

# Modélisation de la courantologie et de l'agitation au droit de la Petite Afrique - Beaulieu-sur-mer

R. Dumasdelage & J. Larraun  
Service Environnement

Juillet 2018

## 1 Contexte

La plage de la Petite Afrique est située sur la commune de Beaulieu-sur-mer dans la partie Ouest du golfe de Saint Hospice. Deux types d'ouvrage ont été construits en 1968:

- un brise-lames positionné longitudinalement au trait de côte
- un épi positionné perpendiculairement à la plage

L'anse Ouest de la cellule présente une forte turbidité pendant la saison estivale occasionnant des désagréments olfactifs et visuels.

L'étude détaillée dans ce document porte sur l'analyse de ce phénomène à travers un diagnostic des paramètres hydrodynamiques locaux (houle/courant) puis établit des solutions d'aménagement afin d'améliorer la circulation des eaux (fig. 1 et 2).



Figure 1: Suppression de l'îlot rocheux compris entre l'épis et le brise-lames

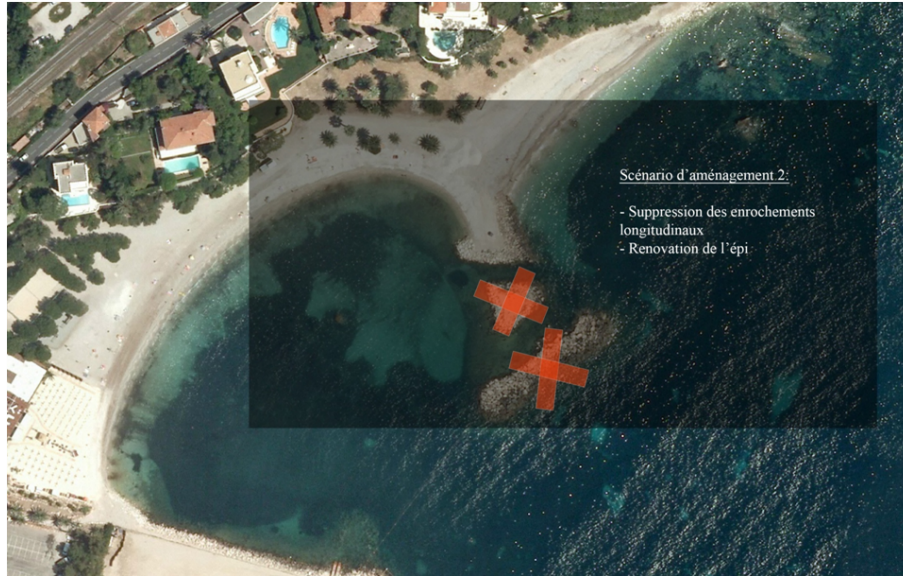


Figure 2: Suppression de l'îlot rocheux et du brise-lames

## 2 Zone d'étude et grilles de calcul

### 2.1 Emprise large

La grille de calcul d'emprise large, ou maillage, s'étend de Monaco à Agay (fig. 3) et est composée de 200 000 éléments (résolution 200m). Sur ce support les paramètres de houles au large ont été calculés. L'emprise importante du maillage permet de modéliser les vagues au droit du littoral métropolitain sans effet de bord. Une attention particulière a été portée aux proéminences du littoral influençant la propagation (le Cap d'Antibes pour les houles d'Ouest et le Cap Ferrat pour les houles d'Est).

