Rapport d'Etude

_____

Diagnostic du littoral et étude de la dynamique sédimentaire des plages de Bandol en vue de travaux de protection du littoral

FRANCE

GlobOcean

29/04/22	*A*	*Rapport initial*	*FB*	*VT*
Date	*Révision*	*Description*	*Prepared*	*Checked*

Table des Matières

1. Contexte de l'étude 5

1.1. Le site 5

1.2. Objectifs de la mission 5

2. Recueil des données 6

2.1. Statistiques de houle au large de Bandol 6

3. Diagnostic du littoral 7

3.1. Analyse historique de l'évolution du trait de côte et des profils topo-bathymétriques 7

3.1.1. Méthodologie 7

3.1.2. Résultats 8

4. Etude de la dynamique sédimentaire – modélisations de houle et courantologie en fonction d'événements types 22

4.1. Stratégie de modélisation 22

4.2. Présentation des logiciels de modélisation 22

4.2.1. Modèle de houle TOMAWAC 22

4.2.2. Modèle courantologique (TELEMAC-2D) 23

4.2.3. Modèle sédimentologique (SISYPHE) 23

4.2.4. Méthodologie de couplage de codes 23

4.3. Mise en place du modèle 24

4.3.1. Emprise, maillage et bathymétrie 24

4.4. Conditions limites de forçage et cas simulés 25

4.5. Fonds rigides / biocénoses 27

4.6. Sorties des modèles 27

4.7. Prélèvements sédimentologiques 28

4.8. Résultats du modèle hydrodynamique 30

4.8.1. Résultats modélisation de la houle - TOMAWAC 30

4.9. Résultats modélisation de la courantologie - TELEMAC-2D 34

4.10. Résultats du modèle sédimentologique 39

4.11. Extraction des résultats au droit des plages 41

5. Conclusions et recommandations 41

6. Références 42

Table des Figures

Figure 1-1: Localisation des plages étudiées : plage de Renécros, plage centrale, plage du Casino et plage du Grand Valat 5

Figure 2-2 – Localisation du point d'extraction des états de mer au large.....6

Figure 2-3 – Rose de houle sur le point 'PT1' à l'ouvert de la baie de Bandol 6

Figure 3.1.2-4: Position des traits de côte utilisés dans le cadre de l'analyse de l'évolution du trait de côte de la plage de Renécros et résultats de l'évolution entre 2006 et 2022 avec la méthode LRR (Taux de Régression Linéaire) 9

Figure 3.1.2-5: Position des traits de côte utilisés dans le cadre de l'analyse de l'évolution du trait de côte de la plage Centrale et résultats de l'évolution entre 2006 et 2022 avec la méthode LRR (Taux de Régression Linéaire) 10

Figure 3.1.2-6: Position des traits de côte utilisés dans le cadre de l'analyse de l'évolution du trait de côte de la plage du Casino et résultats de l'évolution entre 2006 et 2022 avec la méthode LRR (Taux de Régression Linéaire) 11

Figure 3.1.2-7: Position des traits de côte utilisés dans le cadre de l'analyse de l'évolution du trait de côte de la plage du Grand Valat et résultats de l'évolution entre 2006 et 2022 avec la méthode LRR (Taux de Régression Linéaire).....12

Figure 3.1.2-8: Plage de Renécros: MNT 2022 (gauche), MNT LITTO3D (centre) et différentiel (droite).....14

Figure 3.1.2-9: Plage centrale: MNT 2022 (gauche), MNT LITTO3D (centre) et différentiel (droite).....15

Figure 3.1.2-10: Plage du Casino: MNT 2022 (gauche), MNT LITTO3D (centre) et différentiel (droite).....16

Figure 3.1.2-11: Plage du Grand Valat: MNT 2022 (gauche), MNT LITTO3D (centre) et différentiel (droite).....17

Figure 3.1.2-12: Evolution des profils topo-bathymétriques – plage de Renécros.....18

Figure 3.1.2-13: Evolution des profils topo-bathymétriques – plage Centrale 19

Figure 3.1.2-14: Evolution des profils topo-bathymétriques – plage du Casino 20

Figure 3.1.2-15: Evolution des profils topo-bathymétriques – plage Valat 21

Figure 4.1-16 : Emprise horizontale et maillage 25

Figure 4.1-17 – Maillages Plages Renécros (gauche) et Centrale, Casino et Valat (droite) 25

Figure 4.1-18: Implémentation des biocénoses dans le modèle (ANDROMEDE, 2009).....27

Figure 4.1-19: Localisation des profils d'extractions des valeurs de courant et de houle (plage de Renécros – figure de gauche) et plages Centrale, Casino et Grand Valat (figure de droite).....27

Figure 4.1-20 – Position des points de prélèvements (SEMANTIC TS, 2022).....28

Figure 4.8-21 : Planches de hauteurs de houle - vue globale – conditions fréquentes SO (Hs=0.75m, Tp=5.5s, Zs=0.6m) 31

Figure 4.8-22 : Planches de hauteurs de houle - vues rapprochées – conditions fréquentes SO 31

Figure 4.8-23 : Planches de hauteurs de houle - vue globale – conditions fréquentes SUD (Hs=0.75m, Tp=5.5s, Zs=0.6m) 32

Figure 4.8-24 : Planches de hauteurs de houle – vues rapprochées – conditions fréquentes SUD 32

Figure 4.8-25 : Planches de hauteurs de houle - vue globale – condition SUD-SUD EST (Hs=0.75m, Tp=5.5s, Zs=0.6m) ..33

Figure 4.8-26 : Planches de hauteurs de houle – vues rapprochées – conditions SUD-SUD EST.....33

Figure 4.8-27: Courants générés par une houle fréquente de secteur SO (vue globale).....36

Figure 4.8-28: Courants générés par une houle fréquente de secteur SO (vues rapprochées).....36

Figure 4.8-29: Courants générés par une houle fréquente de secteur S (vue globale).....37

Figure 4.8-30: Courants générés par une houle fréquente de secteur S (vues rapprochées) 37

Figure 4.8-31 : Courants générés par une houle fréquente de secteur SSE (vue globale).....38

Figure 4.8-32: Courants générés par une houle fréquente de secteur SSE (vues rapprochées).....38

Figure 4.10-33: Evolutions bathymétriques modélisées (durée 24h): houle fréquente de SO.....39

Figure 4.10-34: Evolutions bathymétriques modélisées (durée 24h): houle fréquente de S 40

Figure 4.10-35 – Evolutions bathymétriques modélisées (durée 24h) : houle fréquente de SSE 40

Figure 7-36 : Extrêmes d'états de mer pour les secteurs Sud, SSO, SO et OSO 44

Figure 7-37 : Probabilités d'occurrences conjointes entre Hm0 et Dirp.....45

Figure 7-38 : Probabilités d'occurrences conjointes entre Hm0 et Tp 45

Figure 7-39 : Probabilités d'occurrences conjointes entre Hm0 et Dirp.....46

Table des Tableaux

Tableau 2-1 : Liste des données de bathymétrie disponibles.....24

Tableau 2-2: Conditions metéo-océaniques (modélisation des houles d'incidence SO - 225°N) 26

Tableau 2-3: Conditions metéo-océaniques (modélisation des houles d'incidence S - 180°N et SSE- 150°N).....26

Tableau 2-4 : Granulométrie des échantillons de sédiment pour les 4 plages d'intérêt (Valat – VA ; Casino CA ; Centrale CE et Renécros RE) 28

1. Contexte de l'étude

1.1. Le site

L'étude concerne le littoral de Bandol, et notamment les plages listées sur la Figure 1-1.

Figure 1-1: Localisation des plages étudiées : plage de Renécros, plage centrale, plage du Casino et plage du Grand Valat

1.2. Objectifs de la mission

L'objectif général de cette étude est de mieux comprendre les conditions hydrodynamiques et la dynamique sédimentaire sur les secteurs identifiés comme potentiellement à risque le long des plages de Bandol, afin de déterminer la vulnérabilité des plages vis-à-vis du risque d'érosion littorale, et la faisabilité de travaux de protection du littoral (notamment rechargement de plage, mise en place d'ouvrages transversaux et/ou longitudinaux…).

En complément de l'analyse des données topo-bathymétriques mises à jour dans le cadre de la présente étude (topographie par levé drone photogrammétrique et profils bathymétriques, cette étude s'appuie sur la construction d'un modèle hydrosédimentaire 2D (codes de la suite Telemac) afin d'étudier les tendances de houle, de courantologie et de transport sédimentaire en fonction de plusieurs conditions metéo-océaniques représentatives.

Ce rapport se décompose ainsi de la façon suivante :

- *Etude météo-océanique et sélection des conditions représentatives ;*
- *Diagnostic du littoral :*
  - *Analyse historique de l'évolution du trait de côte et des profils topo-bathymétriques*
- *Etude de la dynamique sédimentaire :*
  - *Modélisation de la propagation des houles ;*
  - *Modélisation courantologique ;*
  - *Modélisation sédimentologique ;*
  - *Conclusions sur la dynamique sédimentaire.*

2. Recueil des données

2.1. Statistiques de houle au large de Bandol

Les analyses statistiques sur des séries temporelles (houle, vent, niveaux marins, etc.) permettent de déterminer les valeurs extrêmes des paramètres en fonction de la période de retour pour chaque secteur directionnel. La base de données développée par GLOBOCEAN au large de la baie de Bandol est utilisée (GLOBOCEAN, 2022 [1])

La modélisation des états de mer du large a été effectuée avec l'utilisation du modèle de vagues WaveWatch III, qui est un modèle d'états de mer en points de grille de 3ème génération. Il calcule les champs de vagues par génération, propagation et dissipation des états de mer sur les zones de simulations concernées, en utilisant les champs de vent en entrées (forçage atmosphérique). Ces données issues de modèles ont été validées par rapport à des mesures d'états de mer par satellite.

Une analyse statistique des conditions de houle a été réalisée à partir des séries continues d'états de mer reconstituées par le modèle WaveWatchIII sur un point de référence au large de *Bandol,* dénommé 'PT1' (*Figure 2-2*). Voir roses de houle en *Figure 2-3* et statistiques extrêmes directionnelles et probabilités d'occurrences conjointes en Annexe 1.

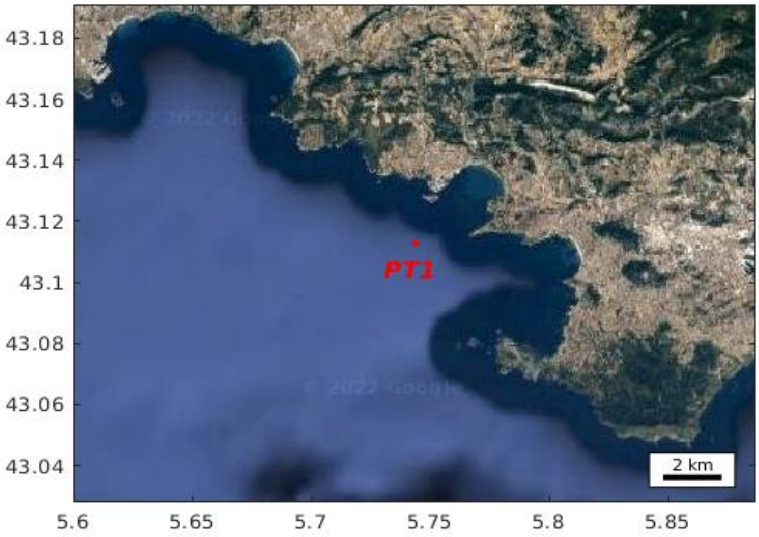


Figure 2-2 – Localisation du point d'extraction des états de mer au large

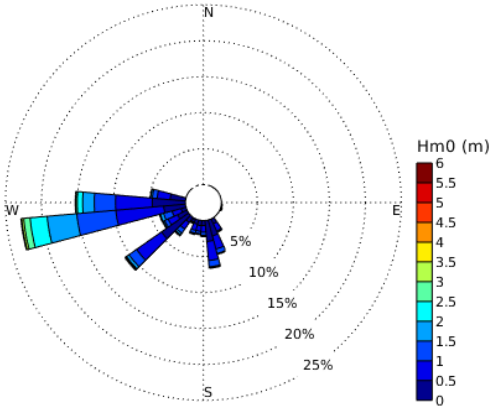


Figure 2-3 – Rose de houle sur le point 'PT1' à l'ouvert de la baie de Bandol

3. Diagnostic du littoral

3.1. Analyse historique de l'évolution du trait de côte et des profils topo-bathymétriques

3.1.1. Méthodologie

3.1.1.1. Evolution du trait de côte

Le module DSAS (Digitial Shoreline Analysis System) du logiciel d'ArcGIS a été utilisé pour le calcul de l'évolution du trait de côte.

La méthodologie est présentée succinctement ci-dessus :

- Importation dans ArcGIS de 5 images avec géoréférencement pour les images les plus anciennes. Les dates retenues pour l'analyse sont les suivantes : 2006, 2011, 2014, 2017 et 2022 ;
- Digitalisation des traits côte et importation de ces derniers dans le module Digital Shoreline Analysis System (DSAS). Les traits de côte obtenus sont consultables Figure 3.1.2-4 à Figure 3.1.2-7 ;
- Création de transects perpendiculaires à une ligne de base. Ces transects vont intersecter les différents traits de côte et permettre de mesurer la variation des taux d'évolution des traits de côte le long de ces transects. L'espacement entre chaque transect est de 2m ;
- Calcul automatique de taux d'évolution du trait de côte sur chacun des transects avec le module DSAS selon la méthode du LRR. LRR (Linear Regression Rate) indique la distance entre tous les traits de côte pour chaque transect (Unité : m) ;
- Analyse thématique sous un logiciel SIG afin de représenter les transects avec des couleurs et ainsi de mettre en évidence les secteurs de recul ou d'avancée du trait de côte.

3.1.1.2. Evolution des fonds (topo-bathymétrie)

Pour l'étude des mouvements sédimentaires des plages de Bandol, les jeux de données disponibles suivants ont été exploités :

- Modèle Numérique de Terrain de l'IGN-SHOM avec le produit L3D, 2015 [3] ;
- Levé drone et bathymétrie SEMANTIC TS, 2022 [4].

Un MNT a pu être généré pour les jeux de données de topographie de 2022 et ainsi permettre de réaliser un différentiel altimétrique par plage par rapport aux données du MNT LITO3D. Concernant la bathymétrie, le nombre restreint de profils levés par plage n'a pas pu permettre de générer un MNT (trop d'erreurs dues aux interpolations) ; l'analyse des changements bathymétriques est donc basée sur l'étude des changements le long des profils.

3.1.2. Résultats

3.1.2.1. Evolution du trait de côte

Les résultats d'évolution du trait de côte sont donnés Figure 3.1.2-4 à Figure 3.1.2-7 (méthode LRR) et montrent des différences spatiales importantes à la fois en fonction de la plage ainsi que du secteur considéré.

Les figures mettent en avant :

- Pour la plage Renécros (Figure 3.1.2-4) :
    - Un recul du trait de côte sur l'extrémité Nord (-0,2 à -0,4m/an) ;
    - Un trait de côte stable au centre de la plage ;
    - Une avancée sur la partie sud (+0,2 à +0,4) – les changements topo-bathymétriques permettront de valider l'hypothèse d'une rétention des sédiments vers le large par les herbiers)
- Pour la plage Centrale (Figure 3.1.2-5) :
    - Un trait de côte relativement stable (voire en légère avancée) sur l'ensemble de la plage ;
- Pour la plage du Casino (Figure 3.1.2-6) :
    - Un recul du trait de côte sur la partie Ouest (entre -0,2m/an et -1m/an) ;
    - Une avancée sur la partie Est (+0,1 à +0,4m/an) ;
- Pour la plage du Grand Valat (Figure 3.1.2-7) :
    - Un trait de côte alternant entre recul et avancée à l'ouest de l'épi ;
    - Un trait de côte en avancée généralisée à l'Est de l'épi (entre +0,4m/an et +1,4m/an) ;

A noter que certaines zones d'avancée de trait de côte sur le secteur ouest sont dues à des rechargements de plage. Les figures mettent en avant l'impact des ouvrages et des rechargements de plage.

Les résultats de l'étude d'évolution du trait de côte sont également à mettre en perspective avec les évolutions topo-bathymétriques traitées dans le chapitre suivant (3.1.2.2).

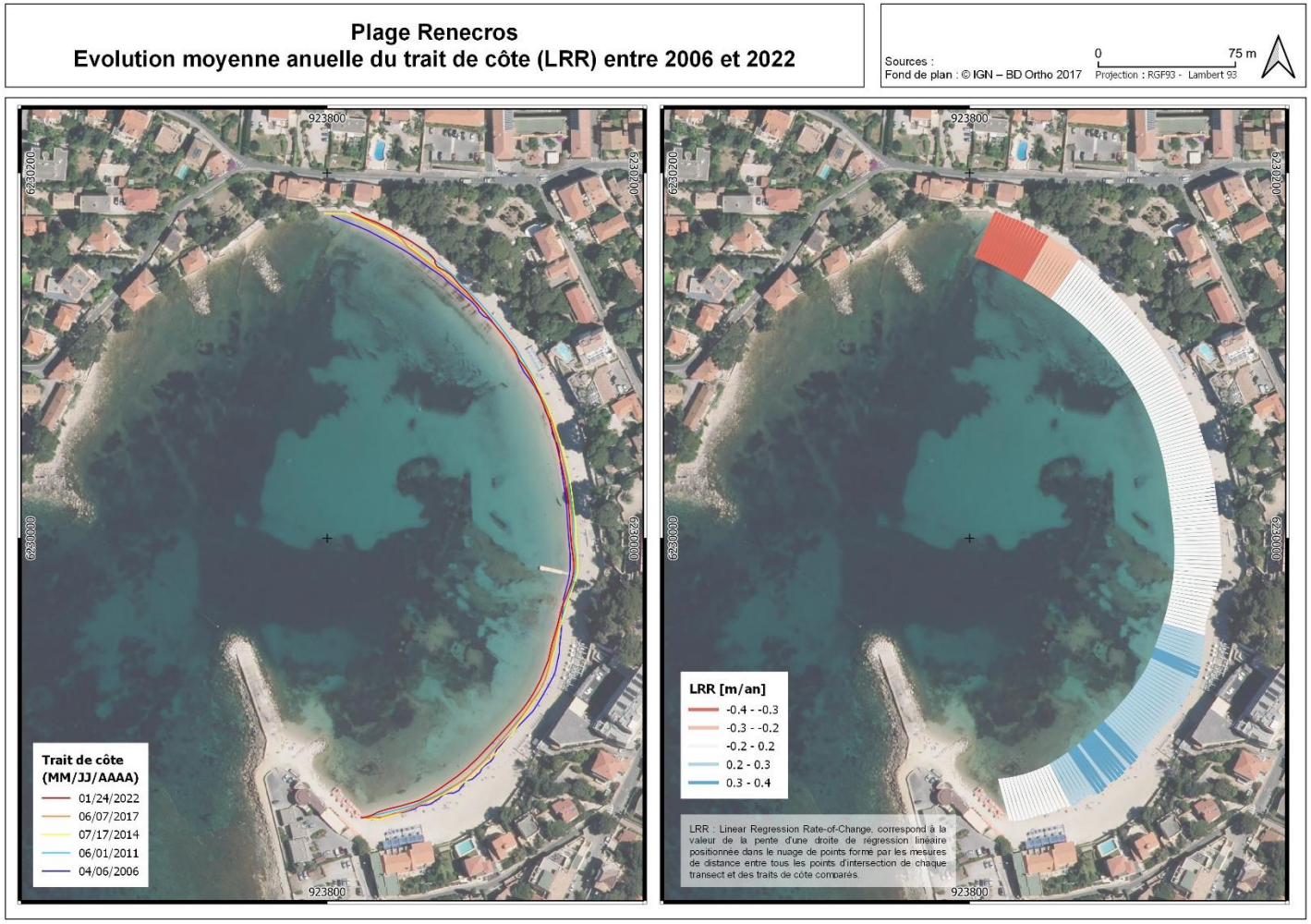


Figure 3.1.2-4: Position des traits de côte utilisés dans le cadre de l'analyse de l'évolution du trait de côte de la plage de Renécros et résultats de l'évolution entre 2006 et 2022 avec la méthode LRR (Taux de Régression Linéaire)

Figure 3.1.2-5: Position des traits de côte utilisés dans le cadre de l'analyse de l'évolution du trait de côte de la plage Centrale et résultats de l'évolution entre 2006 et 2022 avec la méthode LRR (Taux de Régression Linéaire)

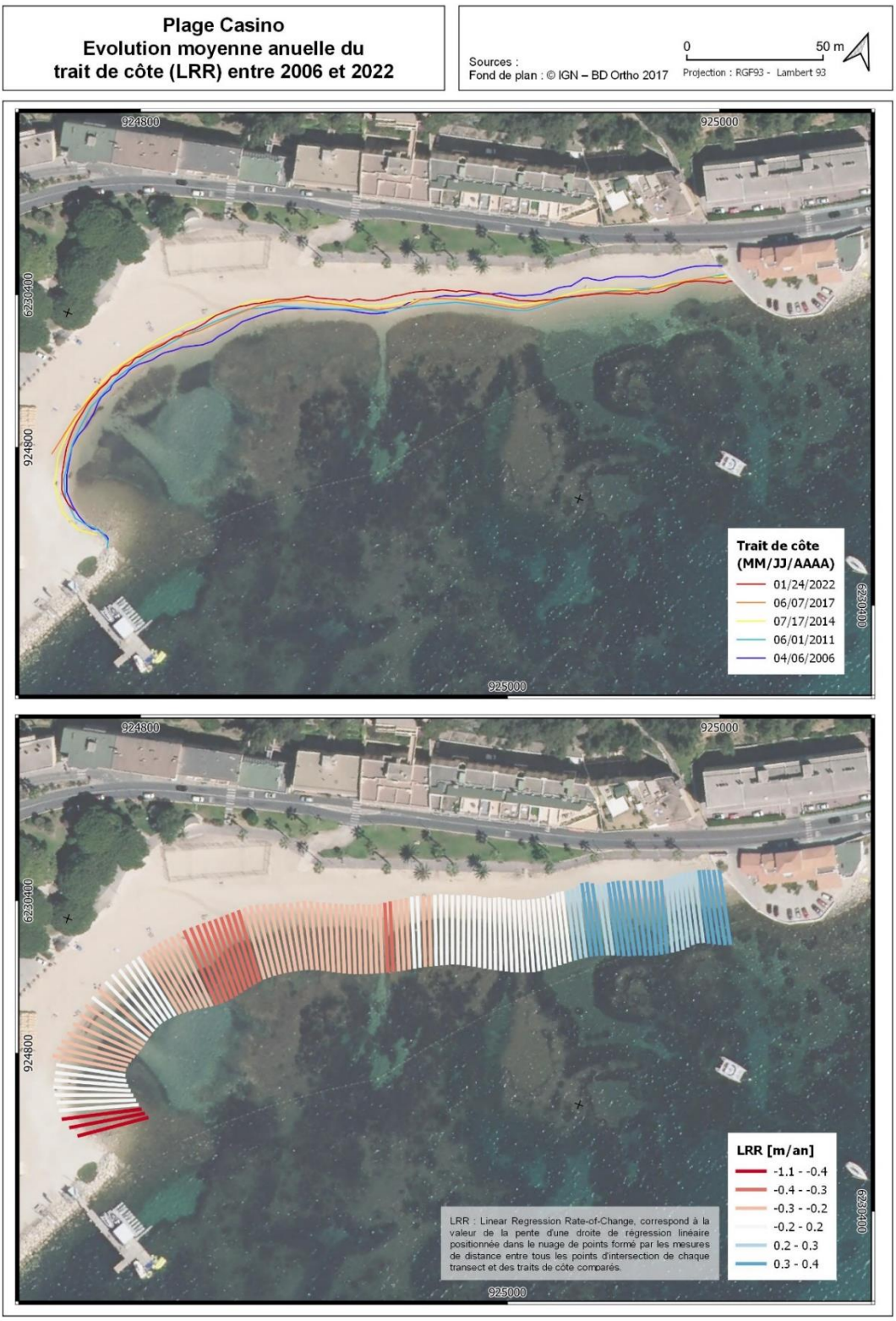


Figure 3.1.2-6: Position des traits de côte utilisés dans le cadre de l'analyse de l'évolution du trait de côte de la plage du Casino et résultats de l'évolution entre 2006 et 2022 avec la méthode LRR (Taux de Régression Linéaire)

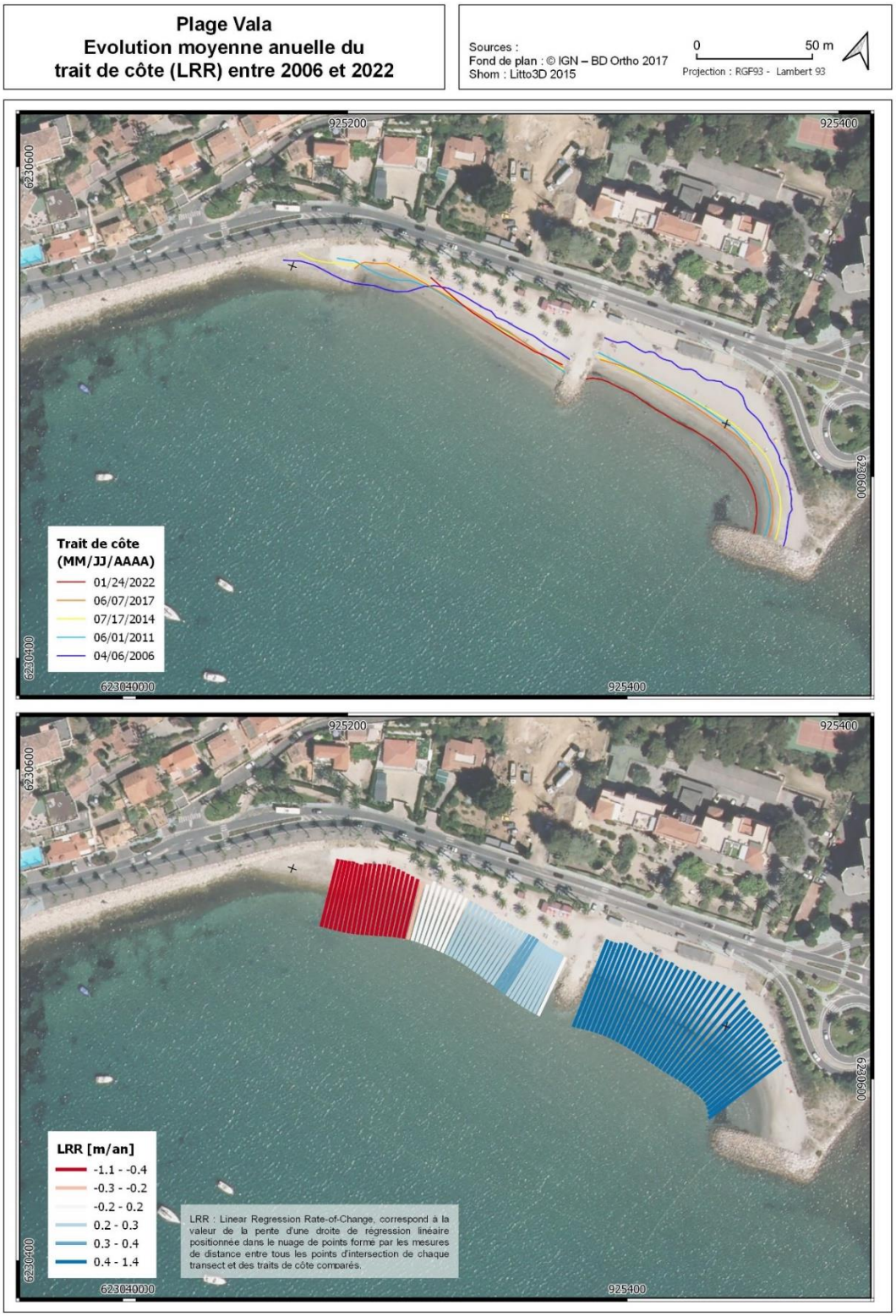


Figure 3.1.2-7: Position des traits de côte utilisés dans le cadre de l'analyse de l'évolution du trait de côte de la plage du Grand Valat et résultats de l'évolution entre 2006 et 2022 avec la méthode LRR (Taux de Régression Linéaire)

3.1.2.2. Evolution des fonds (topo-bathymétrie)

Les MNT terrestres générés et les différentiels sont donnés Figure 3.1.2-8 à Figure 3.1.2-11 et les profils topo-bathymétriques Figure 3.1.2-12 à Figure 3.1.2-15.

