

Volet aménagements maritimes

Modélisation des houles Propagation et agitation portuaire Phase PROJET

PORNICHET - 44

Marché de conception réalisation
pour le réaménagement des ports de
plaisance de Pornichet



SEM CEPP

SOUS-TRAITANCE



Modifications	Indice	Date	Établi	Vérfié	Validé	Suivi des modifications		État
	A	05/03/2025	GDU	GDU	MC	Émission initiale		

ÉMETTEUR	ENTITÉ		NUMÉRO INTERNE	DOCUMENT	PHASE ÉTUDE	THÈME	N° DOCUMENT	INDICE	STATUT
CHA	NA	C	24009	NDC	PRO	EXP	003	A	PVI



RAPPORT

Conception et réalisation du programme d'aménagement des ports de plaisance de Pornichet

Modélisation des houles – Propagation et Agitation portuaire

Mars 2025

CHARIER GENIE CIVIL



CLIENT : Charier Génie Civil

COORDONNÉES	2 Rue des Meuniers 44220 Couëron
INTERLOCUTEUR	Monsieur Milig Collobert mcollobert@charier.fr

CREOCEAN

COORDONNÉES	Siège social Zone Technocéan – Rue Charles Tellier 17000 LA ROCHELLE Tél. : 05 46 41 13 13 E-mail : commercial@creocean.fr
INTERLOCUTEUR	Monsieur Gaëtan Dufour gaetan.dufour@creocean.fr

RAPPORT

TITRE	Conception et réalisation du programme d'aménagement des ports de plaisance de Pornichet Modélisation des houles – Propagation et Agitation portuaire
NOMBRE DE PAGES TOTAL	79

VERSION

RÉFÉRENCE	VERSION	DATE	REDACTEUR	CONTRÔLE QUALITE
241208_Propagation_Agitation	Version 1	27/01/2025	TLE	GDU
241208_Propagation_Agitation	Version 2	03/03/2025	TLE/IAZ	GDU
241208_Propagation_Agitation	Version 3	05/03/2025	GDU	GDU

Sommaire

1. Recueil des données météo-océaniques.....	4
1.1. Analyse des vents	5
1.2. Analyse de la houle	8
1.2.1. Distribution des houles	8
1.2.2. Variabilité temporelle	8
1.2.3. Résumé des constats	11
1.2.4. Analyse statistique extrême	11
1.3. Niveaux d'eau	13
1.3.1. Généralités sur la marée.....	13
1.3.2. Hausse du niveau de la mer due au réchauffement climatique.	15
1.3.3. Les niveaux d'eau extrêmes	16
1.3.4. Niveaux de dimensionnement.....	17
2. Stratégie de modélisation	18
2.1. Principes généraux	18
2.2. Modélisation de la propagation de la houle avec le modèle spectral TOMAWAC	18
2.3. Modélisation de l'agitation portuaire avec le modèle ARTEMIS.....	18
3. Propagation des houles du large à la côte.....	19
3.1. Construction du système de modélisation	19
3.2. Simulation des conditions hydrodynamiques	20
3.2.1. Scénarios simulés.....	20
3.2.2. Résultats de la modélisation	20
3.2.3. Synthèse des résultats du modèle TOMAWAC.....	29
4. Modélisation de l'agitation portuaire	31
4.1. Objectifs et méthodologie.....	31
4.2. Méthodologie	31
4.2.1. Description du logiciel.....	31
4.2.2. Domaine, maillage et bathymétrie.....	31
4.2.3. Conditions aux limites.....	33
4.2.4. Scénarios modélisés.....	34
4.3. Critères d'agitation portuaire	34

4.4. Résultats	35
4.4.1. Résultats des cas usuels	35
4.4.2. Résultats des cas extrêmes.....	38
4.4.3. Résultats des cas de mer de vent.....	41
4.4.4. Conclusion sur les résultats de l'agitation portuaire	42
Annexes.....	43

Liste des Figures

<i>Figure 1.1 : Localisation de la zone d'étude et du point au large.</i>	4
<i>Figure 1.2 : Rose des vents réalisée à partir des données de vent extraites du modèle Homere au point d'extraction entre janvier 1994 et avril 2020.</i>	5
<i>Figure 1.3 : Roses des vents mensualisées</i>	6
<i>Figure 1.4 : Evolution des conditions de vent de 1994 à 2020</i>	6
<i>Figure 1.5 : Courbe de dépassement saisonnier du vent de 1994 à 2020</i>	7
<i>Figure 1.6 : Corrélogramme vitesse vs direction du vent de 1994 à 2020</i>	8
<i>Figure 1.7 Rose des houles réalisée à partir des données de houle extraites du modèle Homere au point d'extraction entre janvier 1994 et avril 2020.</i>	9
<i>Figure 1.8 : Evolution des conditions de houle de 1994 à 2020.</i>	9
<i>Figure 1.9 : Méthode des clusters appliquée à la houle extraite du modèle Homere au point d'extraction entre janvier 1994 et avril 2020.</i>	10
<i>Figure 1.10 : Boite à moustaches de la variabilité mensuelle en Hm0. La boite représente l'intervalle entre le premier et le troisième quartile, la médiane et la moyenne sont représentées respectivement par des traits pleins et pointillés vert. Les valeurs extrêmes sont représentées par des points.</i>	10
<i>Figure 1.11 : Série temporelle des hauteurs significatives échantillonnée grâce à la méthode POT à partir des données de houle extraites du modèle Homere au point d'extraction entre janvier 1994 et mars 2020.</i>	11
<i>Figure 1.12 : Période de retour des Hm0 extrêmes au point d'extraction.</i>	12
<i>Figure 1.13 : Carte des différents sites d'observation de la marée autour de l'estuaire de la Loire (SHOM 2020).</i>	13
<i>Figure 1.14 : Schéma récapitulatif des niveaux de marée (RAM, SHOM 2020)</i>	14
<i>Figure 1.15 : Références altimétriques maritimes pour le site de Pornichet (RAM, SHOM 2020).</i>	14
<i>Figure 1.16 : Projections de l'élévation du niveau marin pour le scénario SSP5-8.5, GIEC 202515</i>	
<i>Figure 1.17 : Paramètres à considérer dans l'estimation des niveaux d'eau extrêmes (Gervais 2008).</i>	16
<i>Figure 1.18 : Niveaux d'eau extrêmes à Saint-Nazaire, Cerema 2022.</i>	17
<i>Figure 3.1 : Maillage interpolé au niveau du site d'étude.</i>	19
<i>Figure 3.2 : Bathymétrie autour du port de Pornichet et position de la ligne d'extraction des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage.</i>	21

