



## NOTICE TECHNIQUE

Etude du comportement hydrosédimentaire de la zone située entre l'enbouchure de la Gisle et la digue du large de Port Grimaud I

N° Réf. : 890/1117

F G O NOTI 890 1117 1 0



# PORT GRIMAUD I



## Edition du document

	Nom	Date
Rédigé par	Fabrice GOUAUD	19/05/2014
Vérifié par		
Validé par		

## Versions et Modifications

Version	Date	Description	Modifications
0	19/05/2014	Notice technique	Version initiale

## SOMMAIRE

<b>1. DIAGNOSTIC DE L'EXISTANT</b> .....	<b>1</b>
1.1. LOCALISATION DU SITE D'ETUDE .....	1
1.2. BATHYMETRIE .....	2
1.2.1. Bathymétrie du large .....	2
1.2.2. Bathymétrie de la zone d'étude .....	2
1.3. CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES .....	3
1.3.1. Variation des niveaux d'eau .....	3
1.4. DONNEES DE VENT ET DE HOULE.....	3
1.4.1. Extrapolation des houles de projet.....	5
1.5. ANALYSE GRANULOMETRIQUE .....	6
1.6. SUIVI BATHYMETRIQUE.....	7
<b>2. ETUDE HYDROSEDIMENTAIRE</b> .....	<b>10</b>
2.1. SCENARII DE SIMULATION NUMERIQUE .....	11
2.2. ETUDE DE PROPAGATION DE HOULE .....	11
2.2.1. Présentation du logiciel de propagation .....	11
2.2.2. Paramétrage du Modèle Numérique .....	12
2.2.3. Résultats des simulations numériques .....	13
2.3. ETUDE DE COURANTOLOGIE ET DE TRANSPORT SEDIMENTAIRE .....	14
2.3.1. Paramétrage du Modèle Numérique .....	14
2.3.2. Comportement hydrosédimentaire suite à un évènement de tempête de 72h.....	15
2.4. ETUDE DU COMPORTEMENT HYDROSEDIMENTAIRE A LONG TERME .....	19
<b>3. SYNTHÈSE</b> .....	<b>20</b>
<b>4. REFERENCES</b> .....	<b>20</b>
<b>5. ANNEXES : EVOLUTIONS BATHYMETRIQUES A LONG TERME (SIMULATION)</b> .....	<b>21</b>

## 1. Diagnostic de l'existant

### 1.1. Localisation du site d'étude

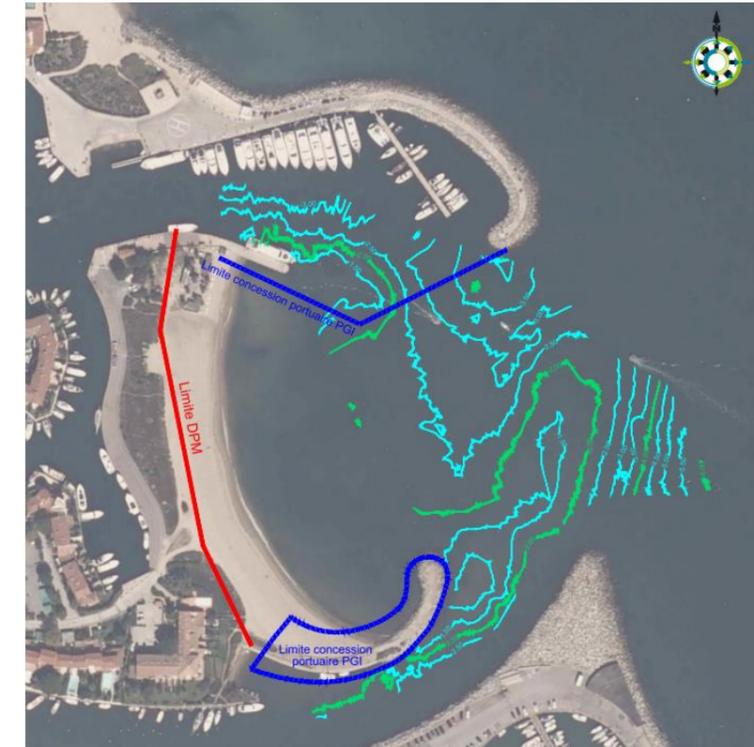
Le site d'étude est situé dans le département du Var sur la commune de Grimaud.



*Plan de localisation du site d'étude*

Port-Grimaud dispose d'un débouché en mer principal, la passe d'entrée « Capitainerie », et de deux débouchés secondaires empruntant le cours d'eau la Giscle mais que seules des embarcations d'une longueur inférieure à 10 mètres peuvent utiliser.

Le site d'étude concerne la zone constituée par l'embouchure de la Giscle, l'Avant Port et la passe d'entrée, dite « Capitainerie », de Port Grimaud I (PG1).



*Délimitation des différentes zones du site d'étude*

**1.2. Bathymétrie**

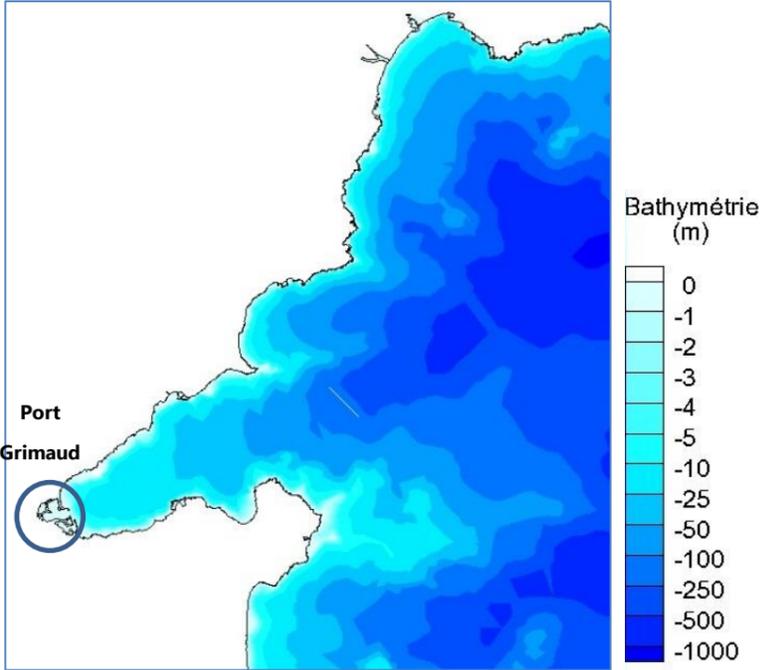
**1.2.1. Bathymétrie du large**

L'image ci-contre présente une compilation de toutes les données bathymétriques ayant été récoltées du large à la côte ; parmi elles, la bathymétrie au large du Golfe de Saint Tropez, extraite de la carte marine SHOM 7408P (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), complétée par la bathymétrie plus fine du golfe de Saint Tropez, extraite de la carte marine SHOM 7267P.

Une reconstitution numérique de la bathymétrie a été réalisée à partir de ces deux jeux de données disponibles. Cette bathymétrie numérisée a été prise en compte lors de la première mise en œuvre du logiciel de modélisation numérique de propagation de houle du large à la côte.

Le zoom sur la zone d'étude ne montre pas de bathymétrie locale particulièrement accidentée. Les lignes isobathes au niveau des petits fonds devant les plages sont parallèles et suivent assez fidèlement la côte.

En vue de la configuration du Golfe de Saint Tropez, la baie est exposée aux houles de secteur Est. Le fond remonte régulièrement et lentement dans le golfe.

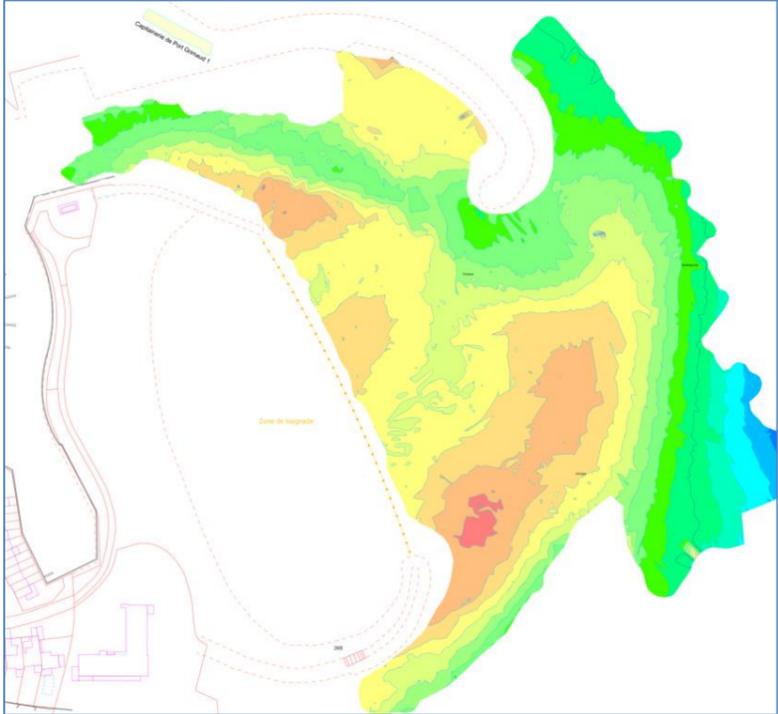
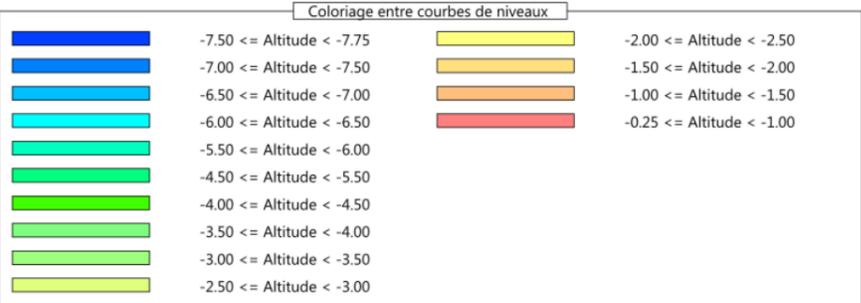


*Bathymétrie interpolée à partir des données disponibles*

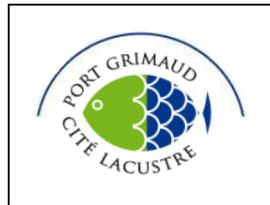
**1.2.2. Bathymétrie de la zone d'étude**

La bathymétrie relevée en aout 2013 est exposée ci-contre.

On observe une profondeur au niveau de la passe variant entre -3.0m NGF et -4.0m NGF. Des zones d'ensablement sont localisées à la sortie de la Gisclle, ainsi qu'au niveau de la zone de baignade et au Sud de la passe d'entrée du port.



*Relevé bathymétrique d'Aout 2013*



### 1.3. Conditions hydrodynamiques

#### 1.3.1. Variation des niveaux d'eau

Les variations du niveau de la mer ont une importance fondamentale sur la position du trait de côte et donc sur les phénomènes d'érosion et/ou d'accrétion réels et/ou relatifs.

En Méditerranée, le niveau de la mer varie selon l'interaction de phénomènes tels la marée astronomique (faible), la marée barométrique (pouvant engendrer des variations de quelques dizaines de centimètres), les surcotes de tempête (appelés « storm surge », entraînant des variations pouvant aller jusqu'au mètre). Par ailleurs, le niveau général des mers devrait évoluer significativement dans les prochaines décennies selon les conclusions des travaux du GIEC : Des modifications du niveau de la mer sont attendues en raison du réchauffement climatique (avec de nombreuses variations régionales).

