

Demande d'examen au cas par cas préalable à la réalisation éventuelle d'une évaluation environnementale

Article R. 122-3 du code de l'environnement

Ce formulaire sera publié sur le site internet de l'autorité environnementale
Avant de remplir cette demande, lire attentivement la notice explicative

Cadre réservé à l'autorité environnementale

Date de réception :
06/03/2019

Dossier complet le :
06/03/2019

N° d'enregistrement :
F-084-19-C-0028

1. Intitulé du projet

Modification de l'ouvrage de protection du port de La Capte, commune de Hyères les Palmiers.

2. Identification du (ou des) maître(s) d'ouvrage ou du (ou des) pétitionnaire(s)

2.1 Personne physique

Nom

Prénom

2.2 Personne morale

Dénomination ou raison sociale

Mairie de Hyères Les Palmiers

Nom, prénom et qualité de la personne
habilitée à représenter la personne morale

Monsieur le maire

RCS / SIRET

2 1 8 3 0 0 6 9 7 0 0 4 3 8

Forme juridique

Joignez à votre demande l'annexe obligatoire n°1

3. Catégorie(s) applicable(s) du tableau des seuils et critères annexé à l'article R. 122-2 du code de l'environnement et dimensionnement correspondant du projet

| N° de catégorie et sous-catégorie | Caractéristiques du projet au regard des seuils et critères de la catégorie (Préciser les éventuelles rubriques issues d'autres nomenclatures (ICPE, IOTA, etc.)) |
|---|--|
| 11. Travaux, ouvrages et aménagements en zone côtière | a) Ouvrages et aménagements côtiers destinés à combattre l'érosion et travaux maritimes susceptibles de modifier la côte par la construction notamment de digues, de môles, de jetées, d'enrochements, d'ouvrages de défense contre la mer et d'aménagements côtiers constituant un système d'endiguement. |

4. Caractéristiques générales du projet

Doivent être annexées au présent formulaire les pièces énoncées à la rubrique 8.1 du formulaire

4.1 Nature du projet, y compris les éventuels travaux de démolition

Le projet concerne la modification de la digue de protection du port de La Capte, sur la commune de Hyères Les Palmiers.

4.2 Objectifs du projet

Le projet correspond à la modification de l'ouvrage de protection du port de La Capte afin d'une part à sécuriser la passe et à renforcer la protection des embarcations en poste à flot, d'autre part à remplacer la perte en poste d'amarrage supprimés dans le canal du Gras reliant le port aux Salin des Pesquiers, et enfin à garantir la libre circulation des eaux de ce canal, diminuant par la même le risque d'inondation des terres des Salins en amont.

La modélisation réalisée par la société ACRI IN permet d'indiquer que cet ouvrage n'aura pas d'influence notables sur les dépôts et/ou les accrétions sur les plages limitrophes.

Ce projet, comme évoqué dans le premier paragraphe, permettra aussi d'abaisser l'énergie de la houle entrante dans le port La Capte et donc de sécuriser les postes à flot dans le port.

Il convient d'indiquer que ces travaux visent à modifier la forme de la digue sans en augmenter l'emprise au sol et cela dans l'emprise du domaine portuaire existant.

4.3 Décrivez sommairement le projet

4.3.1 dans sa phase travaux

La modification se fera par la pose d'enrochement avec ancrage sur l'ouvrage existant.

4.3.2 dans sa phase d'exploitation

En phase d'exploitation, la modification de l'ouvrage permet la création de trente-neuf nouveaux postes d'amarrage. Création qui vient pallier la suppression d'un même nombre de poste actuellement en place dans le canal du Gras.

La suppression de ces postes permet une meilleure circulation des eaux dans le canal et renforce ainsi la lutte contre les inondations en amont dans la salins des Pesquiers. Salins qui sont la propriété du Conservatoire du Littoral.

4.4 A quelle(s) procédure(s) administrative(s) d'autorisation le projet a-t-il été ou sera-t-il soumis ?
 La décision de l'autorité environnementale devra être jointe au(x) dossier(s) d'autorisation(s).

S'agissant d'un dossier relevant du régime de la déclaration au titre des articles L241-1 à 6 du Code de l'Environnement, il n'y a pas de demande d'autorisation.

4.5 Dimensions et caractéristiques du projet et superficie globale de l'opération - préciser les unités de mesure utilisées

| Grandeurs caractéristiques | Valeur(s) |
|---------------------------------|-----------|
| Modification de la digue : | |
| Longueur développée : | 100 m |
| Largeur au pieds de l'ouvrage : | 19 m |

4.6 Localisation du projet
 Adresse et commune(s)
 d'implantation

Commune de Hyères Les Palmiers
 Port de l'Aiguade

Coordonnées géographiques¹

Long. 06° 10' 24" 02 Lat. 43° 06' 00" 35

Pour les catégories 5° a), 6° a), b) et c), 7° a), b) 9° a), b), c), d), 10°, 11° a) b), 12°, 13°, 22°, 32°, 34°, 38° ; 43° a), b) de l'annexe à l'article R. 122-2 du code de l'environnement :

Point de départ :

Long. 06° 10' 23" 67 Lat. 43° 06' 01" 15

Point d'arrivée :

Long. 06° 10' 22" 15 Lat. 43° 05' 59" 74

Communes traversées :

Commune de Hyères les Palmiers

Joignez à votre demande les annexes n° 2 à 6

4.7 S'agit-il d'une modification/extension d'une installation ou d'un ouvrage existant ? Oui Non
 4.7.1 Si oui, cette installation ou cet ouvrage a-t-il fait l'objet d'une évaluation environnementale ? Oui Non

4.7.2 Si oui, décrivez sommairement les différentes composantes de votre projet et indiquez à quelle date il a été autorisé ?

(Empty box for project description and authorization date)

¹ Pour l'outre-mer, voir notice explicative

5. Sensibilité environnementale de la zone d'implantation envisagée

Afin de réunir les informations nécessaires pour remplir le tableau ci-dessous, vous pouvez vous rapprocher des services instructeurs, et vous référer notamment à l'outil de cartographie interactive CARMEN, disponible sur le site de chaque direction régionale.

Le site Internet du ministère en charge de l'environnement vous propose, dans la rubrique concernant la demande de cas par cas, la liste des sites internet où trouver les données environnementales par région utiles pour remplir le formulaire.

| Le projet se situe-t-il : | Oui | Non | Lequel/Laquelle ? |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--|
| Dans une zone naturelle d'intérêt écologique, faunistique et floristique de type I ou II (ZNIEFF) ? | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | ZNIEFF 83-008-00 Presqu'île de Giens. ZNIEFF 83-159-10 Tombolo occidental de Giens. ZNIEFF 83-100-10 Pinède de La Capte. ZNIEFF 83-100-13 Salins d'Hyères et des Pesquiers. |
| En zone de montagne ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Dans une zone couverte par un arrêté de protection de biotope ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Sur le territoire d'une commune littorale ? | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | |
| Dans un parc national, un parc naturel marin, une réserve naturelle (nationale ou régionale), une zone de conservation halieutique ou un parc naturel régional ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Sur un territoire couvert par un plan de prévention du bruit, arrêté ou le cas échéant, en cours d'élaboration ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Dans un bien inscrit au patrimoine mondial ou sa zone tampon, un monument historique ou ses abords ou un site patrimonial remarquable ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Dans une zone humide ayant fait l'objet d'une délimitation ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |

| | | | |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Dans une commune couverte par un plan de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN) ou par un plan de prévention des risques technologiques (PPRT) ? Si oui, est-il prescrit ou approuvé ? | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | PPRI approuvé |
| Dans un site ou sur des sols pollués ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Dans une zone de répartition des eaux ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Dans un périmètre de protection rapprochée d'un captage d'eau destiné à la consommation humaine ou d'eau minérale naturelle ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Dans un site inscrit ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Le projet se situe-t-il, dans ou à proximité : | Oui | Non | Lequel et à quelle distance ? |
| D'un site Natura 2000 ? | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | FR 9301613 Rade de Hyères. FR 9312008 Salins d'Hyères et des Pesquiers. FR 9310020 Îles d'Hyères. |
| D'un site classé ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |

6. Caractéristiques de l'impact potentiel du projet sur l'environnement et la santé humaine au vu des informations disponibles

6.1 Le projet envisagé est-il susceptible d'avoir les incidences notables suivantes ?
 Veuillez compléter le tableau suivant :

| Incidences potentielles | | Oui | Non | De quelle nature ? De quelle importance ? Appréciez sommairement l'impact potentiel |
|-------------------------|---|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Ressources | Engendre-t-il des prélèvements d'eau ? Si oui, dans quel milieu ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Impliquera-t-il des drainages / ou des modifications prévisibles des masses d'eau souterraines ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Est-il excédentaire en matériaux ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Est-il déficitaire en matériaux ? Si oui, utilise-t-il les ressources naturelles du sol ou du sous-sol ? | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | Enrochements provenant de carrière. |
| Milieu naturel | Est-il susceptible d'entraîner des perturbations, des dégradations, des destructions de la biodiversité existante : faune, flore, habitats, continuités écologiques ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | Présence d'herbiers de Posidonies, la limite supérieure la plus proche est située à environ 40 mètres du pied de l'ouvrage (hors zone d'influence). Présence de neuf individus de Pinna nobilis au niveau de la limite supérieure des herbiers, situés à environ 47 mètres du pied de l'ouvrage (hors zone d'influence). |
| | Si le projet est situé dans ou à proximité d'un site Natura 2000, est-il susceptible d'avoir un impact sur un habitat / une espèce inscrit(e) au Formulaire Standard de Données du site ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |

| | | | | |
|------------------|--|-------------------------------------|-------------------------------------|---|
| | Est-il susceptible d'avoir des incidences sur les autres zones à sensibilité particulière énumérées au 5.2 du présent formulaire ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Engendre-t-il la consommation d'espaces naturels, agricoles, forestiers, maritimes ? | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | La modification de la digue n'augmente pas l'emprise au sol. Le projet engendre une consommation d'environ 800m2 de l'espace maritime au profit de l'espace portuaire, tout en restant dans le domaine portuaire. |
| Risques | Est-il concerné par des risques technologiques ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Est-il concerné par des risques naturels ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Engendre-t-il des risques sanitaires ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Est-il concerné par des risques sanitaires ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Nuisances | Engendre-t-il des déplacements/des trafics | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Est-il source de bruit ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Est-il concerné par des nuisances sonores ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |

| | | | | |
|------------------|--|--------------------------|-------------------------------------|--|
| | Engendre-t-il des odeurs ? Est-il concerné par des nuisances olfactives ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Engendre-t-il des vibrations ? Est-il concerné par des vibrations ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Engendre-t-il des émissions lumineuses ? Est-il concerné par des émissions lumineuses ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| Emissions | Engendre-t-il des rejets dans l'air ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Engendre-t-il des rejets liquides ? Si oui, dans quel milieu ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Engendre-t-il des effluents ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Engendre-t-il la production de déchets non dangereux, inertes, dangereux ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |

| | | | | |
|--|---|--------------------------|-------------------------------------|--|
| Patrimoine / Cadre de vie / Population | Est-il susceptible de porter atteinte au patrimoine architectural, culturel, archéologique et paysager ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |
| | Engendre-t-il des modifications sur les activités humaines (agriculture, sylviculture, urbanisme, aménagements), notamment l'usage du sol ? | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | |

6.2 Les incidences du projet identifiées au 6.1 sont-elles susceptibles d'être cumulées avec d'autres projets existants ou approuvés ?

Oui Non Si oui, décrivez lesquelles :

6.3 Les incidences du projet identifiées au 6.1 sont-elles susceptibles d'avoir des effets de nature transfrontière ?

Oui Non Si oui, décrivez lesquels :

6.4 Description, le cas échéant, des mesures et des caractéristiques du projet destinées à éviter ou réduire les effets négatifs notables du projet sur l'environnement ou la santé humaine (pour plus de précision, il vous est possible de joindre une annexe traitant de ces éléments) :

Lors des travaux, les mesures seront prises pour ne pas propager des éléments fins lors de la pose des enrochements. En cas de nécessité une barrière anti MES, et/ou anti hydrocarbures, pourra être positionner pour circonscrire et traiter une pollution accidentelle.

Comme nous l'indiquions précédemment, ces travaux visent à modifier la forme de la digue sans en augmenter l'emprise au sol et cela dans l'emprise du domaine portuaire existant.

7. Auto-évaluation (facultatif)

Au regard du formulaire rempli, estimez-vous qu'il est nécessaire que votre projet fasse l'objet d'une évaluation environnementale ou qu'il devrait en être dispensé ? Expliquez pourquoi.

Le projet concerne la modification de l'ouvrage de protection contre la houle du port de La Capte afin de sécuriser les postes à flots et la passe, de permettre la libre circulation des eaux du Gras et de remplacer une trentaine de postes à flots actuellement dans ce canal. Les limites supérieures des herbiers de Posidonies et les Pinna nobilis sur le site se situent, hors zone d'influence, respectivement à environ 40m et 47m du pied du projet.

Compte tenu de l'absence d'espèce faunistique et/ou floristique réglementées et/ou protégées dans la zone d'emprise et d'influence, de la modélisation réalisée (dont une des conclusion est que la modification ne modifie pas la dynamique littoral, annexée à ce document) et de l'intérêt physique avéré, ce projet devrait être dispensé d'une évaluation environnementale.

8. Annexes

8.1 Annexes obligatoires

| Objet | | |
|-------|---|-------------------------------------|
| 1 | Document CERFA n°14734 intitulé « informations nominatives relatives au maître d'ouvrage ou pétitionnaire » - non publié ; | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 2 | Un plan de situation au 1/25 000 ou, à défaut, à une échelle comprise entre 1/16 000 et 1/64 000 (Il peut s'agir d'extraits cartographiques du document d'urbanisme s'il existe) ; | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 3 | Au minimum, 2 photographies datées de la zone d'implantation, avec une localisation cartographique des prises de vue, l'une devant permettre de situer le projet dans l'environnement proche et l'autre de le situer dans le paysage lointain ; | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 4 | Un plan du projet <u>ou</u> , pour les travaux, ouvrages ou aménagements visés aux catégories 5° a), 6°a), b) et c), 7°a), b), 9°a), b), c), d), 10°, 11°a), b), 12°, 13°, 22°, 32, 38° ; 43° a) et b) de l'annexe à l'article R. 122-2 du code de l'environnement un projet de tracé ou une enveloppe de tracé ; | <input checked="" type="checkbox"/> |
| 5 | Sauf pour les travaux, ouvrages ou aménagements visés aux 5° a), 6°a), b) et c), 7° a), b), 9°a), b), c), d), 10°, 11°a), b), 12°, 13°, 22°, 32, 38° ; 43° a) et b) de l'annexe à l'article R. 122-2 du code de l'environnement : plan des abords du projet (100 mètres au minimum) pouvant prendre la forme de photos aériennes datées et complétées si nécessaire selon les évolutions récentes, à une échelle comprise entre 1/2 000 et 1/5 000. Ce plan devra préciser l'affectation des constructions et terrains avoisinants ainsi que les canaux, plans d'eau et cours d'eau ; | <input type="checkbox"/> |
| 6 | Si le projet est situé dans un site Natura 2000, un plan de situation détaillé du projet par rapport à ce site. Dans les autres cas, une carte permettant de localiser le projet par rapport aux sites Natura 2000 sur lesquels le projet est susceptible d'avoir des effets. | <input checked="" type="checkbox"/> |

8.2 Autres annexes volontairement transmises par le maître d'ouvrage ou pétitionnaire

Veillez compléter le tableau ci-joint en indiquant les annexes jointes au présent formulaire d'évaluation, ainsi que les parties auxquelles elles se rattachent

| Objet |
|--|
| Etude de la dynamique sédimentaire du port de La Capte permettant d'apprécier que l'ouvrage modifié n'influence pas la dynamique littorale sur les plages de La Capte et renforce la protection des ouvrages et des postes à flots dans le port. Etude faune flore sous marine "Investigations biologiques sous marines - Ville de Hyères - Plage de la Capte" au droit de la passe d'entrée du port. |

9. Engagement et signature

Je certifie sur l'honneur l'exactitude des renseignements ci-dessus

Fait à

HYERES

le,

6 Mars 2019

Signature

L'Adjointe au Maire

Edith AUDIBERT



Modification de l'ouvrage de protection du port de La Capte

Demande d'examen au cas par cas - Pièce n°2



PORT DE LA CAPTE

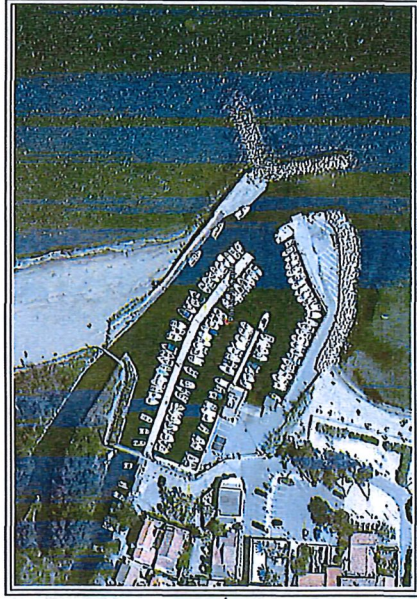


OPSIA
TEL: 04 94 23 93 00
FAX: 04 94 23 43 99
EMAIL: OPSIA@OPSIA.ME



Ville de Hyères

PORT DE LA CAPTE



Modification de l'ouvrage de protection du port de
La Capte

Demande d'examen au cas par cas - Pièce n°4

PROJET

VUE EN PLAN ET COUPES

PORT DE LA CAPTE

Projet

Le 19/09/2017



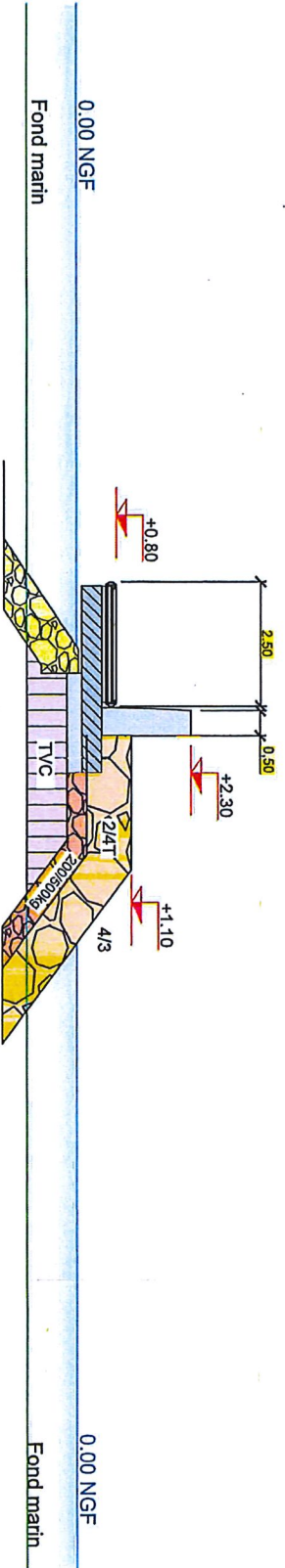
| CATEGORIE | Nombre |
|--------------|--------|
| 8.00 x 2.80 | 29u |
| 10.00 x 3.40 | 10u |
| Total | 39u |

PORT DE LA CAPTE

Projet

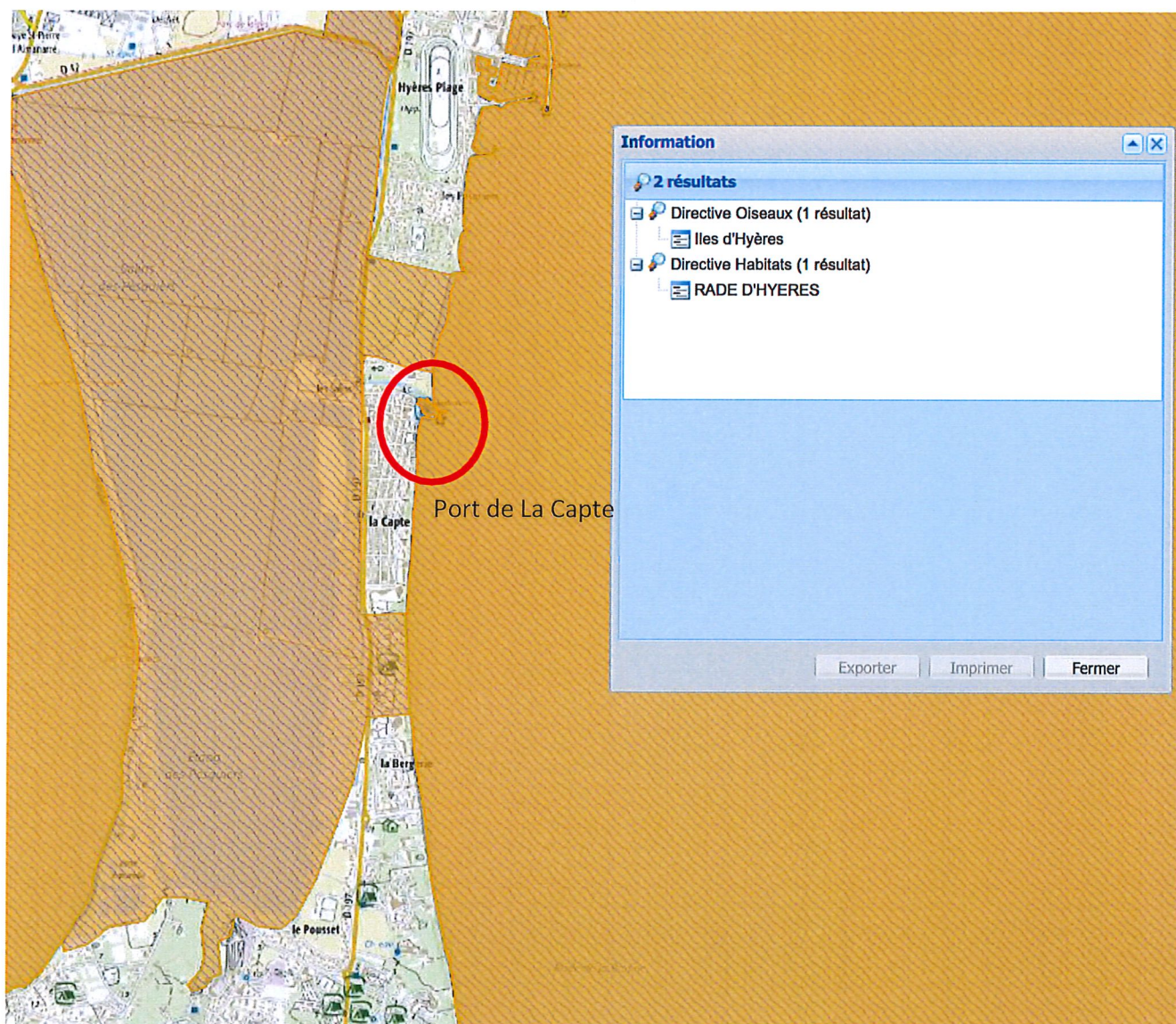
Le 19/09/2017

COUPE B-B



Modification de l'ouvrage de protection du port de La Capte

Demande d'examen au cas par cas - Pièce n°6



Etude de la dynamique sédimentaire du port de la Capte



Rapport d'études

Réf.: A1695-0192-V0.1

Date: 06/11/2018



Client: Commune d'Hyères-les-Palmiers





Page blanche

Signatures

| | Nom | Société |
|--------------|-----|---------|
| Préparé par | NCH | ACRI-IN |
| Contrôlé par | ILE | ACRI-IN |
| Autorisé par | RDE | ACRI-IN |

Version

| Version | Contenu | Auteur |
|---------|--------------------|--------|
| 0.0 | Rapport provisoire | NCH |

Illustrations page de garde : le port de la Capte (crédit photographique Métropole Toulon Provence Méditerranée).



