits de côte (SDAGE RMC, 2005). La mer avance donc vers la terre et ceci aux dépends des littoraux.

#### b) Facteurs océaniques

Ils se composent des principaux éléments tels que les houles, les courants, et les

tempêtes.

#### i. Houles

La houle est un facteur clé des transports des sédiments dans la zone côtière où de grands volumes de sédiments sont déplacés sous l'action des vagues et des courants. Les vagues produisent des courants côtiers qui transportent les sédiments (Mihoubi et al., 2011). A l'approche de la côte, les vagues sont freinées. Leur énergie est dissipée et transformée principalement en turbulence (Mihoubi et al., 2011). Leur crête a tendance à se disposer parallèlement aux isobathes. La houle impacte les littoraux par l'énergie mécanique, qui est à la fois potentielle et cinétique. Cette énergie est proportionnelle à la hauteur des vagues, autrement dit, elle augmente quand la vague grandit. En fonction de la topographie marine, il peut se produire une concentration ou une dispersion de l'énergie des vagues. L'érosion par les vagues se manifeste surtout dans l'estran. L'effet de l'érosion des vagues est ressentie de 0 à 30 mètres de profondeur. En effet, l'action significative des vagues est ressentie de 0 à 30 mètres de profondeur (Van Heeswyck et al., 2012).

#### ii. Courants littoraux

Ils ont un pouvoir d'érosion important et une capacité de transport importante. Ils déplacent les matériaux en suspension et en saltation. Les courants locaux liés à la houle près du rivage transportent des sédiments et modèlent le paysage littoral.

#### iii. Tempêtes

La figure 1-5 montre les changements schématiques d'un profil de plage en raison d'un cas de tempête. Si le profil n'est pas en équilibre en raison de l'activité croissante de la houle, la partie supérieure du profil va d'abord être érodée. Les dépôts de matière à des parties inférieures du profil conduisent à un aplatissement du profil. En conséquence, la dissipation de l'énergie des houles est répartie sur une plus grande surface et la vitesse d'érosion est diminuée. Lorsque le profil d'équilibre est atteint, le taux d'érosion devient proche de zéro.



Figure 1-5 : Schéma des changements du profil de plage dû aux tempêtes (U.S. Army Corps of Engineers, 2002).

#### c) Facteurs de plage

Ces facteurs comprennent la disponibilité du sédiment et sa composition (sable, galets, etc. ...) et la morphologie de la plage. Concernant la disponibilité du sédiment et sa composition, la vitesse minimale de début d'entrainement du sable est une fonction de la granulométrie, de la densité et de la sphéricité des grains ; elle s'abaisse en fonction inverse de l'accroissement de la pente. La pente très forte limite considérablement les échanges sédimentaires entre les parties émergée et immergée dans le profil de plage. Lors des coups de mer, les sédiments entrainés par les courants de retour vers le large ne peuvent être réacheminés à la côte par les houles de beau temps car la pente est trop forte. Il y a donc une perte dans le bilan sédimentaire qui est difficilement quantifiable.

Le déficit sédimentaire est un paramètre indéniable du recul de la ligne du rivage. Ce déficit est induit par la réduction des apports solides des cours d'eau (SDAGE RMC, 2005). En effet, ces apports ne sont pas suffisants pour compenser les pertes de sédiments annuelles. La présence de barrages a bloqué la grande majorité du transport sédimentaire par charriage. L'extraction de matériaux du littoral a été également responsable du déficit sédimentaire il y a quelques décennies (SDAGE RMC, 2005).

#### 1.6.2.2. Influence anthropique

Aujourd'hui, le littoral est confronté à des enjeux considérables liés à l'économie et à l'environnement (SDAGE RMC, 2005). L'influence anthropique peut souvent aggraver le phénomène d'érosion côtière de façon directe (SOGREAH, 1984) ou indirecte, en amont des cours d'eau, par perte d'apports sédimentaires. L'action de l'homme provoque le réchauffement climatique qui a les impacts potentiels sur les forçages météo-marins et sur les aléas érosion et submersion marine (Yates-Michelin et al., 2010).

#### a) Aménagements

Les aménagements bloquent la dérive littorale des sédiments et engendrent un déséquilibre de la plage.

#### i. Ouvrages en mer

L'installation d'ouvrages en mer provoque une perturbation des transports sédimentaires qui contrôlent l'équilibre sédimentaire des plages (SDAGE RMC, 2005). La construction d'ouvrage produit des modifications du milieu marin qui ont un impact sur les transits sédimentaires. Ils modifient les équilibres sédimentaires. La présence de nombreux ports de plaisance a beaucoup modifié les transports de sédiments (SDAGE RMC, 2005). Elle peut favoriser l'érosion marine sur les secteurs adjacents. En effet, la dérive littorale de sédiments ne peut pas franchir les digues de ces ports. Il en

résulte un déficit sédimentaire en aval des ouvrages (SDAGE RMC, 2005).

Les constructions en front de mer réduisent la largeur de l'estran et diminuent l'efficacité de la dissipation de l'énergie des vagues (Alexandre et al., 2003; Sbai et al., 2004). Les vagues restent très violentes pour le rivage. De plus, lorsque les houles de tempêtes attaquent les murs des bâtiments, la turbulence est renforcée. Alors, la largeur de la plage est diminuée à cause de l'augmentation du volume de sable retiré à la plage.

#### ii. Ouvrages de protection du littoral

La présence d'ouvrages de protection « durs » ou « légers » a localement permis de limiter l'érosion de certains secteurs du littoral. Cependant, à moyen terme, elle a aussi des conséquences sur l'évolution du littoral et sur l'environnement tels que: le déplacement des zones d'érosion, des effets négatifs de certaines structures après une courte période positive, des impacts paysagers des épis perpendiculaires au trait de côte, etc. ... (SDAGE RMC, 2005). Malgré un certain succès des opérations de protection du littoral, l'effet environnemental et économique de ces ouvrages reste incertain (SDAGE RMC, 2005). En effet, les structures en béton, enrochements, ports artificiels, digues, et jetées, favorisent la réflexion de l'énergie des vagues au lieu de son atténuation et provoquent l'arrachage du sédiment. De plus, elles ont un effet de barrage mécanique qui empêche le transit littoral naturel.

#### b) Fréquentation humaine

Elle comporte de l'urbanisation côtière, les fréquentations à terre et en mer.

#### i. Urbanisation du littoral

Des petits villages de pêcheurs le long de la côte sont élargis par la construction d'immeubles, de promenades, et de routes, ... Des véritables stations touristiques ont été créées pour servir le tourisme au bord de la mer (SDAGE RMC, 2005). Ils ont réduit la largeur de la zone de déferlement et limité le déferlement des houles. Une petite partie de l'énergie des houles est perdu sur le rivage. Le reste provoque le phénomène d'érosion. Les cordons dunaires sont parfois arasés pour des raisons principalement financières, ou paysagères, au profit de constructions très proches du bord de mer.

#### ii. Fréquentation à terre

Les fréquentations à terre, telles que les stations touristiques en bordure immédiate de la mer, le réseau de dessertes routières, et les ports, ont eu des effets importantes sur la dynamique côtière (SDAGE RMC, 2005).

Les touristes sont très nombreux en été. Ils accélèrent la destruction de cordons dunaires. Les cordons dunaires sont un élément important du fonctionnement de certains systèmes littoraux (SDAGE RMC, 2005). En effet, les cordons dunaires sont un stock de sable pour les plages et diminuent les fortes vagues. Ils empêchent ainsi des matériaux déplacés vers le large. Ils ont été fragilisés par le piétinement de la végétation à protéger. Cela a favorisé l'érosion marine par l'action des facteurs naturels. Ce piétinement est accentué l'été par la présence de camping sauvage, l'augmentation du nombre de véhicules, et des dégradations variées (SDAGE RMC, 2005).

L'extraction de matériaux sédimentaires dans l'embouchure des fleuves, directement sur la plage ou en mer aggrave encore le déficit sédimentaire (SDAGE RMC, 2005).

De plus, l'activité pendant la période estivale amène aussi les effets néfastes des modifications morphologiques. En effet, le nettoyage intensif des plages avec des machines entraîne une déstructuration de la couche superficielle du sable. Cette couche devient plus sensible à l'action du vent. Le vent peut provoquer l'érosion du pied de dune (SDAGE RMC, 2005).

Certains littoraux fragiles ont été déstabilisés par la croissance de la fréquentation à terre qui joue un rôle important en amorçant les phénomènes d'érosion côtière (SDAGE RMC, 2005).

#### iii. Fréquentation en mer

La fréquentation mal contrôlée peut provoquer la destruction de certains secteurs des herbiers de posidonies (SDAGE RMC, 2005). Certains polluants qui sont rejetés à la mer par l'homme, sont toxiques pour les herbiers de posidonies, qui ont des actions protectrices pour les plages. Les herbiers infralittoraux de posidonies constituent une protection contre la houle en amortissant son énergie (SDAGE RMC, 2005). La disparition des posidonies provoque le creusement et l'instabilité des fonds, et augmente le risque d'érosion des plages (SDAGE RMC, 2005).

## 1.6.3. Mesures de protection contre l'érosion marine

Les techniques du génie côtier sont généralement distinguées en deux grandes familles de techniques : les techniques « dures » et « douces ». Les techniques « douces » sont de nature biologique tels que la plantation d'oyats, de ganivelles (palissades de châtaignier qui font obstacle au vent) qui permettent de fixer les dunes et sont efficaces mais agissent surtout sur l'érosion par le vent. Les techniques « dures » sont la mise en place d'ouvrages d'art tels qu'épis, brise-lames, et enrochements. Ces techniques ont cependant une efficacité sujette à caution. Après une phase d'amélioration rapide, elles aboutissent souvent à une aggravation de l'érosion des secteurs adjacents, ce qui demande une installation de nouveaux ouvrages d'art et un cercle vicieux s'installe. En d'autres termes, elles permettent de résoudre localement le phénomène d'érosion côtière mais s'avèrent non appropriées lorsqu'il s'agit de protéger un linéaire côtier dans son ensemble.

Il existe une autre classification des méthodes et des techniques de lutte contre

l'érosion des côtes à partir de trois modes essentiels d'intervention : rechargement des plages, renforcement du trait de côte, et atténuation de la houle par les ouvrages en mer (ERAMM, 2001).

Le phénomène d'érosion marine est de plus en plus préoccupant. Plusieurs techniques de protection des littoraux sont apparues au cours des dernières décennies dans le monde entier. Ces technologies ont pour but d'atténuer ou de dissiper l'énergie de la houle avant qu'elle n'arrive au rivage. Elles offrent des avantages environnementaux en diminuant l'influence sur les fonds marins. Néanmoins, peu de systèmes ont été installés en Europe en général et particulièrement en France. Dans la plupart des cas, ERAMM (2001) recomande que le rechargement des plages accompagné ou non d'ouvrages en enrochements est préféré.

## **1.7.** Conclusions

Plusieurs approches dans l'étude d'évolution des côtes et des fonds marins sont présentées. Les modèles mathématiques sont largement utilisés dans le monde. Ils sont appliqués avec certains succès aux littoraux français. Ils jouent un rôle important sur la recherche de l'évolution du littoral. Leurs applications nous permettent d'améliorer notre compréhension de l'évolution du littoral. Les modèles numériques se composent des modèles de vague, de circulation, de transport sédimentaire, et d'évolution du trait de côte.

L'érosion des plages affecte de nombreux pays dans le monde. En effet, 70% de plages s'érodent alors que seulement 10% s'avancent. En Europe, environ 20% des côtes sont reculées. La majorité des littoraux sableux français recule sous l'action de la mer. Près de 50% des côtes sableuses méditerranéennes ont tendance à aller vers l'érosion. Ces érosions sont causées par de nombreux facteurs naturels (les vagues, les courants, les tempêtes, et les apports sédimentaires, etc. …) et des activités humaines (l'aménagement du littoral, l'urbanisation). De nos jours, plusieurs techniques de protection du génie côtier sont exposées dans le monde. Elles sont classées en deux groupes : les techniques « douces » et « dures ».

# Chapitre 2. Acquisition et traitement des données disponibles

Le suivi de l'évolution des plages du tombolo a été fait de 1998 jusqu'en 2010. L'information sur la bathymétrie, la topographie et le profil ont été enregistrées. Pour la zone menacée du tombolo, les mesures in-situ de la houle, du courant et de sédiment ont été réalisées en 2000 (à l'Almanarre) et en 2009 (à la Capte). Ces mesures ont été réalisées sous différentes conditions météorologiques.

Ce chapitre récupérera et traitera toutes les données brutes disponibles. Les données nécessaires aux modèles de prévisions sont les données de terrain (les bathymétries et le trait de côte), les dynamiques météo-marines (vents, pression atmosphérique, houles, courants, et niveaux marins), la nature des fonds, et les biocénoses, et des observations du milieu en s'appuyant sur le centre de données <u>CORIOLIS</u>. Ce chapitre a pour but de créer ses propres données pour les modèles appliqués au secteur d'étude. Au cours de ce chapitre, nous travaillerons avec de grandes quantités de données. Alors, il est nécessaire de trouver la meilleure façon de les gérer et de créer des codes Matlab qui nous permettent de traiter plus facilement ces données.

## 2.1. Site d'étude

La situation géographique privilégiée d'Hyères en fait la ville la plus au Sud de la Provence. La ville de Hyères est située entre Carqueiranne et la Londe-les-Maures. Elle est sensiblement à la même latitude que le Cap Corse et Florence. La distance de l'Ouest à Carqueiranne est de 8 à 10 kilomètres, pour Toulon par autoroute elle est de 18 à 19 kilomètres ; la distance de l'Est à la Londe-les-Maures est de 9 à 11 kilomètres, à Saint Tropez de 40 kilomètres. C'est une commune très étendue. Elle offre plusieurs paysages exceptionnels avec 39 kilomètres de côtes sableuses et rocheuses (Moha, 2014). Le paysage hyérois est embelli par la présence de marais salants (Moha, 2014). La presqu'île de Giens se situe sur la commune d'Hyères (Var) et compte 24 plages (Figure 2-1, p. 66). Nous pouvons y aller par la route du Sel ou par la route de la Capte.

Le tombolo oriental, le plus important (7 kilomètres de long sur 350 mètres de large), est engraissé par les apports du Pansard et du Gapeau. Le tombolo occidental, long de 4,5 kilomètres, large au maximum de 80 mètres et constitué de sable et de

petits galets est plutôt étroit et bas (guère plus de 2,5 à 3,5 mètres d'altitude). Il y a plusieurs parkings le long de la route du Sel du tombolo occidental (Antoine, Année inconnue). Sa partie Nord est fortement déformée. Le tombolo occidental est limité dans son extension à l'Est par le canal de ceinture de l'étang des Pesquiers. La zone d'étude choisie est la plage de l'Almanarre, sur la partie ouest de la presqu'île de Giens, située dans la moitié Nord du tombolo occidental.



Figure 2-1 : Situation de la presqu'île de Giens (A), le tombolo (B) et la plage de l'Almanarre (C) (Source : <u>Google Earth</u>, PlagesMed).

## 2.2. Numérisation des documents fournis par la ville de Hyères

Tous les documents (thèses, rapports, et cartes) en relation avec l'évolution du tombolo (section 1.3) ont été numérisés à l'aide d'un scanner à plat A4 (CanoScan4200F de Canon), à l'aide de CanoScan Toolbox 4.6, en mode Color (défaut) avec une résolution de 300 dpi.

Nous avons écrit les codes de création des visualisations sur Google Earth (Annexe B, p. - 9 -) tels que <u>line2kml.m</u>, <u>poly2kml.m</u>, et <u>kmlMerge.m</u> sous Matlab afin de reproduire les figures des références citées dans Google Earth.

## 2.3. Données de terrain disponibles

L'utilisation d'un MNT précis est essentielle pour représenter avec précision les phénomènes d'agitation et de courants au droit du site d'étude. Nous exposons dans ce qui suit des méthodes d'acquisition et de traitement des données de terrain afin de faire des maillages du site.

## 2.3.1. Acquisition

Nous allons expliquer les sources des bathymétries et du trait de côte pour le site d'étude.

## 2.3.1.1. Bathymétries

Trois types de données ont été collectés et fusionnées pour créer notre MNT final, à savoir la base de données européenne EMODnet Gridded Bathymetry (<u>EGB</u>), <u>Litto3D</u> <u>de SHOM</u> et la campagne bathymétrique réalisée sur l'ensemble de la zone d'étude par EOL.

#### a) Données d'EGB

La base de données d'EGB permet d'obtenir des données sur la bathymétrie européenne avec une résolution de 0,25 minutes d'arcs en utilisant la meilleure bathymétrie disponible à partir d'une variété de sources et de méthodes. La couverture est encore incomplète et certaines données n'ont été recueillies qu'il y a plusieurs années, mais de nouvelles données et d'autres ensembles de données existants sont disponibles, les lacunes seront comblées et la grille mise à jour.

La bathymétrie de la zone de Toulon à Cavalaire est représentée par la figure 2-2A. Nous pouvons créer les profils du golfe de Giens à partir des bathymétries d'EGB (Figure 2-2B).



*Figure 2-2 : (A) Bathymétrie de la zone de Toulon à Cavalaire. (B) Profil du golfe de Giens à l'Almanarre (Source : <u>portal.emodnet-bathymetry.eu</u>).* 

#### b) Données de Litto3D

Le Litto3D crée un MNT, continu terre-mer sur la frange littorale. Des technologies de mesure sont composées de la technique du lidar et des sondeurs multifaisceaux

(Figure 2-3).



Figure 2-3 : (A) Technologies de mesures des topographies et bathymétries. (B) Bathymétrie du littoral hyérois à partir des données Litto3D (Source : <u>IGN</u> et <u>SHOM</u>).

Deux lasers aéroportés de type lidar sont installés : un laser bathymétrique pour les profondeurs marines et un laser topographique pour le relief terrestre. Un sondeur multifaisceaux est utilisé dans les zones immergées plus loin du rivage. En se basant sur des données de Litto3D, nous pouvons déterminer la modification des bathymétries dûes à l'érosion pour étudier la protection du littoral (Source : <u>www.geoportail.gouv.fr</u>). A la ville de Hyères, les données bathymétriques de Litto3D couvrent le tombolo, la petite rade de Toulon et une partie de la grande rade de Toulon. Les bathymétries du tombolo sont illustrées sur la figure 2-4A.



Figure 2-4 : Surface 3D de bathymétrie du tombolo occidentale à partir des données Litto3D (A) et à partir des données d'EOL en automne 2008 (B) (Lacroix et al., 2015a).

#### c) Campagne bathymétrique d'EOL

Les données de bathymétrie disponibles fournies par l'association EOL et la ville de Hyères sont sous forme de fichier PDF, DBF, DWG avec les coordonnées X, Y, et Z. Nous avons converti ces fichiers au format XYZ.

Les matériels utilisés sont un D-GPS (« *Differential Global Positionning System* ») Trimbel ProXRS et un sondeur Tritech. La précision en Z dans la mesure des profondeurs est de 0,5 à 50 millimètres. L'incertitude de la mesure peut atteindre de 10 centimètres jusqu'à 8 mètres de profondeur (Courtaud, 2000).

La bathymétrie réalisée sur le site d'étude permet de voir, avec précision, les trous et les chenaux longitudinaux et transversaux de la plage de l'Almanarre. Les bathymétries sont présentées dans la figure 2-4B.

#### 2.3.1.2. Trait de côte

Le trait de côte est la limite entre le domaine terrestre et le domaine marin. Il est téléchargé à partir des bases de données de Histolitt de <u>Géoportail</u> ou de <u>SHOM</u> (Figure 2-5). Le trait de côte Histolitt est disponible sur la côte française. C'est un produit commun au <u>SHOM</u> et à l'<u>IGN</u>.

Au niveau de la zone étudiée, nous pouvons déterminer le trait de côte à partir des données d'EOL et de Litto3D. Il se compose des points bathymétriques à 0 mètres de profondeur.



*Figure 2-5 : Trait de côte HISTOLITT*® *dans la base de données maritimes et littorales de SHOM (Source : <u>data.shom.fr</u>).* 

## 2.3.2. Traitement

Nous traiterons d'abord les données de bathymétries collectées à partir du zéro hydrographique qui sera utilisé dans tous nos calculs. Nous allons ensuite créer les bathymétries et le trait de côte sous le format adapté à MIKE. Le maillage du site d'étude sera établi. Ensuite, nous préparons la grille en 3-D des bathymétries et présenterons les méthodes de la détermination des changements de volumes bathymétriques. Les visualisations de données de terrain seront enfin exposées.

#### 2.3.2.1. Création des bathymétries sous la forme XYZ

Les fichiers d'EGB sont sous la forme XYZ. Ses coordonnées en longitude et en latitude sont en LONG/LAT et ses bathymétries (Z) sont exprimées en mètres. Les données d'EOL sont en Lambert III Sud (Courtaud, 2000). Les bathymétries d'EGB et d'EOL ont subi la transformation associée à la projection en Lambert 93.

Les données Litto3D sont fournies en grille ASCII (format « \*.ASC », aussi connu comme un « *ASCII GRID ARC/INFO* ») en projection Lambert 93. Nous avons créé le code Matlab (<u>asc2xyz.m</u>) afin de convertir des fichiers au format grille ASCII au fichier au format XYZ (Annexe B, p. - 9 -).

#### 2.3.2.2. Création du trait de côte sous la forme XYZ

D'abord, les données de trait de côte d'IGN-SHOM est sous la forme « \*.DWG » en projection Lambert 93. Nous utilisons <u>AUTOCAD</u> pour l'exportation de données bathymétriques de sortie dans le format XYZ sous la forme de trois colonnes de coordonnées.

Ensuite, en se basant sur des données bathymétriques - topographiques d'EOL et de Litto3D sous la forme XYZ, nous interpolons les valeurs du zéro mètre NGF dans Matlab. Puis, nous exportons ces points dans le format «\*.XYZ ». Nous avons créé le code Matlab <u>extractCoastline.m</u> et <u>extractContour.m</u> afin d'extraire les contours à partir des fichiers bathymétriques-topographiques au format XYZ (Annexe B, p. - 9 -).

#### 2.3.2.3. Création 2D Bathymétries sous le maillage

Le module « *Mesh Generator* » nous offre un environnement pour la création, l'édition et la présentation de bathymétries numériques 2D détaillées. « *Mesh Generator* » génère un format souple de maillage (\*.MESH) (DHI, 2014l). Le programme nous fournit les utilitaires pour importer des données du trait de côte, notamment les bathymétries. Pour faciliter le processus d'élaboration manuelle des données et leur présentation, des cartes graphiques des images de fond peuvent être importées et superposées aux données bathymétriques (DHI, 2014l). Diverses options d'interpolation sont disponibles pour fournir la meilleure méthode possible pour notre type de données. Lorsque la bathymétrie a été préparée, nous pouvons utiliser les utilitaires d'exportation de données bathymétriques de sortie dans différents formats (DHI, 2014l).

La création d'une bathymétrie est généralement divisée en les phases suivantes : le choix du système de projection, le traitement des données bathymétriques XYZ, la

génération du maillage et l'interpolation des valeurs bathymétriques sur le maillage.

#### a) Système de projection

Il nous faut choisir le système de projection pour la conception du maillage. Ce choix influence le format de l'affichage sur la carte. Les systèmes de projection des données de trait de côte et de bathymétrie peuvent être différents. Il nous faut uniformiser ces données par rapport au système choisi lors de l'importation de ces données dans MIKE21. En effet, les données collectées sont projetées en LONG/LAT et Lambert III Sud. Nous devons transformer la projection Lambert 93 à l'aide d'un module de conversion disponible dans MIKE21. Quand nous travaillons sur beaucoup de fichiers XYZ, il n'est pas facile de transformer la projection avec ce module. Il est plus facile de le faire à l'aide des codes Matlab que nous avons créés : <u>datumConvert.m</u>, <u>datumConvertc.m</u>, et <u>datumConvertLarge.m</u> (Annexe B, p. - 9 -).

#### b) Traitement des données bathymétriques XYZ

Nous avons récupéré plusieurs types de données : données d'EGB, données de Litto3D et données d'EOL. Pour combiner ces données, nous avons besoin d'effacer les points bathymétriques (fichier « \*.XYZ ») à l'extérieur du site d'étude et à l'intérieur de la zone des données Litto3D et EOL. Il y a deux façons de le faire. La première façon consiste à utiliser le module « *Mesh Generator* » dans MIKE21 pour effacer les points nécessaires. Les données obtenues sont enregistrées sous la forme XYZ grâce à ce module. Cette méthode est manuelle et peu pratique. La deuxième consiste à créer des codes sous Matlab pour effacer les points nécessaires (code <u>clearBathy.m</u>, Annexe B, p. - 9 -) et regrouper les restants dans un fichier « \*.XYZ » (code <u>mergeBathy.m</u>, Annexe B). Elle est automatique et très pratique.

#### c) Génération de la géométrie du maillage

A l'aide du module « *Mesh Generator* » dans MIKE21, nous pouvons d'abord importer le trait de côte à partir des données transformées précédemment (fichier « \*.XYZ »). Nous devons assurer que les lignes du trait de côte soient bien fermées lors de l'importation d'une série de lignes. Nous utilisons l'outil *Redistribute Vertices* dans MIKE21 pour redistribuer les points sur les lignes. Cela nous permet de générer un maillage le plus régulier possible. Puis, les données bathymétriques (fichier « \*.XYZ ») sont importées dans le fichier de maillage.

Pour créer un maillage, d'une part, il nous faut enlever les points anormaux (à l'extérieur des limites du contour) et les contours anormaux de la bathymétrie dans le cas de l'utilisation des différentes sources de données. D'autre part, nous devons déterminer des limites des zones plus raffinées du maillage par des arcs.

Nous notons que la vitesse de calcul est proportionnelle à la taille du plus petit élément du maillage. En effet, le modèle MIKE21 choisi le pas de temps afin d'assurer la condition de stabilité CFL inférieure à 1 pour tous les éléments. Cependant, cette condition est la plus restrictive pour le plus petit élément. La vitesse de l'ensemble de la simulation est diminuée par un élément anormalement petit.

#### d) Interpolation des valeurs bathymétriques sur le maillage

Le générateur de maillage donne des possibilités à l'égard de deux interpolations pour les éléments triangulaires. Les deux routines d'interpolation sont possibles : le voisin naturel et l'interpolation linéaire. Elles sont indépendantes du type de maillage utilisé.

#### 2.3.2.4. Création de la grille en 3-D des bathymétries

Nous avons utilisé <u>Surfer</u> pour la création des grilles. La grille s'établit à partir d'une grille issue des points de mesures de Litto3D et d'EOL. Il nous faut interpoler une grille de nouvelles valeurs à partir des valeurs initiales sur ces grilles. Il existe plusieurs méthodes d'interpolation mais il n'y a pas de méthode parfaite (Courtaud, 2000). Nous avons utilisé l'interpolation par méthode de *Kriging*. Le résultat est une grille avec les points uniformément répartis.

## 2.3.2.5. Estimation des variations de volumes bathymétriques

Pour le calcul des volumes des grilles, il y a plusieurs outils tels que <u>Surfer</u>, <u>Saga</u>, et <u>Matlab</u>. Ils permettent d'estimer le volume entre deux surfaces définies (Courtaud, 2000). Elle se fait sur des formes solides définies par deux surfaces de grille. Ces volumes sont calculés pour chaque élément de la grille par différence des élévations entre deux surfaces de grille. Il existe trois méthodes pour les estimer: « *Trapezoidal Rule », « Simpson's Rule »,* et *« Simpson's 3/8 Rule »* dans <u>Surfer</u>. La marge d'erreur pour ces méthodes ne dépasse jamais 0,05% du volume obtenu (Courtaud, 2000).

## 2.3.2.6. Création des visualisations de données de terrain disponibles

Dans cette section, nous allons expliquer comment nous visualisons sur une carte le trait de côte et les bathymétries dans Google Earth. Nous pouvons également afficher nos données de terrain, leur analyse et notre prise de décision dans Google Earth. C'est une bonne alternative à l'affichage de ceux-ci. Elles seront d'abord importées dans Google Earth. Nous allons ajouter ensuite des informations sur des points, des lignes et des polygones supplémentaires afin de mieux raconter l'histoire de notre collecte de données de terrain. Il est possible de lancer l'animation à l'aide de la barre d'outils « *Timeline* » dans Google Earth. Les résultats seront enfin exportés sous la forme support KML ou KMZ. Pour les visualiser, Google Earth est la meilleure solution (plus simple et plus vite).

Nous avons écrit les codes sous Matlab permettant la visualisation des données de
terrain sur Google Earth. Les processus sont présentés sur la figure 2-6. Nous pouvons citer les codes suivants (Annexe B, p. - 9 -) :

- Les bornes EDF (Électricité de France) à l'Almanarre sont chargées dans Google Earth à l'aide du code <u>point2kmlBornes.m</u> sous Matlab ;
- Les bathymétries sont affichées sur Google Earth à l'aide des codes xyz2kmlContour.m et xyz2kmlContourf.m (contour rempli);
- Pour afficher les fichiers de maillage (« \*.MESH ») et de grille de MIKE21 (« \*.DFS2 ») sur Google Earth, les codes Matlab sont <u>meshtokml.m, dfs2kml.m</u>, et <u>dfs2kmlf.m</u>.



Figure 2-6 : Description de la visualisation des données de terrain disponibles.

# 2.4. Données de forçages météo-marins disponibles

Nous allons exposer d'abord une acquisition des forçages météo-marins. Ils seront ensuite traités afin d'élaborer une base de données adaptée à MIKE.

## 2.4.1. Acquisition

Nous allons présenter les données de vent, de niveau marin, de houle, et de courant provenant de leurs observations et leurs simulations.

## 2.4.1.1. Données de vent disponibles

Les vents observés et simulés seront récupérés à partir de plusieurs sources différentes.

#### a) Observations du vent

Il existe cinq stations météorologiques à proximité du tombolo (Figure 2-7). Les vents trihoraires à ces stations sont très différents. Ils sont enregistrés sur une longue période (plus de trente ans) à toutes les stations. Les travaux de SOGREAH (1988a) ont utilisé les vents trihoraires à partir des fiches de Météo France (Courtaud, 2000).

Plusieurs sites nous permettent de collecter des données METAR/SYNOP, par exemple, les sites<sup>1</sup> dans les notes à la fin de la thèse (Notes, p. 349). A la station

météorologique de Toulon - La Mitre, les observations synoptiques (SYNOP) se trouvent sur le site <u>www.ogimet.com/synops.phtml.en</u> pour 2003 à 2014. Celles à Porquerolles se trouvent aussi sur le site <u>www.ogimet.com/synops.phtml.en</u> pour la même période. Le vent et les conditions atmosphériques sont relevés par la station météorologique d'Hyères le Palyvestre, dont l'historique est consultable sur <u>www.meteociel.com</u>. Les observations METAR à cette station se trouvent sur le site <u>www.ogimet.com/metars.phtml.en</u> pour la période de 2005 à 2014. Cette station est particulièrement bien exposée au vent marin et adaptée à l'étude des vents associés aux tempêtes marines.



*Figure 2-7 : Localisation de cinq stations météorologiques : La Mitre, Cap Cépet, Le Palyvestre, Île de Porquerolles et Île du Levant (Source : <u>www.google.com/earth</u>).* 

#### b) Champs de vent des modèles existants

Nous pouvons bénéficier de plusieurs outils de prévision du vent dans le secteur d'étude tels que la réanalyse NCEP/NCAR de la NOAA, la réanalyse du centre européen de météorologie (ECMWF), le modèle ARPEGE HR par Météo-France, et le modèle GFS 50 km de WindGURU. Par exemple, les champs de vent issus de la réanalyse ERA 40 de l'ECMWF sur la période du 1er Janvier 1979 au 31 Août 2002 (Source : www.ecmwf.int). Ils sont aussi sortis du modèle ARPEGE HR de résolution 10 kilomètres et rafraichis quotidiennement (Source : www.meteofrance.com). Windguru est un service de prévisions et utilise GTOPO30 et SRTM comme données d'altitude (Source : www.windguru.cz). La prévision des vents à l'Almanarre est réalisée par Windguru. Nous retrouvons les simulations de vent aux points à proximité du tombolo tels que l'Almanarre, la Madrague (Almanarre), la Californie, le Mourillon, les Sablettes, la Bergerie, les Salins & La Londe, et Brégançon pendant la période de 2003 à 2014 sur le site www.windguru.cz/fr/historie.php.

## 2.4.1.2. Données de niveau marin disponibles

La zone d'étude manque de données, ce qui pose un problème de fiabilité des résultats. Malgré tout, cette section présente les variations marégraphiques associées à différentes échelles de temps, grâce aux quelques enregistrements in situ et de proximité (Courtaud, 2000). Il existe différentes sources des données de marée disponibles tels que SHOM, IOC, PSMSL (les valeurs statistiques des moyennes mensuelles et annuelles), et CSMSE (Tableau C-4, p. - 15 -). Les évolutions du niveau de

la mer du tombolo sont régulièrement décrites à partir des données de Toulon (SOGREAH, 1988d; IARE, 1996; Courtaud, 2000).

#### a) Mesures

#### i. Réseau marégraphique RONIM

Un réseau de marégraphes côtiers numériques a été installé par le SHOM sur les côtes françaises depuis 1992 (Creach et Goasguen, 2008). C'est le Réseau d'Observation du NIveau de la Mer (RONIM). Le RONIM est un réseau d'observation mis à disposition sur le système REFMAR à l'adresse <u>refmar.shom.fr</u>. Nous retrouvons aussi les données des observations de niveaux sus le site <u>www.ioc-sealevelmonitoring.org</u>. Les mesures du réseau RONIM sont des données brutes en temps réel (mesure toutes les minutes, moyennées sur 15 secondes) et des données validées par le SHOM en temps différé (mesures toutes les 10 minutes, moyennées sur 2 minutes). Les données moyennes journalières, mensuelles et annuelles du niveau moyen de la mer sont disponibles sur le site <u>www.sonel.org</u>.

#### ii. Réseau marégraphique SONEL

Le Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales (SONEL) nous donne les mesures des réseaux marégraphiques français depuis 1999. Le portail est établi par l'Université de la Rochelle avec l'adresse Internet <u>www.sonel.org</u>. Les données sont gratuites pour l'enseignement et la recherche. Les données en temps réel sont conservées et partagées par le SHOM. Nous retrouvons les données des observations de niveaux sur le site <u>refmar.shom.fr</u>. La visualisation des données en temps réel est possible sur le site <u>www.previmer.org</u> du projet Previmer (Creach et Goasguen, 2008). Le SONEL présente les variations moyennes journalières, mensuelles, et annuelles à long terme du niveau de la mer à Toulon.

#### iii. Permanent Service for Mean Sea level (PSMSL)

Créé en 1933, le PSMSL a été responsable de la collecte, la publication, l'analyse et l'interprétation des données de niveau de la mer à partir du réseau mondial de marégraphes. Elle est basée à Liverpool au National Oceanography Centre (NOC), qui est une composante de la Natural Environment Research Council du Royaume-Uni (NERC). Le PSMSL est membre de la Fédération des services astronomiques et géophysiques (FAGS), qui est en train de restructurer le cadre du Système de données dans le monde. Le portail est accessible via l'adresse suivante : www.psmsl.org/data/obtaining/stations/61.php (Source : www.psmsl.org). La figure 2-8 montre que les données enregistrées des niveaux moyens mensuels et annuels de la mer à Toulon sont discontinues (peu d'années et souvent incomplètes entre 1970 et 1990). Les niveaux moyens mensuels varient de 6 837 à 7 202 mm RLR (Figure 2-8). Les niveaux moyens annuels oscillent entre 6 966 et 7 097 mm RLR (Figure 2-8).



Figure 2-8 : Données moyennes mensuelles (en haut) et annuelles (en bas) du niveau moyen de la mer (mm) par rapport au datum « Revised Local Reference » (RLR, voir la section 2.4.2.2. p. 95) à Toulon (Source : <u>www.psmsl.org</u>).

#### iv. Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est à la Capte



*Figure 2-9 : (A) Localisation de la station marégraphique CSMSE à la Capte (Source : <u>www.google.com/earth</u>). (B) ADCP à la position 1 en rade de Toulon (Dufresne, 2014).* 

Depuis 1971, la Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est (CSMSE) a fait des mesures météo-marines à la Capte (Figure 2-9). Les niveaux marins ont été enregistrés à l'aide d'une échelle de marée correspondant au zéro NGF (Courtaud, 2000).

Environ 98% des données disponibles sont du 8 Novembre 1984 au 22 Février 1996. Les données manquantes représente 11,4% (Courtaud, 2000). Il est difficile de prédire les tendances de la marée en cas de manque d'enregistrements pendant une longue période.

#### v. Données de l'ADCP dans la rade de Toulon

Les mesures de niveau marin issues du marégraphe et de l'ADCP sont illustrées respectivement en noir et rouge dans la figure 2-9B. L'ADCP a été installé à la position 1 (43° 05,334' N ; 05° 56,044' E) au niveau de 30 mètres de profondeur entre Juin et Octobre 2009 (Dufresne, 2014).



Figure 2-10 : Elévation du niveau marin du chenal de navigation en position 1 : mesuré par l'ADCP (rouge), par le marégraphe (noir) et modélisé par le modèle MARS3D (bleu) (Dufresne, 2014).

Les élévations de niveau marin sont comparées entre les mesures et la simulation par Dufresne (2014). Les deux données in situ présentent l'oscillation de la marée. Les épisodes de Mistral et de vent d'Est sont respectivement mis en évidence par les boîtes bleues et oranges (Figure 2-10). Dans la période de Mistral, les niveaux marins mesurés par le marégraphe sont inférieurs à ceux mesurés par l'ADCP (Dufresne, 2014). Dans l'autre cas, les deux mesures sont similaires (Dufresne, 2014).

#### b) Simulation numérique

Les données des niveaux d'eau du modèle Méditerranée MARS3D sur Previmer à 1,2 kilomètres de résolution concernent deux façades, Atlantique et Méditerranée. Le modèle MARS3D à haute résolution (une résolution horizontale de 100 mètres) a été appliqué à la rade de Toulon avec les forçages météorologiques *Mesoscale Model 5 (MM5)* et Météo-France par Dufresne (2014). Dans ce modèle, les niveaux d'eaux sont

calculés dans la condition sans marée sous l'effet combiné du vent (Mistral, vent d'Est, et temps calme) et des forçages atmosphériques MM5 (Figure 2-10) (Dufresne, 2014).

#### 2.4.1.3. Données de houle disponibles

D'abord, les données de houle au large de la région toulonnaise sont issues des fetchs et des vents, des observations des navires au large de Giens, des mesures de houles réalisées au large. Puis, elles sont aussi construites à partir des simulations numériques tels que les données sur Previmer, sur ECMWF, et l'atlas numérique de houle ANEMOC (Section 2.4.1.3. f) . Enfin, à la côte du tombolo elles sont issues des mesures de houles réalisées à l'Almanarre en 2000, à la Capte en 2009, au Pradet en 1999, et au Cap Cépet en 1994.

#### a) Données à partir des fetchs et des vents

La caractéristique des houles au large a une relation avec les fetchs, la durée moyenne du vent et la direction de provenance. Les résultats des périodes et hauteurs de houle significatives à partir de l'abaque de Bretschneider sont présentés dans le tableau 2-1 (ERAMM, 2001).

Tableau 2-1 : Evaluation des caractéristiques de la houle au large à partir des fetchs (ERAMM, 2001).

	Fetch (km)	Durée des évènements (heure)	Période T <sub>p</sub> (s)	H <sub>s</sub> (m)
WSW (N260°)	250	6:00	8	3,5
SW (N215°)	400	10:00	9	4,0
SSW (N200°)	720	12:00	10	4,5

Nous constatons que les houles de direction de 200 à 215 degrés Nord avec un long fetch et une longue durée sont plus fortes que celles de direction de 260 degrés Nord (Tableau 2-1). Les houles de Sud-Ouest provoquent une forte agitation dans le golfe de Giens. Elles menacent l'équilibre du tombolo occidental.

#### b) Données à partir des fetchs locaux

La houle au large se propage vers le golfe de Giens et provoque une agitation locale. Cette agitation est augmentée par les vagues dûes aux vents locaux avec les fetchs entre le Cap Sicié et la plage de l'Almanarre. Les hauteurs et périodes des vagues sont calculées en fonction des vitesses et directions des vents locaux à l'aide des abaques de Breitschneider (ERAMM, 2001). Ils sont exposés dans la figure 2-11.

Pour des coups de vent très violents de secteur Ouest de 20 à 25 mètres par seconde (ERAMM, 2001), l'agitation et la période des vagues peuvent atteindre plus de 1 mètre et plus de 4 secondes, respectivement (Figure 2-11).



*Figure 2-11 : Hauteurs et périodes des vagues levées localement par les vents dans le golfe de Giens [d'après SOGREAH (1988d), ERAMM (2001), modifié].* 

#### c) Observations de navires de la houle par KNMI

Les observations de la vague (hauteurs, périodes, et directions) sont réalisées par les navires depuis 1949 (Olagnon et al., 1992). Elles ont été recueillies sous la coordination de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Les données sont conservées par les agences météorologiques nationales responsables d'une zone déterminée. Elles constituent des données homogènes grâce aux recommandations de l'OMM (Olagnon et al., 1992).



Figure 2-12 : Hauteur-direction réalisée à l'aide des observations faites à partir des observations des navires (<u>KNMI</u>) entre 1961 et 1980 (ERAMM, 2001).

Dans le golfe de Giens, nous notons qu'il y a des observations de navires (KNMI) dans la période de 1961 à 1980 dans le secteur 42-43,5°N/5,5-6,5°E. La rose des houles au large est établie (Figure 2-12). Elle présente une relation entre hauteur significative ( $H_s$ ) et direction de la houle (MWD). Le régime des houles d'Ouest est le plus fréquent. Sa hauteur la plus fréquente est de 2 à 3 mètres. Par contre, le régime des houles de Sud-Ouest est peu fréquent et sa hauteur peut atteindre de 5 à 7 mètres (ERAMM, 2001).

#### d) Observations de la houle à la côte

Le travail de la société SOGREAH nous donne d'abord la répartition des hauteurs de houle résiduelles à la côte à proximité du tombolo occidental : au Cap Cépet et à Porquerolles qui est représenté sur la figure 2-13 (ERAMM, 2001).



Figure 2-13 : Fréquence des hauteurs de houle (240 à 60 degrés Nord sens des aiguilles d'une montre) au Cap Cépet de 1968 à 1979 (A) et à Porquerolles entre 1955 et 1979 (B) [d'après SOGREAH (1988d), ERAMM (2001), modifié].

A la lecture des données de la figure 2-13, nous constatons que dans le secteur de 240 à 60 degrés Nord, la plupart des hauteurs moyennes des vagues est inférieure ou égale à 0,5 mètre et les hauteurs supérieures à 0,5 mètre représentent seulement environ 5% (ERAMM, 2001).

Le travail de COOPER (1977) nous présente ensuite des observations de fréquence de hauteur d'agitation pendant des périodes de 3 ans (de 1977 à 1980) à 5 ans (de 1975 à 1980) sur trois stations d'observation de l'Almanarre, du Passe-pied et du Sud dans le golfe de Giens. Ces observations sont montrées dans la figure 2-14. Elles montrent que 25% environ des hauteurs de houle (Figure 2-14) sont supérieures à 1,5 mètres (ERAMM, 2001).



Figure 2-14 : Nombre de jours (A et B) et fréquence (C et D) des hauteurs d'agitation à l'Almanarre pendant la période de 1977 à 1980 (A et C) et au "Passe-pied" et Sud pendant la période de 1975 à 1980 (B et D) [d'après ERAMM (2001), modifié].

#### e) Mesures in-situ de la houle

#### i. Réseau de bouée CANDHIS du CETMEF

Le Centre d'Études Techniques Maritimes Et Fluviales (CETMEF) gère un ensemble de bouées sur le littoral français à partir de 1972. CETMEF enregistre les paramètres d'états de mer dans une base de données CANDHIS (Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ) par l'utilisation des bouées directionnelles ou omnidirectionnelles (Creach et Goasguen, 2008).

Les données de houle sont le résultat de mesures in situ. Dans la période de tempête, il existe un risque d'interruption des mesures à cause des problèmes de transmission et/ou d'autonomie (CETMEF, 2011). Cela entraîne une perte d'information sur les événements extrêmes. Il est important de prendre en compte ces éléments pour toute utilisation des résultats présentés.

Les données disponibles sont accessibles via l'adresse Internet suivante : <u>candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/carte.</u> Grâce à ce site, l'état de la mer

en « temps réel » sera exploré heure par heure. Nous pouvons récupérer les métadonnées, les histogrammes et les corrélogrammes disponibles dans la base de données (Creach et Goasguen, 2008).

La bouée de Porquerolles se situe à proximité du tombolo : la bouée 08301/08302. Le nombre de mesures de la campagne du houlographe 08301/08302 est présenté dans la figure 2-15/le tableau C-7, p. - 21 -.



■ janv. ■ févr. ■ mars ■ avril ■ mai ■ juin ■ juil. ■ août ■ sept. ■ oct. ■ nov. ■ déc.

*Figure 2-15 : Nombre de mesures de la campagne du houlographe 08301 (Source : CANDHIS, modifié).* 

Ces données sont traitées statistiquement par le CETMEF. Elles sont collectées sous la forme d'histogrammes des hauteurs et périodes significatives de houle au large (Figure C-8, p. - 22 -), de corrélogramme entre la fréquence, la hauteur et la période (Tableaux C-6 et C-8, p. - 21 -) et de graphique des périodes de retour de la houle (Courtaud, 2000). Le tableau 2-2 montre la corrélogramme entre la hauteur significative et la période de pic des vagues dans la condition annuelle.

Tableau 2-2 : Corrélogramme  $H_{m0}/T_p$  à la campagne 08301 – Porquerolles (042°58,000' N, 006°12,290' E), 90 mètres de profondeur dans la condition annuelle (Source : <u>CANDHIS</u>).

H <sub>m0</sub> (m)							Tp (Secon	des)						
0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	15	16.5 - 27	28.5	30	Total
0.5		1705	8088	5522	4391	2082	252	8	2	1		6		22057
1		837	8434	13261	7386	2398	312	7						32635
1.5		7	2079	6543	9544	3387	146	9	1					21716
2			336	2418	7068	5982	310	15						16129
2.5			21	846	3601	6880	581	23	11					11963
3				166	1482	4866	829	26						7369
3.5				7	475	2530	682	20						3714
4					86	1108	402	38						1634
4.5					13	378	220	33	2					646
5					1	88	89	18	1					197
5.5						18	35	7						60
6						6	22	2						30
6.5							6	1						7
7							1	1						2
Total		2549	18958	28763	34047	29723	3887	208	17	1		6		118159
Note:		>= 10	<b>‰</b>		>= 30 \%0		>=	50 ‰						

#### ii. Cap Cépet

L'évènement du 5 et 6 Janvier 1994 est un coup de « Largade ». Il a fortement touché le littoral varois (ERAMM, 2000). Les hauteurs significatives des vagues ( $H_{1/3}$ ) et hauteurs moyennes du centième des vagues les plus hautes ( $H_{1/100}$ ) sont enregistrées du 5 Janvier 1994 à 15 h UTC au 7 Janvier à 12 h par bouée de la DCN au cap Cépet (Figure 2-16) (Novel, 1995). Les hauteurs des vagues augmentent rapidement entre 17 et 19 h UTC du 5 Janvier. En effet, la hauteur significative des vagues atteint près de 4 mètres ; la hauteur significative des vagues  $H_{1/100}$  est de 6 mètres (Figure 2-16).



Figure 2-16 : Hauteur des vagues ( $H_{1/3}$  et  $H_{1/100}$ ) au cap Cépet du 5 au 7 Janvier 1994 (Novel, 1995).

#### iii. Almanarre

Un houlographe OPHIURE III a été installé le 29 Octobre 2000 à 100 mètres du niveau de la borne B09 (Figure 2-17A, p. 84) par la société Oceanoservice. Son capteur est localisé à 4 mètres de profondeur (ERAMM, 2001).



Figure 2-17 : (A) Positionnement du houlographe (coordonnées WGS84 : 6° 07,602' E, 43° 04,444' N) (Source : <u>www.google.com/earth</u>). (B) Rose des houles mesurées par OPHIURE III à la côte en Novembre 2000 (Lacroix et al., 2015a).



Figure 2-18 : Hauteur (A) et direction (B) de la houle à l'Almanarre en Novembre 2000.

Ce houlographe directionnel mesure la houle (Figures 2-17B et 2-18) et les courants induits par la houle en Novembre 2000. Les conditions météorologiques correspondaient au coup de mer de secteur Sud-Sud-Ouest du 6 Novembre 2000 et un régime d'Est faible sans houle résiduelle.

#### iv. La Capte

Les données de houle sont enregistrées sur une période de 1 mois et demi (du 12 Mars au 28 Avril 2009) par les appareils de mesures immergés. Ces appareils se situent aux positions de SCAPT1 à SCAPT5 (Figure 2-19).



*Figure 2-19 : Localisation des stations de mesure des courants de SCAPT1 à SCAPT5 (5-1 et 5-2) à la Capte.* 



Figure 2-20 : Rose des houles à la Capte de Juillet à Décembre 2009 (Meulé, 2010).

La période de mesure diffère en fonction de l'appareil et de la station de mesure

(Meulé, 2010). En effet, les appareils des stations SCAPT2, SCAPT3, et SCAPT5 (5-1 et 5-2) n'enregistrent des données que sur une très courte période (12 au 17 Mars 2009). Seuls les appareils des stations SCAPT1 et SCAPT4 ont marché correctement du 13 Mars au 22 Avril (Meulé, 2010). Les données de houle à la station SCAPT4 sont illustrées dans les figures 2-20 et C-10, p. - 28 -.

#### v. Pradet



*Figure 2-21 : (A) Positionnement du houlographe (Source : <u>www.google.com/earth</u>). <i>(B) Rose des houles mesurées par OPHIURE III à la côte en Octobre 1999.* 



Figure 2-22 : Hauteur (A) et direction (B) de la houle au Pradet en Octobre 1999.

Un houlographe OPHIURE III a été installé aux stations 1 (6°1,12' E, 43°5,25' N) et 2 (43°05,230°N, 06°01,220°E), à 200 et 50 mètres du niveau de la côte correspondant à deux périodes : Octobre et Décembre 1999, respectivement (Figure 2-21A). Les

conditions météorologiques en Octobre et Décembre 1999 correspondaient à un régime d'Ouest et d'Est, respectivement (ERAMM, 2000). Les données de houle sont illustrées dans les figures 2-21B et 2-22. Les hauteurs significative et maximale atteignent 1,72 et 2,2 mètres, respectivement, en provenance d'une direction de 222 à 231 degrés (Figures 2-21B et 2-22A,B).

#### f) Simulation numérique

#### i. Données sur Previmer

Previmer est le projet en partenariat avec Ifremer, le SHOM et Météo-France et cofinancé par l'Union Européenne. Ces données sont calculées à partir des données de vent fournies par Météo-France (Source : <u>www.previmer.org</u>) et des données de vent réanalysées du NOAA/NCEP CFSR et d'ECMWF.

Ce projet fourni des données à plusieurs échelles : GLOBAL (0,5 degré), GLOBAL05\_NOC (0,5 degré), MED (6'), MEDNORD (2'), AZUR (500 mètres), Provence (200 mètres), etc. ... (Figure 2-23).



Figure 2-23 : Modèles Méditerranée (MEDNORD) avec la résolution 2' (A) (Source : <u>www.previmer.org</u>) et certains modèles opérationnels sur Previmer (B) (Rudy Magne et Fabrice Ardhuin, 2009).

Les données comportent des paramètres d'état de la mer, par exemple la hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), la direction moyenne de la mer totale (vent + houle) (Dir), la période au pic du spectre d'énergie ( $T_p$ ), le spectre fréquence-direction, etc. ...

Les paramètres de la houle de Toulon à Cavalaire sont représentés sous forme de cartographie. La comparaison de la hauteur des vagues mesurée et simulée est établie sous forme de diagramme. Le modèle PREVIMER reproduit le spectre fréquencedirection, l'étalement directionnel et les données de vents.

#### ii. Atlas numérique de houle ANEMOC

EDF LNHE (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement) et le CETMEF ont établi un atlas numérique d'états de mer sur les façades Atlantique, Manche et Mer du Nord pour compléter la base de données CANDHIS. Il s'appelle Atlas Numérique d'Etats de Mer Océanique et Côtiers (ANEMOC). Cette base de données est disponible sur la période du 1er Janvier 1979 au 31 Août 2002. Cet atlas a été établi grâce aux simulations avec le logiciel TOMAWAC. Ces données sont calculées à partir des données de vent réanalysées ERA 40 du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (Creach et Goasguen, 2008; Michel Benoit, 2008). Elles sont traitées statistiquement (Tableaux C-9 – C-12, p. - 22 -). L'atlas numérique de houle ANEMOC (Figure 2-24) est disponible sur l'adresse <u>anemoc.cetmef.equipement.gouv.fr/anemoc</u> (Creach et Goasguen, 2008; Michel Benoit, 2008).



Figure 2-24 : Points de sortie d'ANEMOC (Source : ANEMOC).

#### iii. Données sur ECMWF

Le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF) est une organisation intergouvernementale soutenue par 34 états, basée à Reading, à l'ouest de Londres, au Royaume-Uni. Quatre ensembles de données sont supportés séparément : l'analyse globale des vagues, l'analyse des vagues de la Méditerranée, la prévision globale des vagues et la révision des vagues de la Méditerranée. Les données disponibles sont accessibles gratuitement sur l'adresse : <u>apps.ecmwf.int</u> (Source : <u>apps.ecmwf.int</u>). Les vagues d'ECMWF de 1979 à 1999 sont enfin appliquées à Porquerolles afin de compléter la base de données des houles de 1979 à 2014.

#### 2.4.1.4. Données de courant disponibles

Elles sont présentées par des observations ainsi que des simulations existantes.

#### a) Mesures

Les mesures in-situ des courants sont réalisées à certains endroits tels que Almanarre, La Capte, et rade de Toulon.

#### i. Almanarre

Les mesures ont révélé que la vitesse du courant moyen oscille entre 3 et 7 centimètres par seconde par temps calme ou 15 et 25 centimètres par seconde en période d'agitation (ERAMM, 2001). Il y a trois directions correspondantes : 90-180 degrés Nord (Est à Sud), 200-290 degrés Nord (Sud-Sud-Ouest à Ouest-Nord-Ouest) et 300-360 degrés Nord (Nord-Ouest à Nord). Selon ERAMM (2001), les directions dominantes du courant moyen sont d'Est à Sud et d'Ouest à Nord (Figure 2-25). Le

courant moyen vers la direction Sud-Est est plus faible que le courant vers la direction Nord-Ouest qui correspond aux périodes d'agitation (Figure 2-25). Pendant le coup de mer du 6 Novembre 2000, la vitesse du courant moyen vers la direction de Nord-Ouest passe de 5 à 25 centimètres par seconde (Figure C-6, p. - 19 -) en l'espace de 20 heures (ERAMM, 2001).



Figure 2-25 : Rose des courants moyens à l'Almanarre : (A) du 30 Octobre au 29 Novembre 2000 ; (B) du 04 au 10 Novembre 2000 (Lacroix et al., 2015a).

#### ii. La Capte

Les données de courant proviennent de la station SCAPT4 située à 120 mètres de la côte. Elles sont disponibles du 13 Mars au 22 Avril 2009 (Meulé, 2010).

Les courants transversaux (Figure 2-26A) se dirigent d'une part vers la côte (d'Est à Ouest), lorsque les vitesses sont positives, d'autre part vers le large (d'Ouest à Est), lorsque les vitesses sont négatives (Meulé, 2010). Leur vitesse maximale est de 0,09 mètre par seconde vers la côte (Figure 2-26). Nous notons que ces courants vers la côte sont plus rapides que ceux vers le large. La période des courants vers la côte est plus courte que celle vers le large (Meulé, 2010). Par exemple, un courant vers le large est relativement faible du 18 au 28 Mars 2009 mais un courant vers la côte est plus fort entre le 1er et le 4 Avril (Meulé, 2010).

Les courants longitudinaux (Figure 2-26A) se dirigent d'une part vers le sud, lorsque les vitesses sont positives, d'autre part vers le nord, lorsque les vitesses sont négatives (Meulé, 2010). Selon Meulé (2010), la vitesse maximale des courants longitudinaux est de 0,14 mètre par seconde vers le Nord (Figure 2-26A,B). Durant la période de mesure, nous remarquons d'une part qu'il y a peu de courant dominant vers le sud et d'autre part que les courants ont tendance à se déplacer vers le nord (Figure 2-26B).



Figure 2-26 : Données de courant à La Capte : (A) Courants transversaux (noir) et longitudinaux (bleu) . (B) Rose des courants à SCAPT4.

#### iii. Rade de Toulon

Des courantomètres ont été utilisés et en plusieurs positions dans la Rade entre Juin 2009 et Septembre 2012 pour mesurer les courants saisonnières (Figure 2-27 et Tableau 2-3) (Dufresne, 2014).



Figure 2-27 : Positions des courantomètres dans la rade de Toulon (A) et des mouillages aux exutoires du Las (orange) et de l'Eygoutier (vert) (B) (Dufresne, 2014).

Tableau 2-3 : Synthèse des mouillages des courantomètres (Dufresne, 2014).

Position	Couleur	Latitude	Longitude	h (m)	Période
Chenal Position 1	bleu	43°05.334'	05°56.044'	0	Juin à Oct. 2009
Chenal Position 2	bleu	43°05.206'	05°55.841'	29	Nov. 2009 à Avril 2010
Cap Cépet	rouge	43°04.822'	05°57.483'	2	Juillet à Sept. 2011

Position	Couleur	Latitude	Longitude	h (m)	Période
					Janv. à Juin 2012
Cap Carqueiranne	violet	43°05.032'	06°00,324'	29	Juillet à Sept. 2011 Janv. à Juin 2012
L'exutoire du Las				9	Sept. 2013 à Mars 2014
L'exutoire de l'Eyg.				20	30 Août 2013 à 08 Janv. 2014

h – profondeur en mètre ; Eyg. – Eyg<br/>outier ; Chenal Position 1 / 2 - chenal de navigation de la rade de Toulon.

#### North c) North a) 30% 30% West East West East Vitesse (cm.s<sup>-1</sup>) Vitesse (cm.s<sup>-1</sup>) 35 - 40 35 - 40 30 - 35 30 - 35 25 - 30 25 - 30 20 - 25 20 - 25 15 - 20 15 - 20 South 10 - 15 10 - 15 South 5 - 10 5-10 0-5 0-5 (C) (A) North North b) d) 30% 30% 10% West East West East Vitesse (cm.s-1) Vitesse (cm.s-1) 35 - 40 35 - 40 30 - 35 30 - 35 25-30 25 - 30 20 - 25 20 - 25 15 - 20 15 - 20 South 10 - 15 10-15 5 - 10 South 5-10 0-5 0-5

#### Courants dans le chenal de navigation

(B) (D) Figure 2-28 : Roses des courants à un mètre sous la surface (A et C) et à deux mètres audessus du fond (B et D) enregistrées aux positions 1 (A et B) l'été et aux positions 2 (C et D) l'hiver (Dufresne, 2014).

Deux directions de courant (Nord-Est et Sud-Ouest) sont illustrées par les roses des courants aux positions 1 et 2 pendant l'été et l'hiver dans la figure 2-28. Il y a certaines différences entre les courants enregistrés aux deux positions (Dufresne, 2014).

En position 1, les forts courants de surface s'écoulent vers la direction Nord-Est environ 40% du temps (Figure 2-28A). Selon Dufresne (2014), les courants de fond s'écoulent vers la direction Nord-Est plus de 40% du temps et vers la direction Ouest-Sud-Ouest 20% du temps (Figure 2-28B).

En position 2, les courants de surface se déplacent vers la direction Nord-Est environ 42% du temps et vers la direction Sud- Ouest environ 15% du temps (Figure 2-28C). Selon Dufresne (2014), les courants de fond se dirigent vers la direction Nord-Est plus 50% du temps et vers la direction Sud-Ouest 15% du temps (Figure 2-28D).

#### Courants dans la Grande Rade de Toulon

Certains paramètres statistiques des courants sont présentés dans le tableau 2-4 à partir des roses des courants enregistrées (Dufresne, 2014). Nous notons que les courants estivaux (Figure 2-29A,B) sont plus forts que les courants hivernaux (Figure 2-29C,D) (Dufresne, 2014).



Figure 2-29 : Roses des courants enregistrées entre Juin et Septembre 2011 (A et B) et entre Janvier et Avril 2012 (C et D), à un mètre sous la surface (A et C) et à deux mètres au-dessus du fond (B et D) (Dufresne, 2014).

-			-	-	
Devent	Cap Cépet		Cap de Carqueiranne		
rarametres	Eté 2011	Hiver 2012	Eté 2011	Hiver 2012	
Intensité moyenne du courant (mm/s)	73	60	78	65	
Direction dominante en surface	SE	NO	NO et SE	SE et NO	
Direction dominante au fond	SE et N-NE	E-SE	NO et S	SE et NO	

Tableau 2-4 : Paramètres statistiques des mesures de courant (Dufresne, 2014).

#### Courants près de l'exutoire du Las

Un ADCP a été installé à l'exutoire du Las à 9 mètres de profondeur pour la période de Septembre 2013 à Mars 2014 (Figure 2-27, p. 90) (Dufresne, 2014).



Figure 2-30 : Roses des courants de 0,50 mètre sous la surface (A) et de 1 mètre au-dessus du fond (B), près de l'exutoire du Las pour la période de Septembre 2013 à Mars 2014 (Dufresne, 2014).

La figure 2-30 illustre les roses des courants en surface et au fond entre Septembre 2013 et Mars 2014. Les courants de surface dominants sont déplacés vers la direction de Nord à Nord-Nord-Ouest environ 50% du temps (Figure 2-30A) (Dufresne, 2014).

Les courants de fond dominants s'écoulent vers le Sud-Sud-Est 45% du temps. Les courants plus forts (60 à 80 millimètres par seconde et moins de 5% du temps) s'orientent vers la direction de Nord à Nord-Ouest (Figure 2-30B) (Dufresne, 2014).

#### Courants près de l'exutoire de l'Eygoutier

Un ADCP était installé à environ 20 mètres de profondeur près de l'exutoire de l'Eygoutier (Figure 2-27, p. 90) pour la période du 30 Août 2013 au 8 Janvier 2014 (Dufresne, 2014). Les courants dans la Grande Rade sont plus forts que ceux dans la Petite Rade. Ils peuvent atteindre 150 et 100 millimètres par seconde en surface et au fond, respectivement (Dufresne, 2014).

La figure 2-31 présente les roses des courants en surface et au fond entre Septembre 2013 et Mars 2014 (Dufresne, 2014). Ces roses de courant montrent que les courants de surface s'écoulent vers les directions de l'Ouest au Nord-Ouest environ 40% du temps (Figure 2-31A). Elles montrent aussi que ces courants se déplacent vers les directions du Nord-Est au Sud-Est un peu plus de 30% du temps (Dufresne, 2014). Les directions des courants de fond dominants sont le plus souvent dirigées vers les directions du Nord-Ouest au Sud-Ouest (Figure 2-31B). Les intensités des courants de fond sont plus faibles et souvent inférieures à 90 millimètres par seconde (Dufresne, 2014).



Figure 2-31 : Roses des courants de surface (A) et de fond (B), près de l'exutoire de l'Eygoutier pour la période du 30 Août 2013 au 8 Janvier 2014 (Dufresne, 2014).

#### b) Simulation numérique

Les courants du modèle Méditerranée sont calculés dans le projet Previmer avec MARS3D. Nous avons établi une convention avec Previmer sur les données de houle, de courant, de salinité en 2012 pour la zone Provence entre 5,236 et 7,345°E et de 42,747 à 43,721°N. La résolution de ces données est de 0,009°E et 0,015°N. Les courants dans la rade de Toulon sont aussi construits à partir du modèle MARS3D à haute résolution (100 mètres) par Dufresne (2014).

#### 2.4.2. Traitement

D'abord, la référence temporelle des données météo-marines peut varier selon leur situation géographique. Il nous faut convertir ces données à la même référence temporelle. Puis, nous choisirons la référence temporelle comme le temps universel coordonné (UTC) par le fuseau horaire UTC+1. Nous traiterons les données de hauteurs d'eau collectées à partir du zéro hydrographique. Cette référence hydrographique sera utilisée dans tous nos calculs. Puis, pour la visualisation des données NETCDF du modèle d'océan, nous avons besoin d'utiliser des outils tels que *Panoply, NOAA's Weather and Climate Toolkit (WCT), Integrated Data Viewer (IDV),* etc. ... <sup>2</sup> (Notes, p. 349). Nous allons ensuite estimer les vents à 10 mètres. La conversion

des références verticales maritimes sera ensuite exposée. Les données adaptées au format de MIKE21 serons extraites à partir des fichiers aux formats NetCDF (Annexe C6, p. - 32 -), TXT (Section C7.1, p. - 33 -), et IMAGE (Section C7.2, p.- 34 -).

## 2.4.2.1. Estimation du vent à 10 mètres à partir des données d'observation

Notre modèle calcule des données de vents à 10 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer. Cependant, les données des vents que nous avons acquises sont au niveau soit 2 mètres (à Hyères) soit 126 mètres (à Cap Cépet) soit 24 mètres (à Toulon), etc. ...

Il est nécessaire de convertir les données existantes en données des vents à 10 mètres. Il existe deux modèles mathématiques qui déterminent le profil vertical de la vitesse du vent. Ce sont la loi logarithmique et la loi de puissance. Les deux méthodes posent un problème de fiabilité des résultats du fait de la nature complexe et variable de flux turbulents. Pour plus de renseignements, nous renvoyons au mémoire de recherche de Beaudoin (2007).

Nous utilisons la loi logarithmique, largement utilisée dans toute l'Europe. L'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur inférieure à 100 mètres peut être décrite par l'expression logarithmique :

$$\frac{v}{v_0} \approx \frac{\ln\left(\frac{H}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{H_0}{z_0}\right)} \tag{2-1}$$

Dans cette équation, v en mètres par seconde, est la vitesse calculée à la hauteur voulue H en mètres et v<sub>0</sub> en mètres par seconde, est la vitesse observée à la hauteur de l'anémomètre H<sub>0</sub>. La longueur de rugosité du site z<sub>0</sub> est fonction du type de terrain, de l'espacement et de la hauteur du facteur de rugosité, elle varie de 0,0002 à 1,6 (Tableau C-3, p. - 14 -). La vitesse du vent est inversement proportionnelle à la rugosité z<sub>0</sub>. Nous choisirons la valeur 0,0002 pour la rugosité z<sub>0</sub> (le type de terrain est la mer). Ainsi, nous allons modéliser une plus grande vitesse de vent que celles des autres valeurs de rugosité.

# 2.4.2.2. Conversion des références verticales maritimes à Toulon

Le datum RLR (« *Revised Local Reference* ») à chaque station est défini comme étant d'environ 7 000 millimètres sous le niveau marin moyen (Source : <u>www.psmsl.</u> <u>org/data/ obtaining/rlr.php</u>).

Dans la figure 2-32, le référence M.A.E3-9 BIS est un benchmark, 3,907 mètres audessus du datum TGZ (le zéro des hydrographes ou « 0 CM » - Cartes Marines) et 3,654 mètres au-dessus NGF-IGN 69. Le datum TGZ est de 0,253 mètre au-dessous du NGF-IGN 69. Il est de 0,373 mètre au-dessous du niveau moyen MSL. Le NGF-IGN 69 est de 0,12 mètre au-dessous du niveau moyen MSL. Nous convertirons tous les données de marée en CM.



Figure 2-32 : Diagramme du datum RLR à Toulon (Source : <u>www.psmsl.org</u>).

## 2.5. Données d'évènements exceptionnels disponibles

Nous trouvons des données d'évènements exceptionnels à Porquerolles dans les études existantes (Courtaud, 2000; ERAMM, 2000, 2001) pour la période de 1992 à 2000. Ces données sont disponibles à la bouée de CANDHIS 08301 à Porquerolles (CEREMA, 2014) pour la période de 1995 à 2008 (Tableaux 2-5 et 2-6, p. 97).

Pour la période de 2009 jusqu'à aujourd'hui, nous déterminons les évènements exceptionnels en nous basant sur la définition des tempêtes à partir des données de vent, de niveau marin et de houle disponibles (Paragraphe 1.4.2. p. 53).

Nous avons récupéré les conditions de météo marine telles que la température, le vent (direction et vitesse) et la pression pour toutes les heures à partir des données METAR/SYNOP et des données d'Infoclimat (Paragraphe C5.1, p. - 29 - ). Nous nous intéressons aux événements extrêmes qui ont une influence significative sur l'agitation du tombolo occidental. Ce sont les événements à l'origine de direction d'Ouest à Sud-Ouest.

Nous avons traité les données d'évènements extrêmes sur les références temporelle et hydrographique (paragraphe 2.4.2. p. 94) et sur les figures de hauteur de vagues de tempête (Annexe C7.2, p.- 34 -) pour obtenir les données au format compatible avec MIKE21.

## 2.5.1. Coups de mer

En se basant sur des données de CANDHIS (section 2.4.1.3. i), nous avons déterminé les coups de mer significatifs dans le golfe de Giens de 1992 à 2012 (Tableau 2-5). Les paramètres des houles sont collectés. Ce sont la hauteur significative (H<sub>1/3</sub>), la valeur moyenne du dixième supérieur des hauteurs des vagues (H<sub>1/10</sub>), la hauteur de la plus grande vague (H<sub>max</sub>), la période significative (T<sub>H1/3</sub>), la valeur moyenne des périodes du dixième supérieur des plus grandes vagues (T<sub>H1/10</sub>), et la période correspondant au maximum de la densité spectrale (T<sub>pic</sub>). Les hauteurs des vagues à Porquerolles oscillent de 3,60 à 5,75 (4,42 en moyen) mètres pour H<sub>1/3</sub>, de 4,80 à 6,27 (5,27 en moyen) mètres pour H<sub>1/10</sub>, et de 5,80 à 10,50 (7,50 en moyen) mètres pour H<sub>max</sub> (Tableau 2-5). Pareillement, les périodes des vagues fluctuent entre 6,6 et 10 s (8,5 s en moyen) pour T<sub>H1/3</sub>, entre 8,2 et 9,7 s (8,8 s en moyen) pour T<sub>H1/10</sub>, et entre 8,8 et 10,2 s (9,6 s en moyen) pour T<sub>pic</sub> (Tableau 2-5).

Tableau 2-5 : Paramètres des houles au large à Porquerolles pendant les coups de mer entre 1992 et 2012.

Paramètres	$H_{1/3}(m)$ $H_{1/10}(m)$		H <sub>max</sub> (m)	T <sub>H1/3</sub> (s)	T <sub>H1/10</sub> (s)	T <sub>p</sub> (s)
Valeur minimale	3,60	4,80	5,80	6,6	8,2	8,8
Valeur moyenne	4,42	5,27	7,50	8,5	8,8	9,6
Valeur maximale	5,75	6,27	10,50	10,0	9,7	10,2

## 2.5.2. Tempêtes

Les principales tempêtes dans le golf de Giens de 1995 à 2008 sont collectées dans le tableau 2-6. Les paramètres des houles de tempête sont collectés. Ce sont la hauteur significative (H<sub>1/3</sub>), la hauteur de la plus grande vague (H<sub>max</sub>), la période significative (T<sub>H1/3</sub>), la période de la vague de la plus grande hauteur (T<sub>Hmax</sub>), l'estimation de la hauteur significative des vagues à partir du moment d'ordre zéro de la densité spectrale (H<sub>m0</sub>) et la période d'énergie définie par rapport du moment d'ordre moins un sur le moment d'ordre zéro de la densité spectrale (T<sub>e</sub>). Les hauteurs des houles au large varient entre 5,5 et 6,80 (5,83 en moyen) mètres, entre 5,80 et 6,80 (6,30 en moyen) mètres, et entre 8,10 et 12,30 (9,51 en moyen) mètres pour H<sub>1/3</sub>, H<sub>m0</sub>, et H<sub>max</sub>, respectivement (Tableau 2-6). Similairement, les périodes des houles changent de 7,6 à 10,4 s (8,8 s en moyen), de 9,2 à 9,8 s (9,4 s en moyen), et de 7,4 à 10,9 s (9,0 s en moyen) pour T<sub>H1/3</sub>, T<sub>e</sub>, et T<sub>Hmax</sub>, respectivement (Tableau 2-6).

*Tableau 2-6 : Liste des tempêtes dans le golfe de Giens entre 1995 et 2008 (ERAMM, 2001; CEREMA, 2014; Lacroix et al., 2015a).* 

Date	Pic de tempête	<b>H</b> <sub>1/3</sub>	H <sub>m0</sub>	<b>H</b> <sub>max</sub>	<b>T</b> <sub>H1/3</sub>	Te	T <sub>Hmax</sub>
12 - 14 Mai 1995	05h00, 13 Mai	5,5 (5,55)	5,8	9,1 (9,79)	10,4 (10,2)	9,8	10,6 (11,1)
27 - 29 Déc. 1999	04h30, 28 Déc.	5,6	5,9	9,2	9,4	9,2	10,1
20 - 23 Janv. 2005	11h00, 21 Janv.	5,6	***	9,0	8,4	***	8,7

Date	Pic de tempête	$H_{1/3}$	H <sub>m0</sub>	H <sub>max</sub>	<b>T</b> <sub>H1/3</sub>	Te	T <sub>Hmax</sub>
30 Janv 02 Févr. 2005	11h30, 01 Févr.	6,4	6,8	10,2	9,4	9,2	9,2
10 - 16 Févr. 2005	05h00, 13 Févr.	5,6	***	8,1	8,1	***	8,9
23 - 25 Janv. 2007	00h30, 24 Janv.	6,8	6,7	12,3	9,8	9,4	8,8
12 - 14 Févr. 2007	00h00, 13 Févr.	5,9	***	10,4	9,0	***	8,4
17 - 21 Mars 2007	17h00, 19 Mars	5,8	***	9,2	9,2	***	10,9
28 - 29 Mai 2007	13h00, 28 Mai	5,8	***	8,8	8,3	***	8,9
09 - 12 Déc. 2007	04h00, 10 Déc.	5,5	***	9,4	7,9	***	8,8
20 - 22 Mars 2008	13h00, 21 Mars	5,6	***	9,8	7,6	***	7,4
30 Oct 01 Nov. 2008	16h30, 30 Oct.	5,8	***	8,6	8,5	***	7,7
Valeur minimale		5,50	5,80	8,10	7,6	9,2	7,4
Valeur moyenne		5,83	6,30	9,51	8,8	9,4	9,0
Valeur maximale		6.80	6.80	12.30	10.4	9.8	10.9

 $H_{1/3}$ ,  $H_{m0}$ , et  $H_{max}$  en mètres ;  $T_{H1/3}$ ,  $T_e$ , et  $T_{Hmax}$  en secondes ; la valeur dans les parenthèses d'après étude d'ERAMM (2001).

#### 2.5.3. Surcotes

A partir des données de niveau marin (section 2.4.1.2), les niveaux marins relevés à Toulon de 1982 à 1999 sont reportés sur la figure 2-33. Les surcotes observées oscillent entre 0,53 et 0,92 mètres au port de Toulon entre 1982 et 1999 (Figure 2-33). Les surcotes historiques sont les suivantes : 8 Mars 1917, 17 et 30 Novembre 1940, Avril 1942, 1958 (surcote de 0,7 mètre), 27 et 28 Décembre 1970 (ERAMM, 2001).



*Figure 2-33 : Evolution des niveaux observés au port de Toulon entre 1982 et 1999 (ERAMM, 2001).* 

# 2.6. Données de natures du fond et de biocénoses disponibles

Les données des fonds marins seront montrées et traitées afin de créer d'une part des grilles des tailles des sédiments et d'autre part celles des rugosités et des frottements du fond en cas de présence et d'absence des posidonies.

## 2.6.1. Acquisition

Les données des sédiments et des biocénoses sont reprises et analysées à partir de la base de données du SHOM et du Cartham-AAMP/Andromède, respectivement.

## 2.6.1.1. Natures du fond

Le SHOM a recueilli les données de sédiments du fond marin. Une partie de ces données proviennent de ses propres observations et prélèvements. D'autres données peuvent être obtenues à partir des autres organismes publics ou privés tels que Ifremer, le BRGM et des universités (Bordeaux, Brest, Caen, Corte, Rouen, Lille, etc. ...), etc. ... Ces données permettent de déterminer les différentes zones sédimentaires (Source : <u>www.shom.fr</u>).

Le SHOM intègre ces données dans la base de données sédimentologiques du SHOM (BDSS) pour fabriquer des cartes sédimentologiques (cartes G) qui décrivent la nature du fond marin. Elles représentent la nature et la répartition des sédiments (cailloutis, graviers, et sables, etc. ...) sur les fonds. Les littoraux français sont couverts par 34 cartes G (Figure 2-34A). La carte 7407G publiée par Guyomard P. (2010) décrit la nature du fond de Toulon à Cavalaire-sur-Mer. Elle dessine les natures du fond dans le golfe de Giens dans la figure 2-34B (Source : <u>www.shom.fr</u>). Son système géodésique est WGS 84. L'échelle des cartes papier est de l'ordre du 1 : 50 000.



Figure 2-34 : (A) Zones couvertes de la cartographie des "Natures du fond". (B) Natures du fond dans le golfe de Giens (Source : <u>data.shom.fr</u>).

Les natures du fond dans le golfe de Giens comportent plusieurs types de sédiments très différents tels que cailloutis, graviers, sables, et vases (Garlan, 2010; SHOM, 2013). D'abord, les cailloutis sont des sédiments contenant de 50 à 100% de particules supérieures à 20 millimètres. Les cailloutis graviers contiennent des

cailloutis et de 15 à 50% de graviers. Puis, les graviers contiennent de 50 à 100% de particules de sédiments comprises entre 20 et 2 millimètres. Les sables graviers sont des matériaux mélangés entre des sables et de 15 à 50% de graviers. Ensuite, les sables sont des sédiments contenant de 50 à 100% de particules comprises entre 2 et 0,5 millimètres. Les sables vaseux sont des sables contenant entre 5 et 20% de particules inférieures à 0,05 millimètre. Les sables fins comportent des sédiments qui contiennent de 50 à 100% de particules comprises entre 0,5 et 0,05 millimètre. Les sables fins et de 5 à 20% de particules inférieures à 0,05 millimètre. Les sables fins et de 5 à 20% de particules inférieures à 0,05 millimètre. Enfin, les vases contiennent de 20 à 100% de particules de sédiments inférieures à 0,05 millimètre.

La coupe de terrain du littoral occidental est établie à partir d'un sondage (Figure 2-35). En nous basant sur celle-ci, nous pouvons distinguer trois types de facies tels que limoneux/argileux, sableux, et graveleux au tombolo occidental (ERAMM, 2001). D'abord, les facies limoneux/argileux se trouvent à une certaine profondeur en particulier dans les zones les moins exposées à l'agitation comme le Sud du tombolo. En régime d'Ouest-Nord-Ouest, le transit littoral transporte les argiles du Nord au Sud du tombolo. Ensuite, le granoclassement de la fraction sableuse diminue du Nord au Sud du tombolo. La fraction sableuse fine se trouve au Sud du tombolo. Le sable moyen apparaît au Nord-Ouest du tombolo. Enfin, la fraction graveleuse apparaît le long du tombolo plus particulièrement au Sud sur la plage aérienne. Cependant, les petits galets de la Durance se trouvent uniquement entre la partie Nord et centrale du tombolo et sont totalement absents au Sud.

Le secteur Nord entre les bornes B08 et B10 de la branche occidentale est relevé par le bureau d'études géotechniques ERG (Etudes et Recherches Géotechniques). Son travail a pour but d'effectuer une reconnaissance de la nature, de la structure et de la résistance du substratum sous-marin. De plus, un levé géologique et géotechnique des fonds sous-marins est réalisé. En se basant sur le levé géologique nous pouvons identifier les différents facies sédimentaires (ERAMM, 2001). Premièrement, les bancs de grès sous-marin (substratum rocheux) forment une barre discontinue, parallèle au rivage (Courtaud, 2000). Ils se situent à 200 mètres du rivage. Ils sont composés d'une dalle de grès large de 50 mètres, haute de 2 mètres en moyenne, située sous 3 mètres de la surface. Au niveau de la borne B09, selon ERAMM (2001) il existe une brèche qui réduit la largeur du banc de grès à 20 mètres et la hauteur du talus à 0,5 mètre. Deuxièmement, les sables se répartissent sur une largeur de 50 mètres environ des fonds. Le diamètre des sédiments augmente vers le large. Les graviers et galets (de 3 à 10 millimètres) d'origine détritique proviennent de la destruction du plateau continental. Troisièmement, les argiles noires se trouvent près de la côte et contiennent de nombreux débris coquillers (Coques) dans leur couche supérieure. Des argiles calcaréo-sableuses couvrent une zone large de 100 mètres entre les argiles noires et les grès sous une faible épaisseur de sable. Les argiles ont une structure peu

#### consolidée.



*Figure 2-35 : Coupe de terrain réalisée à partir d'un sondage au milieu du tombolo ouest (Histoire de l'eau à Hyères, 2014a).* 

### 2.6.1.2. Biocénoses

La nomenclature retenue est définie par PNUE-PAM- CAR/ASP (2007). Puis, Egis Eau et Andromède Océanologie (2010) décrit les nomenclatures retenues qui s'appuient sur cette définition. Elle comporte les fonds meubles de l'infralittoral, le détritique côtier, la roche à algues photophiles, les herbiers denses à posidonie et les herbiers de posidonie clairsemée, et la matte morte de posidonie (Figure 2-36, p. 102).

Premièrement, les fonds meubles de l'infralittoral comportent quatre biocénoses. La première biocénose est constituée des sables fins bien calibrés qui se situent généralement entre 2 et 25 mètres de profondeur sur fonds meubles infralittoraux. La deuxième biocénose est celle des sables vaseux superficiels de mode calme, qui se situe souvent voisine de 1 mètre de profondeur et excède rarement 3 mètres de profondeur. La troisème biocénose est de sables grossiers et fins graviers brassés par les vagues, excèdant rarement 1 mètre de profondeur. La quatrième biocénose est celle des sables grossiers et fins graviers sous l'influence des courants de fonds, qui se retrouve entre 3 à 4 mètres et 20 à 25 mètres jusqu'à 70 mètres de profondeur. Elle se situe donc sur les deux étages infralittoral et circalittoral (Egis Eau et Andromède Océanologie, 2010).

Deuxièmement, la biocénose du détritique côtier se situe de la limite inférieure de l'herbier de Posidonie (environ 30 mètres) jusqu'à la biocénose des fonds détritiques du large (hors secteur d'étude) à une profondeur de 90 à 100 mètres (Egis Eau et Andromède Océanologie, 2010).

Troisièmement, la roche à algues photophiles peut se situer de la surface de l'eau

jusqu'à une profondeur de 35 à 40 mètres (Egis Eau et Andromède Océanologie, 2010).

Quatrièmement, les herbiers denses à posidonie et les herbiers de posidonie clairsemée se trouvent depuis la surface de l'eau jusqu'à 30 à 40 mètres de profondeur. L'évolution des herbiers et leur dynamique dépendent des facteurs tels que la nature du fond, le forçage hydrodynamique, la profondeur et la qualité des eaux, etc. ... (Egis Eau et Andromède Océanologie, 2010).

Cinquièmement, les mattes mortes de posidonie apparaîssent après la mort des posidonies. Les mattes sont constituées par les rhizomes, les écailles, les racines et les sédiments (Boudouresque et al., 2006).



Figure 2-36 : Cartographie des biocénoses marines du tombolo of Giens (Egis Eau et Andromède Océanologie, 2010).

## 2.6.2. Traitement

Les cartes du SHOM, d'EGIS EAU, et d'IGN se présentent sous forme d'images dans le système LONG/LAT. Nous avons d'abord créé un « *world file* » sous le format de fichiers texte pour chaque image. Il a pour but d'associer des coordonnées à des images matricielles. Il est utilisé dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour afficher l'image dans le système de projection. Le nom du fichier « *world file* » doit être le même que celui de l'image associée (Source : <u>fr.wikipedia.org</u>). Les images avec « *world file* » peuvent être importées dans les logiciels tels que Google Earth, MIKE21, et AutoCad (Map 3D/Civil 3D) pour créer la superposition d'images.

Dans AutoCad avec la projection en Lambert 93, nous avons ensuite désigné tous

les points, lignes, polylignes, polygones qui contiennent les couleurs d'image pour chaque couche différente. Pour la création des grilles des natures du fond et des biocénoses, nous avons reporté les élévations différentes correspondant aux couches pour les objets d'AutoCAD au-dessus (par exemple, elles varient de 0 à 15 m). Le « *lisp CAD* » est utilisé pour exporter les coordonnées des objets du CAD au format TXT composé de trois colonnes de coordonnées X, Y, et Z. Les fichiers en TXT sont transformés au format XYZ.

Nous avons enfin utilisé <u>Surfer</u> pour la création des grilles des natures du fond et des biocénoses. L'interpolation par méthode « *Nearest Neighbor* » est utilisée dans ce cas. Le résultat est exporté au format « \*.ASC ». Puis, il est converti au format « \*.DFS2 » à l'aide de la rubrique « *GIS* » dans l'outil « *MIKE Zero Toolbox* ». Les résultats sont des grilles des natures du fond et des biocénoses.

A partir de la grille des natures du fond au format « \*.DFS2 », nous avons remplacé la valeur du point dans chaque zone par le diamètre des sédiments correspondants. Nous avons obtenu la grille des diamètres des sédiments au format « \*.DFS2 ».

Nous avons créé les codes de calcul sous Matlab tels que <u>hydroDynamicGrain.m</u>, <u>hydroDynamic.m</u>, et <u>hydroSediment.m</u>, etc. ... pour la création de la grille des rugosités et des frottements du fond en nous basant sur la grille des diamètres des sédiments et des biocénoses (Annexe B, p. - 9 -).

## **2.7. Conclusions**

Une base de données des références bibliographiques est créée dans ce chapitre. Plusieurs documents fournis par la ville de Hyères en relation avec l'évolution du tombolo ont été numérisés.

Les bathymétries et le trait de côte ont d'abord été collectés à partir de l'<u>EGB</u>, du SHOM, et de l'EOL. Ils sont convertis sous la forme XYZ à l'aide d'<u>AUTOCAD</u>, des codes Matlab <u>asc2xyz.m</u>, <u>extractCoastline.m</u>, et <u>extractContour.m</u>. Ils sont référencés au zéro hydrographique. Leur projection est ensuite transformée en Lambert 93 par le code Matlab <u>datumConvert.m</u>. Le maillage en 2-D est ensuite établi par les différentes étapes. La grille en 3-D est installée à l'aide de <u>Surfer</u>. Les variations de volumes bathymétriques sont estimées dans Matlab ou <u>Surfer</u>. Ces données sont enfin visualisées dans Google Earth.

Les vents sont enregistrés par cinq stations à proximité du tombolo. Les champs de vent sont aussi extraits à partir des modèles existants. Les vents à 10 mètres sont estimés à partir des vents observés et simulés. Il existe différentes sources des observations de niveaux de la mer disponibles : SHOM, IOC, PSMSL, et CSMSE. Ces observations à Toulon sont discontinues. Elles sont référencées au zéro hydrographique. Les variations du niveau marin du tombolo sont régulièrement décrites à partir de celles-ci. Les données de houle disponibles sont issues ou bien des fetchs et des vents ou bien des observations des navires. Elles viennent aussi des mesures de houles au large (Cap Porquerolles, Cépet) et à la côte (Almanarre, La Capte, et Pradet). Elles sont fournies par certaines simulations numériques de Previmer, d'ANEMOC, et d'ECMWF. Les données de courant disponibles sont sorties ou bien des mesures de courants à l'Almanarre, à La Capte, et la rade de Toulon ou bien des simulations numériques MARS3D de Previmer. Les évènements extrêmes sont extraits à partir des études existantes et des observations METAR/SYNOP et Infoclimat. Le fuseau horaire UTC+1 est choisi comme la référence temporelle. Les forçages météomarins sous les différents formats tels que NetCDF, ASCII, et IMAGE sont transformés aux formes MIKE21.

Les natures du fond et les biocénoses sont issues des cartes du SHOM, d'EGIS EAU, et d'IGN sous forme d'images dans le système LONG/LAT. Elles sont d'abord converties aux grilles des natures du fond et des biocénoses dans le système Lambert 93. Les grilles des diamètres des sédiments, des rugosités, et des frottements du fond sont alors créées dans MIKE21 à l'aide des codes Matlab tels que <u>hydroDynamicGrain.m</u>, <u>hydroDynamic.m</u>, et <u>hydroSediment.m</u>.

# Chapitre 3. Analyse des principaux facteurs influençant l'évolution du littoral

Les morphodynamiques du tombolo sont influencées par l'interaction entre le régime de l'hydrodynamique et le climat saisonnier en Méditerranée. L'érosion marine est forte dans certains secteurs, notamment la zone nord de la plage de l'Almanarre. Elle menace la sécurité de la route du Sel, qui peut affecter les habitants de Giens. Les causes de l'érosion de la plage de l'Almanarre n'ont pas encore fait l'objet d'une analyse claire.

Des codes Matlab ont été créés afin d'analyser les données collectées au chapitre 2. Ce chapitre va être consacré à l'analyse des études et des données existantes afin de rechercher les facteurs responsables de l'évolution morphologique du tombolo.

# 3.1. Caractéristiques générales du secteur d'étude

Nous analysons les caractéristiques des éléments tels que la géographie, la morphologie, les vents, les houles, les courants, le transport sédimentaire, les fonds marins, et l'action anthropique.

# 3.1.1. Principales caractéristiques géographiques et morphologiques

Selon ERAMM (2001), le golfe de Giens se caractérise par la présence d'îlots situés au large et des hauts-fonds situés en zone côtière. Ils changent les caractéristiques de la houle incidente par les processus en eaux peu profondes. En effet, les hauts-fonds provoquent un phénomène de réfraction. Il s'agit d'une concentration de l'énergie de la houle à ces endroits.