Figure 3.3 : Bathymétrie autour du port de Pornichet et position de la ligne d'extraction des houles au niveau du terre-plein.	21
Figure 3.4 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario cas 2.	22
Figure 3.5 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario cas 2.	23
Figure 3.6 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario cas 2.	24
Figure 3.7 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario cas 2.	24
Figure 3.8 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario 100 ans niveau moyen.	25
Figure 3.9 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario 100 ans niveau moyen.	26
Figure 3.10 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario 100 ans niveau moyen.	26
Figure 3.11 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario 100 ans niveau moyen.	27
Figure 3.12 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario 100 niveau d'eau élevé.	28
Figure 3.13 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario 100 niveau d'eau élevé.	28
Figure 3.14 : Position de la ligne d'extraction et découpage des tronçons 1,2 et 3.	29
Figure 3.15 : Position de la ligne d'extraction et découpage des tronçons 4 et 5.	29
Figure 4.1 : Visualisation du maillage utilisé pour le modèle d'agitation portuaire	32
Figure 4.2 : Visualisation de la bathymétrie utilisée dans le modèle d'agitation portuaire	32
Figure 4.3 : Coefficients de réflexion utilisés dans le modèle	33
Figure 4.4 : Hauteurs de houle limites (en pieds) à ne pas dépasser pour un bassin portuaire de plaisance (PIANC, 2016)	34
Figure 4.5 : Visualisation des zones d'extraction	35
Figure 4.6 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour le cas 1 - Zoom sur le port	37
Figure 4.7 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour le cas 2 - Zoom sur le port	37
Figure 4.8 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour le cas 3 - Zoom sur le port	38
Figure 4.9 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour le cas de période de retour annuelle - Zoom sur le port	40

Figure 4.10 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour le cas de période de retour décennale - Zoom sur le port	40
Figure 4.11 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour le cas de période de retour centennale - Zoom sur le port	41
Figure 4.12 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour un vent de 13m/s de direction Sud à Sud-Est - Zoom sur le port	42
Figure 4.13 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario cas 1.	44
Figure 4.14 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario cas 1.	44
Figure 4.15 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario cas 1.	45
Figure 4.16 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario cas 1.	45
Figure 4.17 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario cas 2.	46
Figure 4.18 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario cas 3.	46
Figure 4.19 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario cas 3.	47
Figure 4.20 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario cas 3.	47
Figure 4.21 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario 1 an niveau moyen.	48
Figure 4.22 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario 1 an niveau moyen.	48
Figure 4.23 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario 1 an niveau moyen.	49
Figure 4.24 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario 1 an niveau moyen.	49
Figure 4.25 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario 10 ans niveau moyen.	50
Figure 4.26 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario 10 ans niveau moyen.	50
Figure 4.27 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario 10 ans niveau moyen.	51
Figure 4.28 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario 10 ans niveau moyen.	51
Figure 4.29 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario 1 an niveau élevé.	52
Figure 4.30 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario 1 an niveau élevé.	52

Figure 4.31 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario 1 an niveau élevé.	53
Figure 4.32 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario 1 an niveau élevé.	53
Figure 4.33 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario 10 ans niveau élevé.....	54
Figure 4.34 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario 10 ans niveau élevé.....	54
Figure 4.35 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario 10 ans niveau élevé.	55
Figure 4.36 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario 10 ans niveau élevé.	55
Figure 4.37 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario 100 ans niveau élevé.....	56
Figure 4.38 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario 100 ans niveau élevé.....	56
Figure 4.39 : Position des deux profils bathymétriques.	58
Figure 4.40 : Profil 1.	58
Figure 4.41 : Profil 2.	59

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau de synthèse des hauteurs significatives correspondantes aux différentes périodes de retour.	12
Tableau 2 : Tableau de synthèse des tailles des mailles.	19
Tableau 3 : Synthèse des résultats des modélisations pour chaque tronçon et chaque scénario.	30
Tableau 4 : Tableau illustrant l'agitation maximale et moyenne au niveau des zones d'extraction - Cas usuels	36
Tableau 5 : Tableau illustrant l'agitation maximale et moyenne au niveau des zones d'extraction - Cas extrêmes	39