La prise en compte de ces variations est cruciale pour ce genre d'étude. En effet, en situation de fort anticyclone, en été par exemple, le niveau de la mer est beaucoup plus bas que lors du passage d'une dépression hivernale. Et même si aucune érosion mécanique n'a véritablement eu lieu et que le profil de la plage n'a pas changé, une comparaison de photos prises pendant ces deux périodes peut laisser croire à une perte importante de sédiments au niveau de la plage en hiver, ce qui n'est en fait pas le cas.

Les cotes altimétriques évoquées dans cette étude ce rapport au zéro du nivellement général de la France 0 NGF (ou 0 IGN69). Le zéro des cartes marines (ou 0 CM) étant situé à 0.4 m sous le zéro NGF à Grimaud.

##### 1.3.1.1. Marée astronomique

La marée en Méditerranée est de type semi-diurne, avec une très faible amplitude. Malgré la présence de ce phénomène le long des côtes françaises de la Méditerranée, le marnage qui lui est associé est relativement faible (de l'ordre de 40 cm).

Il y a plusieurs explications à ce faible marnage :

- D'une part, la Méditerranée est une mer fermée, et les longueurs d'onde de marée sont quasiment égales à la largeur du bassin méditerranéen ;
- D'autre part, le plateau continental étant très étroit en Méditerranée, l'amplitude de la marée ne s'y trouve pas accentuée ;

Le marnage dans la zone d'étude ne dépasse pas 0.3 m.

##### 1.3.1.2. Surcotes, décotes et storm surge

Le niveau de la mer subit des variations en raison des phénomènes atmosphériques tels que la pression barométrique (passage d'une dépression ou d'un anticyclone), le vent qui souffle depuis le large vers la cote (storm surge, surcote) ou l'inverse (décote), et les conditions océanographiques comme le courant (upwelling, downwelling) ou les vagues (wave set-up), dont les influences peuvent être bien supérieures à la marée astronomique.

#### 1.3.1.3. Les niveaux d'eau

ACRI-IN dispose des mesures du niveau d'eau, sur un peu plus de 8 ans, issues des marégraphes de Nice et de Toulon. Elles ont été exploitées pour évaluer les niveaux d'eau d'occurrences extrêmes. La méthode suivante, dite du renouvellement, a été employée :

- Sélection des pics du niveau d'eau associés à des événements climatiques indépendants entre 2000 et 2008, avec un seuil minimal de valeur pris égal à 0.65m CM, ce qui représente 3 à 5 valeurs pics par trimestre ; Recherche d'une courbe de régression de type Weibull avec le paramètre d'ajustement « k » le plus approprié pour réduire les écarts avec les données brutes ;

D'après cette analyse, on obtient les valeurs de niveau d'eau suivantes, rapportées au 0 NGF :

Période de retour	Niveau d'eau
1 an	0.5 m NGF
10 ans	0.7 m NGF

Niveaux d'eau extrêmes

A ces valeurs, il faut rajouter la hausse probable du niveau de la mer due au réchauffement climatique, même si les valeurs moyennes de la hausse comme ses variations régionales restent soumises à une grande incertitude. En faisant référence aux études du Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (G.I.E.C.) pour un scénario défavorable d'évolution, la surélévation du niveau de la mer pourrait être de 50 cm dans les 100 prochaines années. Dans ces conditions, les niveaux d'eau de projet sont présentés dans le tableau suivant :

Période de retour	Niveaux d'eau
1 an	1 m NGF
10 ans	1.2 m NGF

Niveaux d'eau extrêmes avec prise en compte de la hausse du niveau de la mer

### 1.4. Données de vent et de houle

De nos jours, les données fiables de houle et de vent sur de grandes périodes proviennent de modèles globaux vent-houle tournant sur de grandes étendues à l'échelle des mers et océans. Ces modèles sont alimentés en continu par les variations dans l'espace et le temps des dépressions atmosphériques. Ils assimilent des données satellites, et sont, par ailleurs, confrontés aux résultats des bouées de mesures, là où elles sont présentes.

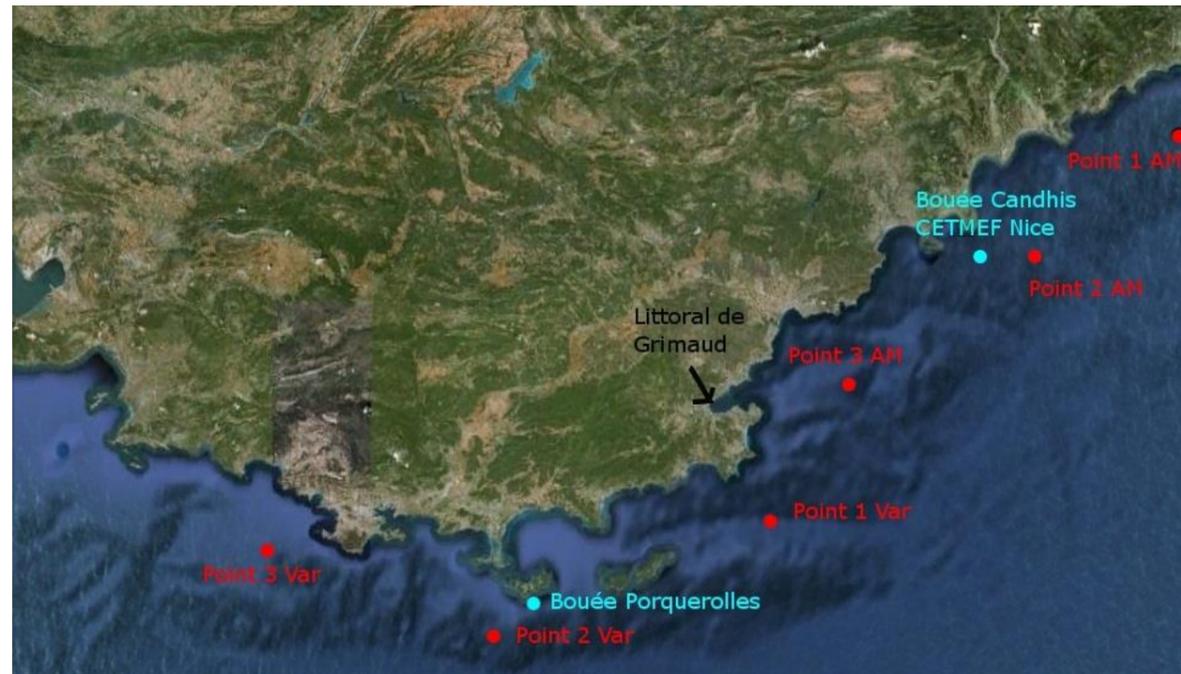
Les données de vent et de houle proviennent d'historiques de houles et de vents, basées sur des modèles globaux vent-houle tournant sur de grandes étendues à l'échelle des mers et océans, alimentés en continu par les variations dans l'espace et le temps des dépressions atmosphériques. Ces modèles assimilent des données satellites et sont par ailleurs confrontés aux résultats de bouées de mesures, là où elles existent.

Donnons pour exemple les bouées de mesure présentes sur le département des Alpes-Maritimes sont les suivantes:

- La bouée dyfamed (station 61001) au point de coordonnées 43°24'N, 7°48'E, tenue par Météo France au large des côtes par 2300m de profondeur, non directionnelle dont les données en temps réel sont disponibles à l'adresse :(<http://www.meteo.shom.fr/real-time/html/dyfamed.html>)
- La bouée Candhis du CETMEF (00601), directionnelle située au-devant de l'aéroport de Nice par 270m de fond au point de coordonnées (43°38.3', 7°13.7') et dont les données en temps réels sont disponibles à l'adresse suivante :(<http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/campagne/?idcampagne=c4ca4238a0b923820dcc509a6f75849b>).

ACRI-IN a fait l'acquisition d'un historique de 19 ans de données de houle et de vent, de 1992 à 2010 pour extraire les mers de vent le long des côtes des Alpes Maritimes et du Var sur les 6 points indiqués sur la carte ci-après.

Le point le plus représentatif pour l'étude de Port-Grimaud est le point 3 des Alpes Maritimes (43°20'N ; 6°55'E), pour les houles de Nord-Est à Sud-Est. En effet, il se situe à l'est au large de la zone d'étude. Le point 1 du Var (43°06'N ; 6°44'E) permet de valider les ordres de grandeur des houles de projet. Le point 3 des Alpes Maritimes est situé à une distance de 25 km de la zone d'étude.



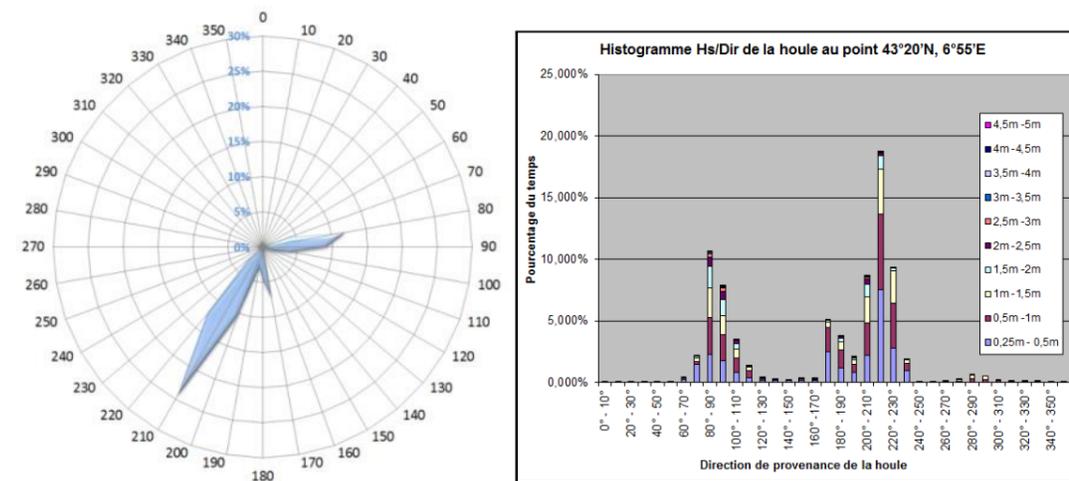
*Localisation des points de données de houle et des bouées de mesure*

D'après ces données de houles et de vents, on observe trois régimes de houle distincts :

- Les houles de Sud-Ouest, les plus fréquentes, de N200° à N230° ;
- Les houles d'Est, de N80° à N100° ;

- Les houles de Sud, les moins fréquentes, de N170° à N180° ;

A eux deux les régimes des houles d'Est et de Sud-Ouest représentent quasiment 80% des directions de houles observées au large, les houles de Sud environ 10 à 15% ; les houles de Sud-Est en revanche sont assez rares.



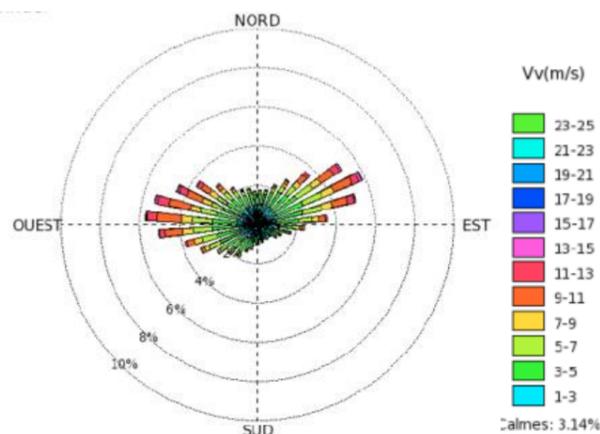
*Rose de houle au point GlobOcéan 3 (43°20N, 6°55'E) et histogramme Hs / Dir*

Comme pour les vents, on observe deux régimes de vent distincts :

- Les vents d'Ouest Sud-Ouest ;
- Les vents de Nord-Est ;

Les vents ont une dominance plus Ouest due à la forme de la côte et au Mistral qui a tendance à suivre la côte en passant du secteur Ouest au secteur Sud-Ouest en se dirigeant vers l'Est. De même, les vents d'Est Nord-Est, générés par la présence d'une dépression dans le Golfe de Gênes, subissent la même trajectoire mais en sens inverse.

