



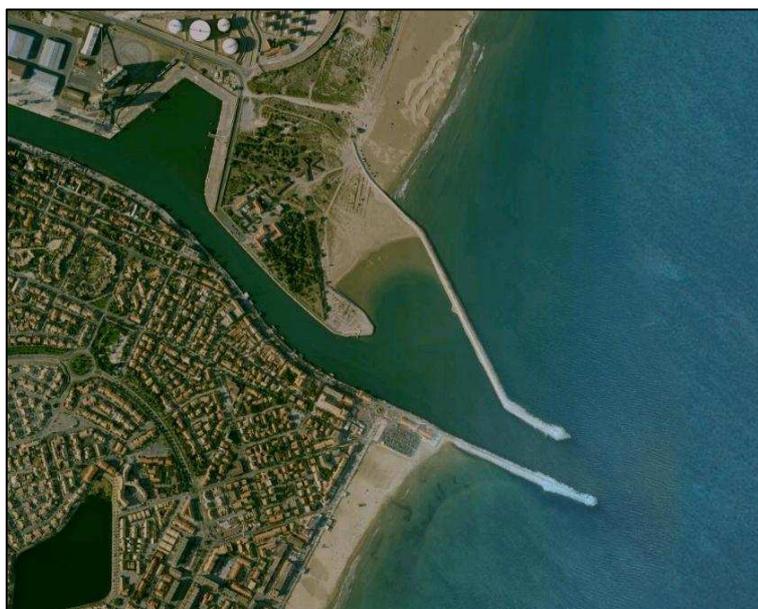
Port de Brégaillon
Bâtiment FIRST
B. P. 63
83 502 La Seyne/Mer
Tél. : 04 94 10 97 40
Fax : 04 94 94 42 27
E-mail : contact@oceanide.net



Port de Port la Nouvelle

Passé d'Entrée et Avant-Port

Etude d'Aménagement sur Modèle Mathématique et Physique



Modélisations numériques de l'état actuel

Numéro : MN 09-3-067 / 01 / B

Date : 2 août 2010

Révision : B

Avec la participation
financière du



**FICHE D'IDENTIFICATION**

REFERENCES DU DOCUMENT			
Nature du document	<input type="checkbox"/> pièce d'étude	<input type="checkbox"/> publication	<input checked="" type="checkbox"/> rapport
	<input type="checkbox"/> document final	<input type="checkbox"/> document intermédiaire	<input type="checkbox"/> devis
	Numéro	TITRE	
Classement	MN 09-3-067/01/B	Port de Port la Nouvelle - Passe d'Entrée et Avant-Port Etude d'Aménagement sur Modèle Mathématique et Physique Modélisations numériques de l'état actuel	
Pièce	Rév.B		
CLIENT	Région Languedoc Roussillon – Sous direction des Ports – Pôle Ingénierie		
Référence			

VISAS AVANT DIFFUSION		
REDIGE PAR	RELU PAR	APPROUVE PAR
Alexis LENOBLE Stéphane SCARDIGLI	Stéphane SCARDIGLI	Jean-Pierre AULANIER
DATE D'EMISSION	APPROBATION MO	
2 août 2010		

DIFFUSION		
Fiche d'identification seule		
Document complet	Interne	Externe
	Génie Côtier	RLR – Sous direction des Ports RLR – PTPLN

MOTS CLES
HOULE, PROPAGATION, AGITATION, COURANT, SEDIMENTOLOGIE, NAVIGABILITE



IDENTIFICATION



Révision	Date	Objet
A	29/06/2010	1 ^{ère} émission
B	02/08/2010	2 ^{nde} émission – Insertion du logo du Conseil Général de l'Aude

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
I- PRESENTATION	2
1-1 SITUATION DU PORT DE PORT LA NOUVELLE.....	2
1-2 BATHYMETRIE.....	2
1-3 ZONE D'ETUDE.....	3
1-4 EXPOSITION AUX HOULES.....	4
II- PROPAGATION DE LA HOULE DU LARGE	5
2-1 DESCRIPTION DU MODELE DE PROPAGATION.....	5
2-2 HOULES RETENUES.....	5
2-3 EMPRISE DU MODELE.....	6
2-4 BATHYMETRIE ET MAILLAGE.....	7
2-5 CALAGE DES MODELES.....	8
2-6 PRESENTATION DES RESULTATS.....	9
2-7 RESULTATS DES CALCULS DE PROPAGATION NECESSAIRES A L'AGITATION.....	10
2-7.1 Houle 0,9 % – Hs au large = 2,2 m – Tp = 6 s – 100°N – +1,0 m (CM).....	10
2-7.2 Houle 0,05 % – Hs au large = 3,6 m – Tp = 6 s – 100°N – +1,0 m (CM).....	11
2-7.3 Houle 1 an – Hs au large = 4,4 m – Tp = 8 s – 100°N – +1,2 m (CM).....	11
2-8 ETUDE DE SENSIBILITE SUR LA PERIODE ET LA DIRECTION.....	12
2-9 RESULTATS DES CALCULS DE PROPAGATION NECESSAIRES AU PREDIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES.....	13
2-9.1 Cas testés.....	13
2-9.2 Présentation des résultats.....	14
2-9.3 Houle annuelle – Hs = 4,9 m – Tp = 8 s – 70°N – +1,2 m CM.....	15
2-9.4 Houle décennale – Hs = 6,0 m – Tp = 10 s – 70°N – +1,4 m CM.....	15
2-9.5 Houle cinquantennale – Hs = 7,4 m – Tp = 10 s – 70°N – +1,8 m CM.....	16
2-9.6 Houle cinquantennale – Hs = 7,4 m – Tp = 12 s – 70°N – +1,8 m CM.....	17
2-9.7 Etude de sensibilité.....	18
2-9.8 Valeurs des houles en pied d'ouvrage.....	20
III- MODELE D'AGITATION AUX ABORDS DE PORT-LA-NOUVELLE	21
3-1 DESCRIPTION DU MODELE D'AGITATION.....	21
3-2 CONDITIONS AUX LIMITES.....	21
3-2.1 Données d'entrée.....	21
3-2.2 Coefficients de réflexion.....	21
3-3 EMPRISE DU MODELE.....	23
3-4 BATHYMETRIE ET MAILLAGE.....	23

3-5	RESULTATS DE L'ETUDE D'AGITATION	25
3-5.1	<i>Etudes de sensibilité sur la période et la direction</i>	26
3-5.2	<i>Résultats pour les houles de référence</i>	28
3-6	COMMENTAIRES.....	32
3-6.1	<i>Comparaison avec les données bibliographiques</i>	32
3-6.2	<i>Synthèse</i>	33
IV-	MODELISATION DE LA COURANTOLOGIE	34
4-1	DESCRIPTION DU MODELE DE COURANTOLOGIE	34
4-2	ETUDE DU COURANT TRAVERSIER	35
4-2.1	<i>Conditions aux limites</i>	35
4-3	ETUDE DU COURANT DANS LE GRAU	40
4-3.1	<i>Echanges mer/étang</i>	40
4-3.2	<i>Emprise du modèle et maillage</i>	40
	<i>Afin de bien prendre en compte les faibles vitesses de courant, des mailles de 5 m ont été modélisées.</i>	40
4-3.3	<i>Résultats</i>	41
4-4	COMMENTAIRES.....	46
4-4.1	<i>Comparaison avec les données bibliographiques</i>	46
4-4.2	<i>Synthèse</i>	46
V-	MODELISATION DE LA SEDIMENTOLOGIE	47
5-1	DESCRIPTION DU MODELE DE SEDIMENTOLOGIE	47
5-2	EMPRISE DU MODELE	47
5-3	BATHYMETRIE ET MAILLAGE	48
5-4	DONNEES D'ENTREE.....	49
5-4.1	<i>Données physico-chimiques</i>	49
5-4.2	<i>Données météorologiques</i>	49
5-4.3	<i>Cas étudiés</i>	49
5-5	RESULTATS DE LA MODELISATION SEDIMENTOLOGIQUE	50
5-5.1	<i>Cas 1 – Courant N-S et houle de limite d'opérabilité 70°N</i>	51
5-5.2	<i>Cas 2 – Courant N-S et houle annuelle 70°N</i>	52
5-5.3	<i>Cas 3 - Courant N-S et houle décennale 70°N</i>	53
5-5.4	<i>Cas 4 et 4bis – Courants et houle d'incidence 110°N</i>	54
5-5.5	<i>Cas 5 – Courant N-S et houle de limite d'opérabilité 100°N</i>	56
5-5.6	<i>Cas 6 – Courant S-N et houle 0,02% 130°N</i>	57
5-6	CONCLUSIONS	58
5-6.1	<i>Tendance sur le site et modélisations</i>	58
5-6.2	<i>Tableau de synthèse</i>	59

VI- ETUDE DE LA NAVIGABILITE	60
6-1 DESCRIPTION DU MODELE DE NAVIGABILITE	61
6-2 CAS ETUDIES	61
6-2.1 <i>Caractéristiques du navire étudié</i>	62
6-2.2 <i>Cas réalisés</i>	63
6-2.3 <i>Sorties graphiques</i>	64
6-3 COMMENTAIRES	75
VII- ETUDE DES PHENOMENES DE RESONANCE	77
7-1 DESCRIPTION DU MODELE D'ETUDE DES SEICHES	77
7-2 EMPRISE DU MODELE	77
7-3 BATHYMETRIE ET MAILLAGE	78
7-4 RESULTATS DE LA MODELISATION	80
7-4.1 <i>Modélisation du port de Port la Nouvelle</i>	81
7-4.2 <i>Modélisations en présence du Thais</i>	83
7-5 COMPARATIF AVEC LES DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES ET LES OBSERVATIONS	86
7-6 CONCLUSION	87

CARTES

Carte 1 : Situation du port de Port la Nouvelle	2
(Extrait de la carte SHOM 6844)	2
Carte 2 : Emprise du modèle de propagation	6

FIGURES

Figure 1 : Bathymétrie obtenue pour le modèle de propagation	8
Figure 2 : Résultats de propagation de la houle 0,9 %	10
Figure 3 : Résultats de propagation de la houle annuelle	11
Figure 4 : Tronçons principaux de la Jetée Nord	13
Figure 5 : Implantation des profils type de la Jetée Nord	14
Figure 6 : Résultats de propagation de la houle annuelle 70°N	15
Figure 7 : Résultats de propagation de la houle décennale 70°N	15
Figure 8 : Résultats de propagation de la houle cinquantennale 70°N – 10s	16
Figure 9 : Propagation de la houle cinquantennale 70°N – 12s	17
Figure 10 : Propagation de la houle cinquantennale 90°N – 12s	19
Figure 11 : Coefficients de réflexion utilisés	22
Figure 12 : Emprise globale du modèle d'agitation	23

Figure 13 : Bathymétrie obtenue pour le modèle d'agitation	24
Figure 14 : Emplacement des profils	25
Figure 15 : Agitation associée à la houle annuelle.....	29
Figure 16 : Agitation associée à la houle 0,9%	30
Figure 17 : Bathymétrie et emprise du modèle global de courantologie.....	35
Figure 18 : Courant 0,7 m/s – 190°N – 1h	36
Figure 19 : Courant 0,7 m/s – 190°N – 6h	37
Figure 20 : Courant 0,7 m/s – 10°N – 1h	38
Figure 21 : Courant 0,7 m/s – 10°N – 6h	39
Figure 22 : Emprise du modèle local de courantologie	40
Figure 23 : Courant sortant de l'étang de 1,2 m/s – 1h	41
Figure 24 : Courant sortant de l'étang de 1,2 m/s – 6h	42
Figure 25 : Courant entrant dans l'étang de -0,7 m/s – 6h.....	44
Figure 26 : Courant entrant dans l'étang de -0,7 m/s – 12h.....	45
Figure 27 : Emprise du modèle de sédimentologie	47
Figure 28 : Bathymétrie et zoom sur le maillage du modèle de sédimentologie.....	48
Figure 29 : Prise en compte des volumes de sédiments en mouvement	50
Figure 30 : Modélisations sédimentaires – Cas 1	51
Figure 31 : Modélisations sédimentaires – Cas 2	52
Figure 32 : Modélisations sédimentaires – Cas 3	53
Figure 33 : Modélisations sédimentaires – Cas 4	54
Figure 34 : Modélisations sédimentaires – Cas 4bis.....	55
Figure 35 : Modélisations sédimentaires – Cas 5	56
Figure 36 : Modélisations sédimentaires – Cas 6	57
Figure 37 : Levé bathymétrique au moment de l'incident du Diane.....	58
Figure 38 : Emprise du modèle de résonance	78
Figure 39 : Bathymétrie du modèle de résonance	78
Figure 40 : Maillage du modèle de résonance	79
Figure 41 : Résonance transversale de la darse pétrolière – Mode 30 (30,2 s)	82
Figure 42 : Résonance longitudinale de la darse pétrolière – Mode 16 (49,4 s).....	82
Figure 43 : Résonance mixte dans la darse pétrolière – Mode 13 (59,8 s)	83
Figure 44 : Résonance longitudinale, présence du Thaïs – Mode 16 (50,1 s).....	85
Figure 45 : Résonance mixte, présence du Thaïs – Mode 13 (60,1 s).....	85

PHOTOS

Photo 1 : Zone d'étude des nouveaux aménagements.....	3
Photo 2 : Le Thaïs	62

GRAPHES

Graph. 1 : Rose des houles à proximité du port.....	4
Graph. 2 : Agitation au niveau de l'avant-port pour des périodes de 6 s, 8s et 10 s.....	26
Graph. 3 : Agitation au niveau de l'avant-port pour des directions de 100°N, 110°N et 120°N.....	27

TABLEAUX

Tableau 1 : Houles du large pour l'étude de propagation.....	5
Tableau 2 : Niveaux d'eau retenus	7
Tableau 3 : Houles à proximité du sealine	8
Tableau 4 : Propagation de la houle à la côte.....	9
Tableau 5 : Comparatif des périodes 10 s et 12 s – Houle cinquantennale.....	18
Tableau 6 : Caractéristiques de la houle de secteur 90°N	18
Tableau 7 : Comparatif des directions 70°N et 90°N	18
Tableau 8 : Propagation de la houle à la côte.....	20
Tableau 9 : Moyennes et Extrema des Hs le long des profils, houle annuelle 110°N, 6s, 8s et 10s	26
Tableau 10 : Moyennes et Extrema des Hs le long des profils, houle 0.05%, 100°N, 110°N et 120°N	27
Tableau 11 : Moyennes et Extrema des Hs le long des profils, houle 0,9%, 0,05% et 1an	28
Tableau 12 : Hauteurs d'agitation – Etat actuel BCEOM	32
Tableau 13 : Critères d'agitation dans les zones spécifiques du port.....	33
Tableau 14 : Courants de projet à l'entrée du grau.....	40
Tableau 15 : Courants de référence pour la configuration actuelle	46
Tableau 16 : Résultats des simulations sédimentaires	59
Tableau 17 : Principaux cas modélisés pour la configuration actuelle	63
Tableau 18 : Modes de résonance et périodes propres – Port de Port la Nouvelle.....	81
Tableau 19 : Modes de résonance – Bassin portuaire en présence du THAIS	84

ANNEXES

- ANNEXE 1** : LOGICIEL TELEMAT – MODULE TOMAWAC (propagation)
ANNEXE 2 : LOGICIEL TELEMAT – MODULE ARTEMIS (agitation)
ANNEXE 3 : LOGICIEL TELEMAT – MODULE TELEMAT2D (courantologie)
ANNEXE 4 : LOGICIEL TELEMAT – MODULE SISYPHE (sédimentologie)
ANNEXE 5 : LOGICIEL REFONDE (résonance)
ANNEXE 6 : LOGICIEL NAVMER (navigabilité)
ANNEXE 7 : RESULTATS DE PROPAGATION
ANNEXE 8 : RESULTATS D'AGITATION
ANNEXE 9 : COEFFICIENTS DE REFLEXION
ANNEXE 10 : RESULTATS DE COURANTOLOGIE

REFERENCES

[1] : OCEANIDE – Région Languedoc Roussillon – Port de Port la Nouvelle – Passe d'Entrée et Avant-Port – Etude d'aménagement sur Modèle Mathématique et Physique – Etude bibliographique – EB 09-3-067 / 01 / D – 2 août 2010

[2] : OCEANIDE – Région Languedoc Roussillon – Port de Port la Nouvelle – Passe d'Entrée et Avant-Port – Etude d'aménagement sur Modèle Mathématique et Physique – Note d'Hypothèses – NH 09-3-067 / 01 / E – 2 août 2010

[3] : OCEANIDE – Région Languedoc Roussillon – Port de Port la Nouvelle – Passe d'Entrée et Avant-Port – Etude d'aménagement sur Modèle Mathématique et Physique – Note intermédiaire sur la navigabilité – NN 09-3-067 / 01 / A – 25 juin 2010

INTRODUCTION

Le présent document entre dans le cadre de l'étude de la passe d'entrée et de l'avant-port de Port la Nouvelle. Il correspond **aux modélisations numériques de la configuration portuaire actuelle**.

Les résultats relatifs à l'état actuel (état zéro) serviront de **référence** pour analyser les différents scénarii d'aménagements projetés. Ces derniers ne devront pas empirer les phénomènes observés dans le port d'aujourd'hui.

L'étude de la configuration actuelle s'appuie sur l'Etude Bibliographique [1] et sur la Note d'Hypothèses [2].

Afin de permettre une analyse complète de la configuration de la zone étudiée, les modélisations numériques suivantes ont été réalisées :

- **Propagation** de la houle du large, avec le module TOMAWAC issu de TELEMAC (cf. Présentation au paragraphe 2.1 et en annexe 1) ;
- **Agitation** portuaire, avec le module ARTEMIS issu de TELEMAC (cf. Présentation au paragraphe 3.1 et en annexe 2) ;
- **Courantologie** du site, avec le module TELEMAC 2D issu de TELEMAC (cf. Présentation au paragraphe 4.1 et en annexe 3) ;
- **Sédimentologie** avec le module SISYPHE issu de TELEMAC (cf. Présentation au paragraphe 5.1 et en annexe 4) ;
- Etude des **résonances** des plans d'eau, avec le logiciel REFONDE (cf. Présentation au paragraphe 7.1 et en annexe 5) ;
- Etude de la **navigabilité**, avec le logiciel NAVMER (cf. Présentation au paragraphe 6.1 et en annexe 6).

I- PRESENTATION

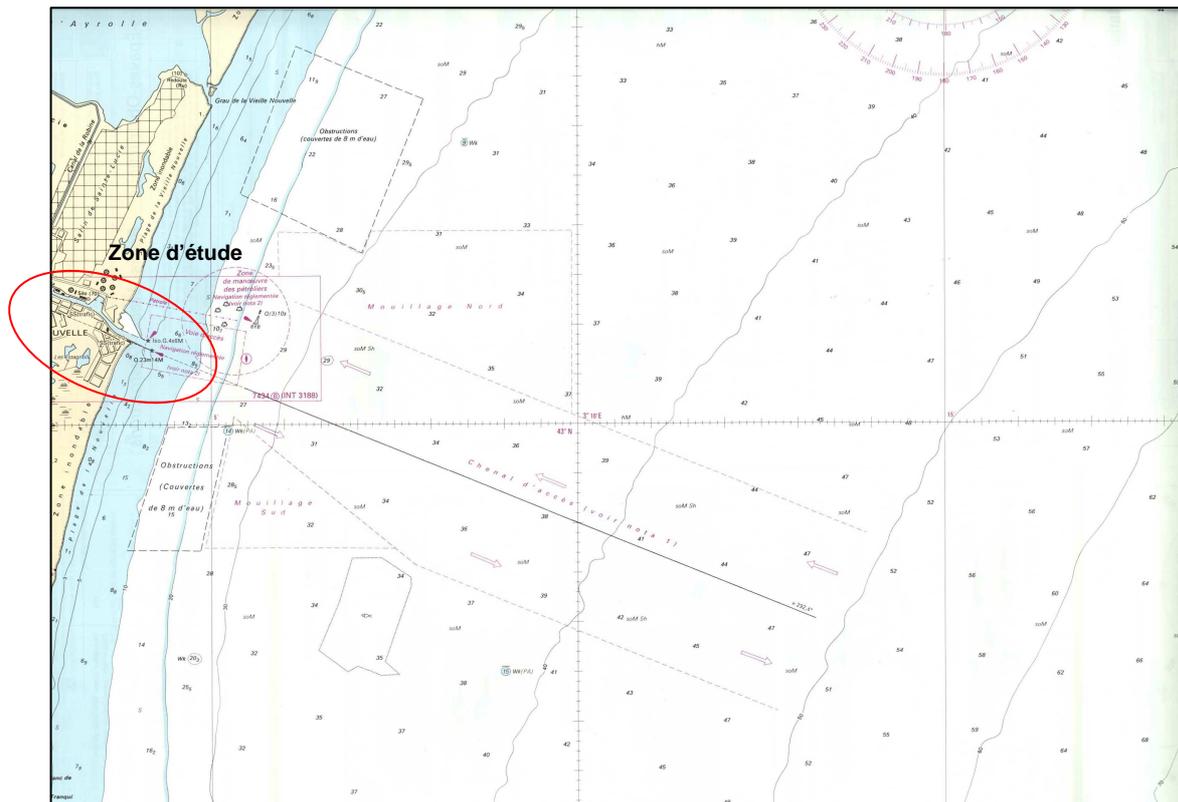
1-1 Situation du port de Port la Nouvelle

Port la Nouvelle appartient au département de l'Aude et à la région Languedoc-Roussillon.

Le port est situé à l'Ouest du Golfe du Lion. Il est entouré de deux plages (au Nord : la Vieille Nouvelle et au Sud : la Nouvelle). Il sert de grau pour les étangs de Bages-Sigean.

1-2 Bathymétrie

Le relief sous-marin est peu marqué : il faut aller à plus de 25 km des côtes pour avoir des profondeurs supérieures à 80 m (cf. carte 1).



**Carte 1 : Situation du port de Port la Nouvelle
(Extrait de la carte SHOM 6844)**

Un chenal d'accès est actuellement dragué à -9,6 m (Carte Marine). L'avant port jusqu'au dépôt pétrolier est quant à lui dragué à -8,7 m (CM).

1-3 Zone d'étude

La zone d'étude englobe le port de Port la Nouvelle et ses environs.

En particulier, l'étude de propagation est étendue jusqu'à des profondeurs proches de 80 m (c'est-à-dire dans des fonds suffisamment importants pour que la houle ne soit pas influencée).

L'étude de courantologie et de sédimentologie sera également faite en considérant les alentours du port de manière à évaluer les phénomènes globaux à proximité de celui-ci.

L'étude des seiches englobera l'ensemble du plan d'eau portuaire intérieur.

Les études d'agitation, de navigabilité et d'aménagement concerneront la passe d'entrée, l'avant port et la darse pétrolière (cf. photo 1).



Photo 1 : Zone d'étude des nouveaux aménagements

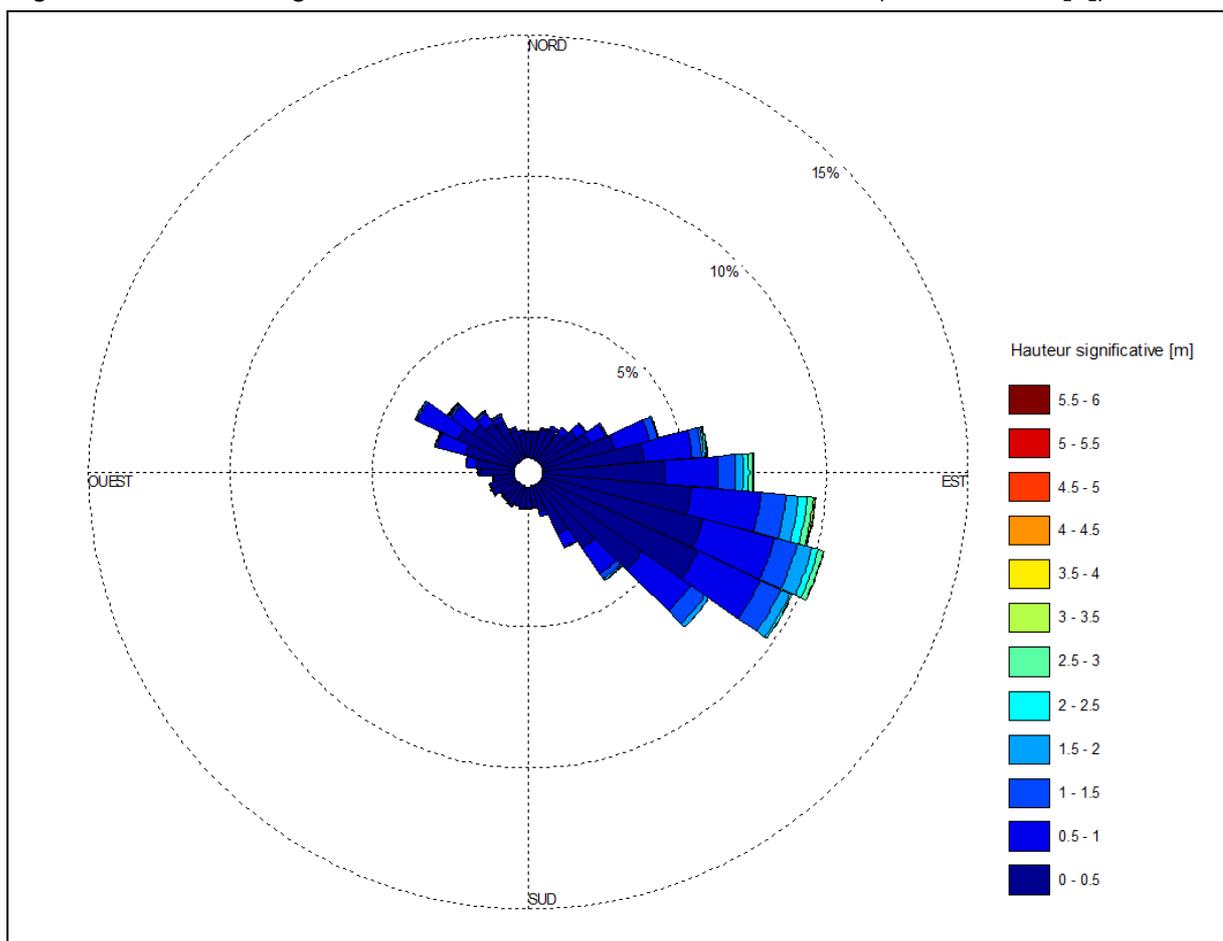
1-4 Exposition aux houles

Le site étudié est exposé aux houles provenant du Nord-Est au Sud-Est.

Le descriptif détaillé des incidences de houle et des hauteurs associées figure dans l'Etude Bibliographique [1] et dans la Note d'Hypothèses [2]. Seuls les points principaux utiles à la compréhension des modélisations réalisées sont rappelés ici :

- Provenance 20°N à 50°N : secteur géométriquement défavorable pour la Jetée Nord (extrémité Est), mais peu significatif (fetchs limités, profondeurs faibles et vents modérés) ;
- Provenance 50°N à 70°N : secteur présentant des fetchs plus importants, défavorable à la Jetée Nord (sur l'ensemble de son linéaire) et à l'extrémité de la digue Sud ;
- Provenance 70°N à 160°N : ce secteur correspond aux houles du large les moins impactées par les fonds et pouvant présenter de très grands fetchs ;
- Provenance 160°N à 180°N : secteur le plus défavorable à la digue Sud. Comme pour le secteur 20°N à 50°N, les fetchs, les profondeurs et les vents restent faibles.

La rose des houles à proximité du sealine du port est rappelée ci-dessous (cf. graph. 1). On remarque que les houles les plus fréquentes sont centrées sur le secteur 110°N et les houles de plus grandes hauteurs significatives sont de Direction Nord-Est à Est (cf. document [1]).



Graph. 1 : Rose des houles à proximité du port

II- PROPAGATION DE LA HOULE DU LARGE

Pour étudier la propagation des houles du large jusqu'à la côte, Océanide utilise le modèle numérique TOMAWAC du système TELEMAC (Cf. Annexe 1).

Les résultats permettent d'avoir les houles à proximité de la côte et les valeurs pour le dimensionnement des ouvrages. Un modèle d'agitation est ensuite imbriqué au modèle de propagation des houles du large de manière à connaître avec précision les houles en faibles profondeurs et à proximité des ouvrages (cf. paragraphe III).

2-1 Description du modèle de propagation

Le logiciel TOMAWAC permet de modéliser la propagation de la houle réelle (irrégulière) du large vers la côte. Il est basé sur une structure en éléments finis et est intégré à la bibliothèque des codes numériques d'hydraulique à surface libre du système TELEMAC du Laboratoire National d'Hydraulique.

Les phénomènes physiques modélisés sont : la réfraction, le shoaling, la génération d'énergie par le vent (supposé stationnaire), la dissipation par frottement sur le fond et par déferlement dû à la bathymétrie.

Les résultats principaux de TOMAWAC sont, en chaque nœud du maillage de résolution du domaine fluide, la hauteur et l'incidence de la houle.

2-2 Houles retenues

Les caractéristiques des houles retenues pour l'étude de propagation de la houle du large ont été établies à partir de l'étude bibliographique et de l'analyse statistique des mesures effectuées à proximité du sealine entre 2005 et 2008.

Les **houles au large du port** (profondeurs supérieures à 80 m) retenues **après calage** des modèles (cf. 2-5 calage des modèles) pour l'étude de propagation de la houle du large sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Période de retour	Hs	Tp	Incidence	Objectif
0,9 %	2,2 m	6 s	100°N	Agitation
0,05 %	3,6 m	6 s	100°N	Agitation
1 an	4,4 m	8 s	100°N	Agitation
1 an	4,9 m	8 à 10 s	70°N	Franchissements
10 ans	6,0 m	10 à 12 s	70°N	Franchissements
50 ans	7,4 m	10 à 13 s	70°N	Stabilité

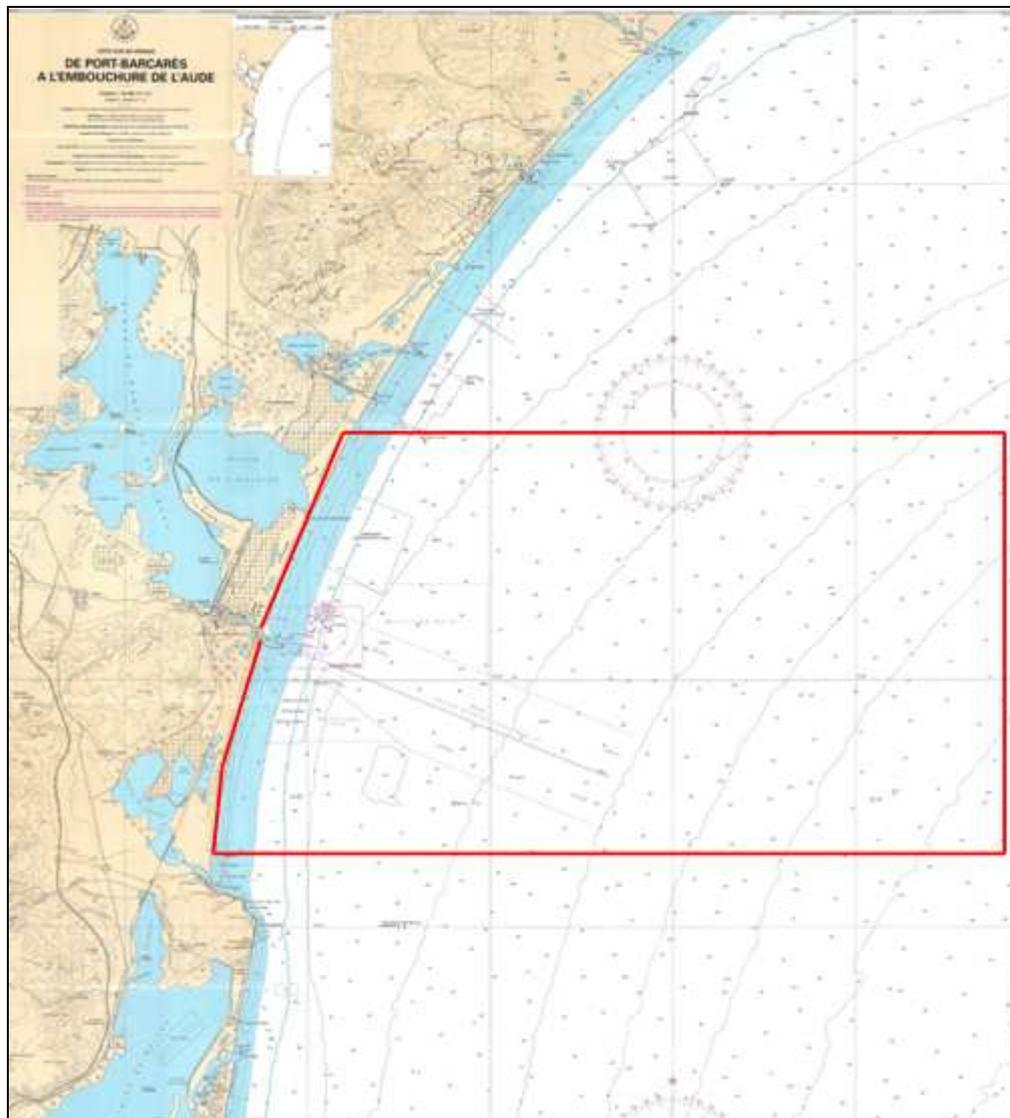
Tableau 1 : Houles du large pour l'étude de propagation

2-3 Emprise du modèle

L'emprise du modèle de propagation est déterminée en fonction de différents paramètres :

- Les phénomènes de réfraction sur les fonds influencent la houle à partir d'une profondeur égale à la moitié de sa longueur d'onde. La plus longue période de houle à étudier délimite les profondeurs au large à atteindre dans le modèle ;
- Les incidences de la houle au large (de 70°N à 120° N) pour l'orientation du modèle ;
- Les caractéristiques bathymétriques de la zone étudiée et de la zone où sont renseignées les houles de projet. La remontée des fonds étant douce et régulière sur des kilomètres (isobathe des 80m à 25km de l'entrée du port), les houles de projet sont propagées en profondeur "finie".

Le modèle est ainsi étendu jusqu'à des profondeurs de 80m. Il couvre une partie du littoral compris entre La Franqui et Ayrolle. Son emprise schématique est présentée sur la carte 2 suivante.



Carte 2 : Emprise du modèle de propagation

2-4 Bathymétrie et maillage

La bathymétrie des abords du port et de ses fonds a été modélisée avec les données fournies par le Maître d'Ouvrage (la Région Languedoc-Roussillon) et complétée à partir des cartes SHOM. Ces données bathymétriques sont précisées dans la Note d'Hypothèses [2].

Toutes les profondeurs sont rapportées au Zéro Hydrographique (équivalent au zéro Carte Marine c'est-à-dire au niveau des plus basses mers), qui se situe à -0,392m en dessous du zéro du nivellement général de la France (IGN69) à Port-la-Nouvelle.

Les surcotes du plan d'eau retenues pour les études sont présentées dans le tableau ci-dessous. Ces niveaux tiennent compte de la marée, de la pression barométrique et de l'estimation de l'augmentation du niveau des mers (pour les périodes de retour cinquantennale et centennale).

	Niveau d'eau par rapport au Zéro Hydrographique
Niveau extrême bas	0,00 m
Niveau d'eau moyen	+ 0,60 m
Tr < 1an	+ 1,00 m
Tr = 1an	+ 1,20 m
Tr = 10 ans	+ 1,40 m
Tr = 50 ans	+ 1,80 m
Tr = 100 ans	+ 2,00 m

Tableau 2 : Niveaux d'eau retenus

Le maillage du domaine est réalisé à l'aide du mailleur MATISSE, élément du système TELEMAC. Afin d'obtenir une bonne résolution pour les calculs de propagation, les mailles ont été affinées à proximité du port : la taille des mailles est d'environ 130 m au large et de 30 m à proximité du port.

La bathymétrie obtenue est présentée sur la figure 1 suivante. Les profondeurs indiquées sur ces figures ne tiennent pas compte de la surcote, elles sont rapportées au zéro C.M..

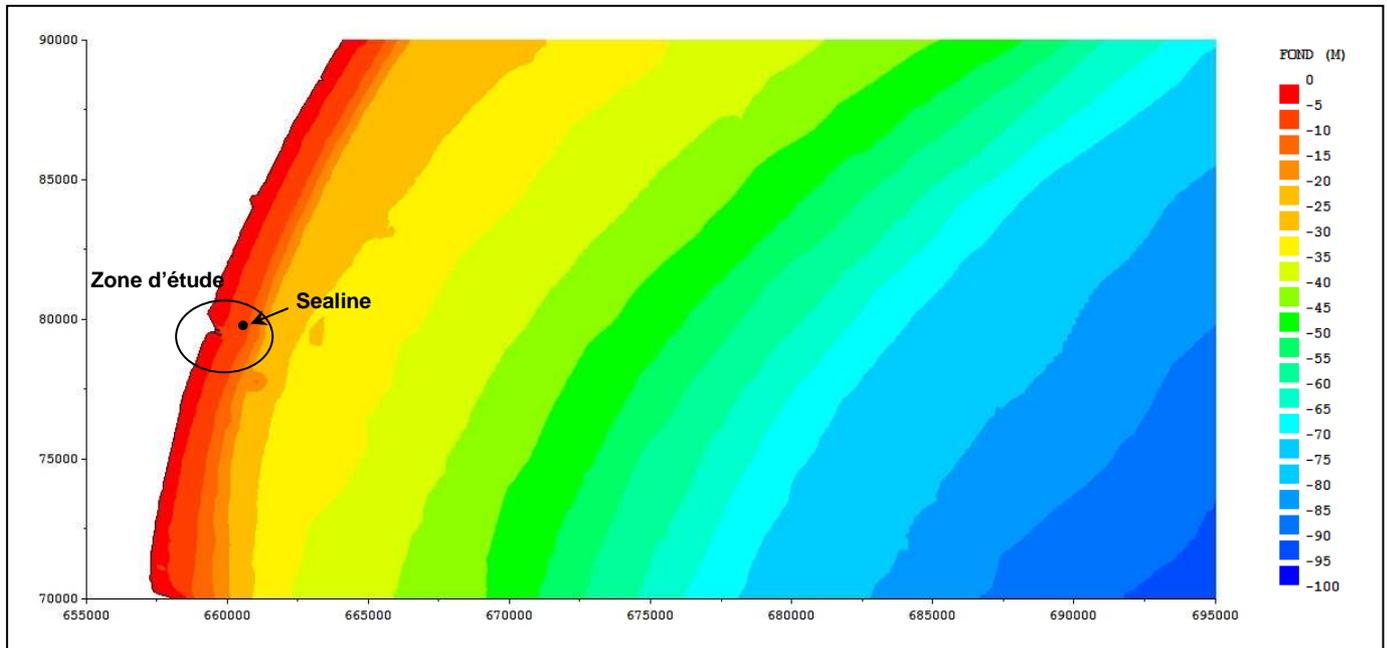


Figure 1 : Bathymétrie obtenue pour le modèle de propagation

2-5 Calage des modèles

Le climat des houles au large du port de Port la Nouvelle a été ajusté afin de se caler sur le climat des houles observées à proximité du sealine (cf. tableau 3).

Période de retour	Hs	Tp	Incidence	Surcotes (/ ZH)
0,9 %	2,0 m	6 s	100°N	+ 1,0 m
0,05 %	3,3 m	6 s	100°N	+ 1,0 m
1 an	4,0 m	8 s	100°N	+ 1,20 m
1 an	4,3 m	8 à 10 s	70°N	+ 1,20 m
10 ans	6,0 m	10 à 12 s	70°N	+ 1,40 m
50 ans (*)	7,4 m	10 à 13 s	70°N	+ 1,80 m

Tableau 3 : Houles à proximité du sealine

(*) : on rappelle que la durée des mesures (3 ans) ne permet pas d'extrapoler avec précision les caractéristiques de la houle cinquantennale.

Remarque : le calage des houles s'est fait au niveau du point de mesure à proximité du sealine (Coordonnées : 43°01'128"N ; 3°04'787"E).

Le tableau suivant présente les houles au large retenues finalement et leurs caractéristiques, après propagation, à proximité du sealine.

Période de retour	Tp	Hs au large	Hs devant le port	Incidence au large	Incidence devant le port
0,9 %	6 s	2,2 m	2,0 m	100°N	102°N
0,05 %	6 s	3,6 m	3,3 m	100°N	102°N
1 an	8 s	4,4 m	4,0 m	100°N	102°N
0,2 %	6 s	2,2 m	2,0 m	110°N	109°N
0,05 %	6 s	3,0 m	2,8 m	100°N	102°N
0,05 %	6 s	3,0 m	2,7 m	110°N	109°N
0,05 %	6 s	3,0 m	2,7 m	120°N	116°N
1 an	6 s	3,7 m	3,4 m	110°N	109°N
1 an	8 s	3,7 m	3,3 m	110°N	108°N
1 an	10 s	3,7 m	3,2 m	110°N	107°N

Tableau 4 : Propagation de la houle à la côte

2-6 Présentation des résultats

Les résultats des calculs de propagation sont présentés sur 2 figures pour chacun des cas modélisés :

- Première figure : Hauteurs significatives et directions de la houle sur l'ensemble du modèle ;
- Deuxième figure : Hauteurs et directions de la houle aux abords du port.

Remarque : les graphiques principaux sont présentés dans le corps du texte. Une deuxième partie des graphiques est présentée en annexe.

2-7 Résultats des calculs de propagation nécessaires à l'agitation

2-7.1 Houle 0,9 % – Hs au large = 2,2 m – Tp = 6 s – 100°N – +1,0 m (CM)

On rappelle que cette houle correspond à une hauteur significative de 2,0 m à proximité du sealine et à la limite d'opérabilité des navires sur la zone.

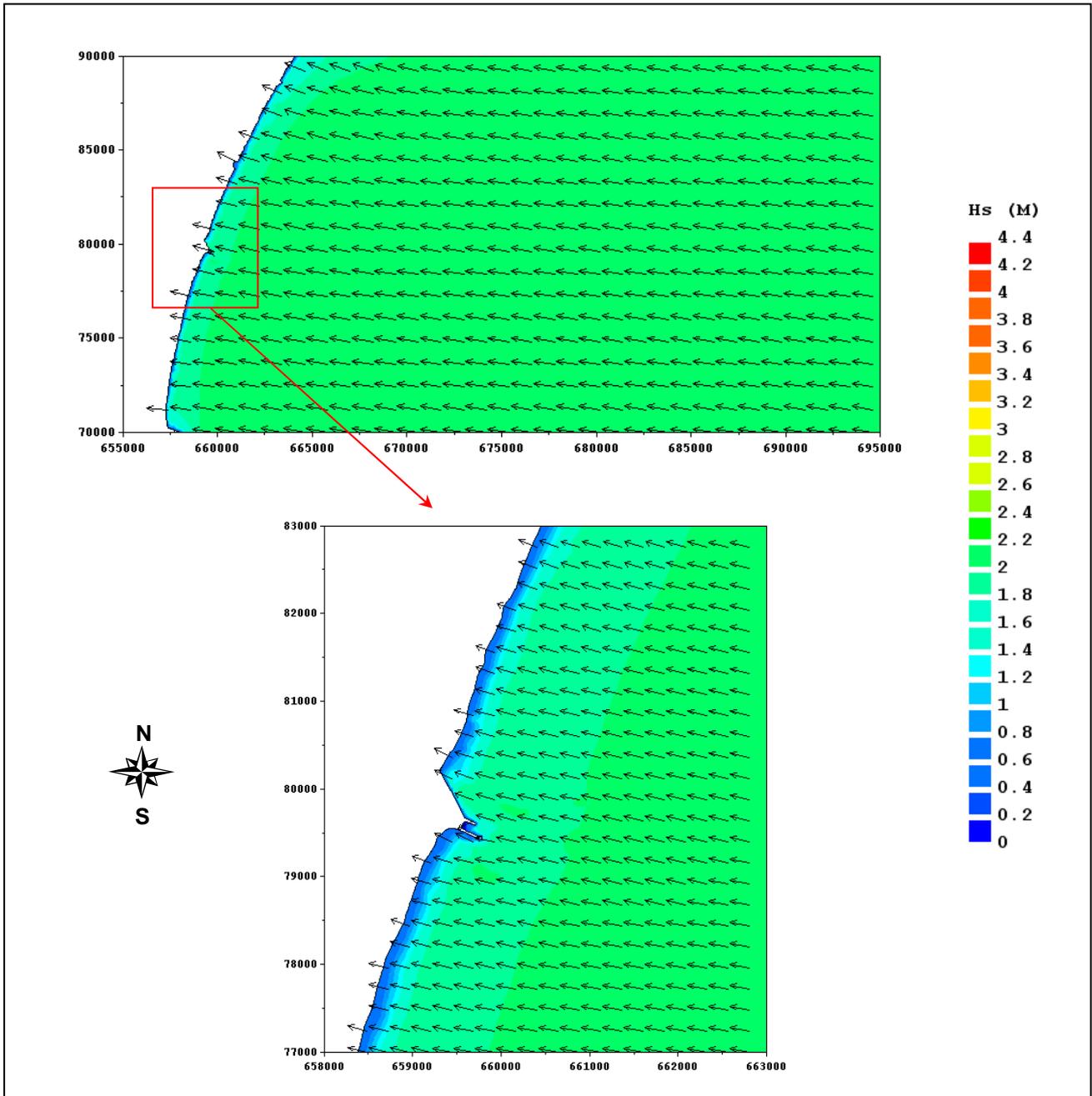


Figure 2 : Résultats de propagation de la houle 0,9 %

2-7.2 Houle 0,05 % – Hs au large = 3,6 m – Tp = 6 s – 100°N – +1,0 m (CM)

Cette houle est une houle intermédiaire entre la houle annuelle et la houle correspondant à la limite d'opérabilité.

Les résultats graphiques relatifs à cette houle sont présentés en annexe 7.

2-7.3 Houle 1 an – Hs au large = 4,4 m – Tp = 8 s – 100°N – +1,2 m (CM)

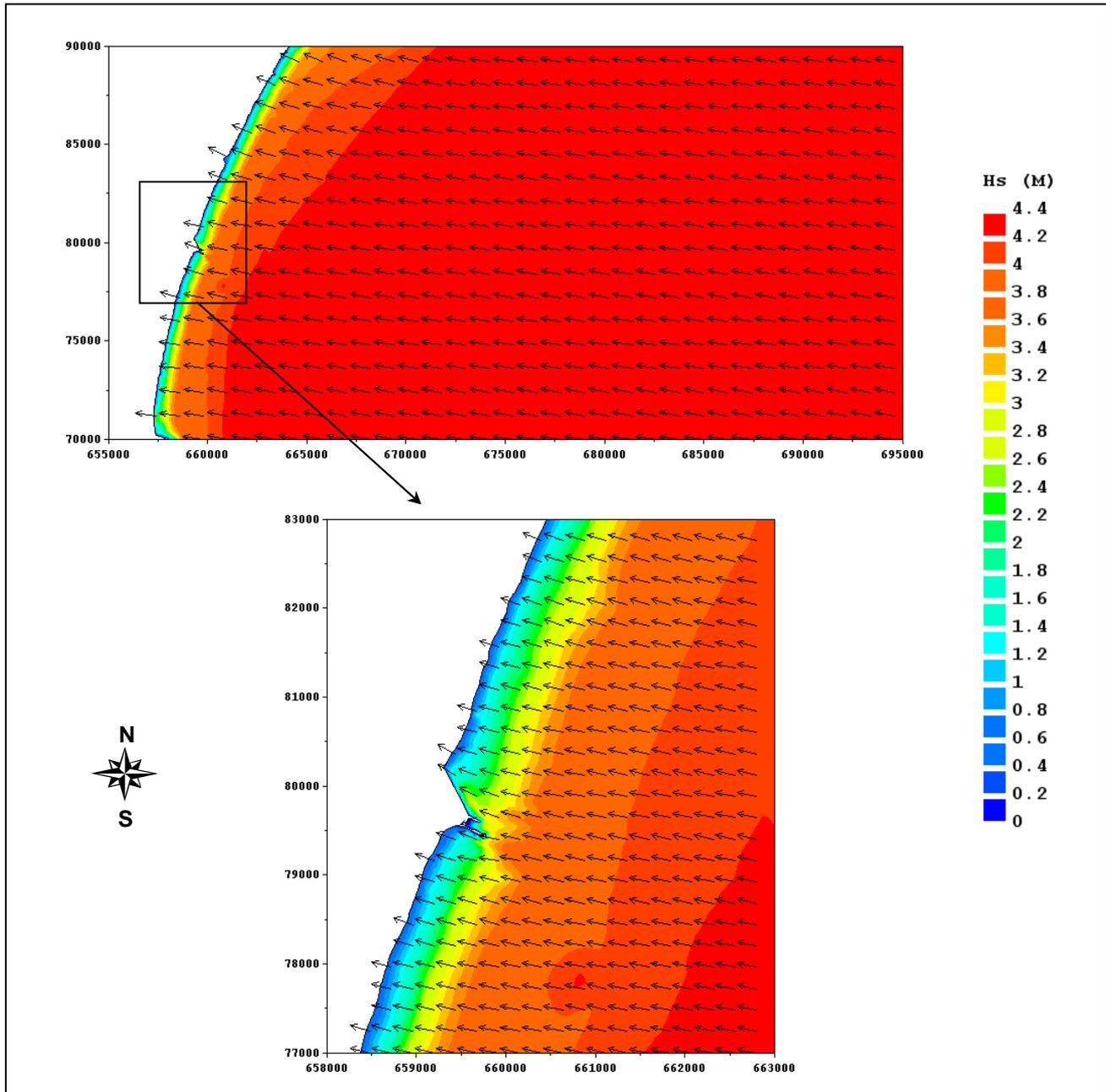


Figure 3 : Résultats de propagation de la houle annuelle

2-8 Etude de sensibilité sur la période et la direction

Une double étude de sensibilité a été menée afin d'évaluer les houles les plus défavorables en terme d'agitation dans le port :

- Sur la période : la houle annuelle de direction 110°N (Hs au large = 3,7 m) a été modélisée pour des périodes de 6 s, 8 s et 10 s afin d'évaluer l'influence de la période sur les houles incidentes dans le port de Port la Nouvelle ;
- Sur la direction : la houle "0,05 %" (Hs au large = 3,0 m) a été modélisée pour des directions de 100°N, 110°N et 120°N afin de vérifier la direction de houle la plus pénalisante pour l'agitation à l'intérieur du port.

Les résultats de cette étude de sensibilité sont présentés dans le paragraphe 3-5.1 relatif aux résultats d'agitation dans le port et dans le tableau 4 du paragraphe 2-5 (Calage des modèles).

La houle 0,05 % est atténuée dans les mêmes ordres de grandeur depuis le large (environ 9 %), pour les secteurs 100°N à 120°N. De plus elle n'est guère réorientée : la houle de direction 120°N au large est orientée à 116°N près du port (réorientation de l'ordre de 4 %).

La houle annuelle est légèrement plus atténuée pour une période de 10 s que pour une période de 6 s (13% contre 8%). Cette légère différence s'explique par la plus forte influence des fonds pour les plus grandes périodes. D'autre part, pour différentes périodes, les directions entre le large (110°N) se trouvent peut modifiées.

Note : une étude de sensibilité similaire (direction, période et Hs) a également été menée afin d'évaluer au mieux les houles de prédimensionnement. Les résultats sont présentés dans le paragraphe 2-9 suivant.

2-9 Résultats des calculs de propagation nécessaires au prédimensionnement des ouvrages

L'étude statistique des houles à proximité du port de Port la Nouvelle montre que ce sont les houles de secteur [60 – 80°N] qui présentent les plus fortes hauteurs significatives, puis les houles de secteur [80 – 100°N]. De plus les houles de ces secteurs se trouvent être les plus frontales à la Jetée Nord : elles seront donc utilisées pour vérifier son design en terme de stabilité et de franchissement.

Les conditions suivantes à proximité du port ont été étudiées :

- Houle annuelle : $H_s = 4,9 \text{ m}$ – $T_p = 8 \text{ à } 10 \text{ s}$ – 70°N – +1,20 m : cette houle a pour objectif d'évaluer les franchissements sur les ouvrages portuaires ;
- Houle décennale : $H_s = 6,0 \text{ m}$ – $T_p = 10 \text{ à } 12 \text{ s}$ – 70°N – +1,40 m : cette houle a également pour objectif d'évaluer les franchissements ;
- Houle cinquantennale : $H_s = 7,4 \text{ m}$ – $T_p = 10 \text{ à } 12 \text{ s}$ – 70°N – +1,80 m : cette houle a pour objectif d'évaluer la stabilité des ouvrages.