Liste des annexes

<i>Annexe 1 : Figures des resultats de modelisation TOMAWAC. Résultats cas1</i>	<i>44</i>
<i>Annexe 2 : Figures des resultats de modelisation TOMAWAC. Résultats cas3.....</i>	<i>46</i>
<i>Annexe 3 : Figures des resultats de modelisation TOMAWAC. Résultats scénario 1 an niveau moyen</i>	<i>48</i>
<i>Annexe 4 : Figures des resultats de modelisation TOMAWAC. Résultats scénario 10 ans niveau moyen</i>	<i>50</i>
<i>Annexe 5 : Figures des resultats de modelisation TOMAWAC. Résultats scénario 1 an niveau eleve.....</i>	<i>52</i>
<i>Annexe 6 : Figures des resultats de modelisation TOMAWAC. Résultats scénario 10 ans niveau eleve.....</i>	<i>54</i>
<i>Annexe 7 : Figures des resultats de modelisation TOMAWAC. Résultats scénario 100 ans niveau eleve.....</i>	<i>56</i>
<i>Annexe 8 : Profils bathymétriques</i>	<i>58</i>
<i>Annexe 9 : Résultats de l'agitation portuaire</i>	<i>60</i>
<i>.....</i>	<i>60</i>
<i>.....</i>	<i>65</i>

LEXIQUE DEFINITIONS ET CONVENTIONS

Définition des paramètres

Notations relatives au vent

Notation	Unité	Définition
Ws	m/s	Vitesse moyenne du vent sur 10 minutes À une altitude de 10 m
Wd	° / Nord	Direction du vent Associée à Ws

Notations relatives au niveau de la mer

Notation	Unité	Définition
Surcote ou Décote	m	Surcote ou Décote atmosphérique incluant l'effet du vent, le baromètre inverse, et la variation saisonnière du niveau de la mer Marée et réchauffement climatique exclus
Niveau de marée	m	Niveau de marée d'origine astronomique

Notations relatives aux niveaux caractéristiques de marée

Notation	Unité	Définition
PHMA	m	Plus Haute Mer Astronomique
PMVE	m	Pleine Mer Moyenne de Vive-Eau
NM	m	Niveau Moyen
BMVE	m	Basse Mer Moyenne de Vive-Eau
PMBA	m	Plus Basse Mer Astronomique

Notations relatives aux vagues

Notation	Unité	Définition
Hm0 or Hs	m	Hauteur de houle significative spectrale = $4 \sqrt{E}$, où E est l'énergie du spectre de houle
H1/3	m	Hauteur de houle significative Définie comme la moyenne du 1/3 supérieur des vagues En eau profonde $H1/3 \approx Hm0$
Hmax	m	Hauteur de houle maximum = $0.707 \times H1/3 \sqrt{(\ln N)}$ où N est le nombre de vagues
Tp	s	Période pic Définie comme l'inverse de la fréquence la plus énergétique du spectre total, après somme des directions
DirM	° / North	Direction moyenne Définie comme la direction Moyenne du spectre de houle
DirTp	° / North	Direction pic Définie comme la direction la plus énergétique de la bande de fréquence correspondant au Tp

Conventions

TRES IMPORTANT :

- ▶ Par convention, les directions données sont :
 - Celles d'où viennent les vagues ;
 - Celles d'où vient le vent ;
 - Celles où se dirigent les courants ;
- ▶ Les coordonnées sphériques se rapportent à la projection de Mercator dans le système WGS84 ;
- ▶ Les coordonnées verticales sont relatives au ZH (Zéro Hydrographique).

Statistiques

Les diagrammes présentés dans ce document sont utilisés pour montrer la répartition statistique de deux variables :

- ▶ Un **Scatter plot (corrélogramme ou nuage de points)** est une représentation graphique permettant de montrer les valeurs simultanées de deux variables issues d'une base de données. Les couples de données sont affichés sous forme de collection de points, la valeur du premier paramètre déterminant la position sur l'axe horizontal, la valeur du second celle sur l'axe vertical.
- ▶ Un **diagramme quantile-quantile (ou Q-Q plot)** est une méthode graphique pour comparer les distributions statistiques de deux paramètres en affichant pour chaque quantile leur valeur respective.

1. Recueil des données météo-océaniques

Afin d'analyser les conditions hydrodynamiques auxquelles le site d'étude est soumis, une étude sur une longue période est nécessaire. Les données de vent et de houle ont été extraites à partir de la base HOMERE de l'Ifremer. Ces données couvrent un point situé au sud-ouest du port de Pornichet et ont été utilisées pour calculer des valeurs statistiques caractéristiques.

La base HOMERE fournit des informations détaillées sur les caractéristiques de la houle (hauteur significative, période, direction) ainsi que sur les vents et conditions météorologiques influençant la propagation de la houle. Ces données, largement utilisées en recherche scientifique et en modélisation, permettent d'établir une analyse précise des conditions environnementales.

Le point sélectionné est situé aux coordonnées suivantes :

- ▶ Longitude : $-2.3924^{\circ}W$;
- ▶ Latitude : $47.2153^{\circ}N$.