Page blanche

Table des matières

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCTION | 1 |
| 2 | PRESENTATION DU SITE D'ETUDE | 2 |
| 3 | INVENTAIRE DES DONNEES DISPONIBLES | 3 |
| 3.1 | DONNÉES ENVIRONNEMENTALES | 3 |
| 3.1.1 | Données topo-bathymétriques et géophysiques | 3 |
| 3.1.2 | Données météo-océanographiques | 3 |
| 3.2 | DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES | 3 |
| 4 | AGITATIONS MARINES | 5 |
| 4.1 | AGITATIONS AU LARGE | 5 |
| 4.1.1 | Données de houle | 5 |
| 4.1.2 | Analyse qualitative de la série temporelle – 2004 à 2016 | 6 |
| 4.1.3 | Analyse statistique de la série temporelle – 2004 à 2016 | 7 |
| 4.1.4 | Statistiques des houles extrêmes | 9 |
| 4.2 | MODÈLE DE PROPAGATION | 12 |
| 4.2.1 | Hypothèse de modélisation | 12 |
| 4.2.2 | Emprise du modèle de propagation | 12 |
| 4.2.3 | Maillage | 13 |
| 4.2.4 | Bathymétrie | 14 |
| 4.2.5 | Données d'entrée | 14 |
| 4.2.5.1 | Gammes d'agitation fréquentes | 14 |
| 4.2.5.2 | Agitations extrêmes | 14 |
| 4.2.6 | Résultats | 15 |
| 4.3 | AGITATION À PROXIMITÉ DE LA CÔTE | 17 |
| 4.3.1 | Cas des agitations fréquentes | 17 |
| 4.3.2 | Houles extrêmes | 17 |
| 5 | NIVEAUX MARINS | 19 |
| 5.1 | DÉFINITIONS | 19 |
| 5.2 | MARÉE ASTRONOMIQUE | 19 |
| 5.3 | MARÉE ATMOSPHÉRIQUE | 20 |
| 5.4 | VALEURS EXTRÊMES | 20 |
| 6 | LES COURANTS LITTORAUX | 21 |
| 6.1 | LA DÉRIVE LITTORALE | 21 |
| 7 | LEVES TOPOGRAPHIQUES ET BATHYMETRIQUES | 22 |
| 7.1 | BATHYMÉTRIE GÉNÉRALE DES FONDS MARINS | 22 |
| 7.2 | LEVÉS BATHYMÉTRIQUES DANS LE PÉRIMÈTRE DU PORT DE LA CAPTE | 22 |
| 7.3 | EVOLUTIONS TOPO-BATHYMÉTRIQUES ET DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE | 23 |
| 7.3.1 | Evolutions passées | 23 |
| 7.3.2 | Evolutions récentes et dynamique sédimentaire | 24 |
| 7.4 | APPORTS SÉDIMENTAIRES PAR LES COURS D'EAUX | 24 |
| 7.5 | APPORTS SÉDIMENTAIRES PAR RECHARGEMENT | 25 |
| 8 | CARACTERISTIQUES SEDIMENTOLOGIQUES | 26 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 9 | MODELISATION MORPHODYNAMIQUE | 27 |
| 9.1 | GÉNÉRALITÉS | 27 |
| 9.2 | HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION | 27 |
| 9.3 | EMPRISE DU MODÈLE | 28 |
| 9.4 | DONNÉES D'ENTRÉE DU MODÈLE | 29 |
| 9.4.1 | Traitements appliqués pour la constitution de la bathymétrie du modèle | 29 |
| 9.4.2 | Bathymétrie du maillage | 29 |
| 9.5 | COURANTOLOGIE | 30 |
| 9.5.1 | Equations résolues | 30 |
| 9.5.2 | Schéma de résolution | 30 |
| 9.5.3 | Paramètres numériques et physiques | 30 |
| 9.5.4 | Forçages aux limites maritimes | 30 |
| 9.6 | AGITATIONS MARINES | 31 |
| 9.6.1 | Equations résolues | 31 |
| 9.6.2 | Schéma de résolution | 31 |
| 9.6.3 | Paramètres numériques et physiques | 31 |
| 9.6.4 | Forçage du modèle de vagues | 32 |
| 9.7 | TRANSPORT SÉDIMENTAIRE ET ÉVOLUTIONS BATHYMÉTRIQUES | 32 |
| 9.7.1 | Equations résolues | 32 |
| 9.7.1.1 | Equation de transport | 32 |
| 9.7.1.2 | Equation d'évolution du fond | 32 |
| 9.7.2 | Paramètres physiques et numériques du modèle | 33 |
| 9.7.2.1 | Formule de transport | 33 |
| 9.7.2.2 | Taille des grains | 33 |
| 9.7.2.3 | Effet de pente | 33 |
| 9.8 | COUPLAGE ENTRE MODULE | 33 |
| 9.9 | PRÉSENTATION DES RÉSULTATS | 35 |
| 9.9.1 | Plan de vagues | 35 |
| 9.9.1.1 | Vagues hivernales annuelles | 35 |
| 9.9.1.2 | Vagues extrêmes de période de retour de 5 ans | 35 |
| 9.9.2 | Courants induits par les vagues | 36 |
| 9.9.2.1 | Vagues hivernales annuelles | 36 |
| 9.9.2.2 | Vagues extrêmes de période de retour de 5 ans | 37 |
| 9.9.3 | Incidence sur les dépôts et érosions | 38 |
| 9.9.3.1 | Vagues hivernales annuelles | 38 |
| 9.9.3.2 | Vagues extrêmes de période de retour de 5 ans | 39 |
| 9.10 | COMPARAISON DES VOLUMES DÉPOSÉS DANS LE PORT | 41 |
| 9.11 | SYNTHÈSE SUR LES RÉSULTATS DE MODÉLISATION | 42 |

1 Introduction

La municipalité de Hyères les palmiers souhaite engager des travaux de requalification des aménagements portuaires du port de la Capte. La digue d'enceinte existante se prolonge vers le large sous la forme d'un Y jusqu'à des profondeurs inférieures à -2 m et n'arrête que partiellement le transit sédimentaire.

D'autre part, il serait envisageable de réaliser un agrandissement de la zone portuaire en modifiant la géométrie de la digue tout en restant dans la zone de concession portuaire.

Un tel aménagement peut avoir des incidences sur le transport sédimentaire et une analyse de ces incidences est nécessaire avant de réaliser les travaux.

Le but du présent document est de :

- Faire un état des lieux des connaissances et des données disponibles (météo-océanographie, topo-bathymétrie, évolution morpho-sédimentaire) sur la zone étudiée, afin d'analyser la dynamique sédimentaire et de pouvoir *in-fine* élaborer des scénarii permettant de maintenir un accès pérenne au port et de protéger les plages adjacentes de l'érosion ;
- Construire un modèle numérique permettant de quantifier l'incidence de l'allongement de l'épi du port de la capte sur le processus de sédimentation dans le chenal de navigation du port et le long du littoral.

2 Présentation du site d'étude

Le site d'étude se situe sur la commune d'Hyères-les-Palmiers, dans le département du Var. Le port de La Capte a été aménagé à l'embouchure du canal des Salines. Les ouvrages de protection sont constitués par un endiguement des deux rives. Sur la rive Nord, l'ouvrage de protection est constitué d'un double épi ; le premier permettant de protéger l'accès du port contre les agressions marines, le second permettant de bloquer le transport sédimentaire provenant du Nord.

Les digues du port de la Capte constitue la frontière entre cellules hydrosédimentaire des Pesquiers au Nord et de la Capte au Sud. Au Sud du port, la plage de la Capte s'étend sur plus d'un kilomètre de long. C'est une plage sableuse dissipative à pente faible avec un système de barres d'avant côte réduit au large duquel s'étend un herbier à *Posidonia oceanica*. Le transit sédimentaire s'opère préférentiellement du Nord vers le Sud (Meulé et al., 2010).



Figure 1 : Présentation de la zone d'étude

3 Inventaire des données disponibles

3.1 Données environnementales

Nous présentons ici les données qui ont été élaborées au cours du projet, ainsi que les données sources qui ont servies à leurs mises au point.

3.1.1 Données topo-bathymétriques et géophysiques

- GECBO : General Bathymetric Chart of the Oceans, modèle numérique de terrain de l'élévation des fonds marins avec une résolution de 30 secondes d'arc ;
- Données EDMODnet Bathymetry : Coastal areas with high resolution bathymetry, 2016. MNT harmonisé réalisé à partir de données bathymétriques issues de différents survey terrains et de données du programme GEBCO. La résolution est de 7.5 secondes d'arc ;
- Données topo-bathymétrique LITTO3D (source IGN et SHOM) constituées d'un modèle numérique de terrain (MNT) à très haute résolution (1 m), nettoyé de l'occupation du sol (bâtiments, végétation, véhicules...). Le levé LIDAR été réalisé au cours des mois d'octobre et novembre 2007 pour la topographie et la bathymétrie. Les dalles ont été récupérées pour l'ensemble de la Rade de Hyères via le serveur DATASHOM ;
- Données du levé géophysique Opsia, 2013. Levé bathymétrie;
- Orthophotographies littorales V2 de l'IGN, 2011 ;
- Trait de côte Histolitt du SHOM ;

3.1.2 Données météo-océanographiques

- IOWAGA : atlas de vagues issues de réanalyses de vagues sur la période 2004 à 2016 réalisées par le LOPS ;
- ANEMOC : atlas de vagues issues de réanalyses de vagues sur la période 1979 à 2008 réalisées par le CEREMA/EDF R&D.
- CANDHIS : service d'observations des données de vagues sur les côtes françaises, produit par le CEREMA.

3.2 Données bibliographiques

Dans le cadre de l'étude, un certain nombre de manuscrits et rapports d'études (classé par ordre chronologique) ont été analysés et cités afin de quantifier les conditions naturelles qui caractérisent le site d'étude :

- Bordet P. *et al.* (1975) - Cartes géologiques à 1/50 000 - Feuille Hyères - Ile de Porquerolles. Carte et notice, BRGM éditions.
- Rapport SOGREAH (1988) – Etude sédimentologique de la rade d'Hyères. Littoral de Port Pothuau au ruisseau du Pansard. 79p. Rapport qui présente le littoral et les aménagements en 1988, source potentielle de données historiques en vue de l'évolution du littoral.

- Rapport SOGREAH (1988) – Etude sédimentologique de la rade d’Hyères. Du littoral de Port Pothuau à la Badine. 187p. Rapport qui présente le littoral et les aménagements en 1988, source potentielle de données historiques en vue de l’évolution du littoral.
- Rapport OCEANIDE (2010) – Climat de houle au large de Hyères (Var). 94p.
- Rapport OCEANIDE (2010) - Etude pour la protection de la plage du Ceinturon et du secteur Sud du port Saint-Pierre, Hyères-Les-Palmiers. Phase 1 : Synthèse des connaissances. 143p.
- Rapport OCEANIDE (2011) - Etude pour la protection de la plage du Ceinturon et du secteur Sud du port Saint-Pierre, Hyères-Les-Palmiers. Phase 2 : Etude du fonctionnement hydrosédimentaire. 230p.
- Capanni R. (2011). Etude et gestion intégrée des transferts sédimentaires dans le système Gapeau/Rade d’Hyères. Thèse d’Université, Aix-Marseille I, 280 p. + Annexes. Ce document contient une description de la plage de la Capte.
- ANDROMEDE OCEANOLOGIE (2012). Inventaires biologiques et analyse écologique des habitats marins patrimoniaux du site Natura 2000 « Rade d’Hyères » FR 9301613. Contrat ANDROMEDE OCEANOLOGIE / AGENCE DES AIRES MARINES PROTEGEES. Cartes de nature de fond et des habitats (herbiers) sur le secteur d’étude. Ce rapport contient également des Informations sur le milieu physique et les usages en mer.
- Le Roy S., Stepanian A., Pedreros R., Bulteau T., Nicolae-Lerma A. et Balouin Y. (2014) – Modélisation de la submersion marine sur la Plaine du Ceinturon (Hyères-les-Palmiers). Rapport final. BRGM/RP-63945-FR, 98 p., 80 ill., 6 ann., 8 cartes hors-texte. Ce rapport dresse une cartographie du risque de submersion marine. Il contient des informations statistiques sur les vents, les vagues, les courants sur le secteur d’étude. Un historique des tempêtes est présenté, ainsi que les principales crues du Gapeau.
- Stepanian A. (2014) – Evaluation des Risques Naturels Littoraux. Scot Provence-Méditerranée – Evolution historique du trait de côte. Rapport final. BRGM/RP-63952-FR, 145 p., 23 ill., 2 ann., 1 CD. Ce rapport présente les évolutions du trait de côte et une projection à l’horizon 2050.

4 Agitations marines

4.1 Agitations au large

4.1.1 Données de houle

Les données de houles sont issues du modèle Méditerranée Nord (MEDNORD) du projet IOWAGA¹ qui fournit des états de mers reconstitués numériquement avec une résolution spatiale de 1/20° en longitude et 1/30° en latitude. Trois points d'extractions sont définis :

- Point P1 [6.1°E / 43°N] : localisé à 5000 mètres à l'ouest de l'île de Porquerolles. Ce point est caractéristique des houles provenant de l'ouest.
- Point P4 [6.2°E / 42.967°N] : localisé à 1700 mètres au sud de l'île de Porquerolles, très proche de la position de la bouée CANDHIS 08301 & 08302 – Porquerolles. Ce point est caractéristique des houles provenant du sud-ouest, sud et sud-est.
- Point P16 [6.6°E / 43.1°N] : localisé à 6600 mètres au sud du cap Lardier. Ce point est caractéristique des houles provenant de l'est.

La période retenue couvre 12 années, de 2004 à 2016 (sauf 2012), avec un pas temporel de 3 heures. Le forçage du vent émane du CFRS² jusqu'en 2012 puis de ECMWF³.

NB : Ces données de houle contiennent une période de données manquantes : février à décembre 2011, soit 8% de la période.



Figure 2 : Données de houle au large - Localisation des points IOWAGA et de la bouée CANDHIS

¹ Integrated Ocean Waves for Geophysical and other Application - www.ifremer.fr/iowaga/ - Projet porté par l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER)

² <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>

³ www.ecmwf.int

4.1.2 Analyse qualitative de la série temporelle – 2004 à 2016

L'observation des séries temporelles des hauteurs significatives (H_s), périodes de pic (T_p) et directions des données de houle IOWAGA extraites aux points P1 et P4 (voir Figure 2) montrent saisonnalité, plus marquée au point 16 qu'aux points 4 et 1 :

- L'hiver

Le P90⁴ et le P50 journaliers des H_s (soit la hauteur significative journalière telle que 90% [50%] des hauteurs significatives par jour lui soit inférieure) sont les plus élevés entre novembre et mars. Les houles les plus longues (maximum 13s) s'observent sur cette période hivernale mais plus de 50% des houles ont une période de pic inférieure à 7s aux points 1 et 4. Au point 16, les houles longues sont plus fréquentes en novembre et décembre.

- L'été

Les mois de mai et octobre montrent les changements de régimes. En période estivale, de juin à septembre, aux points 1 et 4, les P90 des hauteurs significatives ne dépassent pas les 3 mètres, et 50% sont inférieures à 1 mètre. Les 90% des périodes de pic sont inférieures à 8 secondes aux points 1 et 4, à 10 secondes au point 16. Les houles proviennent essentiellement de sud-sud-ouest.

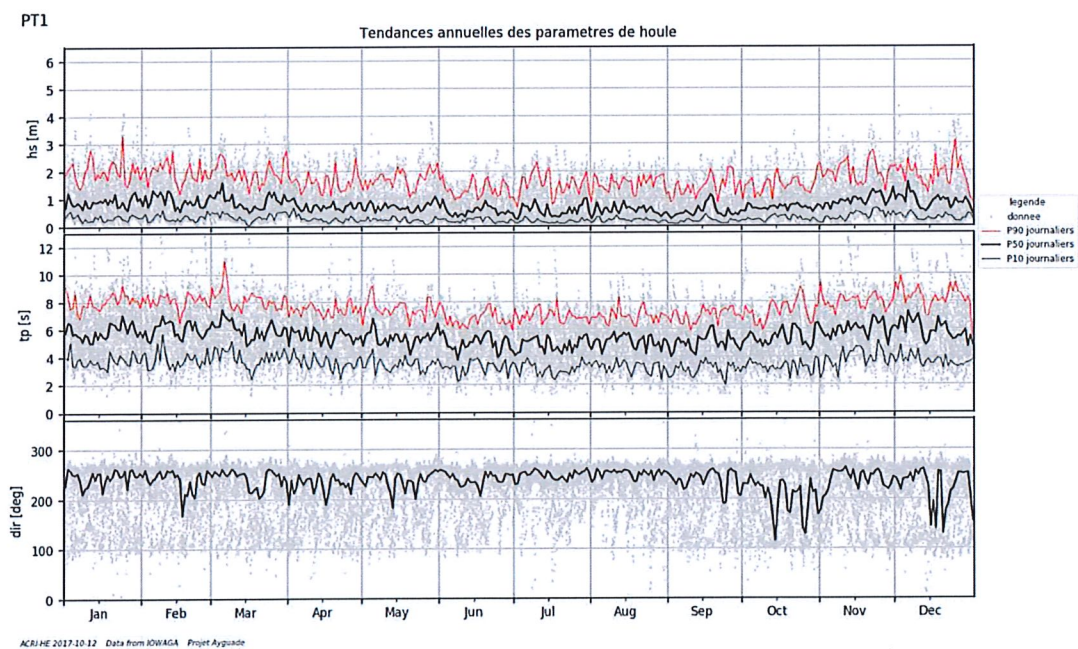


Figure 3 : Tendances annuelles des paramètres de houle - Point 1

⁴ Percentile 90

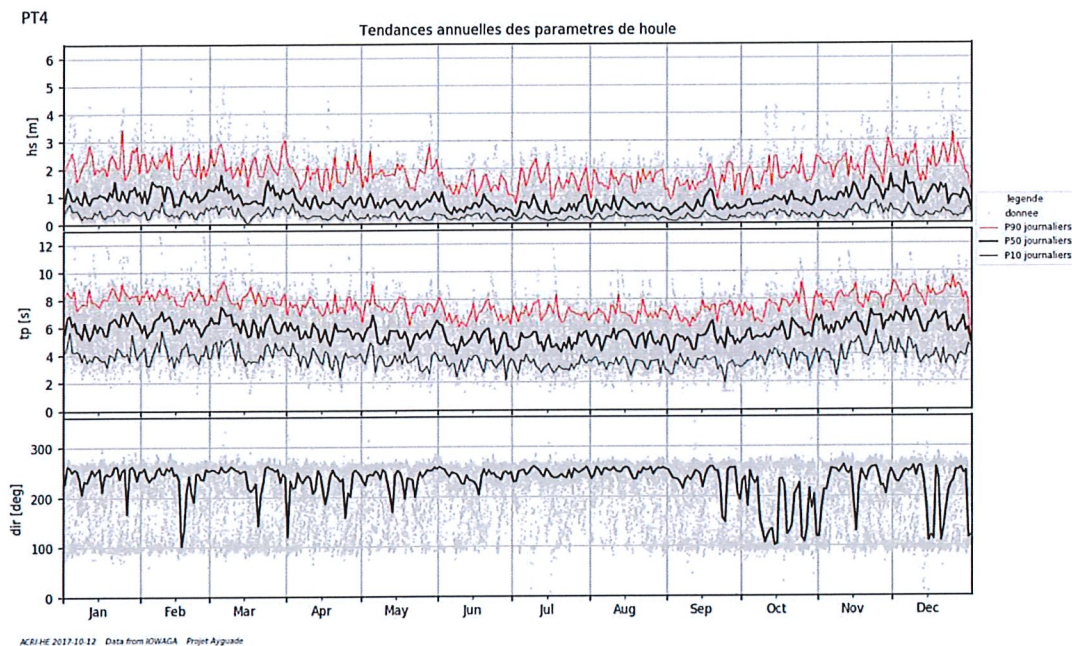


Figure 4 : Tendances annuelles des paramètres de houle - Point 4

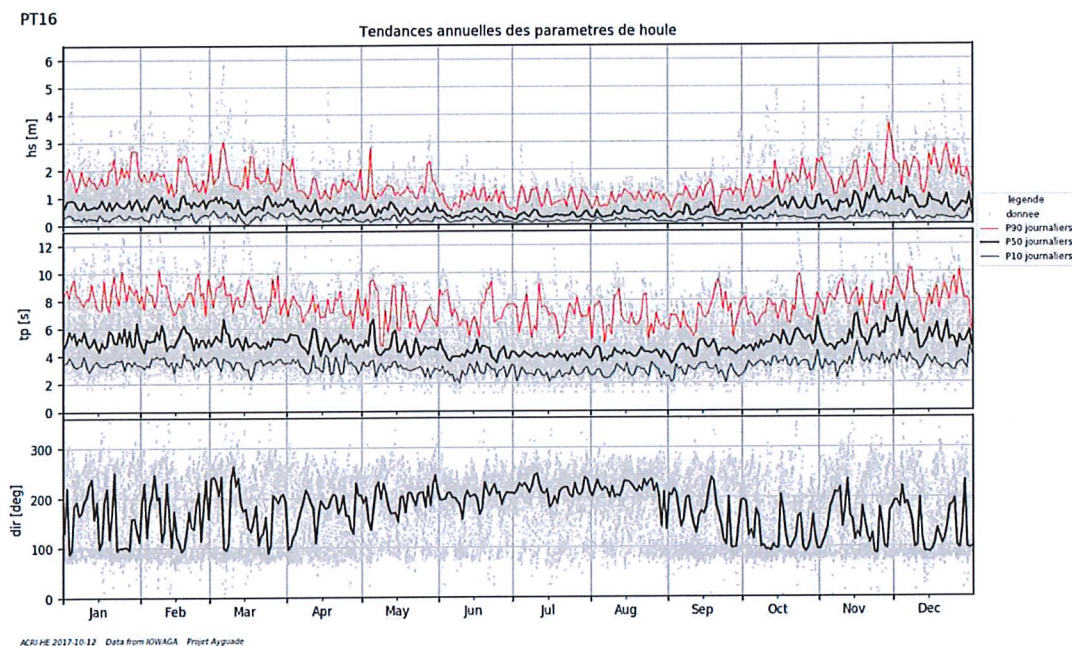


Figure 5 : Tendances annuelles des paramètres de houle - Point 16

4.1.3 Analyse statistique de la série temporelle – 2004 à 2016

Les figures en annexe illustrent l'analyse statistique des séries temporelles d'agitation aux trois points retenus. Sur chacune de ces figures :

- Les deux roses montrent la répartition des Hs d'une part, et des Tp d'autre part, dans chaque plage de directions :

Aux points 1 et 4, un tiers des houles proviennent de sud-ouest à ouest (48%). Principalement inférieures à 2.0m (Hs) et 10s (Tp). Les houles de hauteur significative supérieure à 2m proviennent essentiellement d'ouest-sud-ouest.