Les figures mettent en avant :

- Pour la plage Renécros (Figure 3.1.2-8 et Figure 3.1.2-12) :
    - Un abaissement des fonds du haut de plage sur le secteur Nord (-0,1 à -0,3m)
    - Des dépôts généralisés en haut de plage en partie Sud (+0,2 à +0,4m)
    - Des dépôts au centre de la baie sur le banc de sable (profils 1 et 3)
    - Des dépôts en limite d'herbier (profil 2)
- Pour la plage Centrale (Figure 3.1.2-9 et Figure 3.1.2-13) :
    - Une plage relativement stable avec un léger abaissement généralisé du terrain naturel (TN) de l'ensemble de la plage ;
    - Un profil de plage relativement stable (profils 1 et 2) avec une tendance à l'érosion (abaissement du TN) en haut de plage et des dépôts dans les petits fonds (0,1 à 0,2m) en particulier sur le profil 2
- Pour la plage du Casino (Figure 3.1.2-10 et Figure 3.1.2-14) :
    - Un abaissement sur la partie centrale (entre -0,2m et -0,5m) ;
    - Des tendances d'érosion de la zone de swash, puis dépôts dans les petits fonds (isobathe -2,5m)
    - Un profil relativement stable avec une tendance à l'érosion en du haut de plage et des dépôts dans les petits fonds (0,1 à 0,2m) en particulier sur le profil 2 et 3
- Pour la plage du Grand Valat (Figure 3.1.2-11 et Figure 3.1.2-15) :
    - L'abaissement du TN au droit de l'ouvrage longitudinal de protection de talus en enrochements ;
    - Des zones d'abaissement de la plage à l'ouest de l'épi ;
    - Des dépôts à l'Est de l'épi en lien avec les observations d'avancée du trait de côte.
    - Un profil en équilibre avec des gains notamment sur le profil ouest proche de l'ouvrage en enrochements (profil 3)
    - Des évolutions en haut de plage dues aux variabilités saisonnières et date des levés (présence d'une berme en 2022 par exemple)

Remarque : attention à l'interprétation des changements bathymétriques le long des profils (et en particulier au niveau des herbiers) car les jeux de données ont été mesurées par des techniques différentes (données bathymétriques issues de sonar mono-faisceau alors que LITTO3D est issu d'un levé LIDAR). Il est donc important de croiser ces résultats avec les résultats de l'étude de vitalité des herbiers [4].

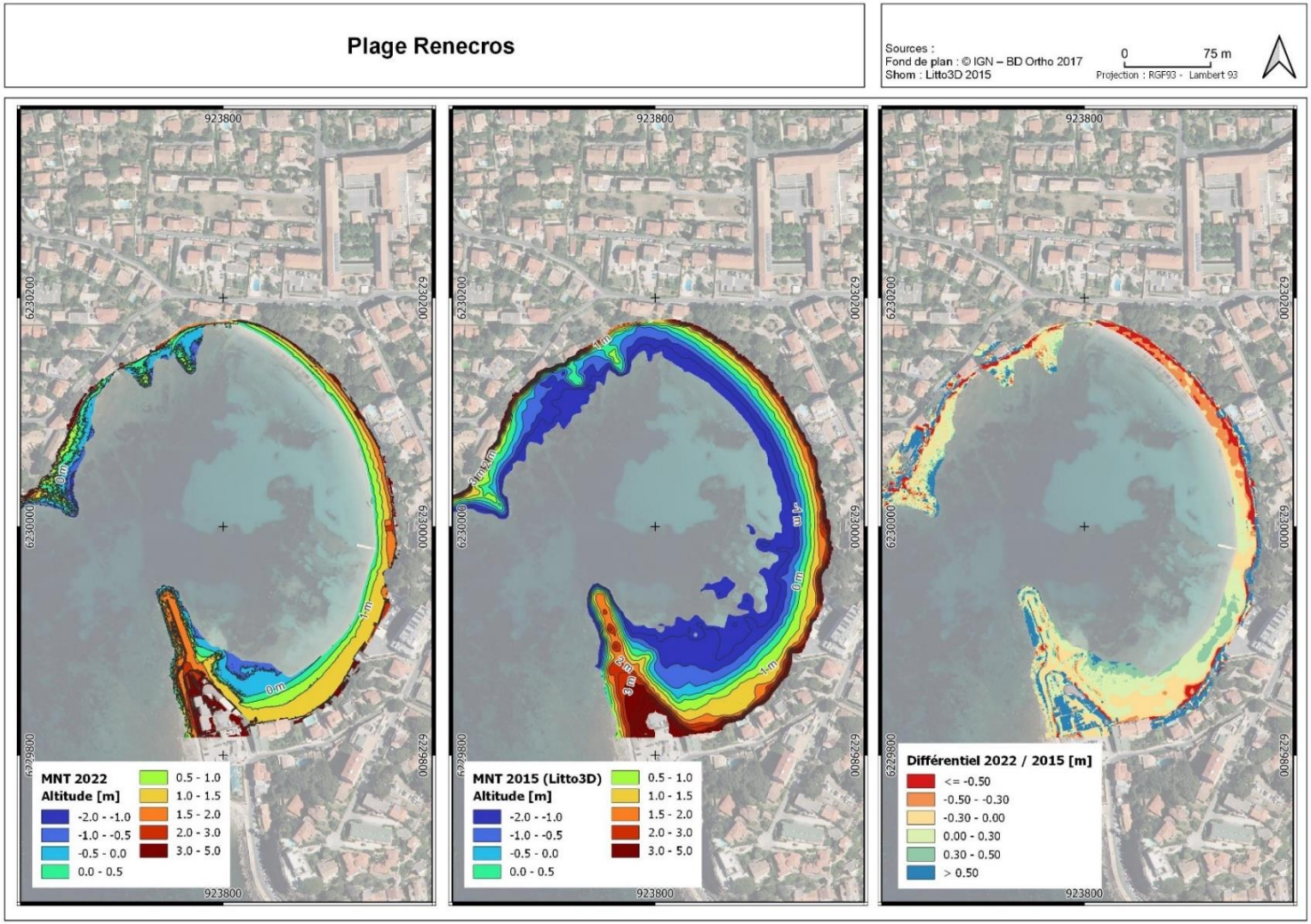


Figure 3.1.2-8: Plage de Renécros: MNT 2022 (gauche), MNT LITTO3D (centre) et différentiel (droite)

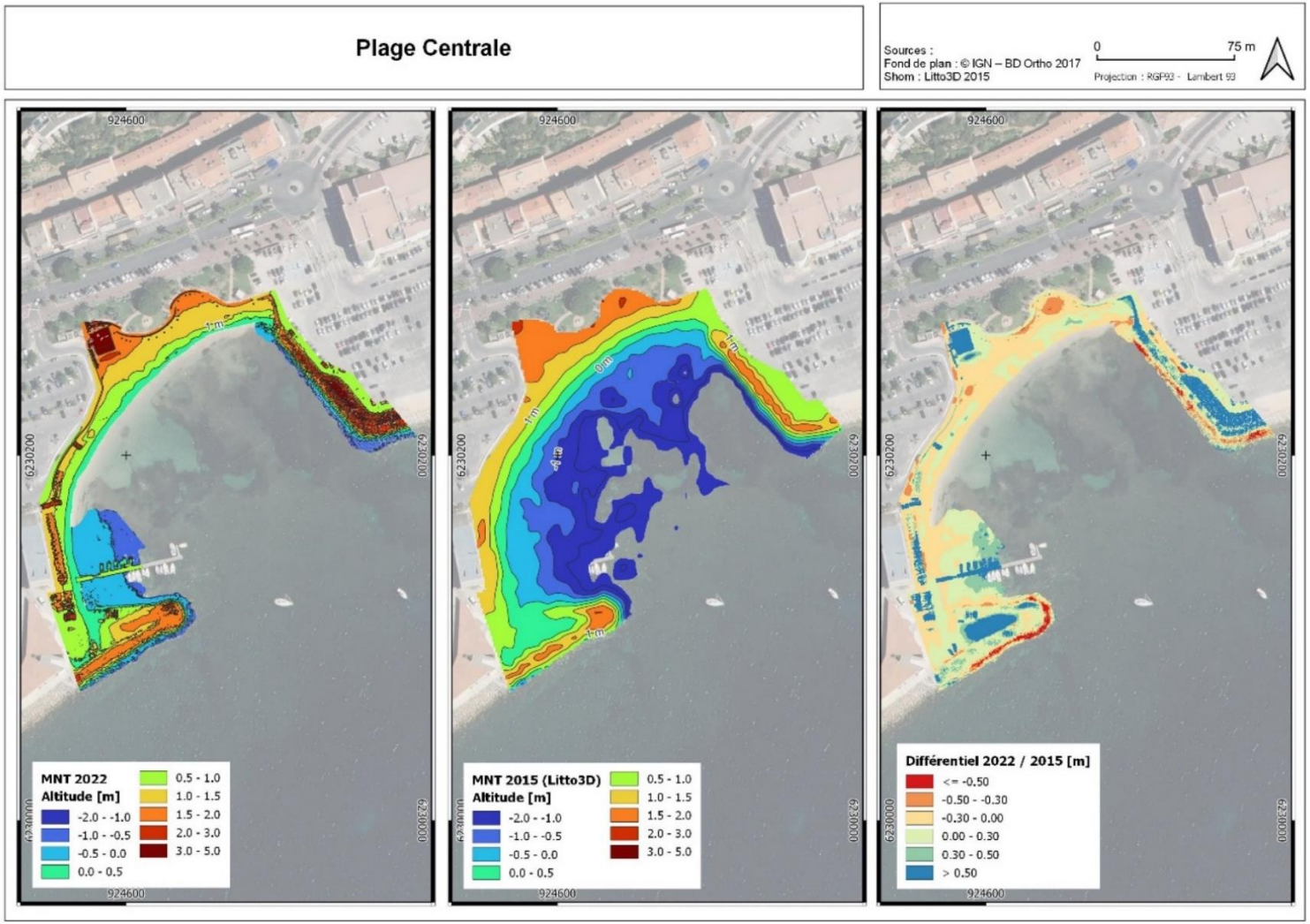


Figure 3.1.2-9: Plage centrale: MNT 2022 (gauche), MNT LITTO3D (centre) et différentiel (droite)

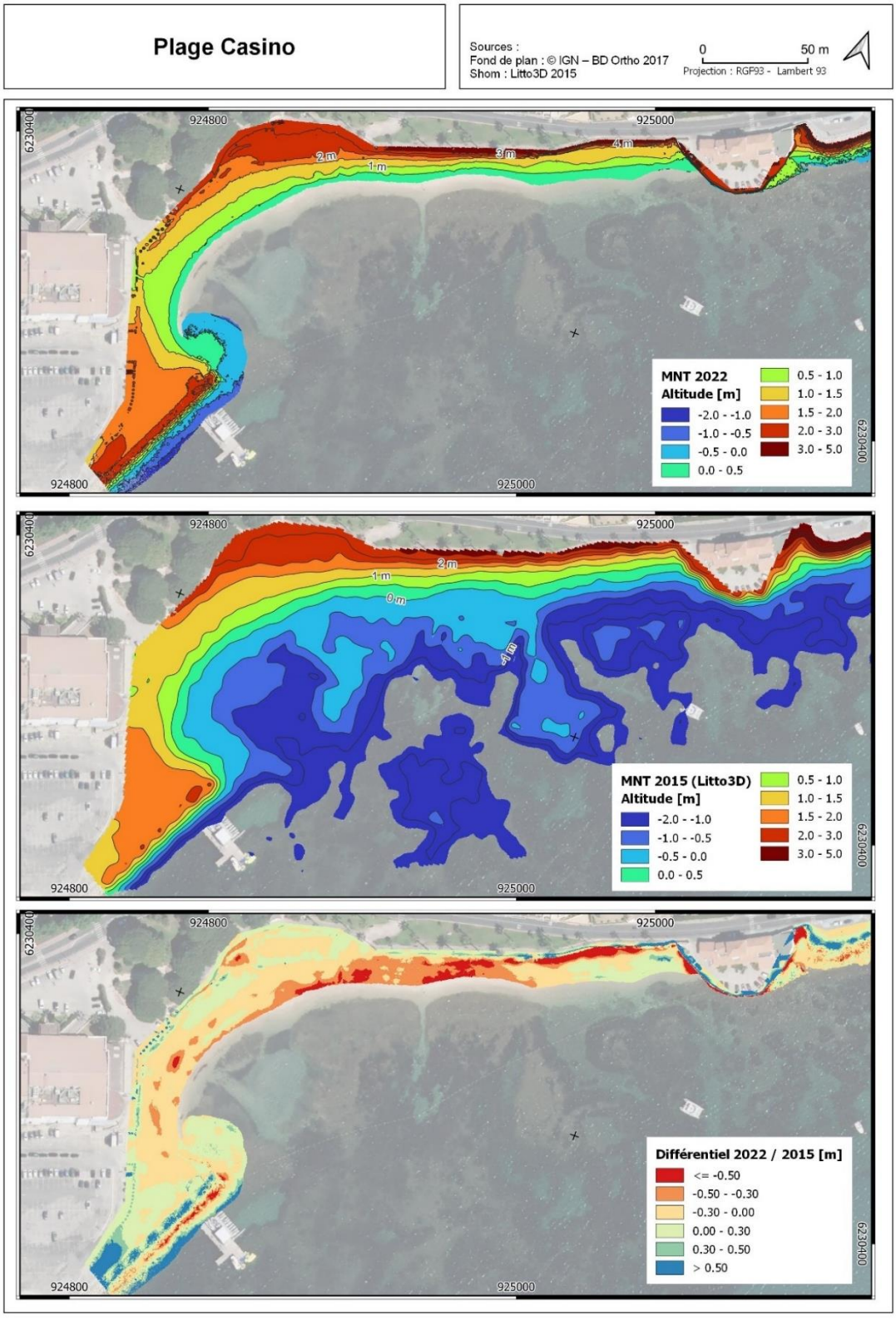


Figure 3.1.2-10: Plage du Casino: MNT 2022 (gauche), MNT LITTO3D (centre) et différentiel (droite)

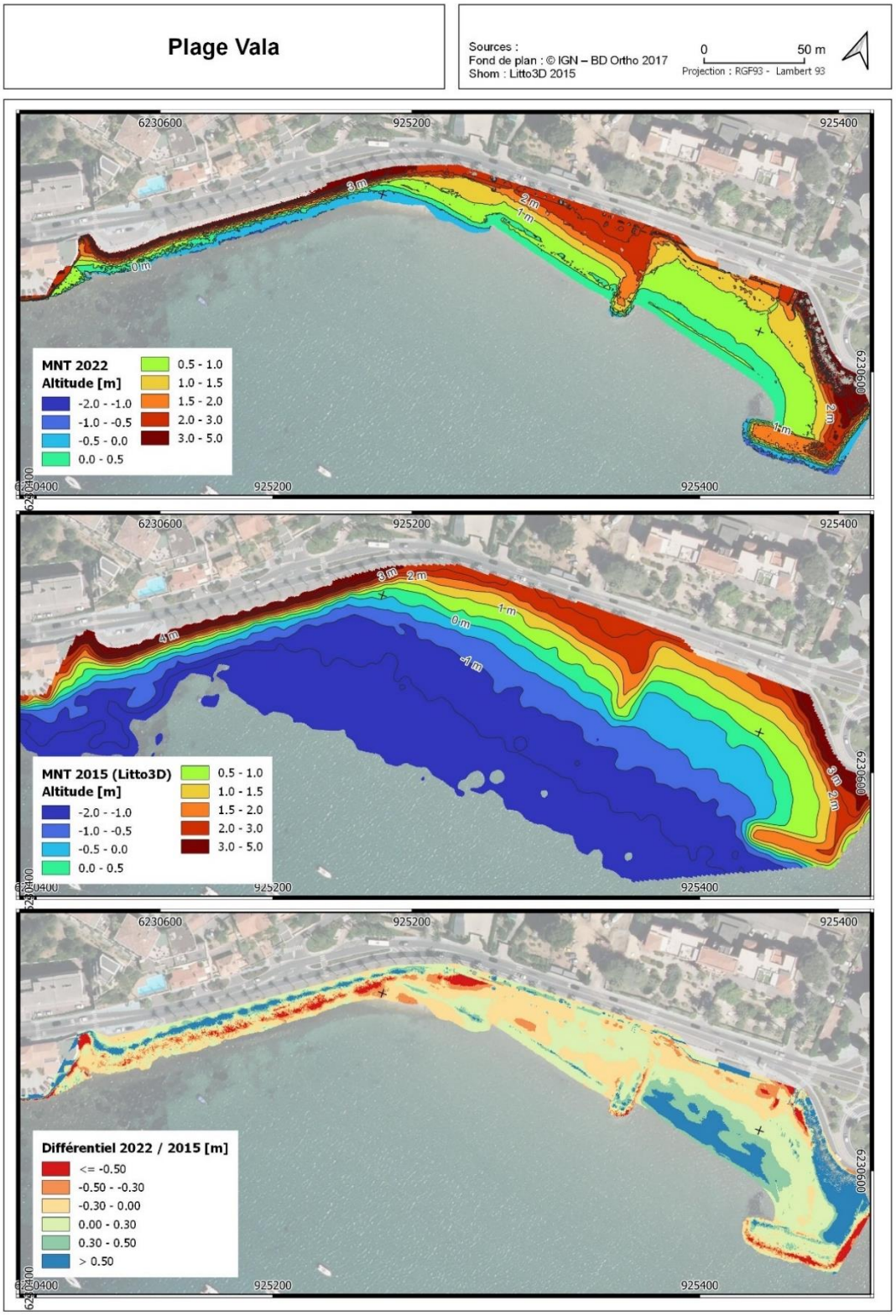


Figure 3.1.2-11: Plage du Grand Valat: MNT 2022 (gauche), MNT LITTO3D (centre) et différentiel (droite)