En général, la bathymétrie du golfe de Giens est régulière. Il présente une pente moyenne du fond relativement faible (Tableau 3-1, p. 107). Cependant, ERAMM (2001) souligne des forts dénivelés près de la côte (Tableau 3-1).

Les isobathes des cinq, dix, et vignt mètres en zéro hydrographique sont de formes semblables au trait de côte (Figure 3-1). La pente à l'isobathe de 30 mètres varie entre 0,9 et 1% (Courtaud, 2000). Les profondeurs du golfe de Giens sont limitées par l'isobathe de 50 mètres (Figure 3-1). L'isobathe de 50 mètres relié entre la Cap de Carqueiranne au Nord-Ouest et la Pointe Escampobariou au Sud-Ouest de la presqu'île de Giens. La ligne des 100 mètres suit à une distance de l'ordre de 2,778 kilomètres. Au-delà, les fonds descendent rapidement à plusieurs centaines de mètres (ERAMM, 2001).

La zone entre le trait de côte et la limite supérieure de l'herbier n'a pas de barre sédimentaire (Certain et Barusseau, 2004) dans le golfe de Giens. Une comparaison avec les critères de Wright et Short (1984) confirme que la plage du tombolo correspond à une plage réflective (Courtaud, 2000).



Figure 3-1 : Carte marine dans le golfe de Giens (SHOM, 2014).



Figure 3-2 : Profil de la plage de l'Almanarre à la borne B08.

La pente des fonds est plus forte de l'extrémité Nord jusqu'à la borne B23. Elle est forte sur les 100 premiers mètres du profil limités par l'isobathe 2 mètres (Figure 3-2 et Tableau 3-1). Puis, à partir de l'isobathe 2 mètres (Tableau 3-1), elle est très faible sur le restant du profil (Figure 3-2). A partir de 200 mètres de la côte, la présence de

hauts fonds correspondant au plateau continental perturbe et réduit la pente des fonds jusqu'à 600 mètres de la côte dans la figure 3-2 (ERAMM, 2001).

Par comparaison avec la situation de 1896, ERAMM (2001) affirme que les brèches localisées entre les bornes B08 et B10 se sont creusées avec le temps. Il existe trois grands trous sous-marin (Figure 3-42, p. 155) situés à une centaine de mètres de la côte avec une superficie de plus de 4 ha.

Isobathe (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B01	7,04	5,31	3,75	0,85	1,03	0,44	0,84	0,50	9,83	0,45	29,95
B01a	14,34	0,49	3,15	3,05	1,73	0,47	0,68	0,50	1,19	0,58	2,31
B01	13,66	10,44	0,31	0,78	1,06	1,76	34,60	0,32	0,70	2,60	3,55
B02a	15,03	11,73	6,88	0,25	1,00	2,06	0,51	0,49	31,27	1,29	0,57
B03	15,43	11,47	1,64	0,27	1,08	1,53	34,12	0,43	0,79	0,83	1,64
B04	13,10	6,21	1,57	0,30	0,81	3,64	0,69	0,47	0,90	2,40	1,65
B05	17,15	10,95	0,70	0,32	1,84	0,79	1,36	0,91	0,47	0,57	1,56
B06	16,82	8,79	0,60	0,37	2,19	0,66	1,42	0,61	0,58	1,06	3,76
B07	14,07	7,23	0,27	2,42	1,33	0,43	1,20	0,60	1,27	0,53	1,24
B08	16,74	9,16	0,34	0,63	1,48	0,83	1,15	0,78	0,46	12,02	1,94
B09	17,64	7,00	0,32	1,11	0,57	0,63	0,81	1,55	0,91	2,46	0,49
B10	18,20	8,89	0,33	0,54	7,81	0,48	0,94	0,42	1,07	3,85	0,70
B11	18,74	7,58	0,36	0,44	1,26	0,73	0,89	1,12	0,70	8,44	0,47
B12	17,58	9,30	0,34	0,54	0,73	0,83	1,17	0,82	0,51	2,42	1,36
B13	17,67	11,58	0,48	0,34	1,14	0,34	1,09	1,13	1,29	0,58	1,99
B14	17,24	7,71	0,42	0,39	1,63	0,51	0,69	2,10	0,46	0,86	1,43
B15	13,40	3,93	2,13	1,03	0,16	13,62	0,47	1,57	1,26	0,62	1,93
B16	12,63	4,25	1,36	0,98	0,17	3,23	0,53	37,29	0,74	0,54	1,86
B17	13,46	3,92	0,94	1,11	0,19	0,77	0,91	1,14	3,48	0,46	1,85
B18	0,30	6,43	5,01	0,26	1,95	0,72	0,93	0,49	0,67	2,18	1,97
B19	12,58	5,35	0,34	6,50	0,24	1,08	1,01	0,79	1,36	0,56	1,94
B20	17,70	0,30	0,34	1,13	0,38	1,40	0,67	0,82	1,40	1,26	1,97
B21	24,78	0,30	0,30	1,62	10,01	0,58	0,51	1,37	0,61	1,94	2,06
B22	14,89	0,22	14,25	0,26	0,70	0,77	22,61	0,49	1,58	1,17	2,02
B23	11,84	4,36	0,25	0,24	0,94	0,34	1,12	1,79	1,56	1,69	1,55
B24	6,01	3,96	0,25	0,26	0,78	10,52	0,28	1,87	1,58	1,75	1,56
B25	5,41	0,23	2,67	0,25	2,23	2,86	0,27	1,16	1,54	1,56	1,90
B26	4,88	4,47	3,58	0,25	2,19	0,17	0,32	1,36	1,83	1,75	1,09
B27	4,54	4,15	0,21	18,40	0,34	0,19	1,75	1,77	1,35	1,35	1,77
B28	3,52	4,04	2,94	0,20	0,23	0,27	1,72	1,69	1,67	0,66	3,45
B29	3,40	3,64	3,03	0,20	1,95	0,14	1,36	1,76	1,60	1,53	1,22
B30	3,31	3,87	2,82	0,14	0,78	0,22	1,74	1,65	1,52	1,25	2,97
B31	2,52	3,23	0,23	0,27	1,19	7,73	0,19	1,49	3,34	2,01	0,98
B32	2,27	3,30	2,53	0,27	0,21	0,25	1,49	1,64	2,42	1,52	1,14
B33	2,50	3,06	2,14	0,21	6,08	0,99	0,13	1,69	6,37	1,64	1,12
B34	1,98	2,76	2,60	0,33	1,13	0,11	7,64	0,64	5,04	4,70	1,00
B35	5,31	5,59	0,29	0,37	0,69	0,16	1,50	1,65	1,80	26,20	0,74
B36	4,40	4,22	0,25	0,61	1,43	0,15	1,13	1,19	1,89	1,21	1,06
B37	4,22	4,35	0,19	1,53	17,15	0,39	0,16	1,88	2,97	1,21	3,16
B38	4,85	4,17	0,31	0,20	17,49	26,73	0,16	1,88	2,29	1,45	2,59
B39	3,00	3,46	0,30	0,54	0,50	0,17	2,20	1,67	2,70	0,90	1,84

Tableau 3-1 : Pente du littoral occidental de Giens (en pourcentage).

Isobathe (m)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B40	4,39	0,38	0,87	0,48	4,05	0,16	1,59	0,67	9,49	19,35	0,82
B41	5,16	0,30	0,78	0,47	0,29	0,49	1,18	1,07	1,32	1,36	1,26
B42	9,84	0,33	0,77	0,39	0,26	0,65	1,44	21,86	0,57	6,21	0,76
B43	3,19	0,29	0,40	0,85	0,25	1,54	1,55	1,24	0,98	1,35	0,93
B44	0,95	0,34	0,42	0,50	0,37	13,55	0,51	1,94	1,55	1,01	1,62
B45	0,55	0,32	0,91	0,48	0,45	12,32	0,34	2,14	1,32	1,52	0,91
B46	0,59	0,85	0,86	0,63	0,49	0,45	1,23	1,25	1,43	2,07	1,79

La valeur de la pente du fond marin en pourcentage.

## 3.1.2. Principales caractéristiques climatiques

Le type de climat général du tombolo est le climat méditerranéen. Il est caractérisé par des étés chauds (la forte moyenne annuelle de la température et de l'ensoleillement) et par des hivers particulièrement doux et des vents violents fréquents (Météo-France).

La figure 3-3 donne les valeurs moyennes mensuelles des paramètres climatologiques à la station météorologique d'Hyères Aéroport, altitude 2 mètres NGF, située à 3 kilomètres du site.



Figure 3-3 : Valeurs moyennes mensuelles des paramètres climatologiques (de Janvier (J) 1951 à Décembre (D) 1980) à la station BAN Hyères.

L'humidité est très variable d'une année à l'autre en automne et hiver. Inversement, elle est faible et stable en été sur la période de 1971 à 2000 (Joly et al., 2010).

La température moyenne annuelle est élevée, avec des jours chauds compris entre 15 et 23 jours par an. L'été est répétitivement chaud d'une année à l'autre (Joly et al., 2010).

Le climat de la presqu'île est le plus fort ensoleillement de France (l'ensoleillement
très important est de 2650 heures par an en moyenne), des hivers doux et ensoleillés après les pluies d'automne et des étés chauds et secs (Serantoni et Gutierrez, 1997).

Le cumul des précipitations annuelles est moyen de 750 à 950 millimètres mais elles ne sont pas réparties de façon homogène (HYDRO M, 1993; Joly et al., 2010). La station de Porquerolles n'enregistre que 600 millimètres par an de pluviométrie moyenne. L'été et l'hiver sont secs, mais le printemps et l'automne sont très arrosés (40% du total annuel en 3 mois) (Météo-France). La saison pluvieuse est d'Octobre à Mars (maximum en Novembre). Il y a peu de jours de pluie et irrégulièrement répartis sur l'année (Météo-France). Les plus fortes pluies correspondent aux épisodes orageux. La saison sèche est de Mai à Septembre (minimum en Juillet ou Août). Il existe une réduction de la pluviométrie moyenne (sécheresse). La pluie journalière décennale est présentée dans le tableau 3-2. II existe un gradient pluviométrique décroissant entre le nord et le sud du tombolo. Le climat de la partie Sud est proche de celui de presqu'île de Giens (HYDRO M, 1993).

Tableau 3-2 : Pluie journalière décennale (Courtaud, 2000).

Fleuve	RM	Gapeau		Roubaud	Pansard	Maravenne	РМ		
Station	Décapris	SP SE		L'embouchure	R.N. 98	R.N. 98	L'embouchure		
P (mm)	104	120	117	117	164	164	164		
P. pluio journalière déconnale en millimètres · PM. Réal Martin · PM. Pansard Maravanne ·									

P - pluie journalière décennale en millimètres ; RM - Réal Martin ; PM - Pansard-Maravenne ; SP - Solliès-Pont ; SE - Ste-Eulalie.

L'évaporation moyenne atteint 1 485 millimètres par an. L'évaporation moyenne journalière atteint 6,5 millimètres par jour en trois mois de la saison estivale (Juin, Juillet, et Août). Elle correspond à une perte de 65 mètres cube par jour par hectare de plan d'eau.

Le vent est un des facteurs de l'évolution littorale. Il a un effet direct sur le transport éolien du sable (limité dans la plage émergé) et indirect, à l'origine des houles et de certains courants (Courtaud, 2000). Lorsque nous analysons des vents à 10 mètres à la station BAN Hyères, nous constatons qu'il y a 88,94% des vents avec une vitesse inférieure à 7,78 mètres par seconde et 2,35% des vents avec une vitesse supérieure à 13,61 mètres par seconde (Tableau 3-3).

Tableau 3-3 : Données statistiques sur le vent à 10 mètres à partir des données SYNOP pour 14 ans à Hyères.

V (m/s)	Ν	NE	Е	SE	S	SO	0	NO	N	
v (m/s)		<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	P (%)	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0
-0.20	Ν	47	40	20	19	22	0	0	0	0
<0,28	Vm	0,23	0,22	0,25	0,25	0,25	0	0	0	0
	Dm (°)	10,72	44,28	89,13	139,47	172,05	0	0	0	0
	P (%)	1,87	1,49	0,60	0,98	1,57	0,55	0,63	2,16	1,42
1 20	Ν	3104	2476	987	1623	2597	903	1042	3583	2356
1,39	Vm	0,94	0,96	0,94	0,92	0,95	1,01	1,01	1,01	1,01
	Dm (°)	13,30	42,78	94,55	141,54	179,33	228,90	275,64	324,40	353,92

V(m/s)		Ν	NE	Ε	SE	S	SO	0	NO	Ν
v (m/s)		<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	P (%)	3,14	3,60	2,27	4,59	4,81	3,16	2,31	10,96	3,16
2.06	Ν	5195	5969	3759	7610	7962	5231	3831	18159	5235
3,00	Vm	2,09	2,30	2,42	2,43	2,18	2,47	2,37	2,36	2,12
	Dm (°)	13,91	44,39	95,91	139,43	180,69	224,91	276,34	321,62	353,07
	P (%)	0,36	2,66	3,54	4,37	1,74	5,08	2,26	3,56	0,81
F 20	Ν	598	4401	5860	7232	2887	8412	3738	5899	1346
5,28	Vm	4,10	4,27	4,41	4,23	4,13	4,35	4,40	4,16	4,25
	Dm (°)	13,88	52,19	96,65	133,92	183,13	224,38	274,40	318,57	352,67
	P (%)	0,07	1,51	3,66	1,68	0,45	3	2,76	1,81	0,25
7 70	Ν	122	2509	6056	2776	748	4973	4579	2990	421
7,70	Vm	6,28	6,40	6,45	6,23	6,28	6,37	6,56	6,52	6,35
	Dm (°)	13,49	57,01	94,66	129,64	181,22	231,32	273,06	313,54	352,14
	P (%)	0,01	0,82	1,92	0,35	0,13	1,21	2,55	1,64	0,08
10,56	Ν	16	1350	3181	575	219	2008	4228	2718	127
	Vm	8,45	8,69	8,71	8,76	8,61	8,71	8,73	8,77	8,47
	Dm (°)	14,53	60,66	88,12	137,25	179,92	239,06	272,17	311,60	350,75
	P (%)	0	0,20	0,48	0,07	0,01	0,26	0,62	0,52	0
12 61	Ν	1	339	798	114	17	436	1032	862	3
13,01	Vm	11,64	11,34	11,43	11,47	11,13	11,16	11,29	11,34	10,96
	Dm (°)	10	63,68	86,64	136,19	180,88	243,37	270,23	310,86	356,67
	P (%)	0	0,03	0,05	0,01	0	0,02	0,04	0,02	0
16.04	Ν	1	42	90	9	0	25	73	41	0
10,94	Vm	14,92	14,26	14,35	14,70	0	14,37	14,27	14,04	0
	Dm (°)	5	61,07	85,11	143,33	0	246,20	270,96	308,66	0
	P (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20 56	Ν	0	0	3	0	0	1	3	0	0
20,50	Vm	0	0	17,54	0	0	17,71	17,54	0	0
	Dm (°)	0	0	88,33	0	0	250	273,33	0	0
Total	Nt	9084	17126	20754	19958	14452	21989	18526	34252	9488
Total	Pt (%)	5,48	10,34	12,53	12,05	8,73	13,28	11,19	20,68	5,73
<7.70	N1	9066	15395	16682	19260	14216	19519	13190	30631	9358
<7,70	P1 (%)	6,15	9,29	10,07	11,63	8,58	11,78	7,96	18,49	5,65
<b>&gt;10 56</b>	N2	2	381	891	123	17	462	1108	903	3
>10,50	P2 (%)	0,05	9,79	22,90	3,16	0,44	11,88	28,48	23,21	0,08

P – la fréquence (%); N – le nombre d'observation; Vm – la vitesse des vents à 10 mètres moyenne (m/s); Dm – la direction des vents à 10 mètres moyenne (°); Nt - le nombre d'observation total; Pt - Fréquence totale (%); N1 – le nombre d'observation cumulé des vents < 7,78 m/s; P1 – la fréquence cumulée des vents < 7,78 m/s (%); N2 – le nombre d'observation cumulé des vents > 10,56 m/s; P2 – la fréquence cumulée des vents > 10,56 m/s; P2 – la fréquence cumulée des vents > 10,56 m/s (%).

Nous remarquons que toutes les données SYNOP/METAR, CFSR, ECMWF, et WINDGURU permettent d'identifier deux régimes de vents dominants (Figure 3-4):

 d'une part, le régime de secteur Ouest, dominé par trois directions de vent relativement proches, Sud-Ouest (SO, de 200 à 240 degrés Nord), Ouest (O, de 240 à 300 degrés Nord) et Nord-Ouest (NO, de 300 à 340 degrés Nord). Les vents dominants de secteur Ouest soufflent dans une direction soit de Nord-Ouest à Sud-Ouest (données SYNOP/METAR, Figure 3-4), soit Nord-Ouest (données CFSR et ECMWF), soit de Nord-Ouest à Ouest (données WindGURU).

L'étude sur les vents synoptiques montre que les vents dominants de direction de Sud-Ouest à Nord-Ouest ont une fréquence cumulée voisine de 45%, entièrement compatible avec celle de Grissac et Courtaud (plus 40%, Tableau 3-4, p. 111). Les vents les plus forts (plus 17 mètres par seconde en moyen) soufflent dans une direction de Sud-Ouest à Ouest (Tableau 3-3, p. 109). Les vents de Nord-Ouest sont les plus fréquents (20,68%) avec des vitesses maximales de 13,61 à 16,94 mètres par seconde. Les vents de Sud-Ouest sont en moyenne de 4,77 mètres par seconde, au maximum de 16,94 à 20,56 mètres par seconde et en fréquence de 13,28%. Les vents d'Ouest sont les plus forts (près de 20,56 mètres par seconde au maximum).

d'autre part, le régime de Nord-Est (NE) à Sud-Est (SE) (de 20 à 160 degrés Nord) domine soit de 70 à 110 degrés Nord (Figure 3-4), soit de 20 à 110 degrés Nord (Figure 3-4). Ce régime représente 40,34% des vents (Tableau 3-4, p. 111). Les vents de Nord-Est ont des vitesses moyennes de 3,93 mètres par seconde, un maximum de 13,61 à 16,94 mètres par seconde et des fréquences de 10,32% à 13,89% (Courtaud, 2000). Les vents de Sud-Est ont des fréquences (12,04%) et des vitesses moyennes de 3,73 mètres par seconde et maximums de moins de 16,94 mètres par seconde.



*Figure 3-4 : Roses des vents à la station d'Hyères à partir des données observées SYNOP pour la période de 1999 à 2014 (A) et METAR pour la période de 2005 à 2014 (B).* 

Direction (°N)	Ν	NE	E	SE	S	SO	0	NO	Ν
Direction (N)	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	38 <sup>i</sup>				0	7	28	10	5
Fréquence (0/.)	<u>35,7"</u>				-	<u>42,7</u>			-
riequence (%)	5,46 <sup>iii</sup>	10,32	12,52	12,04	8,71	13,28	11,19	20,68	5,73
	8,12 <sup>iv</sup>	13,89	10,47	13,08	8,11	9,92	9,14	20,69	6,17

Tableau 3-4 : Données statistiques sur le vent annuel à 10 mètres à Hyères pour la période 1999 à 2014.

<sup>&</sup>lt;sup>i</sup> Nombre en "italique": Grissac (1975) a calculé les fréquences des vents observés à Toulon La Mitre (période de 1946 à 1960) et à la BAN Hyères (période de 1954 à 1964).

<sup>&</sup>lt;sup>ii</sup> Nombre en "souligné": Courtaud (2000) a calculé des fréquences des vents pour la période 1992 à 2000 au Levant.

<sup>&</sup>lt;sup>iii</sup> Nombre en "gras": données SYNOP

<sup>&</sup>lt;sup>iv</sup> Nombre en "normal": données METAR

Direction	Direction (°N)		NE	E	SE	S	SO	0	NO	Ν
Direction	, NJ	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
Nombre		9037	17086	20734	19939	14430	21989	18526	34252	9488
d'observation		12128	20744	15634	19528	12117	14817	13658	30894	9208
moyenne		1,90	3,93	5,45	3,73	2,67	4,77	5,74	3,64	2,42
Witesse m	moyenne	1,55	2,80	4,92	3,08	2,08	4,48	5,70	3,92	2,48
(m/s)	min	0,28	0,34	0,29	0,34	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
	max	14,92	16,70	17,71	16,70	12,65	17,71	17,71	15,68	11,64
Direction moyenne (°)		14	50	94	136	181	228	274	320	353
		13	45	94	135	178	229	275	320	353



Figure 3-5 : Percentiles des vitesses de vent annuel à 10 mètres à Hyères à partir des données observées : (A) SYNOP pour la période de 1999 à 2014. (B) METAR pour la période de 2005 à 2013.

L'analyse sur le percentile des vitesses de vent est présentée dans la figure 3-5. Les vents de secteurs ouest (O) et est (E) présentent la même dispersion des vents (Courtaud, 2000). 30% des vents de ces secteurs atteignent au moins 7 mètres par seconde (Figure 3-5A,B) et 2% d'entre eux dépassent au moins 11 (Figure 3-5A) et 15 mètres par seconde (Figure 3-5B). La vitesse maximale peut atteindre 30 mètres par seconde (Figure 3-5B).

Les vents de secteur nord-ouest (NO) présentent 30% de vents d'au moins 3 mètres par seconde et 2% d'entre eux dépassent au moins 10 (Figure 3-5A) et 16 mètres par seconde (Figure 3-5B). La vitesse maximale peut atteindre 40 mètres par seconde (Figure 3-5B).

Les percentiles des vitesses de vent de nord-est (NE) et de sud-ouest (SO) évoluent parallèlement. Elles présentent 30% de vents d'au moins 4 mètres par seconde. La vitesse maximale peut atteindre 40 mètres par seconde (Figure 3-5B). Les vitesses des vents de Sud-Est (SE), de sud (S) et de nord (N) n'atteignent que des valeurs faibles : 30% des vents sont supérieurs à 2 mètres par seconde, 1% des vents dépassent au moins 5 mètres par seconde (Figure 3-5B).

# **3.1.2.1. Influence des régimes des vents dans le golfe de Giens**

Le tombolo Ouest est soit directement exposé aux vents de Sud-Ouest, soit sous l'influence limitée des vents de Nord-Ouest (Courtaud, 2000). L'influence du régime d'Est sur l'agitation dans le golfe de Giens peut être nulle.

Dans le golfe de Giens, les vents générant l'agitation forte proviennent des secteurs Sud à Ouest, notamment le secteur Sud-Ouest à Ouest du fait de l'étendue du fetch (Jeudy De Grissac, 1975; IARE, 1996; Courtaud, 2000).

Les vents de Sud-Ouest ne sont peut-être pas plus fréquents (13,28%) mais génèrent de fortes vagues sur le littoral. Les coups de « largade » se produisent en automne et en hiver avec une forte probabilité pour les mois de Décembre et Janvier (ERAMM, 2001).

# 3.1.2.2. Analyse statistique des données saisonnières des vents

Nous allons analyser les données statistiques de vent pour 2 périodes correspondant aux saisons de la houle : les périodes estivale (de Juin à Août) et hivernale (de Décembre à Février). Les résultats des calculs sont présentés dans les tableaux C-1 et C-2, p. - 10 -. En observant le tableau C-1, nous constatons que les deux périodes sont dominées par deux régimes : de Sud-Ouest à Nord-Ouest (de 40% à 48% des cas) et de Nord-Est à Sud-Est (de 28% à 40% des cas).

Les résultats du calcul statistique sur les vents hivernaux de plus de 10,56 mètres par seconde montrent que 43,44% de ceux-ci sont de direction de Nord-Est à Sud-Est, 55,54% sont de direction de Sud-Ouest à Nord-Ouest (Tableau C-2, p. - 11 -). Les vitesses des vents estivaux sont inférieures ou égales à 16,94 mètres par seconde et moindres que celles des vents hivernaux (excepté pour celles de Sud-Est, de Sud-Ouest et de Nord-Ouest à Ouest). Pour les vents estivaux de plus 10,56 mètres par seconde de vitesses, le tableau C-1, p. - 10 - en recense 6,61% de direction de Nord-Est à Sud-Est, 93,26% de direction de Sud-Ouest à Nord-Ouest. L'analyse sur les vents saisonniers montre que les vents dominants de direction de Sud-Ouest (SO) à Nord-Ouest (NO) ont une fréquence cumulée voisine de 36% (Tableau 3-5).

	Direction (9N)	Ν	NE	E	SE	S	SO	0	NO	Ν
Direction	(°N)	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
Enéminen	- (0/)	5,90 <sup>i</sup>	6,85	9,73	17,70	9,06	22,54	11,15	13,58	3,36
Frequence	e (%)	<u>5,09<sup>ii</sup></u>	<u>11,27</u>	<u>9,97</u>	<u>8,05</u>	<u>9,23</u>	<u>6,90</u>	<u>12,35</u>	<u>28,93</u>	<u>8,14</u>
		1,54	2,21	4,17	3,75	2,58	5,15	6,18	3,83	2,06
Vitesse	moyenne	<u>2,19</u>	<u>4,38</u>	<u>5,86</u>	<u>3,68</u>	<u>2,72</u>	<u>4,02</u>	<u>5,60</u>	<u>3,50</u>	<u>2,62</u>
	min	0,34	0,34	0,34	0,34	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
(m/s)		<u>0,51</u>	<u>0,34</u>	<u>0,38</u>	<u>0,34</u>	<u>0,51</u>	<u>0,51</u>	<u>0,51</u>	<u>0,51</u>	<u>0,51</u>
		7,59	11,70	12,65	16,70	9,61	13,66	14,67	14,67	10,62
	max	<u>14,67</u>	<u>14,67</u>	<u>13,91</u>	<u>12,65</u>	<u>11,64</u>	<u>17,71</u>	<u>15,68</u>	<u>10,62</u>	<u>14,67</u>
Direction moyenne		14	46	99	135	183	227	272	317	354
(°)		<u>14</u>	<u>50</u>	<u>92</u>	<u>140</u>	<u>180</u>	230	<u>275</u>	<u>321</u>	<u>353</u>

Tableau 3-5 : Données statistiques sur les vents estival et hivernal à 10 mètres à Hyères à partir des données observées SYNOP pour la période 1999 à 2014.

En hiver, les vents de secteur de Nord-Est à Est et de secteur de Nord-Ouest à Ouest sont dominants avec une fréquence d'au moins 21% et 41%, respectivement (Tableau 3-5). En été, les vents dominants soufflent dans la direction de secteur Est à Sud-Est (plus 27%) et de secteur Ouest à Sud-Ouest (au moins 33%) (Tableau 3-5).

L'analyse sur le percentile des vitesses de vents estival et hivernal est présentée dans les figures C-1 et C-2, p. - 12 -. Les percentiles P98, P99 et la courbe max représentent les plus fortes intensités. Les vitesses les plus fortes sont observées selon les directions nord-est, est, ouest et nord-ouest. Environ 30% des vents de secteur de nord-ouest (NO) à sud-ouest (SO) peuvent souffler au moins à 8 (en été) et 7 (en hiver) mètres par seconde (Figure C-1). La vitesse maximale peut atteindre 25 mètres par seconde selon la direction ouest (Figure C-2). Les vents de secteurs nord-est (NE) à Sud-Est (SE) présentent 30% de vents d'au moins 5 (en été) et 7 (en hiver) mètres par seconde (Figure C-1). La vitesse maximale peut atteindre 40 mètres par seconde selon la direction nord-est (Figure C-2). Les vents d'autres secteurs ne sont pas très fortes (Figures C-1) et C-2).

## 3.1.3. Principales caractéristiques des cours d'eau

Les cours d'eau dans le golfe de Giens se composent de l'Eygoutier, le Las, et les petits cours d'eau.

## 3.1.3.1. Caractéristiques de l'Eygoutier

L'Eygoutier prend sa source à la Crau (dans le marais de l'Estagnol à La Moutonne) et traverse le Plan de la Garde (Dufresne, 2014; Histoire de l'eau à Hyères, 2014b). Il parcourt 15,2 kilomètres et la superficie du bassin versant est de 70 kilomètres carrés (7 000 hectas). Le débit moyen est de 0,92 mètre cube par seconde et oscille de 0,14 à 201,44 mètres cube par seconde. L'apport solide annuel moyen est de 1 800 tonnes par

<sup>&</sup>lt;sup>i</sup> Nombre en "normal": données SYNOP pendant la période estivale.

<sup>&</sup>lt;sup>ii</sup> Nombre en "souligné": données SYNOP pendant la période hivernale.

an (Dufresne, 2014). Les apports de l'Eygoutier sont faibles en comparaison à d'autres cours d'eau (Dufresne, 2014).

## 3.1.3.2. Caractéristiques du Las

Le Las, situé à l'ouest de Toulon, long d'environ de 8 à 12 kilomètres, est un petit fleuve côtier qui traverse le territoire des communes du Revest-les-Eaux, les quartiers Ouest de Toulon et la zone de pyrotechnie de l'Arsenal militaire dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, Var (Dufresne, 2014). Il prend sa source aux exutoires de la Foux de Dardennes et le Ragas, à l'altitude de 96 à 149 mètres. Les coordonnées de la source sont de 43° 11′ 57″ N, 5° 57′ 28″ E. Il se jette dans la rade de Toulon, à l'altitude 0 mètre. Les coordonnées de l'embouchure sont de 43° 07′ 04″ N, 5° 53′ 32″ E (Source : fr.wikipedia.org). La superficie du bassin versant du Las est de 40 à 60 kilomètres carrés (Source : SANDRE). Le débit moyen estimé (480 à 970 litres par seconde) est environ égal à un mètre cube par seconde (Source : SANDRE). Il est de régime pluvial méridional (Dufresne, 2014). Il peut être découpé en quatre zones distinctes (Source : www.valdas.org) :

- la Rivière de Dardennes (de la Retenue à Dardennes, du point B01 au point D25) ;
- le Las (de Dardennes au Jonquet, du point PC01 au point PC22) ;
- la Rivière Couverte (Du Jonquet au Pont Neuf, du point RC01 au point RC04) ;
- la Rivière Neuve (du Pont Neuf à Lagoubran, du point PB04 au P015).

Le Las s'écoule dans la direction nord-est/sud-ouest et traverse d'abord une zone rurale, puis une zone fortement urbanisée (Source : <u>fr.wikipedia.org</u>). Il existe peu d'informations et de mesures disponibles au Las. Le débit moyen est de 1,64 mètres cube par seconde et oscille de 0,01 à 29,14 mètres cube par seconde (Dufresne, 2014). L'apport solide annuel moyen est de 1 040 tonnes par an. L'apport du Las est faible en comparaison à d'autres cours d'eau (Dufresne, 2014).

## 3.1.3.3. Caractéristiques des autres cours d'eau

Les petits cours d'eau dans le golfe de Giens sont situés entre la pointe de Carqueiranne et l'Almanarre. Leurs bassins ne représentent que 15 kilomètres carrés pour 10 kilomètres de linéaire côtier (Courtaud, 2000). Les débits sont négligeables et n'ont jamais été mesurés. Il est difficile d'estimer les apports solides des autres cours d'eau. Nous prennons souvent la valeur de 2 000 mètres cube par an pour l'ensemble des apports solides (Roubaud compris) arrivant dans les deux golfes (Courtaud, 2000). Nous soulignons que les autres cours d'eau sont moins importants pour les apports solides (SOGREAH, 1988b,c).

## 3.1.4. Principales caractéristiques hydrodynamique

Nous allons d'abord expliquer les circulations des masses d'eau dans le golfe de

Giens. L'état de mer composé des paramètres des vagues sera ensuite exposé.

### 3.1.4.1. Circulation des masses d'eau

Dans ce qui suit, nous allons expliquer et analyser les courants côtiers et les variations des niveaux marins.

#### a) Courants côtiers

A l'approche du tombolo, nous notons qu'il existe des courants généraux liés à la circulation des masses d'eau en Méditerranée, les courants de marée, les courants de houle et les courants de vents. Bien qu'il y ait plusieurs types de courants qui se rencontrent ici, nous insisterons sur les courants de dérive et les courants sagittaux qui ont un rôle primordial dans le transport sédimentaire (Courtaud, 2000).

#### i) Courants côtiers généraux

Au large de la presqu'île de Giens, il y a un courant général d'Est en Ouest (courant Ligure) avec une vitesse moyenne de 0,2 à 0,3 mètre par seconde mais pouvant atteindre 0,5 mètre par seconde par fort vent d'Est (SOGREAH, 1988d; HYDRO M, 1993; Courtaud, 2000). Ce courant pénètre dans le golfe de Giens. Il s'écoule entre la presqu'île de Giens et Porquerolles. Il n'agit pas directement dans le golfe de Giens (HYDRO M, 1993).

Dans le golfe de Giens, un courant induit se forme dans le sens des aiguilles d'une montre (Figure 3-8, p. 119) (Jeudy De Grissac, 1975). Sa vitesse moyenne oscille de 5 à 10 centimètres par seconde (Courtaud, 2000). Dans le champ du transport sédimentaire des sables (plus de 0,13 millimètre de diamètre) et des galets (plus de 1,6 millimètres de diamètre), leur rôle est négligeable car leur intensité est faible notamment au voisinage des côtes (Courtaud, 2000).

#### ii) Courants de marée

Nous remarquons que l'ampleur de la marée en Méditerranée est faible (inférieure à 0,3 mètre). Les courants de marée sont aussi faibles (vitesse de quelques centimètres par seconde) (Courtaud, 2000). Leur rôle est négligeable dans le transport des sédiments (HYDRO M, 1993; Courtaud, 2000). Dans le golfe de Giens, les grains de sable varient de 0,13 à 20 millimètres. Les vitesses de courant de marée sont très inférieures à celles nécessaires au mouvement d'un grain de sable.

#### iii) Courants de houles

Ces courants sont dus à la houle. Ils jouent un rôle important dans la quasi-totalité des transports sédimentaires et sont responsables de la distribution des sédiments au niveau du golfe de Giens. Ils comprennent les courants de dérive liés à la composante longitudinale de la houle et les courants sagittaux liés à la composante normale à la côte (Courtaud, 2000). Nous présentons dans ce qui suit une description des caractéristiques générales des courants liés à l'action de la houle (Courtaud, 2000).

#### Courants de dérive

Les courants de dérive littorale sont dûs à l'obliquité de la houle à la côte. Leur intensité dépend de plusieurs facteurs tels que la hauteur, la période et la direction de la houle, ainsi que la nature, la rugosité et la pente des fonds marins. Leur vitesse est maximale dans les zones de convergence des orthogonales de houle. Leur vitesse peut atteindre 0,5 mètre par seconde, dans le golfe de Giens (Jeudy De Grissac, 1975; SOGREAH, 1988d; Courtaud, 2000).

Dans le golfe de Giens, il existe deux dérives simultanées de directions opposées. Elles se rencontrent à mi-parcours du tombolo occidental et donnent naissance à un puissant courant d'arrachement dirigé vers le large. Il y a deux cellules de décantation (du nord et du sud) ; leur rôle est important pour la formation de chenaux d'érosion sectorisant l'herbier de posidonie en plusieurs ensembles distincts (Figure 3-6) (Blanc, 1975; Jeudy De Grissac, 1975).



Figure 3-6 : Courantologie dans le golfe de Giens [d'après Jeudy De Grissac (1975), modifié].

#### ✤ Courants sagittaux

Leur intensité et périodicité sont déterminées par la hauteur et la période de la houle (Blanc, 1956; Larson et Kraus, 1995; Ruessink et al., 1998; Courtaud, 2000).

Les indentations dans l'herbier de posidonie sont dûes à la force des grands

courants sagittaux (Blanc, 1956, 1975). Ainsi, trois chenaux principaux d'érosion dans le golfe de Giens sont distingués: chenal de l'Almanarre, chenal des passe-pieds, et chenal de Giens (Figure 3-7, p. 118). Trois zones de courants sagittaux situées au niveau des bornes B03, B18, et B33 sont très importantes. Une autre zone de courants sagittaux moins importante, se situe à la borne B45 dans la partie Sud. Les courants sagittaux se dirigent le long des chenaux vers le large de 10 à 12 mètres de profondeur. Selon Courtaud (2000), dans le golfe de Giens, les courants sagittaux sont plus forts qu'en rade d'Hyères.



Figure 3-7 : Courants sagittaux dans le golfe de Giens (SOGREAH, 1988d; Courtaud, 2000), modifié.

#### iv) Courants de vents

Il y a peu d'études en relation avec les courants liés aux vents le long du tombolo (Jeudy De Grissac, 1975). Le régime des courants est donc essentiellement lié aux vents (Figure 3-8) (HYDRO M, 1993). Le régime des vents d'Ouest provoque deux sens de courant de vents (Jeudy De Grissac, 1975; SOGREAH, 1988d) : d'une part, un courant de vents s'écoule de l'Ouest vers l'Est puis du Nord au Sud dans la zone Nord du golfe de Giens ; d'autre part, un courant de vents se dirige de l'Ouest vers l'Est puis du Sud au Nord dans la zone Sud du golfe de Giens. Le régime des vents d'Est pousse les eaux de surface vers le large (décote). Il existe un déséquilibre hydrologique dans la zone littorale (SOGREAH, 1988d). Pour répondre à ce déséquilibre, des eaux de fonds

remontent vers la côte (« upwelling ») (SOGREAH, 1988d).

La vitesse des courants de vents sont souvent inférieure à 30 centimètres par seconde (SOGREAH, 1988d). Elle estimée à 2 ou 3% de la vitesse du vent (Jeudy De Grissac, 1975). Ces vitesses dépassent rarement 1 mètre par seconde pendant des fortes tempêtes. Dans le golfe de Giens, ces vitesses ont été évaluées en fonction de la vitesse du vent et de la profondeur de la tranche d'eau (Courtaud, 2000). Les vitesses du courant et du vent ont une corrélation forte linéaire avec  $R^2 > 0,9$ . Nous considérons que leur rôle est relativement limité sur la mobilisation et le transport des particules sédimentaires du fait de la taille des sédiments. Les courants de vents sont trop faibles pour transporter des sédiments de la taille du sable ou du gravier.



Figure 3-8 : Courants de surface par vents d'Est et d'Ouest à proximité du tombolo (SOGREAH, 1988d; Paillard et al., 1993; Courtaud, 2000), modifié.

#### b) Niveaux marins

Premièrement, nous allons porter sur les marées astronomique et barométrique. Deuxièmement, les surcotes annuelles seront présentées. Troisièmement, les variations des niveaux marins seront analysées en trois échelles de temps tels que les variations annuelles, saisonnières, et les variations dans la période entre 1993 à 1995. Quatrièmement, nous essayerons d'estimer les dispersions entre des niveaux marins à Porquerolles, MEDIT-2610, et MEDIT-2185 et ceux à Toulon.

#### i) Marées

Dans le secteur d'étude, la marée astronomique est de faible amplitude, de  $\pm 0,15$  à  $\pm 0,25$  mètre. En effet, les fluctuations à Hyères sont de l'ordre de 20 centimètres et atteignent rarement 30 centimètres pour les plus forts coefficients (Courtaud, 2000). Ces marnages faibles sont sans importance sur l'évolution sédimentaire littorale (Blanc, 1980).

Avec une pression de référence de 1 015 hectopascals, une dépression de 990 hectopascals provoquera une surélévation du niveau marin (marée barométrique) d'environ 25 centimètres (Préfet de la Vendée, 2012; Vanroye et al., 2012). Dans le cas de la pression inférieure à 750 millimètres de mercure (valeur minimum enregistré de

742 millimètres de mercure à Hyères), la surélévation du niveau marin sera plus forte entre +0,4 et +0,6 mètre NGF, notamment sous les effets de "seiches" (HYDRO M, 1993). Dans le golfe de Giens, le niveau marin peut atteindre +0,8 mètre NGF du fait de l'influence des vents de secteur Ouest pendant les tempêtes (HYDRO M, 1993). Les vitesses de vents de secteur Ouest sont maximales de 34,21 mètres par seconde correspondant aux fortes dépressions de 746 millimètres de mercure (HYDRO M, 1993).

#### ii) Surcotes annuelles

En utilisant l'analyse des observations à Toulon, nous obtenons la valeur de surcote annuelle d'environ de 30 centimètres NGF. Cette valeur ne prend pas en compte la marée astronomique. En combinant ces phénomènes, le niveau marin moyen annuel est de 0,5 mètre NGF (ERAMM, 2001).

Le niveau marin des évènements extrêmes dans le golfe de Giens est de plus de +0,4 mètre NGF correspondant à 0,653 mètres CM (SOGREAH, 1988d; Courtaud, 2000). Alors, nous analysons des événements exceptionnels avec niveaux marins supérieurs à 0,653 mètre CM. Les fréquences des événements exceptionnels sont calculées et présentées dans les figures 3-9 et C-3, p. - 16 -. Ces figures montrent que les évènements extrêmes sont les plus fréquents en automne et hiver (d'Octobre à Janvier). Ils présentent près de 70% du total. Les valeurs maximales apparaissent en Janvier, Octobre, et Novembre. Les niveaux marins des événements exceptionnels les plus bas sont atteints en Juillet et Août.



Figure 3-9 : Fréquence (A) et dispersion mensuelle des niveaux marins (B) des événements extrêmes (supérieur à 0,653 mètres CM) à Toulon entre 1999 et 2014.

Puis, nous avons établi les dispersions mensuelles des niveaux marins des événements exceptionnels à Toulon (Figure 3-9) et à la Capte (Figure C-4, p. - 16 -). La tendance mensuelle des niveaux marins des événements exceptionnels peut être estimée par un polynôme degré 6 avec une corrélation forte ( $R^2 > 0,8$ ).

#### iii) Variations annuelles

Nous avons comparé les niveaux marins à Toulon, à la Capte et au Port Ferréol (Figure 3-10). Pour la période de 1964 à 2014, les données annuelles oscillent entre 25 et 70 centimètres en-dessus la référence CM.

La régression linéaire indique une montée du niveau marin à Toulon et au port Ferréol mais son coefficient de détermination est faible (inférieur à 0,1) (Figure 3-11). C'est tout à fait compatible avec la tendance de montée du niveau marin en général.

En revanche, il semble qu'une tendance de baisse du niveau marin a eu lieu à la Capte dans cette période. Ce commentaire n'est pas sûr à cause de son coefficient de détermination très faible ( $R^2 < 0,2$ ). Cela prouve que ces données ne permettent pas d'estimer l'évolution du niveau marin dans le secteur d'étude avec une fiabilité convaincante (Courtaud, 2000).



Figure 3-10 : Niveaux marins annuels à Toulon, à la Capte et au Port Ferréol.



Figure 3-11 : Evolution du niveau marin à Toulon (A) et au Port Ferréol2 (B).



iv) Variations observées sur la période de 1993 à 1995

*Figure 3-12 : Comparaison des niveaux marins journaliers entre les marégraphes de Toulon et de la Capte du 01 Janvier 1993 au 31 Décembre 1995.* 



Figure 3-13 : Dispersion entre les niveaux marins à Toulon et à la Capte.

En observant la figure 3-12, les niveaux maximaux ne sont pas très élevés à Toulon mais assez forts à la Capte (de 75 à plus 95 centimètres). Nous avons testé la relation entre les niveaux marins à la Capte et ceux à Toulon. Nous contestons que l'évolution des niveaux marins à la Capte est assez proche de ceux de Toulon. Nous utilisons une régression linéaire sous la forme y =  $p_1^*x + p_2$ , où y est le niveau marin à la Capte en mètres ; x est le niveau marin à Toulon en mètres. Avec les bornes de confiance à 95% pour les coefficients de corrélation, nous avons obtenu les valeurs de  $p_1$  et de  $p_2$  :  $p_1$  = 0,777 (0,7205 ; 0,8334) et  $p_2$  = 0,162 (0,1393 ; 0,1847). Cette régression linéaire est acceptable avec les valeurs de R<sup>2</sup> = 0,4, R<sup>2</sup>-adjR = 0,4 et RMSE = 0,085 (Figure 3-13, p. 122).

#### v) Variations saisonnières

L'analyse des évolutions saisonnières des niveaux marins est établie à partir des calculs statistiques sur les données de marée à Toulon et à la Capte (Tableau 3-6).

WL	Saicon P (0/) Niveaux marins (m)										
(m)	Saison	P (%)	max	min	P10	P20	P30	P50	P70	<b>P80</b>	P90
	Printemps	26,72	0,55	0,02	0,26	0,28	0,32	0,38	0,43	0,46	0,5
<0 EE2	Été	26,7	0,55	0	0,27	0,33	0,37	0,42	0,46	0,49	0,52
≤0,555	Automne	22,27	0,55	0,08	0,28	0,35	0,38	0,44	0,48	0,51	0,53
	Hiver	24,31	0,55	0	0,23	0,27	0,3	0,37	0,43	0,46	0,5
	Printemps	15,02	0,65	0,55	0,56	0,56	0,57	0,58	0,6	0,61	0,63
<0.652	Été	16,76	0,65	0,55	0,56	0,56	0,57	0,57	0,59	0,6	0,62
≤0,055	Automne	45,14	0,65	0,55	0,56	0,57	0,57	0,59	0,61	0,63	0,64
	Hiver	23,08	0,65	0,55	0,56	0,57	0,57	0,59	0,61	0,63	0,64
	Printemps	8,33	0,75	0,65	0,66	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7	0,72
<0.752	Été	3,1	0,75	0,65	0,66	0,66	0,67	0,68	0,69	0,7	0,71
≤0,755	Automne	51,54	0,75	0,65	0,66	0,67	0,67	0,69	0,7	0,72	0,73
	Hiver	37,04	0,75	0,65	0,66	0,67	0,67	0,69	0,7	0,72	0,73
	Printemps	2,83	0,86	0,75	0,76	0,76	0,76	0,77	0,79	0,8	0,83
<0.052	Été	0,33	0,8	0,76	0,76	0,76	0,76	0,78	0,79	0,8	0,8
20,955	Automne	42,13	0,93	0,75	0,76	0,76	0,77	0,79	0,81	0,82	0,84
	Hiver	54,72	0,95	0,75	0,76	0,77	0,78	0,8	0,82	0,84	0,86
	Printemps	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>0.052	Été	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
>0,953	Automne	7,69	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
	Hiver	92.31	0.99	0.95	0.96	0.96	0.96	0.97	0.98	0.98	0.99

Tableau 3-6 : Statistiques sur les variations des niveaux de la mer à Toulon.

WL – les niveaux de la mer ; P – la fréquence ; max et min – les valeurs maximale et minimale des niveaux marins ; P10, P20, et P30, etc. ... - les percentiles des niveaux marins, par example, P10 où 90% des valeurs sont situées au-dessus de la courbe et 10% en dessous.

Nous analysons les tendances de l'évolution des niveaux marins au port de Toulon et à la Capte (Figure 3-14). La figure 3-14A montre que les niveaux les plus hauts sont atteints en automne et hiver. En automne et hiver, les dépressions sont fréquentes. Comme nous le savons déjà, la baisse de la pression atmosphérique provoque des variations marégraphiques positives. En effet, le niveau de la mer a tendance à augmenter entre Septembre et Octobre. Les valeurs maximales apparaissent en Octobre. D'Octobre à Février, nous notons qu'il existe une baisse du niveau de la mer. Les niveaux les plus bas sont atteints en Février. Le niveau marin augmente significativement de Février à Avril où les tempêtes d'équinoxe apparaissent de plus en plus. Cette tendance devient légère jusqu'en Août.

La figure 3-14B indique aussi que les niveaux les plus hauts sont atteints en automne et hiver. Le niveau de la mer a tendance à augmenter entre Septembre et Octobre. Les valeurs maximales apparaissent en Octobre. Entre Octobre et Novembre, le niveau marin peut continuer à augmenter ou diminuer. De Novembre à Janvier, il existe une baisse du niveau marin. Mais, une tendance d'augmentation du niveau marin apparaît entre Janvier et Février. Les niveaux marins sont plus bas en Mars. Ils remontent en Avril. Ils ont tendance à baisser légèrement dans la période d'Avril à Août. En été, l'état de la mer est plus calme qu'aux autres saisons. Ce qui entraîne une diminution de la valeur des niveaux marins.



Figure 3-14 : Dispersion mensuelle des cotes marégraphiques : (A) à Toulon entre 1999 et 2014 ; (B) à la Capte pendant la période entre 1993 et 1995 [d'après Courtaud (2000), modifié].

#### vi) Dispersion des niveaux marins

Nous avons déterminé la relation entre niveaux de la mer à Porquerolles, MEDIT-2610 et MEDIT-2185 et ceux à Toulon à partir des données PREVIMER à Provence avec la résolution 200 mètres pour la période de 2013 à 2014. Nous utilisons la régression linéaire sous la forme  $y = p_1^*x + p_2$ , où y correspond aux niveaux marins à Porquerolles/MEDIT-2610/MEDIT-2185 et x correspond aux niveaux marins à Toulon. En utilisant Matlab, les dispersions entre des niveaux marins à Porquerolles, à MEDIT-2610, à MEDIT-2185 et ceux à Toulon sont représentées dans la figure 3-15. Les coefficients avec l'intervalle de confiance (IC) à 95% et les paramètres statistiques tels que SSE, R<sup>2</sup>, R<sup>2</sup>-adjR, et RMSE sont présentés dans le tableau 3-7.

Nous obtenons de bonnes relations linéaires avec  $R^2 > 0.9$ , RMSE  $\approx 0$ , et SSE < 0.4. C'est pourquoi, nous pouvons utiliser ces relations pour déterminer les niveaux marins des conditions limites du modèle hydrodynamique (Paragraphe 4.7.1. p. 210).

Tableau 3-7 : Dispersion entre les niveaux marins à Porquerolles, à MEDIT-2610, à MEDIT-2185 et ceux à Toulon.

Station	Coefficients (95)	SSE	<b>D</b> 2	P2-adiP	DMSE		
Station	<b>p</b> <sub>1</sub>	<b>p</b> <sub>2</sub>	33E	N-	Raujr	ICHOL	
MEDIT-2610	0,978 (0,976, 0,979)	0,008 (0,007, 0,009)	0,083	0,990	0,990	0,003	
Porquerolles	0,857 (0,854, 0,861)	0,062 (0,061, 0,063)	0,25	0,964	0,964	0,005	
MEDIT-2185	0,849 (0,845, 0,853)	0,069 (0,068, 0,071)	0,380	0,945	0,945	0,006	



Figure 3-15 : Dispersion entre les niveaux marins à MEDIT-2610 (A), à MEDIT-2185 (B), à Porquerolles (C) et ceux à Toulon.

### 3.1.4.2. Etat de mer

Nous utilisons les données de houle disponibles dans le chapitre 2 afin de déterminer des caractéristiques des houles. Ce sont :

- Les houles au large à partir des bouées à Porquerolles, des simulations numériques fournies par Previmer, et ANEMOC. En effet, nous utilisons d'abord les données de la bouée 08301 à Porquerolles pour la période de 1999 à 8/2012. Pour le période de 9/2012 à 2014, nous avons extrait les vagues à partir du modèle Provence (résolution de 200 mètres) de Previmer. Ensuite, celles de modèle « *WaveWatch III* » de Previmer de 1999 à 2014 sont aussi utilisées. Nous avons enfin obtenu les données statistiques des houles d'ANEMOC (CETMEF) de 1979 à 2002 aux pointes MEDIT-2610 et MEDIT-2185 sous le format des tableaux. Elles présentent la relation entre la hauteur, la direction, et la période de la houle.
- Les houles à la côte à partir des plans de houle et des mesures in-situ à l'Almanarre en 2000 et à la Capte en 2009.

Nous présentons dans ce qui suit des caractéristiques des houles au large, des houles à la côte, et la comparaison entre eux.

#### a) Caractéristiques des houles au large

Les phénomènes de diffraction sont nombreux du fait de la présence d'avancées rocheuses. La réorientation de ces houles au contact des caps se retrouve au niveau des plans de houle (Figures 3-29 et 3-30, p. 141-142)(Courtaud, 2000). Le tombolo occidental subit les attaques de houles au large de plus de trois mètres de hauteur, avec une fréquence d'environ trois ou quatre fois par an, notamment en période d'équinoxe (HYDRO M, 1993). Il est très exposé à l'agitation de secteur Ouest à Sud-Ouest. Il est protégé de l'agitation provenant du secteur Nord-Ouest par la présence de Cap Sicié. Les évènements du secteur Est à Sud-Est influencent peu l'équilibre du tombolo Ouest grâce à la présence de tombolo Est (ERAMM, 2001). Les directions d'agitation Ouest et Sud-Ouest qui ont la hauteur moyenne des vagues peu élevées sont importantes et représente 28% du temps (HYDRO M, 1993). Les hauteurs significatives et périodes significatives les plus fréquentes corrélées à ces hauteurs sont présentées dans le tableau 3-8 (Courtaud, 2000) :

		-		_		
Tableau 20	Ilantona	a a shart a a to saa	at mania dag	a and figation	(Countrand 2000)	ſ
1000000.3-8	·HUMPURS	SIGNITICATIVES	PI NPRIMAPS	SIGNITICOLIVES		1
I ubicuu b o	inducedis	Significatives	ci per loues	Significatives	[ 00 ul tu uu, <b>1</b> 0000]	,

	Période de retour annuelle	Période de retour décennale
$H_{1/3}$ (m)	3,3	4,4
T <sub>1/3</sub> (s)	De 7 à 8	De 9 à 10

Les paramètres principaux des houles au large sont le fetch, la hauteur, et la période (Courtaud, 2000). Nous présentons dans ce qui suit une description de ces paramètres. Puis, l'impact morphologique du régime des houles sera exposé. Les régimes annuel et saisonnier des houles seront analysés. Nous porterons ensuite sur

les houles moyennes et morphologiques saisonnières. Les houles mesurées et simulées au large de Porquerolles seront ensuite comparées. Nous estimerons enfin une dispersion entre la hauteur et la période de la houle au large.

#### i) Fetch des houles au large

C'est la distance d'une étendue d'eau sur laquelle souffle un vent d'une force et d'une direction données. Le rôle du fetch est significatif dans l'organisation hydrodynamique (Larras, 1979; United States. Army. Corps of Engineers et Coastal Engineering Research Center (U.S.), 1984). Cependant, nous remarquons que les fetchs des houles ne sont pas très importants car la largeur de la Méditerranée est faible. Selon l'origine des vents, les houles affectant le tombolo occidental seront plus ou moins agressives car la magnitude des houles est proportionnelle à la distance du fetch dans le tableau 3-9 (Courtaud, 2000).

Tableau 3-9 : Distance des fetchs (Courtaud, 2000).

Directions	Est à Nord-Est	Sud-Est	Sud-Ouest		Nord-O			
Origine des vents	Golfe de Gênes	Sardaigne	Espagne*	Baléares	Lion**	Rhône***	Toulon****	
Distance (km)	330	310	250	400	230	100	18	
* Côte nord orientale de l'Esnagne · ** Golfe du Lion · *** Vallée du Rhône · **** Rade de Toulon								



#### ii) Hauteurs et périodes des houles au large

Figure 3-16 : Dispersion des hauteurs significatives et maximales ( $H_s$  et  $H_{max}$ ) et des périodes significatives et maximales ( $T_s$  et  $T_{max}$ ) des houles à Porquerolles pendant la période de 1992 à 1997 [d'après Courtaud (2000), modifié].

La dispersion des hauteurs des houles à Porquerolles indique que 20% des hauteurs significatives des houles atteignent au moins 1,5 mètres et que 20% des hauteurs maximales des houles dépassent 2,5 mètres (Figure 3-16).

La dispersion des périodes montre que 20% des périodes significatives et maximales atteignent respectivement au moins 7,5 et 10 secondes (Figure 3-16).

L'histogramme des hauteurs significatives de houle indique que plus de 80% des

hauteurs sont supérieures à 0,5 mètre et que 30% des valeurs dépassant 1,5 mètres (Figure 3-17A).

Les périodes les plus fréquentes oscillent de 4 à 7 secondes (plus de 90% de fréquence cumulée) (Figure 3-17C) (Courtaud, 2000). Les périodes supérieures à 7 secondes correspondent aux fortes houles et représentent 10% des valeurs (Figure 3-17C) et 30% des valeurs (Figure 3-17D).

Courtaud (2000) souligne que les fortes vagues de Porquerolles correspondant aux hauteurs significatives supérieures à 1,25 mètres proviennent de trois secteurs : Nord-Ouest, Est et Sud-Ouest. Selon Courtaud (2000), les vagues les plus fortes de Porquerolles correspondant aux hauteurs significatives supérieures à 4 mètres et périodes supérieures à 10 secondes, apparaissent lors des vents violents de secteur Nord-Ouest (20 mètres par seconde). Cela prouve que les vagues les plus fortes n'influencent pas directement le tombolo.



Figure 3-17 : Histogrammes des hauteurs (A et B) et périodes significatives (C et D) de houle au large de Porquerolles (Mesures du 14 Mai 1992 au 07 Juin 2011) (CEREMA, 2014).

#### iii) Impact morphologique du régime des houles

Dans le golfe de Giens, la variation du niveau de la mer est faible. Alors, le courant de marée est aussi faible [Section 3.1.4.1. a) ii) p. 116]. L'analyse des régimes de houle nous permet d'explorer le régime du transport sédimentaire sous l'action de la houle.

Pour déterminer des régimes de transport des sédiments, nous devons analyser statistiquement les données de houle. Il est nécessaire d'utiliser un modèle statistique des houles qui influent sur la morphologie, le transport sédimentaire et l'évolution du fond.

La méthode d'Elias (2006) nous permet d'estimer la composante dominante des régimes de houle sur le transport sédimentaire. Selon cette méthode, la hauteur de houle significative (Hs) est remplacée par la hauteur de la houle morphologique représentative (H<sub>mor</sub>) (Trinh, 2010). Elle est calculée par formulation suivant :

$$H_{mor} = \left\{\frac{1}{n} \cdot \sum [H_s(i)]^k\right\}^{1/k}$$
(3-1)

0ù :

n est le nombre d'observation ;

H<sub>s</sub> est hauteur de houle significative en mètres ;

k est la relation de pouvoir entre hauteur de transport et de la houle (k = 2,5)

Les données des houles au large sont utilisées comme condition limite pour le modèle de propagation et le modèle hydrodynamique.

Ces données pour la période 1999 à 2012 ont été analysées en huit directions des vagues et en sept classes de hauteur des vagues selon Douglas (Tableau 3-10, p. 130 et paragraphe C4.3.2, p. - 24 -). Nous avons calculé la hauteur de la houle morphologique représentative (H<sub>mor</sub>) déterminée par l'équation (3-1) pour chaque classe.

L'impact morphologique (IM) de chaque classe est calculé en multipliant la hauteur de la houle morphologique représentative par une probabilité d'occurrence (P) (Trinh, 2010) :

$$IM = H_{mor} \cdot P \tag{3-2}$$

Seules les houles de direction de Sud à Ouest sont prises en compte dans le modèle car le golfe de Giens est exposé aux directions sud-ouest. Ainsi, la direction efficace de la houle est comprise entre 160 et 300 degrés Nord, les données sont triées dans les directions efficaces. Le résultat des analyses (H<sub>mor</sub>, P, et IM) sont indiqués dans le tableau 3-10.

En basant le résultat statistique sur le tableau 3-10, la fréquence de la direction de  $250^{\circ}$  à  $270^{\circ}$  (Ouest) (38,86% dans le tableau 3-10) est plus élevée que la fréquence de la direction de Sud à Sud-Ouest (11,55 + 21,41 = 32,96% dans le tableau 3-10). Toutefois, les valeurs de l'IM de la direction Ouest (plus de 57% en total dans le tableau 3-10) sont plus élevées que celles des directions de Sud à Sud-Ouest (10,03 + 19,43= 29,46% en total dans le tableau 3-10). Ainsi, la houle d'Ouest a la plus grande influence

sur le transport des sédiments dans le golfe de Giens (Figures 3-18 et 3-19, p. 131-132).

<b>H</b> <sub>1/3</sub>	Morphologie	N	NE	Ε	SE	S	<b>SO</b>	0	NO	Ν
(m)	houle	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	Hmor	0	0	0,10	0,09	0	0	0	0	0
<0,1	P (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IM	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Hmor	0,35	0,33	0,36	0,37	0,36	0,35	0,35	0,34	0,33
0,5	P (%)	0,01	0,09	2,38	3,26	4,20	9,63	3,36	0,20	0,01
	IM	0	0,03	0,85	1,20	1,50	3,39	1,16	0,07	0
	Hmor	0,76	0,89	0,90	0,86	0,86	0,84	0,93	1,01	0,94
1,25	P (%)	0,02	0,18	5,93	5,21	4,96	11,93	10,19	0,94	0,02
	IM	0,01	0,16	5,36	4,47	4,28	10,04	9,48	0,95	0,02
	Hmor	1,78	1,72	1,80	1,75	1,68	1,73	1,84	1,85	1,54
2,5	P (%)	0,01	0,15	5,15	2,28	2,21	5,27	12,27	2,42	0,01
	IM	0,01	0,27	9,29	3,99	3,70	9,09	22,54	4,48	0,01
	Hmor	0	2,81	2,97	2,96	2,87	2,99	3,07	2,92	2,97
4	P (%)	0	0,03	1,17	0,22	0,17	0,83	4,06	0,54	0
	IM	0	0,07	3,48	0,64	0,50	2,47	12,44	1,57	0,01
	Hmor	0	0	4,44	0	4,48	4,29	4,38	4,35	0
5	P (%)	0	0	0,05	0	0,01	0,07	0,43	0,02	0
	IM	0	0	0,23	0	0,05	0,32	1,88	0,07	0
E 24	Hmor	0	0	5,18	0	0	5,16	5,17	5,05	0
5,34	P (%)	0	0	0	0	0	0,01	0,04	0	0
	IM	0	0	0,02	0	0	0,04	0,23	0	0
	Hmor	0	0	5,46	0	0	5,51	5,59	0	0
6	P (%)	0	0	0	0	0	0	0,04	0	0
	IM	0	0	0,01	0	0	0,01	0,21	0	0
	Hmor	0	0	0	0	0	0	6,16	0	0
6,48	P (%)	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0
	IM	0	0	0	0	0	0	0,07	0	0
	Hmor	0	0	0	0	0	0	6,59	0	0
7,03	P (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IM	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0
	ΣΡ	0,04	0,45	14,68	10,97	11,55	27,74	30,40	4,12	0,04
	ΣIM	0,02	0,53	19,24	10,30	10,03	25,36	48,02	7,14	0,04

Tableau 3-10 : Effet de la hauteur et la direction de la houle sur la morphodynamique du tombolo (Porquerolles 08301) (calculé par notre script Matlab : <u>waveStat.m</u>)









*Figure 3-18 : Caractéristiques du climat des vagues en provenant d'Est, Sud-Est, Sud, Sud-Ouest (de haut en bas) et son influence sur la morphodynamique du golfe de Giens.* 



*Figure 3-19 : Caractéristiques du climat des vagues en provenant d'Ouest et son influence sur la morphodynamique du golfe de Giens.* 

#### iv) Régime annuel des houles

Pour mieux comprendre l'influence des facteurs océaniques, il faut faire tourner le modèle numérique avec un régime de la houle annuelle.

Les statistiques de la houle permettent de définir le régime de la houle annuelle.



Figure 3-20 : Roses des houles annuelles de 1999 (A) à 2002 (D) (de gauche à droite et de haut en bas).



(I) (J) Figure 3-21 : Roses des houles annuelles de 2003 (A) à 2012 (J) (de gauche à droite et de haut en bas).

Les figures 3-20 et 3-21 illustrent les roses des houles du régime annuel de la

houle. Nous voyons que 80 à 180 degrés Nord (de Est à Sud) et 180 à 300 degrés Nord (de Sud à Ouest) sont les directions dominantes et en comparant avec la rose des houles pour 14 ans, les roses des houles en 2007 et 2008 sont presque la même en termes de distribution dans la direction de 90 à 270 degrés Nord ainsi que la hauteur de la houle significative. Ainsi, la période 2007 et 2008 permet de définir le régime de la houle annuelle.

Dans ces figures, nous voyons que les variations de la houle en 2008 sont plus appropriées pour l'examen de la répartition de la direction significative, la hauteur et la période de pic de la houle.

Les données de la houle utilisées comme conditions limites pour le modèle sont celles de Porquerolles (bouée 08301 - CANDHIS), les données d'observation recueillies à 14 ans (de 1999 à 2012) toutes les 6 heures (Figure 3-22).



*Figure 3-22 : Rose des houles pour quatorze années (de 1999 à 2012) (Lacroix et al., 2015a).* 

Seulement les houles venant de la direction de Sud à Ouest sont prises en compte dans le modèle de houle. La direction efficace de la houle est de 180 à 270 degrés Nord, les données sont triées dans les directions efficaces et sont listées dans le tableau 3-11.

Tableau 3-11 : Comparaison statistique de houle entre 14 ans d'observation, année 2000, année 2007 et année 2008.

Direction		Ν	NE	Ε	SE	S	SO	0	NO	Ν
(°N)		<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
Fréquence (%)	14 ans	0,03	0,45	14,69	10,97	11,55	27,74	30,40	4,11	0,05
	2000	0	0,15	12,57	10,39	14,54	29,99	26,51	5,86	0
	2007	0,02	0,09	15,63	12,01	10,59	23,20	38,36	0,09	0,01
	2008	0,01	0,02	12,34	10,48	10,80	31,58	34,57	0,18	0,02
	14 ans	0,81	1,13	1,27	0,90	0,83	0,88	1,54	1,69	0,95
Hs (m)	2000	0	0,57	1,01	0,77	0,76	0,79	1,32	1,70	0
	2007	1,10	0,81	1,61	1,03	0,70	0,97	2,21	0,93	0,83
	2008	2,01	1,90	1,58	1,07	1,24	1,09	1,94	1,85	2,03

Direction (°N)		Ν	NE	Е	SE	S	SO	0	NO	Ν
		<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
MWD (°)	14 ans	11	57	95	133	181	226	265	302	348
	2000	0	56	91	136	180	224	271	300	0
	2007	17	47	98	133	178	231	262	320	356
	2008	19	47	98	135	181	229	261	307	356
	14 ans	5,45	5,83	5,49	5,12	5,25	5,26	5,95	6,39	6,05
Tp (sec)	2000	0	5,05	5,15	4,88	5,16	5,10	5,67	6,51	0
	2007	5,22	4,26	5,54	5	5,09	5,05	6,18	5,27	5,43
	2008	6,32	6,26	5,54	4,95	5,30	5,20	6,05	5,97	6,12

#### v) Régime saisonnier des houles

La répartition saisonnière des houles est évaluée à partir de quatre variables :  $H_{1/3}$ ,  $H_{max}$ ,  $T_{1/3}$  et  $T_{max}$  (Figure 3-23) (Courtaud, 2000).



Figure 3-23 : Variations saisonnières des hauteurs (A) et des énergies (B) des houles au large de Porquerolles de 1992 à 1997 [d'après Courtaud (2000), modifié].

La figure 3-23 montre qu'une baisse de tous les paramètres de la houle entre Janvier et Février. Ensuite, à partir de Mars, une augmentation des variables jusqu'à Avril. Puis, une nouvelle baisse des hauteurs et périodes d'Avril à Juillet (sauf le mois de Juin). Les plus faibles variables se trouvent entre Mai et Août. Le début de l'automne, la tendance à la hausse des variables jusqu'à Décembre. Les hauteurs atteignent plus de 1 mètre (Courtaud, 2000).

L'énergie (E en watts par mètre) est calculé par Courtaud (2000) à partir de  $H_{1/3}$  et de  $T_{1/3}$  (Bruzzi, 1996) selon la formule de Jimenez et Sanchez-Arcilla (1994) (Figure 3-23). L'énergie de la houle diminue de Janvier à fin Février. En Mars, elle augmente et atteint sa valeur maximale (supérieur à 2,5 watts par mètre) pendant les tempêtes d'équinoxe de printemps. A partir du mois d'Avril, elle descend et atteint une valeur minimum de 0,39 watt par mètre en Août. Enfin, elle remonte jusqu'au mois de Décembre. Les plus fortes valeurs d'énergie de la houle (de 2,5 à 3 watts par mètre) sont en Décembre et en Janvier (Courtaud, 2000).

En observant la figure 3-23, nous pouvons démontrer qu'il y a deux régimes de houles très différents. Ceux sont le régime hivernal et le régime estival. En hiver, les

paramètres des houles tels que la hauteur des houles, la période, atteint ses valeurs maximales ( $H_{1/3}$  supérieur à 1,2 mètres,  $T_{13}$  supérieur à 6,5 secondes). L'énergie varie entre 2 et 3 watts par mètre (Courtaud, 2000). En été, les houles sont réduites en hauteur des houles, en période et en énergie. L'énergie moyenne est environ 0,5 watt par mètre (Courtaud, 2000).

#### vi) Houles moyennes saisonnières

Les statistiques de la houle nous permettent de déterminer les paramètres des houles moyennes saisonnières tels que fréquence, hauteur, direction et période (Tableau 3-12).

Direction		Ν	NE	Е	SE	S	SO	0	NO	Ν	
(°N)		<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360	
Direction (°N)   N   NE   E   SE   S   SO   O   I     (°N)   <20   <70   <110   <160   <200   <250   <290   <     Fréquence (%)   Annuel   0,03   0,45   14,69   10,97   11,55   27,74   30,4      Fréquence (%)   Estival   0,01   0,13   5,77   8,30   11,20   36,41   36,28      Hivernal   0,06   0,78   20,34   9,55   9,03   23,31   29,60      Hivernal   0,81   1,13   1,27   0,9   0,83   0,88   1,54      Hivernal   0,87   1,43   1,55   1,14   1,16   1,32   1,93      MWD (°)   Estival   0,87   1,43   1,55   1,14   1,16   1,32   1,93      MwD (°)   Estival   12   54   96   134   181   230   264	4,11	0,05									
	36,28	1,88	0,02								
(70)	Nie (°N)NESESOONO°N)<20<70<110<160<200<250<290<3Annuel0,030,4514,6910,9711,5527,7430,44,1Sréquence (%)Estival0,010,135,778,3011,2036,4136,281,8Hivernal0,060,7820,349,559,0323,3129,607,2Annuel0,811,131,270,90,830,881,541,6Hivernal0,330,770,750,630,520,551,221,2Hivernal0,871,431,551,141,161,321,931,9MWD (°)Estival12549613418123026429Hivernal11579413218222426630F <sub>P</sub> (sec)Estival4,734,874,784,944,865,585,57	7,25	0,09								
	Annuel 0,03 0,45 14,69 10,97 11,55 27,74 30,4 4,17   Estival 0,01 0,13 5,77 8,30 11,20 36,41 36,28 1,88   Hivernal 0,06 0,78 20,34 9,55 9,03 23,31 29,60 7,23   Annuel 0,81 1,13 1,27 0,9 0,83 0,88 1,54 1,66   Estival 0,33 0,77 0,75 0,63 0,52 0,55 1,22 1,20   Hivernal 0,87 1,43 1,55 1,14 1,16 1,32 1,93 1,90   Annuel 11 57 95 133 181 226 265 302   Hivernal 12 54 96 134 181 230 264 296   Hivernal 11 57 94 132 182 224 266 305	1,69	0,95								
Hs (m)	Estival	0,33	0,77	0,75	0,63	0,52	0,55	1,22	1,20	0,74	
IIS (III)	Hivernal	0,87	1,43	1,55	1,14	1,16	1,32	1,93	1,96	1,24	
	Annuel	11	57	95	133	181	SO   O   NO   N     250   <290   <340   <360     27,74   30,4   4,11   0,05     36,41   36,28   1,88   0,02     23,31   29,60   7,25   0,09     0,88   1,54   1,69   0,95     0,55   1,22   1,20   0,74     1,32   1,93   1,96   1,24     226   265   302   348     230   264   298   349     224   266   305   347     5,26   5,95   6,39   6,05     4,86   5,58   5,54   5,34     5,87   6,45   6,73   6,60	348			
MWD (°)	Estival	12	54	96	134	181	230	264	298	349	
	Hivernal	11	57	94	132	182	224	266	305	347	
	N   NE   E   SE   SO   O   NO   NO     V)      NE   E   SE   SO   O   NO   NO	6,05									
T <sub>p</sub> (sec)	Estival	4,73	4,73	4,87	4,78	4,94	4,86	5,58	5,54	5,34	
	Hivernal	5.62	6.41	5.89	5.52	5.57	5.87	6.45	6.73	6.60	

Tableau 3-12 : Statistique des houles dans de golfe de Giens (Porquerolles 08301) pendant 14 ans (calculé par notre script Matlab : <u>waveStat.m</u>, Annexe B, p. - 9 -).

#### vii) Houles morphologiques saisonnières

Les statistiques de la houle permettent aussi de déterminer les impacts morphologiques du régime des houles saisonnières. En basant le résultat statistique (Tableaux 3-13 et 3-14, p. 137 et paragraphe C4.3.3, p. - 27 -) la fréquence de la direction Ouest est plus élevée que la fréquence de la direction Sud-Ouest. Toutefois, l'impact morphologique de la direction Ouest est plus élevé que les directions de Sud-Ouest. Donc, la houle d'Ouest a toujours la plus grande influence sur le transport des sédiments dans le golfe de Giens, tant l'hiver que l'été.

Tableau 3-13 : Effet de la hauteur et de la direction de la houle estivale sur la morphodynamique du tombolo (Porquerolles 08301) (calculé par notre script Matlab : waveStat.m, Annexe B, p. - 9 -).

<b>H</b> <sub>1/3</sub>	Morphologie	Ν	NE	Ε	SE	S	SO	0	NO	Ν
(m)	houle	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
-0.1	Hmor	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<0,1	P (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0

<b>H</b> <sub>1/3</sub>	Morphologie	Ν	NE	E	SE	S	SO	0	NO	Ν
(m)	houle	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	IM	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Hmor	0,20	0,25	0,34	0,35	0,35	0,34	0,33	0,33	0,18
0,5	P (%)	0,01	0,05	2,61	4,22	6,77	21,15	7,49	0,13	0,01
	IM	0	0,01	0,89	1,49	2,36	7,20	2,47	0,04	0
	Hmor	0,59	0,70	0,84	0,82	0,77	0,79	0,92	0,97	0
1,25	P (%)	0	0,04	2,34	3,29	3,91	13,70	13,93	0,95	0
	IM	0	0,03	1,97	2,69	3,01	10,86	12,86	0,92	0
	Hmor	0	1,68	1,59	1,65	1,52	1,60	1,80	1,69	0
2,5	P (%)	0	0,03	0,61	0,79	0,48	1,38	12,06	0,78	0
	IM	0	0,05	0,97	1,30	0,73	2,22	21,68	1,32	0
	Hmor	0	3	3,22	3,44	2,84	3,57	3,04	2,82	3
4	P (%)	0	0	0,21	0,01	0,03	0,11	2,61	0,02	0
	IM	0	0,01	0,67	0,04	0,10	0,38	7,95	0,05	0,01
	Hmor	0	0	0	0	0	4,07	4,29	0	0
5	P (%)	0	0	0	0	0	0,07	0,19	0	0
	IM	0	0	0	0	0	0,28	0,82	0	0
	ΣP	0,01	0,12	5,77	8,31	11,19	36,41	36,28	1,88	0,01
	∑IM	0	0,10	4,50	5,52	6,20	20,94	45,78	2,33	0,01

Tableau 3-14 : Effet de la hauteur et de la direction de la houle hivernale sur la morphodynamique du tombolo (Porquerolles 08301) (calculé par notre script Matlab : <u>waveStat.m</u>, Annexe B, p. - 9 -).

$H_{1/3}$	Morphologie	N	NE	Е	SE	S	SO	0	NO	Ν
(m)	houle	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	Hmor	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<0,1	P (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	IM	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Hmor	0	0,45	0,41	0,43	0,39	0,39	0,41	0,44	0
0,5	P (%)	0	0,05	1,09	1,32	1,51	2,44	0,85	0,01	0
	IM	0	0,02	0,44	0,56	0,59	0,96	0,35	0	0
	Hmor	0,70	0,92	0,93	0,85	0,89	0,90	0,95	1,04	0,99
1,25	P (%)	0,05	0,28	7,15	4,75	3,97	9,69	7,48	1,04	0,06
	IM	0,04	0,26	6,65	4,04	3,53	8,73	7,10	1,08	0,06
2,5	Hmor	2,33	1,74	1,84	1,82	1,76	1,75	1,90	1,90	1,54
	P (%)	0,01	0,36	9,75	3,20	3,15	9,29	13,89	4,79	0,03
	IM	0,02	0,63	17,96	5,83	5,55	16,28	26,38	9,13	0,04
	Hmor	0	2,82	2,95	2,86	2,93	2,93	3,07	2,98	2,61
4	P (%)	0	0,08	2,13	0,28	0,36	1,74	6,30	1,35	0,01
	IM	0	0,22	6,27	0,81	1,06	5,09	19,37	4,01	0,02
	Hmor	0	0	4,45	0	4,54	4,47	4,41	4,36	0
5	P (%)	0	0	0,20	0	0,02	0,11	0,76	0,06	0
	IM	0	0	0,89	0	0,11	0,51	3,37	0,25	0
E 24	Hmor	0	0	5,18	0	0	5,19	5,18	5,05	0
5,54	P (%)	0	0	0,01	0	0	0,02	0,14	0	0
	IM	0	0	0,07	0	0	0,11	0,72	0,02	0
	Hmor	0	0	5,46	0	0	5,38	5,58	0	0
6	P (%)	0	0	0,01	0	0	0	0,12	0	0
	IM	0	0	0,04	0	0	0,02	0,68	0	0

<b>H</b> <sub>1/3</sub>	Morphologie	Ν	NE	Ε	SE	S	SO	0	NO	Ν
<b>(</b> m <b>)</b>	houle	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
6,48	Hmor	0	0	0	0	0	0	6,16	0	0
	P (%)	0	0	0	0	0	0	0,05	0	0
	IM	0	0	0	0	0	0	0,29	0	0
	Hmor	0	0	0	0	0	0	6,59	0	0
7,03	P (%)	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0
	IM	0	0	0	0	0	0	0,04	0	0
	ΣP	0,06	0,77	20,34	9,55	9,01	23,29	29,60	7,25	0,10
	ΣIM	0,06	1,13	32,32	11,24	10,84	31,70	58,30	14,49	0,12

#### viii) Comparaison des houles mesurées et simulées au large de Porquerolles

Les paramètres de la houle sont comparés avec les données de la houle de la bouée 08301 et sont validés pendant la tempête (Figures 3-24 à 3-26).



Figure 3-24 : Comparaison des hauteurs (A) et périodes (B) de la houle calculée et mesurée sur 14 ans à Porquerolles.



Figure 3-25 : Comparaison des hauteurs (A) et périodes (B) de la houle calculée et mesurée en Janvier 2008 à Porquerolles.



Figure 3-26 : Comparaison des hauteurs (A) et périodes (B) de la houle calculée et mesurée en Juin 2008 à Porquerolles.

Nous essayons de tester la relation entre la hauteur/période significative simulée et mesurée de la houle. Nous utilisons la régression linéaire sous la forme  $y = p_1^*x + p_2$ , où y correspond à la hauteur/période simulée de la houle et x correspond à la hauteur/période mesurée de la houle.

En utilisant Matlab, les dispersions des hauteurs et des périodes de la houle calculées et mesurées sont représentées dans les figures 3-24 à 3-26. Les coefficients avec l'intervalle de confiance (IC) à 95% et les paramètres statistiques tels que R<sup>2</sup>, R<sup>2</sup>- adjR, et RMSE sont présentés dans le tableau 3-15. Nous remarquons que ces relations sont d'assez bonnes qualités avec R<sup>2</sup> et R<sup>2</sup>-adjR supérieurs à 0,44.

Pour une période annuelle, les paramètres de la houle sont exacts. C'est une période assez longue pour calculer les paramètres statistiques de la houle.

Période	Paramètre	Coefficients (95% confiance)	de l'intervalle de	<b>R</b> <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> -adiR	RMSE	
		<b>p</b> 1	<b>p</b> <sub>2</sub>				
14 ans	H <sub>1/3</sub>	0,586 (0,583, 0,589)	0,227 (0,222, 0,231)	0,527	0,527	0,459	
	T <sub>1/3</sub>	0,687 (0,682, 0,691)	0,624 (0,599, 0,65)	0,440	0,440	0,876	
01/2009	H <sub>1/3</sub>	0,761 (0,735, 0,787)	-0,216 (-0,272, -0,161)	0,819	0,818	0,407	
01/2008	<b>T</b> <sub>1/3</sub>	0,965 (0,928, 1,002)	-0,780 (-0,996, -0,565)	0,785	0,785	0,607	
06/2008	H <sub>1/3</sub>	0,628 (0,606, 0,651)	0,077 (0,050, 0,104)	0,810	0,810	0,203	
	<b>T</b> <sub>1/3</sub>	0,715 (0,667, 0,762)	0,640 (0,381, 0,900)	0,544	0,543	0,6615	

Tableau 3-15 : Dispersion des hauteurs et des périodes de la houle calculée et mesurée.

#### ix) Relation entre la hauteur et la période de la houle au large

Nous avons essayé de rechercher la relation entre la hauteur et la période de la houle au large à partir des données mesurées et simulées de houle. Mais, nous n'avons pas réussi en raison des incertitudes.

Cependant, en Méditerranée Orientale, nous pouvons estimer la période de la houle en fonction de la hauteur de la houle grâce à la fonction suivante (Migniot, 1990):

$$T = H_{1/10} + 4,5 \tag{3-3}$$

Où T est la période de la houle au large en second,  $H_{1/10}$  est la hauteur de la houle en mètre.

#### b) Caractéristiques des houles à la côte dans le golfe de Giens

Une hauteur significative moyenne des houles estimée est supérieure à 1,25 mètres au tombolo (Courtaud, 2000). Cette valeur correspond à la limite inférieure de la "mer agitée" dans l'échelle de Douglas (Tableau C-5). L'amortissement des houles par l'herbier n'est pas encore quantifié (Courtaud, 2000). Nous présentons dans ce qui suit une description des clapots, des coefficients de réfraction et de la dispersion entre la période et la hauteur de la houle.

#### i) Clapots

Les vents locaux à Hyères provoquent des clapots avec des hauteurs de 0,5 mètres en moyenne et des périodes courtes de 2 à 4 secondes (Figure 3-27). Les clapots engendrent des courants de transit littoral (parallèles à la côte) (HYDRO M, 1993).



Figure 3-27 : Caractéristiques des clapots pour une longueur de surface libre sans obstacle de 10-15 kilomètres dans le golfe de Giens à partir des abaques de Bretschneider [d'après HYDRO M (1993), modifié].

#### ii) Coefficients de réfraction à partir des plans de houle dans le golfe de Giens

Les coefficients de réfraction ont été divisés en cinq classes (Figure 3-28), afin de mettre en évidence (Courtaud, 2000) :



Figure 3-28 : Classification des coefficients de réfraction.



Figure 3-29 : Plan de houle de secteur Sud-Ouest (T = 7 secondes) : Point rouge : Kr > 1 ; Point magenta : 0,75 < Kr < 1 ; Point orange : 0,5 < Kr < 0,75 ; Point vert : 0,25 < Kr < 0,5 ; Point bleu : Kr < 0,25 [d'après Courtaud (2000), modifié].

Les plans de houle de Sud-Ouest et d'Ouest ont été établis pour une période de 7

secondes. Sur le plan de houle de Sud-Ouest, les coefficients de réfraction (Kr) sont forts entre 0,76 et 1,1 dans certains secteurs entre les bornes B04 et B15, B25 et B30, B37, et B40. Ils sont le plus forts (environ 1,36) entre les bornes B20 et B21. Au niveau de la borne B40, ces coefficients sont faibles, inférieurs à 0,32 (Figure 3-29, p. 141) (Courtaud, 2000).

En régime d'Ouest, la réfraction est la plus forte (environ 1,4) entre les bornes B15 et B16. Ce coefficient est fort (environ 0,8) entre les bornes B03 et B14, B25 et B28 (Figure 3-30). Au niveau de la borne B20, B33, et B46, ce coefficient est faible, environ 0,6 (Courtaud, 2000).



*Figure 3-30 : Plan de houle de secteur Ouest (T = 7 secondes) [d'après SOGREAH (1988d), modifié].* 

La construction des plans de vague ne tient pas compte du phénomène de diffraction (ERAMM, 2001). Selon Courtaud (2000), le plan de houle s'adapte aux fonds réguliers. La présence de posidonie dans le golfe de Giens influence les paramètres de

la houle. Ils peuvent varier en fonction des caractériques des herbiers de posidonie et des bancs de grès (SOGREAH, 1988a). Les résultats de la modélisation de la houle sont dans le paragraphe 4.6.7. p. 199 et sont plus fiables que les simples plans.

#### iii) Dispersion entre la période de pic et la hauteur de la houle à l'Almanarre

Bredmose et al. (2012) a proposé une relation entre la période de pic et la hauteur de la houle :

 $T_{13} = a^* sqrt(H_s/g)$  (3-4) Où g est l'accélération de pesanteur et le coefficient « a » est de 11,1 à 14,3.



Figure 3-31 : Dispersion entre la période de pic et la hauteur de la houle à l'Almanarre : (A) Limites observées non simultanées. (B) Limites observées simultanées. (C) Limites fonctionnelles non simultanées. (D) Limites fonctionnelles simultanées.

Nous avons testé cette relation à l'Almanarre, mais le résultat n'est pas bon. Nous avons essayé en ajoutant un autre coefficient « b » dans le membre de droite de cette équation. La dispersion entre la période de pic et la hauteur de la houle est estimé par l'équation suivante :

 $T_{13} = a^* sqrt(H_s/g) + b$  (3-5) En utilisant Matlab (Figure 3-31), les coefficients (l'intervalle de confiance (IC) à 95%) obtenus sont : a = 10,14 (de 9,083 à 11,2) et b = 4,157 (de 3,944 à 4,369). Nous obtenons les paramètres statistiques tels que R<sup>2</sup> = 0,3632, ajustement R<sup>2</sup>-adjR = 0,3622, et RMSE = 0,8406. Nous remarquons qu'ils ne sont pas très bonne qualité car le site de l'Almanarre est très proche de la côte où les paramètres de la houle dépendent de la bathymétrie et les phénomènes complexes tels que la réfraction, la diffraction ainsi que le déferlement, etc. ...

#### c) Comparaison des mesures de la houle au large de Porquerolles et de la houle à la côte

La comparaison des mesures de la houle au large de Porquerolles et de la houle à la côte nous permet de déterminer l'atténuation de la houle du fait des phénomènes de réfraction et de diffraction (ERAMM, 2001). Elle est illustrée dans la figure 3-32.



Figure 3-32 : Hauteur (A) et période (B) de la houle enregistrée au large et à la côte au cours du mois de Novembre 2000 (ERAMM, 2001).



Figure 3-33 : Dispersion des hauteurs (A) et périodes (B) de la houle à la côte (Almanarre) et de la houle au large (Porquerolles).

Nous essayons de tester la relation entre la hauteur/période de la houle à la côte (Almanarre) et de la houle au large (Porquerolles). Nous utilisons une régression linéaire. Nous obtenons des fonctions sous la forme y = 0,3154x - 0,0642 (pour la hauteur de la houle) et y = 0,7387x + 1,6771 (pour la période de la houle) (Figure 3-33), où y correspond à la hauteur/période de la houle à la côte (Almanarre) en mètres, x correspond à la hauteur/période de la houle au large (Porquerolles) en mètres. Nous obtenons un bon coefficient de détermination ( $R^2 > 0,7$ ).

## 3.1.5. Principales caractéristiques d'évènements extrêmes

Les tempêtes marines correspondent à l'évolution d'une perturbation
atmosphérique pouvant s'étendre sur une largeur atteignant les 200 kilomètres. Chaque année, le littoral occidental est soumis à plusieurs épisodes de tempêtes marines d'intensité variable. Le cordon littoral séparant la mer de la lagune peut alors être franchi par les vagues qui peuvent ainsi détruire la route du Sel. Le tombolo occidental est influencé par ces grandes attaques de la mer, notamment lors des tempêtes d'équinoxe. En période d'automne et d'hiver (de Septembre à début Mars), l'énergie libérée par les vagues de tempête est forte, supérieure à 80 000 watts par mètre par minute (Courtaud, 2000).

Le golfe de Giens est souvent très agité lors des évènements tempétueux de Sud-Ouest. Les régimes agressifs sont les tempêtes d'ouest associées à des marées barométriques. Les oscillations du niveau moyen peuvent atteindre +0,6 à +0,8 mètre CM (Blanc, 1973).

Il est donc nécessaire d'améliorer la compréhension de ces phénomènes météomarins qui menacent la zone côtière du tombolo.

# 3.1.5.1. Coups de mer et tempêtes en période du 14 Mai 1992 au 15 Septembre 1997

Selon Courtaud (2000), dans cette période, 79 épisodes de coup de mer ou de tempête sont observés. Ils proviennent de Sud-Ouest (29 évènements), de Nord-Ouest (16 évènements), de Nord-Est (6 évènements), d'Est (27 évènements) et de Sud-Est (1 évènements). En tenant compte des évènements extrêmes, nous observons qu'il y a quinze tempêtes qui ont des niveaux marins supérieurs à 0,4 mètre NGF. Elles se composent d'un évènement de Sud-Ouest, de quatre évènements de Nord-Ouest, de trois évènements de Nord-Est et de trois évènements d'Est (Courtaud, 2000).

Nous estimons la dispersion entre la force moyenne du vent et la direction du vent par une régression linéaire en cas d'évènements extrêmes. Cette régression indique que la force moyenne du vent est inversement proportionnelle à la direction du vent. Mais son coefficient de détermination est faible ( $R^2 < 0,5$ ) (Figure 3-34, p. 146).

Nous essayons de tester la relation entre la force moyenne du vent et la hauteur moyenne de la houle. Nous utilisons une régression linéaire. Nous obtenons une fonction sous la forme y = 0,0559x + 0,7787, où y correspond à la hauteur moyenne de la houle en mètres et x correspond à la force moyenne du vent en mètres par seconde. Le résultat montre que la hauteur moyenne de la houle est proportionnelle à la force moyenne du vent. Nous obtenons un faible coefficient de détermination (R<sup>2</sup> = 0,25) (Figure 3-34). Mais, c'est tout à fait compatible avec la tendance de cette relation en général.