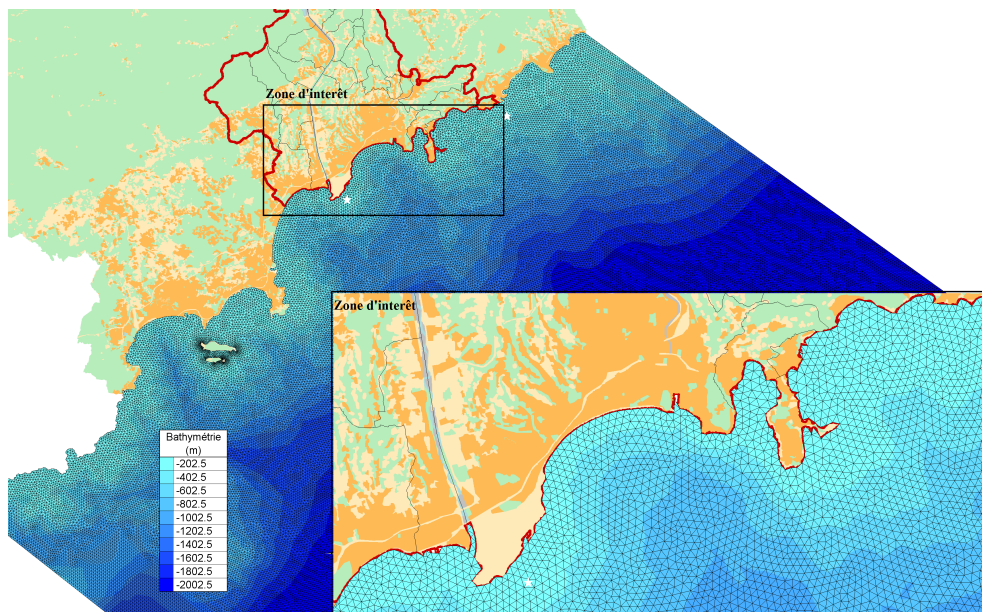


Figure 3: Grille de calcul modèle d'emprise large



## 2.2 Emprise locale

Le second maillage d'emprise plus réduite est centré sur le littoral de Beaulieu afin de simuler avec précision les interactions des vagues et du courant avec les ouvrages présents. Les simulations menées sur la grille d'emprise large sont couplées aux calculs réalisés sur le maillage d'emprise locale.

Il est composé de trois zones de tailles de maille différentes. Plus la résolution est haute et plus la taille de la maille est fine. La résolution croît donc à mesure que la hauteur d'eau diminue. Ainsi, une taille de maille de 8m est choisie pour les fonds importants tandis qu'elle est de 1 m pour les petits fonds (fig. 4).

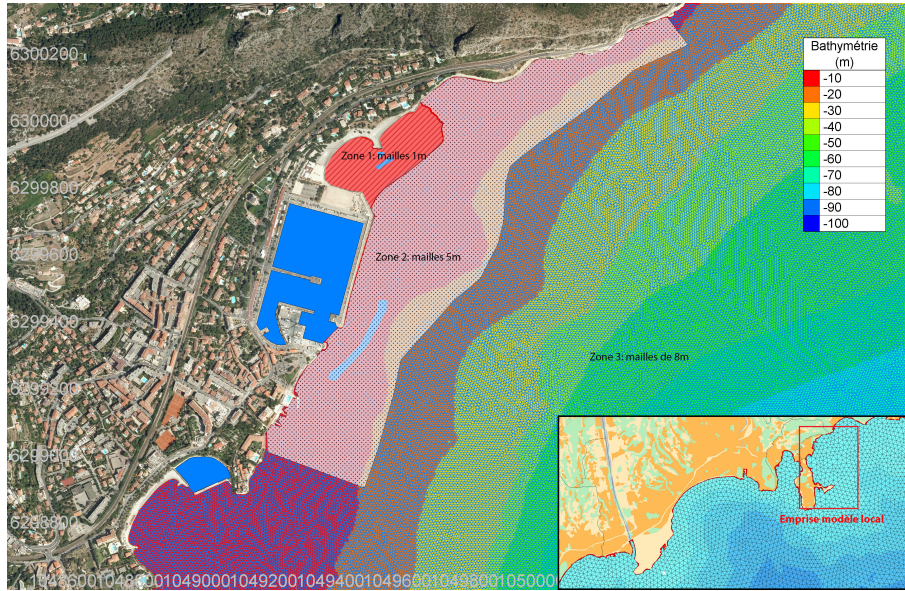


Figure 4: Maillage du modèle local

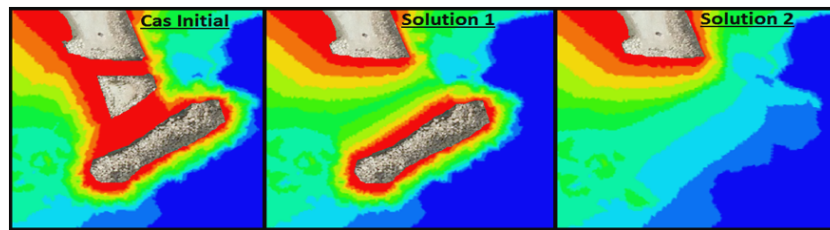


Figure 5: Différences entre les configurations

Plusieurs campagnes de mesures ont été utilisées pour interpoler la bathymétrie sur la zone:

- Un relevé du SHOM pour les fonds allant de -50m à -2000m
- Un relevé effectué par Mesuris en 2006 dans le cadre du contrat de baie pour les fonds compris entre -10 et -50m
- Un relevé bathymétrique des petits fonds (de -10m à -1m) commandé par le service Air Milieux Front de mer et Plan d'eau en 2014

Afin d'intégrer les solutions d'aménagement au modèle, le maillage et la bathymétrie ont été modifiés au niveau des structures rocheuses(fig. 5).

### 3 Scénarios et hypothèses

Vingt quatre scénarios de houles usuelles sont simulés pour chaque aménagement afin de caractériser les événements d'amplitudes faibles (fig. 6), majoritaires en méditerranée (90% des houles ont une hauteur significative inférieure à 2.0m).