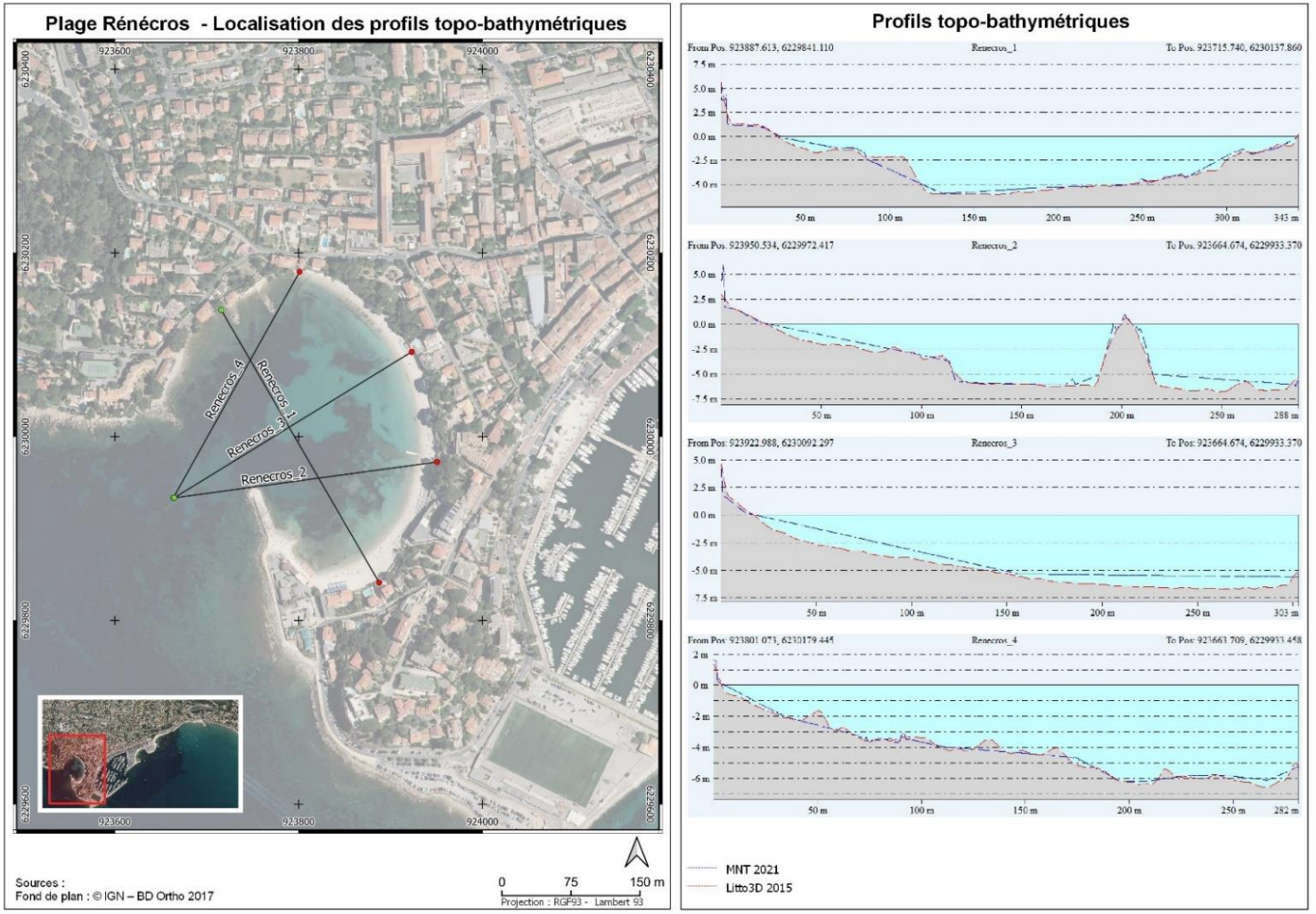


Figure 3.1.2-12: Evolution des profils topo-bathymétriques – plage de Renécros

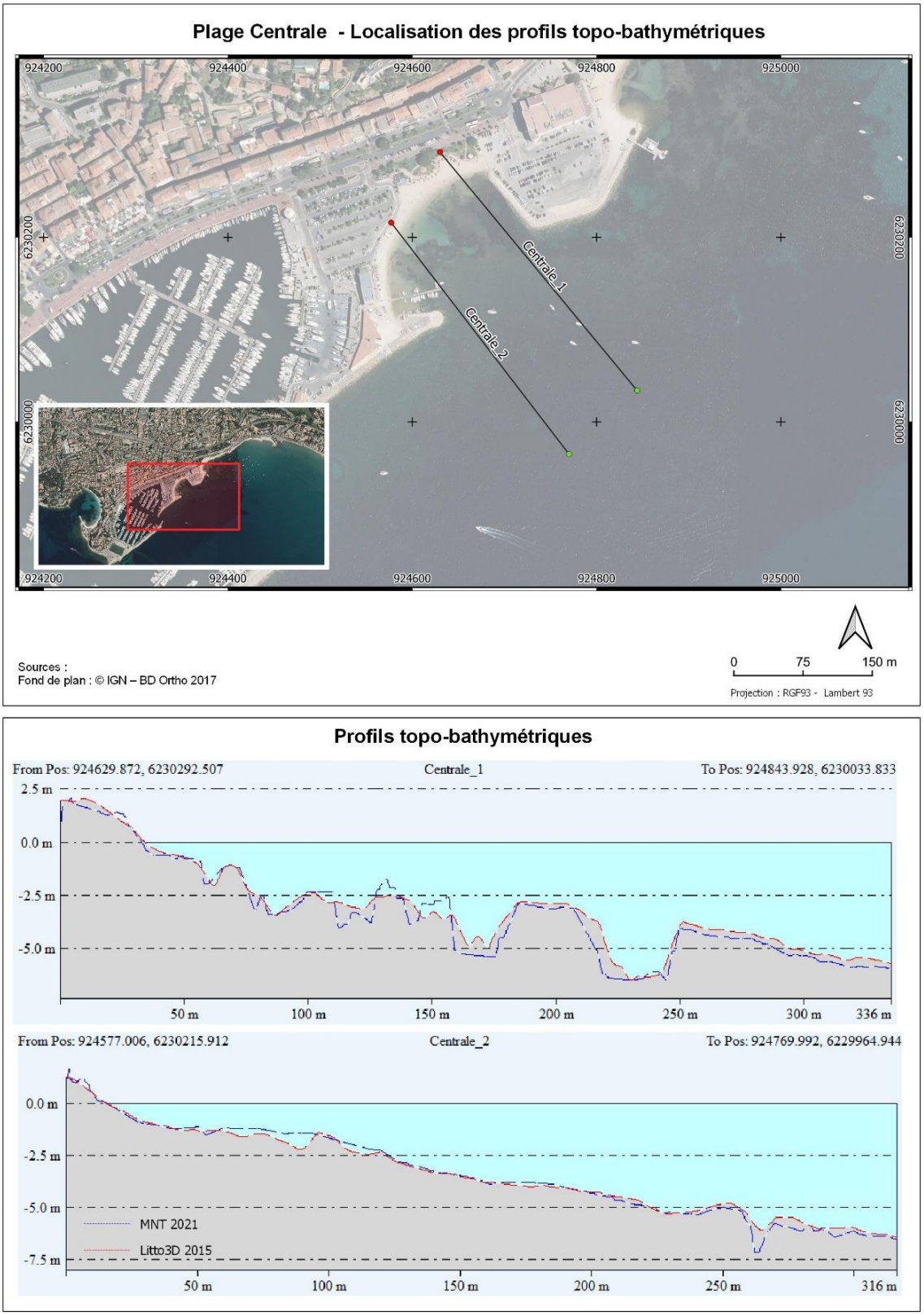


Figure 3.1.2-13: Evolution des profils topo-bathymétriques – plage Centrale

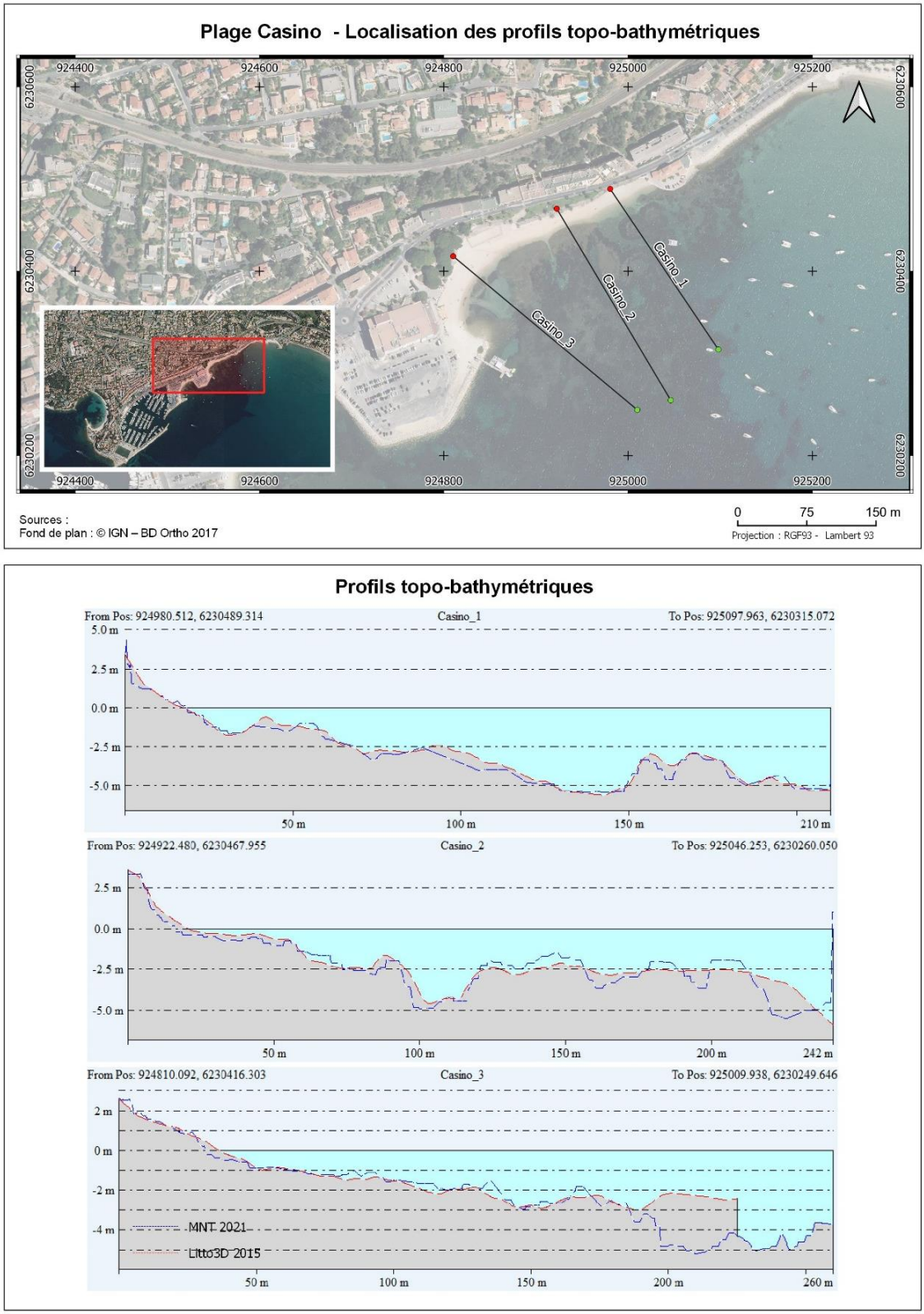


Figure 3.1.2-14: Evolution des profils topo-bathymétriques – plage du Casino

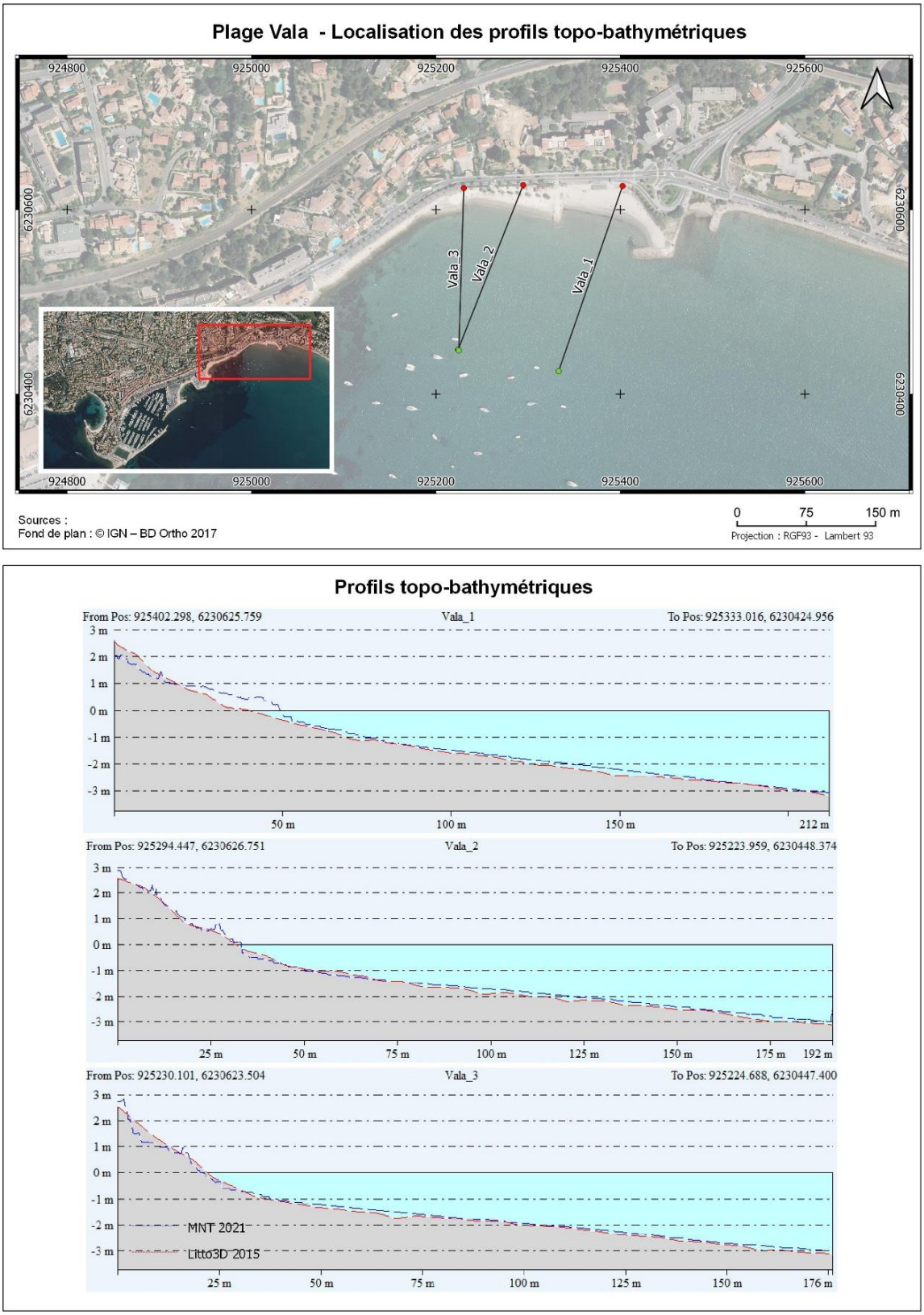


Figure 3.1.2-15: Evolution des profils topo-bathymétriques – plage Valat

4. Etude de la dynamique sédimentaire – modélisations de houle et courantologie en fonction d'événements types

4.1. Stratégie de modélisation

Le système de modélisation TELEMAC (www.opentelemac.com) est un code open source développé à l'origine par EDF R&D. Ce modèle est aujourd'hui largement diffusé dans la communauté internationale et devenu un code de référence.

Le système TELEMAC repose sur la méthode des éléments finis. Il est donc parfaitement adapté pour représenter finement les géométries complexes des systèmes littoraux.

Le couplage de plusieurs modèles a été mis en œuvre pour représenter les interactions complexes entre la houle, les courants et les sédiments qui gouvernent l'évolution des plages en zone côtière.

Pour cette étude, les codes suivants ont été utilisés :

- TOMAWAC pour la propagation de la houle ;
- TELEMAC 2D pour la courantologie ;
- SISYPHE pour le transport de sédiments et les évolutions bathymétriques qui en résultent.

4.2. Présentation des logiciels de modélisation

4.2.1. Modèle de houle TOMAWAC

Le code TOMAWAC est un code de propagation de la houle depuis le large jusqu'en zone côtière. Ce modèle dit de 'troisième génération' repose sur une représentation spectrale de la houle.

TOMAWAC a été ici utilisé en mode non-couplé (fond stationnaire, pas de prise en compte des courants) pour calculer les contraintes de radiation et les contraintes de frottement dues à la houle qui seront imposées dans les modèles hydrosédimentaires.

Les processus pris en compte sont les suivants :

- Réfraction bathymétrique ;
- Dissipation d'énergie par déferlement, frottement sur le fond ;
- Dissipation par moutonnement ;
- Interaction non linéaire (triades et quadruplets interactions).
- Les hypothèses de modélisation sont les suivantes :
- Spectre JONSWAP ;
- Pas de temps Dt= 2s ;
- Discrétisation en 36 directions ;
- 20 fréquences (fmin= 0.05 Hz, r = 1.1) ;
- Vent et courant non pris en compte ;
- Niveau d'eau moyen constant (correspondant à la surcote).

4.2.2. Modèle courantologique (TELEMAC-2D)

Le code Telemac-2D résout les équations de St Venant par la méthode des caractéristiques et avec prise en compte des bancs découvrants. La prise en compte dans les termes sources des contraintes de radiation permet de représenter l'effet de la houle (courants générés par la houle et surcôte). L'effet du frottement sur le fond et de la contrainte exercée par le vent en surface sont pris en compte par le biais de coefficients de frottement quadratiques. Les paramètres hydrodynamiques sont les suivants :

- Dt= 1s ;
- Chainage avec Tomawac ;
- Prise en compte des effets du vent ;
- Frottement de Nikuradse (ks= 5 cm) ;
- Prise en compte des évolutions du fond (couplage interne avec Sisyphe).

4.2.3. Modèle sédimentologique (SISYPHE)

Le code Sisyphe calcule le transport sédimentaire par le biais d'une formule empirique (ici formule de Bijker) en fonction des variables hydrodynamiques et du sédiment (diamètre et densité). Le modèle résout l'équation d'Exner pour calculer les évolutions du fond (avec prise en compte des fonds rigides) par une méthode similaire au traitement des bancs découvrants.

- Courant et houle imposés par les modèles hydrodynamiques ;
- Couplage avec Telemac, chainage avec Tomawac ;
- Diamètre constant (1 seule classe) : d_{50} = 0,40 mm ;
- Fonds rigides en dehors des plages de sable ;
- Chainage avec Tomawac : Effet de la houle sur le transport solide ;
- Formule de Bijker ;
- Correction pour frottement de peau (k_{sp}=3 d50).

4.2.4. Méthodologie de couplage de codes

Le couplage triple entre les 3 codes (houle, courant et sédiments) étant trop coûteux en temps de calcul, nous avons utilisé la méthodologie simplifiée suivante :

1/ Calcul TOMAWAC (découplé)

Le niveau d'eau est imposé et considéré comme constant. Les contraintes de radiation et les variables de la houle (hauteurs significative, période de pic) sont sauvegardées dans le fichier de résultats. Les résultats obtenus au dernier pas de temps seront utilisés comme données d'entrée des modèles de courant et de transport solide.

2/ Couplage interne TELEMAC 2D- SISYPHE

Les deux codes sont couplés et échangent à chaque période de couplage (ici tous les 10 pas de temps) des variables hydrosédimentaires.

Le code TELEMAC 2D calcule la hauteur d'eau et les courants qui sont envoyés à SISYPHE ;

Le code SISYPHE calcule les évolutions du fond ; le niveau bathymétrique est réactualisé dans TELEMAC.

4.3. Mise en place du modèle

4.3.1. Emprise, maillage et bathymétrie

Le domaine de modélisation et le maillage sont représentés sur la Figure 4.1-16. Le modèle s'étend sur une dizaine de km d'extension de la plage de la Coudoulière à l'Est jusqu'à l'Ile Rousse à l'Ouest. Le maillage est composé de 118 658 éléments triangulaires pour 60 931 nœuds avec une taille de maille variable de plus de 250 m le long de la frontière maritime à moins de 5m dans la baie de Bandol et comprise entre 1 et 2m au niveau de la plage.

La frontière au large du modèle coïncide avec la localisation du point d'entrée de houle au large (point PT1, sortie WW3). L'emprise permet également de prendre en compte les éléments bathymétriques qui pourraient influencer la propagation de houles.

Le maillage a été interpolé sur un assemblage de bathymétries composé à partir de plusieurs jeux de données.

Tableau 4.1-1 : Liste des données de bathymétrie disponibles

Type données	***Source***	***Couverture/résolution***	***Remarques***
HOMONIM	SHOM	0 – 2800 m Résolution 100m	Disponible PBMA et NM
LITO3D	SHOM	Bande littorale Résolution 1m	Levés de 2015
Topographie par photogrammétrie	SEMANTIC TS	Plage émergée Résolution 0,2m	Levés de 2022

Les Figure 4.1-16 et Figure 4.1-17 montrent la bathymétrie au niveau de la baie de Bandol. Ces figures illustrent l'irrégularité de la bathymétrie dans cette zone.

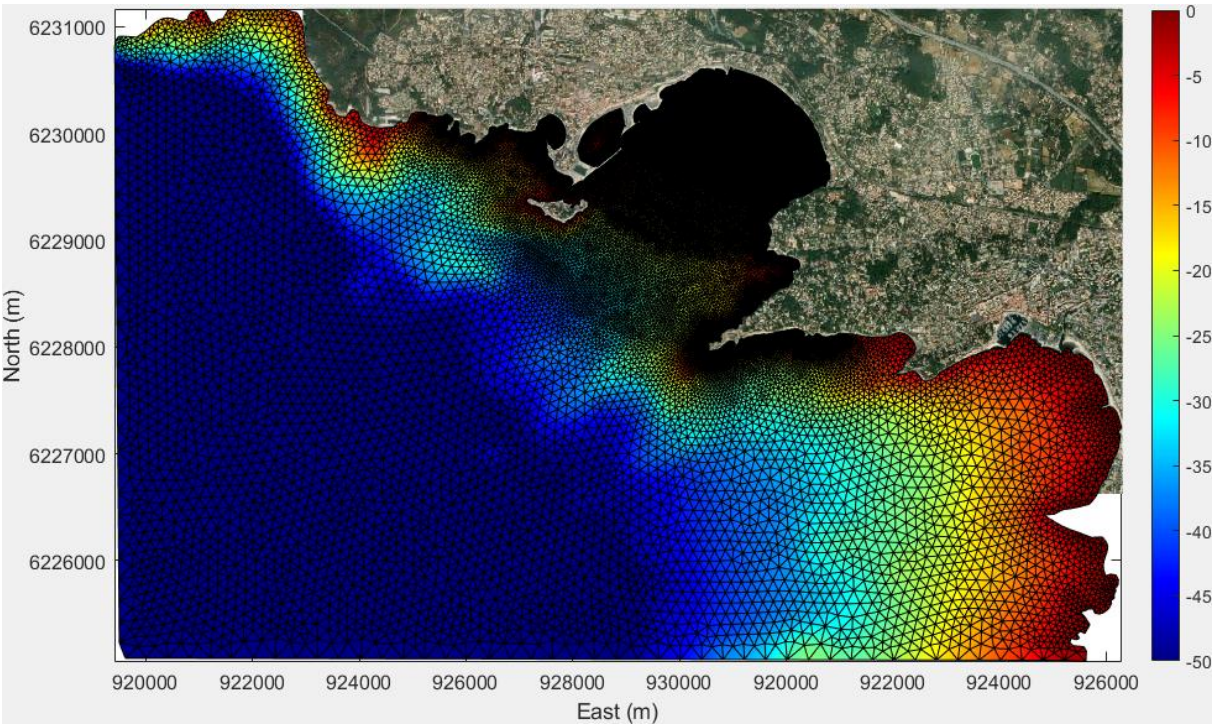


Figure 4.1-16 : Emprise horizontale et maillage

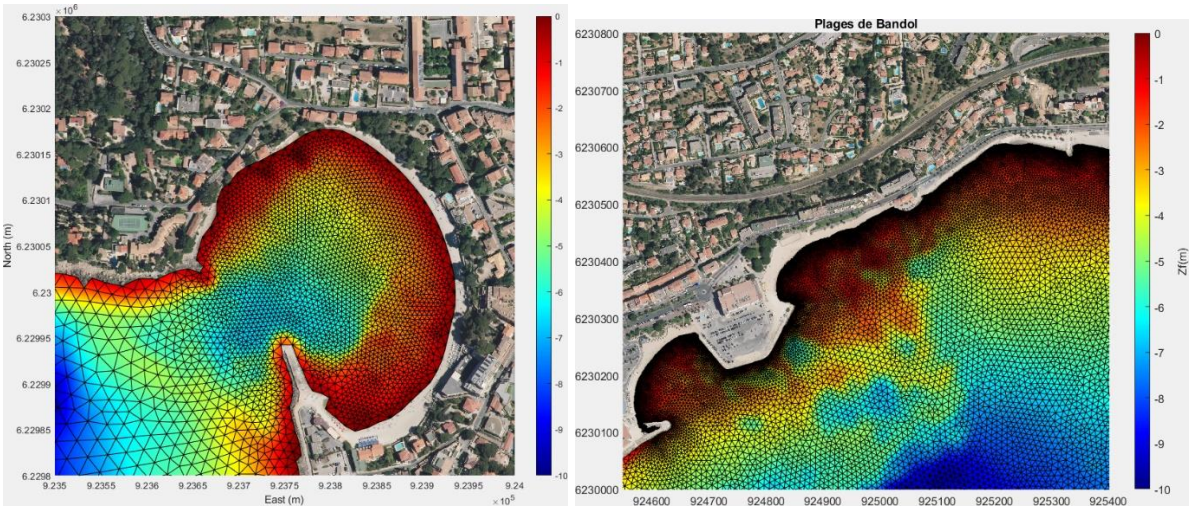


Figure 4.1-17 – Maillages Plages Renécros (gauche) et Centrale, Casino et Valat (droite)

4.4. Conditions limites de forçage et cas simulés

Les conditions extrêmes sur une période de retour de 1 (T1) et usuelles (tables d'occurrences conjointes Hm0/Dirp, Hm0/Tp, et Tp/Dirp) d'états de mer au large de la baie de Bandol, pour forçage du modèle hydro-sédimentaire sont issues de l'étude GLOBOCEAN [1], voir Annexe 1. Les conditions retenues pour estimer les risques d'érosion sont les tempêtes fréquentes et annuelles. Pour la modélisation des houles provenant du secteur SO, les états de mer extrêmes au large du secteur 3 - (entre 220°N et 240°N) ont été sélectionnés (§2.1). Pour la

modélisation des secteurs S et SSE, les états de mer extrêmes du secteur 1 (entre 180°N et 200°N) ont été sélectionnés.

Les cas suivants ont été simulés :

Périodes de retour (RP) :	***3 secteurs directionnels :***
Tempête fréquente (<T1) ;	SO (225°N) ;
T = 1an ;	Sud (180°N) ;
	SSE (157°N)

L'ensemble des plages du littoral de Bandol est abrité des houles de secteur Est. La plage Renécros situées à l'Ouest de Bandol est bien abritée des coups de vents de Sud et Sud Sud-Est, mais reçoit pleinement l'énergie des houles de SO. A l'inverse, les plages de la Baie de Bandol (Centrale, Casino et Valat) sont bien abritées des coups de mer du SSE mais plus exposées aux houles de secteur Sud (voire SO pour les plages du Grand Valat).

Les conditions metéo-océaniques retenues comme conditions de forçage du modèle (2 périodes de retour x 3 incidences au total) sont synthétisées dans le Tableau 4.1-2 et Tableau 4.1-3. Les conditions imposées concernent la houle au large (hauteur significative H_s et période de pic T_p), le niveau moyen Z_s. Le forçage du vent n'a pas été pris en compte dans les simulations, étant donné qu'il est négligeable par rapport au forçage dû à la houle en zone littorale. Les secteurs Nord et Est n'ont pas été modélisés car la baie de Bandol est largement abritée des coups d'Est.

Pour chaque condition, le niveau d'eau moyen Z_s imposé correspond à un niveau fréquent auquel sont ajoutées les valeurs de surcote calculées dans le guide du CETMEF pour le Port de Toulon [2].

Tableau 4.1-2: Conditions metéo-océaniques (modélisation des houles d'incidence SO - 225°N)

Conditions	H_s (m)	T_p (s)	Z_s (m, NGF)
Fréquent	0.75	5.5	0.6
Annuelle (T1)	3.10	8.9	0.7

Tableau 4.1-3: Conditions metéo-océaniques (modélisation des houles d'incidence S - 180°N et SSE- 150°N)

Conditions	H_s (m)	T_p (s)	Z_s (m)
Fréquent	0.75	5.5	0.6

Annuelle (T1)	2.40	8.3	0.7

4.5. Fonds rigides / biocénoses

Les fonds rigides ont été implémentés dans le modèle. Les biocénoses sont extraites des données Andromède [6, 7].

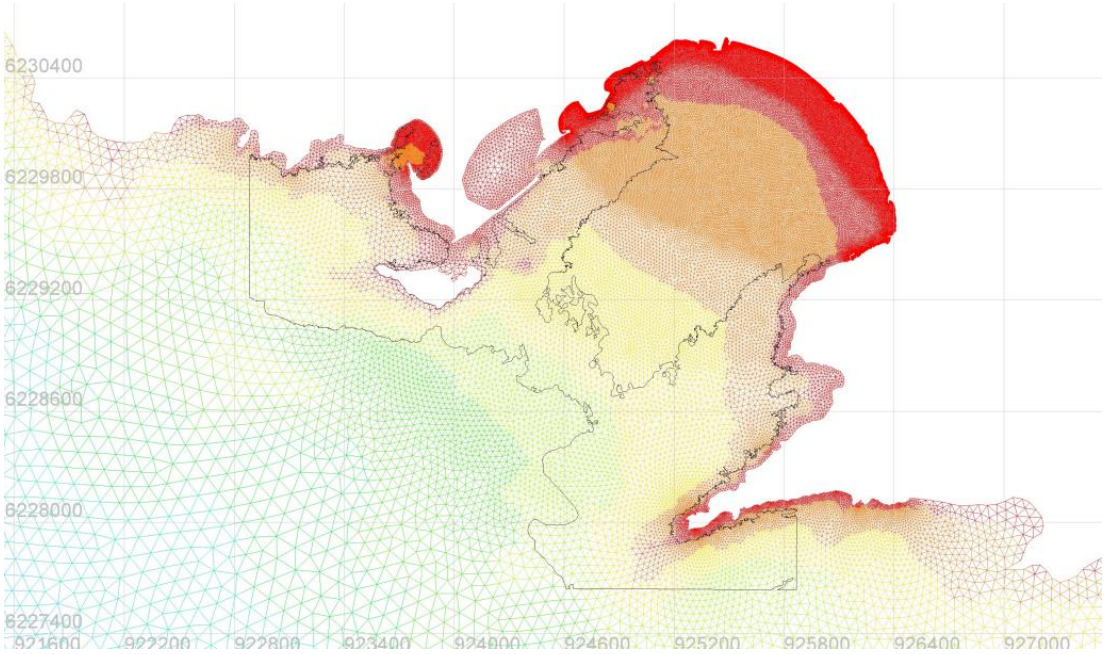


Figure 4.1-18: Implémentation des biocénoses dans le modèle (ANDROMEDE, 2009)

4.6. Sorties des modèles

En complément des planches de hauteurs de houle et vitesses de courant, les valeurs numériques seront extraites le long des profils suivants.

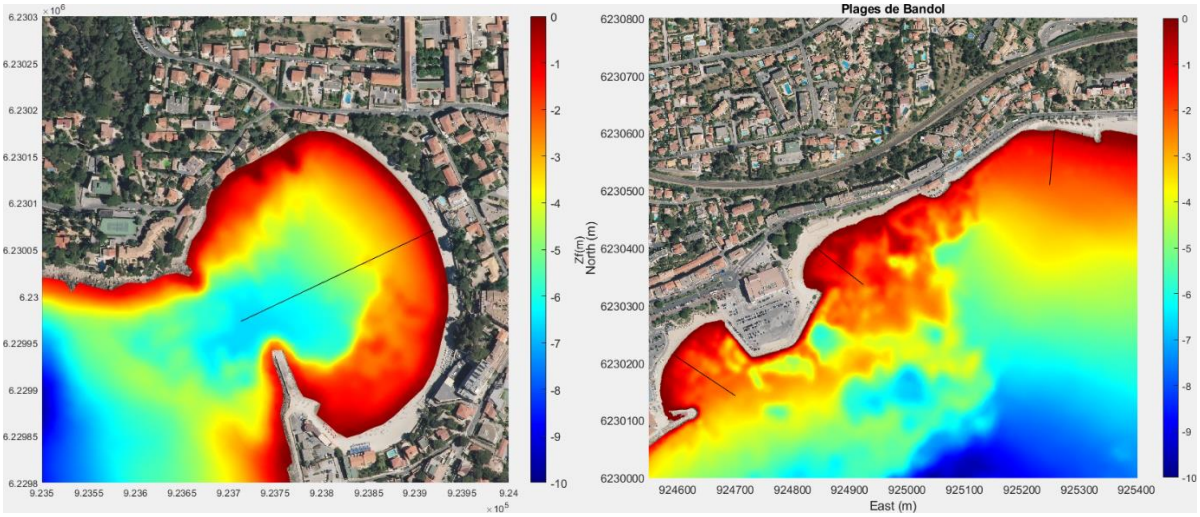


Figure 4.1-19: Localisation des profils d'extractions des valeurs de courant et de houle (plage de Renécros – figure de gauche) et plages Centrale, Casino et Grand Valat (figure de droite)

4.7. Prélèvements sédimentologiques

Des prélèvements de sédiments ont été réalisés en janvier 2022 par la société SEMANTIC TS au niveau de la baie de Bandol et analysés par le laboratoire EUROFINS [4 et 5].

La position des points de prélèvements est donnée Figure 4.1-20.