La Figure 1.1 illustre la position du point en lien avec la zone d'étude. Toutes les caractéristiques analysées dans ce chapitre en sont issues.

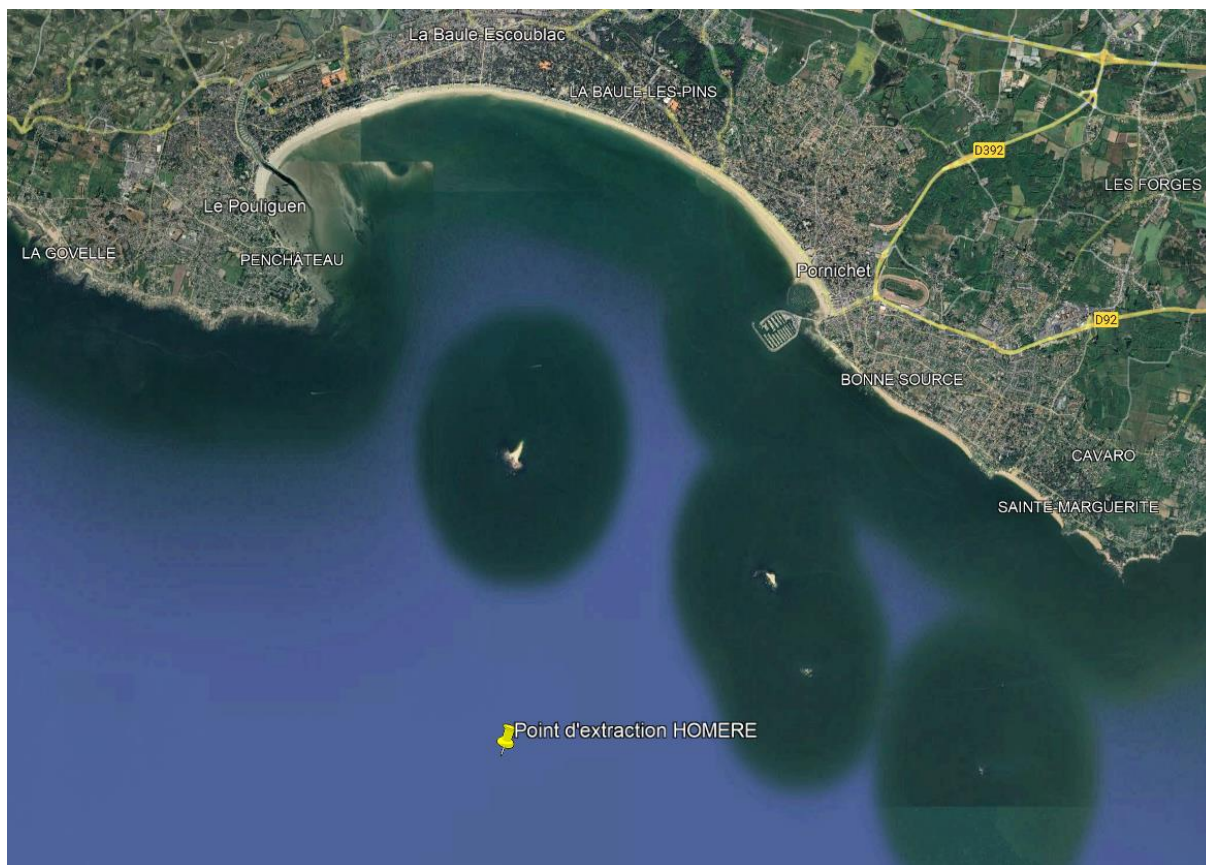


Figure 1.1 : Localisation de la zone d'étude et du point au large.

1.1. Analyse des vents

La base de données HOMERE contient également des données de vent. Ces données sont issues du modèle ERA 5. Le modèle **ERA5** est une réanalyse météorologique et climatique développée par le **Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme** (ECMWF). Il fournit des données atmosphériques, terrestres et océaniques globales avec une résolution spatiale fine (environ **31 km**) et une résolution temporelle horaire. ERA5 couvre une période historique longue, de 1950 à aujourd'hui, et inclut des variables telles que la vitesse et la direction du vent, la température, la pression et les précipitations.

Les données de vent sont extraites au niveau du point Homere choisi et ont donc une résolution temporelle horaire sur la période 1994-2020 et ont été convertis en vents moyennés sur 10 minutes en utilisant la formule fournie par les recommandations ROSA 2000.

La vitesse du vent au large de Pornichet varie de manière importante au cours des saisons. Les vents durant la période hivernale sont plus intenses que ceux de la période estivale. On observe en effet que le vent médian est de l'ordre de 16 km/h sur pendant les mois de juillet et d'août contre une vitesse médiane de 25 km/h pendant les mois de janvier et février.