La géographie de la zone, et notamment la bathymétrie au large de Port la Nouvelle (présence de faibles profondeurs au Nord-Est) ne permet pas de propager simplement la houle "depuis le large" pour le secteur [60 – 80°N]. Les conditions aux limites du modèle ont donc été directement appliquées à proximité du sealine.

Note : le prédimensionnement des futurs ouvrages se fera à partir des houles incidentes en pied d'ouvrage. Ces dernières seront relevées une fois l'implantation des futurs ouvrages finalisés. Une réévaluation des houles incidentes sur la Jetée Nord actuelle sera également faite.

2-9.1 Cas testés

La Jetée Nord comporte deux tronçons linéaires d'orientation différente (voir Figure 4). Un coefficient de réflexion de 40 % a été appliqué au tronçon 2 et une réflexion nulle a été imposée au tronçon 1 afin d'avoir les houles uniquement incidentes sur l'ouvrage



Figure 4 : Tronçons principaux de la Jetée Nord

Le tronçon 1 de la Jetée Nord est composé de trois profils types. Conformément au cahier des charges, les houles dimensionnantes seront étudiées au droit de ces trois profils types. La figure 5 suivante présente l'implantation des différents profils.



Figure 5 : Implantation des profils type de la Jetée Nord

Rappel :

La dernière partie de la digue Nord, au niveau du musoir, n'est pas étudiée car l'élargissement de la passe nécessitera de modifier significativement cette section pour les futurs aménagements.

2-9.2 Présentation des résultats

Pour chaque condition hydraulique modélisée et chacun des profils types de la Jetée Nord sont présentés :

- La hauteur significative maximale incidente en pied d'ouvrage ;
- La direction de la houle incidente en pied d'ouvrage.

Des sorties graphiques illustrent la propagation de la houle depuis le sealine jusqu'à proximité des ouvrages : sont présentées les hauteurs significatives et les directions de la houle.

Note : *il n'a pas été retenu la moyenne des Hs en pied d'ouvrage mais la valeur maximale des Hs.*

2-9.3 Houle annuelle – Hs = 4,9 m – Tp = 8 s – 70°N – +1,2 m CM

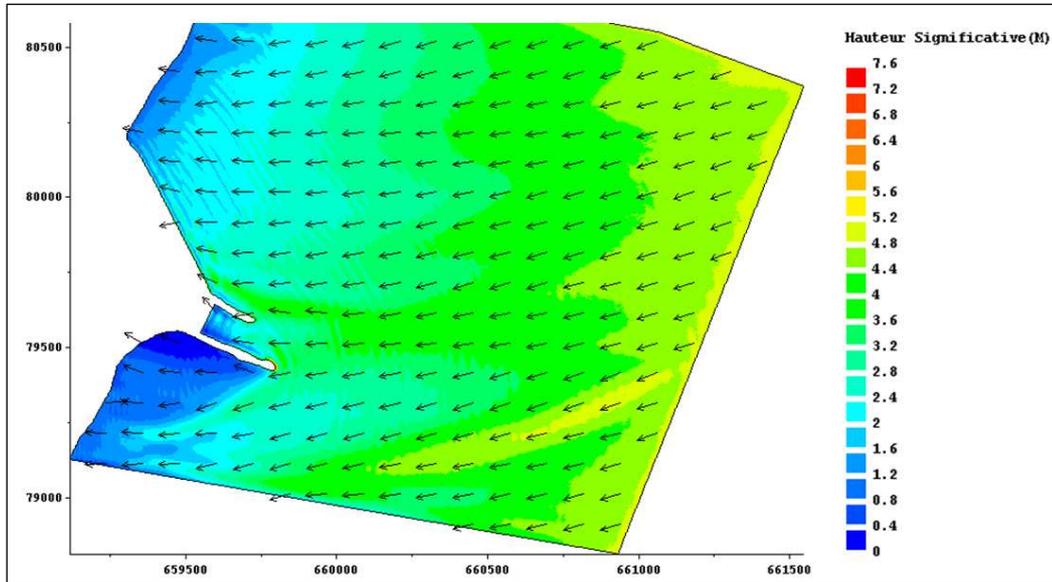


Figure 6 : Résultats de propagation de la houle annuelle 70°N

2-9.4 Houle décennale – Hs = 6,0 m – Tp = 10 s – 70°N – +1,4 m CM

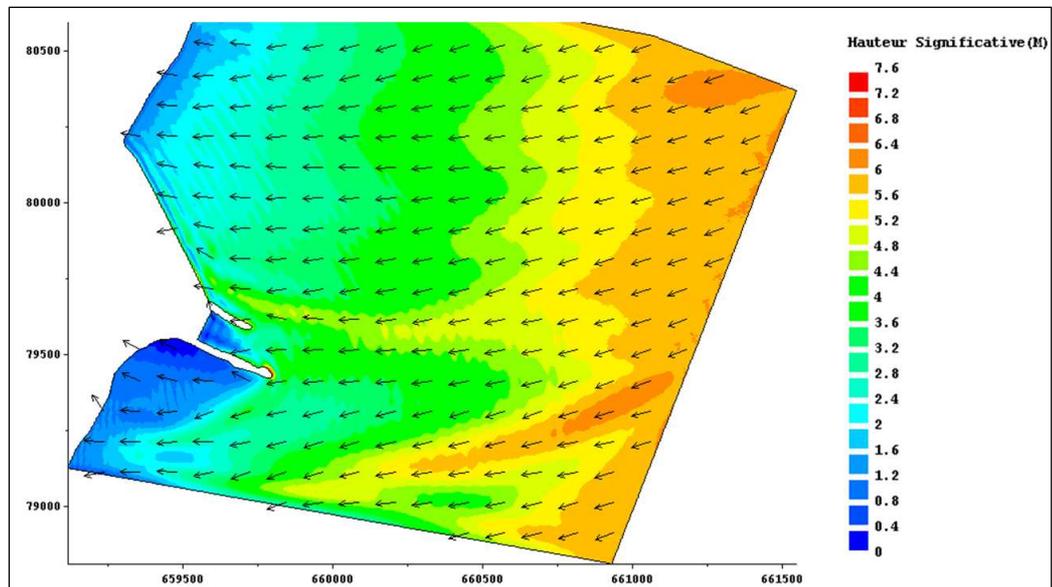
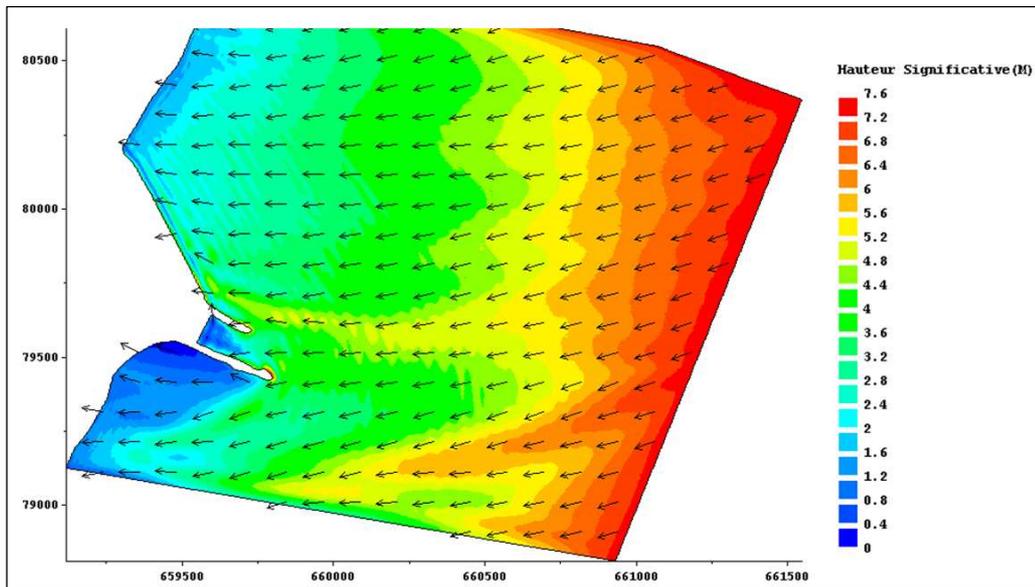


Figure 7 : Résultats de propagation de la houle décennale 70°N

2-9.5 Houle cinquantennale – $H_s = 7,4 \text{ m}$ – $T_p = 10 \text{ s}$ – 70°N – $+1,8 \text{ m CM}$ **Figure 8 : Résultats de propagation de la houle cinquantennale 70°N – 10s**

2-9.6 Houle cinquantennale – $H_s = 7,4 \text{ m}$ – $T_p = 12 \text{ s}$ – 70°N – $+1,8 \text{ m CM}$

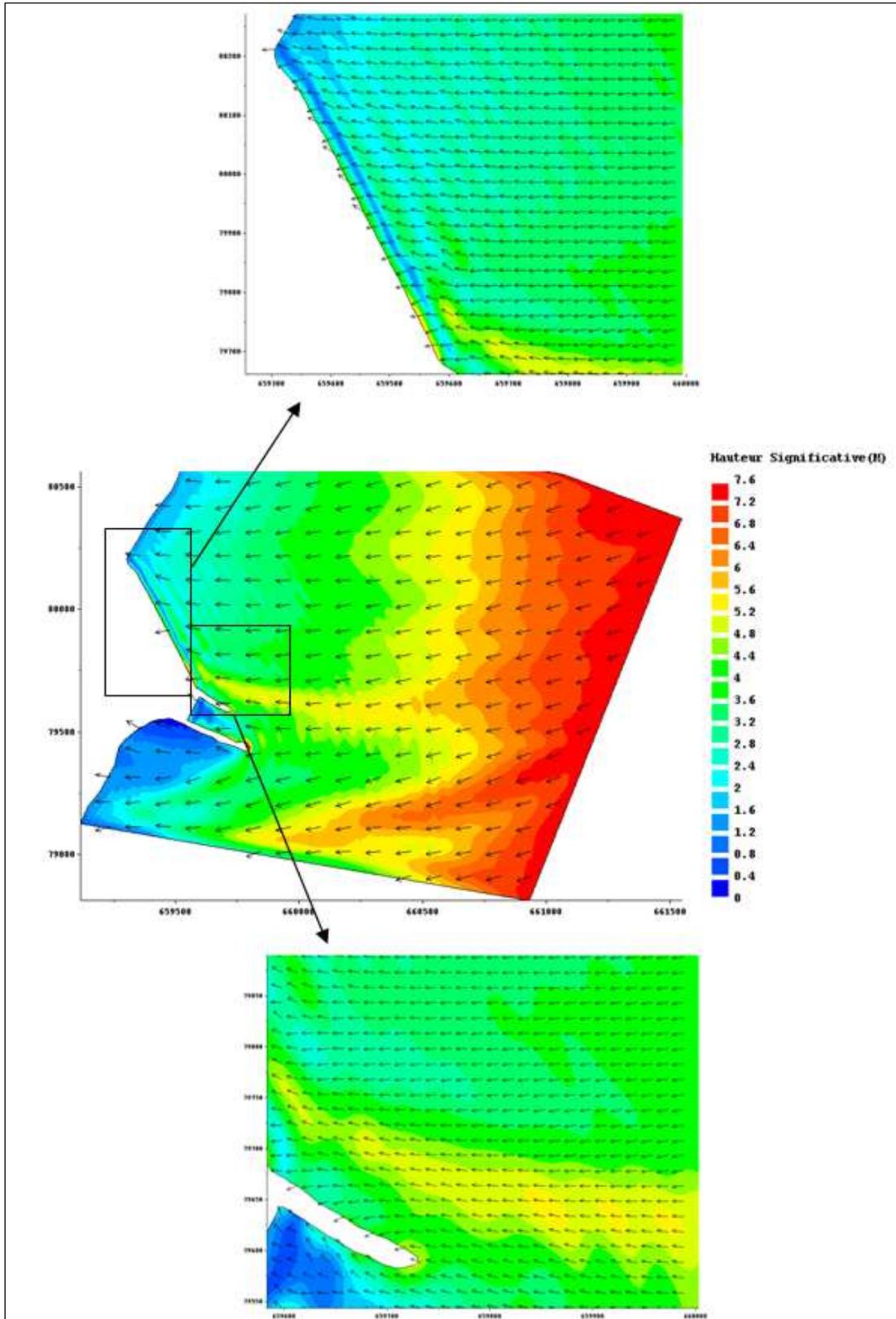


Figure 9 : Propagation de la houle cinquantennale 70°N – 12s

2-9.7 Etude de sensibilité

Une double étude de sensibilité a été menée :

- Sur la **période** : la houle cinquantennale a été modélisée pour une période de 10 s (cf. 2-9.5) et de 12 s (cf. 2-9.6). Les résultats (cf. tableau suivant) montrent que la houle de plus grande période reste dimensionnante :

Période de retour	N° Profil	Hs max (m)	Direction (°N)
50 ans (12s)	Profil I	4,95 m	70°N – 80°N
	Profil II	2,80 m	70°N – 80°N
	Profil III	2,20 m	70°N – 80°N
50 ans (10s)	Profil I	4,65 m	70°N – 80°N
	Profil II	2,45 m	70°N – 80°N
	Profil III	2,07 m	70°N – 80°N

Tableau 5 : Comparatif des périodes 10 s et 12 s – Houle cinquantennale

- Sur la **direction** : Afin de vérifier que les houles de projet sont effectivement les plus défavorables pour la Jetée Nord, une houle de direction 90°N a été modélisée. Cette houle est sensé perdre moins d'énergie puisque déjà orienté suivant les isobathes. Les caractéristiques de cette houle sont présentées dans le tableau suivant :

Période de retour	Hs	Tp	Incidence	Objectif	Surcote
50 ans	6,1 m	12 s	90°N	Stabilité	1,80 m CM

Tableau 6 : Caractéristiques de la houle de secteur 90°N

Le tableau suivant permet de comparer les hauteurs significatives en pied d'ouvrage pour une houle cinquantennale de direction 70°N et 90°N.

Période de retour et direction	N° profil	Hs max (m)	Direction (°N)
50 ans – 90°N	Profil I	5,0 m	80°N – 90°N
	Profil II	2,70 m	80°N – 90°N
	Profil III	2,10 m	80°N – 90°N
50 ans – 70°N	Profil I	4,95 m	70°N – 80°N
	Profil II	2,80 m	70°N – 80°N
	Profil III	2,20 m	70°N – 80°N

Tableau 7 : Comparatif des directions 70°N et 90°N

On constate que la houle de direction 90°N reste légèrement moins dimensionnante que la houle de direction 70°N : les hauteurs significatives sont légèrement inférieures et les directions de la houle incidente moins frontales à l'ouvrage. Notons néanmoins que la houle d'Est est moins atténuée.

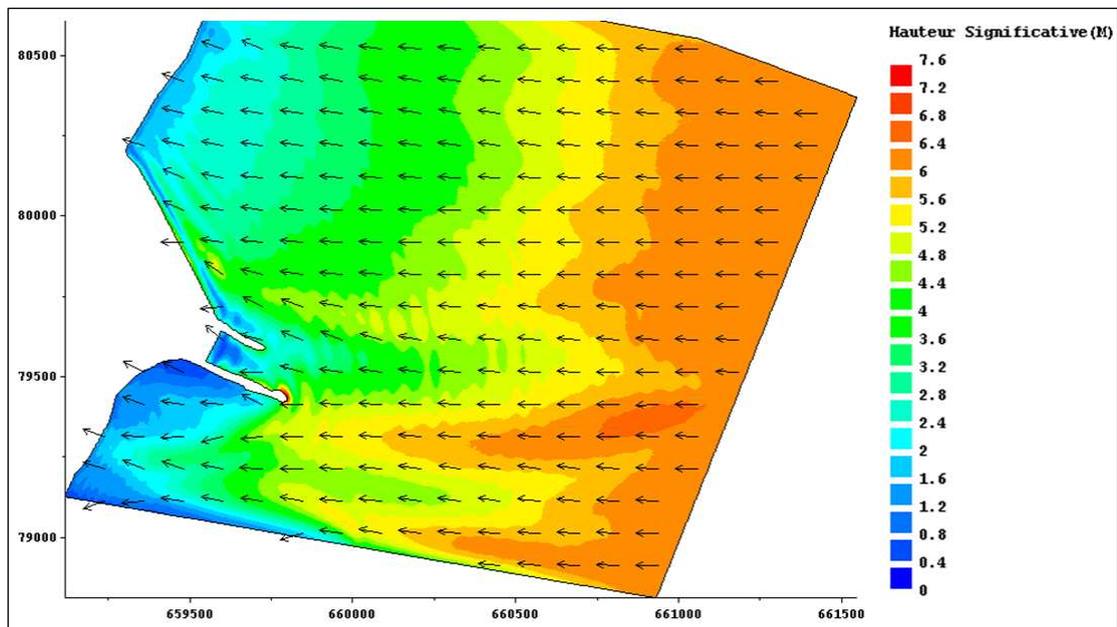


Figure 10 : Propagation de la houle cinquantennale 90°N – 12s

2-9.8 Valeurs des houles en pied d'ouvrage

Le tableau suivant présente les hauteurs significatives maximales incidentes au pied de chaque profil type de la Jetée Nord.

Période de retour	N° Profil	Hs max (m)	Direction (°N)
1 an	Profil I	3,80 m	70°N – 80°N
	Profil II	1,95 m	70°N – 80°N
	Profil III	1,65 m	70°N – 80°N
10 ans	Profil I	4,45 m	70°N – 80°N
	Profil II	2,45 m	70°N – 80°N
	Profil III	1,98 m	70°N – 80°N
50 ans (12s)	Profil I	4,95 m	70°N – 80°N
	Profil II	2,80 m	70°N – 80°N
	Profil III	2,20 m	70°N – 80°N

Tableau 8 : Propagation de la houle à la côte

Commentaires :

La houle de direction 70°N au niveau du sealine s'orient progressivement en fonction des isobathes lors de sa propagation vers la côte. Elle perd ainsi une bonne partie de son énergie. Néanmoins, cette direction est associée aux plus fortes hauteurs significatives au niveau du sealine et garde une incidence assez frontale à la section principale de la Jetée Nord. Le caractère dimensionnant de ce secteur angulaire apparaît donc justifié pour les profils type I, II et III.

La houle cinquantennale de période 12 s et de direction 70°N au niveau du sealine est dimensionnante. On rappelle que cette houle est associée à une surcote de +1,8 m CM qui permet de limiter le déferlement avant d'arriver sur l'ouvrage.

Le profil I est le plus sollicité. Une zone de forte concentration de houle est observée dans la partie Sud du tronçon I, dans le prolongement du tronçon II qui focalise la houle.

III-MODELE D'AGITATION AUX ABORDS DE PORT-LA-NOUVELLE

Un premier modèle d'agitation ("Etat zéro") est réalisé pour le port dans sa configuration actuelle. L'objectif est de calibrer la modélisation numérique (coefficients de réflexion, paramètres de calculs) en fonction des différentes mesures réalisées in situ, et ce afin de connaître les conditions d'agitation portuaire à Port-la-Nouvelle ainsi que les directions principales des houles.

Cet état zéro servira de référence à toutes les solutions d'aménagements étudiées par la suite afin d'établir une analyse comparative et critique de la modification des ouvrages portuaires.

Le recours à un modèle d'agitation se justifie de part la présence d'éléments réfléchissants aux limites du plan d'eau (digue, plage,...) et ainsi que l'existence de diffraction autour des ouvrages.

Les études sont réalisées avec le modèle ARTEMIS du système TELEMAC (Cf. Annexe 2).

3-1 Description du modèle d'agitation

Le logiciel ARTEMIS permet de calculer l'agitation proche de la côte ou à l'intérieur d'un port. Il résout, par la méthode des éléments finis, l'équation de Berkhoff ou « mild slope equation » avec prise en compte des termes de dissipation (déferlement et frottement sur le fond).

Les phénomènes physiques pris en compte sont les suivants : réfraction due à la bathymétrie, diffraction derrière un obstacle, réflexion partielle ou totale par un ouvrage, pertes d'énergie par déferlement et par frottement sur le fond.

Les données d'entrée peuvent être des houles régulières ou irrégulières (spectres de houle).

Les résultats principaux d'ARTEMIS sont, en chaque nœud du maillage de résolution, la hauteur et l'incidence de la houle.

3-2 Conditions aux limites

3-2.1 Données d'entrée

Les houles en entrée du modèle sont directement issues des résultats de l'étude de propagation : le modèle d'agitation est imbriqué au modèle de propagation de manière à n'avoir aucune discontinuité entre le large et l'intérieur du port.

3-2.2 Coefficients de réflexion

Pour les parois dites solides (quais, plages, ouvrages...), les coefficients de réflexion sont fonction de la nature des ouvrages existants et des cambrures des houles incidentes. La visite sur site et la connaissance des profils type des ouvrages en place permettent de préciser les coefficients implémentés dans la modélisation.

Remarque : les coefficients retenus ont été comparés à ceux utilisés dans l'Etude d'Aménagement sur Modèle Numérique du BCEOM (cf. [1]).

La figure de la page suivante illustre les coefficients de réflexion pris en compte pour l'étude numérique.

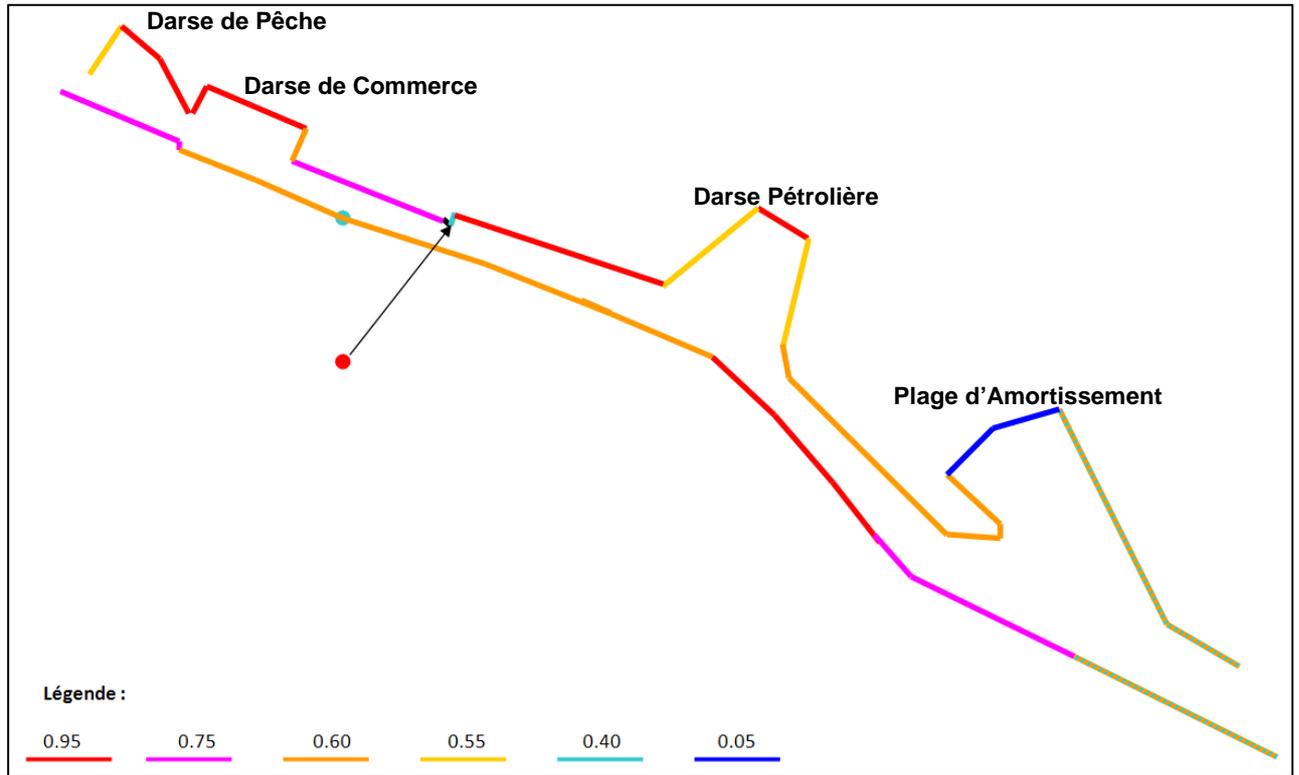


Figure 11 : Coefficients de réflexion utilisés

L'étude complète des coefficients de réflexion est présentée en annexe 9.

3-3 Emprise du modèle

Le modèle d'agitation englobe l'ensemble des ouvrages du port depuis le chenal d'accès jusqu'à l'ancien pertuis de communication avec les étangs.

La zone étudiée prend en compte le port et ses abords immédiats.

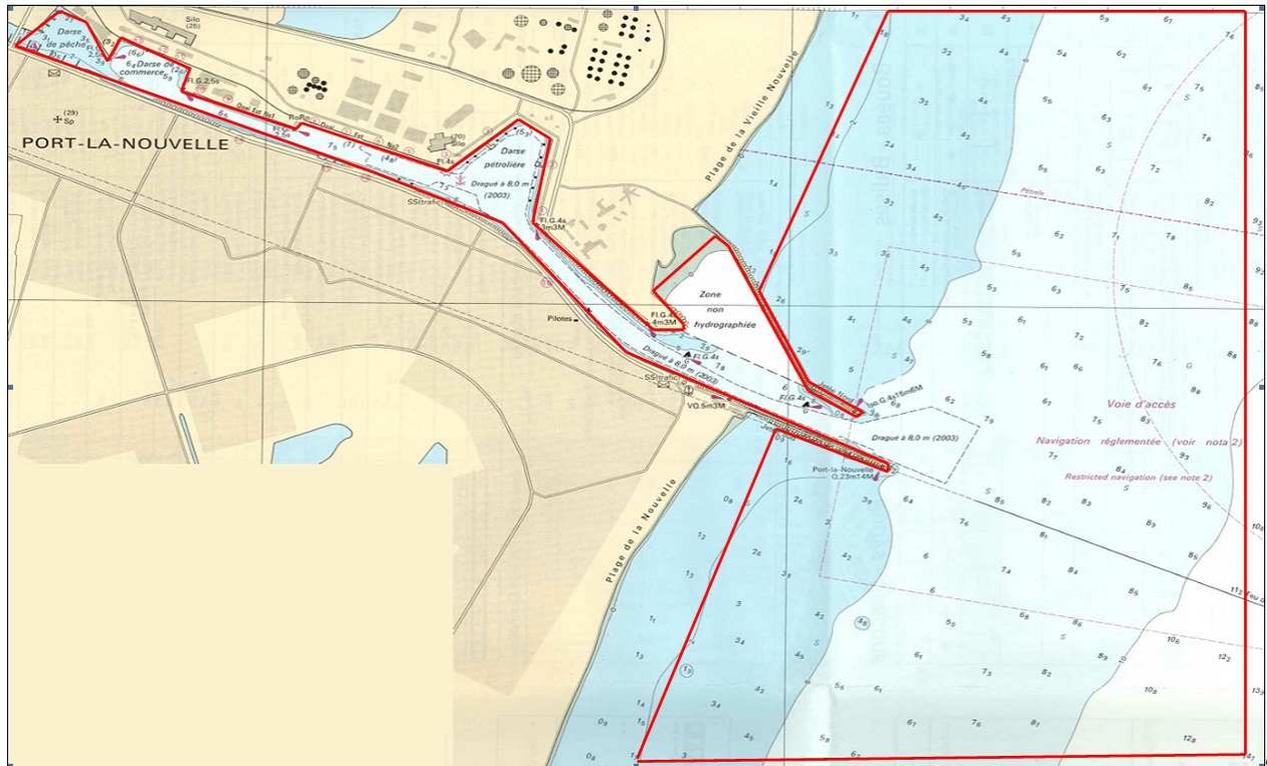


Figure 12 : Emprise globale du modèle d'agitation

3-4 Bathymétrie et maillage

La bathymétrie du port de Port-la-Nouvelle et de son chenal d'accès a été fournie par le Maître d'Ouvrage. La bathymétrie des abords du port a été complétée à partir de la carte SHOM 7091 S (1/25 000). La Note d'Hypothèses [2] précise les différents fichiers pris en compte.

Toutes les profondeurs sont rapportées au zéro C.M.

Une surcote du plan d'eau a été prise en compte, elle varie entre + 1,0 m pour les houles de période de retour inférieure à la houle annuelle et + 1,8 m pour les houles cinquantennales.

Le maillage du domaine est réalisé à l'aide du mailleur MATISSE, élément du système TELEMAC. Afin d'obtenir une bonne résolution, la taille des mailles, qui sont triangulaires, est choisie de manière à avoir un minimum de 7 points par longueur d'onde pour tous les cas de calcul. La taille des mailles a été calculée en fonction de la longueur d'onde locale de la houle pour la plus petite période à étudier.

La bathymétrie obtenue est présentée sur la figure 13. Comme pour l'étude de propagation, les profondeurs indiquées sur ces figures ne tiennent pas compte de la surcote, elles sont rapportées au zéro C.M.

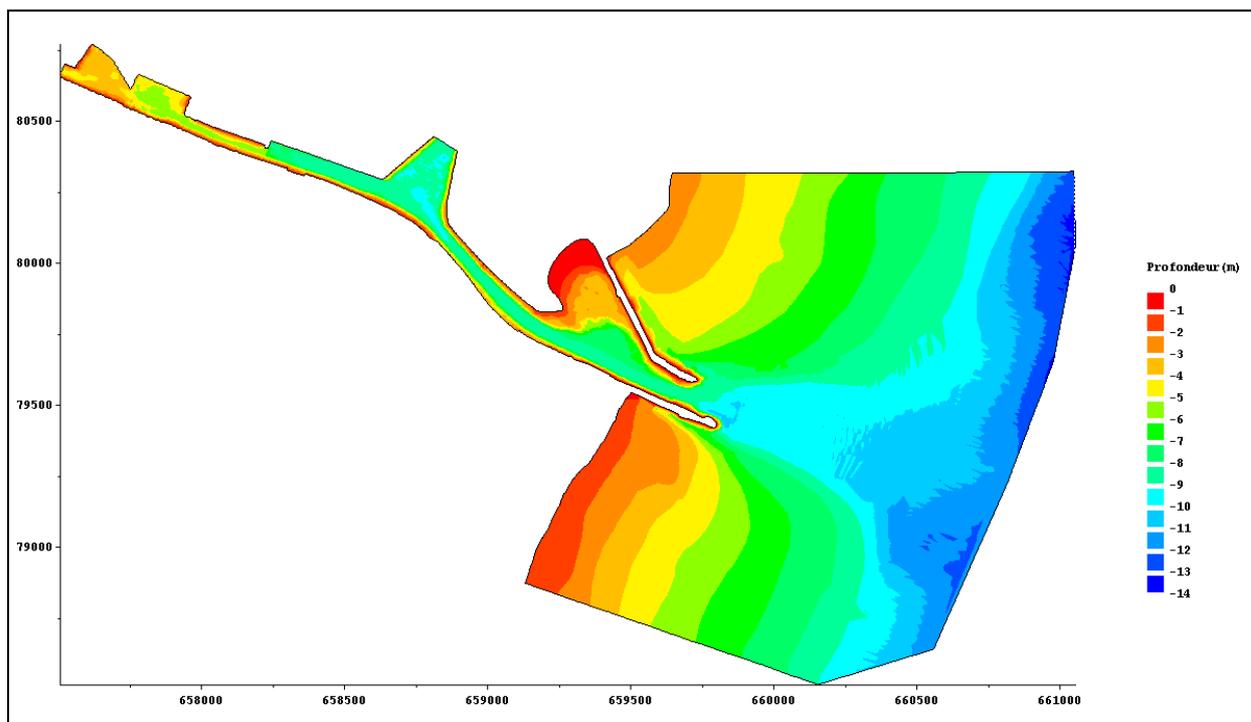


Figure 13 : Bathymétrie obtenue pour le modèle d'agitation

Remarque : Les relevés bathymétriques fournis par la cellule de sondage de Port-La-Nouvelle ont été préférés aux données des cartes SHOM. Des écarts significatifs (de l'ordre de 2 m) ont été notés par endroits.

3-5 Résultats de l'étude d'agitation

Des planches graphiques représentant les **hauteurs d'agitation** et les **directions** principales des houles pour l'ensemble du port et chacune des conditions aux limites sont présentées.

Les hauteurs d'agitation (H_s max, H_s min et H_s moyen) au niveau de chaque point de calage ou zone spécifique (exemples : Avant-port, Darse pétrolière) sont indiquées dans des tableaux.

Enfin, les hauteurs d'agitation le long de profils spécifiques sont présentées à l'aide de **graphiques bi-dimensionnels**.

La figure 14 suivante présente l'implantation des différents profils retenus.

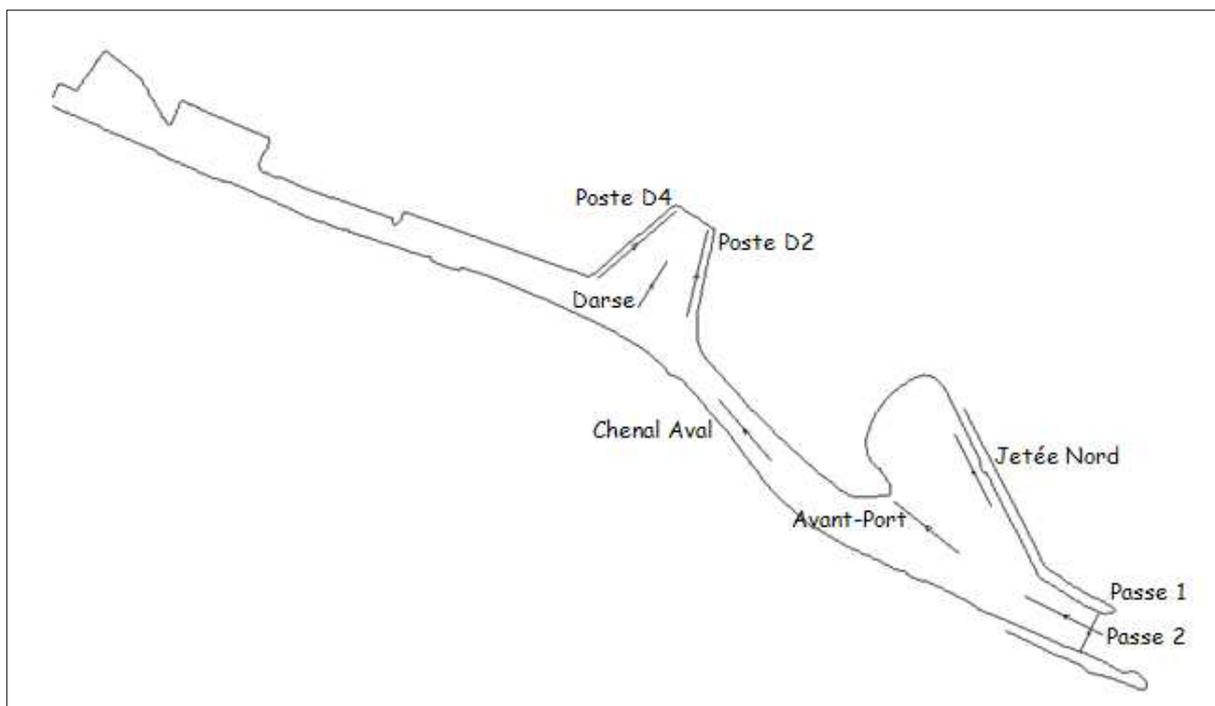


Figure 14 : Implantation des profils

3-5.1 Etudes de sensibilité sur la période et la direction

On rappelle qu'une double étude de sensibilité (sur la période et sur la direction) a été menée afin d'évaluer les houles les plus défavorables en terme d'agitation dans le port (cf. 2-8).

Influence de la période de la houle :

Une houle annuelle de H_s au large égale à 3,7 m, de direction $110^\circ N$ et de surcote +1,2 m CM a été modélisée. Des périodes de 6 s, 8 s et 10 s ont été successivement associées à cette houle. Les agitations résultantes de chacune de ces conditions sont présentées pour les différents profils dans le tableau suivant.

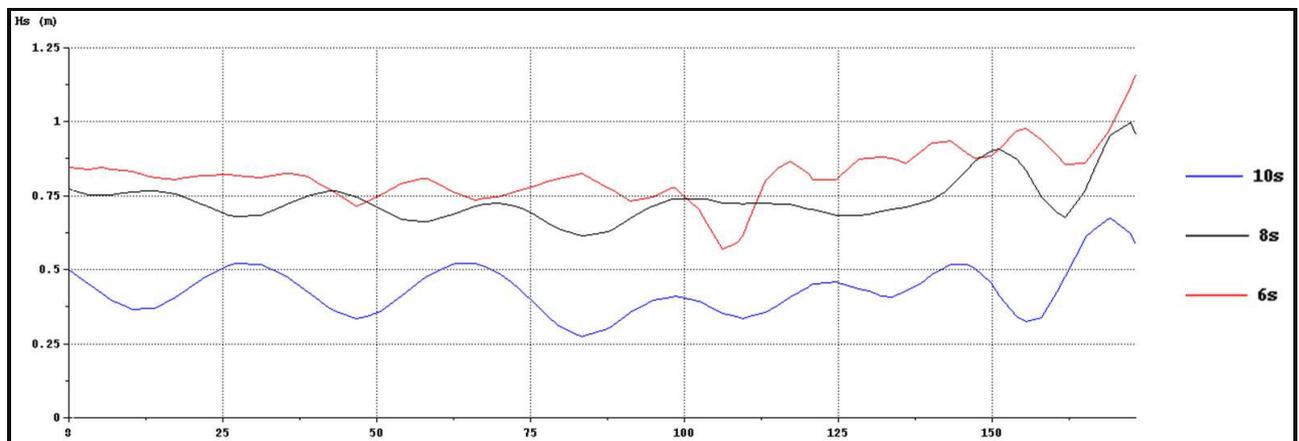
	Houle 1an 110° 6s			Houle 1an 110° 8s			Houle 1an 110° 10s		
	H_{max}	H_{min}	H_{moy}	H_{max}	H_{min}	H_{moy}	H_{max}	H_{min}	H_{moy}
Passe 1	3.05	0.28	1.80	4.04	0.53	1.80	4.10	0.97	1.80
Passe 2	2.75	1.08	1.71	2.45	1.10	1.55	1.68	0.86	1.07
Avant-Port	1.14	0.57	0.82	0.99	0.61	0.73	0.68	0.27	0.43
Jetée Nord	0.67	0.44	0.54	0.41	0.26	0.33	0.45	0.22	0.31
Chenal Aval	0.42	0.22	0.32	0.28	0.17	0.23	0.25	0.12	0.17
Darse	0.17	0.10	0.13	0.13	0.03	0.08	0.09	0.04	0.07
Poste D2	0.14	0.06	0.10	0.11	0.03	0.09	0.18	0.07	0.13
Poste D4	0.15	0.04	0.09	0.08	0.02	0.05	0.13	0.04	0.08

Tableau 9 : Moyennes et Extrema des H_s le long des profils, houle annuelle $110^\circ N$, 6s, 8s et 10s

Commentaires :

- Quelle que soit la période de houle, l'agitation dans la darse et au niveau des postes (D2 et D4) reste inférieure à 20cm.
- Les houles de longues périodes pic génèrent plus d'agitation au niveau de la passe d'entrée. En revanche, leur perte d'énergie est plus importante si bien que l'agitation à l'intérieur du port est légèrement plus significative pour les plus petites périodes.

Le graphique suivant illustre la plus forte agitation associée à la période de 6 s. A noter que cette agitation est de l'ordre de 80 cm et est due en partie à la réflexion du môle. En effet, elle n'est plus que de 50 cm au niveau de la Jetée Nord, dans une zone moins soumise aux réflexions.



Graph. 2 : Agitation au niveau de l'avant-port pour des périodes de 6 s, 8s et 10 s

Note :

L'étude des corrélogrammes hauteurs - périodes montre la possibilité pour les houles annuelles d'être associées à une période de 6s. Des calculs ont ainsi été menés sur la houle annuelle (110°N, 4,40m au large, Tp 6s).

Les résultats ont montré que pour cette condition hydraulique l'agitation est supérieure au niveau de la passe d'entrée du port (profil passe 2). En revanche, cette dernière "filtre" les plus fortes hauteurs de houle. L'agitation observée dans le port est alors comparable pour la houle annuelle de 6 s et 8s.

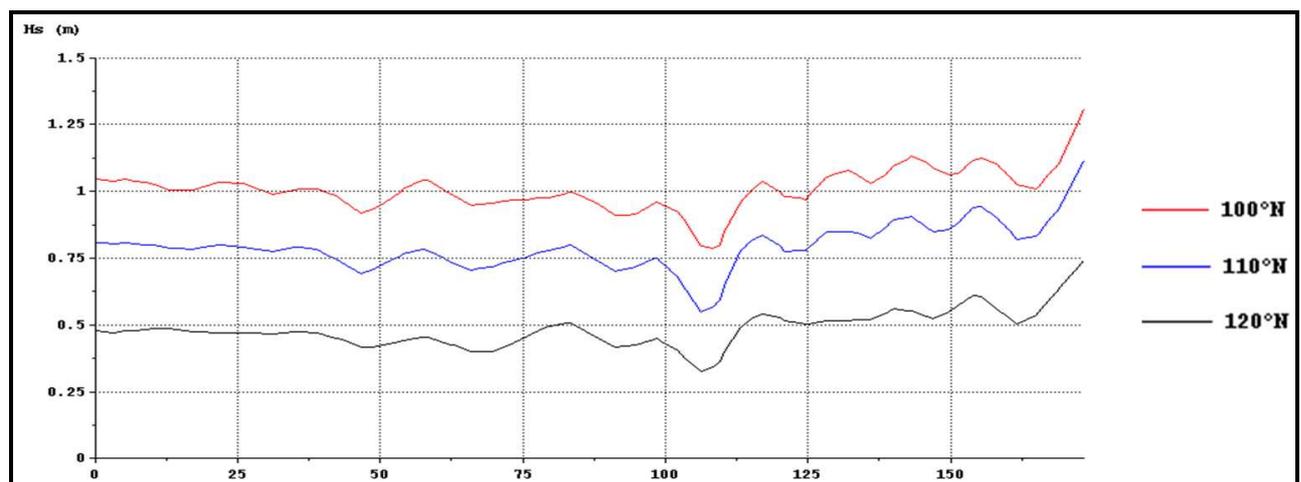
Influence de la direction de la houle :

Une houle de Hs au large égale à 3,0 m, de Tp = 6 s et de surcote +1,0 m CM a été modélisée. Des directions de 100°N, 110°N et 120°N ont été successivement associées à cette houle. Les agitations associées à chacune de ces conditions sont présentées pour les différents profils dans le tableau suivant.

	Houle 0.05% 100° 6s			Houle 0.05% 110° 6s			Houle 0.05% 120° 6s		
	Hmax	Hmin	Hmoy	Hmax	Hmin	Hmoy	Hmax	Hmin	Hmoy
Passe 1	3.07	0.50	2.10	2.94	0.27	1.70	2.35	0.28	1.12
Passe 2	3.05	1.37	1.93	2.59	1.03	1.61	1.65	0.63	0.99
Avant-Port	1.30	0.80	1.00	1.11	0.55	0.79	0.73	0.33	0.48
Jetée Nord	1.06	0.74	0.90	0.79	0.53	0.68	0.50	0.31	0.40
Chenal Aval	0.53	0.18	0.38	0.48	0.18	0.33	0.28	0.15	0.23
Darse	0.15	0.09	0.12	0.17	0.10	0.12	0.15	0.08	0.10
Poste D2	0.15	0.06	0.10	0.14	0.06	0.10	0.12	0.05	0.08
Poste D4	0.13	0.04	0.08	0.15	0.04	0.09	0.13	0.03	0.08

Tableau 10 : Moyennes et Extrema des Hs le long des profils, houle 0.05%, 100°N, 110°N et 120°N

Le graphique suivant illustre également la plus forte agitation associée à la direction de 100°N.



Graph. 3 : Agitation au niveau de l'avant-port pour des directions de 100°N, 110°N et 120°N

Commentaires :

- On constate que la houle qui génère le plus d'agitation dans le port (à hauteur égale au large) est la houle de direction 100°N. Ceci s'explique par l'orientation du chenal dragué d'accès au port qui favorise l'entrée des houles de ce secteur.
- L'agitation dans la darse pour ces conditions hydrauliques reste faible et inférieure à 20 cm.
- Une agitation voisine de 1 m est observée dans l'avant port.

La houle de direction **100°N** est donc prise en référence pour les calculs d'agitation de la configuration actuelle du port. Elle engendre en effet le plus d'agitation sur l'ensemble du plan d'eau. A noter que cette direction est par ailleurs associée à des plus fortes hauteurs significatives que les directions 110°N et 120°N.

D'autre part, et conséquemment aux études de sensibilité sur la période, les houles de plus petites périodes pics seront préférées aux plus grandes périodes.

Remarque : les sorties graphiques des cas présentés ci-avant figurent en annexe 8.

3-5.2 Résultats pour les houles de référence

Sont présentés dans ce paragraphe les agitations engendrées par les houles suivantes :

- La houle de limite d'opérabilité ($H_s = 2,0$ m à proximité du port) ;
- La houle intermédiaire entre la houle de limite d'opérabilité et la houle de période de retour 1 an (3,3 m à proximité du port) ;
- La houle annuelle (4,0 m à proximité du port).

Le tableau suivant présente les hauteurs significatives obtenues en différentes zones du port.

	Houle 0.9%(2m) 100° 6s			Houle 0.05% 100° 6s			Houle 1an 100° 8s		
	Hmax	Hmin	Hmoy	Hmax	Hmin	Hmoy	Hmax	Hmin	Hmoy
Passe 1	2.56	0.40	1.74	3.18	0.54	2.17	4.65	0.77	2.50
Passe 2	2.52	1.14	1.58	3.17	1.43	2.01	3.46	1.63	2.26
Avant-Port	1.12	0.69	0.89	1.30	0.82	1.03	1.30	0.85	0.99
Jetée Nord	0.72	0.47	0.56	0.83	0.55	0.66	0.52	0.31	0.40
Chenal Aval	0.44	0.20	0.30	0.47	0.24	0.33	0.37	0.21	0.30
Darse	0.15	0.09	0.11	0.16	0.09	0.12	0.14	0.04	0.09
Poste D2	0.14	0.05	0.10	0.15	0.06	0.10	0.13	0.03	0.09
Poste D4	0.13	0.04	0.08	0.14	0.04	0.08	0.10	0.03	0.06

Tableau 11 : Moyennes et Extrema des Hs le long des profils, houle 0,9%, 0,05% et 1an

Les pages suivantes présentent les sorties graphiques associées à ces différentes conditions hydrauliques.

Houle annuelle – Hs au large = 4,4 m – Tp = 8s – 100N – 1,20 mCM

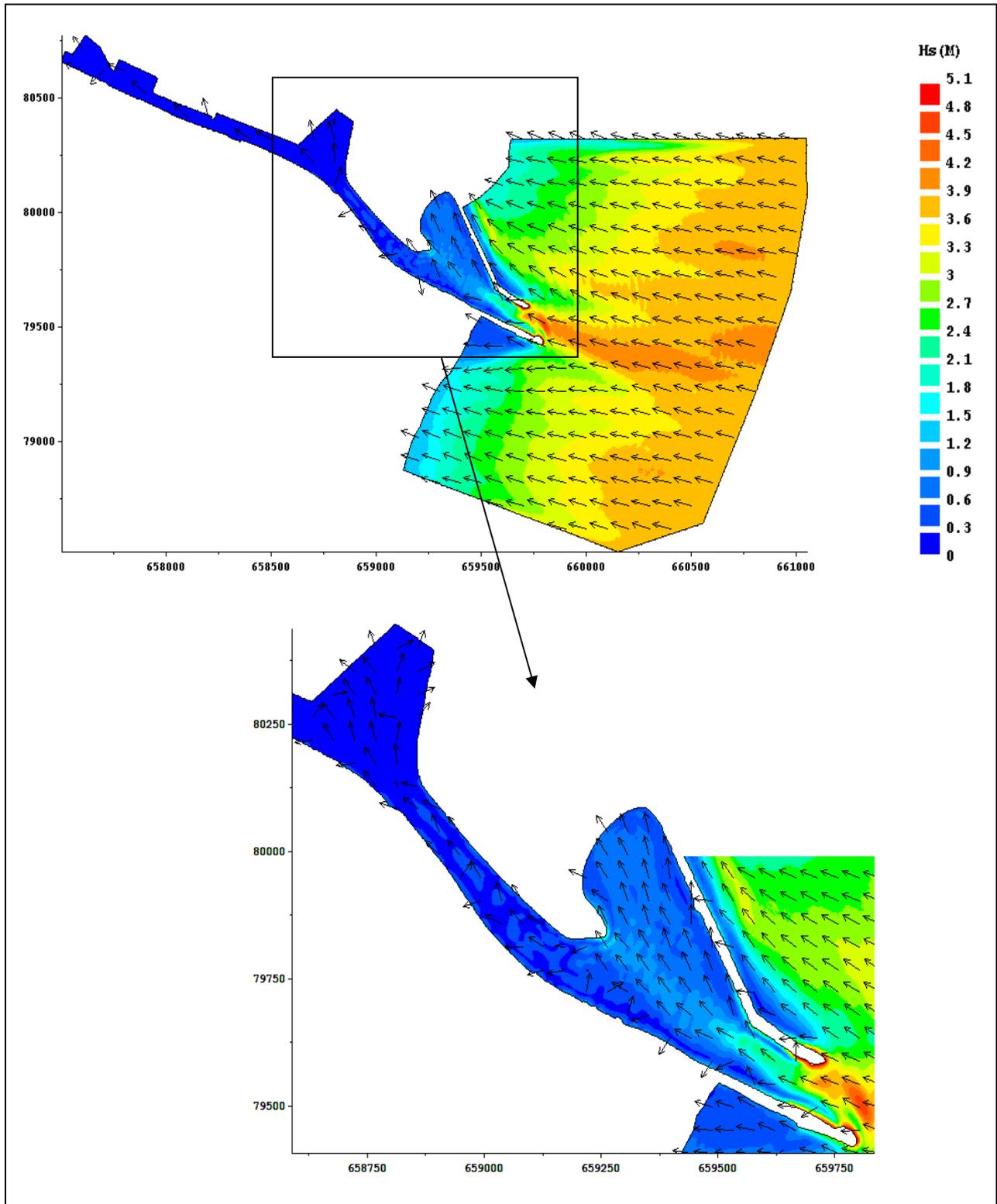


Figure 15 : Agitation associée à la houle annuelle

Houle 0,9% – Hs au large = 2,2 m – Tp = 6s – 100N – 1,00 mCM

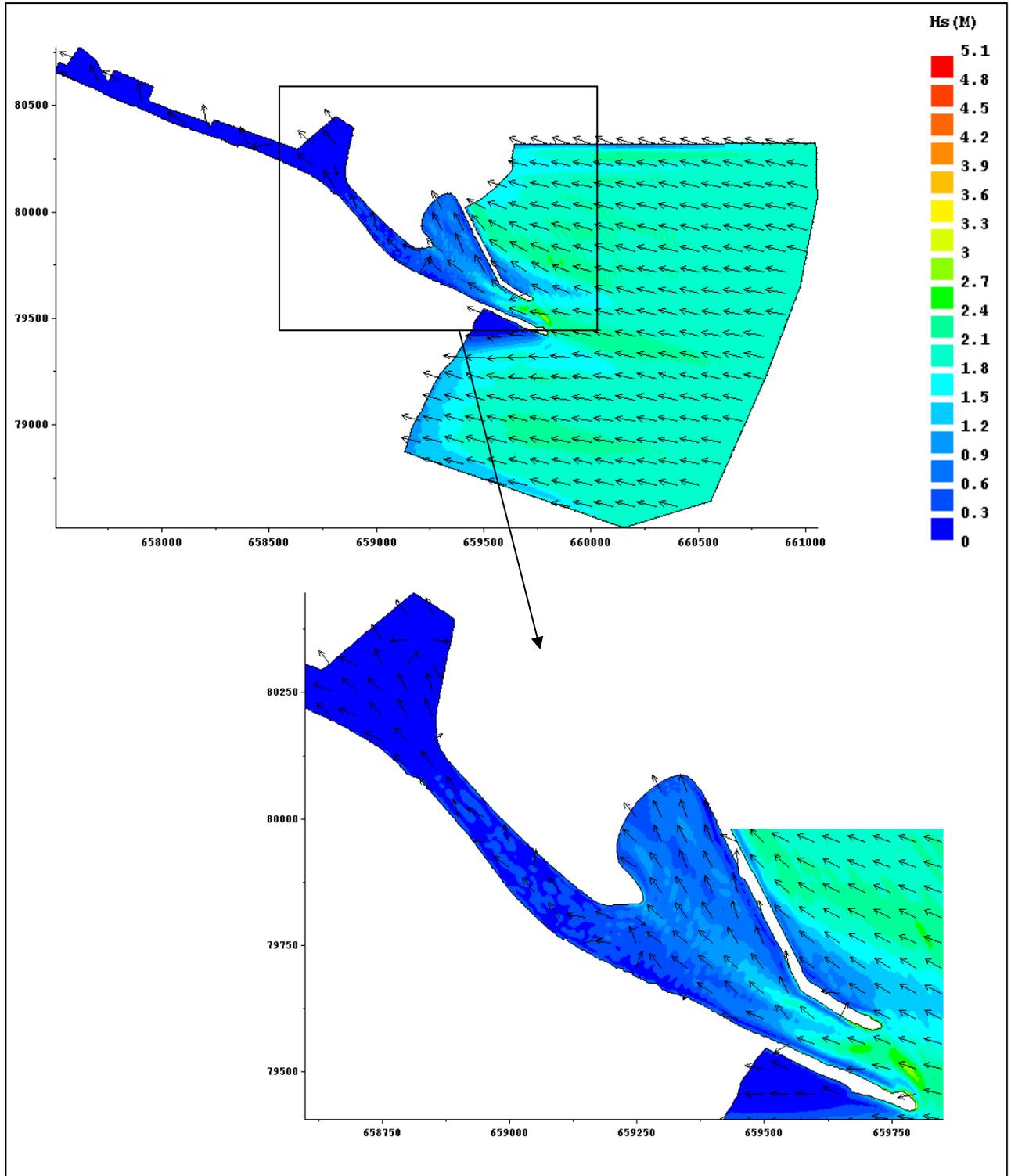


Figure 16 : Agitation associée à la houle 0,9%

Houle 0,05% – Hs au large = 3,6 m – Tp = 6s – 100N – 1,00 mCM

Les sorties graphiques relatives à cette houle sont en annexe 8.