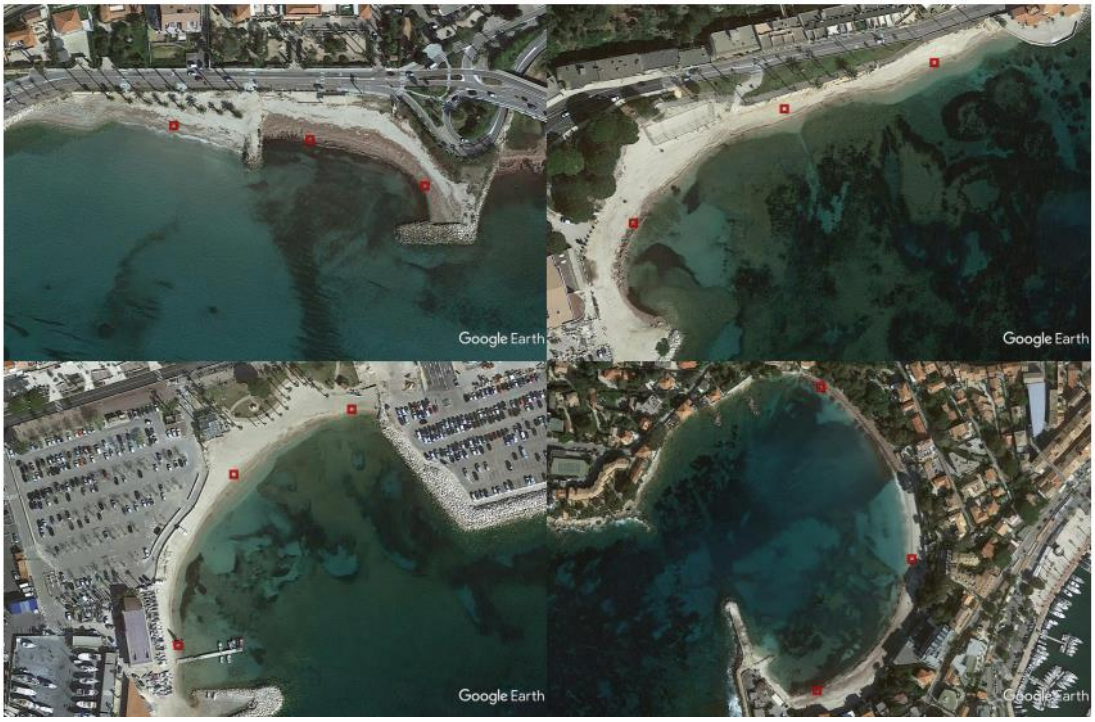


Figure 4.1-20 – Position des points de prélèvements (SEMANTIC TS, 2022)

Le diamètre moyen des sédiments a été mesuré sur les différents échantillons et les résultats sont synthétisés dans le Tableau 4.1-4:

Tableau 4.1-4 : Granulométrie des échantillons de sédiment pour les 4 plages d'intérêt (Valat – VA ; Casino CA ; Centrale CE et Renécros RE)

	VA1	VA2	CA1	CA2	CE1	CE2	RE1	RE2
d_{50} (mm)	0.278	0.166	0.549	0.511	0.456	0.719	0.403	0.371
D moyen (mm)	0.324	0.174	0.586	0.549	0.501	0.793	0.462	0.400

Les mesures montrent que le sédiment est composé de sables moyens de taille variable comprise entre 0.37 et 0.40 pour les plages à l'Ouest (sable moyen). Les sédiments les plus grossiers (compris entre 0.45 et 0.71 mm) ont été prélevés sur la plage Centrale.

Les résultats des analyses suggèrent donc une diminution de la granulométrie de sédiments d'ouest en est sur les plages de la baie de Bandol (D50 compris entre 0,17 et 0,28mm sur la plage du Valat vs. D50 entre 0,51 et 0,55 et entre 0,45 et 0,71 pour Casino et Centrale, respectivement). On peut donc imaginer qu'une partie des sédiments fins des plages Casino et Centrale ait été transporté par combinaison de transport transversal et longitudinal vers la plage du Valat et la partie Est de la Baie de Bandol.

Pour les calculs sédimentologiques (cf. Chapitre 4.10), une seule classe de sable fin d_{50} =0.40mm représentative des sédiments relativement fins à moyens (Diamètre moyen CA1, CA2, CE1, RE1 et RE2) a été utilisée, afin d'être conservatif et ainsi maximiser les risques d'érosion et dépôt. Les évolutions calculées en partie 5 peuvent donc être surestimées ; mais comme dans toute étude sédimentologique, il s'agit de tendances.

Ces plages sont toutes soumises à l'érosion littorale (en fonction des conditions) et font l'objet de projet de rechargement. Sur la plage Centrale, Casino et Valat, on note toutefois la présence de banquettes de posidonies dans la zone de swash. La plage de Renécros est quant à elle caractérisée par des sédiments grossiers notamment sur la partie Nord-Ouest (galets, petits enrochements). En règle générale, une granulométrie plus importante est synonyme de conditions hydrodynamiques plus énergétiques. Les modélisations numériques mettront en avant que cette zone est particulièrement agitée.

4.8. Résultats du modèle hydrodynamique

4.8.1. Résultats modélisation de la houle - TOMAWAC

Les résultats du modèle de propagation de houle sont présentés dans cette section.

Les planches représentant les champs de hauteurs pour une houle fréquente d'incidence SUD OUEST (225°N), SUD (180°N) et SSE (157.5°N) de période de retour inférieure à des conditions annuelles (T1) sont présentées sur la Figure 4.8-21 à Figure 4.8-26. Les planches de propagation pour les conditions annuelles (T1) sont présentées en Annexe.

Les résultats mettent en avant :

- Des différences spatiales en fonction du secteur directionnel, dues à la configuration complexe de la côte :
    - La plage de Renécros particulièrement impactée par les houles de SO et relativement protégée des houles de S et SSE
    - A l'inverse les plages Centrale, Casino et Grand Valat particulièrement exposées aux houles d'incidence Sud et dans une moindre mesure SO et SSE
- Des hauteurs de houles relativement non uniformes le long du littoral (impact des haut fonds, herbiers, platiers, etc.) ;
- La houle au large subit une atténuation par dissipation sur les fonds lorsqu'elle pénètre dans la baie de Bandol et Renécros.

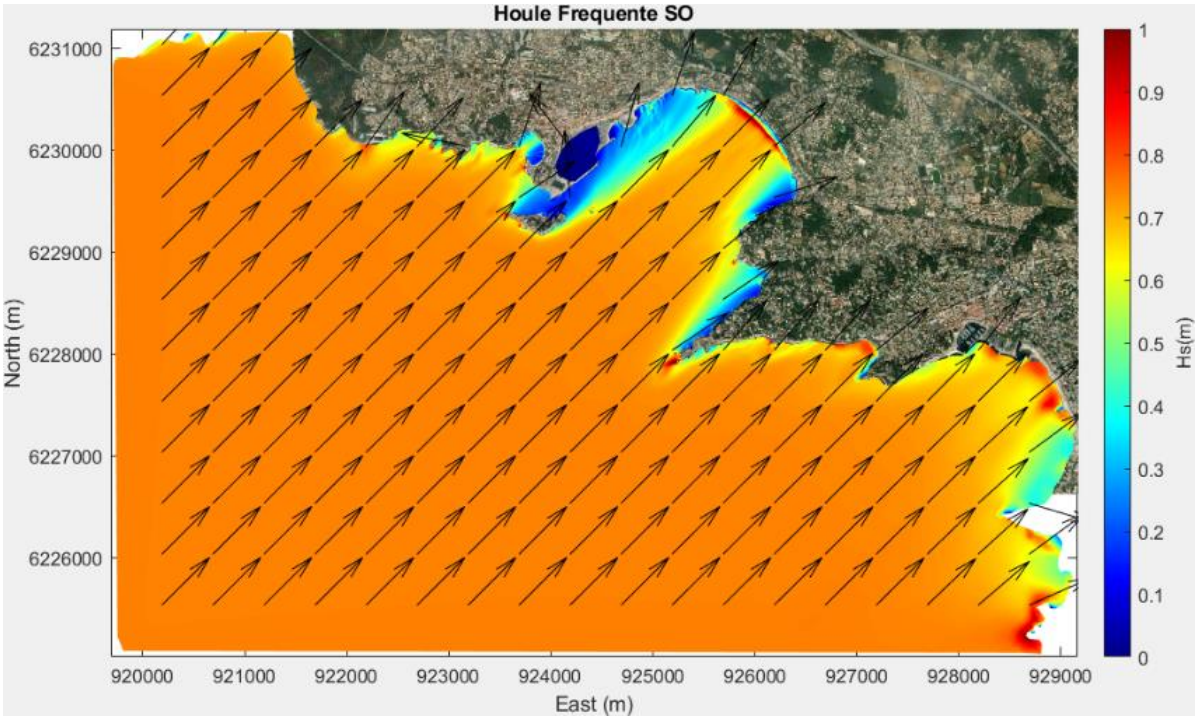


Figure 4.8-21 : Planches de hauteurs de houle - vue globale – conditions fréquentes SO (Hs=0.75m, Tp=5.5s, Zs=0.6m)

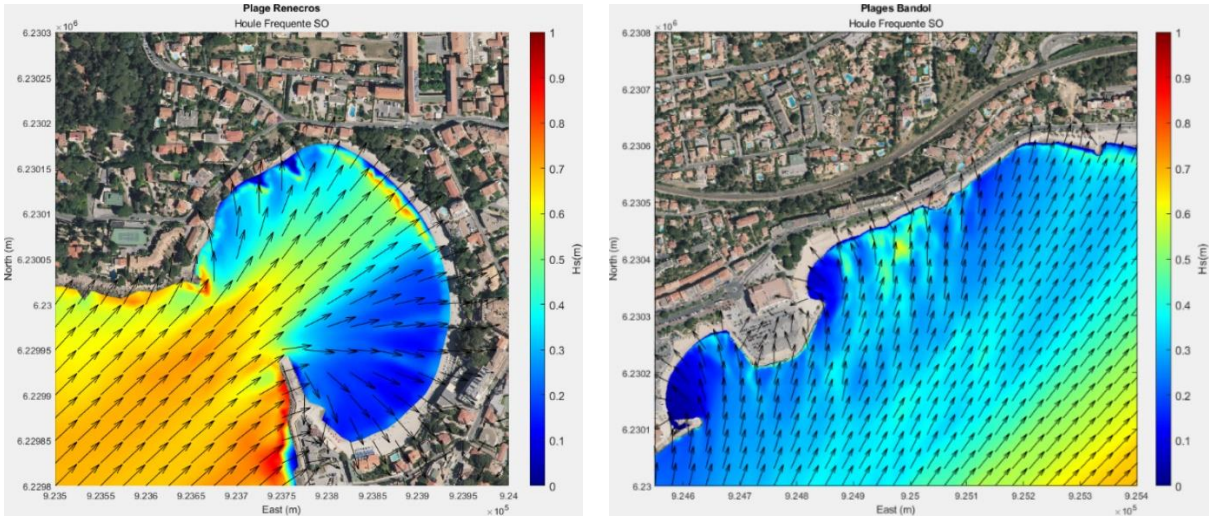


Figure 4.8-22 : Planches de hauteurs de houle - vues rapprochées – conditions fréquentes SO

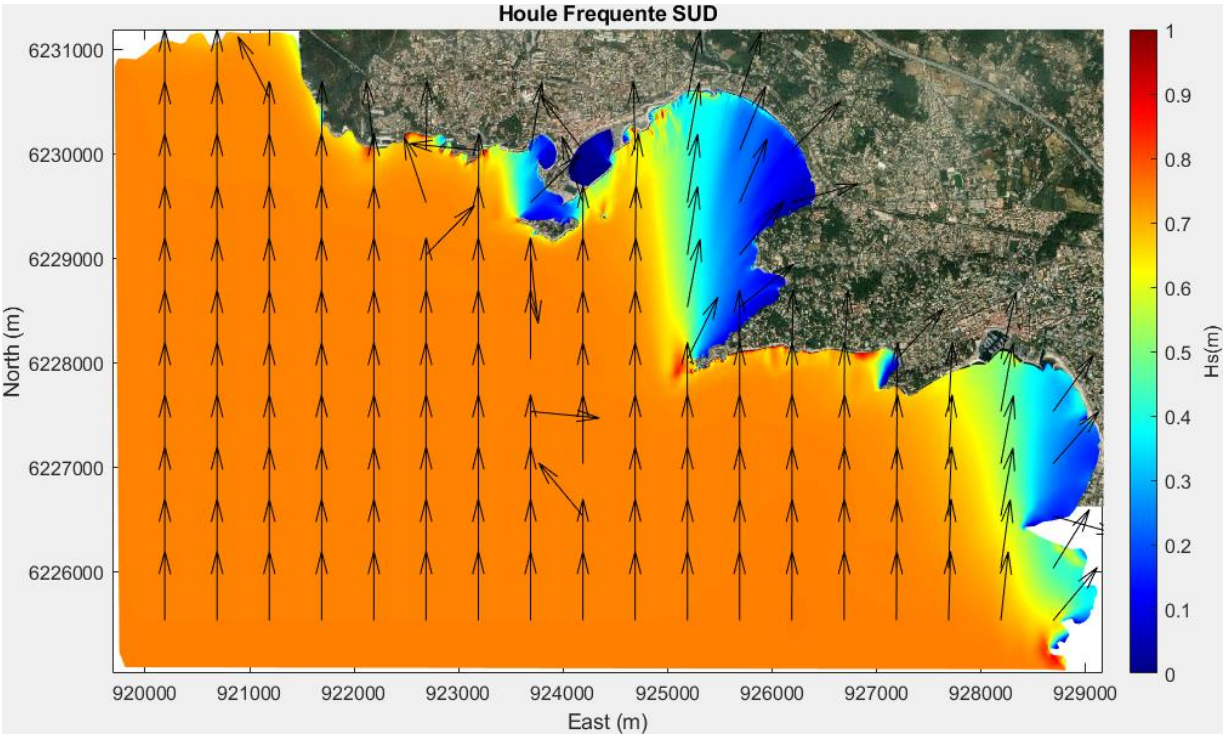


Figure 4.8-23 : Planches de hauteurs de houle - vue globale – conditions fréquentes SUD (Hs=0.75m, Tp=5.5s, Zs=0.6m)

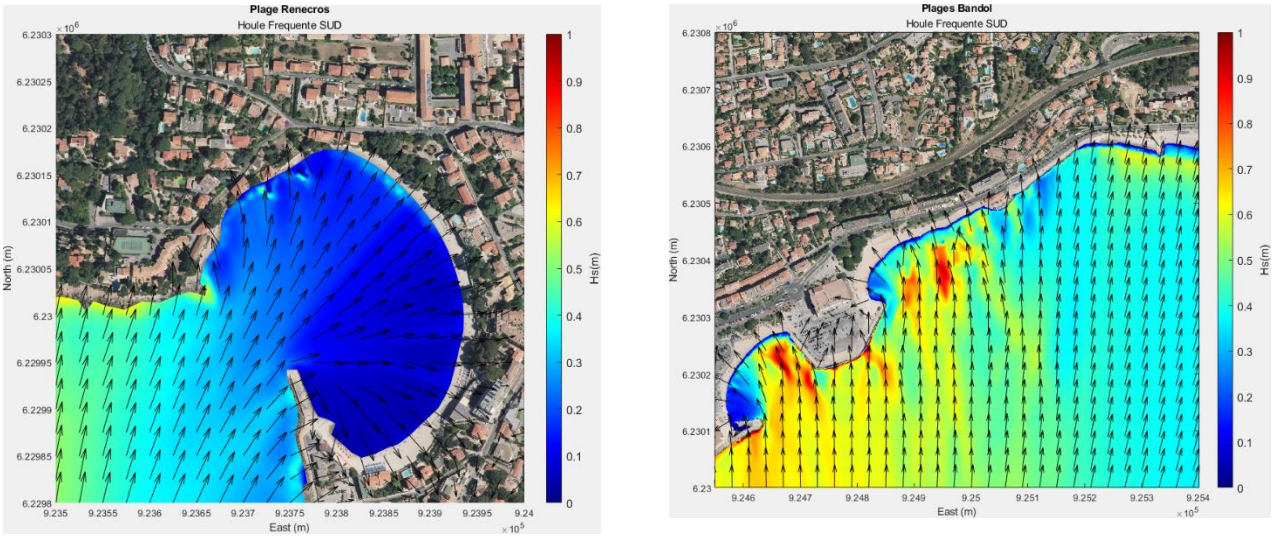


Figure 4.8-24 : Planches de hauteurs de houle – vues rapprochées – conditions fréquentes SUD

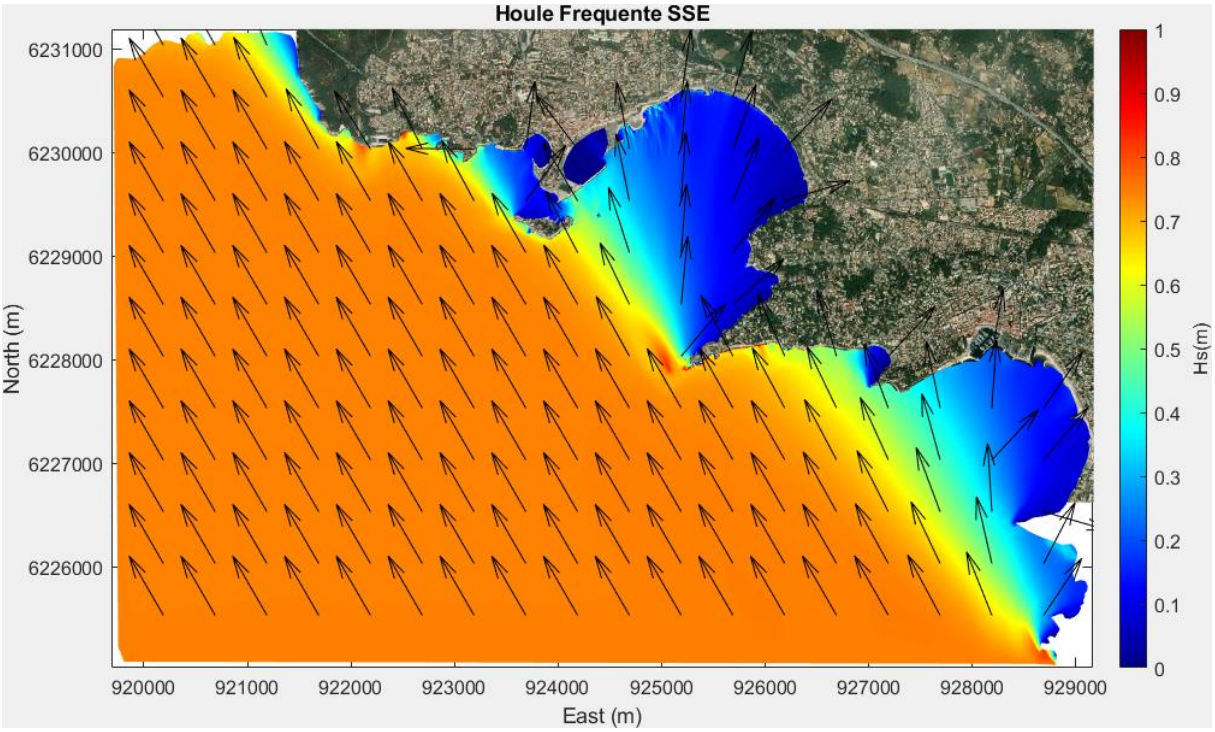


Figure 4.8-25 : Planches de hauteurs de houle - vue globale – condition SUD-SUD EST (Hs=0.75m, Tp=5.5s, Zs=0.6m)

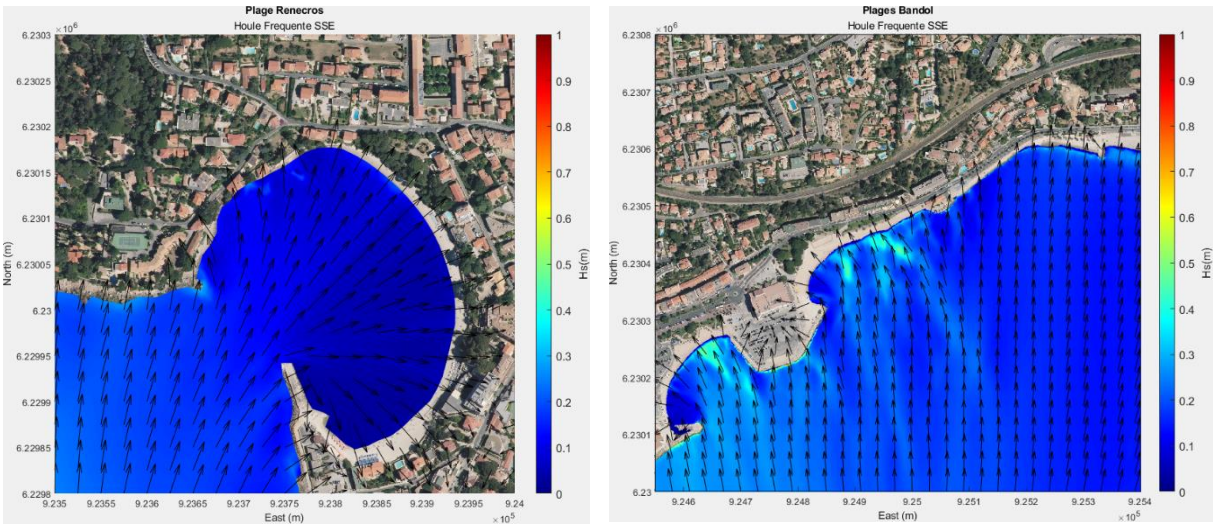


Figure 4.8-26 : Planches de hauteurs de houle – vues rapprochées – conditions SUD-SUD EST

4.9. Résultats modélisation de la courantologie - TELEMAC-2D

Les résultats du modèle de courantologie sont présentés dans cette section.

Les courants générés par la houle ne sont importants que dans la zone proche côtière lorsque l'énergie de la houle se dissipe sur les hauts fonds, et lorsque des interactions avec les ouvrages portuaires et côtiers se produisent.

Les planches représentant les champs de vitesses pour une houle fréquente d'incidence SUD OUEST (225°N), SUD (180°N) et SSE (157.5°N) de période de retour inférieure à des conditions annuelles (T1) sont présentées Figure 4.8-27 à Figure 4.8-32. Les planches de vitesses pour les conditions annuelles (T1) sont présentées en Annexe.

Les résultats mettent en avant :

- Des différences spatiales de vitesses de courant en fonction des conditions de houle (incidence et période de retour) en lien avec les tendances de propagation et déferlement :
    - Des vitesses plus élevées en condition de SO pour la plage de Renécros
    - Des vitesses plus élevées en conditions de S pour les plages situées dans la baie de Bandol (Centrale, Casino et Grand Valat)
    - Des vitesses relativement faibles pour l'ensemble des plages en condition de SSE

- Des tendances de courantologie complexes à l'échelle locale, en lien avec les interactions avec la bathymétrie / morphologie (y.c herbiers/matte) et les ouvrages :
    - Accélération des courants / gradients le long des ouvrages de protection, développement de zones de recirculation dues aux irrégularités de la bathymétrie et ouvrages transversaux

- Plage Renécros :
    - Conditions particulièrement énergétiques pour des houles d'incidence SO avec la génération de courants circulaires tout autour de la baie (intensité maximale sur le secteur nord suite au déferlement des houles le long de la pointe rocheuse et génération d'un courant de « jet » dirigé vers le Nord Est (sens horaire) puis interactions avec les épis/enrochements) qui permettent de le freiner
    - Tendance moins marquée avec des vitesses moins élevées pour conditions de S
    - Dépôts sédimentaires vers le centre de la baie (Mise en place ouvrage transversal)
    - Partie nord de la plage sujette à des courants marins importants expliquant en partie le recul du trait de côte et l'absence de plage ; avec un transport sédimentaire vers le sud de la baie et vers le large (dans les petits fonds entourés des herbiers / zone dépôt (suite à la diminution des courants au centre de la baie)

- Plage centrale :
    - Vitesses les plus élevées pour des houles de Sud, avec des courants circulaires (sens anti horaire) longeant l'ouvrage de protection du talus du casino en enrochements et s'accélérant pour ressortir en « jet »
    - Tendance favorisant les dépôts sédimentaires au droit du musoir de la digue du port (à l'ouest) en bordure d'herbier

- Plage Casino :
    - Présence de courants transversaux / courants d'arrachement (rip currents) liés aux tendances de propagation et de déferlement de houle et les interactions avec la morphologie de la plage et les ouvrages (dépôts vers le large) ; développement de courants longitudinaux / longshore sur l'extrémité Est (proche de la plage du Grand Valat)
    - Courantologie plus importante pour les houles d'incidence Sud (et dans une moindre mesure SO)

- Plage Grand Valat :
    - Courant longitudinal important (gradient) par rapport aux autres plages – expliquant en partie les différences de granulométrie observées
    - Vitesses élevées le long de l'ouvrage de protection du talus de protection de la route en enrochements
    - Interaction avec l'épi qui redirige l'écoulement vers le large et suggère des tendances de dépôt vers le large en bordure d'herbiers

Les résultats (vues rapprochées) permettent de mettre en évidence l'intensité du courant littoral dirigé généralement vers l'est pour les conditions d'incidence SO et SUD pour les plages Centrale, Casino et Grand Valat. Les planches de courantologie pour des conditions fréquentes sont présentées dans ce chapitre. Les planches pour les conditions annuelles (T1) sont données en Annexe.