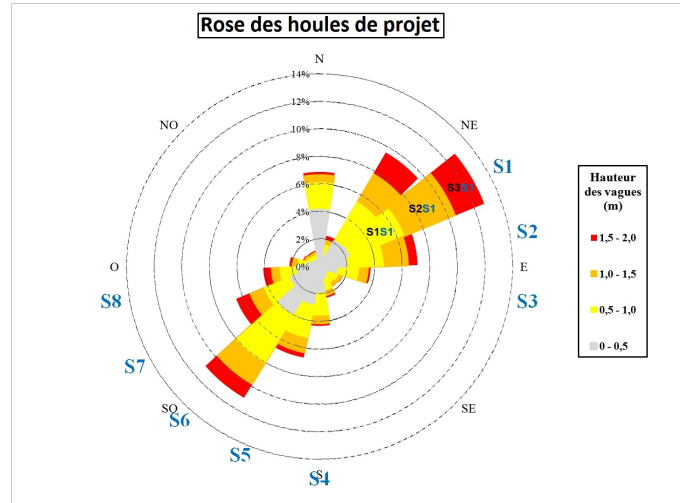


Figure 6: Caractéristiques simulées pour les scénarios de houles usuelles S1SX, S2SX et S3SX (détails en annexe)

Cette démarche permet donc de modéliser les agitations les plus représentatives sur les zones d'emprises large et réduite.



Figure 7: Positionnement des bouées d'enregistrement de houle sur la zone d'étude

Les occurrences de ces scénarios et leurs caractéristiques ont été calculés à partir des enregistrements du houlographe de Météo-France sur la période 1999 à 2006 (fig. 7). Cette bouée étant non-directionnelle, nous avons considéré la direction de propagation identique à la direction du vent afin d'établir les occurrences de chaque secteur (hypothèse raisonnable pour des houles de vents).

Quatre scénarios de houles de tempêtes sont également établis. Le tableau 8 détaille leurs caractéristiques



pour une période de retour 10 ans (S5).

| Houles de tempête période de retour 10 ans |           | Caractéristiques de la houle au large |       |      |
|--------------------------------------------|-----------|---------------------------------------|-------|------|
| Secteur incidence                          | Id du cas | Incidence                             | Hs    | Tp   |
| E                                          | S5S1      | 90°N                                  | 3,9m  | 9s   |
| ESE                                        | S5S2      | 100°N                                 | 3,9m  | 9s   |
| S                                          | S5S3      | 185°N                                 | 5,05m | 9,4s |
| SO                                         | S5S4      | 210°N                                 | 5,25m | 9,2s |

Figure 8: Caractéristiques des scénarios de houles de tempête

La station météorologique du Cap Ferrat est utilisée pour définir les scénarios de vent. Ainsi, les vents les plus fréquemment observés sont de directions principales: Est-Sud-Est et Ouest-Nord-Ouest. Plus précisément, les secteurs de direction N260° à N320° et N80° à N120° représentent respectivement 30.4% et 38% des enregistrements (fig. 9).

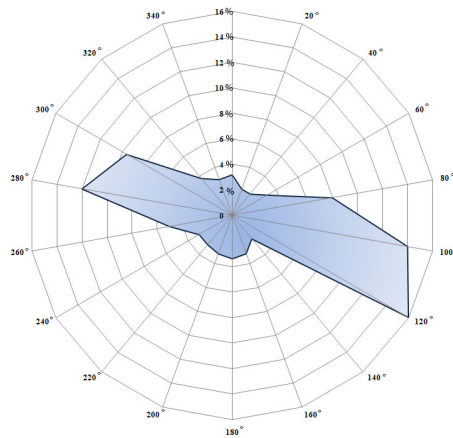


Figure 9: Rose des vents-station Cap-Ferrat

Au regard des ces statistiques, nous avons choisi de simuler un vent d'Est (N100°) pour les houles de secteur Est-Nord-Est et Est-Sud-Est. Pour les scénarios de houles de Sud à Ouest-Sud-Ouest, le vent a été paramétré Ouest-Nord-Ouest (N280°). L'intensité du vent est fixée à 5m/s dans toutes les simulations (détails en Annexe A.2).

Enfin, les houles de tempête décrites ci-dessus sont combinées à un niveau marin égal à 0.85m. Ce niveau tient compte de:

- la surcote atmosphérique exceptionnelle d'une période de retour de 10 ans,
- la hausse du niveau de l'eau due à la marée astronomique correspondant à la pleine mer moyenne de vives eaux (PMVE),
- la surélévation du niveau moyen des mers due aux changements climatiques, hypothèse pessimiste à 2030.

| Niveaux marée<br>(NGF-IGN69) | Surcote<br>atm. | Rech. Clim | Niveau de<br>projet (NGF-<br>IGN69) |
|------------------------------|-----------------|------------|-------------------------------------|
| 0,24m                        | 0,47m           | 0,14m      | 0,85m                               |

Figure 10: Rose des vents-station Cap-Ferrat

## 4 Méthodologie

### 4.1 Représentation de la houle

Sur la grille d'emprise large, les simulations s'appuient sur le code de calcul de 3<sup>ème</sup> génération TOMAWAC (acronyme de TELEMAC-based Operational Model Addressing Wave Action Computation). Il utilise la méthode des éléments finis afin de résoudre l'équation de conservation d'énergie spectrale de la houle.