Figure 3-34 : Régression linéaire entre la force moyenne du vent et la direction du vent (A) et entre la force moyenne du vent et la hauteur moyenne de la houle (B) des évènements extrêmes dont le niveau marin est supérieur à 0,653 mètres CM entre 1992 et 1996.

Nous présentons dans ce qui suit une description des évènements extrêmes principaux du 14 Mai 1992 au 15 Septembre 1997.

#### a) Coups de mer en période du 14 Mai 1992 au 15 Septembre 1997

Les données de coups de mer enregistrées par le houlographe de Porquerolles en cette période sont présentées dans la figure 3-35. La hauteur de houle significative varie de 4 à 5 mètres et le période de pic est de 9,2 à 10,5 secondes lors des coups de mer (Figure 3-35).



Figure 3-35 : Courbes des coups de mer entre 1992 et 1997.

En observant les figures des dispersions des hauteurs des houles (Figures C-11 et C-12, p. - 29 -), nous constatons que les hauteurs de la houle H<sub>1/3</sub>, H<sub>max</sub> et H<sub>1/10</sub> ont une bonne régression linéaire, avec R<sup>2</sup> au moins de 0,7. Nous observons aussi que les corrélations sont linéaires entre les périodes de la houle T<sub>1/3</sub>, T<sub>pic</sub> et T<sub>1/10</sub>, avec R<sup>2</sup> > 0,46 (Figures C-11 à C-13, p. - 29 -).

### b) Tempête du 5 et 6 Janvier 1994

C'est un coup de « largade ». Il a fortement attaqué le littoral varois (ERAMM, 2001). La vitesse du vent atteint de 15 à 31 kilomètres par heure en moyenne avec des rafales à 50 kilomètres par heure (Tableau 3-16).

Tableau 3-16 : Données climatologiques du 05 au 06 Janvier 1994 à la station Hyères – Le Palyvestre (Association Infoclimat, 2014).

Date	Heure	T (°C)	V (km/h)	P (hPa)	Date	Heure	T (°C)	V (km/h)	P (hPa)
05/01	19h	13,0	22	1 008,3	06/01	19h	13,0	26 (50)	995,8
	16h	13,0	22	1 010,1		16h	12,0	26	996,4
	13h	14,0	26	1 012,2		13h	13,0	26	998,0
	10h	12,0	15	1 014,9		10h	13,0	31 (57,4)	999,2
	07h	10,0	19	1 014,2		07h	12,0	26	999,9
	01h	10,0	22	1 013,7		01h	13,0	26	1 004,5

T – La température, V – La vitesse du vent moyen (rafale), P – La pression.

Les houles mesurées pour cette période ne sont pas inclues dans les données du CETMEF (ERAMM, 2001).

Au cap Cépet, les caractéristiques des houles sont enregistrées dans la figure 3-36 et dans le tableau 3-17.



Figure 3-36 : (A) Hauteur des vagues au cap Cépet pendant la coup de « largade » du 05 Janvier 1994 à 15h UTC au 07 Janvier 1994 à 12h (Novel, 1995). (B) Evolution de la hauteur de la houle pendant la tempête du 13 Mai 1995 (CEREMA, 2014).

Tableau 3-17 : Caractéristiques des houles de tempête à partir de la bouée de la DCN.

Date	Pic de tempête	H <sub>1/3</sub> (m)	H <sub>1/10 max</sub> (m)	T <sub>1/3</sub> (s)
Le 5 Janvier 1994	entre 17h et 19h UTC	4	6	
Lo Clammian 1004	à 8h00	4,8		7 à 8
Le 6 Janvier 1994	à 10h00		7,8	

Avant la tempête, les forts vents sont enregistrés. En effet, durant la journée du 1<sup>er</sup> Janvier les vents proviennent de la direction nord-ouest et leur vitesse peut atteindre 22 mètres par seconde en moyenne. Jusqu'au 04 Janvier, il existe une chute de la vitesse du vent jusqu'à 3 mètres par seconde. Dans la période de la fin de l'après-midi du 04 au midi du 05 Janvier 1994, les vents se sont intensifiés rapidement jusqu'à 12 mètres par seconde (Courtaud, 2000).

Pendant la tempête, les vents atteignent 10 mètres par seconde en provenant de Nord-Ouest au 06 Janvier (Courtaud, 2000). Les vents enregistrés au sémaphore de Porquerolles pendant la période du 05 au 06 Janvier sont de l'ordre de 13 mètres par seconde soit 46,8 kilomètres par heure en maximal, en provenance du 160 à 200

### degrés Nord (ERAMM, 2001).

### c) Tempête du 13 Mai 1995

Les paramètres de la houle au pic de tempête du 13 Mai 1995 sont présentés dans le tableau 3-18 :

Tableau 3-18 : Caractéristiques des houles au pic de tempête (CEREMA, 2014).

H <sub>1/3</sub> (m)	H <sub>max</sub> (m)	T <sub>h1/3</sub> (s)	T <sub>hmax</sub> (s)	H <sub>m0</sub> (m)	<b>T</b> <sub>e</sub> ( <b>s</b> )
5,5 (5,55)	9,1 (9,79)	10,4 (10,2)	10,6 (11,1)	5,8	9,8

Valeur dans les parenthèses d'après ERAMM (2001).

Au pic de tempête, le 13 Mai 1995 à 05h00, les hauteurs significative et maximale atteignent au moins de 5,5 et 9,1 mètres, respectivement (Tableau 3-18).

Pendant la tempête, les vitesses des vents varient entre 9 et 28 mètres par seconde. La rafale de vent maximale est de 59,3 kilomètres par heure (Tableau 3-19).

Tableau 3-19 : Données climatologiques du 13 Mai 1995 à la station Hyères – Le Palyvestre (Association Infoclimat, 2014).

Heure	T (°C)	V (km/h)	P (hPa)	Heure	T (°C)	V (km/h)	P (hPa)
01h	14,3	17 (31,5)	1 023,8	13h	14,0	24 (46,3)	1 021,8
00h	14,1	13 (31,5)	1 023,6	12h	13,8	24 (44,4)	1 021,7
23h	14,2	17 (35,2)	1 023,3	11h	13,7	22 (40,7)	1 021,3
22h	14,2	17 (27,8)	1 022,9	10h	12,8	20 (38,9)	1 021,2
21h	14,2	15 (25,9)	1 022,8	09h	12,3	20 (44,4)	1 020,6
20h	13,9	22 (40,7)	1 022,5	08h	11,4	19 (27,8)	1 020,0
19h	12,7	11 (29,6)	1 022,3	07h	9,9	9 (18,5)	1 019,7
18h	13,0	13 (27,8)	1 022,2	06h	9,8	9 (25,9)	1 019,5
17h	12,1	20 (33,3)	1 021,7	05h	10,0	9 (18,5)	1 019,2
16h	13,0	15 (40,7)	1 021,8	04h	9,7	11 (20,4)	1 018,8
15h	13,1	20 (42,6)	1 021,7	03h	9,5	11 (22,2)	1 019,0
14h	12,5	28 (59,3)	1 021,8	02h	9,4	15 (22,2)	1 019,2

T – la température ; V – la vitesse du vent moyen (rafale) ; P – la pression ; les valeurs dans les parenthèses sont d'après ERAMM (2001).

### 3.1.5.2. Coups de mer et tempêtes à partir de 1998

En observant des données climatologiques aucune forte dépression n'a été observée pour la période de 2007 à 2008. La pression oscille entre 989,6 et 1 015,7 hectopascals. La vitesse du vent moyen peut atteindre 54 kilomètres par heure avec la direction dominante d'Ouest à Sud-Ouest. La température est toujours inférieure à 20,4°C.

### a) Coups de mer

Les données de coups de mer ont été enregistrées de 1998 jusqu'à 2012 par le houlographe de Porquerolles (Figure 3-37A). En observant la figure 3-37B, nous constatons que les hauteurs de la houle  $H_{1/3}$ ,  $H_{max}$ , et  $H_{1/10}$  ont une bonne régression linéaire, avec  $R^2 = 0,69$ .



Figure 3-37 : (A) Courbes des coups de mer entre 1998 et 2012. (B) Dispersion des hauteurs  $H_{max}$  et  $H_{1/3}$  entre 1998 et 2012.

### b) Tempêtes

Les données de tempête enregistrées de 1998 jusqu'à 2012 par le houlographe de Porquerolles sont illustrées sur la figure 3-38A.



Figure 3-38 : (A) Graphique des tempêtes entre 1998 et 2012. (B) Dispersion des hauteurs  $H_{max}$  et  $H_{1/3}$  des houles pendant les tempêtes entre 1998 et 2012.

En observant les figures 3-38B et C-14, p. - 31 -, nous constatons que les hauteurs / périodes de la houle ont une bonne régression linéaire, avec  $R^2$  supérieur à 0,6.

Pendant la forte tempête de Sud-Ouest du 30 Octobre 2008 à Hyères, les vents proviennent du secteur de nord-ouest à sud-ouest Pour la tempête maximale observée 24 Janvier 2007 à Hyères, les directions des vents varient de nord-ouest à ouest.

### 3.1.5.3. Surcotes historiques

Nous notons que le tombolo occidental est très étroit et que son altitude est très faible. Lors des forts coups d'Ouest, la mer peut attaquer le haut de plage de l'Almanarre. Depuis 1848, de nombreuses submersions marines et franchissements du tombolo ont été observés sous l'action des tempêtes et des surcotes (ERAMM, 2001).

Dans les conditions des fortes agitations (des plus forts évènements tempétueux), le niveau moyen de la mer dans les deux rades peut atteindre +1,5 mètres NGF. Il est près de +3 mètres NGF à la plage dans le cas extrême (SOGREAH, 1988d; Courtaud, 2000; Lenoble, 2010).

En automne, en hiver et au printemps (Avril et Mai), les surcotes sont maximales. S'il y a une forte chute de la pression (en deçà de 950 hectopascals), l'érosion côtière devient plus forte.

# 3.1.5.4. Estimation de la hauteur significative en fonction des périodes de retour

La hauteur significative  $H_{1/3}$  décennale est estimée à 5 mètres à partir des navires et est supérieure à 0,6 mètre par rapport aux mesures in-situ (Tableau 3-20). C'est une meilleure estimation pour la houle au large (ERAMM, 2001).

Tableau 3-20 : Périodes de retour des hauteurs significatives maximales des vagues  $H_{1/3max}$  (ERAMM, 2001).

Périodes de retour	Annuelle	Annuelle	Décennale	Décennale
	(navires)	(mesures)	(navires)	(mesures)
$H_{1/3 max}$	3,5 m	3,3 m	5 m	4,4 m

Le CEREMA (2014) a pris des échantillons de mesure des événements extrêmes dans le tableau C-22, p. - 31 - afin d'analyser les statistiques des événements extrêmes (Paragraphe C5.2.2, p. - 31 -). Le CEREMA (2014) a utilisé les lois GPD et EXP afin de déterminer la période de retour des hauteurs significatives de houle des évènements extrêmes (Figures C-15 et C-16, p. - 31 -). La hauteur H1/3 décennale de 6,45 à 6,48 mètres est estimée à partir de l'analyse de CANDHIS (Tableau 3-21). Elle est supérieure à 0,45-0,48 mètre par rapport aux navires.

			0,		<b>C</b> ,		
Périodes	Borne inférieure de l'intervalle de confiance (IC) à 70% de H <sub>1/3</sub> (en m)			Estimation H <sub>1/3</sub> (en m)		Borne supérieure de l'IC à 70%	
de retour	GPD	EXP	GPD	EXP	GPD	EXP	
1 an	5,10	5,22	5,24	5,34	5,38	5,46	
10 ans	6,09	6,18	6,45	6,48	6,80	6,79	
30 ans	6,35	6,62	6,90	7,03	7,44	7,44	
50 ans	6,44	6,82	7,08	7,28	7,72	7,74	

Tableau 3-21 : Périodes de retour des hauteurs de houle significatives (CEREMA, 2014).

# 3.1.5.5. Dispersion entre les données de houle au large simulée par PREVIMER et celles mesurées par CANDHIS

Nous essayons de tester la relation entre la hauteur/période significative simulée et mesurée de la houle. Nous utilisons la régression linéaire sous la forme  $y = p_1^*x + p_2$ , où y correspond à la hauteur/période simulée de la houle et x correspond à la hauteur/période simulée de la houle et x correspond à la hauteur/période mesurée de la houle.

En utilisant Matlab, les dispersions des hauteurs et des périodes de la houle calculée et mesurée sont représentées dans la figure 3-39, p. 151. Les coefficients avec l'intervalle de confiance (IC) à 95% et les paramètres statistiques tels que R<sup>2</sup>, R<sup>2</sup>-adjR,

RMSE sont présentés dans le tableau 3-22. Nous remarquons que ces relations sont bonnes qualités avec R<sup>2</sup> et R<sup>2</sup>-adjR supérieurs à 0,78.



Figure 3-39 : Comparaison des hauteurs (A, C, et E) et périodes (B, D, et F) de la houle calculée et mesurée pendant le coup de mer du 30 Novembre 2008 (A et B), la tempête du 21 Mars 2008 (C et D) et la tempête du 24 Janvier 2007 (E et F).

Páriodo	Paramètre	Coefficients (95%	<b>D</b> 2	P2-adjP	DMSE	
renoue		<b>p</b> 1	<b>p</b> <sub>2</sub>	N-	Raujr	IUIJL
30 Nov. 2008	H <sub>1/3</sub>	1,037 (0,940, 1,135)	0,086 (-0,162, 0,334)	0,827	0,825	0,394
	<b>T</b> <sub>1/3</sub>	1,037 (0,925, 1,149)	-0,704 (-1,571, 0,164)	0,783	0,781	0,491
21 Mars	H <sub>1/3</sub>	0,682 (0,643, 0,722)	-0,013 (-0,123, 0,098)	0,926	0,925	0,263
2008	<b>T</b> <sub>1/3</sub>	0,774 (0,702, 0,847)	0,734 (0,282, 1,186)	0,827	0,825	0,364
24 Janv.	H <sub>1/3</sub>	0,598 (0,578, 0,618)	0,017 (-0,056, 0,090)	0,974	0,974	0,209
2007	<b>T</b> <sub>1/3</sub>	0,806 (0,736, 0,876)	0,02 (-0,468, 0,508)	0,847	0,846	0,666

Tableau 3-22 : Dispersion des hauteurs et des périodes de la houle calculée et mesurée.

# 3.1.6. Principales caractéristiques de sédiments et biocénoses

Les sédiments à la branche occidentale sont essentiellement graveleux, sableux, et limoneux/argileux. L'étude sur les 36 échantillons des sédiments montre que 17% des échantillons présentent un taux supérieur à 50% de limons. Il est négligeable en comparaison des 83% d'échantillons présentant un taux supérieur à 50% de sables et graviers. De plus, les limons se concentrent à la partie Sud du tombolo Ouest. Ainsi, le site d'étude est une plage sableuse avec la présence de graviers. Nous savons tous que le transit des sables est très différent de celui des graviers et galets. Il existe deux modes de transport sédimentaire des fonds dans le golfe de Giens: parallèlement et perpendiculairement à la côte (Figure E-34, p. - 45 -) (Courtaud, 2000).

Le système littoral est constitué des étages de haut en bas tels que Supralittoral, Médiolittoral, Infralittoral, Circalittoral et Bathyal (Paillard et al., 1993). Il est caractérisé par la présence de végétaux (posidonie) (Pérès et Picard, 1964). Des étages Infralittoral et Circalittoral du système littoral sont représentées dans la figure 3-40.



*Figure 3-40 : Représentation des étages Infralittoral et Circalittoral du système littoral (Paillard et al., 1993).* 

La répartition des posidonies dans le golfe de Giens est illustrée dans la figure 3-41. La présence de herbiers à posidonies favorise l'atténuation de la houle par le frottement sur le fond. La rugosité du fond de biocénoses est supérieure à celle des fonds sableux. Elle permet d'atténuer l'énergie des houles (ERAMM, 2001).

Les herbiers de posidonie jouent un rôle important sur l'évolution morphosédimentaire du tombolo. La présence de posidonies influence les dynamiques marines (incidences sur la propagation et le déferlement des houles, amortissement des courants, etc. ...). L'herbier de posidonie est entre de 2 à 3 mètres et de 30 à 35 mètres de profondeur. Il a connu des phases d'accrétion et d'érosion. L'accrétion d'un herbier de posidonie est facilitée par bouturage et marcottage. Selon Courtaud (2000), les vitesses d'accrétion des mattes peuvent varier de 0,15 à 1,5 mètres par siècle. Le creusement des mattes délimite des tombants de 1 à 5 mètres de hauteur (Courtaud, 2000).



Figure 3-41 : Répartition des posidonies : (A) Dans le golfe de Giens (Egis Eau et Andromède Océanologie, 2011). (B) Dans la partie centrale du tombolo occidental (Paillard et al., 1993).

# 3.2. Principaux facteurs influençantl'évolution littorale selon des rapportsd'étude au tombolo Ouest

Le littoral est soumis à un ensemble d'agents variables dans l'espace et dans le temps qui contribue à l'érosion du littoral (SDAGE RMC, 2005). L'érosion et l'accrétion marine sont des processus complexes. Ils dépendent de plusieurs facteurs. Les facteurs principaux sont des processus marins (houles, marées, et courants, etc. ...), climatologiques (vent, température et pluie, etc. ...) et anthropiques qui agissent sur les

matériaux et déplacent les sédiments (sables, galets, et graviers, etc. ...) (MEEDDM, 2009).

Le tombolo est l'objet d'une érosion assez générale (Blanc, 1973). Les travaux de Blanc (1974b) montrent des processus d'érosion dans la partie centrale et Nord du tombolo Ouest. Le secteur compris entre les bornes B08 et B10, objet principal de la présente étude, est affecté plus particulièrement. Les causes du phénomène d'érosion du tombolo Ouest sont aussi bien attribuées à des processus marins (houles et courants de houle) qu'à des causes anthropiques (pollution, enrochements de protection). Il est probable que l'évolution du trait de côte de la plage de l'Almanarre est influencée par l'interaction des facteurs tels que l'absence d'apport sédimentaire, les courants, les houles, les tempêtes, et l'influence anthropique ancienne.

# 3.2.1. Influence du déficit sédimentaire

Blanc (1973) a confirmé qu'il n'existe plus d'apports naturels des sédiments dans le golfe de Giens. De nos jours, nous notons qu'il n'y a que de petits cours d'eau qui se jettent dans le golfe de Giens. C'est pourquoi, les apports sédimentaires fluviatiles sont très faibles. Cela influence l'évolution du cordon dunaire (SOGREAH, 1988d). En outre, le stock marin n'apporte pas assez de sédiments pour restaurer le cordon et les fonds (SOGREAH, 1988d). Le déficit annuel est estimé à 8 000 mètres cube par an. Il s'agit du taux du déficit de 2 mètres cube par mètre linéaire de l'ensemble du littoral (4 000 mètres de longueur) et de 4 mètres cube par mètre linéaire de la seule partie Nord (2 000 mètres de longueur) (SOGREAH, 1988d).

# 3.2.2. Influence de la géomorphologie

Le golfe de Giens présente deux systèmes de chenaux d'érosion : chenaux transverses (perpendiculaires à la côte) et chenaux longitudinaux (parallèles à la côte) (Figure 3-42B, p. 155) (Blanc, 1973). Les chenaux transverses sont responsables de rapides érosions (Blanc, 1973). Lors des tempêtes, les sédiments enlevés par les courants sagittaux empruntent les chenaux transverses des fonds marins afin de se déplacer vers le large. Ils ne peuvent pas retourner vers la côte par les houles de beau temps du fait de la pente trop forte. La perte des sédimentes est difficilement quantifiable (ERAMM, 2001). La présence de ces chenaux au littoral favorise l'érosion dûe aux courants de retour. Ils transporteraient les sédiments du prisme littoral vers les fonds de -5 à -10 mètres en dehors de la zone d'échange contribuant ainsi à la perte des sédiments du cordon littoral. Le phénomène d'érosion a lieu entre le rivage et la profondeur d'amortissement de ces courants (jusqu'à une profondeur de 12 à 15 mètres ou plus) (Blanc et Jeudy De Grissac, 1978; Courtaud, 2000). Ce schéma évolutif est sans doute celui qui affecte plus particulièrement le secteur compris entre les bornes B08 et B10. Les chenaux longitudinaux des fonds marins peuvent entrainer les sédiments mobiles le long de la côte (Blanc, 1973).

La pente du littoral joue un rôle important en atténuant ou en accélérant des courants sagittaux. L'augmentation de la pente de certains profils du tombolo Ouest favorise le départ des sédiments en accentuant la vitesse des courants sagittaux (Courtaud, 2000). La pente très forte (environ 10% entre la partie émergée et immergée de la plage) diminue les échanges naturels de sédiments dans le profil de plage (ERAMM, 2001).

Les hauts fonds créent des chenaux qui développent des courants de dérive littorale et génèrent des courants sagittaux très érosifs. Cependant, ils jouent aussi un rôle significatif dans l'amortissement des houles, comme un obstacle immergé. Il est difficile d'évaluer les conséquences des hauts fonds sur l'érosion du tombolo (IARE, 1996).

# 3.2.3. Influence du courant sagittal

Les courants sagittaux provoquent les érosions du littoral et reculs du rivage aux zones de départ de ces courants. La plage a reculé de quelques mètres vers l'intérieur des terres en quelques années (Blanc, 1973).



Figure 3-42 : Zones d'érosions du littoral aux zones de départ de courants sagittaux : les indentations dans l'herbier de posidonie (A) et les trous dans les bathymétries (B) du tombolo Ouest.

La figure 3-42 montre que les indentations dans l'herbier de posidonie

apparaissent à cause de la force des courants sagittaux (Blanc, 1958, 1960, 1975; Courtaud, 2000). Ces indentations correspondent aux positions des courants sagittaux. Trois grands chenaux d'érosion liés aux courants sagittaux sont distingués, perpendiculaires au rivage dans le golfe de Giens (Figure 3-42). Ils favorisent l'érosion du littoral. Les sédiments mobiles passent par ces chenaux et se déposent vers le large. Les transports sédimentaires dans le profil sont estimés de 50 à 100 mètres cube par mètre linéaire par an soit de 150 000 à 300 000 mètres cube par an dans le golfe de Giens par SOGREAH (1988d).

# 3.2.4. Influence du courant de dérive

Dans le golfe de Giens, les courants de dérive s'effectuent principalement du nord vers le sud. Ils sont responsables de la dérive littorale de sédiment (la redistribution des sédiments de nord vers un autre emplacement du sud du tombolo). Ils déplacent les sédiments dans la zone de déferlement (Beach et Sternberg, 1992; Calliari, 1994; Courtaud, 2000). Ils créent des chenaux d'érosion longitudinaux, parallèles au rivage et aux isobathes (Figure 3-42) (Blanc, 1973). Selon Blanc (1973), qui peuvent déplacer les sédiments enlevés du fond jusqu'à des distances supérieurs à 2,5 kilomètres. Le transit littoral est estimé à environ 5 000 mètres cube par an par SOGREAH (1988d).

# 3.2.5. Influence de la houle

L'agitation est le principal moteur de la dynamique des sédiments dans le golfe de Giens (HYDRO M, 1993). La dynamique littorale est différente en fonction des conditions de houle au large (ERAMM, 2001).

Le tombolo Ouest est soumis aux régimes d'ouest à sud-sud-ouest. L'érosion du tombolo occidental est le résultat de l'attaque des vagues d'Ouest, à cambrure élevée, quoique relativement courtes, auxquelles s'ajoutent les vagues de Nord-Ouest et Sud-Ouest, l'ensemble totalisant environ 45 jours par an (Blanc, 1973). Cette dominance des régimes d'Ouest, malgré les faibles valeurs des distances de fetch, nous oblige à envisager une protection efficace de cette zone littorale, orientée du Nord au Sud et perpendiculaire aux forces majeures (Blanc, 1973). Le régime d'Ouest a un fort impact sur les zones entre les bornes B03-B16 et B25-B28. L'impact du régime de Sud-Ouest sur les secteurs entre les bornes B04-B15 et B20-B21 est le plus fort. Le régime de Sud-Sud-Ouest est le plus dévastateur dans la zone nord du tombolo occidental. Il joue un rôle important dans la montée du jet de rive à la côte occidentale. Elle provoque l'inondation de la route du Sel et le dépôt des sédiments de plage dans le canal de ceinture de la borne B08 à B10 (ERAMM, 2001).

En plus des effets destructeurs directs (la pression exercée sur la dune par la houle), l'énergie des vagues qui est transmis par le courant de la houle est la cause principale du transport des sédiments du fond marin et de la création de l'érosion marine.

# 3.2.6. Influence de la tempête

En automne et en hiver, il y a des tempêtes plus fréquentes et agressives accompagnées des vagues destructrices. Les fortes vagues érodent les rivages. Elles peuvent enlever le cordon dunaire. Les sédiments enlevés s'accumulent sous forme de bancs de sable, et l'estran est diminué. Les plages n'ont pas assez de temps pour se reconstituer dans le cas de tempêtes trop fréquentes. Pendant les tempêtes, les transports de matériaux sont influencés par les marées, les houles, et les vents. Nous notons que la marée méditerranéenne est trop faible pour avoir un réel impact sur l'évolution du trait de côte (Anonyme, 2013). Les houles engendrent des transports de sédiments parallèles et/ou perpendiculaires à la côte. La houle est à l'origine d'un déséquilibre des sédiments du littoral. Les vents sur terre jouent un rôle dans l'érosion côtière. Ils déplacent les sables et détruisent les cordons dunaires en arrière plage. Ils peuvent transporter des milliers de mètres cubes de sable des plages (Anonyme, 2013).

Les houles d'ouest à sud-ouest peuvent se révéler assez fortes en hiver, contribuant à une érosion importante. En effet lors des tempêtes, les vagues possèdent des longueurs d'ondes réduites avec une forte amplitude. Le reflux va donc emmener les sédiments érodés au large. Ces derniers seront piégés par les herbiers de posidonies et redistribués au rivage en été, mais pas forcément au même endroit (Anonyme, 2013). De cette façon les très grandes tempêtes occasionnent des mouvements irréguliers du secteur d'étude, mais importants.

Les régimes dangereux étudiés correspondent à des élévations du plan d'eau (+0,70 à +1 mètre NGF) liées à des chutes de la pression à 740 millimètres de mercure par la tempête exceptionnelle (période de 9 à 10 secondes), combinées à des fortes houles et aux vents de secteur Ouest. Ces régimes provoquent d'importants dégâts sur le littoral et pour les fonds marins. Le secteur très menacé est le tombolo Ouest (Blanc, 1973).

### 3.2.7. Influence de la montée lente du niveau marin

Le niveau marin s'est élevé de près de 125 mètres il y a 18 000 ans (Figure 3-43). Le niveau -50 mètres actuel semble être le trait de côte depuis 11 000 ans dans la figure 3-43 (Jarry, 2009).

Selon Ministère de l'Environnement/SRETIE, la montée lente du niveau marin peut atteindre 8 millimètres par an sur les côtes françaises (HYDRO M, 1993). Mais, au XX<sup>ème</sup> siècle, elle ne semblait être que entre 1,8 millimètres par an (Jarry, 2009) et de 2 à 3 millimètres par an (HYDRO M, 1993).

Brunel (2010) a estimé la variation du niveau marin moyen dûe au réchauffement climatique pour le XXI<sup>ème</sup> siècle. Entre 2010 et 2060, elle peut atteindre +35 centimètres (Lenoble, 2010).



*Figure 3-43 : Montée du niveau marin (Les Amis de la presqu'île de Giens, 2011; Petit et Naigeon, 2014).* 

Selon SOGREAH (1988d), la montée du niveau marin moyen est de l'ordre de 1 à 2 millimètres par an. Avec une pente forte 10%, elle favorise le recul lent du rivage de l'ordre de 10 à 20 centimètres par an. Le volume de matériaux érodés est estimé à 0,5 mètre cube par an par mètre linéaire de plage dans le cas du golfe de Giens (SOGREAH, 1988d). Cela représente une valeur de l'ordre de 10 à 20% des processus d'érosion en zone Nord. Pour l'ensemble du littoral (4 kilomètres), le volume concerné est de 2 000 mètres cube par an (SOGREAH, 1988d).

La montée lente du niveau marin ne provoque pas de problèmes littoraux majeurs à court et moyen terme (HYDRO M, 1993). Mais, à long terme, elle aggrave le phénomène d'érosion marine et le recul du rivage (IARE, 1996). Elle serait responsable d'un recul moyen du rivage de 10 mètres en un siècle (HYDRO M, 1993).

# 3.2.8. Influence du vent

Les vents agissent sur les autres paramètres de trois façons :

- ils provoquent l'agitation, premier moteur des mouvements de sédiments (HYDRO M, 1993);
- ils génèrent des courants qui transportent localement, en raison de leur relative faiblesse des éléments très fins (vases d'argiles et limons, débris végétaux dont les feuilles de posidonies) (HYDRO M, 1993) ;
- ils transportent les sables de la plage et du cordon littoral dans les marais et étangs avoisinants (HYDRO M, 1993). Les vents de secteur Ouest favorisent les transports du sable (IARE, 1996). Le transport du sable le long du tombolo est estimé de 5 000 à 10 000 mètres cube par an par SOGREAH (1988d).

Les pertes de sédiments par déflation éolienne de la partie Sud sont plus grandes que ceux de la partie Nord (SOGREAH, 1988d).

# 3.2.9. Influence des différentes actions de l'homme

Les différentes actions effectuées sur ce tombolo sont présentées dans l'Annexe E : p. - 45 -. Plusieurs phénomènes vont alors venir aggraver l'érosion (Anonyme, 2013):

- L'origine anthropique est liée aux extractions de sédiments, facteur important du déséquilibre sédimentologique du cordon littoral. En effet, dès le début du XVII<sup>ème</sup> siècle et ce jusqu'à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle, les travaux réalisés pour l'agrandissement du port de Toulon ont nécessité de prélever une grande quantité de sable. De même pour l'aménagement des tables salantes au cours du XIX<sup>ème</sup> siècle. Ces différentes actions ont réduit de façon importante et irréversible la largeur du tombolo. Ces extractions anthropiques constituent une perturbation morphologique susceptible de renforcer localement les courants de décharge. Il en résulte des accumulations sédimentaires visibles sur les fonds compris entre -5 et 10 mètres mais tous n'ont pas forcément cette origine.
- En 1969 la commune d'Hyères crée une route asphaltée de 6 mètres de large reliant l'Almanarre à Giens ainsi qu'une conduite d'eau potable à 25 à 30 mètres du rivage (Photo 3-1). Ces travaux vont modifier l'équilibre précaire du cordon dunaire. L'ensemble de ces travaux de terrassement va détruire partiellement la végétation qui fixait le sable et c'est désormais 4 kilomètres de plage qui s'ouvrent aux touristes.



Photo 3-1 : Ancienne conduite d'eau potable au tombolo Ouest : (A) construction en 1970. (B) posée vers 1970 (Source : <u>www.histoire-eau-hyeres.fr</u>).

- La mise en place d'ouvrages lourds pour protéger la route : en 1948, pour protéger les marais salants en pleine extension, le trait de côte est fixé par des enrochements et l'enfouissement de rails de chemin de fer dans la dune (Photo 3-2A, p. 160).
- Le nettoyage régulier de la plage pour que les touristes puissent bénéficier d'une plage propre (Photo 3-2B, p. 160). Cela nécessite d'éliminer tous les bancs de

posidonies mortes qui se sont accumulées et qui recouvrent le sable, permettant de créer une barrière efficace contre les coups de mer et contre le vent.

- L'ouverture de la plage aux touristes va accentuer le phénomène de piétinement de la dune faisant progressivement disparaitre les végétaux retenant le sable, qui va ainsi aller se déposer dans les marais salants.



Photo 3-2 : (A) Technique des enrochements et palissades de rondins sur le tombolo Ouest. (B) Plage "propre" débarrassée des mattes de posidonies. Cela la rend beaucoup vulnérable aux coups de mer et à l'érosion du vent (Source : <u>www.histoire-eau-hyeres.fr</u>).

 L'herbier de posidonie se dégrade et ne joue plus pleinement son rôle d'amortisseur de houle, ni de piège à sediments : en 1930, un collecteur d'égout est immergé au large de l'Almanarre (Figure 3-44) et va donc rejeter une quantité importante d'eau douce au milieu des bancs de posidonies.



*Figure 3-44 : Emissaire en mer à la partie Nord du tombolo Ouest (Source : <u>www.histoire-</u><u>eau-hyeres.fr</u>).* 

# **3.3. Conclusions**

Nous avons déterminé et analysé les facteurs dynamiques qui affectent l'évolution du littoral au tombolo Ouest. Les principaux facteurs sont les caractéristiques du fond, les vents, les vagues, les niveaux marins, les courants, le déficit sédimentaire, les tempêtes, et les actions humaines.

La pente des fonds est plus forte de l'extrémité Nord jusqu'à la borne B23. La pente très forte diminue les échanges naturels de sédiments dans le profil de plage. La branche occidentale présente deux systèmes de chenaux d'érosion transverses et longitudinaux ainsi que deux modes de transport sédimentaire des fonds.

Le fond du littoral occidental est caractérisé par la présence d'herbiers à posidonies. Les posidonies sont entre de 2 à 3 mètres et de 30 à 35 mètres d'isobathes. Elles jouent un rôle important sur l'évolution du tombolo.

Nous avons identifié deux régimes de vents dominants de secteur Ouest et de secteur Est. L'influence des vents d'Est sur l'agitation dans le golfe de Giens peut être négligeable. 30% des vents d'Ouest atteignent au moins 7 mètres par seconde et 2% d'entre eux dépassent au moins 11 et 15 mètres par seconde. Les vents de Nord-Ouest présentent 30% de vents d'au moins 3 mètres par seconde et 2% d'entre eux dépassent au moins 10 et 16 mètres par seconde. Celles de Sud-Ouest présentent 30% de vents d'au moins 4 mètres par seconde. La vitesse maximale peut atteindre de 30 à 40 mètres par seconde et est observée selon les directions Ouest et Nord-Ouest.

Les fortes vagues de Porquerolles correspondant aux hauteurs significatives supérieures à 1,25 mètres proviennent de trois secteurs : Nord-Ouest, Est et Sud-Ouest. Le secteur de Sud à Ouest est la direction dominante dans le golfe de Giens. L'impact morphologique de la direction Ouest est plus élevé que les directions de Sud à Sud-Ouest. Deux régimes de houles très différents (hivernal et estival) ont été définis.

La vitesse des courants de dérive littorale peut atteindre 0,5 mètres par seconde, dans le golfe de Giens. Elles provoquent un transit littoral d'environ 5 000 mètres cube par an. Trois zones de courants sagittaux situées au niveau des bornes B03, B18, et B33 sont très importantes. Elles poussent un transport sédimentaire dans le profil d'environ 50 à 100 mètres cube par mètre linéaire.

La marée est de faible amplitude sans importance sur l'évolution sédimentaire littorale. Le niveau marin des évènements extrêmes dans le golfe de Giens est de plus de +0,4 mètre NGF correspondant à 0,653 mètre CM.

Une montée du niveau marin à Toulon est observée. Elle est de l'ordre de 1 à 3 millimètres par an en moyenne et pousse le recul lent du trait de côte occidental de l'ordre de 0,1 à 0,3 mètres par an. Elle favorise le recul du trait de côte (10 à 30 mètres en un siècle) et l'érosion côtière à long terme.

Les apports sédimentaires fluviatiles sont très faibles de 1 040 à 1 800 tonnes par an. Le stock marin n'apporte pas assez de sédiments pour restaurer le cordon et les fonds. Le déficit sédimentaire est quantifié à 8 000 mètres cube par an.

Les régimes dangereux étudiés correspondent à des élévations du plan d'eau de +0,70 à +1 mètre NGF liées à des fortes chutes de la pression à 740 millimètres de mercure par tempête exceptionnelle, combinées à des fortes houles et aux vents de secteur Ouest.

Les différentes actions effectuées sur ce tombolo sont analysées tels que les travaux réalisés pour l'agrandissement du port de Toulon, la contruction d'une route asphaltée et d'une conduite d'eau potable, la mise en place des enrochements, et le nettoyage régulier de la plage, etc. ...

# Chapitre 4. Etude scientifique de base pour déterminer l'évolution du littoral

Ce chapitre a pour but de faire une étude scientifique sur l'évolution morphologique du tombolo en appliquant le modèle numérique. Les codes hydrosédimentologiques seront cités sommairement afin de justifier le choix du modèle. Le modèle MIKE21 sera décrit avec les équations et utilisé dans ce chapitre. Deux échelles spatiales (régionale et locale) seront utilisées afin de modéliser les hydrodynamiques et les transports sédimentaires dans le secteur d'étude. Des scénarios seront définis. Les modèles de houle et de circulation régionaux seront installés, respectivement. Le modèle régional fournira les conditions aux limites pour le modèle local. Ce dernier modèle nous permet d'évaluer l'évolution de la zone proche de la plage de l'Almanarre. Chaque modèle sera présenté par le traitement des conditions aux limites, la calibration, et la validation. Les résultats numériques seront analysés pour la compréhension de l'évolution morphologique au tombolo.

# 4.1. Problème de l'étude de l'évolution du secteur d'intérêt

Au cours des dernières années, la tendance de la sévérité croissante des tempêtes, des inondations ainsi que le développement rapide des activités économiques et l'accroissement de la population ont contribué à augmenter l'instabilité du tombolo Ouest. Pour la plage de l'Almanarre, l'érosion se produit fréquemment en hiver. Cette problématique présente un intérêt particulier pour les chercheurs. Le calcul et la prévision de l'évolution du littoral dépendent de l'équilibre du transport des sédiments dans le secteur d'étude.

L'étude de l'évolution de la plage de l'Almanarre passe donc par celle des causes sous-jacentes qui affectent l'équilibre des sédiments du littoral en fonction des différentes périodes. Plus précisément, le problème posé est de déterminer le régime des houles et hydro-morphologiques, les effets des vagues, des courants sur cette évolution en hiver et en été et les causes de l'érosion dans le secteur d'étude. De là, nous comprendrons les règles de l'accrétion et de l'érosion dans le site d'étude grâce à l'application de modèles mathématiques pour simuler ce processus.

Les données disponibles au tombolo ont été étudiées et analysées dans les

chapitres 2 et 3 pour l'étude et la compréhension des processus côtiers. Elles ne couvrent pas toutes les positions dans le site d'étude et toutes les conditions météorologiques possibles. Par conséquent, une simulation a été développée pour combler cet écart et déterminer l'évolution du littoral (Albers et von Lieberman, 2011). L'ensemble des données disponibles est utilisé pour la configuration, le calibrage, et la vérification des modèles numériques au tombolo.

Le modèle numérique nous permet d'illustrer les houles, le courant dû aux vagues et les modes de transport du littoral, ainsi que l'influence de l'herbier de posidonie au cours de la simulation. Le modèle morphodynamique repose sur un couplage des modèles de propagation de la houle et du modèle de circulation et du modèle de transport sédimentaire dans MIKE21. La modélisation numérique a été réalisée en deux échelles régionale et locale. Nous présentons dans ce qui suit une description de celles.

### 4.1.1. Echelle régionale

L'échelle régionale est un modèle de propagation de la houle et de circulation. La première étape, dans une zone d'étude étendue de Toulon à Cavalaire (environ 42 kilomètres) et à 17 kilomètres de la côte dans le golfe de Giens et la rade d'Hyères, un modèle de propagation de la houle ont été mis en place. La deuxième étape a consisté à coupler le modèle de propagation de la houle avec le modèle hydrodynamique, ce qui simule les courants induits par les vagues. Les résultats ont ensuite été utilisés comme paramètres d'entrée du modèle morphodynamique simulant les modifications du littoral à l'échelle locale. Le domaine de calcul et la bathymétrie sont décrits dans la figure 4-1, p. 165.

A l'échelle régionale, la bathymétrie est le relevé de l'EGB et de la projetée en Lambert 93 en mètres. Le trait de côte est récupéré à partir du site IGN et SHOM. Le modèle de houle est forcé par des vents SYNOP/METAR et ECMWF. Les conditions aux limites de la houle sont des données de houle d'une part à la bouée de Porquerolles (08301 et 08302), d'autre part à deux points MEDIT-2185 et MEDIT-2610 de l'ANEMOC. Les conditions limites du niveau marin sont des données d'une part des observations à Toulon, d'autre part du modèle MARS3D du PREVIMER.

### 4.1.2. Echelle locale

L'échelle locale de la dynamique sédimentaire de la zone côtière est un couplage des modèles de propagation de la houle, hydrodynamique et de transport sédimentaire. Ce modèle couvre la côte autour de la zone de mise au point au tombolo occidental, environ 4 kilomètres. Il simule les modifications du littoral dûes aux régimes des vagues. Le domaine de calcul et la bathymétrie sont décrits dans la figure 4-1. La bathymétrie combine des relevés multi faisceaux mis à disposition par EOL, Litto3D du SHOM, et l'EGB projetée en Lambert 93. Le trait de côte est récupéré à partir du site IGN et SHOM. Le modèle de houle est forcé par des vents SYNOP/METAR à Hyères. Les conditions limites sont calculées à partir du modèles SW à l'échelle régionale. Les sédiments sont décrits d'une part par une taille moyenne de grain de 0,5 millimètre, d'autre part par une cartographie des sédiments. Les variations du niveau marin le long du tombolo Ouest d'une part peuvent être décrites à partir des données de Toulon (SOGREAH, 1988d; IARE, 1996; Courtaud, 2000), d'autre part sont extraites du modèle régional.



Figure 4-1 : Domaine de calcul à l'échelle régionale (A) et à l'échelle locale (B) (Lacroix et al., 2015a).

# 4.2. Choix des modèles couplés

Aujourd'hui, les modèles numériques sont couramment utilisés en génie côtier. Ils font encore l'objet de nombreuses recherches (Brière, 2005). MIKE, DELFT 3D, TELEMAC, SMS, et EFDC\_Explorer sont les modèles couplés les plus populaires. Ils peuvent décrire assez correctement la morphodynamique d'un système (Brière, 2005). Dans le cadre la thèse de Brière, l'approche retenue consiste a priori en la modélisation couplée MIKE21 pour les raisons principales suivantes :

 MIKE Zero est le nom commun des implémentations Windows de DHI intégrant l'interface utilisateur graphique pour la mise en place des simulations, la préanalyse et le post-traitement, la présentation et la visualisation dans un environnement de projet orientée (DHI, 2007). MIKE21 est développé en continu depuis plus de 20 ans, ajusté par 400 applications à travers le monde, y compris de nombreuses œuvres au Vietnam. Il s'agit d'un modèle hydraulique numérique qui a été commercialisé et a été validé par des applications strictement académiques et pratiques, au Vietnam et dans le monde.

- Le modèle hydraulique MIKE21 de maillages non-structurés peut calculer le transport sédimentaire et l'érosion dans le site d'étude produite sur une topographie complexe et permet la résolution locale améliorée pour simuler plus précisément un rivage, des constructions, etc. ... par le maillage en triangles. Le modèle permet la simulation du problème de la houle, de l'hydrodynamique, du transport des sédiments dans les eaux peu profondes et des flux instables en 2 et 3 dimensions.
- Le logiciel MIKE comprend certains modules spécialisés pour calculer le champ des courants, des vagues, du transport sédimentaire, etc. ..., pour les zones côtières. En particulier, le modèle intégré MIKE21/3 FM couplé avec le module MIKE21 ST intègre des modèles professionnels pour étudier les questions liées au transport du sable et au dépôt érosion : Deigaard, R., Fredsoe, J. et Connie Hedegaard, IB (1986). Le modèle couplé MIKE21/3 FM est un nouveau produit (développé en 2004-2009) et le logiciel spécialisé plus avancé MIKE21 comprend de nombreux modules intégrés pour l'utilisation dans quatre grands domaines tels que (i) l'hydraulique de la rivière et de la mer, (ii) les vagues, (iii) les processus d'accrétion et d'érosion, et (iv) l'environnement hydraulique. Il s'agit d'un modèle d'hydraulique numérique par éléments finis intégrés pour simuler le processus hydraulique intégré ainsi que dans des eaux peu profondes, couplant des vagues, des courants et le transport de matériel (boue/sable).
- Les résultats du modèle numérique MIKE21 ont été comparés avec les résultats d'autres modèles numériques tels que TELEMAC (Samaras et al., 2013) et DELFT 3D (Soliman et al., 2011). Les comparaisons de l'élévation de la surface, la vitesse du courant, la hauteur des vagues, et les processus morphodynamiques ont montré un accord satisfaisant. En effet, les comparisons des résultats des modèles hydrodynamiques TELEMAC et MIKE21 montre un accord satisfaisant entre les deux modèles (Soliman et al., 2011). Il y a une petite différence entre les résultats des modèles MIKE21 et DELFT 3D. Elle est inférieure à 5% pour la comparaison des courants littoraux. La comparaison des résultats des modèles numériques LITPROF (MIKE) et DELFT 3D montre que la différence est inférieure à 10%, pour la comparaison de profil côtier (Soliman et al., 2011).

Du fait de la possibilité d'intégrer la dynamique naturelle des processus naturels de sorte que le résultat soit compatible avec le réel de façon satisfaisante, nous avons choisi MIKE21/3 FM modèles couplés pour simuler l'évolution du littoral dans le secteur d'intérêt.

# 4.3. Description des modèles de MIKE

MIKE est un système logiciel développé par le Danish Hydraulics Institute (DHI) et reposant sur un maillage structuré (grille rectangulaire ou curviligne) ou, pour certains modules, sur un maillage non structuré. Actuellement, MIKE se compose de MIKE21 et MIKE21/3 systèmes.

Le modèle MIKE est bidimensionnel horizontal, utilisant une méthode de volumes finis. Il a trois principaux modules tels que l'hydrodynamique (HD), le transport de sable (ST), et le spectre de la houle (SW).

# 4.3.1. Modèle de vague de MIKE

Le système logiciel MIKE21 se compose de différents modules de houle. Nous choisissons le module SW pour modéliser la propagation de la houle dans le secteur d'étude. Le modèle spectral de vague de 3ème génération MIKE21 SW est similaire au SWAN (DHI, 2014m).

Le module SW est l'un des outils de modélisation numérique pour l'étude de modèle spectral vent-vague. C'est un modèle de propagation des vagues de phase moyenne basé sur une grille à maillage flexible (DHI, 2014m). Il est particulièrement applicable pour l'analyse des vagues simultanées à la fois à l'échelle régionale et locale. Le maillage flexible permet une résolution spatiale grossière pour la zone au large et une haute résolution en eau peu profonde et sur le littoral. Le modèle SW simule la croissance des vagues par l'action du vent, l'interaction non-linéaire vague-vague, la dissipation dûe au moutonnement, la dissipation dûe au frottement de fond, la dissipation dûe au déferlement de la vague, la réfraction de la houle par les variations de profondeur, l'interaction vague-courant et l'effet de profondeur d'eau variant dans le temps (ROCHE, 2011; DHI, 2014m). La dynamique des houles de gravité sont décrites par l'équation de transport de la densité de l'action des vagues.

# 4.3.1.1. Equations de base dans le système de coordonnées cartésien

L'équation de conservation de l'action des vagues est

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla . \left( \vec{v} N \right) = \frac{s}{\sigma} \tag{4-1}$$

0ù :

*N* est la densité de l'action  $N(\vec{x}, \sigma, \theta, t)$  avec le vecteur  $\vec{x} = (x, y)$ , la direction d'onde  $\theta$ ; la fréquence angulaire relative  $\sigma$  et le temps t ;

 $\vec{v}$  est le vecteur de la vitesse de propagation d'un groupe d'onde dans l'espace des phases à quatre dimensions ;

S est la dissipation de l'énergie.

- La détermination de la fréquence angulaire relative  $\sigma$ :

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kd)} = \omega - \vec{k}.\vec{U}$$
(4-2)

0ù :

 $ec{v}$  : le vecteur de la vitesse du courant ;

 $\boldsymbol{\omega}$  : la fréquence angulaire absolue ;

 $\vec{k}$ , k : le vecteur et l'amplitude de nombre d'onde, respectivement ;

d : la profondeur de l'eau ;

- La détermination de la vitesse de propagation d'un groupe d'onde dans l'espace des phases à quatre dimensions, s'écrit comme  $\vec{v} = (c_x, c_y, c_\sigma, c_\theta)$  (DHI, 2014h) :

$$\left(c_{x},c_{y}\right) = \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{c}_{g} + \vec{U} \tag{4-3}$$

$$c_{\sigma} = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial\sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla_{\vec{x}} d \right] - c_g \vec{k} \frac{\partial \vec{U}}{\partial s}$$
(4-4)

$$c_{\theta} = \frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \vec{k} \frac{\partial \vec{U}}{\partial m} \right]$$
(4-5)

Où  $c_{g}\,est$  l'amplitude de la vitesse de groupe :

$$c_g = \frac{\partial \sigma}{\partial k} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \frac{\sigma}{k}$$
(4-6)

- La détermination de la dissipation d'énergie :

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf}$$
(4-7)  
S<sub>in</sub>: génération d'énergie par le vent ;

Snl : transfert d'énergie des vagues dûe à l'interaction non-linéaire vague-vague ;

 $S_{\text{ds}}$  : dissipation d'énergie des vagues dûe au moutonnement ;

Sbot : dissipation d'énergie des vagues dûe au frottement de fond ;

S<sub>surf</sub> : dissipation d'énergie des vagues dûe au déferlement de la vague.

### a) Génération d'énergie par le vent (Sin)

$$S_{in}(f,\theta) = \gamma E(f,\theta) \tag{4-8}$$

0ù :

E est la densité de l'énergie ;

 $\boldsymbol{\gamma}$  est le taux de croissance ;

f est la fréquence ;

 $\boldsymbol{\theta}$  est la direction des vagues.

### i) Détermination du taux de croissance

$$\gamma = \varepsilon \beta \sigma x^2 \tag{4-9}$$

0ù :

 $x = \frac{u_*}{c} \cos(\theta - \theta_w)$  avec la vitesse de la phase c, la vitesse de frottement du vent  $u_*$ , la direction des vagues  $\theta$  et la direction des vents  $\theta_w$ ;

 $\varepsilon$ : le rapport de la densité de l'air à l'eau,  $\varepsilon = \rho_a / \rho_w$ ;

 $\sigma$  : la fréquence angulaire relative ;

 $\beta$  : le coefficient

$$\beta = \begin{cases} \frac{1,2}{\kappa^2} \mu \ln^4 \mu, & \mu \le 1 \\ 0, & \mu > 1 \end{cases}$$
(4-10)

0ù :

κ : le constant de von Karman, κ = 0,41;

 $\mu$  : la hauteur critique sans dimension,  $\mu = k. z_c$ ;

 $z_c$ : la hauteur critique définie comme l'élévation au-dessus du niveau de la mer où la vitesse du vent est exactement égale à la vitesse de phase (DHI, 2014h).

$$z_c = z_0. \ e^{(\kappa/x)} \tag{4-11}$$

0ù :

 $z_0$ : la rugosité de la mer,  $z_0 = z_{0b} + z_{0w}$ 

z<sub>0w</sub> : l'effet de courtes vagues de gravité

 $z_{0b}$ : l'effet des vagues de gravité-capillarité (peuvent être considérés comme rugosité du fond)

 $z_{\rm 0b} = z_{Charnock} u_*^2/g$ 

 $z_{Charnock}$  : le paramètre de Charnock, , valeur par défaut est de 0,01 (DHI, 2014h) ;

*u*\*: la vitesse du vent de frottement,  $u_* = \frac{\kappa \cdot \mathbf{u}(\mathbf{z})}{\ln(\frac{\mathbf{z}}{\mathbf{z}_*})}$ 

La vitesse du vent est calculée par :

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} ln\left(\frac{z+z_{0W}}{z_{0b}+z_{0W}}\right), z \gg z_{0W}$$

$$(4-12)$$

### ii) Type d'interaction air-mer

Trois formulations différentes pour estimer u \* et  $z_c$  ont été mises en œuvre dans le modèle (DHI, 2014h) :

- Modèle non couplé en utilisant une loi de traînée

$$u_*^2 = C_D U_w^2 \tag{4-13}$$

$$C_D = \alpha_{drag} + \beta_{drag} U_w \tag{4-14}$$

D'après Smith & Banke (1975),

 $z_{wind} = 10 \text{ (mètres)}; \qquad \alpha_{drag} = 6,3 \cdot 10^{-3}; \qquad \beta_{drag} = 6,6 \cdot 10^{-5}$  $z_0 = z_{wind} exp\left(\frac{\kappa U_W}{u_*}\right) \qquad (4-15)$ 

- Modèle non couplé en utilisant Charnock

$$z_0 = z_{0b} = \frac{z_{Charnock} u_*^2}{g}$$
(4-16)

Modèle couplé

$$z_{0} = z_{0b} + z_{0w} = z_{0b} \left(1 - \frac{\tau_{w}}{\tau}\right)^{-1/2} = \frac{z_{Charnock} u_{\star}^{2}}{g} \left(1 - \frac{\tau_{w}}{\rho_{air} u_{\star}^{2}}\right)^{-1/2}$$
(4-17)

Où  $\tau_w$  est la contrainte de cisaillement induite par les vagues et  $\tau$  est la contrainte totale de cisaillement.

#### b) Moutonnement (S<sub>ds</sub>)

Le processus de moutonnement dans MIKE21 est représenté par la fonction de dissipation formulée par (Komen et al., 1994). Les mécanismes qui sont pris en considération dans la formulation de moutonnement sont la dégénérescence induite par la pression (Hasselmann, 1974), l'atténuation des ondes courtes par le passage de gros moutons et l'étendue de la couverture de moutonnement.

$$S_{ds} \approx \omega.E$$
(4-18)  
$$S_{ds} = -C'_{ds} \left(\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}}\right)^m \frac{k}{k} \bar{\sigma} E$$
(4-19)

0ù :

C'ds et m sont les paramètres d'ajustement ;

 $\sigma$  est la fréquence moyenne angulaire relatif ;

 $ar{k}$  est le nombre d'ondes moyen ;

 $\hat{\alpha}$  est la raideur globale du champ d'onde,  $\hat{\alpha} = \bar{k} \sqrt{E_{tot}}$ ;

 $\hat{\alpha}_{PM}$  est la valeur  $\hat{\alpha}$  pour le spectre de Pierson-Moskowitz ;

Etot est l'énergie totale du spectre d'énergie ;

D'après Komen et al., 1994,

$$S_{ds}(f,\theta) = -C_{ds} \left(\frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}_{PM}}\right)^m \left\{ (1-\delta) \frac{k}{k} + \delta \left(\frac{k}{k}\right)^2 \right\} \bar{\sigma} E(f,\theta)$$
(4-20)  
(4-20)

Où  $C_{ds}$ , d, et m sont des constants.

### c) Frottement du fond (S<sub>bot</sub>)

$$S_{bot}(f,\theta) = -\left[C_f + \frac{f_c(\bar{u},\bar{k})}{k}\right] \frac{k}{\sinh 2kd} E(f,\theta)$$
(4-21)

0ù :

C<sub>f</sub> : coefficient de frottement (m/s);

 $f_c$  : coefficient de frottement pour le courant;

u : la vitesse du courant ;

MIKE21 prévoit quatre modèles pour la détermination des valeurs possibles pour le coefficient de dissipation (DHI, 2014h) :

- Une constante de frottement C<sub>f</sub> basée sur des tests avec des versions régionales de modèle WAM (Komen et al., 1994). La valeur moyenne de JONSWAP :  $C_f = 2 \cdot 0.38/g$ 

= 0,0077 m/s est suffisante pour les tempêtes modérées (DHI, 2014h).

- Une constante du facteur de frottement  $f_w$  est calculée par la formule  $f_w = C_{f/u_b}$  $u_b$  est la valeur efficace (rms) de la vitesse orbitale des vagues :

$$u_b = \left[ 2 \int_{f_1}^{f_{max}} \int_{\theta} \frac{\overline{\sigma}^2}{\sinh^2(kh)} E(f,\theta) \, d\theta \, df \right]^{1/2} \tag{4-22}$$

La valeur par défaut pour  $f_w$  est de 0,015 .  $2^{1/2}$  = 0,021 (DHI, 2014h).

-  $k_N$  est la rugosité de Nikuradse. C'est une constante de la taille de rugosité géométrique suggérée par Weber (1991) en collaboration avec l'expression du facteur de friction de Jonsson et Carlsen (1976) :

$$f_{w} = \begin{cases} e^{-5,977 + 5,123 (a_{b}/k_{N})^{-0,194}}, & a_{b}/k_{N} \ge 2,016389 \\ 0,24, & a_{b}/k_{N} < 2,016389 \\ a_{b} \text{ est déplacement orbital au fond :} \end{cases}$$
(4-23)

$$a_{b} = \left[2\int_{f_{1}}^{f_{max}}\int_{\theta} \frac{1}{\sinh^{2}(kh)}E(f,\theta)\,d\theta\,df\right]^{1/2} \tag{4-24}$$

- d<sub>50</sub> est une constante de la taille médiane des sédiments, le fond est modélisé comme un fond mobile (DHI, 2014h).

### d) Déferlement (S<sub>surf</sub>)

Le terme source de déferlement est écrit par Eldeberky et Battjes (1995) sur la base de la formulation de déferlement dérivée par Battjes et Janssen (1978).

$$S_{surf}(f,\theta) = -\frac{2\alpha_{BJ}Q_b\bar{f}}{\chi}E(f,\theta)$$
(4-25)

0ù :

 $\alpha_{BJ} \approx 10$  est un constant de calibration;

Q<sub>b</sub> est la fraction de vagues déferlantes;

 $\bar{f}$  est la fréquence moyenne;

X est le rapport de l'énergie totale dans le train d'onde aléatoire de l'énergie dans un train d'ondes avec la hauteur maximale possible d'onde (DHI, 2014h) :

$$X = \frac{E_{tot}}{(H_m^2/8)} = \left(\frac{H_{rms}}{H_m}\right)^2$$

$$H_{rms} = \sqrt{8.E_{tot}}$$

$$(4-26)$$

$$(4-27)$$

Etot est l'énergie des vagues totale ;

 $H_m$  est la hauteur de la vague maximale (en eau peu profond,  $H_m = \gamma.d$ );  $\gamma$  est un paramètre de disjoncteur.

$$\frac{q_b}{\ln q_b} = X = \left(\frac{H_{rms}}{H_{ms}}\right)^2 \tag{4-28}$$

$$Q_b = e^{\frac{-(1-Q_b)}{(H_{rms}/H_m)^2}}$$
(4-29)

$$Q_b = \begin{cases} (1+2,x^2).e^{-\frac{1}{x}}, & x < 0,5\\ (1-2,04.z).(1-0,44.z), & z = 1-x, & 0,5 \le x < 1\\ 1, & x \ge 1 \end{cases}$$
(4-30)

La contribution de déferlement des vagues peut être réglée en utilisant le paramètre  $\gamma$  ou  $\alpha$  (paramètre  $\alpha$  qui contrôle le taux de dissipation), ayant une valeur typique entre 0,5 et 1,0 (DHI, 2014h).

### e) Non-linear interactions (S<sub>nl</sub>)

L'interaction non linéaire vague-vague dans le module de spectre de la houle est décrite par le paramétrage « Discrete Interaction Approximate » (DIA) (Hasselmann et al., 1985).

La méthode DIA examinera deux interactions quaternaires des vagues avec des fréquences comme suit :

$$\begin{cases}
\omega_1 = \omega_2 = \omega \\
\omega_3 = \omega(1+\lambda) = \omega_+ \\
\omega_4 = \omega(1-\lambda) = \omega_- \\
\theta_1 = \theta_2 = \theta
\end{cases}$$
(4-31)

où  $\lambda$  est une constante pour la détermination de la combinaison des ondes de composants;  $\lambda$  est de 0,25 pour un accord satisfaisant avec les calculs exacts par Hasselmann et al. (1985). A partir des conditions de résonance des angles  $\theta_3$ ,  $\theta_4$ , des nombres d'onde k<sub>3</sub> (k<sub>+</sub>) et k<sub>4</sub> (k<sub>-</sub>) par rapport à k sont choisis comme  $\theta_3 = 11,5^\circ$  et  $\theta_4 = -10^\circ$ 33,6° (Hasselmann et al., 1985).

En ce qui concerne les densités d'énergie spectrale, les incréments vers les fonctions de source  $S_{nl}(f_r, \theta) = \frac{\partial E}{\partial t}$  aux trois nombres d'ondes en interaction sont donnés (Hasselmann et al., 1985) par :

$$\begin{cases} \delta S_{nl} \\ \delta S_{nl+} \\ \delta S_{nl-} \end{cases} = \begin{cases} -2 \frac{\Delta f \Delta \theta}{\Delta f \Delta \theta} \\ (1+\lambda) \frac{\Delta f \Delta \theta}{\Delta f_{+} \Delta \theta} \\ (1-\lambda) \frac{\Delta f \Delta \theta}{\Delta f_{-} \Delta \theta} \end{cases} \phi(f, E, E_{+}, E_{-})$$
(4-32)

 $\phi(f, E, E_+, E_-) = C'g^{-4}f^{11} \left[ E^2 \left( \frac{E_+}{(1+\lambda)^4} + \frac{E_-}{(1-\lambda)^4} \right) - \frac{2EE_+E_-}{(1-\lambda^2)^4} \right]$ (4-33)0ù :

C' est une constante numérique proportionnelle à C étant donné que 3•10<sup>7</sup>;

 $\Delta f_{r}, \Delta f_{r}$ , et  $\Delta f_{r}$  sont la résolution spectrale discrète de f<sub>r</sub>, f<sub>r,+</sub>, et f<sub>r,-</sub>, respectivement,  $\Delta f \neq \Delta f_+ \neq \Delta f_-$ .

 $E \equiv E(f,\theta), E_{+} \equiv E(f_{+},\theta), et E_{-} \equiv E(f_{-},\theta)$  sont les densités d'énergie aux valeurs des interactions des nombres d'ondes.

L'équation (4-32) est la somme de toutes les fréquences, les directions, et les configurations d'interaction pour obtenir la fonction de source nette, S<sub>nl</sub> (DHI, 2014h).

Les calculs numériques par Hasselmann (1981) de l'intégrale complète de Bolzmann pour l'eau de profondeur arbitraire ont montré qu'il existe une relation approximative entre les taux de transfert en eau profonde et en eau de profondeur finie : pour un spectre de fréquence de direction donnée, le transfert de profondeur finie est identique à la profondeur infinie pour le transfert, à l'exception d'un facteur d'échelle R (DHI, 2014h) :

 $S_{nl}(profondeur finie) = R(\bar{k}h)S_{nl}(profondeur infinie)$  (4-34)

Cette relation de mise à l'échelle est valable dans la gamme  $\overline{k}$ h> 1, où les calculs exacts peuvent être reproduits étroitement avec le facteur d'échelle (DHI, 2014h).

$$R(x) = 1 + \frac{5.5}{x} \left( 1 - \frac{5x}{6} \right) e^{-\left(\frac{5x}{4}\right)}$$

$$(4-35)$$
avec  $x = (3/4) \bar{k}h$ 

Cette approximation est utilisée dans le modèle WAM (DHI, 2014h).

### 4.3.1.2. Choix de formulation dans MIKE21 SW de DHI

Il nous faut choisir des formulations pouvant être utilisées dans un modèle spectral de vague (Damlamian et Kruger, 2013).

### a) Formulation spectrale

Le module SW est approprié à la fois au large et près des côtes pour la modélisation des vagues car il comprend deux formulations différentes :

- La formulation directionnelle découplée paramétrique (formulation paramétrique à découplage directionnel) s'adapte à la modélisation de la houle à la côte (DHI, 2014h). Elle a des incertitudes pour la modélisation de la transformation des vagues à une échelle assez large (Damlamian et Kruger, 2013). Cette formulation est basée sur le paramétrage de l'équation de conservation de l'action des vagues. Le paramétrage est réalisé par l'introduction du moment d'ordre zéro et du premier ordre du spectre d'action de vague en tant que variables dépendantes (DHI, 2014h).
- La formulation entièrement spectrale est la plus adaptée à la modélisation des vagues spectrales au large. Elle permet de modéliser de manière plus efficace la croissance, la décroissance et la transformation des vagues en présence du vent (Damlamian et Kruger, 2013).

Dans nos travaux, les deux formulations spectrales ont été utilisées : la première formulation a été utilisée pour calculer la propagation de la houle pendant une longue période (de 1979 à 2014), comme la zone d'étude se situe principalement dans les eaux peu profondes. Elle requière des temps de calcul nettement plus réduits (Damlamian et Kruger, 2013). La deuxième formulation a été utilisée pour obtenir le spectre fréquence-directionnel de l'action des vagues pendant une courte période. Nous allons comparer entre les spectres au large et celles à la côte.

#### b) Formulation temporelle

MIKE21 SW utilise deux formulations temporelles quasi stationnaire et instationnaire. La formulation quasi stationnaire nécessite en général des temps de calcul moins importants. Elle s'adapte aux forçages qui évoluent lentement dans le temps et dans l'espace (Damlamian et Kruger, 2013). Nous utilisons la formulation quasi stationnaire dans nos calculs.

### c) Formulation d'interaction air-mer

Nos échelles régionale et locale ont des échelles spatiales inférieures à 40 kilomètres. Ce sont de petites échelles inférieures à 10-100 kilomètres (DHI, 2014h). Alors, en cas de choix de la formulation entièrement spectrale, les formulations de « *Uncoupled model* » [Section 4.3.1.1. a) ii) ] doivent être utilisées. En effet, l'utilisation de la formulation couplée peut donner une surestimation de la rugosité de la mer et donc une surestimation de la hauteur significative des vagues (DHI, 2014h). Cette surestimation a été principalement observée pour les vents relativement forts tel que Mistral supérieurs à 13 mètres par seconde de vitesse. L'utilisation des formulations non couplées améliorera les résultats du modèle (DHI, 2014h). Nous utiliserons la formulation du modèle non couplé en utilisant Charnock [Section 4.3.1.1. a) ii) ] dans le modèle SW.

#### d) Formulation du frottement du fond

En général, il est assez difficile d'évaluer le frottement du fond [Section 4.3.1.1. c) ]. Il est donc utilisé comme un facteur de calibration (DHI, 2014h). La rugosité de Nikuradse [Section 4.3.1.1. c) ] peut être estimée en prenant en compte les conditions hydrodynamiques des vagues, les conditions de sédiments ainsi que la présence de posidonies au site d'étude. Une cartographie des rugosités peut être élaborée afin d'évaluer l'influence des posidonies sur le régime hydrodynamique. Alors, nous pouvons choisir la rugosité de Nikuradse dans le modèle SW.

# 4.3.2. Modèle hydrodynamique de MIKE

Le modèle hydrodynamique MIKE21 HD résoud les équations bidimensionnelles classiques de Saint-Venant par la méthode volume fini sur une grille à maillage flexible et par la méthode des différences finies sur une grille à maillage rectangulaire. Il traite le frottement sur le fond, l'effet des événements météorologiques (vent et pression atmosphérique), et la force de Coriolis, etc. ... Il nous permet de simuler les courants côtiers dûes à l'action de la houle dans la zone de déferlement (DHI, 2014m).

\* Equation en eau peu profonde dans le système de coordonnées Cartésien

L'intégration des équations de quantité de mouvement horizontal et l'équation de continuité de la profondeur  $h = \eta + d$  en eau peu profonde produisent (DHI, 2014e) :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial h\bar{v}}{\partial y} = hS \tag{4-36}$$

$$\frac{\partial h \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{u}^2}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v} \bar{u}}{\partial y} = f \bar{v} h - g h \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{g h^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_W}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{bx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + h u_s S$$

$$\frac{\partial h \bar{v}}{\partial t} + \frac{\partial h \bar{u} \bar{v}}{\partial x} + \frac{\partial h \bar{v}^2}{\partial y} = f \bar{u} h - g h \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{g h^2}{2\rho_0} \frac{\partial \rho_W}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{by}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + h v_s S$$

$$(4-38)$$

0ù :

t est le temps ;

x, y, et z sont les coordonnées cartésiennes ;

 $\eta$  est la hauteur de la surface ;

d est le profondeur de l'eau ;

h est la profondeur totale de l'eau,  $h = \eta + d$ ;

u, v, et w sont les composantes de la vitesse du courant dans les directions x, y, et z;

f est le paramètre de Coriolis, f =  $2\Omega \sin \phi$ ;

 $\boldsymbol{\Omega}$  est la vitesse angulaire de révolution ;

 $\phi$  est la latitude géographique ;

 $\rho_w$  est la densité de l'eau ;

Syx, Sxy, Syy, et Sxx sont les composantes du tenseur de rayonnement ;

vt et A sont les viscosités turbulentes verticale et horizontale, respectivement;

pa est la pression atmosphérique ;

 $\rho_0$  est la densité de référence de l'eau ;

S est l'amplitude de la décharge causée par des sources ponctuelles ;

(us, vs) sont les vitesses par laquelle l'eau est déchargée dans l'eau ambiante ;

 $(\tau_{sx}, \tau_{sy})$  et  $(\tau_{bx}, \tau_{by})$  sont les composantes x et y des contraintes de cisaillement du vent de surface et du fond, respectivement.

La barre supérieure décrit une valeur moyenne. Par exemple,  $\bar{u}$  et  $\bar{v}$  - les vitesses des courants à la profondeur moyenne sont définies par :

$$h\bar{u} = \int_{-d}^{\eta} u dz \qquad , \qquad h\bar{v} = \int_{-d}^{\eta} v dz \qquad (4-39)$$

Les contraintes latérales  $T_{ij}$  comprennent le frottement visqueux, l'advection différentielle et le frottement turbulent. Ils sont estimés à l'aide d'une viscosité turbulente sur la base de la formulation des gradients de vitesse moyenne de la profondeur (DHI, 2014e) :

$$T_{xx} = 2A \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, \qquad T_{xy} = A \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), \qquad T_{yy} = 2A \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \qquad (4-40)$$

# 4.3.3. Modèle de transport sédimentaire et de morphologie

D'abord, nous allons choisir un modèle MIKE 21 afin d'évaluer le transport sédimentaire et l'évolution morphologique. Il sera ensuite décrit brièvement.

### 4.3.3.1. Choix des modèles

Le modèle MIKE21 MT (« Mud Transport ») expose d'une part les processus d'érosion et d'accrétion, d'autre part le transport des sédiments cohésifs (vase ou un mélange de sable et vase) sous l'action des vagues et des courants. Il repose sur l'équation de transport des sédiments et l'équation d'Advection-Diffusion dans le modèle HD. La vitesse d'érosion est calculée en utilisant la contrainte de cisaillement critique au fond (début de l'entraînement). Le fond marin est généralement décrit par les substrats meuble et rigide. Il se compose de 3 couches tels que boue fluide faible, boue fluide, et substrat consolidé, caractérisées par leurs densité et résistance au cisaillement (DHI, 2014d). Ce modèle peut prendre en compte plusieurs phénomènes physiques tels que les floculations dûes à la concentration et à la salinité, l'effet de la densité aux concentrations élevées, la sédimentation entravée, la consolidation, les changements morphologiques de fond marin, et la contrainte tangentielle au fond en cas de vagues et des courants combinés (DHI, 2014d). Il est souvent appliqué aux zones côtières où la concentration des vases est élevée tel qu'un estuaire ou un port. En revanche, le modèle MIKE21 ST simule le transport de sédiments non cohésifs (sable) soit sous l'action d'un courant seul, soit sous l'action combinée de la houle et du courant. Les modèles MT et ST sont activés en même temps que le modèle HD.

La plage de l'Almanarre se compose principale de sables et de graviers (Section 3.1.6). Alors, nous pouvons appliquer le modèle ST afin d'estimer la vitesse d'érosion et de dépôt ainsi que le transport sédimentaire.

### 4.3.3.2. Modèle de transport de sable MIKE21 ST

Le calcul du transport de sable se fait selon deux périodes tempétueuse et saisonnière. Dans MIKE21, nous pouvons calculer ces cas en utilisant les données d'entrée tels que les vagues, les vents, et les caractéristiques des sédiments des fonds (DHI, 2014i). Les transports sédimentaires sont calculés dans 2 conditions telles que courant pur et combinaison des houles et des courants. Deux méthodes de simulation sont disponibles dans les conditions combinées de la houle et du courant (DHI, 2014i) : la méthode STP (« *Sediment Transport Program* ») de DHI et la méthode Bijker. Elles utilisent l'équation du transport sédimentaire qui est calculée comme suit (DHI, 2014c) :

$$q_{tb} = q_b + q_s$$
 (4-41)  
Où q<sub>tb</sub>, q<sub>b</sub>, et q<sub>s</sub> sont le transport total des sédiments, le transport par charriage, et le

transport par suspension, respectivement.

La méthode STP traite les différences de phase de l'écoulement oscillatoire, la tension du cisaillement sur le fond et la concentration sédimentaire en suspension dans sa formulation pour le calcul du transport sédimentaire (DHI, 2014m). Deux méthodes de simulation sont disponibles : modèle 2DH et modèle STPQ3D.

Le modèle 2DH est une approche de plan bidimensionnel horizontal (2DH). Les transports sédimentaires sont calculés dans le sens du courant moyen, avec une composante transversale résultante de la pente des fonds (DHI, 2014m).

Le modèle STPQ3D est quasi-tridimensionnelle (Q3D) pour l'hydrodynamique et le transport sédimentaire (DHI, 2014m). Il calcule l'hydrodynamique instantanée et moyenne dans le temps et le transport des sédiments dans deux directions horizontales : perpendiculaire et parallèle au rivage. Comme le modèle calcule le transport par charriage et par suspension séparément, les valeurs de la table de transport sédimentaire sont le transport total.

### a) Transport par charriage

Dans le modèle STPQ3D, le modèle du transport par charriage d'Engelund et Fredsøe (1976) est utilisé, où le transport par charriage est calculé à partir du paramètre de Shields instantané.

### i. Transport par charriage des sables

Le transport par charriage sans dimension  $\Phi_b$  est trouvé par une approche déterministe par Engelund et Fredsøe (1976) :

$$\Phi_b = 5p(\sqrt{\theta'} - 0.7\sqrt{\theta_c}) \tag{4-42}$$

Où p est la probabilité que toutes les particules d'une couche s'orientent, donnée par :

$$p = \left[1 + \left(\frac{\frac{\pi}{6}\beta}{\theta' - \theta_c}\right)^4\right]^{-1/4} \tag{4-43}$$

 $\theta'$  est la contrainte de cisaillement sans dimension (paramètre de Shields) donnée par :

$$\theta' = \frac{u_f'^2}{(s-1)gd}$$
(4-44)

La présence d'ondulation n'influe pas le transport par charriage, c'est pourquoi  $\Phi_b$ , p et  $\lambda$  sont évaluées sur la base  $\theta'$ .

Le paramètre de Shields critique :

$$\theta_{c} = \theta_{c,0} \left( \frac{-\cos\psi\sin\beta + \sqrt{\mu_{s}^{2}\cos^{2}\beta - \sin^{2}\psi\sin^{2}\beta}}{\mu_{s}} \right)$$
(4-45)

Où l'on a les définitions suivantes :

 $\mu_s$  est un coefficient de frottement statique ( $\mu_s$  = tan $\phi_s$ ,  $\phi_s$  = angle de repose) ;

 $\theta_{c,0}\, est$  le paramètre de Shields critique sur le fond plat ;

 $\psi$  est l'angle entre le courant et la direction de pente (le flux est à un angle  $\psi$  de la pente  $\beta$ );

 $\beta$  est la pente du fond.

A partir de l'équation (4-42), nous calculons les moyennes temporelles (DHI, 2014c) :

$$\Phi_{b1} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \Phi_{b}(t) \cos(\phi(t)) dt \qquad (4-46)$$

$$\Phi_{b2} = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} \Phi_b(t) \sin(\phi(t)) dt \qquad (4-47)$$

$$q_{b1} = \Phi_{b1} \cdot \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \tag{4-48}$$

$$q_{b2} = \Phi_{b2} \cdot \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \tag{4-49}$$

Où l'on a les définitions suivantes :

 $\phi(t)$  est la direction de l'écoulement instantané ;

 $\Phi_{b1}$  est le transport par charriage sans dimension dans le sens de courant moyen ;

 $\Phi_{b2}$  est le transport par charriage sans dimension perpendiculaire à la direction moyenne du courant ;

 $q_{b1}$  est le transport par charriage dans le sens de courant moyen ;

 $q_{\rm b2}$  est le transport par charriage perpendiculaire à la direction moyenne du courant.

### ii. Transport par charriage des galets

L'équilibre des forces pour un seul mouvement d'une particule sphérique du sédiment peut être exprimé comme suit (DHI, 2014c) :

$$V(s+C_m)\frac{dU_{b,x}}{dt} = 0.5. C_D A U_{r,x} |\overline{U}_r| + V_m \frac{dU_{0,x}}{dt} - g(s-1)V(\mu_d \cos \alpha \cos \beta_x + \sin \beta_x)$$
(4-50)  
$$V(s+C_m)\frac{dU_{b,y}}{dt} = 0.5. C_D A U_{r,y} |\overline{U}_r| + V_m \frac{dU_{0,y}}{dt} - g(s-1)V(\mu_d \cos \alpha \cos \beta_y + \sin \beta_y)$$
(4-51)

$$\rho s \frac{dy}{dx} = \tau_b - \tau_c - n \left( F_d + F_i + F_g \right) \tag{4-52}$$

$$\theta_{c} = \frac{\tau_{c}}{\rho g(s-1)D} = \frac{4\mu_{s}}{3\alpha^{2}C_{d}} \left( 1 - \frac{1}{g(s-1)\mu_{s}} \frac{dU_{o,w}}{dt} sign(U_{o,w}) \right)$$
(4-53)

$$\theta_{c} = \theta_{c,0} \left( \frac{-\cos\psi\sin\beta + \sqrt{\mu_{s}^{2}\cos^{2}\beta - \sin^{2}\psi\sin^{2}\beta}}{\mu_{s}} \right)$$
(4-54)

Où l'on a les définitions suivantes :

 $\rho$  est la densité du sédiment ;

V est le volume de la particule de sédiment, V =  $(\pi D^3/6)$ ;

A est l'aire de la surface du sédiment de particules, A =  $(\pi D^2/4)$ ;

D est la taille du grain des sédiments ;

s est la densité spécifique des sédiments ;

 $C_{m} \mbox{ est le coefficient de masse hydrodynamique ; }$ 

 $C_d$  est le coefficient de traînée ;

 $\mu_d$  est le coefficient de frottement dynamique ;

 $\mu_s$  est le coefficient de frottement statique ( $\mu_s$  = tan $\phi_s$ ,  $\phi_s$  = angle de repose);

 $\boldsymbol{\alpha}$  est le coefficient sans dimension ;

U<sub>b</sub> est la vitesse des particules dans le mouvement orbital ;

 $\overline{U}_{\mathfrak{b}}~$  est la vitesse des particules à la profondeur moyenne ;

 $U_o$  est la vitesse d'écoulement oscillant près du fond ;

 $U_r$  est le rapport la vitesse d'écoulement dans la direction x :  $U_r = U_o - U_b$ 

 $\overline{\mathbf{U}}_r$  est la vitesse d'écoulement à la profondeur moyenne dans la direction x ;

 ${f \bar q}_b$  est le transport par charriage à la profondeur moyenne ;

Les indices x et y indiquent les projections en x et direction y, respectivement.

$$\frac{d\,\overline{q_b}}{dt} = V \frac{d(n\,\overline{b})}{dt} \tag{4-55}$$

 $\tau_{\text{b}}\,\text{est}$  la contrainte de cisaillement du fond ;

 $\tau_c$  est la contrainte de cisaillement critique du fond ;

n est le nombre de particules en mouvement des sédiments ;

Fd est la force de traînée ;

Fiest la force d'inertie ;

Fg est la force de gravité.

### b) Transport par suspension

Le transport de sédiments par suspension est calculé comme le produit des vitesses instantanées du débit et de la concentration de sédiments instantané (DHI, 2014c) :

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{2d}^D (u.c) \, dz \, dt \tag{4-56}$$

L'intégration dans le temps de l'équation de diffusion pour les matières en suspension est répétée jusqu'à obtention d'une solution périodique (DHI, 2014c).

### i. Concentration de référence de fond c<sub>b</sub>

 $c_b = \frac{0.65}{\left(1+\frac{1}{\lambda}\right)^s} \tag{4-57}$ 

0ù :

 $\lambda$  est la concentration linéaire (DHI, 2014c).

$$\lambda = \sqrt{\frac{\theta' - \theta_c - \frac{\pi}{6}\beta_p}{0,027s\,\theta'}} \tag{4-58}$$
$$\theta' = \frac{U_f'^2}{(s-1)g\,d_{50}} \tag{4-59}$$

p se trouve dans l'équation (4-43);

 $\theta_c$  est la valeur critique ;

Selon Zyserman & Fredsøe (1994),

$$c_b = \frac{0.331(\theta' - 0.045)^{1.75}}{1 + \frac{0.831}{0.46}(\theta' - 0.045)^{1.75}}$$
(4-60)

### ii. Variation de la concentration au cours du temps

La variation de concentration au cours du temps est calculée avec l'équation de diffusion (DHI, 2014c) :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left( \varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} \right) + w \frac{\partial c}{\partial y}$$
(4-61)

Les conditions limites sont (DHI, 2014c) :

$$c(i+1,0) = c_b(i+1) \grave{a} y = 0$$
  

$$\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial y} + wc = 0 \grave{a} y = D$$
  

$$c(0,j) = \frac{3}{2}c'(n,j) - \frac{1}{2}c'(0,j)$$
  

$$c(0,j) = c'(n,j)$$

### iii. Transport par suspension

Le transport par suspension est calculé comme suit :

$$q_s = \int_{2d}^{D} c\left(\frac{T}{4}, y\right) . U_1\left(\frac{T}{4}, y\right) dy \tag{4-62}$$

où U<sub>1</sub> est la vitesse totale instantanée dans le sens de courant moyen (DHI, 2014c).

L'itération est arrêtée lorsque l'écart relatif dans le transport en suspension dans la direction de courant moyen à l'instant t = T/4, q<sub>s</sub> est inférieure ou égale à la tolérance prescrite v. L'écart relatif est déterminé en ce qui concerne le transport q<sub>s'1</sub> déterminé à t = T/4 dans la période précédente (DHI, 2014c) :

$$\frac{q_{s1}-q_{sl_1}}{q_{sl_1}} \le v$$
 (4-63)

### iv. Profil de la concentration moyenne et centre de gravité

La concentration moyenne temporelle au-dessus de la verticale est

$$\bar{c}(y) = \frac{1}{\tau} \int_0^T c(y, t) \, dt \tag{4-64}$$

Le centre de concentration  $y_c$  est calculé comme la hauteur du centre de gravité du profil de concentration moyenne au-dessus du fond.

$$y_c = S/A \tag{4-65}$$
0ù :

A est la quantité totale de matière en suspension par unité de largeur,

$$A = \int_{2d_{50}}^{D} \bar{c}(y) \, dy \tag{4-66}$$

S est le moment du premier ordre du profil de concentration moyenne par rapport au niveau du fond :

$$S = \int_{2d_{50}}^{D} \bar{c}(y) y \, dy \tag{4-67}$$

#### v. Transport moyenne temporelle

$$\varphi_{x}(t) = \int_{\substack{2d \\ cD}}^{D} U_{x}(z,t) \cdot c(z,t) \, dz \tag{4-68}$$

$$\varphi_{y}(t) = \int_{2d}^{2d} U_{y}(z,t) \cdot c(z,t) dz \qquad (4-69)$$

$$\bar{q}_{sx} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \left[ \int_{2d}^{D} U_{x}(z,t) \cdot c(z,t) \, dz \right] dt \tag{4-70}$$

$$\bar{q}_{sy} = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \int_{2d}^D U_y(z,t) \, c(z,t) \, dz \right] dt \tag{4-71}$$

$$\phi_{sx} = \bar{q}_{sx} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \tag{4-72}$$

$$\phi_{sy} = \bar{q}_{sy} \sqrt{(s-1)gd_{50}^3} \tag{4-73}$$

#### 4.3.3.3. Modèle de morphologie du MIKE21 ST

Un modèle morphologique est un modèle de transport hydrodynamique/sédiment combiné. Le champ des courants est mis à jour en permanence en fonction des changements de la bathymétrie du fond (DHI, 2014f). Dans le cas d'une simulation combinée de la houle et du courant, le champ des vagues peut être mis à jour et refléter les changements de la bathymétrie du fond (DHI, 2014f). Les modèles morphologiques sont traditionnellement divisés en modèles couplés et découplés. Dans les modèles couplés, les équations régissant l'écoulement et le transport sédimentaire sont fusionnées en un ensemble d'équations, qui sont résolues simultanément (DHI, 2014f). Dans les modèles couplés, la solution de l'hydrodynamique est résolue à un certain pas de temps avant les équations de transport des sédiments (DHI, 2014f). Par la suite, un nouveau niveau de fond est calculé et le modèle hydrodynamique procède au pas de temps suivant. Cette dernière approche est appliquée dans le système de modélisation présenté (DHI, 2014f).

La vitesse de modification du niveau du fond est généralement calculée en utilisant l'équation d'Exner (la conservation de la masse du fond) :

$$-(1-n)\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial S_x}{\partial x} + \frac{\partial S_y}{\partial y} - \Delta S \qquad (4-74)$$

0ù :

n est la porosité du sédiment ;

z est le niveau du fond ;

 $S_x$  et  $S_y$  sont les transports totaux dans les directions x et y, respectivement ;

 $\Delta S$  est le taux de sources-puits des sédiments.

Le terme de sources-puits est nul en cas de conditions de houles et de courants combinées (DHI, 2014f).

Chaque pas de temps, la bathymétrie est mise à jour et un nouveau niveau du fond est estimé par :

$$z_{n} = z_{a} + \frac{1}{1-n} \cdot \frac{\partial z}{\partial t} \cdot \Delta t_{HD}$$
(4-75)

Où  $\Delta t_{HD}$  est le pas de temps du modèle HD, zn et za sont le nouveau et l'ancien niveaux du fond, respectivement.

# 4.3.4. Modèle couplé MIKE21/3 FM

Le modèle couplé MIKE21/3 FM comprend différents modules tels que HD, ST, et SW, etc. … Nous pouvons les choisir dans la simulation. Le modèle comprend également un couplage dynamique entre les modules ST, HD, et SW (DHI, 2014j). Leurs descriptions détaillées peuvent être trouvées dans les sections 4.3.1, 4.3.2, et 4.3.3. Nous soulignons que le module ST dans le modèle couplé n'utilise que le modèle STPQ3D en cas de houles et de courants combinés. Les transports de sable sont déterminés par l'interpolation dans les tableaux de transport (DHI, 2014j). Ces tableaux doivent être générés au préalable par la « *MIKE 21 Toolbox* » avec le choix de « *Generation of Q3D Sediment Tables* ». Ils doivent intégrer une condition quelconque de bathymétrie, courant, houle, ou sédiments prédite par le modèle intégré (DHI, 2014j).

Le pas de temps global discret est utilisé pour déterminer la fréquence de sortie qui peut être obtenue à partir des différents modules et synchroniser le couplage entre les différents modules (DHI, 2014j). Le pas de temps local pour le module SW et le module ST peut être défini comme un multiple du pas de temps global et d'un facteur de pas de temps (DHI, 2014j).

Les interactions entièrement dynamiques suivantes entre le module hydrodynamique et le module spectral de vague sont possibles (DHI, 2014j). Dans le module SW, il est possible d'inclure les variations d'une part du niveau marin, d'autre part du courant à partir de la simulation hydrodynamique. Dans le module HD, il est possible d'inclure le champ de contrainte et de rayonnement à partir de la simulation de spectre de vague (DHI, 2014j). Le tenseur de rayonnement de vague généré par le modèle SW est un forçage pour le modèle HD. Il est très important en eau peu profonde. Il permet de calculer le courant induit par les vagues généré par les gradients en tenseur de rayonnement dans la zone de surf (DHI, 2014g). Une variation des tenseurs de rayonnement provoque des efforts des vagues sur le fluide affectant le mouvement de l'eau moyen et les niveaux d'eau (Pattiaratchi et Wijeratne, 2011). Les tenseurs de rayonnement sont responsables de la surcote/décote dûe aux vagues, le courant de dérive, et le courant sagittal dans la zone côtière (Pattiaratchi et Wijeratne, 2011). Les courants sagittaux et la surcote/décote sont le résultat des variations des niveaux d'eau dûes aux contraintes normales de rayonnement. Cependant, les courants de dérive sont le résultat des forces des vagues dûes aux contraintes tangentielles de rayonnement..

Les termes de tenseur de rayonnement dans les équations de Saint-Venant (4-37) et (4-38) sont  $\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y}$  et  $\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y}$  (DHI, 2014g). Les termes de S<sub>xx</sub> et S<sub>yy</sub> (m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>) sont les contraintes normales de rayonnement. Les termes de S<sub>xy</sub> et S<sub>yx</sub> (m<sup>3</sup>/s<sup>2</sup>) sont les contraintes tangentielles de rayonnement.

# 4.4. Proposition de scénarios

Selon l'analyse des données des vents et des vagues, l'historique des tempêtes, notre modèle exécute les scénarios dans deux conditions de mer : conditions normales (mer moyenne) et conditions extrêmes (mer « grosse » et tempête).

# 4.4.1. Conditions normales



Figure 4-2 : Roses des vents à 10 mètres à Hyères en 2008 à partir des données observées SYNOP (A) et METAR (B).

Pour les conditions normales, nous faisons le scénario annuel, le scénario saisonnier (estival et hivernal), et le scénario d'une année moyenne (2008). Nous choisissons la période de l'année de 2008 pour faire les scénarios car les vents (Figure

3-4, p. 111) et les houles (Figures 3-21 et C-9, p. - 28 -) en 2008 sont compatibles avec ceux observés pendant 14 ans. Nous avons aussi assez des données disponibles dans cette période. Les vents en 2008 sont exposés dans la figure 4-2.

# 4.4.2. Conditions extrêmes

En hiver, le tombolo occidental est souvent affecté par la tempête, il s'agit d'un facteur important affectant l'évolution du littoral. Nous nous intéressons au scénario de coups de mer, aux scénarios de tempêtes.