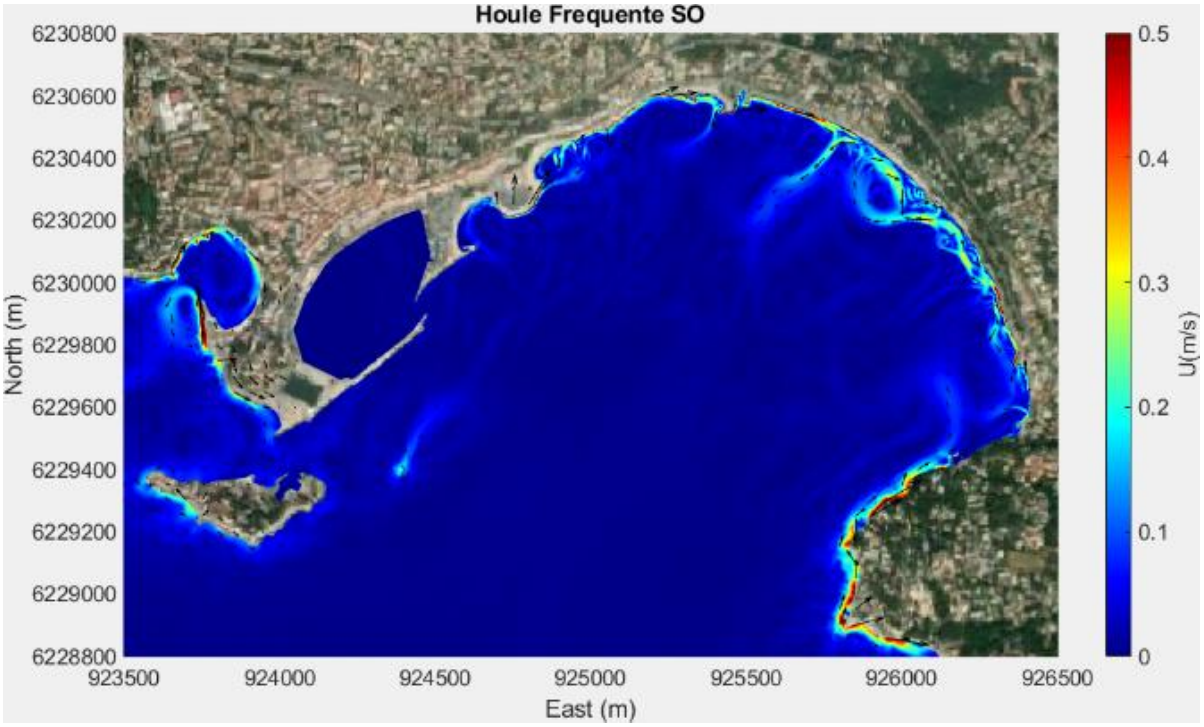


Figure 4.8-27: Courants générés par une houle fréquente de secteur SO (vue globale)

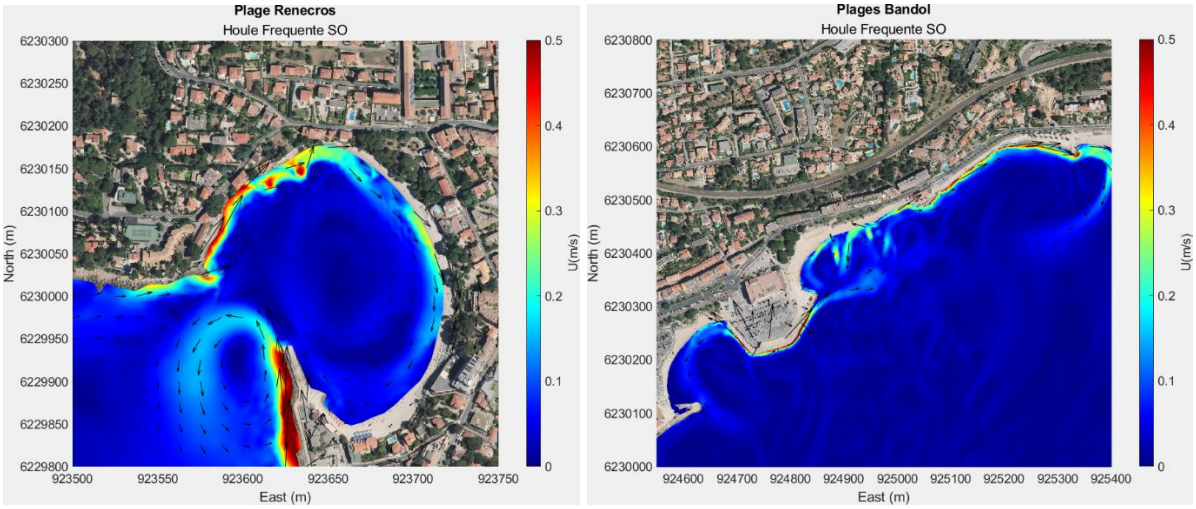


Figure 4.8-28: Courants générés par une houle fréquente de secteur SO (vues rapprochées)

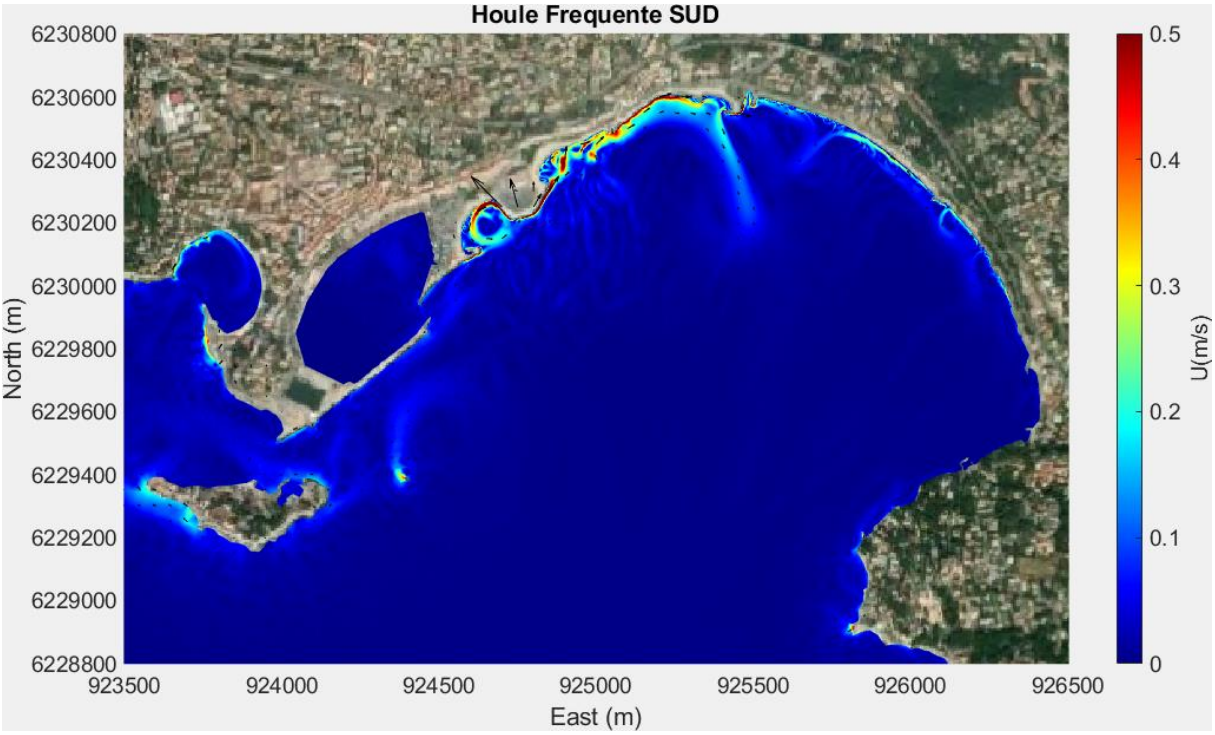


Figure 4.8-29: Courants générés par une houle fréquente de secteur S (vue globale)

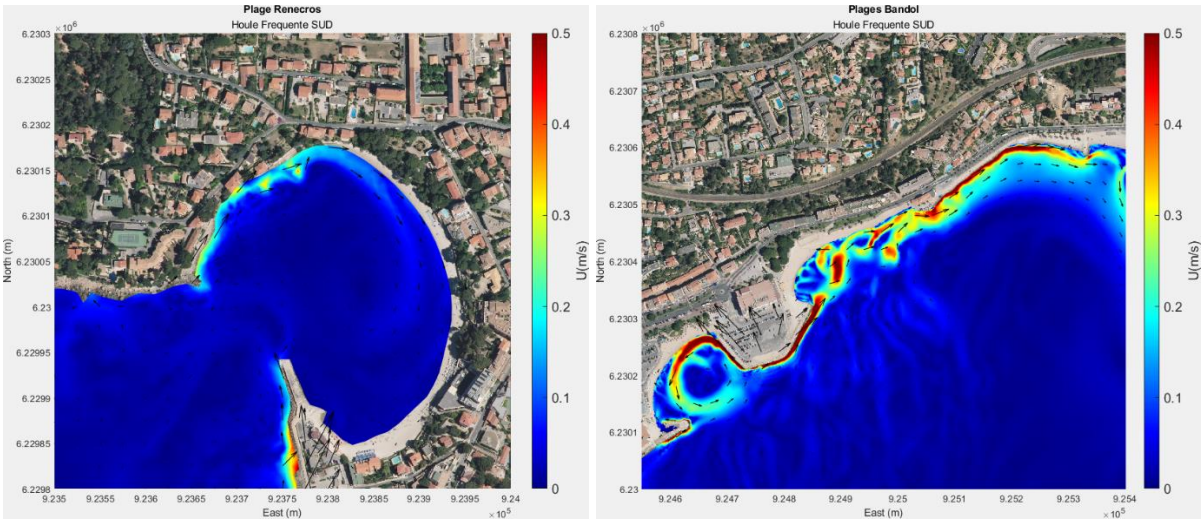


Figure 4.8-30: Courants générés par une houle fréquente de secteur S (vues rapprochées)

Figure 4.8-31 : Courants générés par une houle fréquente de secteur SSE (vue globale)

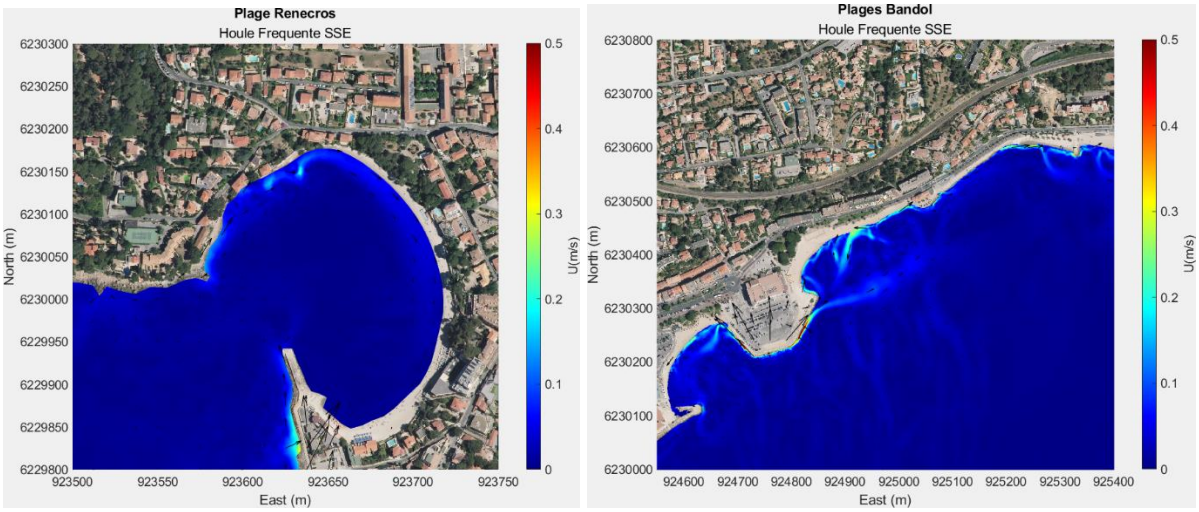


Figure 4.8-32: Courants générés par une houle fréquente de secteur SSE (vues rapprochées)

4.10. Résultats du modèle sédimentologique

Les résultats des modélisations d'évolution des fonds (évolutions bathymétriques) sont donnés dans ce chapitre à titre indicatif. Les évolutions ont été calculées au bout de 24h de simulation pour les 3 incidences de houle. Les planches d'évolution pour les conditions fréquentes sont données ci-dessous et les planches pour les conditions annuelles sont données en Annexe.

Les évolutions pour les houles fréquentes de secteur SO, Sud et SSE sont présentées Figure 4.10-33 à Figure 4.10-35. Les évolutions sont minimales pour les conditions S et SSE et plus importantes pour la condition SO pour les conditions fréquentes.

Les évolutions calculées sont très irrégulières et la variabilité spatiale reflète la variabilité de la bathymétrie. Les zones d'érosion et de dépôt sont liées à la distribution des hauteurs de houle et vitesses de courant ; les zone de dépôt sont observées au centre de baie notamment plage de Renécros et Grand Valat. On observe des affouillements au niveau des épis et talus en enrochements plage Centrale et Casino et des dépôts au droit des ouvrages.

Les dépôts sédimentaires restent toutefois concentrés dans les petits fonds, avec des dépôts plus proches des herbiers le long des plages de Renécros en conditions de houle de SO. Ces résultats sont donc en accord avec les observations issues des mesures (3.1.2.2).

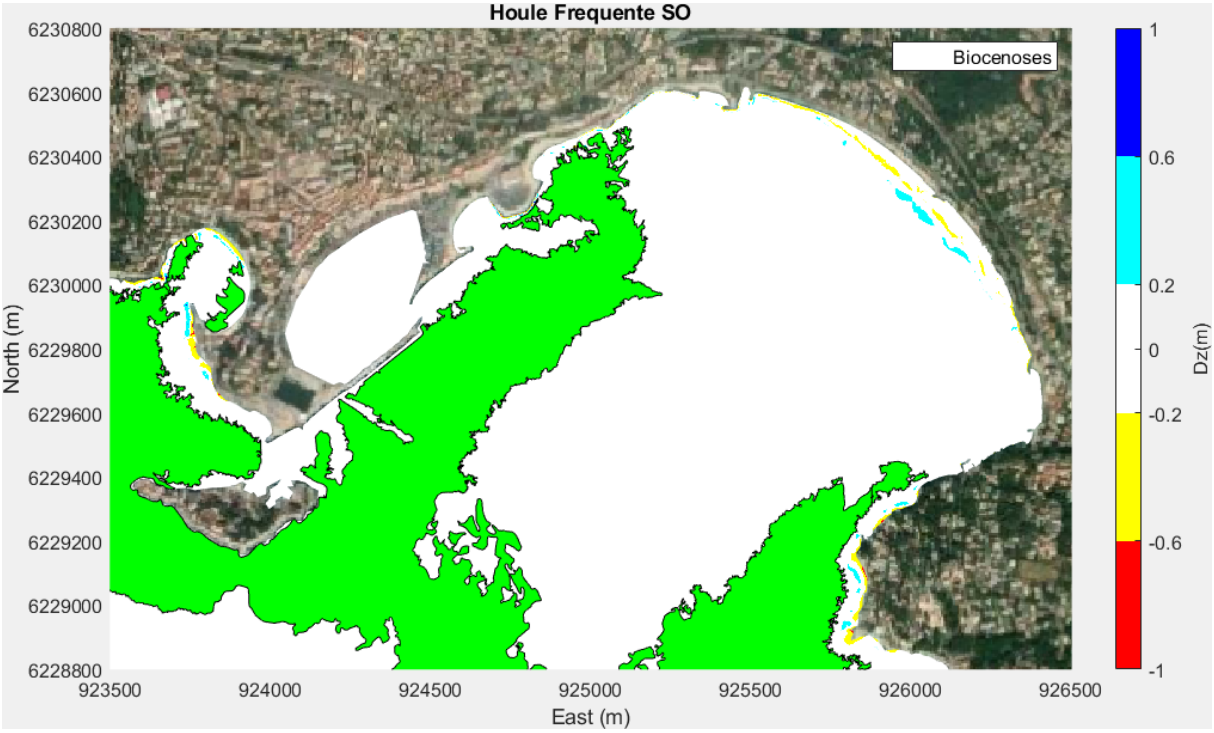


Figure 4.10-33: Evolutions bathymétriques modélisées (durée 24h): houle fréquente de SO

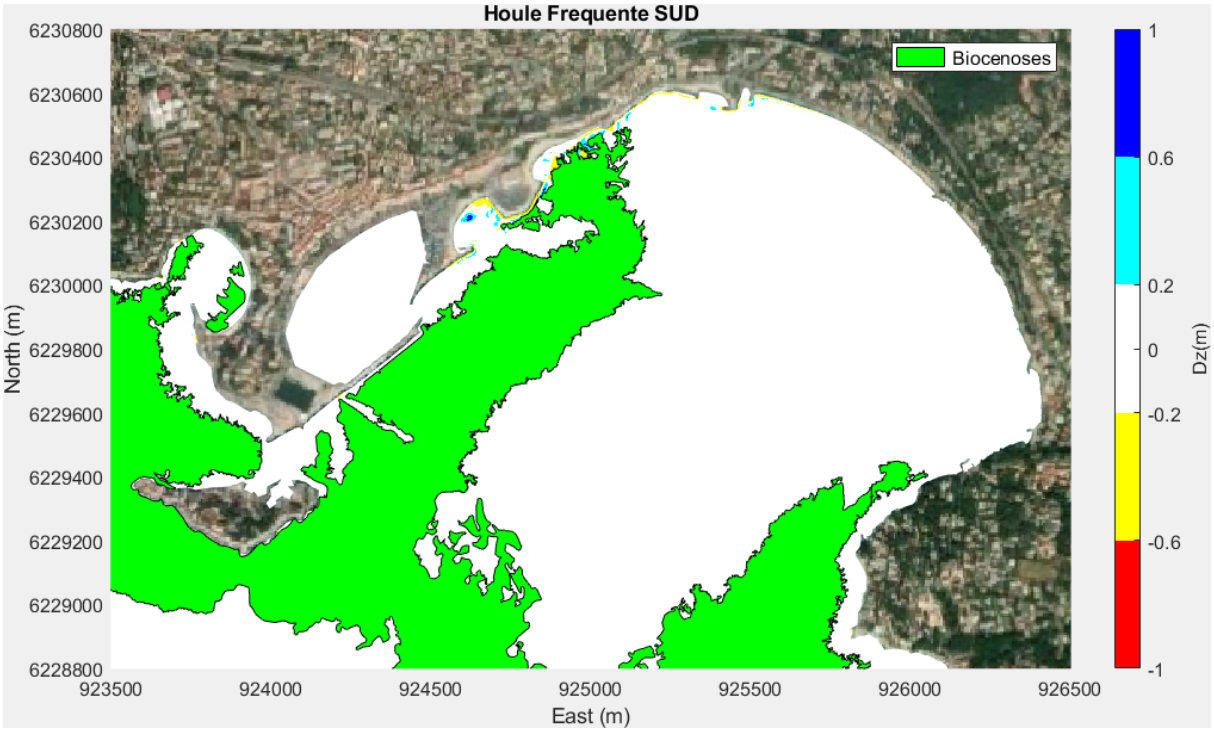


Figure 4.10-34: Evolutions bathymétriques modélisées (durée 24h): houle fréquente de S

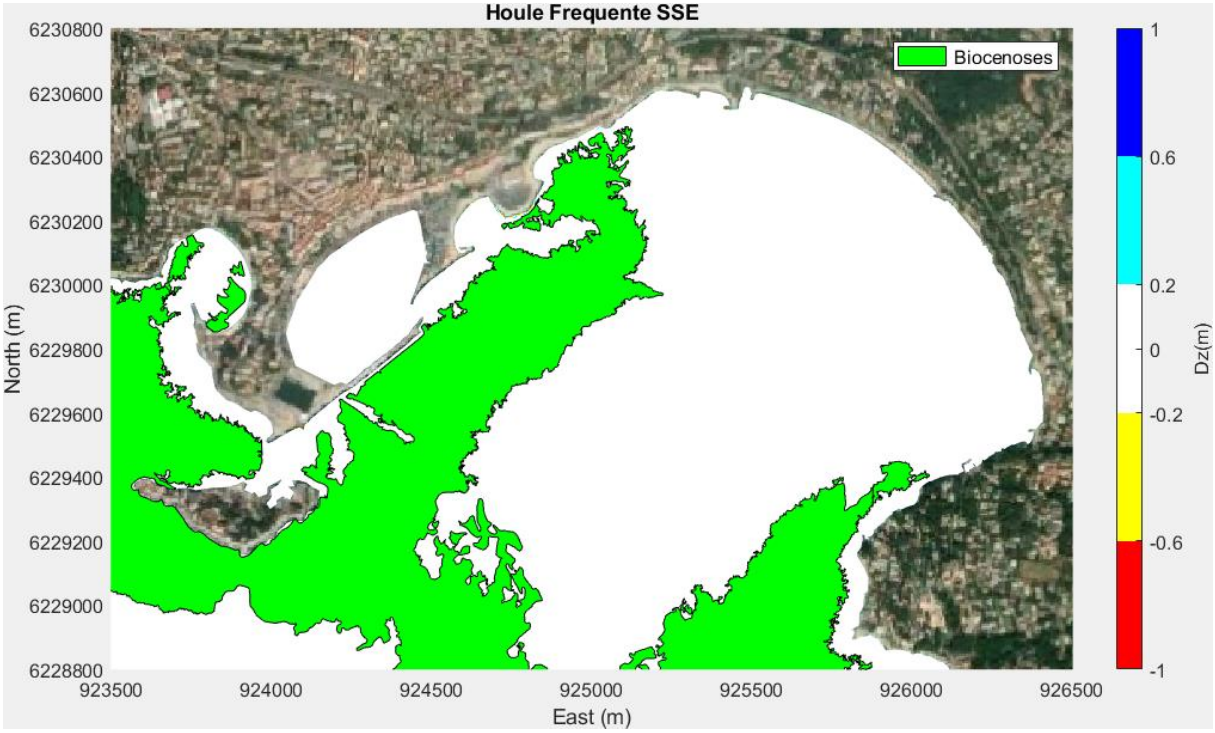


Figure 4.10-35 – Evolutions bathymétriques modélisées (durée 24h) : houle fréquente de SSE

4.11. Extraction des résultats au droit des plages

Les valeurs de hauteurs de houle et de vitesses de courant le long des profils d'extraction sont données en Annexe 4.

5. Conclusions et recommandations

Un diagnostic du littoral de Bandol a été réalisé à l'aide de l'analyse de plusieurs jeux de données (météo-océaniques, sédimentologiques, topo-bathymétriques et images aériennes) historiques et mis à jour dans le cadre de la présente étude.

En complément, des modèles numériques couplés (suite TELEMAC) ont été mis en œuvre afin de comprendre les tendances de houle, de courantologie et la dynamique sédimentaire, pour différentes incidences et conditions hydrodynamiques (fréquentes et annuelles - T1) et ainsi reproduire les mécanismes responsables du transport sédimentaire.

Les résultats d'évolution du trait de côte et des fonds ont mis en avant des différences spatiales considérables. Les cartes d'évolution montrent clairement l'impact des ouvrages agissant comme des points durs (et entrainant le développement de hot spots d'érosion), ainsi que des herbiers qui permettent de limiter les pertes vers le large et de contenir les dépôts en leur limite supérieure. En général, on observe des tendances érosives, plus ou moins marquées sur l'ensemble des plages (recul du trait de côte et abaissement du haut de plage et dépôts dans les petits fonds), et ce, même avec les rechargements ponctuels qui apparaissent clairement dans les graphiques.

Les résultats des modélisations de houle et de courant ont permis de reproduire la dynamique sédimentaire et de comprendre l'impact de la morphologie / bathymétrie et des d'ouvrages.

Pour les Secteurs Sud-Ouest, c'est la plage de Renécros qui est la plus vulnérable au risque d'érosion littorale. Les tendances de courantologie entrainent une érosion le long de la plage au centre de la baie (sud de la zone rocheuse) et des dépôts au droit de la plage, en limite d'herbier.

Pour les Secteurs Sud, les plages de la baie de Bandol (Centrale, Casino et Grand Valat) sont les plus exposées, avec des tendances d'évolution des fonds caractérisées par l'érosion du haut de plage et des dépôts dans les petits fonds. Les plages de la baie de Bandol sont relativement abritées des conditions de SSE.

La majorité des dépôts sédimentaires est observée en bordure d'herbiers (coté plage).

L'étude montre qu'il est donc nécessaire de poursuivre les opérations de rechargement ponctuels sur les plages de Bandol.

Concernant la plage de Renécros, les résultats ont mis en avant des dépôts sédimentaires concentrés au centre de la baie (présence d'un stock sableux exploitable comme gisement) ; il serait envisageable de procéder à des opérations de rechargement via pompage/refoulage. Afin d'améliorer le maintien du stock sableux / rechargement mis en place (éviter les pertes cross shore), il est recommandé de combiner le rechargement à un ouvrage submergé (type butée de pied/atténuateur de houle). Une autre solution pourrait consister à mettre en place un ouvrage transversal (type épi) au centre de la baie afin de limiter le gradient de transport et les vitesses de courant longitudinales élevées responsables de l'érosion (cet épi aurait cependant un impact significatif sur le transport longitudinal et engendrerait des problèmes d'érosion en aval dérive).

Concernant la Plage du Grand Valat, on remarque également la présence de stocks sableux en bordure d'herbiers qui pourraient servir de gisement. La géométrie et la morphologie de la plage

semblent également adaptée à la mise en place d'ouvrage longitudinaux (type butée de pied ou atténuateur de houle).

Ces différentes solutions devront faire l'objet d'études plus approfondies en termes de dimensionnement (phase MOE) et devront être testées en modèle numérique (à la fois 2D et 1D).