3-6 Commentaires

3-6.1 Comparaison avec les données bibliographiques

Pour plus de précisions sur ces données bibliographiques le lecteur devra prendre connaissance du rapport sur l'étude bibliographique [1].

Durant une campagne de mesures de novembre 2004 à mars 2005, **IXSurvey** a enregistré les oscillations du plan d'eau en divers points à l'intérieur du port. Les principales remarques sont :

- L'amplitude maximale mesurée dans la darse pétrolière est de 37,6 cm. A noter qu'une valeur de $H_{max} = 30$ cm (H_s max = 16 cm) est retrouvée par les présents calculs (qui ne tiennent pas compte du vent) ;
- L'agitation est plus forte pour des houles d'incidences $120^\circ N$ que pour $90^\circ N$. La houle de $90^\circ N$ a été modélisée pour le prédimensionnement des ouvrages de la Jetée Nord. Son orientation fait qu'elle rentre moins dans le port qu'une houle plus directe. En revanche, les modélisations réalisées montrent qu'à hauteur égale au large la houle de $100^\circ N$ rentre plus dans le port que la houle de $120^\circ N$. L'influence du chenal d'accès est prépondérante sur ce résultat.
- La hauteur significative maximale mesurée devant la plage d'amortissement a été de 49,2cm. A noter que les modélisations ne présentent pas de profil devant la plage. Le profil s'en rapprochant (profil Jetée Nord, plus agité à cause de la réflexion de l'ouvrage) indique une hauteur significative moyenne de 56 cm et une hauteur significative maximale de 80 cm).

Les valeurs obtenues par le **BCEOM**, après calage des modèles, pour une houle de $H_s=4,0$ m, $T_p=8$ s et de directions $105^\circ N$ et $125^\circ N$ sont synthétisées dans le tableau suivant.

Zone	$H_s=4,0m - T_p=8s - 105^\circ N$	$H_s=4,0m - T_p=8s - 125^\circ N$
Avant-Port / Plage amortissante	0,2 – 0,6 m	0,2 – 0,6 m
Chenal	0,1 – 0,8 m	0,1 – 0,6 m
Darse pétrolière	0 – 0,2 m	0 – 0,2 m

Tableau 12 : Hauteurs d'agitation – Etat actuel BCEOM

On note que ces valeurs sont du même ordre de grandeur que les résultats présentés dans ce rapport :

- L'agitation dans la darse pétrolière est faible ($H_s < 20$ cm) ;
- La houle de direction $105^\circ N$ engendre plus d'agitation (dans le chenal pour l'étude BCEOM, dans l'avant port pour l'étude Océanide).

A noter que les valeurs dans l'avant-port sont disparates suivant les zones concernées (proximité du môle, de la plage amortissante, de la Jetée Nord, proximité de la passe d'entrée). Des valeurs comprises entre 0,2 et 0,6 m sont ainsi retrouvées mais elles peuvent être localement proches de 1m.

Dans le chenal aval des hauteurs plus faibles (comprises entre 0,2 et 0,5 m) sont retrouvées par les calculs Océanide.

Enfin, concernant la passe d'entrée, aucune valeur n'est précisée dans les études antérieures. Selon les observations (Pilotes, Services du Port), de fortes houles peuvent être observées au niveau de la passe mais l'agitation décroît rapidement dès que l'on arrive dans l'avant port.

3-6.2 Synthèse

Dans la configuration actuelle du port on constate que la passe orientée face à la houle engendre de très fortes agitations à l'entrée du port. Cette agitation décroît rapidement en direction du chenal aval et de la plage amortissante.

Dans l'avant-port la plus forte agitation est observée au droit du môle en raison de son pouvoir réflecteur. Les fortes valeurs retrouvées corroborent le fait qu'à l'heure actuelle l'avant port ne soit pas exploité.

Les agitations dans la darse pétrolière, associées à une seule condition de houle au large, sont très faibles. A noter que dans la réalité les agitations dans cette zone du port sont également dues au vent (mais dont les effets ne seront pas impactés par les futurs aménagements).

Le tableau suivant présente les hauteurs de référence qui peuvent être retenues pour la suite de l'étude.

Conditions hydrauliques : $H_s=2,0m$; $100^\circ N$; $T_p=6s$; $+1,0m$ CM		
Critère	Etat actuel	Projet
Agitation dans la darse pétrolière (cm)	20	0 - 30
Agitation dans les bassins (cm)	-	0 - 50
Agitation dans le chenal (cm)	20 - 50	0 - 50
Agitation dans l'avant-port (cm)	60 - 100	30 - 60
Agitation dans la passe d'entrée (cm)	50 - 180	50 - 100

Tableau 13 : Critères d'agitation dans les zones spécifiques du port

IV- MODELISATION DE LA COURANTOLOGIE

Afin de connaître les conditions courantologiques du site, une étude à partir de 2 modèles numériques (un global et un local) est réalisée. Ces modèles permettent d'avoir les courants généraux sur l'ensemble de la zone étudiée et les courants locaux à l'intérieur du port de Port-la-Nouvelle.

Cette étude de courantologie est réalisée avec le modèle TELEMAC2D du système TELEMAC (Cf. Annexe 3).

D'après la synthèse bibliographique, la courantologie générale du site est faible que ce soit pour les courants globaux méditerranéens, les courants de marée ou les courants dus au vent seul. En revanche, le courant généré par les vagues peut être important.

Les courants locaux les plus forts sont observés dans le grau, ils sont dirigés suivant son axe.

4-1 Description du modèle de courantologie

Le logiciel TELEMAC 2D (cf. annexe 3) permet de modéliser les courants de marée, de vent et/ou de houle, les écoulements d'un chenal, la vidange ou le remplissage de l'étang.

Il résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions d'espaces horizontales et il est intégré à la bibliothèque des codes numériques d'hydraulique à surface libre du système TELEMAC du Laboratoire National d'Hydraulique.

Les phénomènes physiques pris en compte sont : la propagation des ondes longues, les frottements sur le fond, l'influence des phénomènes météorologiques, les écoulements torrentiels et fluviaux, les bancs découvrants, les zones de seiche et la prise en compte des courants de houle et/ou de vent.

Les résultats principaux de TELEMAC2D sont, en chaque nœud du maillage de résolution, la vitesse et la direction du courant général.

Note : *Le logiciel est à 2 dimensions, les courants sur la tranche d'eau sont considérés uniformes. Il n'y a donc pas de distinction entre les courants de surface, les courants de retour et les courants de fond. Les résultats obtenus sont qualitatifs.*

4-2 Etude du courant traversier

4-2.1 Conditions aux limites

Pour les courants à proximité du port, il a été modélisé les 2 courants principaux suivants, défavorables pour la navigation :

- Courant 1 : 190°N (direction vers laquelle va le courant), 0,7 m/s ;
- Courant 2 : 10°N, 0,7 m/s.

Note : en l'absence de données, ces courants traversiers n'ont ni été modélisés en présence de vent ni en présence d'échange avec l'étang.

4-2.2 Emprise du modèle et maillage

Le premier modèle **global** a une emprise similaire à celle du modèle de sédimentologie (cf. parties 5.2 et 5.3) afin d'évaluer les courants globaux et les courants locaux à proximité du port de Port-la-Nouvelle.

Des mailles de 10 m ont été réalisées. Le modèle comporte ainsi plus de 30 000 nœuds. La bathymétrie et l'emprise du modèle sont présentées sur la figure suivante.

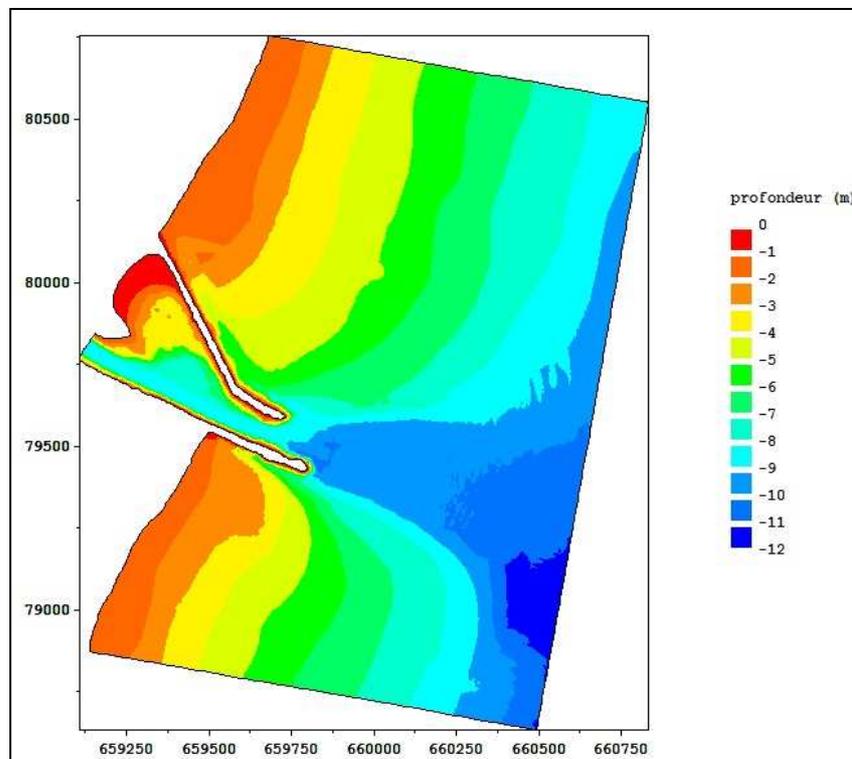


Figure 17 : Bathymétrie et emprise du modèle global de courantologie

4-2.3 Résultats

Sont présentés pour les deux conditions de courant :

- Le champ de courant (vitesses et directions) après 1 h (représentatif de l'établissement du courant sur la zone) ;
- Le champ de courant après 6 h (état stationnaire).

Rappel : les courants présentés sont des courants moyens sur l'ensemble de la tranche d'eau.

Courant 0,7 m/s – 190°N

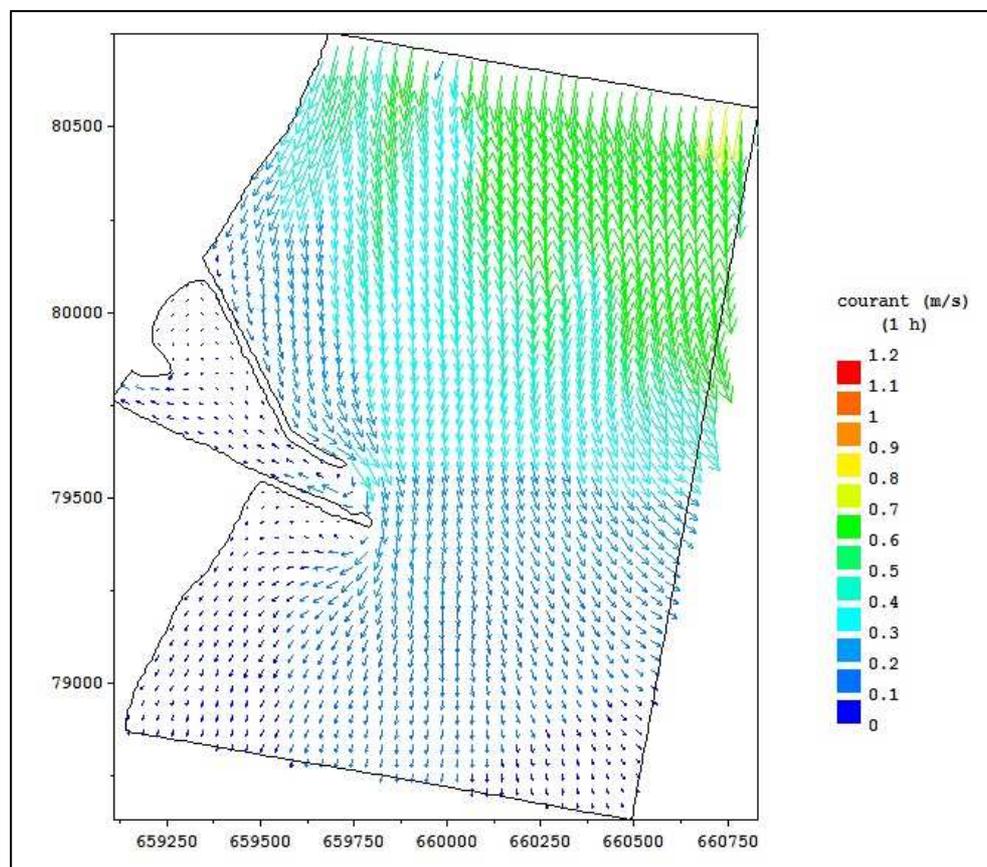


Figure 18 : Courant 0,7 m/s – 190°N – 1h

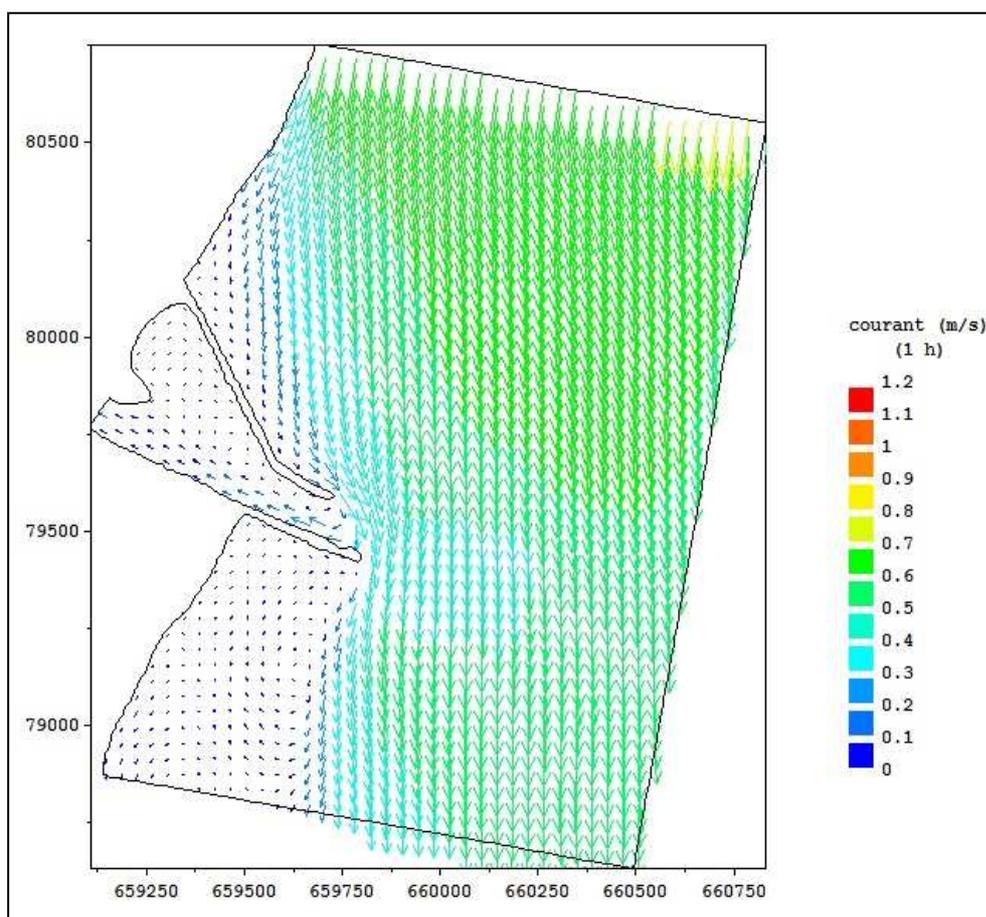


Figure 19 : Courant 0,7 m/s – 190°N – 6h

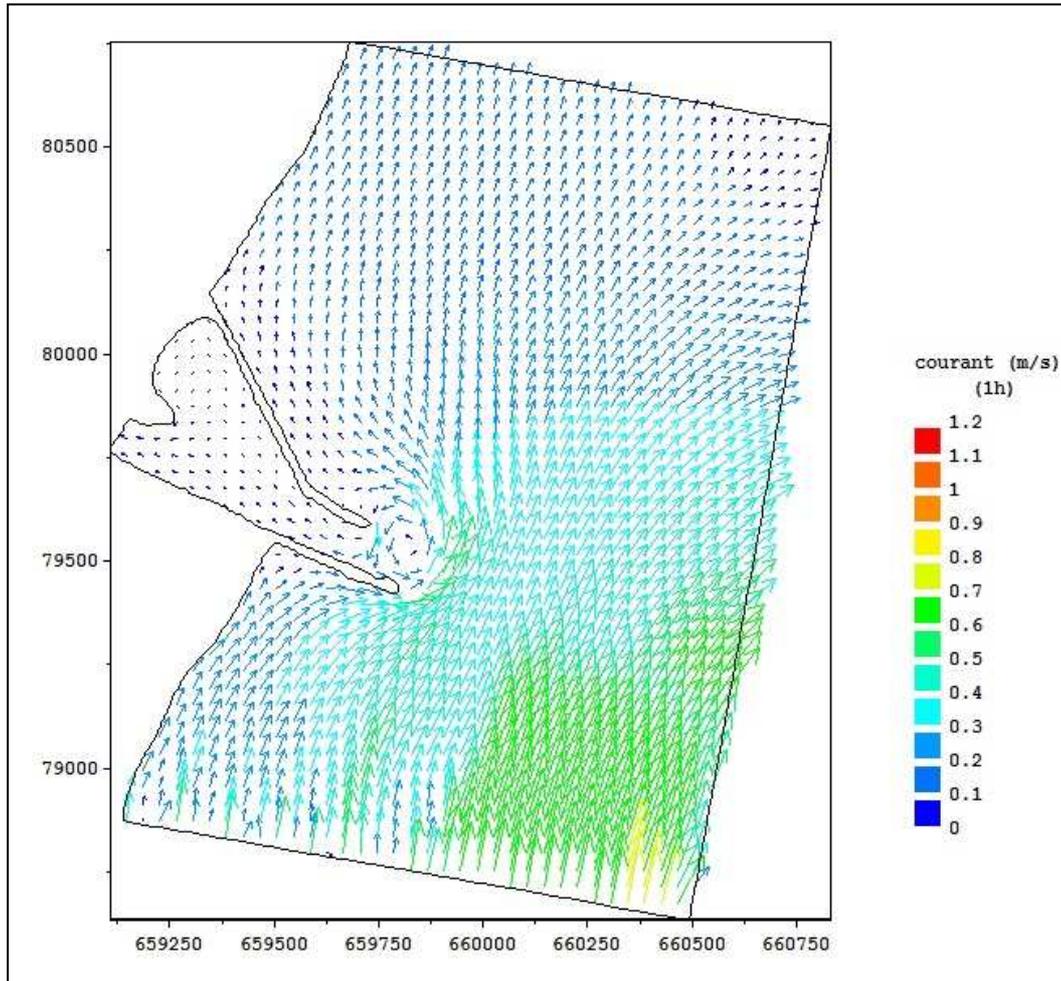
Commentaires :

Lors de son établissement (état transitoire) le courant allant dans la direction 190°N (au Nord du sealine) s'oriente vers le Sud à proximité du port et se dirigeant vers le Sud Est à proximité de son entrée. Son intensité y est d'environ 0,3 m/s. Au niveau de la passe d'entrée, un courant de 0,1 à 0,2 m/s entrant dans le port est observé.

Une fois établi (état stationnaire), le courant allant dans la direction 190°N (au Nord du sealine) se retrouve rapidement orienté du Nord vers le Sud. A noter qu'est retrouvée ici la direction principale du courant relevée par IXSurvey lors de ses différentes campagnes. La géométrie du port associée à la bathymétrie explique cette prise de direction.

A proximité du port, le courant est également orienté du Nord vers le Sud. Son intensité est de l'ordre de 0,6 m/s. A l'approche de l'entrée, sa direction devient Sud-Est. Il est alors associé à des vitesses de l'ordre de 0,4 m/s. Dans la passe d'entrée, le courant demeure entrant avec des vitesses beaucoup plus faibles (comprises entre 0,1 et 0,2 m/s).

On observe également qu'une fois établi le courant longe la Jetée Nord et recircule avec de faibles vitesses au Sud de la Jetée Sud.

Courant 0,7 m/s – 10°N**Figure 20 : Courant 0,7 m/s – 10°N – 1h**

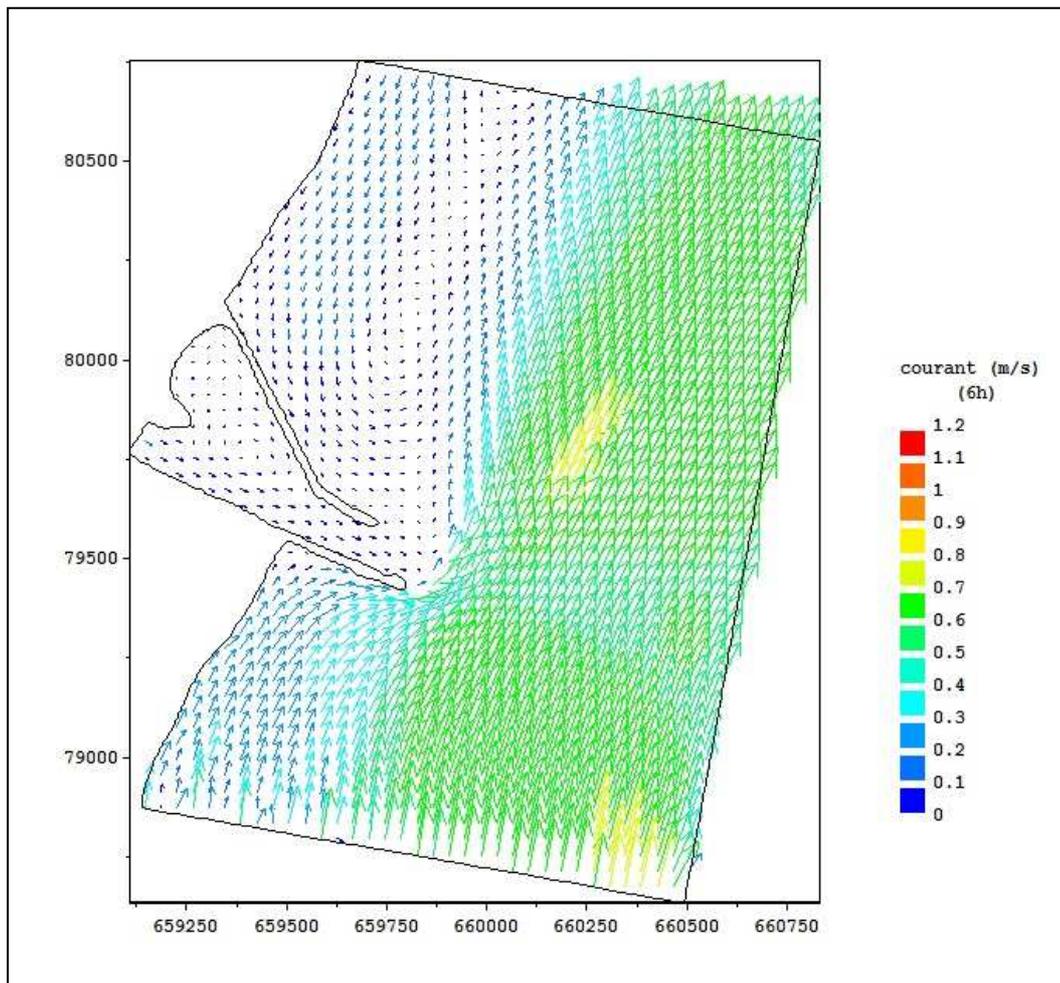


Figure 21 : Courant 0,7 m/s – 10°N – 6h

Commentaires :

Lors de son établissement (état transitoire) le courant reste constant en direction (10°N au Sud du port). Ce courant est homogène à l'approche du port. Des vitesses un peu plus importantes sont observées à proximité de la Jetée Sud (+15 %). Au Nord de l'extrémité de la Jetée Sud est observé un courant de recirculation avec des vitesses allant jusqu'à 0,3-0,4 m/s. Dans la passe, un courant entrant compris entre 0,1-0,2 m/s est observé.

Une fois établi (état stationnaire), le courant principal reste orienté dans la direction 10°N. L'effet de la Jetée Sud conduit à avoir des sur-accélération locales et un courant longeant par le Sud cet ouvrage. Néanmoins, à l'approche du port le courant reste de direction 10°N avec des vitesses de l'ordre de 0,6 m/s.

Dans la passe d'entrée, le courant est désormais sortant avec des vitesses faibles, de l'ordre de 0,1 m/s.

On observe également qu'une fois établi le courant de Sud entraîne un courant de recirculation le long de la Jetée Nord.

Ces courants traversiers génèrent des difficultés de navigation au niveau de la passe lors de l'entrée dans le port, et sont repris dans l'étude de navigabilité (cf. paragraphe VI).

4-3 Etude du courant dans le grau

4-3.1 Echanges mer/étang

Afin d'étudier les courants extrêmes dans le port, les conditions suivantes ont été modélisées (cf. tableau 14). Elles permettent d'évaluer l'influence des échanges entre le port et l'étang de Bages-Sigean sur la courantologie locale dans le port.

Unité : cm/s	ENTRANT	SORTANT
Max	70	120
Moyenne	10	15

Tableau 14 : Courants de projet à l'entrée du grau

Remarque : il n'a pas été imposé de vent. Ce dernier peut générer un courant de surface nettement supérieur à celui modélisé.

4-3.2 Emprise du modèle et maillage

Ce modèle **local** représente l'ensemble du port depuis les abords de la passe d'entrée jusqu'à l'étang de Bages-Sigean. Son emprise, son maillage et sa bathymétrie sont similaires à celles des modèles d'agitation (cf. figure 22).

Afin de bien prendre en compte les faibles vitesses de courant, des mailles de 5 m ont été modélisées.

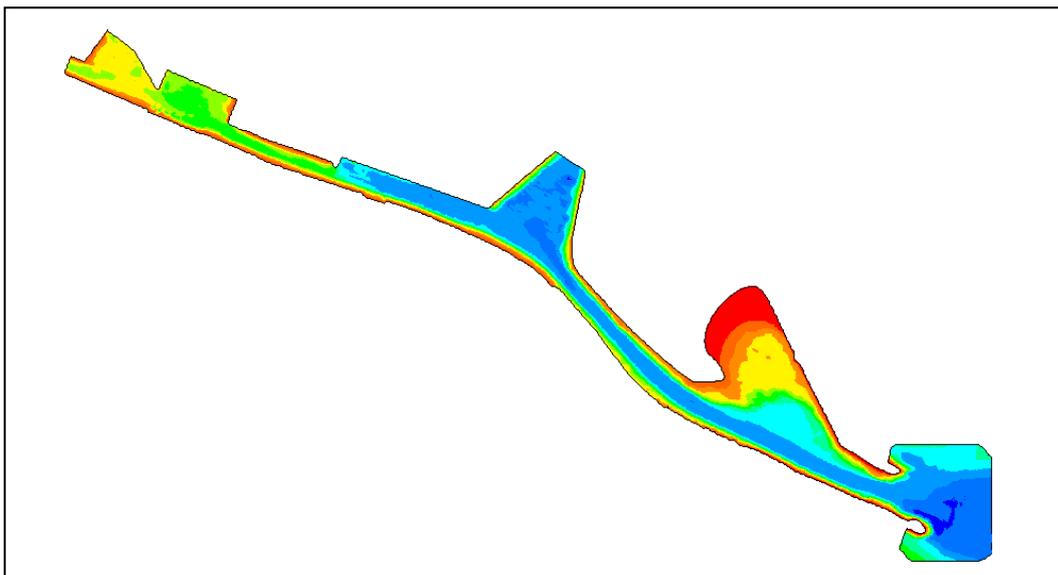


Figure 22 : Emprise du modèle local de courantologie

4-3.3 Résultats

Son présentés pour les quatre conditions de courant :

- Le champ de courant (vitesses et directions) sur l'ensemble de la zone après 1 h ;
- Le champ de courant après un temps plus significatif (6h à 24 h) ;

Remarque : un traceur a été également modélisé. Il permet d'avoir un aperçu du renouvellement des eaux et de la circulation générale dans le port pour les conditions modélisées.

Courant sortant de l'étang – 1,2 m/s

Il s'agit là de la modélisation du courant maximum mesuré à l'entrée du grau et provenant de l'étang (période de crue).

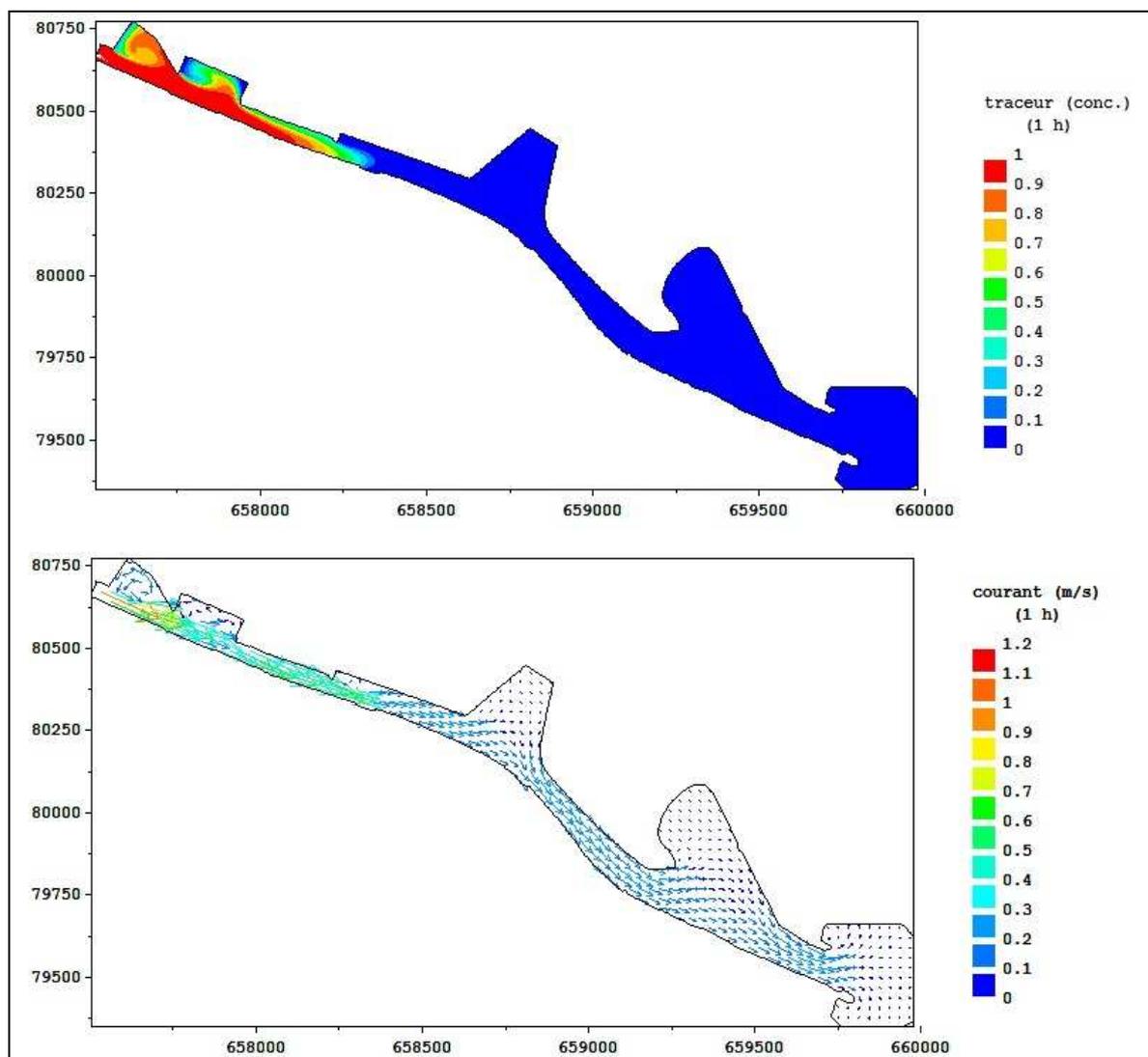


Figure 23 : Courant sortant de l'étang de 1,2 m/s – 1h

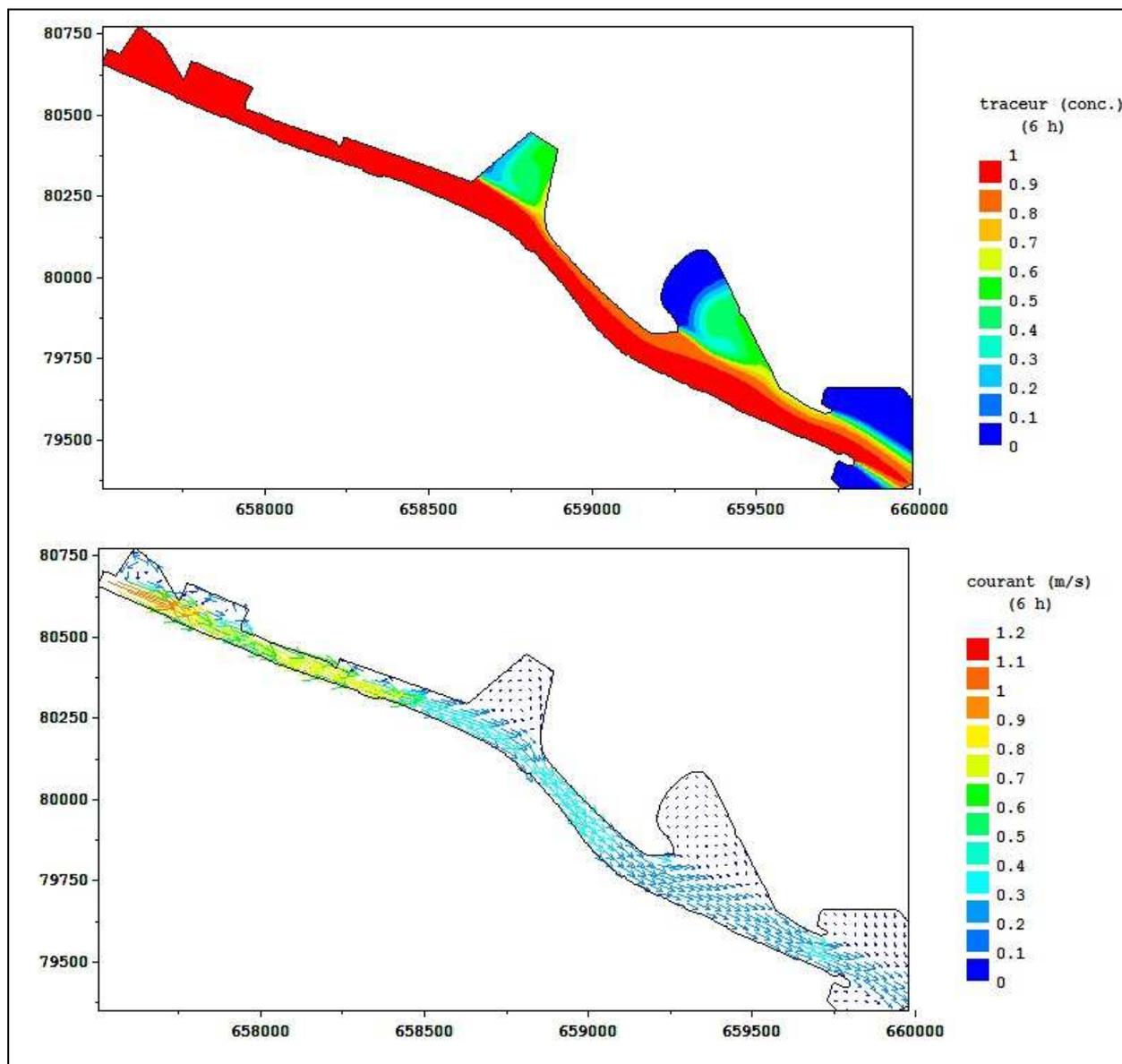


Figure 24 : Courant sortant de l'étang de 1,2 m/s – 6h

On constate qu'après 1 h, le renouvellement est presque total jusqu'au quai Est 1. Pour un courant d'entrée de grade de 1,2 m/s, des vitesses de 0,5 m/s (quai Est 1), 0,3 m/s (chenal aval) et 0,2 m/s (passe d'entrée) sont observées (au bout d'une heure également). Le courant suit le chenal principal et engendre des faibles recirculations au niveau de la darse pétrolière et de l'avant-port.

Après 6 h, le renouvellement des eaux est significatif : seule la zone à proximité de la plage d'amortissement est faiblement renouvelée.

Le courant établi est légèrement supérieur à celui observé au bout d'1 h : des vitesses de 0,8 m/s (quai Est 1), 0,4 m/s (chenal aval) et 0,3 m/s (passe d'entrée) sont observées. Le courant suit le chenal principal et engendre des faibles recirculations au niveau de la darse pétrolière et de l'avant-port.

Courant sortant de l'étang – 0,15 m/s

Il s'agit là de la modélisation du courant moyen mesuré à l'entrée du grau et provenant de l'étang. Les résultats relatifs à cette modélisation sont présentés en annexe 10.

On constate une évolution similaire à celle précédemment décrite, atténuée en raison de la faiblesse de l'intensité du courant (rapport 8 entre les 2 cas).

Ainsi le renouvellement est conséquent au bout de 24 h avec toujours une plus faible recirculation au fond de la darse pétrolière et un très faible renouvellement au niveau de la plage amortissante.

On constate qu'au bout de 6h, pour un courant d'entrée de grau de 0,15 m/s, des vitesses de 0,1 m/s (quai Est 1), 0,05 m/s (chenal aval) et 0,04 m/s (passe d'entrée) sont observées. Ce même champ de courant est observé au bout de 24 h.

Courant entrant dans l'étang – 0,7 m/s

Il s'agit là de la modélisation du courant maximum mesuré à l'entrée du grau et entrant dans l'étang (tempête d'Est).

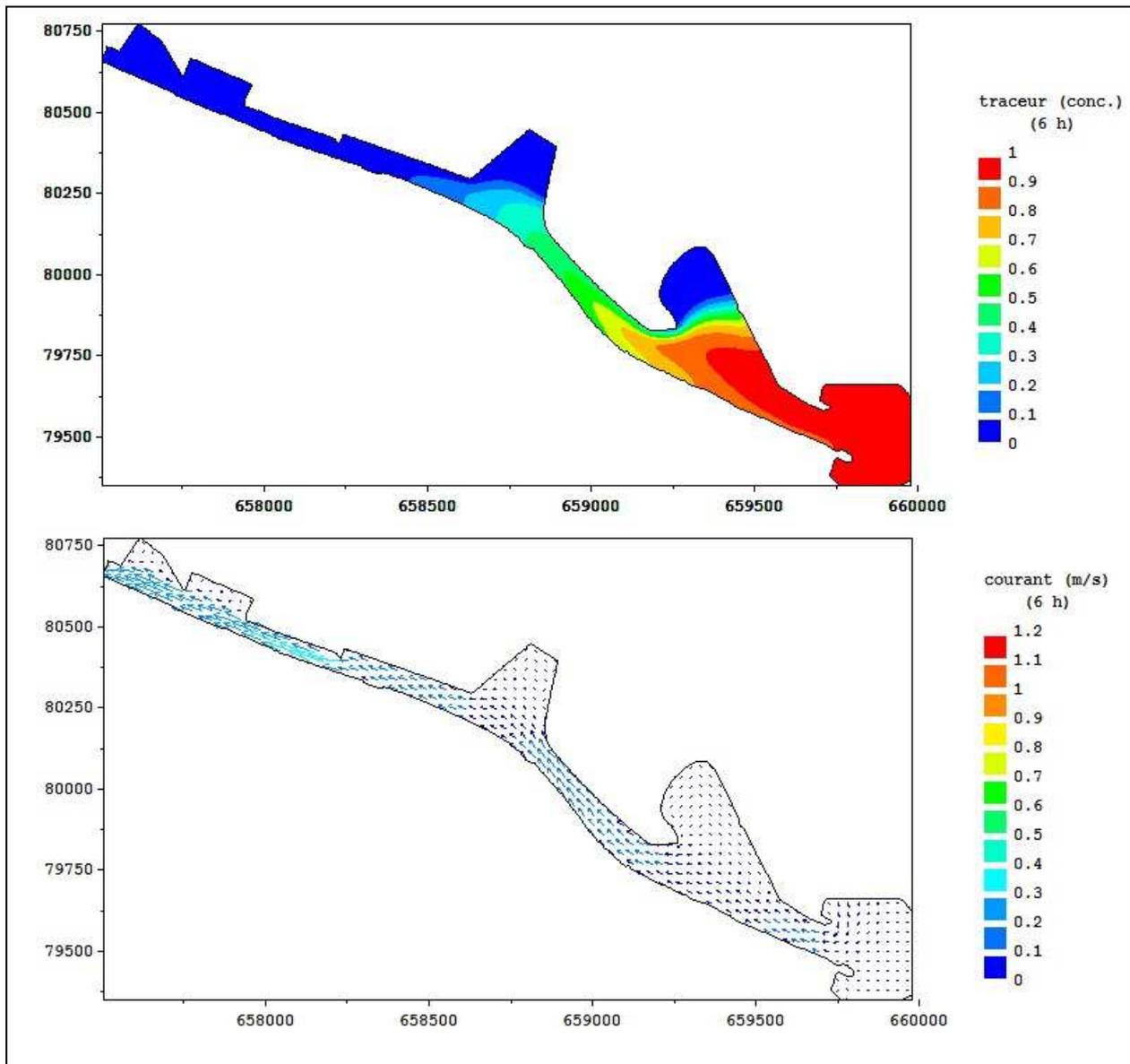


Figure 25 : Courant entrant dans l'étang de -0,7 m/s – 6h

On constate qu'au bout de 6h, plus de la moitié du grau est renouvelé. Le fond de la darse pétrolière et la plage d'amortissement restent deux zones peu renouvelées. Pour un courant de -0,7 m/s entrant dans l'étang, des vitesses de -0,3 m/s (quai Est 1), -0,15 m/s (chenal aval) et -0,12 m/s (passe d'entrée) sont observées.

Le renouvellement est global au bout de 12 h avec toujours les deux mêmes zones moins sensibles aux recirculations. Le champ des vitesses est quant à lui très voisin à celui observé au bout de 6h. On note seulement une vitesse légèrement supérieure dans la passe : 0,15 m/s.

A noter que pour un courant entrant dans l'étang, le flux général à l'entrée du port est orienté du Nord Est vers le Sud Ouest. Ceci s'explique par la dissymétrie de la passe.

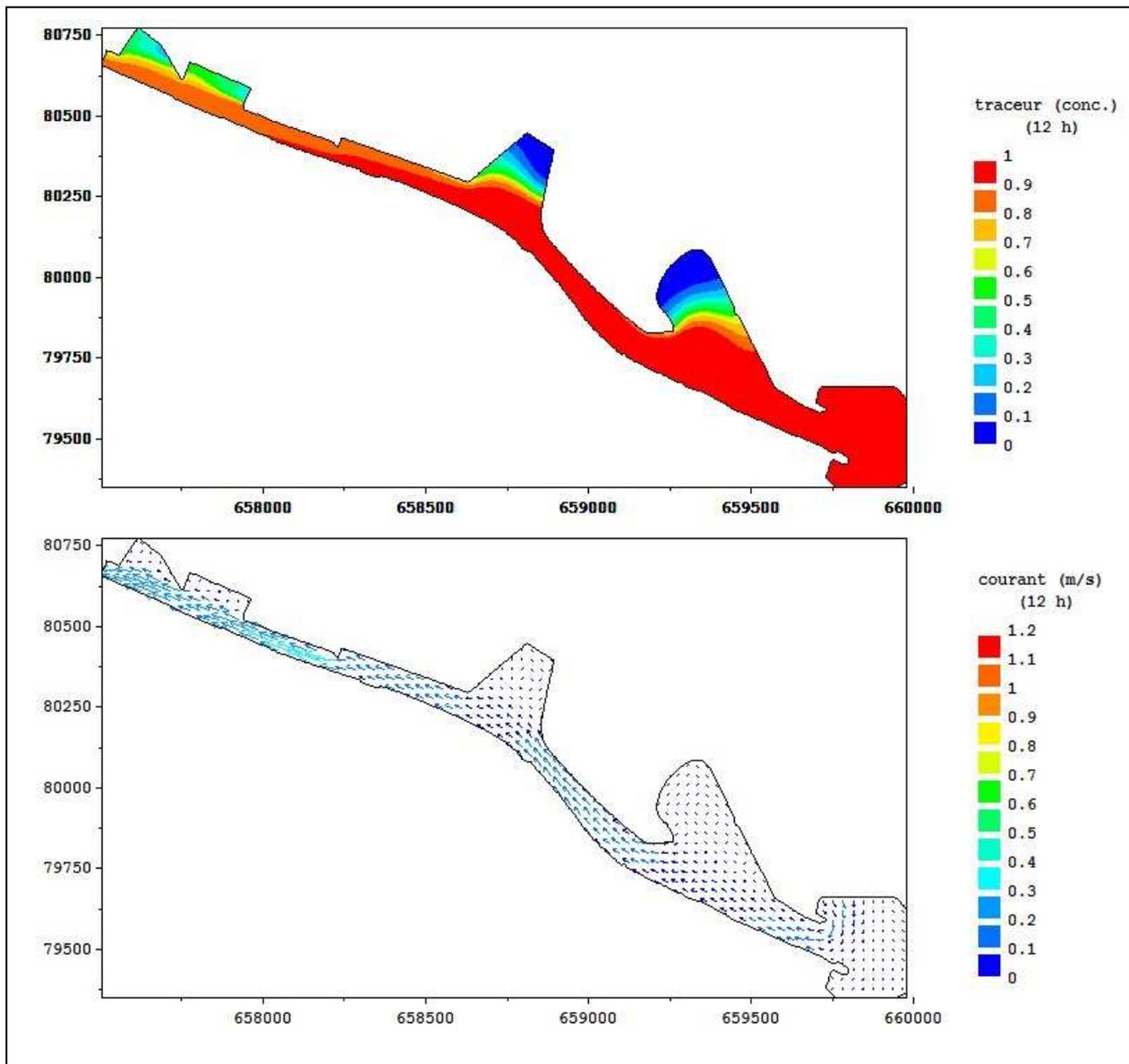


Figure 26 : Courant entrant dans l'étang de -0,7 m/s – 12h

Courant entrant dans l'étang – 0,10 m/s

Il s'agit là de la modélisation du courant moyen mesuré à l'entrée du grau et entrant dans l'étang. Les résultats relatifs à cette modélisation sont présentés en annexe 10.

On constate que l'évolution précédemment décrite est beaucoup moins marquée en raison du courant beaucoup plus faible mais aussi de l'emprise du modèle à l'entrée du port.

Ainsi le renouvellement n'est que partiel au bout de 24 h, alors que le courant est déjà homogène au bout de 6 h. En effet pour un courant entrant dans l'étang de -0,1 m/s, des vitesses de -0,06 m/s (quai Est 1), -0,03 m/s (chenal aval) et -0,02 m/s (passe d'entrée) sont observées à la fois au bout de 6h et de 24 h.

4-4 Commentaires

4-4.1 Comparaison avec les données bibliographiques

Pour plus de précisions sur ces données bibliographiques le lecteur devra prendre connaissance du rapport sur l'étude bibliographique [1].

Une étude EDF précise que le champ des vitesses dans le port suit le chenal et qu'il est assez homogène. L'étude Océanide confirme ce point : seules des vitesses plus élevées sont calculées dans les zones de plus faible section.

A noter que les valeurs des vitesses sont cohérentes avec les études antérieures car les conditions aux limites ont été définies directement avec ces données. La seule différence est liée au fait que le calcul est effectué en moyennant le courant sur la verticale et que dans la réalité il peut être jusqu'à trois fois supérieur près de la surface.

4-4.2 Synthèse

Les résultats de cette partie d'étude permettent de connaître la direction et l'intensité des courants sur l'ensemble de la zone étudiée et au niveau des aménagements existants (passe d'entrée, darses, ...).

L'évolution du renouvellement des eaux permet d'identifier la zone de la plage amortissante comme sensible pour les conditions modélisées.

Les courants de référence (configuration actuelle) suivants peuvent être retenus pour l'étude finale de deux configurations d'aménagement.

Zone	ENTRANT	SORTANT
Grau	- 70 cm/s	120 cm/s
Chenal aval	- 15 cm/s	40 cm/s
Passe d'entrée	- 15 cm/s	30 cm/s

Tableau 15 : Courants de référence pour la configuration actuelle

V- MODELISATION DE LA SEDIMENTOLOGIE

Afin de connaître les mouvements des sédiments marins dans la zone étudiée, une analyse à partir d'un modèle numérique est réalisée. On s'intéressera en particulier aux effets liés au chenal extérieur, en relation avec les volumes de dragage de la zone.

La modélisation sédimentologique doit permettre d'estimer les transports sédimentaires en fonction des conditions météorologiques.

Les études de sédimentologie sont réalisées avec le modèle SISYPHE du système TELEMAC (Cf. Annexe 4).

5-1 Description du modèle de sédimentologie

Le modèle de sédimentologie SISYPHE est un code bidimensionnel horizontal qui calcule le transport par charriage ou le transport total sous l'action des courants et de la houle.

Il s'applique à des sédiments non cohésifs, représentés par une granulométrie variable, pour une gamme de diamètres allant de 0,1 à 4 mm.

Les données d'entrée peuvent être des houles irrégulières (spectres de houle) et/ou vitesse de courant.

5-2 Emprise du modèle

Le modèle couvre les abords du port et la passe intérieure du port sur environ 3 km du littoral, centré sur le port de Port-la-Nouvelle. L'objectif est de simuler au mieux le transport sédimentaire aux abords des ouvrages portuaires, en particulier les phénomènes liés à la présence du chenal extérieur.