Dans les conditions extrêmes, nous pouvons classifier les scénarios de tempêtes en 6 catégories (Tableau 4-2, p. 185) tels que coup de mer, tempête annuelle, tempête décennale (forte tempête), tempête trentennale (tempête maximale observée), tempête cinquantennale (tempête exceptionnelle), et tempête centennale (tempête très exceptionnelle).

L'élévation du niveau marin moyen est estimée de 0,5 mètre dans 50 ans (Section 3.2.7). A partir des caractéristiques des évènements extrêmes (Section 3.1.5), nous estimons les niveaux marins extrêmes dans le tableau 4-1. A partir du tableau 3-21, p. 150, nous pouvons déterminer les hauteurs extrêmes de la houle au large dans le tableau 4-1. La valeur maximale (5 mètres) de la hauteur  $H_{1/3}$  en cas de période de retour inférieure à 1 an est estimée à partir des données de houle décennales mesurées par navires.

Périodes de retor	<1	1	10	30	50	100		
Niveau marin (m)		0,5	0,65	0,95	1	1,15	1,5	
Niveau marin ext	rême (m)	1	1,15	1,45	1,5	1,65	2	
Estimation H <sub>1/3</sub>	Valeur inférieure	4,4	5,24	6,45	6,90	7,08	7,40	
(en m)	Valeur supérieure	5	5,34	6,48	7,03	7,28	7,60	

Tableau 4-1 : Estimation des niveaux marins et hauteurs des houles extrêmes.

Entre 2007 et 2008, 10 événements extrêmes de Sud-Ouest et 13 de Nord-Ouest sont enregistrés (Serantoni et Lizaud, 2000-2010). Ils expliquent l'érosion de la plage au Nord du tombolo dans cette période. Nous choisissons la période de l'année de 2007 à 2008 pour faire les scénarios de tempêtes car cette période a le plus grand nombre de tempêtes dans la période de 1999 à 2013 et la tempête maximale observée est à 00h30 le 24 Janvier 2007, avec la hauteur de la houle à 6,8 mètres. Dans les scénarios d'événement extrême, les vents de Sud-Ouest à Nord-Ouest ont une vitesse de 7,59 à 34 mètres par seconde. La houle au large peut atteindre de 5 à 7 mètres de hauteur significative et de 9 à 12 secondes de période venant de direction de Sud-Ouest à Ouest.

Tous les scénarios sont indiqués dans un tableau récapitulatif (Tableau 4-2). Premièrement, les vitesses de vent à 10 mètres sont les valeurs du percentile voulu (70%) des données SYNOP dans les scénarios annuel, estival, et hivernal. Elles représentent les valeurs observées à partir des données SYNOP dans les scénarios d'une année 2008, d'un coup de mer, d'une tempête annuelle, et d'une tempête maximale observée. La vitesse de vent représente une valeur du percentile voulu (99%) des données SYNOP dans le scénario d'une tempête décennale. Elle expose une valeur maximale observée d'une part à partir des données SYNOP, d'autre part à partir d'une régression d'événement extrême de ces données dans le scénario d'une tempête trentennale. Elle est choisie par une valeur maximale observée à partir des données METAR dans le scénario d'une tempête cinquantennale. Pour les tempêtes centennales, elle est déterminée par une régression d'événement extrême à partir des données METAR. Deuxièmement, les niveaux marins sont au-dessus du zéro des cartes marines CM (0,253 mètres CM = 0 mètres NGF). Ils représentent les niveaux marins extrêmes spécifiés dans le tableau 4-1 en cas de tempêtes décennales, trentennale, cinquantennale, et centennale. Troisièmement, les hauteurs  $H_{1/3}$  de la houle au large sont celles de la houle morphologique représentative dans les scénarios annuel, estival, et hivernal. Les paramètres des houles correspondent à ceux dans le tableau 4-1 pour les tempêtes décennales, trentennale, cinquantennale, et centennale.

Scénario	Condition	Type de	Vent		Niveau	Houle au large		
		scénario	Dir	V	marin (m)	<b>H</b> <sub>1/3</sub>	Tp	MWD
1-0-1	Annuel	Statistique		0	Variation	1,84	5,95	265
1-0-2			45	5,06	observée			
1-0-3			94	6,83				
1-0-4			228	5,57				
1-0-5			274	7,59				
1-0-6			320	4,05				
1-S			228	5,57		1,73	5,26	226
2-0	Estival		272	8,09		0,92	5,58	264
2-S			227	6,07		0,79	4,86	230
3-0	Hivernal		275	7,34		1,90	6,45	266
3-S			230	5,06		1,75	5,87	224
4	Une année	Réel	Variation o	bservée		Variation observée		e
	moyenne (2008)		des vents à	10				
5	35 ans (1979-		mètres à pa	artir des				
	2014)		données SY	NOP				
6	Tempête maximale							
	observée							
7-0 et 7-S	Coups de mer							
8-0 et 8-S	Tempête annuelle							
9-0	Tempêtes	Statistique	275	12,65	1,45	6,48	10	270
9-S	décennales		230	12,65	1,45	6,45	9,4	224
10-0	Tempête		275	17,71	1,5	7	10,5	270
10-S	trentennale		230	17,71	1,5	7	10,5	224
11-0	Tempête		275	31,87	1,65	7,18	11	270
11-S	cinquantennale		230	31,87	1,65	7,18	11	224
12-0	Tempête		275	34,21	2	7,5	12	270
12-5	centennale		230	34 21	2	75	12	224

|--|

Dir – la direction du vent (°) ; V – la vitesse du vent (mètre par seconde) ;  $H_{1/3}$  – la hauteur significative de la houle (mètre) ;  $T_p$  – la période de la houle (s) ; MWD – la direction moyenne de la houle (°).

# 4.5. Indices d'efficacité statistique de la performance des modèles

Les paramètres statistiques de qualité des modèles numériques sont identifiés et exprimés pour les modèles SW, HD, et ST.

# 4.5.1. Modèles SW et HD

Nous utilisons le classement habituel (excellent, bon, raisonnable/faible, pauvre et mauvais) pour le modèle. Nous proposons d'évaluer la performance des modèles sur les paramètres comme erreur absolue relative moyenne (RMAE), racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), coefficient de détermination (R<sup>2</sup>), et coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NASH ou E). La qualification de la performance du modèle est donnée dans le tableau 4-3.

Tableau 4-3 : Indicateurs de la qualité du modèle numérique [d'après van Rijn et al. (2003), modifié].

Indicateurs	RMAE	RMAE				
Classification	Hauteur de vague	Vitesse de courant	RMSE	K-et NASH (E)		
Excellent	<0,05	<0,1	<0,1	>0,9		
Bon	0,05-0,1	0,1-0,3	0,1-0,3	0,7-0,9		
Raisonnable/équitable	0,1-0,2	0,3–0,5	0,3-0,5	0,3-0,7		
Pauvres	0,2-0,3	0,5-0,7	0,5-0,7	0,1-0,3		
Mauvais	>0,3	>0,7	>0,7	<0,1		

# 4.5.1.1. Erreur absolue relative moyenne

L'équation du RMAE est la suivante (Source : <u>www.statsoft.fr</u>)

$$RMAE = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N} \frac{|o_i - p_i|}{p_i}$$
(4-76)

 $Ou` N \ est \ le \ nombre \ d'observations, o_i \ est \ la \ valeur \ observée \ de \ l'observation \ i \ , \ et \ p_i \ est \ la \ valeur \ prédite \ (c'est-à-dire, théorique \ ou \ attendue) \ de \ i.$ 

# 4.5.1.2. Racine de l'erreur quadratique moyenne

RMSE est une mesure fréquemment utilisée pour les différences entre les valeurs prédites par un modèle et les valeurs réellement observées. Fondamentalement, le RMSE représente l'écart type d'échantillon de la différence entre les valeurs prédites et les valeurs observées (Source : <u>en.wikipedia.org</u>).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (o_i - p_i)^2}$$
(4-77)

#### 4.5.1.3. Coefficient de détermination R<sup>2</sup>

Le coefficient de détermination est « *un indicateur spécifique qui permet de traduire la variance expliquée par le modèle* » (Source : <u>fr.wikipedia.org</u>).

Nous évaluons ce coefficient dans le cas particulier de la régression linéaire simple, c'est le carré du coefficient de corrélation. L'équation du coefficient de détermination est la suivante :

$$R^{2} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N} (o_{i} - \bar{o})(p_{i} - \bar{p})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} (o_{i} - \bar{o})^{2} \sum_{i=1}^{N} (p_{i} - \bar{p})^{2}}}\right)^{2}$$
(4-78)

Où  $\bar{o}$  est la valeur moyenne de toutes les observations et  $\bar{p}$  est la valeur moyenne des valeurs prédites.

Ce coefficient nous permet d'estimer la fidélité du modèle, le plus proche de un, le mieux. Il est facile à calculer. Mais, les écarts systématiques ne sont pas reconnus.

#### 4.5.1.4. Coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe

L'équation du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe est la suivante :

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} (o_i - \bar{o})^2}$$
(4-79)

Ce coefficient peut varier de - $\infty$  à 1. Il nous permet d'estimer la fidélité du modèle aussi : avec E négative, la valeur moyenne des données mesurées est un meilleur pronostic que le modèle. Ce coefficient est robuste contre les déviations uniformes et largement utilisé. Mais, il n'est pas robuste aux valeurs extrêmes (comme beaucoup d'autres méthodes).

# 4.5.2. Modèles ST

Nous proposons d'évaluer la performance des modèles sur la base du RMAE, du R<sup>2</sup>, du RMSE, du NASH, et du score d'habileté de Brier (BSS). Les quatre premiers paramètres ont été représentés dans la section 4.5. p. 186. Le BSS est très approprié pour la prédiction de l'évolution du fond (van Rijn et al., 2003). Nous considérons ce paramètre essentiellement pour évaluer la qualité des modèles de morphologie. Dans ce qui suit, nous présentons le BSS.

Ce score d'habileté compare la différence quadratique moyenne entre la bathymétrie modelée et celle observée et la différence quadratique moyenne entre la bathymétrie initiale et celle observée (van Rijn et al., 2003).

Il évalue si la bathymétrie calculée est plus proche de la bathymétrie mesurée que la bathymétrie initiale. La bathymétrie initiale est prise comme référence pour la prédiction de la bathymétrie finale.

$$BSS = 1 - (|z_{bc} - z_{bm}| - \Delta z_{bm})^2 / (z_{b0} - \Delta z_{bm})^2$$
(4-80)

Où  $z_{bm}$  est la bathymétrie mesuré ;  $z_{bc}$  est la bathymétrie calculé,  $z_{b0}$  est la bathymétrie initiale ;  $\Delta z_{bc}$  est l'erreur de la bathymétrie mesurée ( $\Delta z_{bc} = 0,1$  mètre s'applique aux conditions sur le terrain).

Le score d'habileté de Brier est un pour une habileté parfaite. De l'autre côté, un BSS de 0 signifie aucune habileté ; c'est le cas si la bathymétrie modelée et initiale sont les mêmes. Si le modèle est plus loin de la mesure, le score d'habileté est négatif (BSS <0).



Figure 4-3 : Classes de qualification du modèle (van Rijn et al., 2003).

BSS est très sensible si la différence entre les élévations initiales et mesurées est faible (Kobayashi et al., 2008). Les classes de qualification sont représentées dans la figure 4-3.

# 4.6. Modélisation de propagation de la houle

L'information sur le cycle de houle est essentielle lors de la détermination de l'évolution du littoral. Les mesures sur le terrain de la houle ne peuvent pas couvrir toutes les conditions météorologiques possibles. Afin d'obtenir les informations manquantes un modèle de vague numérique sera installé, calibré et vérifié, à l'aide du modèle MIKE, des données disponibles et des données des mesures sur le terrain.

#### 4.6.1. Domaine

Le site d'étude est de Toulon à Cavalaire, avec le maillage régional indiqué dans la figure 4-4A. Le maillage de Toulon à Cavalaire est de 40 kilomètres en direction Ouest-Est et de 15 kilomètres en direction Nord-Sud, couvrant une superficie d'environ 600 kilomètres carrés. La taille moyenne du maillage de chaque cellule de la grille est de 200 mètres.

La fondation géométrique du modèle de vague est un MNT sur la base des données bathymétriques. Par conséquent, un maillage en triangles a été créé pour se rapprocher de la bathymétrie du tombolo en utilisant de 1 099 à 31 361 nœuds et de 1 811 à 60 988 triangles, respectivement. Le modèle numérique calcule la solution numérique pour chaque nœud. Dans la zone de mise au point, où des mesures de protection contre l'érosion seront étudiées dans le chapitre 6, la résolution du modèle doit être suffisamment élevée pour simuler les effets des mesures de protection. Pour atteindre la résolution désirée du modèle sur le site d'étude, le maillage a été affiné à la côte du tombolo. La figure 4-4B montre une partie du maillage régional raffiné à la côte du tombolo, où les triangles sont nettement plus petits qu'au large.



Figure 4-4 : Domaine de calcul et la bathymétrie à l'échelle régionale (A) et parties du MNT sur la côte du tombolo (B) (Lacroix et al., 2015a).

La limite Ouest s'étend perpendiculaire à la côte en direction de Nord au Sud. Puis, la limite Sud-Ouest s'étend latéralement en direction du Sud-Est sur une longueur de 25 kilomètres. Puis, la limite Sud-Est du modèle continue vers le Nord-Est. La zone de modélisation est fermée par la limite Est, qui s'étend perpendiculaire à la côte du Sud vers le Nord.

En raison de la taille de la zone de modélisation, de petites variations dans les conditions aux limites n'ont pas d'influence importante sur la zone d'intérêt. Les résultats du calcul de propagation de la houle selon MIKE21 sur le maillage régional seront pris comme condition limite pour le modèle couplé (section 4.6.7.6). Le pas de temps choisi est de 3 600 secondes.

# 4.6.2. Conditions aux limites

Pour contrôler le modèle numérique de la houle, des informations de houle aux limites sont nécessaires. Les bouées disponibles 08301 et 08302 sont situées seulement à Porquerolles (Chapitre 2. p. 64).

En raison de la disponibilité des données et la taille de la zone d'enquête, certaines simplifications ont été nécessaires : les petites rivières ont été ignorées. Les houles varient dans le temps et sont constantes dans l'espace sur le long de la limite Ouest et de la limite est. Elles sont linéaires dans le temps et l'espace sur le long de la limite Sud-Ouest et de la limite Sud-Est.

#### 4.6.2.1. Scénario annuel

A partir du tableau 3-10, nous déterminons d'abord la hauteur de la houle morphologique représentative (H<sub>mor</sub>) correspondant à la valeur maximale de l'IM de chaque direction (Sud-Ouest et Ouest). Puis, nous choisissons la valeur de la direction moyenne (MWD) et de la période de pic  $(T_p)$  de la houle correspondant à chaque direction (Sud-Ouest et Ouest) en nous basant sur le tableau 3-12, p. 136. Par exemple, à Porquerolles (08301), selon la direction Ouest, l'impact morphologique maximal atteint 22,54. A partir de cette valeur, nous obtenons la valeur de 1,84 mètres pour H<sub>mor</sub> dans le tableau 3-12. Ensuite, la direction moyenne et la période de pic de la houle sont de 265 degrés Nord et 5,95 secondes, respectivement, selon la direction Ouest. Ensuite, nous interpolons la condition aux limites méridionales du point MEDIT-2610 à Porquerolles à partir de leurs paramètres de la houle. L'interpolation des paramètres de la houle entre Porquerolles et le point MEDIT-2185 nous permet de déterminer la condition aux limites entre ces deux points. Enfin, pour la limite occidentale, les paramètres de la houle au point MEDIT-2610 ont été utilisés comme conditions aux limites. Les paramètres de la houle au point MEDIT-2185 ont été utilisés comme conditions aux limites orientales. Les résultats sont présentés dans le tableau 4-4.

Limite		Daramàtra	Sud-Ouest	Ouest
		Falallette	N200-240°	N240-300°
		Hmor (m)	1,71	1,71
	<b>MEDIT-2610</b>	MWD (°)	225	267
		Tp (sec)	3,98	4,56
	08301 (Porquerolles)	Hmor (m)	1,73	1,84
Méridionale		MWD (°)	226	265
		Tp (sec)	5,26	5,95
	MEDIT-2185	Hmor (m)	1,62	1,66
		MWD (°)	224	268
		Tp (sec)	3,61	3,97
Occidentale		Hmor (m)	1,71	1,71
		MWD (°)	225	267

Tableau 4-4 : Configuration pour le scénario annuel.

Limito	Danamàtra	Sud-Ouest	Ouest
Limite	Parametre		N240-300°
	Tp (sec)	3,98	4,56
	Hmor (m)	1,62	1,66
Orientale	MWD (°)	224	268
	Tp (sec)	3,61	3,97

### 4.6.2.2. Scénario estival

De la même façon, lorsque nous utilisons les tableaux 3-12 et 3-13, p. 136, nous pouvons déterminer les conditions aux limites du scénario estival dans le tableau 4-5.

**Sud-Ouest** Ouest Limite Paramètre N200-240° N240-300° Hmor (m) 0,90 0,73 **MEDIT-2610** MWD (°) 228 265 4,27 Tp (sec) 3,40 0,92 Hmor (m) 0,79 08301 Méridionale MWD (°) 230 264 (Porquerolles) 4,86 5,58 Tp (sec) 0,73 Hmor (m) 0,76 **MEDIT-2185** MWD (°) 225 266 Tp (sec) 3,19 3,74 0,90 Hmor (m) 0,73 **Occidentale** MWD (°) 228 265 Tp (sec) 3,40 4,27 0,73 Hmor (m) 0,76 Orientale MWD (°) 225 266 3,19 3,74 Tp (sec)

Tableau 4-5 : Configuration pour le scénario estival.

# 4.6.2.3. Scénario hivernal

Afin de définir les conditions aux limites du scénario hivernal dans le tableau 4-6, nous utilisons les tableaux 3-12 et 3-14, p. 136 de la même manière.

Limite		Danamàtra	Sud-Ouest	Ouest
		Parametre	N200-240°	N240-300°
		Hmor (m)	1,73	1,77
	MEDIT-2610	MWD (°)	223	268
		Tp (sec)	4,60	4,83
Méridionale	08301 (Porquerolles)	Hmor (m)	1,75	1,90
		MWD (°)	224	266
		Tp (sec)	5,87	6,45
	<b>MEDIT-2185</b>	Hmor (m)	1,63	1,73

Tableau 4-6 : Configuration pour le scénario hivernal.

Limito		Danamàtra	Sud-Ouest	Ouest
Limite		Parametre	N200-240°	N240-300°
		MWD (°)	225	269
		Tp (sec)	4,18	4,13
	-	Hmor (m)	1,73	1,77
Occidentale		MWD (°)	223	268
		Tp (sec)	4,60	4,83
		Hmor (m)	1,63	1,73
Orientale		MWD (°)	225	269
		Tp (sec)	4,18	4,13

#### 4.6.2.4. Scénario des coups de mer

Nous travaillons sur 2 régimes de coup de mer : régime d'Ouest et régime de Sud-Ouest (Figure 4-5). La houle au large est assez forte, supérieure à 4 mètres avec une période d'environ 7 secondes.



Figure 4-5 : Roses des houles pendant le coup de mer d'Ouest du 11 Novembre 2007 (A) et le coup de mer de Sud-Ouest du 30 Novembre 2008 (B).

# 4.6.2.5. Tempêtes annuelles

Deux tempêtes d'équinoxe de printemps de même direction Ouest en Mars 2007 et 2008 sont modélisées (Figure 4-6). La hauteur de la houle au large est de 4,5 mètres. La période de pic atteint 8 secondes.



Figure 4-6 : Roses des houles pendant la tempête d'équinoxe de printemps du 19 Mars 2007 (A) et du 21 Mars 2008 (B).

#### 4.6.2.6. Tempêtes décennales

La hauteur de la houle au large est près de 6,5 mètres (Figure 4-7). Sa période de pic varie de 9 à 10 secondes. Les niveaux marins moyens sont de +1,45 mètres NGF. La vitesse du vent est de 12,65 mètres par seconde (Tableau 4-2, p. 185).



Figure 4-7 : Roses des houles pendant la tempête d'Ouest du 13 Février 2007 (A) et la tempête de Sud-Ouest du 30 Octobre 2008 (B).

#### 4.6.2.7. Tempête maximale observée

La forte houle provient d'Ouest à Sud-Ouest avec une hauteur de la houle au large de plus de 6,8 mètres (Figure 4-8). La période de pic peut atteindre de 9,8 à 11 secondes. Les niveaux marins moyens sont de +1,5 mètres NGF. La vitesse du vent est de 17,71 mètres par seconde (Tableau 4-2).



Figure 4-8 : Rose des houles pendant la tempête d'Ouest maximale observée.

#### 4.6.2.8. Tempêtes trentennales

Les houles provenant d'Ouest (270 degrés Nord) et de Sud-Ouest (224 degrés Nord) sont modélisées. La hauteur de la houle au large de 7 mètres est spécifiée (Tableau 4-2). La période de pic de 10,5 secondes est utilisée. Les niveaux marins moyens de +1,5 mètres NGF sont définis. Une vitesse de 17,71 mètres du vent est estimée.

#### 4.6.2.9. Tempêtes cinquantennales

Les conditions limites sont prises à partir des données de houle maximale observée le 24 Janvier 2007 avec certains changements. La hauteur et la période de la houle au large sont augmentées jusqu'à 7,18 mètres et 11 secondes, respectivement. Les houles d'Ouest et de Sud-Ouest sont testées. La vitesse du vent est de 31,87 mètres par seconde. Les niveaux marins moyens sont de +1,65 mètres NGF (Tableau 4-2).

#### 4.6.2.10. Tempêtes centennales

La hauteur et la période de la houle au large sont jusqu'à 7,5 mètres et 12 secondes, respectivement. Les régimes d'Ouest et de Sud-Ouest sont évalués. La vitesse du vent est la plus forte. Sa vitesse atteint 34,21 mètres par seconde. Les niveaux marins moyens sont de +2 mètres NGF (Tableau 4-2).

# 4.6.3. Configuration du modèle SW

Afin d'établir un fichier de simulation, il nous faut d'abord déterminer des paramètres d'entrée décrits dans le tableau D-24, p. - 41 -. Puis, la deuxième colonne présente des valeurs des paramètres d'entrée par défaut dans MIKE21. Ensuite, dans la troisième colonne, nous choisissons les paramètres d'entrée. Enfin, nous faisons des remarques pour chaque paramètre d'entrée. Les configurations sont présentées dans le tableau D-24.

# 4.6.4. Sensibilité au maillage régional

Les maillages sont d'abord générés avec les différentes résolutions de grossière à beaucoup plus fine. Les effets de la résolution du maillage sur les indices d'efficacité statistiques du modèle ont ensuite été évalués aux deux stations : à la côte et au large. Au large, ils ne sont pas significatifs. En effet, les indices d'efficacité statistiques sont constants en cas de nombre des nœuds du maillage supérieurs à 2 126 (Tableau 4-7). Leur variation peut être estimée à environ 1% du RMSE et du RMAE, 0% du R<sup>2</sup>, et 3% du Nash (Tableau 4-7). Cependant, à la côte, ils peuvent provoquer des variations maximales de 18% du RMSE, de 11% du RMAE, de 1% du R<sup>2</sup>, et de 4% du Nash (Tableau 4-7). Une trop faible résolution ainsi qu'une trop haute résolution ne donne pas les bons indices d'efficacité statistiques (Tableau 4-7). De plus, l'utilisation d'un maillage très haute résolution n'augmente que le temps de calcul. Les maillages finaux sont ensuite choisis correspondants d'une part aux valeurs maximales du coefficient de détermination et du Nash-Sutcliffe, d'autre part aux valeurs minimales du RMSE et RMAE. Alors, les maillages choisis peuvent être d'une part le maillage 3 avec 5 098 nœuds et 9 493 triangles, d'autre part le maillage 6 avec 8 057 nœuds et 15 247 triangles (Tableau 4-7). Nous choisissons enfin le maillage 6 (plus fin que le maillage 3) afin d'améliorer la précision de nos modèles.

Station			Almana	rre			MEDIT-	2506			
ID	Nœuds	Eléments	RMSE	RMAE	R <sup>2</sup>	NASH	RMSE	RMAE	R <sup>2</sup>	NASH	
0	1 099	1 811	0,13	0,3	0,91	0,83	0,89	0,86	0,43	0,29	
1	2 126	3 754	0,12	0,27	0,92	0,85					
2	4 001	7 362	0,12	0,27	0,92	0,86					
3	5 098	9 493	0,11	0,27	0,92	0,86					
4	6 032	11 298	0,12	0,27	0,92	0,86					
5	8 006	15 016	0,12	0,28	0,91	0,84	0.00	0.07	0.42	0.2	
6	8 0 5 7	15 247	0,11	0,27	0,92	0,86	0,00	0,07	0,45	0,5	
7	15 364	29 448	0,12	0,28	0,91	0,85					
8	19 689	37 972	0,13	0,29	0,91	0,83					
9	23 362	45 192	0.12	0.2	0.01	0.02					
10	31 361	60 988	0,13	0,5	0,91	0,03					
Variation	maximale	e (%)	18	11	1	4	1	1	0	3	

Tableau 4-7 : Paramètres statistiques de la qualité des modèles en comparant les hauteurs des houles mesurées et simulées à l'Almanarre et au point MEDIT-2506.

La comparaison entre les hauteurs significatives des houles mesurées et simulées est considérée comme très bonne à l'Almanarre en Novembre 2000 (Figure 4-9). Les courbes simulées sont presque identiques en utilisant les maillages 3 et 6 (Figure 4-9).



Figure 4-9 : Comparaison entre les hauteurs significatives des houles mesurées et simulées à l'Almanarre en Novembre 2000. La courbe Hs(0) se compose des hauteurs significatives mesurées. Les courbes Hs(3) et Hs(6) se composent des hauteurs significatives simulées en utilisant les maillages 3 et 6, respectivement.

# 4.6.5. Calibration

Les données de calibration du modèle SW sont d'abord collectées à partir des mesures des houles à l'Almanarre en novembre 2000. Le modèle a été calibré avec ces données.

La procédure de calibration est ensuite exposée. Le coefficient de dissipation des vagues du moutonnement doit être maintenu à la valeur par défaut pendant le processus de calage car l'effet de cette variable sera négligeable. Nous choisissons le déferlement et le frottement du fond comme paramètres de calibration. Le déferlement est spécifié en utilisant un gamma ( $\gamma$ ) constant. Le frottement du fond marin est spécifié en utilisant la rugosité de Nikuradse ( $k_N$  en mètre).

La figure 4-12 a montré que les résultats du calcul coïncident pleinement avec les résultats des mesures si le gamma est de 0,8 et la rugosité de Nikuradse est de plus de 0,04 mètre. La meilleure estimation des valeurs extrêmes correspond à la rugosité de Nikuradse  $k_n = 0,0656$  mètre (la courbe en bleu dans la figure 4-10). Cette valeur de la rugosité est utilisée dans notre modèle.

Nous déterminons des indices d'efficacité statistiques de la performance des modèles (Paragraphe 4.5). Les résultats sont illustrés sur les figures 4-11 et 4-12.



*Figure 4-10 : Comparaison des hauteurs de la houle calculées (Courbes de Sim1 à Sim5) et mesurés (Courbe Obs) en Novembre 2000.* 



Figure 4-11 : Critères statistiques (RMAE et RMSE) de la qualité des modèles SW en comparant les hauteurs des houles mesurées et simulées à l'Almanarre en Novembre 2000.



R2 ♦ NASH (E)

Figure 4-12 : Critères statistiques ( $R^2$  et NASH) de la qualité des modèles SW en comparant les hauteurs des houles mesurées et simulées à l'Almanarre en Novembre 2000.

# 4.6.6. Validation

Le modèle a été validé avec les données de la houle mesurée à l'Almanarre, au Pradet et à la Capte pour des périodes différentes (Tableau 4-8).

Tableau 4-8 : Présentation de la validation du modèle.

ID	1	2	3	4	5
Station	Almanarre		Pradet		La Capte
Vent	ECMWF	CFSR	OGIMET	OGIMET	OGIMET
Période	Nov-2000	Nov-2000	Oct-1999	Dec-1999	Mar-2009

La comparaison des hauteurs de la houle calculées et mesurées à la station SCAPT 4 de la Capte en Mars 2009 est présentée sur la figure 4-13. Elle est raisonnable.



*Figure 4-13 : Comparaison des hauteurs de la houle calculées et mesurées à la station SCAPT 4 de la Capte en Mars 2009.* 

La figure 4-14 représente une comparaison des hauteurs de la houle simulées et mesurées au Pradet en Octobre 1999.



*Figure 4-14 : Comparaison des hauteurs de la houle calculées et mesurées au Pradet en Octobre 1999.* 

Similairement, nous avons comparé les hauteurs de la houle calculées et mesurées au Pradet en Décembre 1999 sur la figure 4-15.



*Figure 4-15 : Comparaison des hauteurs de la houle calculées et mesurées au Pradet en Décembre 1999.* 

La figure 4-17 montre que le résultat de validation est assez bon pour chaque période. Nous pouvons utiliser les paramètres calibrés pour modéliser des scénarios.



■ RMAE ◆ RMSE Figure 4-16 : Qualité de la performance (RMAE et RMSE) durant la validation des modèles SW (La valeur de l'ID correspond à celle dans le tableau 4-8, p. 197).



Figure 4-17 : Qualité de la performance (R<sup>2</sup> et NASH) durant la validation des modèles SW (La valeur de l'ID correspond à celle dans le tableau 4-8, p. 197).

# 4.6.7. Résultats sur les vagues

Le modèle SW d'une part simule la distribution des hauteurs, des périodes, direction des vagues, d'autre part calcule le tenseur des contraintes de rayonnement dans les scénarios annuel, saisonnier, et extrêmes.

Les effets des variations du niveau marin, du vent, du régime de la houle au large, de la saison, et des événements extrêmes seront d'abord analysés. Les champs des houles dans une année moyenne et à 35 ans seront ensuite exposés.

# 4.6.7.1. Effets de la variation du niveau marin sur le champ des houles

Deux scénarios 1-S et 1-S-0 sont examinés (Tableau 4-9). L'évaluation des influences de la variation du niveau marin sur le champ des houles est réalisée à la station de l'Almanarre. Cette station est assez loin de la frontière ouverte du modèle et assez près de la côte, où l'effet du tenseur de rayonnement devrait être évident. De plus, le tenseur de rayonnement n'est important que dans la zone côtière alors qu'il n'est pas présenté aux stations au large.

Les paramètres de la houle et le tenseur de rayonnement à l'Almanarre sont représentés dans le tableau 4-9. Les résultats montrent que la variation du niveau marin peut augmenter les paramètres des houles (sauf la direction des houles) et du tenseur de rayonnement. L'effet de cette modification sur la direction de la houle est négligeable. La comparaison des scénarios 1-S et 1-S-0 montre un changement de 11% de hauteur significative, de 6% de période de pic et une modification du tenseur de rayonnement de 18% à 22% (Tableau 4-9).

Tableau 4-9 : Influence de la variation du niveau de la mer sur les paramètres de la houle et sur le tenseur de rayonnement à l'Almanarre en cas de houle annuelle de Sud-Ouest au large.

Scénario	Niveau marin	Hs (m)	T <sub>p</sub> (s)	MWD (°)	$S_{xx} (m^3/s^2)$	$S_{xy}(m^{3}/s^{2})$	$S_{yy}$ (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )
1-S	Variation	0,79	3,8	236	0,2859	0,1136	0,1926
1-S-0	Sans variation	0,711	3,6	237	0,2424	0,0934	0,1613
Ecart (%)		11	6	0	18	22	19

# 4.6.7.2. Effets du vent sur le champ des houles

Nous avons testé six scénarios de 1-0-1 à 1-0-6 dans les scénarios annuels (Tableau 4-2). La station de l'Almanarre a aussi été choisie afin d'évaluer les influences des différents vents sur les houles d'Ouest. Le résultat de la houle d'Ouest annuel à l'Almanarre est représenté dans le tableau 4-10 :

Tableau 4-10 : Influence de la direction des vents faibles sur la houle d'Ouest annuelle à l'Almanarre.

	Calme	Vents de NE	Vents d'Est	Vents de SO	Vents d'Ouest	Vents de NO
Scénario	1-0-1	1-0-2	1-0-3	1-0-4	1-0-5	1-0-6
Vitesse (m/s)	0	5,06	6,83	5,57	7,59	4,05
Dir (°)		45	94	228	274	320
H <sub>s</sub> (m)	0,779	0,772	0,772	0,782	0,779	0,778
ΔHs		-1%	0%	1%	0%	0%
T <sub>p</sub> (s)	3,95	3,93	3,92	3,96	4,09	3,94
$\Delta T_{p}$		-1%	0%	1%	3%	-4%
MWD (°)	244	243	243	243	244	244
∆MWD		0%	0%	0%	0%	0%
$S_{xx}(m^3/s^2)$	0,3172	0,3105	0,3105	0,3192	0,3280	0,3155
$\Delta S_{xx}$		-2%	0%	3%	3%	-4%
$S_{xy}(m^3/s^2)$	0,0965	0,0952	0,0952	0,0969	0,0946	0,0959
$\Delta S_{xy}$		-1%	0%	2%	-2%	1%
$S_{yy}(m^3/s^2)$	0,1712	0,1689	0,1690	0,1729	0,1761	0,1705
$\Delta S_{vv}$		-1%	0%	2%	2%	-3%

Vitesse – la vitesse du vent ; Dir – la direction du vent ; Les valeurs positives et négatives de la variation ( $\Delta$ ) indiquent l'augmentation et la diminution de la paramètre de la houle en comparant avec la condition calme (absence de vent), respectivement,

Le tableau 4-10 montre que l'effet des variations de la direction des vents faibles (< 7,59 mètres par seconde) n'est pas vraiment clair sur les paramètres de la houle à l'Almanarre. La variation des directions du vent peut provoquer une modification de - 4% à 3% des paramètres des houles et du tenseur de rayonnement (Tableau 4-10). Le calcul du tenseur de rayonnement a lieu à la profondeur de 4 mètres. Une analyse des résultats montre que le tenseur de rayonnement à proximité de la côte atteint une moyenne de 0,3280 mètres cube par seconde carré perpendiculaire à la côte (S<sub>xx</sub>) et de 0,1761 mètres cube par seconde carré le long de la côte (S<sub>yy</sub>) (Tableau 4-10). Les

contraintes latérales de rayonnement sont relativement plus faibles parce que les vagues se rapprochent de la côte presque perpendiculairement et une valeur moyenne de  $S_{xy}$  est de 0,0969 mètres cube par seconde carré (Tableau 4-10).



Figure 4-18 : Hauteur moyenne (A et B) et période de pic (C et D) des vagues d'Ouest annuelles sous l'action des vents de Nord-Ouest (A et C) et d'Est (B et D).

La hauteur de la houle atteint la valeur maximale (0,782 mètres) correspondant aux vents de Sud-Ouest (5,57 mètres par seconde). Cela confirme que le secteur d'étude est le plus exposé aux houles et aux vents dans la direction Sud-Ouest. Le régime de Sud-Ouest des houles et des vents pourrait entraîner une augmentation importante des paramètres des houles et du tenseur de rayonnement à l'Almanarre (Tableau 4-10).

Le régime d'Est des vents influence directement sur la houle dans la rade d'Hyères. L'amplitude des vagues le long du tombolo oriental augmente significativement. Cependant, son impact sur la houle dans le golfe de Giens est limité. Aucun changement significatif au long de la plage de l'Almanarre n'a été observé dans la figure 4-18.

En revanche, le régime d'Ouest des vents provoque principalement l'agitation dans le golfe de Giens. En effet, ce régime propose un risque significatif d'augmentation des périodes des vagues (Figures 4-19 et 4-20). Pendant la tempête d'Ouest, le vent de même direction joue un rôle significatif dans l'agitation dans ce golfe.



Figure 4-19 : Hauteur moyenne (A et B) et période de pic (C et D) des vagues d'Ouest annuelles sous l'action des vents de Nord-Ouest (A et C) et de Sud-Ouest (B et D)



Figure 4-20 : Hauteur moyenne (A) et la période de pic (B) des vagues d'Ouest annuelles sous l'action des vents d'Ouest.

# 4.6.7.3. Effets du régime des houles au large sur le champ des houles

Nous allons porter notre attention sur les effets des régimes d'Ouest et de Sud-Ouest des houles.

#### a) Régime d'Ouest des houles

Nous travaillons sur le scénario 1-O-5. La houle au large en provenance d'Ouest est principalement transmise à la houle à la côte occidentale dans la direction de 243-244 degrés Nord. La hauteur moyenne de la houle atteint 0,782 mètre avec la période de pic moyenne 3,9-4 secondes (Figure D-19, p. - 37 -).

Le coefficient de transmission des hauteurs de la houle ( $K_{tH}$ ) est de l'ordre de 0,42 (Tableau 4-11). Un coefficient de transmission des périodes de la houle ( $K_{tT}$ ) de 0,67

#### est calculé (Tableau 4-11).

Saánaria	Régime des houles	Houle au large		Houle à la côte			V	V	
Scenario		H <sub>1/3</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	MWD	H <sub>1/3</sub> (m)	$T_p(s)$	MWD	<b>K</b> tH	Λ <sub>tT</sub>
1-0-5	Ouest	1,84	5,95	265	0,779	4	244	0,42	0,67
1-S	Sud-Ouest	1,73	5,26	226	0,79	3,8	236	0,46	0,72
Ecart (%)		6	13	17	1	5	3	10	7
Moyenne								0,44	0,7

Tableau 4-11 : Coefficient de transmission de la houle annuelle à l'Almanarre.

Le tenseur de rayonnement est estimé aux isobathes des 4 mètres sur l'Almanarre. Près du rivage, le tenseur de rayonnement donne un résultat qui atteint un maximum de 0,3280 mètres cube par seconde carré perpendiculaire au trait de côte ( $S_{xx}$ ) et de 0,1761 mètres cube par seconde carré le long de la côte ( $S_{yy}$ ) (Tableau 4-12). Les contraintes tangentielles de rayonnement ( $S_{xy}$ ) sont relativement plus faibles parce que les houles se rapprochent du rivage presque perpendiculairement et une valeur moyenne de  $S_{xy}$  a été trouvée de 0,0946 à 0,1136 mètres cube par seconde carré (Tableau 4-12).

Tableau 4-12 : Composantes du tenseur de rayonnement de la houle annuelle à l'Almanarre en cas de régimes d'Ouest et de Sud-Ouest des houles.

Scénario	Régime des houles	$S_{xx}(m^{3}/s^{2})$	$S_{xy}(m^{3}/s^{2})$	$S_{yy}(m^{3}/s^{2})$
1-0-5	Ouest	0,3280	0,0946	0,1761
1-S	Sud-Ouest	0,2859	0,1136	0,1926
Ecart (%)		15%	20%	9%
Moyenne		0,3070	0,1041	0,1844

#### b) Régime de Sud-Ouest des houles

Dans le scénario 1-S, nous étudions le régime de Sud-Ouest de la houle en supposant que les vents sont de même direction que les houles. Les vents de 5,57 mètres par seconde soufflent de la direction Sud-Ouest (228 degrés Nord).

L'amplitude de la houle à l'Almanarre est plus forte que celle en régime d'Ouest (Figure 4-21). Pour la zone au Nord des côtes, les vagues sont de 236 degrés Nord, la hauteur des vagues maximales atteint 0,79 mètre. La période de pic des vagues est de 3,8 secondes (Figure 4-22).

En régime de Sud-Ouest des houles, les coefficients de transmission des hauteurs et des périodes de la houle sont estimés à 0,46 et 0,72, respectivement (Tableau 4-11). Ils sont plus grands que ceux en régime d'Ouest. Il s'agit d'une augmentation importante des paramètres des houles en comparaison avec ceux en régime d'Ouest.

Un tenseur de rayonnement perpendiculaire à la côte ( $S_{xx}$ ) de 0,2859 mètre cube en moyenne par seconde carré est trouvé à proximité de la côte. Une moyenne de 0,1926 mètres cube par seconde carré de tenseur de rayonnement le long de la côte ( $S_{yy}$ ) est calculée (Tableau 4-12, p. 203). Une valeur moyenne de contrainte



tangentielle de rayonnement est estimée à 0,1136 mètres cube par seconde carré (Tableau 4-12).

Figure 4-21 : Hauteur moyenne des vagues de Sud-Ouest annuelles.



Figure 4-22 : Période de pic des vagues de Sud-Ouest annuelles.

#### 4.6.7.4. Effets saisonniers sur le champ des houles

Nous nous intéressons aux deux directions dominantes de la houle qui influencent directement l'évolution du tombolo occidental.

En hiver (scénarios 3-0 et 3-S), le vent d'Ouest est principalement transmis aux vagues de la ligne de rivage à la plage de l'Almanarre dans la direction de 243 degrés Nord. La hauteur et la période de pic des vagues sont assez grandes dans cette période, les plus grandes hauteurs de vagues et les plus grandes périodes de pointe des vagues, respectivement, allant jusqu'à 0,82 mètre et 4,2 secondes à la plage de l'Almanarre.

La hauteur des vagues de Sud-Ouest est plus grande que celle des vagues d'Ouest (Figure 4-23). A la côte du Nord, la hauteur des vagues de Sud-Ouest peut atteindre

0,95 mètres pour la période de pic d'environ 4,1 secondes dans la direction de 234 degrés Nord. Cependant, la période des vagues de Sud-Ouest est moindre que celle des vagues d'Ouest (Figure 4-23).

La figure 4-23 montre que, le golfe de Giens et la rade d'Hyères sont plus agités dans la direction Sud-Ouest que dans la direction Ouest. Cependant, la tendance d'évolution de la période de pic dans les deux rades est différente pour chaque direction de la houle incidente.



Figure 4-23 : Hauteur moyenne (A et B) et période de pic (C et D) des vagues hivernales en cas de vagues au large d'Ouest (A et C) et de Sud-Ouest (B et D).

Le coefficient de transmission des hauteurs de la houle hivernale est estimé entre 0,43 et 0,54 (Tableau 4-13). Le coefficient de transmission des périodes de la houle hivernale oscille entre 0,65 et 0,70 (Tableau 4-13).

Scénario	Condition	Régime	Houle au large		Houle à la côte				KtH	KtT
		des houles	H <sub>1/3</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	MWD	H <sub>1/3</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	MWD		
2-S	Estival	Sud-Ouest	0,79	4,86	230	0,53	4	235	0,67	0,82
2-0		Ouest	0,92	5,58	264	0,52	4,6	247	0,57	0,82
3-S	Hivernal	Sud-Ouest	1,75	5,87	224	0,95	4,1	234	0,54	0,70
3-0		Ouest	1,90	6,45	266	0,82	4,2	243	0,43	0,65
	Moyenne									

Tableau 4-13 : Coefficient de transmission de la houle saisonnière à l'Almanarre.

Une valeur moyenne de 0,3564 à 0,3696 mètres cube par seconde carré de la composante transversale du tenseur de radiation ( $S_{xx}$ ) est trouvée à l'Almanarre. La composante longitudinale du tenseur de radiation ( $S_{yy}$ ) peut atteindre une valeur moyenne de 0,1910 à 0,2395 mètres cube par seconde carré. La composante tangentielle du tenseur de radiation ( $S_{xy}$ ) de 0,1010 à 0,1381 mètres cube par seconde carré est calculée (Tableau 4-14).

	2	0				
Scénario	Condition	Régime des houles	$S_{xx}(m^{3}/s^{2})$	$S_{xy}(m^3/s^2)$	$S_{yy}(m^{3}/s^{2})$	
2-0	Estival	Ouest	0,1464	0,0392	0,0758	
2-S		Sud-Ouest	0,1231	0,0470	0,0773	
3-0	Hivernal	Ouest	0,3564	0,1010	0,1910	
3-S		Sud-Ouest	0,3696	0,1381	0,2395	

Tableau 4-14 : Composantes du tenseur de rayonnement de la houle saisonnière à l'Almanarre en fonction des régimes d'Ouest et de Sud-Ouest des houles.

En été (scénarios 2-0 et 2-S), le long du tombolo Ouest, les houles sont de la direction de 235 à 247 degrés Nord, avec une hauteur moyenne des vagues de 0,54 à 0,6 mètre (Figure 4-24). L'amplitude des houles d'Ouest est plus forte que celle des houles de Sud-Ouest.

Cependant, la zone au Nord des côtes, la hauteur des houles maximales atteindre 0,53 mètres vers 235 degrés Nord en régime de Sud-Ouest. Les houles sont de la direction de 235 à 247 degrés Nord. La période de pic des houles varie de 3,6 à 4 secondes à la plage de l'Almanarre.

Le coefficient de transmission des hauteurs de la houle estivale varie de 0,57 à 0,67 (Tableau 4-13). Le coefficient de transmission des périodes de la houle estivale est de 0,82 (Tableau 4-13).

La composante normale en x du tenseur de rayonnement ( $S_{xx}$ ) à l'Almanarre atteint une moyenne de 0,1231 à 0,1464 mètres cube par seconde carré. Une valeur moyenne de 0,0758 à 0,0773 mètres cube par seconde carré de la composante normale en y du tenseur de rayonnement ( $S_{yy}$ ) est trouvée à l'Almanarre. La composante latérale du tenseur de rayonnement ( $S_{xy}$ ) est estimée de 0,0392 à 0,0470 mètres cube par seconde carré (Tableau 4-14).



Figure 4-24 : Hauteur moyenne (A et B) et période de pic (C et D) des vagues estivales en cas de vagues au large d'Ouest (A et C) et de Sud-Ouest (B et D).

En conclusion, les amplitudes des vagues estivales sont plus petites que celles des vagues hivernales. La période des vagues d'Ouest est souvent plus grande que celle de Sud-Ouest dans le golfe de Giens. Au tombolo Ouest, la direction des houles est de 235 à 245 degrés Nord. Les vagues de Sud-Ouest accèdent directement au Nord du tombolo car le littoral est ouvert d'Ouest à Sud-Ouest. Donc, le tombolo Ouest est plus touché par des vagues de Sud-Ouest, la hauteur des houles à la côte peut atteindre environ 0,95 mètres en période hivernale.

# 4.6.7.5. Effet des événéments extrêmes sur le champ des houles

Chaque année, le tombolo occidental est touché par la tempête. La simulation de ces processus ainsi que l'impact de la tempête sur le tombolo sont nécessaires pour déterminer les impacts de ce phénomène particulier et les effets sur le tombolo.

Scénario	Condition	Niveau	Houle	Houle au large		Houle à la côte			KtH	K <sub>tT</sub>
		(m NGE)	H <sub>s</sub>	T <sub>p</sub>	MWD	H <sub>s</sub>	T <sub>p</sub>	MWD		
6	Tempête maximale	+15	<b>(m)</b>	<b>(8)</b> 9.8	270	<b>(m)</b>	<b>(5)</b>	244	019	0.63
Ŭ	observée	. 1,0	0,0	5,0	270	1,0	0,2	2.1.1	0,19	0,00
7-0	Coups de mer	+0,9	5,25	7,9	240-270	1,07	5	244	0,20	0,63
7-S		+0,9	4,75	9,2	200-240	1,46	6,3	235	0,31	0,68
8-0	Tempête annuelle	+1,15	5,8	10,9	240-270	1,2	6,1	244	0,21	0,56
8-S		+1,15	5,8	10,9	200-240	1,21	6,2	236	0,21	0,57
9-0	Tempêtes	+1,45	6,48	10	270	1,30	6	244	0,20	0,60
9-S	décennales	+1,45	6,45	9,4	224	1,29	6,02	235	0,20	0,64
10-0	Tempête	+1,5	7	10,5	270	1,7	6,62	244	0,24	0,63
10-S	trentennale	+1,5	7	10,5	224	1,72	6,6	235	0,25	0,63
11-0	Tempête	+1,65	7,18	11	270	1,93	7,26	244	0,27	0,66
11-S	cinquantennale	+1,65	7,18	11	224	1,95	7,2	236	0,27	0,65
12-0	Tempête	+2	7,5	12	270	2,48	8,6	244	0,33	0,72
12-S	centennale	+2	7,5	12	224	2,49	8,5	235	0,33	0,71
	Movenne								0.25	0.64

Tableau 4-15 : Paramètres de la houle et coefficient de transmission des hauteurs et des périodes de la houle en cas d'événements extrême à partir du modèle SW.



Figure 4-25 : Magnitude des hauteurs de houle significatives (A) et courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre (B) pendant la tempête annuelle.

Dans les scénarios extrêmes, la hauteur des vagues est environ 1,2 mètres à la côte dans la tempête annuelle (Figure 4-25). Quand il y a une tempête exceptionnelle accompagnée par une dépression, elle peut atteindre 2,4 mètres (Figure 4-26). La période de la houle oscille de 5 à 8,6 secondes. Les résultats des autres scénarios extrêmes sont représentés dans l'annexe D2.1, p. - 37 -.



*Figure 4-26 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant la tempête cinquantennale.* 

Le coefficient de transmission des hauteurs de la houle  $K_{tH}$  est de 0,19 à 0,33 (0,24 en moyenne, Tableau 4-15, p. 207). Le coefficient de transmission des périodes de la houle  $K_{tT}$  varie de 0,56 à 0,72 (0,64 en moyenne). Nous constatons que ces coefficients sont plus petits que ceux en conditions normales (annuel, hivernal, et estival).

La composante transversale du tenseur de radiation (S<sub>xx</sub>) maximale à l'Almanarre varie de 0.8099 2,8655 mètres cube seconde à par carré. Une composante longitudinale du tenseur des tensions de radiation S<sub>vv</sub> de 0,4497 à 1,7339 mètres cube seconde carré est calculée (Tableau par 4-16). La composante du tenseur des tensions de radiation S<sub>xy</sub> dans le plan xy a été trouvée de 0,2172 à 0,8792 mètres cube par seconde carré (Tableau 4-16).

Scénario	Condition	Régime des houles	S <sub>xx</sub> (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )	S <sub>xy</sub> (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )	S <sub>yy</sub> (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )
6	Tempête maximale observée	Ouest	2,0010	0,5020	1,0100
7-0	Coups de mer	Ouest	0,8099	0,2172	0,4497
7-S		Sud-Ouest	1,2310	0,3140	0,7230
8-0	Tempête annuelle	Ouest	1,0767	0,2861	0,5917
8-S		Sud-Ouest	1,2660	0,3731	0,7573
9-0	Tempêtes décennales	Ouest	1,6016	0,4499	0,8828
9-S		Sud-Ouest	1,8315	0,5763	1,1379
10-0	Tempête trentennale	Ouest	2,0184	0,5764	1,1430
10-S		Sud-Ouest	2,0045	0,6239	1,2230
11-0	Tempête cinquantennale	Ouest	2,4842	0,6717	1,3508
11-S		Sud-Ouest	2,4586	0,7551	1,4984
12-0	Tempête centennale	Ouest	2,8655	0,7798	1,5578

Tableau 4-16 : Composantes du tenseur de radiation maximal de la houle en cas d'événements extrêmes à partir du modèle SW.

Scénario	Condition	Régime des	S <sub>xx</sub>	S <sub>xy</sub>	S <sub>yy</sub>
		houles	$(m^{3}/s^{2})$	$(m^{3}/s^{2})$	$(m^{3}/s^{2})$
12-S		Sud-Ouest	2,8306	0,8792	1,7339

#### 4.6.7.6. Champ des houles dans une année moyenne

Le scénario 4 est fait pour l'année 2008. Il a pour but d'une part d'établir une cartographie des houles, d'autre part de calculer des paramètres de houles à l'Almanarre dans le scénario d'une année moyenne. Le champ des houles d'une année moyenne 2008 est exposé dans la figure 4-27 :



Figure 4-27 : Hauteur moyenne (A) et la période de pic (B) des vagues en cas de scénario d'une année moyenne 2008.



Figure 4-28 : (A) Rose des houles simulées à l'Almanarre en 2008. (B) Rose des houles simulées à l'Almanarre (au Point 2) durant 35 ans de 1979 à 2014. (C) Les points extraits de 5 mètres de profondeur le long du tombolo occidental (du Point 1 au Point 8).

A l'Almannare, les houles sont de 243 degrés Nord, la hauteur des vagues maximales est estimée à 0,85 mètres. La période de pic des vagues de 4 secondes est calculée.

Les roses des houles à l'Almanarre sont dessinées dans la figure 4-28A. Pendant une année moyenne 2008, les événements de houles de secteur d'Ouest dominent à l'Almanarre.

#### 4.6.7.7. Champ des houles dans le scénario 35 ans

Le scénario 5 a pour but de créer une base de données des houles le long du tombolo occidental couvrant entièrement la période de 1979 à 2014. Elle sert à analyser des régimes des houles à la côte à long terme afin de les résumer en des régimes statistiques à court terme dans le chapitre 5 (Section 5.5.2. p. 277).

Les roses des houles sont aussi reproduites le long du tombolo occidental. Elles sont extraites aux 8 points (du Point 1 au Point 8) correspondant aux bornes B04, B08, B13, B16, B18, B23, B33, et B41. Les points extraits sur le rivage par 5 mètres de profondeur sont représentés dans la figure 4-28C.

La figure 4-28B représente une rose des houles à l'Almanarre de 1979 à 2014. A l'Almannare, les houles sont supérieures à 1,25 mètre de hauteur maximale en provenance d'une direction Ouest-Sud-Ouest. La période de pic des vagues de 3,9 secondes est calculée. Dans cette période, les événements de houles de secteur d'Ouest dominent à l'Almanarre.

# 4.7. Modélisation hydrodynamique

La modélisation hydrodynamique couple le courant et la houle. L'interaction entre le courant et la houle est pris en compte à chaque pas de temps. Elle est utilisée comme condition limite pour le modèle d'évolution du littoral. Nous utilisons le même maillage dans le modèle de propagation de la houle.

# 4.7.1. Configuration et conditions aux limites

Les conditions aux limites de houle au large sont celles du modèle de houle (Paragraphe 4.6.2). Les niveaux d'eau sont utilisés comme conditions aux limites. Des informations de niveaux d'eau sur les points aux limites sont nécessaires. La gauge disponible est située seulement au port de Toulon. C'est pourquoi, les niveaux d'eau au point d'extrémité de la limite sont calculés à partir des niveaux de la mer à Toulon de 1999 à 2014 sur la base des relations linéaires dans le paragraphe 3.1.4.1.b.vi, p. 124. Les niveaux d'eau à la limite méridionale de Porquerolles à MEDIT-2185 sont créés par une intersection linéarisée entre deux points d'extrémité. Ils varient dans le temps et linéairement dans l'espace entre Porquerolles et MEDIT-2185. En raison de la convergence du modèle sur la période longue, nous supposons que la limite méridionale de MEDIT-2610 à Porquerolles est la limite « *land zero normal* ». C'est-à dire, la composante de la vitesse perpendiculaire à la limite est nulle. Du fait de la taille du modèle, cette hypothèse a un impact négligeable sur les résultats du modèle dans le secteur d'étude qui sont calibrés et validés dans ce qui suit. Les conditions aux limites occidentales ont été spécifiées en utilisant les niveaux marins du point MEDIT-2610. Les niveaux de la mer du point MEDIT-2185 ont été utilisés comme conditions aux limites orientales.

Pour le module SW, nous prenons les mêmes paramètres d'entrée que dans le modèle de houle (section 4.6.3). Mais, une variation du niveau d'eau à partir du modèle HD est appliquée. Nous configurons les paramètres du module HD, dans le tableau D-25, p. - 44 -.

# 4.7.2. Calibration

Les données disponibles de la calibration seront d'abord présentées. Le processus de calibrage sera ensuite réalisé.

#### 4.7.2.1. Données disponibles pour la calibration

Pour calibrer le modèle hydrodynamique, nous avons les niveaux de la mer au port de Toulon et les vitesses (amplitude et direction) des courants à l'Almanarre, les mesures sont réalisées en Novembre 2000. Les données du niveau marin sont disponibles toutes les quinze minutes. Les données de courant sont disponibles toutes les heures. La comparaison des niveaux marins simulés et observés à Toulon est présentée sur la figure 4-29. Elle montre que les données simulées oscillent plus que les données mesurées. Les différences entre les niveaux marins simulés sont négligeables (Figure 4-29).



Figure 4-29 : Comparaison des niveaux marins simulés (courbes Sim1-4) et observés (courbe Obs) à Toulon pendant la période du 05 au 06 Novembre 2000.

#### 4.7.2.2. Processus de calibrage

Au cours de la calibration, deux facteurs ont été pris en compte. Ils sont la viscosité et la rugosité du fond (nombre de Manning). La constante de Smagorinsky varie de 0,24 à 0,9 (DHI, 2014g). Le nombre de Manning est de 24 à 35 (mètre un tiers par



seconde). La meilleure estimation correspond à la constante de Smagorinsky 0,9 et au nombre de Manning 24 (Figure 4-30). Ils sont utilisés dans notre modèle.

*Figure 4-30 : Qualité de la performance durant la calibration des modèles HD : (A) RMAE et RMSE. (B) R<sup>2</sup> et NASH.* 

# 4.7.3. Validation

Pour valider le modèle hydrodynamique, nous avons les données suivantes (paragraphes 2.4.1.2 et 2.4.1.4) :

- les niveaux de la mer au port de Toulon sont disponibles toutes les 15 minutes ;
- les vitesses (amplitude et direction) du courant à l'Almanarre sont disponibles toutes les heures ;
- les niveaux de la mer et l'amplitude du courant dans le chenal de navigation à partir des données ADCP ;
- les roses des courants dans la rade de Toulon. Nous n'avons pas encore des données des vitesses toutes les heures. C'est pourquoi, nous ne pouvons pas calculer des coefficients de la qualité de la performance dans ce cas. Les roses des courants modélisés auront donc été comparées avec les roses des courants mesurés.

ID	Station	Vent	Période	Type des données	Méthode de validation	
1		ECMWF	5/11-6	L'amplitude et la		
2	Almanarre	CFSR	Novembre 2000	direction du courant		
3		ECMWF	5/11-6			
4	Toulon	CFSR	Novembre 2000	Les niveaux de la	Calcul des coefficients de la	
5		OCIMET	12/1999	mer	qualité de la performance	
6		OUMET	03/2009			
7		ECMWF	6/2009 -	Les niveaux de la		
8	Chenal de navigation	CFSR	10/2009 9/2009 - 4/2010	mer L'amplitude du courant		
9	Can Cánat	ECMWF	7/2011-		Comparaison	
10	cap cepet	CFSR	9/2011	Les roses des	entre des roses	
11		ECMWF	01/2012-	courants	des courants	
12	Cap Carqueiranne	CFSR	6/2012	courants	modélisés et mesurés	

Tableau 4-17 : Validation du modèle

Les coefficients de la qualité de la performance sont calculés et montré sur les figures 4-31 et 4-32, p. 214. Les indices d'efficacité statistiques du modèle validé sont raisonnables. En effet, une valeur de 0,08 à 0,5 de RMAE est estimée. RMSE varie entre 0,05 et 0,21 (Figure 4-31). Le coefficient de détermination oscille de 0,6 à 0,9.Une gamme de NASH de 0,35 à 0,9.



Figure 4-31 : Indices d'efficacité statistiques des modèles HD durant le processus de validation tels que RMAE et RMSE (La valeur de l'ID correspond à celle dans le tableau 4-17, p. 213).



Figure 4-32 : Indices d'efficacité statistiques des modèles HD durant le processus de validation tels que R<sup>2</sup> et NASH (La valeur de l'ID correspond à celle dans le tableau 4-17, p. 213).

Une comparaison entre des roses des courants modélisées et mesurées est effectuée pour la rade de Toulon. La distribution de ces roses semble être presque identique. Le processus de validation sur ces roses montre que les résultats du modèle sont compatibles avec les résultats observés (Figures D-17 et D-18, p. - 36 -).

Les comparaisons entre le modèle et les mesures au-dessus confirment la capacité du modèle à reproduire l'hydrodynamique générale dans la zone d'étude. Nous pouvons calculer l'évolution du littoral et évaluer les causes de l'érosion à partir des résultats du modèle.

# 4.7.4. Résultats sur le régime hydrodynamique

Les courants et les niveaux marins seront exposés sur les scénarios annuel, saisonnier, et extrêmes.

#### 4.7.4.1. Effets du vent sur le régime hydrodynamique

Les variations du niveau et du courant sont estimées en cas d'une houle d'Ouest sous l'action des différents vents. La variation de direction des vents influence le niveau marin d'une part et d'autre part le tombolo. En effet, il existe une surélévation à la branche occidentale dans le cas de vent d'Ouest. Dans ce contexte, le niveau marin à la branche orientale est plus bas en rade d'Hyères (Figures 4-33 et D-30, p. - 40 - ). Cela provoque habituellement un recul du trait de côte de l'Almanarre. En revanche, si le vent souffle en direction opposée, elle conduit à une augmentation du niveau marin à la branche orientale (Figure 4-33).

L'amplitude des courants est faible le long du tombolo avec seulement quelques centimètres par seconde (Figures 4-34 et D-31, p. - 41 -). La vitesse du courant dans le cas de vent d'Ouest est plus grande que celle par vent d'Est. Cependant, cette augmentation n'est pas significative au tombolo Ouest dans le scénario annuel.

En général, à la branche occidentale, les vitesses des courants dans la zone du Nord sont plus grandes que celles dans la zone du Sud.



Figure 4-33 : Niveau marin maximal (A et B) et moyen (C et D) dans le cas de la houle d'Ouest sous l'action des vents d'Ouest (A et C) et d'Est (B et D).



Figure 4-34 : Magnitude des courants maximaux (A et B) et moyens (C et D) annuels dans le cas de la houle d'Ouest sous l'action des vents d'Ouest (A et C) et d'Est (B et D).

Le régime des vents a une forte influence sur la direction des courants dans tout le domaine. En effet, dans la zone centrale du tombolo occidental, la tendance des courants est vers le large dans le cas de vent d'Ouest (Figures 4-35 et D-32, p. - 41 -).

Ce sont des courants d'arrachement qui peuvent provoquer un risque d'érosion du littoral pendant la tempête. Mais, si le vent souffle en direction de l'Est, les courants sont vers la côte (Figure 4-35). Nous remarquons que le vent d'Ouest associé à la houle de même direction est le plus dangereux pour le littoral occidental.



Figure 4-35 : Direction des courants moyens annuels dans le cas de la houle d'Ouest sous l'action des vents d'Ouest (A) et d'Est (B).

# 4.7.4.2. Effets du régime des houles au large sur le régime hydrodynamique

D'une part, les effets du régime de vents et de vagues ainsi que du tenseur de rayonnement sur le régime hydrodynamique seront présentés. D'autre part, ceux des niveaux marins sur les vagues seront évalués.

Dans ce qui suit, nous calculons le courant et le niveau marin dans le cas de deux directions dominantes de la houle associées aux vents en même direction.

#### a) Régime d'Ouest des houles

Une faible amplitude moyenne des courants du tombolo de quelques centimètres par seconde est estimée. Les niveaux marins du tombolo occidental sont plus hauts que ceux du tombolo oriental. La surcote peut atteindre 0,5 mètres à la branche occidentale. Les houles d'Est encouragent de forts courants sagittaux au centre du tombolo.

#### b) Régime de Sud-Ouest des houles

Il y a une surélévation d'environ 0,44 mètres dans la zone Nord de la branche occidentale en cas de vent d'Ouest. A la branche orientale, le niveau marin est le plus bas en rade d'Hyères (Figures 4-36 et D-30, p. - 40 -). Comme le cas de houle d'Ouest, l'amplitude des courants est aussi faible autour du tombolo avec seulement quelques centimètres par seconde (ne dépasse pas 10 centimètres par seconde) (Figure 4-37).


Figure 4-36 : Niveau marin maximal (A) et moyen (B) en cas de houle de Sud-Ouest.



Figure 4-37 : Magnitude des courants maximaux (A) et moyens (B) annuels en cas de houle de Sud-Ouest.



Figure 4-38 : Direction des courants annuels en cas de houle de Sud-Ouest.

Ce régime provoque un système de courant d'arrachement : l'un au centre et l'autre plus fort au Nord du tombolo (Figure 4-38). Nous pensons que l'effet combiné des houles et des vents de Sud-Ouest pousse ce courant du centre au Nord du tombolo Ouest. Dans la condition tempétueuse, ce courant devient plus fort et peut provoquer de graves érosions du littoral.

### 4.7.4.3. Effets saisonniers sur le régime hydrodynamique

L'analyse se concentre sur 2 régimes de houle d'Ouest et de Sud-Ouest pour chaque scénario (hivernal et estival).

En hiver, la variabilité spatiale des niveaux marins est illustrée sur la figure 4-39. Les grandes différences spatiales des niveaux ont été observées dans le littoral oriental du tombolo. Les niveaux correspondant aux vagues de Sud-Ouest (0,433 mètre) sont



plus élevés que ceux dans le cas de vague d'Ouest (0,429 mètre).

Figure 4-39 : Niveaux marins saisonniers en cas de vagues d'Ouest hivernale (A), vagues d'Ouest estivale (B), vagues de Sud-Ouest hivernale (C) et vagues de Sud-Ouest estivale (D).



Figure 4-40 : Niveau et vitesse des courants saisonniers en cas de vagues d'Ouest hivernale (A), vagues d'Ouest estivale (B), vagues de Sud-Ouest hivernale (C) et vagues de Sud-Ouest estivale (D).

Nous enregistrons une autre évolution notable des niveaux à la zone du Sud de la branche occidentale. Une surélévation de plus de 0,44 mètres apparaît ici dans le cas de vague d'Ouest. Cependant, cette valeur baisse en dessous de 0,438 mètres qui

correspond à la vague de Sud-Ouest (Figure 4-39).

Sur le littoral, la variation du niveau marin est très forte en hiver. C'est en contraste avec la variation du niveau faible en été (Figure 4-40).



Figure 4-41 : Magnitude des courants saisonniers en cas de vagues d'Ouest hivernale (A), vagues d'Ouest estivale (B), vagues de Sud-Ouest hivernale (C) et vagues de Sud-Ouest estivale (D).

Le champ des courants est représenté dans la figure 4-41. Ces figures montrent que, dans le littoral occidental, la vitesse des courants au Nord est plus grande que celle au Sud. Les vitesses des courants sont trop faibles et facilitent le dépôt de sédiments au Sud du littoral occidental.

Dans le golfe de Giens, la vitesse moyenne peut atteindre 0,2 mètre par seconde (sans prendre en compte les valeurs à la limite Ouest). Le milieu bien fermé (port de Toulon) ou peu fermé (zone Sud du tombolo Ouest) correspond aux vitesses minimales (moins de 0,025 mètre par seconde). Les vitesses des courants de dérive le long du tombolo Ouest variaient de moins de 0,025 à 0,075 mètre par seconde (Figure 3-35). La vitesse du courant est la plus grande environ 0,075 mètre par seconde au Nord du tombolo Ouest.

Sur le littoral occidental, le courant est principalement dans la direction du Nord au Sud, comme la direction du courant général. De l'autre côté, au Nord du littoral oriental, les courants sont opposés aux courants de dérive dominants à cause du régime d'Ouest des vents. Sous l'influence des houles et des vents de Sud-Ouest, la tendance des courants de retour se déplace vers le Nord.



Figure 4-42 : Direction des courants en cas de vagues d'Ouest hivernal (A), vagues d'Ouest estival (B), vagues de Sud-Ouest hivernal (C) et vagues de Sud-Ouest estival (D).

En été, dans le golfe de Giens, la distribution des niveaux et des vitesses est tout à fait semblable à celle de l'hiver. La magnitude des courants est en général moins forte que celle hivernale.

Nous enregistrons une différence nette entre les directions des courants de dérive le long du tombolo Ouest pour chaque direction des vagues (Figure 4-42). En effet, dans le cas de vagues de Sud-Ouest, le courant de dérive a tendance à se déplacer du Sud au Nord, il est à l'opposé en cas de vague d'Ouest.

En général, la vitesse des courants en cas de vague d'Ouest est plus grande qu'en cas de vague de Sud-Ouest. Les vitesses de courant diminuent du Nord au Sud du tombolo Ouest.

## 4.7.4.4. Effet des événéments extrêmes sur le régime hydrodynamique

Dans les scénarios extrêmes, les vitesses de courant peuvent atteindre entre 0,12 et 0,27 mètre par seconde à proximité de la côte. La vitesse des courants est en général de plus de 0,12 mètre par seconde de direction du Sud-Est (vers la côte de la plage de l'Almanarre). La vitesse des courants est d'environ 0,15 mètre par seconde à la côte dans la tempête annuelle (Figure 4-43). Pendant la tempête exceptionnelle accompagnée par une dépression, elle peut atteindre 0,27 mètre par seconde de direction du Sud-Est (Tableau 4-18). Les résultats des autres scénarios extrêmes sont représentés dans le paragraphe D2, p. - 36 -.

*Tableau 4-18 : Niveaux marins et courants maximaux dans la zone du Nord du tombolo à partir du modèle HD.* 

Scénario	6	7-0	7-S	8-0	8-S	9-0	9-S	10-0	10-S	11-0	11-S	12-0	12-S
WL	+1,5	+0,9	+0,9	+1,15	+1,15	+1,45	+1,45	+1,5	+1,5	+1,65	+1,65	2	2
V	0,17	0,19	0,19	0,14	0,15	0,15	0,12	0,18	0,19	0,25	0,26	0,27	0,27
Dir	338	170	170	170	170	170	170	340	340	170	170	170	170
1471 1			L. NCE	N 17 1-			+ ( ) +			2 1. dt.			+ (0)

WL – le niveau marin (mètre NGF) ; V – la vitesse du courant (mètre par seconde) ; Dir – la direction du courant (°).



Figure 4-43 : Courants et niveaux de la mer pendant la tempête annuelle.

## 4.8. Modèle couplé MIKE21/3 FM

D'abord, le domaine d'étude sera exposé et concentré sur les caractéristiques du maillage ainsi que des cellules hydrosédimentaires.

### **4.8.1.** Domaine

Le site d'étude est le littoral occidental du tombolo. Basé sur l'évolution de la bathymétrie, le tombolo Ouest est divisé en 4 cellules hydrosédimentaires : Nord (A), Nord-central (B), central (C), et Sud (D) (Figure 4-44). La zone Nord correspond à la limite Nord et la borne B03 ; la zone Nord correspond aux bornes B03 et B16 ; la zone centrale correspond aux bornes B16 et B22 ; la zone Sud se situe entre borne B22 et B46. La zone B est forte menacée par l'érosion côtière.

Le maillage sélectionné est environ 1 kilomètre de la côte au large, 4 kilomètres qui s'étendent le long du tombolo, couvrant quatre zones focales (A, B, C et D) avec une superficie de 4 kilomètres carrés (Figure 4-44).

Les maillages des triangles ont été créés pour se rapprocher de la bathymétrie du tombolo en utilisant de 4 026 à 62 988 triangles, de 2 105 à 31 860 nœuds (Tableau 4-19). La résolution spatiale (taille des mailles) est inférieure à 219 mètres (au large), et supérieure à 13 mètres (la zone de surf, à 400 mètres de la plage de l'Almanarre). La superficie de l'élément varie de 127 à 4 500 mètres carrés (Lacroix et al., 2015a). Le modèle numérique calcule les solutions mathématiques pour chaque nœud.



Figure 4-44 : Cellules hydrosédimentaires (A) et maillage calculé (B) pour la zone d'étude (Lacroix et al., 2015a,b).

Dans la zone focale, où des mesures de protection contre l'érosion seront étudiées, la résolution du modèle doit être suffisamment élevée pour simuler les effets de cette mesure. Pour atteindre la résolution désirée du modèle sur le site de l'érosion, le maillage a été affiné à la côte de tombolo où les triangles sont nettement plus petits qu'au large (Figure 4-44).

La limite Sud-Ouest du modèle est dans l'axe Nord-Sud. Les limites de Nord et Sud sont assez près de la côte. En raison de la taille de la zone de modélisation, les conditions aux limites n'ont pas d'influence sur la zone d'intérêt (zone B de B03 à B20).

### 4.8.2. Conditions aux limites

Les résultats du modèle hydrodynamique sont utilisés comme les données d'entrée à la limite Sud-Ouest.

Les conditions aux limites Nord et Sud étaient considérées comme des frontières fermées (*« Closed boundary » -* absence de vague incidente et limite absorbée entièrement) dans le module SW. Les vagues le long de la limite Ouest varient dans le temps et le long de la frontière.

Une condition de glissement complet (aucune composante de la vitesse normale, « *Land zero normal velocity* ») a été appliquée comme condition aux limites sur les limites Nord et Sud dans le module HD. Les niveaux de la mer variant dans le temps et le long de la limite Ouest a été spécifiés.

Pour une approche des vagues et des courants combinées, une condition d'équilibre est toujours spécifiée à toutes les frontières dans le module ST. Deux conditions aux limites sont testées tels que « *zero sediment flux gradient* » et « *zero sediment flux gradient for outflow with no bed level change for inflow* ». Mais, les différences entre les résultats sont négligeables. De plus, la condition de « *zero sediment flux gradient* » semble s'adapter aux plages sableuses (Keen et al., 2003). Alors, elle a été appliquée à toutes les limites. Il s'agit d'une part d'un flux des sédiments sortant du domaine, d'autre part d'un apport infini des sédiments entrant dans le domaine à cette limite.

### 4.8.3. Sensibilité au maillage local

Similaire au processus de la sensibilité au maillage régional, les différentes résolutions du maillage local sont d'abord créées. Les indices d'efficacité statistiques du modèle sont ensuite estimés à l'Almanarre pour chaque résolution du maillage. Les variations maximales des indices d'efficacité statistiques sont estimées de 11% du RMSE, de 9% du RMAE, de 1% du R<sup>2</sup>, et de 1% du NASH (Tableau 4-19). Nous choissisons le maillage 4 avec 6 061 nœuds et 11 836 éléments qui représente des bons indices d'efficacité statistiques (Tableau 4-19).

ID	Nœuds	Eléments	RMSE	RMAE	<b>R</b> <sup>2</sup>	NASH
0	2 105	4 026	0,1	0,23	0,91	0,9
1	2 276	4 365	0,09	0,23	0,91	0,91
2	4 005	7 745	0,09	0,23	0,92	0,91
3	5 025	9 746	0,09	0,23	0,92	0,91
4	6 061	11 836	0,09	0,22	0,92	0,91
5	8 0 5 7	15 747	0,09	0,24	0,91	0,91
6	8 2 3 5	16 104	0,09	0,24	0,91	0,91
7	15 754	30 980	0,09	0,23	0,91	0,91
8	19 795	38 984	0,09	0,23	0,91	0,91
9	23 957	47 344	0,09	0,23	0,91	0,91
10	31 860	62 988	0,09	0,23	0,91	0,91
Variation maximale (%)			11%	9%	1%	1%

Tableau 4-19 : Indices d'efficacité statistiques du modèle en comparant les hauteurs mesurées et prédites des houles à l'Almanarre.

Les hauteurs significatives des houles mesurées et simulées sont comparées à l'Almanarre en Novembre 2000 (Figure 4-45). La qualité des simulations est assez bonne.



Figure 4-45 : Courbes des hauteurs significatives des houles mesurées et simulées à l'Almanarre en Novembre 2000. La courbe Hs(0) représente les hauteurs significatives mesurées. La courbe Hs(4) expose les hauteurs significatives simulées en utilisant le maillage 4.

### 4.8.4. Calibration

Nous choisissons la taille de grain moyen ( $d_{50}$ ), la rugosité (Manning et Nikuradse) comme paramètres de calibration. Nous pouvons utiliser des rugosités constantes (nombre de Manning = 24 et la rugosité de Nikuradse K<sub>n</sub> = 0,0656) qui ont été calibrées dans les sections 4.6.4. p. 194 et 4.7.2. p. 211. Cependant, pour prendre en compte l'influence des posidonies et des roches du fond, il nous faut modéliser les classes de rugosité dans chaque nature du fond marin.



*Figure 4-46 : Différentes zones de rugosité de Manning dans la zone de modélisation avec posidonie (A) et sans posidonie (B) (Lacroix et al., 2015a).* 

La figure 4-46 montre les différentes classes de rugosité dans le domaine de la modélisation. En tenant compte des différentes classes de rugosité, nous avons différencié les zones avec ou sans posidonie, roche ou sable, les plus profondes ou peu profondes. Nous supposons que le fond en roche est comme un fond du sable avec le diamètre médian  $d_{50} = 20$  centimètres. L'absence des posidonies provoque un nombre de Manning plus grand (Figure 4-46) et le coefficient de Nikuradse plus petit (Figure 4-47, p. 225). La rugosité de Manning est inversement proportionnelle à la profondeur et la rugosité de Nikuradse.



Figure 4-47 : Différentes zones de rugosité de Nikuradse dans la zone de modélisation avec posidonie (A) et sans posidonie (B) (Lacroix et al., 2015a).

La taille de grain moyen  $(d_{50})$  dans la zone de modélisation est présentée sur la figure 4-48.

Le nombre de Manning est utilisé comme la rugosité pour le courant dans le modèle HD. Nous calculons le modèle SW avec la rugosité de Nikuradse.

Le modèle a été calibré avec les données de la bathymétrie mesurées à l'Almanarre entre 11/2007 et 11/2008 (Figure 4-49). Le BSS est de 0,62, correspondant à la classe de qualification « bon » dans la figure 4-3.



Figure 4-48 : Différentes zones de taille de grain moyen  $(d_{50})$  dans la zone de modélisation.

### 4.8.5. Validation

Le modèle a été validé avec les données de la bathymétrie mesurées à l'Almanarre, pour trois périodes différentes de Novembre 2001 à Avril 2003. Nous reproduisons les valeurs de BSS dans la figure 4-49.



Figure 4-49 : Valeur du BSS de la calibration et de la validation.

Les valeurs BSS varient entre 0,35 et 0,65, correspondant respectivement à la classe de raisonnable à bon en fonction de la qualification dans la figure 4-3, p. 188. L'accord dans les modèles et les mesures est assez bonne.

Le changement morphologique net est calculé pour la période de modélisation entière de 2007 à 2008. L'évolution nette des modèles (Figure 4-50A) et les

modifications correspondantes mesurées (Figure 4-50B) ont été comparées.

Dans la figure 4-50, les couleurs bleues représentent l'érosion, tandis que les couleurs rouges représentent le dépôt. Le modèle prédit des érosions marines allant de -1,5 à -2 mètres sur le tombolo occidental, avec des valeurs plus élevées (jusqu'à -2 mètres) sur la zone du Nord de la plage de l'Almanarre.



Figure 4-50 : Evolution des bathymétries mesurées par EOL - dans le polygone de B03 à B43 (A) et prédites par MIKE21/3 FM (B).

Dans l'ensemble, la comparaison entre les changements morphologiques mesurés et simulés indique une assez bonne concordance dans les tendances. Par exemple, la zone d'érosion le long des bornes B03 à B30 a été vérifiée par les évolutions du fond dans les mesures d'EOL (2008). Cependant, le taux d'érosion dans le modèle est plus fort que celui d'EOL.

Le modèle morphologique a également réussi à reproduire l'accrétion dans la zone Sud de la plage et l'érosion dans la zone Nord, notamment, dans la zone B. Ainsi, le modèle numérique a été calibré et vérifié à l'aide des données de vent, les données de gauges disponibles et les données de mesures sur le terrain.

### 4.8.6. Résultats

D'abord, les effets des variations du niveau marin sur les houles sont exposés. Puis, nous portons sur les impacts du tenseur de rayonnement sur le régime hydrodynamique. Puis, les impacts du vent, de la houle au large, et des posidonies sur l'hydro-morphodynamique seront examinés. Ensuite, les différents scénarios seront simulés. Enfin, nous évaluerons les régimes hydrodynamique et de morphologie dans deux familles de scénario. Ces résultats ont permis de détecter des différences spatiotemporelles de l'hydro-sédimentologique.

# 4.8.6.1. Effets des variations du niveau marin sur le champ des houles

Deux scénarios 1-0-5 et 1-0-5b sont étudiés (Tableau 4-20). L'estimation des effets de la variation du niveau de la mer sur le champ des houles est effectuée à l'Almanarre, assez loin de la limite du modèle et assez près de la côte.

Les variables de la houle et le tenseur de radiation à l'Almanarre sont montrés dans le tableau 4-20. Le changement du niveau de la mer peut accroître les variables des houles et du tenseur de radiation. Cependant, la variation de la direction de la houle n'est pas nette.

Sous l'action de la variation du niveau de la mer, le changement de la hauteur de la houle à l'Almanarre est calculé de l'ordre de 8%. Une valeur de 2% de la variation de la période de pic de la houle est estimée à l'Almanarre. Le changement du tenseur de rayonnement est de 12%.

Scénario	Niveau marin	Hs (m)	T <sub>p</sub> (s)	MWD (°)	S <sub>xx</sub> (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )	S <sub>xy</sub> (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )	S <sub>yy</sub> (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )
1-0-5	Variation du modèle HD	0,768	4,1	245	0,2956	0,0801	0,1726
1-0-5b	Sans variation	0,709	4,0	245	0,2650	0,0713	0,1536
Ecart (%)		8%	2%	0%	12%	12%	12%

Tableau 4-20 : Variables de la houle et tenseur de radiation à l'Almanarre en comptant la variation du niveau de la mer ou pas.

### 4.8.6.2. Effets de la houle sur le régime hydrodynamique

Dans le tableau 4-21, il faut remarquer que dans le scénario 1-O-5 la vitesse du courant à l'Almanarre est importante (0,142 mètre par seconde) en prenant en compte les houles d'Ouest. Dans le scénario 1-O-5c, le niveau marin à l'Almanarre est important (0,438 mètre) sans tenir compte des houles. Les courants sont toujours vers la direction Sud-Sud-Est à l'Almanarre. Mais, ils sont plus prêts de la direction Sud en cas de présence des houles d'Ouest.

Sous l'action des houles d'Ouest, la variation du niveau marin de 17% est estimée. Les modifications de la vitesse et de la direction du courant sont de l'ordre de 11% et 3%, respectivement.

pus				
Scénario	Régime des houles	Niveau marin (m)	Vitesse du courant (°)	Direction du courant (°)
1-0-5	Ouest	0,373	0,142	161
1-0-5c	Sans houle	0,438	0,128	157
Ecart (%)		17%	11%	3%
Movenne		0,4055	0,135	159

Tableau 4-21 : Niveau marin et courant à l'Almanarre en intégrant la houle d'Ouest ou pas.

# 4.8.6.3. Influence du vent sur l'hydrodynamique et la morphologie

Nous avons testé les modèles avec la variation de la direction du vent en cas de houle de Sud-Ouest annuelle. Le régime de Sud-Ouest provoque un niveau marin et une hauteur de la houle plus hauts que ceux de régime d'Est. Les niveaux maximaux correspondent aux vents de Sud-Ouest (Tableau 4-22). Dans les zones Nord (A et B), les vents de Nord-Ouest et d'Ouest augmentent la vitesse du courant en comparant avec le temps calme et les courants s'écoulent dans la direction moyenne de 124-166 degrés Nord (Tableau 4-22). En revanche, le vent de Sud-Ouest diminue la vitesse du courant en comparant avec le temps calme et la direction moyenne du courant dans la zone B est vers le large (250 degrés Nord) (Tableau 4-22).

		Absonco	Régime d'	Est	Régime	de Sud-Oue	st	
Zone		de vent	Vent d'Est	Vent de NE	Vent de NO	Vent d'Ouest	Vent de SO	Moyenne
Statisti	ques moy	ennes						
Α		0,438	0,437	0,437	0,438	0,438	0,439	0,438
В	WL	0,436	0,435	0,435	0,436	0,437	0,438	0,436
С	(m)	0,436	0,435	0,435	0,436	0,437	0,437	0,436
D		0,436	0,434	0,435	0,436	0,438	0,437	0,436
Α		0,117	0,103	0,125	0,127	0,133	0,095	0,117
В	V	0,057	0,045	0,079	0,076	0,074	0,033	0,061
С	(m/s)	0,036	0,03	0,066	0,058	0,046	0,036	0,045
D		0,028	0,034	0,049	0,038	0,037	0,036	0,037
Α		125	128	124	124	124	137	127
В	DID (9)	167	171	163	164	166	250	180
С	DIR()	185	188	174	176	180	197	183
D		188	189	192	190	190	181	188
Statisti	ques maxi	imales						
Α	TA/T	0,703	0,703	0,703	0,703	0,703	0,704	0,703
В	WL (m)	0,69	0,69	0,69	0,69	0,697	0,692	0,692
С	(m)	0,687	0,686	0,686	0,687	0,701	0,689	0,689

Tableau 4-22 : Influence du vent sur le niveau marin et sur le courant.

Zone		Absonco	Régime d'Est		Régime			
		de vent	Vent d'Est	Vent de NF	Vent de NO	Vent d'Ouest	Vent de	Moyenne
D		0,688	0,686	0,688	0,689	0,705	0,688	0,691
Α		0,246	0,234	0,249	0,253	0,265	0,238	0,248
В	V	0,121	0,102	0,135	0,138	0,149	0,086	0,122
С	(m/s)	0,081	0,077	0,127	0,114	0,097	0,087	0,097
D		0,11	0,102	0,122	0,121	0,119	0,085	0,110
Α		311	358	312	311	322	346	327
В	DID (0)	360	360	359	360	360	360	360
С	DIR()	360	360	360	358	359	360	360
D		360	360	360	360	360	360	360

Les houles plus fortes correspondent aux vents d'Ouest et de Sud-Ouest. L'impact du régime des vents sur la période et la direction de la houle n'est pas significatif (Tableau 4-23).

Tableau 4-23 : Influence du vent sur la houle.

		Absonco	Régime	d'Est	Régime d	e Sud-Ouest	:	
Zone		de vent	Vent d'Est	Vent de NE	Vent de NO	Vent d'Ouest	Vent de SO	Moyenne
Statistic	ques moy	ennes						
Α		0,694	0,695	0,693	0,694	0,702	0,696	0,696
В	H <sub>s</sub> (m)	0,777	0,777	0,776	0,777	0,796	0,78	0,781
С	п <sub>s</sub> (Ш)	0,686	0,686	0,688	0,688	0,711	0,678	0,69
D		0,471	0,468	0,471	0,472	0,5	0,477	0,477
Α		3,9	3,9	3,9	3,9	4	3,9	3,9
В	T <sub>p</sub> (s)	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
С		4,1	4,1	4,1	4,1	4,2	4,1	4,1
D		4	4	4	4	4	3,9	3,98
Α		234	234	234	234	234	233	234
В	MWD	248	248	248	248	248	248	248
С	(°)	258	258	258	258	258	258	258
D		269	269	270	270	268	267	269
Statistic	ques maxi	males						
Α		1,066	1,068	1,065	1,065	1,073	1,071	1,068
В	Ц (m)	1,013	1,013	1,012	1,012	1,025	1,013	1,015
С	n <sub>s</sub> (m)	0,945	0,944	0,951	0,95	0,966	0,93	0,948
D		0,78	0,785	0,788	0,785	0,802	0,779	0,787
Α		7,8	7,8	7,8	7,8	7,9	7,8	7,8
В	т (с)	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
С	1 <sub>p</sub> (S)	7,3	7,3	7,3	7,3	7,4	7,3	7,3
D		7,3	7,3	7,3	7,3	7,4	7,3	7,3
Α		250	250	250	250	249	250	250
В	MWD	259	259	259	259	260	259	259
С	(°)	269	269	269	270	268	269	269
D		298	299	299	297	297	297	298

Les résultats des calculs des vitesses d'évolution du littoral de Giens sont mentionnés dans le tableau 4-24. Les zones Nord (A et B) sont érodées par tous les régimes du vent. La zone Sud D est la seule présentant une érosion faible dans le régime d'Est (Tableau 4-24). L'érosion marine moyenne (V) atteint -275 et -1 098 mètres cube par jour dans les zones A et B, respectivement, par temps calme. L'érosion marine est moins sévère dans la zone A (-167 mètres cube par jour) en cas de vents de Sud-Ouest (Tableau 4-24). Mais, le vent de Sud-Ouest menace d'augmenter l'érosion marine dans la zone B (-1 149 mètres cube par jour), tandis que, les autres directions de vent réduisent le phénomène d'érosion marin en comparant avec le temps calme. La vitesse d'évolution du fond est de -1 millimètre par jour (Tableau 4-24).

Zone		Absonco	Régime	d'Est	Régime	de Sud-Ou	est	
		de vent	Vent	Vent	Vent	Vent	Vent	Moyenne
			d'Est	de NE	de NO	d'Ouest	de SO	
Α		-275	-249	-292	-296	-213	-167	-249
В	V	-1098	-1 082	-1 013	-1 032	-488	-1149	-977
С	(m³/j)	8	2	-110	-72	42	2	-21
D		112	-39	-106	57	101	105	38
Α		0	0	0	0	0	0	0
В	R (mm/j)	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1
С		0	0	0	0	0	0	0
D		0	0	0	0	0	0	0

Tableau 4-24 : Influence du vent sur la morphologie.

Nous comparons les impacts du vent sur l'hydrodynamique sédimentaire avec le temps calme dans la zone B (Tableau 4-25). Le symbole (+) signifie une augmentation par rapport au temps calme. En revanche, le symbole (-) signifie un impact de ralentissement par rapport au temps calme. L'impact est nul dans la cellule vide.

	Régime d'E	st	Régime de Sud-Ouest				
	Vent d'Est	Vent de NE	Vent de NO	Vent d'Ouest	Vent de SO		
Niveau	-	-	+	+	+		
Courant	-	+	+	+	-		
Houle		-		+	+		
Érosion marin	-	-	-	-	+		

Tableau 4-25 : Influence du vent sur l'hydrodynamique sédimentaire dans la zone B.

Le régime de Sud-Ouest influence fortement sur l'hydrodynamique sédimentaire dans la zone B, notamment, le vent de Sud-Ouest qui provoque la surélévation, la houle forte, le courant vers le large et l'érosion marine forte. Les vents de Sud-Ouest provoquent un dégât très important sur le littoral.

Dans ce qui suit, nous allons étudier les scénarios en cas de houle et du vent en régime de Sud-Ouest qui influencent fortement l'hydrodynamique et la morphologie.