6. Références

1. *GLOBOCEAN, 2022. Etats de mer au large de Bandol.*

2. *CETMEF. REFMAR (Réseaux de référence des observations marégraphiques)*

3. *SHOM, produit LITTO3D, https://data.shom.fr/*

4. *SEMANTIC TS, 2022. Rapport de mission : levé bathymétrique, topographie par photogrammétrie aérienne, prélèvements sédimentaires et stations de vitalité herbier – plages de Bandol*

5. *EUROFINS, 2022. Rapport d'Analyse sédimentologique (AR-22-LK-036783-01).*

6. *Nature des fonds 150245_Biocenoses_Var_Andromede2009-Modif_POL_NUTM31_WGS84*

7. *Biocénoses : 150245_Biocenoses_Var_Andromede2009-Modif_POL_NUTM31_WGS84*

Annexes

Annexe 1 : STATISTIQUE DES ETAT DE MER DU LARGE

Annexe 2 : CHAMPS DE HOULE – CONDITIONS ANNUELLES

Annexe 3 : EVOLUTION DES FONDS - CONDITIONS ANNUELLES

Annexe 4 : EXTRACTION DES VALEURS LE LONG DES PROFILS

ANNEXE 1 – STATISTIQUES DES ETATS DE MER DU LARGE SUR LE POINT PT1

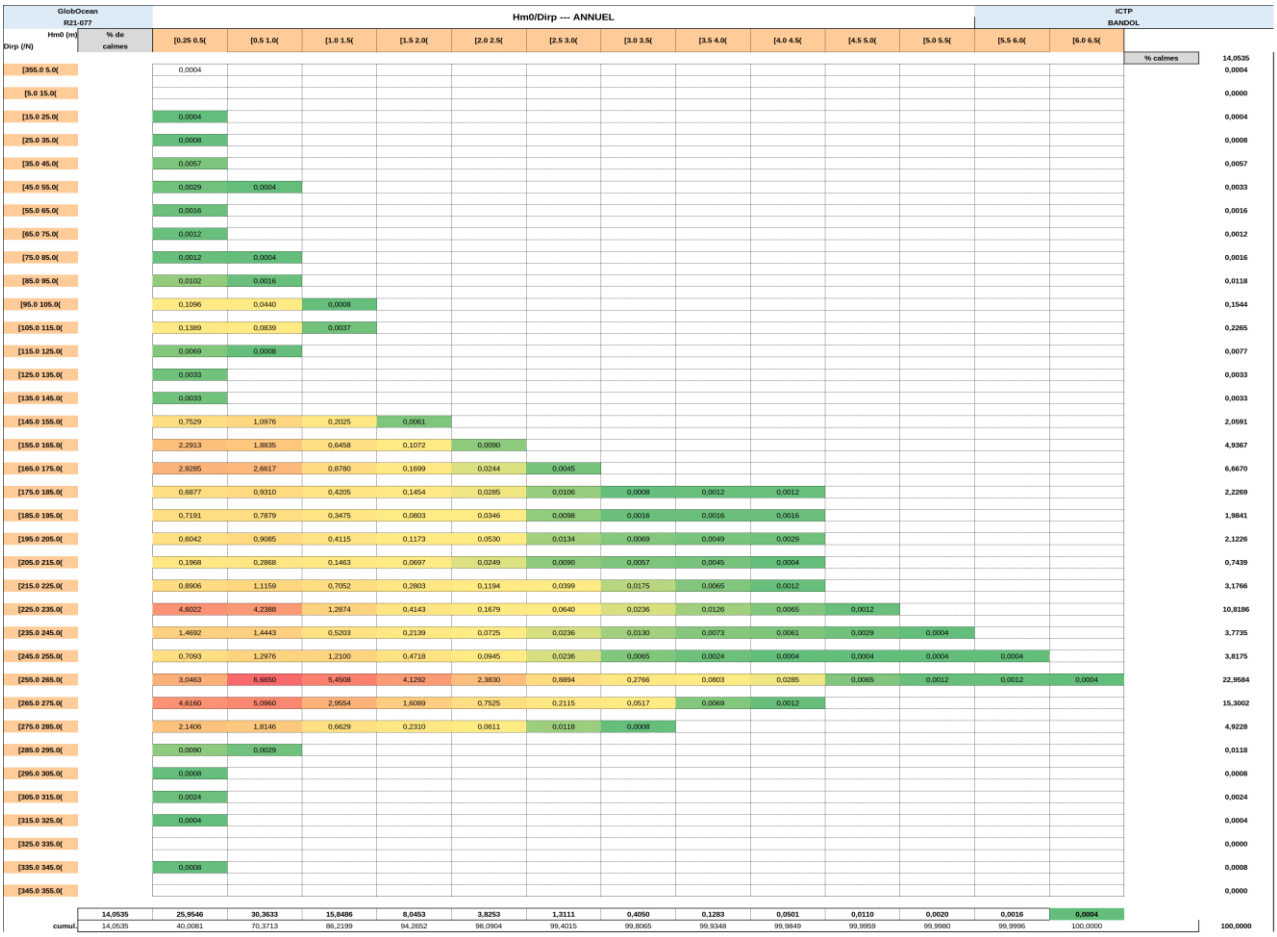
Secteur 1 - [180° - 200°[					
Loi	Exponentielle	Echelle	0,601		
Seuil (m)	2,0				
Nb tempêtes	57				
	Hm0 (m)			Paramètres associés	
		Intervalle de confiance (90%)		Tp (s)	
Périodes de retour	Modal	Borne inf.	Borne sup.	Borne inf.	Borne sup.
1	**2,4**	2,3	2,5	8,2	8,5
10	**3,8**	3,4	4,2	9,2	9,8

Secteur 2 - [200° - 220°[					
Loi	Pareto	Echelle	0,852		
Seuil (m)	2,0	c	-0,248		
Nb tempêtes	87				
	Hm0 (m)			Paramètres associés	
		Intervalle de confiance (90%)		Tp (s)	
Périodes de retour	Modal	Borne inf.	Borne sup.	Borne inf.	Borne sup.
1	**2,8**	2,7	3,0	8,6	8,9
10	**4,0**	3,7	4,1	9,4	9,8

Secteur 3 - [220° - 240°[					
Loi	Exponentielle	Echelle	0,601		
Seuil (m)	2,8				
Nb tempêtes	42				
	Hm0 (m)			Paramètres associés	
		Intervalle de confiance (90%)		Tp (s)	
Périodes de retour	Modal	Borne inf.	Borne sup.	Borne inf.	Borne sup.
1	**3,1**	3,0	3,2	8,8	9,0
10	**4,7**	4,3	5,2	9,8	10,4

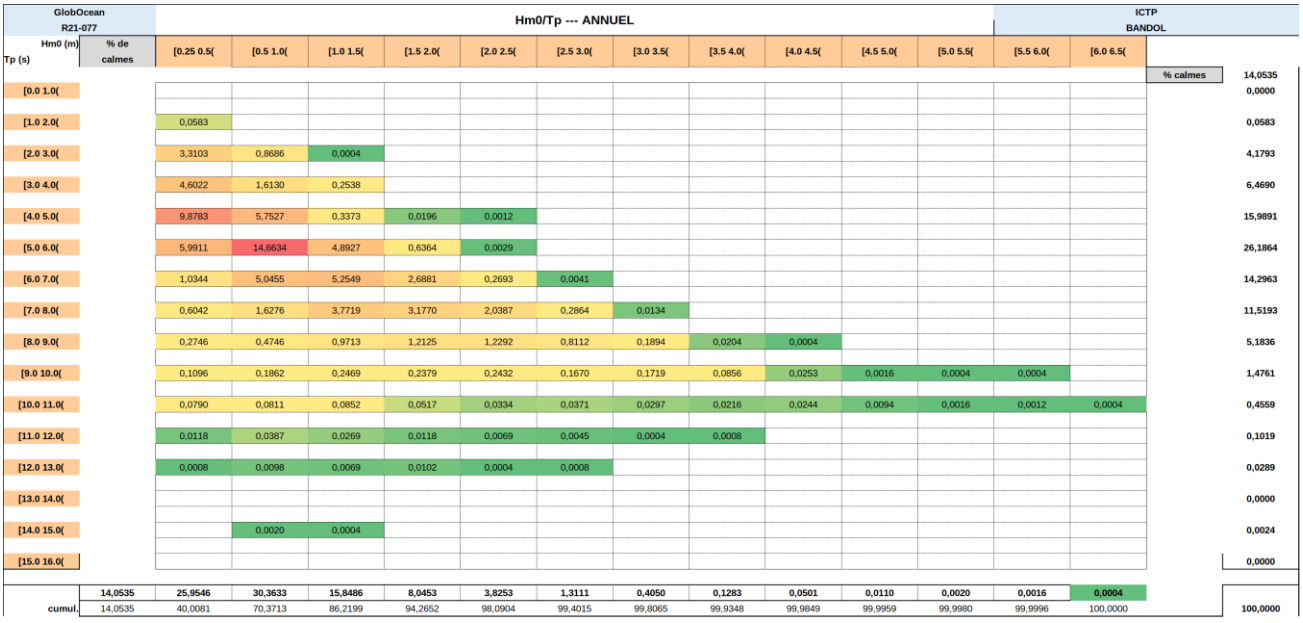
Secteur 4 - [240° - 260°[					
Loi	Exponentielle	Echelle	0,482		
Seuil (m)	3,5				
Nb tempêtes	47				
	Hm0 (m)			Paramètres associés	
		Intervalle de confiance (90%)		Tp (s)	
Périodes de retour	Modal	Borne inf.	Borne sup.	Borne inf.	Borne sup.
1	**3,7**	3,7	3,8	8,8	9,0
10	**4,9**	4,6	5,2	9,5	10,0

Figure 6-36 : Extrêmes d'états de mer pour les secteurs Sud, SSO, SO et OSO



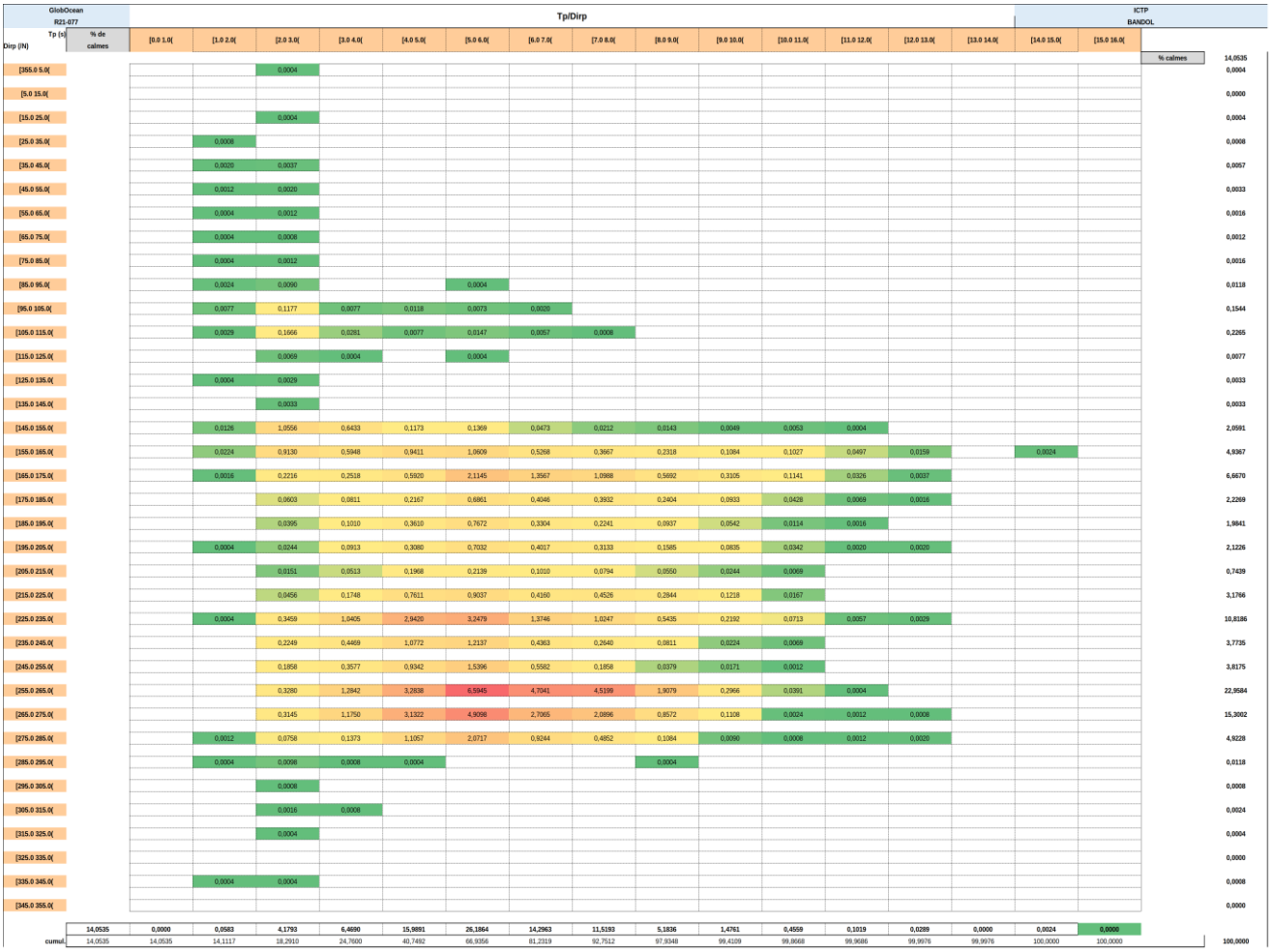
GlobOcean R21-077	Hm0/Dirp --- ANNUEL											ICTP BANDOL		
Hm0 (m) / Dirp (/N)	% de calmes	[0.25 0.5(	[0.5 1.0(	[1.0 1.5(	[1.5 2.0(	[2.0 2.5(	[2.5 3.0(	[3.0 3.5(	[3.5 4.0(	[4.0 4.5(	[4.5 5.0(	[5.0 5.5(	[5.5 6.0(	[6.0 6.5(	
														% calmes	14,0535
[355.0 5.0(		0,0004													0,0004
[5.0 15.0(															0,0000
[15.0 25.0(		0,0004													0,0004
[25.0 35.0(		0,0008													0,0008
[35.0 45.0(		0,0057													0,0057
[45.0 55.0(		0,0029	0,0004												0,0033
[55.0 65.0(		0,0016													0,0016
[65.0 75.0(		0,0012													0,0012
[75.0 85.0(		0,0012	0,0004												0,0016
[85.0 95.0(		0,0102	0,0016												0,0118
[95.0 105.0(		0,1096	0,0440	0,0008											0,1544
[105.0 115.0(		0,1389	0,0839	0,0037											0,2265
[115.0 125.0(		0,0069	0,0008												0,0077
[125.0 135.0(		0,0033													0,0033
[135.0 145.0(		0,0033													0,0033
[145.0 155.0(		0,7529	1,0976	0,2025	0,0061										2,0591
[155.0 165.0(		2,2913	1,8835	0,6458	0,1072	0,0090									4,9367
[165.0 175.0(		2,9285	2,6617	0,8780	0,1699	0,0244	0,0045								6,6670
[175.0 185.0(		0,6877	0,9310	0,4205	0,1454	0,0285	0,0106	0,0008	0,0012	0,0012					2,2269
[185.0 195.0(		0,7191	0,7879	0,3475	0,0803	0,0346	0,0098	0,0016	0,0016	0,0016					1,9841
[195.0 205.0(		0,6042	0,9085	0,4115	0,1173	0,0530	0,0134	0,0069	0,0049	0,0029					2,1226
[205.0 215.0(		0,1968	0,2868	0,1463	0,0697	0,0249	0,0090	0,0057	0,0045	0,0004					0,7439
[215.0 225.0(		0,8906	1,1159	0,7052	0,2803	0,1194	0,0399	0,0175	0,0065	0,0012					3,1766
[225.0 235.0(		4,6022	4,2388	1,2874	0,4143	0,1679	0,0640	0,0236	0,0126	0,0065	0,0012				10,8186
[235.0 245.0(		1,4692	1,4443	0,5203	0,2139	0,0725	0,0236	0,0130	0,0073	0,0061	0,0029	0,0004			3,7735
[245.0 255.0(		0,7093	1,2976	1,2100	0,4718	0,0945	0,0236	0,0065	0,0024	0,0004	0,0004	0,0004	0,0004		3,8175
[255.0 265.0(		3,0463	6,6650	5,4508	4,1292	2,3830	0,8894	0,2766	0,0803	0,0285	0,0065	0,0012	0,0012	0,0004	22,9584
[265.0 275.0(		4,6160	5,0960	2,9554	1,6089	0,7525	0,2115	0,0517	0,0069	0,0012					15,3002
[275.0 285.0(		2,1406	1,8146	0,6629	0,2310	0,0611	0,0118	0,0008							4,9228
[285.0 295.0(		0,0090	0,0029												0,0118
[295.0 305.0(		0,0008													0,0008
[305.0 315.0(		0,0024													0,0024
[315.0 325.0(		0,0004													0,0004
[325.0 335.0(															0,0000
[335.0 345.0(		0,0008													0,0008
[345.0 355.0(															0,0000
	14,0535	25,9546	30,3633	15,8486	8,0453	3,8253	1,3111	0,4050	0,1283	0,0501	0,0110	0,0020	0,0016	0,0004	
cumul.	14,0535	40,0081	70,3713	86,2199	94,2652	98,0904	99,4015	99,8065	99,9348	99,9849	99,9959	99,9980	99,9996	100,0000	100,0000

Figure 6-37 : Probabilités d'occurrences conjointes entre Hm0 et Dirp



GlobOcean R21-077	Hm0/Tp --- ANNUEL											ICTP BANDOL		
Hm0 (m) / Tp (s)	% de calmes	[0.25 0.5(	[0.5 1.0(	[1.0 1.5(	[1.5 2.0(	[2.0 2.5(	[2.5 3.0(	[3.0 3.5(	[3.5 4.0(	[4.0 4.5(	[4.5 5.0(	[5.0 5.5(	[5.5 6.0(	[6.0 6.5(	
														% calmes	14,0535
[0.0 1.0(															0,0000
[1.0 2.0(		0,0583													0,0583
[2.0 3.0(		3,3103	0,8686	0,0004											4,1793
[3.0 4.0(		4,6022	1,6130	0,2538											6,4690
[4.0 5.0(		9,8783	5,7527	0,3373	0,0196	0,0012									15,9891
[5.0 6.0(		5,9911	14,6634	4,8927	0,6364	0,0029									26,1864
[6.0 7.0(		1,0344	5,0455	5,2549	2,6881	0,2693	0,0041								14,2963
[7.0 8.0(		0,6042	1,6276	3,7719	3,1770	2,0387	0,2864	0,0134							11,5193
[8.0 9.0(		0,2746	0,4746	0,9713	1,2125	1,2292	0,8112	0,1894	0,0204	0,0004					5,1836
[9.0 10.0(		0,1096	0,1862	0,2469	0,2379	0,2432	0,1670	0,1719	0,0856	0,0253	0,0016	0,0004	0,0004		1,4761
[10.0 11.0(		0,0790	0,0811	0,0852	0,0517	0,0334	0,0371	0,0297	0,0216	0,0244	0,0094	0,0016	0,0012	0,0004	0,4559
[11.0 12.0(		0,0118	0,0387	0,0269	0,0118	0,0069	0,0045	0,0004	0,0008						0,1019
[12.0 13.0(		0,0008	0,0098	0,0069	0,0102	0,0004	0,0008								0,0289
[13.0 14.0(															0,0000
[14.0 15.0(			0,0020	0,0004											0,0024
[15.0 16.0(															0,0000
	14,0535	25,9546	30,3633	15,8486	8,0453	3,8253	1,3111	0,4050	0,1283	0,0501	0,0110	0,0020	0,0016	0,0004	
cumul.	14,0535	40,0081	70,3713	86,2199	94,2652	98,0904	99,4015	99,8065	99,9348	99,9849	99,9959	99,9980	99,9996	100,0000	100,0000

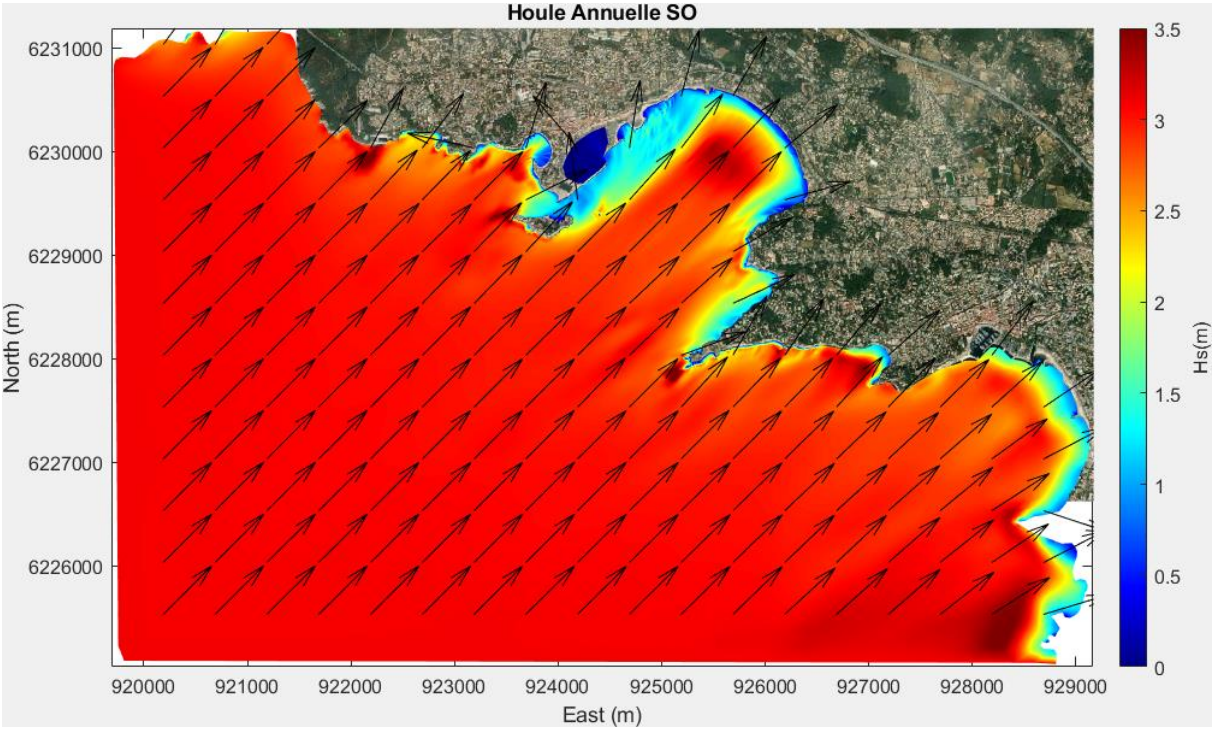
Figure 6-38 : Probabilités d'occurrences conjointes entre Hm0 et Tp

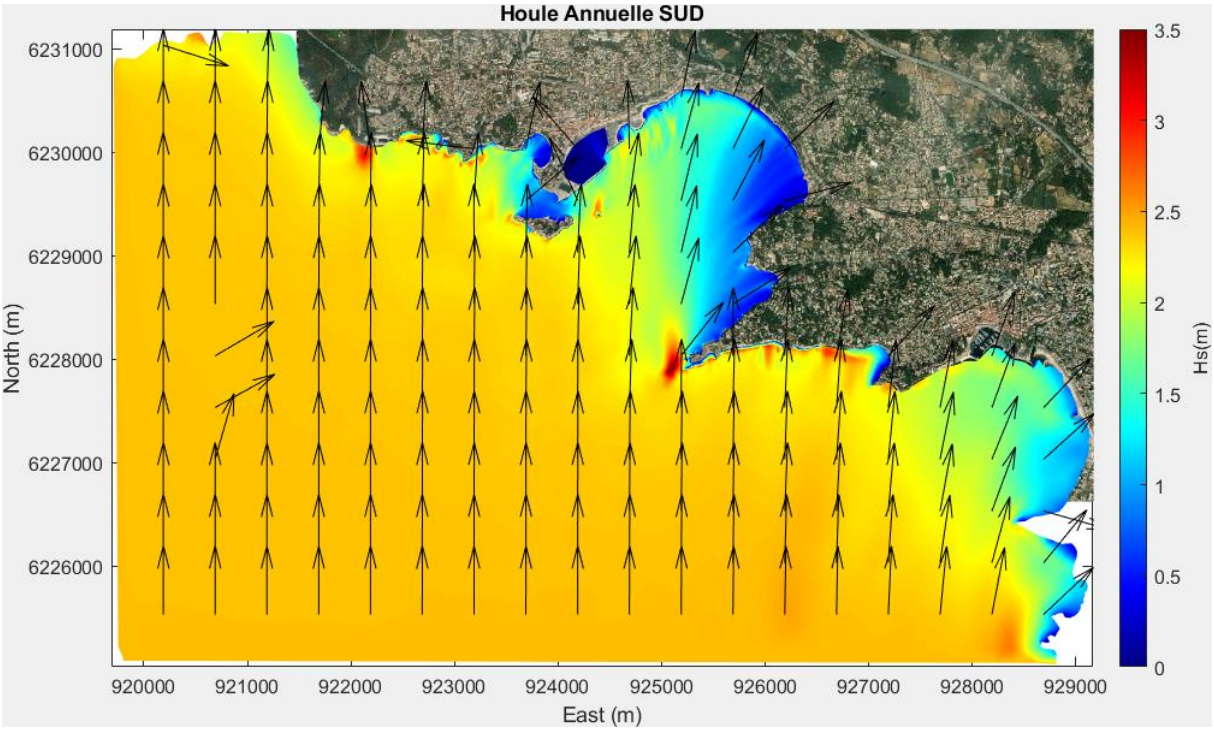


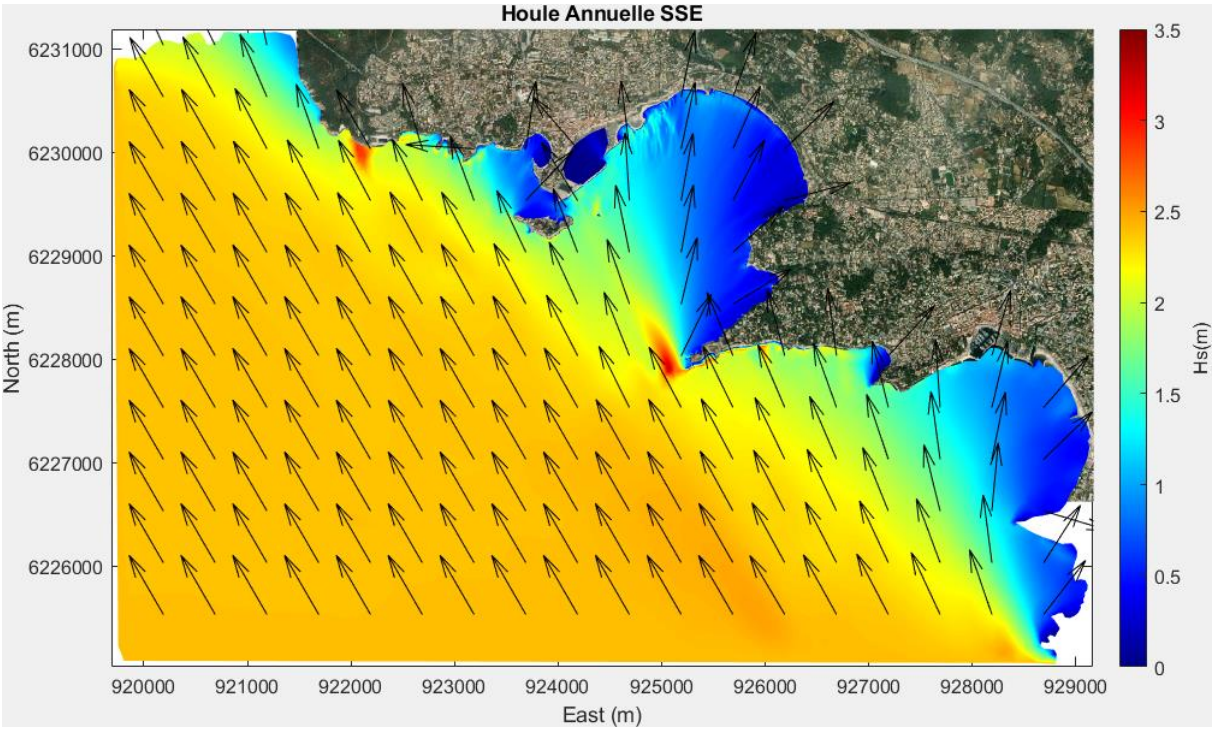
GlobOcean R21-077		Tp/Dirp														ICTP BANDOL		
Tp (s) / Dirp (/N)	% de calmes	[0.0 1.0[	[1.0 2.0[	[2.0 3.0[	[3.0 4.0[	[4.0 5.0[	[5.0 6.0[	[6.0 7.0[	[7.0 8.0[	[8.0 9.0[	[9.0 10.0[	[10.0 11.0[	[11.0 12.0[	[12.0 13.0[	[13.0 14.0[	[14.0 15.0[	[15.0 16.0[	
																	% calmes	14,0535
[355.0 5.0[				0,0004														0,0004
[5.0 15.0[																		0,0000
[15.0 25.0[				0,0004														0,0004
[25.0 35.0[			0,0008															0,0008
[35.0 45.0[			0,0020	0,0037														0,0057
[45.0 55.0[			0,0012	0,0020														0,0033
[55.0 65.0[			0,0004	0,0012														0,0016
[65.0 75.0[			0,0004	0,0008														0,0012
[75.0 85.0[			0,0004	0,0012														0,0016
[85.0 95.0[			0,0024	0,0090			0,0004											0,0118
[95.0 105.0[			0,0077	0,1177	0,0077	0,0118	0,0073	0,0020										0,1544
[105.0 115.0[			0,0029	0,1666	0,0281	0,0077	0,0147	0,0057	0,0008									0,2265
[115.0 125.0[				0,0069	0,0004		0,0004											0,0077
[125.0 135.0[			0,0004	0,0029														0,0033
[135.0 145.0[				0,0033														0,0033
[145.0 155.0[			0,0126	1,0556	0,6433	0,1173	0,1369	0,0473	0,0212	0,0143	0,0049	0,0053	0,0004					2,0591
[155.0 165.0[			0,0224	0,9130	0,5948	0,9411	1,0609	0,5268	0,3667	0,2318	0,1084	0,1027	0,0497	0,0159		0,0024		4,9367
[165.0 175.0[			0,0016	0,2216	0,2518	0,5920	2,1145	1,3567	1,0988	0,5692	0,3105	0,1141	0,0326	0,0037				6,6670
[175.0 185.0[				0,0603	0,0811	0,2167	0,6861	0,4046	0,3932	0,2404	0,0933	0,0428	0,0069	0,0016				2,2269
[185.0 195.0[				0,0395	0,1010	0,3610	0,7672	0,3304	0,2241	0,0937	0,0542	0,0114	0,0016					1,9841
[195.0 205.0[			0,0004	0,0244	0,0913	0,3080	0,7032	0,4017	0,3133	0,1585	0,0835	0,0342	0,0020	0,0020				2,1226
[205.0 215.0[				0,0151	0,0513	0,1968	0,2139	0,1010	0,0794	0,0550	0,0244	0,0069						0,7439
[215.0 225.0[				0,0456	0,1748	0,7611	0,9037	0,4160	0,4526	0,2844	0,1218	0,0167						3,1766
[225.0 235.0[			0,0004	0,3459	1,0405	2,9420	3,2479	1,3746	1,0247	0,5435	0,2192	0,0713	0,0057	0,0029				10,8186
[235.0 245.0[				0,2249	0,4469	1,0772	1,2137	0,4363	0,2640	0,0811	0,0224	0,0069						3,7735
[245.0 255.0[				0,1858	0,3577	0,9342	1,5396	0,5582	0,1858	0,0379	0,0171	0,0012						3,8175
[255.0 265.0[				0,3280	1,2842	3,2838	6,5945	4,7041	4,5199	1,9079	0,2966	0,0391	0,0004					22,9584
[265.0 275.0[				0,3145	1,1750	3,1322	4,9098	2,7065	2,0896	0,8572	0,1108	0,0024	0,0012	0,0008				15,3002
[275.0 285.0[			0,0012	0,0758	0,1373	1,1057	2,0717	0,9244	0,4852	0,1084	0,0090	0,0008	0,0012	0,0020				4,8228
[285.0 295.0[			0,0004	0,0098	0,0008	0,0004				0,0004								0,0118
[295.0 305.0[				0,0008														0,0008
[305.0 315.0[				0,0016	0,0008													0,0024
[315.0 325.0[				0,0004														0,0004
[325.0 335.0[																		0,0000
[335.0 345.0[			0,0004	0,0004														0,0008
[345.0 355.0[																		0,0000
	14,0535	0,0000	0,0583	4,1793	6,4690	15,9891	26,1864	14,2963	11,5193	5,1836	1,4761	0,4559	0,1019	0,0289	0,0000	0,0024	0,0000	
cumul	14,0535	14,0535	14,1117	18,2910	24,7600	40,7492	66,9356	81,2319	92,7512	97,9348	99,4109	99,8668	99,9686	99,9976	99,9976	100,0000	100,0000	100,0000