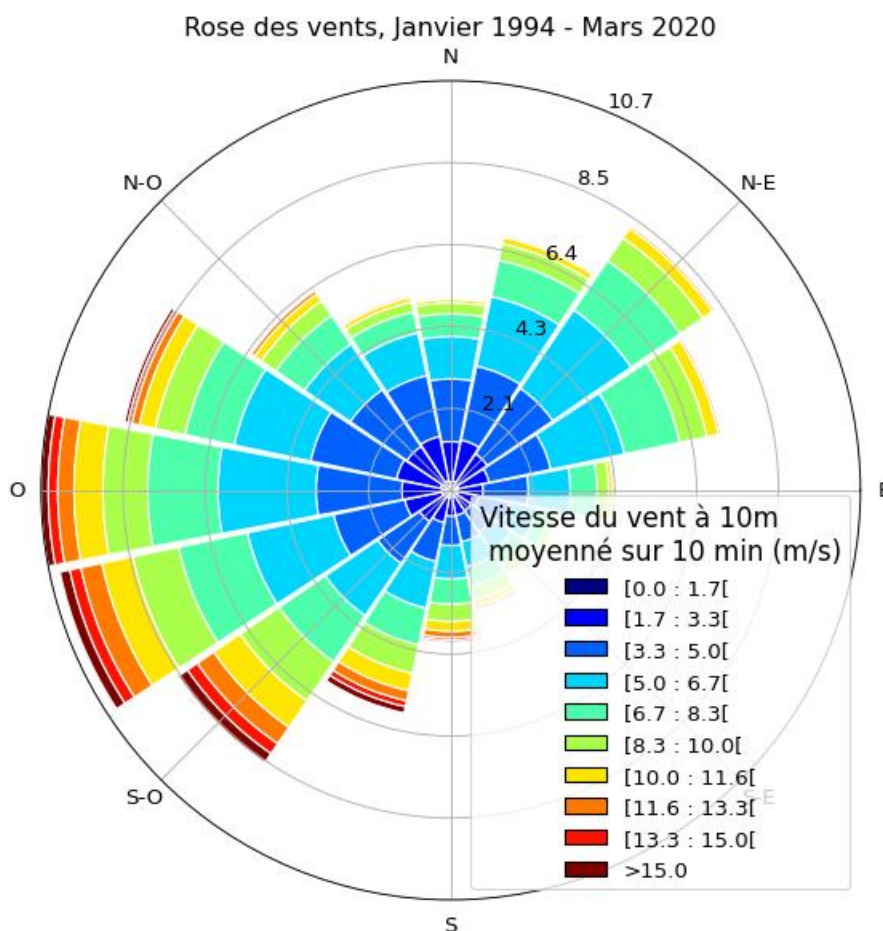


Figure 1.2 : Rose des vents réalisée à partir des données de vent extraites du modèle Homere au point d'extraction entre janvier 1994 et avril 2020.

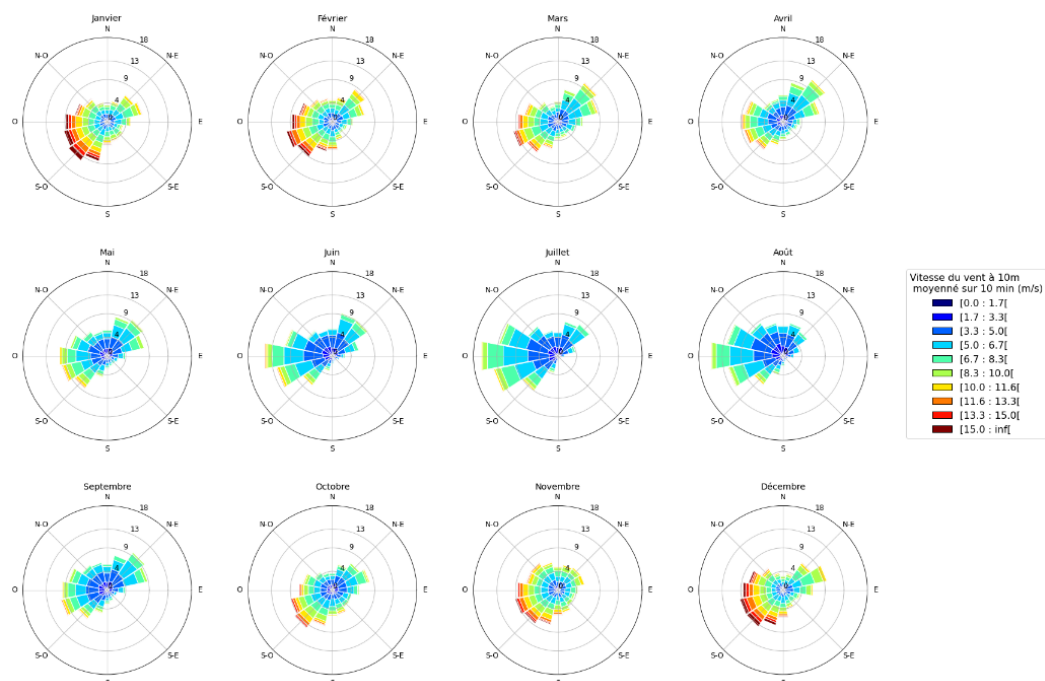


Figure 1.3 : Roses des vents mensualisées

Moyenne et tendance trimestrielle et saisonnière de vent, Janvier 1994 - Mars 2020