## 4.8.6.4. Influence du régime des houles au large sur l'hydrodynamique et la morphologie

Nous avons créé deux modèles dans le cas de la houle au large de Sud-Ouest et d'Ouest annuelle. Le vent est constant avec la vitesse d'environ 5,57 mètres par seconde et souffle en direction 228 degrés Nord.

Les différences des niveaux marins (WL) et des directions des courants (DIR) ne sont pas nettes. Le régime de Sud-Ouest engendre une vitesse des courants plus forte que celle dans le régime d'Ouest. Dans la zone B, le courant a tendance à se déplacer vers le Sud dans le cas de la houle de Sud-Ouest (Tableau 4-26).

Scénario		1-S			1-0-5			
Zone		Houle de S	ud-Ouest		Houle d'Ouest			
		WL (m)	V (m/s)	DIR (°)	WL (m)	V (m/s)	DIR (°)	
	min	0,220	0,000	5	0,220	0,000	5	
Α	moyen	0,439	0,162	136	0,439	0,095	137	
	max	0,706	0,359	353	0,704	0,238	346	
	min	0,221	0,000	0	0,221	0,000	0	
В	moyen	0,437	0,075	211	0,438	0,033	250	
	max	0,692	0,232	360	0,692	0,086	360	
	min	0,222	0,000	0	0,222	0,000	0	
С	moyen	0,437	0,042	195	0,437	0,036	197	
	max	0,688	0,116	360	0,689	0,087	360	
	min	0,222	0,000	0	0,222	0,000	0	
D	moyen	0,437	0,044	183	0,437	0,036	181	
	max	0,688	0,113	360	0,688	0,085	360	

Tableau 4-26 : Influence de la houle au large sur le niveau marin et courant.

Les houles à la côte les plus fortes correspondent au régime de Sud-Ouest de la houle au large. L'impact du régime des houles sur la période et la direction de la houle n'est pas significatif (Tableau 4-27).

Scénario		1-S			1-0-5			
Zone		Houle de S	Sud-Ouest		Houle d'Ouest			
		H <sub>s</sub> (m)	<b>T</b> p <b>(s)</b>	MWD (°)	H <sub>s</sub> (m)	<b>T</b> p <b>(s)</b>	MWD (°)	
	min	0,209	2,7	213	0,213	2,8	212	
Α	moyen	0,701	3,9	234	0,696	3,9	233	
	max	1,074	8,0	250	1,071	7,8	250	
	min	0,305	3,9	238	0,285	3,6	239	
В	moyen	0,817	4,4	248	0,780	4,2	248	
	max	1,036	7,9	260	1,013	7,5	259	
С	min	0,290	3,7	241	0,272	3,2	243	

Tableau 4-27 : Influence de la houle au large sur la houle à la côte.

Scénario		1-S			1-0-5			
Zone		Houle de S	Sud-Ouest		Houle d'Ouest			
		H <sub>s</sub> (m)	<b>T</b> <sub>p</sub> (s)	MWD (°)	H <sub>s</sub> (m)	<b>T</b> <sub>p</sub> (s)	MWD (°)	
	moyen	0,719	4,3	258	0,678	4,1	258	
	max	0,974	7,9	268	0,930	7,3	269	
	min	0,035	0,9	237	0,027	0,9	237	
D	moyen	0,504	4,1	267	0,477	3,9	267	
	max	0,844	7,9	298	0,779	7,3	297	

Tableau 4-28 : Influence de la houle au large sur la morphologie.

Scénario	1-S				1-0-5					
Scenario	Houle de Su	d-Ouest			Houle d'Ou	lest				
Zone	Q (m <sup>3</sup> /s/m)	m <sup>3</sup> /s/m) DIR (°) V (m		R (mm/j)	Q (m <sup>3</sup> /s/m)	DIR (°)	V (m³/j)	R (mm/j)		
Α	5,30E-06	125	-820	-1	9,12E-07	109	-167	-0,2		
В	1,36E-05	197	-2 759	-2	5,68E-06	199	-1 149	-1		
С	2,77E-06	193	-305	-1	1,53E-06	156	2	0		
D	2,47E-06	170	-956	-1	1,49E-06	137	105	1		

A cause de la mer très agitée dans le régime de Sud-Ouest, l'érosion marine devient plus sévère que celle dans le régime de Sud-Ouest. Le volume de l'érosion peut atteindre -2 759 mètres cube par jour dans la zone B (Tableau 4-28). Le littoral occidental est touché par l'érosion sur toute sa longueur dans le régime de Sud-Ouest tandis que la zone Sud a une tendance de dépôt dans le régime d'Ouest.

## 4.8.6.5. Influence des posidonies sur l'hydrodynamique et la morphologie

Pour examiner les effets de la nature du fond sur l'hydrodynamique et la morphologie, nous avons étudié deux modèles : avec posidonie et sans posidonie.

Nous utilisons la bathymétrie réduite de 50 cm dans les zones de posidonie en rapport à la bathymétrie ; le nombre de Manning et la rugosité de Nikuradse diminuent aussi.

Les deux modèles utilisent le vent d'Ouest de 7,59 mètres par seconde (274 degrés Nord). La houle d'entrée dans ces modèles est calculée à partir des données de houle au large en provenance du Sud-Ouest.

Sur le scénario 1-S-2, le niveau marin monte un peu sous l'effet des posidonies, c'est net sur la vitesse des courants qui est réduite d'environ 50% à 80% par rapport à celle sur le fond sans posidonie (Tableau 4-29).

Comme l'effet sur le courant, la hauteur et la période de la houle sur le fond des

posidonies ralentissent un peu, 10% par rapport à celles sans posidonie (Tableau 4-30).

Scénario	1-S-2			1-S-3			
Scenario		Avec posid	onie		Sans posid	onie	
Zone		WL (m)	V (m/s)	DIR (°)	WL (m)	V (m/s)	DIR (°)
	min	0,218	0,000	47	0,216	0,000	27
Α	moyen	0,439	0,201	123	0,439	0,276	124
	max	0,707	0,464	281	0,709	0,548	294
	min	0,221	0,000	1	0,220	0,000	8
В	moyen	0,437	0,106	166	0,437	0,190	163
	max	0,692	0,309	358	0,697	0,398	359
	min	0,222	0,000	0	0,221	0,000	0
С	moyen	0,438	0,070	185	0,437	0,145	178
	max	0,689	0,187	358	0,699	0,275	359
	min	0,223	0,000	0	0,222	0,000	0
D	moyen	0,438	0,058	193	0,438	0,075	191
	max	0,691	0,204	360	0,707	0,210	360

Tableau 4-29 : Influence des posidonies sur le niveau marin et courant.

Tableau 4-30 : Influence des posidonies sur la houle à la côte.

Scénario	1-S-2			1-S-3				
Scenario		Avec posi	donie		Sans posic	donie		
Zone		H <sub>s</sub> (m)	<b>T</b> <sub>p</sub> (s)	MWD (°)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	MWD (°)	
	min	0,209	2,7	213	0,210	2,7	212	
Α	moyen	0,688	3,9	234	0,700	4,0	234	
	max	1,062	7,8	250	1,068	8,0	249	
	min	0,308	3,8	239	0,315	3,9	238	
В	moyen	0,791	4,2	249	0,824	4,4	248	
	max	1,015	7,4	259	1,054	7,9	260	
	min	0,291	3,5	243	0,303	3,8	242	
С	moyen	0,711	4,2	258	0,752	4,4	258	
	max	0,947	7,3	268	1,010	7,9	267	
	min	0,025	1,1	243	0,048	1,3	243	
D	moyen	0,497	4,0	268	0,527	4,2	268	
	max	0,797	7,3	297	0,859	7,9	297	

	,	L			0			
Scánaria	1-S-2				1-S-3			
Scenario	Avec posid	lonie			Sans posid	onie		
Zone	Q		V	R	Q		V	R
Zone	(m³/s/m)	DIR()	(m³/j)	(mm/j)	(m <sup>3</sup> /s/m)	DIR()	(m³/j)	(mm/j)
Α	7,21E-07	96	-52	0	1,52E-06	97	-20	0
В	4,35E-06	131	-663	-1	6,26E-06	125	-679	-1
С	1,66E-06	148	4	0	3,52E-06	140	197	0
D	1,89E-06	168	-13	0	2,65E-06	173	-276	0
Total			-724				-778	

Tableau 4-31 : Influence des posidonies sur la morphologie.

Enfin, nous allons examiner l'influence de la nature du fond sur le transport sédimentaire. Les posidonies jouent un rôle important dans l'équilibre sédimentaire du littoral de Giens, notamment, la zone B et zone D où la vitesse d'érosion est ralentie. Le résultat du transport sédimentaire est indiqué dans le tableau 4-31.

Le tableau 4-31 montre que le transport total des sédiments en présence de l'herbier de posidonie est inférieur à celui sur le fond sans posidonie. La direction moyenne de transport total des sédiments varie entre 90 et 170 degrés Nord (vers la côte).

Les vitesses d'érosion moyenne sur le fond de posidonie sont de -663 mètres cube par jour pour la zone B et -13 mètres cube par jour pour la zone D. Elles sont plus petites que celles sur le fond sans posidonie (-679 et -276 mètres cube par jour, respectivement). Grâce aux posidonies, la vitesse d'évolution du littoral dans les zones A et B est diminuée d'environ 64 mètres cube par jour (23 360 mètres cube par an).

## 4.8.6.6. Hydro-morphodynamique dans des conditions normales

Dans un premier temps, l'évaluation sur l'hydrodynamique sera exposée. Puis, dans un deuxième temps, l'évolution de la bathymétrie sera présentée. Ensuite, dans un troisième temps, nous calculerons le transport de sable. Enfin, dans un quatrième temps, nous essayerons d'évaluer des variations du profil de plage.

#### a) Hydrodynamique saisonnière et annuelle

Les résultats de simulation du champ de la houle montrent que les vagues ont une incidence directe sur le tombolo Ouest. La houle estivale est relativement faible, ses paramètres atteignent seulement 0,538 mètre de hauteur, 7,4 secondes de période et 260 degrés Nord (Tableau 4-32, p. 237). La hauteur moyenne de la houle hivernale est d'environ 0,95 mètre à la côte. Notre modèle reproduit la houle annuelle de direction de 213 à 298 degrés Nord d'environ 0,68 mètre de hauteur (1,074 mètres en maximale) (Figures 4-51 et 4-52).



Figure 4-51 : Hauteur médiane de la houle estivale (A) et hivernale (B).



Figure 4-52 : Période de pic de la houle estivale (A) et hivernale (B).

Scénario		3-0 et 3	-S		2-0 et 2-	-S		1-0-5 et 1-S			
Condition		Hiverna	1		Estival			Annuel			
Zone		H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	MWD (°)	H <sub>s</sub> (m)	T <sub>p</sub> (s)	MWD (°)	H <sub>s</sub> (m)	Tp (s)	MWD (°)	
Houle au la	rge Sud-C	)uest (Scé	nario X-S	S)							
	min	0,206	2,8	213	0,239	2,8	214	0,209	2,7	213	
А	moyen	0,745	4,1	234	0,394	4,2	235	0,688	3,9	234	
	max	1,214	7,8	251	0,537	7,8	250	1,062	7,8	250	
	min	0,294	4,0	237	0,342	4,0	239	0,308	3,8	239	
В	moyen	0,848	4,5	248	0,472	4,5	250	0,791	4,2	249	
	max	1,094	7,4	259	0,538	7,4	260	1,015	7,4	259	
	min	0,284	3,7	245	0,364	3,9	244	0,291	3,5	243	
С	moyen	0,757	4,4	258	0,444	4,5	259	0,711	4,2	258	
	max	0,962	7,3	269	0,506	7,3	267	0,947	7,3	268	
	min	0,037	1,1	242	0,034	1,3	243	0,025	1,1	243	
D	moyen	0,558	4,3	270	0,361	4,3	268	0,497	4,0	268	
	max	0,907	7,3	297	0,504	7,3	298	0,797	7,3	297	
Houle au la	rge d'Oue	est (Scéna	rio X-O)								
	min	0,204	2,8	212	0,236	2,8	214	0,210	2,6	213	
А	moyen	0,747	4,1	234	0,399	4,2	234	0,689	3,9	234	
	max	1,216	7,8	250	0,537	7,8	249	1,066	7,8	250	
	min	0,284	3,9	237	0,342	4,0	238	0,298	3,8	239	
В	moyen	0,849	4,5	248	0,469	4,5	249	0,791	4,2	248	
	max	1,093	7,4	258	0,536	7,4	260	1,013	7,4	259	
	min	0,272	3,7	245	0,360	3,9	244	0,283	3,6	243	
С	moyen	0,746	4,4	258	0,435	4,5	258	0,694	4,2	258	
	max	0,966	7,3	269	0,506	7,3	267	0,941	7,3	268	
	min	0,032	0,8	237	0,034	1,0	242	0,025	0,9	236	
D	moyen	0,551	4,3	270	0,352	4,2	267	0,486	3,9	267	
	max	0,901	7,3	297	0,504	7,3	298	0,788	7,3	297	

Tableau 4-32 : Etat de mer saisonnier et annuel au tombolo occidental.

X – le nombre de 1 à 3.

La densité de l'énergie maximale des vagues a également été extraite sur le rivage pour d'une part les différents points à 1 mètre de profondeur, de E01 à E12 qui correspondent aux bornes B01, B04, B06, B08, B10, B13, B16-18, B23, B33, et B41, d'autre part les points à 3 mètres d'isobathes, du Point 1 au Point 8 (Figure 4-53).

La densité de l'énergie maximale des houles à la côte et la période de pic de la houle de vague sont représentées dans le tableau 4-33, p. 239 :

La figure 4-54, p. 238 présente un exemple d'un spectre des houles simulées à la borne B08 dans le scénario annuel. Elle montre que la valeur maximale du spectre affiche en rouge, correspond au pic d'énergie (E). Il s'agit des vagues les plus visibles. La direction de provenance des vagues est donnée par la position angulaire du pic (la plus forte valeur - couleur rouge). Elle est dans le secteur Ouest-Sud-ouest pour la période T est de 8,4 secondes (indiquée par la distance au centre du diagramme, Figure 4-54). A la côte, nous aurons des vagues dans les zones exposées à ces houles (Courtaud, 2000). L'étalement des vagues est relativement faible ; les vagues seront bien ordonnées (crêtes longues).



Figure 4-53 : Localisation des points d'extraction des climats de houle à la côte à -1 mètre (de E01 à E12) et -3 mètres (du Point 1 au Point 8) (Lacroix et al., 2015b).



Figure 4-54 : Densité de l'énergie des houles à la borne B08 dans le scénario annuel : (A) Spectre de variance. (B) Spectre directionnel de variance.

Les densités d'énergie sont concentrées dans les zones B et C. Elles sont faibles dans les zones A et D. Dans la zone A, au point E01 (borne B01), la densité de l'énergie maximale des houles est de l'ordre de 0,295 mètres carré par seconde par radian, avec une période des houles de 5,2 secondes (Tableau 4-33, p. 239). La densité de l'énergie

est la plus élevée dans le zone B. La densité de l'énergie maximale varie de 0,404 à 0.478 mètres carré par seconde par radian, avec une gamme de période de pic des houles de 5,2 à 5,7 secondes. La valeur maximale correspond à la période de vague de pointe de 5,3 secondes à la borne B13 (Tableau 4-33). Dans la zone C, la densité de l'énergie maximale des houles peut atteindre de 0,292 à 0,465 mètres carré par seconde par radian correspondant à la période de pic des houles de 5,7 secondes. La valeur la plus élevée est obtenue à la borne B17 (Tableau 4-33). La densité de l'énergie maximale des houles dans la zone D oscille de 0,142 à 0,283 mètres carré par seconde par radian, avec une gamme de période de pic des houles entre 5,2 et 5,7 secondes. La plus forte densité de l'énergie des houles est observée à la borne B24 (Tableau 4-33).

Tableau 4-33 : Spectre des houles décrit par la densité de l'énergie maximale des houles à la côte, la fréquence et la période de pic des houles à 1 mètre d'isobathes dans le scénario annuel (scénarios 1-2).

Zone	А	В						С		D		
Point	E01	E02	E03	E04	E05	E06	E07	E08	E09	E10	E11	E12
Borne	B01	B04	B06	B08	B10	B13	B16	B17	B18	B24	B33	B41
Е	0.295	0.454	0.409	0.409	0.404	0.478	0.446	0.465	0.292	0.283	0.275	0.142
f	0.193	0.193	0.193	0.193	0.193	0.19	0.176	0.176	0.176	0.176	0.193	0.193
Tp	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.3	5.7	5.7	5.7	5.7	5.2	5.2

E - la densité de l'énergie des houles (mètre carré par seconde par radian); f - la fréquence (Hz);  $T_p$  – la période de pic des houles (seconde).

Le tableau 4-34 montre que la contrainte de radiation moyenne perpendiculaire à la côte ( $S_{xx}$ ) oscille de 0,1074 à 0,3554 mètres cube par seconde carré. Une valeur de l'ordre de 0,0613 à 0,2151 mètres cube par seconde carré est estimée pour contrainte de radiation moyenne parallèle à la côte ( $S_{yy}$ ) (Tableau 4-34). Une valeur moyenne de la contrainte tangentielle de radiation ( $S_{xy}$ ) est calculée de 0,0299 à 0,1037 mètres cube par seconde carré (Tableau 4-34).

Tableau 4-34 : Composantes du tenseur de radiation de la houle annuelle et saisonnière à la profondeur de 4 mètres à l'Almanarre.

Scénario	Condition	Régime des houles	$S_{xx}(m^3/s^2)$	$S_{xy}(m^{3}/s^{2})$	S <sub>yy</sub> (m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup> )
1-0-5	Annuel	Ouest	0,2956	0,0801	0,1726
1-S		Sud-Ouest	0,2328	0,0525	0,1450
2-0	Estival	Ouest	0,1107	0,0299	0,0625
2-S		Sud-Ouest	0,1074	0,0299	0,0613
3-0	Hivernal	Ouest	0,3593	0,1023	0,2135
3-S		Sud-Ouest	0,3554	0,1037	0,2151

Le champ du courant tient compte de l'interaction des houles avec la variation du niveau de la mer. Les résultats des calculs sont présentés sur les figures 4-55 et 4-56.



Figure 4-55 : Magnitude du niveau marin moyen estival (A) et hivernal (B).



Figure 4-56 : Magnitude du courant moyen estival (A) et hivernal (B).

En été, la variation du niveau marin est légère entre 0,278 et 0,675 mètre. Le courant de marée associé au courant dû à la houle est de direction 124 à 324 degrés Nord de vitesse faible. La vitesse maximale du courant de synthèse atteint 0,27 mètres par seconde (Tableau 4-35).

Scénario		3-0 et 3-5	5	2-0	et 2-S		1-0	)-5 et 1-S		
Condition		Hivernal		Esti	val		An	nuel		
Zone		WL (m)	V (m/s)	DIR (°)	WL (m)	V (m/s)	DIR (°)	WL (m)	V (m/s)	DIR (°)
Houle au la	arge Sud-(	Ouest (Scé	nario X-S)							
Α	min	0,219	0,000	44	0,278	0,000	90	0,218	0,000	47
	moyen	0,439	0,230	124	0,481	0,138	124	0,439	0,201	123
	max	0,710	0,544	259	0,675	0,270	353	0,707	0,464	281
В	min	0,221	0,000	5	0,282	0,000	6	0,221	0,000	1
	moyen	0,437	0,113	169	0,481	0,081	165	0,437	0,106	166
	max	0,693	0,333	360	0,669	0,205	360	0,692	0,309	358
С	min	0,222	0,000	0	0,285	0,000	5	0,222	0,000	0
	moyen	0,438	0,069	191	0,481	0,052	189	0,438	0,070	185
	max	0,689	0,189	360	0,667	0,131	359	0,689	0,187	358
D	min	0,222	0,000	0	0,287	0,000	0	0,223	0,000	0
	moyen	0,438	0,064	189	0,482	0,050	183	0,438	0,058	193
	max	0,692	0,229	360	0,667	0,129	360	0,691	0,204	360
Houle au la	arge d'Ou	est (Scéna	rio X-O)							
Α	min	0,220	0,000	6	0,280	0,000	4	0,220	0,000	37
	moyen	0,439	0,201	131	0,481	0,064	164	0,439	0,165	132
	max	0,710	0,517	344	0,674	0,191	344	0,706	0,428	294
В	min	0,221	0,000	0	0,282	0,000	0	0,221	0,000	0
	moyen	0,437	0,079	208	0,480	0,050	324	0,437	0,061	217
	max	0,693	0,291	360	0,669	0,148	360	0,692	0,248	360
С	min	0,222	0,000	0	0,284	0,000	0	0,222	0,000	0
	moyen	0,437	0,055	195	0,480	0,056	212	0,437	0,048	190
	max	0,688	0,123	360	0,666	0,134	360	0,688	0,119	360
D	min	0,222	0,000	0	0,286	0,000	0	0,222	0,000	0
	moyen	0,437	0,050	180	0,480	0,056	175	0,437	0,047	179
	max	0,689	0,174	360	0,663	0,156	360	0,689	0,146	360

Tableau 4-35 : Niveau marin et courant saisonniers et annuels au tombolo occidental.

X – le nombre de 1 à 3.

En hiver, les vents et les houles de Nord-Ouest à Sud-Ouest génèrent des courants côtiers en direction du Sud (172 degrés Nord) avec une vitesse moyenne de 0,14 mètres par seconde. La vitesse maximale atteint jusqu'à 0,544 mètres par seconde dans la zone A.

L'étude sur le scénario annuel montre que les courants de direction Nord-Sud sont de 0,06 mètre par seconde en moyenne (ne dépassent pas 0,464 mètres par seconde dans la zone A).

#### b) Evolution de la bathymétrie

En été (scénarios 2-0 et 2-S), la dérive littorale influence peu l'évolution de la bathymétrie. Les petites vagues estivales de Sud-Ouest peuvent provoquer l'érosion dans la zone B (Tableau 4-36, p. 243). Mais l'évolution de la bathymétrie est faible (R  $\approx$ 

0 mètre par jour) (Figure 4-57).



*Figure 4-57 : Vitesse de changements bathymétriques en été (A) et en hiver (B).* 



Figure 4-58 : Vitesse de changements bathymétriques annuelle.

En hiver (scénarios 3-0 et 3-S), l'effet du vent fort de Nord-Ouest à Sud-Ouest provoque une grande évolution de la bathymétrie. Dans cette période, la plus grande vitesse d'érosion marine atteint -1 millimètre par jour dans la zone B (Figure 4-57).

Durant les scénarios annuels (scénario 1-0-5 et 1-S), le tombolo est touché par l'érosion presque sur toute sa longueur (sauf les zones C et D). La vitesse d'érosion est moins forte qu'en hiver et peut atteindre -1 millimètre par jour (Figure 4-58).

Scénario	Condition	-	Houle	au large	Sud-O	uest	Houle a	u large d	'Ouest	
beenario	contaction		(Scén	ario X-S)		uese	(Scénar	io X-0)	ouese	
		Zone	А	В	С	D	А	В	С	D
3-0 et 3-S	Hivernal	Q	7,70	65,6	29,8	23,1	6,41	62,1	21,3	17,1
		(10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> /s/m)								
		DIR (°)	95	130	150	172	98	143	144	164
		V (m <sup>3</sup> /j)	-180	-1649	-220	-67	-194	-1527	-95	3
		R (mm/j)	0	-1	0	0	0	-1	0	0
2-0 et 2-S	Estival	Q	5,52	12,1	7,38	15,8	0,82	6,25	8,42	18,2
		(10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> /s/m)								
		DIR (°)	95	125	145	161	107	199	108	132
		V (m <sup>3</sup> /j)	112	-98	42	-31	30	41	69	-22
		R (mm/j)	0	0	0	0	0	0	0	0
1-0-5 et	Annuel	Q	7,21	43,5	16,6	18,9	5,33	38,6	9,15	14,3
1-S		(10 <sup>-7</sup> m <sup>3</sup> /s/m)								
		DIR (°)	96	131	148	168	100	149	136	142
		V (m³/j)	-52	-663	4	-13	-55	-602	-4	10
		R (mm/j)	0	-1	0	0	0	-1	0	0

Tableau 4-36 : Transport de sable et évolution du tombolo occidental.

X – le nombre de 1 à 3.

### c) Transport de sable au tombolo Ouest

Les facteurs hydrodynamiques jouent un rôle clé dans le processus d'accumulation (d'érosion et d'accrétion). Les résultats calculés dans le tableau 4-36 montrent que le tombolo occidental présente de l'érosion, notamment en zone B, mais aussi de l'accrétion (zone A, C, et D).



Figure 4-59 : Transport sédimentaire total en été (A) et en hiver (B).

En été, le transport de sable varie de 0,82•10<sup>-7</sup> à 18,2•10<sup>-7</sup> mètres cube par seconde par mètre linéaire. Le dépôt de sédiments se fait principalement dans les zones A et C. Les dépôts de sédiments varient de +30 à +112 mètres cube par jour (+59 mètres cube par jour en moyenne). Le tableau 4-36 démontre l'érosion faible dans les zones B et D (de -22 à -98 mètres cube par jour). Les autres zones ont une tendance au dépôt des sédiments (Figure 4-59, p. 243).

En revanche, en hiver, les zones A, B, et C sont érosives, l'évolution de l'érosion est de -1500 mètres cube par jour. Le dépôt de sédiments est très faible, environ 3 mètres cube par jour dans la zone D. Dans la zone B, il y a beaucoup d'endroits érodés fortement, la vitesse d'érosion s'élève à -1 649 mètres cube par jour (Tableau 4-36 et Figure 4-59).

Durant les scénarios annuels, le transport sédimentaire vers le Sud-Ouest atteint 3,86•10<sup>-6</sup> mètres cube par seconde par mètre linéaire (122 mètres cube par an par mètre linéaire). La vitesse d'érosion est de -660 mètres cube par jour (Figure 4-60).



Figure 4-60 : Transport sédimentaire total annuel.

#### d) Evolution du profil

Le profil B08 est en zone d'érosion. Il est très exposé au régime de Sud-Ouest. Le phénomène érosif principal existe pendant le régime des houles de Sud-Ouest. Le scénario a été soumis à des houles et des vent annuels de Sud-Ouest. Ces houles étaient destinées à représenter une houle moyenne entre la houle estivale et la houle hivernale.

La couche de l'allongement du profil était attaquée. Elle a subi une modification significative. Il existe des zones en érosion. La zone sédimentologique active est à 800 mètres de la borne B08, jusqu'à la profondeur -6,8 mètres. Une partie du sable est emporté vers le large au niveau de la borne 8. Le sable peut s'échapper par la brèche à -



4,1 mètres et à 240 mètres de cette borne qui atténue les houles du large (Figure 4-61).

Figure 4-61 : Changements des bathymétries à la borne B08.



Figure 4-62 : Evolutions annuelles des bathymétries à la borne B08.

Le trait de côte ne s'est pas déplacé. Les 70 premiers mètres sont stables. Entre 70 et 380 mètres, une érosion importante a eu lieu, l'épaisseur maximale étant d'environ 0,16 mètre par 8 jours (0,02 mètre par jour) entre 170 et 180 mètres de la borne.

Il y a eu une accumulation de sable entre 380 et 480 mètres, avec une épaisseur maximale de l'ordre de 0,065 mètre par 8 jours. C'est-à dire qu'une grande partie du sable a été emportée au large de la couche près de la côte.

Ensuite, un creusement, sur une épaisseur maximale de 0,05 centimètre par 8 jours, s'est produit entre 480 et 680 mètres et une accrétion, sur une épaisseur maximale de 0,065 mètres, entre 680 et 800 mètres (Figures 4-61 et 4-62).

Alors, avec le vent et la houle annuelle, le résultat montre que la tendance érosive existe au profil B08. En effet, ce profil a été attaqué pratiquement sur toute sa longueur, notamment, la couche entre 70 et 380 mètres de la borne B08.

Les vents et les houles de Sud-Ouest attaquent directement les plages provoquant un transit transversal vers le large. Il n'a pas été remonté dans le profil à cause de la forte pente de la plage, des faibles profondeurs et de la présence de brèche.

## 4.8.6.7. Hydro-morphodynamique dans les conditions extrêmes

La localisation de la zone de surf dépend essentiellement de la bathymétrie et le niveau d'eau. Par conséquent, elle se déplace en fonction du niveau marin. Ces modèles ont calculé certains niveaux marins différents (Tableau 4-2, p. 185).

Ces modèles permettent de mettre en avant les zones à évolution significative : accrétion et érosion. Les résultats sont exposés dans ce qui suit. Nous allons d'abord porter sur l'évaluation sur l'hydrodynamique. Nous examinerons ensuite le changement de bathymétrie. Le transport de sable sera ensuite estimé. Les modifications du profil de plage seront enfin examinées.

#### a) Hydrodynamique

Au tombolo occidental, la hauteur des houles significative peut atteindre de 1,1 à 1,5 mètres et la période de 7 à 8 secondes (Tableau 4-37). La direction moyenne des vagues au tombolo est de Sud-Ouest lors des tempêtes.

Scénario	Condition		Houle	au large	e de Sud-	Ouest	Houle	au large	d'Oues	t
		Zone	Α	B	С	D	Α	B	С	D
6	Tempête	Hs (m)	2,28	1,75	1,45	1,28	1,56	1,62	1,61	1,50
	maximale	Tp (s)	7,7	7,4	7,2	7,1	7,6	7,7	7,6	8,0
	observée	MWD (°)	173	190	208	218	230	248	258	268
7-0 et 7-S	Coup de mer	Hs (m)	1,734	1,445	1,238	1,127	1,211	1,390	1,359	1,272
		Tp (s)	7,8	7,5	7,2	7,2	7,8	7,8	7,8	8,1
		MWD (°)	175	192	209	219	234	251	260	269
8-0 et 8-S	Tempête	Hs (m)	1,8	1,5	1,2	1,1	1,224	1,418	1,344	1,220
	annuelle	Tp (s)	7,8	7,3	7,1	7,0	7,8	7,6	7,7	7,9
		MWD (°)	172,8	191,2	208,2	219,0	231	250	259	269
9-0 et 9-S	Tempête	Hs (m)	1,6	1,2	1,1	1,0	1,119	1,180	1,200	1,178
	décennale	Tp (s)	7,8	7,4	7,1	7,2	7,8	7,7	7,7	8,1
		MWD (°)	173,5	191,2	209,0	219,0	232	250	260	269
10-0 et 10-S	Tempête	Hs (m)	2,3	1,8	1,5	1,3	1,579	1,699	1,657	1,511
	trentennale	Tp (s)	7,8	7,5	7,2	7,2	7,8	7,8	7,8	8,1
		MWD (°)	173,5	191,2	209,0	219,8	232	250	260	270
11-0 et 11-S	Tempête	Hs (m)	2,2	1,9	1,4	1,3	1,561	1,786	1,546	1,519
	cinquantennale	Tp (s)	9,0	8,4	7,9	7,2	9,0	8,7	8,6	8,1

Tableau 4-37 : Hauteur, période et direction des houles en scénarios extrêmes.

Scénario	Condition	_	Houle	au large	de Sud-	Ouest	Houle au large d'Ouest			
		Zone	Α	В	С	D	Α	В	С	D
		MWD (°)	176,5	193,5	209,8	212,5	236	253	261	261
12-0 et 12-S	Tempête	Hs (m)	3,2	2,3	1,9	1,9	2,235	2,217	2,110	2,185
	centennale	Tp (s)	7,9	7,2	6,8	6,5	7,9	7,5	7,4	7,3
		MWD (°)	175,0	192,0	208,2	219,8	234	251	259	270

Les densités d'énergie sont plus fortes dans les zones B et C (Tableau 4-38), notamment le secteur de la borne de B13 à B17. En effet, la tempête de Sud-Ouest génère la densité de l'énergie la plus élevée de 3,9 mètres carré par seconde par radian au niveau de la borne B17. Ils sont moins importants dans les zones A et D.



Figure 4-63 : Densité de l'énergie des vagues à la borne B08 pendant tempête de Sud-Ouest : (A) Spectre de variance. (B) Spectre directionnel de variance (Lacroix et al., 2015b).

Dans la zone A, au point E01 (borne B01), la densité de l'énergie maximale des houles est de l'ordre de 1,47 à 1,49 mètres carré par seconde par radian, avec une période de houles de 8,4 secondes (Tableau 4-38, p. 248). Dans la zone B, la densité de l'énergie maximale varie de 2,42 à 3,8 mètres carré par seconde par radian, avec une gamme de période de pic des houles de 8,6 à 9,3 s. La valeur maximale correspond à la période de vague de pointe de 9,3 s à la borne B13 (Tableau 4-38). Dans la zone C, la densité de l'énergie maximale des houles peut atteindre de 2,38 à 3,9 mètres carré par seconde par radian correspondant à la période de pic des houles de 8,6 à 9,3 secondes. La valeur la plus élevée est obtenue à la borne B17 (Tableau 4-38). La densité de l'énergie maximale des houles dans la zone D oscille de 0,35 à 1,2 mètres carré par seconde par radian, avec une gamme de période de pic des houles entre 7,7 et 8,6 secondes. La plus forte densité de l'énergie des houles est observée à la borne B24 (Tableau 4-38).

Tableau 4-38 : Spectre des houles décrite par la densité de l'énergie maximale des houles à la côte, la fréquence et la période de pic des houles à 1 mètre d'isobathes dans les scénarios extrêmes (Lacroix et al., 2015b).

Zone		Downo	Scénario 9-S			Scénario 9-0		
	Point	Богне	Tempête de Su	d-Ouest		Tempête d'Oue	est	
			E (m <sup>2</sup> /s/rad)	f (Hz)	T (s)	E (m <sup>2</sup> /s/rad)	f (Hz)	T (s)
Α	E01	B01	1,49	0,119	8,4	1,47	0,119	8,4
В	E02	B04	3,30	0,116	8,6	3,44	0,119	8,4
	E03	B06	3,10	0,108	9,3	2,86	0,116	8,6
	E04	B08	2,90	0,108	9,3	2,56	0,116	8,6
	E05	B10	2,80	0,108	9,3	2,42	0,116	8,6
	E06	B13	3,80	0,108	9,3	3,33	0,116	8,6
	E07	B16	3,50	0,108	9,3	2,9	0,108	9,3
С	E08	B17	3,90	0,108	9,3	3,13	0,116	8,6
	E09	B18	2,65	0,108	9,3	2,38	0,116	8,6
D	E10	B24	1,20	0,116	8,6	1,36	0,116	8,6
	E11	B33	0,85	0,119	8,4	0,87	0,119	8,4
	E12	B41	0.35	0.131	7.7	0.42	0.131	7.7

Une tension de radiation transversale  $(S_{xx})$  à 4 mètres de profondeur à l'Almanarre est estimée de 1,6010 à 1,8010 mètres cube par seconde carré (Tableau 4-39). Une tension de radiation longitudinale  $(S_{yy})$  atteint entre 0,8900 et 1,1350 mètres cube par seconde carré (Tableau 4-39). Une valeur maximale de tension de radiation dans le plan xy  $(S_{xy})$  est déterminée de 0,4500 à 0,5600 mètres cube par seconde carré (Tableau 4-39). Les tensions de radiation dans les conditions extrêmes sont supérieures à 5-15 fois à celles dans les conditions normales.

Tableau 4-39 : Composantes du tenseur de radiation de la houle à l'Almanarre en cas de houles d'Ouest et de Sud-Ouest.

Scénario	Régime des houles	$S_{xx}(m^3/s^2)$	$S_{xy}(m^{3}/s^{2})$	$S_{yy}(m^{3}/s^{2})$
9-0	Ouest	1,6010	0,4500	0,8900
9-S	Sud-Ouest	1,8010	0,5600	1,1350
Ecart (%)		12%	24%	28%
Moyenne		1,701	0,505	1,0125

Durant les tempêtes de Sud-Ouest, les vitesses des courants peuvent atteindre 0,2 à 0,4 mètre par seconde vers le Sud dans la zone B (Tableau 4-40 et Figure 4-64, p. 249). La houle de direction 170 à 200 degrés Nord est forte, avoisine de 1,45 à plus 2 mètres.

Durant les tempêtes d'Ouest, le modèle de houle indique les houles fortes concentrées entre les zones B et C. La hauteur le plus haute peut atteindre plus de 2 mètres vers la direction Sud-Ouest. Bien que la vitesse du vent et la hauteur de la houle au large soient plus élevées que dans le scénario Sud-Ouest, les vagues sont moins fortes que celles dans le scénario Sud-Ouest car le tombolo Ouest est ouvert à la direction Sud-Ouest. Le modèle de tempête cinquantennale associées à une dépression reproduit les courants de direction Nord-Sud d'environ 0,251 mètre par seconde dans la zone B.

Scénario	Condition	Houle au large de Sud-Ouest (Scénario X-S)					Houle au large d'Ouest (Scénario X-O)			
		Zone	Α	В	С	D	Α	В	С	D
6	Tempête	WL (m)	1,480	1,485	1,486	1,488	1,490	1,488	1,488	1,489
	maximale	V (m/s)	0,18	0,09	0,08	0,09	0,16	0,08	0,06	0,05
	observée	DIR (°)	144	162	194	186	148	206	182	186
7-0 et 7-S	Coup de mer	WL (m)	0,664	0,662	0,661	0,661	0,378	0,377	0,378	0,379
		V (m/s)	0,173	0,090	0,074	0,057	0,131	0,063	0,073	0,065
		DIR (°)	150	193	189	189	155	242	177	188
8-0 et 8-S	Tempête	WL (m)	0,382	0,381	0,381	0,382	0,382	0,381	0,381	0,382
	annuelle	V (m/s)	0,2	0,1	0,1	0,1	0,155	0,062	0,060	0,062
		DIR (°)	139	176	202	186	144	220	189	185
9-0 et 9-S	Tempête	WL (m)	1,428	1,427	1,427	1,428	1,428	1,427	1,427	1,428
	décennale	V (m/s)	0,2	0,1	0,1	0,0	0,142	0,060	0,058	0,056
		DIR (°)	130	167	199	188	134	209	186	187
10-0 et 10-S	Tempête	WL (m)	1,492	1,490	1,490	1,491	1,492	1,490	1,490	1,491
	trentennale	V (m/s)	0,2	0,1	0,1	0,1	0,186	0,076	0,068	0,058
		DIR (°)	145	164	197	188	150	205	184	187
11-0 et 11-S	Tempête	WL (m)	1,670	1,672	1,675	1,680	1,670	1,672	1,675	1,680
	cinquantennale	V (m/s)	0,4	0,3	0,1	0,1	0,331	0,184	0,125	0,131
		DIR (°)	118	133	204	186	122	167	191	185
12-0 et 12-S	Tempête	WL (m)	1,831	1,821	1,819	1,816	1,831	1,821	1,819	1,816
	centennale	V (m/s)	0,7	0,4	0,2	0,1	0,516	0,251	0,210	0,131
		DIR (°)	122	13	187	172	126	164	175	171

Tableau 4-40 : Niveau marin et le courant en scénarios extrêmes.

X – le nombre de 6 à 12.



Figure 4-64 : Niveau marin (A), vitesse du courant (B) et hauteur de la houle (C) pendant la tempête du 24 Janvier 2007.

#### b) Evolution de la bathymétrie

L'évolution de la bathymétrie est la plus forte dans les zone B et D (Figure 4-65, notamment le secteur de la borne B08). En effet, la vitesse des érosions peut atteindre

jusqu'à -78 à -80 millimètres par jour pour les zones B et D. La vitesse d'érosion moyenne est de -17 millimètres par jour. Le niveau des accrétions peut atteindre jusqu'à +131 millimètres par jour dans la zone A (au large de la borne B08) (Tableau 4-41).

Scénario	Condition	Zone	Houle au large Sud-Ouest				Houle au large d'Ouest			
			(Scénar	rio X-S)			(Scénario X-O)			
			А	В	С	D	А	В	С	D
6	Tempête	Q	23	260	210	130	14	220	270	210
	maximale	DIR (°)	92	102	118	125	98	112	120	148
	observée	V (m <sup>3</sup> /j)	-1,2	-10,0	-1,4	-3,10	-0,31	-9,8	-3,6	-9,2
		R (mm/j)	1,2	-8,34	-3,0	-2,15	-0,35	-8,1	-8,2	-5,0
<b>7-O et</b>	Coup de mer	Q	12,3	126,4	63,9	44,1	7,47	106	82,3	72,7
7-S		DIR (°)	100	122	120	138	104	135	123	161
		V (m <sup>3</sup> /j)	333	-3 190	-363	-690	0	-3 108	-944	-1 962
		R (mm/j)	-0,34	-2,65	-0,8	-0,44	0	-2,6	-2,1	-1,2
8-0 et	Tempête	Q	13,3	121,6	96,3	55,7	8,09	102	124	91,9
8-S	annuelle	DIR (°)	92	112	124	126	96	124	128	148
		V (m <sup>3</sup> /j)	-216	-3 451	-470	-944	-65	-3 362	-1 223	-2 681
		R (mm/j)	0,2	-2,8	-1,0	-0,6	-0,06	-2,79	-2,68	-1,69
9-0 et	Tempête	Q	10,6	72,3	31,1	27,8	6,43	60,6	40	45,8
9-S	décennale	DIR (°)	92	113	127	126	96	126	131	147
		V (m <sup>3</sup> /j)	229	-1376	-193	-326	69	-1341	-502	-927
		R (mm/j)	-0,2	-1,1	-0,4	-0,2	0,07	-1,11	-1,10	-0,59
10-O et	Tempête	Q	24	263	212	131	14,8	221	273	217
10-S	trentennale	DIR (°)	94	103	119	128	98	114	122	150
		$V(10^3)$	-1,16	-10,14	-1,48	-3,30	-0,35	-9,88	-3,84	-9,37
		m <sup>3</sup> /j)								
		<b>R</b> ( <b>mm</b> / <b>j</b> )	1,4	-8,4	-3,2	-2,2	-0,4	-8,21	-8,41	-5,92
11-O et	Tempête	Q	0,0	0,0	0,0	0,0	18,9	273	350	376
11-S	cinquantenna	DIR (°)	89	111	138	154	93	123	142	180
	le	$V(10^3)$	-2,17	-8,86	-1,99	-4,72	-0,65	-8,63	-5,16	-13,39
		m³/j)								
		<b>R</b> ( <b>mm/j</b> )	2,3	-7,3	-4,3	-3,1	-0,668	-7,17	-11,3	-8,48
12-0 et	Tempête	Q	3 0 2 9	5 1 5 1	3 276	1 692	1 840	4 320	4 2 2 0	2 790
12-S	centennale	DIR (°)	114	159	182	204	119	176	187	239
		$V(10^3)$	-125	-95	-10	-44	-37	-93	-27	-126
		m³/j)								
		<b>R</b> ( <b>mm</b> / <b>j</b> )	131,2	-78,9	-22,6	-29,3	-38,6	-77,4	-59,2	-80
	Moyenne	$R_{\rm m}$ (mm/j)	22,4	-16,9	-5,4	-6,0	-6,6	-16,5	-14,1	-16,3

Tableau 4-41 : Transport de sable et évolution du tombolo Ouest.

X - le nombre de 7 à 12 ; Q - le transport sédimentaire total en mètres cube par seconde par mètre linéaire (x 10-7).

#### c) Transport de sable au tombolo Ouest

Le transport sédimentaire total est caractérisé par la direction vers le large d'environ 5 151•10<sup>-7</sup> mètres cube par seconde par mètre linéaire (44,5 mètres cube par jour par mètre linéaire) dans le scénario tempête cinquantennale.

Les évolutions morphologiques indiquent l'érosion généralisée entre les bornes B03 et B08. Les dépôts sédimentaires concentrés dans la zone de posidonie et sur la zone de roche.



Figure 4-65 : Vitesse de changements bathymétriques en mètre par jour (A) et transport sédimentaire total en mètre cube par seconde par mètre linéaire (B) pendant la tempête d'Ouest du 24 Janvier 2007 (Lacroix et al., 2015b).

#### d) Evolution du profil

Le scénario a été soumis à des houles et des vent d'Ouest pendant la tempête du 24 Janvier 2007. C'est la plus grande houle dans la période de 2007 à 2008. Sa période de retour est environ 30 ans.

Le profil a subi une modification forte. La zone sédimentologique active a été étendue jusqu'à la profondeur de 11 mètres (Figures 4-66 et 4-67). Les 70 premiers mètres sont encore stables. Entre 70 et 710 mètres, une érosion importante a eu lieu, l'épaisseur maximale étant d'environ 0,2 mètre par 4 jours (0,05 mètre par jour) entre 300 et 400 mètres de la borne B08. Ensuite, il y a eu une accumulation de sable à partir de 710 mètres, avec une épaisseur maximale de l'ordre de 0,175 mètre par 4 jours.



Figure 4-66 : Changements des bathymétries à la borne B08 (Lacroix et al., 2015b).



Figure 4-67 : Evolution des bathymétries à la borne B08 (Lacroix et al., 2015b).

## 4.9. Conclusions

Le logiciel MIKE21 a été appliqué pour reproduire les régimes hydrodynamiques et les processus morphologiques. Le modèle numérique a été implémenté en deux échelles régionale et locale. Les scénarios ont été proposés dans deux conditions
normales et extrêmes. La sensibilité aux maillages régional et local a été examinée. Le processus complexe de modélisation requiert des données d'entrée aussi précises que possible, permettant l'évaluation de la qualité de la performance des modèles en comparant entre les résultats calculés et des mesures d'évolution du littoral. Le modèle développé avec MIKE21 donne des résultats satisfaisants de ce point de vue et donc peut servir de base aux tests de solutions par la voie numérique. L'intégration d'un certain nombre de modules donne en effet des résultats raisonnables, compatibles avec le phénomène réel et les mesures réelles. Les résultats de nos calculs ont donné une image complète du processus d'évolution du littoral, en concordance avec les observations réalisées.

L'effet des variations du niveau marin sur le champ des houles a été évalué. L'effet de cette modification sur la direction de la houle est négligeable. Les variations du niveau marin provoquent un changement de 11% de hauteur significative, de 6% de période de pic et une modification du tenseur de rayonnement de 18% à 22%.

L'effet du vent et des houles au large sur l'hydrodynamique et la morphologie ont été examinés. Le site d'étude est le plus exposé aux régimes de Sud-Ouest des houles et des vents. Le régime de Sud-Ouest des houles et des vents pourrait entraîner une augmentation importante des paramètres des houles et du tenseur de rayonnement à l'Almanarre.

Les effets saisonniers sur l'hydrodynamique et la morphologie ont été évalués. L'amplitude des vagues estivales est plus petite que l'hivernale. La direction des houles à la côte est de 235 à 245 degrés Nord. La hauteur des houles à la côte peut atteindre environ 0,95 mètres en période hivernale. La magnitude des courants en été est en général moins forte que celle hivernale. La variation du niveau de la mer est d'une part très forte en hiver, d'autre part faible en été.

L'influence des posidonies sur l'hydrodynamique et la morphologie a été évaluée. En effet, le niveau marin monte un peu en cas de la présence de posidonies. Les vitesses des courants diminuent d'environ 50% à 80% à l'aide des posidonies. Un taux de réduction de 10% a été estimé pour la hauteur et la période de la houle en comparant à celles sur le fond sans posidonie. Le transport total des sédiments a été nettement diminué en présence de posidonies. La vitesse d'érosion sur le fond avec posidonies est inférieure à celle sur le fond sans posidonie.

Les évaluations sur l'hydrodynamique et sur la morphologie se sont faites dans les scénarios annuel, saisonniers, et extrêmes. Nos résultats donnent une image complète des processus hydrodynamique et morphologique. Ils sont très utiles pour les gestionnaires du littoral.

Nous pouvons utiliser nos modèles pour calculer l'évolution du littoral à l'avenir et prévoir l'impact des solutions de protection dans le chapitre 6. Il devient ainsi plus simple d'envisager différents scénarios d'intervention.

# Chapitre 5. Evolution du rivage du tombolo Ouest

Les processus côtiers induits par les vents, les vagues, les courants, et les niveaux marins entraînent les changements de profil de la plage et des évolutions du rivage. Les modifications du rivage à long terme ont plus d'intérêt et suscitent plus de préoccupations des gestionnaires des zones côtières (Dang et Pham, 2008). L'évolution du rivage est souvent divisée en trois catégories telles que l'érosion, l'équilibre et l'accrétion (Salghuna et Bharathvaj, 2015).

Ce chapitre fera l'étude de l'évolution du rivage sur deux points : l'évolution du trait de côte et la capacité du transit sédimentaire. L'outil de calcul des statistiques d'évolution DSAS sera d'abord utilisé à trois échelles temporelles de 1920 à 2012 tels que long, moyen, et court terme. Il permet d'une part d'analyser les mouvements de la ligne du rivage, d'autre part d'identifier les tendances d'érosion et de dépôt. Les tendances futures des mouvements du trait de côte seront prédites. Le modèle LITPACK sera ensuite appliqué pour déterminer la capacité du transit sédimentaire. Les régressions entre les modifications de la ligne du rivage et certains agents de l'évolution côtière seront enfin établies au tombolo Ouest afin de déterminer les principales causes de l'érosion du rivage.

# 5.1. Choix d'outils pour la détermination de l'évolution du rivage

Il existe de nombreux modèles développés pour simuler les changements à long terme du littoral tels que GENESIS (Hanson et al., 1989), UNIBEST (van der Salm, 2013), et LITPACK (DHI, 2014b). L'outil DSAS calcule d'une part les statistiques de vitesse de changement, d'autre part les mouvements de la ligne du rivage pour une série chronologique des données vectorielles du littoral (Himmelstoss, 2009). L'outil DSAS version 4.3 développé par USGS est une extension pour le logiciel ArcGIS version 10 afin d'évaluer l'évolution du littoral. Chaque outil a des avantages et des inconvénients. Nous avons choisi LITPACK et DSAS pour déterminer l'évolution du rivage dans le secteur d'étude.

## 5.2. Description de l'outil DSAS

Il existe de nombreuses méthodes statistiques dans l'étude de l'évolution du rivage tels que « End Point Rate (EPR) », « Average of Rates (AOR) », « Minimum Description Length (MDL) », « Jack-Knife Rate (JKR) », « Ordinary Least Squares (OLS) » / « Linear Regression (LRR) », « Reweighed Least Squares (RLS) », « Weighted Least Squares (WLS) », « Least Absolute Deviation (LAD) », et « Weighted Least Absolute Deviation (WLAD) » (Dang et Pham, 2008). Chaque méthode a des avantages et des inconvénients (Thieler et al., 2003, To and Thao, 2006 and Genz et al., 2007). DSAS utilise plusieurs techniques statistiques comparant les positions de la ligne du rivage à travers le temps pour estimer l'évolution de la ligne de la côte (Jamont, 2014). Les principales méthodes utilisées dans DSAS peuvent être décrites ci-dessous. Plus de détails sur les autres paramètres statistiques sont décrits par Himmelstoss (2009).

## 5.2.1. Mouvement net du trait de côte

Le mouvement net de la ligne du rivage (« *Net Shoreline Movement* » - NSM) rapporte une distance, pas un taux. Il est associé avec les dates de seulement deux rives. Il rend compte de la distance entre les plus anciennes et les plus jeunes rivages pour chaque transect (Oyedotun, 2014). Cela représente la distance totale entre l'ancienne et la plus récente des rives (Himmelstoss, 2009). Le changement global dans la position du trait de côte est estimé à l'aide de NSM (Oyedotun, 2014).

## 5.2.2. Méthode des points extrêmes

La méthode des points extrêmes (« *End Point Rate* » - EPR) est la distance sur le transect entre deux traits de côte le plus récent et le plus ancien divisé par le nombre d'années séparant ces traits de côte (Himmelstoss, 2009; Jamont, 2014).

 $R = D/T_e$  (5-1) où R est la vitesse en mètres par an (m/an), D est la distance en mètres, et T<sub>e</sub> est le laps de temps écoulé entre la plus ancienne et la plus récente ligne de la côte (ans).

EPR fonctionne toujours bien quand nous avons seulement deux traits de côte pour analyser l'évolution de la ligne du rivage (Thieler et al., 2005).

## 5.2.3. Régression linéaire

Une droite de régression linéaire («*Linear Regression* – LRR ») des moindres carrés est établie grâce à toutes les intersections des traits de côte historique pour un transect. La pente de cette droite dans (5-2) est la vitesse de changement annuel de la ligne du rivage en mètres par an (Himmelstoss, 2009; Jamont, 2014).

$$y = m. x + b \tag{5-2}$$

Où: y est la distance de la ligne de base, m est la pente de la régression et b est

l'ordonnée d'abscisse nulle

## 5.2.4. Régression linéaire pondérée

Une régression linéaire aux moindres carrés (« *Weighted Linear Regression* » - WLR) est utilisée avec prise en compte de la pondération en fonction de l'incertitude des données. La régression linéaire aux moindres carrés est utilisée en pondérant chaque valeur. La pondérée est l'inverse de l'incertitude positionnelle totale au carré (Fletcher et al., 2011). Cette méthode augmente l'influence des points de rivage avec la plus petite incertitude totale sur la droite de régression ajustée (Himmelstoss, 2009). La méthode WLR nécessite au moins trois positions historiques du trait de côte (Fletcher et al., 2011). La pente de la régression dans (5-3) est la vitesse de changement du trait de côte en mètres par an.

 $y = m_w \cdot x + b_w \tag{5-3}$ 

Où:  $m_w$  est la pente de la régression (méthode WLR), et  $b_w$  est l'ordonnée d'abscisse nulle.

## 5.2.5. Enveloppe du changement du trait de côte

L'enveloppe de la modification de la ligne du rivage signale une distance, pas un taux. *« Shoreline Change Envelope »* (SCE) est la distance entre la mesure la plus éloignée du littoral et la plus proche de la ligne de base à chaque transect. Cela représente la variation totale de mouvement de rivage pour toutes les positions du rivage disponibles et n'est pas lié à leurs dates (Himmelstoss, 2009).

## 5.2.6. Moindres carrés médians

Le procédé de montage de la ligne aux points de données suit la même logique que la méthode LRR. « *Least Median of Squares* » (LMS) est déterminé par un processus itératif qui calcule toutes les valeurs possibles de la pente (le taux de variation) dans une gamme restreinte d'angles en suivant une approche décrite dans l'étude de Rousseeuw et Leroy (1987) (Himmelstoss, 2009).

## 5.2.7. Critères de qualité de l'évaluation de l'évolution de la ligne de la côte

L'écart-type de la pente d'une droite avec l'intervalle de confiance LCI et WCI correspondent à la régression linéaire et à la régression linéaire pondérée, respectivement. Ils exposent les incertitudes des vitesses de changements, en mètres par an (Himmelstoss, 2009).

Le coefficient de détermination ( $R^2$ ) est le pourcentage de variance dans les données qui s'explique par une régression (Himmelstoss, 2009). Il est utilisé pour vérifier la qualité d'une régression.

## 5.3. Description du modèle LITPACK

Les résultats de modèle couplé MIKE21/3 FM, dans la section 4.3.4 ont été remis au modèle morphodynamique, qui simule l'évolution du littoral dans la zone d'étude. Le modèle numérique LITPACK est utilisé afin d'estimer l'évolution du littoral en 1-D. LITPACK développé par DHI est un logiciel d'ingénierie professionnelle pour la modélisation du transport des sédiments non cohésif dans les vagues et les courants, la dérive littorale, l'évolution du trait de côte, et le développement de profil le long des plages quasi-uniformes (DHI, 2014b). Il contient des modules tels que LITDRIFT, LITLINE, et LITPROF, etc. ... Ce logiciel permet de calculer la houle dans la zone de déferlement, le courant de houle et le transport sédimentaire pour une plage uniforme. Les données nécessaires pour ce modèle sont des houles assez proches de la côte qui sont extraites des résultats du modèle couplé MIKE21/3 FM, des profils de plage et des paramètres des sédiments.

Le premier module LITDRIFT, un modèle de transport des sédiments à une dimension, permet de coupler des houles, des courants, et des vents pour estimer d'une part le courant de dérive et d'autre part la capacité de transits sédimentaires. Ce modèle prend en compte les effets du frottement sur le fond, des hauts-fonds, du déferlement, et de l'agitation des vagues. Les données d'entrée du modèle sont un profil et une granulométrie moyenne caractéristiques de la plage et des données de houle près du rivage (DHI, 2014a).

Le courant de dérive est calculé en utilisant l'équation d'équilibre de quantité de mouvement parallèle au rivage (DHI, 2014a) :

$$-\frac{1}{\rho_{w}}\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{1}{\rho_{w}}\tau_{s}\sin\theta_{w} + gdI = \frac{v^{2}}{c^{2}} - \frac{\partial}{\partial x}\left(Ed\frac{\partial v}{\partial x}\right)$$
(5-4)

$$E = \frac{4a_b}{\tau} \cos^2 \alpha \tag{5-5}$$

$$a_b = U_b \frac{T}{2-} \tag{5-6}$$

$$U_b = \frac{\pi H}{T \sinh(kd)} \tag{5-7}$$

0ù :

C est le coefficient de résistance ;

V est la vitesse moyenne sur la profondeur ;

 $S_{xy} \mbox{ est}$  le tenseur de rayonnement dans le plan local xy, agissant dans une direction parallèle à la côte ;

E est le coefficient de transfert de quantité de mouvement (le coefficient d'échange de quantité de mouvement) ;

ab est l'amplitude du mouvement orbital des vagues ;

T est la période des vagues ;

 $\alpha$  est la direction principale des vagues dominantes ;

 $\tau_s$  est la contrainte de cisaillement du vent ;

 $\theta_w$  est l'angle entre la direction du vent et la normale à la côte ;

I est la pente littorale de la surface de l'eau.

Les autres paramètres se trouvent dans le Glossaire, p. 17.

Le transport total par charriage et suspension est alors évalué par le modèle. Le modèle calcule le transport net et brut du littoral (DHI, 2014a). En effet, le transport des sédiments ( $Q_s$ ) est d'abord calculé aux points spécifiés dans le profil en utilisant le modèle STP (Section 4.3.3.2) (DHI, 2014a). L'interpolation des transports des sédiments est ensuite réalisée pour tous les points du profil. La capacité de transport de sédiments ( $Q_{sc}$ ) est ensuite transférée en transport solide ( $Q_s$ ) en introduisant la porosité (DHI, 2014a).

$$Q_{sc} = \frac{1}{(1-n)} Q_s \tag{5-8}$$

La dérive littorale annuelle totale ( $Q_{sa}$ ) est enfin calculée par la contribution du transport de chaque houle incidente qui se produit durant une année (DHI, 2014a).

 $Q_{sa} = \sum_{i=1}^{n} Q_{sc} \cdot P(i)$  (5-9) Où P est la durée de l'événement de houle spécifiée en pourcentage de l'année (la somme de toutes les durées est de 100%), « i » est l'indice de l'événement de houle et « n » est le nombre total des événements de houle durant une année.

## 5.4. Détermination de l'évolution de la ligne du rivage

Dans un premier temps, nous allons porter notre attention sur la méthodologie. Dans un deuxième temps, l'acquisition des positions de la ligne du rivage sera exposée. Dans un troisième temps, l'incertitude des données sera évaluée. Dans un quatrième temps, les périodes de calcul seront choisies. Dans un cinquième temps, la configuration de DSAS sera réalisée. Enfin, les résultats sur l'évolution de la ligne du rivage seront analysés.

## 5.4.1. Méthodologie

Tout d'abord, les techniques d'extraction de la ligne du rivage ont été mentionnées dans de nombreuses études. Les techniques utilisées dans nos travaux reposent sur les techniques de photo-interprétation, réalisées par le CEREGE (Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement) et Courtaud (2000) et les techniques d'extraction de rivage à partir des levés GPS, DGPS, et LiDAR (Figure 5-1).

Puis, l'outil DSAS été utilisé pour analyser la modification de la ligne de côte

(Figure 5-1). Nous évaluons les changements globaux de la position du rivage (en mètres) par méthode « *Net Shoreline Movement* » (NSM) (Figure 5-1). Les vitesses annuelles de modifications du trait de côte (en mètres par an) sont estimées à chaque transect en utilisant trois méthodes statistiques : « *End Point Rate* » (EPR), « *Weighted Linear* Regression » (WLR), et « *Linear Regression Rate* » (LRR). Les vitesses de changements de la ligne du rivage à court, moyen, et long terme sont évaluées.

Ensuite, nous utilisons une extrapolation de ces vitesses afin de prédire les mouvements du trait de côte à venir (Figure 5-1).

Enfin, nous essayons d'analyser des régressions entre l'évolution de la ligne du rivage et certains facteurs de l'érosion côtière (houle, élévation du niveau marin, pente de la plage, et orientation de la côte) (Figure 5-1).



Figure 5-1 : Méthodologie pour l'analyse des changements du trait de côte.

## 5.4.2. Acquisition des positions de la ligne du rivage

Dans nos travaux, certaines sources sont utilisées pour obtenir les positions de la ligne du rivage. Premièrement, les données des côtes utilisées pour nos travaux sont acquis à partir des travaux du CEREGE et de Courtaud (2000) de 1920 à 1998. La figure 5-2 présente la photographie aérienne au tombolo à partir des organismes publics et privés. Les positions de la côte sont extraites des photographies aériennes par certains organismes tels que IGN, Centre Camille Jullian (CNRS, Aix-en-Provence), Société Aérial (Aix-Les Milles) (Tableau 5-1). Cette base de données se compose de douze lignes de rivage de 1920, 1950, 1955, 1960, 1970, 1971, 1984, 1987, 1991, 1994, 1995, et 1998. Les différentes étapes du traitement des photographies aériennes sont décrites par Courtaud (2000) tels que choix d'une image de référence, la rectification géométrique des photographies aériennes disponibles, la numérisation du trait de côte, et

l'estimation d'incertitudes. Deuxièmement, les lignes du rivage entre 2000-2010 et 2012 sont extraites d'une part des levés GPS, DGPS, à partir de l'EOL (Etude et observation du Littoral), d'autre part des levés LiDAR (données bathymétriques et topographie) à partir du SHOM.



Figure 5-2 : Photographies aériennes pour le tombolo en 1971.

Tableau 5-1 : Photographies aériennes au tombolo de Giens à partir des organismes publics et privés (Courtaud, 2000).

Year	Organism	Year	Organism	Year	Organism	Year	Organism
1940 to	Centre Camille	1972	IFN	1982	IGN	1991	IGN
1944	Jullian						
1950	IGN	1976	IGN	1984	Société Aérial	1993	IGN
1955	IGN	1977	IGN	1987	IGN	1994	Société Aérial
1960	IGN	1978	IGN	1988	IGN	1997	IGN
1971	IGN	1979	IGN	1989	IGN	1998	IGN

D'abord, tous les traits de côte sont projetés au même système géographique (Lambert 93) (Faye et al., 2011). Ensuite, chaque trait de côte est un « *shapefile* » au format « \* .shp ». Il doit avoir des attributs tels que date, longueur, ID, « *shape* », et incertitude. La date des traits de côte historique est ajoutée pour l'attribut date au format MM/JJ/AAAA. L'incertitude du trait de côte est calculée et entrée pour l'attribut

d'incertitude. Les autres attributs (longueur, ID, et *« shape »*) sont générés automatiquement dans ArcGIS, lorsqu'un *« shapefile »* a été créé. Enfin, nous obtenons une collection de positions du trait de côte au format *« shapefile »* pour la période de 1920 à 2012, composée de vingt-quatre positions de la ligne du rivage pour les années 1920, 1950, 1955, 1960, 1970, 1971, 1984, 1987, 1991, 1994, 1995, 1998, 2000-2010, et 2012.

## 5.4.3. Incertitude des données

Les incertitudes seront estimées pour deux périodes différentes selon leurs sources.

## 5.4.3.1. Incertitudes des données de 1920 à 1998

Les types d'incertitude seront d'abord exposés. L'incertitude positionnelle totale sera ensuite présentée.

#### a) Types d'incertitude

Il existe deux types d'incertitude tels que l'incertitude positionnelle et l'incertitude de mesure (Fletcher et al., 2011). Cinq principales sources d'erreur sont évaluées dans la détection de positions de la côte à partir des photographies aériennes utilisées pour cette étude telles que erreur de saison, erreur de fluctuation de marée, erreur de numérisation, erreur de pixel, et erreur de rectification (Fletcher et al., 2011; Romine et Fletcher, 2012).

#### i. Incertitudes positionnelles

Elles sont liées aux saisons et marées (Fletcher et al., 2011).

Erreur saisonnière (Es)



Figure 5-3 : Profil saisonnier de la plage aux bornes B08 (A) et B11 (B) du tombolo occidental dans les observations saisonnières différentes de 2002 à 2003 (Serantoni et Lizaud, 2000-2010).

C'est l'erreur de mouvements de la position de la ligne du rivage (fluctuations saisonnières du rivage) sous l'action des vagues et tempêtes (Fletcher et al., 2011). Les différences des positions saisonnières du trait de côte sont calculées sur les profils de plage au printemps et en automne à partir des mesures d'EOL à la plage de l'Almanarre (Figure 5-3) (Fletcher et al., 2011).

Les différentes étapes de calcul de cette erreur sont décrites par Fletcher et al. (2011). L'erreur saisonnière a été évaluée à  $\pm$  5 mètres.

#### **\diamond** Erreur de fluctuation de la marée ( $E_t$ )

C'est l'erreur associée à une variabilité horizontale de la position du trait de côte en raison des marées (Fletcher et al., 2011). L'amplitude des marées (0,3 mètre) du site d'étude est négligeable. L'erreur de fluctuation de la marée est donc d'environ 0 mètres (Addo et al., 2011).

#### ii. Incertitudes de mesure

Elles sont liées aux erreurs tels que numérisation du trait de côte, résolution de l'image, et rectification de l'image.

#### *Erreur de numérisation*(*E*<sub>*d*</sub>)

C'est l'erreur liée à la numérisation de la ligne du rivage (Fletcher et al., 2011). Elle est estimé à environ ± 4.5 mètres (Romine et Fletcher, 2012).

#### $\clubsuit \quad Erreur \ de \ pixel \ (E_{P})$

Elle se rapporte à la précision de l'image (résolution). Elle est la taille de pixel de l'image (Fletcher et al., 2011). Selon Courtaud (2000), la taille de pixel de l'image est de 2,5 à 5 mètres. Un écart maximal de  $\pm$  2 pixels ( $\pm$  5-10 mètres) est estimé pour la détection de la ligne du rivage (Courtaud, 2000). Alors, un erreur de pixel moyenne de  $\pm$  7.5 mètres est raisonnable.

#### **Erreur de rectification** $(<math>E_r$ )

C'est l'erreur quadratique moyenne du processus de rectification d'image (Fletcher et al., 2011; Romine et Fletcher, 2012). L'erreur de rectification est proposé ± 0.1-7.3 mètres (Romine et Fletcher, 2012). Nous avons décidé que l'erreur de rectification peut être choisie ± 1 mètres (Robichaud et al., 2012).

#### b) Incertitude positionnelle totale

L'incertitude positionnelle totale  $(U_t)$  est le résultat de toutes les erreurs qui ont été précédemment estimées. Il est défini comme la racine carrée de la somme des carrés des sources d'erreur précédemment (Fletcher et al., 2011; Romine et Fletcher, 2012). Elle est calculée en utilisant (5-10):

$$U_t = \pm \sqrt{E_s^2 + E_t^2 + E_d^2 + E_p^2 + E_r^2}$$
(5-10)

L'estimation de chaque type d'erreur est énumérée dans le tableau 5-2. Les incertitudes positionnelles totales sont utilisées comme des pondérées (régression linéaire pondérée ou des moindres carrés pondérés) dans l'analyse des changements du trait de côte dans DSAS.

Tableau 5-2 : Incertitudes sur les lignes historiques du rivage de 1920 à 1998.

Incertitude	Incertitude p	ositionnelle	Incertitude de mesure			Incertitude positionnelle
	Es	Et	Ed	Ep	Er	totale U <sub>t</sub> (m)
Valeur (m)	± 5	$\approx 0$	± 4,5	± 7,5	± 1	± 10

L'incertitude annuelle (U<sub>a</sub>) est l'incertitude dans le modèle de détermination de la vitesse de changement du trait de côte (Addo et al., 2011; Fletcher et al., 2011). Comme la vitesse de changement, elle est exprimée en mètre par an. Elle est calculée comme étant la somme de la racine des carrés des incertitudes positionnelles totales pour chaque trait de côte divisé par la période d'analyse (T) dans (5-11) (Fletcher et al., 2011) :

$$U_{a} = \pm \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} u_{ti}^{2}}}{T}$$
(5-11)

Où « i » est indice de la ligne de la côte.

## 5.4.3.2. Incertitudes des données de 2000 à 2012

L'incertitude de la cartographie est estimée d'environ ± 5 mètres pour la période de 2000 à nos jours (Anders et Byrnes, 1991; Crowell et al., 1991; Thieler et Danforth, 1994; Moore, 2000). Ainsi, une incertitude globale peut être choisie de ± 5 mètres pour les traits de côte entre 2000 et 2012.

## 5.4.4. Determination des périodes de calcul

A long terme, la période de calcul des vitesses d'évolution du rivage est de 92 ans. Tous les traits de côte ont servi à calculer dans DSAS. Les données des rivages disponibles de 1920 à 2012 ont été utilisées afin d'évaluer les modifications du trait de côte dans cette période (Figure 5-4A, p. 264).

A moyen et court terme, les données du rivage sont divisées en quatre périodes en fonction des aménagements réalisés sur le tombolo (Annexe E : p. - 45 -) : de 1920 à 1960 (sans aménagements), de 1960 à 1971 (l'installation de gabions du tombolo ; construction de la route du Sel), de 1971 à 1998 (la mise en place de palissades en bois, d'enrochements et de ganivelles, ...), et de 1998 à 2012 (l'enlèvement complet des enrochements, reconstitution du cordon annuel). Les intervalles de temps de chaque période varient entre 11 et 40 ans. Il suffit d'estimer les changements de la ligne de la côte dans le site d'étude.

## 5.4.5. Configuration de DSAS

Il existe quatre grandes étapes d'implémentation de DSAS:

A la première étape, une ligne de base est définie sous le format « *shapefile* » (\* .shp) avec certains attributs (nom, type, et propriétés géographiques). Elle est créée du Nord au Sud presque parallèle à l'orientation générale de la côte, à travers des bornes B01-46. La localisation de la ligne de base est sur la terre. Elle est utilisée pour calculer la distance au trait de côte à chaque transect orthogonal.

A la deuxième étape, une collection des lignes de rivage et la ligne de base sont créées dans ArcGIS pour DSAS (Figure 5-4A). Une « *Personal Geodatabase* » (\*.mdb) est établie en utilisant l'outil « *ArcCatalog* » dans ArcGIS pour chaque période.



Figure 5-4 : (A) La position du trait de côte à différentes années (1920-2012). (B) Les transects générés le long de la côte et leurs positions relatives aux bornes terrestres.

Les « Feature Class » (type de « Line Features ») de la ligne du rivage et la ligne de base sont créées dans chaque « Personal Geodatabase ». Toutes les positions du rivage pour chaque période spécifiée sont annexées à un « shapefile » unique.

Dans une troisième étape, les transects orthogonaux sont générés à un espacement

spécifié le long de la côte à l'aide de DSAS lorsque les « *Personnal geodatabase* » sont prêtes dans ArcGIS. Ils sont engendrés de manière automatique par DSAS (Jamont, 2014).Ils sont équidistants et perpendiculaires à la ligne de base. Un total de 246 transects orthogonaux est généré du Nord au Sud à un espacement 25 mètres le long de la ligne de base. Il représente assez finement l'évolution du trait de côte. La longueur du transect est de 200 mètres. Ces transects couvrent l'ensemble de la côte des zones A à D. Ils sont numérotés du Nord (Transect ID 1) au Sud (Transect ID 246) (Figure 5-4B). Les transects qui ne se croisent pas au moins trois traits de côte, ne sont pas inclus dans l'analyse de changements de la ligne du rivage.

Dans la dernière étape, après la création des transects orthogonaux, DSAS calcule les changements globaux des positions du trait de côte (les distances du mouvement de la ligne du rivage) en utilisant la méthode NSM. La vitesse de modifications du trait de côte le long de chaque transect de calcul est calculée pour chaque période en utilisant les méthodes EPR, WLR et LRR. La vitesse de changements régionaux est estimée en utilisant la moyenne des vitesses de changements de tous les transects dans chaque zone étudiée. Le coefficient de détermination (R<sup>2</sup>) est calculé par DSAS. Le coefficient de détermination moyen est la moyenne de tous les coefficients de détermination à chaque transect. Les incertitudes de vitesse annuelle de variation en mètres par an sont les intervalles de confiance 95 % (LCI95 ou WCI95).

## 5.4.6. Résultats sur l'évolution du trait de côte

D'abord, les mouvements nets de la ligne du rivage sont présentés. Puis, les vitesses annuelles de changements de la ligne de la côte sont estimées. Ensuite, nous évaluons la qualité de l'estimation de l'évolution du rivage. Enfin, les tendances d'érosion et de dépôt ainsi que la tendance de mouvements du trait de côte sont analysées.

#### 5.4.6.1. Mouvement net du trait de côte

Les mouvements nets du trait de côte sont exposés pour chaque zone de A à D.

#### a) Zone A

La Zone A se compose de 53 transects (transect numéro 1 à 53). La figure 5-5A montre que la zone A comprend une zone stable entre les transects 1 et 33. Au sud de la zone (transects 33 à 46 correspondant aux bornes B01-B03) on observe des mouvements positifs du trait de côte avant 1971. Les mouvements négatifs sont observés après 1971, peut-être en raison de la présence d'une route du Sel, de l'enrochement et du Canal de Ceinture, qui influent sur l'équilibre des sédiments naturels également l'installation du déversoir.

#### b) Zone B

Les transects de zone B sont 51 (Figure 5-5B), de 54 à 104. Elle a une valeur

positive indiquant l'accrétion (maximum 12 mètres avec la méthode NSM) pour une approche à court terme de 1960, peut-être en raison de la présence de rechargements de plage pendant la construction de la route du Sel (Figure 5-5B). De plus, les petites zones d'accrétion sont retrouvées à la partie nord et sud de cette zone d'une part aux court et moyen termes de 1920 à 1960 et de 1998 à 2012, d'autre part à long terme (1920-2012) (Figure 5-5B).

Ne prenant pas compte des deux cas de phénomènes d'accrétion ci-dessus, nous pouvons confirmer qu'elle est une zone d'érosion. La Zone B a une valeur négative indiquant l'érosion en ce qui concerne l'approche à moyen terme de 1971 à 1998 en raison de l'anthropisation (route du Sel, enrochement, et Canal de Ceinture) (Figure 5-5B).



Figure 5-5 : Mouvement net du trait de côte à court, moyen, et long termes le long des transects dans les zones A (A) et B (B) au tombolo Ouest.

#### c) Zone C

La Zone C se compose des transects 105 à 131. Nous observons que les mouvements nets de changements à court terme concernant la période 1998-2012 et à long terme de 1920-2012 sont opposés. Depuis 1971, cette zone a tendance à se déposer car elle n'est pas exposée au régime de sud-ouest comme la zone B. Nous avons constaté que le transect numéro 117 près de la borne B19 est stable pendant les périodes de 1971-1998 et de 1998-2012 (Figure 5-6A).

#### d) Zone D

Le nombre de transects de zone D est de 115. La Zone D se compose des transects 132 à 246. La partie Sud de la zone D du numéro 224 à 246 (de la borne B46 à l'extrémité sud du littoral) est stable. La partie Nord de la zone D du transect numéro 126 à 224 présente la plus grande quantité d'érosion (environ -65 mètres par méthode NSM) au transect numéro 162 à moyen terme de 1920-1960 (Figure 5-6B).

Elle a également enregistré les plus fortes accrétions (environ 40 mètres avec la méthode NSM) au transect numéro 151 par l'approche à court terme de 1960 à 1971 (Figure 5-6B).



*Figure 5-6 : Mouvement net du trait de côte à court, moyen, et long termes le long des transects dans les zones C (A) et D (B) au tombolo Ouest.* 

## 5.4.6.2. Vitesse annuelles de changements du trait de côte

Similairement, les vitesses annuelles de modifications de la ligne du rivage sont aussi présentées pour chaque zone.

#### a) Zone A

Seulement 9 % des transects sont érodés et 30 % sont accrétés à long terme (Tableau 5-3). La vitesse moyenne de changements à long terme pour tous les transects d'érosion dans la zone A est de  $-0,15 \pm 0,12$  mètre par an en utilisant la méthode WLR (Tableau 5-3). L'accrétion dans la zone A représente une vitesse

moyenne à long terme de 0,04  $\pm$  0,05 mètre par an estimée par méthode LRR (Tableau 5-3).

Tableau 5-3 : Tendances de changement de la ligne du rivage pour la zone A (Zone Nord) du tombolo occidental (les valeurs négatives et positives indiquent l'érosion et l'accrétion, respectivement).

Dáriada		Court terme Moyen terme						
Periode		1960-1971	1998-2012	1920-1960	1971-1998	1971-2012	Long terme	
NTE		4	17	0	18	17	5	
NTA		17	2	21	3	4	16	
EP (m)		75	400	0	425	400	100	
AP (m)		400	25	500	50	75	375	
Taux d'EP (%	)	8	32	0	34	32	9	
Taux d'AP (%	5)	32	4	40	6	8	30	
	Ε	-0,01	-0,05	0,00	-0,04	-0,06	-0,01	
VE minimal	L	0,00	-0,03	0,00	-0,02	-0,02	-0,01	
	W	0,00	-0,02	0,00	-0,02	-0,07	-0,01	
	Ε	-0,01	-0,38	0,00	-0,29	-0,33	-0,02	
VE moyen	L	0,00	-0,43	0,00	-0,26	-0,23	-0,02	
J.	W	0,00	-0,63	0,00	-0,26	-0,40	-0,15	
	Ε	-0,01	-0,62	0,00	-0,59	-0,47	-0,03	
VE maximal	L	0,00	-0,63	0,00	-0,46	-0,33	-0,06	
	W	0,00	-0,98	0,00	-0,47	-0,58	-0,22	
	Ε	0,13	0,08	0,01	0,05	0,00	0,01	
VA minimal	L	0,20	0,00	0,15	0,03	0,00	0,01	
	W	0,20	0,03	0,15	0,03	0,01	0,01	
	Ε	0,56	0,08	0,23	0,05	0,00	0,06	
VA moyen	L	0,51	0,00	0,28	0,03	0,00	0,04	
	W	0,51	0,05	0,28	0,03	0,01	0,01	
	Ε	0,93	0,08	0,36	0,05	0,00	0,14	
VA maximal	L	0,81	0,00	0,38	0,03	0,00	0,07	
	W	0,81	0,07	0,38	0,03	0,01	0,01	

NTE = nombre de transects de l'érosion ; NTA = nombre de transects de l'accretion ; EP = érosion de la plage ; AP = accretion de la plage ; E = EPR ; L = LRR ; W =WLR ; VE = vitesse d'érosion (m/an) ; VA = vitesse d'accretion (m/an) ; km = kilomètre ; m/an = meter par an.

La figure 5-7A,C,E résume les vitesses de changements pour chaque période étudiée. La vitesse maximale d'érosion à long terme (-0,22 ± 0,16 mètre par an) est retrouvée au transect numéro 47 (près de la borne B02) par méthode WLR (Figure 5-7E). La vitesse d'accrétion maximale à long terme (0,14 ± 0,19 mètre par an) est repries au niveau du transect numéro 38 (près de la borne B01) par méthode EPR. Le long de la zone A, les vitesses à long terme (1920-2012) ont des tendances similaires d'une part avec des vitesses à court terme (1920-1960) en utilisant la méthode EPR, d'autre part avec celles à court terme (1971-1998) par méthode WLR (Figure 5-7A,E). Environ 32 % des transects sont érodés à court terme (1998-2012) et 23 % sont déposés à long terme de 1920-2012 (Tableau 5-3). La vitesse d'érosion maximale à court terme (-0,98 ± 0,54 mètre par an) est retrouvée au niveau du transect numéro 47 près de la borne B02 (Figure 5-7C). La vitesse d'accrétion maximale à court terme 53 (environ  $0,93 \pm 1,82$  mètres par an par méthode EPR)

période de 1960 à 1971 (Figure 5-7A). Dans la zone A, la vitesse moyenne à moyen terme de 1971 à 2012 (-0,40  $\pm$  0,15 mètre par an par méthode WLR) indique une érosion plus forte que celui à long terme de 1920 à 2012 (-0,15  $\pm$  0,12 mètre par méthode WLR) (Figure 5-7E).



Figure 5-7 : Vitesses de changements annuels du trait de côte à court, moyen et long termes, dans les zones A (à gauche : A, C, et E) et B (à droite : B, D, et F) du tombolo Ouest en utilisant les méthodes EPR (A et B), LRR (C et D), et WLR (E et F).

#### b) Zone B

Cette zone représente une forte érosion en raison de son exposition aux fortes vagues, vents, et courants sagittaux des régimes d'Ouest et de Sud-Ouest en hiver. Dans la zone B, la majorité des rivages ont été érodés. Cette zone représente la plus forte érosion du tombolo Ouest (Tableau 5-4 et Figure 5-7B,D,F). Le milieu de la zone B du transect numéro 65 à 88 indique une érosion à long et court termes sauf sur une période de 1960 à 1971 (Figure 5-7B,D,F).

Période		Court terme Moyen terme						
		1960-1971	1998-2012	1920-1960	1971-1998	1971-2012	Long terme	
NTE		4	34	32	51	51	46	
NTA		47	17	19	0	0	5	
EP (m)		75	825	775	1 250	1 250	1 125	
AP (m)		1150	400	450	0	-25	100	
Taux d'EP (%	)	8	67	63	100	100	90	
Taux d'AP (%	5)	92	33	37	0	0	10	
	Ε	-0,06	-0,01	-0,03	-0,11	-0,13	-0,01	
VE minimal	L	0,00	-0,04	-0,03	-0,14	-0,03	-0,02	
	W	0,00	-0,09	-0,04	-0,13	-0,03	-0,01	
VE moyen	Ε	-0,09	-0,23	-0,20	-0,43	-0,32	-0,12	
	L	0,00	-0,43	-0,17	-0,45	-0,22	-0,15	
	W	0,00	-0,49	-0,19	-0,42	-0,32	-0,19	
	Е	-0,11	-0,42	-0,46	-0,78	-0,56	-0,26	
VE maximal	L	0,00	-0,83	-0,40	-0,72	-0,44	-0,25	
	W	0,00	-1,17	-0,42	-0,70	-0,75	-0,40	
	Ε	0,04	0,03	0,01	0,00	0,00	0,01	
VA minimal	L	0,15	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	
	W	0,14	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	
	Ε	0,65	0,18	0,10	0,00	0,00	0,01	
VA moyen	L	0,66	0,23	0,09	0,00	0,00	0,00	
	W	0,66	0,24	0,08	0,00	0,13	0,01	
	Ε	1,06	0,46	0,18	0,00	0,00	0,02	
VA maximal	L	1,11	0,47	0,19	0,00	0,00	0,00	
	W	1,10	0,65	0,19	0,00	0,29	0,02	

Tableau 5-4 : Tendances de changement de la ligne du rivage pour la zone B (Zone Nordcentral) du tombolo occidental.

L'érosion est la tendance générale à long terme dans la zone B (Figure 5-7B,D,F). 90 % des transects présentent l'érosion à long terme. Cette zone montre le plus faible taux d'accrétion de la plage (0%) des quatre zones dans la période 1971-1998 (Tableau 5-4).

La vitesse d'érosion moyen à long terme (1920-2012) est de -0,19  $\pm$  0,08 mètre par an en utilisant la méthode WLR (Tableau 5-4). La vitesse d'érosion maximale à long terme (-0,4  $\pm$  0,16 mètre par an) est estimée au niveau du transect numéro 73 (près de la borne B08) (Figure 5-7B,D,F).

Environ 100 % des taux à court terme (1971-1998) représentent l'érosion avec le pourcentage le plus élevé dans les quatre zones (Figure 5-7B,D,F). Les vitesses

d'érosion à moyen et court termes (1971-1998 et 1998-2012) dans la zone B sont les plus fortes dans quatre zones. La vitesse d'érosion maximale à court terme (-1.17  $\pm$  0,5 mètres par an) est estimée au niveau du transect numéro 73 (près de la borne B08). La vitesse d'accrétion a augmenté après le rechargement de plage à court terme de 1960 à 1971 (Figure 5-7B,D,F). La vitesse d'accrétion moyenne à court terme (0,66  $\pm$  1,9 mètres par an) est calculée en utilisant la méthode LRR pour la période de 1960 à 1971 (Figure 5-7D).

#### c) Zone C

La Zone C représente un peu d'érosion à long terme et une importante accrétion à court terme de 1998-2012 (Figure 5-8A,C,E). La vitesse moyenne à long terme dans la zone C indique une érosion de  $-0,18 \pm 0,07$  mètres par an en utilisant la méthode LRR (Tableau 5-5). Environ 100 % des transects indiquent l'érosion à long terme (Tableau 5-5). La vitesse d'érosion maximal à long terme ( $-0,35 \pm 0,16$  mètre par une) est estimée au niveau du transect numéro 114 (près de la borne B19) (Tableau 5-5). La vitesse d'accrétion maximale ( $0,17 \pm 0,14$  mètre par an) est retrouvée au transect numéro 127 (près de la borne B22).

Au contraire de l'analyse à long terme, l'approche à court terme suggère d'une part une plage stable, d'autre part une plage d'accrétion. Nous avons observé que le court terme de 1998 à 2012 dans la zone C indique une tendance d'accrétion (Figure 5-8A,C,E). En effet, 96 % des transects représentent l'accrétion dans le tableau 5-5. La vitesse moyenne à court terme (1998-2012) indique une accrétion de 0,44  $\pm$  0,35 mètres par an estimée par méthode WLR (Tableau 5-5). La vitesse d'accrétion maximale à court terme (0,76  $\pm$  0,78 mètre par an) est calculée au niveau du transect numéro 120 (près de la borne B20).

Période		Court terme		Moyen term	Moyen terme			
		1960-1971	1998-2012	1920-1960	1971-1998	1971-2012	Long terme	
NTE		20	1	27	12	12	27	
NTA		7	26	0	15	15	0	
EP (m)		475	0	650	275	275	650	
AP (m)		150	625	0	350	350	0	
Taux d'EP (%	)	74	4	100	44	44	100	
Taux d'AP (%	<b>b)</b>	26	96	0	56	56	0	
	Ε	-0,06	-0,01	-0,07	-0,06	-0,02	-0,06	
VE minimal	L	-0,03	0,00	-0,14	-0,07	-0,01	-0,02	
	W	-0,03	-0,02	-0,14	-0,05	-0,01	-0,02	
	Ε	-0,73	-0,01	-0,37	-0,40	-0,19	-0,17	
VE moyen	L	-0,58	0,00	-0,45	-0,51	-0,17	-0,18	
	W	-0,59	-0,05	-0,45	-0,49	-0,08	-0,12	
	Ε	-1,20	-0,01	-0,73	-0,67	-0,35	-0,35	
VE maximal	L	-1,06	0,00	-0,75	-0,75	-0,26	-0,33	
	W	-1,06	-0,07	-0,76	-0,75	-0,14	-0,16	
VA minimal	Ε	0,05	0,06	0,00	0,05	0,03	0,00	

Tableau 5-5 : Tendances de changement de la ligne du rivage pour la zone C (Zone Central) du tombolo occidental.

Dáriada		Court terme		Moyen term	е		Longtormo
Periode		1960-1971	1998-2012	1920-1960	1971-1998	1971-2012	Long terme
	L	0,12	0,09	0,00	0,06	0,05	0,01
	W	0,01	0,06	0,00	0,08	0,13	0,07
	Е	0,24	0,31	0,00	0,34	0,35	0,00
VA moyen	L	0,24	0,34	0,00	0,38	0,35	0,02
	W	0,21	0,44	0,00	0,41	0,33	0,14
	Е	0,51	0,57	0,00	0,57	0,52	0,00
VA maximal	L	0,43	0,59	0,00	0,56	0,51	0,03
	W	0,43	0,76	0,00	0,56	0,51	0,17

#### d) Zone D

La zone D présente les tendances d'accrétion au contraire à la zone B, sauf à court terme de 1920-1960 (Figure 5-8B,D,F). Pour l'approche à long terme entre 1920 et 2012, 58 % des transects représentent l'érosion (Tableau 5-6). L'érosion moyenne des berges à long terme sont environ de  $-0,17 \pm 0,16$  et  $-0,14 \pm 0,21$  mètres par an pour EPR et LRR, respectivement (Tableau 5-6). La vitesse d'érosion maximale à long terme ( $-0,35 \pm 0,16$  mètre par an) est retrouvée au transect numéro 184 (près de la borne B36) (Tableau 5-6).

Tableau 5-6 : Tendances de changement de la ligne du rivage pour la zone D (Zone Sud) du tombolo occidental.

Période		Court terme Moyen terme					
		1960-1971	1998-2012	1920-1960	1971-1998	1971-2012	Long terme
NTE		9	43	81	0	2	67
NTA		83	53	24	109	107	42
EP (m)		200	1 050	2 000	-25	25	1 650
AP (m)		2 050	1 300	575	2 700	2 650	1 025
Taux d'EP (%	)	8	37	70	0	2	58
Taux d'AP (%	5)	72	46	21	95	93	37
	Ε	-0,01	-0,01	-0,24	0,00	-0,01	-0,02
VE minimal	L	0,00	-0,01	-0,22	0,00	-0,01	-0,04
	W	0,00	-0,01	-0,23	0,00	-0,01	-0,02
VE moyen	Ε	-0,01	-0,32	-1,08	0,00	-0,06	-0,17
	L	0,00	-0,11	-1,06	0,00	-0,01	-0,14
	W	0,00	-0,14	-1,09	0,00	-0,06	-0,05
	Ε	-0,01	-0,69	-1,63	0,00	-0,11	-0,35
VE maximal	L	0,00	-0,27	-1,62	0,00	-0,01	-0,19
	W	0,00	-0,60	-1,64	0,00	-0,22	-0,12
	Ε	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01
VA minimal	L	0,39	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01
	W	0,38	0,01	0,00	0,03	0,01	0,01
	Ε	1,50	0,16	0,31	0,49	0,32	0,08
VA moyen	L	2,01	0,18	0,00	0,41	0,26	0,18
	W	1,99	0,41	0,00	0,42	0,30	0,22
	Е	3,60	0,31	0,67	1,06	0,69	0,14
VA maximal	L	3,79	0,38	0,00	0,87	0,53	0,45
	W	3,78	0,81	0,00	0,87	0,62	0,53



Figure 5-8 : Vitesses de changements annuels du trait de côte à court, moyen et long termes, dans les zones C (à gauche : A, C, et E) et D (à droite : B, D, et F) du tombolo Ouest en utilisant les méthodes EPR (A et B), LRR (C et D), et WLR (E et F).