Les vents accompagnent généralement la houle pour ces deux régimes c'est-à-dire que, lorsqu'il y a de la houle de Sud-Ouest, celle-ci est généralement accompagné de vent, de même pour les houles d'Est / Nord-Est, car ces houles sont générées localement. Ce qui n'est pas le cas des houles de Sud, qui naissent dans le détroit de Gibraltar et remontent tout le bassin Méditerranéen avant de toucher les côtes cannoises, et qui peuvent arriver sans vent, avec du vent d'Est ou du vent de Sud.



Rose des vents issue des données de vents au point 3 ; 4 °20'N, 6°55'E

### 1.4.1. Extrapolation des houles de projet

Pour déterminer les houles de projet, nous avons appliqué la méthode de recherche du pic de hauteur significative de chaque tempête, sélectionné dès lors qu'il vérifie une valeur supérieure à un seuil fixé (POT=Peak Over Threshold). Cette méthode est inspirée de la méthode du renouvellement permettant d'extrapoler des caractéristiques de houles et mers de vent d'occurrence extrême à partir d'échantillons de données de tempêtes indépendantes au large. Les caractéristiques des houles de tempête sont réparties par secteur de direction, sur la base de hauteurs significatives supérieures à un certain seuil suivant les secteurs de provenance, en prenant soin de s'assurer que les différents événements soient indépendants entre eux. Le choix du seuil est également nécessaire pour différencier les houles du large des mers de vent.

On applique une distribution de probabilités à la série de tempêtes, puis on extrapole les données par une loi classique inhérente aux valeurs extrêmes. Le logiciel HYFRAN, utilisé par Globocéan, a permis d'extrapoler les houles de projet avec un nombre important de lois statistiques classiques en hydraulique maritime telles que les lois de la famille Gamma, les lois extrêmes classiques, exponentielle...

Les houles qui entrent dans le golfe de Saint Tropez proviennent du secteur Est. Les mesures les plus représentatives de ce qui se passe au large du golfe proviennent donc du point 3 AM. En effet il se situe à l'Est du golfe, plus près de la côte que le point Globocéan 1 du Var.

Les résultats des houles de projet pour le point 3 AM Ces études de houle ont été approfondies par la suite afin de déterminer les houles de projet spécifiques au site d'étude. Une analyse directionnelle des houles atteignant le site d'étude a été effectuée.

Les caractéristiques au large des houles de projet retenues pour l'étude en fonction des différentes période de retour sont exposées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau des hauteurs significatives de projet

Hauteurs significatives Hs (m) de projet retenues	
Secteur d'intérêt	Période de retour
	1 an
N65° -N85°	2.8
N85° -N105	2.7
N105° -N125°	1.4

Les périodes pics associées aux hauteurs significatives de projet sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau des périodes pics associées aux hauteurs significatives de projet

Périodes pic associées aux hauteurs significatives de projet retenues	
Secteur d'intérêt	Période de retour
	1 an
N65° -N85°	7 à 8
N85° -N105	7 à 8
N105° -N125°	5 à 6

1.5. Analyse granulométrique

Sur la base des éléments à disposition, une synthèse des informations relatives aux caractéristiques granulométriques des sédiments dans la zone d'études est présentée dans le tableau ci-dessous.

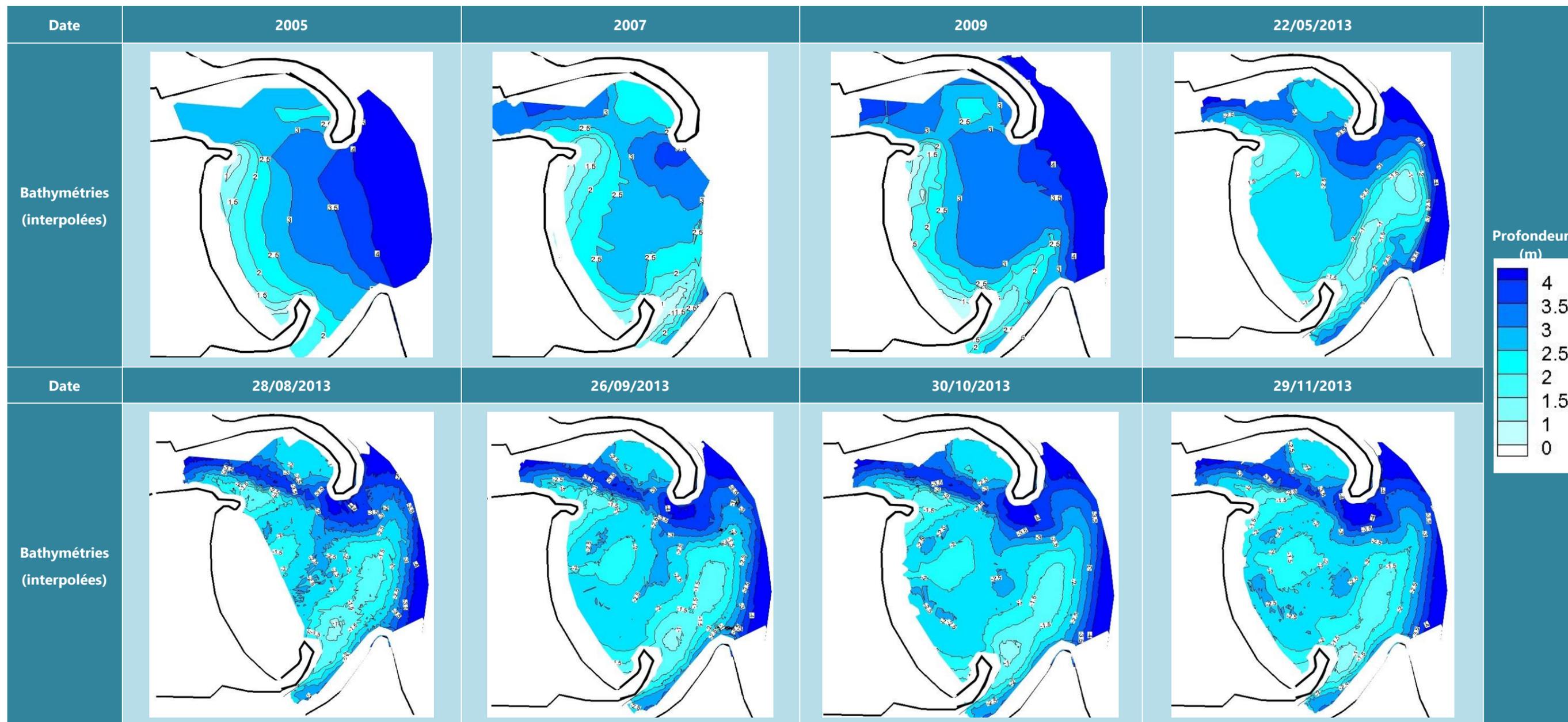
Les sédiments, de bonne qualité, sont constitués essentiellement de sables fins à moyens de diamètre médian d'environ 0,2 à 0,3mm.

Période	Juillet 2011	Mars et avril 2012	Février – Mars 2013	Octobre 2012																									
Plan d'échantillonnage																													
Granulométrie de passe de la Capitainerie	<p><b>Sédiments Passe Nord</b>            32.5% sables fins (entre 125µm et 250µm)            32% sables moyens (entre 250µm et 500µm)            30% sables grossiers à très grossiers (500µm et 2000µm)            Environ 3% de fraction fine</p> <p><b>Sédiments Passe Sud</b>            40.5% sables fins (entre 125µm et 250µm)            41.5% sables moyens (entre 250µm et 500µm)            9.56% sables grossiers à très grossiers (500µm et 2000µm)            Environ 3% de fraction fine</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Echantillon 1</th> <th>Echantillon 2</th> <th>Echantillon 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sables entre 0.02 µm et 50 µm</td> <td>15.6%</td> <td>2.7%</td> <td>16.6%</td> </tr> <tr> <td>Sables entre 50 µm et 200 µm</td> <td>43.5%</td> <td>16.8%</td> <td>37.4%</td> </tr> <tr> <td>Sables entre 200 µm et 2000 µm</td> <td>40.9%</td> <td>80.5%</td> <td>45.6%</td> </tr> </tbody> </table>		Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	Sables entre 0.02 µm et 50 µm	15.6%	2.7%	16.6%	Sables entre 50 µm et 200 µm	43.5%	16.8%	37.4%	Sables entre 200 µm et 2000 µm	40.9%	80.5%	45.6%	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Sur la bosse de sable</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Sables entre 0.02 µm et 50 µm</td> <td>5.8%</td> </tr> <tr> <td>Sables entre 50 µm et 200 µm</td> <td>7.9%</td> </tr> <tr> <td>Sables entre 200 µm et 2000 µm</td> <td>86.3%</td> </tr> </tbody> </table>		Sur la bosse de sable	Sables entre 0.02 µm et 50 µm	5.8%	Sables entre 50 µm et 200 µm	7.9%	Sables entre 200 µm et 2000 µm	86.3%	
	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3																										
Sables entre 0.02 µm et 50 µm	15.6%	2.7%	16.6%																										
Sables entre 50 µm et 200 µm	43.5%	16.8%	37.4%																										
Sables entre 200 µm et 2000 µm	40.9%	80.5%	45.6%																										
	Sur la bosse de sable																												
Sables entre 0.02 µm et 50 µm	5.8%																												
Sables entre 50 µm et 200 µm	7.9%																												
Sables entre 200 µm et 2000 µm	86.3%																												
D50	<p><b>Sédiments Passe Nord</b> : D50=340µm  <b>Sédiments Passe Sud</b> : D50=280µm</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Echantillon 1</th> <th>Echantillon 2</th> <th>Echantillon 3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>D50</td> <td>170 µm</td> <td>297 µm</td> <td>185 µm</td> </tr> </tbody> </table>		Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3	D50	170 µm	297 µm	185 µm	<p>D50=393.0 µm</p>	<p>D50=600 µm</p>																
	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3																										
D50	170 µm	297 µm	185 µm																										

1.6. Suivi bathymétrique

L'analyse de l'évolution bathymétrique entre 2005 et 2013 a été réalisée à partir d'un jeu de données bathymétriques fournies par Port Grimaud 1 (de 2005 au 22/05/2013) et de mesures bathymétriques réalisés entre Août 2013 et Novembre 2013, dans le cadre de la mission de « suivi bathymétrique et météorologique » confiée à ACRI-IN [1]. Les différentes bathymétries sont exposées dans le tableau ci-après. Pour les mesures réalisées avant Août 2013, le traitement n'a pu être effectué que sur le positionnement des lignes bathymétriques et non sur les données brutes. L'interprétation générale et qualitative reste inchangée, néanmoins des précautions sont à prendre en cas d'interprétation quantitative.

⇒ L'historique des bathymétries montre une très forte évolution des fonds entre 2005 et 2013. On observe globalement une avancée des isobathes vers le large et la formation d'une langue de sable au niveau de la digue Sud, traduisant une augmentation progressive du volume de sédiments dans la zone.