Au point 16, les houles proviennent de deux directions privilégiées : sud-sud-ouest et est. Ce sont les houles d'est qui sont peuvent induire le plus d'impact pour notre étude. Elles sont principalement inférieures à 2m (Hs) et 10s (Tp). La part des houles de Hs supérieur à 2m n'est pas négligeable. Ces vagues proviennent presque exclusivement du secteur Est.

- Les histogrammes présentent les occurrences par classe des Hs d'un part, et Tp d'autre part, toutes directions confondues.

Aux trois points, les vagues de Hs inférieures à 2m représentent près de 90% de l'agitation.

L'histogramme des périodes de pic rend compte de la présence d'une tendance prédominante dans les états de mer (un pic). Aux points 1 et 4, les houles de périodes de pics comprises entre 2 et 8 secondes sont les plus fréquentes. Tandis qu'au point 16, la moitié des houles ont une période de pic entre 2 et 5 secondes et l'autre moitié entre 5 et 10 secondes.

- Les diagrammes de corrélations entre paramètres intégraux des vagues montrent les occurrences de couples. Un code couleur est choisi pour quantifier les probabilités d'occurrence (bleu foncé : peu d'occurrences, rouge : beaucoup d'occurrences). Ces diagrammes sont redondants avec les roses mais permettent de pouvoir distinguer les familles de vagues dans un repère cartésien.

Les tables ci-dessous apportent une quantification des corrélations entre Hs et Tp, toutes directions confondues (*rappel : les % indiqués comprennent 10% de données manquantes, d'où le total à 90%*) :

- Les hauteurs significatives sont à 89% inférieures à 2.5m (points 1 et 16) et 3.0m (point 4).
- Aux trois points, les houles longues (11s) sont très peu fréquentes : 0.2% au point 1, 0.1% au point 4 et 0.4% au point 16.

| Hs [m] | POINT 1 - entrée OUEST du maillage | | | | | | | | | | | | | | TOTAL | |
|--------------|------------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| | 0 - 1 | 1 - 2 | 2 - 3 | 3 - 4 | 4 - 5 | 5 - 6 | 6 - 7 | 7 - 8 | 8 - 9 | 9 - 10 | 10 - 11 | 11 - 12 | 12 - 13 | 13 - 14 | | 14 - 15 |
| 0,0 - 0,5 | 0,856% | 3,901% | 8,499% | 9,558% | 4,498% | 1,618% | 0,753% | 0,571% | 0,437% | 0,114% | 0,011% | | | | | 31% |
| 0,5 - 1,0 | | 0,457% | 3,271% | 5,594% | 9,635% | 6,567% | 1,344% | 0,417% | 0,251% | 0,171% | 0,083% | 0,051% | 0,017% | | | 28% |
| 1,0 - 1,5 | | | 1,056% | 1,279% | 4,247% | 5,468% | 2,979% | 0,839% | 0,134% | 0,046% | 0,037% | 0,009% | | | | 16% |
| 1,5 - 2,0 | | | | 0,425% | 0,808% | 3,479% | 2,842% | 1,156% | 0,166% | 0,023% | 0,009% | 0,003% | 0,003% | | | 9% |
| 2,0 - 2,5 | | | | 0,103% | 0,023% | 1,036% | 1,824% | 0,808% | 0,186% | 0,020% | 0,006% | | | | | 4% |
| 2,5 - 3,0 | | | | 0,003% | 0,031% | 0,031% | 0,497% | 0,557% | 0,148% | 0,037% | 0,006% | 0,011% | | | | 1% |
| 3,0 - 3,5 | | | | | | | 0,029% | 0,194% | 0,114% | 0,020% | 0,003% | | | | | 0% |
| 3,5 - 4,0 | | | | | | | | 0,029% | 0,071% | 0,020% | 0,003% | | | | | 0% |
| 4,0 - 4,5 | | | | | | | | 0,003% | 0,006% | 0,014% | 0,003% | | | | | 0% |
| 4,5 - 5,0 | | | | | | | | | | | | | | | | 0% |
| 5,0 - 5,5 | | | | | | | | | | | | | | | | 0% |
| 5,5 - 6,0 | | | | | | | | | | | | | | | | 0% |
| 6,0 - 6,5 | | | | | | | | | | | | | | | | 0% |
| TOTAL | 0% | 1% | 4% | 13% | 17% | 19% | 18% | 10% | 5% | 2% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 90% |

Figure 6 : Table d'occurrences conjointes Hs/Tp au point P1

| | | POINT 4 - proche bouée CANDHIS | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|-----|
| | | Tp [s] | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hs [m] | | 0 - 1 | 1 - 2 | 2 - 3 | 3 - 4 | 4 - 5 | 5 - 6 | 6 - 7 | 7 - 8 | 8 - 9 | 9 - 10 | 10 - 11 | 11 - 12 | 12 - 13 | 13 - 14 | 14 - 15 | |
| 0,0 - 0,5 | | | 0,485% | 3,445% | 7,937% | 8,613% | 3,248% | 1,187% | 0,591% | 0,434% | 0,303% | 0,040% | | | | | 26% |
| 0,5 - 1,0 | | | | 0,117% | 3,054% | 6,179% | 10,274% | 5,751% | 0,893% | 0,146% | 0,123% | 0,094% | 0,066% | 0,034% | 0,006% | | 27% |
| 1,0 - 1,5 | | | | | 0,026% | 1,678% | 4,932% | 6,127% | 3,493% | 0,893% | 0,097% | 0,020% | 0,017% | 0,003% | | | 17% |
| 1,5 - 2,0 | | | | | | 0,026% | 1,364% | 3,993% | 3,348% | 1,478% | 0,271% | 0,020% | 0,003% | 0,006% | | | 11% |
| 2,0 - 2,5 | | | | | | | 0,066% | 1,453% | 2,500% | 1,122% | 0,303% | 0,029% | | | | | 5% |
| 2,5 - 3,0 | | | | | | | | 0,106% | 0,902% | 0,902% | 0,188% | 0,023% | | | | | 2% |
| 3,0 - 3,5 | | | | | | | | 0,003% | 0,088% | 0,337% | 0,188% | 0,017% | | | | | 1% |
| 3,5 - 4,0 | | | | | | | | | 0,014% | 0,114% | 0,157% | 0,020% | 0,003% | | | | 0% |
| 4,0 - 4,5 | | | | | | | | | | 0,034% | 0,051% | 0,023% | 0,003% | | | | 0% |
| 4,5 - 5,0 | | | | | | | | | | | 0,017% | 0,029% | | | | | 0% |
| 5,0 - 5,5 | | | | | | | | | | | | 0,011% | | | | | 0% |
| 5,5 - 6,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | 0% |
| 6,0 - 6,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | 0% |
| TOTAL | | 0% | 0% | 4% | 11% | 16% | 20% | 19% | 12% | 5% | 2% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 90% |

Figure 7 : Table d'occurrences conjointes Hs/Tp au point P4

| | | POINT 16 - entrée EST du maillage | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|--|-----------------------------------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|-----|
| | | Tp [s] | | | | | | | | | | | | | | | |
| Hs [m] | | 0 - 1 | 1 - 2 | 2 - 3 | 3 - 4 | 4 - 5 | 5 - 6 | 6 - 7 | 7 - 8 | 8 - 9 | 9 - 10 | 10 - 11 | 11 - 12 | 12 - 13 | 13 - 14 | 14 - 15 | |
| 0,0 - 0,5 | | | 1,093% | 6,555% | 11,906% | 9,212% | 3,887% | 2,540% | 2,018% | 1,721% | 1,230% | 0,308% | 0,029% | 0,009% | | | 41% |
| 0,5 - 1,0 | | | | 0,285% | 7,774% | 5,967% | 6,735% | 2,603% | 1,070% | 0,733% | 0,711% | 0,337% | 0,151% | 0,114% | 0,009% | | 26% |
| 1,0 - 1,5 | | | | | 0,437% | 5,519% | 2,677% | 2,568% | 1,104% | 0,585% | 0,203% | 0,140% | 0,026% | 0,023% | | | 13% |
| 1,5 - 2,0 | | | | | | 0,808% | 1,179% | 1,530% | 0,928% | 0,405% | 0,117% | 0,063% | 0,017% | 0,011% | | | 5% |
| 2,0 - 2,5 | | | | | | | 0,123% | 0,908% | 0,625% | 0,240% | 0,108% | 0,060% | 0,014% | 0,006% | | | 2% |
| 2,5 - 3,0 | | | | | | | 0,011% | 0,108% | 0,676% | 0,245% | 0,086% | 0,026% | 0,003% | | | | 1% |
| 3,0 - 3,5 | | | | | | | | | 0,208% | 0,220% | 0,037% | 0,020% | | | | | 0% |
| 3,5 - 4,0 | | | | | | | | | 0,014% | 0,177% | 0,017% | 0,003% | | | | | 0% |
| 4,0 - 4,5 | | | | | | | | | | 0,071% | 0,063% | 0,003% | 0,003% | | | | 0% |
| 4,5 - 5,0 | | | | | | | | | | 0,006% | 0,043% | 0,003% | | | | | 0% |
| 5,0 - 5,5 | | | | | | | | | | | 0,029% | 0,009% | | | | | 0% |
| 5,5 - 6,0 | | | | | | | | | | | 0,003% | 0,009% | | | | | 0% |
| 6,0 - 6,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | 0% |
| TOTAL | | 0% | 1% | 7% | 20% | 22% | 15% | 10% | 7% | 4% | 3% | 1% | 0% | 0% | 0% | 0% | 90% |

Figure 8 : Table d'occurrences conjointes Hs/Tp au point P16

Ces tableaux permettent de quantifier la probabilité d'occurrence de certaines conditions de mer :

- On constate que les hauteurs significatives les plus élevées sont de l'ordre de :
 - Point 1 : 4 à 4.5m pour des périodes de pics comprises entre 8 et 12s,
 - Point 4 : 5 à 5.5m pour des périodes de pics entre 10 et 11s,
 - Point 16 : 5.5 à 6m pour des périodes de pics entre 9 et 11s.
- La médiane des hauteurs significatives des vagues, c'est-à-dire la hauteur significative qui se produit 50% du temps est comprise entre 0.5 et 1m aux trois points.
- La médiane des périodes de pics est entre 5 et 6s aux points 1 et 4, entre 4 et 5s au point 16.

4.1.4 Statistiques des houles extrêmes

L'analyse des valeurs extrêmes des hauteurs significatives est réalisée en deux temps. Dans un premier temps les événements extrêmes sont estimés toutes directions confondues. Cette approche est discutable car les paramètres statistiques des distributions sont estimés sur des populations hétérogènes.

Dans un second temps, les analyses sont conduites suivant des classes de vents homogènes en direction.

L'analyse est réalisée sur la période 2004 à 2016 (sauf 2011 et 2012) en extrayant les 10 événements extrêmes par année. A partir de ces échantillons, le calcul de valeurs extrêmes est effectué en ajustant une loi de distribution GEV par méthode de maximum de vraisemblance (Coles, 2001) :

| | 5 ans | | 10 ans | | 20 ans | | 50 ans | | 100 ans | |
|----------|-------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|
| | Hs | Tp | Hs | Tp | Hs | Tp | Hs | Tp | Hs | Tp |
| point 1 | 4,1m | 10,1s | 4,3m | 10,4s | 4,4m | 10,5s | 4,5m | 10,7s | 4,6m | 10,8s |
| point 4 | 4,9m | 10,5s | 5,2m | 10,9s | 5,4m | 11,1s | 5,7m | 11,5s | 5,8m | 11,6s |
| point 16 | 5,2m | 10,2s | 5,6m | 10,8s | 6,0m | 11,3s | 6,4m | 11,8s | 6,7m | 12,2s |

Tableau 1 : Hauteurs significatives extrêmes toutes directions confondues

Les annexes présentent les tables d'occurrences et relations Hs/Tp déduites, pour chacun des points 1, 4 et 16, toutes directions confondues.

Les valeurs des hauteurs significatives pour les différentes périodes de retour ici estimées sont comparables par celles mentionnées dans le rapport CANDHIS d'analyses de mesures de la bouée au sud de Porquerolles. Les différences sont de l'ordre de la quinzaine de centimètres, ce qui reste dans l'intervalle de confiance des méthodes statistiques employées.

Afin de distinguer les différentes populations de houle au large, en fonction de leurs directions de provenance, la méthode d'analyse des événements extrêmes est reprise en classant les houles par directions privilégiées. Le principe retenu est :

- Classer les houles par directions privilégiées ;
- Extraire les 10 événements extrêmes par année, estimés à partir des hauteurs significatives ;
- Estimer les périodes associées aux périodes de retour 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 ans ;
- Déduire des tables d'occurrences conjointes (réalisées également sur les extraits par directions privilégiées) les relations Hs/Tp (selon une loi puissance) qui permettent de recalculer les couples.

Le Tableau 2 présente les résultats obtenus.

| | 5 ans | | 10 ans | | 20 ans | | 50 ans | | 100 ans | | direction privilégiée |
|----------|-------|------|--------|------|--------|-------|--------|-------|---------|-------|-----------------------|
| | Hs | Tp | Hs | Tp | Hs | Tp | Hs | Tp | Hs | Tp | |
| point 1 | 3,8m | 7,8s | 3,9m | 7,9s | 4,1m | 8,0s | 4,2m | 8,1s | 4,3m | 8,1s | 250 - 280 |
| point 4 | 4,4m | 9,6s | 4,7m | 9,8s | 5,1m | 10,0s | 5,5m | 10,2s | 5,8m | 10,4s | 110 - 250 |
| point 16 | 5,2m | 9,3s | 5,7m | 9,6s | 6,1m | 9,8s | 6,5m | 10,0s | 6,8m | 10,2s | 70 - 110 |

Tableau 2 : Houles extrêmes aux points 1, 4 et 16 (couples Hs/Tp par directions privilégiées)

De cette analyse, il est possible de tirer les informations suivantes :

- Les hauteurs significatives des houles extrêmes sont associées généralement à des périodes de l'ordre de 9 à 10 secondes aux points 4 (houles provenant du sud) et 16 (houle provenant de l'est);
- Les hauteurs significatives des houles extrêmes au point 1 (houles provenant de l'ouest) sont légèrement plus faibles et associées à des périodes de l'ordre de 8 secondes ;
- Les vagues provenant de l'est (point 16) ont des hauteurs significatives les plus élevées, avec une cinquantennale à 6.5m ;
- La distinction par populations homogènes de vagues fournit des hauteurs significatives extrêmes comparable au cas toutes directions confondues car l'agitation est peu hétérogène. Néanmoins, l'estimation des périodes de retour associées est plus précise avec cette distinction

par directions privilégiées car la relation H_s/T_p est réalisée avec une loi puissance qui selon la théorie est la plus appropriée.

- La houle centennale est ici présentée mais la période d'observations considérée ne permet pas d'avoir une estimation de la valeur extrême avec une précision suffisante ; la valeur proposée ne devrait pas être considérée.

4.2 Modèle de propagation

4.2.1 Hypothèse de modélisation

Afin de simuler numériquement le transport des vagues à la côte, la chaîne de calcul TELEMAC (version 6.2) a été choisie. Cette chaîne de calcul contient :

- TOMAWAC, un module résolvant l'équation de conservation de la densité d'action des vagues et tenant compte des processus physiques induits par les variations de fonds, les interactions entre vagues, la présence de courant et les variations des niveaux marins.

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

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

TOMAWAC permet de modéliser les phénomènes physiques suivants :

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

4.2.2 Emprise du modèle de propagation

Un modèle de propagation de vagues a été mis en place afin de propager les agitations du large vers le littoral de la zone d'étude.

L'emprise du modèle de propagation (Figure 9) consiste en un domaine de calcul de 40km en longitudes et 6km en longitude.

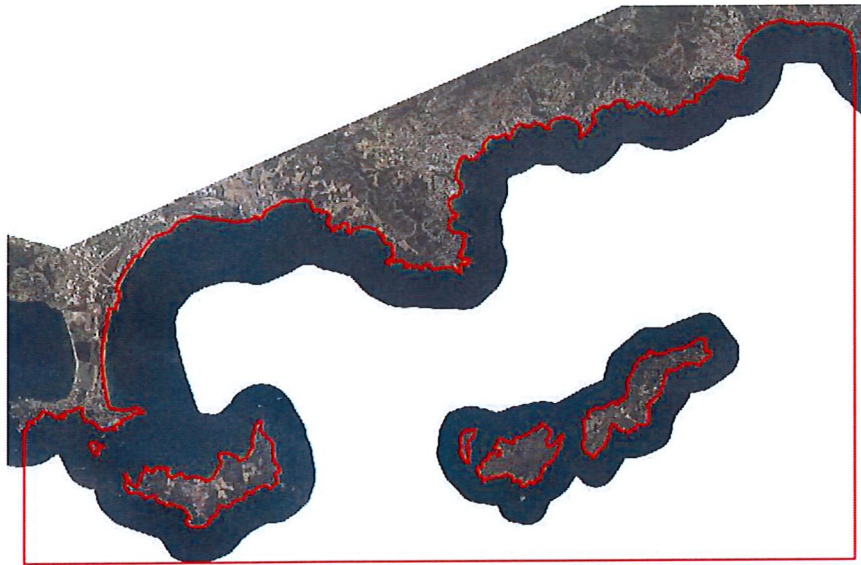


Figure 9 : Frontières du modèle d'approche

4.2.3 Maillage

Le domaine de calcul est discrétisé spatialement à l'aide d'un maillage non structuré constitué de 33177 mailles triangulaires et 17082 nœuds. Le maillage est généré grâce à l'outil BlueKenue, puis sa régularité est vérifiée à l'aide de l'outil Stbtel. Les dimensions géométriques des mailles sont les suivantes :

- La frontière maritime du modèle de propagation : la résolution spatiale est de 700m ;
- La contrainte de points fixes correspondants à la frontière de la zone locale échantillonnée d'une résolution de 50m.

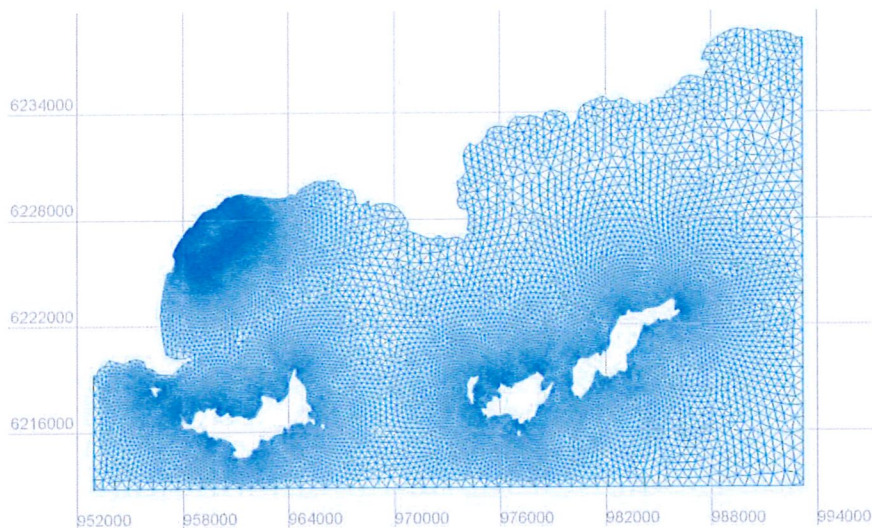
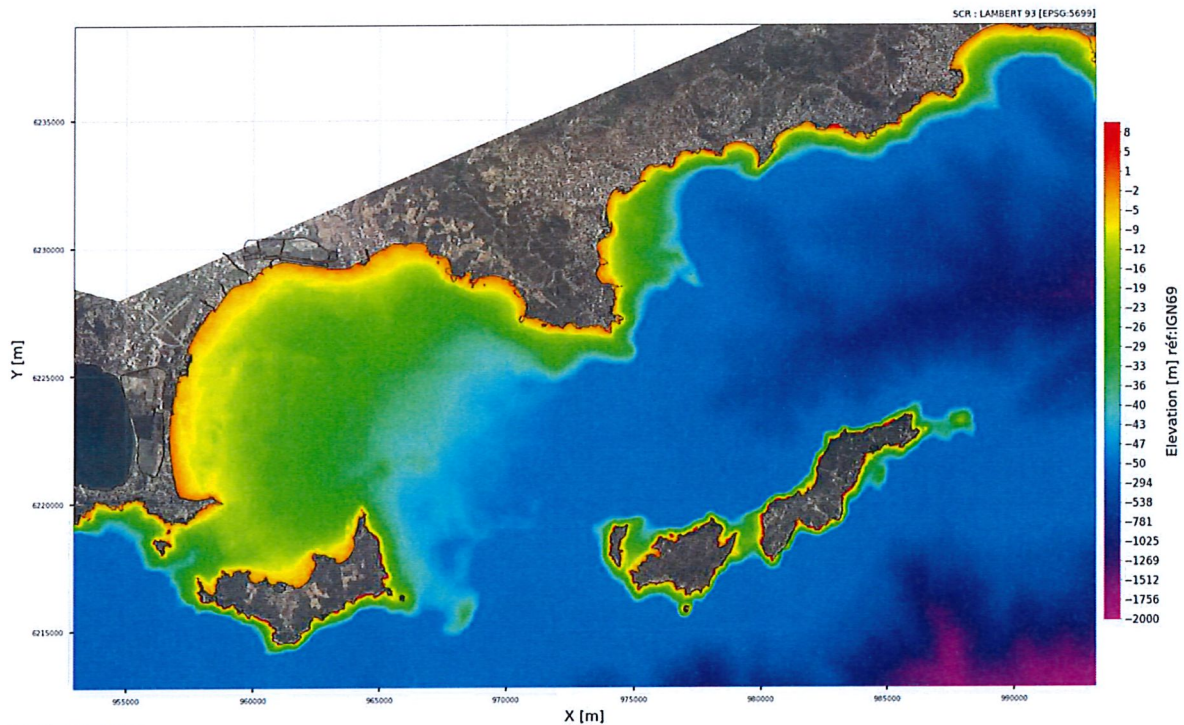


Figure 10 : Maillage du modèle d'approche

4.2.4 Bathymétrie

La bathymétrie associée au maillage (voir Figure 11) est la bathymétrie Emodnet⁵ complétée par les semis de points des levés Litto3D pour la bande littorale (profondeurs inférieures à 10m). La résolution spatiale est donc très élevée à la côte et moindre au large mais suffisante pour cette étude.