Figure 6-39 : Probabilités d'occurrences conjointes entre Hm0 et Dirp

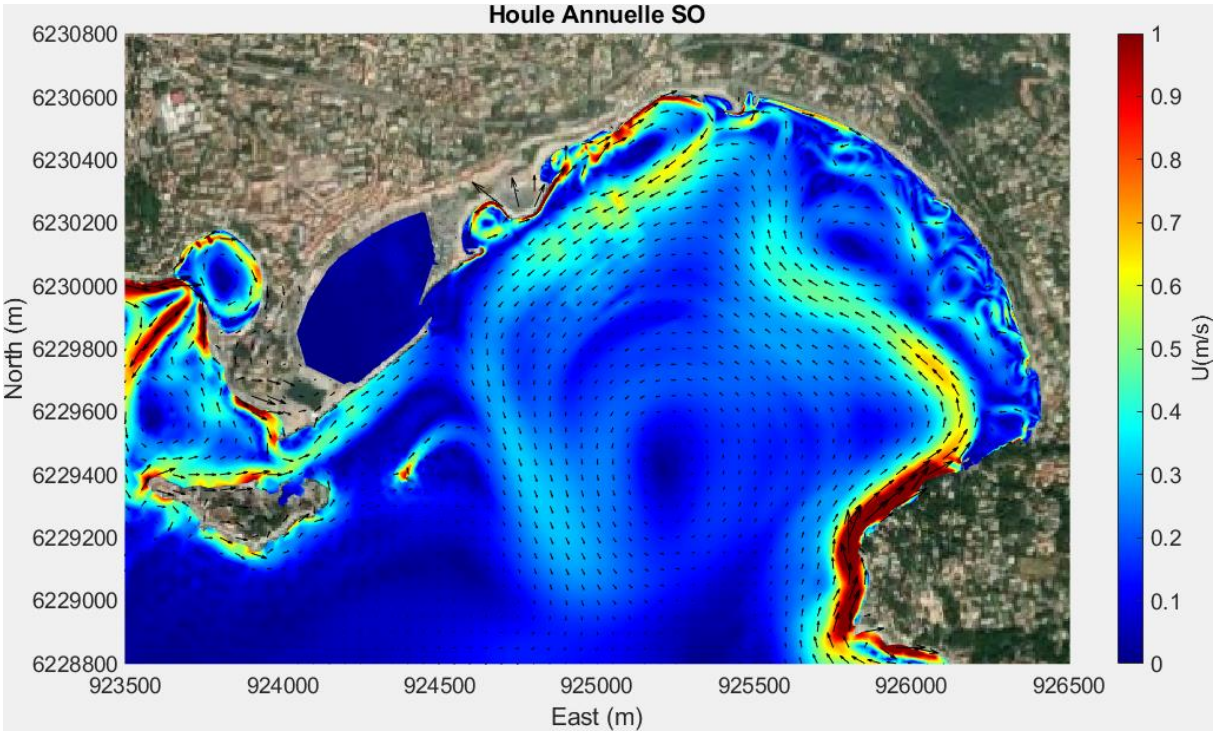
ANNEXE 2 – CHAMPS DE HOULE : CONDITIONS ANNUELLES

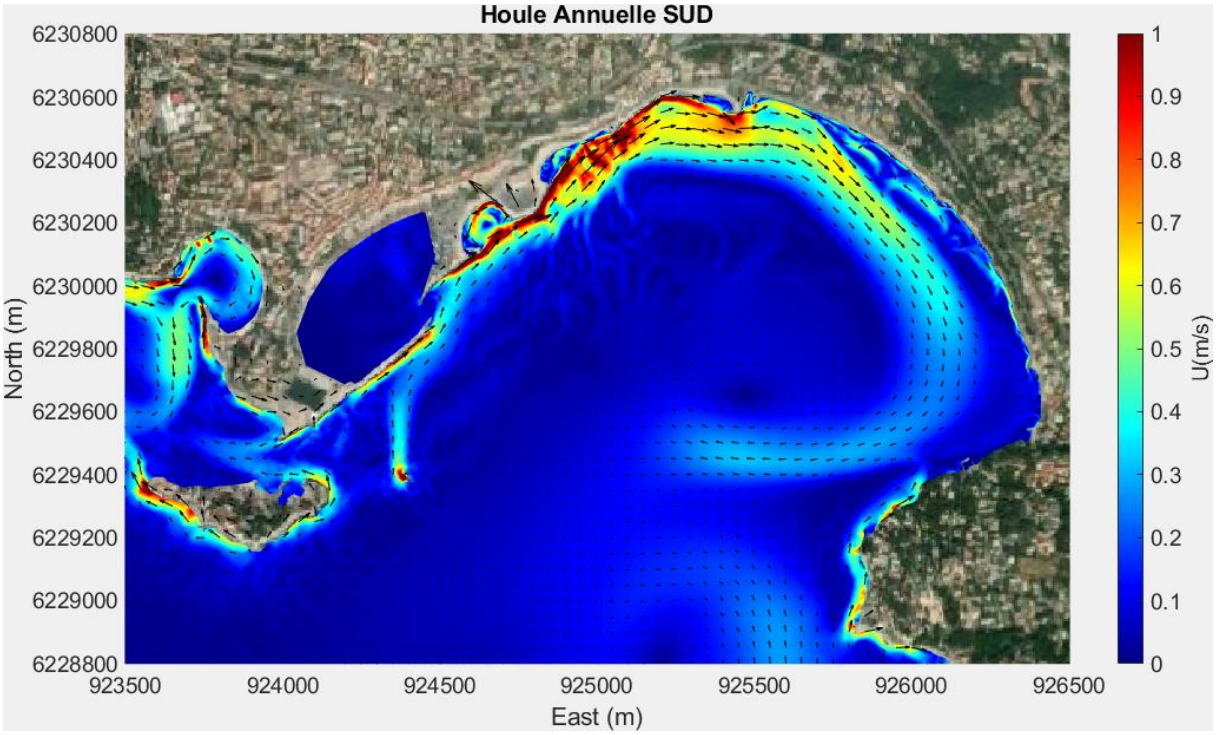


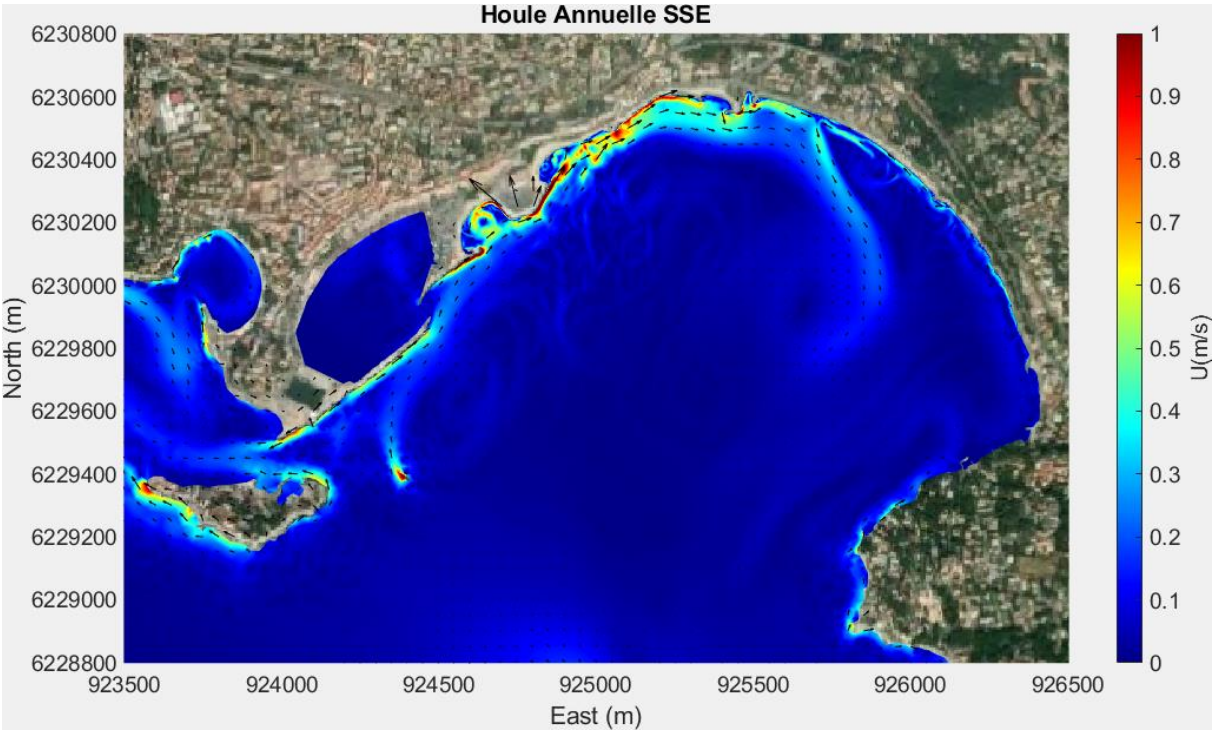



Houle Annuelle SSE
North (m)
6231000
6230000
6229000
6228000
6227000
6226000
920000
921000
922000
923000
924000
925000
926000
927000
928000
929000
East (m)
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
Hs(m)

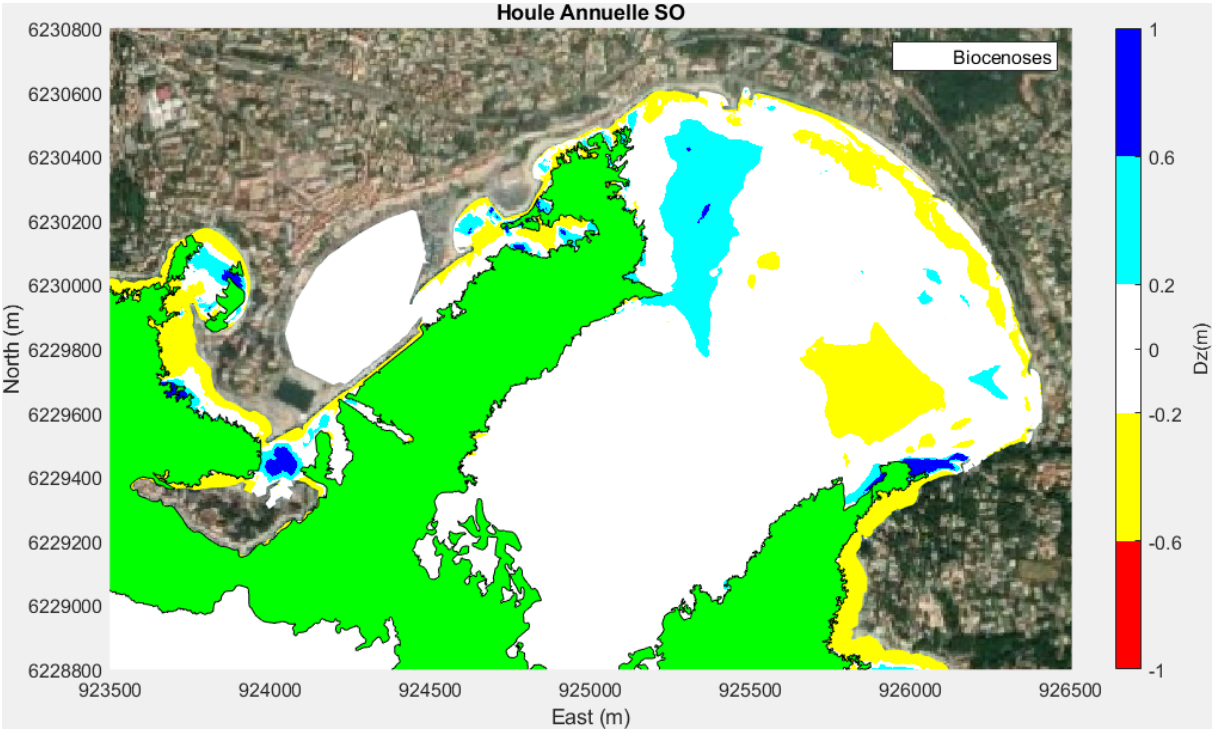
ANNEXE 2 – CHAMPS DE VITESSES : CONDITIONS ANNUELLES

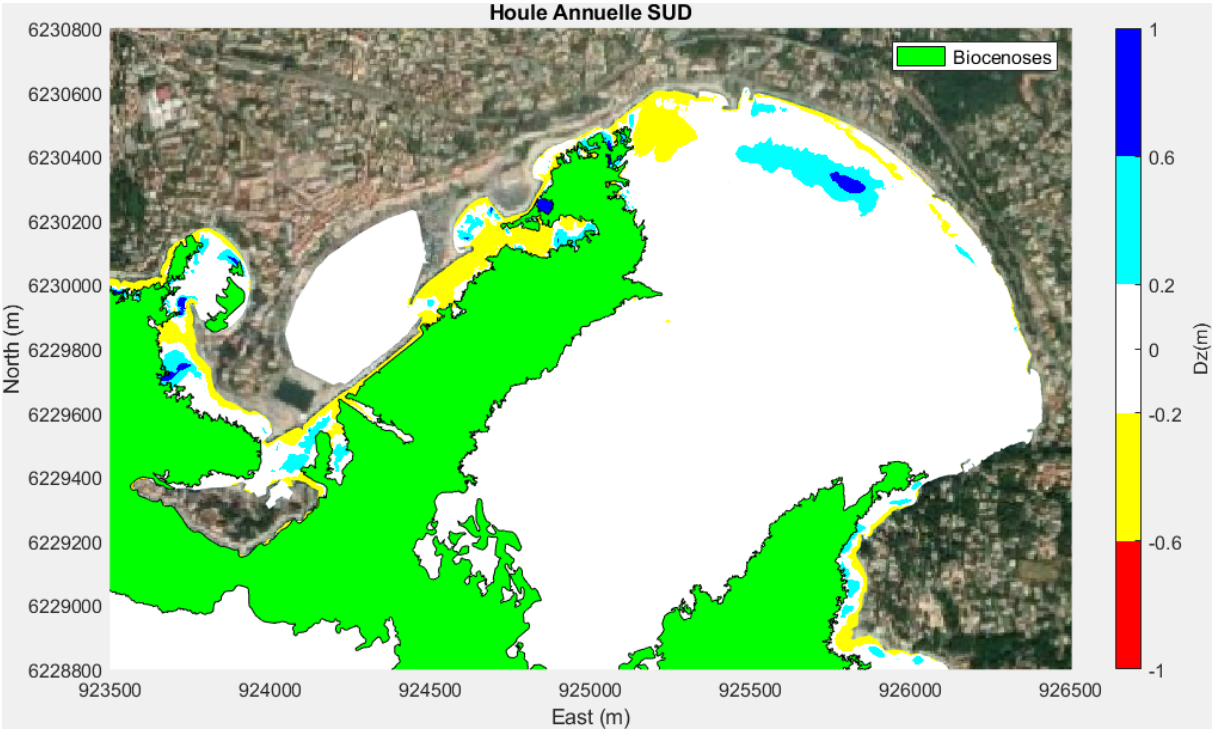


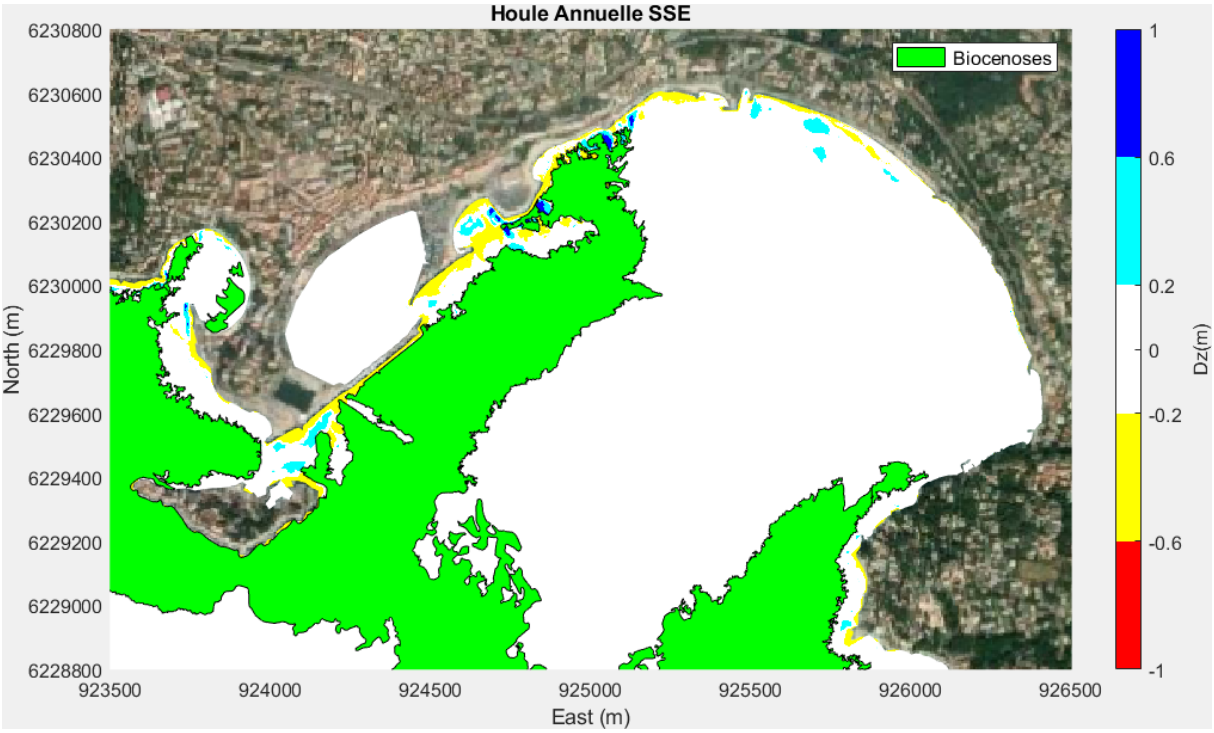



Houle Annuelle SSE
North (m)
East (m)
U(m/s)
6230800
6230600
6230400
6230200
6230000
6229800
6229600
6229400
6229200
6229000
6228800
923500
924000
924500
925000
925500
926000
926500
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0

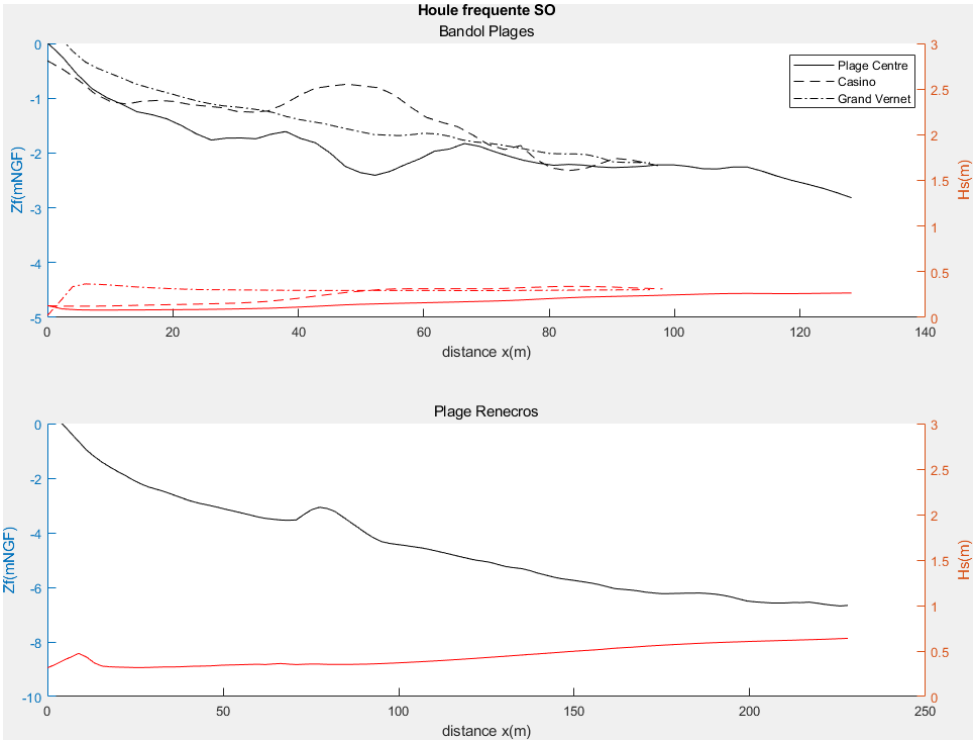
ANNEXE 3 – EVOLUTION DES FONDS : CONDITIONS ANNUELLES

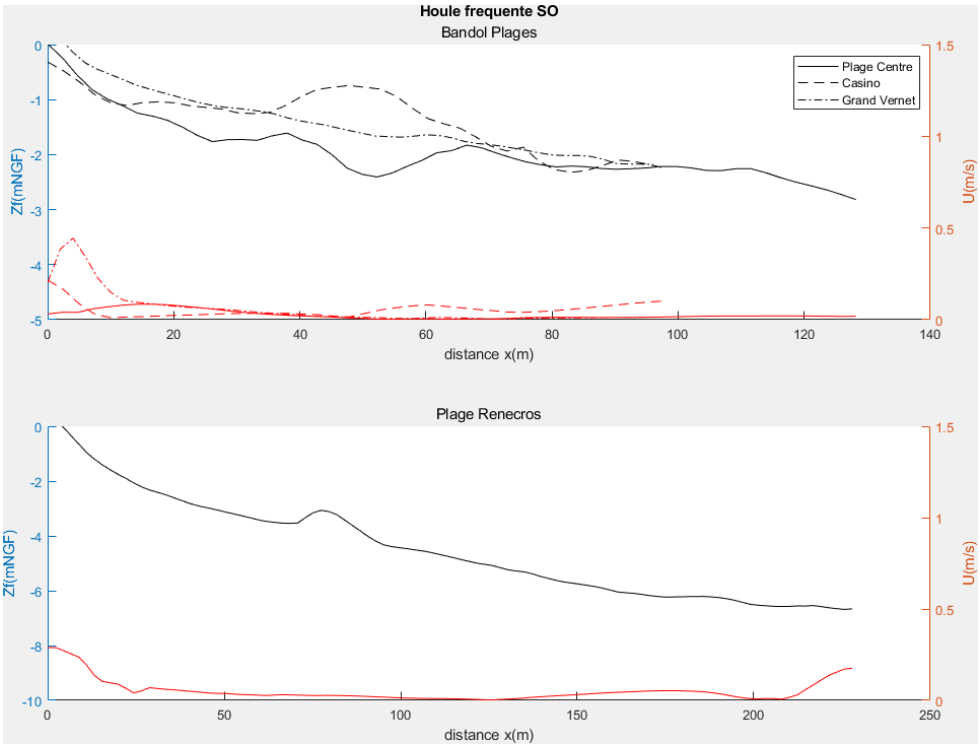


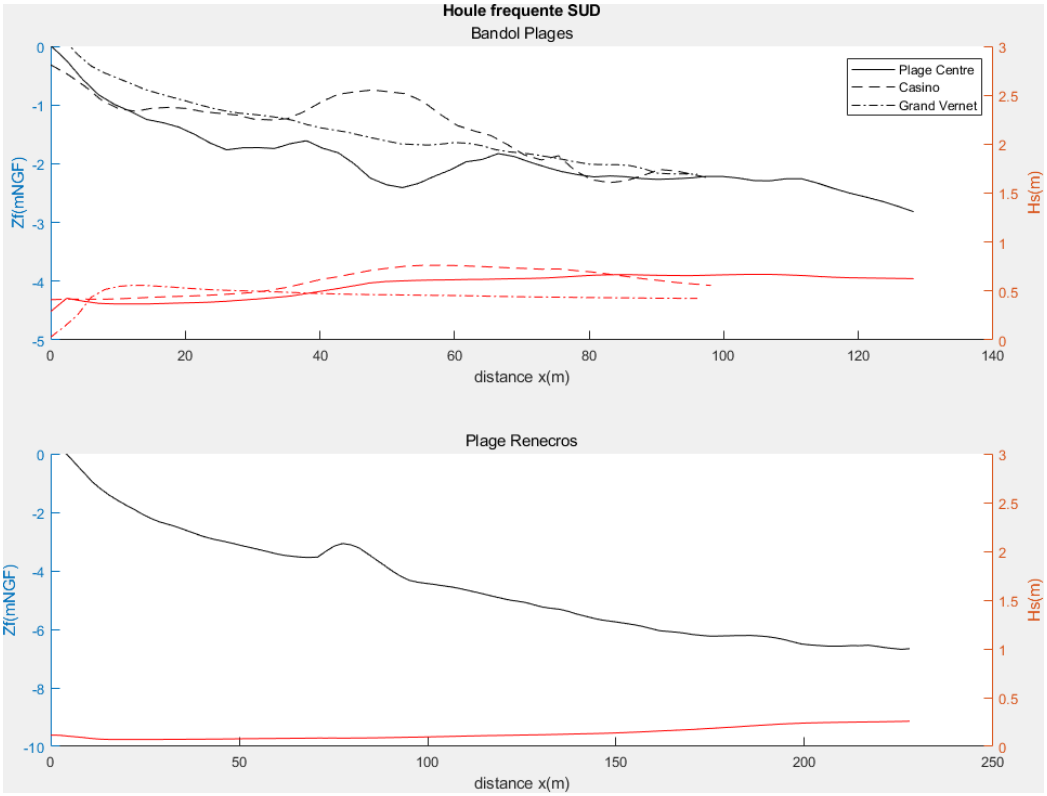


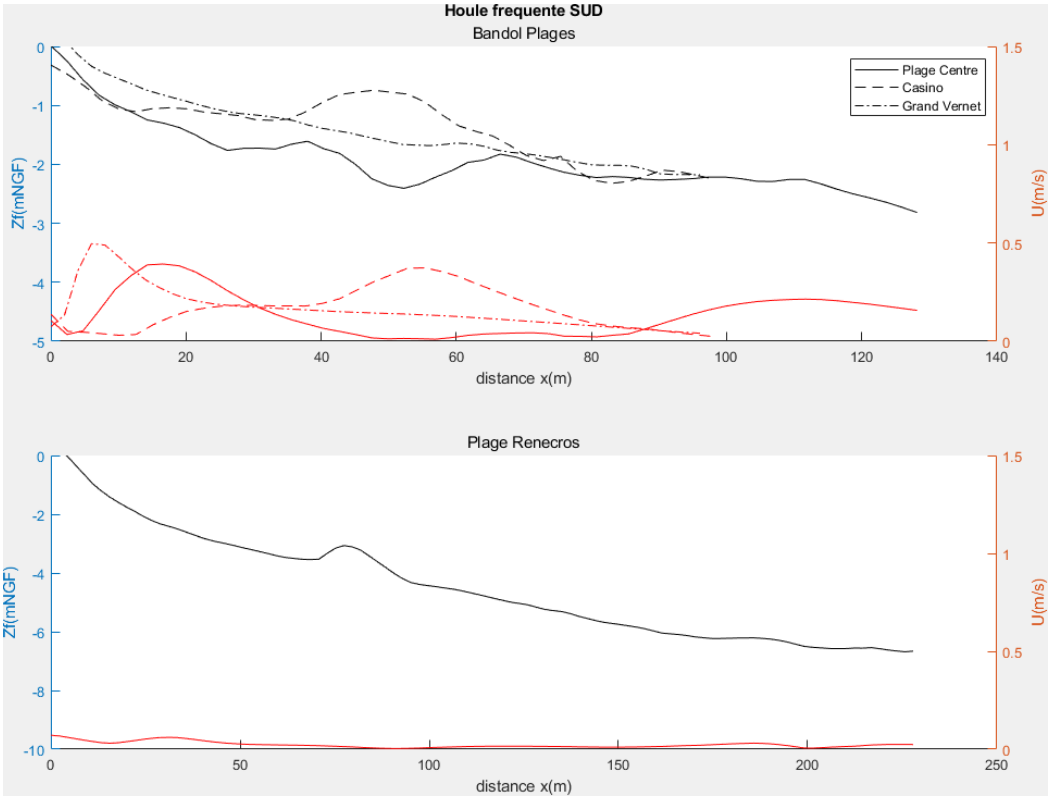

Houle Annuelle SSE
Biocenoses
North (m)
East (m)
Dz(m)
6230800
6230600
6230400
6230200
6230000
6229800
6229600
6229400
6229200
6229000
6228800
923500
924000
924500
925000
925500
926000
926500
1
0.6
0.2
0
-0.2
-0.6
-1