Une analyse des variations bathymétriques, à partir de ces données de 2005 à Mai 2013, a été réalisée ci-après et les figures sont présentées dans le tableau ci-après. Les principales observations pouvant être faites sont les suivantes :

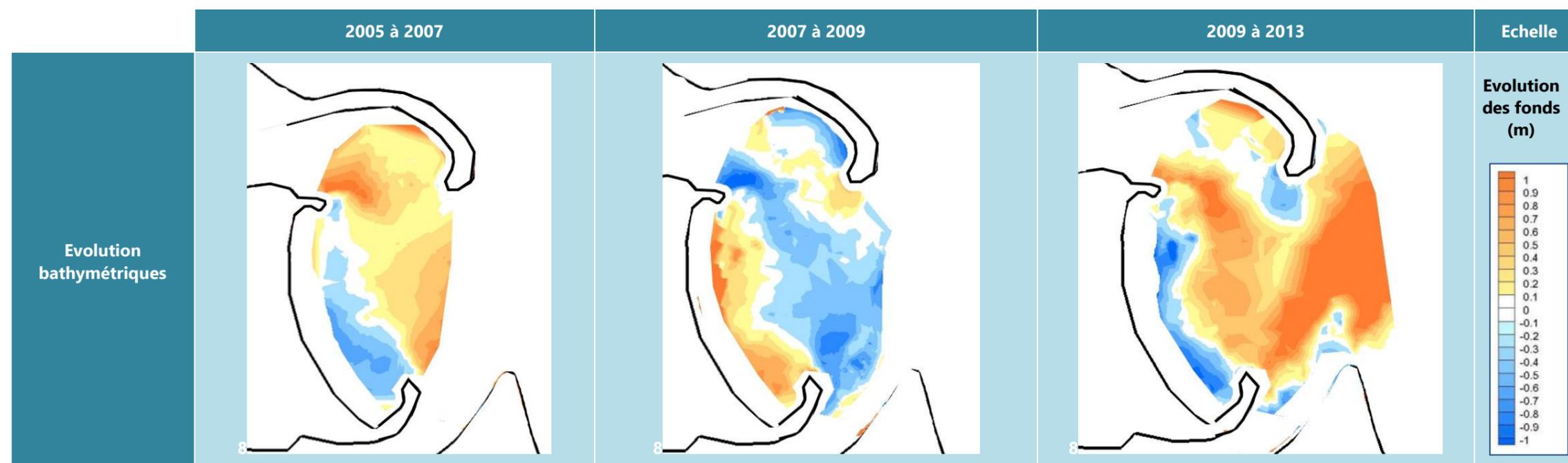
- Entre 2005 et 2007, on observe une zone d'érosion au niveau de la partie Sud de la plage et un ensablement général de la cellule hydrosédimentaire, avec la formation d'une flèche sableuse à l'embouchure de la Gisclé ;
- Entre 2007 et 2009, une érosion générale de la zone est observée avec, notamment au niveau des digues Nord et Sud. Les matériaux remaniés semblent avoir été reparti au niveau de la passe d'entrée et de la plage où l'on observe un ensablement. La flèche sableuse à l'embouchure de la Gisclé a régressé notablement ;
- Entre 2009 et 2013, la tendance est inversée, avec une accrétion de l'ensemble de la cellule, une partie des matériaux semblant provenir de la plage en érosion. La flèche sableuse à l'embouchure de la Gisclé s'est agrandie et a progressé vers le large formant à son extrémité un haut fond constituant un banc de sable. De l'érosion est également observée, au niveau du musoir de la digue du large. Le chenal de la passe d'entrée présente peu de variations bathymétriques.

**Note :** Le manque d'information concernant les dragages effectués de 2005 à 2013 ne nous permet pas de statuer sur le transport sédimentaire à long terme.

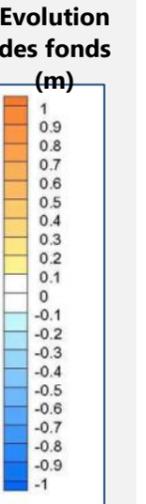
Une analyse fine a pu être réalisée à partir des relevés de Mai à Novembre 2013 dont les détails sont présentés dans le tableau en page suivante. Les principales observations pouvant être faites sont les suivantes :

- Entre Mai 2013 et Août 2013, des travaux de dragage ont été réalisés au niveau de la passe d'entrée. On observe donc un approfondissement de cette zone, jusqu'à -3m NGF à -3.5m NGF et un remaniement général des fonds marins avec un déplacement, recul et élargissement de la flèche sableuse et une accrétion des fonds marins dans la partie profonde (à l'entrée de la zone) et au droit de la plage ;
- Entre Août 2013 et fin Novembre 2013, il a été réalisé un suivi bathymétrique et météorologique mensuel afin de déterminer les mouvements sédimentaires ayant lieu dans la cellule sédimentaire :
  - D'Août à Octobre, seules de très faibles variations de bathymétries sont observées, en cohérence avec le climat de houle calme observé durant cette période ;
  - D'Octobre à Novembre, les événements de tempêtes, plus violents, ont provoqué de plus fortes variations de bathymétries, avec notamment de l'ensablement au niveau de la passe d'entrée.

⇒ De manière générale entre Août 2013 et Novembre 2013, les variations bathymétriques montrent que les sédiments issus des « bosses » sableuses (hauts fonds, banc, barre et flèche sableuse) tendent à combler les fosses. **La bathymétrie tend donc à s'aplanir, sur l'ensemble de la zone étudiée, au cours des tempêtes sous l'effet des courants induits par les houles déferlantes.**



Comparaison	Du 22/05/2013 au 28/08/2013	Du 28/08/2013 au 26/09/2013	Du 26/09/2013 au 30/10/2013	Du 30/10/2013 au 29/11/2013
<b>Evolution bathymétriques</b>				
<b>Action anthropique</b>	Dragage à -3.5m NGF avec augmentation de la profondeur d'eau le long de la passe d'entrée.			
<b>Suivi météorologique</b>	Pas d'évènement météorologique significatif.	Pas d'évènement météorologique majeur pendant cette période.	<p><u>1<sup>er</sup> évènement</u> : le 4 octobre : Vents supérieurs à 20 nœuds et vagues supérieures à 2.5m au large.</p> <p><u>2<sup>nd</sup> évènement</u> : le 22 octobre : Vents supérieurs à 15 nœuds et vagues supérieures à 2 m au large</p>	Un évènement majeur de 4 jours avec une intensité de vent allant jusqu'à 30 nœuds et des hauteurs significatives de houles atteignant jusqu'à 4m au large du Golfe de St Tropez.
<b>Evolution des fonds marins</b>	Mouvements de sable dans toute la zone de l'avant port.	Pas de mouvement de sable significatif observé.	<p>La passe d'entrée s'ensable par endroit.</p> <p>Le fond devant le musoir s'érode sur une petite surface (jusqu'à 30 cm d'érosion).</p> <p>Sur les autres zones, on observe quelques variations locales et de faible amplitude.</p>	<p>Le fond marin en entrée de port a été fortement modifié.</p> <p>On observe un ensablement (quelques dizaines de centimètres) au niveau de la passe d'entrée de Port Grimaud, avec de l'érosion d'une zone voisine, dans la continuité de la contre jetée.</p> <p>Des mouvements significatifs sont également observables à l'embouchure de la Giscle, au niveau du banc de sable, avec des zones d'érosion et d'accrétion, ainsi qu'au droit de la plage.</p> <p>De manière générale, les mouvements de sédiments montrent une tendance à l'aplanissement de la zone, avec pour seule exception, la zone autour du musoir de la digue du large, en érosion.</p>





## 2. Etude hydrosédimentaire

Cette étude vise à comprendre les mécanismes régissant le comportement hydrosédimentaire de la zone d'étude, lors d'un épisode de tempête et/ou de crue de 72h. Elle combine modélisation numérique et observations in situ.

Il convient au préalable de rappeler que pour tout système côtier, les apports extérieurs de sédiments se font soit depuis les plages environnantes au système étudié, soit par apport fluvial. Les artificialisations des cours d'eau et des côtes au cours des dernières décennies ont engendré un déséquilibre des dynamiques sédimentaires, avec une diminution des apports de sédiments par les fleuves, et généralement une diminution des transits sédimentaires côtiers, résultants en une érosion de plage plus ou moins intense suivant les zones. Le littoral de Grimaud n'échappe pas à ce scénario. La Giscle, comme tout cours d'eau, apporte donc des sédiments à son embouchure, avec pour preuve les structures sédimentaires qui s'y forment (flèche sableuse, hauts fonds...).

Après analyse des documents transmis, il n'est pas possible de quantifier les apports de sédiments par la Giscle lors d'un événement de crue. Cependant, des informations ont pu être obtenues dans le cadre d'études en cours. Il apparaît qu'en ce qui concerne la Giscle, impactant le chenal navigable à l'aval de la N98 (ex. RD559) Port Cogolin et dans une proportion moindre la Gislette et son port, une corrélation a été mise en évidence (SAFEGE, 2000) entre les concentrations des MES et les débits, permettant de reconstituer les transports en suspension annuels. Sur une période reconstituée de 10 ans, les flux moyens de MES sont d'environ 130 000 t/an (variables entre 30 000 et 300 000 t/an). Les bilans de transport des matériaux du fond du lit (saltation et charriage) ont été estimés entre 10 000 à 12 000 m<sup>3</sup>/an en moyenne sur la même période, soit avec une densité de 1.5 t/m<sup>3</sup>, de 15 000 à 18 000 t/an, se répartissant sur la partie à l'aval de la N98.

Les flux de de sédiments sont essentiellement produits pendant les crues :

- en moyenne durant 10 ans, les  $\frac{3}{4}$  des flux se concentrent entre les crues de novembre et février,
- sur une année moyenne, 85% des flux sont produits pendant 10% du temps.

Sur la base de ces calculs, il a été estimé que le transport en suspension représente en moyenne de 88 à 90% du transport solide total et le transport par charriage et saltation de 10% à 12%. Il s'agit toutefois bien sûr de valeurs moyennes, de grands écarts étant possibles d'une année à l'autre selon l'hydraulicité des cours d'eau.

Ces valeurs sont en cohérence avec l'évaluation faite par PG1 concernant les besoins en dragage effectués dans la passe d'entrée de à 2000m<sup>3</sup> à 2500m<sup>3</sup> par an en moyenne annuelle sur les 10 dernières années.

Il est à noter toutefois que dans la partie avale de la Giscle, le lit mineur est très large (40 m environ) et l'embouchure en mer engendre un ralentissement des écoulements. Les matériaux transportés s'y déposent (sables : D<sub>m</sub> = 0,5 mm compris entre 0,2mm et 1,6mm), entraînant un rehaussement du fond du lit et une réduction de la capacité hydraulique. Ces sédiments lourds n'atteignent donc pas directement la passe d'entrée de port Grimaud, comme cela est démontré par la suite.

Aussi, dans le cadre de ces travaux, nous nous sommes focalisés sur les mécanismes physiques hydrosédimentaires dans la zone d'étude. Ces mécanismes sont en effet à l'origine du transport des sédiments depuis les zones de hauts fonds vers la zone de dépôt.



## 2.1. Scénarii de simulation numérique

Le logiciel Delft3D permet, à travers l'ensemble de ses modules, de modéliser la propagation de la houle du large à la côte, la courantologie induit par les vagues et le vent, et le transport sédimentaire ainsi que les changements bathymétriques associés. Tous les modules sont couplés les uns les autres et donc fonctionnent en interaction puisqu'un changement bathymétrique implique une modification de la propagation de la houle, puis des courants et ainsi de suite.

Delft3D, développé par WL Delft Hydraulics (The Netherlands), est un des logiciels de modélisation de l'environnement 2D/3D les plus performants au monde ; c'est aussi un logiciel flexible qui simule en 2D (aussi bien dans le plan horizontal que sur la verticale) et en 3 dimensions la courantologie, les vagues, la qualité des eaux, l'écologie, le transport sédimentaire, la morphodynamique, et il est capable de traiter les interactions entre ces différents processus.