ACRI IN 2017 - Projet Fort de l'Arguinde

Figure 11 : Aperçu de la bathymétrie Emodnet [portal.emodnet-bathymetry.eu] & Litto3D 2007

4.2.5 Données d'entrée

4.2.5.1 Gammes d'agitation fréquentes

L'analyse des séries temporelles de houle des points 1, 4 et 16 de IOWAGA permet d'identifier des cas de houles caractéristiques de la zone. Ainsi, 95 cas sont retenus (Figure 12)

4.2.5.2 Agitations extrêmes

L'analyse statistique de houles extrême a permis de définir les cas de houle extrêmes (voir cf. 4.1.4).

⁵ Emodnet bathymetry : <http://portal.emodnet-bathymetry.eu/mean-depth-full-coverage>

| | direction [°] | Hs [m] | Tp [s] | occurrence par classe de Tp | | | | | |
|----|---------------|-----------|--------|--------------------------------|---------|--|--|--|--|
| 1 | PT16 | 70 - 80 | | | 3,422% | | | | |
| 2 | | 75 | 1,0 | 4 | 0,457% | | | | |
| 3 | | 75 | 1,0 | 5 | 0,596% | | | | |
| 4 | | 75 | 1,5 | 6 | 0,785% | | | | |
| 5 | | 75 | 2,5 | 7 | 0,711% | | | | |
| 6 | | 75 | 3,0 | 8 | 0,499% | | | | |
| 7 | | 75 | 4,0 | 9 | 0,294% | | | | |
| 8 | | 75 | 5,0 | 10 | 0,080% | | | | |
| 8 | PT16 | 80 - 90 | | | 10,100% | | | | |
| 9 | | 85 | 1,0 | 4 | 0,962% | | | | |
| 10 | | 85 | 1,0 | 5 | 1,824% | | | | |
| 11 | | 85 | 1,5 | 6 | 2,457% | | | | |
| 12 | | 85 | 2,0 | 7 | 2,352% | | | | |
| 13 | | 85 | 3,0 | 8 | 1,675% | | | | |
| 14 | | 85 | 4,0 | 9 | 0,636% | | | | |
| 15 | | 85 | 4,5 | 10 | 0,168% | | | | |
| 16 | | 85 | 6,0 | 11 | 0,026% | | | | |
| 16 | PT16 | 90 - 100 | | | 6,869% | | | | |
| 17 | | 95 | 1,0 | 4 | 1,398% | | | | |
| 18 | | 95 | 1,0 | 5 | 2,192% | | | | |
| 19 | | 95 | 1,5 | 6 | 1,921% | | | | |
| 20 | | 95 | 2,0 | 7 | 0,993% | | | | |
| 21 | | 95 | 3,0 | 8 | 0,271% | | | | |
| 22 | | 95 | 4,0 | 9 | 0,071% | | | | |
| 23 | | 95 | 4,5 | 10 | 0,023% | | | | |
| 23 | PT16 | 100 - 110 | | | 3,191% | | | | |
| 24 | | 105 | 1,0 | 4 | 0,950% | | | | |
| 25 | | 105 | 1,0 | 5 | 1,139% | | | | |
| 26 | | 105 | 1,5 | 6 | 0,716% | | | | |
| 27 | | 105 | 2,0 | 7 | 0,225% | | | | |
| 28 | | 105 | 3,0 | 8 | 0,117% | | | | |
| 29 | | 105 | 2,5 | 9 | 0,043% | | | | |
| 30 | | 105 | 1,0 | 10 | 0,017% | | | | |
| 29 | PT4 | 110 - 120 | | | 2,643% | | | | |
| 30 | | 115 | 1,0 | 4 | 0,528% | | | | |
| 31 | | 115 | 1,0 | 5 | 0,830% | | | | |
| 32 | | 115 | 1,5 | 6 | 0,662% | | | | |
| 33 | | 115 | 2,0 | 7 | 0,365% | | | | |
| 34 | | 115 | 3,0 | 8 | 0,157% | | | | |
| 35 | | 115 | 4,0 | 9 | 0,074% | | | | |
| 36 | | 115 | 2,5 | 10 | 0,026% | | | | |
| 36 | PT4 | 200 - 210 | | | 3,065% | | | | |
| 37 | | 205 | 1,0 | 5 | 0,762% | | | | |
| 38 | | 205 | 1,0 | 6 | 0,833% | | | | |
| 39 | | 205 | 1,5 | 7 | 0,616% | | | | |
| 40 | | 205 | 2,0 | 8 | 0,479% | | | | |
| 41 | | 205 | 2,5 | 9 | 0,194% | | | | |
| 42 | | 205 | 3,5 | 10 | 0,137% | | | | |
| 43 | | 205 | 4,0 | 11 | 0,043% | | | | |
| 43 | PT4 | 210 - 220 | | | 3,253% | | | | |
| 44 | | 215 | 1,0 | 5 | 0,916% | | | | |
| 45 | | 215 | 1,5 | 6 | 0,862% | | | | |
| 46 | | 215 | 1,5 | 7 | 0,648% | | | | |
| 47 | | 215 | 2,0 | 8 | 0,439% | | | | |
| 48 | | 215 | 2,5 | 9 | 0,231% | | | | |
| 49 | | 215 | 3,5 | 10 | 0,131% | | | | |
| 50 | | 215 | 5,0 | 11 | 0,026% | | | | |
| 50 | PT4 | 220 - 230 | | | 3,293% | | | | |
| 51 | | 225 | 1,0 | 5 | 1,259% | | | | |
| 52 | | 225 | 1,0 | 6 | 0,970% | | | | |
| 53 | | 225 | 1,5 | 7 | 0,517% | | | | |
| 54 | | 225 | 2,0 | 8 | 0,274% | | | | |
| 55 | | 225 | 3,0 | 9 | 0,123% | | | | |
| 56 | | 225 | 3,5 | 10 | 0,108% | | | | |
| 57 | | 225 | 4,0 | 11 | 0,043% | | | | |
| 57 | PT4 | 230 - 240 | | | 3,459% | | | | |
| 58 | | 235 | 1,0 | 5 | 1,678% | | | | |
| 59 | | 235 | 1,5 | 6 | 0,930% | | | | |
| 60 | | 235 | 2,0 | 7 | 0,459% | | | | |
| 61 | | 235 | 2,0 | 8 | 0,191% | | | | |
| 62 | | 235 | 2,5 | 9 | 0,106% | | | | |
| 63 | | 235 | 3,0 | 10 | 0,046% | | | | |
| 64 | | 235 | 4,5 | 11 | 0,031% | | | | |
| 65 | | 235 | 2,0 | 12 | 0,009% | | | | |
| 66 | | 235 | 2,0 | 13 | 0,009% | | | | |
| 66 | PT4 | 240 - 250 | | | 6,310% | | | | |
| 67 | | 245 | 1,0 | 5 | 1,570% | | | | |
| 68 | | 245 | 1,5 | 6 | 2,172% | | | | |
| 69 | | 245 | 1,5 | 7 | 1,390% | | | | |
| 70 | | 245 | 2,0 | 8 | 0,739% | | | | |
| 71 | | 245 | 2,5 | 9 | 0,291% | | | | |
| 72 | | 245 | 3,0 | 10 | 0,103% | | | | |
| 73 | | 245 | 3,5 | 11 | 0,029% | | | | |
| 74 | | 245 | 5,0 | 12 | 0,009% | | | | |
| 75 | | 245 | 5,0 | 13 | 0,009% | | | | |
| 75 | PT1 | 250 - 260 | | | 13,841% | | | | |
| 76 | | 255 | 1,0 | 4 | 1,244% | | | | |
| 77 | | 255 | 1,0 | 5 | 2,834% | | | | |
| 78 | | 255 | 1,0 | 6 | 4,529% | | | | |
| 79 | | 255 | 1,5 | 7 | 3,413% | | | | |
| 80 | | 255 | 1,5 | 8 | 1,356% | | | | |
| 81 | | 255 | 2,0 | 9 | 0,417% | | | | |
| 82 | | 255 | 5,0 | 10 | 0,049% | | | | |
| 82 | PT1 | 260 - 270 | | | 16,687% | | | | |
| 83 | | 265 | 1,0 | 5 | 0,987% | | | | |
| 84 | | 265 | 1,5 | 6 | 3,530% | | | | |
| 85 | | 265 | 2,0 | 7 | 6,247% | | | | |
| 86 | | 265 | 2,5 | 8 | 4,078% | | | | |
| 87 | | 265 | 3,0 | 9 | | | | | |
| 88 | | 265 | 3,5 | 9 | 1,644% | | | | |
| 89 | | 265 | 4,0 | 10 | 0,200% | | | | |
| 89 | PT1 | 270 - 280 | | | 3,085% | | | | |
| 90 | | 275 | 1,0 | 5 | 0,126% | | | | |
| 91 | | 275 | 1,5 | 6 | 0,402% | | | | |
| 92 | | 275 | 2,0 | 7 | 1,107% | | | | |
| 93 | | 275 | 2,5 | 8 | 1,019% | | | | |
| 94 | | 275 | 3,0 | 9 | 0,377% | | | | |
| 95 | | 275 | 3,5 | 10 | 0,054% | | | | |

Figure 12 : Cas de houle caractéristiques de la zone

4.2.6 Résultats

Les 95 cas d'agitation imposés aux frontières maritimes du modèle permettent de constituer une table de conditions par classes et occurrences associées en chaque point du maillage (voir exemple Figure 13) et plus particulièrement en chacun des points de la frontière maritime du future modèle local.

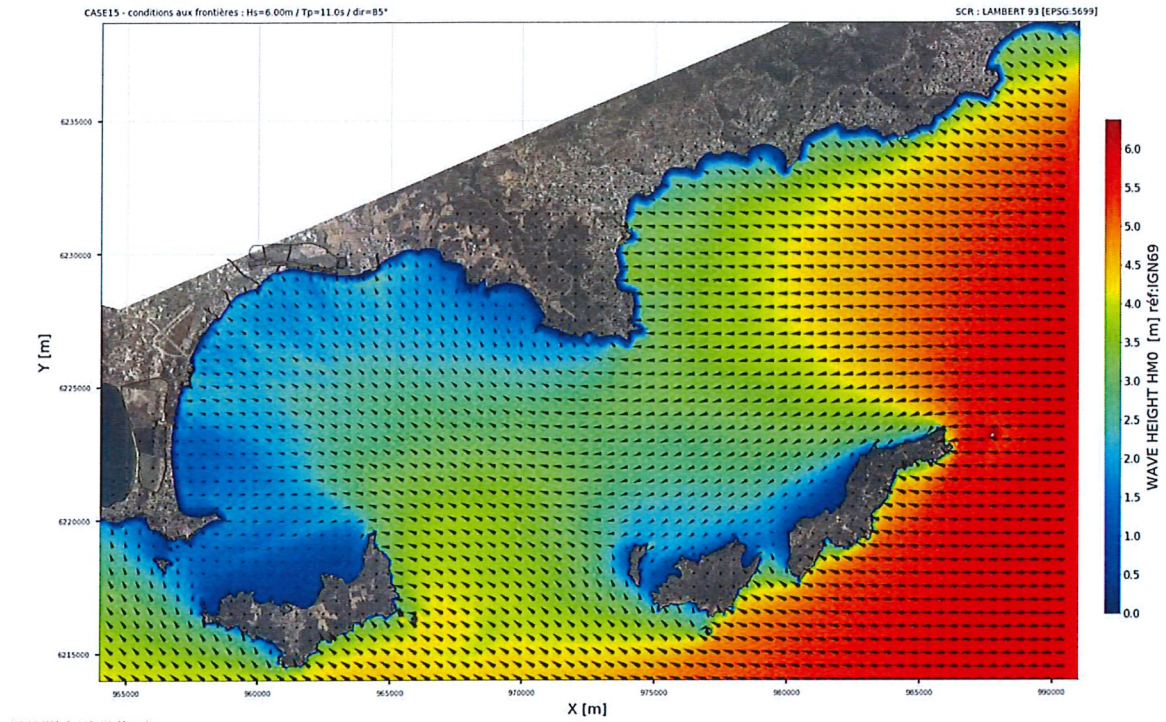


Figure 13 : Résultat de la propagation du cas de houle $H_s=6m$ / $T_p=11s$ / $dir=85^\circ$

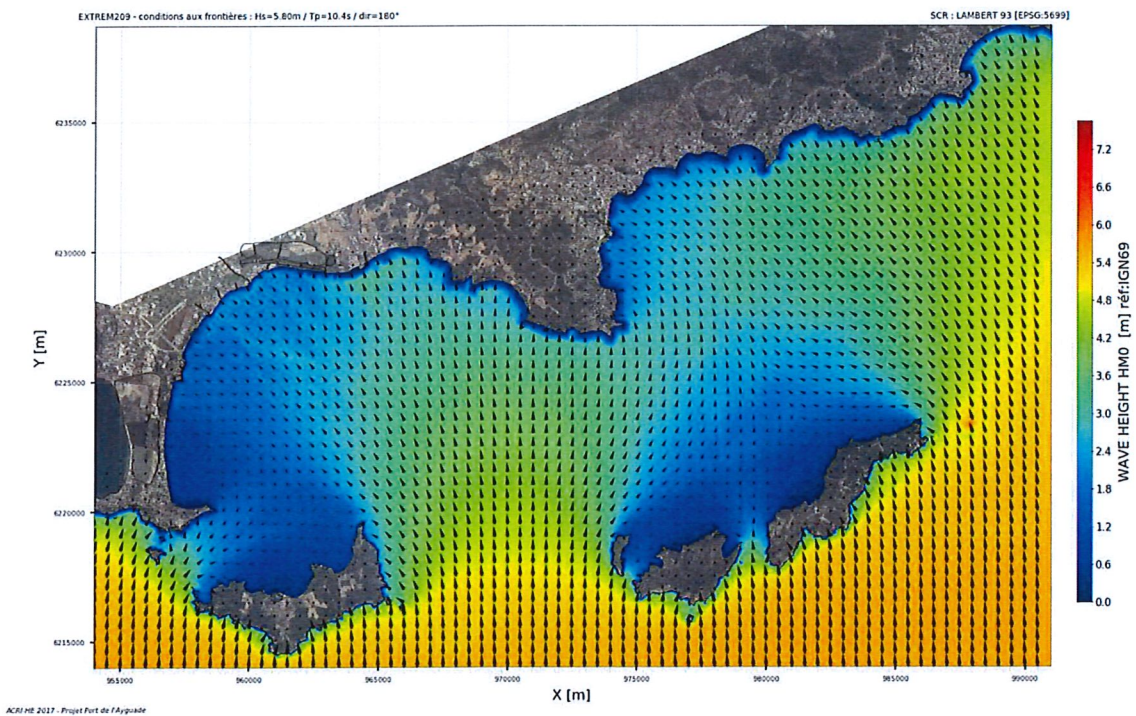


Figure 14 : Résultat de la propagation d'un cas d'agitation extrême

4.3 Agitation à proximité de la côte

4.3.1 Cas des agitations fréquentes

Les 95 cas d'agitation induisent des conditions d'agitation à la côte regroupées en classes. Le Tableau 3 fournit les résultats en un point central de la frontière maritime du futur modèle local.

| | dir | Hs | Tp | occurrence |
|-------|-----------|-----------|---------|------------|
| 1 | 120 - 130 | 0,0 - 0,5 | 3,9 - 6 | 11,1% |
| 3 | 120 - 130 | 0,0 - 0,5 | 10 - 12 | 0,1% |
| 2 | 120 - 130 | 0,5 - 1,0 | 3,9 - 6 | 7,1% |
| 3 | 120 - 130 | 0,5 - 1,0 | 6 - 8 | 5,1% |
| 4 | 120 - 130 | 1,0 - 1,5 | 6 - 8 | 3,1% |
| 5 | 120 - 130 | 1,0 - 1,5 | 8 - 10 | 1,1% |
| 6 | 120 - 130 | 1,5 - 2,0 | 8 - 10 | 0,1% |
| 7 | 120 - 130 | 1,5 - 2,0 | 10 - 12 | 0,1% |
| 8 | 120 - 130 | 2,0 - 2,5 | 10 - 12 | 0,1% |
| 9 | 130 - 140 | 0,5 - 1,0 | 6 - 8 | 2,1% |
| 10 | 130 - 140 | 0,5 - 1,0 | 8 - 10 | 1,1% |
| 11 | 130 - 140 | 0,5 - 1,0 | 10 - 12 | 0,1% |
| 12 | 130 - 140 | 0,5 - 1,0 | 12 - 14 | 0,1% |
| 13 | 130 - 140 | 1,0 - 1,5 | 10 - 12 | 0,1% |
| 14 | 130 - 140 | 1,0 - 1,5 | 12 - 14 | 0,1% |
| 15 | 130 - 140 | 1,5 - 2,0 | 10 - 12 | 0,1% |
| 16 | 140 - 150 | 0,0 - 0,5 | 3,9 - 6 | 7,1% |
| 17 | 140 - 150 | 0,0 - 0,5 | 6 - 8 | 2,1% |
| 18 | 140 - 150 | 0,0 - 0,5 | 8 - 10 | 1,1% |
| 19 | 140 - 150 | 0,5 - 1,0 | 8 - 10 | 0,1% |
| 20 | 140 - 150 | 0,5 - 1,0 | 6 - 8 | 0,1% |
| 21 | 140 - 150 | 0,5 - 1,0 | 10 - 12 | 0,1% |
| 22 | 150 - 160 | 0,0 - 0,5 | 3,9 - 6 | 11,1% |
| 23 | 150 - 160 | 0,0 - 0,5 | 6 - 8 | 5,1% |
| 24 | 150 - 160 | 0,0 - 0,5 | 8 - 10 | 6,1% |
| 25 | 150 - 160 | 0,0 - 0,5 | 10 - 12 | 0,1% |
| 26 | 150 - 160 | 0,5 - 1,0 | 8 - 10 | 2,1% |
| 27 | 150 - 160 | 0,5 - 1,0 | 10 - 12 | 0,1% |
| 28 | 160 - 170 | 0,0 - 0,5 | 3,9 - 6 | 7,1% |
| 29 | 160 - 170 | 0,0 - 0,5 | 6 - 8 | 7,1% |
| 30 | 160 - 170 | 0,0 - 0,5 | 8 - 10 | 1,1% |
| 31 | 170 - 180 | 0,0 - 0,5 | 3,9 - 6 | 1,1% |
| TOTAL | | | | 79,1% |

Tableau 3 : Occurrences par classes d'agitations à proximité du Port de la Capte

La direction d'incidence des vagues varie entre 120° et 180°. Les vagues sont majoritairement inférieures à 0.5m et se propagent avec une période inférieure à 10s.

4.3.2 Houles extrêmes

Le Tableau 4 présente les conditions d'agitation induites à la côte par les cas extrêmes d'agitation.

| | T_{retour} | | conditions au large | | | conditions à la côte | | |
|-----|---------------------|----------|---------------------|------|-------|----------------------|------|-------|
| | | | dir | Hs | Tp | dir | Hs | Tp |
| 200 | 5 ans | point 1 | 265° | 3,8m | 7,8s | 158° | 0,5m | 7,8s |
| 201 | 10 ans | point 1 | 265° | 3,9m | 7,9s | 157° | 0,5m | 7,8s |
| 202 | 20 ans | point 1 | 265° | 4,1m | 8,0s | 157° | 0,5m | 8,0s |
| 203 | 50 ans | point 1 | 265° | 4,2m | 8,1s | 157° | 0,6m | 8,2s |
| 204 | 100 ans | point 1 | 265° | 4,3m | 8,1s | 157° | 0,6m | 8,2s |
| 205 | 5 ans | point 4 | 180° | 4,4m | 9,6s | 131° | 1,7m | 9,5s |
| 206 | 10 ans | point 4 | 180° | 4,7m | 9,8s | 131° | 1,8m | 9,9s |
| 207 | 20 ans | point 4 | 180° | 5,1m | 10,0s | 131° | 2,0m | 10,1s |
| 208 | 50 ans | point 4 | 180° | 5,5m | 10,2s | 131° | 2,1m | 10,2s |
| 209 | 100 ans | point 4 | 180° | 5,8m | 10,4s | 131° | 2,3m | 10,2s |
| 210 | 5 ans | point 16 | 90° | 5,2m | 9,3s | 125° | 1,9m | 9,2s |
| 211 | 10 ans | point 16 | 90° | 5,7m | 9,6s | 125° | 2,1m | 9,4s |
| 212 | 20 ans | point 16 | 90° | 6,1m | 9,8s | 125° | 2,2m | 9,8s |
| 213 | 50 ans | point 16 | 90° | 6,5m | 10,0s | 125° | 2,4m | 10,1s |
| 214 | 100 ans | point 16 | 90° | 6,8m | 10,2s | 125° | 2,5m | 10,1s |

Tableau 4 : Conditions d'agitation à proximité du port de la Capte induites par les cas de houle extrêmes.

5 Niveaux marins

5.1 Définitions

Les variations du niveau marin dans l'embouchure de la Seine sont principalement liées à la superposition de deux phénomènes physiques principaux :

- la marée astronomique,
- la marée atmosphérique.

La marée astronomique correspond à la variation induite par la propagation d'ondes gravitaires générées par l'attraction gravitationnelle des astres (principalement le Soleil et la Lune). Ces ondes sont régies par des phénomènes déterministes et il est donc possible de proposer des prédictions pour les variations du niveau marin induites par la marée astronomique. Ces prédictions sont obtenues par recombinaison du signal de marée à partir de constantes harmoniques estimées à l'aide d'observations in situ. On notera ici que les constantes harmoniques sont calculées à partir de niveaux marins ayant fait l'objet d'un filtrage afin d'extraire du signal observé la partie haute fréquence. Typiquement, l'analyse harmonique est réalisée sur un signal échantillonné avec un pas horaire.