L'événement enregistré entre le 02 Novembre et le 09 Novembre 2014 a été exploité pour valider le modèle en tempête. Le rapport (Dumasdelage, 2017) détaille la méthode de calibration et les performances du modèle pour d'autres événements de houle. Les résultats de simulations ont été comparés aux enregistrements des houlographes (fig. 7) et attestent de la précision des résultats (Annexes A.1).

Le code de calcul utilisé pour le modèle local est ARTEMIS. Il permet, grâce aux équations de Berkhoff, de simuler les interactions entre la houle, la côte et les ouvrages (phénomènes de diffraction, réfraction et réflexion). Ce code a été modifié afin de transférer les résultats du modèle global aux limites du modèle local (hauteurs significatives et directions de propagation).

Le brise-lames, l'épi et les digues portuaires ont été configurés grâce à leur topographie et leur coefficient de réflexion.

Les 24 scénarios usuels ainsi que les 4 scénarios de tempêtes présentés précédemment sont simulés à l'aide de ces deux modèles sur chacun des maillages.

### 4.2 Courantologie

TELEMAC2D a été choisi pour calculer les variations de hauteur d'eau et des vitesses horizontales (moyennées sur la verticale) de la surface libre en chaque point du domaine. Pour se faire, le système de Saint-Venant est résolu selon deux directions d'espace (x et y). L'interaction de la houle et du courant est prise en compte grâce à un couplage indirect avec ARTEMIS.

**Les simulations de courantologie ont été menées uniquement sur la grille de calcul locale pour les scénarios de houles usuelles** (Annexe A.2). En effet, l'objectif de l'étude consiste à solutionner un problème de turbidité survenant fréquemment en été. Les cas d'agitation fortes comme les coups de mer sont des phénomènes rares. Ils ne nécessitent donc pas une attention particulière.

### 4.3 Calcul de la submersion

Dans le cas du calcul de la submersion marine, et contrairement à l'étude courantologique, seuls les scénarios exceptionnels (de tempêtes) sont étudiés. Ainsi, nous nous appuyons sur le scénario le plus défavorable afin d'établir l'altitude atteinte par le jet de rive pour 2% des vagues les plus importantes  $R_2$  (fig. 11).

Xbeach permet de modéliser les phénomènes hydrodynamiques et morphodynamiques intervenants dans la submersion marine. Deux simulations sont lancées successivement.

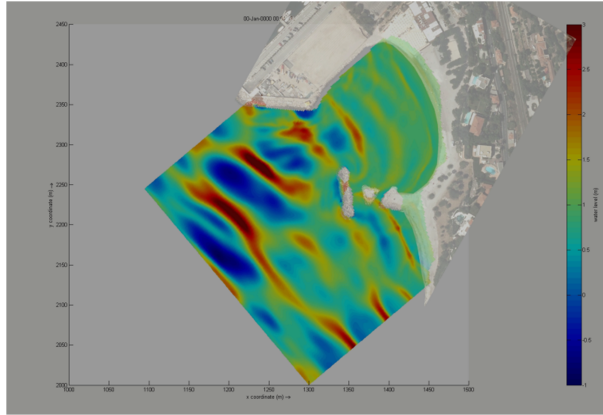


Figure 11: Scénario dimensionnant S5S2 (voir Annexe A.3.2 fig. 13): Houle de tempête d’une période de retour 10 ans

Les modifications du fond sont calculées, dans un premier temps, grâce à un modèle énergétique de la houle et à la résolution d’une équation d’advection-diffusion de la concentration en sédiment. Puis, les valeurs du run-up sont évaluées en utilisant la forme non linéaire du système de Saint-Venant en deux dimensions avec l’hypothèse de pression non hydrostatique (terme d’accélération verticale pris en compte).

La frontière Sud du modèle Xbeach est configurée à l’aide d’un couplage avec ARTEMIS. Les paramètres de houle sont moyennés et transférés aux limites.