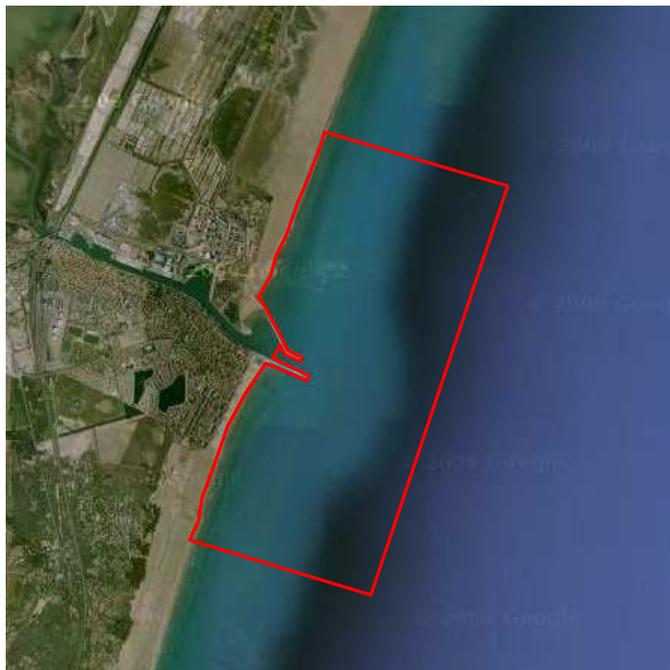


Figure 27 : Emprise du modèle de sédimentologie

5-3 Bathymétrie et maillage

La bathymétrie utilisée pour la modélisation de la sédimentologie est présentée ci-après :

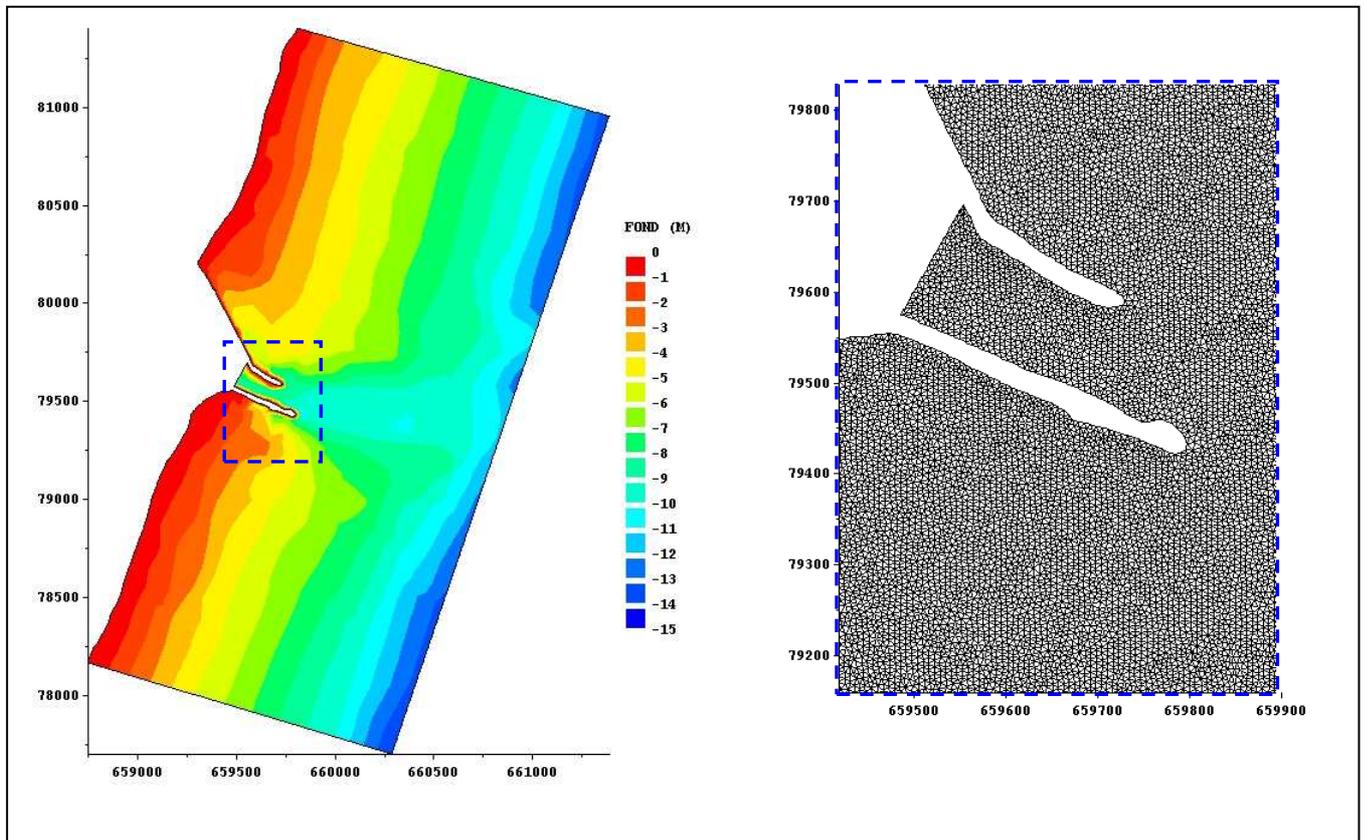


Figure 28 : Bathymétrie et zoom sur le maillage du modèle de sédimentologie

Le maillage de ce modèle (fenêtre zoomée sur la figure précédente) contient environ 131 000 nœuds pour la réalisation des différentes modélisations nécessaires aux calculs des conditions sur la zone (houle et courant) puis pour le calcul des mouvements sédimentaires.

5-4 Données d'entrée

5-4.1 Données physico-chimiques

L'étude s'appuie sur les données sédimentologiques contenues dans les documents bibliographiques (cf. Etude Bibliographique et Note d'Hypothèses).

Les principales valeurs retenues pour la modélisation sont :

- Diamètre moyen des sédiments (sables marins) :
 - 0,20 mm aux abords du rivage pour les fonds inférieurs à -5m CM ;
 - 0,15 mm pour les fonds au-delà de -5m CM.
- Masse volumique des sédiments : 2650 kg/m³ ;
- Masse volumique de l'eau de mer : 1027 kg/m³ ;

5-4.2 Données météorologiques

Les courants et les houles intégrés dans les simulations de sédimentologie sont issus de calculs réalisés sur des modèles d'agitation et de courantologie de la même emprise que le modèle de sédimentologie afin de déterminer précisément les conditions impactant la zone.

Les données météorologiques utilisées correspondent aux données statistiques issues de l'étude bibliographique et mises en avant dans la note d'hypothèse.

Les conditions prises en compte sont :

- Un courant moyen parallèle à la côté orienté Nord-Sud (majoritaire) ou Sud-Nord. ;
- Des houles provenant du secteur E et pour différentes périodes de retour. Il a été étudié des conditions de mer « modérées » et des conditions plus exceptionnelles, voir extrêmes. Les durées des simulations ont été adaptées à chaque situation.

Les cas simulés sont détaillés dans le paragraphe 5-4.3 suivant.

5-4.3 Cas étudiés

Les caractéristiques des contraintes hydrauliques retenues seront représentatives de conditions remarquables observées et des phénomènes pouvant être observés.

- . **Cas 1** : Courant N-S de 0,15 m/s & Houle d'incidence 70°N en limite d'opérabilité (2m et 6s) ;
- . **Cas 2** : Courant N-S de 0,15 m/s & Houle annuelle d'incidence 70°N (2,9m et 8s) ;
- . **Cas 3** : Courant N-S de 0,15 m/s & Houle extrême décennale d'incidence 70°N (6m et 12s) ;
- . **Cas 4** : Courant N-S de 0,15 m/s & Houle décennale d'incidence 110°N (4m et 12s) ;
- . **Cas 4bis** : Courant S-N de 0,15 m/s & Houle décennale d'incidence 110°N (4m et 12s) ;
- . **Cas 5** : Courant N-S de 0,15 m/s & Houle d'incidence 100°N en limite d'opérabilité (2m et 6s) ;
- . **Cas 6** : Courant S-N de 0,15 m/s & Houle 0,02% (cf. [1]) d'incidence 130°N (2,20m et 8s) ;

Note : *Un faible courant entrant dans le port (environ 0,08 m/s) est simulé.*

5-5 Résultats de la modélisation sédimentologique

Les résultats sont présentés, pour tous cas, sur des planches en couleur donnant le déplacement des sédiments.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'impact des aménagements sur les transports sédimentaires à partir de l'état actuel. Ainsi, les volumes mis en mouvement sont évalués sur une surface de référence comprenant le chenal extérieur et la passe d'entrée. La figure suivante illustre cette zone de « contrôle » et d'où sont issues les quantités indiquées pour chaque cas simulé :

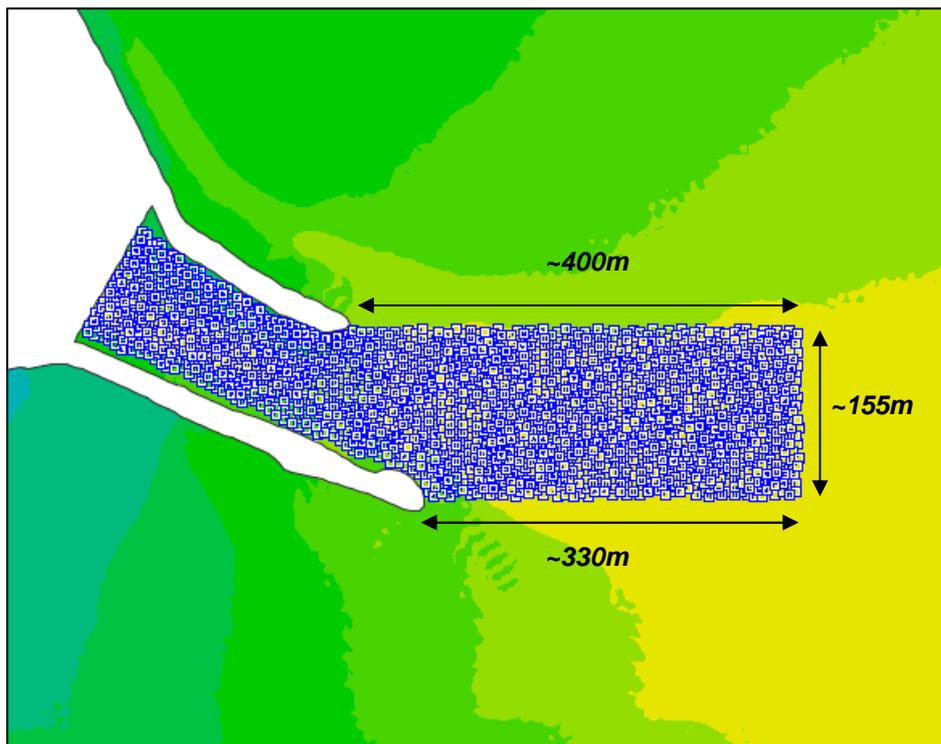


Figure 29 : Prise en compte des volumes de sédiments en mouvement

Note :

Les abords immédiats des ouvrages ne sont pas pris en compte dans le décompte des volumes de sédiments en mouvement. Les calculs issus des modélisations y sont trop amplifiés pour être réalistes.

5-5.1 Cas 1 – Courant N-S et houle de limite d'opérabilité 70°N

Le cas simulé est :

- Courant 0,15 m/s venant du Nord et se propageant au Sud parallèlement à la côte ;
- Une houle : $H_s=2$ m, $T_p=6$ s et une incidence 70°N.

La durée de simulation de ces conditions est longue (plusieurs centaines d'heures) car leur occurrence sur le site est élevée.

Les graphes ci-dessous présentent les résultats des calculs :

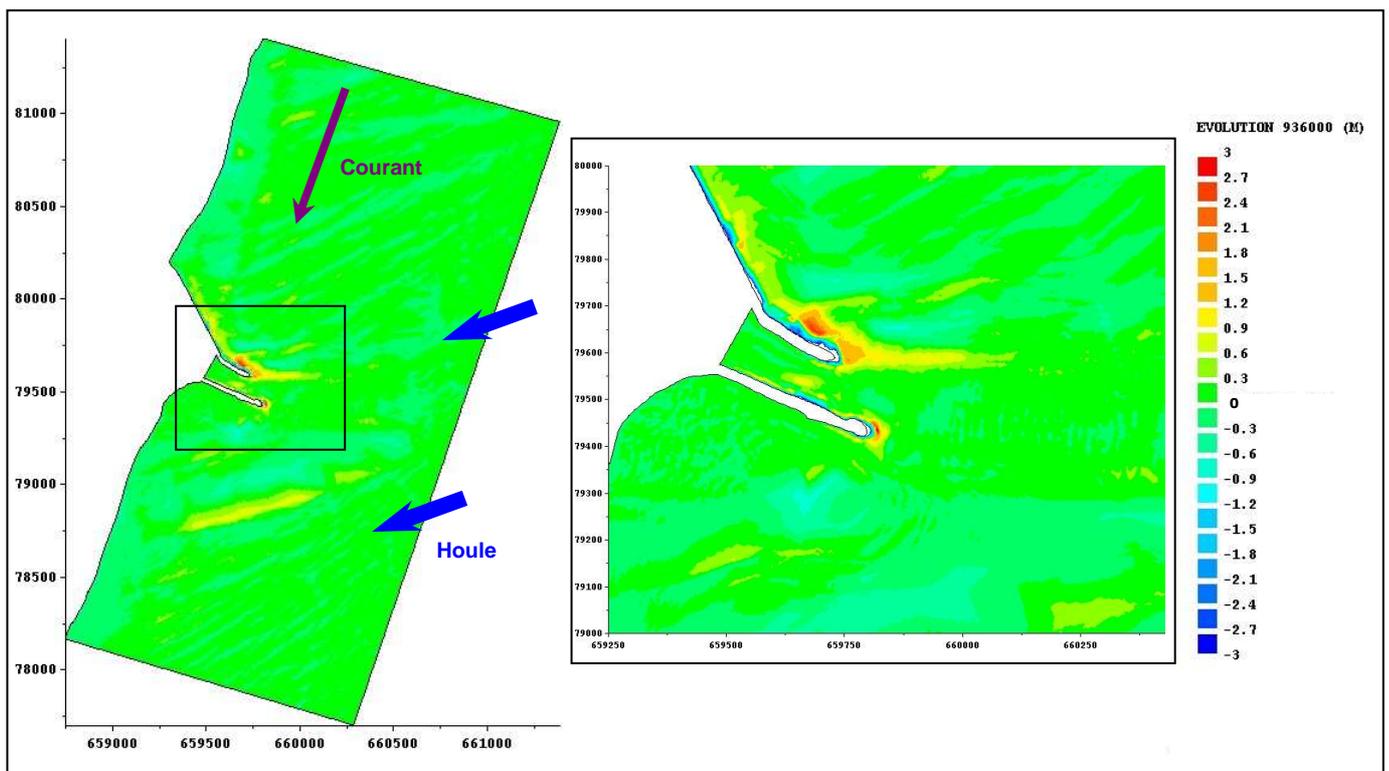


Figure 30 : Modélisations sédimentaires – Cas 1

Les principaux mouvements sédimentaires notables sont une accumulation progressive de sédiments le long de la digue Nord, s'accompagnant de la création d'une bande sableuse au droit du musoir de la digue Nord.

On observe aussi une accumulation de sédiments aux abords immédiats du musoir de la digue Sud, mais dans une zone limitée.

Le volume de sédiments apportés dans le chenal et la passe (zone de mesure) d'après la modélisation est de **7 672 t**. Hormis la bande sableuse au droit du musoir Nord, il n'y a pas de point particulier d'accumulation de sédiments dans la passe.

5-5.2 Cas 2 – Courant N-S et houle annuelle 70°N

Le cas simulé est :

- Courant 0,15 m/s venant du Nord et se propageant au Sud parallèlement à la côte ;
- Une houle : $H_s=2,90$ m, $T_p=8$ s et une incidence 70°N . La période est prise à 8 s, et non pas 6 s, pour mieux modéliser l'influence de la houle sur les fonds.

La durée de simulation de ces conditions est modérée (plusieurs dizaines d'heures) car leur occurrence sur le site est relativement faible.

Les graphes ci-dessous présentent les résultats des calculs :

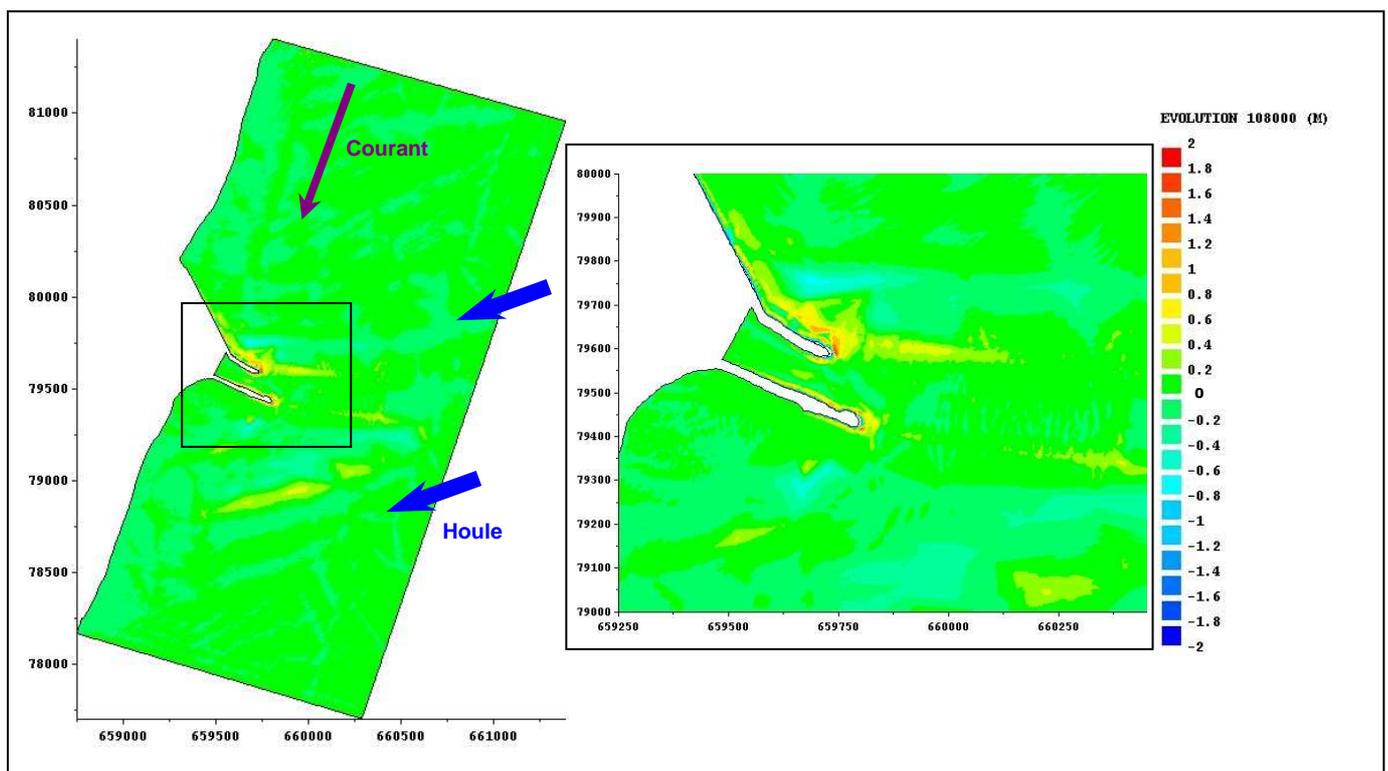


Figure 31 : Modélisations sédimentaires – Cas 2

Les mouvements sédimentaires significatifs pour le cas 2 sont similaires au cas 1, mais se concentrant sur une échelle de temps beaucoup plus réduite (ordre de grandeur proche de 10).

On retrouve notamment une accumulation le long de la digue Nord avec une bande sableuse se formant au droit du musoir.

Le volume de sédiments apportés dans le chenal et la passe (zone de mesure) d'après la modélisation est de **4 352 t**.

5-5.3 Cas 3 - Courant N-S et houle décennale 70°N

Le cas simulé est :

- Courant 0,15 m/s venant du Nord et se propageant au Sud parallèlement à la côte ;
- Une houle extrême : $H_s=6$ m, $T_p=12$ s et une incidence 70°N.

La durée de simulation de ces conditions est courte (quelques heures) car cet événement est exceptionnel.

Les graphes ci-dessous présentent les résultats des calculs :

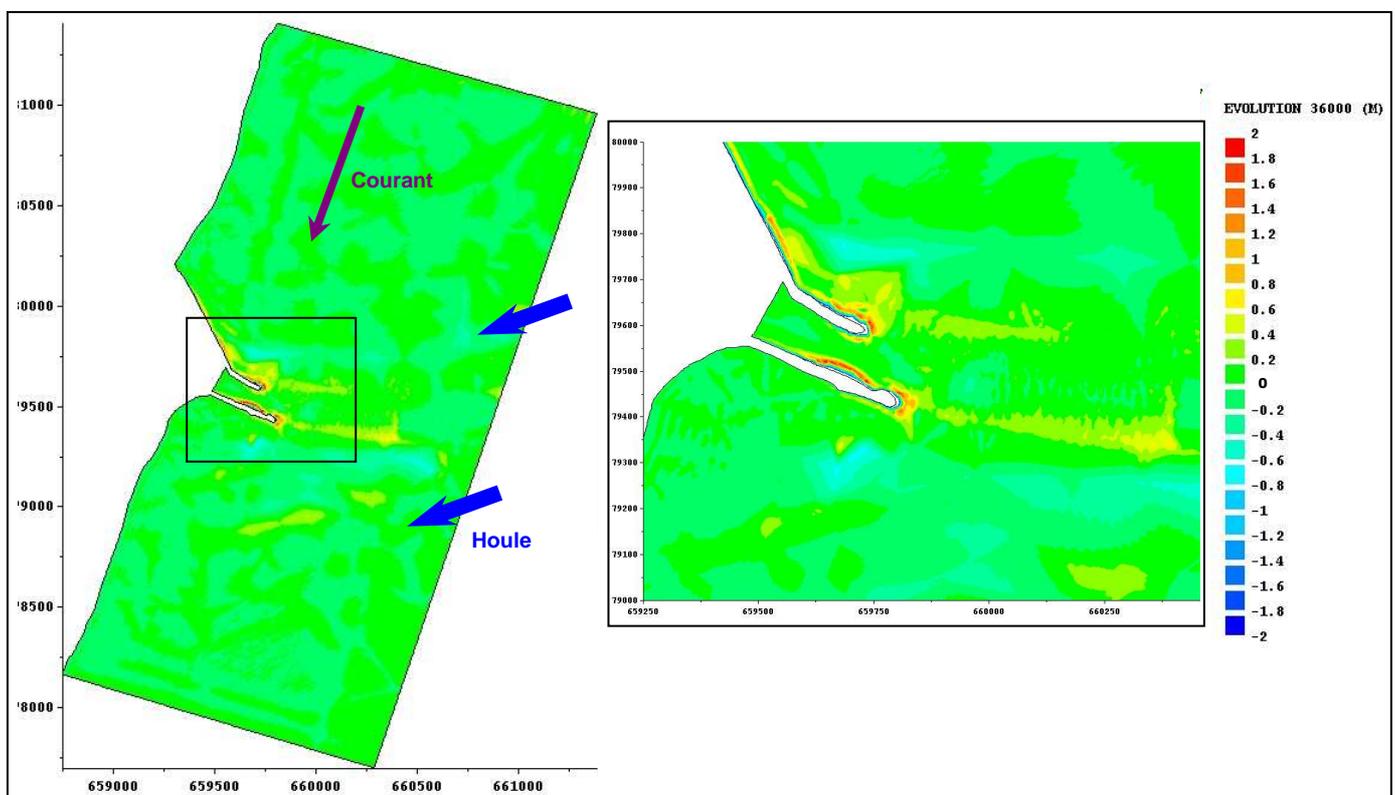


Figure 32 : Modélisations sédimentaires – Cas 3

Pour le cas 3 avec une houle exceptionnelle d'incidence 70°N, les principales tendances observées sont :

- Une accumulation de sédiments le long des digues Nord et Sud sur la face orientée vers la houle (cf. figure précédente) ;
- Des mouvements sédimentaires au niveau de la pente du chenal.

Le volume de sédiments apportés dans le chenal et la passe (zone de mesure) d'après la modélisation est de **4 937 t**, et ce sur une courte durée de simulation.

5-5.4 Cas 4 et 4bis – Courants et houle d'incidence 110°N

Deux cas avec la même houle, mais un courant moyen orienté dans les deux sens, sont simulés pour observer l'impact du courant sur cette houle qui arrive perpendiculaire à la côte.

Le 1^{er} cas simulé est :

- Courant 0,15 m/s venant du Nord et se propageant au Sud parallèlement à la côte ;
- Une houle : $H_s=4$ m, $T_p=12$ s et une incidence 110°N.

La durée de simulation de ces conditions est modérée (plusieurs dizaines d'heures) car leur occurrence sur le site est relativement faible.

Les graphes ci-dessous présentent les résultats des calculs du cas 4 :

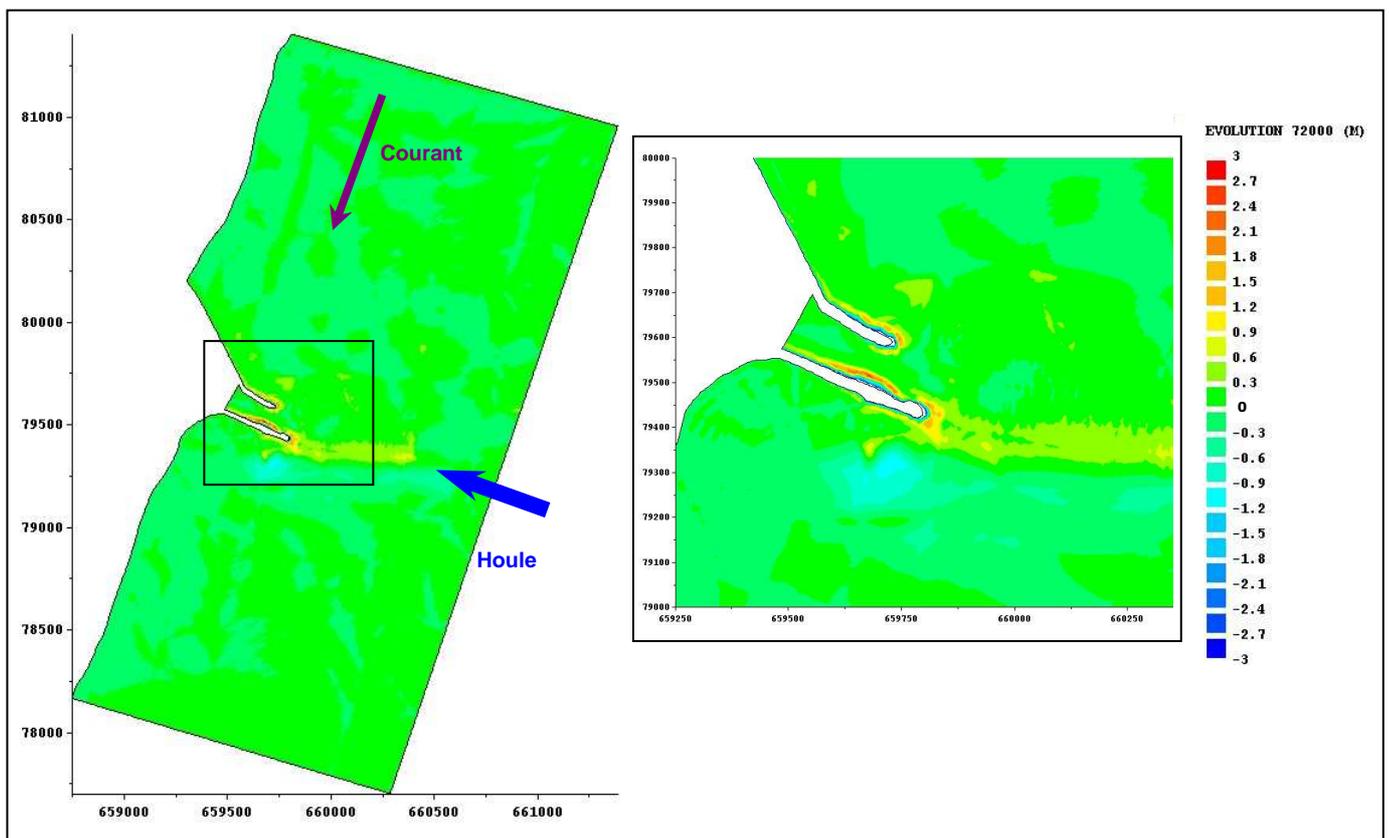


Figure 33 : Modélisations sédimentaires – Cas 4

Le 2nd cas simulé est :

- Courant 0,15 m/s venant du Sud et se propageant au Nord parallèlement à la côte. L'objectif de cette simulation est d'analyser l'impact du courant moyen sur le site par rapport aux conditions de houle ;
- Une houle : $H_s=4$ m, $T_p=12$ s et une incidence $110^\circ N$.

La durée de simulation de ces conditions est modérée (plusieurs dizaines d'heures) car leur occurrence sur le site est relativement faible.

Les graphes ci-dessous présentent les résultats des calculs du cas bis :

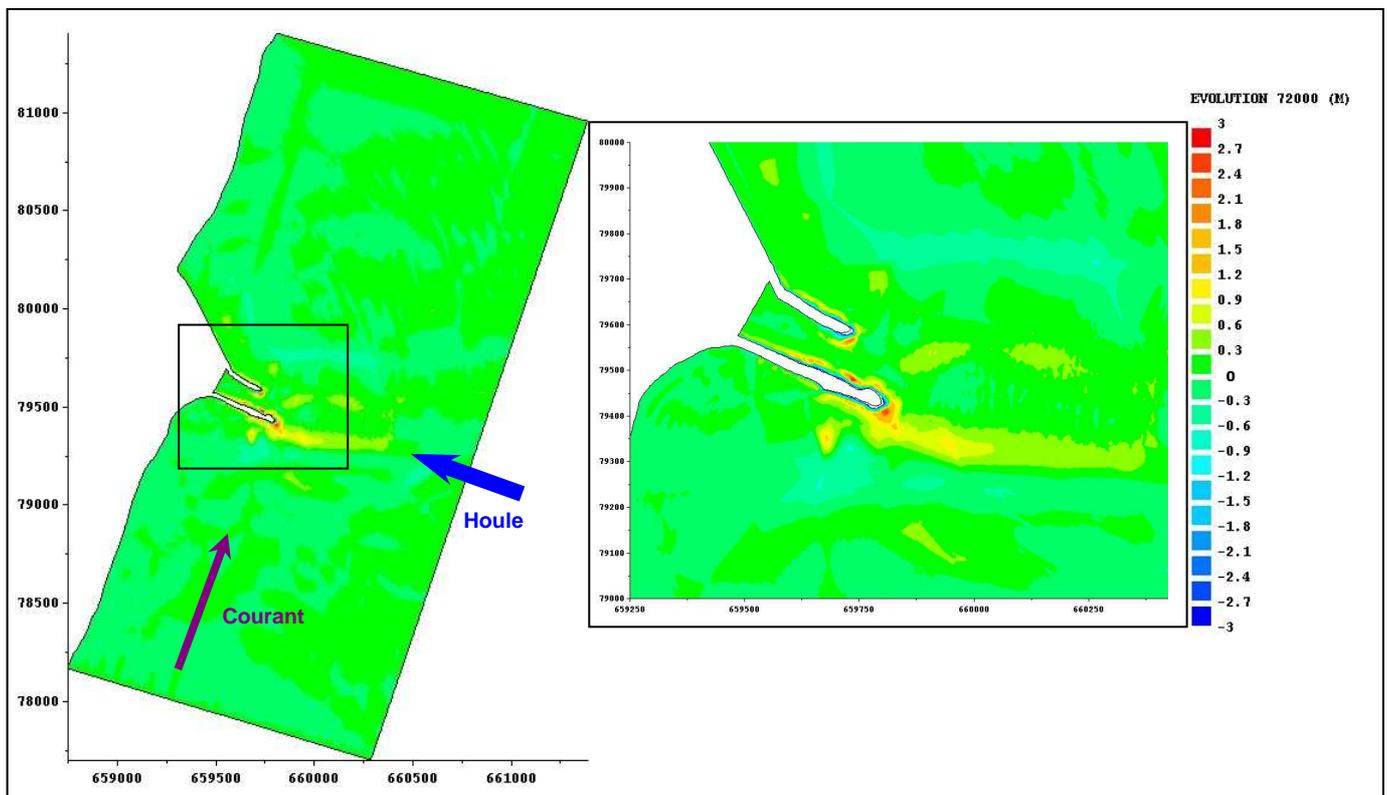


Figure 34 : Modélisations sédimentaires – Cas 4bis

Pour les deux modélisations, l'accumulation se concentre plutôt au niveau de la digue Sud, et une bande sableuse se crée aussi dans son prolongement.

On observe aussi une accumulation de sédiments le long des faces Nord des ouvrages, en particulier pour la configuration avec le courant venant du Nord.

Les phénomènes sont similaires dans les 2 cas, et les volumes en mouvements calculés sont :

- **9 033 t** pour le cas 4 ;
- **8 256 t** pour le cas 4bis. Soit une différence d'environ 9%.

5-5.5 Cas 5 – Courant N-S et houle de limite d'opérabilité 100°N

Le cas simulé est :

- Courant 0,15 m/s venant du Nord et se propageant au Sud parallèlement à la côte ;
- Une houle : $H_s=2$ m, $T_p=6$ s et une incidence 100°N. Cette incidence est la plus pénalisante pour l'agitation.

La durée de simulation de ces conditions est longue (plusieurs centaines d'heures) car leur occurrence sur le site est élevée.

Les graphes ci-dessous présentent les résultats des calculs :

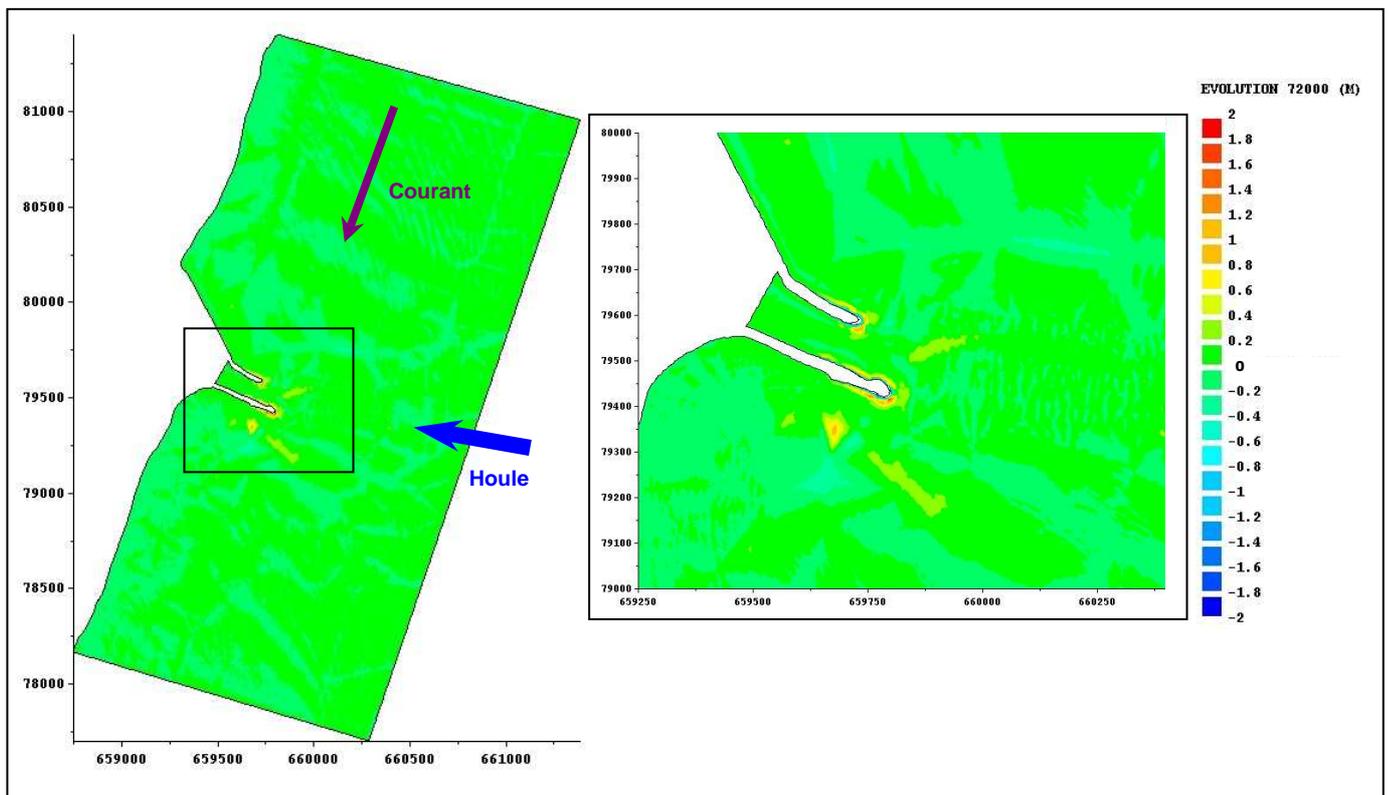


Figure 35 : Modélisations sédimentaires – Cas 5

Il est observé des accumulations de sables en plusieurs points particuliers, mais sans tendance particulière significative.

Sur une longue durée de simulation similaire au cas 1, le volume de sédiments apportés dans le chenal et la passe (zone de mesure) d'après la modélisation est de **4 111 t**. Ce qui correspond à environ la moitié des volumes pour une houle similaire d'incidence 70°N. On retrouve bien l'importance de l'angle d'attaque de la houle sur les phénomènes de transport sédimentologique.

5-5.6 Cas 6 – Courant S-N et houle 0,02% 130°N

Le cas simulé est :

- Courant 0,15 m/s venant du Sud et se propageant au Nord parallèlement à la côte ;
- Une houle : $H_s=2,20$ m, $T_p=8$ s et une incidence $130^\circ N$.

La durée de simulation de ces conditions est modérée (plusieurs dizaines d'heures) car leur occurrence sur le site est relativement faible.

Les graphes ci-dessous présentent les résultats des calculs :

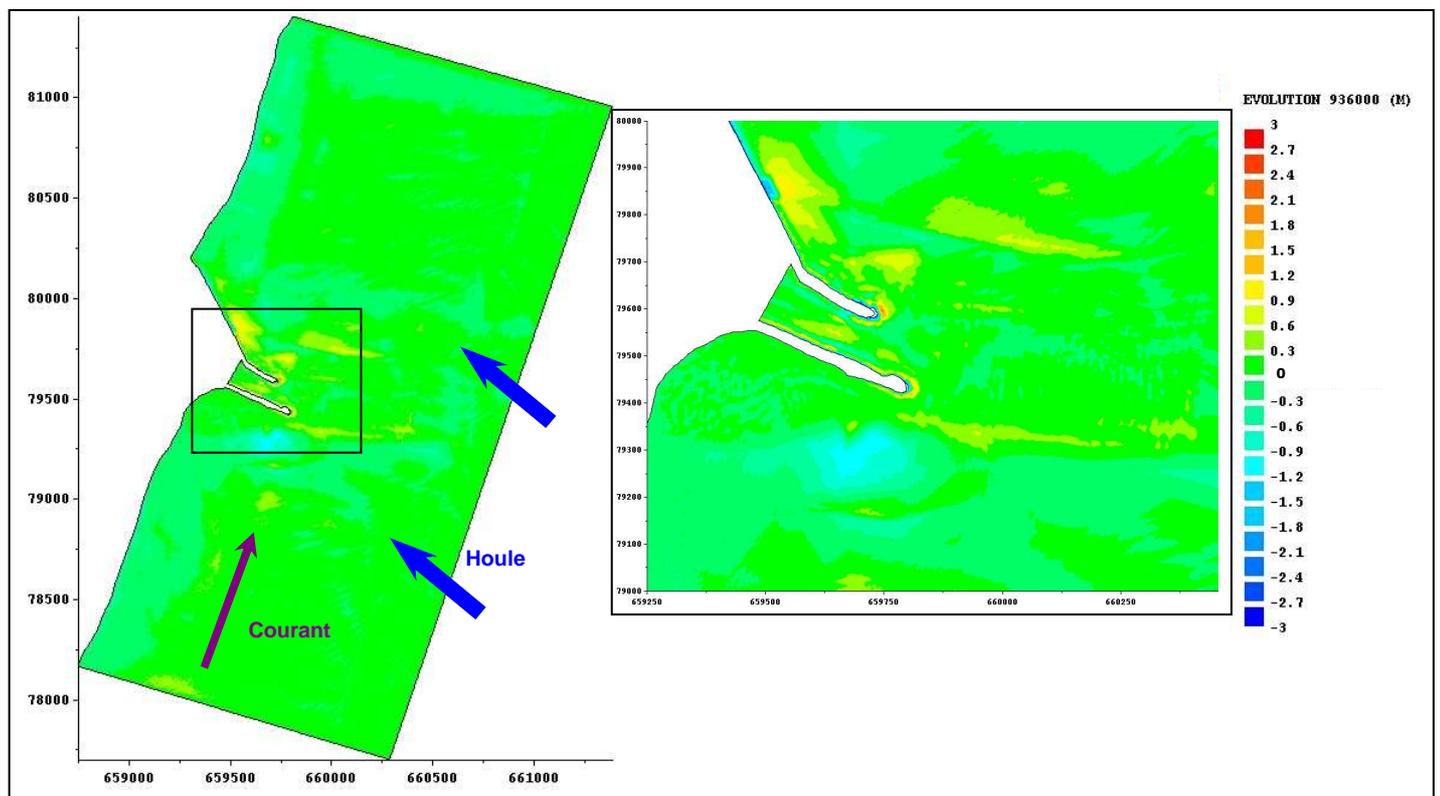


Figure 36 : Modélisations sédimentaires – Cas 6

L'objectif de cette simulation est d'observer l'impact d'une houle de secteur SE sur la zone d'étude.

Il est observé en particulier un déport de sédiments depuis le Sud du port, ainsi qu'une accumulation modérée au Nord, mais les volumes mis en jeu dans le chenal et la passe (zone de mesure) d'après la modélisation sont « seulement » de **2 515 t**.

5-6 Conclusions

5-6.1 Tendence sur le site et modélisations

En se basant sur l'analyse bibliographique [1], il apparaît que la zone de Port la Nouvelle est un point d'équilibre pour les transports sédimentaires littoraux.

En revanche, un cycle de mise en circulation des sédiments existe entre le chenal et les abords immédiats du port. Le chenal a tendance à piéger les sédiments afin de rétablir naturellement l'équilibre des fonds.

Les principales observations pouvant être émises à partir des modélisations et des données connues sont que les houles les plus pénalisantes proviennent du secteur NE (70°N) en raison de leur occurrence et de leur impact plus important que les houles similaires d'incidence E à SE.

Le volume dragué en 2009 est d'environ 15 000 t pour la zone comprenant le chenal extérieur et la passe d'entrée. L'ordre de grandeur des simulations proposées dans ce chapitre est comparable et permet de voir que cet apport sédimentaire est autant la conséquence des houles modérées qui arrivent régulièrement sur le site, qu'à certains événements plus exceptionnels qui génèrent des mouvements importants sur une courte durée.

Remarque :

- *Il existe peu d'éléments permettant le calage des simulations si ce n'est les volumes de dragage ;*
- *L'incident de l'échouage du navire Diane sur un banc de sable dans le chenal extérieur aux abords du musoir de la digue Nord (cf. figure ci-dessous) est une bonne indication des tendances sédimentaires réelles, et que l'on retrouve sur certaines simulations (en particulier pour les houles d'incidence 70°N).*

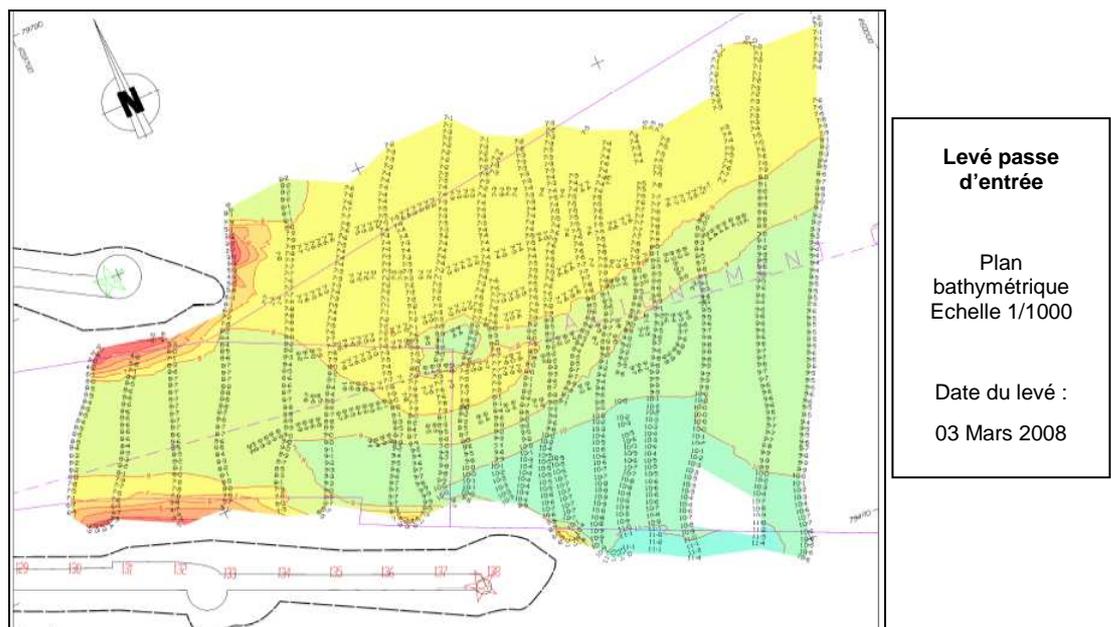


Figure 37 : Levé bathymétrique au moment de l'incident du Diane

5-6.2 Tableau de synthèse

Le tableau suivant résume les cas simulés et les volumes sédimentaires calculés à l'issu des modélisations :

Cas	Houle			Niveau (m CM)	Courant	Durée du calcul sédimentaire	Evolution sédimentaire
	Hs (m)	Tp (s)	dir (°N)				Volume (t)
1	2	6	70°N	+0,6	0,15 m/s N-S	Longue	7 672
2	2,90	8	70°N	+0,6	0,15 m/s N-S	Modérée	4 352
3	6	12	70°N	+1,2	0,15 m/s N-S	Courte	4 937
4	4	12	110°N	+1,2	0,15 m/s N-S	Modérée	9 033
4 bis	4	12	110°N	+1,2	0,15 m/s S-N	Modérée	8 256
5	2	6	100°N	+0,6	0,15 m/s N-S	Longue	4 111
6	2,20	8	130°N	+0,6	0,15 m/s S-N	Modérée	2 515

Tableau 16 : Résultats des simulations sédimentaires

La simulation de certains de ces mêmes cas en présence des futures configurations d'aménagement permettra ainsi d'estimer leur impact sur les mouvements sédimentaires.

VI-ETUDE DE LA NAVIGABILITE

Afin d'évaluer les manœuvres d'entrée et de sortie d'un navire type pour la configuration actuelle du port, le logiciel de simulation NAVMER, développé par le CETMEF, a été utilisé.

L'objectif est d'identifier les points faibles de la configuration actuelle afin d'orienter les aménagements futurs.

Cette étape de l'étude a été menée grâce à **différents intervenants** :

- Les Techniciens du CETMEF pour leur maîtrise du logiciel, des paramètres permettant d'affiner les simulations ainsi que pour leur expérience sur d'autres projets portuaires ;
- Les Pilotes du port de Port-la-Nouvelle ayant la pratique des conditions nautiques locales, des problématiques du site et des navires ; ils sont indispensables au bon calage des modèles ;
- Un pilote-expert (M. JP Salducci) permettant d'apporter un regard extérieur sur le projet, et dont l'expérience sur de nombreux autres sites est un atout essentiel.

L'étude de la navigabilité pour la configuration actuelle du port s'est effectuée en **plusieurs étapes** :

- Récupération, vérification, mise en forme et intégration des données du port (topographie, bathymétrie, géométrie des ouvrages, limites des berges, bouées...) et des données environnementales (courants, vent) dans le modèle, notamment les champs de courant déduits de valeurs issues de l'étude bibliographique ;
- Définition des caractéristiques physiques, propulsives et manœuvrières du (des) bateau(x) à modéliser. Adaptation et/ou construction des modèles de bateaux correspondants puis intégration dans le logiciel ;
- Calage du modèle et de ses différents paramètres. Cette étape a été réalisée à l'aide de simulations dirigées par les Pilotes du port de Port la Nouvelle. Cette phase a eu un double objectif : familiariser les pilotes avec l'utilisation du logiciel et valider les modélisations ;
- Une seconde phase de simulations, ciblée sur les objectifs de l'étude, a ensuite été réalisée avec les Pilotes selon les scénarios définis en concertation avec le Maître d'Ouvrage. Les simulations ont été effectuées avec les Pilotes afin d'affiner les paramètres en fonction de leurs retours d'expériences ;
- L'analyse approfondie des résultats des simulations et la rédaction d'un rapport intermédiaire avec le concours du pilote expert.

On rappelle qu'une nouvelle étude de navigabilité aura lieu sur 2 configurations pertinentes d'aménagements.

Remarque : une note intermédiaire sur la navigabilité présente l'ensemble des résultats modélisés pour la configuration actuelle (cf. [3]). Les principaux résultats et cas représentatifs sont présentés ci-dessous.

6-1 Description du modèle de navigabilité

Pour la réalisation de cette partie de l'étude, OCEANIDE s'appuie sur le travail réalisé par le CETMEF et son logiciel de simulation NAVMER (cf. fiche en annexe 6), couramment utilisé pour la modélisation des trajectoires de navire.

Le simulateur calcule les efforts s'appliquant sur le navire modélisé à partir de ses caractéristiques, des ordres du pilote, du site (bathymétrie, berges), du vent et du courant.

Les ordres (barre, machine), transmis via une Interface Homme-Machine, permettent au navire simulé de se déplacer.

Les formulations utilisées synthétisent des études réalisées en bassin de carène et des adaptations au réel.

La simulation va de pair avec la théorie qui s'appuie sur des équations simplifiées et avec l'expérience. Mais avant d'être prédictive, elle doit être calée sur des phénomènes vérifiés dans la pratique. Dans le cas présent, elle doit reproduire des expériences d'essais de giration, de zigzag et d'arrêt, normalisés par l'Organisation Maritime Internationale.

Pour décrire le déplacement du navire type, l'utilisation d'équations dynamiques représentant les efforts est préférable à celle de relations purement cinématiques, en particulier pour prendre en compte les effets du vent, du courant, de la profondeur et des berges.

La modélisation s'appuie donc sur des équations différentielles qui relient les efforts subis par le navire aux accélérations.

Les paramètres régissant le comportement hydrodynamique final du navire sont ensuite ajustés lors des premières simulations dirigées par les pilotes (cf. [3]).

6-2 Cas étudiés

Les calages du modèle avec le navire projet (type Thaïs) ont été réalisés en présence des pilotes de Port la Nouvelle lors de la semaine 22 (année 2010).

Les principaux paramètres modélisés ont été :

- Navire chargé entrant et sortant ;
- Courant traversier Nord-Sud et Sud-Nord ;
- Effets de berge ;
- Limites du chenal ;
- Effets du vent.

6-2.1 Caractéristiques du navire étudié

Le navire qui est modélisé pour l'étude de navigabilité avec la configuration de port actuelle est le **THAIS** (cf. photo 2).



Photo 2 : Le Thais

Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

- Navire PE140FP1G107UP (codification CETMEF) ;
- Longueur : 140 m ;
- Largeur : 23 m ;
- Tirant d'eau : 8 m ;
- Vitesse max. : 11 nds ;
- Masse : 19 200 t.

Les essais de calibration du navire projet sont présentés dans la note intermédiaire [3].

6-2.2 Cas réalisés

Les cas listés ci-après sont ceux concernant les modélisations du 17 et 18 juin 2010 (avec le navire calibré). Les différents cas sont commentés dans le paragraphe 6-3.