La marée atmosphérique est, quant à elle, liée à des variations du champ de pression atmosphérique. Ces variations ont un caractère aléatoire et peuvent être prévues à court terme à l'aide d'outils informatiques capables de résoudre certains principes de conservations.

La marée observée est la superposition de ces deux phénomènes. La différence entre l'observation et la prédiction du niveau marin prend le nom de :

- surcote si le niveau observé est supérieur au niveau prédit,
- décote si le niveau observé est inférieur au niveau prédit.

Il est généralement considéré que cette différence est liée aux effets atmosphériques sur le niveau marin.

D'autres phénomènes locaux peuvent également induire des variations du niveau marin. Sur un littoral exposé aux vagues, le niveau marin moyen peut être modifié. Cette modification est liée à l'énergie qui est véhiculée par les vagues et qui peut être échangée avec le milieu lorsque les fonds marins remontent. Ces variations sont de l'ordre de 10 à 20 % de la hauteur des vagues déferlantes.

Dans un port, des phénomènes de résonance peuvent également être observés. Ce phénomène, lié à la pénétration d'un forçage extérieur et à la géométrie du port, prend le nom de seiches. Ces ondes sont plus longues que celles associées aux vagues, tout en étant plus courtes que les ondes composant le signal de marée astronomique. Elles sont de l'ordre de quelques minutes à quelques dizaines de minutes. Elles peuvent induire des variations du niveau marin de plusieurs centimètres à quelques décimètres.

5.2 Marée astronomique

Le long du littoral varois, les effets gravitationnels se font peu ressentir sur les variations du niveau marin. On parle d'un littoral micro tidal. Au niveau du port de référence, les variations induites par la composante astronomique sont de l'ordre de 0.2m (RAM, 2014).

5.3 Marée atmosphérique

Il n'existe pas d'observation à long terme du niveau marin dans la rade de Hyères. Les données issues du marégraphe de Toulon sur la période 1960 à 2012 sont présentées sur la Figure 15

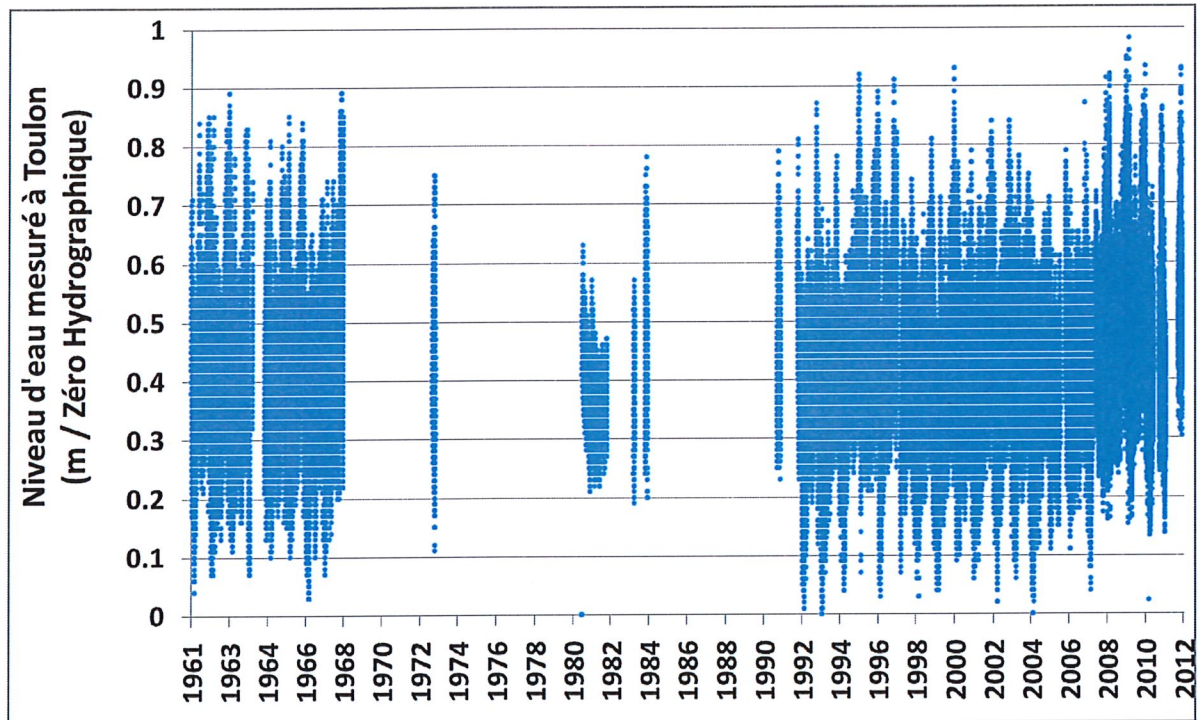


Figure 15 : niveau marin mesuré au marégraphe de Toulon (source BRGM, 2014)

5.4 Valeurs extrêmes

Dans le cadre du rapport sur la submersion dans le secteur de Hyères (BRGM, 2014), la valeur du niveau centennal est de 0.7mNGF.

6 Les courants littoraux

6.1 La dérive littorale

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

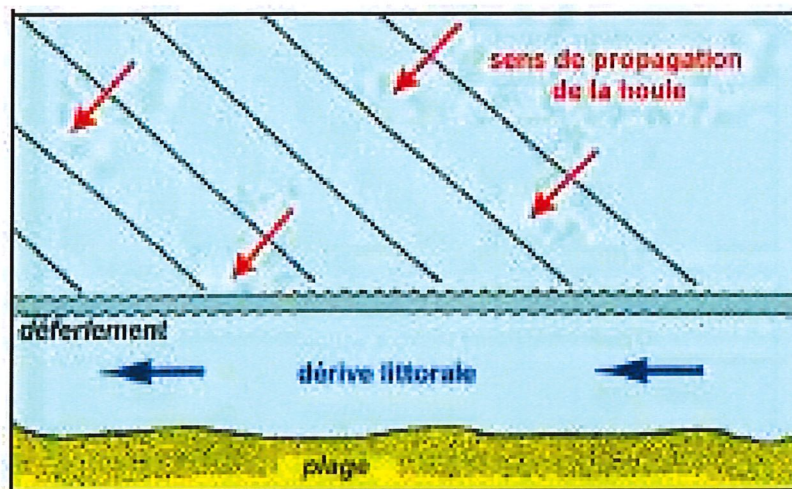


Figure 16 : Principe de la dérive littorale

7 Levés topographiques et bathymétriques

7.1 Bathymétrie générale des fonds marins

Les données bathymétriques prises en compte sont les données GECBO, EDMODnet Bathymetry, ainsi que les données topo-bathymétrique LITTO3D (cf. § 3.1.1). Les données LITTO3D sont issues d'un modèle numérique de terrain (MNT) à très haute résolution (1 m). Elles couvrent l'emprise de la zone d'étude (Figure 17).

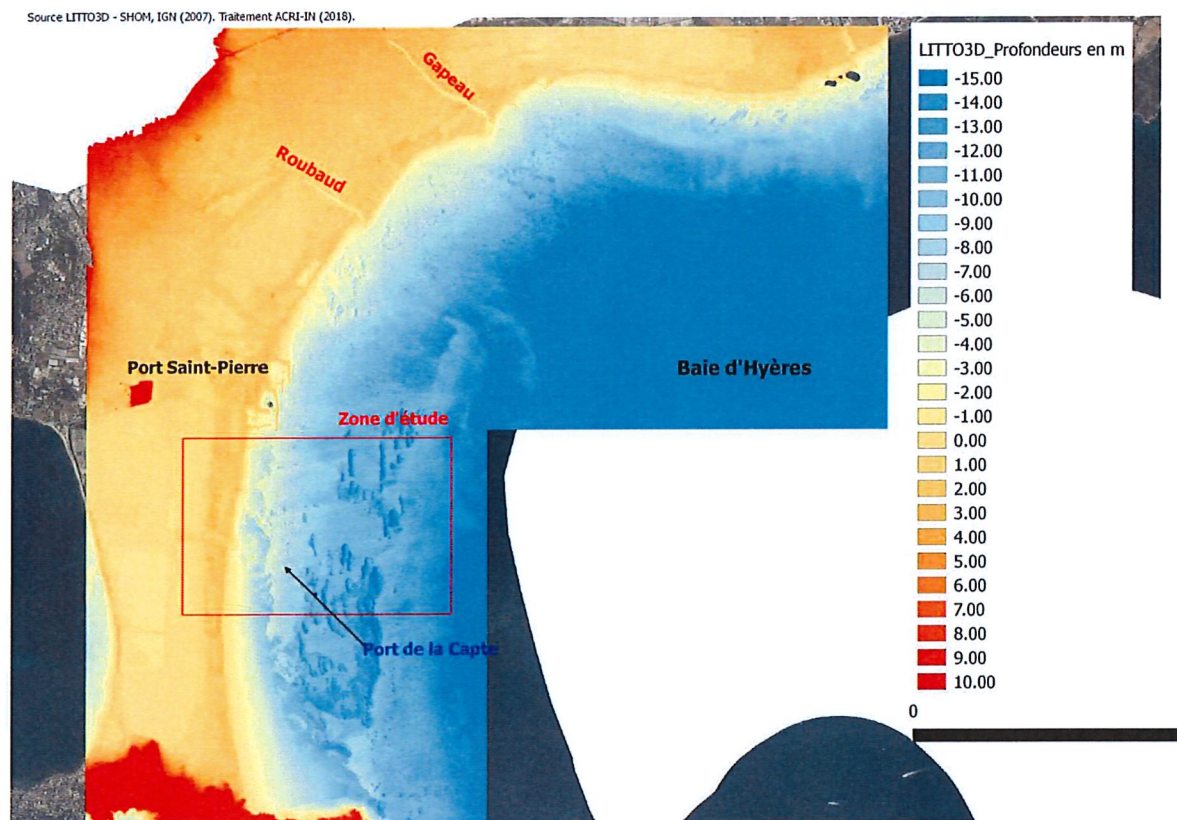


Figure 17 : Bathymétrie LITTO3D sur le secteur d'étude (source SHOM et IGN, 2007).

7.2 Levés bathymétriques dans le périmètre du port de la Capte

Un levé bathymétrique a été réalisé par Opsia en 2013. (Figure 18).

Sur la zone de la Capte, l'érosion marquée du haut de plage s'accompagne par une accrétion des petits fonds. Sur la période 1896 à 2005, la zone présente une relative stabilité avec une augmentation de $300\text{m}^3/\text{an}$.

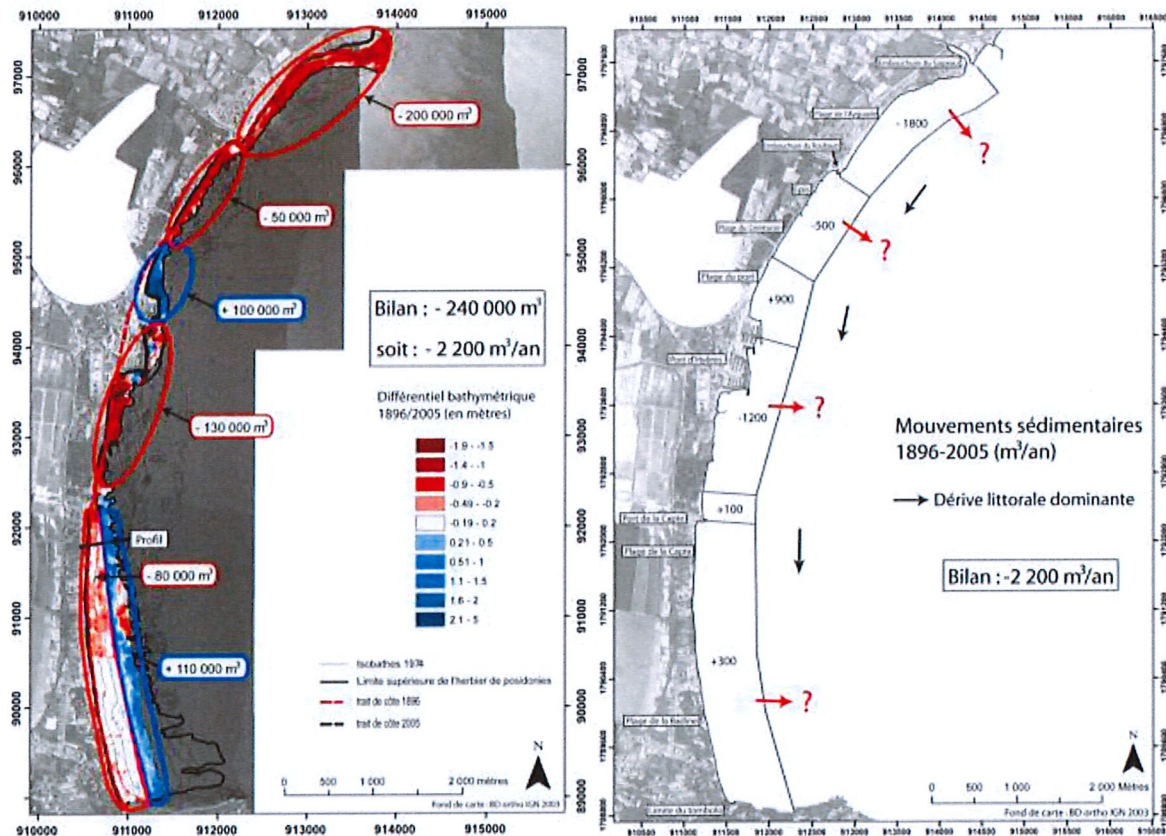


Figure 19 : Différentiel bathymétrique 1896-2005. (Capanni, 2011)

7.3.2 Evolutions récentes et dynamique sédimentaire

Meulé et al.(2010) propose une évolution morphologique du littoral de la Capte. Avant la mise en place des Géotubes® en mars-avril 2008, l'étude du fonctionnement de la plage montrait une érosion importante de la plage de la Capte lors des périodes hivernales (étude réalisée entre novembre 2007 et février 2008). Le recul du trait de côte atteignait en certains endroits le pied de la digue frontale réalisant un déchaussement de plus de 30 cm localement.

Au niveau du port, des accrétions de l'ordre de 0.7 à 0.9 m est noté sur cette même période de l'hiver 2007-2008.

Depuis la mise en place de Géotubes® au large de la plage de la Capte, une évolution positive du trait de côte est notée (Meulé et al. 2010).

7.4 Apports sédimentaires par les cours d'eaux

Seuls deux cours d'eau se jetant en rade d'Hyères ont un apport significatif en sédiments : le Gapeau et le Pansard-Maravenne (Oceanide, 2010). Avec un débit décennal de $28\text{m}^3/\text{s-1}$ et un débit centennal de

56 m³/s-1, le Roubaud n'est pas considéré comme étant un cours d'eau ayant un apport significatif en sédiments. Ces apports sédimentaires ne sont donc pas chiffrés, mais Sogreah (1988) estime à partir de taux d'érosion sur les bassin-versants, à environ 2 000 m³/an, l'ensemble des apports sédimentaires issus des petits cours d'eau (hors Gapeau et le Pansard-Maravenne), dont le Roubaud.

Le principal cours d'eau ayant un apport significatif en sédiments en baie d'Hyères est le Gapeau. Ce cours d'eau présente un bassin versant de 513 km². Son débit moyen annuel est de 5 m³/s (Sogreah, 1988). Il est de 600 m³/s lors des crues centennales. Selon Sogreah (2010), ses apports solides sont de 50000 t/an (25000 à 30000 m³/an) dont 20 à 30% de sables, graviers et galets soit 10000 à 15000 t/an (5000 à 8000 m³/an). Les apports solides se font essentiellement lors des crues. Capanni, 2011, fait une estimation du transport solide annuel moyen des matières en suspension du Gapeau entre 31000m³/an et 62000m³/an, mais il ne mentionne pas le volume de sédiments transporté par charriage (sables, graviers et galets). La fourchette basse de son estimation est proche de celle de Sogreah.

Le bassin versant du Pansard-Maravenne est le second pourvoyeur en sédiments de la baie. Son exutoire est situé à l'Est du celui du Gapeau. Il présente un bassin versant de 78 km². Son débit moyen annuel est inférieur à 1 m³/s (Sogreah, 1988). Il est de 190 m³/s lors des crues centennales. Selon Sogreah, ses apports solides sont de 6500 t/an dont 1500 t/an de sables, graviers et galets. D'après Capanni (2011), le littoral de l'Ouest de la rade ne semble pas en bénéficier compte tenu des ouvrages qui s'avancent de façon importante vers le large bloquant ainsi la majorité du transit sédimentaire issu de la dérive littorale.

Selon Capanni (2011), l'alimentation sédimentaire en rade d'Hyères est donc essentiellement induite par le Gapeau (environ 85%) et le Pansard-Maravenne (environ 10%), le secteur de la rade que nous étudions bénéficiant quasi-uniquement des apports du Gapeau.

Dans l'étude menée par le bureau d'études BCEOM en 2007, il est souligné que les apports sédimentaires fluviaux au niveau de la Capte sont absents. Seul le transit littoral est en mesure d'apporter, de manière naturelle, des sédiments sur la plage de la Capte.

7.5 Apports sédimentaires par rechargement

Dans la mesure où la plage de la Capte montre des signes d'érosion, des rechargements de plage ont été conduits à notre connaissance depuis 1999 à 2015. Les sédiments sont prélevés au Nord du port pour être par la suite placés au Sud du Port. Les volumes de rechargement varient entre 12 000m³ par an jusqu'en 2008, date de la mise en place d'atténuateurs de houle au large de la plage.

8 Caractéristiques sédimentologiques

Des prélèvements sédimentaires ont été réalisés dans le cadre de l'analyse des incidences des aménagements du port de la Capte.



Figure 20 : Prélèvements de plage, secteur sud du port de la Capte (Eurofins, 2018)

La granulométrie des sédiments au voisinage du port est comprise entre 170 microns et 190 microns. Il s'agit de sédiments non cohésifs fins à moyens.

En se rapprochant du littoral et de la plage aérienne, on note une augmentation progressive de la granulométrie. En bas de plage les sédiments sont toujours fins à moyens (222.0 microns). Dans la zone de swash, les sédiments deviennent moyens à grossiers (481.0 microns). Enfin en haut de plage les sédiments sont grossiers de l'ordre de 720 microns.

9 Modélisation morphodynamique

9.1 Généralités

Afin de mieux appréhender la dynamique sédimentaire au droit du port de la Capte, la Mairie de Hyères a souhaité construire un modèle numérique morphodynamique.

Le modèle a pour objectif de décrire les grandes tendances hydro-sédimentaires de la zone d'étude :

- Transports résiduels
- Estimation des volumes dans différentes zones le long du chenal.

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

9.2 Hypothèses de modélisation

Afin de simuler numériquement les écoulements, les vagues, le transport sédimentaire et les évolutions bathymétriques au droit du port de la Capte, la chaîne de calcul TELEMAC (version 6.2) a été choisie. Cette chaîne de calcul contient :

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

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

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

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

TELEMAC2D, en résolvant les équations de Saint Venant, permet de modéliser les composantes horizontales des courants intégrés sur la verticale et les hauteurs de la colonne d'eau. Cette modélisation tient compte des processus de propagation, de convection, de dispersion, de frottement sur le fond et d'apports d'énergie par le vent. De plus, le module permet de prendre en compte un certain nombre de sources ponctuelles. Le paramétrage du frottement peut être uniforme ou variable spatialement et temporellement. Le module peut prendre en compte des singularités telles les siphons, les seuils. Des forces volumiques peuvent également être imposées dans les équations du mouvement. Plusieurs options existent enfin pour la fermeture turbulente des équations.

TOMAWAC permet de modéliser les phénomènes physiques suivants :

- Propagation des spectres de vagues,
- Convection des spectres de vagues,
- Réfraction bathymétrique,
- Réfraction par les courants,
- Interactions vagues-vagues,
- Dissipation d'énergie par frottement sur le fond,
- Dissipation d'énergie par moutonnement,
- Apport d'énergie par le vent,
- Déferlement bathymétrique.

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

9.3 Emprise du modèle

Le domaine de calcul est centré sur le port de la Capte.

Il s'étend sur 3 000 m de part et d'autre du port et sa frontière maritime est située environ à 1 200 m des côtes.

Le maillage ainsi réalisé contient 18 200 nœuds pour 35 700 éléments triangulaire, dont la résolution varie entre :

- 100 m au large
- et 2 m au niveau du port.

9.4 Données d'entrée du modèle

9.4.1 Traitements appliqués pour la constitution de la bathymétrie du modèle

La bathymétrie utilisée pour la construction du modèle est issue d'une mosaïque de trois sources de données topo-bathymétriques :

- le levé bathymétrique réalisé la ville de Hyères en 2013,
- les données Litto3D disponible auprès du Shom,
- dans l'enceinte du port à la cote est fixé à -2 m NGF
- Une pente de 15% pour représenter les profils en travers des ouvrages afin de réaliser un raccord avec la bathymétrie locale.

Le nuage de points est interpolé bilinéairement sur le maillage du modèle.

9.4.1.1 Filtrage des anomalies

Un filtre est appliqué à la bathymétrie interpolée afin de supprimer toutes variations abruptes des fonds. Ce filtre consiste à corriger la pente du fond en chaque point du domaine pour qu'elle soit toujours inférieure à la pente de mise en mouvement dynamique de 15° (Bagnold, 1956).