## 5 Résultats et interprétations

### 5.1 Diagnostic de l'état initial

Les résultats des modélisations de houle montrent que les seuls scénarios entraînant une agitation significative au droit de la petite Afrique sont les houles S3S1, S3S2, S3S3. Ces derniers sont représentatifs des agitations provenant du large du secteur Est comprises entre les directions N°70 et N°110. Nous pouvons également noter que les houles de secteur sud (S3S4) peuvent engendrer des hauteurs de vagues supérieures à 0.7 m au droit de la zone d'intérêt (phénomène engendré par la réfraction). Néanmoins, dans chacun de ces cas, un amortissement des hauteurs significatives est observable à l'approche de la partie Ouest de la plage. L'agitation ne dépasse pas 0.9 m pour une houle au large de 1 m 75 à 6sec (quelque soit sa direction).

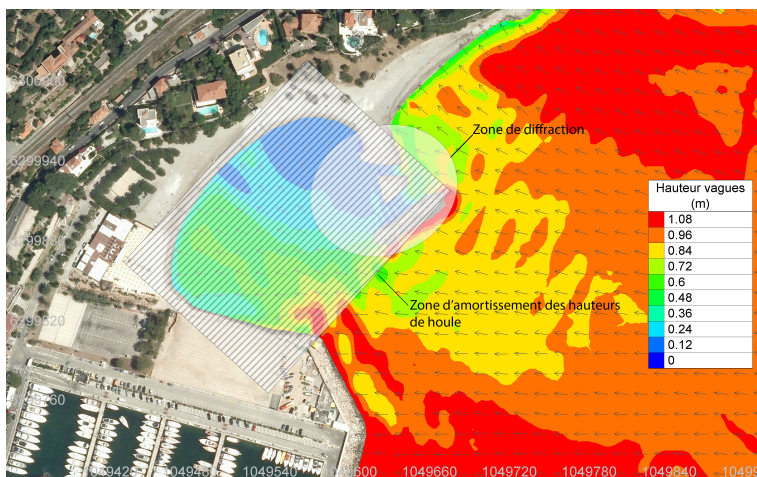


Figure 12: Résultat de simulation pour le scénario S3S2 du modèle local d'agitation - houle de secteur ESE

Le Cap Ferrat protège la zone d'étude des événements de secteur Sud-Ouest et Ouest-Sud-Ouest représentés par les scénarios S3S5, S3S6, S3S7 et S3S8 <sup>1</sup>.

Pour la totalité des scénarios, le brise-lames positionné au droit de la Petite-Afrique induit une diffraction de la houle autour de l'ouvrage.

Enfin, pour la partie courantologie, les houles de direction Ouest-Sud-Ouest (S1S7, S1S8, S2S7, S2S8, S3S7, S3S8) et Sud-Ouest (S1S5, S1S6, S2S5, S2S6, S3S5, S3S6) génèrent des courants très faibles et principalement causés par l'action du vent (Annexe A.4.3). Ce phénomène s'explique par les faibles hauteurs significatives exposées précédemment.

Pour les agitations de Sud, seul les houles au large d'amplitude supérieure à 1m50 induisent un courant littoral plus prononcé (Annexe A.4.3 : fig. 27, S3S4). Ce dernier se traduit par des vitesses comprises entre 0.2 et 0.4m/s, maximales au droit du brise-lames.

Les houles de secteur Est-Nord-Est et Sud-Est sont les plus dommageables pour la Petite Afrique. Par conséquent, elles génèrent un courant longitudinal produit par le déferlement <sup>2</sup>. Ce dernier est orienté Est-Ouest au droit de la partie Est de la plage et Ouest-Est à l'Ouest des ouvrages (Annexe A.4.3 : fig. 27).

<sup>1</sup>les mêmes observations ont été faites pour les scénarios d'agitation plus faibles S1 et S2

<sup>2</sup>l'action du vent est négligeable dans ce cas

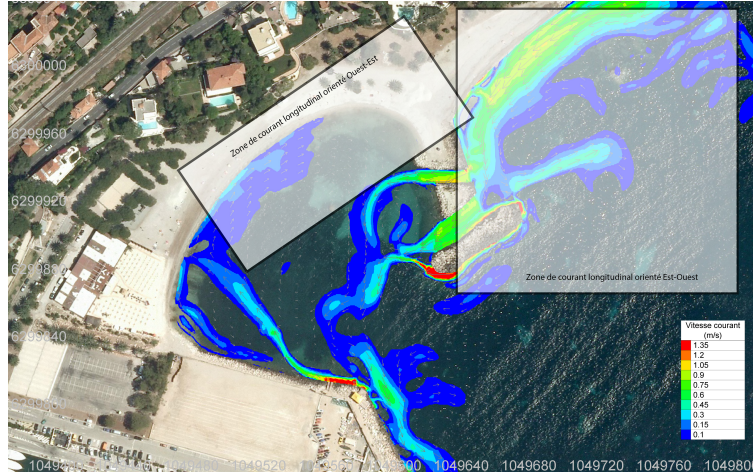


Figure 13: Résultat de simulation pour le scénario S3S2 du modèle local de courantologie