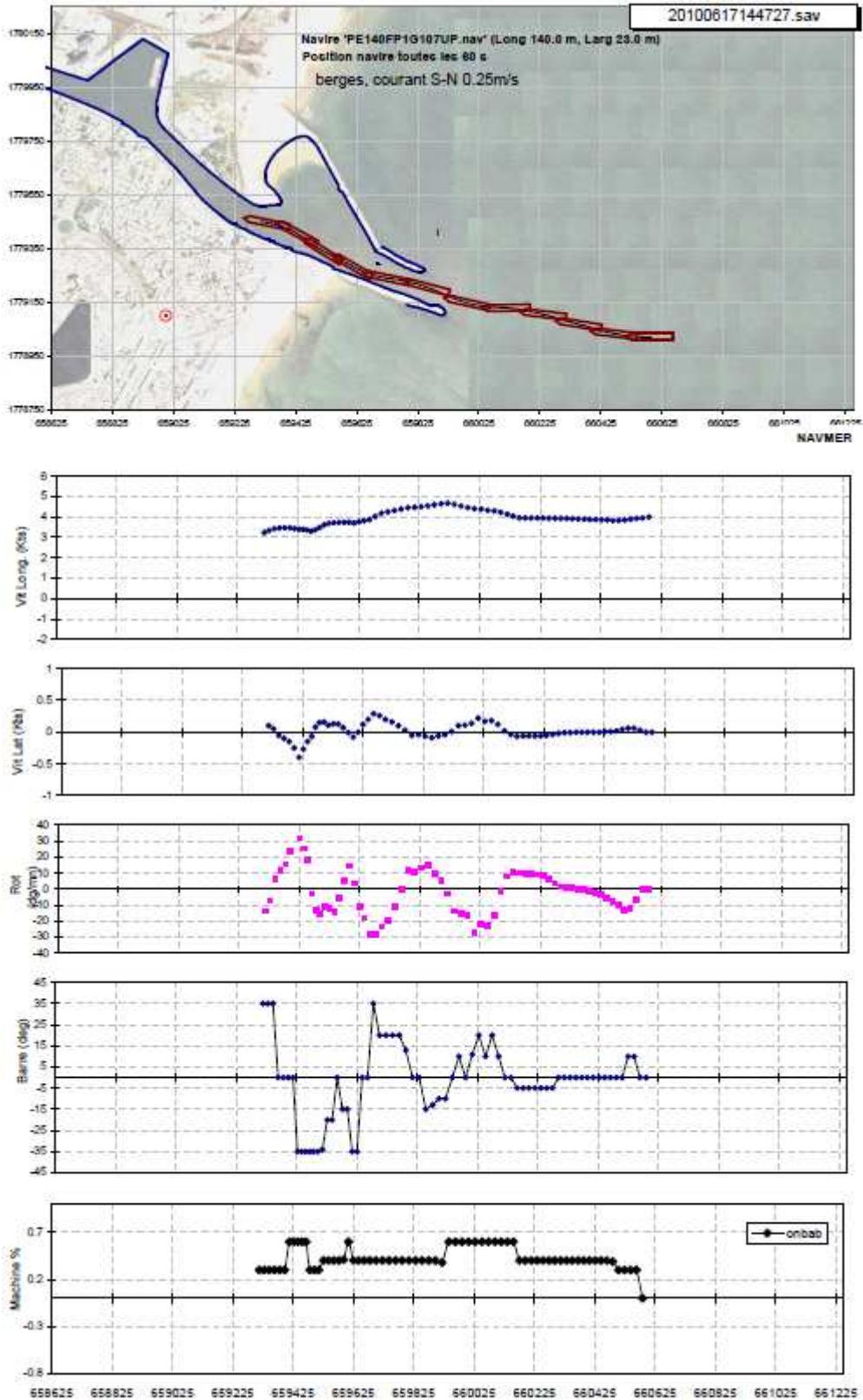
Cas	Configuration	Remarque	Commentaires
Cas 1	<ul style="list-style-type: none"> Courant Sud→Nord : 0,25 m/s Effets de berges Présence des 2 bouées tribord 	Non visualisation de la limite du plafond Navire entrant	Le bateau heurte la 2 ^{ème} bouée tribord, cas jugé représentatif
Cas 2	<ul style="list-style-type: none"> Courant Sud→Nord : 0,5 m/s Effets de berges Présence des 2 bouées tribord 	Non visualisation de la limite du plafond Navire entrant Essai d'arrêt dans la darse pétrolière	Cas jugé représentatif
Cas 3	<ul style="list-style-type: none"> Courant Sud→Nord : 0,5 m/s Effets de berges Présence des 2 bouées tribord 	Non visualisation de la limite du plafond Navire sortant	Cas jugé représentatif notamment avec les effets de berge
Cas 4	<ul style="list-style-type: none"> Effets de berges 	Visualisation de la limite du plafond Navire entrant	Cas jugé représentatif
Cas 5	<ul style="list-style-type: none"> Courant Sud→Nord : 0,5 m/s Effets de berges 	Visualisation de la limite du plafond Navire entrant Essais d'arrêt dans l'avant port	Distance d'arrêt insuffisante Cas jugé représentatif
Cas 6	<ul style="list-style-type: none"> Courant Nord→Sud : 1,0 m/s Effets de berges 	Visualisation de la limite du plafond Navire entrant	Le navire heurte la Jetée Sud, cas jugé représentatif
Cas 7	<ul style="list-style-type: none"> Courant Nord→Sud : 1,0 m/s Effets de berges 	Visualisation de la limite du plafond Navire entrant	Le navire heurte la Jetée Nord, cas jugé représentatif
Cas 8	<ul style="list-style-type: none"> Courant Sud→Nord : 0,7 m/s Effets de berges 	Visualisation de la limite du plafond Navire entrant Essais d'arrêt dans la darse pétrolière	Approche hors champ du courant
Cas 9	<ul style="list-style-type: none"> Effets de berges Présence des 2 bouées tribord 	Non visualisation de la limite du plafond Navire entrant Essais d'arrêt dans la darse pétrolière	Cas jugé représentatif
Cas 10	<ul style="list-style-type: none"> Effets de berges Présence des 2 bouées tribord 	Non visualisation de la limite du plafond Navire entrant Essais d'arrêt dans la darse pétrolière	Cas jugé représentatif

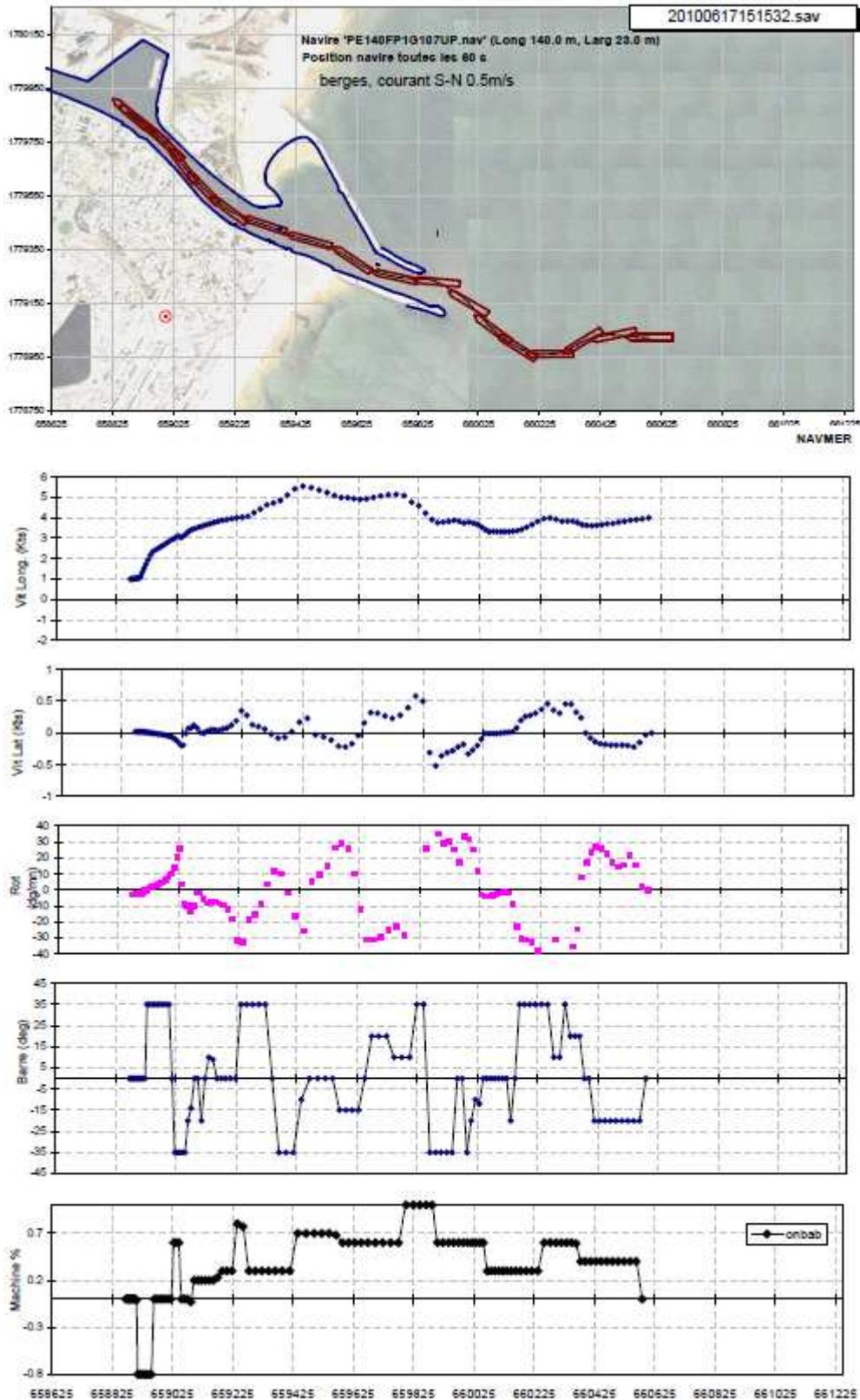
Tableau 17 : Principaux cas modélisés pour la configuration actuelle

6-2.3 Sorties graphiques

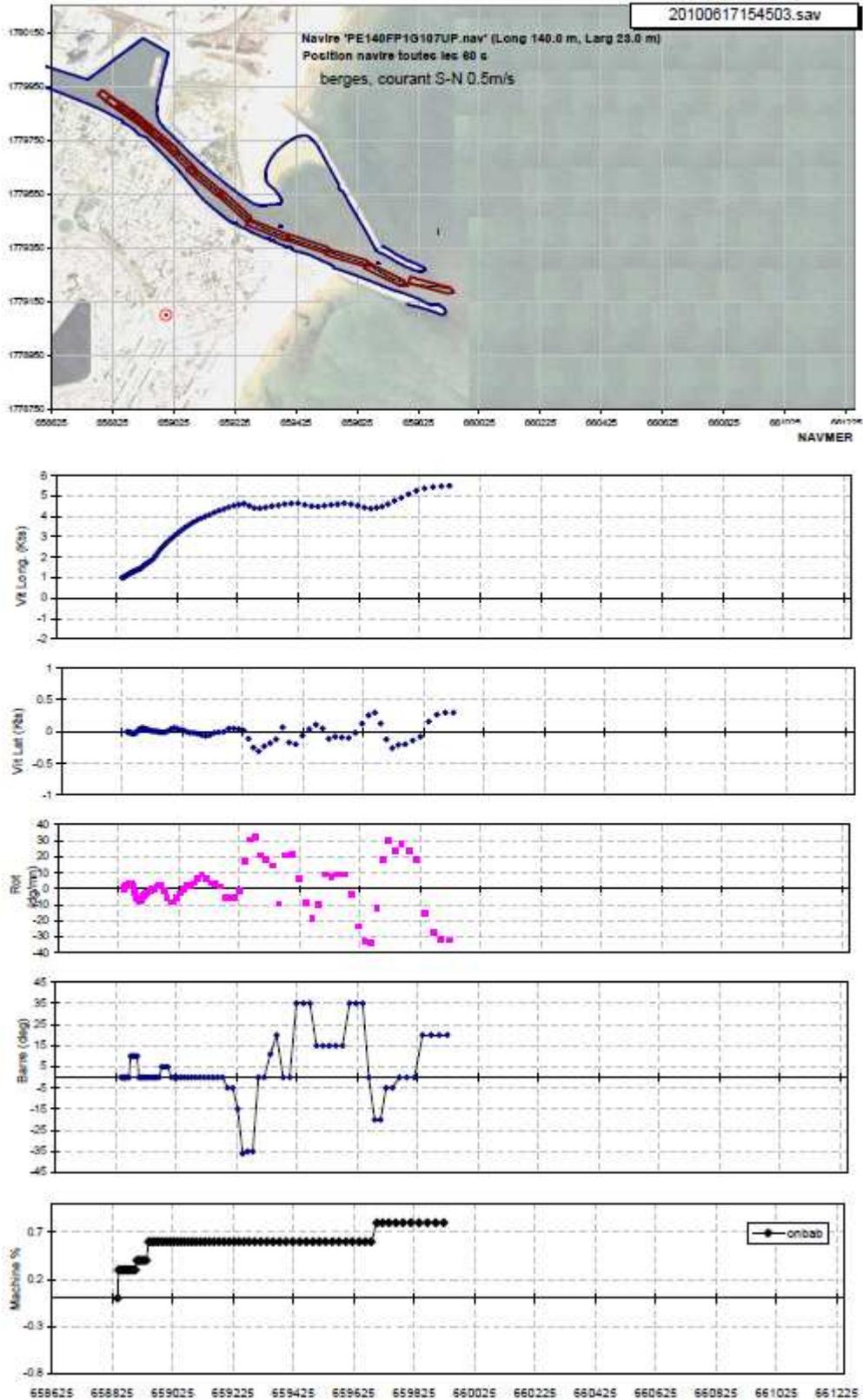
Les résultats graphiques (pages suivantes) présentent pour chacun des cas listés dans le tableau précédent :

- La position du navire, toutes les 60 s, en vue de dessus sur l'ensemble de la zone modélisée ;
- La vitesse longitudinale du navire en nœuds ;
- La vitesse latérale du navire en nœuds ;
- La giration du navire en degrés par minute ;
- La position de la barre en degrés ;
- La consigne machine en pourcentage.

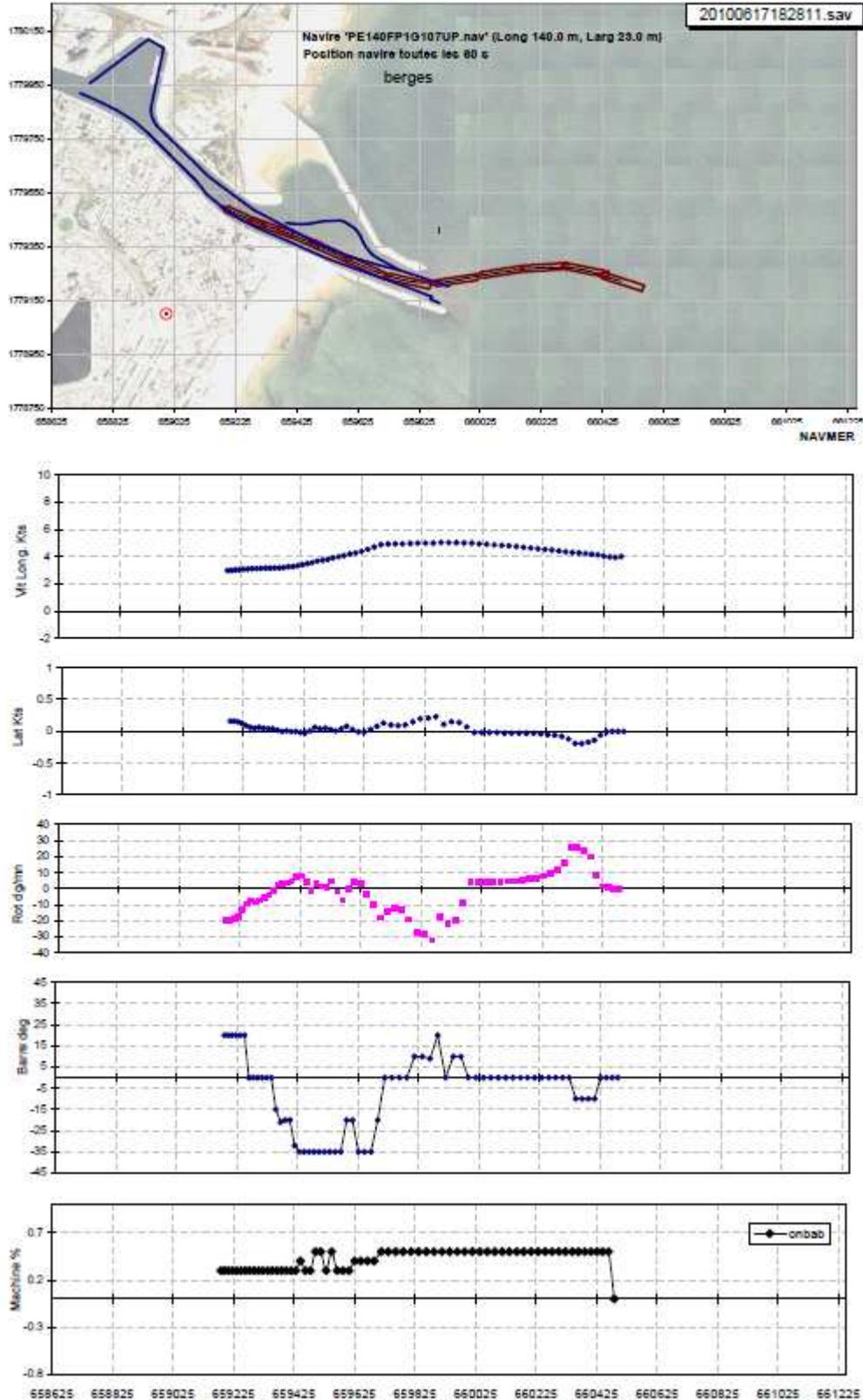
Cas 1 : Courant Sud→Nord (0,25 m/s) – effets de berges – présence des 2 bouées

Cas 2 : Courant Sud→Nord (0,5 m/s) – effets de berges – présence des 2 bouées

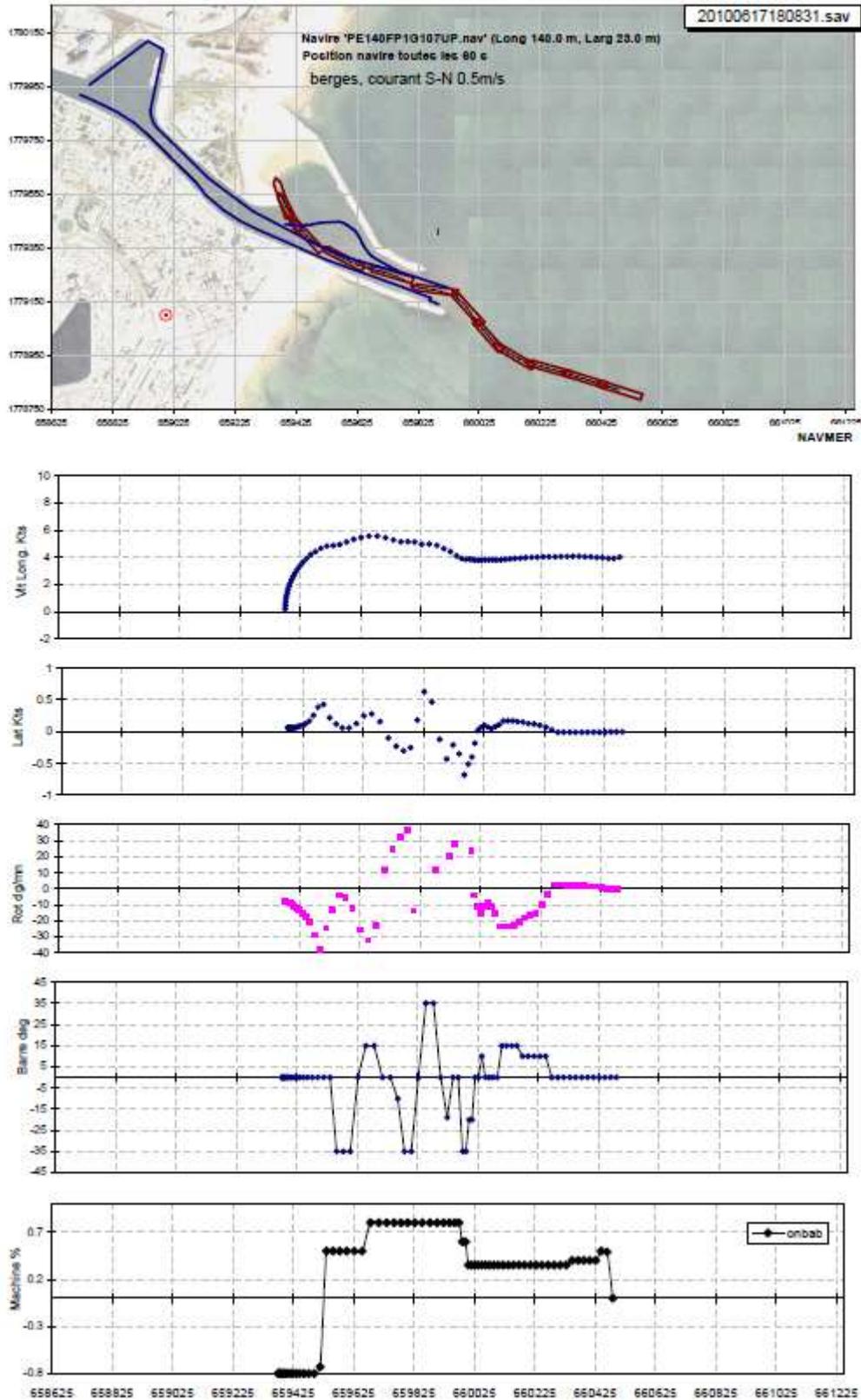
Cas 3 : Courant Sud→Nord (0,5 m/s) – effets de berges – présence des 2 bouées



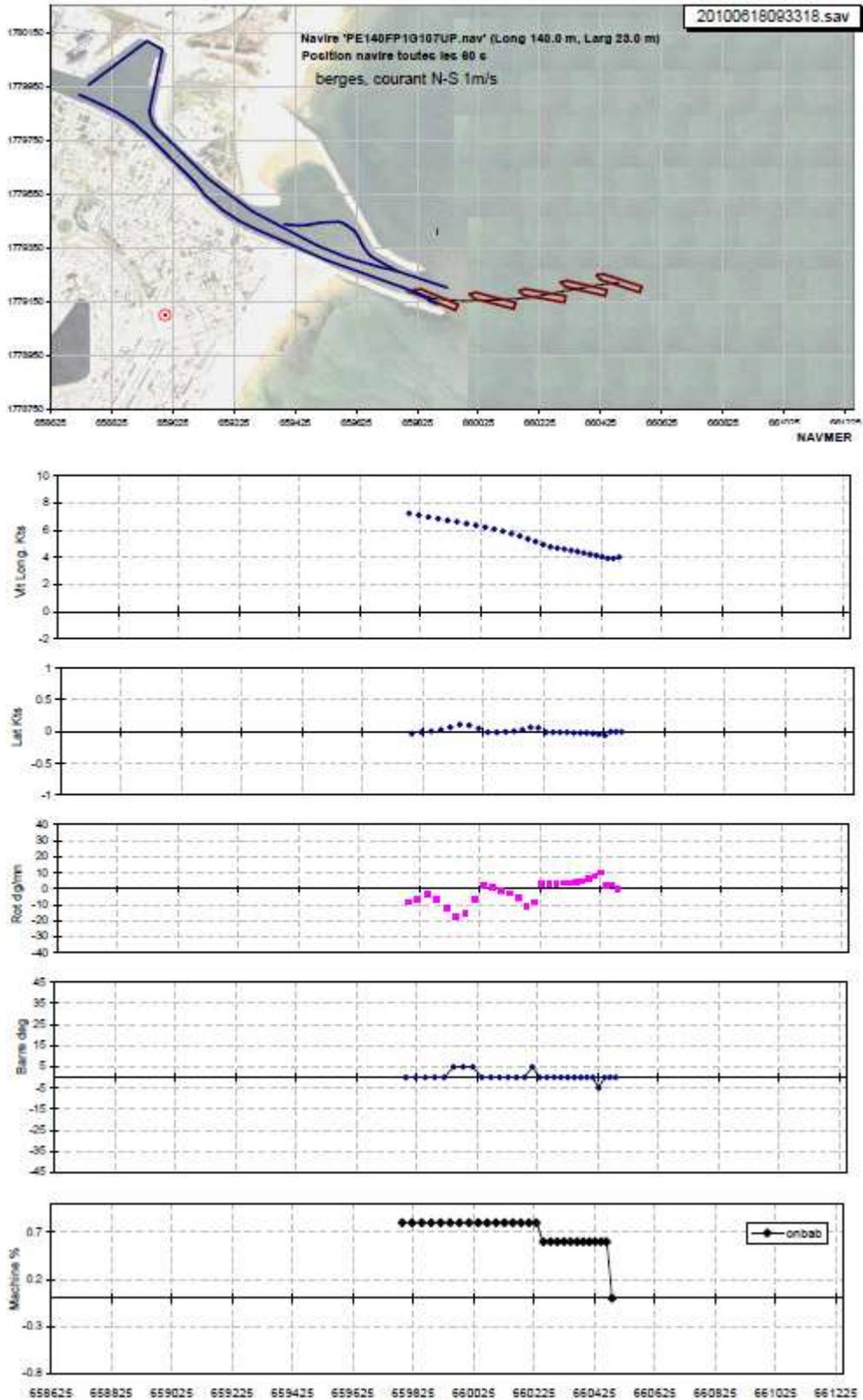
Cas 4 : Effets de berges



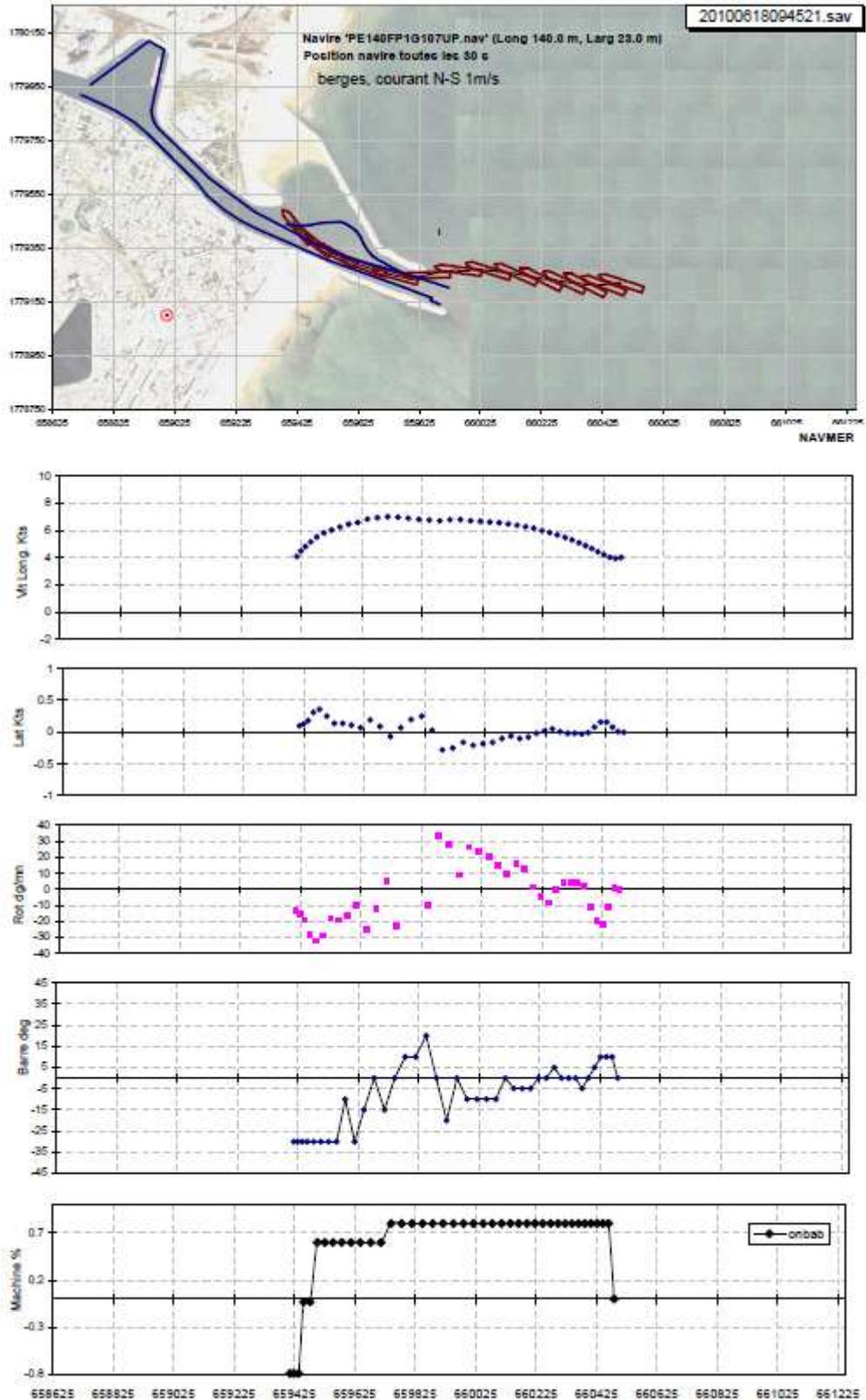
Cas 5 : Courant Sud→Nord (0,5 m/s) – effets de berges



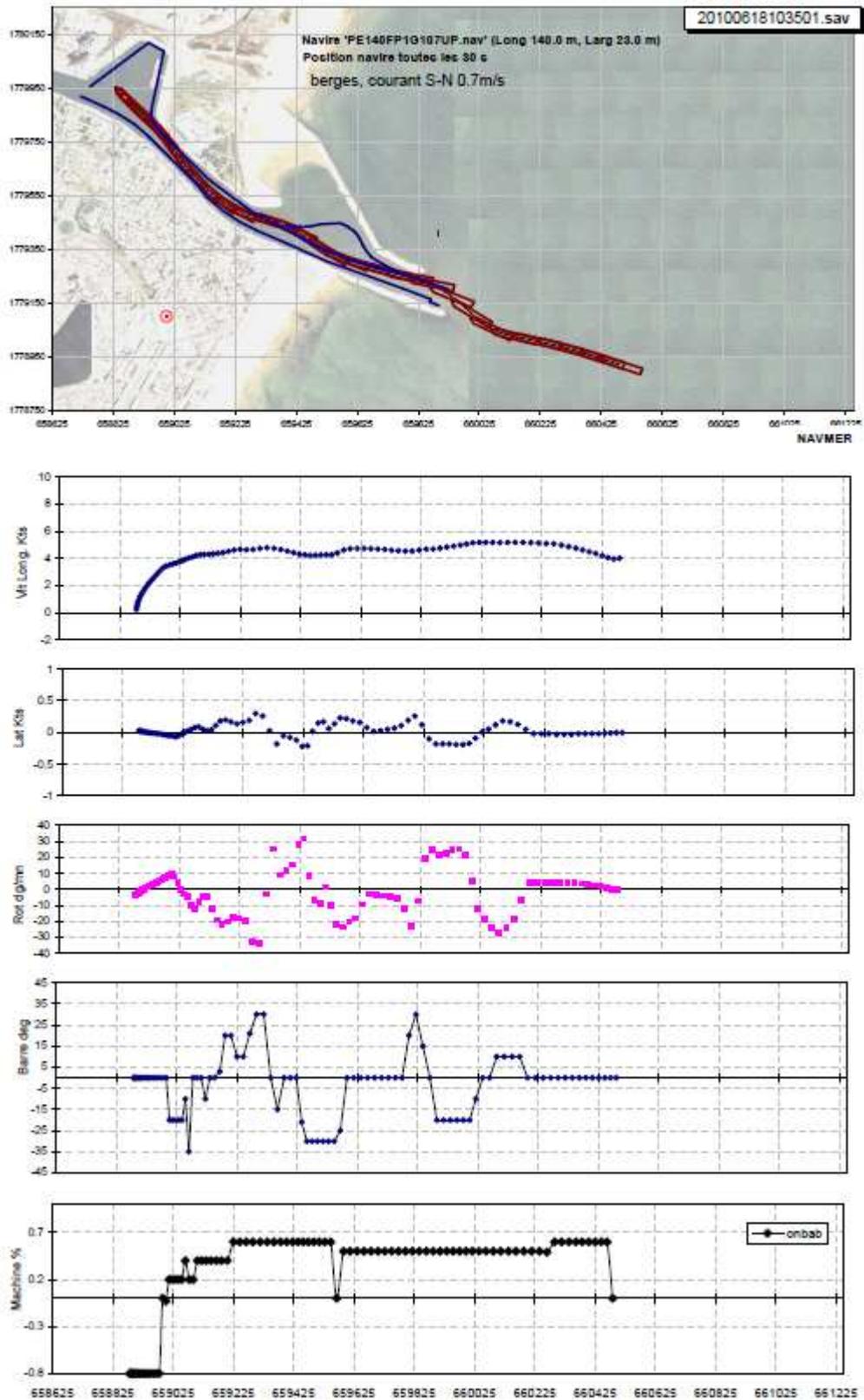
Cas 6 : Courant Nord→Sud (1,0 m/s) – effets de berges



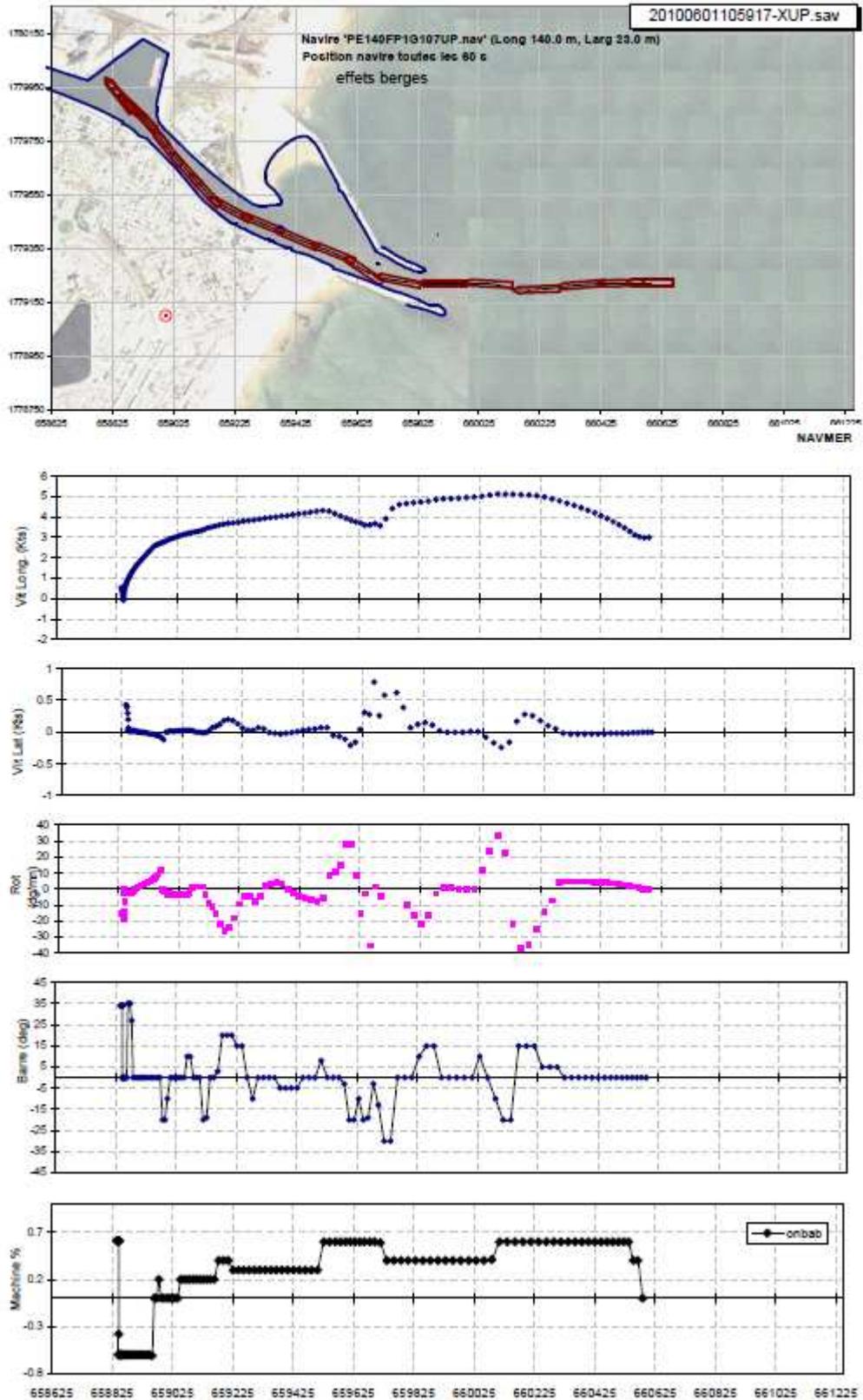
Cas 7 : Courant Nord→Sud (1,0 m/s) – effets de berges

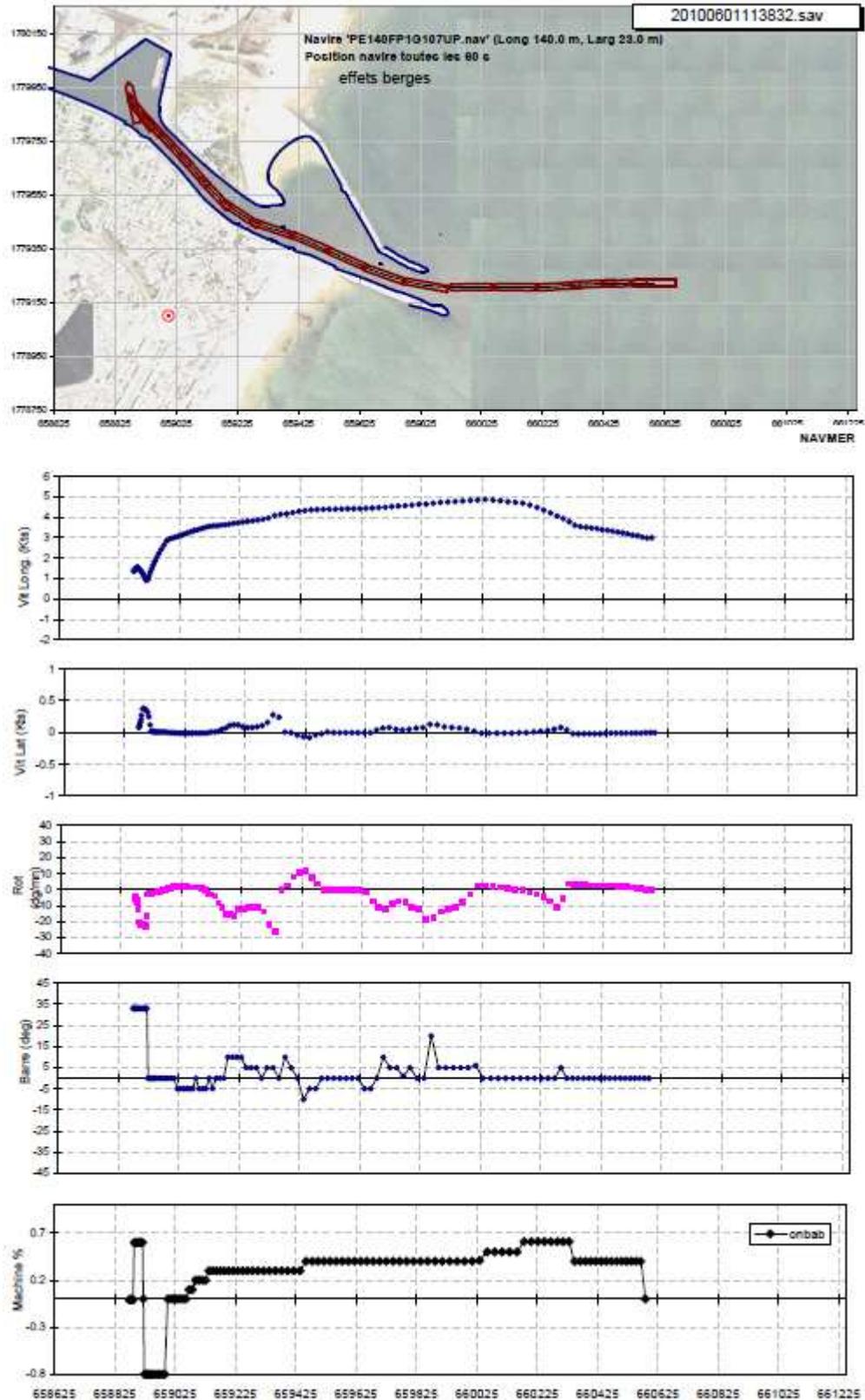


Cas 8 : Courant Sud→Nord (0,7 m/s) – effets de berges



Cas 9 : Effets de berges – présence des 2 bouées



Cas 10 : Effets de berges – présence des 2 bouées

6-3 Commentaires

Cas 1 : Courant Sud→Nord (0,25 m/s) – effets de berges – présence des 2 bouées

Le courant traversier est faible (0,25 m/s). Le navire entre à un peu moins de 5 nds. Un effet de berges le dérouté du chenal et sa trajectoire ne peut pas être corrigée : le navire sort du chenal en passant sur la deuxième bouée tribord.

Cas 2 : Courant Sud→Nord (0,5 m/s) – effets de berges – présence des 2 bouées

Le courant traversier est plus significatif (0,50 m/s). L'approche se fait donc plus au Sud. Le navire a une vitesse de plus de 5 nœuds dans la passe (pour contrer les effets du courant) et les corrections successives au niveau de la barre font que le bateau met par la suite plusieurs longueurs avant d'être stabilisé (trajectoire en "zigzag" dans le chenal). Le navire ne peut d'ailleurs pas éviter la deuxième bouée tribord.

Dans le chenal aval la vitesse est moindre (passage de 4 nœuds à 3 nœuds). A cette vitesse, seule une machine arrière à 80% permet au bateau de s'arrêter dans la darse pétrolière.

Cas 3 : Courant Sud→Nord (0,5 m/s) – effets de berges – présence des 2 bouées

Le navire est modélisé sortant du port depuis la darse pétrolière. A l'approche du casino un effet de berge significatif est ressenti et perturbe la trajectoire. A l'approche de la passe d'entrée le navire passe de 4,5 nds à 5,5 nds. Cette vitesse lui permet de s'écarter rapidement de la passe soumise à un courant traversier de 0,5 m/s.

***Remarque :** la manœuvre de sortie n'a été réalisée qu'une seule fois car jugée peu délicate par rapport à la manœuvre d'entrée dans le port.*

Cas 4 : Effets de berges

La limite du plafond a été ajoutée sur les vues graphiques du port : le chenal d'accès apparaît encore plus réduit.

Ce cas 4 permet de valider l'effet de berge : les consignes à la barre sont conséquentes afin de garder le navire dans le chenal.

Cas 5 : Courant Sud→Nord (0,5 m/s) – Effets de berges

Le navire est modélisé entrant dans le port avec un courant traversier du Sud vers le Nord à 0,5m/s. Le navire rentre à 5,5 nœuds, un essai d'arrêt est tenté dans l'avant port, sans succès (cf. [3]).

Cas 6 : Courant Nord→Sud (1 m/s) – Effets de berges

Le navire est modélisé entrant dans le port avec un courant traversier du Nord vers le Sud à 1m/s. Le navire est pris par le fort courant et il est déporté vers la Jetée Sud. La trajectoire ne peut pas être rectifiée.

***Remarque :** ce courant correspond aux valeurs maximales mesurées sur site et vraisemblablement à des conditions de non navigabilité au niveau de la passe.*

Cas 7 : Courant Nord→Sud (1 m/s) – Effets de berges

La même configuration que la précédente est reproduite. Le navire approche plus par le Nord avec une vitesse de 7 nœuds. Néanmoins il vient trop près de la Jetée Nord (sortie du chenal). Cet écart de trajectoire n'est pas rattrapé par la suite dans l'avant port malgré des commandes extrêmes à la barre. Enfin, le test d'arrêt d'urgence, entamé au niveau du casino avec une vitesse à 6 nœuds, ne permet pas au navire de s'arrêter avant d'heurter le môle (à près de 4 nœuds).

Cas 8 : Courant Sud→Nord (0,7 m/s) – Effets de berges

Le navire est modélisé entrant avec un courant du Sud vers le Nord à 0,7 m/s. L'entrée se fait à 5 nœuds, le navire met toujours du temps à retrouver une trajectoire "rectiligne".

Dans le chenal aval, la vitesse est progressivement descendue avant un test d'arrêt (passage de 3,5 nœuds à 0 nœuds) avec une machine arrière à 80 %.

Remarque : *une partie de l'approche a été réalisée en dehors du champ du courant si bien que ce dernier ne s'est fait ressentir qu'à une distance de la passe d'environ 2 longueurs de navire.*

Cas 9 et 10 : Effets de berges – présence des 2 bouées

Ces cas sont des cas de calage des effets de berge sans courant et en présence des 2 bouées tribord comme seuls repères. Ils sont représentatifs de conditions calmes d'approche des navires. On constate néanmoins avec le cas 9 les difficultés liés à la largeur du chenal qui engendrent des effets de berge et par conséquent des trajectoires délicates à rectifier.

Les principales constatations sur les simulations réalisées sont :

- Le comportement du navire modélisé dans la configuration actuelle (prise en compte du courant traversier, effets de berge, comportement hydrodynamique) est approuvé par les pilotes ;
- Pour les futures configurations projetées, le champ de courant devra être élargi et les effets de berge adaptés (au nouveau chenal) ;
- Les changements de commande au niveau de la barre permettent de rectifier en grande partie les trajectoires du navire : les bons paramétrages du gouvernail sont fondamentaux.

Note : *deux modélisations ont été essayées en présence du futur navire projet (160m x 27m x 9,5m). La largeur actuelle du chenal n'a pas permis de rendre les cas représentatifs, le navire est apparu en effet complètement canalisé par les effets de berge sans pouvoir être manœuvré. Ainsi aucune simulation supplémentaire n'a été faite sur la configuration actuelle en présence du futur navire projet car non réaliste.*

VII- ETUDE DES PHENOMENES DE RESONANCE

De manière générale, les “seiches ” sont provoquées par la résonance dans un bassin portuaire ou une baie d'une onde de période allant de quelques dizaines de secondes à plusieurs minutes. Cette période propre est principalement fonction des caractéristiques géométriques du domaine de résonance.

Afin d'évaluer les phénomènes de résonance actuels du port de Port la Nouvelle et pouvoir évaluer le comportement du plan d'eau en présence des futurs aménagements, le module SEICHE du code de calcul REFONDE, développé par le CETMEF (cf. 7.1 et annexe 5) a été utilisé.

L'objectif est d'évaluer les périodes propres et les amplifications relatives locales de la configuration actuelle : ces éléments permettront pour la suite de l'étude de vérifier que les configurations projetées améliorent les conditions de réponse du plan d'eau, ou au moins qu'elles ne soient pas plus défavorables.

Note : *les paramètres météorologiques pouvant entraîner des seiches (exciter les modes propres des plans d'eau) sont souvent complexes. Le manque de données sur le site et le peu d'observations recueillies ne permettent pas d'identifier avec certitude le (ou les) paramètre(s) qui ont engendrés les phénomènes qui ont été observés. Ils ne peuvent ainsi pas être modélisés. En revanche, les modes de résonance dépendent uniquement de la géométrie du port. Ils sont donc évalués avec précision. Les résultats permettent également d'estimer les amplifications relatives pour chaque période sensible et par conséquent les “zones à risques”.*

7-1 Description du modèle d'étude des seiches

Le module seiche (cf. annexe 5) est un code de calcul aux éléments finis. Il résout l'équation de Berkhoff modifiée. Il permet en particulier de calculer et d'isoler les modes propres des bassins ainsi que d'obtenir les hauteurs relatives d'agitation engendrées par une éventuelle mise en résonance de ce dernier.

7-2 Emprise du modèle

La modélisation proposée reprend l'ensemble du plan d'eau portuaire intérieur depuis la passe d'entrée jusqu'à la darse de pêche.

Une attention particulière a été portée à la darse pétrolière où des évènements particuliers (cf. Etude Bibliographique [1]) ont eu lieu en relation direct avec l'excitation harmonique du plan d'eau.

La figure suivante présente l'emprise du modèle qui a servi à l'étude des phénomènes de seiche dans le port.



Figure 38 : Emprise du modèle de résonance

7-3 Bathymétrie et maillage

La bathymétrie représentée correspond aux éléments pris en compte pour l'étude de l'agitation. Elle est présentée sur la figure suivante.

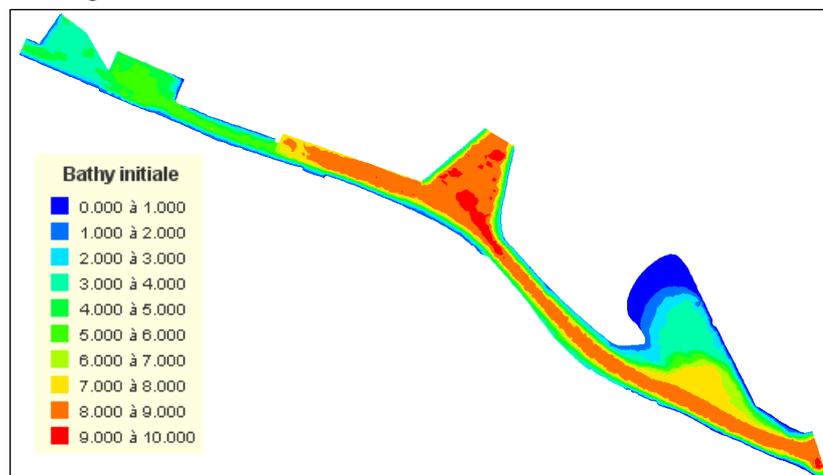


Figure 39 : Bathymétrie du modèle de résonance

Des mailles de 70 m ont été imposées à l'ensemble du domaine modélisé. Le maillage est présenté sur la figure suivante.

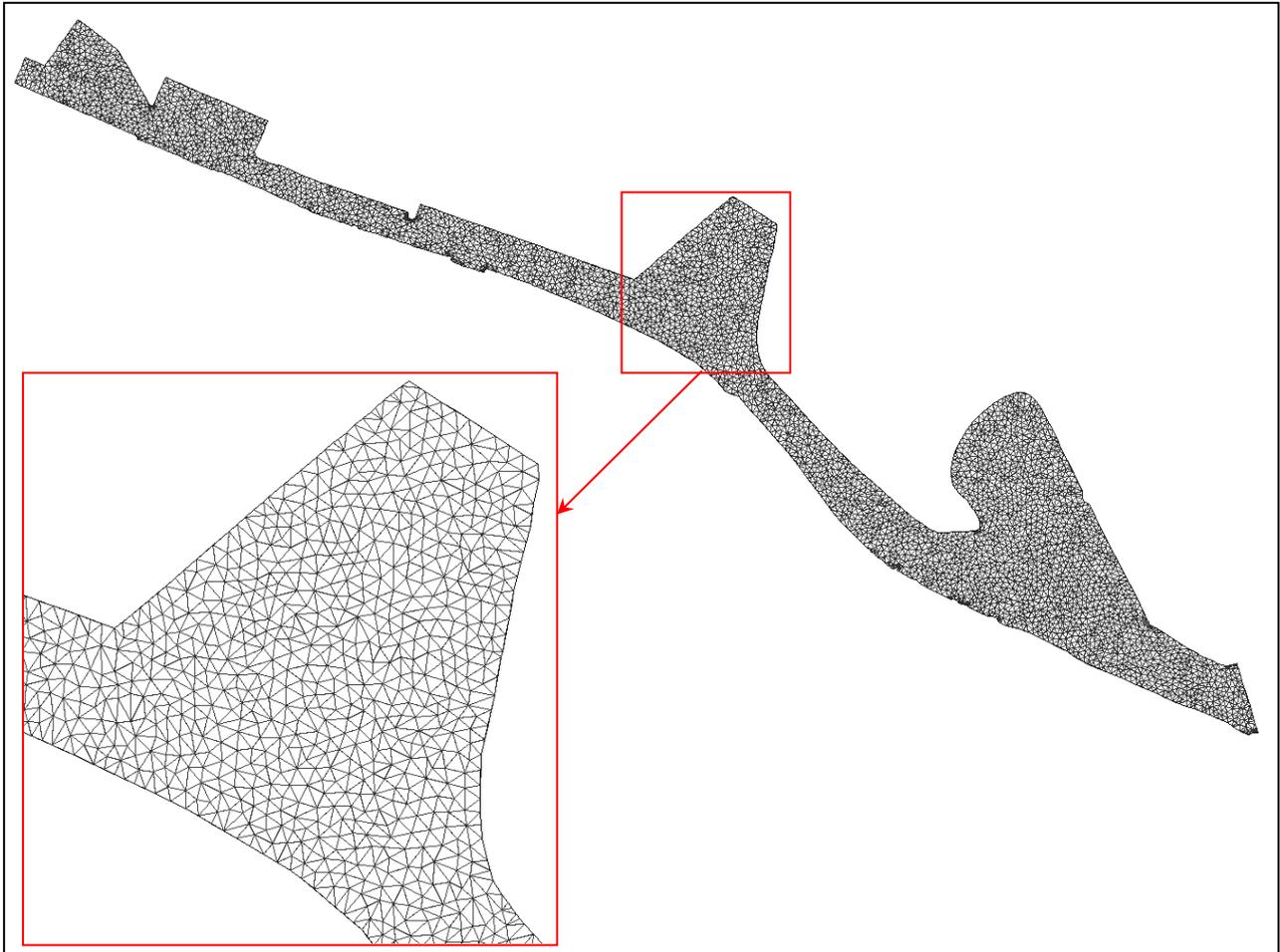


Figure 40 : Maillage du modèle de résonance

Remarque : les périodes associées aux phénomènes de seiches sont généralement très grandes. Par conséquent les longueurs d'ondes associées sont importantes. Par exemple, si l'on considère une profondeur de 6 m et des périodes de 20s et 50s, les longueurs d'ondes respectives associées sont de 150 et 380 m. Pour de telles valeurs, l'ensemble des ouvrages apparaissent réfléchissants.