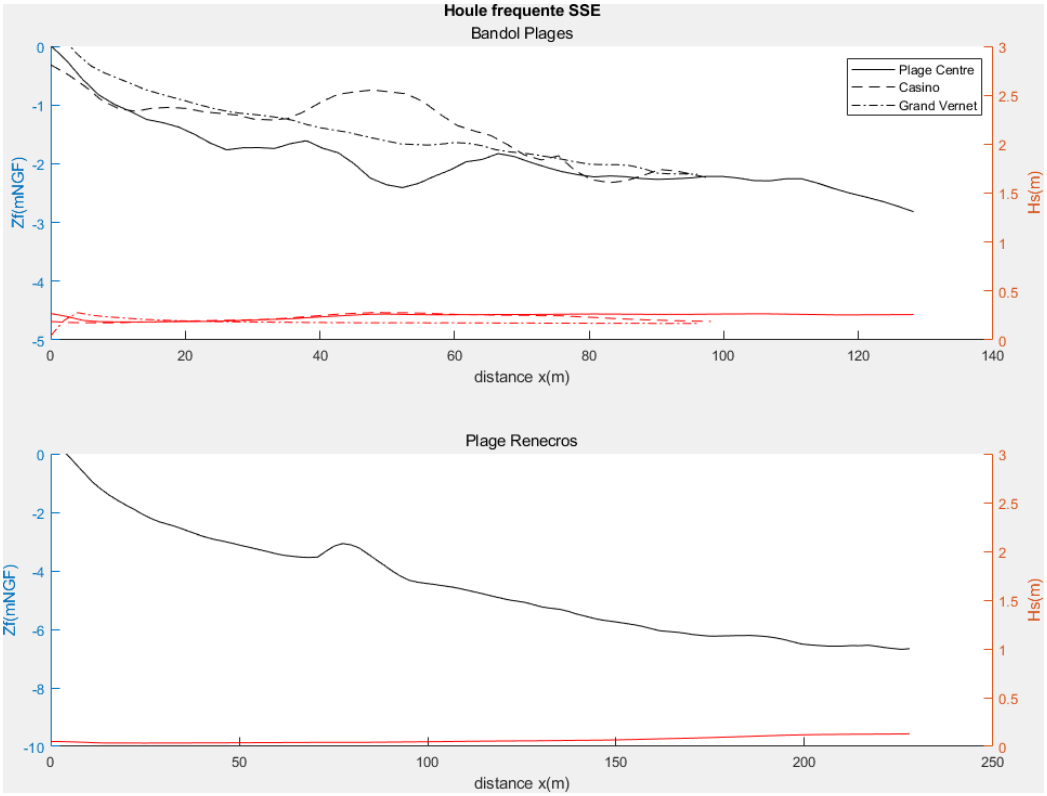
ANNEXE 4 – EXTRACTION DE VALEURS DE HAUTEURS DE HOULE ET VITESSE LE LONG DE PROFILS - CONDITIONS FREQUENTES ET ANNUELLES

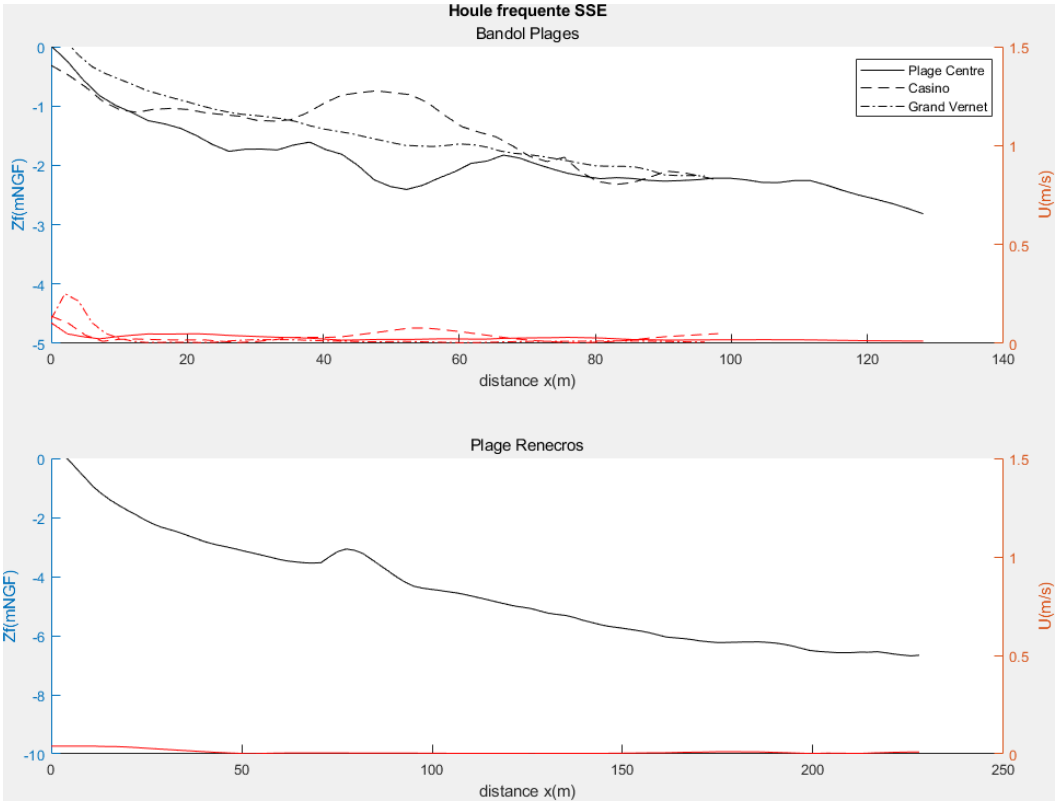


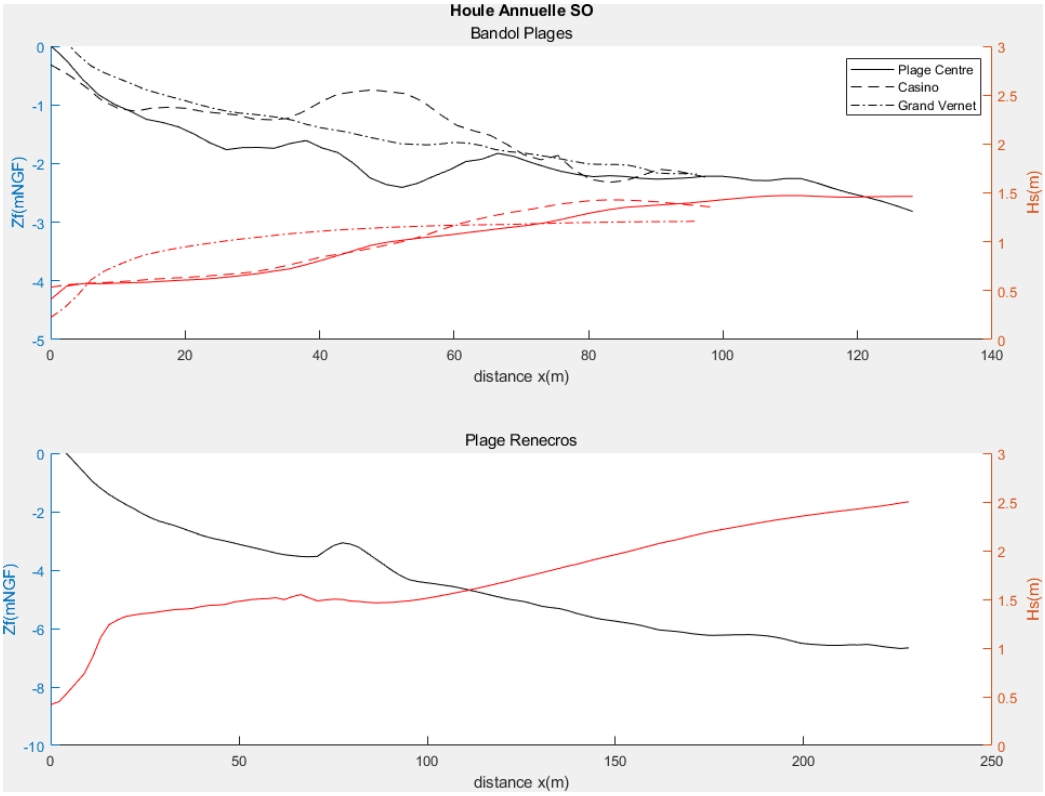


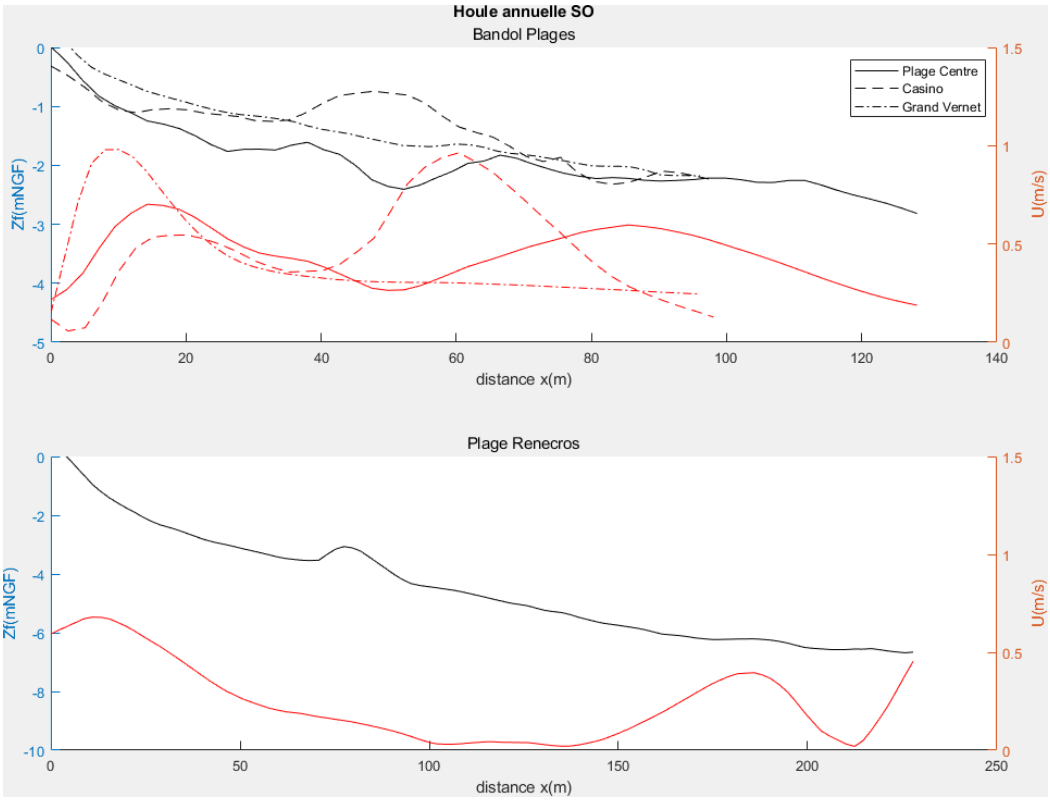

Houle frequente SUD
Bandol Plages
Plage Centre
Casino
Grand Vernet
Zf(mNGF)
Hs(m)
distance x(m)
Plage Renecros
Zf(mNGF)
Hs(m)
distance x(m)

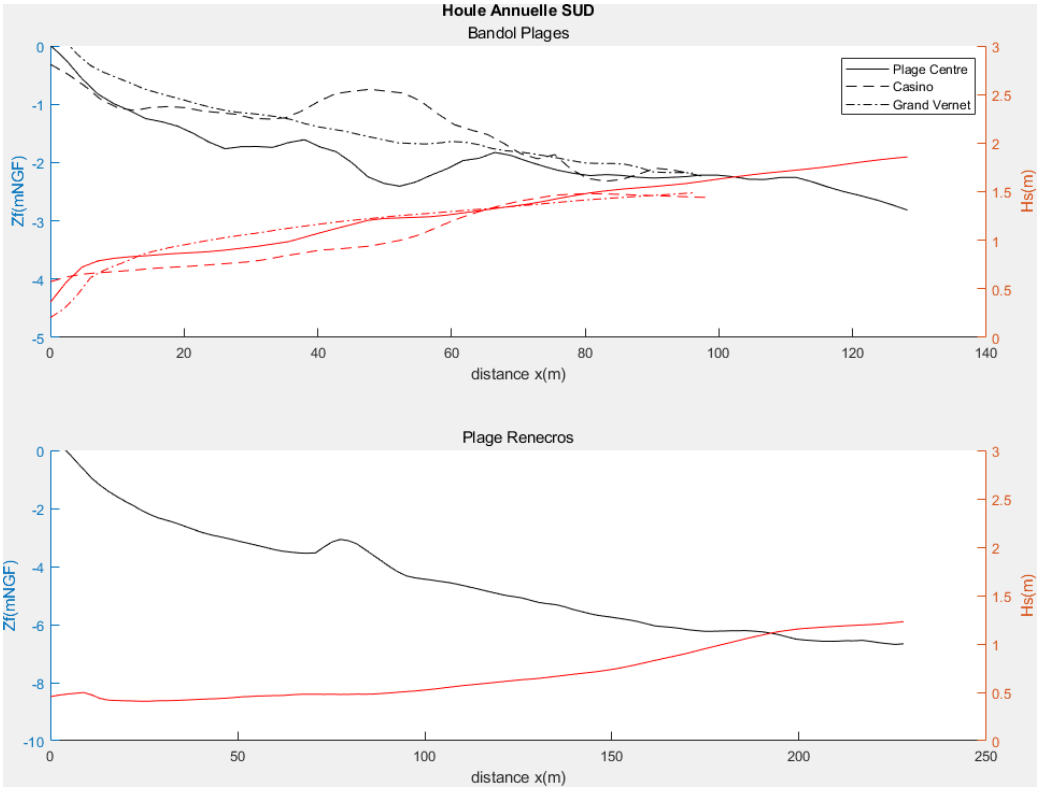

Houle frequente SUD
Bandol Plages
Plage Centre
Casino
Grand Vernet
Zf(mNGF)
U(m/s)
distance x(m)
Plage Renecros
Zf(mNGF)
U(m/s)
distance x(m)

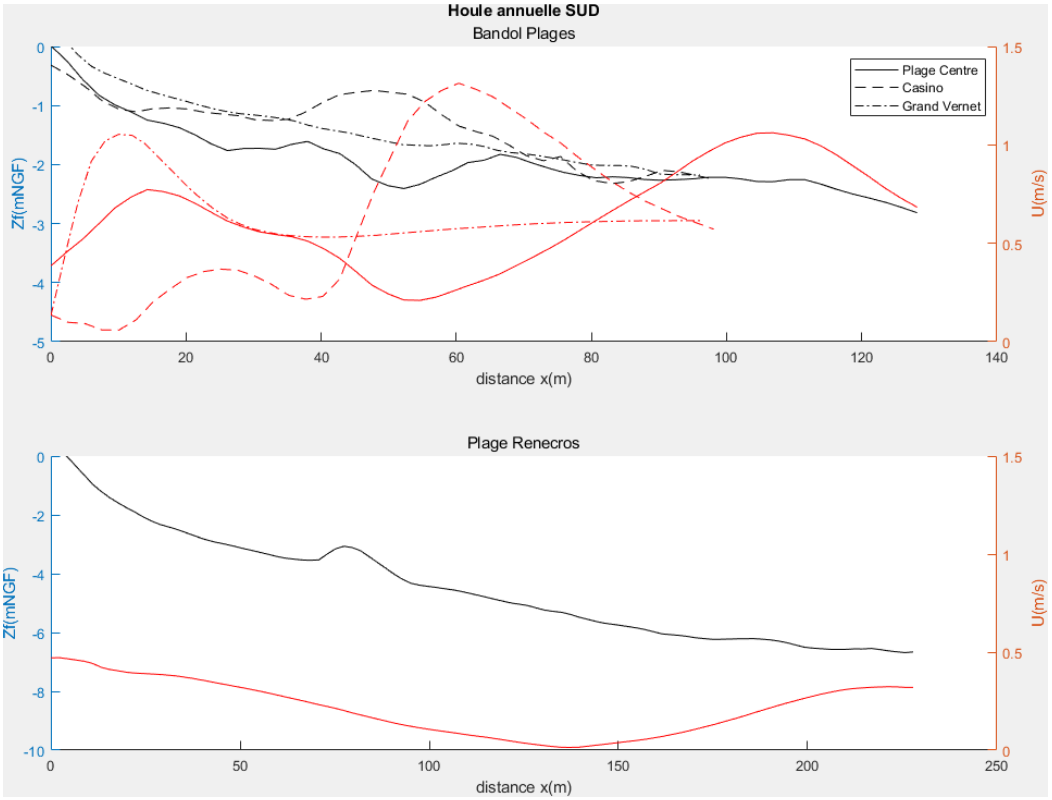

Houle frequente SSE
Bandol Plages
Plage Centre
Casino
Grand Vernet
Zf(mNGF)
Hs(m)
distance x(m)
Plage Renecros
Zf(mNGF)
Hs(m)
distance x(m)

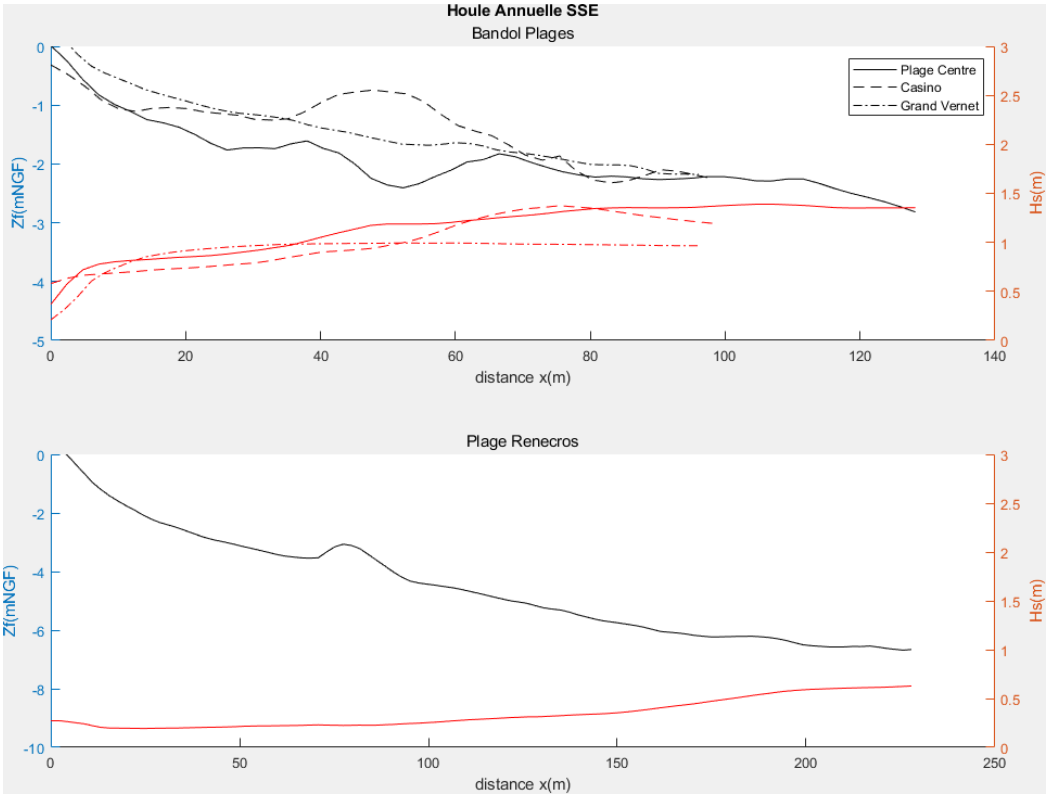

Houle frequente SSE
Bandol Plages
Plage Centre
Casino
Grand Vernet
Zf(mNGF)
U(m/s)
distance x(m)
Plage Renecros
Zf(mNGF)
U(m/s)
distance x(m)

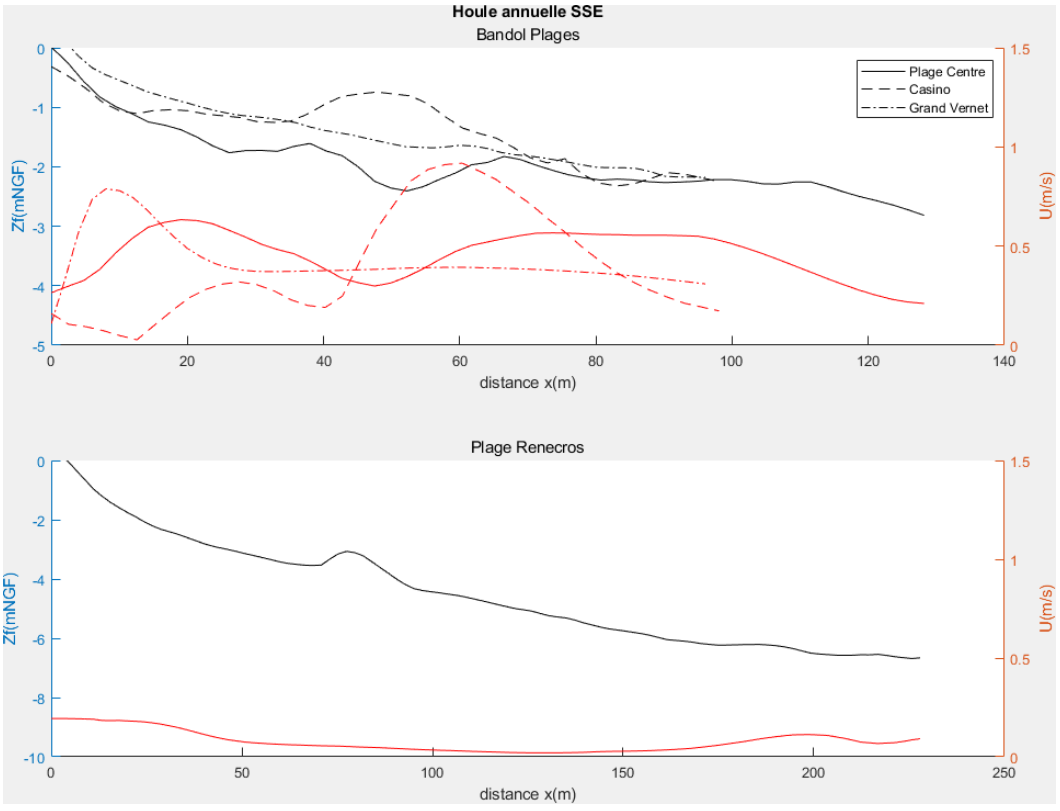

Houle Annuelle SO
Bandol Plages
Plage Centre
Casino
Grand Vernet
Zf(mNGF)
Hs(m)
distance x(m)
Plage Renecros
Zf(mNGF)
Hs(m)
distance x(m)


Houle annuelle SO
Bandol Plages
Plage Centre
Casino
Grand Vernet
Zf(mNGF)
U(m/s)
distance x(m)
Plage Renecros
Zf(mNGF)
U(m/s)
distance x(m)


Houle Annuelle SUD
Bandol Plages
Plage Centre
Casino
Grand Vernet
Zf(mNGF)
Hs(m)
distance x(m)
Plage Renecros
Zf(mNGF)
Hs(m)
distance x(m)


Houle annuelle SUD
Bandol Plages
Plage Centre
Casino
Grand Vernet
Zf(mNGF)
U(m/s)
distance x(m)
Plage Renecros
Zf(mNGF)
U(m/s)
distance x(m)


Houle Annuelle SSE
Bandol Plages
Plage Centre
Casino
Grand Vernet
Zf(mNGF)
Hs(m)
distance x(m)
Plage Renecros
Zf(mNGF)
Hs(m)
distance x(m)


Houle annuelle SSE
Bandol Plages
Plage Centre
Casino
Grand Vernet
Zf(mNGF)
U(m/s)
distance x(m)
Plage Renecros
Zf(mNGF)
U(m/s)
distance x(m)