## 5.2 Solution 1: Suppression de l'îlot central

Lorsque seul l'îlot central est retiré, le courant observé entre l'épis rocheux et le brise lame devient plus homogène. De fait, l'espace inter-structure s'élargit, la vitesse du courant augmente alors en son centre et diminue proche des ouvrages restants (fig. 14). En raison de la position du brise-lames et de l'enclavement de l'anse, ce phénomène ne concerne que les houles de direction Est-Nord-Est à Sud-Est de hauteur supérieure à 1m (directions S1 à S3, hauteurs S2 à S3). L'ensemble de ces scénarios représentent 11.5% des agitations totales selon l'étude menée par SOGREAH (SOGREAH, 2009, fascicule 1 p22).

En revanche, pour les houles de direction Sud-Ouest à Ouest-Sud-Ouest (S5 à S8) qui génèrent initialement un courant très faible, aucune amélioration dans la circulation des eaux n'est observée quelque soit la hauteur des vagues.

Concernant l'agitation, il n'y a aucun changement notable. Cette solution n'aura donc pas d'impact sur la submersion marine.

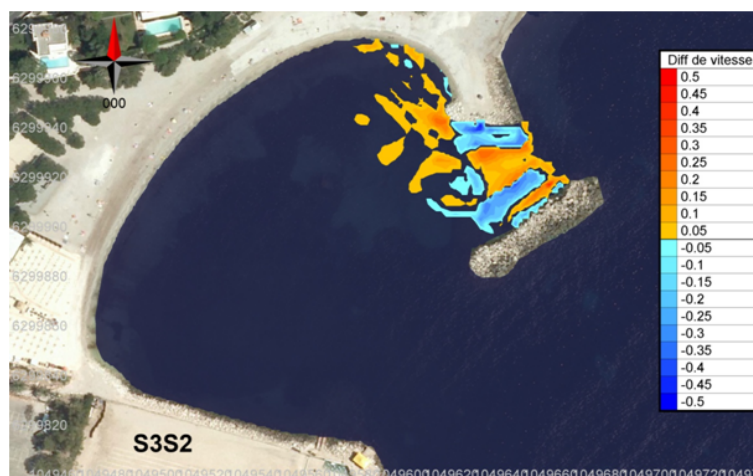


Figure 14: Résultat de la comparaison entre les simulations pour le scénario S3S2 du modèle local de courantologie de l'État Initial et de la Solution 1

### 5.3 Solution 2: Suppression du brise-lames et de l'îlot central

La suppression de l'îlot rocheux et du brise-lames implique une augmentation de l'agitation (fig. 15) localisée dans la partie Est de l'anse et au droit de l'épis. Cette modification est observée pour les houles de direction Est-Nord-Est à Sud-Est et de hauteur supérieure à 0.5m (directions S1 à S3, hauteurs S1 à S3). Ces scénarios représentent 35% des agitations.

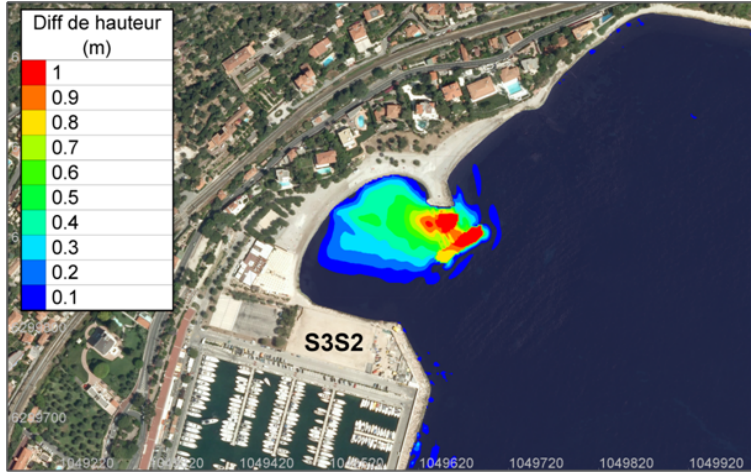


Figure 15: Résultat de la comparaison entre les simulations pour le scénario S3S2 du modèle local de houle de l'état initial et de la Solution 2

Le courant, calculé à partir des résultats d'ARTEMIS, est donc lui aussi augmenté dans 35% des agitations. Ainsi, l'amélioration de la circulation des eaux est plus significative que pour la solution d'aménagement 1, le courant est doublé en intensité (fig. 16). Cependant, cette amplification du courant n'est pas observable dans la partie Ouest de l'anse à cause d'un contre courant, dirigé vers l'Est, qui lui n'est pas impacté par les modifications.