Les scénarii de simulation étudiés, caractéristiques des différents « climats hydrodynamiques », sont les suivants :

Evènement de 72h	Zone d'étude
Tempête (coup d'Est)	X
Crue	X
Tempête + Crue	X

## 2.2. Etude de propagation de houle

Dans un premier temps, une analyse directionnelle de la houle a été réalisée afin de déterminer le secteur de houle le plus pénalisant au niveau de la zone d'étude. Les houles de ce secteur seront par la suite propagées lors de l'étude hydro-sédimentaire.

### 2.2.1. Présentation du logiciel de propagation

Le module de vagues de Delft3D utilisé pour cette étude se nomme SWAN.

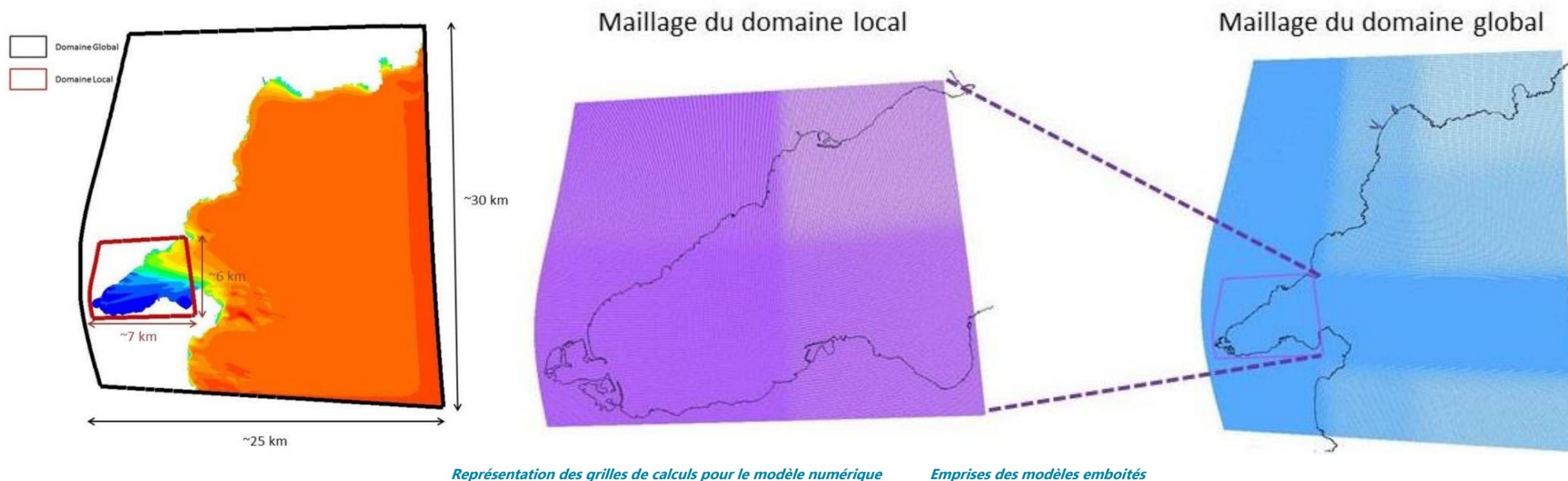
SWAN (Simulating WAVes Nearshore) est un modèle de troisième génération permettant d'obtenir une estimation réaliste des paramètres des vagues en zone côtière, dans les lacs et les estuaires, pour un vent, une bathymétrie, et des conditions de courants donnés. Ce module, basé sur l'équation de conservation de la densité spectro-angulaire d'action des vagues, de façon complètement spectrale, modélise la propagation non-stationnaire des vagues courtes sur un fond irrégulier en considérant l'action du vent, la dissipation d'énergie par friction sur le fond, le déferlement, la réfraction (due à la bathymétrie, au niveau d'eau et aux courants), le shoaling, ainsi que l'étalement directionnel de la houle.

Le modèle SWAN calcule l'évolution de vagues aléatoires et irrégulières sous l'effet de courants ambiants. Il rend compte de la propagation due au courant dans les régions côtières par eau profonde, intermédiaire, et en eau peu profonde, et représente les processus de génération des vagues par le vent, la dissipation due au moutonnement, au frottement sur le fond, au déferlement bathymétrique, et aux interactions non-linéaires entre les vagues (triplets et quadruplets de fréquences) de façon explicite par des formulations de l'état de l'art.

La seule limitation notable de ce modèle, dans notre cas d'étude, concerne le phénomène de diffraction: bien qu'il soit pris en compte et représenté, certains effets peuvent être dans certains cas sous-estimés, notamment dans le cas de la présence d'ouvrages maritimes. Il peut être ainsi anticipé que l'agitation simulée dans la passe d'entrée est inférieure à l'agitation réelle. Il n'est pas attendu d'impact notable sur la problématique de simulation des courants à l'origine du transport sédimentaire du fait d'une certaine inertie de ces phénomènes. Pour l'étude spécifique des problématiques d'agitation portuaire, un modèle numérique fin de Réfraction-Diffraction du type SIMAC (développement interne ACRI-IN) est adapté.

**2.2.2. Paramétrage du Modèle Numérique**

Aux vues des périodes de houle à considérer pour la répartition fréquentielle, la profondeur pour laquelle la houle n'est plus perturbée par la bathymétrie est supérieure à 100m, ce qui implique un domaine de calcul très vaste. Nous avons donc eu recours à un emboîtement de plusieurs modèles avec un raffinement de la grille de calcul sur les zones d'étude. (Voir figure ci-dessous). Le modèle le plus vaste (domaine global) s'étend sur près de 30 km du Nord au Sud et 25 km d'Ouest en Est. Le domaine local s'étend sur 6 km du Nord au Sud et 7 km d'Ouest en Est.

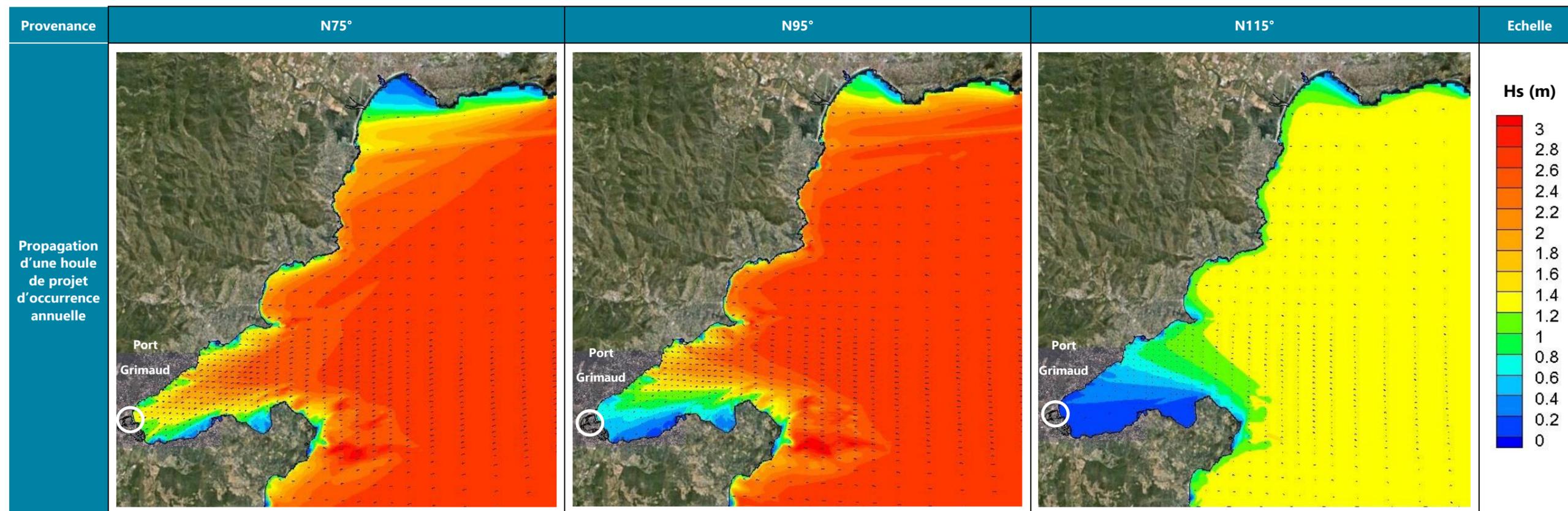


Comme indiqué dans le paragraphe 0, les houles qui entrent dans le golfe de Saint-Tropez proviennent du secteur Est. Ainsi, les houles utilisées pour cette analyse directionnelle sont les houles de projet d'occurrence annuelle de provenance N75°, N95° et N115°, dont les caractéristiques sont exposées ci-après :

<i>Scénarii de Simulation pour les tempêtes</i>			
<i>Direction de provenance des houles</i>	<i>Période de retour</i>		
	<i>1 an</i>		
	<i>Hs (m)</i>	<i>Tp (s)</i>	<i>Niveau d'eau (m)</i>
<i>N75°</i>	<i>2.8</i>	<i>7.5</i>	<i>1.0</i>
<i>N95°</i>	<i>2.7</i>	<i>8.5</i>	
<i>N115°</i>	<i>1.4</i>	<i>5.5</i>	

**2.2.3. Résultats des simulations numériques**

Les résultats de la propagation d'une houle d'occurrence annuelle pour les trois directions N75°, N95° et N115° sont présentés ci-après.



Pour ces trois directions, la houle atteint l'entrée du golfe de Saint-Tropez. La hauteur significative de la houle est la plus élevée pour la direction de provenance N75°. Deux facteurs peuvent l'expliquer :

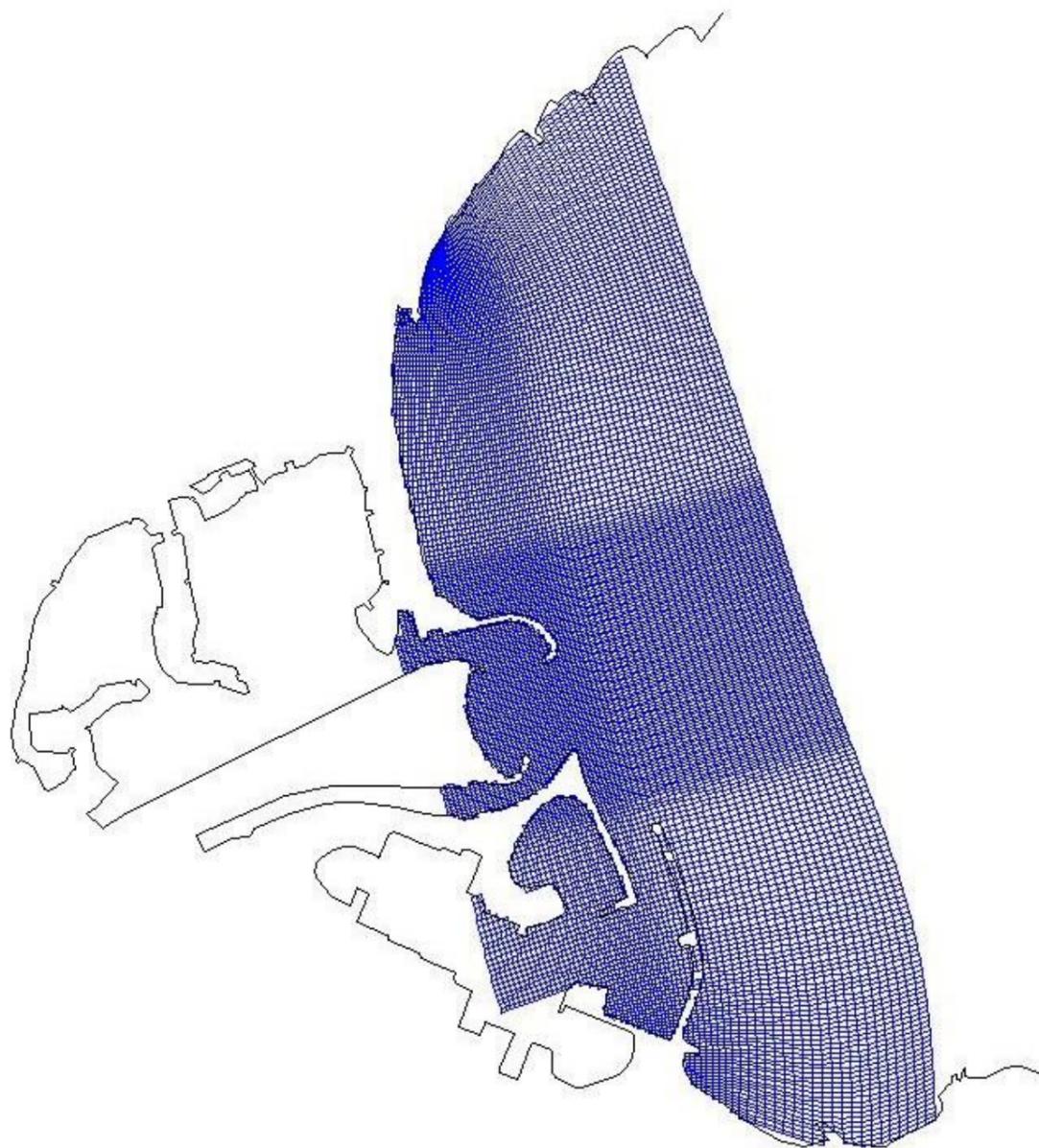
- Les hauteurs significatives des houles de projet au large sont plus élevées pour cette direction de provenance ;
- La houle atteint le golfe de Saint-Tropez sans rencontrer d'obstacle pour cette direction de provenance. Pour les autres directions, le littoral de Grimaud est protégé de la houle par l'avancée de terre comprenant le cap de Saint-Tropez, la pointe de l'Ay, et la pointe de la Rabiou. La direction de houle N75° est parallèle à l'axe du golfe de Saint-Tropez.