9.4.2 Bathymétrie du maillage

La figure suivante présente la bathymétrie du modèle

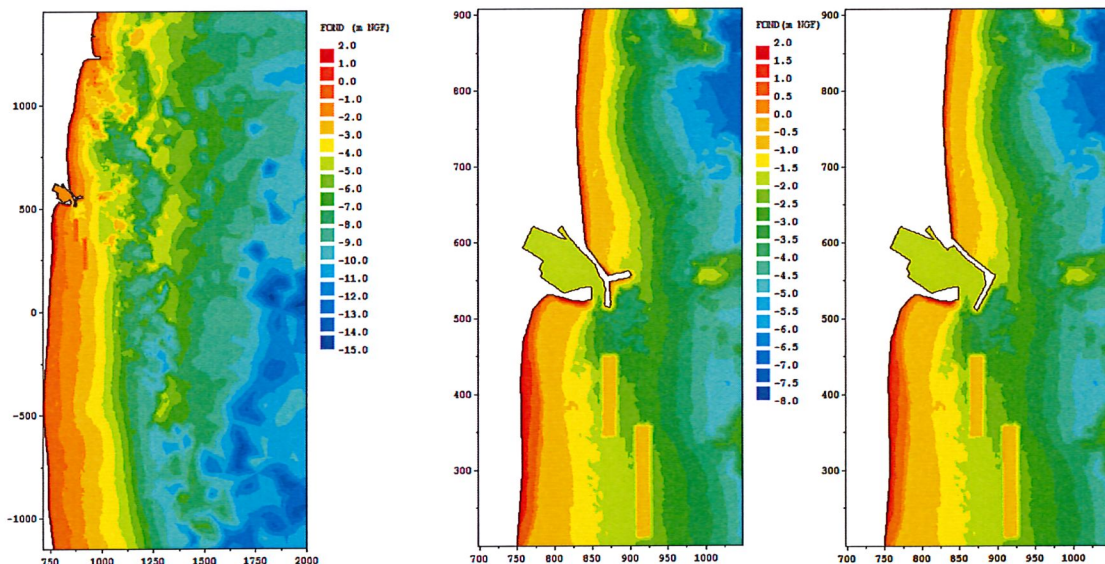


Figure 21 : Bathymétrie générale du maillage (à gauche) et zoom sur la zone d'étude (état actuel et état projeté)

9.5 Courantologie

9.5.1 Equations résolues

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

9.5.2 Schéma de résolution

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

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

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

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

9.5.3 Paramètres numériques et physiques

9.5.3.1.1 *Le pas de temps*

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

9.5.3.1.2 *Choix du coefficient de frottement*

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

9.5.3.1.3 *Choix de la modélisation de la turbulence*

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

9.5.4 Forçages aux limites maritimes

Le modèle est forcé, aux frontières maritimes, en imposant une vitesse nulle et une élévation nulle

9.6 Agitations marines

9.6.1 Equations résolues

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

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

9.6.2 Schéma de résolution

L'espace est discrétisé sur un maillage non structuré avec des éléments triangulaires.

Les directions sont discrétisées suivant une grille régulière et les fréquences sont quant à elle échantillonnées à l'aide d'une suite géométrique.

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

9.6.3 Paramètres numériques et physiques

9.6.3.1.1 *Le pas de temps*

Le pas de temps des simulations est de 2s.

9.6.3.1.2 *Le nombre de direction*

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

9.6.3.1.3 *Le nombre de fréquence*

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

9.6.3.1.4 *Les autres paramètres*

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

9.6.4 Forçage du modèle de vagues

Le modèle est utilisé avec les données de vagues décrites au paragraphe 4.3.

9.7 Transport sédimentaire et évolutions bathymétriques

9.7.1 Equations résolues

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

9.7.1.1 Equation de transport

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

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

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

où u^* est la vitesse de frottement, exprimé en $m.s^{-1}$, s est le rapport entre la masse volumique du sédiment et la masse volumique du fluide ($s = 2,65$ pour du quartz), g est l'accélération de la gravité ($m.s^{-2}$), et d_{50} la taille des grains (m).

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

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

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

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

9.7.1.2 Equation d'évolution du fond

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

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

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

9.7.2 Paramètres physiques et numériques du modèle

9.7.2.1 Formule de transport

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

9.7.2.2 Taille des grains

Une classe moyenne de sédiment est considérée représentative des conditions observées (Océanide, 2011). Ainsi une classe granulométrique uniforme 0,18mm est imposée, granulométrie observée au droit du port de la Capte.

9.7.2.3 Effet de pente

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

9.8 Couplage entre module

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

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

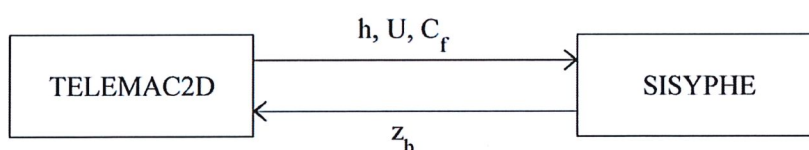


Figure 22 : Couplage entre courantologie et évolution bathymétrique

La version de la chaîne TELEMAC (6.2) ne permet pas le couplage entre vagues, courant et transport sédimentaire. De ce fait un couplage par échange de fichier est considéré. Dans un premier temps, le champ de houle pour un niveau marin donnée est estimé. Puis le couplage courantologie / sédiment est effectué en interne tout en tenant compte des champs de vagues comme suit:

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

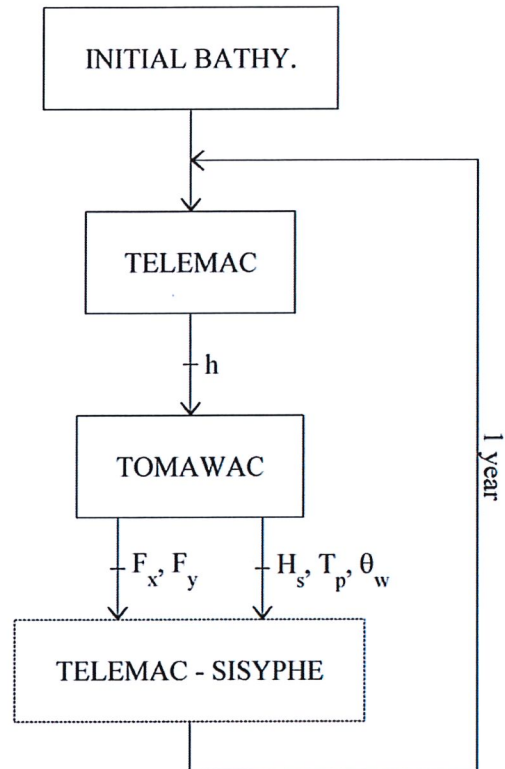


Figure 23 : Schéma de couplage entre vagues, courant et évolution bathymétrique

9.9 Présentation des résultats

9.9.1 Plan de vagues

9.9.1.1 Vagues hivernales annuelles

Les agitations marines lors d'événements de vagues hivernales annuelles sont représentées sur la Figure 24.

On note que les conditions d'agitations ne sont pas modifiées par la reprise envisagée des aménagements portuaires.

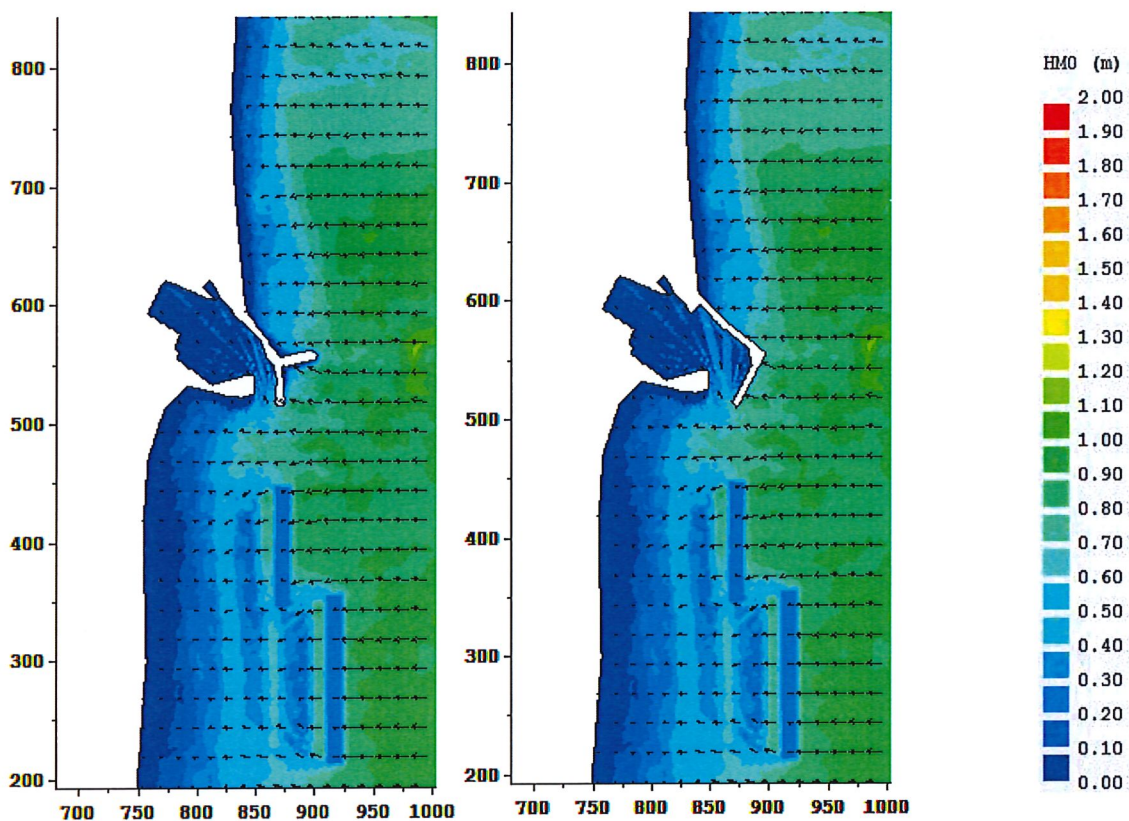


Figure 24 : Plan de vagues (Hm0 annuel hivernal, direction 90°)

9.9.1.2 Vagues extrêmes de période de retour de 5 ans

Les résultats présentés en Figure 25 reproduisent le champ de vagues pour l'état initial et le scénario aménagé pour une vague de période de retour de 5 ans avec une direction de 90°N au large.

Le plan de vague n'est pas modifié par les ouvrages projetés.

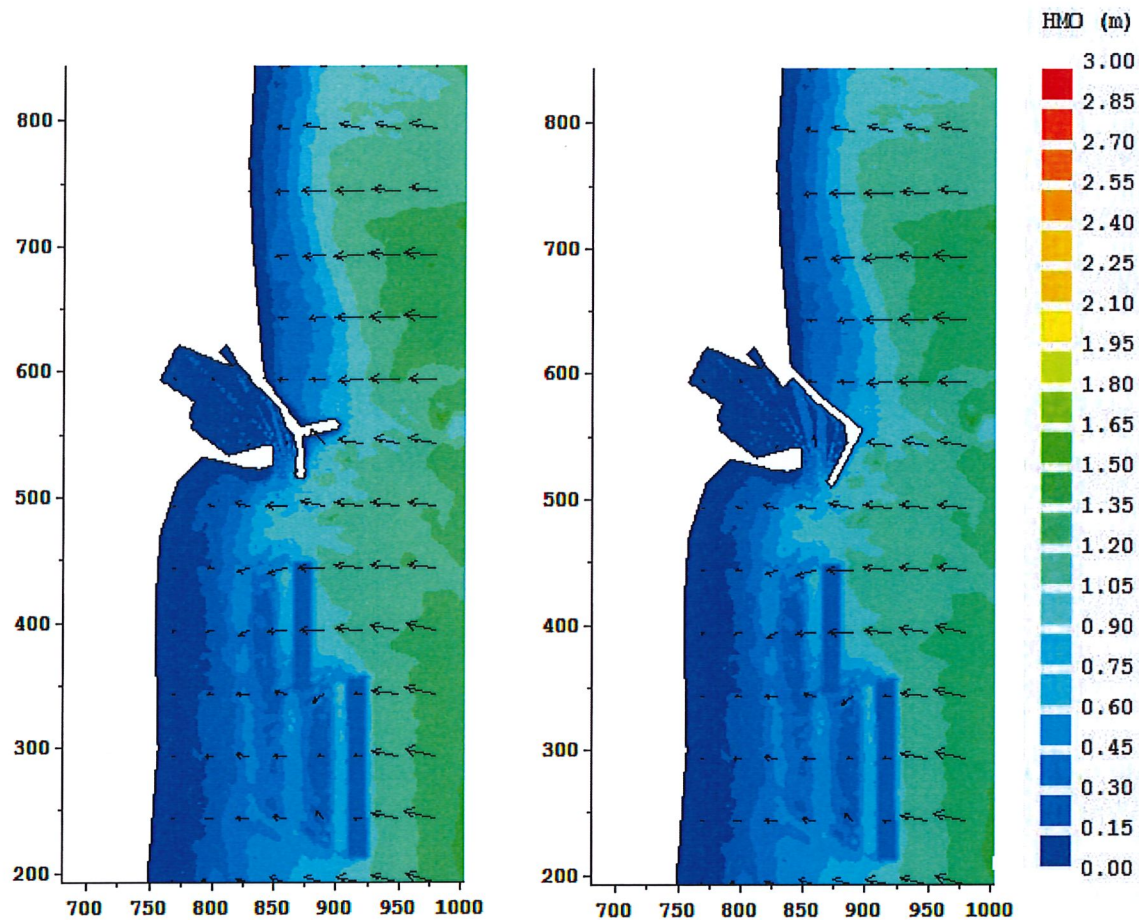


Figure 25 : Plan de vagues (H_{m0} 5 ans, direction 90°)

9.9.2 Courants induits par les vagues

9.9.2.1 Vagues hivernales annuelles

La Figure 26 présente le champ de courant induit par des vagues de secteur $90^\circ N$ pour des conditions hivernales moyennes.

La circulation induite par les courants de vagues dans le voisinage du port de la Capte présente de nombreuses zones de convergences et de divergences. On note que cette circulation complexe n'est pas modifiée par les aménagements projetés. Seuls des évolutions très locales au voisinage direct des ouvrages peuvent être notées. Ces modifications ne déstabilisent pas pour autant la circulation générale des courants.

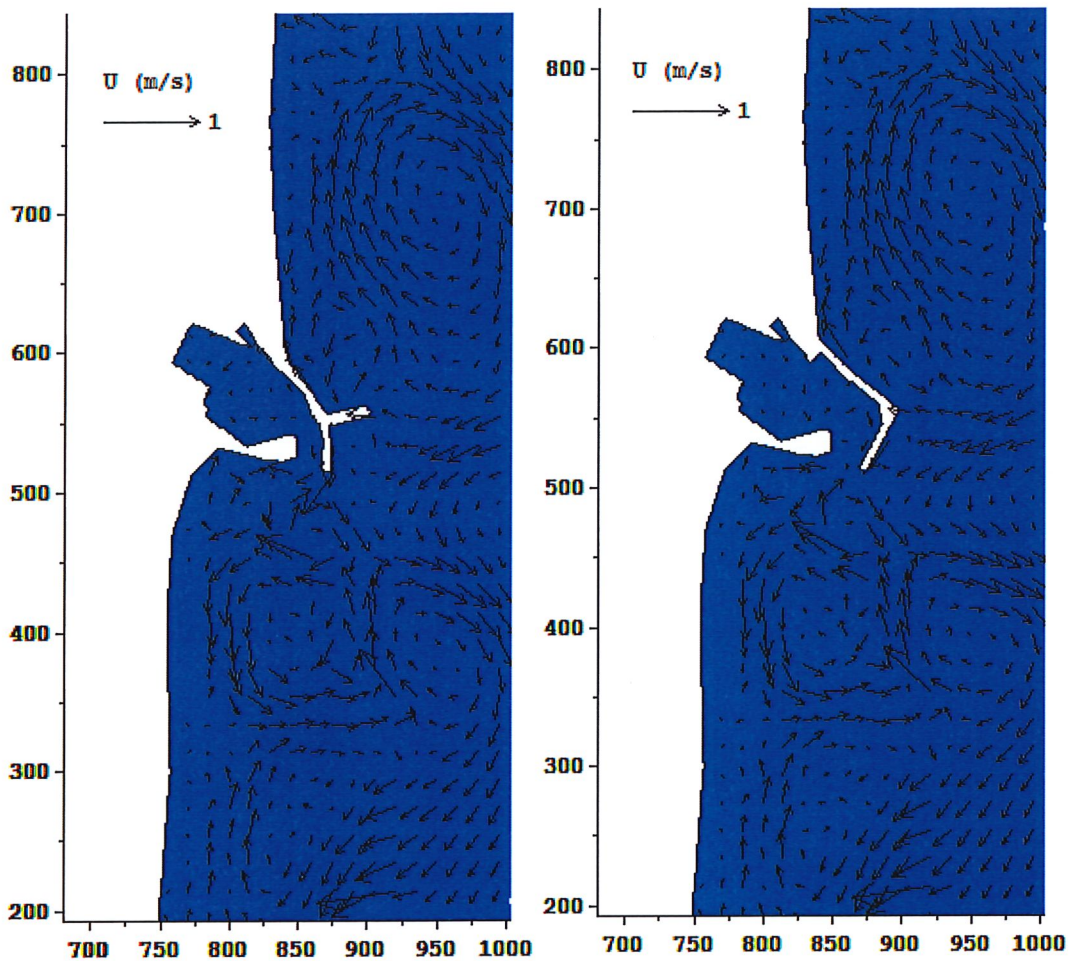


Figure 26 : Courants induits par les vagues (H_m0 annuel hivernal, direction 90°)

9.9.2.2 Vagues extrêmes de période de retour de 5 ans

La figure suivante présente les résultats des courants induits les vagues.

Les ouvrages projetés ne modifient pas la circulation générale des courants.

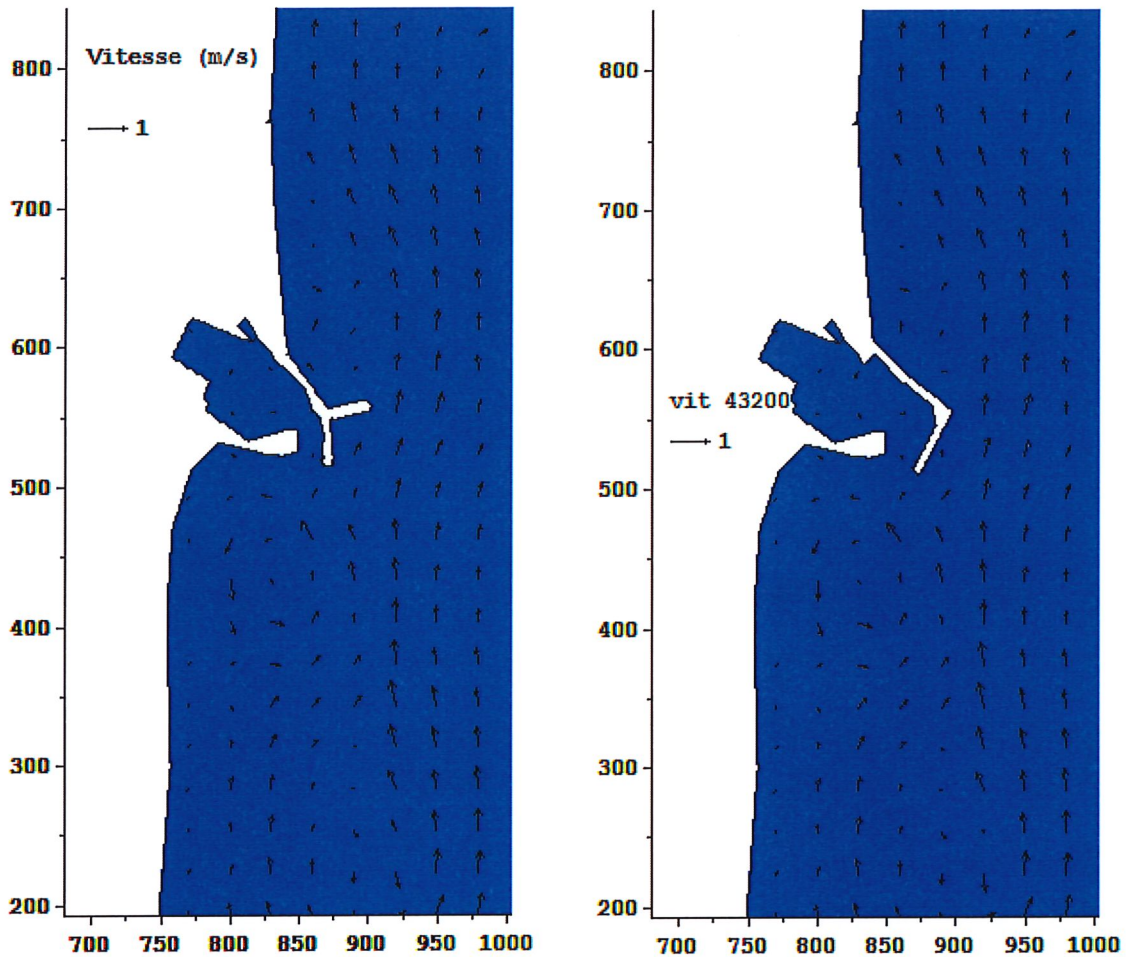


Figure 27 : Courants induits par les vagues (Hm0 5 ans , direction 90°)

9.9.3 Incidence sur les dépôts et érosions

9.9.3.1 Vagues hivernales annuelles

La modélisation des évolutions bathymétriques met en évidence une zone d'accumulation de sédiments à la sortie du chenal du port dans le cas de l'état initial. Un dépôt de l'ordre de 50 cm est modélisé pour des conditions de vagues annuelles.

La reprise de l'ouvrage d'enceinte du port ne modifie pas les zones de dépôts et d'érosion et l'amplitude des évolutions reste similaire entre l'état initial et l'état projeté (Figure 28).

Dans l'enceinte du port, les aménagements ne modifient pas la sédimentation observée à l'état initial.

La modification des ouvrages portuaires n'a pas d'effet sur la dynamique sédimentaire de la plage de la Capte.