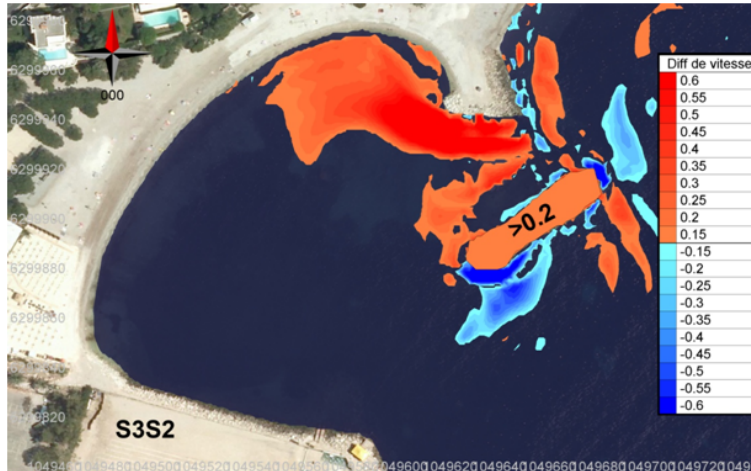


Figure 16: Résultat de la comparaison entre les simulations pour le scénario S3S2 du modèle local de courantologie de l'état initial et de la Solution 2



Les modifications de l'agitation de la solution d'aménagement 2 entraînent, une augmentation de la côte du run-up de 10% sur la partie de la plage située derrière le brise-lames. Cela correspond à une augmentation de 0.2m de la côte atteinte par 2% des vagues ( $R_2$ ) lors d'un événement de tempête de période de retour 10 ans (fig. 17). La zone submergée serait alors repoussée jusqu'à la limite de la zone grise sur la figure 18. La zone bleue représente quant à elle la limite atteinte par les eaux, pour la même tempête, pour l'état actuel (avec toutes les structures rocheuses).

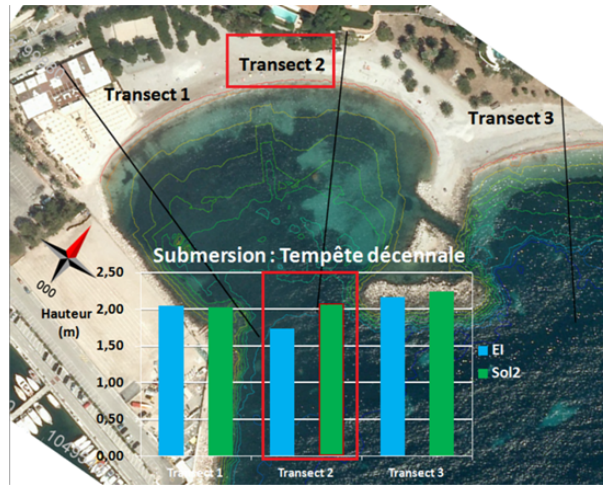


Figure 17: Comparaison des résultats de run-up des simulations XBeach pour le scénario S5S2 entre l'état initial et la Solution 2

Pour obtenir la figure 18, une isoligne correspondante au résultat du calcul du run-up a été créée à partir des données topographiques initiales de la plage. A chaque portion de plage est associé une côte de run-up; les lignes topographiques du terrain naturel sont alors reliées entre elles pour former la limite atteinte par le jet de rive.

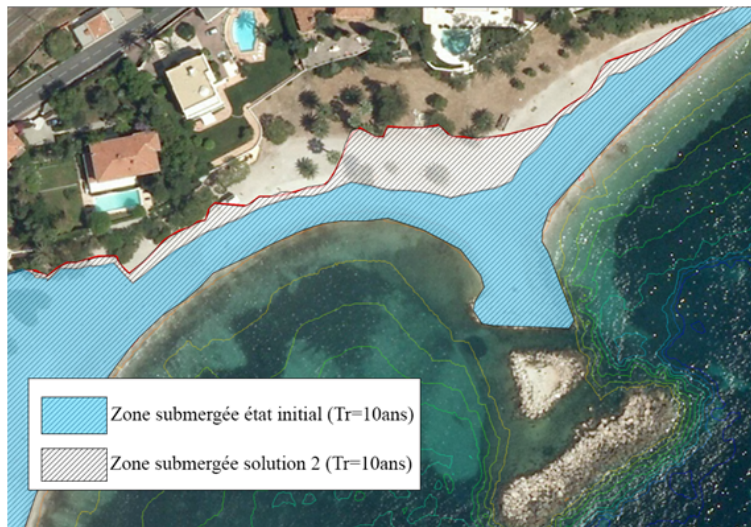


Figure 18: Résultat de la comparaison entre les simulations pour le scénario S5S2 du modèle local de submersion de l'État Initial et de la Solution 2



La solution d'aménagement 2 modifie également le transport sédimentaire. En supprimant le brise-lames et donc en augmentant l'agitation, l'accrétion est diminuée aux abords de l'épi (fig. 19). Ce résultat est généralisable à toutes les houles entraînant des mouvements de sédiments puisque le rôle de protection des enrochements longitudinaux n'est plus effectif.