7-4 Résultats de la modélisation

Dans un premier temps sont présentées les trente trois premiers modes de résonance du port ainsi que les périodes propres associées. Les tableaux qui suivent dans ce chapitre illustrent ainsi les valeurs calculées pour l'ensemble du modèle portuaire, avec une analyse plus particulière sur la darse pétrolière qui reste le point sensible du plan d'eau intérieur.

Certaines périodes propres sont qualifiées :

- Ajout d'une étoile (*) pour des valeurs apparaissant dans les études antérieures (cf. **[1]**) ;
- Caractérisation du type de sollicitation pour la zone de la darse pétrolière (longitudinal, transversal, ...)
- Les modes en bleu et en gras correspondent à une réponse particulièrement forte de la darse pétrolière (forte agitation relative).

Dans un deuxième temps, pour les périodes jugées sensibles (en particulier pour la tenue à quai), les représentations graphiques des facteurs d'amplification relative de la houle sont présentées.

7-4.1 Modélisation du port de Port la Nouvelle

Mode	Période propre associée (s)	Type de sollicitation dans la darse pétrolière
1	695.9	-
2	367.3	-
3	274.9	-
4	168.5	-
5	143.6	Longitudinale
6	121.5	-
7	108.3	-
8	88.4	-
9	81.5	Longitudinale
10	70.9	-
11	66.4	Longitudinale
12	63	-
13	59.8 *	Mixte
14	54.7	Longitudinale
15	53.3	-
16	49.4	Longitudinale
17	46.3	Transversale

Mode	Période propre associée (s)	Type de sollicitation dans la darse pétrolière
18	43.3	-
19	42.9	-
20	41.1	-
21	39.8	-
22	37.8	-
23	37.2	-
24	35.8	Longitudinale
25	34.2 *	-
26	34.1	-
27	33.6	-
28	31.7	-
29	31.1	-
30	30.2 *	Transversale
31	29.4	-
32	29	Mixte
33	28.6	-

Tableau 18 : Modes de résonance et périodes propres – Port de Port la Nouvelle

Remarque : les périodes de résonance supérieures à 2 minutes engendrent des phénomènes d'amplification sur des distances très grandes (plusieurs centaines de mètres). Ainsi pour ces premiers modes c'est l'ensemble du plan d'eau de la darse qui oscille et non une partie.

A la vue des valeurs calculées, nous pouvons ainsi citer comme périodes propres entraînant la mise en résonance de la darse pétrolière : **81.5s, 66.4s, 59.8s, 54.7s, 49.4s, 46.3s, 35.8s, 30.2s** et **29s**.

Pour ces périodes propres la darse pétrolière présente des modes de résonance longitudinaux (figure 42), transversaux (figure 41) ou bien mixtes (figure 43).

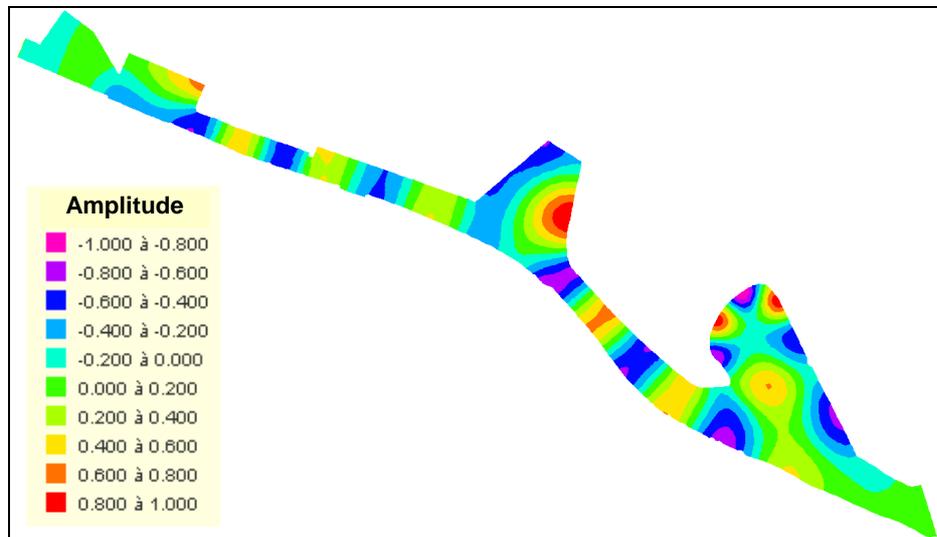


Figure 41 : Réséance transversale de la darse pétrolière – Mode 30 (30,2 s)

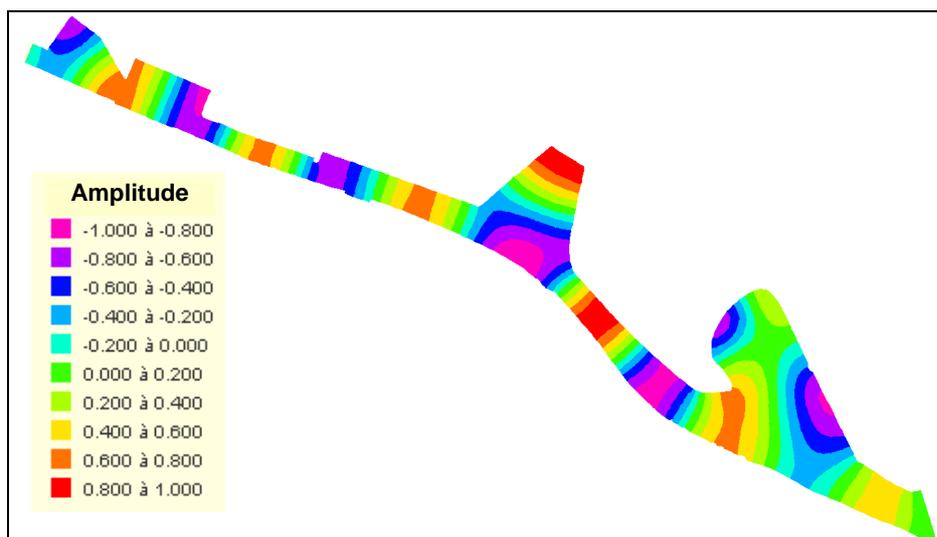


Figure 42 : Réséance longitudinale de la darse pétrolière – Mode 16 (49,4 s)

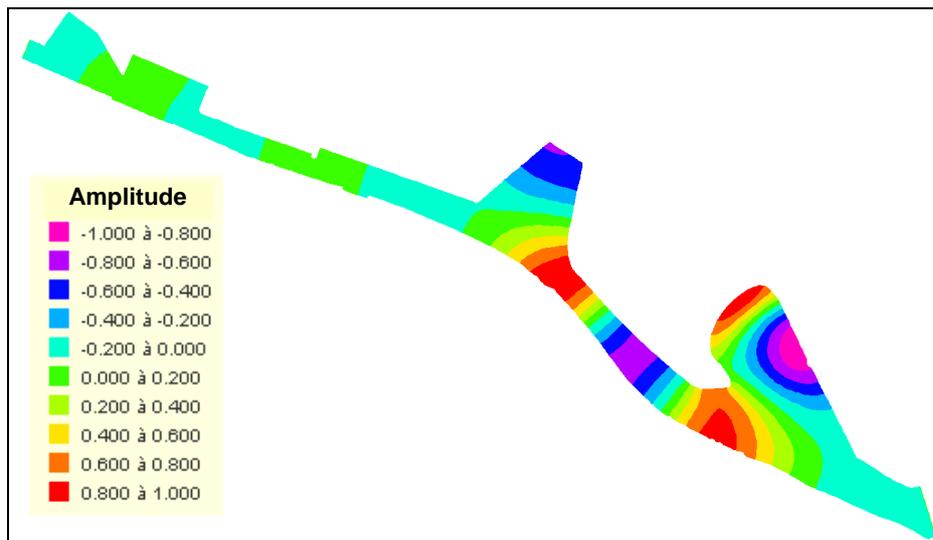


Figure 43 : Résonance mixte dans la darse pétrolière – Mode 13 (59,8 s)

7-4.2 Modélisations en présence du Thaïs

Afin de déterminer l'influence éventuelle d'un navire à quai dans la darse pétrolière, le phénomène de résonance a été modélisé en présence du Thaïs au poste D4.

Les résultats des 25 premiers modes de résonance et les périodes propres associées sont présentés dans le tableau 18 de la page suivante. Ces nouvelles valeurs sont comparées à celles précédemment trouvées.

Remarque : Le Thaïs est considéré dans l'étude comme un volume modifiant le contour extérieur du port. Cette modélisation amène essentiellement une réduction de la largeur de la darse pétrolière.

Mode	Période propre associée (s)	Delta (%) Ecart relatif avec les périodes propres associés au port sans navire	Type de sollicitation dans la darse pétrolière
1	680.4	2.2%	
2	366.1	0.3%	
3	272.3	0.9%	
4	169.3	0.5%	
5	142.5	0.8%	
6	121.2	0.2%	-
7	108.5	0.2%	-
8	89.1	0.8%	-
9	81.2	0.4%	Longitudinale
10	70.8	0.1%	-
11	68.8	3.6%	Longitudinale
12	63	0.0%	-
13	60.1 (*)	0.5%	Mixte
14	55.6	1.6%	Longitudinale
15	53.5	0.4%	-
16	50.1	1.4%	Longitudinale
17	46.4	0.2%	Transversale
18	43.5	0.5%	-
19	42.9	0.0%	-
20	41.1	0.0%	-
21	39.9	0.3%	-
22	37.7	0.3%	-
23	37.2	0.0%	-
24	36.1	0.8%	Longitudinale
25	34.1 (*)	0.3%	-

Tableau 19 : Modes de résonance – Bassin portuaire en présence du THAIS

Les modes de résonance du bassin portuaire de Port-La-Nouvelle et leurs périodes propres associées ne diffèrent que très peu suivant la présence ou non d'un navire à quai (écart maximum de l'ordre de 3.5%). Les amplifications relatives observées sont également très voisines comme l'illustre les deux figures suivantes (à comparer avec les figures 42 et 43 précédentes).

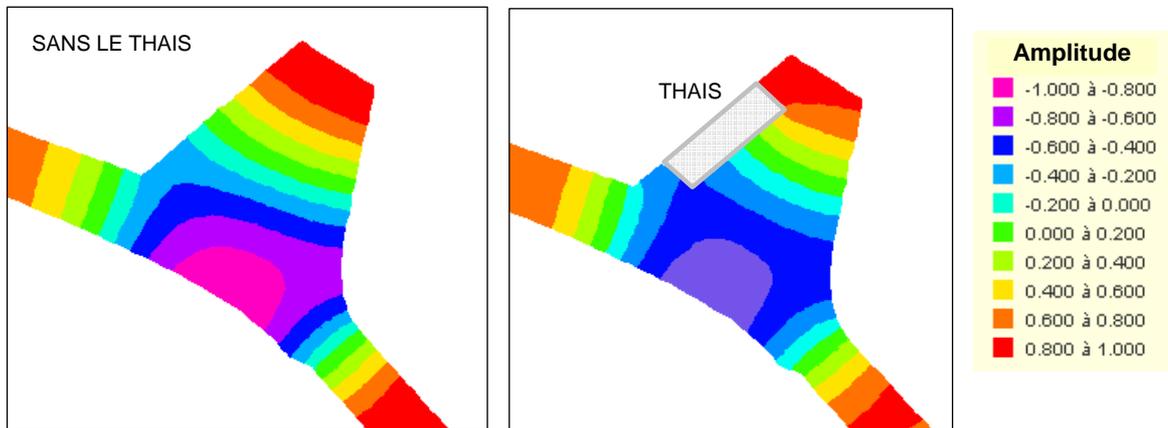


Figure 44 : Résonance longitudinale, présence du Thaïs – Mode 16 (50,1 s)

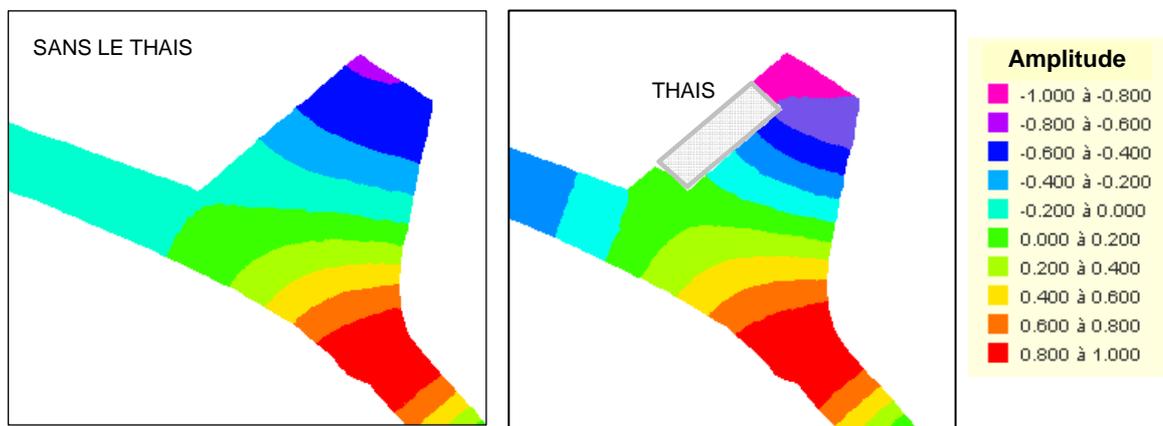


Figure 45 : Résonance mixte, présence du Thaïs – Mode 13 (60,1 s)

7-5 Comparatif avec les données bibliographiques et les observations

Rappel des données bibliographiques

Les points suivants ont été identifiés lors de l'examen des études précédentes :

- L'étude EDF précise la présence de pics marqués entre 30 s et 55 s dans le chenal. Une période propre de 86 s correspondant à un mode de résonance longitudinal dans la darse pétrolière est mise en avant. Une résonance transversale dans la dite darse apparaît pour une période propre de 30 s.
- IX SURVEY dénote une période d'excitation principale autour de 60 s dans la darse pétrolière.
- Le BCEOM cerne les périodes propres suivantes dans le port : 7.5 s, 13 s, 20 s et 34.5 s. En parallèle il calcule les modes propres de la darse seule, sans tenir compte du reste du port. Elles sont théoriquement autour de 12.4 s, 13.7 s, 21.3 s, 28,6 s.

L'ensemble de ces études est présenté dans la synthèse bibliographique [1]. Sont également présentés les références associées.

Rappel des observations sur site

Les observations sur site du 8 décembre 1953 font état d'oscillation dont l'amplitude est de l'ordre de 0,6 à 0,8 m et de périodes de l'ordre de 80 s, 160 s et 240 s. A noter qu'à cette époque la configuration du port était différente de celle étudiée.

Les dernières observations des usagers (3 décembre 2003 et nuit du 16 février 2010) font état de deux incidents au niveau de la darse pétrolière : poste D4 et poste D2. Les amplitudes étaient de l'ordre du mètre et la période de quelques dizaines de secondes. Les usagers du port ont également noté que le phénomène concerne l'ensemble du port même si les incidents les plus préjudiciables ont eu lieu au niveau de la darse pétrolière.

Ces phénomènes sont plus précisément décrits dans l'étude bibliographique [1].

Bilan

Le mode de résonance transversal isolé par EDF autour d'une période de 30 s est retrouvé dans les modélisations réalisées avec REFONDE. De plus, le pic de résonance longitudinal, présenté autour de 86s par EDF, se retrouve pour une période de 81 s.

Comme pour l'étude IX SURVEY, une période d'excitation proche de 60 s se manifeste pour le bassin.

Les périodes propres isolées par le BCEOM correspondent à des périodes plus proches d'un phénomène de houle (périodes inférieures à 20 s). Ainsi seule la plus grande période calculée (34,5 s) est voisine des faibles valeurs présentées ci-dessus.

Les résultats numériques concordent également avec les différentes observations : des périodes proches de 80 s, 160 s et plusieurs minutes peuvent être observées. En ce qui concerne les amplitudes observées, les résultats présentés ne permettent que d'avoir les amplitudes relatives : les hauteurs peuvent être très fortes dans le port mais elles demeurent proportionnelles au phénomène qui les génère, ce dernier n'est malheureusement pas connu à ce jour avec précision.

Néanmoins, on peut noter que des ventres d'agitation existent pour certaines périodes propres dans la darse pétrolière avec des longueurs d'onde susceptibles de générer des mouvements de navires au niveau des quais D4 ou D2.

7-6 Conclusion

Le port de Port-La-Nouvelle, et plus particulièrement sa darse pétrolière, présente une sensibilité remarquable aux phénomènes de seiches. Cette sensibilité s'étale sur une gamme fréquentielle allant de 0.012 Hz à 0.035 Hz (correspondant à un intervalle de période de **[28 s - 82 s]**).

Les principaux modes engendrant une agitation conséquente dans la darse pétrolière, et éventuellement pénalisante pour la tenue des navires à quai se retrouvent pour des périodes de : **81.5 s, 66.4 s, 59.8 s, 54.7 s, 49.4 s, 46.3 s, 35.8 s, 30.2 s et 29 s.**

Ces périodes propres correspondent à des modes de résonance longitudinaux, transversaux ou bien mixtes.

Enfin, la présence d'un navire à quai est négligeable en termes d'impact sur le phénomène de résonance.

Il est important de noter que l'ensemble du port est soumis à des modes de résonance avec des amplifications locales réparties suivants les modes. En particulier, l'avant-port apparaît sensible aux phénomènes de seiche.

Rappel : les résultats présentés ci-dessus seront comparés avec les futures configurations projetées.

Annexe 1 :
LOGICIEL TELEMAC
MODULE TOMAWAC
(propagation)



OCEANIDE
Port de Brégaillon - B.P. 63
83 502 La Seyne sur Mer Cedex

Tél. : 04 94 10 97 40
Fax : 04 94 94 42 27
E-Mail : oceanide@wanadoo.fr

OUTILS DE CALCULS

MODELE DE REFRACTION « TOMAWAC »

Descriptif :

Le logiciel TOMAWAC permet de modéliser la propagation de la houle réelle (irrégulière) du large vers la côte.

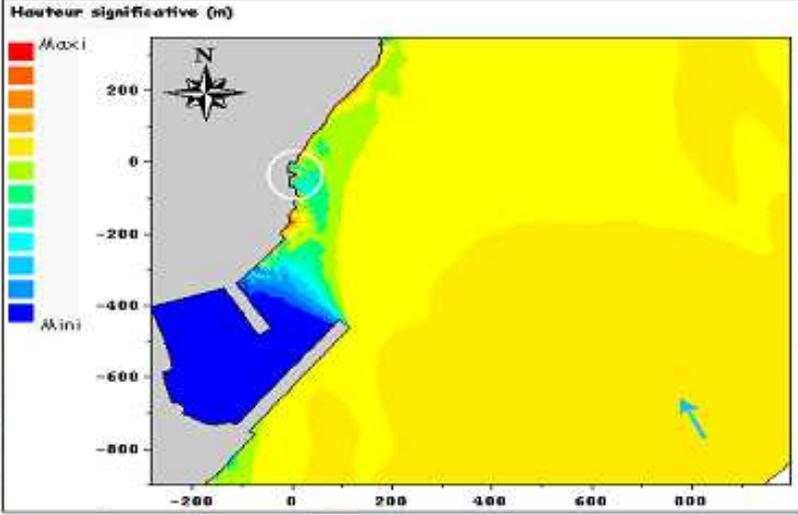
Il est basé sur une structure en éléments finis et est intégré à la bibliothèque des codes numériques d'hydraulique à la surface libre du système TELEMAC du Laboratoire National d'Hydraulique.

Les phénomènes physiques modélisés sont : la réfraction, le shoaling, la génération d'énergie par le vent (supposé stationnaire), la dissipation par frottement sur le fond et par déferlement dû à la bathymétrie.

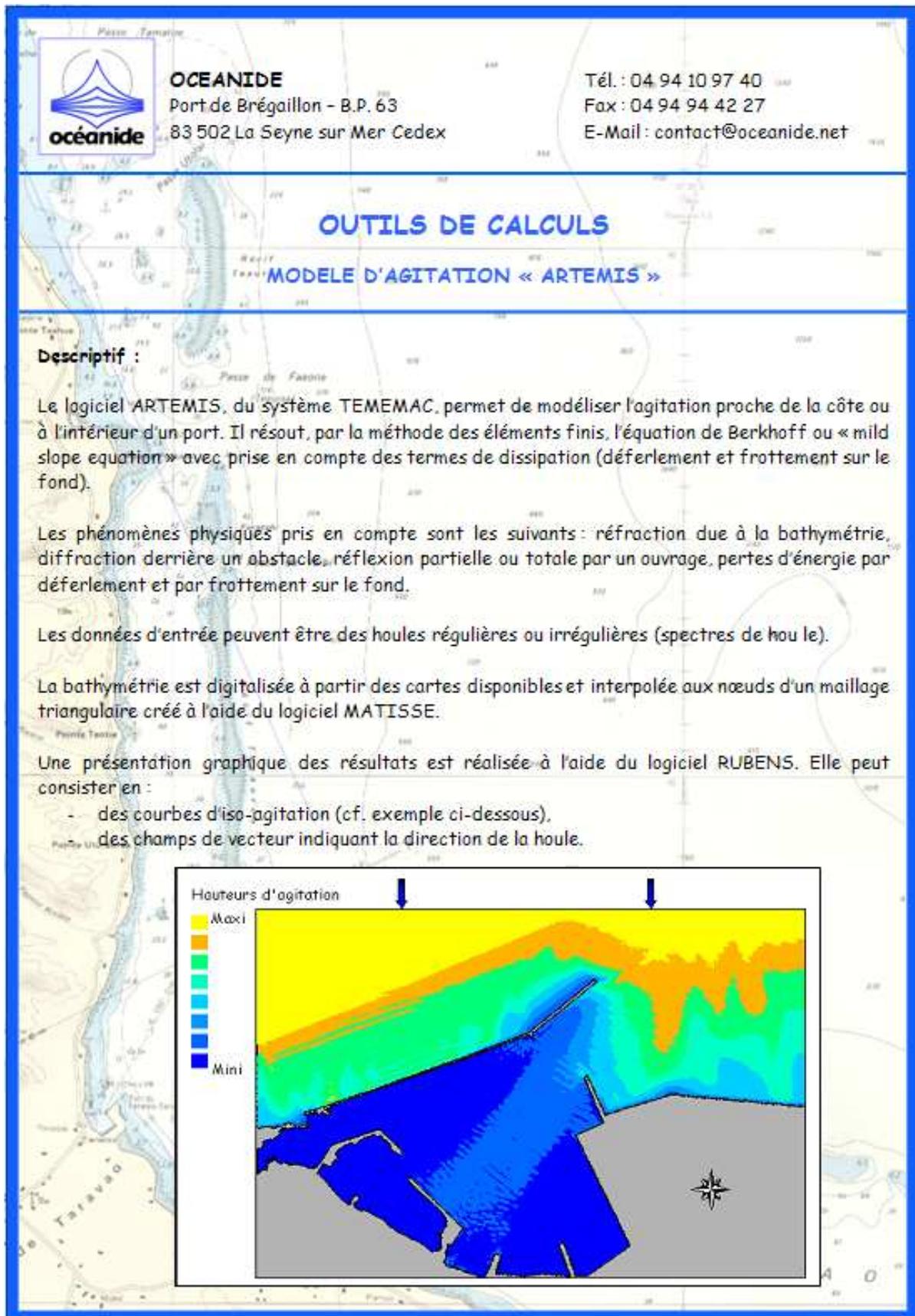
La bathymétrie est digitalisée à partir des cartes disponibles et interpolée aux nœuds d'un maillage triangulaire créé à l'aide du logiciel MATISSE.

Une présentation graphique des résultats est réalisée à l'aide du logiciel RUBENS. Elle peut consister en :

- des courbes d'iso-hauteurs (cf. exemple ci-dessous),
- des champs de vecteur indiquant la direction de la houle,
- des plans de vagues présentant les iso-phases.



Annexe 2 :
LOGICIEL TELEMAC
MODULE ARTEMIS
(agitation)



 **OCEANIDE**
Port de Brégaillon - B.P. 63
83 502 La Seyne sur Mer Cedex

Tél. : 04 94 10 97 40
Fax : 04 94 94 42 27
E-Mail : contact@oceanide.net

OUTILS DE CALCULS

MODELE D'AGITATION « ARTEMIS »

Descriptif :

Le logiciel ARTEMIS, du système TEMEMAC, permet de modéliser l'agitation proche de la côte ou à l'intérieur d'un port. Il résout, par la méthode des éléments finis, l'équation de Berkhoff ou « mild slope equation » avec prise en compte des termes de dissipation (déferlement et frottement sur le fond).

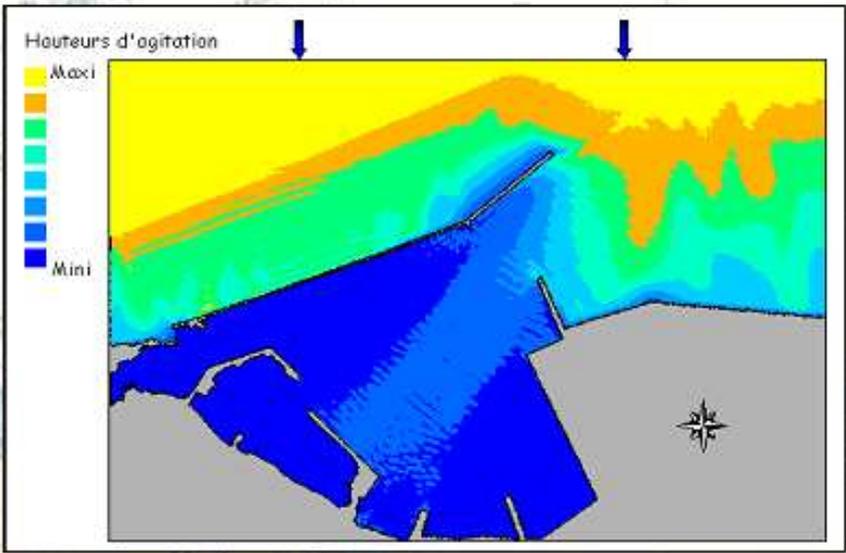
Les phénomènes physiques pris en compte sont les suivants : réfraction due à la bathymétrie, diffraction derrière un obstacle, réflexion partielle ou totale par un ouvrage, pertes d'énergie par déferlement et par frottement sur le fond.

Les données d'entrée peuvent être des houles régulières ou irrégulières (spectres de houle).

La bathymétrie est digitalisée à partir des cartes disponibles et interpolée aux nœuds d'un maillage triangulaire créé à l'aide du logiciel MATISSE.

Une présentation graphique des résultats est réalisée à l'aide du logiciel RUBENS. Elle peut consister en :

- des courbes d'iso-agitation (cf. exemple ci-dessous),
- des champs de vecteur indiquant la direction de la houle.



Annexe 3 :
LOGICIEL TELEMAC
MODULE TELEMAC 2D
(courantologie)



OCEANIDE
Port de Brégaillon - B.P. 63
83 502 La Seyne sur Mer Cedex

Tél. : 04 94 10 97 40
Fax : 04 94 94 42 27
E-Mail : contact@oceanide.net

OUTILS DE CALCULS

MODELE DE COURANTOLOGIE « TELEMAC 2D »

Descriptif :

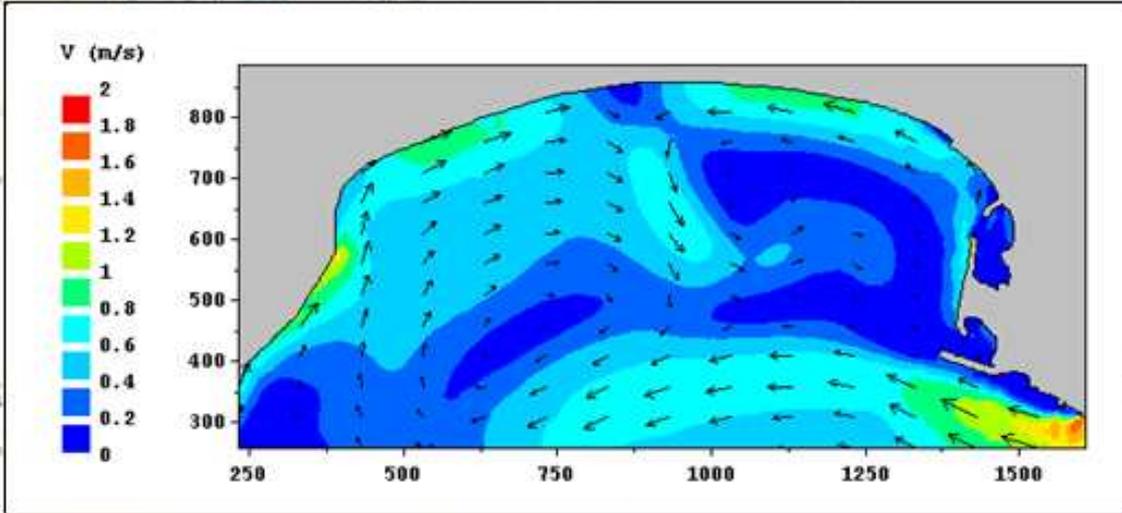
Le logiciel TELEMAC 2D permet de modéliser Les courants de marée et/ou de houle. Il résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions d'espaces horizontales et est intégré à la bibliothèque des codes numériques d'hydraulique à la surface libre du système TELEMAC du Laboratoire National d'Hydraulique.

Les phénomènes physiques modélisés sont : la propagation des ondes longues, les frottements sur le fond, l'influence des phénomènes météorologiques, les écoulements torrentiels et fluviaux, les bancs découvrant, les zones de seiche et la prise en compte des courants de houle.

La bathymétrie est digitalisée à partir des cartes disponibles et interpolée aux nœuds d'un maillage triangulaire créé à l'aide du logiciel MATISSE.

Une présentation graphique des résultats est réalisée à l'aide du logiciel RUBENS. Elle peut consister en :

- des courbes d'iso-hauteurs présentant le niveau de la surface libre (cf. exemple ci-dessous),
- des courbes d'iso-hauteurs présentant la vitesse des courants,
- des champs de vecteur indiquant la direction et l'intensité des courants.



Annexe 4 :
LOGICIEL TELEMAC
MODULE SISYPHE
(sédimentologie)



OCEANIDE
Port de Brégaillon - B.P. 63
83 502 La Seyne sur Mer Cedex

Tél. : 04 94 10 97 40
Fax : 04 94 94 42 27
E-Mail : contact@oceanide.net

OUTILS DE CALCULS

MODELE DE SEDIMENTOLOGIE « SISYPHE »

Descriptif :

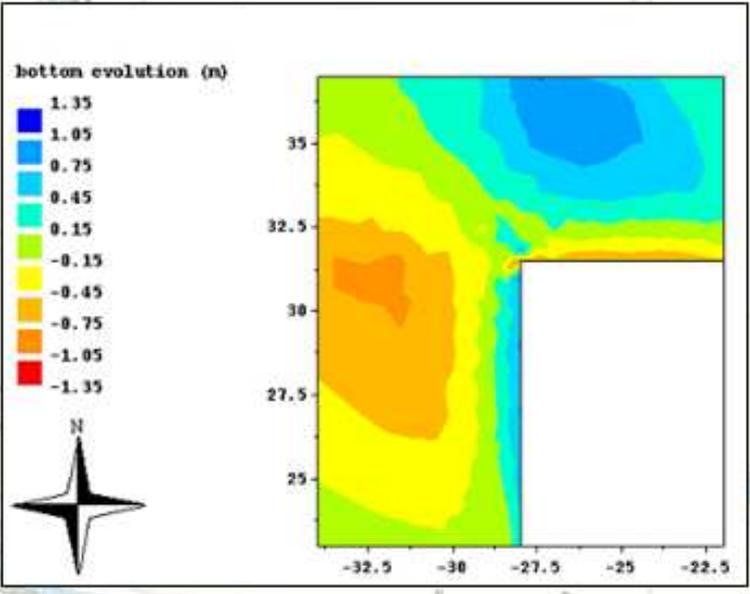
Le modèle de sédimentologie SISYPHE est un code bidimensionnel horizontal qui calcule le transport par charriage ou le transport sédimentaire sous l'action des courants et de la houle.

Il s'applique à des sédiments cohésifs et non cohésifs, représentés par une granulométrie variable, pour une gamme de diamètres allant des vases à 4 mm.

Les données d'entrée peuvent être des houles irrégulières (spectres de houle) et/ou vitesse de courant.

La bathymétrie est digitalisée à partir des cartes disponibles et interpolée aux nœuds d'un maillage triangulaire créé à l'aide du logiciel MATISSE.

Les représentations graphiques des résultats sont réalisées à l'aide du logiciel RUBENS.

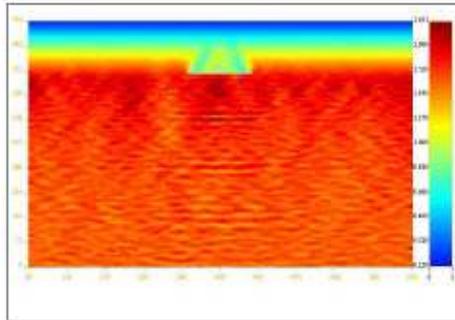


Annexe 5 :
LOGICIEL REFONDE
(résonance)

Hydraulique et environnement



Fudaa-Refonde associe un pré-traitement au logiciel de houle REFONDE 2.2. La finalité est de déterminer le champ de hauteurs de la houle, servant au dimensionnement des ouvrages portuaires.

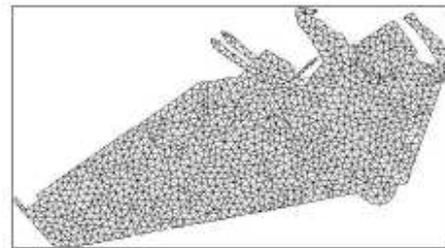


Brise-lames submersible, houle aléatoire provenant du sud, déferlement selon le critère de Miche

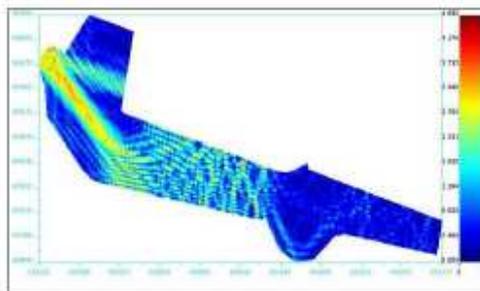
REFONDE est un code de calcul aux éléments finis qui résout l'équation de Berkhoff prenant en compte les phénomènes de diffraction, réfraction et réflexion.

La version 2.2 traite les digues transmissibles, propose 5 critères de déferlement. La houle est monochromatique ou aléatoire associée à un spectre de type Jonswap.

Fudaa-Refonde utilise le maillage Dunes. Il propose 2 méthodes : la première comporte un critère sur l'aire maximale des éléments, la seconde réalise un maillage paramétré en fonction de la profondeur d'eau.



Exemple de maillage sur le port de Brest.



Port du Havre, incidence de houle 320°Nord

REFONDE 2.2 permet de modéliser les courants induits par la houle. Couplé au code de courantologie REFLUX, il permet de calculer les courants générés par la houle grâce aux contraintes de radiation.

Le module Seiche est un complément de Fudaa-Refonde pour le calcul de l'agitation due à la houle dans les ports, les diffractions et réflexions multiples, houle régulière et irrégulière.

Développement futurs

Il est prévu de prendre en compte les effets du courant sur la houle ainsi que l'influence de fonds plus pentus. Des conditions aux limites d'ordre 2 pour les frontières ouvertes seront aussi développées pour améliorer la précision des résultats.

Il est enfin envisagé des travaux de parallélisation du solveur pour pouvoir traiter des maillages plus grands en utilisant des multi-processeurs ou des grappes de PC.

Contact : pierre.debaillon@equipement.gouv.fr

Annexe 6 :
LOGICIEL NAVMER
(navigabilité)



NAVMER

C.E.T.M.E.F

SIMULATEUR DE TRAJECTOIRES DE NAVIRES

Fournir des aides et des conseils aux acteurs qui localement ont la charge de rendre la navigation plus sûre et plus fonctionnelle, est à l'origine du développement par le CETMEF d'un simulateur de manoeuvres fonctionnant sur un ordinateur portable.

La prédiction de manoeuvres d'un navire est essentielle pour prévenir les accidents, définir des aides à la navigation et améliorer des infrastructures maritimes et fluviales. Pour des impératifs de qualité, l'ambition du modèle logiciel développé s'apparente à celle décrite dans le projet conçu au VTT Manufacturing Technology et à l'université d'Helsinki : concevoir, fabriquer, tester, former le personnel navigant et valider la manoeuvrabilité d'un navire grâce à l'ordinateur, avant que la première tôle n'ait été découpée !

Quatre exemples d'actions développées durant l'année 2000 illustrent la démarche.

LE SIMULATEUR

Le modèle NAVMER calcule les efforts sur un navire à partir de ses caractéristiques, des ordres du pilote, du site, du vent et du courant.

Les ordres (barre, machine), transmis à un clavier alphanumérique (figure 1) permettent au navire simulé de se déplacer.

Les résultats (trajectoire, vitesse) et les ordres sont sauvegardés, comparés, analysés et édités.

Les résultats d'expériences en mer correspondent à ceux calculés avec NAVMER pour des navires conventionnels et des navires à grande vitesse.

Les formulations utilisées synthétisent des études réalisées en bassin de carènes et des adaptations au réel.

Config
(Vent, courant,...)

Navire

Battu à 30 degrés tribord...

Ordres

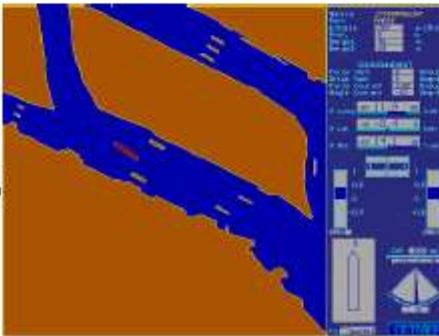


Figure 1 : Représentation du déplacement du navire

En présentant les résultats utiles à une prise de décision sous une forme adaptée aussi bien aux navigants (Stations de Pilotage, Compagnies de Navigation) qu'aux concepteurs d'ouvrages (DDE, Ports Autonomes, Services de Navigation), NAVMER permet de développer une approche d'ensemble.

SIMULATIONS D'UN BATEAU A PASSAGERS A PARIS

La sécurité repose sur l'aptitude des pilotes, les équipements des navires, l'application de la réglementation et la définition d'aides à la navigation.

La croissance du trafic et l'hétérogénéité des équipements des navires sont des sujets de préoccupation pour le Service de Navigation de la Seine (SNS).

Les simulations ont été faites avec un bateau à passagers de 60 m et trois débits de la Seine.

Deux pilotes du SNS ont « descendu et remonté la Seine » entre le pont du Carrousel au Pont d'Austerlitz.

Dix zones à risques (figure 2) ont été repérées. L'origine des difficultés (délais de réactions, effets de lacet et de dérive) notamment dans le bras Marie (figure 3), a été détaillée et commentée par les pilotes.

Il en est ressorti la nécessité de déterminer les trajectoires (espaces balayés) en corrélation avec les ordres donnés (évaluation de la précision des simulations) et de définir les risques (un risque = probabilité x dommages).

Ainsi, pourront être qualifiés les risques (intolérables, significatifs et négligeables).

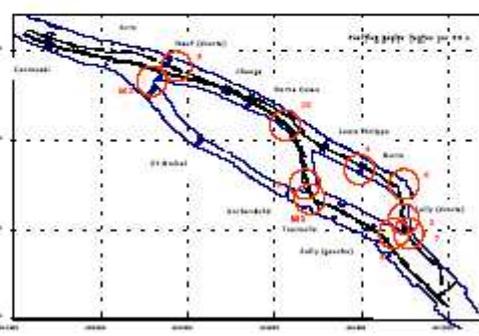


Figure 2 : Les zones à risque (cercles en rouge)

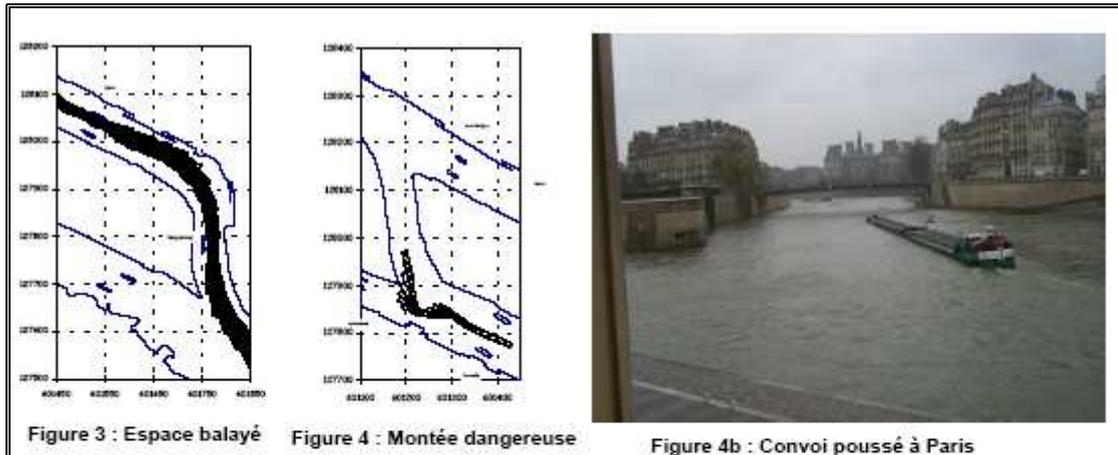


Figure 3 : Espace balayé

Figure 4 : Montée dangereuse

Figure 4b : Convoi poussé à Paris

LE HAVRE PORT 2000 : NAVIGABILITE DES PLANS D'EAU EXTERIEURS

Cette étude complète celle faite l'année précédente avec les mêmes partenaires (le Port Autonome du Havre et la Station de Pilotage du Havre-Fécamp), où avait été examinée la possibilité d'allonger le quai d'Osaka pour augmenter le nombre de postes à quai. Le porte-conteneurs (320 m de long et 43 m de large) avec ses propulseurs latéraux avant et arrière pouvant développer une poussée de 30 tonnes est aidé de remorqueurs au moment de l'accostage et de l'évitage pour contrer les forces considérables (70 tonnes pour un vent de 60 km/h) s'exerçant sur 5660m² de « voilure ». Des directions de vent défavorables (principalement NE et SW) ont été choisies pour les simulations.



Figure 5 : Porte-conteneurs

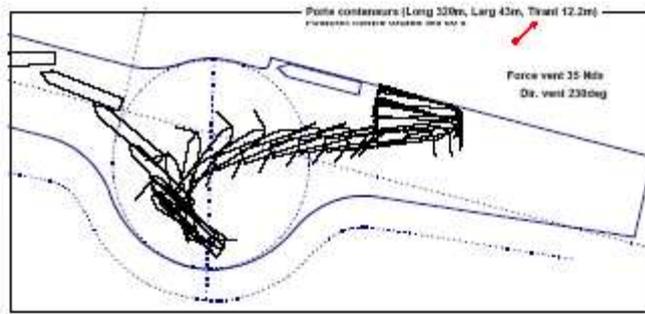


Figure 6 : Appareillage (traits représentant l'action des remorqueurs)

Une campagne de simulations est prévue prochainement avec un nouveau champ de courant fourni par le Port Autonome du Havre. Les calculs de courant sont effectués par la SOGREAH.

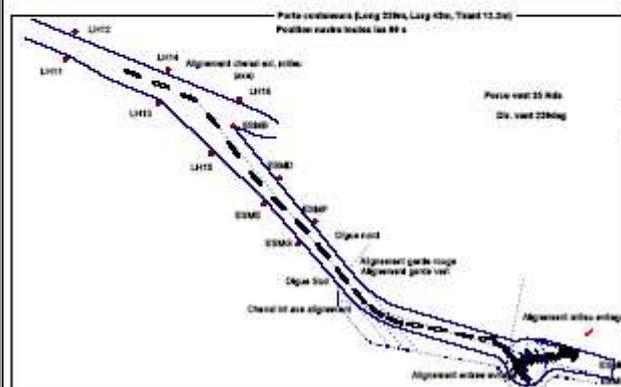


Figure 7 : Sortie par vent de 35 nœuds de Nord Ouest

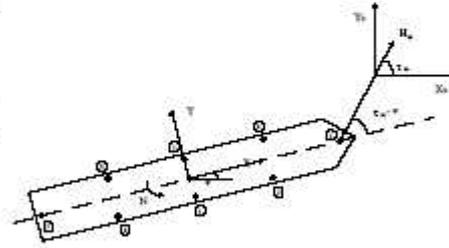


Figure 8 : Points d'attache des haussières

L'action des remorqueurs est schématisée par des forces (50 tonnes maximum) pouvant être appliquées au navire en 8 points. Quatre remorqueurs peuvent travailler simultanément.

SIXIEME FRANCHISSEMENT SUR LA SEINE

La Direction Départementale de l'Équipement de Seine Maritime envisage la construction d'un pont. Muni de deux piles, celui-ci diminue la largeur de la voie navigable et modifie le courant dans la courbe où il est situé (vitesse accrue de 20% entre les piles).

Quelle est l'incidence des piles sur la navigabilité des paquebots ?

Quelle perturbation apportera l'ouvrage sur le transport de marchandises, en particulier le passage des convois poussés ?

Des réponses à ces questions peuvent être données en déterminant :

- les marges de sécurité (vitesses et distance aux piles),
- l'influence du positionnement du navire près du pont,
- le courant (de marée) maximal.

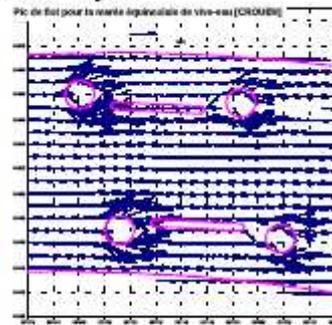


Figure 9 : Courant près des piles

L'étude sera réalisée en collaboration avec la Station de Pilotage de Rouen, après que la DDE ait fixé la forme et l'emplacement définitifs de l'ouvrage.

Trois navires de 170, 194 et 213 m avec propulseurs d'étrave et un convoi poussé de 260 m ont été modélisés.

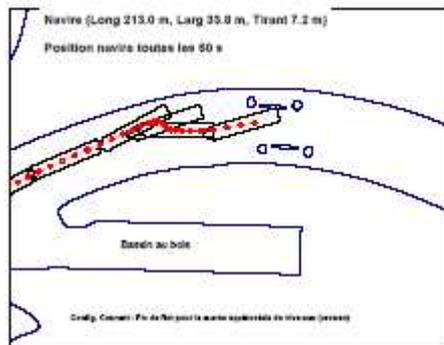


Figure 10 : Mauvaise présentation en marche arrière

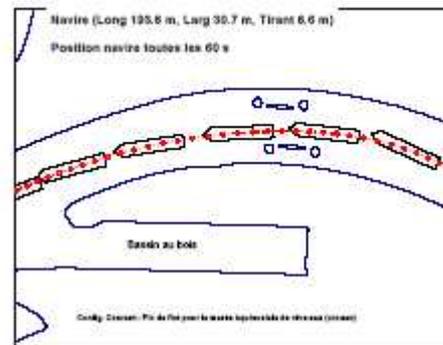


Figure 11 : Franchissement du pont en marche arrière

Les calculs de courant ont été effectués par le GHN avec le modèle Reflux qui prend en compte la forme des piles.

PORT DE NICE

L'activité du port de Nice est résolument tournée vers la croisière. De profondes évolutions sont attendues. Le projet d'extension du port a fait l'objet d'études préliminaires par la CCI Nice Côte D'Azur en 1995 et la DDE 06 en 2000.



Figure 12 : Port de Nice actuel

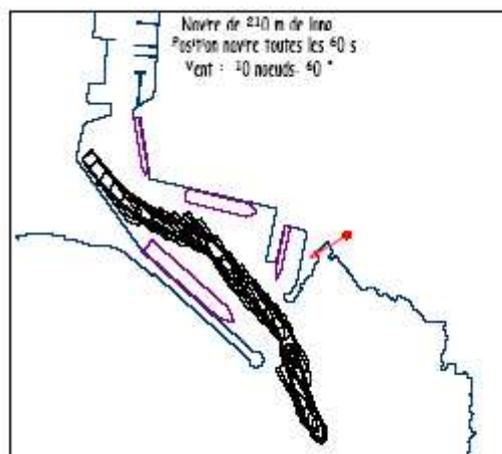


Figure 13 : Accostage en marche arrière (digue redressée)

La configuration figure 13 correspond à des aménagements « mineurs » de l'ancien port améliorant la « fluidité » de déplacements des navires (élimination des parties saillantes où peuvent s'éperonner les navires et amincissement de « l'intérieur » de la digue pour réduire la gêne causée par un navire de 268 m à quai).

Le navire de 210 m a des caractéristiques très proches de navires que le pilote a fait accoster au quai du Commerce.

De l'avis du pilote, le navire réagissait parfaitement. Ceci permet d'apprécier précisément la difficulté de ces manoeuvres exécutées par vent de travers.

Une autre configuration (agrandissement du quai du Commerce et suppression du quai de l'île de Beauté) a été étudiée avec un navire représentatif des grands paquebots (268 m de long et 8400 m² de voilure).

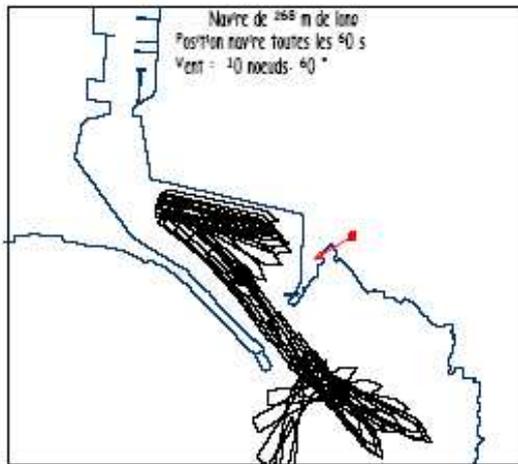


Figure 14 : Accostage en marche arrière

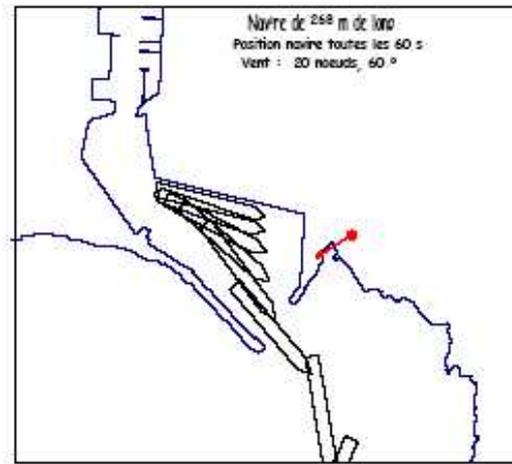


Figure 15 : Appareillage

Les deux propulseurs d'étrave du paquebot de 268 m développent une poussée maximale de 40 tonnes.