On observe, qu'au niveau du port de Grimaud, les hauteurs significatives de houles les plus importantes sont obtenues suite à la propagation des houles de provenance N75°. Cette direction de houle, la plus pénalisante, sera celle étudiée dans l'étude hydrosédimentaire.

### 2.3. Etude de courantologie et de transport sédimentaire

#### 2.3.1. Paramétrage du Modèle Numérique

L'emprise du modèle hydrosédimentaire est d'environ 800m d'Est en Ouest et 2.5km du Nord au Sud. Les dimensions des mailles varient entre 12 et 7m. Le maillage est adapté à la problématique en étant raffiné au niveau de la zone d'étude.



Représentation de la grille de calcul du modèle hydrosédimentaire

Le modèle hydrosédimentaire a été mis en œuvre afin de simuler la courantologie et sédimentologie de la zone d'étude, à la suite d'une tempête de 72h.

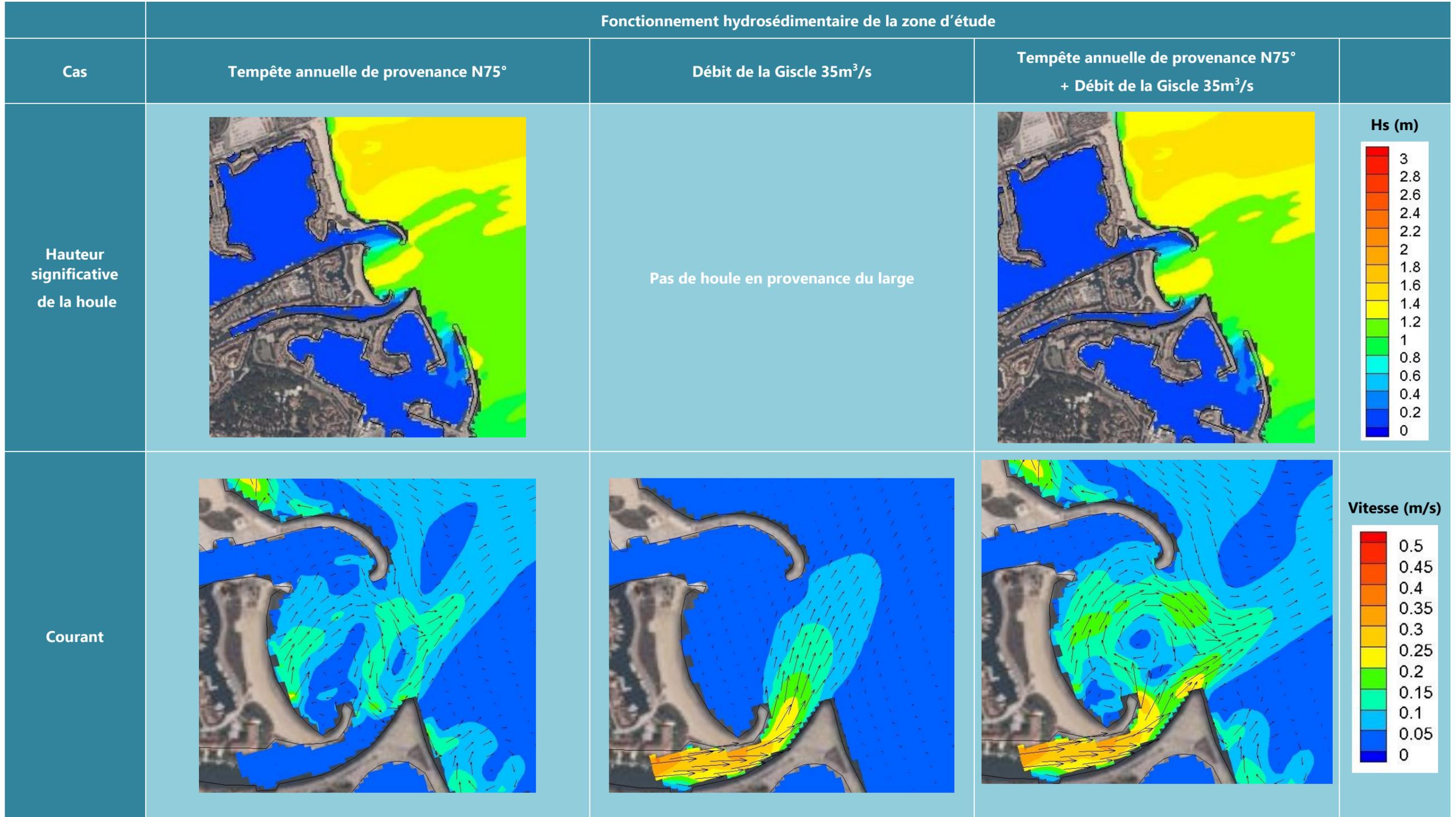
Les paramètres du modèle hydrosédimentaire sont les suivants :

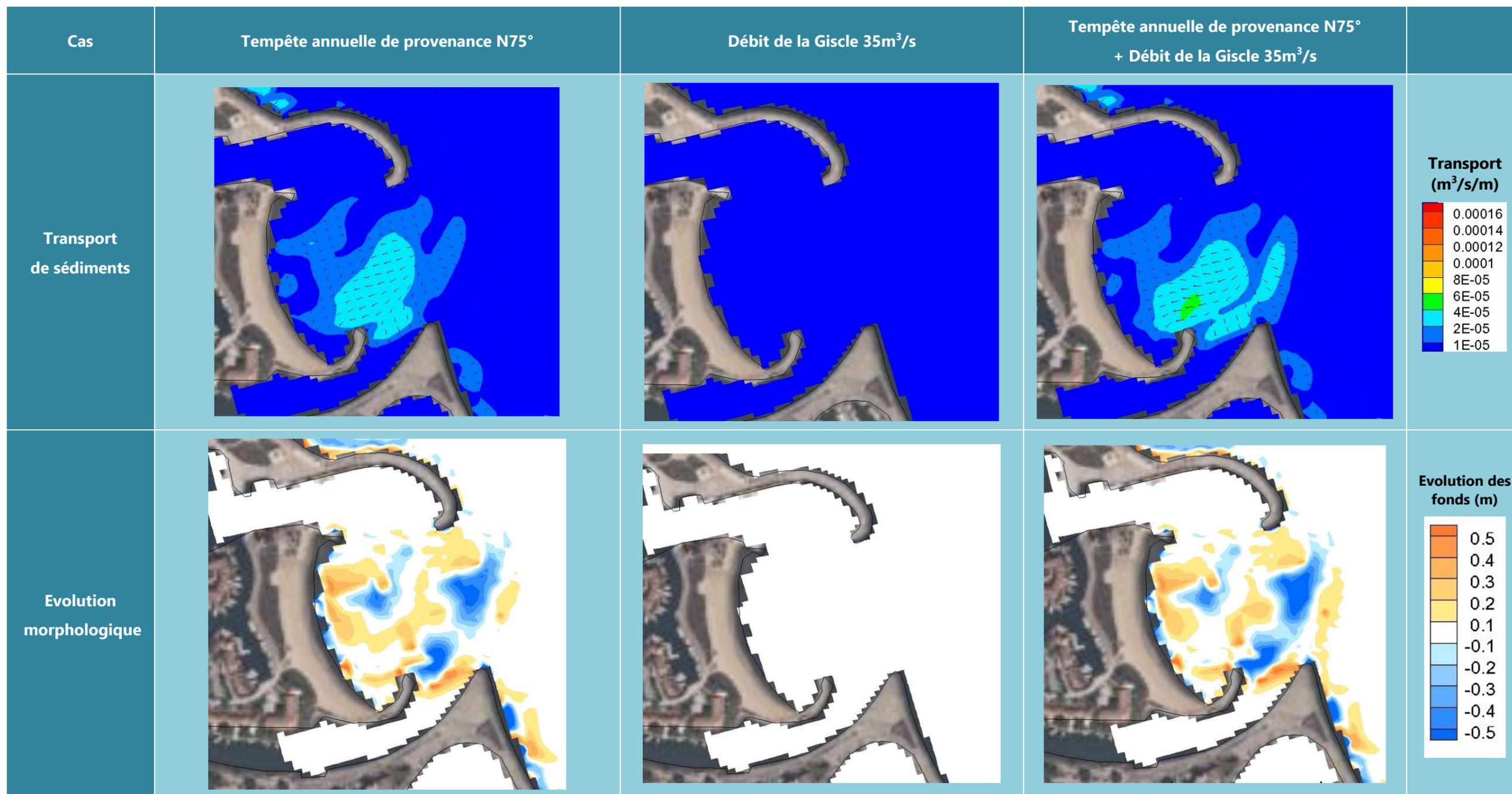
	Modélisation d'un épisode de tempête(72h)	Modélisation d'un épisode de pluies intenses (72h)	Modélisation d'un épisode de pluies intenses et de tempête (72h)
<b>Caractéristiques de la houle</b>	Hs=2.8m Tp=7.5s	-	Hs=2.8m Tp=7.5s
<b>Débit au niveau de la Gisclle</b>	-	D=35m <sup>3</sup> /s	D=35m <sup>3</sup> /s
<b>Diamètre médian des sédiments</b>	D50=200µm	D50=200µm	D50=200µm



Rappel des délimitations des différentes zones du site d'étude

**2.3.2. Comportement hydrosédimentaire suite à un évènement de tempête de 72h**





**Commentaires :**

Les résultats de l'étude de propagation d'une houle de projet annuelle de provenance N75° montrent que la houle en entrée de port varie entre 1m et 1.4m. Cette houle est amplifiée lorsqu'elle est accompagnée d'un épisode de forte pluies. En effet, l'augmentation du débit de la Gisle induit une accélération des courants au niveau de l'entrée de port et par conséquent une modification de la hauteur significative de la houle.