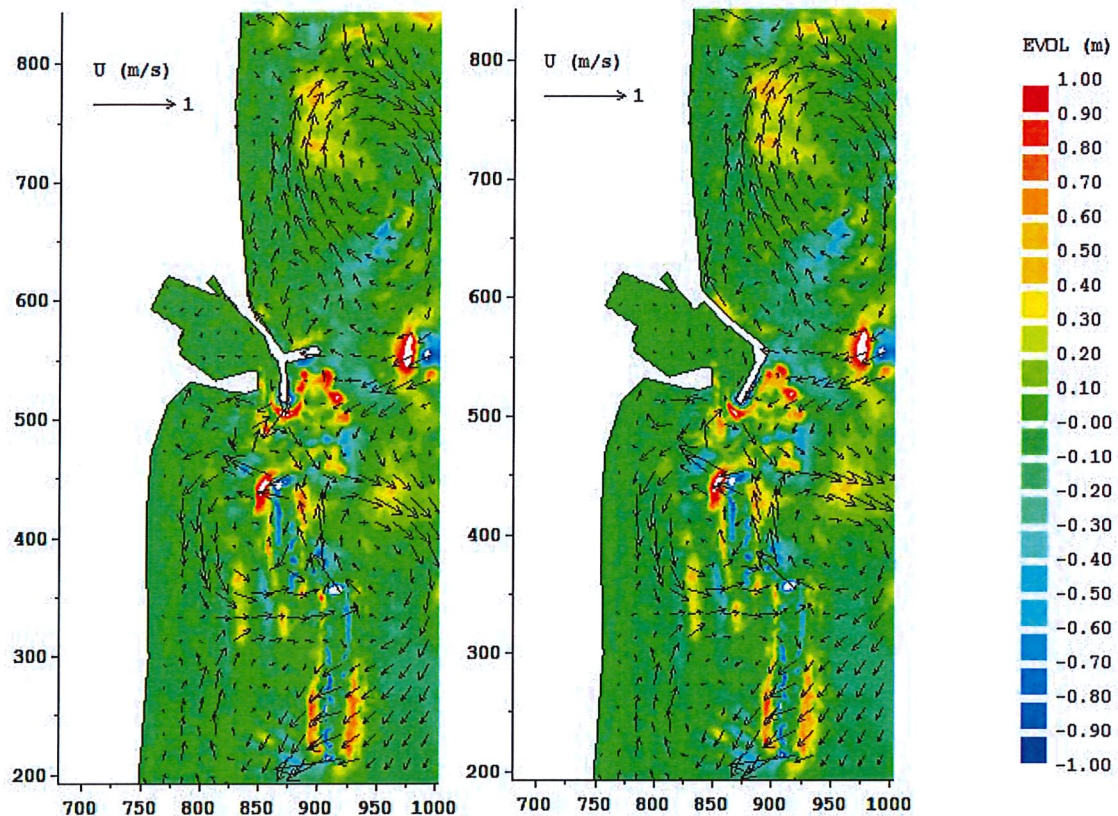


Figure 28 : Evolutions bathymétriques ($H_{m0}=1m$, direction 90°) – zoom sur les ouvrages

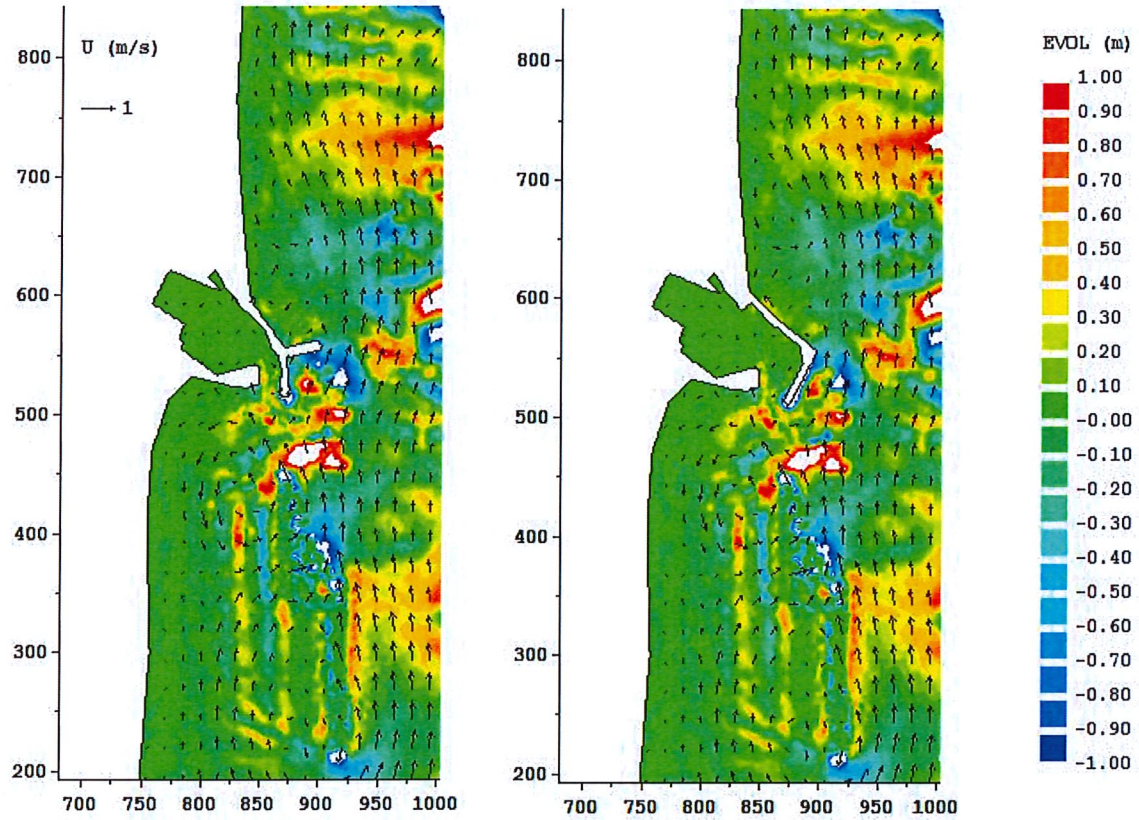
9.9.3.2 Vagues extrêmes de période de retour de 5 ans

La dynamique sédimentaire lors d'une tempête extrême n'est pas modifiée par la reprise des ouvrages portuaires.

On note que les évolutions sont du même ordre pour l'état initial et pour l'état projeté.

Dans l'enceinte du port, les aménagements ne modifient pas la sédimentation observée à l'état initial.

La modification des ouvrages portuaires n'a pas d'effet sur la dynamique sédimentaire de la plage de la Capte.



9.10 Comparaison des volumes déposés dans le port

Afin de quantifier l'incidence des aménagements sur la sédimentation du port, le bilan sédimentaire à l'intérieur de l'enceinte du port est calculé. Le bilan sédimentaire est estimé en sommant les volumes déposés et érodés dans la zone présentée dans la figure suivante. Cette zone représente une surface d'environ 0.52 ha.



Figure 29 : Localisation de la zone de cubature

Le tableau 5 présente les volumes estimés pour chacune des conditions hydrodynamiques simulées (cf. Tableau 1Tableau 4).

La comparaison entre état initial et solution projetés montre qu'il n'existe pas d'écarts significatifs entre les différentes solutions envisagées.

Les écarts sont de l'ordre de quelques dixième de mètres cubes et ne peuvent être considérés comme significatifs.

En moyenne les dépôts dans l'enceinte du port sont très faibles, inférieurs à mm pour les événements extrêmes considérés.

Ces résultats tendent à montrer que la solution projetée n'a pas d'effet sur la sédimentation dans le port.

Tableau 5 : Comparaison des cubatures dans l'enceinte du port pour des conditions hivernales moyennes et des tempêtes extrêmes

| Scénario | Volume (m3) | | Dépôt moyen (mm) | |
|----------------|--------------|--------------|------------------|--------------|
| | Etat initial | Etat aménagé | Etat initial | Etat aménagé |
| 1 | -1.12 | 0.31 | -0.21 | 0.05 |
| 2 | -1.19 | 0.34 | -0.22 | 0.06 |
| 3 | -1.44 | 0.42 | -0.27 | 0.07 |
| 4 | -1.66 | 0.45 | -0.31 | 0.08 |
| 5 | -1.83 | 0.52 | -0.35 | 0.09 |
| 6 | -18.69 | -11.98 | -3.59 | -2.30 |
| 7 | -19.75 | -15.06 | -3.79 | -2.89 |
| 8 | -20.12 | -18.01 | -3.86 | -3.46 |
| 9 | -20.38 | -19.65 | -3.91 | -3.77 |
| 10 | -21.47 | -21.14 | -4.12 | -4.06 |
| 11 | -18.89 | -15.84 | -3.63 | -3.04 |
| 12 | -19.91 | -16.92 | -3.82 | -3.25 |
| 13 | -22.63 | -19.27 | -4.35 | -3.7065 |
| 14 | -25.20 | -21.74 | -4.84 | -4.1815 |
| 15 | -25.24 | -22.47 | -4.85 | -4.3210 |
| Moyen Hivernal | -15.94 | -4.80 | -3.06 | -0.92 |

9.11 Synthèse sur les résultats de modélisation

Les résultats de modélisation numériques des évolutions bathymétriques tenant compte des vagues et des courants induits par ces dernières permettent de mettre en évidence que :

- La circulation générale de la Capte n'est pas modifiée par la reprise des ouvrages portuaires ;
- Il en découle que la solution d'aménagement ne modifie pas les taux d'érosion et de dépôts.

Les ouvrages projetés ne modifient pas, par rapport à l'état initial, le taux de sédimentation dans le chenal d'accès et dans l'enceinte du port.

Les ouvrages projetés ne modifient pas, par rapport à l'état initial, la dynamique littorale sur les plages de la Capte.



Fin du document

Investigations biologiques sous-marines - Ville d'Hyères, Plage de la Capte

Rapport final – Février 2018

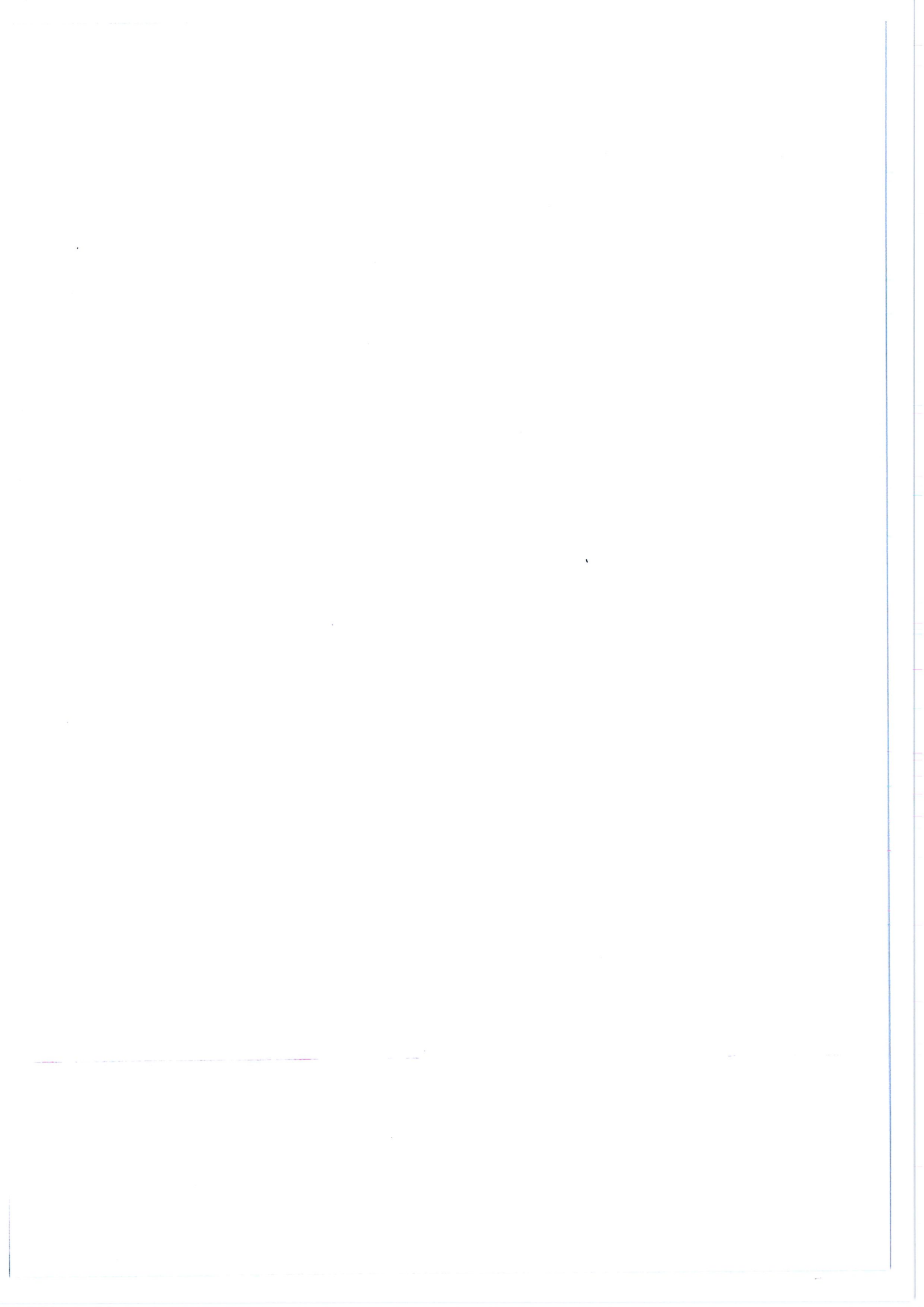
Rapport Final



 **eurofins** | Hydrobiologie



Eurofins Hydrobiologie France – Aix-en-Provence
25 rue de la Petite Duranne
Tel. 04 42 93 26 65 – Courriel : RachelHermansalen@eurofins.com



Sommaire

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCTION | 3 |
| 2 | MÉTHODOLOGIE | 3 |
| 2.1 | PROSPECTION FAUNE FLORE | 4 |
| 2.2 | MESURES <i>PINNA NOBILIS</i> | 4 |
| 2.3 | ÉVALUATION DE L'ÉTAT DE VITALITÉ DE L'HERBIER DE POSIDONIE | 5 |
| 2.3.1 | <i>Mesures de recouvrement</i> | 5 |
| 2.3.2 | <i>Mesures de densité</i> | 6 |
| 2.3.3 | <i>Mesures du déchaussement des rhizomes</i> | 7 |
| 2.3.4 | <i>Type et profondeur de la limite</i> | 8 |
| 3 | RÉSULTATS | 9 |
| 3.1 | <i>OBSERVATIONS GÉNÉRALES DE LA ZONE D'ÉTUDE</i> | 9 |
| 3.2 | FAUNE ET FLORE OBSERVÉE | 9 |
| 3.3 | ÉTAT DE VITALITÉ DE L'HERBIER À <i>POSIDONIA OCEANICA</i> | 11 |
| 3.3.1 | <i>Recouvrement</i> | 11 |
| 3.3.2 | <i>Densité</i> | 11 |
| 3.3.3 | <i>Mesure de déchaussement rhizomes</i> | 11 |
| 3.3.4 | <i>Limite supérieure de l'herbier</i> | 12 |
| 4 | CONCLUSION | 13 |
| 5 | BIBLIOGRAPHIE | 13 |
| 6 | ANNEXES | 14 |

1 Introduction

La plage de la Capte est située sur la commune d'Hyères. Dans le cadre d'un projet de rechargement des plages en sable, des investigations biologiques ont été réalisées à proximité des zones de rechargement afin de mieux cerner les enjeux biologiques. Les prospections se sont focalisées sur les espèces d'intérêt sans prétendre à un inventaire exhaustif ainsi que sur l'herbier de Posidonie.

Ce document présente la méthodologie réalisée ainsi que les résultats obtenus lors cette étude. Ils sont accompagnés de photographies sous-marines prises lors des investigations.

2 Méthodologie

L'objectif des prospections était de mettre en évidence l'absence ou la présence d'espèces ayant un statut de protection ou espèces ayant un intérêt économique ou écologique majeur au niveau de la zone d'étude.

Les investigations ont été réalisées dans la journée du 13 février 2018 et se sont déroulées en deux parties :

- Vérification de la présence éventuelle d'espèces protégées au niveau des stations étudiées
- L'étude de l'herbier de posidonie (Figure 1) avec la réalisation de mesures de densité, de recouvrement ainsi que la caractérisation de la limite de l'herbier sur plusieurs stations pour chaque plage (Figure 2).

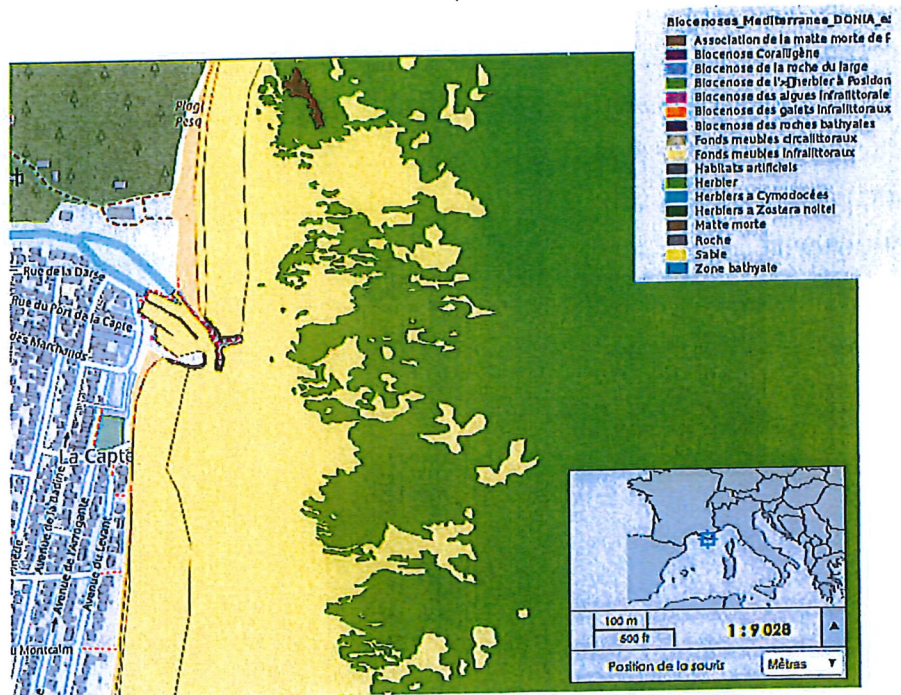


Figure 1 : Carte des biocénoses au niveau du port de la Capte. Source : Medtrix, 2018



Figure 2 : Positionnement des stations de mesures au niveau de la plage de la Capte. Source fond de carte: Google Earth, 2018.

Les observations et mesures ont été réalisées en plongée par une équipe de 3 scaphandriers. Une embarcation motorisée permettait d'assurer la sécurité en surface des plongeurs. En complément des mesures, des photographies et des vidéos ont été réalisés lors des investigations et mesures (fournies en annexe sous format numérique).

2.1 Prospection faune flore

Des observations en scaphandre autonome ont été effectuées au niveau de chaque station de mesure afin de vérifier la présence éventuelle d'espèces protégées (*Pinna nobilis* principalement). Chaque espèce protégée ou d'intérêt a été repérée par GPS.

L'ensemble des informations a été inscrite sur une plaquette immergeable avec notamment la nature des substrats observés, les espèces d'intérêts identifiées, leurs caractéristiques, la profondeur des observations,...

2.2 Mesures *Pinna nobilis*

Chaque individu observé a fait l'objet de mesures afin de mieux caractériser les individus. Le schéma suivant (Figure 3) montre les différentes mesures réalisées. La profondeur des individus est également notée. Chaque individu a été repéré par GPS.

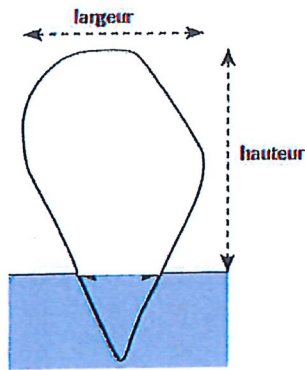


Figure 3 : Mesures sur un individu de Pinna sp.

2.3 Évaluation de l'état de vitalité de l'herbier de Posidonie

Pour la réalisation des mesures de l'état de vitalité de l'herbier, quatre stations ont été définies au niveau de la limite supérieure de l'herbier.

2.3.1 Mesures de recouvrement

Le recouvrement, qui indique le pourcentage moyen de substrat recouvert par l'herbier, a été mesuré au travers d'une plaque translucide divisée en 9 sous-parties par un scaphandrier évoluant à environ 3 mètres au-dessus de l'herbier (Figure 4). A chaque station, dix mesures en réplicat ont été réalisées à proximité de la limite supérieure de l'herbier. L'état de vitalité de l'herbier, selon ce paramètre, se détermine à partir de la classification présentée dans le Tableau 1

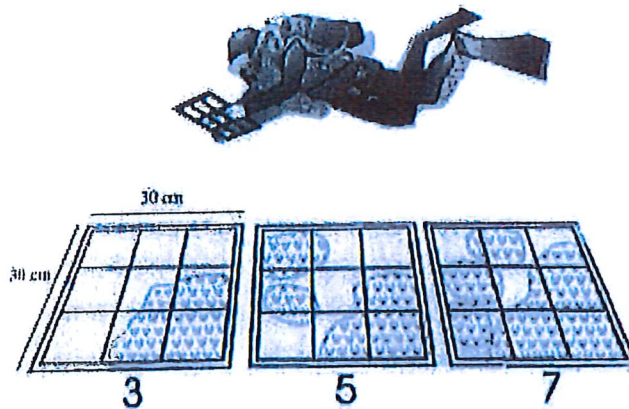


Figure 4 : Illustration d'un scaphandrier effectuant des mesures de recouvrement (Boudouresque et al., 2006)

Rapport Février 2018

Tableau 1 : Classification des recouvrement de l'herbier de posidonie (Charbonnel et al., 2000)

| Recouvrement (%) | Interprétation |
|--------------------|--------------------------|
| >80% | Très fort recouvrement |
| 60% ≤ valeur ≤ 80% | Fort recouvrement |
| 40% ≤ valeur ≤ 60% | Recouvrement moyen |
| 20% ≤ valeur ≤ 40% | Faible recouvrement |
| <20% | Très faible recouvrement |

2.3.2 Mesures de densité

La densité des faisceaux est une mesure du nombre de rhizomes vivants de posidonie par unité de surface. Dix mesures en répliquat ont été effectuées à chacune des trois stations à l'aide d'un quadrat de 20 cm de côté (Figure 5). Les critères de classification sont présentés dans le Tableau 2.



Figure 5 : Plongeur réalisant une mesure de densité à l'aide d'un quadrat.