Un degré surprenant d'habileté est nécessaire pour accoster le paquebot sans utiliser le propulseur arrière (le pilote a fait ce choix car de nombreux paquebots n'en possèdent pas). La figure 17 montre l'importance des efforts du vent. Pour un vent de travers (angle de 90°), la force transversale est de 12, 28 et 36 tonnes pour des vents de 10, 15 et 17 nœuds (18, 28 et 31 km/h) pour le paquebot de 268 m. Cette croissance vient du fait que la force varie comme le carré de la vitesse du vent.

Les directions de vent NE et SW étant les plus pénalisantes, ont été principalement étudiées.

Nul doute que l'examen des différents scénarios proposés par la DDE 06 sera facilité par les 50 simulations effectuées à sa demande.

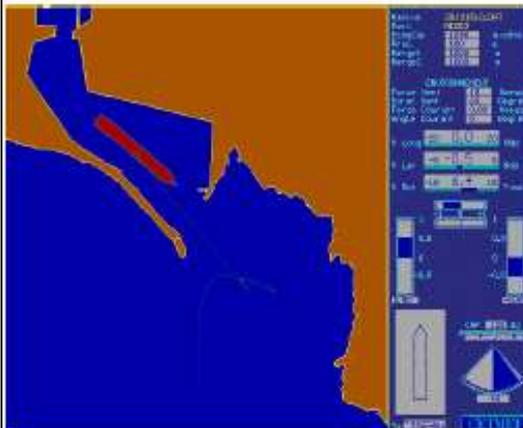


Figure 16 : Vue écran

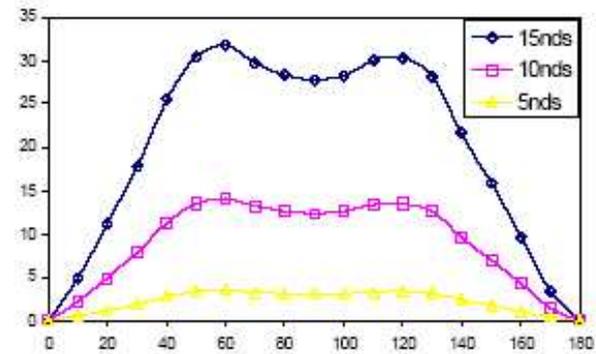
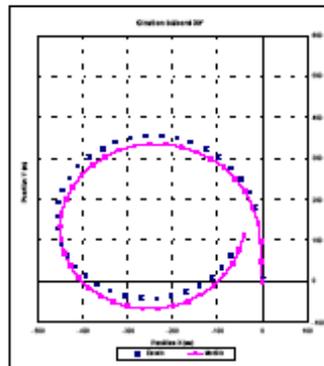


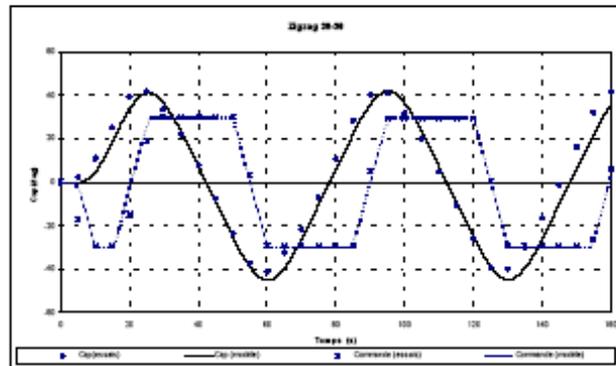
Figure 17 : Efforts du vent en tonnes pour différents angles

La simulation va de pair avec la théorie qui s'appuie sur des équations simplifiées et avec l'expérience. La simulation comme l'expérience, joue sur un certain nombre de paramètres. Mais avant d'être prédictive, elle doit être calée sur des phénomènes vérifiés dans la pratique. Dans le cas présent, elle doit reproduire des expériences des essais de giration, de zigzag et d'arrêt, normalisés par l'Organisation Maritime Internationale.

Pour décrire le déplacement d'un navire, l'utilisation d'équations dynamiques représentant les efforts est préférable à celles de relations purement cinématiques, en particulier pour prendre en compte les effets du vent, du courant, de la profondeur, des berges...



Giration 30° - Position toutes les 3 secondes (sur 117 s)



Zigzag 30-30 - Caps et commandes - Comparaison modèle/expérience

Navire mono-coque rapide de 60 m de long, vitesse 35 noeuds

La modélisation s'appuie donc sur des équations différentielles qui relient les efforts subis par le navire aux accélérations.

Plus précisément, le système différentiel est le même pour tous les navires ; seuls diffèrent les coefficients.

A chaque navire correspond un jeu de coefficients évalués à partir des paramètres caractéristiques représentatifs des différentes parties du navire facilement accessibles à l'écran (Tableau 1).

E880 OSAKA			
CARENE		PUISSANCE	
Cb	0.831	V Max	7.748
Longueur	325.000	T Max	81.000
Largeur	53.000		
Tirant	22.050	HELICE	
Assiette	0.000	X Hélice	-159.250
Xg	10.300	Diamètre	9.100
		Pas	6.501
		AE/AO	0.682
GOUVERNAIL		Nb Pales	5.000
XGouv	-162.500	Sens	1.000
Hauteur	13.313		
Largeur	9.000		
Vg Max	2.700		

E880 BERNICIA			
CARENE		PUISSANCE	
Cb	0.832	V Max	8.497
Longueur	304.800	T Max	80.000
Largeur	47.170		
Tirant	18.100	HELICE	
Assiette	0.000	X Hélice	-147.500
Xg	7.350	Diamètre	8.900
		Pas	6.230
		AE/AO	0.585
GOUVERNAIL		Nb Pales	4.000
XGouv	-151.000	Sens	1.000
Hauteur	13.000		
Largeur	10.000		
Vg Max	2.700		

Tableau 1 : Caractéristiques de navires (pétroliers).

Pour les zigzags (δ_0, ψ_0) , la stratégie de la barre est la suivante : le navire étant maintenu en régime rectiligne uniforme ($r = 0$) à l'instant pris pour origine, on met la barre à δ_0 ; dès que la variation de cap est égale à ψ_0 , on inverse la barre qui prend la valeur $-\delta_0$ et ainsi de suite. Par exemple, sur la figure ci-contre, l'angle de barre est de 10° et la variation de cap maximale admise ψ_0 est égale à 20° .

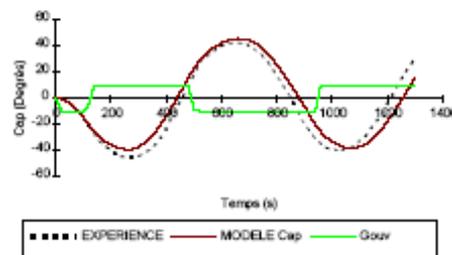


Figure 18 : Zigzag 10°/20° Esso Bernicia grande profondeur

Une procédure permet d'analyser le comportement du navire en ligne droite. Elle est nommée spirale de Diendoné et se présente comme suit : le navire étant en giration uniforme avec un angle de barre $N \cdot \Delta \delta$ ($\Delta \delta < 0$ sur les figures, N un entier positif), la vitesse de rotation r est mesurée, ensuite N est décrémenté et r est mesurée jusqu'à ce que l'angle de barre atteigne la valeur $-N \cdot \Delta \delta$.

A cet instant, la branche supérieure de la courbe $\delta \rightarrow r(\delta)$ est parcourue. La procédure inverse de $-N \cdot \Delta \delta$ à $N \cdot \Delta \delta$ est effectuée ce qui donne la branche inférieure de la courbe.

Si les deux branches peuvent être superposées le navire est stable en ligne droite, sinon le navire est instable. Dans ce dernier cas, la hauteur et la largeur de la boucle permettent de quantifier l'instabilité du navire.

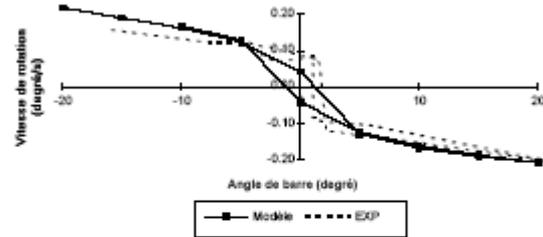
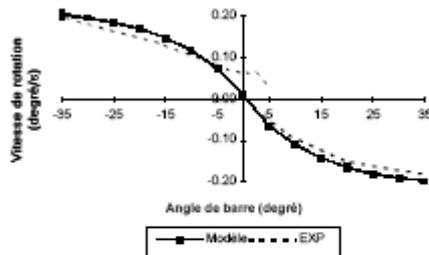


Figure 19 : Spirale très faible profondeur (Esso Osaka) Figure 20 : Spirale en profondeur moyenne (Esso Osaka)

PERSPECTIVES

Avec l'augmentation de puissance des ordinateurs, les modèles et les simulations approchent mieux du réel. Mais la réalité ne peut être saisie sans une collaboration active des parties prenantes et une formalisation des savoirs. Aussi, le CETMEF développe actuellement :

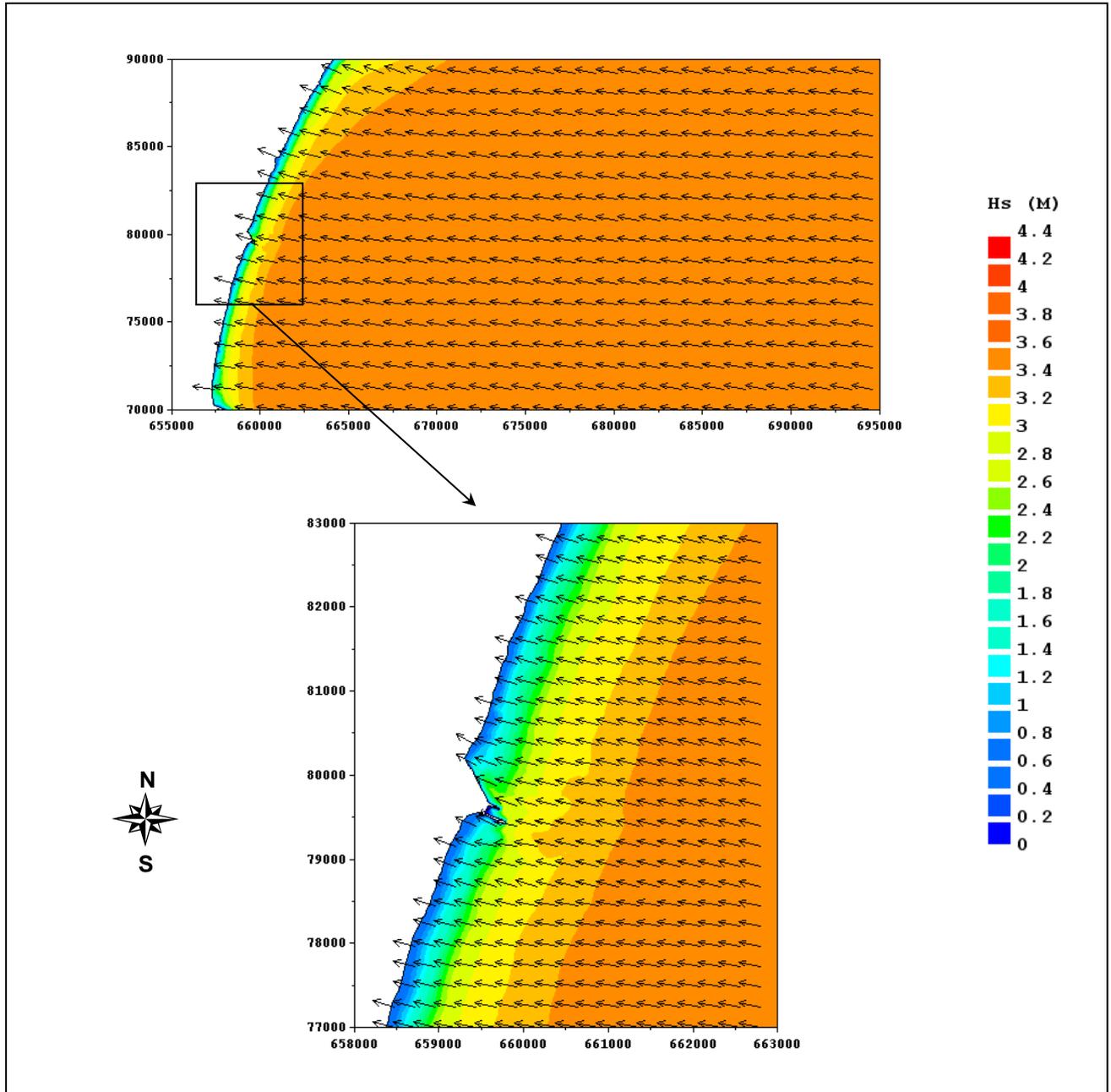
- des outils générant des scénarios en général et de situations à risques en particulier pour faciliter la réflexion d'experts,
- des bases de données et des outils d'analyse de données (sévérité des dommages, probabilité d'occurrence...),
- l'utilisation de l'Intelligence Artificielle (programmation multi-agents, entités logicielles dotées du pouvoir d'interagir et éventuellement « d'apprendre », CBR,...),
- des efforts pour simuler les manoeuvres de monocoques et de catamarans rapides (propulsion par jet),

et en collaboration avec l'Université de Technologie de Compiègne, le Port Autonome du Havre, SIRIA Technologies, le Service de Navigation de la Seine et la Station de Pilotage du Havre-Fécamp :

- un simulateur avec représentation en 3 dimensions de l'environnement, SIMNAV, pour le port pétrolier d'Antifer et pour Paris où la précision des mouvements imprimés aux commandes dépend de la perception détaillée des différents ponts (forme des voïtes).

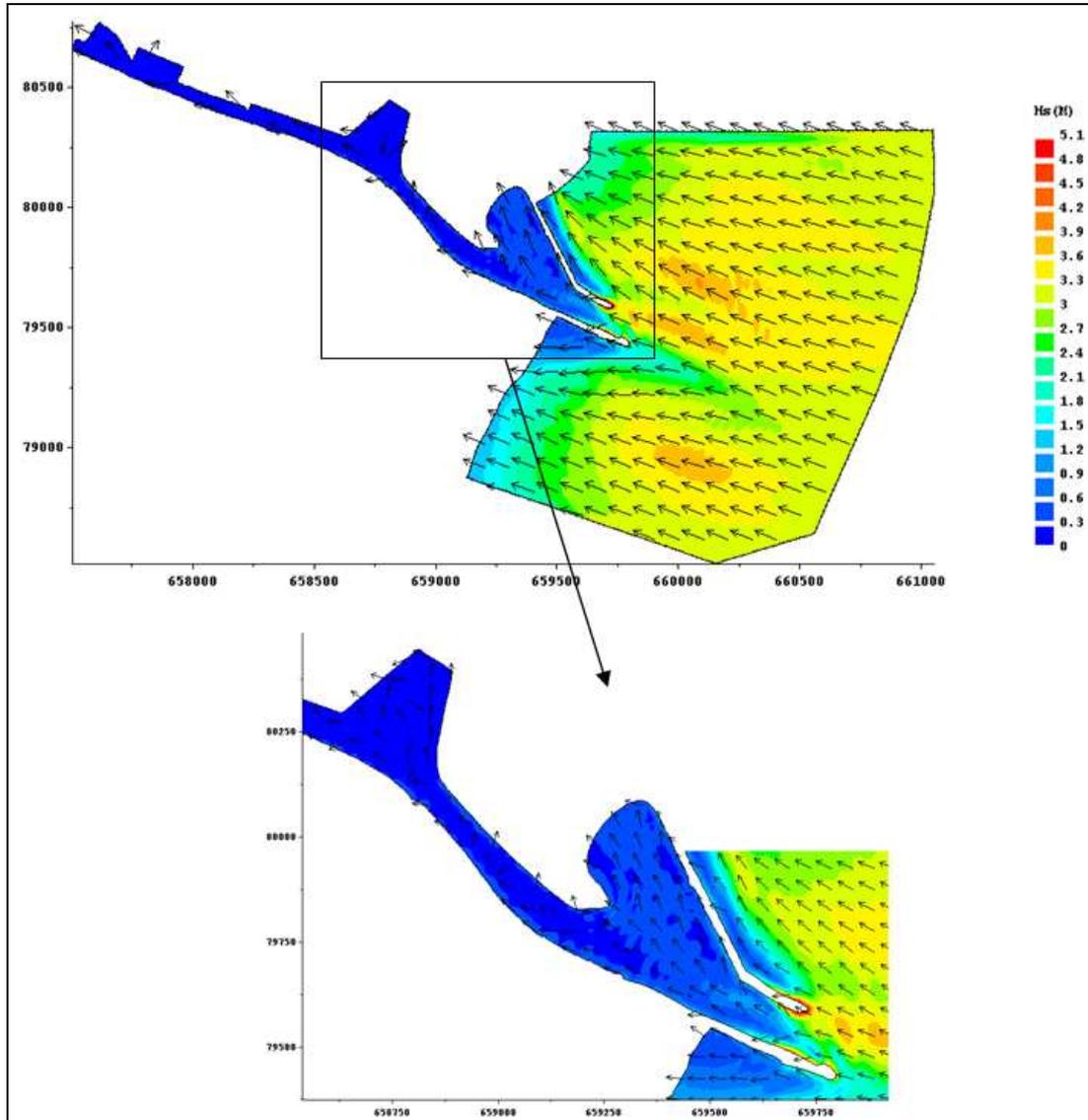
Contacts : **HOLLOCOU Yann** - Tél. : 01 45 13 52 95 - Mél : yann.hollocou@equipement.gouv.fr
LAM Son Ha - Tél. : 01 45 13 53 15 - Mél : michel.lam@equipement.gouv.fr

Annexe 7 :
RESULTATS DE PROPAGATION

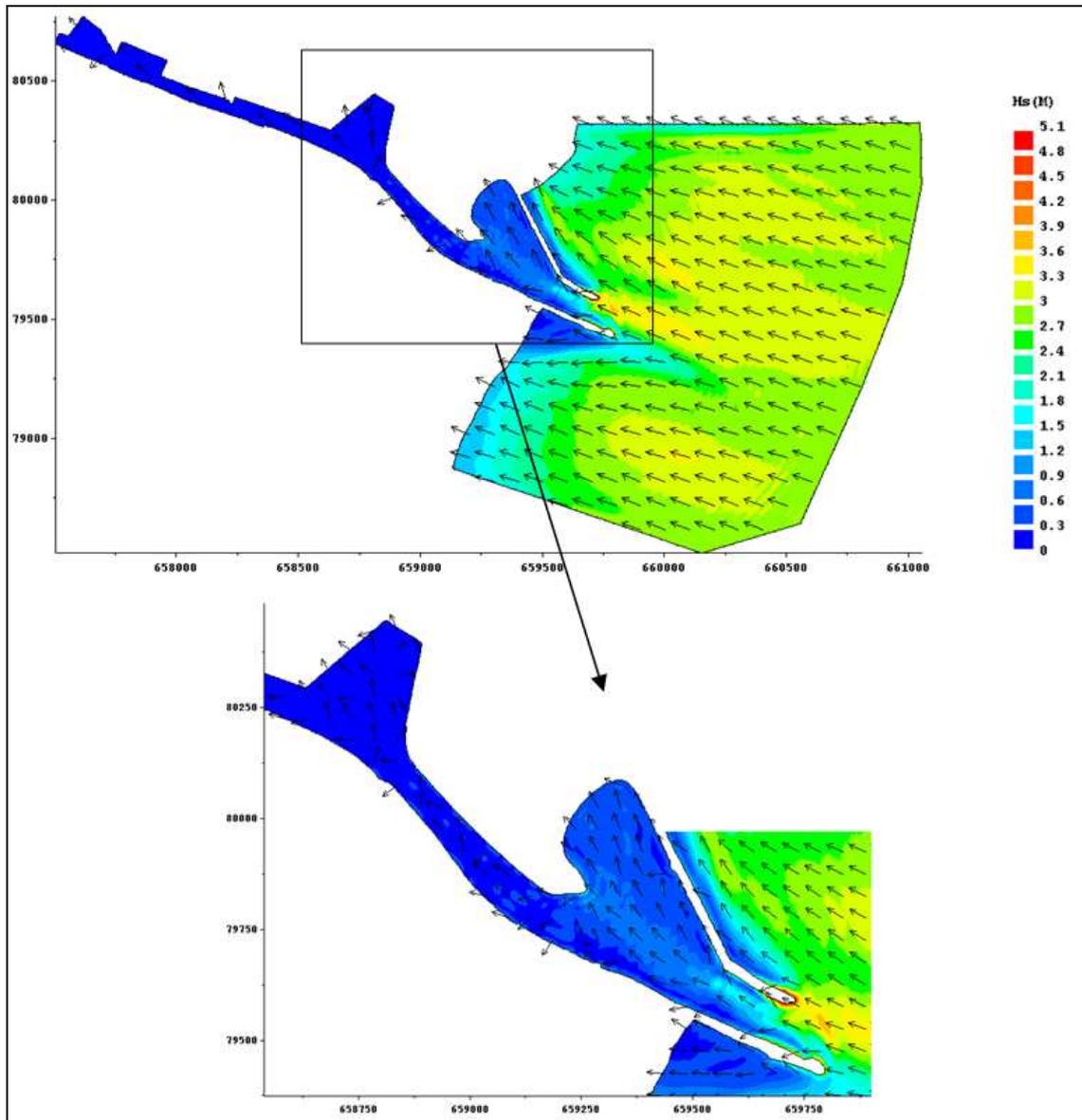


Houle 0,05 % – Hs au large = 3,6 m – Tp = 6 s – 100°N – +1,0 m (ZH)

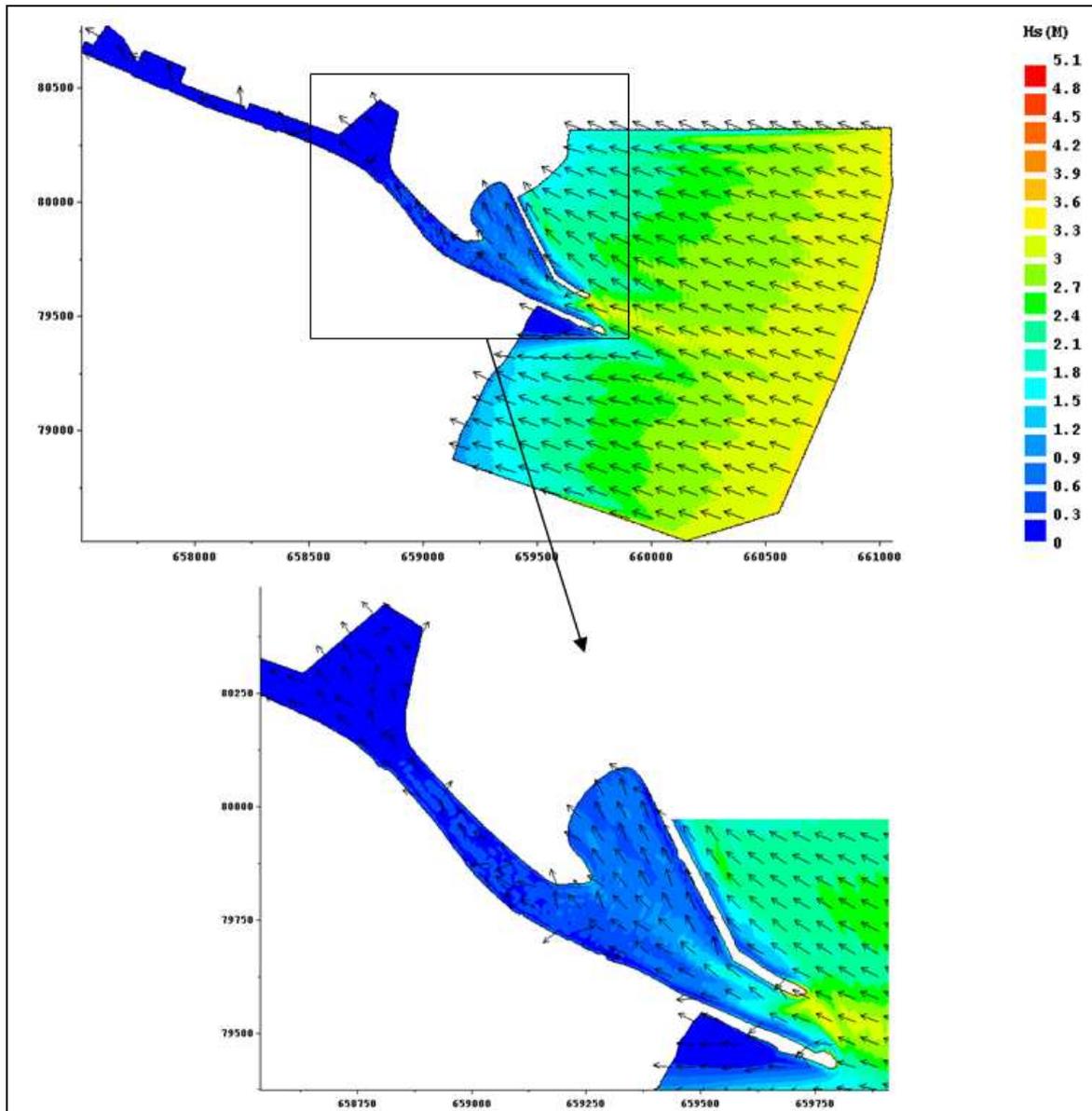
Annexe 8 :
RESULTATS D'AGITATION



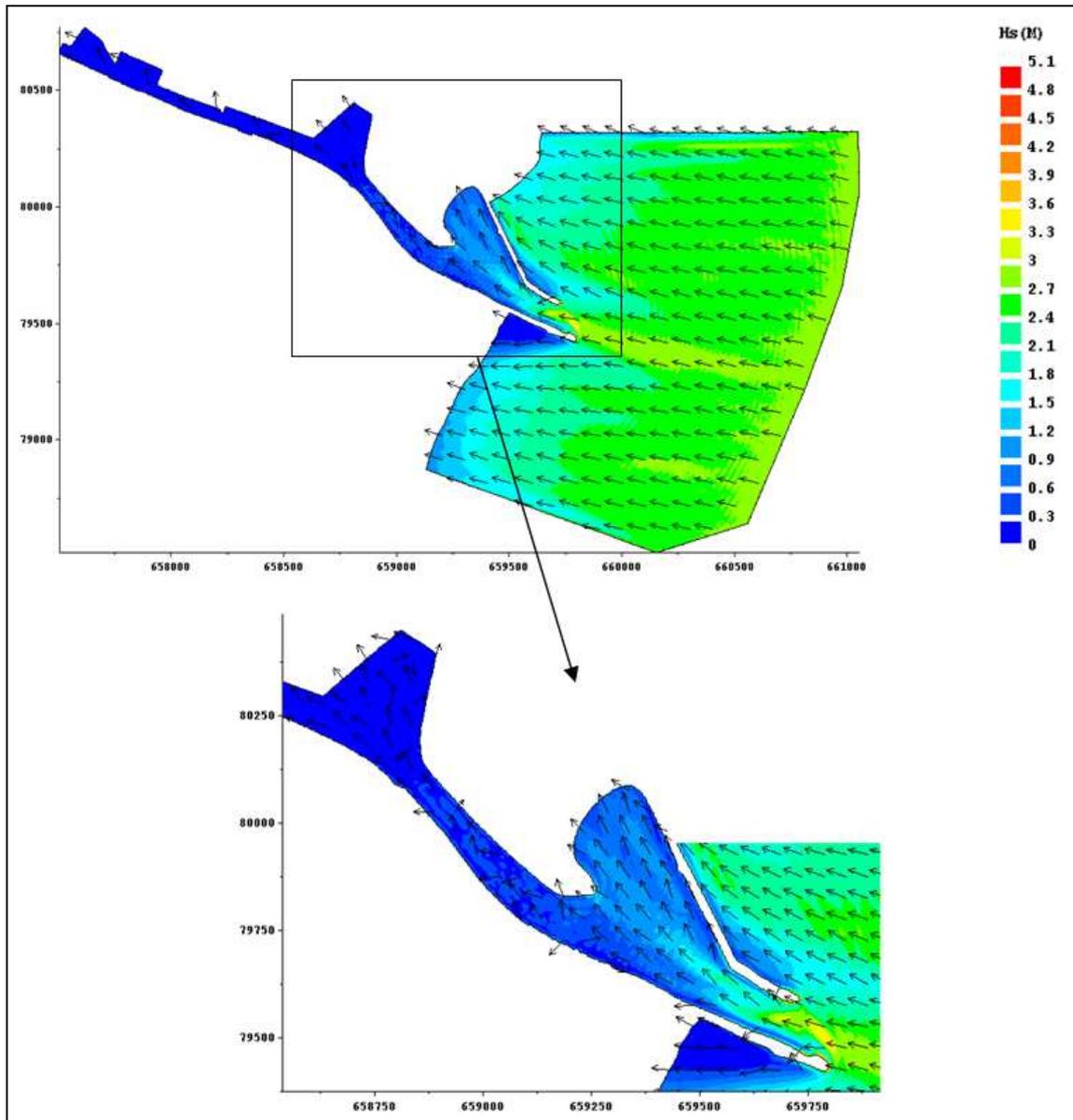
Houle annuelle, 110N 3m4 10s



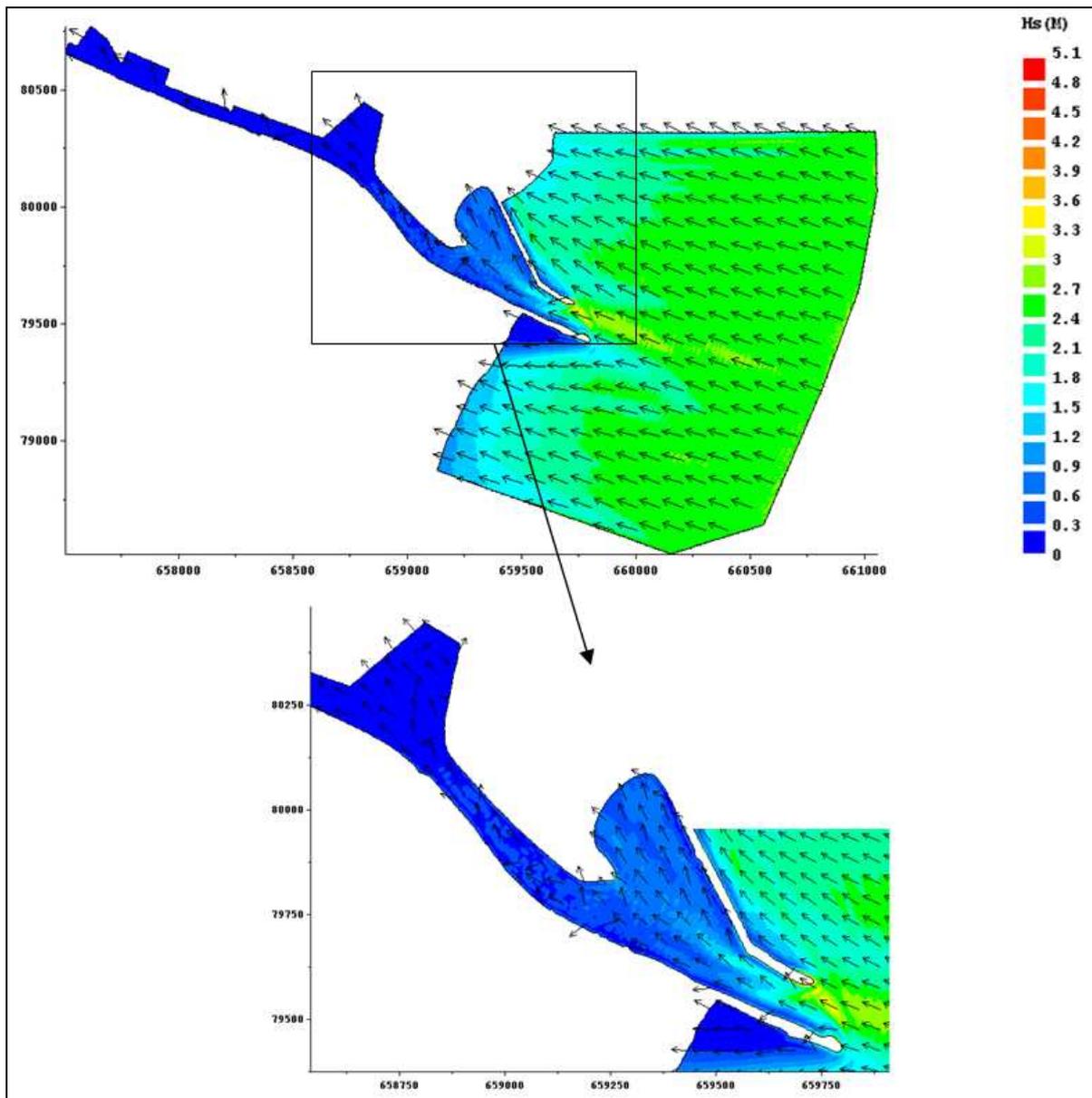
Houle annuelle, 110N 3m4 8s



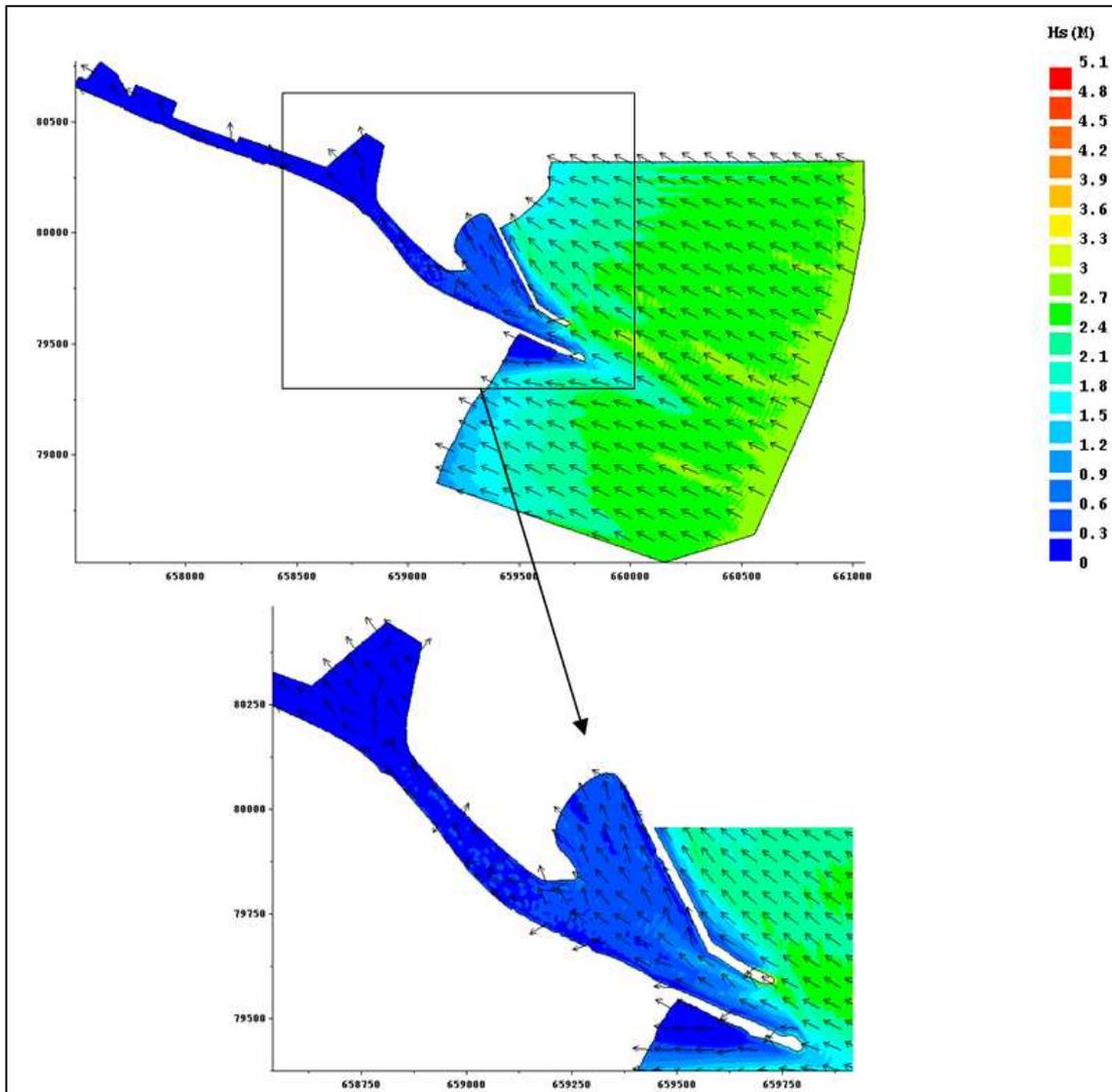
Houle annuelle, 110N 3m4 6s



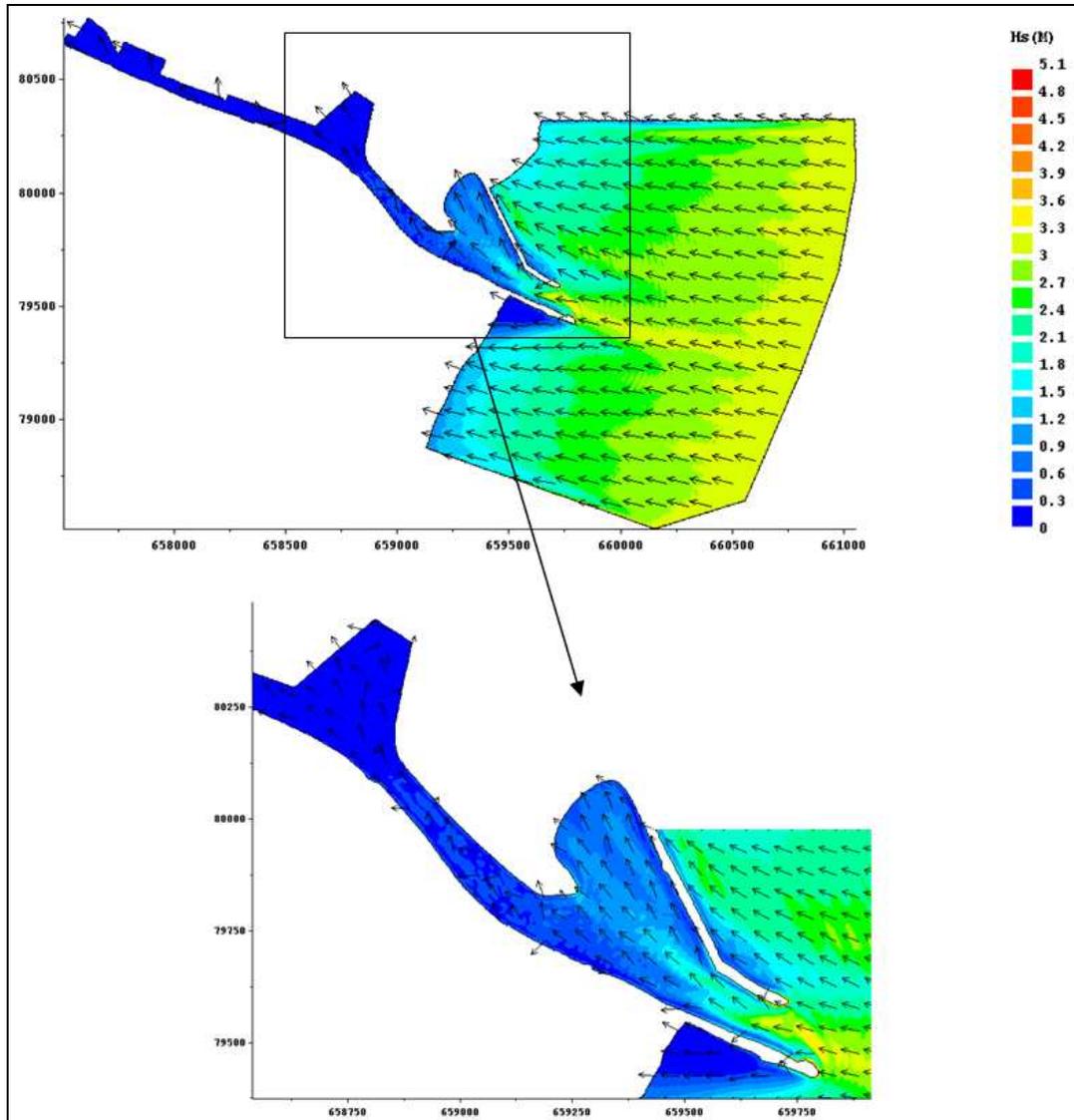
Houle 0.05%, 100N 2m9 6s



Houle 0.05%, 110°N 2m9 6s



Houle 0.05%, 120°N 2m9 6s



Houle 0.05%, 100N 3m4 6s

Annexe 9 :
COEFFICIENTS DE REFLEXION

Afin de modéliser numériquement de façon précise le port de Port-La-Nouvelle, la connaissance des coefficients de réflexion des ouvrages est indispensable.

Ces coefficients de réflexion, correspondant au rapport de la hauteur de houle incidente sur la hauteur de houle réfléchie, sont fonctions de :

- La nature de l'ouvrage et ses caractéristiques physiques : type de matériau présent, état global,...
- La pente de l'ouvrage.

L'obtention des caractéristiques physiques des ouvrages s'est appuyée d'une part sur l'étude ARCADIS (Arcadis – profils et coupe type des ouvrages et bilan de l'état structural des ouvrages – 2006), d'autre part sur une visite du site.

Pour obtenir un profil type des ouvrages on se référera au document cité ci-dessus.

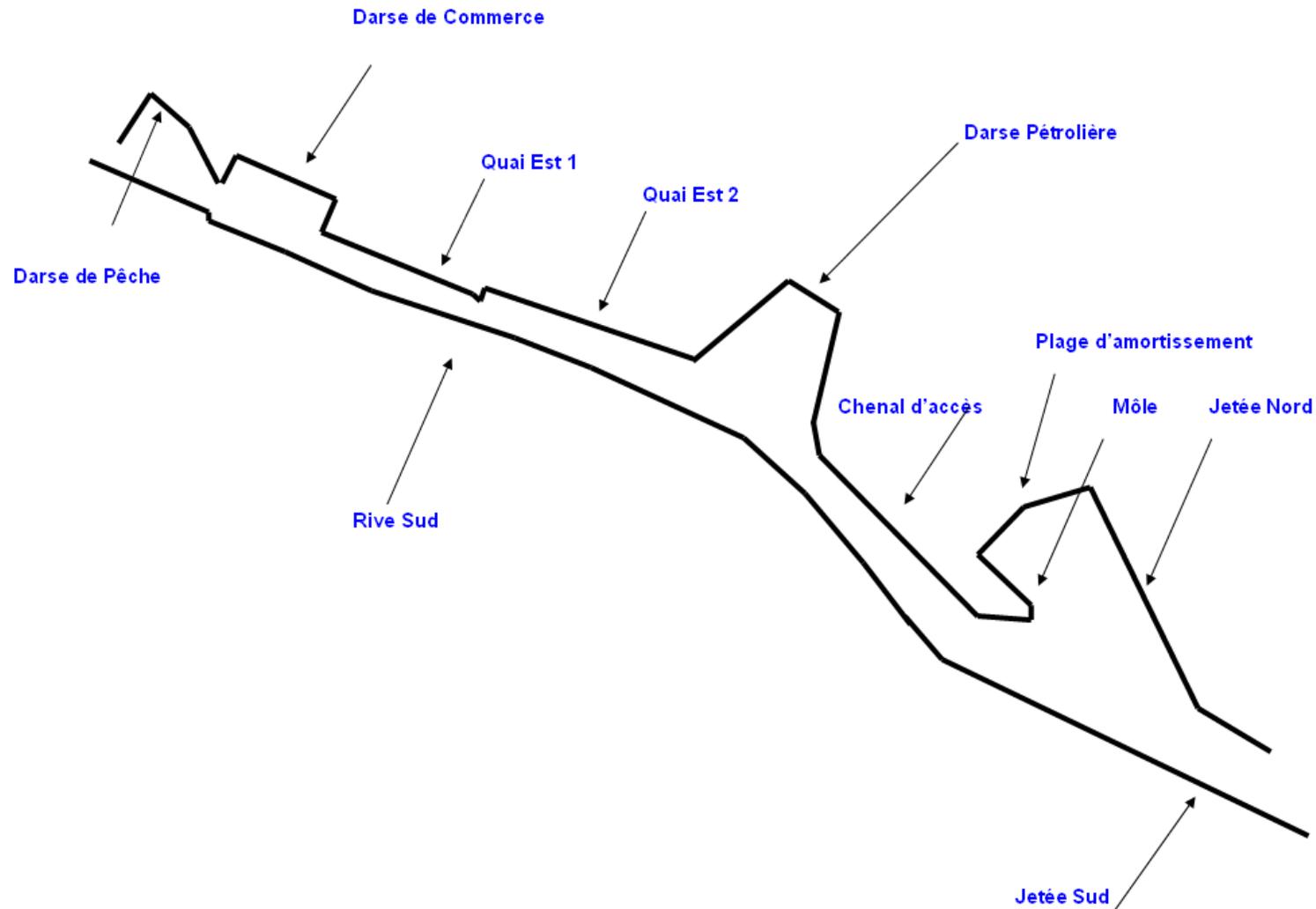
Les coefficients ont été quant à eux soit obtenus à l'aide d'Abaques, soit calculés grâce aux formules présentes dans le Guide Enrochement – L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques – Version française du rock manual – CETMEF – 2^{ème} édition – 2009.

Les hypothèses de calculs sont les suivantes :

- cambrures des houles comprises entre 0.5 et 4%. Fortes cambrures (de 2 à 4%) coté mer, faibles cambrures côté port (de 0.5 à 2%).

Enfin, et en gage de vérification, les valeurs trouvées sont comparées à celles obtenues lors de l'étude réalisée par le BCEOM (BCEOM – Service Maritime de Navigation du Languedoc-Roussillon – Subdivision de l'Aude – Aménagement du port de Port la Nouvelle – Etude d'aménagement sur modèle numérique – MAR 50566S – Décembre 2005).

Plan d'ensemble :



JETEE NORD

Rapport BCEOM : $Cr=0.35$ pour la partie côté
 $Cr=0.60$ pour la partie côté avant-port.

Caractéristiques paroi:

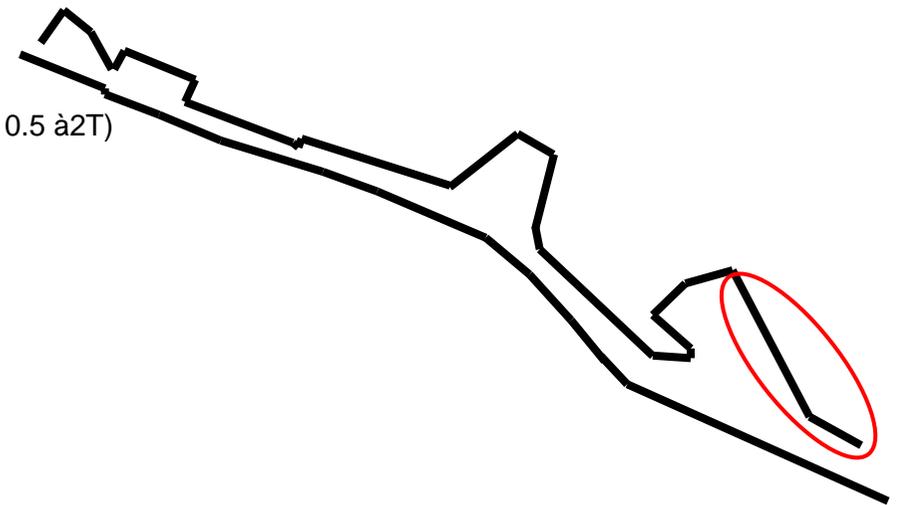
1. Digue en enrochement, avec localement protections en bloc de béton, tétrapodes (notamment au niveau du musoir) et maçonneries.
2. Pente 3/2 côté mer, Pente 4/3 côté avant-port.
3. Blocs de 4 à 6T sur deux couches. Sur les profils II & III, blocs de 2 à 4T et 0.5 à 2T respectivement, toujours sur deux couches. Présence de blocs de petites tailles sur le profil I (d'après visite sur site).

Résultats d'après les différentes sources :

- Rock Manual : $Cr_{(mer)} = 0.40$ et $Cr_{(avt-port)} = 0.58$
- Abaques $Cr_{(mer)} = 0.37$ et $Cr_{(avt-port)} = 0.57$ (0.60 pour des blocs de 0.5 à 2T)

$$Cr_{(mer)} = 0.40$$

$$Cr_{(avt-port)} = 0.60$$



PLAGE D'AMORTISSEMENT

Rapport BCEOM : $Cr=0.05$.

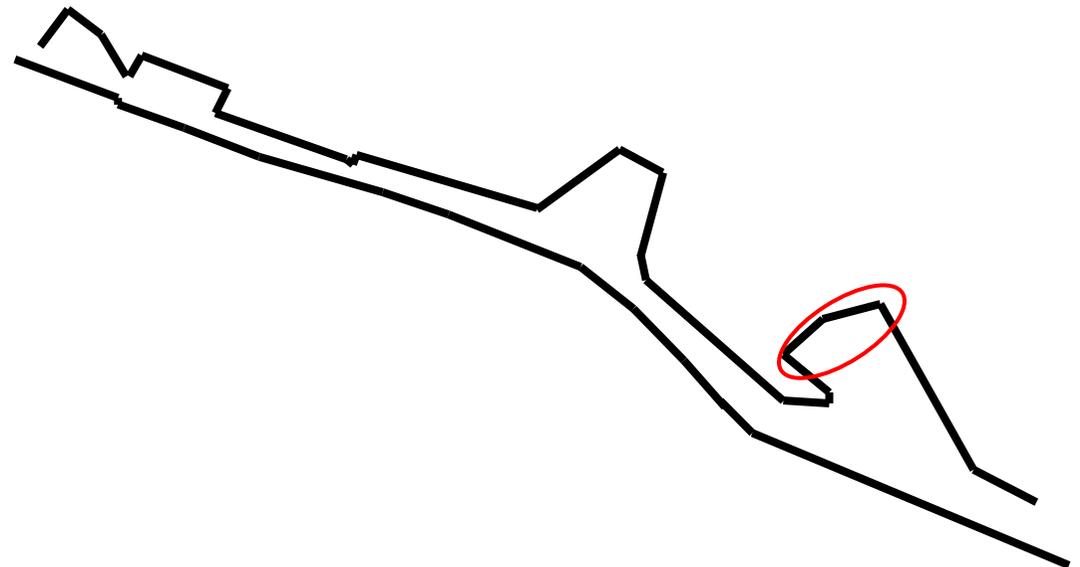
Caractéristiques plage :

1. *Pente : a priori 5% (d'après les observations sur site, pente encore plus faible)*
2. *Sable fin*

Résultats d'après les différentes sources :

- Rock Manual : $Cr < 0.05$ sauf pour d'extrêmement faible cambrure (< 0.01).
- Abaques : $Cr < 0.07$

$Cr = 0.05$



MOLE ET TALUS FRANCIS VALS

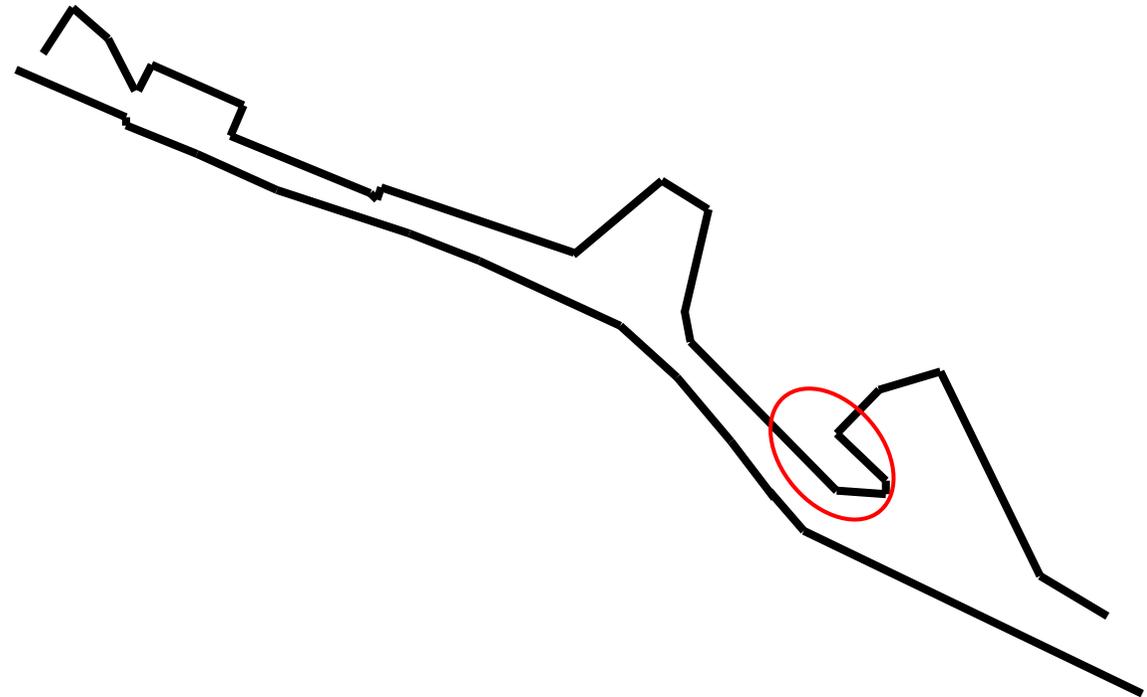
Rapport BCEOM : $Cr=0.60$.