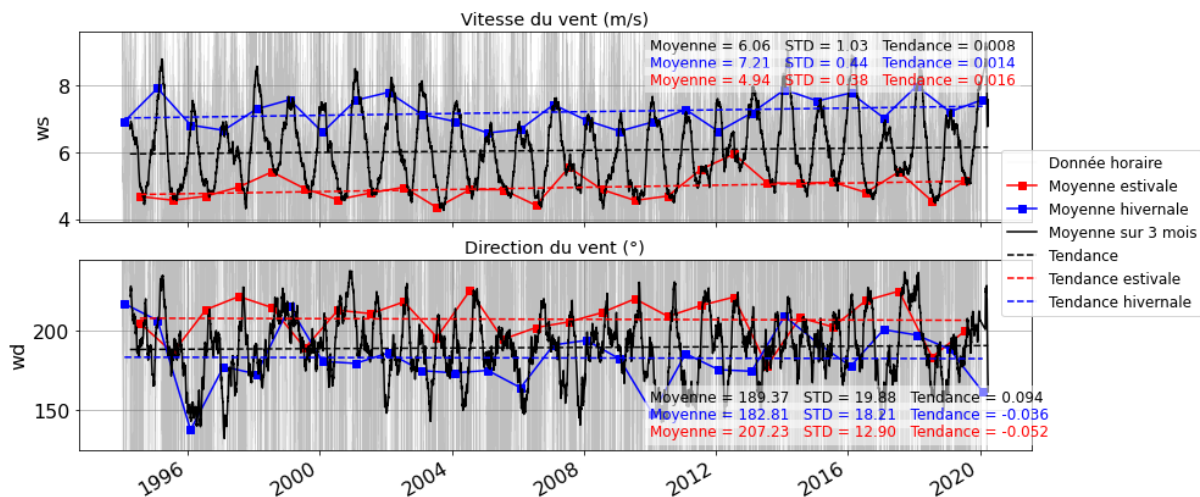


Figure 1.4 : Evolution des conditions de vent de 1994 à 2020

Résultats principaux :

► **Distribution directionnelle :**

La Figure 1.2 présente la rose des vents basée sur les données HOMERE de 1994 à 2020. Les vents proviennent de tous les secteurs, avec une prédominance marquée des secteurs Ouest et Sud-Ouest pour les vents les plus forts.

► **Variabilité saisonnière et long terme :**

- Les vents dépassent 45 km/h environ 24 heures par mois.
- Les vitesses moyennes maximales (sur 10 minutes) atteignent environ 90km/h.
- Une variabilité saisonnière significative est observée, accompagnée d'une tendance à l'intensification des vents moyens (Figure 1.4).

Par ailleurs, les courbes de dépassement saisonnier du vent présentées ci-dessous indiquent qu'un vent moyen de 25 nœuds (soit 13m/s), est dépassé :

- ▶ 0.6% du temps en été (soit 1 jour par saison estivale en moyenne) ;
- ▶ 5.0% du temps en hiver (soit 9 jours par saison hivernale en moyenne) ;
- ▶ 3.0% du temps sur une année type (soit 10 jours par an en moyenne).

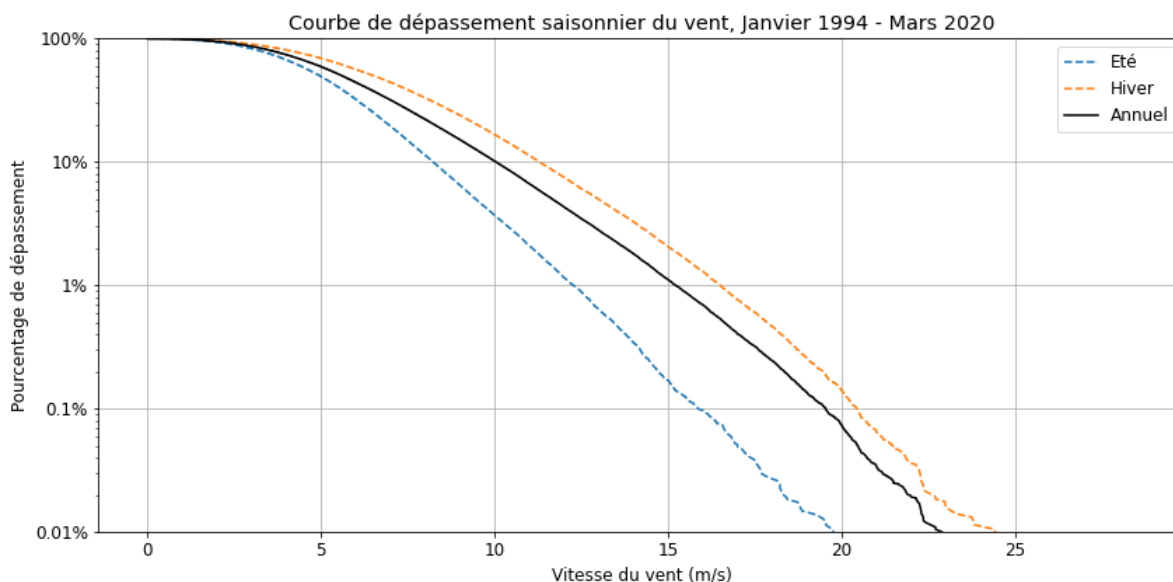


Figure 1.5 : Courbe de dépassement saisonnier du vent de 1994 à 2020

Ces pourcentages de dépassement s'entendent tous secteurs confondus, or les vents de secteur Sud-Est à Sud-Ouest qui affectent le port de Pornichet sont observés 38.5% du temps. Ainsi, un vent moyen de 25 nœuds (soit 13m/s) de secteur Sud-Est à Sud-Ouest, est dépassé :

- ▶ 0.2% du temps en été (soit 0.5 jour par saison estivale en moyenne) ;
- ▶ 1.9% du temps en hiver (soit 3.5 jours par saison hivernale en moyenne) ;
- ▶ 1.2% du temps sur une année type (soit 4 jours par an en moyenne).