Dans la passe d'entrée « Capitainerie », malgré les limitations du modèle en termes de phénomène de diffraction, on observe des hauteurs significatives de houles non négligeables de l'ordre de 0.2 à 0.4m,

### Episode de tempête annuelle (coup de mer)

D'après les résultats de simulations numériques, le courant induit par un coup de mer (occurrence annuelle) forme dans la cellule sédimentaire une boucle circulant dans le sens horaire au droit de la plage et le long de la passe d'entrée. Une seconde boucle de courant, accolée à la première et tournant dans le sens antihoraire, est à noter au niveau de l'embouchure de la Giscle. L'ensemble crée un courant vers le large en sortie de cellule.

Un courant de faible amplitude, dirigé d'Ouest en Est, est observé au niveau de la passe d'entrée « Capitainerie ».

Le transport induit par la houle s'effectue au niveau de l'entrée du port et de l'embouchure de la Giscle, dans le sens Est-Ouest. Il s'agit d'une combinaison entre un transport de type crossshore (du large vers la côte) et longshore (le long des plages et aménagements). Aucun transport significatif n'est observé au niveau de la digue Nord (contre-jetée).

### Episode de forte pluie

Dans le cas d'un épisode de forte pluie induisant un débit de la Giscle de 35m<sup>3</sup>/s, on observe un courant orienté Sud-Sud-Ouest – Nord- Nord-Est et passant au pied de la digue du large. Aucun courant significatif n'est à noter au niveau de la passe d'entrée « Capitainerie ».

La simulation effectuée avec un débit de 35m<sup>3</sup>/s et sans apport de sédiment (paramètre inconnu) depuis la Giscle, montre que le courant n'est pas assez important pour mettre, à lui seul, en suspension les sédiments. Ainsi, aucun transport sur la zone n'est observé en cas d'un épisode de fortes pluies sans houle. Il peut en être déduit que les sédiments lourds (transport par charriage essentiellement) provenant de la Giscle lors des crues, se déposent à l'embouchure immédiate, ce qui forme les structures sédimentaires actuelles (flèches sableuses).

### Episode combiné de tempête annuelle et de forte pluie

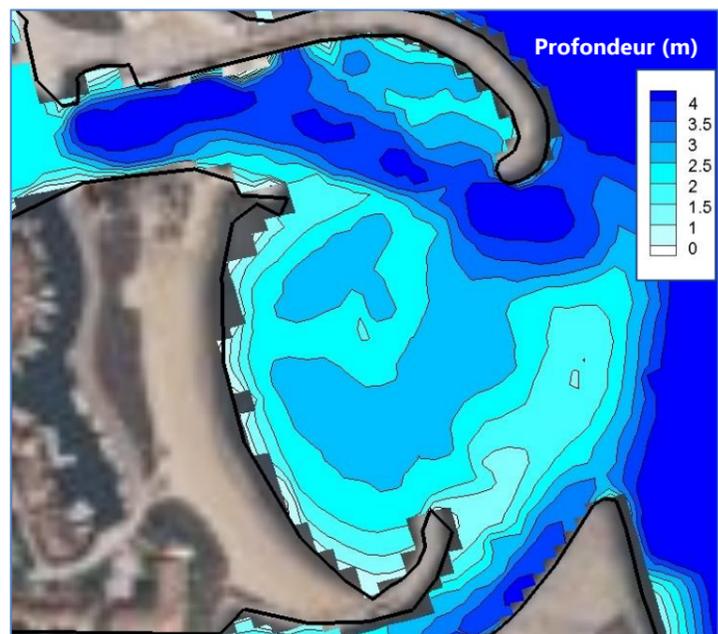
Dans le cas d'un épisode de tempête d'occurrence annuelle accompagné de fortes pluies, la combinaison du courant induit par la houle et de celui induit par la Giscle amplifie la boucle de circulation au droit de la plage préalablement observée lors d'un coup de mer. Le courant de la Giscle est dévié et confiné contre la rive gauche. L'ensemble crée un courant vers le large en sortie de cellule relativement intense (plus de 0.2m/s) et large.

Un courant d'environ 0.1m/s est alors prédit au niveau de la passe d'entrée « Capitainerie ».

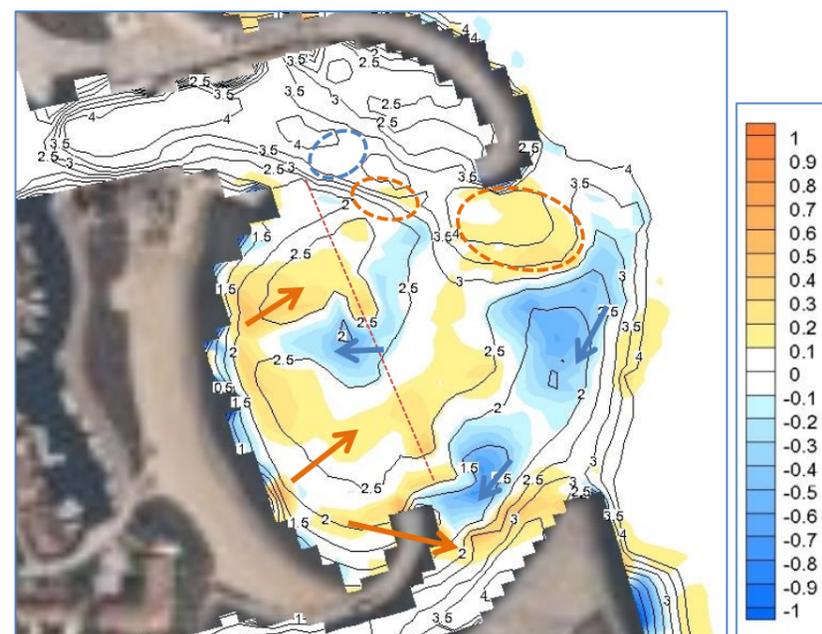
Le transport induit est légèrement amplifié au niveau des digues Nord et Sud.

### Evolution des fonds marins

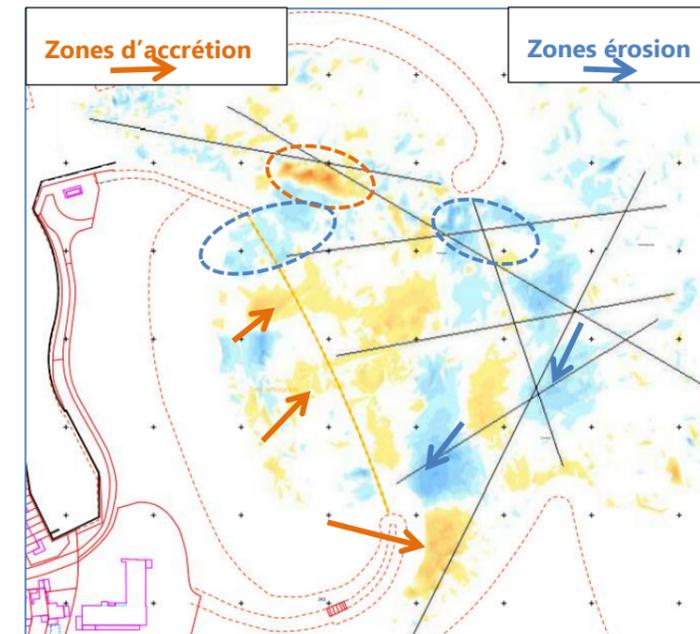
Les résultats de l'évolution morphologique ont des tendances comparables pour la modélisation d'un épisode de tempête annuelle et pour la modélisation d'un épisode de tempête annuelle accompagné de fortes pluies (figure ci-dessous en bas au centre). Ces résultats sont à comparer avec la bathymétrie de l'entrée de port, exposée ci-dessous (en bas à gauche). On observe une évolution bathymétrique importante au niveau des hauts fonds sableux (barres, bancs et flèche) et des « fosses » :



Bathymétrie initiale (m) (30/10/2013)



Simulation numérique de l'évolution des fonds (m) avec superposition des lignes isobathes



Mesure de l'évolution des fonds (m) du 30/10/2013 au 29/11/2013

Dans la continuité de la digue Sud, on observe un glissement du sable de part et d'autre de la flèche sableuse ;

Au Sud du chenal, au centre de la cellule, le banc de sable subit un glissement vers la plage.

Ainsi, après simulation numérique, le sable des hauts fonds sableux, mis en suspension par le courant, se dirige vers des zones plus profondes lors d'épisodes de tempête.

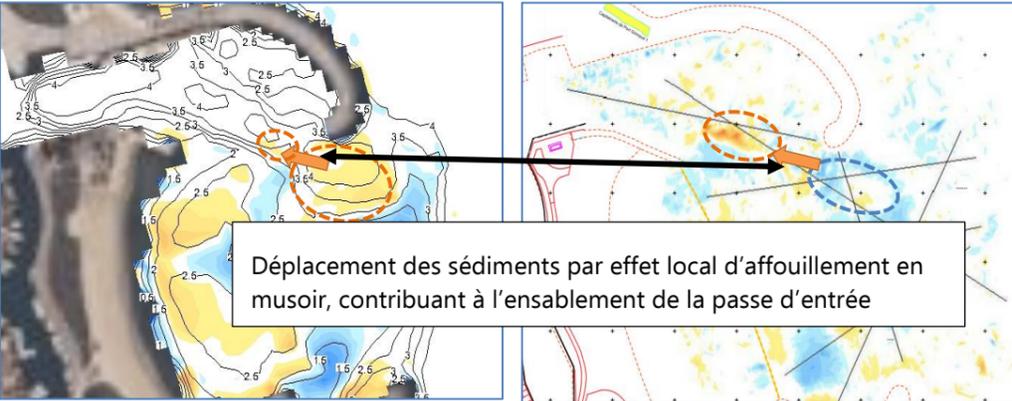
Par comparaison avec les mesures d'évolution des fonds sur la période du 30/10 au 29/11/13 (figure ci-dessus, à droite), pendant laquelle un coup d'Est a été observé, on peut noter effectivement une bonne capacité du modèle numérique à représenter qualitativement et quantitativement les phénomènes généraux, avec un positionnement correct des zones d'accrétion et d'érosion dans la zone d'étude.

Néanmoins, au niveau du chenal de la passe d'entrée, on note que le modèle a tendance localement à sous-estimer les phénomènes. De plus, au niveau du musoir, le modèle prédit une zone d'accrétion alors qu'il a été observé de l'érosion. Cela peut être expliqué par un phénomène très local et tridimensionnel de mise en suspension des sédiments au niveau des extrémités des structures maritimes où les mouvements des particules d'eau dus au passage de la houle créent des tourbillons.