Tableau 2 : Classification des densités au m² de l'herbier de posidonie en fonction de la profondeur (Pergent, 2007)

| Profondeur (m) | Très bonne | Bonne | Moyenne | Médiocre | Mauvaise |
|----------------|------------|----------|---------|----------|----------|
| 1 | >1195 | 1195-964 | 964-732 | 732-501 | <501 |
| 2 | >1126 | 1126-903 | 903-679 | 679-456 | <456 |
| 3 | >1061 | 1061-846 | 846-630 | 630-415 | <415 |
| 4 | >1000 | 1000-792 | 792-585 | 585-377 | <377 |
| 5 | >942 | 942-742 | 742-543 | 543-343 | <343 |
| 6 | >887 | 887-696 | 696-504 | 504-312 | <312 |
| 7 | >836 | 836-652 | 652-468 | 468-284 | <284 |
| 8 | >788 | 788-611 | 611-435 | 435-259 | <259 |
| 9 | >742 | 742-573 | 573-404 | 404-235 | <235 |
| 10 | >699 | 699-538 | 538-376 | 376-214 | <214 |
| 11 | >659 | 659-504 | 504-350 | 350-195 | <195 |
| 12 | >621 | 621-473 | 473-325 | 325-177 | <177 |
| 13 | >585 | 585-444 | 444-303 | 303-161 | <161 |
| 14 | >551 | 551-416 | 416-282 | 282-147 | <147 |
| 15 | >519 | 519-391 | 391-262 | 262-134 | <134 |
| 16 | >489 | 489-367 | 367-244 | 244-122 | <122 |
| 17 | >461 | 461-344 | 344-227 | 227-111 | <111 |
| 18 | >434 | 434-323 | 323-212 | 212-101 | <101 |
| 19 | >409 | 409-303 | 303-197 | 197-92 | <92 |
| 20 | >385 | 385-285 | 285-184 | 184-83 | <83 |
| 21 | >363 | 363-267 | 267-172 | 172-76 | <76 |
| 22 | >342 | 342-251 | 251-160 | 160-69 | <69 |
| 23 | >322 | 322-236 | 236-149 | 149-63 | <63 |
| 24 | >304 | 304-221 | 221-139 | 139-57 | <57 |
| 25 | >286 | 286-208 | 208-130 | 130-52 | <52 |
| 26 | >269 | 269-195 | 195-121 | 121-47 | <47 |
| 27 | >254 | 254-184 | 184-113 | 113-43 | <43 |
| 28 | >239 | 239-173 | 173-106 | 106-39 | <39 |
| 29 | >225 | 225-162 | 162-99 | 99-36 | <36 |
| 30 | >212 | 212-152 | 152-92 | 92-32 | <32 |
| 31 | >200 | 200-143 | 143-86 | 86-30 | <30 |
| 32 | >188 | 188-135 | 135-81 | 81-27 | <27 |
| 33 | >178 | 178-127 | 127-76 | 76-24 | <24 |
| 34 | >167 | 167-119 | 119-71 | 71-22 | <22 |
| 35 | >158 | 158-112 | 112-66 | 66-20 | <20 |
| 36 | >148 | 148-105 | 105-62 | 62-18 | <18 |
| 37 | >140 | 140-99 | 99-58 | 58-17 | <17 |
| 38 | >132 | 132-93 | 93-54 | 54-15 | <15 |
| 39 | >124 | 124-87 | 87-51 | 51-14 | <14 |
| 40 | >117 | 117-82 | 82-47 | 47-13 | <13 |

2.3.3 Mesures du déchaussement des rhizomes

Le déchaussement des rhizomes a été mesuré afin d'évaluer la dynamique sédimentaire. Dix mesures ont été réalisées au niveau de la limite supérieure pour chaque station selon la méthodologie du guide Ramoge (Figure 6):

- Le déchaussement d'un rhizome orthotrope correspond à la distance entre la base des feuilles et la surface du sédiment moins deux cm.
- Le déchaussement d'un rhizome plagiotrope correspond à la distance inférieure des rhizomes et la surface du sédiment.

La classification du déchaussement est présentée Tableau 3.

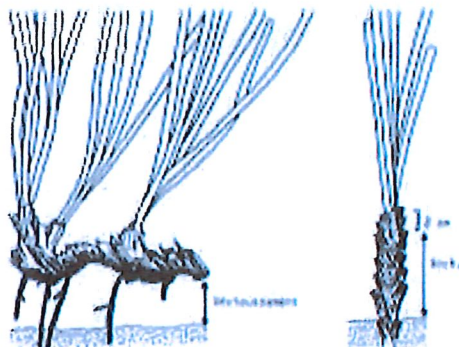


Figure 6 Mesure du déchaussement sur rhizomes plagiotrope et orthotrope (Boudouresque et al., 2006)

Tableau 3 : Classification du déchaussement de l'herbier de Posidonie (Charbonnel et al., 2000)

| Déchaussement (cm) | Interprétation |
|--------------------|-------------------------|
| <5 | Déchaussement faible |
| 5-15 | Déchaussement moyen |
| >15 | Déchaussement important |

2.3.4 Type et profondeur de la limite

Il existe différents types de limite de l'herbier : progressive, franche, érosive, régressive et morcelée. Celle-ci a été définie en fonction des observations des plongeurs ainsi que de la profondeur de la limite.

3 Résultats

3.1 Observations générales de la zone d'étude

La visibilité le jour des investigations était bonne (environ 4m de visibilité). Les conditions météo étaient favorables avec un temps ensoleillé, un vent faible et l'absence de pluie.

3.2 Faune et flore observée

Les inspections au niveau de la limite supérieure des trois stations ont permis de mettre en évidence la présence d'une espèce protégée sur le territoire français : la grande nacre (*Pinna nobilis*)

21 grandes naces ont été observées. La carte ci-après montre la localisation des différents individus observés .

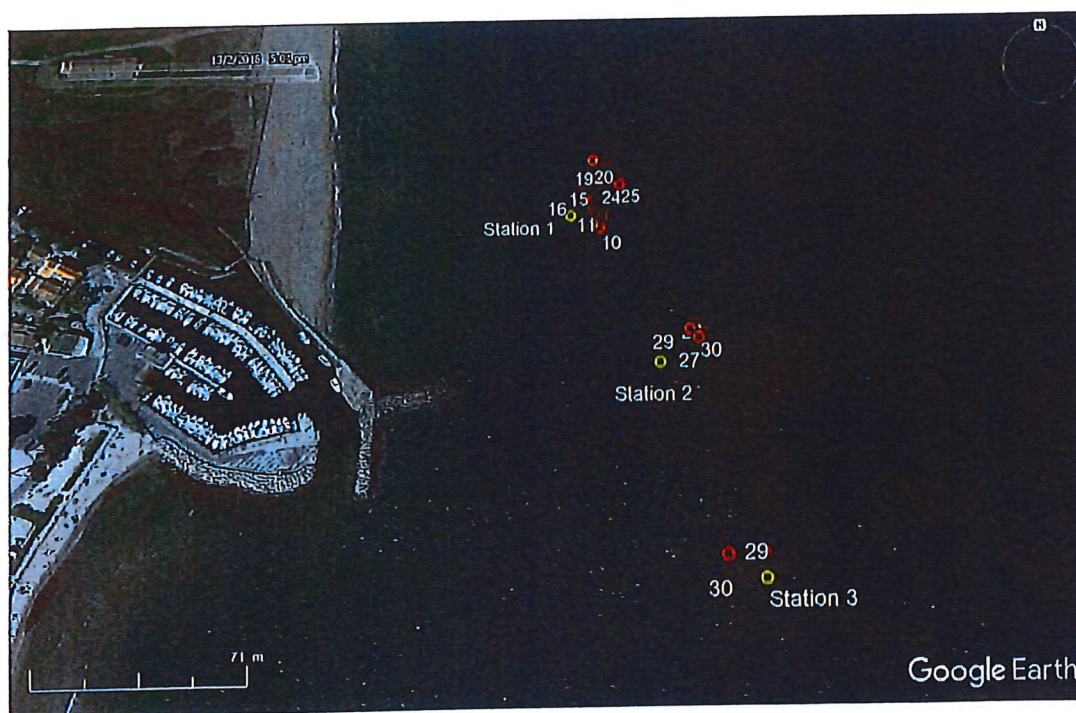


Figure 7 : Carte de la localisation des individus de *Pinna nobilis* observés au niveau des stations de la Capte

L'ensemble des individus ont fait l'objet de photographies et d'une géolocalisation (Tableau 4 et

Rapport Février 2018



Figure 8). À l'exception de la grande nacre, seules des espèces communes caractéristiques des petits fonds de méditerranée ont été observées : holothuries sur les fonds sableux ainsi que quelques sars et sparillons.

Tableau 4 : Caractéristiques des individus de *Pinna nobilis* observés.

| Numéro d'individu | Coordonnées (WGS 84) | Hauteur (cm) | Largeur (cm) |
|-------------------|------------------------------|--------------|--------------|
| 10 | 43°03'56.80"N ; 6°09'10.47"E | 33 | 20 |
| 11 | 43°03'56.87"N ; 6°09'10.35"E | 31 | 18 |
| 12 | 43°03'56.98"N ; 6°09'10.53"E | 23 | 16 |
| 13 | 43°03'57.03"N ; 6°09'10.49"E | 26 | 21 |
| 14 | 43°03'57.12"N ; 6°09'10.37"E | 48 | 23 |
| 15 | 43°03'57.31"N ; 6°09'10.25"E | 30 | 18 |
| 16 | 43°03'57.34"N ; 6°09'10.19"E | 8 | 10 |
| 17 | 43°03'57.56"N ; 6°09'10.20"E | 28 | 27 |
| 18 | 43°03'57.57"N ; 6°09'10.26"E | 25 | 20 |
| 19 | 43°03'57.66"N ; 6°09'10.37"E | 30 | 20 |
| 20 | 43°03'57.97"N ; 6°09'10.45"E | 45 | 26 |
| 21 | 43°03'57.97"N ; 6°09'10.45"E | 43 | 24 |
| 22 | 43°03'57.74"N ; 6°09'10.74"E | 41 | 27 |
| 23 | 43°03'57.82"N ; 6°09'10.71"E | 20 | 11 |
| 24 | 43°03'57.55"N ; 6°09'10.90"E | 35 | 29 |
| 25 | 43°03'57.52"N ; 6°09'10.93"E | 47 | 30 |
| 26 | 43°03'55.25"N ; 6°09'12.01"E | 20 | 20 |
| 27 | 43°03'55.16"N ; 6°09'12.04"E | 44 | 26 |
| 28 | 43°03'55.13"N ; 6°09'12.08"E | 25 | 22 |
| 29 | 43°03'52.28"N ; 6°09'12.62"E | 22 | 11 |
| 30 | 43°03'52.26"N ; 6°09'12.05"E | 16 | 14 |

Rapport Février 2018



Figure 8 : Photographies de différents individus de Pinna nobilis observés

3.3 État de vitalité de l'herbier à Posidonia oceanica

L'herbier de Posidonie étudié était présent sur un substrat sableux. (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).



Figure 9 : Photos de l'herbier de Posidonie de la Capte

3.3.1 Recouvrement

Le recouvrement moyen de l'herbier de Posidonie a été interprété à l'aide de la grille d'interprétation de Charbonnel et al. (2000). L'ensemble des stations présentaient un recouvrement «Fort » à « Très fort» (Tableau 5).

Tableau 5 : Résultats des recouvrements moyens de Posidonie et classification selon Charbonnel et al., (2000).

| Station | Profondeur (m) | Recouvrement moyen (%) | Ecart type | Classification (Pergent, 2007) |
|---------|----------------|------------------------|------------|--------------------------------|
| 1 | 3.2 | 91.1 | 10.9 | Très fort recouvrement |
| 2 | 3 | 85.6 | 15.7 | Très fort recouvrement |
| 3 | 4.1 | 76.7 | 15.3 | Fort recouvrement |

3.3.2 Densité

La densité moyenne des faisceaux de posidonie a été calculée sur les quatre stations (Tableau 6). Les résultats ont été interprétés avec la grille de classification de Pergent (2007). L'ensemble des stations a présenté des densités « médiocre ».

Tableau 6 : Résultats des densités moyennes de faisceaux de Posidonie et classification selon Pergent (2007).

| Station | Profondeur (m) | Densité moyenne (nb faiscs/m ²) | Ecart type | Classification (Pergent, 2007) |
|---------|----------------|---|------------|--------------------------------|
| 1 | 3.2 | 625 | 90 | Médiocre |
| 2 | 3 | 465 | 58 | Médiocre |
| 3 | 4.1 | 422 | 157 | Médiocre |

3.3.3 Mesure de déchaussement rhizomes

Les trois stations ont présenté des déchaussements moyens compris entre 4.9 et 7.7cm ce qui met en évidence un faible déchaussement (Tableau 7).

Tableau 7 : Caractéristiques des rhizomes de Posidonie avec déchaussement moyen

| Station | Déchaussement moyen (cm) | Ecart type | Classification déchaussement (Charbonnel et al., 2000) |
|---------|--------------------------|------------|--|
| 1 | 4.9 | 1.4 | Déchaussement faible |
| 2 | 5.0 | 4.3 | Déchaussement moyen |
| 3 | 7.7 | 4.1 | Déchaussement moyen |

3.3.4 Limite supérieure de l'herbier

La limite supérieure de l'herbier a été relevée par GPS pour chaque station et a été représentée sur la Figure 10. Les touffes isolées de posidonie ont été représentées par des points verts.

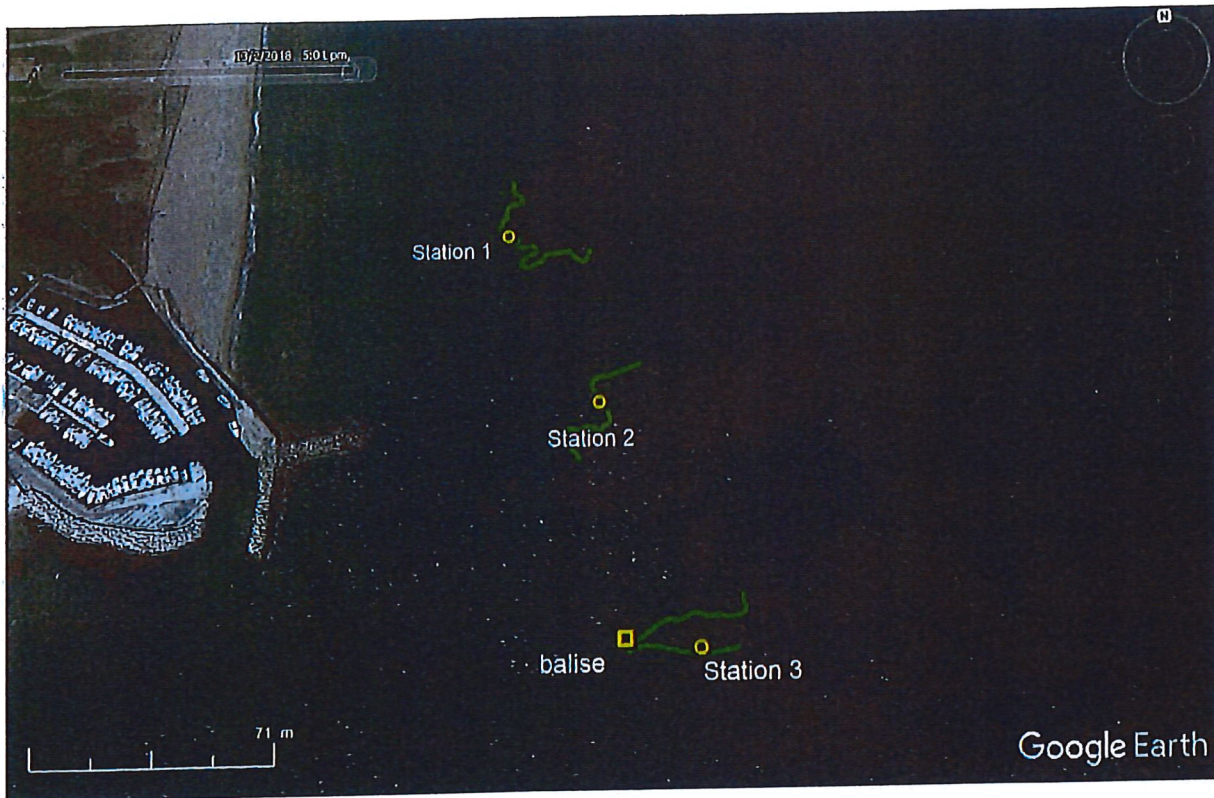


Figure 10 : Limite supérieure de la matte de l'herbier de Posidonie de la Capte

Le substrat était principalement sableux autour de la matte de l'herbier.

De manière générale, l'herbier était morcelé avec la présence de touffes de Posidonie isolées.

Les limites supérieures étudiées étaient franches pour l'ensemble des stations (Figure 11). Une balise présente dans l'étude du GIS Posidonie a été observée et photographiée.

Rapport Février 2018

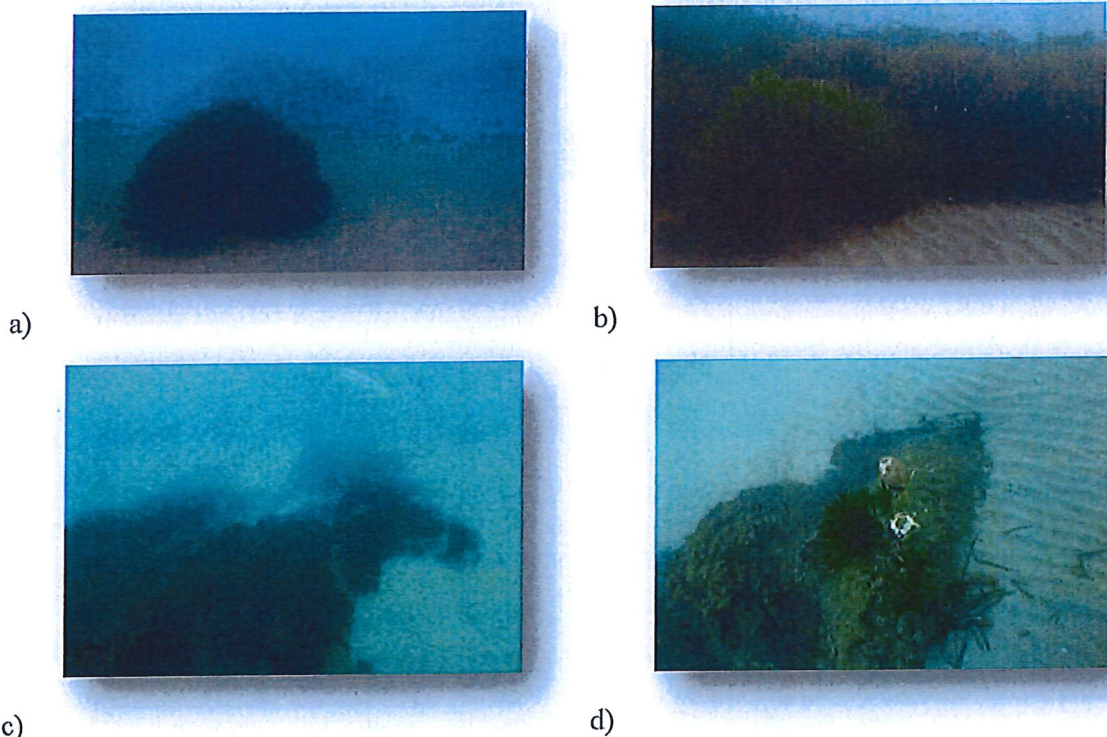


Figure 11 : Photographies de la limite supérieure de l'herbier de *Posidonia* : a) herbier morcelé ; b) limite franche c) vue générale d) balise

4 Conclusion

Les investigations sous-marines réalisées ont permis de mettre la présence d'une faune et d'une flore composée d'espèces communes des petits fonds de Méditerranée. La présence d'une espèce protégée (*Pinna nobilis*) a été mise en évidence dans la zone à proximité du port : 21 individus ont été repérés.

L'étude de l'état de vitalité de l'herbier à *Posidonia oceanica* a mis en évidence un recouvrement «fort» à «très fort» et une densité de faisceaux classée comme «médiocre». Le déchaussement mesuré était faible. La limite supérieure a montré une limite plus au moins morcelée selon les stations étudiées.

5 Bibliographie

Boudouresque C.F., 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 publ. : 1-202, ISBN 2- 905540-30-3, 204PP.

Charbonnel E., Boudouresque C.F., Meinesz A., Bernard G., Bonhomme P., Patrone J., Kruzeck R., Cottalorda J.M., Bertrand M.C., Foret P., Ragazzi M., Le Direac'h L., 2000. Le réseau de surveillance Posidonie de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Première partie : présentation et guide méthodologique. Année 2000. Région PACA / Agence de l'Eau RMC / GIS Posidonie / CQEL 13 / CQEL 83 / Conseil Général 06. GIS Posidonie publ., Marseille, Fr. : 76 PP.

Rapport Février 2018

Pergent G., 2007. Protocole pour la mise en place d'une surveillance des herbiers de Posidonies. Programme « MedPosidonia » / CAR/ASP - Fondation d'entreprise TOTAL pour la Biodiversité et la Mer ; Mémoire d'Accord N°01/2007/RAC/SPA_MedPosidonia Nautilus-Okianos: 24p + Annexes.

6 Annexes

Annexe 1 : Résultats des mesures sur l'herbier de Posidonie.

| | Recouvrement | | |
|------------|--------------|-----------|-----------|
| | Station 1 | Station 2 | Station 3 |
| R1 | 100,00% | 100,00% | 88,89% |
| R2 | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| R3 | 88,89% | 88,89% | 77,78% |
| R4 | 100,00% | 55,56% | 66,67% |
| R5 | 88,89% | 66,67% | 77,78% |
| R6 | 66,67% | 66,67% | 55,56% |
| R7 | 88,89% | 88,89% | 66,67% |
| R8 | 77,78% | 100,00% | 55,56% |
| R9 | 100,00% | 88,89% | 77,78% |
| R10 | 100,00% | 100,00% | 100,00% |
| moyenne | 91,11% | 85,56% | 76,67% |
| Ecart type | 10,89% | 15,75% | 15,28% |

| | Densité faisceaux/0,04m ² | | | Densité faisceaux/m ² | | |
|------------|--------------------------------------|------------|------------|----------------------------------|------------|-------------|
| | Station 1 | Station 2 | Station 3 | Station 1 | Station 2 | Station 3 |
| D1 | 26 | 21 | 9 | 650 | 525 | 225 |
| D2 | 20 | 18 | 20 | 500 | 450 | 500 |
| D3 | 22 | 19 | 32 | 550 | 475 | 800 |
| D4 | 27 | 20 | 14 | 675 | 500 | 350 |
| D5 | 30 | 13 | 11 | 750 | 325 | 275 |
| D6 | 25 | 17 | 16 | 625 | 425 | 400 |
| D7 | 20 | 18 | 12 | 500 | 450 | 300 |
| D8 | 31 | 19 | 22 | 775 | 475 | 550 |
| D9 | 26 | 19 | 16 | 650 | 475 | 400 |
| D10 | 23 | 22 | 17 | 575 | 550 | 425 |
| Moyenne | 25 | 18,6 | 16,9 | 625 | 465 | 422,5 |
| Ecart type | 3,60555128 | 2,33238076 | 6,28410694 | 90,1387819 | 58,3095189 | 157,1026734 |

Rapport Février 2018

| | Déchaussement (cm) | | |
|------------|--------------------|-----------|-----------|
| | Station 1 | Station 2 | Station 3 |
| R1 | 6 | 11 | 14 |
| R2 | 3 | 0 | 6 |
| R3 | 7 | 2 | 3 |
| R4 | 4 | 1 | 4 |
| R5 | 7 | 8 | 8 |
| R6 | 3 | 10 | 13 |
| R7 | 4 | 4 | 11 |
| R8 | 4 | 11 | 9 |
| R9 | 5 | 0 | 7 |
| R10 | 6 | 3 | 2 |
| moyenne | 4,9 | 5 | 7,7 |
| Ecart type | 1,45 | 4,31 | 4,11 |