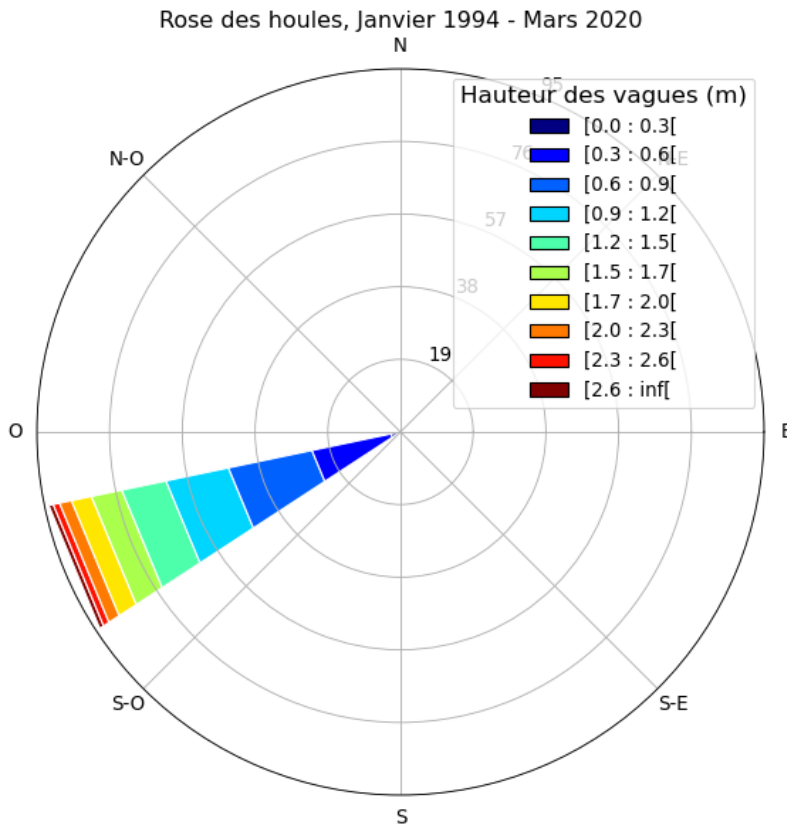


Figure 1.7 Rose des houles réalisée à partir des données de houle extraites du modèle Homere au point d'extraction entre janvier 1994 et avril 2020.

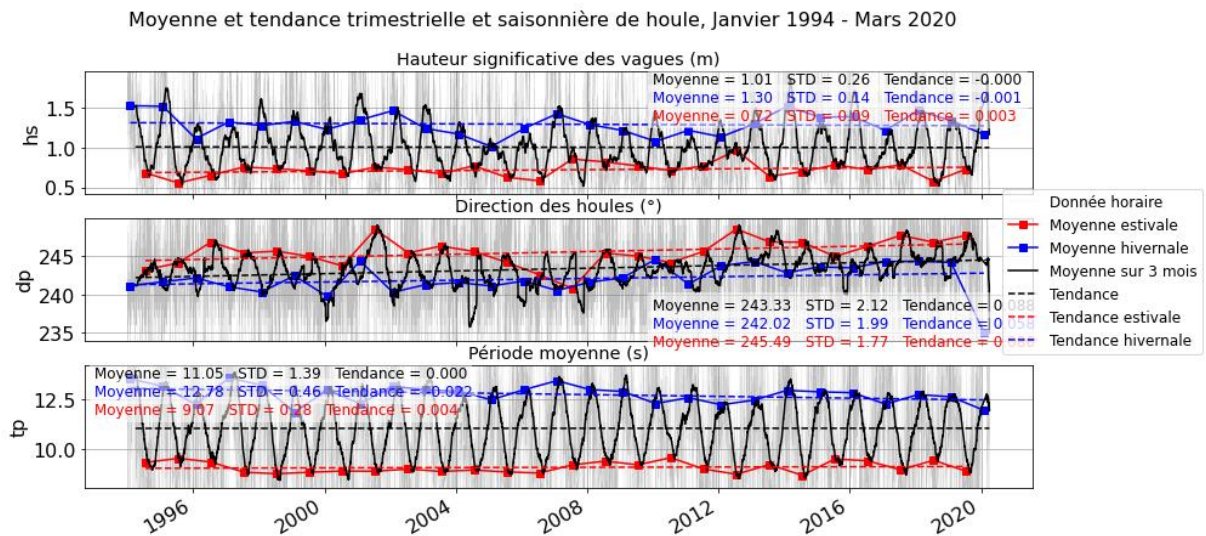


Figure 1.8 : Evolution des conditions de houle de 1994 à 2020.