Cette zone indique une accrétion de 37 % (long terme) et de 46 % (période écourtée de 1998-2012) des transects, suggérant une tendance générale de l'érosion

(Tableau 5-6). Elle a connu une accrétion avec une vitesse moyenne à long terme de  $0,18 \pm 0,25$  et  $0,22 \pm 0,18$  mètre par an en utilisant les méthodes LRR et WLR, respectivement (Tableau 5-6). Elle montre une vitesse d'accrétion le plus forte d'environ  $0,53 \pm 0,18$  mètre par an au niveau du transect numéro 147 (près de la borne B36) en utilisant la méthode WLR (Tableau 5-6). Le long de la zone D, les vitesses à long terme ont des tendances similaires avec celles à court terme sauf les périodes de 1920-1960 et de 1960-1971 (Figure 5-8B,D,F). La vitesse à court terme de 1920-1960 est opposée à celle de 1960-1971 (Figure 5-8B,D,F).

### 5.4.6.3. Répartition de coefficient de détermination

La figure 5-9A représente la distribution des valeurs du coefficient de détermination au tombolo Ouest.



Figure 5-9 : (A) Distribution du coefficient de détermination par méthode WLR au tombolo Ouest. (B) Vitesses de changements annuels du trait de côte à long terme de 1920-2012 en utilisant la méthode EPR au tombolo ouest.

Ces coefficients sont assez bons d'une part dans la partie Sud de la zone A et la zone B, d'autre part dans la partie nord de la zone D. La majorité de ceux-ci varie de 0,25 à 0,75 (Figure 5-9A). Pour l'approche de moyen terme (1971-2012), ces coefficients sont supérieurs à 0,5 d'une part entre les transects 40 et 80 dans la zone B,

d'autre part entre les transect 140 à 180 dans la partie nord de la zone D.

Les coefficients de détermination ne sont pas bons dans la zone C et la partie Sud de la zone D. Ils sont répartis principalement dans la gamme de 0 à 0,5 (Figure 5-9A). Entre les transects numéros 105 et 120, ils sont inférieurs à 0,25 à moyen terme de 1971-2012. Les transects numéros de 190 à 230 ont également plusieurs coefficients de détermination de l'ordre de 0,25 à 0,5.

### 5.4.6.4. Tendances d'érosion et d'accrétion

La figure 5-9B résume la vitesse de changement pour une période à long terme à l'aide de la méthode EPR. La zone Nord (zones A et B) présente les tendances d'érosion contrairement à la zone Sud (zones C et D). Cette évolution s'adapte aux tendances de la littérature (SOGREAH, 1988d; Courtaud, 2000). La vitesse d'érosion maximale à long terme (-0,35 ± 0,16 mètre par an) est trouvée au niveau du transect numéro 114 (près des bornes B18 et B19, Figure 5-9B).

La vitesse annuelle moyenne de recul du rivage varie de  $-0,01 \pm 1,82 \text{ à } -0,63 \pm 0,27$ mètres par an dans la partie Nord. Le tombolo Ouest a montré le plus forte vitesse d'accrétion environ 0,14 ± 0,16 mètre par an au niveau du transect numéro 147 (près de la borne B26) (Figure 5-9B). La vitesse d'accrétion annuelle moyenne du rivage est estimée entre 0,02 ± 0,14 et 2,01 ± 5,10 mètres par an dans la partie centrale et sud du tombolo Ouest.

### 5.4.6.5. Tendance des déplacements de la ligne du rivage

Nous avons utilisé une régression linéaire avec une pente des vitesses de changements annuels moyennes. Les extrapolations à dix, vingt, cinquante, et cent ans des positions du rivage sont estimées à partir des vitesses moyennes pour la période de 1971 à 2012. Durant cette période, le long de la côte de la plage de l'Almanarre, l'accrétion et l'érosion se produisent. Au Sud du tombolo Ouest, l'accrétion naturelle se produit avec une vitesse de dépôt moyenne de  $0,26 \pm 0,17$  à  $0,35 \pm 0,18$  mètre par an dans les zones C et D, respectivement. Au Nord du tombolo occidental en général le littoral est érodé ; la tendance générale est à l'érosion avec un recul en moyenne de  $-0,22 \pm 0,09$  à  $-0,40 \pm 0,15$  mètre par an dans les zones A et B, respectivement.

Le tableau 5-7 montre la tendance des déplacements du trait de côte au tombolo Ouest dans dix, vingt, cinquante et cent ans. Le trait de côte à court terme (2022) est prévu avec un recul d'au moins  $-2,2 \pm 0,9$  mètres dans les zones A et B. Similairement, la récession moyenne de la ligne du rivage en 2032 est estimée à au moins  $-4,4 \pm 1.8$ mètres. A long terme (2112), le long zones A et B, la ligne de côte pourra reculer d'une distance de 22 mètres (Tableau 5-7).

	Taux moyens de 1971		Tendance des déplacements du trait de côte (m)					
Zone			10	20	50	100		
	a 2012 (111/a	in j	(ans)					
	EPR	-0,33	-3,3	-6,5	-16,3	-32,6		
Α	LRR	-0,23	-2,3	-4,6	-11,6	-23,1		
	WLR	-0,40	-4,0	-7,9	-19,8	-39,6		
	EPR	-0,32	-3,2	-6,3	-15,8	-31,5		
В	LRR	-0,22	-2,2	-4,4	-11,1	-22,1		
	WLR	-0,32	-3,2	-6,4	-16,1	-32,2		
	EPR	0,35	3,5	7,1	17,7	35,5		
С	LRR	0,35	3,5	6,9	17,3	34,5		
	WLR	0,33	3,3	6,5	16,3	32,6		
	EPR	0,32	3,2	6,3	15,8	31,6		
D	LRR	0,26	2,6	5,2	12,9	25,9		
	WLR	0,30	3,0	6,0	15,1	30,2		

Tableau 5-7 : Prévisions des mouvements de la ligne de la côte occidentale au tombolo.

Les valeurs positives et négatives indiquent l'érosion et l'accrétion, respectivement.

# 5.5. Détermination de la capacité du transit sédimentaire

Dans le paragraphe précédent (Paragraphe 5.4. p. 252), nous avons évalué l'évolution du littoral par l'analyse de l'évolution du trait de côte de 1950 à 2012. Cette démarche servira également à la calibration et vérification des modélisations numériques.

Pour la détermination de la capacité du transit sédimentaire, la modélisation numérique du transport sédimentaire est réalisée à l'aide du module LITDRIFT du modèle mathématique LITPACK développé par DHI.

## 5.5.1. Domaine

Ce modèle couvre la zone côtière autour de domaines d'intérêt du tombolo occidental. Il simule le transit littoral en fonction des régimes de courant, vague actuelle et vent.

Les résultats de la modélisation hydrodynamique (Sections 4.6.7.6 et 4.8) ont été remis au modèle morphodynamique LITPACK. Les profils de plage (Figure 5-10) et le trait de côte ont construit la base géométrique pour la configuration du modèle.

Pour le rivage initial, une approche simplifiée est utilisée : les bathymétries sont disponibles dans une grille à résolution de 1 à 5 mètres (Litto3D). La ligne du rivage est définie comme la limite entre le niveau moyen de la mer et le terrain. Elle ne correspond pas à la ligne du cordon dunaire.



Figure 5-10 : Profil de la plage à la borne B08.

## 5.5.2. Conditions limites

Les conditions de vagues, de courants actuels, de niveaux d'eau et les caractéristiques des sédiments forment les conditions limites du modèle. Les données de houles et de courants disponibles de 1979 à 2014 ont été analysées et résumés par 8 régimes caractéristiques. Ces événements se produisent avec une fréquence calculée et sont le moteur de l'évolution du littoral. Les houles extraites ont été résumées en événements statistiques ramenés à une année (Cornec et al., 2008).

La figure 5-11 montre deux événements exemplaires. Le diagramme polaire des spectres de houles indique la direction et l'intensité des conditions de vagues. Pendant une année caractéristique, les événements de houles de directions de secteur Ouest dominent.

Comme autres conditions limites, les niveaux d'eau, les paramètres courants simulés et les vents ont été utilisés. Les paramètres caractéristiques des sédiments ont été pris à partir des paramètres de sédiments dans le chapitre 3.



Figure 5-11 : Différents régimes de houle à la borne B08 (A) et à la borne B33 (B) pris en compte dans la modélisation.

## 5.5.3. Calibration

L'évolution du littoral de 1971 et 2012 a été utilisée pour calibrer le modèle de transport sédimentaire. De plus, la tendance évolutive du tombolo Ouest est utile pour

le processus de calibration (Annexe E : p. - 45 -). La figure 5-12 présente une synthèse de l'évolution du trait de côte dans pour l'ensemble du tombolo Ouest pour la période de 1971 à 2012. Le littoral au secteur nord du tombolo est en érosion avec un recul de l'ordre de 0,451 mètre par an. Le secteur très abrité de la partie Sud du littoral où nous pouvons observer une accrétion de l'ordre de 0,283 mètre par an de 1971 à 2012.



*Figure 5-12 : Synthèse de l'évolution du trait de côte de 1971 à 2012 : accrétion (vert) et érosion (rouge).* 

## 5.5.4. Evaluation des capacités de transport sédimentaire

Pour évaluer la capacité de transport sédimentaire pour chaque secteur, le module LITDRIFT du modèle mathématique LITPACK a été utilisé. Dans notre travail, les simulations ont été effectuées en faisant varier l'orientation du trait de côte par pas de 1° afin de déterminer les capacités de transports brut et net de chaque secteur sédimentaire. Les résultats de ces séries de simulations sont illustrés graphiquement sous forme de deux graphes (Cornec et al., 2008). Premièrement, la distribution dans le profil des transports brut et net avec leurs capacités du transport respectifs (pour une orientation donnée) (Cornec et al., 2008). Deuxièmement, une courbe donnant les capacités des transports littoraux net et brut en fonction de la direction normale à la côte (l'orientation du trait de côte) (donnant également une indication d'orientation d'équilibre du trait de côte) (Cornec et al., 2008). Ces deux graphes sont donnés à titre d'exemple en figures 5-13 et 5-14 pour le secteur nord (B08) du tombolo occidental.

Pour chaque profil du littoral, les simulations de transport sédimentaire sont effectuées en faisant varier l'orientation du trait de côte par pas de 1° afin d'examiner les capacités de transport net et brut en fonction de la variabilité de l'orientation du rivage, le transport net correspond à la résultante de toutes les contributions de transport pondérées par leur fréquence d'occurrence et le transport brut correspond à la somme de ces contributions (Cornec et al., 2008). Les résultats de ces séries de simulations sont illustrés graphiquement sous forme de capacité du transport littoral net et brut en fonction de la direction normale à la côte (Cornec et al., 2008).

Un exemple de la capacité du transport sédimentaire net et brut en fonction de l'orientation du trait de côte est présenté sur la figure 5-13, à titre indicatif, pour le secteur Nord du tombolo.



Figure 5-13 : Capacité du transport sédimentaire en fonction de l'orientation du trait de côte, à titre indicatif, pour le secteur Nord (B08) : transport net (bleu) et brut (rouge) ; le transport net est positif (négatif) vers le Nord (Sud).

Sur ce littoral, la capacité du transport net est de l'ordre de -21 000 à 32 000 mètres cube par an portant vers le Sud (Figure 5-13). La zone grise représente l'enveloppe de l'orientation du trait de côte, allant de 256 à 258 degrés Nord dans ce secteur (Figure 5-13). Le transit net est très sensible à l'orientation du trait de côte : un pivotement de 1° du trait de côte peut provoquer un changement significatif du transit d'environ 2 000 mètres cube par an. L'orientation d'équilibre du trait de côte de ce secteur est située à environ 262 degrés Nord (Figure 5-13). Dans ce secteur, la capacité du transport brut est relativement stable de l'ordre de 12 000 à 33 000 mètres cube par an (Figure 5-13).

La figure 5-14 indique un transport sédimentaire se faisant essentiellement dans les fonds entre 0 et 4 mètres CM de profondeur. La figure 5-15 montre que le transit



littoral s'adapte avec la tendance évolutive sur la figure E-34, p. - 45 -.

Figure 5-14 : Distribution du transport sédim<u>e</u>ntaire dans le profil, à titre indicatif, pour le secteur nord (B08) et pour une orientation du trait de côte de 257 degrés Nord : transport net vers le Sud (vert) et vers le Nord (bleu) ; le profil représentatif du secteur Nord est indiqué en jaune.



*Figure 5-15 : Dérive littorale des sédiments le long du tombolo occidental (la polyligne en rouge : zones en érosion, en vert : zones en accrétion).* 

# 5.6. Evaluation des facteurs d'évolution du rivage du tombolo Ouest

D'abord, nous allons qualifier l'influence de certains facteurs d'évolution de la branche occidentale. Puis, leur classification est effectuée en se basant sur cette quantification.

## 5.6.1. Quantification de l'impact des facteurs

Certains facteurs d'évolution littorale occidentale sont exposés tels que houles, remontée du niveau moyen de la mer, pente de la plage, et orientation du trait de côte.

### 5.6.1.1. Houles

Les données statistiques des houles disponibles de 1999 à 2012 (14 ans) à la bouée de Porquerolles - 08301 aident à définir la condition annuelle. Les hauteurs significatives des houles à la côte sont extraites de la simulation dans Mike 21 (Lacroix et al., 2015b) pour tous les transects dans la condition annuelle (Figure 5-16A). Les fortes houles sont concentrées entre les transects 50 et 104 (Figure 5-16A).

Les régressions linéaires entre le mouvement net / la vitesse de déplacement du trait de côte (y) et la hauteur significative des houles (x) sont retrouvées dans la figure 5-16B,C. Leurs coefficients de détermination ne sont pas mauvais ( $R^2 = 0.35$ ).



Figure 5-16 : (A) Hauteurs significatives des houles à la côte aux différents transects à la plage de l'Almanarre. (B) Relation entre le mouvement net du trait de côte et la hauteur significative. (C) Relation entre la vitesse de changements et la hauteur significative.

Ces dispersions montrent que les érosions du rivage sont proportionnelles à la hauteur significative des houles. Un changement de hauteur significative des houles de 1 cm provoque d'une part une variation du mouvement net littoral d'environ -37.6 centimètres (Figure 5-16B) d'autre part celle de la vitesse de changement de l'ordre de - 0,9 centimètre par an (Figure 5-16C).

### 5.6.1.2. Remontée du niveau moyen de la mer

Une dispersion entre l'érosion nette du rivage (y) et le niveau marin (x) en millimètres est retrouvée sous la forme y = -0, 054 x -0,947. Cette régression indique que l'érosion nette du rivage est proportionnelle à l'élévation du niveau marin. Mais son coefficient de détermination est très mauvais (R<sup>2</sup> = 0,1). Avec une variation du niveau de la mer de 1 millimètre, la variation de l'érosion nette du rivage est de -0,054 mètre (Figure 5-17B).



*Figure 5-17 : Relation interactive entre les variations du niveau moyen de la mer et l'érosion nette du rivage dans la période de 1998 à 2010.* 

#### 5.6.1.3. Pente de la plage

La pente du rivage est la plus élevée au niveau des transects numéros de 50 à 100 (Figure 5-18A). Elle est forte dans les 100 premiers mètres du profil limité par les isobathes de 2 mètres. Nous observons que le mouvement net / la vitesse de changement du trait de côte et la pente de la plage ont une corrélation linéaire avec  $R^2 = 0,38$  (Figure 5-18B,C). Une pente d'équilibre des premiers 100 mètres du profil de la plage peut être estimée à environ 5 %. En effet, ERAMM (2001) indique une pente équilibre de la plage de 3 à 5 % près de la côte.



Figure 5-18 : (A) Pente du rivage des 100 premiers mètres du profil de la plage de l'Almanarre (en %) aux différents transects (B) Relation entre le mouvement net du trait de côte et la pente de la plage. (C) Relation entre la vitesse de changements et la pente du rivage.

### 5.6.1.4. Orientation du trait de côte

Les orientations de la côte occidentale varient entre 200° et 310° (Figure 5-19A). A la partie Nord du tombolo, elles sont comprises entre 200° à 258°.



Figure 5-19 : (A) Orientation du rivage de la plage de l'Almanarre (en degrés Nord) aux différents transects. (B) Relation entre la vitesse de changements et l'orientation du trait de côte en utilisant deux ordres d'une transformée de Fourier.

Le transit sédimentaire net est très sensible à l'orientation du trait de côte : un pivot de 1 ° de l'orientation de la côte peut causer une variation importante du transit sédimentaire d'environ 2 000 mètres cube par an.

Nous observons que l'orientation du rivage semble être proportionnelle avec le numéro de transect (transect ID) avec une bonne corrélation ( $R^2 = 0,79$ ) dans la figure 5-19A. La dispersion entre la vitesse de changement et l'orientation de la côte peut être estimée en utilisant deux ordres de la transformée de Fourier avec une faible corrélation ( $R^2 = 0,34$ ) (Figure 5-19B). Une orientation d'équilibre du littoral est retrouvée à environ 262° (Figure 5-19B).

## 5.6.2. Classification des facteurs

En se basant sur les résultats du modèle numérique et sur les conditions hydrodynamiques et morphologiques, nous proposons une évaluation d'impact des facteurs sur l'évolution du littoral ouest de Giens. Les résultats du modèle ont montré que la houle est la plus importante dans l'évolution du tombolo Ouest. De plus, les tempêtes jouent un rôle important dans l'érosion marine de ce littoral. Il est aussi obligatoire de prendre en compte l'impact fort des paramètres du fond tels que : les sédiments, la nature du fond, les biocénoses (posidonies), la géomorphologie, les ouvrages, et le reprofilage des plages. Les autres facteurs jouent un rôle faible ou moyen (Tableau 5-8).

Facteurs			Impact	:	
			faible	moyen	fort
Naturels	La montée lente du ni	veau marin		Х	
	Hydrodynamiques	Vents	Х		
		Marées	Х		
		Surcotes		Х	
	Tempêtes	Courants		Х	
	Temnêtes	Houles			Х
	Tempêtes	Fortes houles, courants			х
		sagittaux et dépressions			
	Sédimentologique	Taille du sédiment			Х
	Nature du fond	Rocheux + banc de grès			Х
	Biocénose	Posidonie			Х
	Géomorphologie	Pente du fond			Х
		Orientation de la côte			Х
		Chenaux d'érosion			х
Humains	Humains négatifs	Ouvrage	Х	Х	х
		Tourisme	Х	Х	

Tableau 5-8 : Facteurs d'évolution du littoral occidental.

Facteurs			;		
					fort
Humains pos	Humains positifs	Ouvrage			Х
		Restauration de la dune	Х	Х	
		Rechargement des plages		Х	
		Reprofilage des plages		Х	Х

## **5.7.** Conclusions

Nous avons déterminé l'évolution de la ligne du rivage à l'aide de l'outil DSAS en nous basant sur les traits de côte historiques. Nous avons aussi évalué les dérives littorales des sédiments le long du tombolo occidental à l'aide de l'outil LITDRIFT du LITPACK.

Tout d'abord, les vitesses annuelles de changements de la ligne historique du rivage sont simplement quantifiables par DSAS. Les vitesses de changements du trait de côte ont été calculées le long des transects. Une vitesse d'érosion moyenne est estimée à environ (- 0,01 à - 0,63) ± (0,27 à 1,82) mètres par an pour les zones A et B. Une vitesse d'accrétion moyenne estimée est de l'ordre de  $(0,02 \text{ à } 2.01) \pm (0,14 \text{ à } 5.10)$ mètre par an pour les zones C et D. Les vitesses individuelles le long de certains transects dans la partie Nord du tombolo Ouest peuvent atteindre jusqu'à -1.17 ± 0,5 mètres par an. Les vitesses de changements calculées s'adaptent aux tendances observées dans la littérature (SOGREAH, 1988d; Courtaud, 2000). Les coefficients de corrélation sont très bons dans la partie Sud de la zone A, la zone B, et la partie Nord de la zone D. Ils sont faibles dans la zone C et la partie méridionale de la zone D. La prédiction des mouvements futurs du trait de côte a été réalisée en utilisant une extrapolation des vitesses de changements annuels moyennes. Le littoral à court terme (2022) pourra reculer d'au moins  $-2.2 \pm 0.9$  mètres dans les zones A et B. De même, la récession moyenne du rivage dans l'année 2032 pourra atteindre -4,4 ± 1,8 mètres. À long terme (2112) le long des zones A et B, le littoral occidental sera érodé de 22 mètres.

Ensuite, la capacité du transport net du littoral occidental est de l'ordre de -21 000 à 32 000 mètres cube par an portant vers le Sud. Le transport sédimentaire net est très sensible à l'orientation de la côte. L'orientation d'équilibre de la côte occidentale est environ 262 degrés Nord (Figure 5-13). La capacité du transport brut est relativement stable de l'ordre de 12 000 à 33 000 mètres cube par an (Figure 5-13). Le transit sédimentaire se produisant principalement entre 0 et 4 mètres CM d'isobathes. Il s'adapte avec la tendance exposée dans la litérature.

Enfin, une évaluation d'impact des facteurs sur l'évolution du rivage occidental montre que la houle est le plus important facteur et que les tempêtes accompagnées des fortes houles, courants sagittaux, et dépressions jouent un rôle important dans l'érosion du rivage. Certains agents sont aussi importants tels que la pente du fond, l'orientation de la côte, les chenaux d'érosion, les bancs de grès, les sédiments, et les biocénoses (posidonies), etc. ... Les autres facteurs tels que le courant, la surcote, le vent, et la marée jouent un rôle faible ou moyen. L'action économique à différents niveaux a eu un impact négatif, a été un appui direct ou indirect à l'érosion (prélèvements, aménagements mal dimensionnés, et nettoyage inapproprié).

# Chapitre 6. Orientation et propositions de solutions de protection du littoral

La flèche littorale occidentale est confrontée à de gros problème d'érosion et notamment sur sa partie Nord. Avec une largeur de trente à quatre-vingt mètres, ce côté Ouest risque de disparaître (Anonyme, 2013).

Dans le précédent chapitre, le processus d'hydrodynamique et de transport de sable a été examiné au tombolo occidental. Les résultats montrent qu'il existe un déséquilibre dans la procédure érosion et accrétion dans le littoral occidental. Lorsqu'un déséquilibre sédimentaire a commencé à se produire, nous ne pouvons pas empêcher l'érosion en cas d'absence d'une solution appropriée.

Ce chapitre parlera des solutions déjà mises en œuvre ainsi que des solutions irréalisables. Puis, il sera consacré aux propositions de solutions pour la protection du littoral. Nous proposons des solutions envisageables contre l'érosion marine au tombolo occidental. L'objectif central des solutions est de réduire l'érosion marine et de développer l'accrétion. Si des solutions contre l'érosion sont choisies qui ne correspondent pas ou si l'impact sur le littoral est mal évalué, les mesures peuvent provoquer des problèmes plus graves au lieu d'améliorer l'érosion. Ainsi, la modélisation numérique est un outil d'aide à la prise de décision. Nous allons proposer et tester certaines solutions avec le modèle couplé local. Il s'agit de pré-valider certaines solutions pour le modèle MIKE. Ces solutions sont modélisées dans le logiciel MIKE21/3 FM. Nous avons établi un modèle des solutions combinées contre l'érosion. Nous allons vérifier les effets de ces solutions sur les plans hydrodynamique et morphologique. Sur la base des résultats obtenus, nous pouvons évaluer leur efficacité sur la diminution de l'érosion côtière ainsi que l'évolution du trait de côte. Les impacts négatifs tels que l'érosion après la construction doivent être éliminés autant que possible. Enfin, les recommandations sur le choix de la solution intégrée sont basées sur les résultats du modèle local, les données de terrain, et l'analyse des coûts.

## 6.1. Solutions douces de protection du littoral contre l'érosion marine au tombolo Ouest

La solution douce a pour but de stabiliser le littoral. Elle passe principalement par

la mise en place de ganivelles. Elle permet de réaliser la mise en œuvre de la gestion intégrée des zones côtières. Nous pouvons dire que de nombreux pays ont adopté des solutions douces faisables et efficaces. Il est important d'éviter un déséquilibre des sédiments et une complication de l'évolution du littoral qui est déjà complexe, difficile à prévoir. Il est facile de remarquer que cette solution a une action douce sur la mer et sur la plage. Il est nécessaire d'avoir une analyse de sa faisabilité puis de sa réalisation technique (SOGREAH, 1988d). Du point de vue environnemental, la solution douce est très pratique. Elle compose avec la mer pour stabiliser le littoral. C'est une solution efficace à long terme. L'investissement est peu coûteux et la solution durable.

## 6.1.1. Méthodes déjà mises en œuvre

Après la tempête de 1994 qui a créé une destruction du cordon dunaire et traversé de la route, une restauration du cordon dunaire est réalisée (Figure E-35 et Tableau E-26, p. - 46 -) (Anonyme, 2013).



Photo 6-1 : Ganivelles le long de la dune (A) et fermeture de la route du Sel (B).



Photo 6-2 : Déplacement de la route vers l'est (A) et affiche pédagogique (B) au tombolo Ouest (Than, 2013).
Plusieurs solutions de protection sont proposées et mises en place au tombolo occidental (Figure E-35 et Tableau E-26) : installation de ganivelles le long de la dune (Photo 6-1) ; une fermeture du parking Nord et une ouverture d'un parking Sud ; une fermeture de la route du Sel en hiver (Photo 6-1) ; recul stratégique (un déplacement de la route vers l'est, Photo 6-2) ; panneau éducatif (Photo 6-2) (Anonyme, 2013; Lacroix et al., 2015b). Ces dernières années, de nombreux travaux ont été réalisés pour renforcer ce cordon dunaire en partie Nord de la route du Sel (Tableau 6-1 et Annexe E, p. - 45 -).

		Materiaux					
Période	Travaux	Sable		Posidonie			
		Volume (T)	Source de sable	(m <sup>3</sup> )			
Nov. 2003	Curage du canal						
Déc. 2003	Formation du cordon	produit du cura stocké	age du canal de ceinture	+ matériaux			
Févr. 2004		3 000	sables roulés <sup>i</sup>				
Oct. 2004		300	Jardin des mers				
Déc. 2004	Refaire du cordon	800 m <sup>3</sup>	en stock	6 000			
Mars 2005		711	La rivière	700			
Avril 2005	Réaménagement du cordon du	unaire après des	truction du chalet				
Nov Dec. 2007		465	La rivière	? <sup>ii</sup>			
Mars 2008		492	La rivière	?			
Avril 2008		1016	La rivière	?			
Avril 2008		479	La rivière	?			
Oct. 2008	Refaire le cordon	305	La rivière	?			
Dec. 2008 - Janv.		710	La riviàro	2			
2009		/10	La IIVIEI e	<b>'</b>			
Mars 2009				?			
Avril 2009				?			
Juin. 2009		305	La rivière	?			
Oct. 2009		215	La rivière	?			
Nov. 2009	Reconstitution du cordon	280	La rivière	?			
Déc. 2009		360	La rivière	?			
Fevr Mars 2010			Le canal + la route <sup>iii</sup>				
Avril 2010	Reformation du cordon			?			
Mai. 2010	Pacanstitution du cordon	350	La rivière	?			
Oct Nov. 2010	Reconstitution du cordon	588	La rivière	?			
Déc. 2010		220	La rivière	?			
Déc. 2010 - Janv.	Reformation du cordon		Le canaliv	?			
2011	iterormation au coruon		unui				
Janv. 2011			Le canal	?			
Mars 2011	Reconstitution du cordon	223	La rivière	?			

Tableau 6-1 : Récapitulatif des travaux de confortement du cordon dunaire en partie Nord de la route du Sel (Source : Ville d'Hyères - Service Eau Littoral Properté, 2013).

<sup>&</sup>lt;sup>i</sup> La masse volumique de sable de carrière, lavé et roulé est de 1 750 kilogrammes par mètre cube car 21 000 tonnes de sables de carrière, lavé et roulé rechargées à la Capte sont équivalentes à 12 000 mètres cube.

<sup>&</sup>lt;sup>ii</sup> Tonnage non connu

iii Sable déposé dans le canal et sur la route par la tempête

<sup>&</sup>lt;sup>iv</sup> Sable déposé dans le canal

		Matériaux						
Période	Travaux	Sable		Posidonie				
		Volume (T)	Source de sable	(m <sup>3</sup> )				
Oct. 2011	Reconstitution du cordon	536	La rivière	?				
Fév. 2012	Reconstitution du cordon	604	Sable roulé lave	?				
Mars 2012	Reformation du cordon		le canal	?				
Juin 2012	Reconstitution du cordon	220	Sable roulé lave	?				
Nov. 2012	Reconstitution du cordon	505	La rivière	?				
Déc. 2012	Reconstitution du cordon	501	La rivière	?				

Ces solutions sont temporaires et à court terme. Elles n'apportent pas une grande efficacité (Lacroix et al., 2015b). Elles ne sont pas suffisamment fortes pour stabiliser du littoral (Lacroix et al., 2015b). Elles sont coûteuses. Il nous faut chercher de nouvelles mesures qui jouent un rôle dans la restauration du profil de la plage.

#### 6.1.2. Solutions douces irréalisables

Les solutions douces impossibles seront exposées, tels que le recul stratégique, la nouvelle ligne de rivage, et le système Ecoplage.

#### 6.1.2.1. Recul stratégique

A cause d'une largeur étroite du tombolo Ouest, le recul libre de la dune n'est pas possible. En effet, si nous faisons un recul stratégique, la ville de Hyères doit penser à installer une nouvelle route vers l'Est pour raison de sécurité vis à vis de Giens. La mer avancera vers la dune. Alors, la dune est déplacée vers l'Est. Elle prendra la place de la route et du chenal de ceinture. Nous perdrons donc la route du Sel. C'est pourquoi, nous ne recommandons pas cette solution dans le cas de la plage de l'Almanarre.

#### 6.1.2.2. Nouvelle ligne de rivage

La nouvelle ligne de rivage consisterait en une modification complète des profils Nord. L'étroitesse d'ensemble du tombolo Ouest (une largeur de 30 m) ne semble pas encourager à utiliser la route et le cordon dunaire ensemble. Nous devons penser à fermer et détruire la route. Si c'est le cas, la dune reprendra la place de la route. Selon cette solution, la route est déplacée vers l'est. De plus, la largeur de la plage est développée. La zone de déferlement peut être assez loin du cordon dunaire. Il sera alors protégé d'une meilleure façon. Le phénomène de dépôt des sables de plage dans le canal de ceinture des salins sera diminué. Cependant, cette solution est compliquée à mettre en œuvre car en l'absence d'une seconde voie de circulation la presqu'île risque d'être congestionnée en période estivale. Elle augmente aussi la pression sur la route du tombolo Est. A cause de ces raisons, nous ne recommandons pas cette solution dans le cas du tombolo Ouest.

#### 6.1.2.3. Système Ecoplage

Le drain de plage est installé sous la plage dans la zone de déferlement (Figure 6-1, p. 291). Il a un conduit perforé pour aspirer l'eau de mer qui percole au travers du sable de la plage. Les sédiments immergés s'assèchent et deviennent plus cohésifs (ERAMM, 2001). Ils sont moins mobiles et moins érodables. Ce système est appliqué avec certains succès dans de nombreux sites français. Il est possible de réutiliser l'eau de mer qui sort de ce système. Cette solution assure la pérennité de la plage (ERAMM, 2001). Son coût est estimé à 1 300 euros hors taxes par mètre de longueur de l'ouvrage en 2006 (Méditerranée, 2006).

D'un point de vue de l'érosion côtière, l'établissement d'un système Ecoplage aurait peu d'effets sur la stabilité de la plage de l'Almanarre. En effet, les processus d'érosion marine se concentrent sur la plage immergée, alors que le drain ne soutient principalement que sur la plage émergée. De plus, ERAMM (2001) indique que c'est un système efficace sous certaines conditions (une pente de 4 à 5% et une granulométrie de type sable moyen). Alors, ce système n'intervient pas efficacement en cas de pente trop forte (10%) et la présence de graviers à la plage de l'Almanarre.



Figure 6-1 : Procédé Ecoplage© (Source : www.geodunes.fr).

#### 6.1.3. Différentes solutions douces envisageables

Nous allons d'abord présenter les techniques de rechargement des plages. Ensuite, nous nous attacherons à décrire les techniques de stabilisation des plages.

#### 6.1.3.1. Solutions de gestion durable du littoral

Les objectifs de gestion à court et moyen terme pourraient se concentrer sur la protection de la dune contre l'érosion et la submersion littorale et sur la stabilisation du rivage. Nous pouvons citer plusieurs propositions.

#### a) Amélioration des panneaux sur la protection environnementale

D'abord, nous soulignons des actions éducatives sur la connaissance du système

dunaire. Il nous faut les améliorer sur la protection environnementale du site avec au moins traduction en anglais. Ils devraient insister sur la dynamique sédimentaire, la morphologie, le développement du cordon dunaire et la fragilité du cordon dunaire, etc. ... De plus, nous mentionnons aussi le rôle important des cordons dunaires, de la végétation, de la dégradation de la végétation liée au piétinement et le rôle des dépôts de mer composés de débris naturels sur ceux-ci. Il est nécessaire de les faire vivre et de les changer quelquefois.

#### b) Amélioration de la gestion des déchets

Il est nécessaire de sensibiliser les gens aux impacts liés aux déchets. Ces déchets sont divers soit d'origines anthropiques (« mauvais » déchets : macro déchets en plastique - sacs, en métal - bidons et en verre - bouteilles, etc. ...) soit d'origines naturelles (« bons » déchets : débris naturels de nature organique : algues, coquillages, bois mort, plantes halonitrophiles, et cadavres d'animaux, etc. ...). Les déchets d'origine naturelle sont essentiels pour le bon fonctionnement de la dune. Les macro-déchets déposés sur la plage peuvent déséquilibrer les échanges entre la plage et la dune). Les déchets peuvent provoquer un risque pour les visiteurs, par exemple des tessons de bouteilles. Pour résoudre ce problème, il nous faut améliorer la gestion des déchets. Il vaut mieux faire un ramassage manuel des déchets anthropiques de la dune et de haut de plage. Le nettoyage manuel est une solution de gestion durable. Un nettoyage mécanique n'est pas recommandé sur ce site.

#### c) Maintien de la dune et ganivelles

Du fait de la fragilité des dunes situées dans la zone Nord, leur maintien est important. Cette action assure la continuité du système dunaire. Nous réalisons une restauration des végétations et une revégétalisation où le couvert végétal est absent ou insuffisant. Nous avons besoin du maintien ou renouvellement des ganivelles pour les secteurs les plus sensibles.

#### d) Amélioration de la gestion de l'herbier de posidonie

Il est d'abord nécessaire de réduire l'impact des vagues déferlant sur le littoral Ouest (Maggi, 1973). Pour cela, il nous faut renforcer les mesures pour gérer et protéger l'herbier de posidonie afin de minimiser l'érosion marine. Il nous faut ensuite limiter la pollution chimique qui influence de façon néfaste la posidonie (Maggi, 1973). De plus, nous pensons que des réimplantations de Posidonies permettraient d'entretenir et de protéger les substrats meubles de l'érosion (Jeudy De Grissac, 1975). En outre, les posidonies mortes déposées sur la plage sont maintenues car elles peuvent jouer un rôle important d'amortisseur des houles.

#### 6.1.3.2. Rechargements

Les rechargements sont appliqués aux plages émergée et immergée. Nous pouvons recharger en sable et/ou en galets au front de cordon dunaire afin de limiter le recul du

cordon. L'absence d'apports sédimentaires naturels encourage un rechargement des plages immergées. Les rechargements des plages se divisent en deux sous-catégories: le rechargement simple, le rechargement avec butée sous-marine (SOGREAH, 1988d; Lacroix et al., 2015b).

#### a) Rechargement simple

Pour la technique envisagée (Figure 6-2), la granulométrie des sédiments apportés est plus grande que celle des sédiments de la plage. Les sédiments apportés peuvent avoir une origine continentale (gravières ou sablières) ou marine (extraction des sables) (ERAMM, 2001).



*Figure 6-2 : Rechargement sans ouvrage de pied : La Croissette à Cannes (Source : R.Bonnefille).* 

Il est facile d'installer ce type d'ouvrage. Ce système est favorable à la protection de l'écosystème côtier (ERAMM, 2001). Il nous permet de retrouver une pente d'équilibre favorable à un amortissement naturel des houles. Alors, il permet une reconstitution du profil d'équilibre. Maggi (1973) pense qu'il est nécessaire de reconstituer la plage de l'Almanarre par des apports de sable de carrière.

#### b) Rechargement avec butée sous-marine

Les butées sous-marines sont installées parallèlement à la côte (Figure 6-3, p. 294). Elles permettent d'assurer le maintien d'une plage rechargée en sédiments. Elles limitent la fuite des sédiments vers le large. Elles ont pour but de reconstituer le profil d'équilibre de la plage afin de stabiliser une plage artificielle. Les matériaux utilisés pour la butée de pied sont des enrochements, des métaux (un rideau de palplanche), ou des géotextiles, etc. .... Les butées de pied se situent dans la zone de déferlement, à des profondeurs inférieures à 5 mètres. Ce type d'ouvrage est sans impact sur le paysage des plages. Néanmoins, les butées en enrochements ont des impacts sur l'écosystème. ERAMM (2001) recommande qu'il est nécessaire d'installer une butée de pied lorsque la pente des fonds est trop forte ou bien les matériaux de rechargement sont les mêmes que ceux de la plage.

La présence d'une butée de pied présente beaucoup d'avantages pour la plage de

l'Almanarre. Elle fixe les sables de rechargement et atténue des houles incidentes. Ce type d'ouvrage n'affecte pas les activités nautiques. Cependant, les matériaux apportés n'ont pas une tenue suffisante sous l'action des tempêtes. La butée de pied en enrochements est difficilement réversible (ERAMM, 2001).



Figure 6-3 : Rechargement avec butées de pied : Port Canto à Cannes (Source : R.Bonnefille).

#### 6.1.3.3. Plage « suspendue »

Dans ce cas, un substrat rigide, non mobilisable par la houle est installé (Figure 6-4). Grâce à ce substrat, la pente des fonds au niveau du rivage est plus faible. Cette technique peut permettre de diminuer la granulométrie des sédiments apportés. La butée au niveau basse mer stoppe tout transport sédimentaire dans le profil. ERAMM (2001) recommande que la plage aménagée atteigne la pente d'équilibre des fonds marins. Cette solution peut être appliquée au site d'étude. Mais, elle doit reposer sur des arguments convaincants.



Figure 6-4 : Plage « suspendue » (Source : R.Bonnefille).

#### 6.1.3.4. Comblement des chenaux d'érosion et de la brèche

Le comblement en sable des chenaux d'érosion peut limiter les transports sédimentaires vers le large et la dérive littorale des sédiments. Cependant, les matériaux apportés peuvent être enlevés et déplacés dans ces chenaux.

Une solution de comblement en sable de la brèche au niveau des bornes B08 et B10 peut diminuer l'énergie des vagues de tempête pour se reformer derrière le plateau continental. Mais, nous n'assurons pas la stabilisation des sables comblés sous l'action des tempêtes.

#### 6.1.3.5. Récifs artificiels en géotextiles

L'utilisation de sacs en géotextiles remplis par des matériaux n'est pas une nouvelle technique. En effet, à partir des années 1970, la technologie baptisée ODS (« *Operational Design System* ») a été appliquée pour les constructions de protection (revêtements, murs, épis, jetées, et brise-lames) (Figure 6-5A). Les tubes Longard et Sandtex (Danemark), Robusta et Géotube (France) ont été appliqués en Europe (Figure 6-5B). Des tubes en géotextiles Terrafix (Allemagne) ont été utilisés comme des récifs sous-marins. La méthode de construction de ces récifs consiste à draguer par des moyens hydrauliques des sables pour remplir les sacs en géotextile à bord d'une barge puis les immerger sur le site à protéger (ERAMM, 2001).



*Figure 6-5 : Epi (A) et brise-lames (B) en géotextile pour la protection de la plage (Source : <u>ACE Geosynthetics</u>).* 

Il semble s'adapter à la protection de la plage de l'Almanarre. En effet, il est facile d'installer cet ouvrage. Il s'adapte facilement aux géomorphologies du fond. Il fonctionne notamment plus efficacement dans le revêtement de la plage émergée ou au pied des falaises et des cordons dunaires. Il est utilisé sur les fonds marins pour atténuer la houle incidente avec une efficacité modérée. Il permet de favoriser la colonisation par la faune et la flore marine. Il assure la préservation des herbiers. Il est possible de créer un spot de surf.

Cependant, il existe peu d'installations (ERAMM, 2001). Le coût de construction est élevé (7 200 euros hors taxes par mètre de longueur de l'ouvrage) (Méditerranée, 2006). L'entretien pose un problème également, s'il est installé en zone de mouillage (Hyères, La Capte).

#### 6.1.3.6. Stabilisation des fonds marins

Les champs d'algues ou d'herbiers de Phanérogames marines (posidonies, zostères et laminaires) jouent le rôle des protections naturelles. Ils aident beaucoup à la stabilité des fonds sableux (substrat meuble). Ils favorisent l'atténuation du courant au fond (ERAMM, 2001).

Le champ d'algues artificielles est utilisé pour protéger les plages en érosion (Photo 6-3). Il se présente sous la forme de rubans en fibres synthétiques. L'ancien système de fixation est un sac en géotextile rempli de sable. Il n'assure pas une protection contre une forte houle. Des nouveaux systèmes avec des vis et des câbles tendus sont proposés. Ils répondent correctement aux efforts de la houle. Les algues artificielles sont disposées sur les fonds compris entre 2 et 5 mètres de profondeur. Leur densité et l'aire couverte doivent être assez importantes pour atteindre l'efficacité souhaitée (ERAMM, 2001).



Photo 6-3 : Des algues artificielles contre l'érosion des plages (Photo : Derek Keats).

Il semble que c'est une solution envisageable en complément de la restauration du profil de plage de l'Almanarre. En effet, il permet d'augmenter significativement la rugosité du fond, d'atténuer des vagues, et de stabiliser les fonds sableux. Il est nécessaire d'avoir une analyse sur le choix des matériaux, sur la zone d'implantation, sur le mode de fixation pour obtenir une meilleure efficacité (ERAMM, 2001). Nous ne tiendrons pas compte de cette solution dans cette thèse. Il faut intégrer ici aussi la protection de l'écosystème, principalement les champs de posidonies.

# 6.1.4. Proposition des types de rechargement de la plage

Nous présentons dans ce qui suit des propositions des scénarios de rechargement de la plage.

#### 6.1.4.1. Rechargement sans ouvrages

Cette solution est la moins agressive pour la plage. Cependant, il est nécessaire de l'entretenir annuellement (SOGREAH, 1988d). Grissac (1975) propose un rechargement en matériel adapté de 8 000 mètres cube par an.

Un rechargement de plage accompagné par une reconstitution du profil a été aussi proposée par ERAMM (2001) pour protéger la zone entre les bornes B08 et B10 de l'érosion (Figure 6-6). Cette solution semble être indispensable pour protéger la plage et stabiliser des fonds (ERAMM, 2001; Lacroix et al., 2015b).



Figure 6-6 : Evolution des bathymétries du rechargement sans ouvrages de B07 à B11 (Lacroix et al., 2015b).

Les trous de la plage entre les bornes B08 et B10 sont recouverts par des sables et des graviers. La zone de rechargement correspond à 460 mètres de longueur de rivage. La limite inférieure se situe à 136 mètres du rivage. Les 100 premiers mètres de la plage ont une pente d'équilibre d'environ 3% ; puis, pour le reste, une pente d'équilibre de 5% (ERAMM, 2001). L'épaisseur de rechargement varie de 0,40 à 2,02 mètres. Le volume de rechargement est égal à 66 680 mètres cubes.

Ensuite, nous proposons une protection entière pour la zone Nord-central par un rechargement (Figure 6-7). La zone de rechargement correspond à 2 kilomètres de longueur du rivage (Tableau 6-2). La limite inférieure se situe à 136 mètres du

rivage. Le volume de rechargement est égal à 218 061 mètres cubes (Lacroix et al., 2015b).

218 061

2 0 0 0

ableau 6-2 : Scenario au rechargement sans ouvrages.										
Scénario	Zone de protection	Volume (m <sup>3</sup> )	Longueur (m)	Lai						
Alternative 1	De B08 à B10	66 680	460	136						

T = 1.1 = = . . for a standay we also and a set a

**Alternative 2** Zone Nord-central



Figure 6-7 : Evolution des bathymétries du rechargement sans ouvrages dans la zone de Nord à central du tombolo (Lacroix et al., 2015b).

#### 6.1.4.2. Rechargement avec ouvrages

Cette solution est plus coûteuse, agressive mais plus sûre que le rechargement sans ouvrages (SOGREAH, 1988d). Selon ERAMM (2001), un rechargement sans ouvrages comme ci-dessus peut être insuffisant pour arrêter la disparition des sédiments vers le large. C'est pourquoi, il semble opportun de mettre en place différents types de butées de pieds : soit en enrochements, soit en palplanche, soit en géotextile. Ces butées permettent d'atténuer la houle incidente et d'améliorer ainsi la protection de la plage (ERAMM, 2001).

La dimension géométrique de la zone de rechargement a été décrite dans la section 6.1.4.1. Nous ajouterons ou bien une butée de pied ou bien une butée de pied et un épi immergé (Figure 6-8 et Tableau 6-3, p. 299). Ils correspondent aux ouvrages immergés.

La butée de pied de 8 à 15 mètres de large se situe à 100 mètres du rivage. Elle est

geur (m)

136

installée parallèlement au rivage sur une longueur de 150 mètres. Elle est disposée dans des fonds de -3,0 mètres. La butée de pied est arasée à la cote -1,12 mètres CM.

L'épi immergé est appliqué dans la zone rechargée de sorte à empêcher une disparition des sables rechargées. Sa dimension est à peu près de 100 mètres de long sur de 8 à 15 mètres de large. La crête de l'épi immergé varie de -1,12 mètres (au large) à 0 mètre (à la côte).



 Image: definition of the second se

Figure 6-8 : Evolution des bathymétries du rechargement avec ouvrages : (A et B) Alternative 3 - Rechargement avec une butée de pied. (C et D) Alternative 4 -Rechargement avec une butée de pied et un épi. (E) Alternative 5 - Rechargement avec 3 butées de pied. (F) Alternative 6 - Rechargement avec 3 butées de pied et 3 épis.

(F)

Tableau 6-3 : Scénarios de rechargement avec ouvrages.

Scénario	Alternative 3	Alternative 4	Alternative 5	Alternative 6
Zone de protection	De B08 à B10	De B08 à B10	Zone Nord- central	Zone Nord- central

Scénario		Alternative 3	Alternative 4	Alternative 5	Alternative 6
	Volume (m <sup>3</sup> )	66 680	66 680	218 061	218 061
Rechargement	Longueur (m)	460	460	2 000	2 000
	Largeur (m)	136	136	136	136
	Nombre	1	1	3	3
	Rc (m)	-1,12	-1,12	-1,12	-1,12
Putéo do niod	X (m)	100	100	100	100
Butee de pieu	L (m)	150	150	150	150
	G (m)	230	230	230	230
	B (m)	12	12	12	12
	Nombre	aucun	1	aucun	3
	Rc (m)	-	De -1,12 à 0	-	De -1,12 à 0
Épi immergé	L <sub>e</sub> (m)	-	100	-	100
	S <sub>e</sub> (m)	-	380	-	380
	B <sub>e</sub> (m)	-	12	-	12

 $R_c$  – la crête de l'ouvrage ; X – la distance de la côte ; L,  $L_e$  – les longueurs des ouvrages ; G – l'espacement entre deux brise-lames ; B,  $B_e$  – les largeurs de la crête ;  $S_e$  – la distance entre deux épis.

## 6.2. Solutions dures de protection du littoral contre l'érosion marine au tombolo Ouest

Cette section commence par décrire les méthodes déjà mises en œuvre au tombolo Ouest. Puis, suivant les solutions dures, nous proposons des solutions irréalisables et des solutions envisageables.

#### 6.2.1. Méthode déjà mises en œuvre



Photo 6-4 : Perré en enrochements de la partie Sud du tombolo occidental entre la dune et la route du Sel (A) et entre la dune et la plage (B).

La plage Nord a été protégée localement par un perré en enrochements qui a été enlevé récemment (Tableau E-26, p. - 46 - et Figure E-35, p. - 48 -). En effet, l'effet de ces blocs sur l'équilibre sédimentologique de la plage est néfaste. La photo 6-4

présente un perré en enrochements de la plage Sud du tombolo Ouest.

#### 6.2.2. Solutions dures irréalisables

Les ouvrages transversaux seront d'abord évalués. Nous parlerons ensuite de l'ouvrage continu tel que la digue. Les brise-lames perméables en parpaing seront ensuite exposés. Nous discuterons enfin d'une application des dissipateurs d'énergie des vagues.

#### 6.2.2.1. Ouvrages transversaux

Les ouvrages transversaux tel que l'épi émergé, l'épi perméable ont pour but de diminuer la force de la mer. Cependant, ils sont parfois plus néfastes que bénéfiques. En effet, selon Jeudy De Grissac (1975), l'ouvrage transversal est la cause de l'augmentation des érosions marines du littoral en rade d'Hyères. Il pense que l'ouvrage longitudinal en face des zones menacées, est une meilleure solution.

Les ouvrages transversaux sont peu recommandables. En effet, Blanc (1973) a recommandé d'abandonner les ouvrages transversaux (épis émergés) à cause de l'absence de véritable transfert de sédiments du Nord vers le Sud. Il conseille de sélectionner un système de défenses longitudinales.

En outre, les ouvrages transversaux influencent négativement sur le paysage du littoral et sur l'écosystème.

#### 6.2.2.2. Ouvrage continu (digue)

Dans ce cas, une partie de l'énergie de la houle est réfléchie. La houle est atténuée avant qu'elle n'arrive à la plage. La houle au large déferle sur la digue. ERAMM (2001) suggère que cette technique s'adapte aux mers à marée avec un ouvrage immergé à marée haute (Figure 6-9). Elle assure un renouvellement du niveau d'eau dans la zone à l'abri. Cette technique aurait un impact trop fort sur le paysage du littoral et sur l'écosystème du tombolo. Elle n'est donc pas recommandée par ERAMM (2001).



*Figure 6-9 : Plage protégée par un ouvrage continu : île Canaries - Plage à marée (Source : R.Bonnefille).* 

#### 6.2.2.3. Brise-lames perméables en parpaing (Sandgrabber)

Ils constituent des blocs de parpaing (buses rectangulaires) en béton (Photo 6-5). Ces blocs sont empilés souvent les uns sur les autres avec les trous perpendiculaires au trait de côte. Les blocs sont fixés par des tiges métalliques. Le caractère essentiel de ce système est la perméabilité au travers de nombreuse ouvertures. Cet ouvrage est disposé parallèlement au trait de côte dans la zone basse mer (en bas estran). Il est plus léger qu'un ouvrage classique. Son influence sur le fond est limitée à de faibles profondeurs, dans une zone où l'agitation est forte. Cet ouvrage peut permettre le développement d'une plage « suspendue » qui réduit la pente de la plage et absorbe une partie de l'énergie des houles. Néanmoins, les transports des sédiments dans le profil sont limités car ce système crée un obstacle difficilement franchissable par les sédiments. Ce système est facile d'installation. Son coût est modéré (ERAMM, 2001).



Photo 6-5 : Brise-lames perméables en parpaing à Hawaill en 1978 (A) et en 2009 (B) (Sandgrabber, <u>sandsaver.com</u> © 2009).

Ce système influence négativement sur le paysage du littoral car il s'installe en pied de plage. De plus, il ne permet pas une restauration de la totalité du profil d'équilibre (ERAMM, 2001).

#### 6.2.2.4. Epis perméables

Un épi perméable est un épi émergé (Photo 6-6). Ce système permet de ralentir le mouvement des sédiments du littoral et d'attraper une partie des sédiments sur la plage. La structure de l'épi perméable peut être faite de pieux en bois plantés. Les épis perméables (Photo 6-6B) réduisent la dérive littorale. Ils peuvent être installés parallèlement au trait de côte, sur le bas de plage ou le haut de plage (Photo 6-6A). Dans ce cas, ils fonctionnent comme un ouvrage de protection frontale contre la houle. Selon ERAMM (2001), cette technique est peu efficace sur la protection de la plage de l'Almanarre car ces épis sont des ouvrages filtrants. En plus, elle influence négativement sur le paysage du littoral.



Photo 6-6 : Brise-lames perméables (A) et épis perméables (B) de la plage de la Dune d'Aval (Source : <u>www.plages.tv</u>).

#### 6.2.2.5. Dissipateurs d'énergie des vagues

Il est composé des modules de pneumatiques. Un module de base est constitué de 18 pneumatiques, avec les dimensions (2 mètres x 2 mètres x 0,75 mètres). Les pneumatiques sont assemblés entre eux par des chaînes ou des courroies (ERAMM, 2001).

C'est un système de protection temporaire car la longévité du système dépend de la qualité des liaisons entre les modules. Ce système produit une bonne atténuation des vagues en se déformant sous l'action des vagues. Mais il existe peu d'informations précises sur l'efficacité d'amortissement de ce système (ERAMM, 2001).

Les dissipateurs de vagues (système Goodyear©) posent problème pour les activités nautiques. En outre, ce système ne s'adapte pas sur le long terme. Il est généralement utilisé pour protéger temporairement les travaux à la mer (ERAMM, 2001).

#### 6.2.3. Différentes solutions dures envisageables

La construction d'ouvrages d'art est l'outil de défense le plus répandu (ERAMM, 2001). Dans un premier temps, nous allons parler des atténuateurs de houle dynamiques. Dans un deuxième temps, nous porterons les récifs artificiels en dur. Dans un troisième temps, les brise-lames et épis immergés seront exposés.

#### 6.2.3.1. Atténuateurs de houle dynamiques

Les techniques des atténuateurs de houle seront d'abord résumées. Puis, nous nous attacherons à analyser leur application au site d'étude.

#### a) Technologie des atténuateurs de houle

Ces techniques se composent des principaux systèmes, tels que les murs d'eau, le « dos de chameau », le système Acripel, et le système ASB.

#### i. Paroi oscillante

C'est un type des digues partielles fixes avec l'installation de plaques horizontales immergées (entre 1 et 2 mètres sous la surface de la mer) qui reposent sur des pieux dans le fond marin (Figure 6-10A). Ces plaques sont arrangées en ligne. Elles sont orientées perpendiculairement à la direction des houles dominantes (ERAMM, 2001).

Cet ouvrage limite les mouvements verticaux associés à la houle. La masse d'eau située sous la plaque fait un mouvement d'oscillation horizontal. Ce dispositif engendre une onde qui s'oppose à la houle incidente. Il provoque une réflexion importante. La houle en arrière du système s'amortit rapidement. Cette technique s'adapte aux mers sans marée. Il a une faible influence sur les fonds et un faible impact sur l'écosystème côtier. Le coût de l'ouvrage est élevé. Cet ouvrage a besoin d'un entretien périodique (ERAMM, 2001). Cet ouvrage est efficace seulement sur les houles longues (Lajoie, 2008). Il ne peut pas stopper les petits clapots. Il a déjà été appliqué à Barcelone (Lajoie, 2008).



*Figure 6-10 : Digues partielles fixes : (A) Paroi oscillante. (B) Mur d'eau fixe (Source : wikhydro.developpement-durable.gouv.fr).* 

#### ii. Mur d'eau fixe

Ce système est composé d'une plaque immergée et d'une superstructure émergeante (Figure 6-10B). Le principe du système repose sur les réflexions provoquées par un mouvement horizontal de la masse d'eau sous la face inférieure d'un caisson (Lajoie, 2008). La houle incidente est réfléchie sur cette masse d'eau qui fonctionne comme un véritable mur. La présence d'un becquet de protection sur la superstructure émergeante améliore l'efficacité du système par rapport à une digue semi-immergée classique. Lajoie (2008) souligne que le mur d'eau fixe ne permet de stopper que les petits clapots. Il a déjà été appliqué pour protéger le nouvel avant-port de Monaco (Lajoie, 2008).

#### iii. Atténuateur de type « dos de chameau »

Le principe du système repose sur le principe du mur d'eau fixe qui permet de réfléchir une grande partie des houles. Ce système est une simple barrière anti-houle (Lajoie, 2008). Il n'a pas de superstructures aménagées. Il est très bas au-dessus de l'eau, avec un faible impact sur le paysage (Figure 6-11, p. 305). Cet ouvrage a été testé

avec succès en canal à houle (Lajoie, 2008). Aujourd'hui, ce dispositif perfectionné est réalisé dans le port de La Condamine de la Principauté de Monaco (Manzone et Lajoie, 2013).



Figure 6-11 : Schéma simple du dos de chameau (Lajoie, 2008).

#### iv. Système Acripel

C'est une digue partielle flottante, avec l'installation de flotteurs axisymétriques légers et mobiles, reliée au fond marin par des câbles, ancrés. Ils peuvent être immergés totalement (Acripel du type caissons prismatiques) ou partiellement (Acripel du type îles flottantes) (Figure 6-12). Ils sont disposés parallèlement au trait de côte à environ 100 ou 200 mètres de la côte (ERAMM, 2001).

L'atténuation de la houle incidente repose sur le principe de réflexion généré par le roulis. De plus, les phénomènes de diffraction-radiation augmentent aussi l'atténuation d'énergie de la houle. Une partie de la houle est réfléchie vers le large. Le reste se disperse au rivage (ERAMM, 2001).



Figure 6-12 : Acripel dispositif d'atténuation de la houle et de protection du littoral : (A) Immergés partiellement. (B) Immergés totalement (Guevel et al., 1994).

Des ancrages de ce système ont une faible influence sur le fond. Ce système engendre des efforts verticaux importants sous les flotteurs. Il menace alors l'écosystème sous les flotteurs. Cette technique s'adapte aux mers sans marée. Le coût de l'ouvrage est élevé. Cet ouvrage a besoin d'un entretien périodique (ERAMM, 2001).

#### v. Système ASB

L'atténuateur semi-submersible (ASB) est composé d'une plaque horizontale surmontée d'une structure verticale à faible section (Figure 6-13A) (ERAMM, 2001). Deux systèmes sont réalisés : ASB-5000 (12 mètres de long et 5 mètres de large) au port de Dieppe, Seine-Maritime en région Haute-Normandie, dans le Nord-Ouest de la France et ASB-3000-12 (Long de 12,0 mètres et large de 3,0 mètres) au port de Nuisement sur le lac du Der-Chantecoq, en région Champagne-Ardennes (Figure 6-13B).



(A) (B) Figure 6-13 : (A) Système ASB (Bougis et Degaie). (B) Atténuateur ASB-3000-12 au port de Nuisement : sortie d'usine Degaie à Pont/Sambre (Beynet et al., 2004)

L'atténuation de la houle incidente repose sur le principe de réflexion généré par le mouvement de pilonnement, glissant verticalement sur des pieux. De plus, les phénomènes de diffraction-radiation augmentent aussi l'atténuation d'énergie de la houle. Une partie de la houle est réfléchie vers le large. Le reste se disperse au rivage (ERAMM, 2001).

Cette technique s'adapte aux mers à marée et aux zones abritées. Elle a une faible influence sur le fond et un faible impact sur l'écosystème. Le coût de l'ouvrage est élevé. Cet ouvrage a besoin d'un entretien périodique. Il n'a pas été testé en mer ouverte (ERAMM, 2001).

#### b) Application des attenuateurs de houle à la plage de l'Almanarre

Nous pouvons appliquer les différents systèmes atténuateurs de houle pour protéger la plage de l'Almanarre car ils sont adaptés aux littoraux à faible marée. Cependant, ces systèmes n'ont jamais été installés comme protection de plage (ERAMM, 2001).

Il est nécessaire d'avoir une analyse de sa faisabilité et de sa réalisation technique. Nous ne tiendrons pas compte de cette solution dans notre travail. Cette solution semble par ailleurs a priori coûteuse et le côté innovant n'est pas un avantage, car il se caractérise ici principalement par une absence de preuve de concept en la matière.

#### 6.2.3.2. Récifs artificiels

Les récifs artificiels sont appliqués dans la zone RAMOGE. Ils sont préfabriqués en matériel lourd (en béton). Leur forme et leur volume sont variables en fonction de leur rôle. Ils peuvent être disposés parallèlement au trait de côte ou créer des champs de récifs dispersés (Figure 6-14). Leur efficacité sur le fond est faible mais très large. Ce système offre certaines zones d'abri et de nourriture afin d'augmenter la ressource halieutique (ERAMM, 2001).



Présentation schématique de l'organisation des récifs artificiels : © Cépralmar

Figure 6-14 : Champs de récifs artificiels (Source : <u>Cépralmar</u>).

La mise en place de ces ouvrages est facile. Ce système permet de favoriser la colonisation par la faune et la flore marine. Il s'adapte à la morphologie du fond. L'action d'atténuation des vagues est modérée. Les récifs artificiels assurent la préservation des herbiers (ERAMM, 2001).

Cependant, le coût de cette technique est élevé. Les récifs artificiels sont peu

efficaces dans la lutte contre l'érosion marine. Ils semblent être peu adaptés à l'atténuation de la houle. Ils peuvent provoquer un risque de dégradation. Il existe peu d'installations de ce type d'ouvrage (ERAMM, 2001).

Maggi (1973) a recommandé de freiner la force de la mer par des récifs artificiels en dur (des blocs de béton à alvéoles), au voisinage de l'isobathe de 10 mètres. Nous pensons que cette solution a pour but de ralentir la dégradation des herbiers de posidonie car ces récifs artificiels se situent trop loin du rivage (1,2 kilomètres). Son efficacité sur l'atténuateur de la houle n'est pas suffisante pour protéger la plage contre l'érosion. C'est pourquoi, nous recommandons que ces récifs soient posés au voisinage de l'isobathe de 5 mètres comme le recommande de Blanc (1973) pour les brise-lames de protection éloignée. De plus, nous pouvons appliquer cette technique dans des zones plus profondes du golfe de Giens pour favoriser le développement de l'herbier de Posidonies. Nous pouvons aussi utiliser des récifs artificiels en dur ou en géotextiles afin de combler la brèche au niveau des bornes B08 et B10 (Serantoni et Lizaud, 2000-2010) et les chenaux d'érosion. Selon Serantoni et Lizaud (2000-2010), la solution de comblement de la brèche peut diminuer l'énergie des vagues de tempête pour se reformer la plage.

## 6.2.3.3. Stabilisation des plages par des brise-lames et épis immergés

Cette solution s'applique fréquemment en Méditerranée sous forme du briselames ou épi en T. Elle délimite en arrière des plages de type alvéolaires avec l'établissement de tombolos plus ou moins avancés. Les tombolos tendent à faire fonction d'ouvrage de protection (ERAMM, 2001). L'ouverture de brèche dans l'ouvrage permet de développer les échanges de sédiments entre les deux milieux (Figure 6-15A).



Figure 6-15 : (A) Plage protégée par un ouvrage discontinu (brise-lames) en Camargue. (B) Un système d'épis en enrochement, perpendiculaires à la côte en Camargue (Source : Google Earth).

Les épis immergés ont pour but de favoriser l'engraissement des plages dans le secteur où le transport sédimentaire est dominant sur les transports dans le profil (ERAMM, 2001). Ces épis n'arrêtent pas totalement la dérive littorale de sédiments. Un épi immergé est caractérisé par une côte arasée sous le niveau moyen de la mer. Des fenêtres peuvent être parfois créées sur les épis. Elles permettent de favoriser l'échange des sédiments le long du littoral. Les épis immergés peuvent permettre de contrôler le transport sédimentaire et d'augmenter l'accrétion dans la zone située en aval. Nous pouvons observer une érosion du côté aval de l'épi et une accrétion de l'autre côté (Figure 6-15B). L'énergie des houles disparaît au travers de l'épi et par son franchissement avant d'arriver au trait de côte (ERAMM, 2001). Leur efficacité sur la protection contre l'érosion marine est modérée. Ils ont des impacts sur l'écosystème. Leur coût est élevé (environ 2 500 euros hors taxes par mètre de longueur de l'ouvrage). Le coût d'entretien est de 3 à 5% du prix d'installation (Méditerranée, 2006).

Cette solution nous permet de modifier les transports sédimentaires et de limiter l'érosion marine dans la zone nord du tombolo Ouest. Elle pourrait avoir un impact négatif sur l'écosystème du tombolo. Cependant, nous pouvons diminuer cet impact grâce à l'installation de l'ouvrage hors de la zone de l'herbier de posidonie.

Nous présentons dans ce qui suit une proposition des types de brise-lames et épis immergés.

## 6.2.4. Proposition des types de brise-lames et épis immergés

Nous avons besoin d'avoir des arguments clairs avant d'utiliser les solutions dures. Face à ce choix difficile, une modélisation numérique est nécessaire pour nous aider dans notre décision.

Les brise-lames ont pour rôle d'arrêter les vagues. Blanc (1973) a proposé des ouvrages frontaux en enrochements, parallèles au littoral et aux isobathes. Le poids des blocs d'enrochement est très important (de 3 à 5 tonnes). Ces ouvrages ont pour but de protéger des secteurs AB, BC, et CC' de la plage de l'Almanarre (Figure 6-16). La zone BC est la plus urgente à protéger (Blanc, 1973).

Les dimensions géométriques sont proposées par Blanc (1973). Premièrement, les brise-lames de protection éloignée (blocs bleus sur la figure 6-16) se trouvant à l'isobathe de 5 mètres recoupant les chenaux et les « mattes » dégradées. Ces ouvrages devraient être élevés à +2,5 et même +3 mètres (Blanc, 1973). Ce sont des brise-lames immergés à -2 mètres (Blanc, 1973). Deuxièmement, les brise-lames de protection rapprochée (blocs rouge sur la figure 6-16) se situent à l'isobathe de 3 mètres. Ces ouvrages seront construits sur le fond des "mattes" érodées, des grès et sables des chenaux. Les enrochements pourront être plus bas (+2 mètres) ; c'est-à-dire que sa

crête est environ -1 mètre CM (Blanc, 1973). Ils se situeraient entre 280 et 350 mètres en moyenne de la plage (Blanc, 1973).



*Figure 6-16 : Une proposition de protection de la plage de l'Almanarre [d'après Blanc (1973), modifié].* 

Selon les calculs préliminaires de la position de plusieurs brise-lames émergés au large, chacun d'environ 230 mètres de long situe à 300 mètres de la côte. Si l'écart entre deux brise-lames est à près de 300 mètres, la réaction des plages sera peut-être un tombolo derrière le brise-lame. Pour s'adapter à la plage de l'Almanarre, nous recommandons que l'écart du brise-lames soit de 280 mètres et que la longueur d'un brise-lames soit de 340 mètres. Nous avons recalculé la réaction des plages : le tombolo se forme peut-être derrière le brise-lames.

En nous basant sur les recommandations de Blanc (1973), de Maggi (1973) et les calculs préliminaires pour les brise-lames émergés, nous allons redéfinir les dimensions géométriques des brise-lames immergés.

Nous proposons que les brise-lames rapprochés de 340 mètres de long et 20 mètres de large se situent à 300 mètres du rivage. La crête du brise-lames est à -2 mètres pour une diminution espérée de 30% de l'énergie par déferlement.

Nous maintenons la dimension géométrique des brise-lames éloignés identique à celle des brise-lames rapprochés. Ils se situent à 400 mètres du rivage. Ces brise-lames ont un niveau de crête de -3 mètres. En général, le brise-lames a des pentes douces de l'ordre de 4/1 à 2/1. Le brise-lames est soit en béton, soit en enrochement, soit en récif artificiel. Chaque type du brise-lames nous donne un coefficient d'atténuation différent de la houle. Cependant, nous ne prenons pas en compte cette différence dans le modèle couplé de MIKE21/3 FM.

Pour simuler l'impact des solutions dures, nous choisissons les cas à étudier dans

le tableau 6-4, p. 311. Les tests en modèle mathématique sont réalisés avec la bathymétrique de 2012. L'alternative 7 a été effectuée avec un brise-lames immergé de protection rapprochée et deux épis immergés. Les alternatives 8 et 9 ont pour but de protéger la zone Nord-central (Figure 6-17). L'alternative 8 se compose de deux brise-lames immergés de protection éloignée, trois brise-lames immergés de protection rapprochée, tandis que l'alternative 9 est la même que l'alternative 8, mais ajoute trois épis immergés.

Scénario		Alternative 7	Alternative 8	Alternative 9	Alternative 10	Alternative 11
Zone de protec	tion	De B08 à B10	Zone Nord-cent	ral	Tombolo Ouest	
	Nombre	aucun	2	2	4	4
Brise-lames	R <sub>c</sub> (m)	-	-3	-3	-3	-3
immergé de	X (m)	-	400	400	400	400
protection	L (m)	-	340	340	340	340
éloignée	G (m)	-	280	280	280	280
	B (m)	-	12	12	12	12
	Nombre	1	3	3	6	6
Brise-lames	R <sub>c</sub> (m)	-2	-2	-2	-2	-2
immergé de	X (m)	200	300	300	300	300
protection	L (m)	440	340	340	340	340
rapprochée	G (m)	-	280	280	280	280
	B (m)	12	12	3	3	3
	Nombre	2	aucun	3	aucun	3
	R <sub>c</sub> (m)	De -2 à 0	-	De -2 à 0	-	De -2 à 0
Épi immergé	Le (m)	200	-	300	-	300
	S <sub>e</sub> (m)	440	-	620	-	620
	B <sub>e</sub> (m)	12	-	12	-	12

Tableau 6-4 : Caractériques des scénarios de solution dure.



Figure 6-17 : (A) Alternative 7 avec 1 brise-lames immergé et 2 épis immergés. (B) Alternative 8 avec 5 brise-lames. (C) Alternative 9 avec 5 brise-lames + 3 épis (Lacroix et al., 2015b).

Les alternatives 10 et 11 ont pour but de protéger tout le tombolo Ouest. L'alternative 10 se compose de quatre brise-lames immergés de protection éloignée, six brise-lames immergés de protection rapprochée, tandis que l'alternative 11 est la même que l'alternative 10, mais ajoute trois épis immergés (Figure 6-18).



(A)

(B)

Figure 6-18 : (A) Alternative 10 avec 10 brise-lames. (B) Alternative 11 avec 10 briselames + 3 épis (Lacroix et al., 2015b).

### 6.3. Solutions combinées de protection du littoral contre l'érosion marine au tombolo Ouest

Les solutions combinées sont simulées avec la bathymétrique rechargée de 2012. L'alternative 12 est la même que l'alternative 7, avec une bathymétrique rechargée de la borne B08 à B10. Les alternatives 13 et 14 sont les mêmes que les alternatives 8 et 9, respectivement, avec la bathymétrique rechargée dans la zone de B08 à B10.

Quatorze différentes alternatives, y compris les solutions douces et dures (Alternative de 1 à 14), ont été proposées pour cette étude de cas. Le tableau 6-5, p. 313 montre les différents scénarios. Il donne une meilleure présentation visuelle des

solutions envisagées.

	Dachargamant	Longueur d	e l'ouvrage (r	n)		
Alternative	(m <sup>3</sup> )	Butée de	Épi	Brise-lames immergé		
	(m <sup>o</sup> )	pied	immergé	Rapprochée	Eloignée	
1	66 680					
2	218 061					
3	66 680	150				
4	66 680	150	100			
5	218 061	450				
6	218 061	450	300			
7			400	440		
8				1 020	680	
9			900	1 020	680	
10				2 040	1 360	
11			900	2 040	1 360	
12	66 680		400	440		
13	66 680			1 020	680	
14	66 680		900	1 020	680	

Tableau 6-5 : Tableau récapitulatif des différents scénarios (Lacroix et al., 2015b).

# 6.4. Simulation des scénarios de la protection des côtes

Notre modèle couple le courant et la houle en présence d'obstacle. Les obstacles tels que le brise-lames, la butée de pied et l'épi sont simplement représentés par l'évolution de la bathymétrie. Ceci est rendu possible par le fait qu'elle est arasée à une cote adaptée au-dessous du zéro hydrographique. Une taille du grain moyen  $d_{50} = 50$  centimètres est appliquée dans la zone de l'obstacle. C'est-à-dire que le nombre de Manning, la rugosité et le transport de sédiment dans la zone des ouvrages sont ceux de la roche.

#### 6.4.1. Domaine

Nous utilisons le même maillage dans le modèle couplé MIKE21/3 FM. Cependant, dans la zone de l'obstacle, la résolution du modèle doit être suffisamment élevée pour simuler l'évolution de la bathymétrie autour de l'obstacle. C'est pourquoi, le maillage a été affiné dans la zone de l'obstacle (zone d'ombre, Figure 6-19, p. 314) où les triangles sont nettement plus petits que les autres. Le maillage des triangles a été créé pour se rapprocher de la bathymétrie du tombolo en utilisant 11 836 triangles et 6 061 nœuds.

Nous définissons les conditions aux limites du modèle comme le modèle couplé MIKE21/3 FM. Les scénarios tiennent compte des houles et des vents dans les conditions annuelle et tempétueuse.



Figure 6-19 : Maillage calculé pour le tombolo Ouest.

## 6.4.2. Evaluation de l'efficacité des solutions envisagées

L'analyse des résultats du modèle numérique est liée aux caractéristiques des solutions afin de donner des suggestions pour l'amélioration des solutions conçues. Elle est réalisée en se basant sur l'efficacité des variations de volume, sur l'évolution profil de la plage, sur la transmission de la houle, sur le courant et sur le niveau marin.

#### 6.4.2.1. Evaluation de l'efficacité sur le volume d'évolution

Les variations en volume représentent la vitesse de changement de volume par jour (mètres cube par jour). Les changements de volume s'étendent du rivage au large et sont divisés en quatre zones : A, B, C et D (Paragraphe 4.8.1. p. 221).

Les changements de volume sont indiqués pour chaque zone dans le tableau 6-6.

Zone	Annuel					Tempête				
Alternative	Α	В	С	D	Total	Α	В	С	D	Total
0	-52	-663	4	-13	-724	-1162	-10141	-1477	-3297	-16077
1	-103,8	117,6	-88	125,9	51,7	-851	-5271	-2157	-3814	-12093
2	-105,9	74,4	-88,6	115,2	-4,9	-874	-5273	-2106	-3781	-12034
3	-106,4	131	-69,4	134,8	90	-960	-5341	-2150	-3879	-12330
4	-103,9	136,3	-59,6	137,9	111	-946	-5293	-2144	-3877	-12260
5	-95,5	-18,7	18,3	124,8	28,9	-984	-5645	-2020	-3874	-12523
6	-93,6	-26	6,7	126,4	13,5	-803	-5623	-2033	-3847	-12306
7	167,9	171,9	-104,3	711,8	947	-784	-5717	-1886	-4174	-12561
8	14,6	149,2	-1,1	-34,4	128	-874	-4409	-1746	-5779	-12808
9	-50,5	151	-18,9	63,3	145	-859	-4407	-1607	-5972	-12845
10	-49,5	185	-26,9	86,3	195	-972	-4387	-1817	-4999	-12175
11	-51,4	156,5	-20,6	81,3	166	-757	-4403	-1643	-5106	-11909
12	173,1	163,2	-107,1	705,7	935	-796	-5706	-1961	-4272	-12735
13	-3,7	140	-42,9	67,1	161	-880	-4455	-1804	-5718	-12857
14	-26,8	127,4	-50	70,2	121	-819	-4388	-1693	-5925	-12825
			V en	mètres c	ube par	jour.				

Tableau 6-6 : Les changements de volume (V) pour chaque solution.



*Figure 6-20 : Evolution du volume pour chaque solution dans la condition annuelle (A) et tempétueuse (B) (Lacroix et al., 2015b).* 

Le changement de volume a été estimée à -724 mètres cube par jour dans la condition annuelle et -16 077 mètres cube par jour dans la condition tempétueuse avec la période de retour de 30 ans si nous ne faisons rien (alternative 0). En général, toutes les solutions diminuent le phénomène d'érosion marine au tombolo.

Dans la condition annuelle, le dépôt dans le site d'étude (de A à D) a été regardé à l'exception de l'alternative 2. Le changement de volume total annuel est de -4,9 à 947 mètres cube par jour. L'accrétion a été observée dans la zone B sauf pour les

alternatives 5 et 6. Le diagramme de la variation du volume d'évolution par jour est montré sur la figure 6-20, p. 315. La plus grande augmentation de volume total (947 mètres cube par jour) a été observée au niveau de l'alternative 7. Il y avait un remplissage de zone B 171,9 mètres cube par jour (Figure 6-20).

Tous les zones sont érodées par la tempête, avec les plus grandes érosions dans les zones B et D. Les solutions diminuent d'environ 50 pourcent l'érosion dans la zone B, mais elles s'accompagnent d'une augmentation d'érosion dans les zones C et D. La zone B présente le plus de fluctuations. Les autres zones montrent moins de fluctuations (Figure 6-20).

#### 6.4.2.2. Evaluation de l'efficacité sur l'évolution du profil de plage

Les figures 6-21 et 6-22 illustrent l'évolution des profils de plage pour le profil B08 dans les conditions annuelle et tempétueuse.

Dans l'alternative 0 (on ne fait rien), le trait de côte ne s'est pas déplacé. Les 70 premiers mètres sont stables. Entre 70 et 200 mètres, une érosion importante a lieu, l'épaisseur maximale étant d'environ 0,16 mètre par 8 jours entre 170 et 180 mètres de la borne B08.

Dans les alternatives de 1 à 6 (Figures 6-21 et 6-22), les 100 premiers mètres sont érodés. Entre 100 et 200 mètres, il y a eu une accumulation de sable, avec une épaisseur maximale de l'ordre de 0,8 mètre par 8 jours. Ensuite, un creusement, sur une épaisseur maximale de 0,2 mètre par 8 jours, s'est produit entre 200 et 300 mètres et une accrétion, sur une épaisseur maximale de 0,17 mètre, entre 300 et 400 mètres (Figure 6-21).



Figure 6-21 : Evolution du profil B08 des alternatives de 0 à 6 (A) et de 7 à 14 (B) après 8 jours dans la condition annuelle (Lacroix et al., 2015b).

Dans les alternatives de 7 à 14 (Figures 6-21 et 6-22), le trait de côte est avancé. Les 100 premiers mètres sont déposés sauf pour les alternatives 7 et 12 (et l'alternative 14 pendant la tempête). Entre 100 et 200 mètres, une accumulation de sable se retrouve dans tous les alternatives, avec une épaisseur maximale de l'ordre de 0,1 mètre par 8 jours. Ensuite, un creusement, sur une épaisseur maximale de 0,12 mètre par 8 jours, s'est produit entre 200 et 400 mètres.

Le résultat montre que la tendance érosive existe aux 100 premiers mètres du profil B08. La présente des brise-lames dans les alternatives 10, 11, 13 et 14 peut limiter ce phénomène et crée une accumulation dans cette zone.



Figure 6-22 : Evolution du profil B08 des alternatives de 0 à 6 (A) et de 7 à 14 (B) pendant la tempête (Lacroix et al., 2015b).

#### 6.4.2.3. Evaluation de l'efficacité sur le transport de sable

L'efficacité des solutions est déterminée selon le transport de sable pour chaque zone et profil. Les résultats sont présentés sous la forme du transport total des sédiments en mètres cube par an par mètre linéaire.

Le tableau 6-7 et la figure 6-23, p. 318 présentent le transport sédimentaire pour chaque zone. De plus, le transport total des sédiments est représenté pour le profil B08. Il est présenté dans la figure 6-24, p. 319.

-					-			
Zone	Annuel				Tempête			
Alternative	Α	В	С	D	Α	В	С	D
0	0,5	3,9	0,9	1,4	4,6	20,3	15,4	16,4
9	0,3	2,1	2,4	1,6	2,2	12,4	12,5	12,8
10	0,2	2,1	2,2	1,5	2,6	13,8	13,6	11,2
11	0,3	2,2	2,4	1,5	2,3	12,6	12,4	11,4
12	0,4	3,1	2,2	5,4	1,4	14,1	18,8	16,3
13	0,3	2,4	2,3	1,6	2,0	13,1	13,7	12,6
14	0,3	2,5	2,5	1,6	2,0	13,2	12,7	12,8
1	0,3	2,2	2,4	1,7	1,5	11,1	23,4	12,7
2	0,3	2,6	2,5	1,7	1,5	11,7	23,3	12,9
3	0,3	2,1	2,4	1,7	1,7	10,5	23,8	12,8
4	0,3	2,1	2,4	1,7	1,7	10,7	23,9	12,7
5	0,3	2,3	2,7	1,7	1,9	10,2	24,4	12,9
6	0,3	2,6	2,7	1,7	1,6	10,6	24,4	12,9
7	0,4	2,7	2,2	5,4	1,3	13,3	18,1	16,3

Tableau 6-7 : Transports sédimentaires (Q) pour chaque solution.



(A) (B) Figure 6-23 : Transports sédimentaires pour chaque solution dans la condition annuelle (A) et tempétueuse (B) (Lacroix et al., 2015b).

A B C D

A B C D

Ces résultats donnent une meilleure représentation de transport de sédiments et illustrent comment les solutions affectent le littoral.

Le résultat du tableau 6-7, p. 317 montre que la tendance à la diminution du transport sédimentaire existe dans la zone B. Cependant, cela peut provoquer une augmentation du transport sédimentaire dans les zones C et D.

La comparaison avec l'alternative 0 (on ne fait rien) permet de suggérer des solutions qui pourraient être plus efficaces contre l'érosion marine. Ceci est nécessaire afin d'éviter la mauvaise évaluation de l'efficacité des solutions. En effet, certaines structures pourraient être efficaces en ralentissant le déplacement des sédiments et piégeant des sédiments du côté aval de la structure. En revanche, elles pourraient causer un transport sédimentaire plus élevé dans le voisinage de la structure.

Les résultats de l'alternative 0 obtenus avec module couplé MIKE21/3 FM pour le tombolo Ouest sont présentés dans la figure 6-24 ce qui indique que le transport total des sédiments par an varie entre 80 à 600 mètres cube par an.

Dans les alternatives de 1 à 6, le transport sédimentaire des 100 premiers mètres monte. Entre 100 et 200 mètres, il y a eu une diminution du transport sédimentaire (Figure 6-24, p. 319). Le plus fort transport est observé dans l'alternative 1, qui est égal à environ 500 mètres cube par an par mètre linéaire.

Dans les alternatives de 7 à 14, le transport sédimentaire des 200 premiers mètres

baisse sauf les alternatives 12 et 14. L'alternative 7 a montré un légèrement plus petit transport de sédiments pour les 200 premiers mètres. Le plus fort transport est observé dans l'alternative 14, qui est égale à environ 370 mètres cube par an par mètre linéaire.

Les structures dans les alternatives de 3 à 6, 12 et 14 induisent un transport de sable plus élevé de près de 450 mètres cube par an par mètre linéaire près de la côte qui est plus grand que celui de l'alternative 0 (Figure 6-24).



Figure 6-24 : Transport sédimentaire en mètres cube par an par mètre linéaire des alternatives de 0 à 6 (A) et de 7 à 14 (B) dans la condition annuelle (Lacroix et al., 2015b).



Figure 6-25 : Transport sédimentaire en mètres cube par an par mètre linéaire des alternatives de 0 à 6 (A) et de 7 à 14 (B) dans la condition tempétueuse (Lacroix et al., 2015b).

Le résultat montre que la tendance de diminution du transport sédimentaire existe entre 100 et 400 mètres du profil B08 (Figure 6-25). La présence de brise-lames dans les alternatives 10, 11, 13, et 14 peut limiter ce phénomène et créer une accumulation dans cette zone.

#### 6.4.2.4. Evaluation de l'efficacité sur l'atténuation de la houle

Au tombolo Ouest, l'érosion marine est principalement causée par les houles, alors, l'atténuation de la houle limiterait l'érosion marine.

Les résultats issus de l'exécution du module couplé de MIKE21/3 FM ont été utilisés pour évaluer l'efficacité des solutions. La houle est analysée à -1 et -3 mètres. Deux points d'extraction des résultats devaient être définis, où l'un d'entre eux est à la côte (-1 mètre) (de E01 à E12) et un autre au large (-3 mètres) (du point 1 au point 8).

#### a) Atténuation de la hauteur et de la période des houles

Le coefficient d'atténuation de la houle est utilisé pour mesurer l'efficacité des solutions en termes d'atténuation de la houle.

$$K_{t1} = H_t / H_i$$
(6-1)  
 $K_{t2} = T_t / T_i$ (6-2)

Où  $K_t$  est le coefficient d'atténuation de la houle ;  $H_t$ ,  $T_t$  sont la hauteur et la période de la houle à la côte ;  $H_i$ ,  $T_i$  sont la hauteur et la période de la houle incidente au large, respectivement.

Lorsque le coefficient d'atténuation est égal à 1, cela indique que les houles de transmission ne sont pas dissipées du tout, tandis que 0 signifie 100% de dissipation des houles. Cela conduit à la conclusion que le coefficient d'atténuation calculé est inversement proportionnel à la capacité de la dissipation des houles.

Les coefficients d'atténuation ont été calculés pour l'ensemble des 14 alternatives. Ils donnent une meilleure présentation visuelle de la façon dont les alternatives atténuent la houle.

La houle à la côte avec et sans solution sont comparées. Ces résultats sont dans le tableau 6-8 et montrent l'efficacité des alternatives sur l'atténuation de la houle dans la zone de déferlement. Les solutions réduisent la hauteur de la houle annuelle à 25% et la houle de tempête à 44%. La période de la houle est changée à 15%. Les coefficients d'atténuation de la hauteur de la houle sont entre 0,56 et 0,88.

· ·		-											
	Annu	ıel					Tem	Tempête					
Alternative	Haut	Hauteur (m)			ode (s)		Haut	Hauteur (m)			Période (s)		
	Hi	Ht	K <sub>t1</sub>	Ti	Tt	K <sub>t2</sub>	Hi	Ht	K <sub>t1</sub>	Ti	Tt	K <sub>t2</sub>	
0	0,8	0,7	0,88	4,5	4	0,89	1,6	1,1	0,69	7,7	7,1	0,92	
1	0,8	0,7	0,88	4,5	3,9	0,87	1,6	1	0,63	7,7	7	0,91	
2	0,8	0,7	0,88	4,5	3,9	0,87	1,6	1	0,63	7,7	7	0,91	
3	0,8	0,6	0,75	4,5	3,8	0,84	1,6	0,9	0,56	7,7	6,9	0,90	
4	0,8	0,6	0,75	4,5	3,8	0,84	1,6	0,9	0,56	7,7	6,9	0,90	
5	0,8	0,6	0,75	4,5	3,8	0,84	1,6	0,9	0,56	7,7	6,9	0,90	
6	0,8	0,6	0,75	4,5	3,8	0,84	1,6	0,9	0,56	7,7	6,9	0,90	
7	0,8	0,7	0,88	4,4	3,9	0,89	1,6	1	0,63	7,7	7,1	0,92	
8	0.8	0.6	0.75	4.5	3.9	0.87	1.6	1	0.63	7.7	7.1	0.92	

Tableau 6-8 : Coefficient de dissipation dans les conditions annuelle et tempétueuse (Lacroix et al., 2015b).

	Annu	Annuel							Tempête				
Alternative	Hauteur (m)			Pério	Période (s)			Hauteur (m)			Période (s)		
	Hi	Ht	K <sub>t1</sub>	Ti	Tt	K <sub>t2</sub>	Hi	Ht	K <sub>t1</sub>	Ti	Tt	K <sub>t2</sub>	
9	0,8	0,6	0,75	4,5	3,9	0,87	1,6	1	0,63	7,7	7,1	0,92	
10	0,8	0,6	0,75	4,5	3,9	0,87	1,6	1	0,63	7,7	7,1	0,92	
11	0,8	0,6	0,75	4,5	3,9	0,87	1,6	1	0,63	7,7	7,1	0,92	
12	0,8	0,6	0,75	4,4	3,8	0,86	1,6	0,9	0,56	7,7	7	0,91	
13	0,8	0,6	0,75	4,5	3,8	0,84	1,6	0,9	0,56	7,7	7	0,91	
14	0,8	0,6	0,75	4,5	3,8	0,84	1,6	0,9	0,56	7,7	7	0,91	

Le coefficient d'atténuation des alternatives 0-2 et 7 varie entre 0,63 et 0,88. Ces résultats ont montré un coefficient d'atténuation plus élevé que ceux observés pour les autres alternatives. Ces solutions devraient être moins efficaces pour l'atténuation de la houle dans les conditions testées.

Les alternatives 8-11 ont des coefficients de transmission plus faibles. Ils se situent dans la gamme de 0,63 à 0,75 et pourraient être qualifiés de solutions assez efficaces pour les conditions testées.

Les sept dernières alternatives (alternatives 3-6 et 12-14), ont montré des résultats similaires entre eux. Ils ont la gamme de coefficient d'atténuation de 0,56 à 0,75. Ce sont les meilleurs résultats.

Nous pouvons dire que les alternatives 3-6 et 12-14 ont les plus bas coefficients de transmission de l'ensemble des 14 solutions conçues et sont les plus efficaces sur l'atténuateur de la houle (Lacroix et al., 2015b).

#### b) Atténuation de l'énergie densité des houles

Nous avons extrait de la simulation de la densité d'énergie de la houle pour quatre secteurs. Point de sortie près de la côte (de -1 mètre, de E01 à E12) a été définie (Figure 4-53, p. 238).



Figure 6-26 : Distribution d'énergie des houles dans la condition annuelle (A) et tempétueuse (B) (Lacroix et al., 2015b).



Figure 6-27 : Distribution d'énergie des houles de la zone Nord dans la condition annuelle (A) et tempétueuse (B) (Lacroix et al., 2015b).