Caractéristiques paroi :

1. *Digue en enrochement.*
2. *Pente 4/3.*
3. *Blocs de 0.5 à 2T.*

Résultats d'après les différentes sources :

- Rock Manual : $Cr=0.58$
- Abaques : $Cr=0.60$



$Cr = 0.60$

RIVE NORD CHENAL D'ACCES

Rapport BCEOM : $Cr=0.60$.

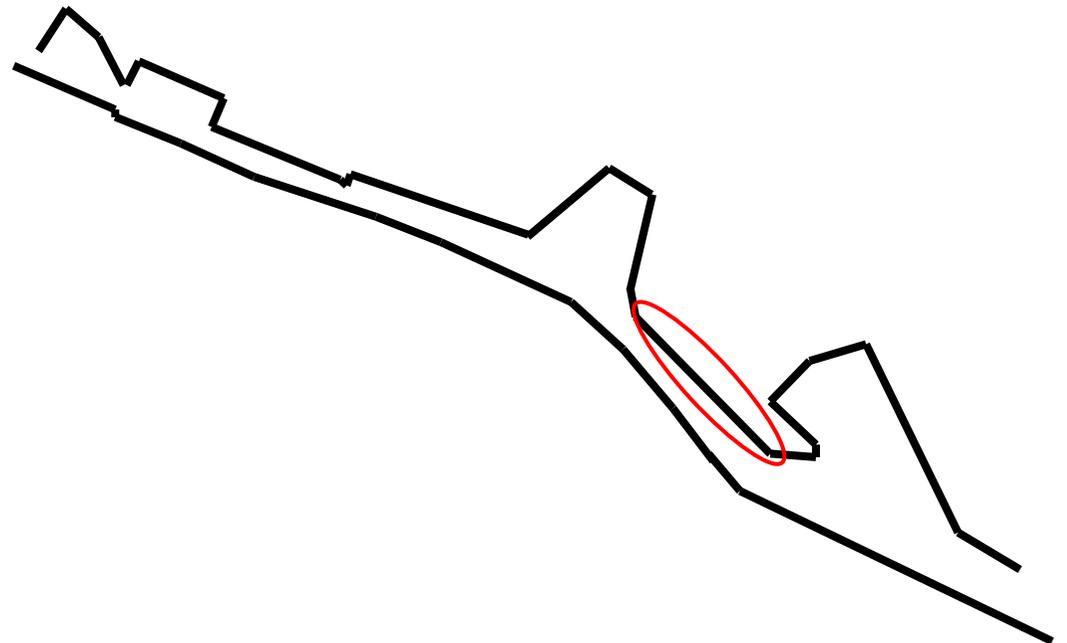
Caractéristiques paroi :

1. Talus, protection enrochement, pente 3/2 puis 2/1.

Résultats d'après les différentes sources :

- Abaques : $Cr=0.60$
- Rock Manual : $Cr=0.62$

$Cr = 0.60$

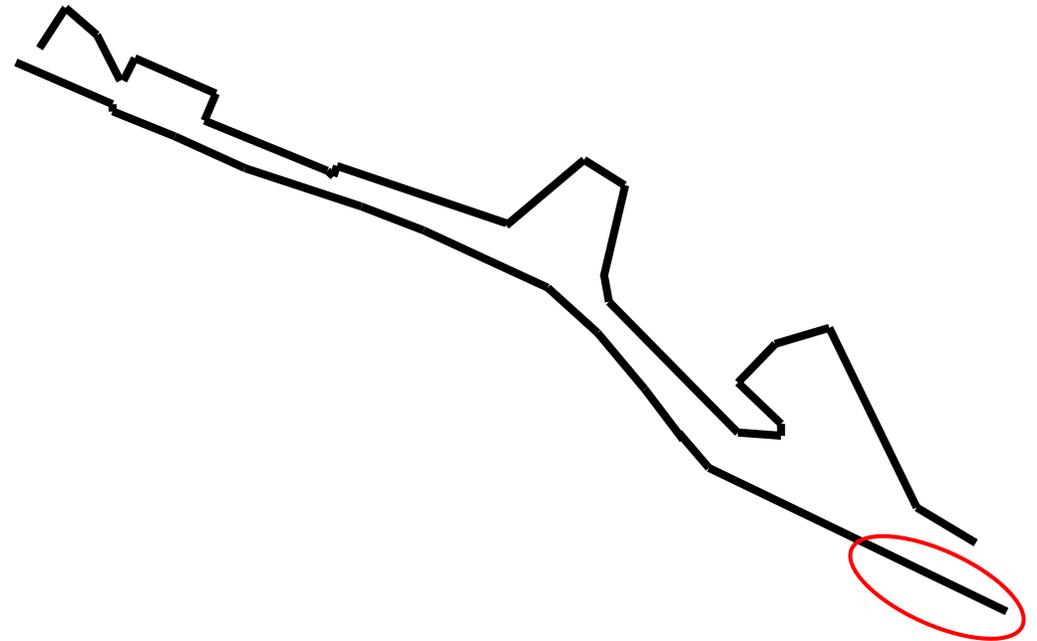


JETEE SUD

Voir Jetée Nord.

D'après observations sur site :

Présence de blocs maçonnés et d'enrochement supérieurs à 6T. Protection en tétrapode sur le musoir prolongée à l'intérieur du port et non côté large.



$$Cr_{(mer)} = 0.35$$

$$Cr_{(avt-port)} = 0.60$$

DARSE PETROLIERE POSTE D2 ET D4

Rapport BCEOM : $Cr=0.60$.

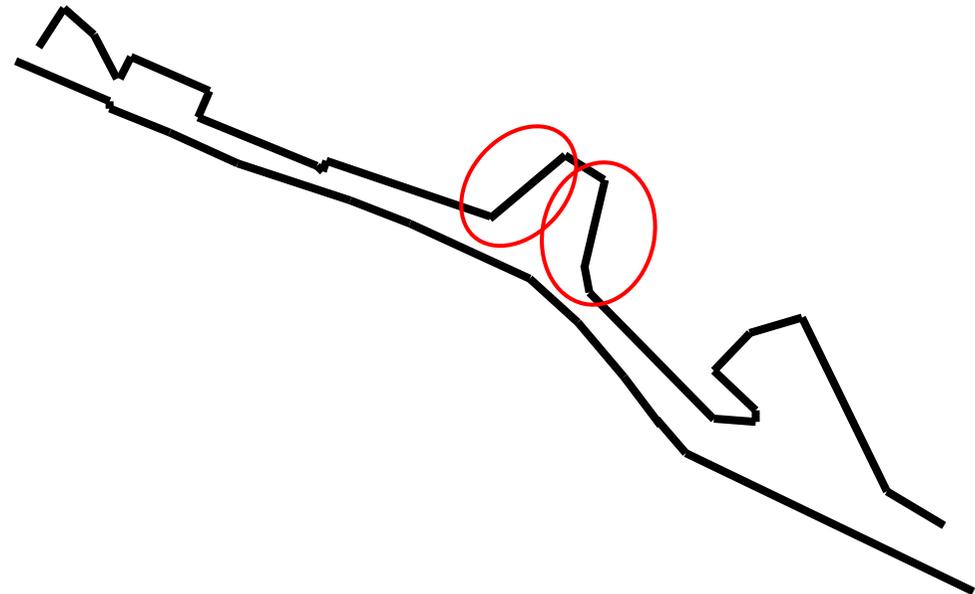
Caractéristiques paroi :

1. Pente 2/1
2. Talus imperméable avec protection supérieure en enrochement.

Résultats d'après les différentes sources :

- Abaques : $Cr=0.52$ (valeur max 0.53).
- Rock Manual : $Cr=0.53$

Cr = 0.55



DARSE PETROLIERE QUAI NORD

Rapport BCEOM : $Cr=0.95$.

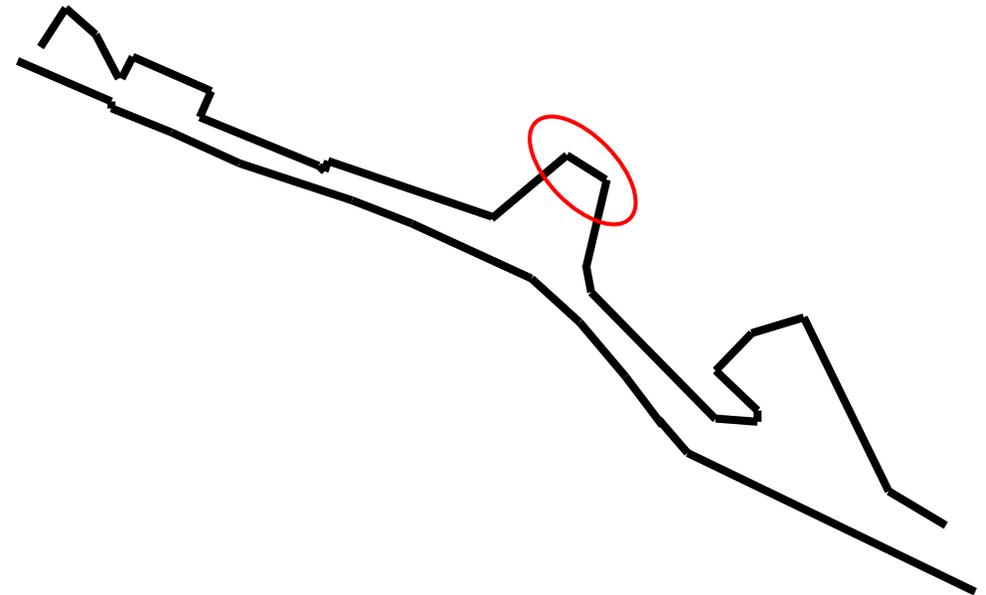
Caractéristiques paroi :

1. Quai droit en palplanche.

Résultats d'après les différentes sources :

- $Cr = 0.95$

$Cr = 0.95$



QUAI EST 2

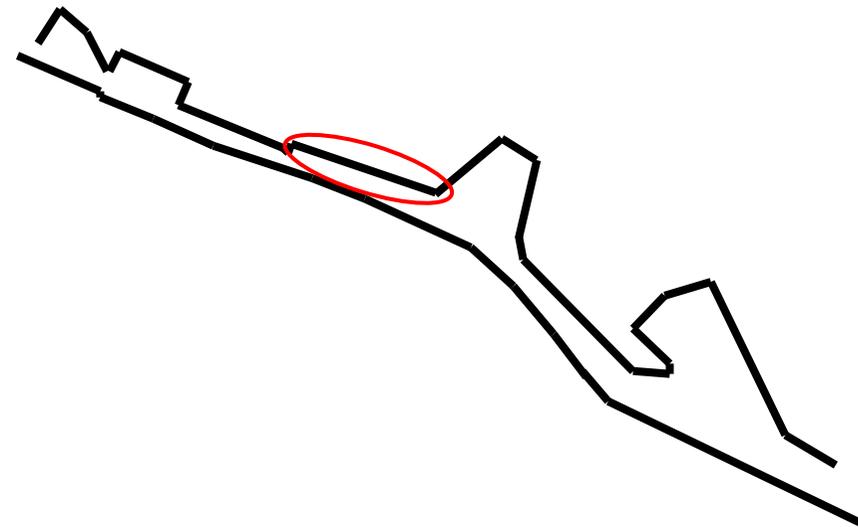
Rapport BCEOM : $Cr=0.95$.

Caractéristiques paroi :

1. Quai droit en palplanche

Résultats d'après les différentes sources :

- $Cr = 0.95$



$Cr = 0.95$

QUAI EST 1

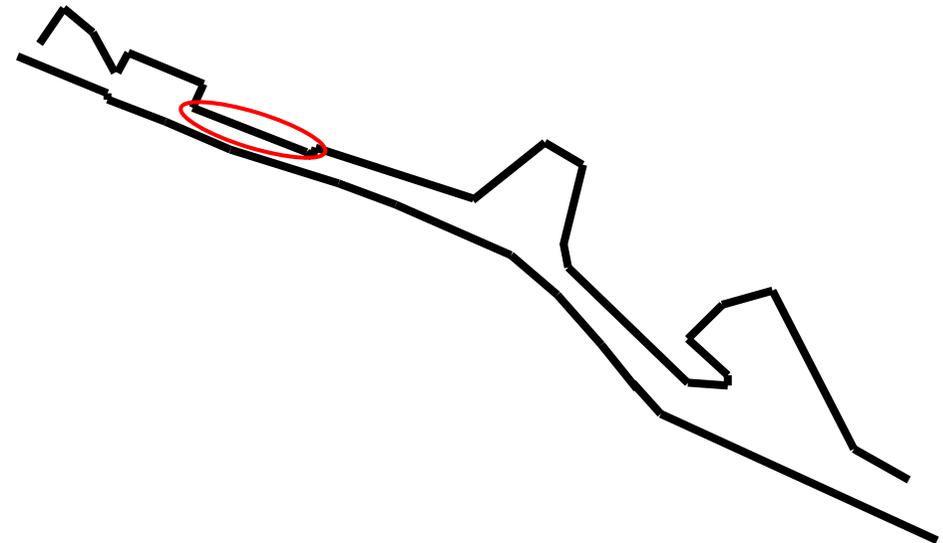
Rapport BCEOM : $Cr=0.75$.

Caractéristiques paroi :

1. talus protégé avec enrochement.
2. pente environ 1/1

Résultats d'après les différentes sources :

- Abaques : $Cr=0.75$ (blocs $100 < m < 500\text{kg}$)
- Rock Manual : $Cr=0.73$



Cr = 0.75

DARSE DE COMMERCE, STATION D'AVITAILLEMENT

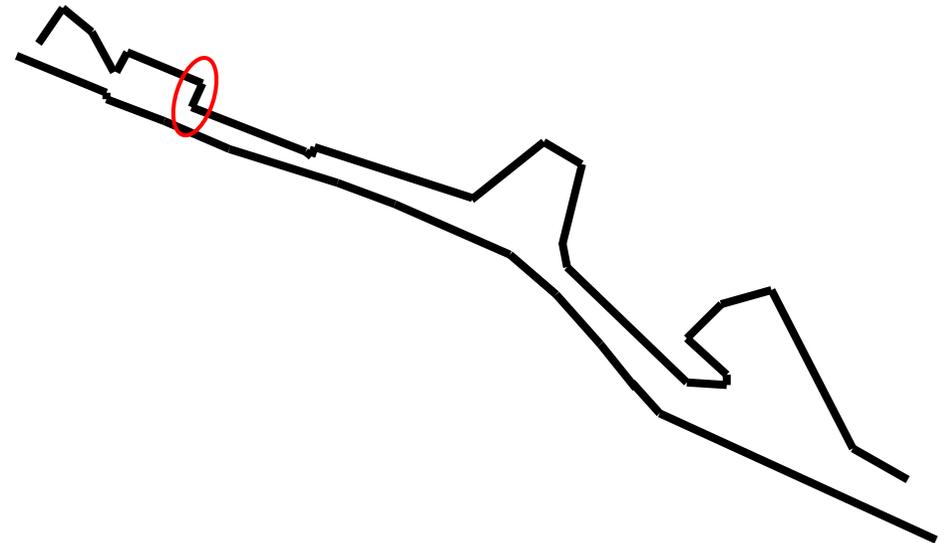
Rapport BCEOM : $Cr=0.60$.

Caractéristiques paroi :

1. Talus avec protection en enrochement.
2. pente a priori 4/3.

Résultats d'après les différentes sources :

- Abaques : $Cr=0.57$ ou $Cr=0.55$ (blocs $100 < m < 500$ kg).
- Rock Manual : $Cr=0.58$.



$Cr = 0.60$

DARSE DE COMMERCE, QUAÏ NORD

Rapport BCEOM : $Cr=0.95$.

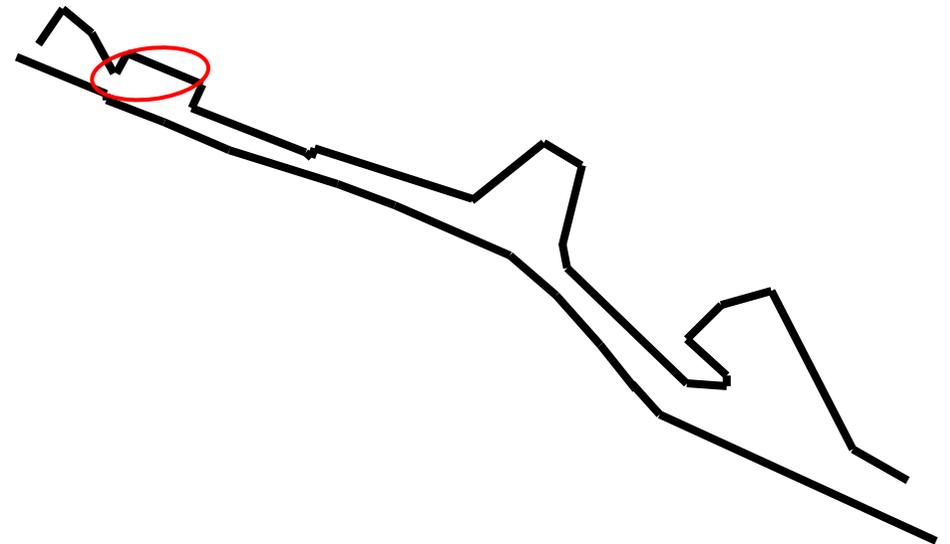
Caractéristiques paroi :

1. Quai en palplanche.

Résultats d'après les différentes sources :

- $Cr=0.95$

$Cr = 0.95$



DARSE DE PECHE, QUAII EST

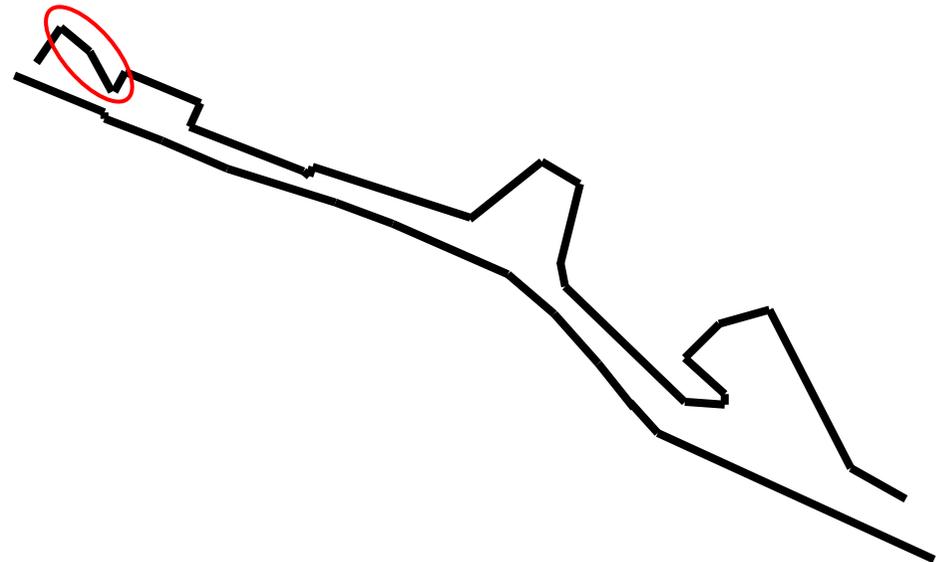
Rapport BCEOM : $Cr=0.95$.

Caractéristiques paroi :

1. Quai en palplanche.

Résultats d'après les différentes sources :

- $Cr=0.95$



Cr = 0.95

DARSE DE PECHE, QUAII OUEST

Rapport BCEOM : $Cr=0.40$.

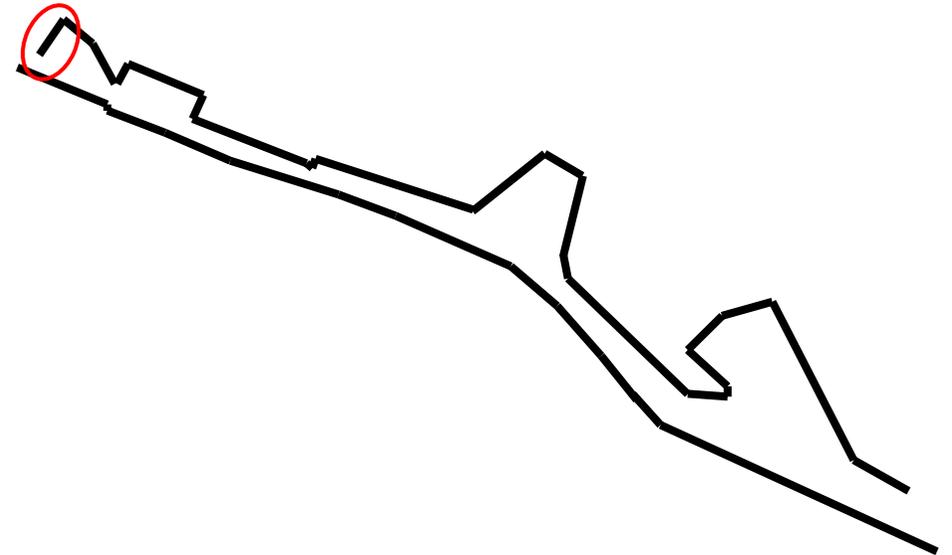
Caractéristiques paroi :)

1. Talus avec protection supérieure en enrochement de troisième et quatrième catégories sur 50cm. Manque généralisé d'enrochement.
2. Pente 3/2.

Résultats d'après les différentes sources :

- Abaques : $Cr=0.50$ ou $Cr=0.51$
- Rock Manual : $Cr=0.62$

$Cr = 0.55$



RIVE SUD, HALTE DE PLAISANCE, QUAI P94_108

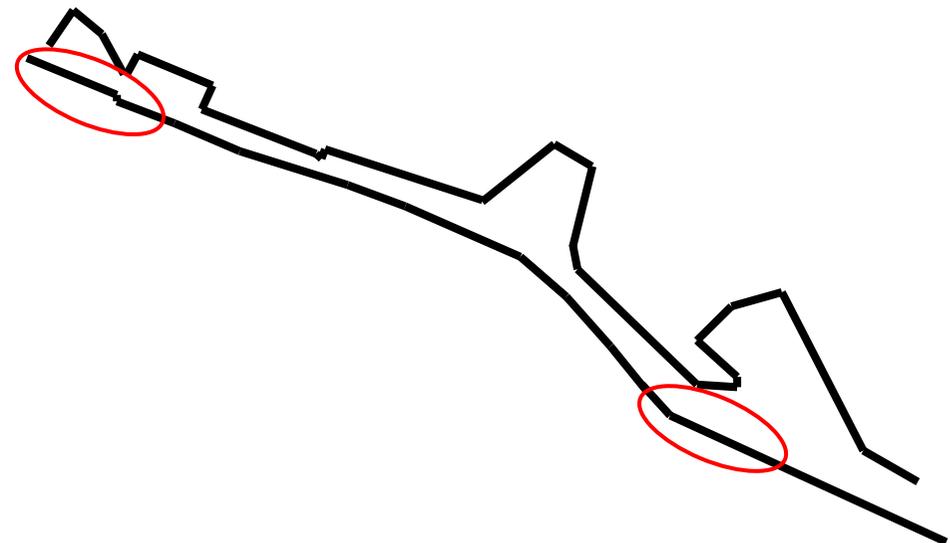
Rapport BCEOM : $Cr=0.95$ (pour la halte plaisance).

Caractéristiques paroi : (source : Arcadis)

1. Mur poids vertical sur 0.50m puis talus imperméable.
2. Pente 2/1.

Résultats d'après les différentes sources :

- Abaques : $Cr = 0.93$ ou $Cr = 0.72$
- Rock Manual : $Cr = 0.69$



$Cr = 0.75$

RIVE SUD

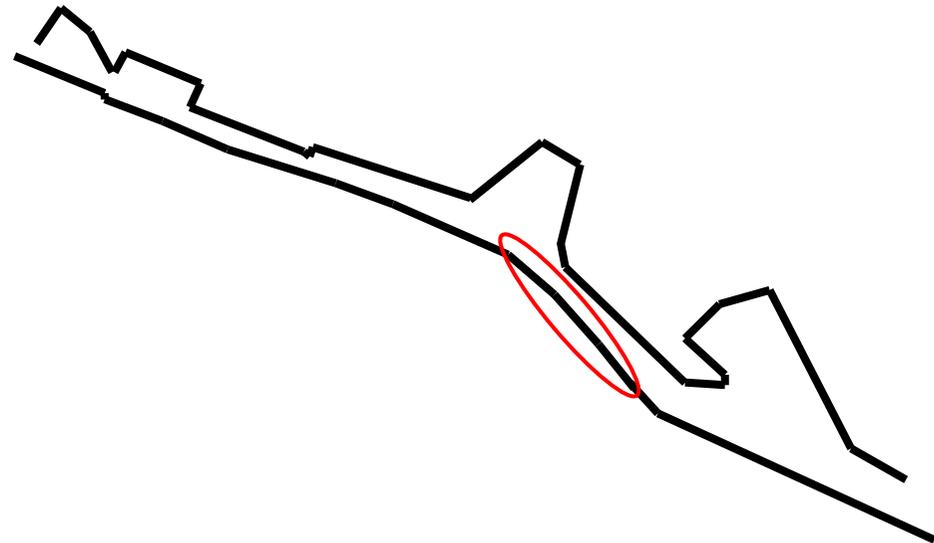
Rapport BCEOM : $Cr=0.95$.

Caractéristiques paroi :

1. Quai vertical constitué d'un rideau de palplanches.

Résultats d'après les différentes sources :

- $Cr=1$



$Cr = 0.95$

RIVE SUD

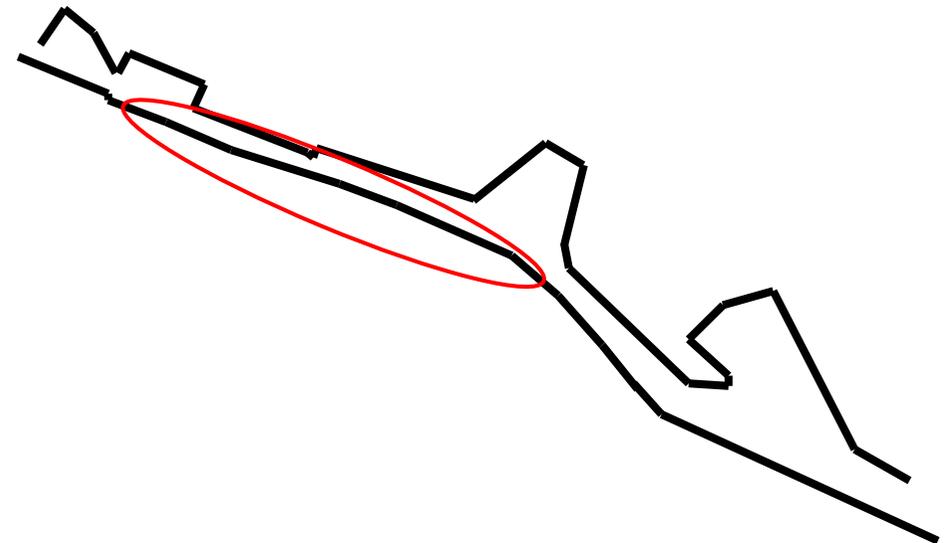
Rapport BCEOM : $Cr=0.60$.

Caractéristiques paroi :

1. Mur poids sur talus avec protection en enrochement jusqu'à la cote -2m. Pente entre 3/2 et 2/1.

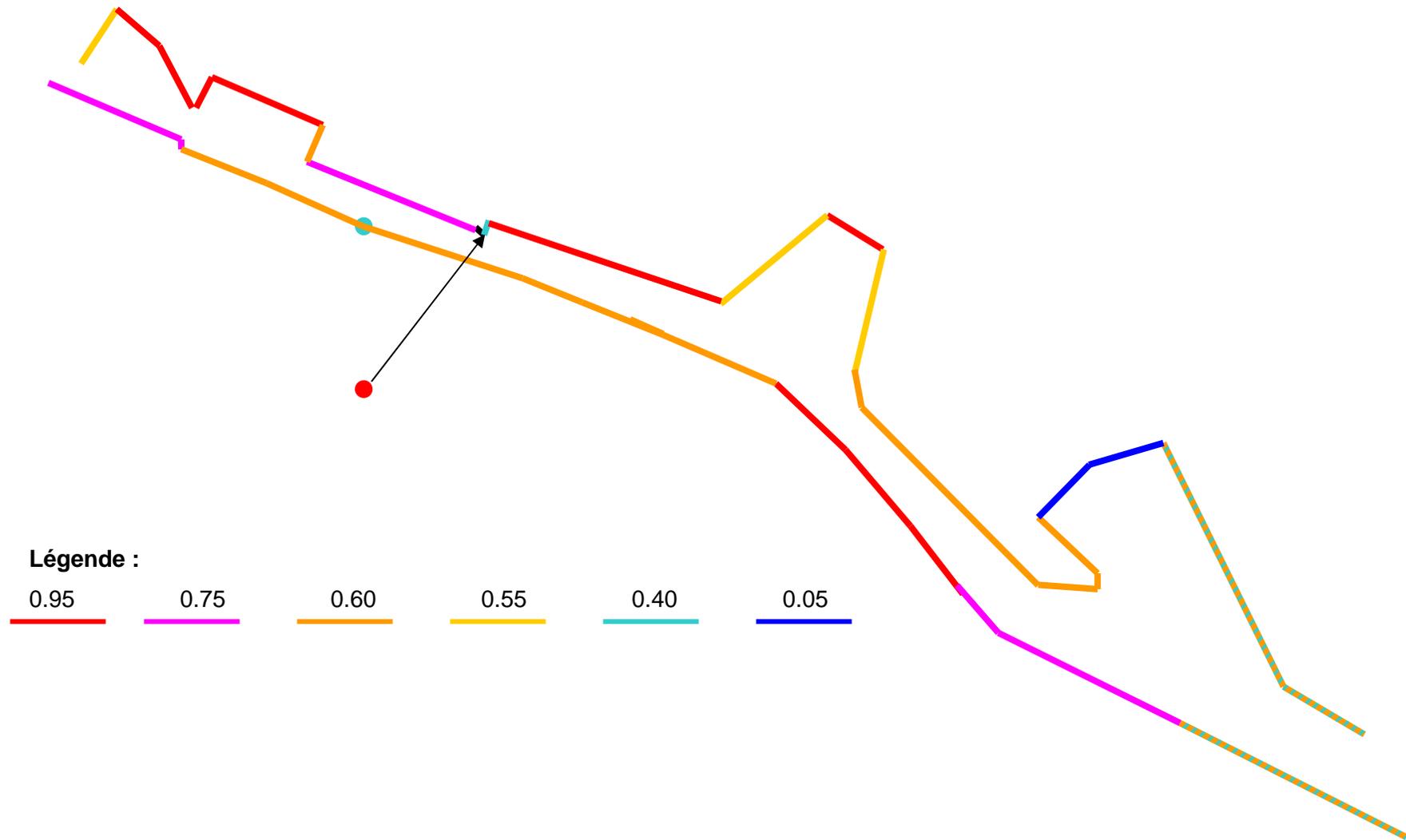
Résultats d'après les différentes sources

- Abaques : $Cr = 0.60$ (enrochements de 100 à 500kg) ou $Cr=0.51$
- Rock Manual : $Cr=0.62$

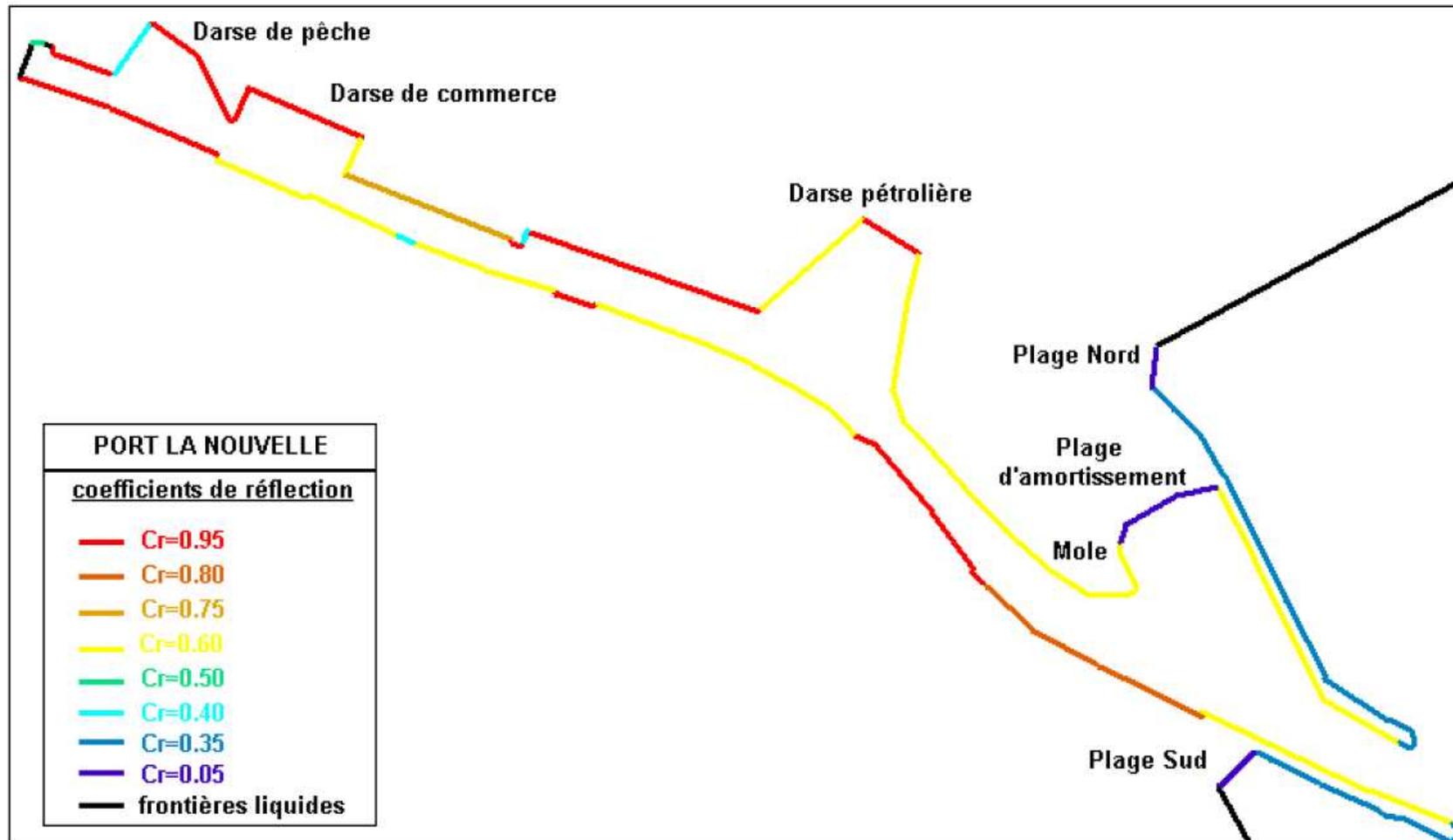


Cr = 0.60

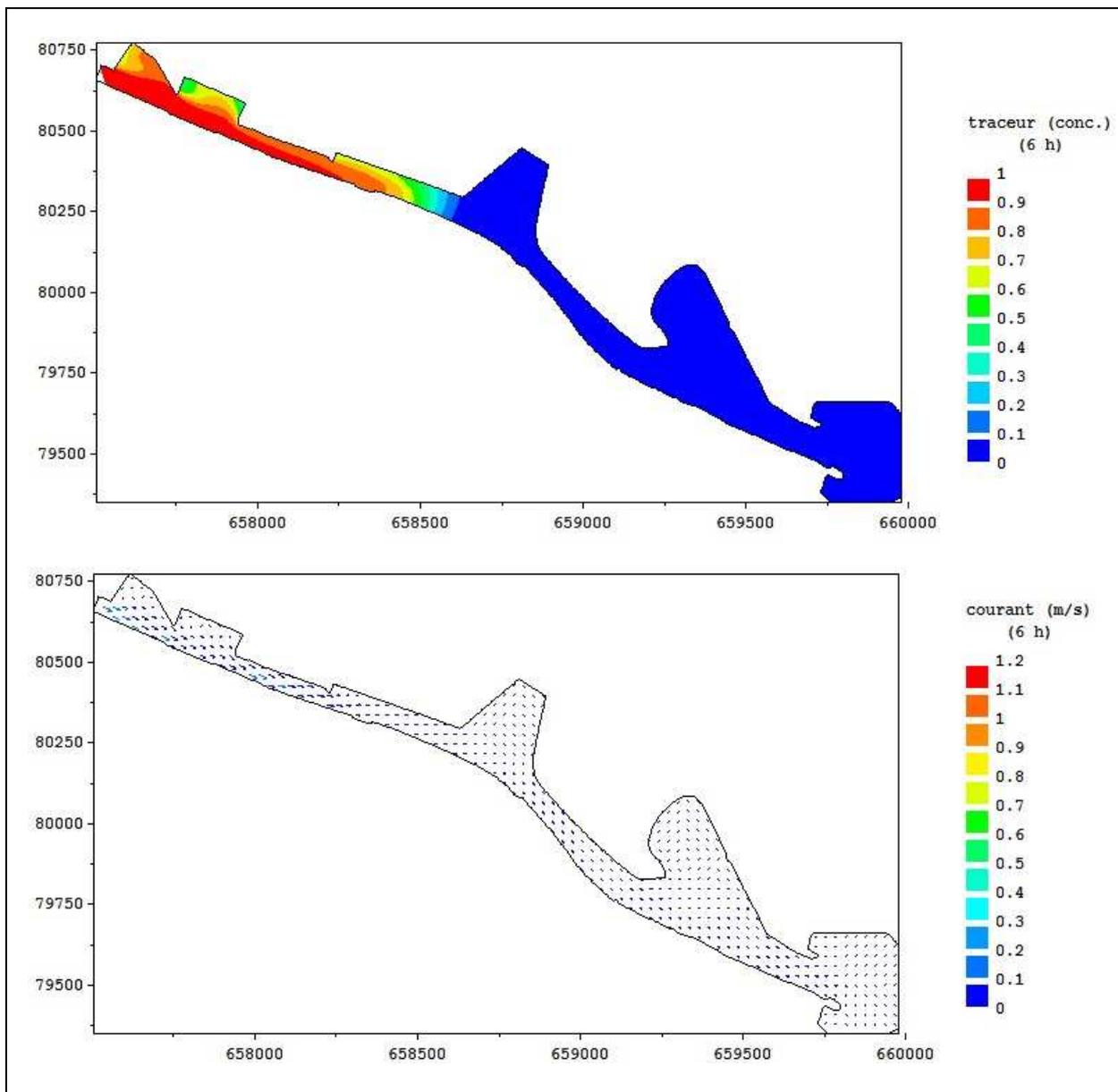
Port-La-Nouvelle, coefficient de réflexion des ouvrages existants :



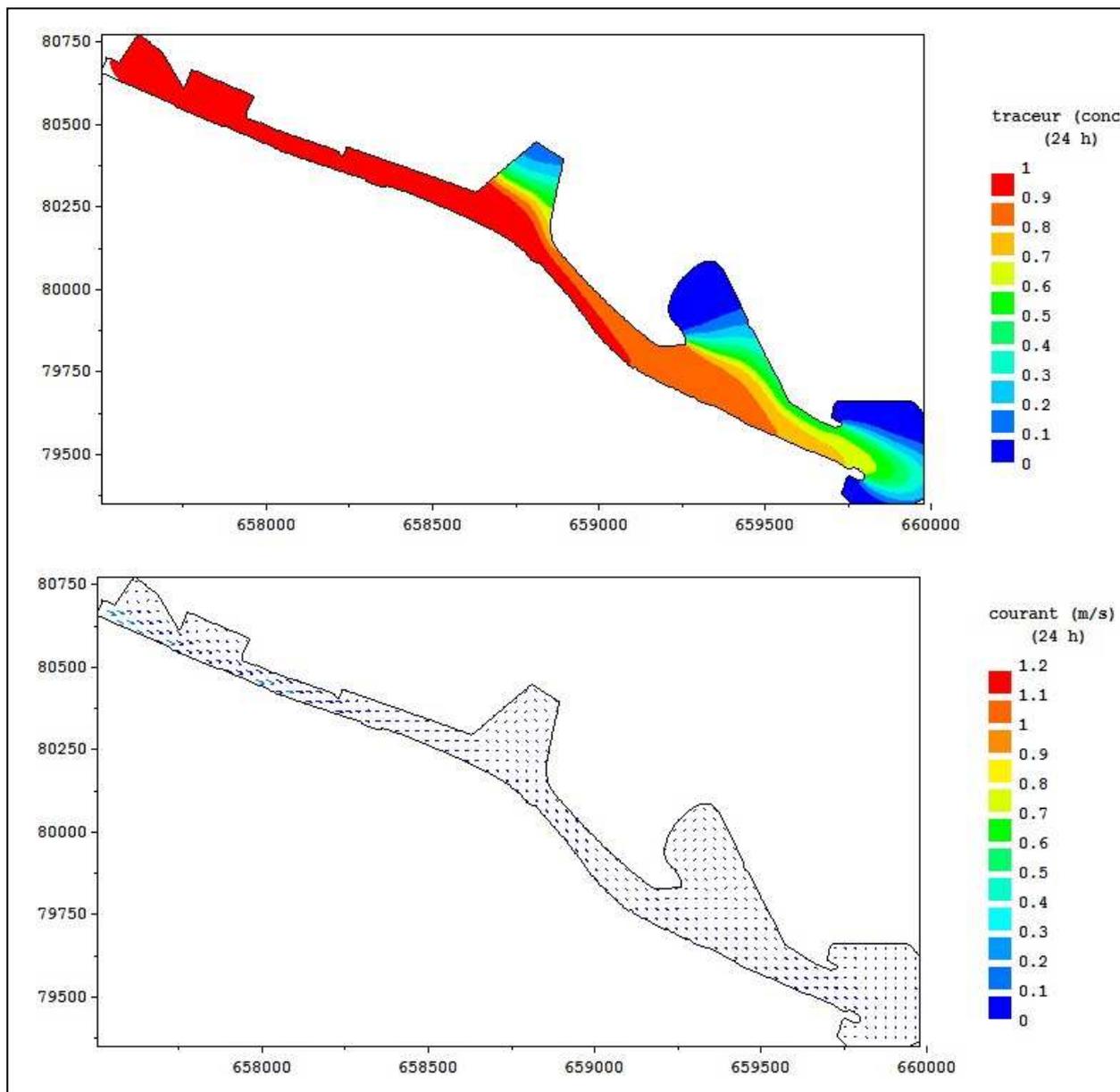
Synthèse Rapport BCEOM :



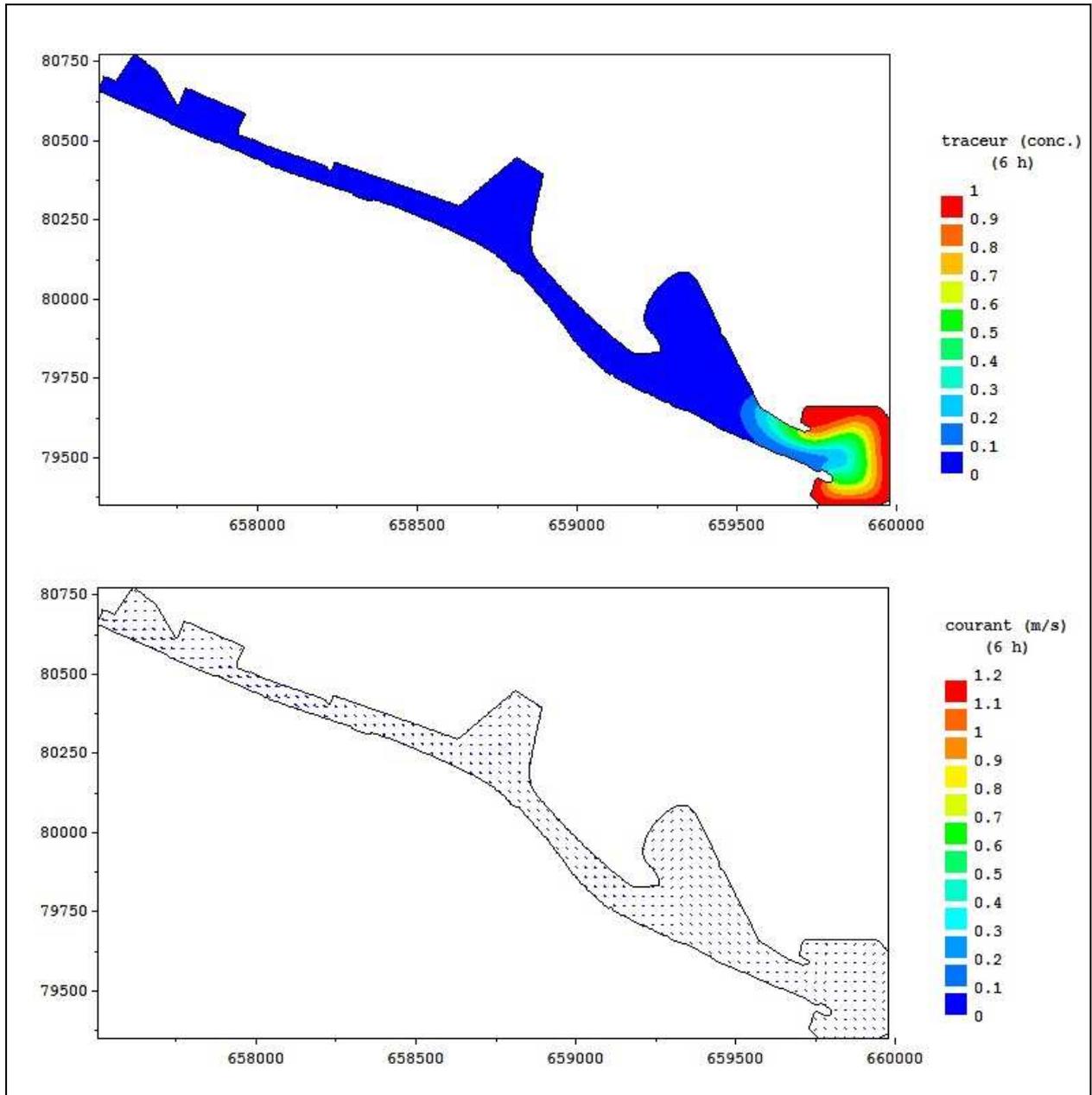
Annexe 10 :
RESULTATS DE COURANTOLOGIE



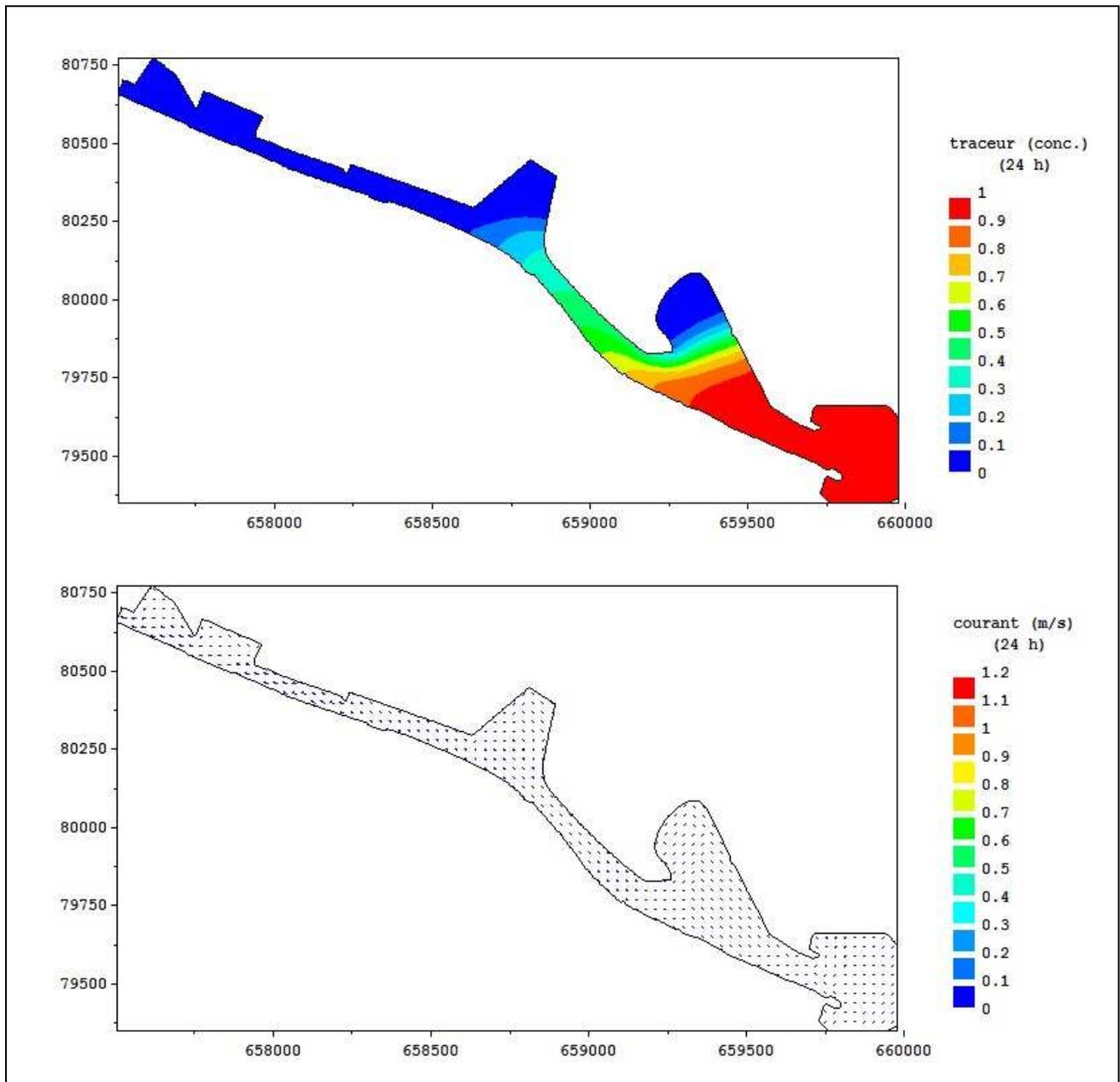
Courant entrant de 0,15 m/s – 6h



Courant entrant de 0,15 m/s – 24h



Courant sortant de -0,10 m/s – 6h



Courant sortant de -0,10 m/s – 24h