Ces phénomènes ont été décrits par Fredsøe and Sumer (1997) [2] qui ont étudié les affouillements au niveau des musoirs des digues en enrochements dans le cas où les conditions hydrodynamiques sont dominées par la houle. Les mécanismes de base de l'affouillement sont décrits ainsi (voir également les figures ci-contre dans l'encadré) :

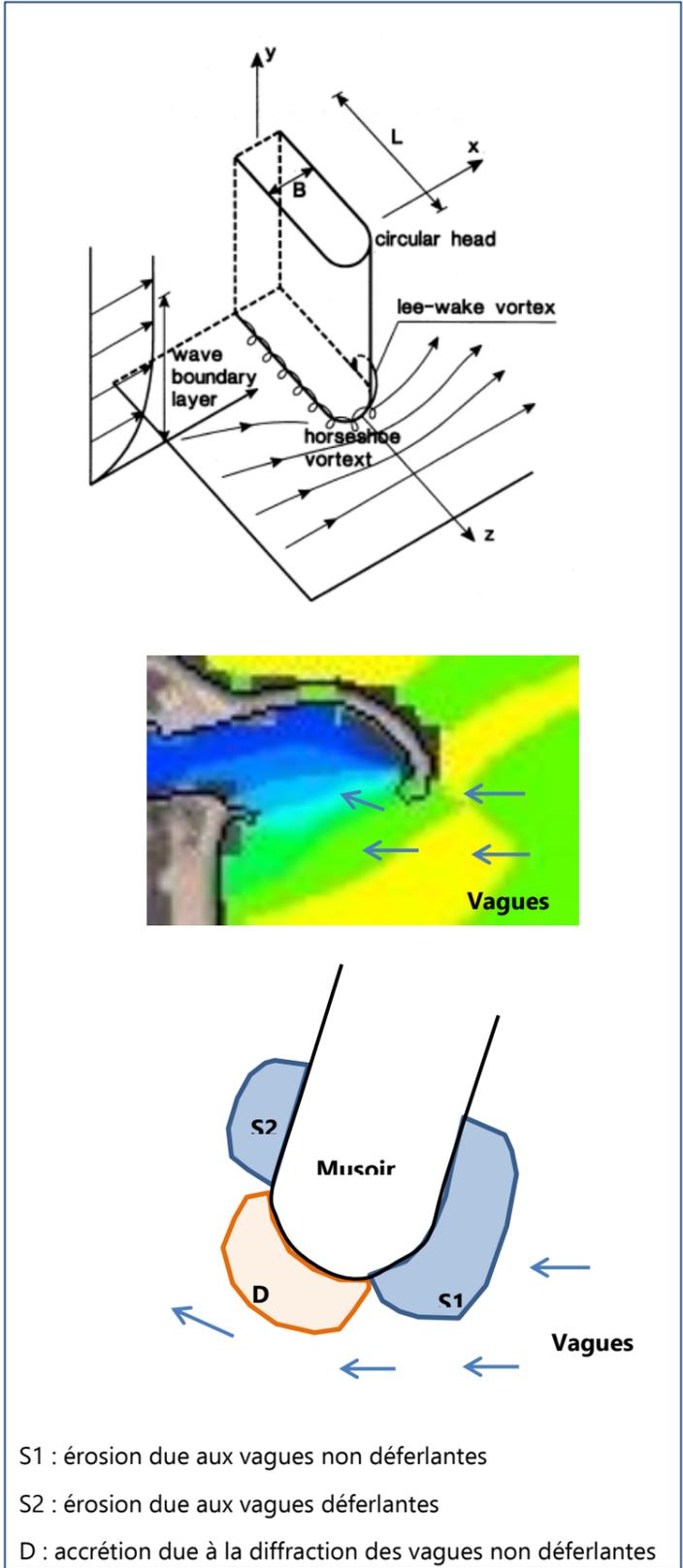
- Vagues non déferlantes induisant un courant régulier au fond et le long de l'ouvrage, dû aux non uniformités de la couche limite et la contraction du flux de particules aux abords du musoir (flux et reflux, de part et d'autre de l'ouvrage soit les parties exposées directement à la houle et les zones opposées) ;
- Vagues pouvant déferler sur la structure de l'ouvrage, induisant des tourbillons au pied du musoir, mettant en mouvement les sédiments, résultant en un affouillement au niveau de la partie du musoir directement exposée aux vagues.
- Les sédiments ainsi déplacés sont déposés dans une zone autour du musoir, comme cela est décrit sur les images dans l'encadré ci-contre.

Ainsi, par ce phénomène, une certaine quantité de sédiments, disponible autour du musoir, est déplacée en arrière du musoir, soit, dans notre cas, au niveau de la passe d'entrée, contribuant ainsi à son ensablement.



**Conclusion**

- ⇒ Les simulations numériques permettent de reproduire les phénomènes principaux de transport sédimentaire dans la zone, avec notamment les effets de redistribution des sédiments lors des coups de mer et donc les effets d'aplanissement induits.
- ⇒ Au niveau du musoir de la digue du large, il faut néanmoins tenir compte d'un effet d'affouillement local que les modèles numériques ne sont pas capables de reproduire.

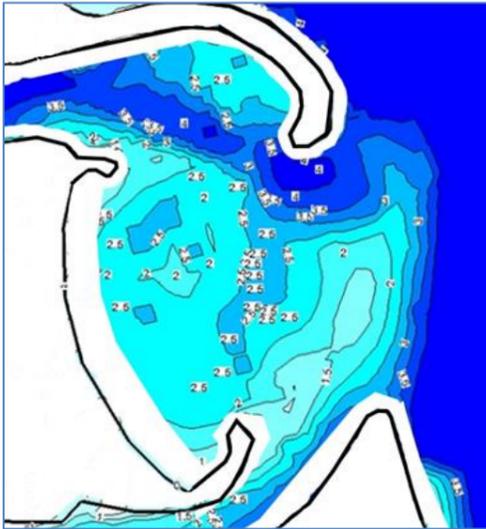
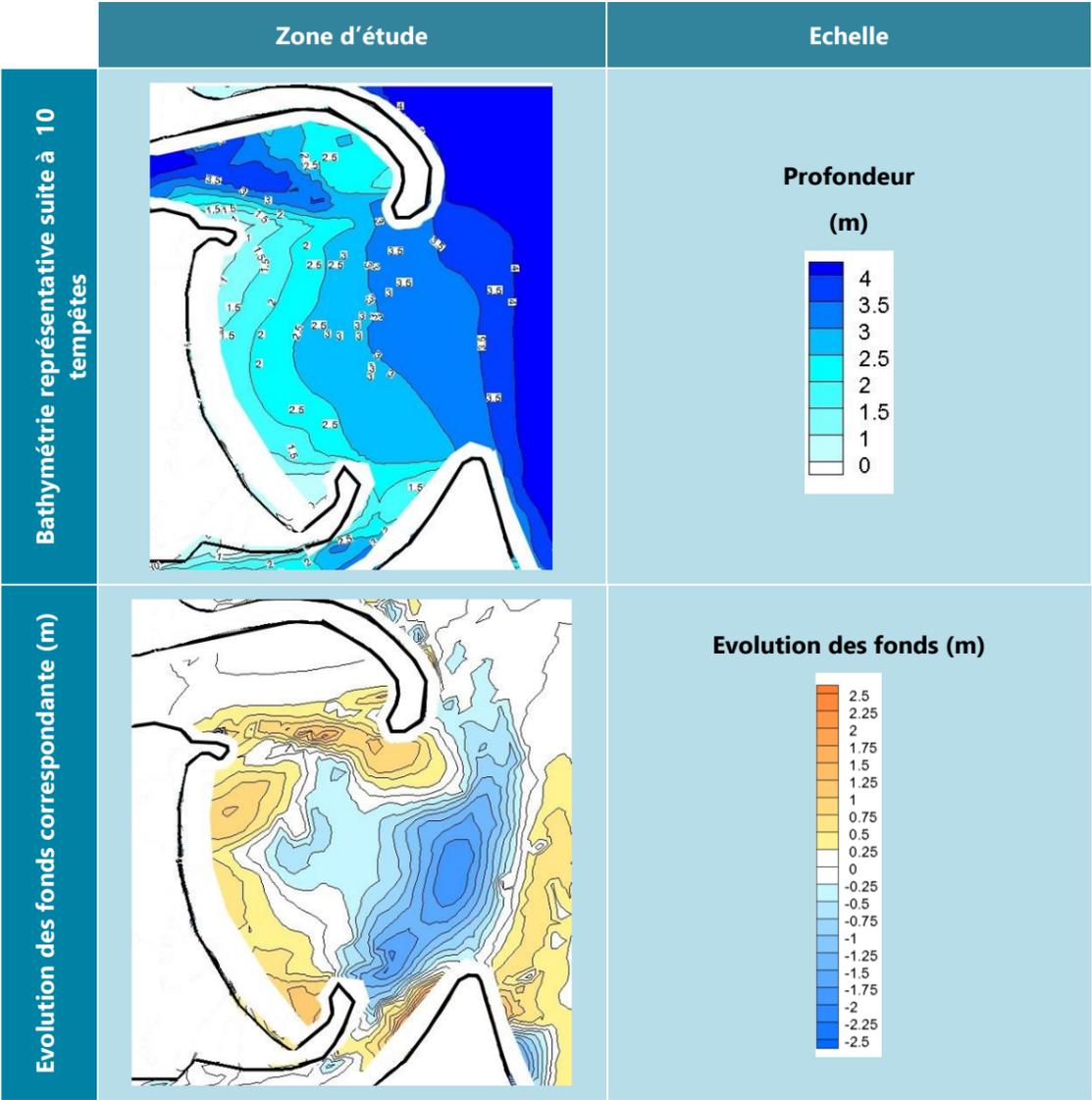


**2.4. Etude du comportement hydrosédimentaire à long terme**

Les résultats présentés ci-dessus se focalisent sur l'évolution des fonds due à une tempête. Il est donc légitime de se demander quelles sont les évolutions à une échelle de temps plus longue. Ainsi, le comportement hydrosédimentaire de la zone d'étude a été étudié sur une période représentative d'une année subissant de nombreux coups de mers.

On fait ici l'hypothèse que les principaux mouvements morphodynamiques sont observés durant des épisodes de tempêtes et qu'au cours d'une année, une dizaine de tempêtes significatives sont observées.

Le tableau ci-après expose la bathymétrie obtenue à la fin de ces simulations, ainsi que les zones d'érosion et d'accrétion et les principaux mouvements de sédiments suite aux simulations.



*Bathymétrie initiale*

**Commentaires :**

On observe un lissage de la bathymétrie. La flèche de sable à l'embouchure de la Giscle a disparu. Les sédiments ont été redistribués le long de la plage.

Les figures d'évolution des fonds entre la bathymétrie initiale et la bathymétrie après une année de simulation montrent les principales zones d'érosion et d'accrétion suivantes :

- Zone d'érosion : au prolongement de la digue Sud ;
- Zone d'accrétion : au droit de la plage, au niveau de passe d'entrée du port et au Sud du musoir de la digue du large.

L'évolution de la bathymétrie au cours du temps est présentée en annexe.



### 3. Synthèse

---

L'étude numérique du fonctionnement hydrosédimentaire de la zone d'étude a été réalisée à deux échelles de temps.

Dans un premier temps, il a été étudié numériquement l'impact d'une tempête sur le transport hydrosédimentaire. Cette étude a pris en compte des événements climatiques différents, en modélisant :

- Un épisode de tempête (vagues venant déferler dans la zone d'étude) ;
- Un épisode de pluies intenses (débit de la Giscle mais sans apport de sédiment, la donnée étant inconnue) ;
- Un épisode de tempête accompagné de pluies intenses.

Les transports sédimentaires induits par les courants cotiers simulés les plus importants ont été obtenus pour des épisodes de tempêtes accompagnés de pluies intenses.

Durant des épisodes de tempête, le transport sédimentaire tend naturellement à combler les fosses au sein de la cellule hydrosédimentaire en aplanissant la bathymétrie. Ces résultats numériques sont très représentatifs des observations faites suite à la mission de suivi météorologique et bathymétrique pour la période août à novembre 2013 [1] : on y retrouve les mêmes tendances d'évolution des fonds. Il est à noter néanmoins un effet local d'affouillement au niveau du musoir de la digue du large.

### 4. Références

---

[1] « Suivi Bathymétrique et Météorologique » IN1107/890 », ACRI-IN pour Port Grimaud 1, décembre 2013.

[2] « LOCAL SCOUR NEAR STRUCTURES » par Leo C. van Rijn, [www.leovanrijn-sediment.com](http://www.leovanrijn-sediment.com), mars 2013

**5. Annexes : Evolutions bathymétriques à long terme (simulation)**