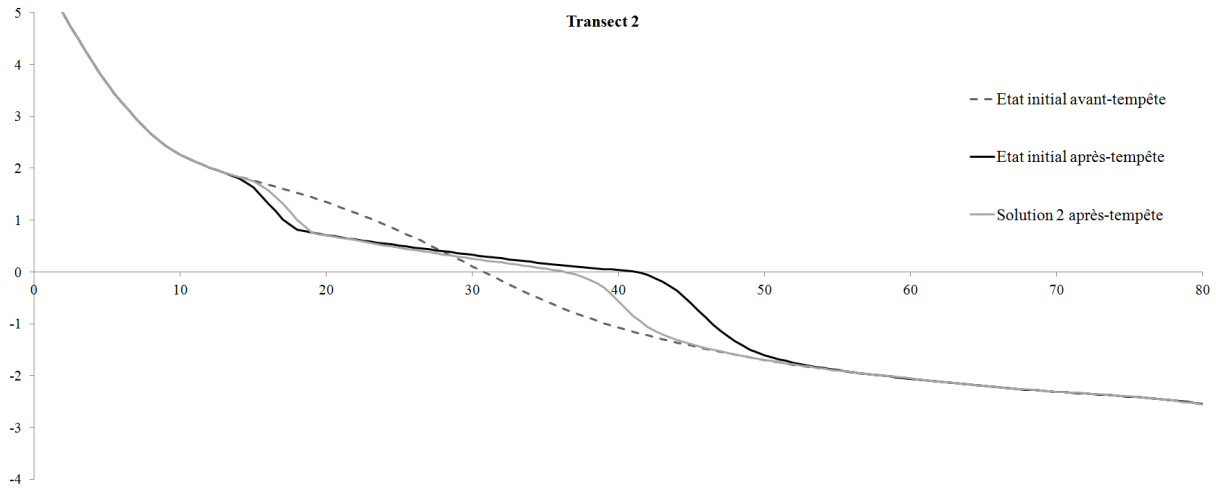


Figure 19: Comparaison de l'accrétion entre l'état initial et la solution d'aménagement 2 en cas de tempête

## 6 Conclusion et discussion

Pour résumer, l'étude a permis de démontrer les points suivants:

- Le Cap Ferrat et la bathymétrie locale sont à l'origine d'une réduction importante de la hauteur de houle à l'approche de la côte pour les secteurs Ouest-Sud-Ouest à Sud.
- Les structures en place créent une zone protégée de l'agitation et des courants au droit de l'anse Ouest, quelque soit les directions de propagation.
- Un courant convergent centré sur l'épi est généré par la diffraction de la houle autour du brise-lames, la bathymétrie et la topographie locale.
- La partie Ouest de la petite Afrique est caractérisée par une intensité faible des courants pour la majorité des scénarios testés. Seulement 5.4% <sup>3</sup> des agitations usuelles génèrent un courant important ( $\geq 0.4 \text{ m/s}$ ). Ces dernières proviennent d'une houle au large de secteur Est-Nord-Est ou Est-Sud-Est.

L'insuffisance d'agitation et de courant au droit de la partie Ouest de la plage est à l'origine de la stagnation de matériaux fins et d'algues en suspension. Il en découle une forte turbidité et des désagréments olfactifs et visuels pour les baigneurs.

Les scénarios d'aménagement ont été simulés afin de lutter contre ce phénomène. Leur étude a permis de démontrer que:

- la solution 1 améliore la circulation des eaux pour 11.5% des agitations totales en rendant le courant plus homogène au niveau de l'espace inter-structure. Ne pas retirer le brise lame permet d'éviter un impact sur la côte de submersion. Le coût de la suppression de l'îlot s'élèverait à 49 000 euros HT.
- la solution 2 améliore quant à elle la circulation des eaux pour 35% des agitations en allant jusqu'à doubler la vitesse du courant dans la partie Est de l'anse. En revanche la côte de submersion est augmentée de 10% derrière l'épis. Retirer les deux structures aurait un coût de 315 000 euros HT.

Enfin il est important de noter que les améliorations présentées dans cette étude peuvent paraître assez faibles en raison des statistiques annoncées. Néanmoins, au vu de l'enclavement de la plage (port, cap Ferrat) et de la climatologie du secteur (34% des agitations présentent des hauteurs  $< 0.5\text{m}$ ), les résultats obtenus sont significatifs.

---

<sup>3</sup>ce pourcentage provient des statistiques des occurrences pour les houles de hauteur significative supérieur à 1.5m et de secteur N50° à N110°