Les figures 6-26 et 6-27 présentent la répartition d'énergie des houles à la côte (Lacroix et al., 2015b).

Nous avons également extrait de la distribution de l'énergie des houles pour la zone Nord.

Les énergies des houles des alternatives 0, 1, 4 et 7-11 sont plus élevées que celles observées pour les autres alternatives. Ces solutions devraient être moins efficaces pour l'atténuation de l'énergie des houles dans les conditions testées.

Les alternatives 2, 3, 5, 6 et 12-14 ont des densités d'énergie plus faibles. Ils pourraient être qualifiés de solutions assez efficaces pour les conditions testées. Ce sont les meilleures solutions (Lacroix et al., 2015b).

Nous pouvons dire que les alternatives 2, 3, 5, 6, et 12-14 ont les plus basses densités d'énergie de l'ensemble des 14 solutions conçues et représentent les plus efficaces sur l'atténuateur de la houle (Lacroix et al., 2015b).

#### 6.4.3. Evaluation des coûts

Les coûts des solutions envisagées seront d'abord estimés à partir des sources disponibles. Ils seront ensuite comparés avec les coûts de la construction d'une nouvelle route.

#### 6.4.3.1. Estimation des coûts des solutions envisagées

Il est difficile de déterminer de façon précise le coût de chaque solution. Nous estimons les coûts qui peuvent varier dans chaque région à partir des données disponibles fournies par les travaux d'ERAMM (2001), BCEOM, EID Méditerranée, et DDE 13. Le coût estimatif se compose du coût des matériaux pour la construction et le coût des solutions au mètre linéaire. Ces coûts permettent d'évaluer les financements de chaque solution pour comparer et choisir les solutions.

En outre, il nous faut prendre en compte les autres coûts tels que le coût de suivi des bathymétries, des observations, le coût d'opérations de sensibilisation (panneaux expliquant le fonctionnement écologique des dunes, ...), etc. .... (Méditerranée, 2006). Cependant, ils ne sont pas pris en compte dans notre travail car ils sont seulement une petite partie de l'investissement total.

Le tableau 6-9, p. 323 indique les coûts d'installation et d'entretien pour certaines solutions. Le coût d'entretien du rechargement de plage est très variable. Il dépend de la demande en rechargement annuel du site. En effet, le rechargement de 8 000 m3/an de sable est estimé au tombolo Ouest (Jeudy De Grissac, 1975). Pour une butée de pied en enrochement, le coût d'entretien est semblable à celui des autres ouvrages lourds (épis et brise-lames). Pour les données d'ERAMM (2001), un euro (€) est équivalent à 6,55957 FF.

ID	Techniques	Équipe/	Unité	Coût (€ HT)		Source
	utilisées	matériaux		Installation	Entretien	
1	Coût moyen des m	natériaux				
1.1	Sable et gravier	Voie terrestre	Т	15,24		ERAMM, 2001
1.2	Sable et gravier	Pompage et refoulement	Т	7,62		
1.3	Ballaste	Voie maritime	Т	21,34		
1.4	Enrochement		m <sup>3</sup>	76,22		
			ml	4 065		
1.5	Palplanche		ml	2 541		
1.6	Géotextile			2 541		
1.7	Sable		Т	12,2		SOGREAH,
			m <sup>3</sup>	24,39		1988
2	Coût estimative de	es solutions				
2.1	Rechargement	Sable	m <sup>3</sup>	7 à 14	Très variable	
	de plage	Grenus	ml	45		DDE 13
2.2	Reprofilage de pla	ge	ml	70		EID Med
2.3	Rechargement +	Voie terrestre	ml	4 574 à 5 336		ERAMM, 2001
	Reprofilage de plage	Voie maritime	ml	6 098		
2.4	Création de cordo	n dunaire	ml	320 à 400	20 € HT/ml de	EID Med
2.5	Restauration duna	aire	ml	75	ganivelles remplacé	EID Med
2.6	Epis		ml	2 500	3 à 5% du prix	DDE 13
2.7	Brises lames émer	gé	ml	4 000	d'installation	BCEOM
2.8	Brise-lames semi-	immergé	ml	6 200	pai all	
2.9	Butée de pied	Géotextile	ml	2 000	Variable	BCEOM, 2004
		Enrochement	ml	4 000		
		Géotextile ml		700		ERAMM, 2004
		Enrochement	ml	1 330		
		Géotextile	ml	1 100		BRL, 2005
		Géotextile	ml	7 200		DDE13, 2006

Tableau 6-9 : Coûts d'installation et d'entretien (Méditerranée, 2006).

ID	Techniques utilisées	Équipe/ matériaux	Unité	Coût (€ HT)	Source	
				Installation	Entretien	
		Enrochement	ml	1 1 4 3		ERAMM, 2001
		Palplanche	ml	686		
		Géotextile	ml	686		

Mètre de longueur de l'ouvrage (ml) ; € HT - euros hors taxes ;

Sur cette base, nous pouvons déterminer le coût pour chaque solution. Ces solutions sont triées de faible coût à coût élevé dans le tableau 6-10. Les coûts des solutions envisagées varient de 0,8 à 11 millions d'euros hors taxes.

Tableau 6-10 : Coût des différentes solutions envisages (Lacroix et al., 2015b).

Alternative	Rechargement	Longueur (m)			Cout (E HT)			
	(m <sup>3</sup> )	В	Е	BIR	BIE	Installation	Entretien	Total
1	66 680					733 480	88 000	821 480
3	66 680	150				1 114 630		1 202 630
4	66 680	150	100			1 368 730		1 456 730
7			400	440		2 134 440	?	2 134 440
2	218 061					2 398 671	88 000	2 486 671
12	66 680		400	440		2 867 920		2 955 920
5	218 061	450				3 542 121		3 630 121
8				1020	680	4 319 700	?	4 319 700
6	218 061	450	300			4 304 421	88 000	4 392 421
13	66 680			1020	680	5 053 180	?	5 053 180
9			900	1020	680	6 606 600	?	6 606 600
14	66 680		900	1020	680	7 340 080	?	7 340 080
10				2040	1360	8 639 400	?	8 639 400
11			900	2040	1360	10 926 300	?	10 926 300

B – la butée de pied ; E – l'épi immergé ; BIR – les brise-lames immergés rapprochées ; BIE – les briselames immergés éloignées ; la signe « ? » - les coûts d'entretien chaque année ne sont pas pris en compte : 3 à 5% du prix d'installation (Tableau 6-9, p. 323).

## 6.4.3.2. Comparaison entre les coûts des solutions envisagées et ceux de la construction d'une nouvelle route

La ville Hyères a envisagé une solution consistant en la construction d'une nouvelle route située entre les deux branches du tombolo. Une analyse portant sur 35 projets réalisés entre 1997 et 2002 nous donne un coût moyen de 4,91 millions d'euros hors taxes par kilomètre aux tarifs de 2006. Selon Cazala et al. (2006), les frais de maîtrise d'œuvre et d'ouvrage représentent environ 10% des dépenses annuelles d'investissement. Si nous prenons en compte ces frais, le coût moyen de construction est de l'ordre de 5,4 millions d'euros hors taxes par kilomètre aux tarifs de 2006 pour une route à 2 voies x 2 voies (Cazala et al., 2006). Cela nous permet d'estimer le coût de la nouvelle route d'une longueur de 4 kilomètres entre 19 et 22 millions d'euros hors taxes (valeur 2006), sans impacter sur ce coût celui de la construction en terrain non
stabilisé (pilotis). Il ne tient pas compte des coûts de l'impact environnemental (les salins des Pesquiers sont une zone naturelle très sensible), ou paysager. Il est plus grand que celui des solutions envisagées inférieur à 11 millions d'euros dans le tableau 6-10.

# 6.5. Suggestions sur le choix de la solution globale de protection du tombolo Ouest

Sur la base des résultats des modélisations de la solution de protection contre l'érosion et des conditions spécifiques au tombolo occidental, nous notons que les résultats de la modélisation numérique sur les solutions proposées est conforme à la règle générale. Les résultats calculés pour les scénarios proposés permettent que la sélection de la solution optimale soit basée sur les critères qui sont décrits dans le tableau 6-11 :

Tableau 6-11 : Critères pour choisir la solution de protection du tombolo Ouest (Lacroix et al., 2015b).

ID	Critères
1	Efficacité sur le volume d'évolution
2	Efficacité sur l'évolution profil de la plage et sur le transport de sable
3	Performance réduction de vague
4	Amélioration de la dune
5	Préférence pour la solution douce
6	Coût
7	Impact minimal sur l'environnement
8	Prise en charge des activités de loisirs (tourisme, sport)

En termes d'efficacité sur le volume d'évolution, les alternatives 1, 3, 4, et 7-14 semblent être plus efficaces que les autres alternatives.

En termes d'efficacité sur l'évolution du profil de plage et sur le transport de sable, la présente des brise-lames dans les alternatives 10, 11, 13, et 14 peut créer le dépôt de sédiment dans le littoral de 100 premiers mètres. Les autres alternatives peuvent provoquer une érosion dans cette zone.

En termes d'efficacité sur l'atténuation de la houle, nous remarquons que les alternatives 3-6 et 12-14 nous donnent les plus bas coefficients de transmission que les autres alternatives. Ils pourraient être atténuateur les plus efficaces de houle.

Concernant les remarques ci-dessus, les conditions hydrodynamiques et morphologiques et les conditions de vie sociale et économique au tombolo occidental, nous proposons une comparaison des solutions selon les critères dans le tableau 6-12,

#### p. 326.

Nous avons deux groupes de solutions plus adaptées :

- Le groupe 1 se compose des alternatives 3, 4, et 12 (Tableau 6-12). Nous remarquons que le rechargement semble être incontournable pour la solution de protection de la plage. Cependant, le groupe 1, avec le rechargement, les butées et épis immergés, ne suffit pas à arrêter définitivement le phénomène d'érosion au tombolo Ouest.
- Le groupe 2 se compose des alternatives 10, 11, 13, et 14 (Tableau 6-12). Les calculs montrent également que pour la stabilité du littoral, le groupe 2 est le meilleur car il est possible d'empêcher les principales causes d'érosion du littoral. Il peut atténuer la houle incidente et faire progresser ainsi la protection contre l'érosion marine. Le groupe 2 est plus coûteux (de 5 à 11 millions d'euros hors taxes) que le groupe 1 (de 1,2 à 3 millions d'euros hors taxes).

Altornativo	Critère									
Alternative	1	2	3	4	5	6	7	8		
1	+	-	-	-	+	+	+	+		
2	-	-	-	-	+	+	+	+		
5	-	-	++	-	+	-	-	+		
6	-	-	++	-	+	-	-			
7	+	-	-	-	-	-	-			
8	+	-	+	+	-			-		
9	+	-	+	+	-					
3	+	-	++	-	+	-	-	+		
4	+	-	++	-	+	-	-	+		
12	+	-	++	-	-	-	-	-		
10	+	+	+	+	-			-		
11	+	+	+	+	-					
13	+	+	++	+	-					
14	+	+	++	+	-					

*Tableau 6-12 : Comparaison des solutions de protection du tombolo Ouest (Lacroix et al., 2015b).* 

++ : très bon, + : bon, - : mauvaise, -- : très mauvaise.

Dans le même temps, en parallèle avec des solutions dures, nous devons mettre en œuvre des mesures de gestion intégrée de tout le tombolo pour soutenir les solutions dures dans la protection de l'environnement en général.

Nous notons que les résultats de notre travail sur les modèles des solutions envisagés sont analysés individuellement. Pour calibrer et valider ceux-ci, les données détaillées supplémentaires de mesures in situ et la modélisation physique sont nécessaires, mais non disponibles pour cette thèse.

## **6.6.** Conclusions

En nous basant sur les résultats des études de modélisation, nous pouvons atténuer des houles et ralentir des transports sédimentaires par la présence de construction pour limiter l'érosion du littoral dûe aux houles et courants.

Les modèles couplés des houles, des courants, des niveaux d'eau et des transports sédimentaires nous permettent de calculer l'évolution hydrodynamique et morphologique au tombolo occidental en présence d'ouvrages de protection. L'analyse des données disponibles et le résultat des calculs montrent que le processus hydrodynamique, le transport de sable et l'évolution du fond marin ont été modifiés en présence d'ouvrages de protection. Ces ouvrages se révèlent être une protection efficace, particulièrement efficace en zone Nord, la plus impactée en l'absence d'intervention. Nous distinguons deux groupes de solutions mieux adaptées :

Le groupe 1 se compose des alternatives 3, 4, et 12. Nous remarquons que le rechargement semble être incontournable pour la protection de la plage. Cependant, le groupe 1, avec le rechargement, les butées et épis immergés, ne suffit pas à arrêter définitivement le phénomène d'érosion au tombolo ouest.

Le groupe 2 se compose des alternatives 10, 11, 13, et 14. Les calculs montrent également que pour la stabilité du littoral, le groupe 2 est le plus performant car il est possible d'empêcher les principales causes d'érosion du littoral. Il peut atténuer la houle incidente. Le groupe 2 est plus coûteux (de 5 à 11 millions d'euros hors taxes) que le groupe 1 (de 1,2 à 3 millions d'euros hors taxes). Ces solutions sont conformes à l'objectif fixé pour le problème d'érosion au tombolo.

En comparaison des coûts des solutions envisagées ci-dessus, allant de 0,8 à 11 millions d'euros hors taxes, le coût d'une nouvelle route paraît disproportionné, sans même envisager l'impact environnemental (les salins des Pesquiers sont une zone naturelle très sensible), ou paysager.

# **Chapitre 7. Enseignements et perspectives**

La détermination de l'évolution du tombolo occidental est un problème très difficile et complexe, en particulier en présence des herbiers de posidonie. De plus, le tombolo Ouest est soumis à des contraintes économiques et environnementales fortes. Notre travail utilise des méthodes de recherche modernes pour analyser les problèmes existants par le biais des études précédentes et avec pour objectif de proposer des solutions durables à la stabilisation du cordon dunaire. Nous avons par des méthodes scientifiques analysé et identifié les facteurs affectant l'évolution du tombolo occidental. Sur cette base, nous proposons des solutions envisageables pour stabiliser le littoral. Nous tirerons quelques enseignements de nos travaux. Les perspectives seront présentées à la fin du chapitre.

## 7.1. Enseignements

Les enseignements seront tirés de nos travaux sur deux aspects : les données d'entrée et la modélisation numérique.

#### 7.1.1. Sur les données d'entrée

Pour améliorer la modélisation morphologique du tombolo occidental, nous faisons plusieurs suggestions :

Tout d'abord, la résolution temporelle des données de bathymétrie du tombolo n'est pas assez précise, seules sont disponible la mention de l'année ou de la saison, mais la courte période (un mois ou une semaine) n'est pas documentée. Plus de précision temporelle sur ces relevés amélioreraient la performance (la fidélité) du modèle.

Ensuite, les données au niveau de la limite de l'échelle régionale ne sont pas assez précises pour calibrer le modèle hydrodynamique. Ainsi, pour être plus quantitatifs et plus précis, il faut renforcer la précision des mesures à ce niveau-là aussi.

Nous utilisons les données de houle à la bouée 08301 de CANDHIS non directionnelle. La direction de la houle au large a été récupérée par des données simulées par PREVIMER, mais elle n'est pas assez précise non plus. Pour résoudre ce problème, nous proposons d'utiliser les données de houle à la bouée 08302 de CANDHIS depuis 09 Décembre 2013. Les paramètres de la houle et du courant d'une ou deux stations le long du tombolo occidental pourraient être utiles pour calibrer la propagation de la vague du large à la côte. Basé sur le transport des sédiments observé par section transversale, le modèle de transport de sédiments pourrait être ajusté pour donner un résultat plus précis.

Enfin, la thèse n'a pas abordé l'impact de l'évolution saisonnière des herbiers de posidonie. Les paramètres pris en compte sont des valeurs moyennes en méditerranée ou au site de la Capte. Des données détaillées supplémentaires de bathymétrie sont nécessaires pour déterminer plus précisément la bathymétrie avec et sans posidonie. Sur cette base, nous pourrons évaluer plus détail le rôle des posidonies dans l'évolution du littoral et améliorer aussi les résultats du modèle numérique car la bathymétrie joue un rôle déterminant pour le modèle morphologique.

#### 7.1.2. Sur la modélisation numérique

Il nous faut améliorer l'estimation de la rugosité des zones de roche et d'herbiers de posidonie qui influencent significativement le courant et la houle.

Le modèle n'examine pas l'impact des petites rivières, le régime des pluviométries, la variabilité de la salinité, ainsi que la viscosité.

La modélisation morphologique du tombolo permet d'expliquer pourquoi l'érosion est forte dans la partie Nord et d'évaluer l'efficacité des solutions envisagées en courte période, mais elle n'a pas encore calculé sur une durée assez longue (par exemple 5 ou 10 ans) pour voir l'évolution et le comportement morphologique du tombolo à plus grande échelle.

Les résultats de cette thèse s'arrêtent juste au niveau de la recherche, de l'analyse de l'évolution du littoral et de l'impact des solutions sur le littoral, ainsi que la proposition de solutions intégrées ; mais nous n'avons pas examiné l'impact spécifique de la reconstitution annuelle du cordon dunaire au tombolo occidental. De plus, le phénomène de franchissement et de destruction du cordon dunaire, avec transport du sable vers le canal de ceinture, n'a pas été intégré à notre modèle.

La solution d'ingénierie qui serait retenue devrait intégrer des analyses plus fines pour le modèle avant de l'appliquer pour tenter de stabiliser le littoral, les enjeux étant importants.

## 7.2. Perspectives

Nos travaux auraient besoin de beaucoup de temps de travail pour une compréhension totale des phénomènes d'érosion littorale. Dans la prochaine étape de la recherche, nous devrons analyser, évaluer, mettre à jour des données et réaliser des recherches plus approfondies. Les détails sur les solutions suggérées devront être clarifiés concernant les couches, les profils, et les orientations de la plage rechargée ainsi que les profils des brise-lames et des épis immergés. Les modifications à long terme de bathymétrie à proximité de ces structures devront être analysées. Le problème de leur stabilité devra être évalué. Nous traiterons le problème de l'érosion côtière en cas d'absence ou de présence des structures proposées au tombolo par l'étude expérimentale afin de vérifier une fois de plus nos modèles.

# **Bibliographie**

- K.A. ADDO, JAYSON-QUASHIGAH P.N. & KUFOGBE K.S. 2011. Quantitative analysis of shoreline change using medium resolution satellite imagery in Keta, Ghana. *Marine Science*, 1, 1-9. Disponible à l'adresse : <u>article.sapub.org/10.5923.j.ms.20110101.</u> 01.html.
- E. AKOUANGO 1997. Morphodynamique et dynamique sédimentaire dans le Golfe du Lion : contribution à l'étude de la zone côtière dans l'actuel et le quaternaire récent, Perpignan. Disponible à l'adresse : www.theses.fr/1997PERP0292.
- T. ALBERS & VON LIEBERMAN N. 2011. Current and Erosion Modelling Survey. Management of Natural Resources in the Coastal Zone of Soc Trang Province. Disponible à l'adresse : <u>czmsoctrang.org.vn/Publications/EN/Docs/Erosion%20</u> <u>Control%202011\_EN.pdf</u>.
- A. ALEXANDRE, MALLET C., LE NINDRE Y.M. & BENHAMMOUDA S. 2003. Evolution du littoral aquitain et impact des ouvrages de protection : secteurs de Biscarrosse, Mimizan et Capbreton. BRGM. Rap. BRGM/RP-51877-FR. Disponible à l'adresse : infoterre.brgm.fr/rapports/RP-51877-FR.pdf.
- F.J. ANDERS & BYRNES M.R. 1991. Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. *Shore and Beach*, 59, 17–26. Disponible à l'adresse :
- Anonyme. 2013. *Sédimentation: le recul du trait de côte du tombolo ouest de la presqu ile de Giens* [Online]. Disponible à l'adresse : <u>benvtt04.free.fr/L2/semestre%204/</u><u>dossier%20final.pdf</u>.
- C. ANTOINE. Année inconnue. Plage de l'Almanarre. Disponible à l'adresse : provence.aparcourir.com/c geo/geo fiche.php?id=PlAlmanarre.
- ASSOCIATION INFOCLIMAT. 2014. *La météo en temps réel* [Online]. Disponible à l'adresse : <u>www.infoclimat.fr/observations-meteo/archives/4/septembre/2013/</u> toulon-la-mitre/07660.html.
- J.P. BARUSSEAU, RADULESCU M., DESCAMPS C., AKOUANGO E. & GERBE A. 1994. Morphosedimentary multiyear changes on a barred coast (Gulf of Lions, Mediterranean Sea, France). *Marine Geology*, 122, 47-62, 0025-3227. Disponible à l'adresse : <u>www.sciencedirect.com/science/article/pii/0025322794902046</u>.
- J.P. BARUSSEAU & SAINT-GUILY B. 1981. Disposition, caractères et formation des barres d'avant-côte festonnées du Golfe du Lion. *Oceanologica Acta*, 4, 297-304. Disponible à l'adresse : <u>archimer.fr/doc/00131/24197/22190.pdf</u>.
- J.A. BATTJES. Surf similarity. Proceedings of 14th Coastal Engineering Conference, 1974 Copenhagen, Denmark. : American Society of Civil Engineers, New- York, 466–480. Disponible à l'adresse : <u>icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/2921</u>.
- J.A. BATTJES & JANSSEN J.P.F.M. Energy loss and set-up due to breaking of random waves. 16th International Conference on Coastal Engineering, 1978 Am. Soc. of Civ. Eng., Hamburg, Germany. 569-587, 2156-1028. Disponible à l'adresse : cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?28058.

- R.A. BEACH & STERNBERG R.W. 1992. Suspended sediment transport in the surf zone: Response to incident wave and longshore current interaction. *Marine Geology*, 108, 275-294, 0025-3227. Disponible à l'adresse : <u>www.sciencedirect.com/science/ article/pii/002532279290201R</u>.
- P. BEAUDOIN. 2007. Analyse prédictive et comparative de la production énergétique d'une centrale éolienne autonome en site éloigné à l'aide du logiciel d'analyse de projet en énergies renouvelables Retscreen International. Mémoire de recherche, Université du Québec à Rimouski, 1412314410. Disponible à l'adresse : <u>constellation.uqac.ca</u> /397/1/030008179.pdf.
- J.-M. BEYNET, BOUGIS J., CHERRIÈRE T., CHIGNOLI M. & DEGAIE A. 2004. Protection originale du port de Nuisement sur le lac du Der. *VIIIèmes Journées Nationales Génie Civil Génie Côtier.* Compiègne. Disponible à l'adresse : <u>www.paralia.fr/Files/08 69 7p beynet.pdf</u>.
- E.W. BIJKER 1967. Some considerations about scales for coastal models with movable bed. Disponible à l'adresse : <u>repository.tudelft.nl/view/ir/uuid%3Acdf2f061-3fe6-4361-a0e7-636fc69c9eca/</u>.
- R. BIZIEN, DELORT E. & GRUNCHEC R. 2004. Evolution du trait de côte du littoral varois. Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/download/9gqsleikye5kvsk/</u> <u>b d g 04.pdf</u>.
- J.J. BLANC 1953. Hydrodynamique et sédimentation des fonds de calanques. *COMPTES RENDUS HEBDOMADAIRES DES SEANCES DE L ACADEMIE DES SCIENCES*, 237, 1173-1175. Disponible à l'adresse : gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343481087/date.langFR.
- J.J. BLANC. 1956. Recherches de sédimentologie littorale et sous-marine en Provence occidentale. PhD. Thesis, Univ. Paris-Sorbonne. Disponible à l'adresse : <u>books.google.fr/books/about/Recherches de s%C3%A9dimentologie littorale.html</u> <u>?id=pp5-GwAACAAJ&pgis=1</u>.
- J.J. BLANC 1958. Houles et vagues (Nord, Nord-Ouest, Ouest) dans la région de Marseille. Influence sur la sédimentation littorale. *Recueil des travaux de la Station marine d'Endoume,* 23, 123. Disponible à l'adresse : <u>paleopolis.rediris.es/benthos/REF/SME.html</u>.
- J.J. BLANC 1960. *Etude sédimentologique de la presqu l'île de Giens et de ses abords.* Rapport final. Disponible à l'adresse : <u>www.abebooks.fr/Etude-s%C3%A9di</u> <u>mentologique-presqu%C2%92%C3%AEle-Giens-abords-BLANC/1044346745/bd</u>.
- J.J. BLANC 1971. Mouvements de la mer et notes de sédimentologie littorale. *Travaux du Laboratoire de Géologie de Luminy.* : Laboratoire de géologie de Luminy. Disponible à l'adresse : <u>books.google.fr/books?id=oLOTtgAACAAJ</u>.
- J.J. BLANC 1973. Recherches sédimentologiques sur la protection du littoral à la presqu'ile de Giens (Var). Rapport final. Disponible à l'adresse : <u>archimer.ifremer.fr/</u><u>doc/00077/18797/16374.pdf</u>.
- J.J. BLANC 1974a. Les zones littorales de la Provence Orientale-Equilibres sédimentaires. Disponible à l'adresse : <u>archimer.ifremer.fr/doc/00104/21502/</u>.
- J.J. BLANC 1974b. Phénomènes d'érosions sous-marines à la Presqu'île de Giens (Var). *CR Acad. Sci. Paris,* 278, 1821-1823.
- J.J. BLANC 1975. Recherches de sédimentologie appliquée au littoral rocheux de la Provence. Aménagement et protection. Rapport final. Disponible à l'adresse : archimer.ifremer.fr/doc/00110/22158/19810.pdf.

- J.J. BLANC 1980. Sédimentologie dynamique des plages de Provence. Méthodologie et études d'impact. Disponible à l'adresse : <u>archimer.ifremer.fr/doc/00110/22149/</u>19790.pdf.
- J.J. BLANC 1982. La dynamique littorale et ses applications sédimentologiques du grand Rhône à la presqu'île de Giens. *Méditerranée*, 46, 25-33, 0025-8296. Disponible à l'adresse : <u>www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/medit 0025-8296 1982 num 46 3 2078</u>.
- J.J. BLANC & JEUDY DE GRISSAC A. 1978. *Recherches de géologie sédimentaire sur les herbiers à posidonies du littoral de la Provence.* Disponible à l'adresse : <u>archimer. ifremer.fr/doc/00077/18813/16390.pdf</u>.
- C.F. BOUDOURESQUE, BERNARD G., BONHOMME P., CHARBONNEL E., DIVIACCO G., MEINESZ A., PERGENT G., PERGENT-MARTINI C., RUITTON S. & TUNESI L. 2006. *Préservation et conservation des herbiers à Posidonia oceanica*, RAMOGE, 2-905540-30-3. Disponible à l'adresse : www.com.univ-mrs.fr/~boudouresque/ Documents conservation/Boudouresque et al 2006 Posidonia Ramoge.pdf.
- J. BOUGIS & DEGAIE A. 1995. L'atténuateur de houle ASB–5000 a permis la création du port de plaisance de Dieppe. Disponible à l'adresse : <u>scs-ingenierie.pagesperso-orange.fr/ASB-docs/ASB Dieppe.pdf</u>.
- H. BREDMOSE, LARSEN S.E., MATHA D., RETTENMEIER A., MARINO E. & SAETTRAN L. 2012. D2.4: Collation of offshore wind-wave dynamics. Disponible à l'adresse : www.fp7-marinet.eu/public/docs/D2.04 Collation of Offshore Wind-Wave Dynamics.pdf.
- F.G. BREHIN, ZARILLO G.A. & ENJO J. 2011. Modélisation morphodynamique des plages du golfe de La Napoule, Alpes Maritimes, France. Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime 2011 Tanger, Maroc. Disponible à l'adresse : www.paralia.fr/cmcm/e02-31-brehin.pdf.
- C. BRIÈRE. 2005. *Etude de l'hydrodynamique d'une zone côtière anthropisée: l'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet.* PhD. Thesis, Université de Pau et des Pays de l'Adour. Disponible à l'adresse : <u>www.theses.fr/2005PAUU3007</u>.
- C. BRUNEL. 2010. Évolution séculaire de l'avant côte de la méditerranée Française, impact de l'élévation du niveau de la mer et des tempêtes. Thèse de Doctorat, Université de Provence-Aix-Marseille I. Disponible à l'adresse : <u>tel.archives-ouvertes.fr/tel-00511971/</u>.
- C. BRUNEL 2013. *Tempêtes et élévation marine: Sur les plages françaises de Méditerranée,* Paris, France, Editions L'Harmattan, 2296513654. Disponible à l'adresse : <u>books.google.fr/books?id=49Dt60I4RoQC&amp;pg=PA65</u>.
- C. BRUZZI 1996. Introduction méthodologique à l'étude des tempêtes. Exemple du littoral du delta du Rhône. *Méditerranée*, 85, 51-54, 0025-8296. Disponible à l'adresse : <u>www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/medit 0025-8296 1996 num 85 4 2954</u>.
- C. BRUZZI. 1998. Les tempêtes et l'évolution morphosédimentaire des plages orientales du delta du Rhône. Aix-Marseille 1. Disponible à l'adresse : www.theses.fr/1998AIX10051.
- C. BRUZZI & PROVANSAL M. 1996. Impacts morphosédimentaires des tempêtes sur les Côtes de Provence [ Morphosedimentary impacts of storms on the littoral of Provence.]. *Quaternaire*, 7, 129-137, 1142-2904. Disponible à l'adresse : <u>www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/quate 1142-</u> 2904 1996 num 7 2 2066.

- L.J. CALLIARI 1994. Cross-Shore and Longshore Sediment Size Distribution on Southern Currituck Spit, North Carolina: Implications for Beach Differentiation. *Journal of Coastal Research*, 10, 360-373. Disponible à l'adresse : www.jstor.org/stable/4298222.
- B. CASTELLE. 2004. *Modélisation de l'hydrodynamique sédimentaire au-dessus des barres sableuses soumises à l'action de la houle : application à la côte aquitaine.* Ph.D. dissertation. Disponible à l'adresse : <u>www.epoc.u-bordeaux.fr/indiv/bonneton/Divers/These Castelle.pdf</u>.
- A. CAZALA, DETERNE J., CRESPY G., GARNIER P., MONCHY G.D. & RIMATTEI P. 2006. Rapport sur la comparaison au niveau européen des coûts de construction, d'entretien et d'exploitation des routes. : Contrôle général économique et financier & Conseil général des ponts. Disponible à l'adresse : <u>www.ladocumentation</u> <u>francaise.fr/var/storage/rapports-publics/074000038/0000.pdf</u>.
- CEREMA 2014. 08301 Porquerolles Mesures du 13/05/1992 au 19/06/2012. Disponible à l'adresse : <u>candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/publications</u> /08301/astx\_08301\_2.pdf.
- R. CERTAIN. 2002. *Morphodynamique d'une côte sableuse microtidale à barres : le golfe du Lion (Languedoc-Roussillon).* Ph.D., Université de Perpignan. Disponible à l'adresse : <u>www.gladys-littoral.org/resources/theses/raphael-certain.pdf</u>.
- R. CERTAIN & BARUSSEAU J.-P. Modélisation conceptuel de l'évolution morphodynamique des barres sédimentaires d'une plage microtidale (Sète, France). Actes des VIII èmes Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier, 2004. 175-183. Disponible à l'adresse : <u>www.paralia.fr/Files/08\_20\_9p\_certain.pdf</u>.
- R. CERTAIN & BARUSSEAU J.P. 2005. Conceptual modelling of sand bars morphodynamics for a microtidal beach (Sète, France). *Bulletin de la Societe Geologique de France,* 176, 343-354. Disponible à l'adresse : <u>dialnet.unirioja.es/</u><u>servlet/articulo?codigo=1265894</u>.
- CETMEF 2011. Fiches synthétiques de mesure des états de mer: Détail des traitements. Disponible à l'adresse : <u>candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/</u><u>publications/doc/2 FicheSynthetique DetailTraitment v2.pdf</u>.
- J.-M. CHAREL. 2014. *Les courants de retour* [Online]. Disponible à l'adresse : jeanmarc.charel.pagesperso-orange.fr/courants/oceancourantretour.htm.
- S. COLAS 2006. Un quart du littoral recule du fait de l'érosion. *Le 4 pages, IFEN: Territoires,* 1-4, 1777-1838. Disponible à l'adresse : <u>www.onml.fr/uploads/media/</u> <u>un quart du littoral recule du fait de l erosion 01.pdf</u>.
- G. COOPER 1977. Giens les Posidonies ou le privilège d'Hyères: les plus grands champs de Posidonies de France et le double tombolo. Il est triste de le voir remis en cause par l'action de la pollution. *Jardinier de la Mer Provence-Corse, Cahier,* 2, 1-119. Disponible à l'adresse : <u>www4.fao.org/cgi-bin/faobib.exe?rec id=203480& database=faobib&search type=link&table=mona&back path=/faobib/mona&lang=e ng&format name=EFMON</u>.
- E.L. CORNEC, FIERE M., GRUNNET N. & PEETERS P. 2008. *Etude de connaissance des phénomènes d'érosion sur le littoral vendéen.* Disponible à l'adresse : <u>www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/etude-de-connaissance-des-a1899.html</u>.
- J. COURTAUD. 2000. *Dynamiques geomorphologiques et risques littoraux cas du tombolo de giens (Var, France méridionale).* Ph.D. dissertation, Université Aix-Marseille I. Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/9ggz02iyoss0v5z/courtaud.pdf</u>.

- R. CREACH & GOASGUEN G. Réseau de mesures du niveau des mers RONIM et réseau de mesures de houle CANDHIS. Les 7èmes journées scientifiques et techniques du CETMEF, 8/12 2008 Paris. : , 12. Disponible à l'adresse : <u>refmar.shom.fr/documents</u> /10227/25991/R%C3%A9seau+de+mesures+du+niveau+des+mers+et+r%C3%A9 seau+de+mesures+du+niveau+des+mers+et+r%C3%A9
- M. CROWELL, LEATHERMAN S.P. & BUCKLEY M.K. 1991. Historical Shoreline Change: Error Analysis and Mapping Accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7, 839-852, 0749-0208. Disponible à l'adresse : <u>www.jstor.org/stable/4297899</u>.
- H. DAMLAMIAN & KRUGER J. 2013. Modèle bidimensionnel couplé de Rangiroa (modèle hydrodynamique et modèle spectral de vague) Cyclone tropical Orama-Nisha (1983).
   Rapport technique. PR166. Disponible à l'adresse : <u>www.pacificdisaster.net/pdnadmin/data/original/SPC\_SOPAC\_2013\_2dCoupled\_hydrodynamic\_FR.pdf</u>.
- V.T. DANG & PHAM T.P.T. 2008. A shoreline analysis using DSAS in Nam Dinh coastal area. *International Journal of Geoinformatics*, 4, 37-42, 1686-6576. Disponible à l'adresse : <u>creativecity.gscc.osaka-cu.ac.jp/IJG/article/view/607</u>.
- DDE & CETE 1992. *Protection du Tombolo Ouest de Giens. Etude de dune.* Rapport final. Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/r230yhaki4kgrbn/CETE 92.pdf</u>.
- D. DE MELO APOLUCENO. 2003. *Morphodynamique des plages à barres en domaine méso à macrotidal : exemple de la plage du Truc Vert, Gironde, France.* thesis. Disponible à l'adresse : <u>babordplus.univ-bordeaux.fr/notice.php?q=id:431402</u>.
- A. DEHOUCK. 2006. *Morphodynamique des plages sableuses de la mer d'Iroise (Finistère).* PhD. Thesis, Université de Bretagne occidentale Brest. Disponible à l'adresse : <u>dumas.ccsd.cnrs.fr/LETG-GEOMER/tel-00109373</u>.
- F. DESMAZES. 2005. Caractérisation des barres sableuses d'une plage de la côte aquitaine: exemple de la plage du Truc Vert. Thèse doctorat, Université de Bordeaux I. Disponible à l'adresse : grenet.drimm.u-bordeaux1.fr/pdf/2005/DESMAZES FRANCK\_2005.pdf.
- DHI 2007. *MIKE ZERO The Common DHI User Interface for Project Oriented Water Modelling.* Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/xymek644xahs1y3/</u><u>MIKEZero.pdf</u>.
- DHI 2014a. *LITDRIFT Longshore Current and Littoral Drift. LITDRIFT USER GUIDE.* Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/feja73aoynj2eeg/litdrift.pdf</u>.
- DHI. 2014b. *LITPACK An Integrated Modelling System for Littoral Processes And Coastline Kinetics Short Introduction and Tutorial.* Disponible à l'adresse : www.mediafire.com/view/p8tt94yygb9yndu/Litpack.pdf.
- DHI 2014c. *LITSTP Noncohesive Sediment Transport in Currents and Waves LITSTP USER GUIDE.* Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/0ag9ttkjkdlslgt/</u><u>litstp.pdf</u>.
- DHI 2014d. MIKE 3 FLOW MODEL FM. Mud Transport Module. User Guide.
- DHI 2014e. *MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM Hydrodynamic and Transport Module Scientific Documentation.* Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/f6fieqopdkeus32/MIKE 321 FM Scientific Doc.pdf</u>.
- DHI 2014f. *MIKE 21 & MIKE 3 FLOW MODEL FM Sand Transport Module -Scientific Documentation.* Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/?5wuau9ilss4tdn3</u>.
- DHI 2014g. *MIKE 21 FLOW MODEL. Hydrodynamic Module. User Guide.* Disponible à l'adresse : <u>www.hydroasia.org/jahia/webdav/site/hydroasia/shared/Document\_public/Project/Manuals/WRS/MIKE21 HD.pdf</u>.

- DHI 2014h. *MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation*. Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/rr6pv2o6bf6k87u/M21SW Scientific Doc.pdf</u>.
- DHI 2014i. *MIKE 21 ST Non-Cohesive Sediment Transport Module User Guide.* Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/?j95xb5h1nuqmbbo</u>.
- DHI 2014j. *MIKE 21/3 Couple Model FM.* Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com</u> /view/4extjtmhec4v69v/MIKE 213 Coupled Model FM.pdf.
- DHI. 2014k. *Mike zero preprocessing & postprocessing User Guide Generic Editors and Viewers*. Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/rw0c3ckhgky7h7g/</u><u>MzGeneric.pdf</u>.
- DHI 2014l. *MIKE ZERO: Creating 2D Bathymetries. Bathymetry Editor & Mesh Generator. Scientific Documentation.* Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/</u> <u>yc3w6h2c2elqnhh/BathymetryGeneration\_ScientificDoc.pdf</u>.
- DHI 2014m. *Modélisation côtière.* Disponible à l'adresse : <u>www.hydrosoft.ca/#!</u> <u>modelisation/c1vjt</u>.
- R. DOLAN & DAVIS R.E. 1994. Coastal storm hazards. *Journal of Coastal Research*, 103-114, 0749-0208.
- C. DUFRESNE. 2014. Compréhension et analyse des processus hydrosédimentaires dans la baie de Toulon. Apport à la modélisation de la dispersion des radionucléides PhD. Thesis, Université de Toulon. Disponible à l'adresse : <a href="https://www.mediafire.com/view/qr1pnh10es2q5iw/1\_Manuscrit\_Dufresne-envoi-rapporteurs.pdf">www.mediafire.com/view/qr1pnh10es2q5iw/1\_Manuscrit\_Dufresne-envoi-rapporteurs.pdf</a>.
- P. DURAND. 1999. L'évolution des plages de l'ouest du golfe de Lion au XXème siècle -Cinématique du trait de côte, dynamique sédimentaire, analyse prévisionnelle. PhD. Thesis, Université Lumière Lyon II. Disponible à l'adresse : <u>www.sudoc.fr/</u>053644107.
- EGIS EAU & ANDROMÈDE OCÉANOLOGIE 2010. Schéma Départemental de la Mer et du Littoral - Volet Environnemental. Annexe 1: Etat des lieux - Etude complémentaire de l'écologie marine. Disponible à l'adresse : <u>www.mer-var.com/schema-departemental</u> <u>-de-la-mer-et-du-littoral pageid231.html</u>.
- EGIS EAU & ANDROMÈDE OCÉANOLOGIE 2011. Schéma Départemental de la Mer et du Littoral - Volet Environnemental. Disponible à l'adresse : <u>ecorem.fr/files/ DESML</u> <u>Plan\_d%5C%27actions-engagements\_20110517.pdf</u>.
- Y. ELDEBERKY & BATTJES J.A. Parameterization of triad interactions in wave energy models. *In:* DALLY, W. R. & ZEIDLER, R. B., eds. Coastal Dynamics '95, 1995. : , 140-148. Disponible à l'adresse : <u>www.researchgate.net/publication/256198135</u> <u>Parameterization of triad interactions in wave energy models</u>.
- J. ENGELUND & FREDSØE F. 1976. A Sediment Transport Model for Straight Alluvial Channels. Disponible à l'adresse : <u>www.iwaponline.com/nh/007/nh0070293.htm</u>.
- ERAMM 2000. Etude de faisabilite couranrologique et sédimentologique préalable au projet d'extension du port des Oursinières. Rapport final. Disponible à l'adresse : www.mediafire.com/view/a26m36dcoou9kco/eramm 00.pdf.
- ERAMM 2001. Etude sur la protection de la partie Nord du tombolo Ouest de Giens. Rapport final. Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/folder/aq5s7cus4fu6f/</u><u>eramm01</u>.
- A. FALSAN. 1863. *Carte géologique et minéralogique des environs d'Hyères*, 1 / 40000. Lyon: imp. de G. Marmorat.
- I. FAYE, GIRAUDET E., GOURMELON F. & HENAFF A. 2011. Cartographie normalisée de l'évolution du trait de côte. *Mappemonde*, 104, 12. Disponible à l'adresse : <u>hal.archives-ouvertes.fr/hal-00671879</u>.

- C.H. FLETCHER, ROMINE B.M., GENZ A.S., BARBEE M.M., DYER M., ANDERSON T.R., LIM S.C., VITOUSEK S., BOCHICCHIO C. & RICHMOND B.M. 2011. National assessment of shoreline change: Historical shoreline change in the Hawaiian Islands. U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1051. Disponible à l'adresse : pubs.usgs.gov/of/ 2011/1051.
- J.E. FUCELLA & DOLAN R. 1996. Magnitude of subaerial beach disturbance during northeast storms. *Journal of Coastal Research*, 12, 420-429. Disponible à l'adresse : www.jstor.org/discover/10.2307/4298494?sid=21106261694563&uid=4&uid=2& uid=3738016.
- T. GARLAN 2010. *Produit Cartes G au format shape*. Notice. Disponible à l'adresse : diffusion.shom.fr/media/wysiwyg/pdf/natures de fond notice.pdf.
- T. GOURIOU. 2007. Evolution morphologique d une plage sableuse: Comparaison entre un site préservé et un site anthropisé. M2. Disponible à l'adresse : www.thomasgouriou.fr/docs/rapport\_master2\_gouriou\_2007.pdf.
- P. GUEVEL, LAJOIE D. & MANGIN A. 1994. Présentation d'un système dynamique d'absorption de houle pour les aménagements côtiers. *paralia*, 2-4. Disponible à l'adresse : <u>www.paralia.fr/Files/03 07 6p guevel.pdf</u>.
- H. HANSON, KRAUS N. & NAKASHIMA L. 1989. Shoreline change behind transmissive detached breakwaters. *DTEC FpLE copy*, 40. Disponible à l'adresse : <u>classify.oclc.org/classify2/ClassifyDemo?wi=54993983</u>.
- K. HASSELMANN 1974. On the spectral dissipation of ocean waves due to white capping. *Boundary-Layer Meteorology*, 6, 107-127, 0006-8314, 1573-1472. Disponible à l'adresse : <u>link.springer.com/article/10.1007/BF00232479</u>.
- S. HASSELMANN, HASSELMANN K., ALLENDER J.H. & BARNETT T.P. 1985. Computations and Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer in a Gravity-Wave Specturm. Part II: Parameterizations of the Nonlinear Energy Transfer for Application in Wave Models. *Journal of Physical Oceanography*, 15, 1378-1391, 0022-3670. Disponible à l'adresse : <u>dx.doi.org/10.1175/1520-0485(1985)015</u> <<u>1378:CAPOTN>2.0.CO;2</u>.
- P. HAUTEFEUILLE. *Phénomène des courants marins* [Online]. Disponible à l'adresse : <u>pierre.hautefeuille.free.fr/TPE/courantsMarins.htm</u>.
- A. HÉQUETTE 2001. Courants et transports sédimentaires dans la zone littorale : le rôle des courants orbitaux et de downwelling / Currents and sediment transport in the coastal zone: the role of orbital and downwelling currents. *Géomorphologie : relief, processus, environnement,* 7, 5-16, 1266-5304. Disponible à l'adresse : www.persee.fr/web/revues/home/prescript/article/morfo 1266-5304 2001 num 7 1 1082.
- A. HÉQUETTE 2012. Courant marin. *Hypergéo*. Disponible à l'adresse : <u>www.hypergeo.eu/spip.php?article531</u>.
- E.A. HIMMELSTOSS 2009. DSAS 4.0 Installation Instructions and User Guide. in: Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan. 2009 Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278. \*updated for version 4.3. Disponible à l'adresse : woodshole.er.usgs.gov/project-pages/DSAS/version4/ images/pdf/DSASv4 3.pdf.
- HISTOIRE DE L'EAU À HYÈRES. 2014a. *Géologie locale Le double tombolo de Giens* [Online]. Disponible à l'adresse : <u>www.histoire-eau-hyeres.fr/461-geologie-loc2bis-</u><u>pg.html</u>.

- HISTOIRE DE L'EAU À HYÈRES. 2014b. *Géologie locale Les cours d'eau* [Online]. Disponible à l'adresse : <u>www.histoire-eau-hyeres.fr/460-geologie-loc2.html</u>.
- M. HOM-MA & SONU C. Rhythmic pattern of longshore bars related to sediment characteristics. Proceedings of 8th Conference on Coastal Engineering, 1962 Mexico City, Mexico. : , 16. Disponible à l'adresse : <u>icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/</u> <u>icce/article/view/2265</u>.
- HYDRO M 1993. Etude d'impact sur l'environnement du projet de protection du tombolo ouest de la presqu'ile de Giens. Rapport final. Disponible à l'adresse : www.mediafire.com/view/tanpr3p3ajmzitc/hydro-m 93.pdf.
- IARE 1996. Le Tombolo Occidental de Giens Synthèse des connaissances- Analyse globale et scenarios d'aménagement et de gestion. Rapport final. Disponible à l'adresse : www.mediafire.com/view/olhaly9uq88a0ep/iare\_96.pdf.
- IFEN 2007. Analyse statistique et cartographique de l'érosion marine. Orléans. Disponible à l'adresse : <u>www.onml.fr/uploads/media/dossier\_erosion\_01.pdf</u>.
- M.F. JAMONT 2014. Etude des aléas naturels sur le «Sud Vendée et marais Poitevin» -Rapport de phase 2 - Caractérisation des aléas de référence. Disponible à l'adresse : www.vendee.gouv.fr/IMG/pdf/Rapport Phase 2.pdf.
- N. JARRY. 2009. *Etudes expérimentales et numériques de la propagation des vagues audessus de bathymétries complexes en milieu côtier.* PhD. Thesis, Université du Sud Toulon Var. Disponible à l'adresse : <u>tel.archives-ouvertes.fr/tel-00644931</u>.
- A. JEUDY DE GRISSAC. 1975. *Sédimentologie dynamique des rades d'Hyères et de Giens (Var). Problèmes d'Aménagements.* Ph.D. dissertation, Université d'Aix-Marseille II. Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/4bs600cn8crvn88/grissac.pdf</u>.
- D. JOLY, BROSSARD T., CARDOT H., CAVAILHES J., HILAL M. & WAVRESKY P. 2010. Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo : European Journal of Geography*, 10.4000/cybergeo.23155. Disponible à l'adresse : <u>cybergeo.revues.org/23155</u>.
- I.G. JONSSON & CARLSEN N.A. 1976. Experimental and Theoretical Investigations in an Oscillatory Turbulent Boundary Layer. *Journal of Hydraulic Research*, 14, 45-60, 0022-1686. Disponible à l'adresse : <u>dx.doi.org/10.1080/00221687609499687</u>.
- J.W. KAMPHUIS 1991. Alongshore sediment transport rate. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean ..., 117, 624-624. Disponible à l'adresse : <u>link.aip.org/link/</u> <u>JWPED5/v117/i6/p624/s1&Agg=doi\nascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)07</u> <u>33-950X(1991)117:6(624)</u>.
- T.R. KEEN, BEAVERS R.L., HOWD P.A. & HATHAWAY K. 2003. Shoreface Sedimentation during a Northeaster at Duck, North Carolina, U. S. A. *Journal of Coastal Research*, 19, 24-40, 07490208. Disponible à l'adresse : <u>www.jstor.org/stable/4299145</u>.
- R. KHAIRI. 2013. *Modélisation de la diffusion électromagnétique par les vagues côtieres déferlantes.* Université de Bretagne Occidentale. Disponible à l'adresse : <u>hal.univ-brest.fr/file/index/docid/839745/filename/RefzulKhairi These.pdf</u>.
- C.A.M. KING & WILLIAMS W.W. 1949. The Formation and Movement of Sand Bars by Wave Action. *The Geographical Journal*, 113, 70-85, 0016-7398. Disponible à l'adresse : <u>www.jstor.org/stable/1788907</u>.
- N. KOBAYASHI, PAYO A. & SCHMIED L. 2008. Cross-shore suspended sand and bed load transport on beaches. *Journal of Geophysical Research*, 113, C07001-C07001. Disponible à l'adresse : <u>doi.wiley.com/10.1029/2007JC004203</u>.
- G.J. KOMEN, CAVALERI L., DONELAN M., HASSELMANN K., HASSELMANN S. & JANSSEN P.A.E.M. 1994. *Dynamics and modelling of ocean waves,* Cambridge, Cambridge

University Press, 0521470471. Disponible à l'adresse : <u>www.iucat.iu.edu/catalog/</u>581229.

- A. KROON 1994. Sediment transport and morphodynamics of the beach and nearshore zone near Egmond, the Netherlands. *Nederlandse Geografische Studies*, 178, 275-275.
- Y. LACROIX, THAN V.V., LEANDRI D. & LIARDET P. 2015a. Analysis of a Coupled Hydro-Sedimentological Numerical Model for the Tombolo of GIENS. *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Geophysical Engineering,* 99, 117 - 124, 1307-6892. Disponible à l'adresse : <u>waset.org/publications/10000572</u>.
- Y. LACROIX, THAN V.V., LEANDRI D. & LIARDET P. 2015b. Analysis of Some Solutions to Protect the Tombolo of GIENS. *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Geophysical Engineering,* 99, 108 - 116, 1307-6892. Disponible à l'adresse : <u>waset.org/publications/10000571</u>.
- D. LAJOIE 2008. Optimisation du fonctionnement des atténuateurs de houle de type dos de chameau à l'aide de perforations dans la structure. 749-760. Disponible à l'adresse : <u>www.paralia.fr/jngcgc/10\_71\_lajoie.pdf</u>.
- J. LARRAS 1979. *Physique de la houle et des lames,* Paris, Eyrolles.
- M. LARSON & KRAUS N.C. 1995. Prediction of cross-shore sediment transport at different spatial and temporal scales. *Marine Geology*, 126, 111-127.
- L. LÉGER & BLANCHET 1927. *Sur l'existence de plages fossiles aux îles d'Hyères.* Laboratoire de Pisciculture. Travaux du laboratoire de Pisciculture, Grenoble. Disponible à l'adresse : <u>geologie-alpine.ujf-grenoble.fr/articles/GA 1929 15 1</u> <u>86 0.pdf</u>.
- A. LENOBLE 2010. Etude pour la protection de la plage du Ceinturon et du secteur Sud du port Saint-Pierre – Phase 1 : Synthèse des connaissances - Rapport. Disponible à l'adresse : <u>www.oceanide.net/Projets%20GC.html</u>.
- LES AMIS DE LA PRESQU'ÎLE DE GIENS 2011. Double Tombolo. Disponible à l'adresse : apgiens.com/index.php?page=double-tombolo.
- P. MAGGI 1973. Le problème de la disparition des herbiers à Posidonies dans le golfe de Giens (Var). *Science et Pêche*, 221, 7-20, 0036-8350. Disponible à l'adresse : <u>archimer.ifremer.fr/doc/1973/publication-6662.pdf</u>.
- G.M. MAILLET. 2005. *Relations sédimentaires récentes et actuelles entre un fleuve et son delta en milieu microtidal: Exemple de l'embouchure du Rhône.* PhD. Thesis, Université de Provence, Aix-Marseille 1. Disponible à l'adresse : <u>tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011967/document</u>.
- J.-M. MANZONE & LAJOIE D. 2013. *Dispositif d'atténuation d'une houle*.
- R. MAYENÇON 1992. Météorologie marine, [Paris], Editions maritimes & d'outre-mer [EMOM], 9782737307164. Disponible à l'adresse : <u>www.plaisance-pratique.com/</u> <u>IMG/pdf/veine de mistral In Meteorologie marine.pdf</u>.
- E. MÉDITERRANÉE 2006. Etude de définition des enjeux de protection du littoral sableux. Rapport technique. Disponible à l'adresse : <u>www.parccamargue.fr/getlibrarypublicfile.php/69268afc9fd30dd5e3ffc1d59e1a9330/parccamargue/ /collection library fr/201100146/0001/Littoral sableux C final.pdf.</u>
- MEEDDM 2009. A l'interface entre terre et mer: la gestion du trait de côte. Disponible à l'adresse : <u>www.developpement-durable.gouv.fr/A-l-interface-entre-terre-et-mer.html</u>.

- MÉTÉO-FRANCE. *Le climat en métropole* [Online]. Disponible à l'adresse : <u>www.</u> <u>meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climat-en-france/le-climat-en-metropole</u> [Accessed 16/12 2014].
- S. MEULÉ 2010. *IMplantation d'Atténuateur de Houle en GEOtextile: Suivi scientifique de la plage de La Capte, Hyères, Var : Instrumentation, Modélisation.* Rapport final. Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/y9v5f5n9lonvbgy/Rapport\_Final.pdf.</u>
- S. MEULÉ, PAQUIER A., CERTAIN R., BOUCHETTE F., GRATIOT J., SABATIER F. & ROBIN N. 2010. Morphodynamique de la plage de la Capte, Hyères, Var, suite à la mise en place d'atténuateurs de houle en géotextile. XIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, 22-25 juin 2010 Les Sables d'Olonnes, France. : Paralia, 369-378. Disponible à l'adresse : www.paralia.fr/jngcgc/11\_44\_meule.pdf.
- F.L. MICHEL BENOIT 2008. Constitution et exploitation d'une base de données d'états de mer le long des côtes françaises par simulation numérique sur 23 ans. Base ANEMOC en Atlantique Manche Mer du Nord. *European Journal of Environmental and Civil Engineering EUR J ENVIRON CIV ENG*, 12, 35-50, 1774-7120. Disponible à l'adresse : www.researchgate.net/publication/254227196 Constitution et exploitation d'une base de donnes d'tats de mer le long des ctes franaises par si mulation numrique sur 23 ans.
- C. MIGNIOT 1990. Manuel sur l'hydrodynamique sédimentaire et l'érosion et sédimentation du littoral. 2ème partie: Erosion et sédimentation du littoral. Ecole Nationale des Travaux Publics et Faculté des Sciences d'Orsay. Disponible à l'adresse : www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ER PM 88-02 cle6a4afe-1.pdf.
- M.K. MIHOUBI, KETTAB A., KHODJET KESBA O. & DAHMANI H. 2011. Modélisation numérique de la houle côtière et du transport sédimentaire pour l étude d un port de pêche: cas du port de Khemisti. Disponible à l'adresse : <u>www.paralia.fr/cmcm/e02-48-mihoubi.pdf</u>.
- N. MOHA. 2014. Hyères une qualité de ville. Disponible à l'adresse : <u>www.villedehyereslespalmiers.com/-hyeres-qualite-ville</u>.
- L.J. MOORE 2000. Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 16, 111-124. Disponible à l'adresse : <u>journals.fcla.edu/jcr/article/view/80780\</u> <u>nwww.bioone.org/doi/abs/10.2112/03-0071.1</u>.
- M. NIERI, FRANCOUR P., SARTORETTO S., SLOECK O. & URSCHELLER F. 1992. Cartographie des peuplements benthiques, des types de fond et de l'herbier de posidonies autour du port Saint-Pierre-d'Hyères. Rapport final.
- T. NOVEL 1995. Situation météorologique particulière. Grosse houle en Méditerranée. *METMAR*, 4-10. Disponible à l'adresse : <u>pluiesextremes.meteo.fr/media/upload/</u> 19940106/Article Novel METMAR num 169 dec 1995.pdf.
- M. OLAGNON, BECQ F. & CHARRIEZ P. 1992. *Sources de donnees météo-océaniques pour l ingénierie marine.* Disponible à l'adresse : <u>archimer.ifremer.fr/doc/1992/rapport-988.pdf</u>.
- T.D.T. OYEDOTUN 2014. Shoreline Geometry: DSAS as a Tool for Historical Trend Analysis. *Geomorphological Techniques, Chap. 3, Sec. 2.2 (2014)*, 12, 2047-0371. Disponible à l'adresse : <u>www.geomorphology.org.uk/assets/publications/</u> <u>subsections/pdfs/OnsitePublicationSubsection/42/3.2.2\_shorelinegeometry.pdf</u>.
- M. PAILLARD, GRAVEZ V., CLABAUT P. & WALKER P. 1993. Cartographie de l'herbier de posidonie et des fonds marins environnants de Toulon à Hyères (Var-France):

*reconnaissance par sonar latéral et photographie aérienne. Notice de présentation.* GIS Posidonie. Faculté des sciences de Luminy. 2905540176. Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/lfho8hixmpyev92/IFRGIS93.pdf</u>.

- H. PARENT 1924. Le cours du Gapeau a travers les âges. *La Vie Hyèroise*, 7-8. Disponible à l'adresse : <u>www.histoire-eau-hyeres.fr/460-geologie-loc2.html</u>.
- R. PASKOFF 2005. Les plages vont-elles disparaître, Le Pommier, 2746502380.
- C. PATTIARATCHI & WIJERATNE S. 2011. Port Geographe Sand and Seagrass Wrack Modelling Study, Western Australia. Disponible à l'adresse : <u>www.transport.wa.</u> <u>gov.au/mediaFiles/marine/MAC-R-PortGeo-SandSeagrassModelling.pdf</u>.
- J.M. PÉRÈS & PICARD J. 1964. Nouveau manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée. *Recueil des Travaux de la Station Marine d'Endoume,* 47, 3-137. Disponible à l'adresse : <u>catalog.hathitrust.org/Record/008334301</u>.
- H. PETIT & NAIGEON C. 2014. Côte d'Azur : la baie d'Hyères. Posidonie et beaux dessous d'un bleu profond. Disponible à l'adresse : <u>www.cabotages.fr/la-baie-d-hyeres.html</u>.
- T.H. PHAM. 2012. *Nghiên cứu cơ sở khoa học cho việc đề xuất giải pháp ổn định cửa Đà Rằng, tỉnh Phú Yên.* Ph.D., WRU. Disponible à l'adresse : <u>daotao.wru.edu.vn/ftp/p3/</u><u>Upload/NCS/LUANAN10-08-2012.pdf</u>.
- PNUE-PAM- CAR/ASP 2007. Manuel d'interprétation des types d'habitats marins pour la sélection des sites à inclure dans les inventaires nationaux de sites naturels d'intérêt pour la Conservation. Disponible à l'adresse : <u>inpn.mnhn.fr/docs/ref habitats/</u><u>TYPO BARC HAB PDF.pdf</u>.
- PRÉFET DE LA VENDÉE 2012. Ile de Noirmoutier Plan de prévention des risques naturels prévisibles littoraux Notice de présentation. Vendée. Disponible à l'adresse : <u>www.vendee.gouv.fr/IMG/pdf/note de presentation ppr noirmoutier</u> <u>15102012c cle143113.pdf</u>.
- A. ROBICHAUD, SIMARD I. & CHELBI M. 2012. Erosion et infrastructures à risque à Sainte-Marie-Saint-Raphaël, Péninsule acadienne, Nouveau-Brunswick. Disponible à l'adresse : www.csrpa.ca/sites/default/files/fichiers/rapport\_erosion\_et\_infrastructures a risque a smsr.pdf.
- ROCHE 2011. Analyse des solutions en érosion cotière dans la Baie de Plaisance, Îles-dela-Madeleine. Étude en hydraulique maritime. Rapport final. N/Réf. : 61933.
  Disponible à l'adresse : <u>www.muniles.ca/images/Upload/3 services municipaux/</u> 7 developpement milieu et amenagement territoire/6 publications/erosion im ra pport final 08-11-2011 reduit partie1.pdf.
- B.M. ROMINE & FLETCHER C.H. 2012. A summary of historical shoreline changes on beaches of Kauai, Oahu, and Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, 29, 605-614. Disponible à l'adresse : <u>www.jcronline.org/doi/abs/10.2112/JCOASTRES-D-11-00202.1</u>.
- RUDY MAGNE & FABRICE ARDHUIN 2009. *Modélisation des états de mer : états des lieux et perspectives avec caparmor II.* SHOM. Disponible à l'adresse : <u>wwz.ifremer.fr/pcim/content/download/29503/407881/file/magne.pdf</u>.
- B.G. RUESSINK, HOUWMAN K.T. & HOEKSTRA P. 1998. The systematic contribution of transporting mechanisms to the cross-shore sediment transport in water depths of 3 to 9 m. *Marine Geology*, 152, 295-324. Disponible à l'adresse : <u>www.researchgate</u>. <u>net/publication/248460679 The systematic contribution of transporting mechani</u> <u>sms to the cross-shore sediment transport in water depths of 3 to 9 m</u>.

- B.G. RUESSINK & TERWINDT J.H.J. 2000. The behaviour of nearshore bars on the time scale of years: a conceptual model. *Marine Geology*, 163, 289-302. Disponible à l'adresse : <u>www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025322799000948</u>.
- F. SABATIER. 2001. Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône. Université de Nantes. Disponible à l'adresse : <u>sites.univ-</u> provence.fr/geophys/sabatier cadre.htm.
- F. SABATIER, SAMAT O., BRUNEL C., HEURTEFEUX H. & DELANGHE-SABATIER D. 2009a. Determination of set-back lines on eroding coasts. Example of the beaches of the Gulf of Lions (French Mediterranean Coast). *Journal of Coastal Conservation*, 13, 57-64. Disponible à l'adresse : <u>link.springer.com/article/10.1007%2Fs11852-009-0062-y#page-1</u>.
- F. SABATIER, SAMAT O., CHAIBI M., LAMBERT A. & PONS F. Transport sédimentaire de la dune à la zone du déferlement sur une plage sableuse soumise à des vents de terre. VIIIèmes Journées Nationales Génie Civil-Génie Côtier Compiègne, 2004. 223-229. Disponible à l'adresse : <u>www.paralia.fr/Files/08 25 7p sabatier.pdf</u>.
- F. SABATIER, SAMAT O., ULLMANN A. & SUANEZ S. 2009b. Connecting large-scale coastal behaviour with coastal management of the Rhône delta. *Geomorphology*, 107, 79-89, 0169-555X. Disponible à l'adresse : <u>hal.archives-ouvertes.fr/hal-00342747</u>.
- N.N. SALGHUNA & BHARATHVAJ S.A. 2015. Shoreline Change Analysis for Northern Part of the Coromandel Coast. *Aquatic Procedia*, 4, 317-324, 2214-241X. Disponible à l'adresse : <u>www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214241X15000449</u>.
- A. SALMAN 2004. Vivre avec l'érosion côtière en Europe-Espaces et sédiments pour un développement durable. Bilans et recommandations du projet EUROSION. Document traduit de l'anglais. Service contract B4-3301/2001/329175/MAR/B3. Disponible à l'adresse : www.eurosion.org/reports-online/part1 fr.pdf.
- A.G. SAMARAS, VACCHI M., ARCHETTI R. & LAMBERTI A. 2013. Wave and hydrodynamics modelling in coastal areas with TELEMAC and MIKE21. XXth TELEMAC-MASCARET User Conference, October 16-18, 2013 2013 Karlsruhe, Germany. : , 59-63, 978-3-939230-07-6. Disponible à l'adresse : <u>vzb.baw.de/</u> <u>publikationen/vzb\_dokumente\_oeffentlich/0/tuc\_2013\_gesamt\_rgb\_111013.pdf</u>.
- O. SAMAT. 2007. Efficacité et impact des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales. Le cas du Languedoc et du delta du Rhône. Université de Perpignan. Disponible à l'adresse : www.sudoc.fr/15031745X.
- F. SBAI, LABRAIMI M. & HADDANE M. 2004. Evaluation du recul du trait de cote sur une portion du littoral atlantique marocain de Mohammedia--Assessment of coastal retreat on a portion of the Moroccan Atlantic coastline at Mohammedia. *Pangea*, 41-42, 25-32. Disponible à l'adresse : <u>hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00946959</u>.
- SDAGE RMC 2005. *Connaissance et gestion de l'érosion du littoral.* Guide technique n°9. Disponible à l'adresse : <u>www.mementodumaire.net/wp-content/uploads/2012/07/</u><u>sdage-2005-gestion-littoral.pdf</u>.
- N. SÉNÉCHAL. 2003. Etude de la propagation des vagues au-dessus d'une bathymétrie complexe en zone de surf. PhD. Thesis, Université de Bordeaux I. Disponible à l'adresse : www.sudoc.abes.fr/DB=2.1/SRCH?IKT=12&TRM=077241401.
- P. SERANTONI & GUTIERREZ L. 1997. Un plan global pour la réhabilitation et la sauvegarde du Tombolo de la presqu île de Giens (Hyères- Var). Disponible à l'adresse : www.mediafire.com/folder/i84z1eio546ta/s g.

- P. SERANTONI & LIZAUD O. 2000-2010. Suivi de l évolution des plages de la commune Hyères-les-palmiers. Rapport final. Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/</u> <u>folder/6m1lka2nxra4k/s o</u>.
- P. SERANTONI & LIZAUD O. 2006. *Campagne cartographique bathymetrie du Port de la Capte et du Jardin des mers*. Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/</u><u>na1p4r685c77k18/s o 06.pdf</u>.
- SHOM 2013. Bases de données "Natures de fond". Descriptif de contenu du produit externe. Disponible à l'adresse : <u>diffusion.shom.fr/media/wysiwyg/pdf/</u> <u>specs externes nature de fonds 150000.pdf</u>.
- SHOM. 2014. *Le portail de l'information géographique maritime et littorale* [Online]. Disponible à l'adresse : <u>data.shom.fr/</u>.
- A.D. SHORT 1991. Macro-Meso Tidal Beach Morphodynamics: An Overview. *Journal of Coastal Research*. Disponible à l'adresse : <u>www.jstor.org/stable/4297847</u>.
- P.A. SILVA, RAMOS M. & TEMPERVILLE A. Evolution bathymétrique due au transport cross-shore en zone côtière. VIlmes Journées Nationales Génie Civil- Génie Côtier, Mai 2002 Anglet, France. : Paralia, 273-280, 2-9505 787-6-4. Disponible à l'adresse : www.paralia.fr/Files/07 30 8p silva.pdf.
- SOGREAH 1984. Catalogue sédimentologique des côtes françaises. Volume 2 : Côtes de la Méditerranée, de la frontière espagnole à Sète, de Sète à Marseille, de Marseille à la frontière italienne. Rapport final.
- SOGREAH 1988a. *Défense du littoral oriental du golfe de Giens.* Rapport final. Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/hc3ckn46txdxscl/sogreah 88.pdf</u>.
- SOGREAH 1988b. *Etudes sédimentologiques de la rade d Hyères. Littoral de port Pothuau à la Badine.* Rapport final. Disponible à l'adresse : www.mediafire.com/view/8ctv8dd3duwdnlv/sogreah 88 4.pdf.
- SOGREAH 1988c. Etudes sédimentologiques de la rade d Hyères. Littoral de port Pothuau au Ruisseau du Pansard. Rapport final. Disponible à l'adresse : www.mediafire.com/view/ae0e67bynd3x94u/sogreah 88 5.pdf.
- SOGREAH 1988d. *Protection du tombolo Ouest.* Rapport final. Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/hfo6e5q8f42mzbc/sogreah 88 2 1a.pdf</u>.
- A. SOLIMAN, MOGHAZY H., ISMAIL R. & EID R. 2011. EVALUATION of TWO NUMERICAL MODELS FOR THE DESIGN OF ARTIFICIAL SUBMERGED REEF. *The International Maritime Transport and Logistics Conference "A Vision For Future Integration".* Disponible à l'adresse : marlog-aast.org/2011/docs/papers/S.4.2.pdf.
- C.J. SONU 1973. Three-Dimensional Beach Changes. *The Journal of Geology*, 81, 42-64, 0022-1376. Disponible à l'adresse : <u>www.jstor.org/stable/30060693</u>.
- N. STAIQULY & THIBAULT B. 1991. *Etude en canal à houle. Protection du tombolo ouest de Giens. Presqu île de Giens. Protection du tombolo ouest.* Disponible à l'adresse : <u>www.mediafire.com/view/tqeg1rot9cewz35/sogreah 88 2 1b.pdf</u>.
- A. STÉPANIAN. 2002. *Evolution morphodynamique d'une plage macrotidale à barres : Omaha beach (Normandie).* PhD. Thesis, Université de Caen. Disponible à l'adresse : <u>tel.archives-ouvertes.fr/tel-00003997</u>.
- S. SUANEZ, BRUZZI C. & ARNOUX-CHIAVASSA S. 1998. Données récentes sur l'évolution des fonds marins dans le secteur oriental du delta du Rhône (plage Napoléon et flèche de la Gracieuse). Géomorphologie : relief, processus, environnement, 4, 291-311, 1266-5304. Disponible à l'adresse : <u>hal.archivesouvertes.fr/hal-00494332/</u>.

- S. SUANEZ & LIPPMANN-PROVANSAL M. 1997. *Dynamiques sédimentaires actuelles et récentes de la frange littorale orientale du Delta du Rhône.* Disponible à l'adresse : books.google.fr/books?id=WZpstwAACAAJ.
- S. SUANEZ & SABATIER F. 1999. Eléments de réflexion pour une gestion plus cohérente d'un système anthropisé : exemple du littoral du delta du Rhône / Ideas on the more coherent management of an anthropised system : the example of the coasts of the Rhône delta. *Revue de géographie de Lyon*, 74, 7-25. Disponible à l'adresse : hal.archives-ouvertes.fr/hal-00637342.
- M. TABEAUD & BOULIGAND R. 2000. Les surcotes à Brest depuis un siècle : analyse des paramètres météorologiques influents à l'échelle locale. *Norois*, 201-217, 0029-182X. Disponible à l'adresse : <u>/web/revues/home/prescript/article/noroi 0029-182x\_2000\_num\_186\_2\_7015.</u>
- B. TESSIER, CERTAIN R., MICHEL D. & STEPANIAN A. 2003. Dynamique sédimentaire des côtes sableuses : évolution à long terme. 9° *congrès Français de sédimentologie. A.S.F.* Bordeaux.
- E.R. THIELER & DANFORTH W.W. 1994. Historical Shoreline Mapping (I): Improving Techniques and Reducing Positioning Errors. *Journal of Coastal Research*, 10, 549-563. Disponible à l'adresse : <u>www.jstor.org/stable/4298252</u>.
- E.R. THIELER, HIMMELSTOSS E.A. & MILLER T. 2005. *Digital Shoreline Analysis System* (*DSAS*) version 3.0: An ArcGIS extension for calculating shoreline change. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1304. Disponible à l'adresse : woodshole.er.usgs.gov/project-pages/DSAS/version3.
- S. TOURDIAT & CHEVALIER L. 1998. *Vague et transport sédimentaire.* Institut National Polytechnique de Toulouse. Travaux des élèves 1995 1998 de la Formation d'ingénieurs en Hydraulique et Mécanique des Fluides. Disponible à l'adresse : <u>hmf.enseeiht.fr/travaux/CD9598/travaux/optsee/hym/nome55/hydromar/chetou/p3.htm</u>.
- T.T. TRẦN & VAN DE GRAAFF J. 2015. *Hình thái bờ biển*, Hanoï, Vietnam, WRU. Disponible à l'adresse : <u>thuvienso.hcmute.edu.vn/doc/hinh-thai-bo-bien-ths-tran-thanh-tung-51009.html</u>.
- D.H. TRINH. 2010. *Morphological modelling of Lai Giang inlet, Vietnam.* MSc Thesis, Delft University of Technology. Disponible à l'adresse : <u>repository.tudelft.nl/assets/uuid:6c3f7a74-dc91-4d91-8f18-a82b7af68109/Msc</u> <u>Thesis-Trinh Dieu Huong.pdf</u>.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS 2002. *Coastal Engineering Manual. Engineer Manual 1110-2-1100*, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (in 6 volumes). Disponible à l'adresse : <u>chl.erdc.usace.army.mil/cem</u>.
- UNITED STATES. ARMY. CORPS OF ENGINEERS & COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER (U.S.) 1984. *Shore Protection Manual*, Department of the Army, Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi. Disponible à l'adresse : <u>ft-sipil.unila.ac.id</u> <u>/dbooks/spm1984.htm</u>.
- G.L.S. VAN DER SALM. 2013. *Coastline modelling with UNIBEST: Areas close to structures.* MSc. Graduation Thesis, Delft University of Technology. Disponible à l'adresse : repository.tudelft.nl/assets/uuid:f77f32d5-b9ca-47d8-9b43-decbe23c 8080/Graduation thesis Guido van der Salm feb2013.pdf.
- E. VAN HEESWYCK, SUBLET F. & DEBOUVERIE T. 2012. *Mer et littoral: l'érosion côtière.* Disponible à l'adresse : <u>valentin.bors.free.fr/Mer-et-littoral/G1%20-%20l'%</u> <u>E9rosion%20cotiere.pdf</u>.

- L.C. VAN RIJN, WALSTRA D.J.R., GRASMEIJER B., SUTHERLAND J., PAN S., SIERRA J.P. & VAN RIJN L.C. 2003. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, 47, 295-327, 0378-3839. Disponible à l'adresse : www.leovanrijn-sediment.com/papers/P6-2003.pdf.
- C. VANROYE, GAUTIER Y., LEGROS C. & PEIGNAULT F. 2012. Rapport relatif à la tempête JOACHIM sur le littoral du département de la Vendée 15 et 16 décembre 2011. Disponible à l'adresse : <u>www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr</u> <u>/IMG/pdf/Rapport JOACHIM Littoral.pdf</u>.
- N. WEBER 1991. Bottom Friction for Wind Sea and Swell in Extreme Depth-Limited Situations. *Journal of Physical Oceanography*, 21, 149-172, 0022-3670. Disponible à l'adresse : journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0485%281991%29021%3 C0149%3ABFFWSA%3E2.0.C0%3B2.
- K.M. WIJNBERG 1995. *Morphologic behaviour of a barred coast over a period of decades,* Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap, 9789068092110.
- K.M. WIJNBERG & KROON A. 2002. Barred beaches. *Geomorphology*, 48, 103 120. Disponible à l'adresse : <u>www.utwente.nl/ctw/wem/organisatie/medewerkers/</u> <u>wijnberg/geomorph.pdf</u>.
- F.C.J. WOLF 1997. *Hydrodynamics, sediment transport, and daily morphological development of a bar-beach system,* Utrecht, Koninklijk Nederlands Aardrijkskundig Genootschap/Faculteit Ruimtelijke Wetenschappen Universiteit Utrecht, 90680925290169-4839.
- L.D. WRIGHT & SHORT A.D. 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine geology*, 56, 93-118, 0025-3227. Disponible à l'adresse : <u>www.sciencedirect.com/science/article/pii/0025322784900082</u>.
- M. YATES-MICHELIN, LE COZANNET G. & BALOUIN Y. 2010. *Etat des connaissances sur les effets potentiels du changement climatique sur les aléas côtiers en Languedoc-Roussillon.* Rapport final. BRGM/RP 58 872-FR. Disponible à l'adresse : infoterre.brgm.fr/rapports/RP-58872-FR.pdf.
- W. ZAKI, BASBOUS T., YOUNES R. & RAAD S. 2003. Modélisation de la houle au port de Beyrouth. : Université Libanais, Faculté de Génie, Beyrouth Liban. Disponible à l'adresse : <u>sites.google.com/site/waelzaki/cimna2k3-houle.pdf</u>.

## Index

- Accrétion, 44, 47, 57, 153, 163, 166, 227,
- 243, 246, 275, 278, 280, 287, 315, 316
- Action anthropique, 105
- Aménagement du littoral, 59, 64
- Amortissement des houles, 140, 155
- Atténuation de la houle, 64, 144, 153, 305, 306, 308, 320, 321, 325
- Banc de grès, 100, 284
- Bilan sédimentaire, 58, 61
- Brise-lames, 51, 53, 63, 295, 300, 303, 308, 309, 310, 311, 312, 317, 319, 325
- Calibration, 171, 195, 211, 212, 224, 226, 276, 278
- Causes de l'érosion, 105, 163
- Coefficient de détermination, 121, 144, 145, 187
- Coefficients de corrélation, 123
- Coefficients de réfraction, 140, 141, 142
- Cordons dunaires, 49, 62, 157, 292, 295
- Couplage dynamique, 182
- Coups de mer, 61, 97, 146, 148, 149, 160, 184, 192
- Courants, 44, 51, 54, 55, 56, 57, 59, 60, 61, 67, 84, 85, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 101, 105, 109, 116, 117, 118, 119, 140, 153, 154, 155, 156, 158, 159, 161, 163, 164, 166, 174, 181, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 232, 241, 248, 253, 254, 257, 277, 284, 286, 327
- Courants d'arrachement, 216
- Courants de dérive littorale, 51, 116, 117, 155, 161
- Courants liés à l'action de la houle, 67, 117
- Chenaux d'érosion, 117, 156, 295, 308
- Chenaux longitudinaux, 69, 154
- Déferlement des houles, 62, 153
- Dépressions, 120, 123, 284
- Dérive littorale, 54, 55, 56, 57, 61, 116, 117, 155, 156, 161, 241, 257, 295, 302, 309
- Dissipation d'énergie, 51

Données, 38, 39, 40, 42, 43, 44, 47, 48, 56, 65, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 85, 86, 87, 88, 89, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 103, 104, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 121, 123, 124, 126, 127, 129, 134, 138, 140, 146, 147, 148, 149, 150, 161, 163, 164, 165, 176, 183, 184, 185, 187, 188, 190, 194, 195, 197, 211, 212, 213, 222, 225, 226, 227, 233, 253, 254, 256, 257, 263, 277,

- 287, 322, 323, 326, 327, 328, 329
- Énergie de la houle, 64, 105, 135, 301, 305, 306, 321
- Épis, 53, 62, 63, 295, 300, 301, 302, 303, 308, 309, 311, 312, 323, 326, 327
- Équilibre du tombolo, 38, 78, 126
- Erosion côtière, 39, 57, 58, 59, 61, 63, 149, 157, 221, 330
- Erosion marine, 38, 39, 61, 63, 64, 105, 156, 158, 161, 231, 233, 242, 284, 287, 292, 300, 308, 309, 312, 315, 318, 320, 326
- État de la mer, 81, 87, 124
- Événements exceptionnels, 120
- Évènements extrêmes, 120, 144, 145, 146, 150, 161, 184
- Évènements tempétueux, 145, 149
- Évolution, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 55, 56, 57, 58, 62, 64, 65, 66, 102, 103, 105, 109, 119, 121, 122, 123, 129, 144, 153, 154, 157, 161, 163, 164, 166, 184, 187, 188, 204, 205, 210, 214, 218, 221, 226, 231, 235, 241, 242, 243, 244, 246, 249, 250, 253, 254, 257, 258, 263, 265, 275, 276, 277, 278, 281, 284, 285, 287, 288, 313, 314, 316, 325, 327, 328, 329
- Évolution du fond, 129, 187, 231, 327
- Évolution du littoral, 39, 40, 42, 43, 44, 45, 47, 48, 56, 62, 64, 105, 161, 163, 164, 166, 184, 188, 210, 214, 231, 235, 253, 254, 257, 276, 277, 284, 288, 329

Évolution littorale, 109

- Évolution morphosédimentaire, 153
- Fonds sableux, 153, 296
- Fonds sous-marins, 100
- Frottement sur le fond, 51, 153, 174, 257
- Golfe de Giens, 38, 67, 78, 79, 80, 97, 99, 105, 106, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 129, 130, 131, 132, 136, 140, 142, 145, 152, 153, 154, 156, 158, 161, 164, 201, 205, 207, 219, 220, 308
- Hauteur de houle significative, 129
- Hauteur de la houle morphologique représentative, 129, 185, 190
- Hauteur significative de la houle, 129
- Herbier de posidonie, 101, 117, 142, 153, 155, 160, 161, 235, 253, 292, 309
- Houle incidente, 52, 54, 55, 105, 205, 295, 298, 304, 305, 306, 320, 326, 327
- Houles à la côte, 126, 140, 232, 322
- Houles au large, 78, 80, 126, 127, 129, 135
- Houles de tempête, 62, 97, 147
- Hydrodynamique, 38, 102, 115, 125, 127, 129, 164, 166, 167, 174, 177, 179, 181, 182, 210, 211, 212, 214, 222, 228, 229, 231, 232, 233, 253, 276, 287, 327, 328
- Impact morphologique, 129, 136, 161, 190
- intervalle de confiance, 125, 139, 143, 150
- Modèle, 39, 40, 44, 45, 46, 47, 49, 57, 64, 74, 77, 87, 94, 95, 125, 129, 132, 134, 164, 165, 166, 167, 169, 170, 173, 174, 176, 177, 181, 183, 186, 187, 188, 189, 190, 195, 196, 197, 207, 208, 210, 211, 212, 213, 214, 221, 222, 223, 225, 226, 227, 235, 248, 253, 257, 276, 277, 278, 284, 287, 310, 311, 313, 314, 328, 329
- Modèle de surcote, 45, 64
- Modèle de transport des sédiments, 45, 64
- Modèle de vague, 45, 64, 188
- Modèle numérique, 47, 132, 164, 166, 190, 221, 227, 257, 284, 314, 329
- Modèle numérique de terrain, 47, 188
- Modèles couplés, 165, 166, 181, 327
- Modélisation hydrodynamique, 210, 276
- Nature des fonds, 99
- Ouvrages transversaux, 301
- Période au pic, 87

Périodes de retour, 82, 150 Plage de l'Almanarre, 38, 39, 40, 66, 69, 78, 105, 106, 149, 154, 163, 200, 201, 204, 206, 220, 227, 275, 290, 293, 294, 306, 309, 310 Plage émergée, 292, 295 Prisme littoral, 154 Profil, 46, 53, 57, 60, 61, 65, 67, 95, 106, 155, 156, 161, 166, 180, 181, 244, 246, 251, 254, 257, 278, 279, 280, 290, 293, 294, 297, 302, 309, 314, 316, 317, 319, 325 Protection du littoral, 40, 62, 68, 287, 300, 305, 312 Recul du trait de côte, 38, 214, 263 Rechargement des plages, 64 Référence hydrographique, 94, 96, 103 Régime de transport sédimentaire, 129 Régime des courants, 118 Régimes de houles, 135, 161 Résolution, 45, 66, 67, 74, 77, 87, 94, 125, 126, 166, 167, 172, 188, 221, 222, 276, 313, 328 Résultat, 38, 54, 57, 72, 81, 103, 129, 136, 143, 145, 156, 166, 198, 199, 200, 228, 235, 246, 317, 318, 319, 327, 329 Route du Sel, 105, 156 Rugosité du fond, 153, 169, 211, 296 Surcote, 45, 54, 57, 98, 120 Surélévation, 119, 120, 214, 216, 218, 231 Systèmes de chenaux, 154, 161 Tempête, 40, 53, 54, 57, 60, 81, 96, 97, 138, 145, 147, 148, 149, 151, 157, 161, 162, 183, 184, 185, 192, 193, 201, 207, 208, 216, 220, 247, 248, 249, 250, 251, 288, 289, 295, 308, 316, 317, 320 Tempêtes d'équinoxe, 124, 135, 145, 192 Tempêtes marines, 74, 144, 145 Tombolo, 38, 39, 40, 49, 50, 54, 56, 65, 66, 68, 73, 74, 75, 78, 80, 82, 96, 100, 101, 102, 103, 105, 106, 108, 109, 113, 116, 117, 118, 119, 126, 127, 128, 130, 136, 137, 140, 145, 149, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 184, 188, 189, 201, 204, 206, 207, 214, 215, 216, 217, 219, 220, 221, 222, 227, 235, 237, 241, 243, 246, 248,

250, 254, 263, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 285, 287, 288, 289, 290, 298,

300, 301, 309, 310, 312, 313, 314, 315, 318, 320, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330

- Tombolo de Giens, 38, 40, 49, 54, 65, 66, 68, 73, 78, 82, 100, 103, 105, 106, 109, 116, 130, 136, 137, 140, 145, 153, 156, 161, 163, 188, 189, 207, 214, 217, 221, 222, 243, 246, 301, 309, 313, 315, 327, 329
- Tombolo occidental, 56, 65, 68, 145, 149, 156, 276, 278, 280
- Tombolo oriental, 65, 201
- Trait de côte, 45, 46, 47, 48, 49, 55, 56, 62, 64, 65, 69, 70, 71, 103, 105, 106, 154, 157, 159, 164, 214, 245, 257, 263, 276, 278, 279, 280, 287, 302, 305, 307, 309, 316
- Transit littoral, 62, 100, 140, 156, 161, 276, 280
- Transport des sédiments, 38, 44, 45, 46, 47, 54, 55, 56, 57, 61, 116, 129, 130, 136, 156, 161, 163, 164, 166, 176, 177, 181, 243, 244, 250, 257, 287, 317, 319, 325, 327, 329
- Transport du sable, 109, 158, 166, 329
- Transport sédimentaire, 38, 40, 44, 47, 51, 54, 57, 105, 116, 129, 152, 161, 164, 177, 235, 243, 244, 250, 251, 257, 276, 277, 278, 279, 280, 285, 294, 309, 317, 318, 319

- Vague, 45, 51, 52, 53, 60, 79, 97, 142, 167, 168, 170, 171, 173, 182, 186, 188, 218, 220, 276, 325, 329
- Vagues, 40, 44, 45, 47, 48, 50, 51, 52, 53, 55, 57, 59, 60, 62, 64, 78, 79, 80, 82, 83, 87, 88, 96, 97, 101, 105, 113, 126, 128, 129, 131, 132, 145, 147, 150, 156, 157, 161, 163, 164, 166, 167, 168, 169, 171, 172, 173, 176, 181, 183, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 208, 209, 217, 218, 219, 220, 235, 237, 239, 241, 246, 247, 248, 253, 254, 257, 277, 292, 295, 301, 303, 307, 308, 309
- Validation, 56, 197, 198, 199, 213, 214, 227
- Vent, 40, 45, 50, 51, 52, 54, 57, 59, 63, 73, 74, 77, 78, 87, 88, 94, 95, 96, 103, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 116, 119, 127, 145, 146, 147, 148, 153, 158, 160, 167, 168, 169, 173, 174, 175, 184, 193, 194, 201, 204, 214, 215, 216, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 242, 244, 246, 248, 251, 253, 258, 276, 286
- Zéro des hydrographes, 95
- Zéro hydrographique, 69, 94, 103, 105, 313
- Zone de déferlement, 50, 51, 52, 57, 62, 156, 174, 257, 290, 291, 293, 320

## Notes

<sup>1</sup>Liens de téléchargement des données de vent : www.ogimet.com/synops.phtml.en www.ogimet.com/metars.phtml.en www.infoclimat.fr/observations-meteo/archives/4/septembre/2013/toulon-la-mitre/07660.html www.meteoenfrance.com/historique.php?station=07667&date=01-01-2002&ville=Hyeres&station\_record=07667&history-submit= meteodu03.alwaysdata.net/synop.php www.mundomanz.com/meteo\_p/byind?countr=FRANCE&ind=07667&year=2014&month=02&day=1 4&n\_days=31&time=all&trans=DE&l=1&action=display donneespubliques.meteofrance.fr/?fond=caracteristique&caracteristique=11&caracdisp=28 www.meteo-mc.fr/metars.php meteociel.com/temps-reel/obs\_villes.php?code2=7667

<sup>2</sup> Les autres outils : <u>McIDAS, Ocean Data View (ODV)</u>, <u>Scientific DataSet Library and Tools, ncview, Max-Sea Viewer et GRIB VIEWER</u>.





# UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE ECOLE DOCTORALE : ED184 INSTITUT DE MATHÉMATIQUES DE MARSEILLE UMR 7373

Thèse présentée pour obtenir le grade universitaire de docteur

Discipline : Mathématiques Spécialité : Ingénierie côtière

Van Van THAN

ANNEXES

## Résumé

L'objectif de cette thèse est la détermination des causes du phénomène d'érosion marine, et la production de propositions d'orientation pour la protection de la plage de l'Almanarre. L'étude commence par la collecte et l'analyse de toutes les données disponibles, pour trouver des règles d'évolution du tombolo de Giens. Puis, le logiciel de modélisation MIKE a été appliqué pour confirmer l'hypothèse et à obtenir une meilleure connaissance de la dynamique à l'œuvre au tombolo Ouest. Ensuite, nous avons couplé des facteurs simultanément : les houles, les courants côtiers, et les transports des sédiments pour les différents régimes de houle et de vent dans MIKE 21. Enfin, la possibilité de stabiliser le tombolo Ouest est discutée pour donner des suggestions sur les choix de solutions adaptées.

*Mots clés :* hydrodynamique, plage de l'Almanarre, modèle numérique, modèles couplés, évolution, érosion côtière, tombolo, rechargement des plages, brise-lames.

## Abstract

The objective of this thesis is the determination of the causes of sea erosion phenomenon, and the production of policy proposals for the protection of the beach. The study begins with the collection and analysis of all available data, to find evolution rules of tombolo of Giens. Which aims to explain how the hydrodynamic processes and sediment transport occur. Then MIKE modeling software was applied to confirm the hypothesis and get a better understanding of the dynamics at work in the Western tombolo. Then, we coupled factors simultaneously: waves, coastal currents and sediment transport for different regimes of wave and wind in MIKE 21. Finally, the possibility of stabilizing the Western tombolo is discussed to give suggestions on the choice of solutions.

*Keywords:* hydrodynamics, Almanarre beach, numerical model, coupled models, evolution, coastal erosion, tombolo, beach nourishment, breakwaters.

# Table des matières des annexes

Annexe	A : Art	icles	8 -
	A1.	Article 1	· 8 -
	A2.	Article 2	· 8 -
	A3.	Article 3	· 8 -
Annexe	B : Coc	les Matlab	9 -
Annexe	C : For	çages météo-marins	- 10 -
	C1.	Vents	· 10 -
	C2.	Niveaux marins -	· 15 -
	СЗ.	Courants	· 17 -
	C4.	Houles -	· 17 -
	C5.	Evènements extrêmes	- 29 -
Annexe	D : Mo	délisation numérique	- 36 -
	D1.	Validation du modèle HD -	· 36 -
	D2.	Houles à partir du modèle SW et HD	- 37 -
	D3.	Niveaux marins à partir du modèle HD	- 40 -
	D4.	Courants à partir du modèle HD -	· 41 -
	D5.	Configuration d'un fichier de simulation SW et HD -	- 42 -
Annexe	E : Evo	lution et intervention au Tombolo Ouest	- 45 -

# Liste des figures des annexes

Figure C-1 : Percentiles des vitesses de vent estival (A) et hivernal (B) à 10 mètres à Hyères à partir des données observées SYNOP pour la période de 1999 à 2014 12 -
Figure C-2 : Percentiles des vitesses de vent estival (A) et hivernal (B) à 10 mètres à Hyères à partir des données observées METAR pour la période de 2005 à 2013 13 -
Figure C-3 : Fréquence des événements exceptionnels (supérieur à 0,653 mètre CM) à la Capte entre 1993 et 1995 [d'après Courtaud (2000), modifié]
Figure C-4 : Dispersion mensuelle des niveaux marins des événements exceptionnels (supérieur à 0,653 mètre CM) à la Capte entre 1993 et 1995
Figure C-5 : Schéma des courants côtiers (Héquette, 2001)
Figure C-6 : Vitesse (A) et direction (B) du courant moyen pour la période Novembre 2000 à l'Almanarre 19 -
Figure C-7 : Classement du déferlement dépend de la forme du fond (Je comprends Enfin !2010) 20 -
Figure C-8 : Histogrammes des hauteurs et périodes significatives de houle au large de Porquerolles (08302) (CEREMA, 2014) 22 -
Figure C-9 : Rose des houles à la station de Porquerolles en 2008
Figure C-10 : Hauteur (A) et période (B) de la houle à la station SCAPT4 à La Capte 28 -
Figure C-11 : Dispersion des hauteurs $H_{1/10}$ et $H_{1/3}$ (A) et des hauteurs $H_{max}$ et $H_{1/3}$ (B) entre 1992 et 1997 29 -
Figure C-12 : Dispersion des hauteurs $H_{max}$ et $H_{1/10}$ (A) et des périodes $T_{1/10}$ et $T_{1/3}$ (B) entre 1992 et 1997 29 -
Figure C-13 : Dispersion des périodes $T_{pic}$ et $T_{1/3}$ (A) et $T_{pic}$ et $T_{1/10}$ (B) entre 1992 et 1997 29 -
Figure C-14 : Dispersion des périodes $T_{max}$ et $T_{1/3}$ des houles pendant les tempêtes entre 1998 et 2012 31 -
Figure C-15 : Ajustement graphique de la loi GPD (CEREMA, 2014)
Figure C-16 : Ajustement graphique de la loi EXP (CEREMA, 2014)
Figure D-17 : Roses des courants enregistrés (A) (Dufresne, 2014) et simulés (B) aux positions 1 dans le chenal de navigation durant la période de Juin à Octobre 2009 36 -
Figure D-18 : Roses des courants enregistrés (A) (Dufresne, 2014) et simulés (B) aux Cap Carqueiranne durant la période de Juin à Septembre 2011
Figure D-19 : Hauteur moyenne des vagues d'Ouest annuels sous l'action des vents de Nord-Ouest (A) et de Sud-Ouest (B) à partir du modèle SW
Figure D-20 : Champ de la houle pendant deux coups de mer en 2007 (A) et 2008 (B) à partir du modèle SW 37 -

Figure D-21 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant deux coups de mer en 2007 (A) et 2008 (B) à partir du modèle SW 37 -
Figure D-22 : Magnitude des hauteurs de houle significatives (A) et courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre (B) pendant la tempête décennale à partir du modèle SW 38 -
Figure D-23 : Magnitude des hauteurs de houle significatives (A) et courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre (B) pendant la tempête maximale observée à partir du modèle SW38 -
Figure D-24 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant la tempête trentennale (A) et la tempête cinquantennale (B) à partir du modèle SW
Figure D-25 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant la tempête centennale à partir du modèle SW
Figure D-26 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant deux coups de mer en 2007 (A) et 2008 (B) à partir du modèle HD
Figure D-27 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre en cas de houles d'Ouest (A) et de houles de Sud-Ouest (B) pendant la tempête décennale
Figure D-28 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant la tempête trentennale (A) et la tempête cinquantennale (B) 40 -
Figure D-29 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant la tempête maximale observée (A) et centennale (B) 40 -
Figure D-30 : Niveaux marins en cas de vagues d'Ouest (A), de vagues de Sud-Ouest (B), de vagues d'Est (C) et de vagues de Sud-Est (D) à partir du modèle HD
Figure D-31 : Magnitude des courants moyens estivaux en cas de vagues d'Ouest (A), de vagues de Sud-Ouest (B), de vagues d'Est (C) et de vagues de Sud-Est (D)
Figure D-32 : Direction des courants estivaux en cas de vagues d'Ouest (A) et de vagues de Sud-Ouest (B) 41 -
Figure D-33 : Champ des courants pendant deux coups de mer en 2007 (A) et 2008 (B). - 41 -
Figure E-34 : Tendances évolutives du tombolo Ouest (IARE, 1996) 45 -
Figure E-35 : Localisation des secteurs morphodynamiques « homogènes » et des interventions humaines avant l'année 1996 (IARE, 1996)
Figure E-36 : Localisation des interventions humaines après l'année 2003 (Serantoni et Lizaud, 2000-2010) 49 -

# Liste des tableaux aux annexes

Tableau C-1 : Données statistiques sur le vent à 10 mètres à Hyères à partir des données observées SYNOP en été 10 -
Tableau C-2 : Données statistiques sur le vent à 10 mètres à Hyères à partir des données observées SYNOP en hiver 11 -
Tableau C-3 : Catégories et paramètres de terrain (Source : es.ucsc.edu) 14 -
Tableau C-4 : Caractéristiques des stations marégraphiques en Méditerranée orientale française à proximité du tombolo [d'après Courtaud (2000), modifié] 15 -
Tableau C-5 : Echelle de Douglas (Source : www.previmer.org) 20 -
Tableau C-6 : Relation hauteur de la houle et période de pic à Porquerolles (08301) (Source : CANDHIS) 21 -
Tableau C-7 : Détail du nombre de mesures de la campagne du houlographe 08302 (Source : CANDHIS) 21 -
Tableau C-8 : Relation entre la hauteur de la houle et période de pic à Porquerolles (08302) (Source : CANDHIS) 21 -
Tableau C-9 : Relation entre la hauteur de la houle et période de pic au point MEDIT- 2610 pour la période hivernale (Source : ANEMOC) 22 -
Tableau C-10 : Relation entre la hauteur de la houle et direction moyenne au point MEDIT-2610 pour la période hivernale (Source : ANEMOC) 23 -
Tableau C-11 : Relation entre la hauteur de la houle et période de pic au point MEDIT- 2185 pour la période hivernale (Source : ANEMOC) 23 -
Tableau C-12 : Relation entre la hauteur de la houle et direction moyenne au point MEDIT-2185 pour la période hivernale (Source : ANEMOC) 23 -
Tableau C-13 : Effet de la hauteur et la direction de la houle annuelle au point MEDIT- 2610 sur la morphodynamique du tombolo
Tableau C-14 : Effet de la hauteur et la direction de la houle annuelle au point MEDIT- 2185 sur la morphodynamique du tombolo
Tableau C-15 : Effet de la hauteur et la direction de la houle estivale au point MEDIT- 2610 sur la morphodynamique du tombolo 25 -
Tableau C-16 : Effet de la hauteur et la direction de la houle hivernale au point MEDIT- 2610 sur la morphodynamique du tombolo
Tableau C-17 : Effet de la hauteur et la direction de la houle estivale au point MEDIT- 2185 sur la morphodynamique du tombolo 26 -
Tableau C-18 : Effet de la hauteur et la direction de la houle hivernale au point MEDIT- 2185 sur la morphodynamique du tombolo
Tableau C-19 : Climat saisonnier des houles au point MEDIT-2610 27 -
Tableau C-20 : Climat saisonnier des houles au point MEDIT-2185 27 -

#### Annexe A : Articles

#### A1. Article 1

Lacroix, Y., Than, V., Léandri, D., Liardet, P. (2015). 'Analysis of a Coupled Hydro-Sedimentological Numerical Model for the Tombolo of GIENS'. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 99, *International Journal of Environmental, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 9(3), 124 - 131. URL : <u>waset.org/publications/10000572/analysis-of-a-coupled-hydro-</u> <u>sedimentological-numerical-model-for-the-tombolo-of-giens</u>

#### A2. Article 2

Lacroix, Y., Than, V., Léandri, D., Liardet, P. (2015). 'Analysis of Some Solutions to Protect the Tombolo of GIENS'. World Academy of Science, Engineering and Technology, International Science Index 99, *International Journal of Environmental*, *Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, 9(3), 115 - 123. URL : <u>waset.org/publications/10000571/analysis-of-some-solutions-to-protect-the-</u> <u>tombolo-of-giens</u>

#### A3. Article 3

Than, V.V., Lacroix, Y., Nguyen, T.T (2015). 'Numerical modelling of coastal erosion: a case study at the Western tombolo in Giens'. *Vietnam-Japan Workshop on Estuaries, Coasts and Rivers 2015, September 7<sup>th</sup>-8<sup>th</sup>, Hoi An, Vietnam.* URL: vjwecr2015.ckt.edu.vn/files/Workshop%20Program%20-%2023-8-2015(1).pdf

## Annexe B: Codes Matlab

Nos codes Matlab de traitement des données, analyse statistique des résultats et visualisations des résultats, etc. ... sont disponibles en téléchargement dans sur le site *Mediafire : <u>www.mediafire.com/folder/hm34bdefb7a3s/myDHI</u> ou <i>Mega : <u>mega.co.nz/#F!x01kgJhR!qD2mDs4ZHQKivyC-sJhVag</u>.* Dans ce qui suit, nous présentons un exemple d'un code de création des bornes EDF à l'Almanarre dans Google Earth.

```
%% point2kmlBornes.m
% Create KML file of the landmarks EDF of the Almanarre beach.
% Syntax:
    % point2kmlBornes(datum,KFile,XFile)
% Description
   % datum =
                           Lambert932RGF93;
                                                Lambert932RGF93
         SudFrance2RGF93;
    욯
    8
         Lambert2et2RGF93;
                             SudFrance2RGF93;
                                                  Lambert2et2RGF93
         LambertIIISud2RGF93; [] (Default) = No convert
   움
   % KFile = Filename of KML file output;
   % XFile = Filename of XYZ file input;
function point2kmlBornes(datum,KFile,XFile)
   clc:
          tic
   fprintf('\nRunning prepare .xyz [Single file .xyz]\n\n\n');
   narginchk(0,3);
   if nargin<3</pre>
       XFile = getfullfilem('.xyz','Select file of the landmarks EDF');
       KFile = [];
   end
   if nargin==0,
                       datum = [];
                                          end
   응용
   if class(XFile) == 'cell',
                              XFile = XFile';
                                                     nf = length(XFile);
                                           end
   else
                               nf = 1;
    for j=1:nf
       if nf==1,
                           FILENAME = eval('XFile');
       else
                           FILENAME = XFile(j);
                                                       end
       if isempty(KFile),
                           KFile = renamefullfile(FILENAME, 'ge', '.kml');
       end
       xyz = importdata(FILENAME);
       if ~isempty(datum),
           ELL = datumConvert(datum, 'newdatumconvert.xyz',XFile);
                      ELL = xyz;
        else
                                   end
       % Assign the name for the placemark.
       name = cell(1, size(ELL, 1));
       name{1}='B01'; name{2}='B01"'; name{3}='B02'; name{4}='B02"';
        % Icon
       icon = 'http://maps.google.com/mapfiles/kml/paddle/red-circle.png';
        for i=5:size(ELL,1)
           if i<10, name{i}=['B0',num2str(i-2)];</pre>
           else
                       name(i)=['B',num2str(i-2)];
                                                               end
       end
        % Use kmlwritepoint to write the point and associated data to the KML file.
       kmlwritepoint(KFile, ELL(:,2),ELL(:,1),'Name', name, ...
            'Icon', icon, 'IconScale', 1.5, ...
            'Description', {'Borne EDF - Route du sel - Almanarre'});
       fprintf('\nFile created: ''%s''\n',KFile);
   end
    응응
   clc, fprintf('\nNormal Finished Work!\n');
                                                   toc
end
```

# Annexe C: Forçages météo-marins

#### C1. Vents

#### C1.1. Analyse statistique des données de vents

Tableau C-1 : Données statistiques sur le vent à 10 mètres à Hyères à partir des données observées SYNOP en été.

V(m/c)		Ν	NE	Ε	SE	S	SO	0	NO	Ν
v (m/s)		<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
-0.20	P (%)	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0
	N	17	16	5	5	2	0	0	0	0
<0,28	Vm	0,22	0,23	0,25	0,25	0,25	0	0	0	0
	Dm (°)	11,72	42,08	91,50	147	167,50	0	0	0	0
	P (%)	2,85	2,47	1	1,30	1,77	0,59	0,56	1,89	1,28
1.20	N	1030	892	362	471	641	215	202	684	464
1,39	Vm	0,92	0,95	0,94	0,92	0,94	1,01	1,01	1	1,01
	Dm (°)	13,62	42,36	94,48	140,95	180,24	228,16	274,15	323,49	354,11
	P (%)	2,84	3,03	3,02	6,26	4,67	4,11	2,02	5,93	1,61
2.04	N	1026	1094	1092	2261	1687	1485	729	2142	581
3,06	Vm	1,93	2,09	2,36	2,47	2,23	2,51	2,35	2,30	2,08
	Dm (°)	14,17	45,11	96,90	138,32	182,35	223,10	275,79	319,20	353,79
	P (%)	0,17	0,99	2,82	7,36	2,32	8,95	1,99	2,23	0,37
<b>F</b> 20	N	63	358	1019	2660	839	3236	720	806	132
5,28	Vm	4,20	4,18	4,42	4,23	4,05	4,41	4,39	4,27	4,34
	Dm (°)	13,57	55,16	100,22	133,42	185,23	221,76	274,64	316,13	352,85
	P (%)	0,04	0,33	2,27	2,35	0,28	5,72	2,68	1,94	0,09
7 70	N	13	118	819	849	102	2068	968	701	32
7,78	Vm	6,16	6,16	6,37	6,23	6,24	6,37	6,59	6,51	6,20
	Dm (°)	14,68	54,68	102,07	126,09	181,68	229,85	273,36	312,80	352,08
	P (%)	0	0,03	0,54	0,38	0,02	2,53	2,83	1,34	0,02
10,56	N	0	12	194	138	7	914	1022	486	6
	Vm	0	8,62	8,58	8,64	8,89	8,71	8,79	8,63	8,18
	Dm (°)	0	53,40	95,03	134,59	166,43	238,42	269,06	309,76	347,50
	P (%)	0	0	0,09	0,05	0	0,60	1,04	0,24	0
12 61	N	0	1	31	17	0	217	376	87	1
13,01	Vm	0	11,70	11,06	11,44	0	11,19	11,33	11,06	10,62
	Dm (°)	0	41,25	88,71	133,53	0	242,92	264,71	309,83	360
	P (%)	0	0	0	0	0	0,03	0,04	0	0
16.04	N	0	0	0	1	0	10	14	1	0
10,94	Vm	0	0	0	16,70	0	13,66	13,84	14,67	0
	Dm (°)	0	0	0	135	0	246	261,07	310	0
Tatal	Nt	2149	2491	3522	6402	3278	8145	4031	4907	1216
Total	Pt (%)	5,95	6,89	9,75	17,71	9,07	22,54	11,15	13,58	3,36
-7.70	N1	2149	2478	3297	6246	3271	7004	2619	4333	1209
,/8</th <td>P1 (%)</td> <td>6,59</td> <td>6,86</td> <td>9,12</td> <td>17,28</td> <td>9,05</td> <td>19,38</td> <td>7,25</td> <td>11,99</td> <td>3,35</td>	P1 (%)	6,59	6,86	9,12	17,28	9,05	19,38	7,25	11,99	3,35
> 10 FC	N2	0	1	31	18	0	227	390	88	1
>10,56	P2 (%)	0	0,13	4,10	2,38	0	30,03	51,59	11,64	0,13

V(m/c)		Ν	NE	Е	SE	S	SO	0	NO	Ν
v (m/s)		<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	P (%)	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0	0	0	0
-0.20	Ν	7	8	3	3	10	0	0	0	0
<0,28	Vm	0,25	0,23	0,25	0,25	0,25	0	0	0	0
	Dm (°)	10,71	50	90,83	141,67	172	0	0	0	0
	P (%)	1,34	0,95	0,47	0,81	1,59	0,51	0,68	2,49	1,64
1 20	N	593	420	207	358	701	227	298	1098	725
1,39	Vm	0,95	0,97	0,97	0,93	0,97	1,03	1,01	1,01	1,01
	Dm (°)	12,86	44,02	94,39	143,11	178,87	228,65	276,07	325,44	353,44
	P (%)	3,05	3,58	1,66	3,43	5,28	2,56	2,67	16,58	4,55
2.06	N	1345	1579	733	1513	2331	1129	1180	7317	2009
3,00	Vm	2,19	2,39	2,40	2,35	2,17	2,43	2,39	2,38	2,15
	Dm (°)	13,81	43,19	95,55	141,45	179,47	226,57	276,45	322,12	352,96
	P (%)	0,58	3,32	2,54	2,21	1,50	2,18	2,70	5,36	1,28
E 20	N	254	1466	1121	975	664	962	1191	2365	564
5,20	Vm	4,06	4,29	4,40	4,17	4,17	4,27	4,38	4,12	4,21
	Dm (°)	13,84	49,90	94,76	138,07	180,61	230,14	274,51	319,81	352,29
	P (%)	0,10	2,08	2,59	1,13	0,67	1,18	2,94	1,81	0,54
7 79	N	42	918	1142	501	294	520	1298	801	237
7,70	Vm	6,27	6,44	6,48	6,34	6,28	6,42	6,55	6,52	6,37
	Dm (°)	13,25	56,81	91,61	137,74	181,28	235,80	274,20	314,65	352,28
	P (%)	0,02	1,14	1,96	0,36	0,17	0,44	2,75	1,99	0,13
10,56	N	10	504	865	161	75	193	1215	879	57
	Vm	8,55	8,61	8,80	8,76	8,55	8,57	8,67	8,79	8,45
	Dm (°)	14	61,85	86,29	139,78	182,20	241,31	274,98	313,72	351,58
	P (%)	0	0,15	0,68	0,10	0,02	0,03	0,54	0,67	0
12.61	N	0	68	299	45	9	15	237	297	1
13,01	Vm	0	11,44	11,48	11,65	11,19	10,79	11,26	11,23	10,62
	Dm (°)	0	61,18	86,96	140,67	177,22	244,67	276,50	313,06	360
	P (%)	0	0,04	0,08	0	0	0	0,07	0,03	0
16.94	N	1	19	34	2	0	0	31	14	0
10,74	Vm	14,92	14,09	14,02	13,79	0	0	14,72	14,13	0
	Dm (°)	5	60,53	86,18	147,50	0	0	272,58	306,43	0
	P (%)	0	0	0	0	0	0	0,01	0	0
20 56	N	0	0	0	0	0	0	3	0	0
20,30	Vm	0	0	0	0	0	0	17,54	0	0
	Dm (°)	0	0	0	0	0	0	273,33	0	0
Total	Nt	2252	4982	4404	3558	4084	3046	5453	12771	3593
Total	Pt (%)	5,10	11,29	9,98	8,06	9,25	6,90	12,35	28,93	8,14
<7.78	N1	2241	4391	3206	3350	4000	2838	3967	11581	3535
(1,70	P1 (%)	5,73	9,95	7,26	7,59	9,06	6,43	8,99	26,24	8,01
>10.56	N2	1	87	333	47	9	15	271	311	1
>10,50	P2 (%)	0,09	8,09	30,98	4,37	0,84	1,40	25,21	28,93	0,09

Tableau C-2 : Données statistiques sur le vent à 10 mètres à Hyères à partir des données observées SYNOP en hiver.


Figure C-1 : Percentiles des vitesses de vent estival (A) et hivernal (B) à 10 mètres à Hyères à partir des données observées SYNOP pour la période de 1999 à 2014.



(B)

Figure C-2 : Percentiles des vitesses de vent estival (A) et hivernal (B) à 10 mètres à Hyères à partir des données observées METAR pour la période de 2005 à 2013.

# C1.2. Catégories et paramètres de terrain

Roughness Class	Roughness Length (m)	Landscape Type
0	0,0002	Water surface
0,2	0,0005	Inlet water
0,5	0,0024	<i>Completely open terrain with a smooth surface, e,g, concrete runways in airports, mowed grass, etc,</i>
1	0,03	<i>Open agricultural area without fences and hedgerows and very scattered buildings. Only softly rounded hills</i>
1,5	0,055	Agricultural land with some houses and 8 metre tall sheltering hedgerows with a distance of approximately 1250 metres
2	0,1	<i>Agricultural land with some houses and 8 metre tall sheltering hedgerows with a distance of approximately 500 metres</i>
2,5	0,2	<i>Agricultural land with many houses, shrubs and plants, or 8 metre tall sheltering hedgerows with a distance of approximately 250 metres</i>
3	0,4	Villages, small towns, agricultural land with many or tall sheltering hedgerows, forests and very rough and uneven terrain
3,5	0,8	Larger cities with tall buildings
4	1,6	Very large cities with tall buildings and skyscrapers

Tableau C-3 : Catégories et paramètres de terrain (Source : <u>es.ucsc.edu</u>).

Roughness definitions according to the European Wind Atlas.

# **C2.** Niveaux marins

# C2.1. Marée

Les marées sont une fluctuation du niveau marin. Nous pouvons distinguer les catégories de variation du niveau marin dans le site d'étude :

- la marée astronomique dûe à la gravité (et à la force centrifuge) de deux astres, la Lune et le Soleil (Hautefeuille);
- la marée barométrique (dès que la pression chute en dessous de 760 millimètres de mercure). Les chutes de pression atmosphérique provoquent les augmentations du niveau marin (HYDRO M, 1993). Une baisse de la pression atmosphérique de 1 hectopascal provoque une surélévation d'environ un centimètre [(ERAMM, 2000; Tabeaud et Bouligand, 2000; ERAMM, 2001) ; <u>Météo France</u>; <u>SHOM</u>].

# C2.2. Surcote

Le terme de surcote indique une différence positive entre le niveau marin mesuré et le niveau de la mer prédit en présence de la marée astronomique seule au même instant (Source : <u>SHOM</u>). La surcote ne dépend pas de la marée astronomique. Les surcotes induisent des risques littoraux élevés, particulièrement la submersion et le recul du trait de côte à l'aide de l'action des vagues (Courtaud, 2000).

# C2.3. Décote

Le terme de décote indique une différence négative entre le niveau marin mesurée et le niveau de la mer prédit en présence de la marée astronomique seule au même instant (Courtaud, 2000). Les décotes induisent un risque sur la navigation (Source : <u>SHOM</u>).

Station	Coordonnées	Organisme	Période d'enregistrement	Pas de temps	Utilisation par PSMSL
Salin de Giraud (Grau de la Dent)	43° 35' N 04° 70' E	CSMSE	Depuis 1905	Journalier (à 7 h)	Non
Toulon	43° 07' N 05° 55' E	SHOM	1961-1968 1973 1981-1984 1991-2012	Minute	Oui
La Capte	43° 04' N 06° 09 E	CSMSE	1984-1996	Journalier (à 8 h)	Non
Port Ferréol	43° 21'32" N 6° 43'3" E	SHOM	Depuis 2/2012	Minute	Non

Tableau C-4 : Caractéristiques des stations marégraphiques en Méditerranée orientale française à proximité du tombolo [d'après Courtaud (2000), modifié].



Figure C-3 : Fréquence des événements exceptionnels (supérieur à 0,653 mètre CM) à la Capte entre 1993 et 1995 [d'après Courtaud (2000), modifié].



*Figure C-4 : Dispersion mensuelle des niveaux marins des événements exceptionnels (supérieur à 0,653 mètre CM) à la Capte entre 1993 et 1995.* 

# C3. Courants

Les courants côtiers sont d'une autre nature que ceux dans l'océan. Ils sont surtout générés par la marée ou les vagues (Héquette).

# C3.1. Courant de marée

La marée est responsable de mouvements horizontaux de l'eau. Elle produit les courants de marée. Les courants de marée dans le littoral sont caractérisés par leur réversibilité (Héquette). Ils s'écoulent généralement dans la direction opposée pendant la marée montante et la marée descendante. Les courants de flot et de jusant sont engendrés par la marée montante et descendante, respectivement (Héquette). Généralement, la vitesse des courants de marée est faible là où le marnage est faible (Héquette).

# C3.2. Courant de vague

Les vagues sont à l'origine de plusieurs types de courants de vague (Figure C-5) dans la zone littorale (Héquette).



Figure C-5 : Schéma des courants côtiers (Héquette, 2001).

#### C3.2.1. Courant orbital

Les vagues produisent un mouvement des particules d'eau sous le nom de courant orbital ou de courant oscillatoire (Figure C-5). Dans les petits fonds, ces courants finissent par atteindre le fond au niveau duquel le mouvement orbital de la houle est réduit à un mouvement de va-et-vient (Héquette). Ces courants sont la principale source d'agitation des fonds meubles et de transport des sédiments dans les petitsfonds (Héquette).

#### C3.2.2. Courant de dérive

Lorsque les vagues s'approchent du rivage avec un angle (une obliquité) par le phénomène de réfraction qui a tendance à rendre les crêtes de houle de plus en plus parallèles au trait de côte (Figure C-5), elles génèrent un courant parallèle à la côte - courant de dérive (Héquette). Il entraîne le transport sédimentaire le long de la côte (Héquette).

#### C3.2.3. Courants de retour

Au niveau des trous dans la barre sous-marine (canaux de retour), la houle ne déferle pas encore comme elle le fait sur la barre sous-marine (Charel, 2014). Entre les canaux de retour et les zones à l'abri (derrière la barre), il y a un gradient de pression qui provoque une accélération des courants de retour (Figure C-5) (Charel, 2014).

#### C3.2.4. Courants sagittaux

L'arrivée successive des vagues provoque un surplus d'eau à la côte. Il est à l'origine du déséquilibre hydrologique dans la zone littorale. Les courants sagittaux apparaissent afin de répondre à ce déséquilibre (Courtaud, 2000). Ils sont perpendiculaires à la côte. Dans la zone littorale, les courants sagittaux (courants d'arrachement) s'écoulent vers le large entre le rivage et la zone de déferlement (Figure C-5). Ils s'amortissent dans la zone de déferlement. Ils sont contrôlés par la morphologie locale du fond (Héquette). Ces courants affectent certains rivages et peuvent entraîner les baigneurs vers le large. Généralement, ils sont à l'origine des épisodes de sauvetages de plage (Héquette).

#### C3.2.5. Courant d'undertow

L'undertow est l'un des types de courant de retour. C'est également un courant dirigé vers le large qui n'intéresse que la partie basale de la colonne d'eau (Héquette). Il s'écoule près du fond contrairement au courant sagittal qui se manifeste surtout en surface (Figure C-5) (Héquette).

#### **C3.2.6.** Courants de downwelling

Ces courants sont générés par des vents d'afflux qui provoquent une surcote (surélévation du niveau marin). Ils s'écoulent vers le large au niveau du fond dans la zone de transformation des vagues (Figure C-5) (Héquette).



C3.3. Courant à l'Almanarre

à l'Almanarre.

# C4. Houles

# C4.1. Echelle de Douglas

L'échelle de Douglas a été créée en 1917 par le vice-amiral Sir Percy Douglas lorsqu'il était responsable du Service Météorologique de la Marine. Elle exprime l'état de mer basé sur la hauteur de la vague liée au vent et sur la hauteur de la houle résiduelle (Source : <u>PREVIMER</u>).

Tableau C-5 : Echelle de Douglas (Source : <u>www.previmer.org</u>).

Degré	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Echelle de couleurs										
Hs (m)	0	0-0,1	0,1-0,5	0,5-1,25	1,25-2,5	2,5-4	4-6	6-9	9-14	≥14

# C4.2. Type de déferlement



Figure C-7 : Classement du déferlement dépend de la forme du fond (Je comprends.. Enfin !2010).

# C4.3. Houle au large

#### C4.3.1. Données statistiques des houles

Tableau C-6 : Relation hauteur de la houle et période de pic à Porquerolles (08301) (Source : <u>CANDHIS</u>).

							C (Hau	orrélo	gram	me - H trales des	<b>m0/Tp</b> vagues / Pi	) - HIV iode de pic	ERNA : barycentri	L ique)							
hm0 (m)										tç	(Seconde	s)									
0	1.5	3	4.5	6	7.5	9	10.5	12	13.5	15	16.5	18	19.5	21	22.5	24	25.5	27	28.5	30	Total
0.5		386	1790	1875	1038	400	53	2	1	1									3		5549
1		270	3284	6063	4170	1383	180	2													15352
1.5		4	1217	2990	5710	2668	122	9	1												12721
2			247	1440	3983	4364	290	14													10338
2.5			12	434	2017	4917	543	23	11												7957
3				103	715	3481	752	26													5077
3.5				2	245	1770	588	20													2625
4					59	712	349	36													1156
4.5					10	244	176	28	2												460
5					1	63	61	17													142
5.5						15	30	6													51
6						6	22	1													29
6.5							6	1													7
7							1	1													2
Total		660	6550	12907	17948	20023	3173	186	15	1									3		
					Le	s valeurs d	lu tableau s	ont exprim	ées en nor	nbre d'élém	ients - Les	case vides	correspond	dent à des	valeurs nul	es.					
	Coo	le des coul	eurs		1																
>= 10	%	>= 30 ‰	>=	50 ‰																	

Tableau C-7 : Détail du nombre de mesures de la campagne du houlographe 08302 (Source : <u>CANDHIS</u>).

Année	Janv.	Févr.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
2014	1457	1305	1472	1410	1454	1406	1413	1440	59	0	0	0	11416
2013	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	990	990
Total	1457	1305	1472	1410	1454	1406	1413	1440	59	0	990	1457	12406

Tableau	С-8:	Relation	entre	la	hauteur	de	la	houle	et	période	de	ріс	à	Porquerolles
(08302)	(Sourd	ce : <u>CAND</u>	<u>HIS</u> ).											

					Corrélo	gramme -	Hm0/Tp -	GLOBAL					
							vagues / Priode de						
hm0 (m)							tp (Secondes)						
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Total
0.5			259	439	1022	633	368	151	59	13			2944
1			20	375	968	1533	564	286	73	21	4	2	3846
1.5				7	259	814	890	426	157	27	5	4	2589
2					4	196	574	631	227	15	1		1648
2.5					1	5	139	413	284	37			879
3						1	5	67	197	56			326
3.5							1	6	62	22			91
4									20	23	1		44
4.5									4	8			12
Total			279	821	2254	3182	2541	1980	1083	222	11	6	
			Le	s valeurs du table	au sont exprimées	en nombre d'élém	ients - Les case vio	des correspondent	à des valeurs null	es.			
	Code des couleurs	3	]										
>= 10 ‰	>= 30 ‰	>= 50 ‰											



*Figure C-8 : Histogrammes des hauteurs et périodes significatives de houle au large de Porquerolles (08302) (CEREMA, 2014).* 

Tableau C-9 : Relation entre la hauteur de la houle et période de pic au point MEDIT-2610 pour la période hivernale (Source : ANEMOC).

				Corrélog	ramme H	lm0 / Tpic	- ANEM	OC MEDI	T 2610 -	hivernal				
Hm0 (m)							Tpic (Se	condes)	-					
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Total
0.5			35.70	87.02	116.53	72.44	19.32	11.35	1.96	0.03	0.01	0.04	0.06	344.46
1			18.47	114.20	65.32	89.72	73.49	15.17	1.72	0.02				378.10
1.5				1.64	13.88	42.27	47.56	41.76	4.15	0.09				151.34
2					0.08	9.26	26.70	26.43	6.09	0.20	0.05			68.80
2.5						0.11	7.51	20.72	5.83	0.36	0.06			34.59
3							0.13	10.04	6.26	0.42	0.02			16.86
3.5								0.37	3.61	0.32		0.01		4.31
4								0.02	0.59	0.38	0.03	0.02		1.04
4.5									0.09	0.14	0.02	0.02		0.27
5									0.01	0.16				0.17
5.5										0.07				0.07
Total			54.16	202.86	195.81	213.80	174.70	125.87	30.30	2.18	0.17	0.09	0.06	
	Les valeu	rs du tableau sor	nt exprimées en '	"pour mille (‰)"	Les valeurs 0.0	0 ‰ corresponde	ent à des fréquer	nces comprises e	ntre 0 ‰ et 0.01	‰ - Les case vi	des corresponde	ent à des fréquen	ces nulles.	
	Code des coul	eurs												
>= 10 ‰	>= 30 ‰	>= 50 %	»											

Tableau C-10 : Relation entre la hauteur de la houle et direction moyenne au point MEDIT-2610 pour la période hivernale (Source : ANEMOC).

			•			•										-									
						Co	orrélo	gram	me H	lm0 /	DirM	oy - /	ANEN		MEDI	T_26	10 - h	ivern	al						
Hm0 (m)												Dir	Noy (deg	és)											
0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	Total
0.5	3.05	2.89	2.11	2.01	3.04	4.55	24.41	53.23	33.06	16.95	20.16	18.79	14.19	17.89	19.29	17.60	15.20	24.95	30.39	10.50	3.22	2.46	1.76	2.55	344.23
1	14.00	17.84	21.10	20.08	13.93	9.82	11.77	20.67	14.14	13.71	16.88	14.23	13.90	17.26	18.15	14.72	14.71	23.88	15.94	17.69	16.01	12.25	11.13	13.29	377.12
1.5	0.08	0.13	0.28	0.54	0.91	3.04	6.19	11.97	9.68	9.74	10.44	8.65	9.72	13.02	12.83	10.85	12.03	16.23	10.12	3.10	1.05	0.43	0.17	0.14	151.32
2						0.25	1.10	4.75	7.66	9.04	6.58	6.26	5.59	6.66	6.67	6.16	5.92	1.93	0.16	0.06					68.80
2.5						0.04	0.24	1.45	5.95	5.61	3.75	2.76	3.56	4.32	4.22	2.26	0.41	0.02							34.59
3							0.12	0.17	1.96	4.46	2.74	1.55	2.07	2.58	1.10	0.11	0.02								16.86
3.5							0.01	0.05	0.14	0.80	0.98	0.67	0.76	0.83	0.06	0.01									4.31
4								0.02	0.11	0.17	0.15	0.17	0.21	0.19		0.02									1.04
4.5									0.05	0.04		0.05	0.04	0.05	0.04	0.01									0.27
5										0.06	0.07	0.04													0.17
5.5											0.04	0.03													0.07
Total	17.13	20.86	23.48	22.64	17.88	17.69	43.84	92.31	72.74	60.58	61.79	53.19	50.02	62.80	62.36	51.74	48.27	67.00	56.62	31.34	20.27	15.13	13.06	15.99	
		Les valeu	urs du tab	leau sont	exprimé	es en "po	our mille (	‰)" - Les	valeurs (	0.00 ‰ cc	rrespond	ent à des	fréquen	es comp	rises entr	e 0 ‰ et	0.01 ‰ -	Les case	vides co	rrespond	ent à des	fréquenc	es nulles		
		Code des	s couleurs	3		1																			
>= 1	0 ‰	>= 3	30 ‰	>= 5	0 ‰																				

Tableau C-11 : Relation entre la hauteur de la houle et période de pic au point MEDIT-2185 pour la période hivernale (Source : ANEMOC).

				Corré	logramm	ne Hm0 /	Tpic - Al	NEMOC_	MEDIT_2	2185 - hiv	rernal				
Hm0 (m)								Tpic (Secondes	)						
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	Total
0.5			37.94	83.80	109.30	69.47	16.05	8.58	2.07	0.59	0.01		0.02	0.09	327.91
1			10.12	136.16	66.15	74.44	51.70	15.58	4.38	0.29					358.83
1.5				3.73	28.51	54.08	64.60	26.39	8.88	0.76					186.94
2					1.22	6.87	35.83	31.79	8.52	1.37	0.11				85.71
2.5						0.80	2.98	19.65	9.11	0.99	0.13				33.65
3						0.02	0.22	1.32	2.99	1.09	0.09	0.02			5.73
3.5							0.04	0.10	0.27	0.46	0.04	0.02			0.92
4								0.02	0.06	0.16		0.03			0.27
4.5									0.01	0.02	0.01				0.03
Total			48.06	223.69	205.18	205.67	171.42	103.43	36.29	5.72	0.38	0.06	0.02	0.09	
	Les val	eurs du tableau	ı sont exprimées	en "pour mille	(‰)" - Les valeu	urs 0.00 ‰ corre	espondent à des	fréquences co	mprises entre 0	‰ et 0.01 ‰ - L	es case vides o	correspondent à	à des fréquence	s nulles.	
	Code des co	uleurs													
>= 10 ‰	>= 30 %	>= 5	0 ‰												

Tableau C-12 : Relation entre la hauteur de la houle et direction moyenne au point MEDIT-2185 pour la période hivernale (Source : ANEMOC).

						<u> </u>					DiaM	/				T 04	05 6								
						Cc	orrelo	gram	ime H	Im0 /	DIRM	oy - <i>F</i>	ANEN	10C	MEDI	T_21	85 - n	uverr	ial						
Hm0 (m)												Dir	Noy (deg	és)											
0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	Total
0.5	1.06	1.36	1.52	3.57	36.48	71.50	20.59	10.87	7.80	8.98	16.57	24.43	22.46	27.69	28.09	16.61	11.89	4.33	2.40	2.43	2.25	2.24	1.44	1.29	327.83
1	10.48	13.70	16.20	17.66	28.66	37.20	11.86	6.51	6.39	8.29	12.32	16.92	20.34	23.59	15.53	11.32	14.82	14.39	11.97	10.99	10.46	12.25	13.17	13.16	358.19
1.5	0.89	1.35	5.50	19.55	30.71	22.24	7.10	4.88	4.78	5.62	8.03	10.93	13.52	14.84	11.47	9.75	6.99	4.50	1.70	0.76	0.47	0.32	0.45	0.55	186.91
2	0.01	0.09	0.62	2.89	16.43	11.87	5.08	3.77	3.31	3.89	4.71	6.40	7.56	8.52	5.87	3.17	1.26	0.22	0.02	0.01			0.02	0.02	85.71
2.5			0.03	0.84	2.55	4.32	1.92	1.88	1.39	1.97	2.82	3.02	4.98	5.13	2.22	0.49	0.06	0.02							33.65
3				0.09	0.57	0.35	0.21	0.13	0.12	0.21	0.13	0.16	1.31	2.11	0.32	0.02	0.02								5.73
3.5					0.11	0.17	0.02				0.02	0.09	0.14	0.35	0.01	0.02									0.92
4					0.04	0.09							0.05	0.06		0.03									0.27
4.5															0.03										0.03
Total	12.44	16.51	23.87	44.60	115.54	147.74	46.78	28.04	23.78	28.96	44.60	61.94	70.35	82.30	63.53	41.41	35.03	23.46	16.09	14.19	13.18	14.82	15.07	15.01	
		Les valeu	irs du tab	leau sont	exprimé	es en "po	our mille (	‰)" - Les	valeurs (	0.00 ‰ co	orrespond	ent à des	fréquen	ces comp	rises entr	e 0 ‰ et	0.01 ‰ -	Les case	vides co	rrespond	ent à des	fréquenc	es nulles		
		Code des	couleurs	3		1																			
>= 1	0 ‰	>= 3	0 ‰	>= 5	0 ‰																				

# C4.3.2. Effet de la hauteur et de la direction de la houle sur la morphodynamique du tombolo

Tableau C-13 : Effet de la hauteur et la direction de la houle annuelle au point MEDIT-2610 sur la morphodynamique du tombolo.

<b>H</b> <sub>1/3</sub>	Morphologie	Ν	NE	Е	SE	S	SO	0	NO	Ν
(m)	houle	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	Hmor	0,06	0,03	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,05	0,03
<0,1	P (%)	0	0	0,04	0,32	0,53	1,28	0,17	0,01	0
	MI	0	0	0	0,02	0,04	0,09	0,01	0	0
	Hmor	0,33	0,31	0,35	0,34	0,32	0,32	0,37	0,40	0,36
0,5	P (%)	0,03	0,12	1,68	5,16	6,11	13,43	6,23	0,22	0,02
	MI	0,01	0,04	0,60	1,75	1,93	4,29	2,28	0,09	0,01
	Hmor	0,85	0,89	0,89	0,84	0,84	0,82	0,90	0,95	0,85
1,25	P (%)	0,06	0,24	3,66	6,60	4,76	8,08	15,76	2,29	0,08
	MI	0,05	0,22	3,27	5,56	4,02	6,63	14,11	2,17	0,07
	Hmor	1,39	1,64	1,78	1,73	1,65	1,71	1,71	1,82	1,52
2,5	P (%)	0,01	0,07	2,53	2,31	1,08	2,21	9,85	3,18	0,02
	MI	0,01	0,12	4,49	4,01	1,78	3,78	16,81	5,81	0,03
	Hmor	0	2,90	2,97	2,96	2,93	3,18	2,88	2,84	0
4	P (%)	0	0,02	0,39	0,23	0,07	0,19	0,43	0,46	0
	MI	0	0,06	1,15	0,67	0,21	0,62	1,23	1,31	0
	Hmor	0	0	4,56	4,13	4,36	4,23	4,53	4,20	0
5	P (%)	0	0	0,02	0	0	0,01	0,01	0,01	0
	MI	0	0	0,07	0,01	0,02	0,04	0,03	0,04	0
F 24	Hmor	0	0	0	0	0	0	5,12	0	0
5,34	P (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MI	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	$\Sigma P$	0,10	0,45	8,32	14,62	12,55	25,20	32,45	6,17	0,12
	∑MI	0,07	0,44	9,58	12,02	8	15,45	34,47	9,42	0,11

Tableau C-14 : Effet de la hauteur et la direction de la houle annuelle au point MEDIT-2185 sur la morphodynamique du tombolo.

		Ν	NE	Е	SE	S	SO	0	NO	Ν
H <sub>1/3</sub> (m)	Morphologie houle	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	Hmor	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
<0,1	P (%)	0	0,03	0,46	0,40	1,10	2,38	0,08	0,01	0
	MI	0	0	0,03	0,03	0,08	0,17	0,01	0	0
	Hmor	0,33	0,34	0,34	0,31	0,30	0,30	0,38	0,37	0,33
0,5	P (%)	0,07	0,37	8,35	5,24	7,83	18,44	4,01	0,31	0,07
	MI	0,02	0,13	2,88	1,64	2,32	5,58	1,51	0,12	0,02
	Hmor	0,80	0,84	0,85	0,82	0,84	0,79	0,87	0,91	0,85
1,25	P (%)	0,07	0,54	9,71	2,81	3,89	6,77	10,79	1,24	0,09
	MI	0,06	0,45	8,25	2,31	3,26	5,38	9,36	1,13	0,08
	Hmor	1,38	1,88	1,75	1,72	1,62	1,62	1,66	1,85	1,51
2,5	P (%)	0	0,31	4,99	0,67	0,75	0,98	4,15	1,63	0,02
	MI	0	0,58	8,73	1,15	1,22	1,59	6,89	3,02	0,03
4	Hmor	0	3	3,04	2,89	3,20	2,91	2,91	2,88	0

		Ν	NE	Е	SE	S	SO	0	NO	Ν
H <sub>1/3</sub> (m)	Morphologie houle	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	P (%)	0	0,08	0,71	0,06	0,02	0,07	0,12	0,30	0
	MI	0	0,25	2,15	0,17	0,06	0,19	0,35	0,86	0
	Hmor	0	0	4,27	4,22	0	4,23	4,43	4,20	0
5	P (%)	0	0	0,04	0,01	0	0	0,01	0,01	0
	MI	0	0	0,16	0,03	0	0	0,04	0,04	0
E 24	Hmor	0	5,16	5,20	0	0	0	0	0	0
5,54	P (%)	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0
	MI	0	0	0,04	0	0	0	0	0	0
	Hmor	0	0	5,39	0	0	0	0	0	0
6	P (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MI	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0
	$\Sigma^{\mathrm{P}}$	0,14	1,33	24,26	9,19	13,59	28,64	19,17	3,51	0,18
	∑MI	0,08	1,42	22,25	5,34	6,94	12,91	18,16	5,16	0,12

Tableau C-15 : Effet de la hauteur et la direction de la houle estivale au point MEDIT-2610 sur la morphodynamique du tombolo.

H1/3	Morphologie	N	NE	Е	SE	S	SO	0	NO	Ν
(m)	houle	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	Hmor	0,06	0,03	0,07	0,08	0,07	0,07	0,08	0,05	0,03
<0,1	P (%)	0,01	0,01	0,08	0,58	0,81	2,64	0,36	0,02	0
	MI	0	0	0,01	0,04	0,06	0,20	0,03	0	0
	Hmor	0,30	0,27	0,31	0,32	0,30	0,31	0,35	0,37	0,26
0,5	P (%)	0,02	0,11	1,43	4,57	8,07	24,08	8,48	0,14	0,02
	MI	0,01	0,03	0,44	1,45	2,44	7,41	2,97	0,05	0,01
	Hmor	0	0,73	0,84	0,80	0,79	0,73	0,90	0,97	0,75
1,25	P (%)	0	0,02	1,26	3,42	2,75	7,07	19,72	1,38	0,01
	MI	0	0,01	1,06	2,75	2,17	5,17	17,74	1,34	0,01
	Hmor	0	0	1,80	1,73	1,81	1,42	1,60	1,75	0
2,5	P (%)	0	0	0,48	0,48	0,22	0,14	9,94	1,44	0
	MI	0	0	0,87	0,84	0,40	0,20	15,89	2,51	0
	Hmor	0	0	2,67	3,34	0	0	2,61	2,61	0
4	P (%)	0	0	0,06	0,07	0	0	0,02	0,05	0
	MI	0	0	0,16	0,24	0	0	0,05	0,14	0
	$\Sigma^{\mathrm{P}}$	0,03	0,14	3,31	9,12	11,85	33,93	38,52	3,03	0,03
	∑MI	0,01	0,04	2,54	5,32	5,07	12,98	36,68	4,04	0,02

Tableau C-16 : Effet de la hauteur et la direction de la houle hivernale au point MEDIT-2610 sur la morphodynamique du tombolo.

H (m)	Morphologia houlo	Ν	NE	Ε	SE	S	SO	0	NO	Ν
п1/3 (Ш)	Morphologie noule	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	Hmor	0	0	0	0,07	0,08	0,08	0,10	0	0
<0,1	P (%)	0	0	0	0,12	0,21	0,25	0,02	0	0
	MI	0	0	0	0,01	0,02	0,02	0	0	0
	Hmor	0,34	0,38	0,38	0,36	0,33	0,35	0,38	0,41	0,39
0,5	P (%)	0,03	0,14	1,30	4,86	3,93	7,13	5,72	0,32	0,03
	MI	0,01	0,05	0,49	1,72	1,30	2,47	2,18	0,13	0,01
	Hmor	0,83	0,85	0,91	0,82	0,88	0,86	0,87	0,95	0,89
1,25	P (%)	0,16	0,43	5,84	6,56	3,92	7,59	14,63	3,45	0,23
_,	MI	0,13	0,37	5,31	5,39	3,47	6,51	12,80	3,27	0,20
2 5	Hmor	1,44	1,66	1,77	1,76	1,68	1,73	1,77	1,90	1,59
2,5	P (%)	0,02	0,15	3,54	3,21	1,61	4,24	10,78	5,41	0,05

H (m) Mormhologia houla		Ν	NE	Е	SE	S	SO	0	NO	Ν
H1/3 (M)	Morphologie noule	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	MI	0,02	0,25	6,26	5,64	2,69	7,33	19,07	10,28	0,08
	Hmor	0	2,86	2,90	3,01	2,94	3,22	2,91	2,88	0
4	P (%)	0	0,01	0,57	0,44	0,15	0,39	1,05	1,35	0
	MI	0	0,03	1,66	1,33	0,44	1,24	3,05	3,89	0
	Hmor	0	0	4,68	4,13	4,36	4,23	4,53	4,20	0
5	P (%)	0	0	0,03	0,01	0,02	0,04	0,03	0,03	0
	MI	0	0	0,13	0,03	0,07	0,17	0,14	0,14	0
E 24	Hmor	0	0	0	0	0	0	5,12	0	0
5,34	P (%)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	MI	0	0	0	0	0	0	0,02	0	0
	$\Sigma^{\mathrm{P}}$	0,21	0,73	11,28	15,20	9,84	19,64	32,23	10,56	0,31
	ΣMI	0,16	0,70	13,85	14,12	7,99	17,74	37,26	17,71	0,29

Tableau C-17 : Effet de la hauteur et la direction de la houle estivale au point MEDIT-2185 sur la morphodynamique du tombolo.

		Ν	NE	Е	SE	S	SO	0	NO	Ν
H <sub>1/3</sub> (m)	Morphologie houle	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	Hmor	0,08	0,05	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,06	0,08
<0,1	P (%)	0	0,08	0,85	0,66	1,92	5,52	0,21	0,02	0
	MI	0	0	0,06	0,05	0,13	0,39	0,01	0	0
	Hmor	0,29	0,3	0,32	0,29	0,28	0,29	0,38	0,33	0,26
0,5	P (%)	0,06	0,34	6,05	5,2	9,52	31,56	5,82	0,22	0,07
	MI	0,02	0,1	1,92	1,5	2,64	9,18	2,19	0,07	0,02
	Hmor	0,71	0,66	0,81	0,76	0,76	0,73	0,85	0,91	0,71
1,25	P (%)	0,01	0,1	3,66	1,68	1,62	5,84	12,97	0,5	0,01
	MI	0,01	0,07	2,96	1,29	1,23	4,25	11,06	0,45	0,01
	Hmor	0	0	1,7	2,04	1,91	1,44	1,6	1,75	0
2,5	P (%)	0	0	0,69	0,23	0,14	0,14	3,6	0,47	0
	MI	0	0	1,16	0,48	0,26	0,2	5,75	0,83	0
	Hmor	0	0	2,68	3,15	0	0	2,59	2,71	0
4	P (%)	0	0	0,08	0,08	0	0	0,03	0,02	0
	MI	0	0	0,2	0,25	0	0	0,07	0,05	0
	Hmor	0	0	0	4,22	0	0	0	0	0
5	P (%)	0	0	0	0,03	0	0	0	0	0
	MI	0	0	0	0,13	0	0	0	0	0
	$\Sigma^{\mathrm{P}}$	0,07	0,52	11,33	7,88	13,2	43,06	22,63	1,23	0,08
	∑MI	0,03	0,17	6,3	3,7	4,26	14,02	19,08	1,4	0,03

Tableau C-18 : Effet de la hauteur et la direction de la houle hivernale au point MEDIT-2185 sur la morphodynamique du tombolo.

H <sub>1/3</sub>	Morphologie	Ν	NE	Е	SE	S	SO	0	NO	N
(m)	houle	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	Hmor	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,08	0,09	0,08	0,07
<0,1	P (%)	0	0,04	0,07	0,21	0,3	0,56	0,01	0	0
	MI	0	0	0,01	0,02	0,02	0,05	0	0	0
	Hmor	0,33	0,38	0,36	0,32	0,3	0,33	0,39	0,39	0,35
0,5	P (%)	0,08	0,4	9,39	4,18	4,94	10,7	3,86	0,36	0,07
	MI	0,03	0,15	3,37	1,32	1,46	3,5	1,49	0,14	0,03
	Hmor	0,82	0,84	0,86	0,78	0,87	0,84	0,86	0,92	0,93
1,25	P (%)	0,16	1	13,59	2,33	4,38	6,97	10,08	2,06	0,2
	MI	0,13	0,84	11,72	1,83	3,81	5,87	8,67	1,9	0,18

<b>H</b> <sub>1/3</sub>	Morphologie	Ν	NE	Е	SE	S	SO	0	NO	Ν
(m)	houle	<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	Hmor	1,48	1,88	1,77	1,73	1,61	1,63	1,73	1,92	1,55
2,5	P (%)	0	0,7	8,46	0,67	1,27	1,84	4,68	3,43	0,05
	MI	0,01	1,31	15	1,16	2,04	3	8,11	6,57	0,08
	Hmor	0	2,88	3	2,82	2,69	2,82	2,99	2,91	0
4	P (%)	0	0,13	1,2	0,08	0,02	0,1	0,24	1,01	0
	MI	0	0,38	3,61	0,24	0,05	0,28	0,73	2,93	0
	Hmor	0	0	4,25	0	0	4,23	4,43	4,2	0
5	P (%)	0	0	0,08	0	0	0	0,04	0,03	0
	MI	0	0	0,33	0	0	0,01	0,18	0,14	0
	Hmor	0	5,16	5,22	0	0	0	0	0	0
5,34	P (%)	0	0	0,01	0	0	0	0	0	0
	MI	0	0,02	0,05	0	0	0	0	0	0
	$\Sigma P$	0,24	2,27	32,81	7,47	10,91	20,17	18,91	6,89	0,33
	∑MI	0,16	2,70	34,09	4,56	7,38	12,70	19,18	11,68	0,29

#### C4.3.3.Climat saisonnier des houles

Tableau C-19 : Climat saisonnier des houles au point MEDIT-2610.

Direction	Direction		NE	Е	SE	S	SO	0	NO	Ν
(°N)		<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
Fréquence	Annuel	0,09	0,46	8,32	14,63	12,56	25,21	32,44	6,18	0,13
(04)	Estival	0,03	0,14	3,31	9,12	11,85	33,94	38,53	3,04	0,04
(%)	Hivernal	0,21	0,73	11,28	15,19	9,83	19,64	32,24	10,56	0,31
	Annuel	0,69	0,90	1,12	0,79	0,60	0,58	1,03	1,48	0,83
Hs (m)	Estival	0,20	0,29	0,74	0,55	0,40	0,35	0,92	1,30	0,33
	Hivernal	0,77	0,92	1,19	0,89	0,78	0,87	1,12	1,64	0,92
	Annuel	11	51	96	133	180	225	267	303	348
MWD (°)	Estival	11	53	96	136	180	228	265	299	347
	Hivernal	11	49	95	130	182	223	268	306	348
	Annuel	4,32	4,59	4,59	4,14	4,39	3,98	4,56	5,03	4,66
Tp (sec	Estival	2,33	2,68	3,76	3,61	4,05	3,40	4,27	4,61	2,76
	Hivernal	4,62	4,69	4,92	4,39	4,53	4,60	4,83	5,30	4,97

Tableau C-20 : Climat saisonnier des houles au point MEDIT-2185.

Direction (°N)		Ν	NE	Ε	SE	S	SO	0	NO	Ν
Direction (N)		<20	<70	<110	<160	<200	<250	<290	<340	<360
	Annuel	0,14	1,33	24,26	9,19	13,59	28,64	19,17	3,51	0,18
Fréquence (%)	Estival	0,08	0,52	11,32	7,89	13,19	43,06	22,63	1,23	0,09
	Hivernal	0,24	2,27	32,81	7,47	10,91	20,17	18,91	6,89	0,33
	Annuel	0,53	1,02	0,88	0,55	0,48	0,42	0,91	1,43	0,67
Hs (m)	Estival	0,30	0,31	0,52	0,44	0,29	0,30	0,81	1,09	0,29
	Hivernal	0,63	1,15	1	0,58	0,64	0,60	0,98	1,65	0,86
	Annuel	11	57	89	134	183	224	268	303	349
MWD (°)	Estival	12	55	91	135	183	225	266	302	350
	Hivernal	11	58	88	133	184	225	269	305	349
	Annuel	3,73	4,49	4,37	3,91	4,30	3,61	3,97	4,80	4,06
Tp (sec	Estival	2,72	2,82	3,55	3,50	3,71	3,19	3,74	4,11	2,63
	Hivernal	4,10	4,82	4,74	4,07	4,68	4,18	4,13	5,18	4,64

#### C4.3.4. Rose des houles



Figure C-9 : Rose des houles à la station de Porquerolles en 2008.



## C4.4. Houle à la côte

Figure C-10 : Hauteur (Å) et période (B) de la houle à la station SCAPT4 à La Capte.

# C5. Evènements extrêmes

## C5.1. Coups de mer



Figure C-11 : Dispersion des hauteurs  $H_{1/10}$  et  $H_{1/3}$  (A) et des hauteurs  $H_{max}$  et  $H_{1/3}$  (B) entre 1992 et 1997.



Figure C-12 : Dispersion des hauteurs  $H_{max}$  et  $H_{1/10}$  (A) et des périodes  $T_{1/10}$  et  $T_{1/3}$  (B) entre 1992 et 1997.



Figure C-13 : Dispersion des périodes  $T_{pic}$  et  $T_{1/3}(A)$  et  $T_{pic}$  et  $T_{1/10}(B)$  entre 1992 et 1997.

# C5.2. Tempêtes

Tableau C-21 : Liste des coups de mer entre 1992 et 1999 (ERAMM, 2001) et entre 2000 et 2012.

Date	H <sub>1/3</sub> (m)	H <sub>1/10</sub> (m)	H <sub>max</sub> (m)	T <sub>H1/3</sub> (s)	T <sub>H1/10</sub> (s)	T <sub>p</sub> (s)
05 Déc. 1992	4,03	5,36	6,88	8,4	8,4	10,2
28 Déc. 1992	4,4	5,36	6,8	8,7	8,8	9,4
10 Janv. 1995	3,88	4,9	6,62	8,2	8,2	8,8

Date	H <sub>1/3</sub> (m)	$H_{1/10}(m)$	H <sub>max</sub> (m)	T <sub>H1/3</sub> (s)	T <sub>H1/10</sub> (s)	T <sub>p</sub> (s)
11 Janv. 1995	4,02	4,99	6,27	8,7	8,5	9,4
11 Janv. 1995	4,94	6,27	8,8	9,7	9,7	10,2
20 Nov. 1996	4,09	4,8	6,03	9,4	9,5	10,2
09 Déc. 1996	4,07	5,18	6,25	8,3	8,5	9,4
04 Déc. 1998	4,17	5,51	8,07	8,6	8,8	9,4
27 Janv. 1999	4,01	4,88	6,37	8,6	8,6	9,4
28 Janv. 1999	4,35	5,48	6,71	8,8	8,7	9,4
06 Nov. 2000	4,52	-	8	8	-	-
30 Janv. 2001	3,6	-	6,7	9	-	-
27 Févr. 2001	3,9	-	6,2	8	-	-
23 Nov. 2001	3,8	-	6,6	8,5	-	-
24 Janv. 2002	3,8	-	5,8	8	-	-
20 Févr. 2002	3,9	-	6,9	8,7	-	-
31 Oct. 2003	4,4	-	7,7	9,5	-	-
28 Nov. 2003	3,8	-	6,8	8,5	-	-
22 Déc. 2003	5	-	8,3	9	-	-
02 Janv. 2004	5,1	-	9,2	8,5	-	-
15 Janv. 2004	5,2	-	10,3	7,9	-	-
20 Janv. 2004	5,1	-	9,2	8,6	-	-
28 Janv. 2004	4	-	7	7,8	-	-
15 Déc. 2004	5,2	-	8,4	8	-	-
29 Déc. 2004	5	-	8,5	8,5	-	-
23 Nov. 2005	4,5	-	9,1	7,9	-	-
24 Mai 2006	3,8	-	6,5	6,6	-	-
12 Nov. 2006	4	-	7,5	8,1	-	-
22 Nov. 2006	3,8	-	6,3	6,9	-	-
09 Déc. 2006	5,2	-	9	8	-	-
22 Déc. 2006	4	-	6,8	7	-	-
02 Janv. 2007	4	-	7	7,8	-	-
12 Janv. 2007	5	-	9	7,4	-	-
20 Oct. 2007	4,1	-	7	7,5	-	-
26 Oct. 2007	4	-	6,5	7,2	-	-
09 Nov. 2007	4,4	-	8	8	-	-
11 Nov. 2007	5,25	-	7,5	7,9	-	-
14 Nov. 2007	4,6	-	7,1	8,5	-	-
15 Déc. 2007	4,75	-	7,8	8	-	-
04 Oct. 2008	4,1	-	6,1	7,8	-	-
03 Nov. 2008	4,7	-	7	8,3	-	-
22 Nov. 2008	4,3	-	7,5	8,9	-	-
30 Nov. 2008	4,75	-	7,2	9,2	-	-
14 Déc. 2008	4,8	-	8	8,9	-	-
26 Déc. 2008	5,5	-	8,8	9,8	-	-
24 Janv. 2009	5,75	-	10,5	10	-	-
27 Mai 2009	4,1	-	6,8	9	-	-
01 Janv. 2010	5	-	8,5	9,5	-	-
28 Janv. 2010	4,8	-	7,5	9	-	-
03 Mars 2010	4	-	7,5	8	-	-
09 Mars 2010	3,9	-	7	8,8	-	-
04 Mai 2010	4,7	-	8,2	8,9	-	-
16 Mai 2010	4	-	6,25	8,8	-	-
24 Déc. 2010	4,4	-	7,3	9,4	-	-
08 Nov. 2011	3,9	-	7	8,5	-	-
16 Déc. 2011	4,9	-	9,2	9,6	-	-
05 Janv. 2012	4,5	-	7,5	8,9	-	-

C5.2.1. Dispersion des périodes des houles



Figure C-14 : Dispersion des périodes  $T_{max}$  et  $T_{1/3}$  des houles pendant les tempêtes entre 1998 et 2012.

#### C5.2.2. Période de retour des tempêtes

	GPD	EXP
Durée de l'échantillon de mesure (année)	14,16	
Seuil de sélection u (en m)	3,75	5
Nombre d'événements sélectionnés	113	28
Cambrure moyenne des événements sélectionnés	0,069	0,074



Figure C-15 : Ajustement graphique de la loi GPD (CEREMA, 2014).



Figure C-16 : Ajustement graphique de la loi EXP (CEREMA, 2014).

# C6. Extraction de données sous la forme MIKE21 à partir des fichiers NetCDF

« *Network Common Data Form* » (NetCDF) est un ensemble de bibliothèques logicielles et de formats de données indépendants de la machine, auto-descriptifs, qui soutiennent la création, l'accès et le partage des données scientifiques sous la forme de tableau orienté (Source : <u>www.unidata.ucar.edu/software/netcdf</u>). Si nous avons besoin de plus d'informations sur NetCDF sur Windows, celle-ci est accessible sur le site « *Unidata's NetCDF Installation and Porting Guide* ». Nous pouvons trouver une longue liste d'outils utiles sur la page NetCDF logiciel d'Unidata.

Nous ne pouvons pas travailler avec les données NetCDF directement et avons besoin d'extraire des données pour une petite région (peut-être une cellule de la grille unique) sous la forme « \*.DFS0 » ou « \*.DFS1 » ou « \*.DFS2 ». Puis, nous l'importons dans MIKE21. Voici, étape par étape, les instructions pour convertir des données NetCDF sous la forme MIKE21.

La première étape consiste à installer <u>NCO</u> (netCDF Operator), version 4.4.1. NCO manipule des données stockées dans des formats NetCDF accessibles, tels que HDF4 et HDF5. Elle exploite également l'expressivité géophysique de nombreux CF (climat et prévisions), la description souple de dimensions physiques traduites par <u>UDUnits</u>, la transparence du réseau d'<u>OPeNDAP</u>, les fonctions de stockage (par exemple, de compression, d'arrachement, de groupes) de <u>HDF</u> (Hierarchical Format de données) et de nombreux algorithmes mathématiques et statistiques puissants de GSL (la GNU Scientific Library) (Source : <u>nco.sourceforge.net</u>).

La deuxième étape consiste à déterminer les cellules de la grille dont nous avons besoin. Les données sont stockées dans les fichiers NetCDF dans des tableaux 2D. Pour sortir des données pour une sous-région, nous avons besoin de connaître la gamme appropriée d'index de tableau. Les grilles ne sont pas carrées en coordonnées LONG/LAT. Par conséquent, il y a aussi des tableaux 2D nommés "lat" et "lon" qui donnent la latitude et la longitude pour chaque cellule de la grille.

La troisième et dernière étape permet l'extraction des données à partir des cellules spécifiées. Avec les indices de la cellule de grille dans le fichier NETCDF, nous pouvons extraire des données à partir du fichier NetCDF. Nous avons créé des codes Matlab (Annexe B, p. - 9 -) tels que <u>nc2dfs0.m</u>, <u>nc2dfs1.m</u>, et <u>nc2dfs2.m</u>, etc. ... afin d'interpoler des données NETCDF pour un point, une ligne et une région respectivement. Pour extraire les données, il nous faut connaître le nom de la variable et les indices de tableau de la cellule de grille que nous voulons extraire. Nous pouvons extraire les valeurs d'une gamme de coordonnées. Le fichier résultant peut être ouvert dans MIKE21.

# C7. Création des données sous la forme MIKE21 à partir des fichiers au format TXT et IMAGE

Les forçages en format TXT et IMAGE seront convertis au format approprié à l'aide de l'outil de « *Time Series Editor* » dans MIKE21 et nos codes Matlab.

# C7.1. A partir des données au format TXT

D'abord, à partir des données de houle d'ANEMOC et des observations du vent, du niveau de la mer au format TXT, nous avons créé les données sous la forme ASCII. Il s'agit d'un format texte générique qui peut être produit par presque tous les tableurs ou éditeurs de texte. Seules les données de l'axe de calendrier non équidistant peuvent être enregistrées dans ce format. Les fichiers doivent avoir le format suivant (DHI, 2014k) :

```
Titre
Time
        Itemname 1 Itemname 2
Unit
        100274
                     2000 0
                                  100003
                                               2401 0
2000-01-01 00 : 00 : 00
                           5.65257
                                        342.319
2000-01-01 03:00:00
                           4.95776
                                        354.423
2000-01-01 06:00:00
                           4.85349
                                        1.55423
2000-01-01 09:00:00
                           4.55973
                                        7.49017
etc. ...
```

La première ligne contient le titre (DHI, 2014k). La deuxième ligne contient la

chaîne « *Time* » suivie du nom des éléments. La liste est séparée par des tabulations (DHI, 2014k). La troisième ligne est facultative. Elle contient la chaîne « *Unit* » suivie des trois codes par chaque paramètre : type de paramètre, unité de paramètre et type de temps de la série qui sont présentés dans le tableau C-23 (DHI, 2014k).

Nom dos álámonts	Code dans le fichier ASCII		Description	
Nom des éléments	Type de code	Valeur	(Paramètre / Unité / Type de la série)	
	Type de paramètre	100274	« Wind Speed »	
« Itemname 1 »	Unité de paramètre	2000	m/s	
	Type de temps de la série	0	« Instantaneous »	
« Itemname 2 »	Type de paramètre	100003	« Wind Direction »	
	Unité de paramètre	2401	« degree »	
	Type de temps de la série	0	« Instantaneous »	

Tableau C-23 : Description des codes dans le fichier ASCII.

Chacune des lignes suivantes contient les données pour un pas de temps. Chaque ligne consiste en une date et une heure suivie d'une zone pour chacun des éléments de données (DHI, 2014k). Le format de la date et de l'heure est conforme à la norme ISO 8601, qui est AAAA-MM- JJ HH : MM : SS. Entre la date et l'heure, il peut y avoir un « espace » ou la lettre « T ». Après le temps il doit y avoir un onglet et chacun des éléments de données doivent être séparés par des tabulations (DHI, 2014k). Les fichiers enregistrés dans ce format ont l'extension « .DFS0 » et « .DFS1 » (DHI, 2014k).

Ensuite, nous importons les fichiers ASCII dans le module « *Time Series Editor* » dans MIKE21. Cette fonctionnalité peut être utilisée pour importer des données de séries chronologiques à partir d'un fichier ASCII. L'ensemble de données peut ensuite être sauvegardé dans un fichier de DFS ou exporté vers un fichier ASCII à nouveau. « *Time Series Editor* » prend en charge deux formats de fichiers, le format ASCII et DFS. Nous notons que les fichiers peuvent être convertis d'un format à l'autre, c'est à dire enregistrés dans un format différent de leur format d'origine, mais avec des restrictions. Le fichier au format DFS a été développé par DHI pour le stockage des données de variables hydrodynamiques temporelles. Les données de dimension 0, 1, 2 ou 3 peuvent être stockées, bien que seules les données de dimension zéro soient pertinentes pour l'éditeur de séries chronologiques. Les fichiers enregistrés dans ce format doivent avoir l'extension « .DFS0 » ou « .DFS1 » ou « .DT0 » est également autorisé, car il est l'ancien format de fichier de séries chronologiques (DHI, 2014k).

Le fichier DFS sera importé dans la modélisation hydrodynamique et transport des sédiments dans le chapitre 4.

#### C7.2. A partir des données sous format image

Certaines données sont sous la forme d'image (par exemple, un fichier « \*.BMP ») tels que les données de vent, de bouées et de courant à la Capte en 2009. A partir de ces données, nous utilisons certains outils afin de créer les données au format ASCII («

\*.TXT ») dans MIKE21.

À la première étape, nous devons faire la vectorisation de l'image. Pour ce faire, nous utilisons le logiciel *Vector Magic Desktop Edition* version 1.15 (*Vector Magic*) (Source : <u>www.vectormagic.com</u>). La vectorisation d'image se fait souvent à la main. Nous pouvons utiliser *Vector Magic* pour rendre ce processus simple et rapide pour certains types d'image. Il y a différents modes de vectorisation de l'image : le mode photo et le mode logo. Nous choisissons le mode logo qui nous permet de choisir le nombre de couleurs à utiliser. Nous choisissons le *Mode assitant* en « *De base* », le *Type d'Image* en *Logo sans anti-alias*, la *Qualité d'entrée* en *Haute* et le *Mode couleur* en *Deux couleurs* (n'utiliser que deux couleur). Nous allons exporter l'image en format bitmap (« \*.BMP »).

La deuxième étape nécessite l'installation du logiciel *GetData Graph Digitizer* version 2.24. *GetData Graph Digitizer* est un programme de numérisation des graphiques et des diagrammes. Il est souvent nécessaire d'obtenir des données d'origine (x, y) à partir des graphiques, par exemple, des parcelles scientifiques numérisées, lorsque les valeurs de données ne sont pas disponibles. *GetData Graph Digitizer* permet d'obtenir facilement les données dans de tels cas. La numérisation est un processus en quatre étapes : ouvrir un graphique, définir l'échelle (système de coordonnées : les dates ou les heures et la variable) ; numériser (automatiquement ou manuellement) et exporter au format TXT (Source : <u>getdata-graph-digitizer.com</u>). Il nous faut assigner le format numérique "Nombre" à une valeur de date ou d'heure.

La troisième étape vise à créer et interpoler les données de « *Time series* » dans Matlab à partir du fichier au format TXT précédent. Nous exportons le résultat au format TXT à l'aide du code Matlab <u>resampleAscii.m</u> que nous avons créé (Annexe B, p. - 9 -).

La quatrième et dernière étape permet de créer des données au format ASCII (« \*.TXT ») dans MIKE21 à partir des données au format TXT créées dans la troisième étape de la section C7.1.

# Annexe D: Modélisation numérique

# D1. Validation du modèle HD



Figure D-17 : Roses des courants enregistrés (A) (Dufresne, 2014) et simulés (B) aux positions 1 dans le chenal de navigation durant la période de Juin à Octobre 2009.



Figure D-18 : Roses des courants enregistrés (A) (Dufresne, 2014) et simulés (B) aux Cap Carqueiranne durant la période de Juin à Septembre 2011.

# D2. Houles à partir du modèle SW et HD

#### D2.1. Modèle SW



Figure D-19 : Hauteur moyenne des vagues d'Ouest annuels sous l'action des vents de Nord-Ouest (A) et de Sud-Ouest (B) à partir du modèle SW.



Figure D-20 : Champ de la houle pendant deux coups de mer en 2007 (A) et 2008 (B) à partir du modèle SW.



Figure D-21 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant deux coups de mer en 2007 (A) et 2008 (B) à partir du modèle SW.



Figure D-22 : Magnitude des hauteurs de houle significatives (A) et courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre (B) pendant la tempête décennale à partir du modèle SW.



Figure D-23 : Magnitude des hauteurs de houle significatives (A) et courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre (B) pendant la tempête maximale observée à partir du modèle SW.



Figure D-24 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant la tempête trentennale (A) et la tempête cinquantennale (B) à partir du modèle SW.



*Figure D-25 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant la tempête centennale à partir du modèle SW.* 

#### D2.2. Modèle HD



*Figure D-26 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant deux coups de mer en 2007 (A) et 2008 (B) à partir du modèle HD.* 



Figure D-27 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre en cas de houles d'Ouest (A) et de houles de Sud-Ouest (B) pendant la tempête décennale.



Figure D-28 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant la tempête trentennale (A) et la tempête cinquantennale (B).



Figure D-29 : Courbes des paramètres de la houle à l'Almanarre pendant la tempête maximale observée (A) et centennale (B).

# D3. Niveaux marins à partir du modèle HD



Figure D-30 : Niveaux marins en cas de vagues d'Ouest (A), de vagues de Sud-Ouest (B), de vagues d'Est (C) et de vagues de Sud-Est (D) à partir du modèle HD.

# D4. Courants à partir du modèle HD



Figure D-31 : Magnitude des courants moyens estivaux en cas de vagues d'Ouest (A), de vagues de Sud-Ouest (B), de vagues d'Est (C) et de vagues de Sud-Est (D).



Figure D-32 : Direction des courants estivaux en cas de vagues d'Ouest (A) et de vagues de Sud-Ouest (B).



Figure D-33 : Champ des courants pendant deux coups de mer en 2007 (A) et 2008 (B).

# D5. Configuration d'un fichier de simulation SW et HD

Tableau D-24 : Configuration d'un fichier de simulation SW.

Paramètre d'entrée	Par défaut	Choisi	Remarques
« Basic Equations »	« Spectral formulation » = « Fully	« Spectral formulation » = «	Efforts de calibration indiquent que «
	spectral formulation »	Directionally decoupled parametric	Fully spectral formulation » était
	« Time formulation » = « Instationary	formulation »	nécessaire
	formulation »	« Time formulation » = « Quasi	
		stationary formulation »	
« Time parameters »	-	le pas de temps est de 30 minutes	
« Spectral	« Frequency Discretization »	Par défaut	Efforts de calibration indiquent que
Discretization »	« Discretization type » = « Equidistant »,		l'augmentation du "number of directions"
	« Number of frequencies » = 25,		de 16 à 32 a marginalement affecté les
	« Minimum Frequency » = 0,055hz		résultats du modèle
	« Frequency interval » = 0,02hz		
	« Directional Discretization »		
	« Discretization type » = « 360 degree		
	rose »		
	« Number of directions » = 16		
« Solution Technique	« Geographical space discretization » =	Par défaut	aucun
»	« Higher order »		
	« Max. number of levels of transport » =		
	32		
	« Number of steps in source » = 1		
	« Min time step » = 0,01 sec		
	« Max time step » = 30 sec		

« Water Level Conditions »	« Specify water level variation »	Données des marées mesurées de Toulon comme constante dans le site d'étude.	aucun
« Current Conditions »	« No current »	Par défaut	Il est entendu que le courant ne devrait pas avoir un effet important sur la transformation de la hauteur des vagues du large à la côte.
« Wind Forcing »	« No wind »	« Wind, velocity components » « Wind, speed and direction »	aucun
« Ice Coverage »	« No ice coverage »	Par défaut	« <i>Ice Coverage</i> » n'est pas prévu dans la zone d'étude
« Wave Breaking »	« Model » = « Wave breaking » « Type of gamma » = « Specified gamma » « Format » = « Constant » « Constant value » = 0,8 « Alpha » = 1	Par défaut	aucun
« Bottom Friction »	« Model » = « Nikuradse roughness, kn » « Format » = « Constant » « Constant value » = 0,04 m	« Model » = « Nikuradse roughness, kn » « Format » = « Constant » « Constant value » = 0,0656 m	aucun
« Initial Conditions »	<ul> <li>« Type » = « Spectra from empirical formulas »</li> <li>« Type de formulas » = « JONSWAP fetch growth »</li> <li>« Maximum fetch » = 100 000 m</li> <li>« Max peak Frequency » = 0,4Hz</li> <li>« Max Philips constant » = 081</li> <li>« Shape Parameter » = 0,07</li> <li>« Shape Parameter » = 0,09</li> <li>« Peakness parameter » = 3,3</li> </ul>	« Type » = « Spectra from empirical formulas » « Type de formulas » = « S.P.M. – 1973 Shallow water » « Maximum fetch » = 200 000 m « Shape Parameter, sigma a » = 0,07 « Shape Parameter, sigma b » = 0,09 « Peakness parameter » = 3,3	Efforts de calibration indiquent que la modification des « <i>initial conditions</i> » n'affecte que les premiers phénomènes de vagues.

Paramètre d'entrée	Par défaut	Choisi	Remarques
« Solution	« Time integration » = « Higher order »	Par défaut	aucun
Technique »	« Space discretization » = « Higher order		
	<i>»</i>		
	« Minimum time step » = 0,01 (s)		
	« Maximum time step » = 60 (s)		
« Time parameters »	-	le pas de temps est de 30 minutes	
« Flood and dry »	« Drying depth » = 0,005 (m)	Par défaut	aucun
	« Flood depth » = 0,05 (m)		
	« Wetting depth » = 0,1 (m)		
« Density »	« Barotropic »	Par défaut	aucun
« Eddy Vicosity »	« No Eddy »	« Smagorinsky formulation data » =	Il est entendu que la viscosité ne devrait
		0,9 (type constant)	pas avoir un effet important sur le
			courant.
« Bed Resistance »	« No bed resistance »	« <i>Manning number</i> » = 24 (type	
		constant)	
« Coriolis Forcing »	« No Coriolis force »	« Varing in domain »	aucun
« Wind Forcing »	« No wind »	« Wind, speed and direction »	aucun
« Ice Coverage »	« No include coverage »	Par défaut	« Ice Coverage » n'est pas prévu dans le
			site d'étude
« Tidal Potential »	« No include tidal potential »	Par défaut	aucun
« Precipitation-	« No include precipitation-evaporation »	Par défaut	aucun
Evaporation »			
« Wave radiation »	Wave radiation from SW simulation	Par défaut	aucun
« Source »	« No sources »	Par défaut	aucun
« Initial Conditions »	« Surface elevation » = 0	« <i>Surface elevation</i> » = 0,5	Efforts de calibration indiquent que la
			modification des « initial conditions »
			n'affecte que les premiers phénomènes de
			vagues, courants.
« Decoupling »	« No decoupling »	Par défaut	aucun

Tableau D-25 : Configuration de la simulation hydrodynamique HD.

# Annexe E : Evolution et intervention au Tombolo Ouest



Figure E-34 : Tendances évolutives du tombolo Ouest (IARE, 1996).

Tableau E-26 : Interventions réalisées au cordon dunaire du tombolo Ouest de Gien (sources : IARE (1996) ; Ville d'Hyères - Service Eau Littoral Properté - le 27 Mars 2013).

1848-1849Début des aménagements du Nord de l'étang des Pesquiers en Salins1854-1917Protection du tombolo et des salines par des rails de chemin de fer et quelques enrochements.1959Les effluents de la ville de Giens auparavant déversés à l'embase Sud du tombolo, rejetés non traités 600 mètres plus au large et à 4,50 mètres de profondeur.1968Installation de gabions dans la partie médiane du tombolo.1969Construction de la Route du Sel et l'implantation des réseaux. Renforcement des gabions dans la partie médiane à l'aide d'énormes blocs de calor	sont aire. ¡e et ne etés,
1854-1917Protection du tombolo et des salines par des rails de chemin de fer et quelques enrochements.1959Les effluents de la ville de Giens auparavant déversés à l'embase Sud du tombolo, rejetés non traités 600 mètres plus au large et à 4,50 mètres de profondeur.1968Installation de gabions dans la partie médiane du tombolo.1969Construction de la Route du Sel et l'implantation des réseaux. Renforcement des gabions dans la partie médiane à l'aide d'énormes blocs de calor	sont aire. ¡e et ne etés,
<ul> <li>1959 Les effluents de la ville de Giens auparavant déversés à l'embase Sud du tombolo, rejetés non traités 600 mètres plus au large et à 4,50 mètres de profondeur.</li> <li>1968 Installation de gabions dans la partie médiane du tombolo.</li> <li>1969 Construction de la Route du Sel et l'implantation des réseaux. Renforcement des gabions dans la partie médiane à l'aide d'énormes blocs de calor</li> </ul>	sont aire. e et ne etés,
<ul> <li>1968 Installation de gabions dans la partie médiane du tombolo.</li> <li>1969 Construction de la Route du Sel et l'implantation des réseaux. Renforcement des gabions dans la partie médiane à l'aide d'énormes blocs de calc</li> </ul>	aire. ;e et ne etés,
<ul> <li>1969</li> <li>Construction de la Route du Sel et l'implantation des réseaux. Renforcement des gabions dans la partie médiane à l'aide d'énormes blocs de calc</li> </ul>	aire. ;e et ne etés,
<b>1969</b> Renforcement des gabions dans la partie médiane à l'aide d'énormes blocs de calc	aire. ;e et ne etés,
	;e et ne etés,
<b>Avant 1970</b> Pose de la conduite d'eau (entre le DPM et les canaux de ceinture des étangs).	ge et ne etés,
<b>1973</b> Les effluents de la ville d'Hyères, auparavant rejetés à 200 ou 300 mètres du rivag subissant qu'une simple décantation, sont traités par une station biologique et rej par un émissaire de 1400 mètres de long, à 12,50 mètres de profondeur.	
<b>1975</b> Un diffuseur multipores est mis en place à l'extrémité de l'émissaire d'Hyères dan d'améliorer les phénomènes de dilution	s le but
<b>1976</b> Les effluents de la ville de Giens sont détournés vers le réseau d'assainissement d ville d'Hyères et sont donc traités.	e la
<b>1976-1977</b> Palissades en bois réalisé entre B15 et B18, entre B20 et B24	
<b>1979</b> Palissades en bois réalisé entre B06 et B14	
<b>1981</b> Les effluents de la ville de Carqueiranne sont détournés vers le collecteur d'Hyère	s.
<b>1984</b> Palissades en bois réalisé entre B14 et B15 et entre B18 et B20 ;	
<b>1986</b> Importants travaux de création de parkings dans la partie Sud du tombolo.	
<b>1984-1987</b> Enrochements entre B03 et B14	
<b>1992</b> Le restaurant "La Madrague" (Sud du tombolo) a dû être reculé d'une quarantaine mètres ; reconstruction d'une dalle en béton au détriment d'une zone recouverte végétation psammo-halophile. La réhabilitation du cordon dunaire par mise en place de ganivelles au niveau du des Estagnets	e de de la marais
<ul> <li>1994</li> <li>- Reconstruction de la Route du Sel dans la partie nord, désormais à côté du canal ceinture de l'étang.</li> <li>- La mise en place de nouvelles ganivelles au Sud du tombolo Quest.</li> </ul>	de
Juin 1994- Juin 1995Rechargements de 14 600 tonnes de graviers et de 3 800 mètres cubes de sable et carrefour de l'Almanarre et le restaurant "les Salinas" (borne B15) suite aux temp - 6 Juin 1994 : 2 790 tonnes de graviers de la Durance. - 1ère semaine de Juin 94 : 2 330 mètres cubes de sable de Bormes-les-Mimosas - 19 Octobre 1994 : 722 tonnes de graviers - 19 au 22 Déc. 1994 : 3 492 tonnes de graviers - 14 au 17 Février 1995 : 1 979 tonnes de graviers de la Durance - 10 au 12 Avril 1995 : 3 128 tonnes - 17 au 24 Mai 1995 : 2 500 tonnes de graviers et 1 550 mètres cubes de sables. Rechargement du Sud du tombolo de 700 mètres cubes de sable peur le reprofilag dunes.	itre le êtes ge des
<b>1995-1996</b> Reprofilage du cordon dunaires et implantations de ganivelles du Sud du tombolo	Ouest
<b>1995-1998</b> Enlèvement des enrochements dans le premier tiers nord de la branche occidenta	le
Nov-03 Curage canal	
<b>Déc-03</b> Formation du cordon dunaire avec produit du curage du canal de ceinture + maté stocké	riaux
Févr-04 Formation du cordon dunaire avec 3 000 T sable roulé	
• refaire du cordon à la borne B08 : Apport de 300 T de sable du Jardin des mers • Renouvellement de ganivelles au niveau du Marais des Estagnets (Sud Route du	Sel)
<b>Nov-04</b> Renouvellement de ganivelles au niveau des passages (Sud Route du Sel)	
<b>Déc-04</b> Refaire du cordon à la BorneB08 : Apport de 800 mètres cubes sable de rivière (en et 6 000 mètres cubes de posidonie	ı stock)
Mars-05 apport de 711 T de sable de rivière et 700 mètres cubes de posidonie	

Période	Travaux
Avr-05	- Réengraissement de la branche occidentale, - Réaménagement du cordon dunaire à la borne B15 après destruction du chalet "Le Salinas".
	<ul> <li>Pose et/ou renouvellement de ganivelles de la branche occidentale.</li> <li>Enfouissement des lignes électriques et France Telecom (Sud Route du Sel)</li> </ul>
Nov-07 ÷ Dec-07	<ul> <li>Création de casier de ganivelles en lieu et place du restaurant la zone bleu, renouvellement des ganivelles sur la partie sud de la route du sel avec ajout d'un rang côté plage (branche occidentale).</li> <li>Reformation du cordon dunaire à chaque hiver et printemps entre la borne 6 et l'ancien emplacement du restaurant le salinas : un mélange de sable de rivière (465 tonnes) et de posidonie (tonnage non connu) est apporté.</li> <li>Des opérations d'enlèvement de posidonie sur tout le long du littoral hyérois sur les zones très fréquentées et accessibles aux engins.</li> </ul>
Oct-07 ÷ Avr-08	- Les ganivelles de la partie occidentale du tombolo sont réparées et de nouvelles sont posées, sur la partie nord.
Mars-08	<ul> <li>Reformation du cordon dunaire entre la borne 6 et l'ancien emplacement du restaurant le Salinas : un nouvel apport de sable de rivière (492 tonnes) et de posidonie (tonnage non connu).</li> <li>Des opérations d'enlèvement de posidonie sur tout le long du littoral hyérois sur les zones très fréquentées et accessibles aux engins.</li> </ul>
Avr-08	Reformation du cordon dunaire entre la borne 6 et l'ancien emplacement du restaurant le salinas : deux derniers apports d'un mélange de sable (1016 tonnes et 479 tonnes) et de posidonies (tonnage non connu).
Oct-08	Apport de sable de rivière (305 tonnes) et de posidonie (tonnage non connu) pour refaire le cordon en partie nord
Dec-08 ÷ Jan-09	Apport de sable de rivière (710 tonnes) et de posidonie (tonnage non connu) pour refaire le cordon en partie nord
Mars-09	Apport de posidonie (tonnage non connu) pour refaire le cordon en partie nord
Avr-09	Apport de posidonie (tonnage non connu) pour refaire le cordon en partie nord
Juin-09	Apport de sable de rivière (305 tonnes) et de posidonie (tonnage non connu) pour refaire le cordon en partie nord
Oct-09	Reconstitution du cordon dunaire au niveau de la borne B08 par apport de posidonie et 215 T de sable de carrière roulé-lavé
Nov-09	Reconstitution du cordon dunaire au niveau de la borne B08 par apport de posidonie et 280 T de sable de carrière roulé-lavé
Déc-09	Reconstitution du cordon dunaire au niveau de la borne B08 par apport de posidonie et 360 T de sable de carrière roulé-lavé
Fevr-10 ÷ Mars-10	Reconstitution du cordon dunaire par la réutilisation des matériaux déposés dans le canal de ceinture des salins et sur la route par la tempête
Avr-10	Apport de posidonie et reformation du cordon dunaire au niveau de la borne B08 dans la zone Nord du tombolo Ouest.
Mai-10	Reconstitution du cordon dunaire au niveau de la borne B08 par apport de posidonie et 350 T de sable de carrière roulé-lavé
Oct-10 ÷ Nov-10	Reconstitution du cordon dunaire par apport de posidonie et 588 T de sable de rivière
Déc-10	Reconstitution du cordon dunaire par apport de posidonie et 220 T de sable de rivière
Déc-10 ÷ Jan-11	Apport de posidonie et reformation du cordon dunaire avec sable déposé dans le canal
Jan-11	Apport de posidonie et reformation du cordon dunaire avec sable déposé dans le canal
Mars-11	Reconstitution du cordon dunaire par apport de posidonie et 223T de sable de rivière
Oct-11	Reconstitution du cordon dunaire par apport de posidonie et 536 T de sable de rivière
Fev-12	Reconstitution du cordon dunaire par apport de posidonie et 604 T de sable roulé lave
Mars-12	Apport de posidonie et reformation du cordon dunaire avec sable depose dans le canal
Nov.12	Reconstitution du cordon dunaire par apport de posidonie et 505 T de sable de vivière
Déc-12	Reconstitution du cordon dunaire par apport de posidonie et 505 T de sable de rivière
	r rr rr rorpostore at the second seco


*Figure E-35 : Localisation des secteurs morphodynamiques « homogènes » et des interventions humaines avant l'année 1996 (IARE, 1996).* 



Figure E-36 : Localisation des interventions humaines après l'année 2003 (Serantoni et Lizaud, 2000-2010).