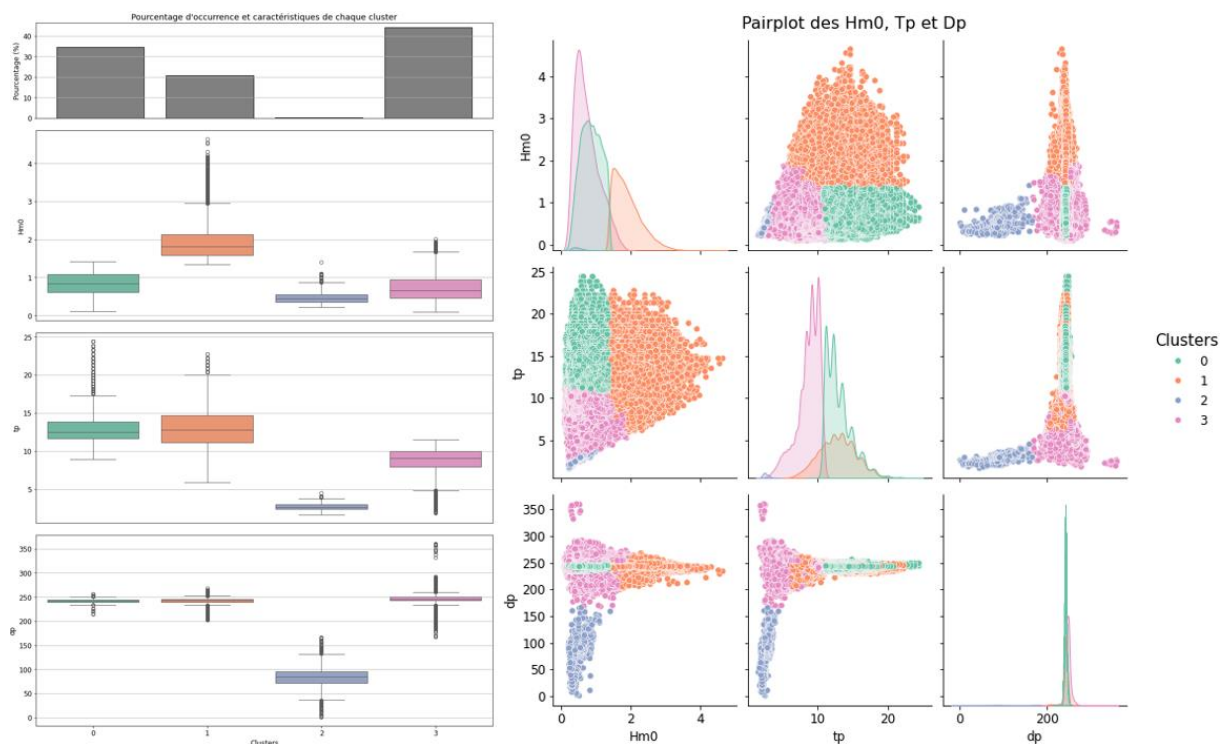


Figure 1.9 : Méthode des clusters appliquée à la houle extraite du modèle Homere au point d'extraction entre janvier 1994 et avril 2020.

Boxplot de la variabilité mensuelle des vagues, Janvier 1994 - Mars 2020

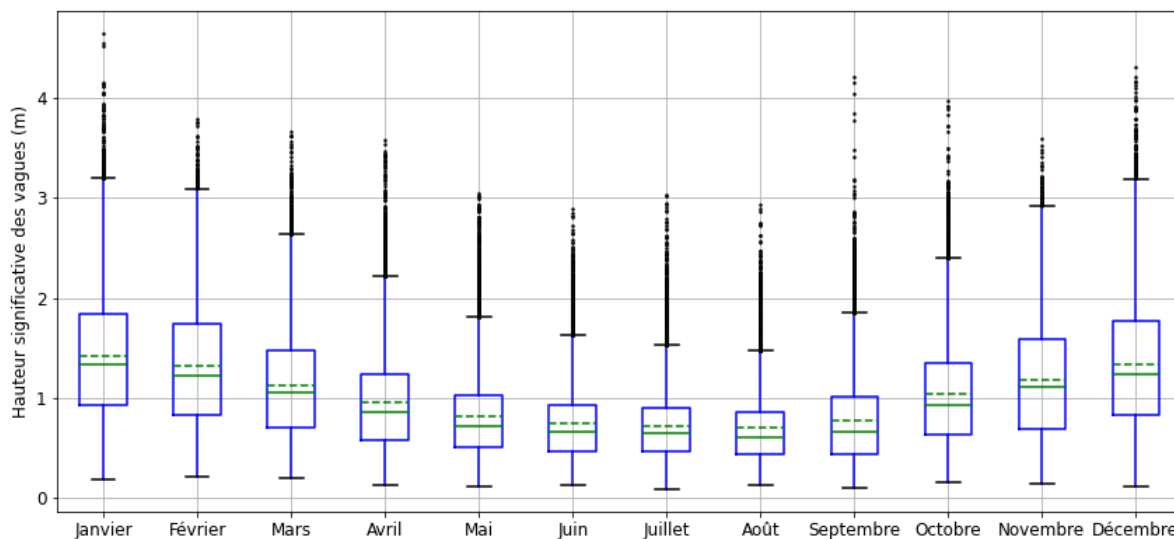


Figure 1.10 : Boîte à moustaches de la variabilité mensuelle en Hm0. La boîte représente l'intervalle entre le premier et le troisième quartile, la médiane et la moyenne sont représentées respectivement par des traits pleins et pointillés vert. Les valeurs extrêmes sont représentées par des points.

1.2.3. Résumé des constats

Les analyses statistiques permettent de dégager les observations suivantes :

- ▶ Plus de 95 % des vagues proviennent du secteur Ouest-sud-ouest.
- ▶ Les vagues les plus hautes, dépassant 6 m de hauteur significative, viennent principalement de l'Ouest-Sud-Ouest.
- ▶ Les hauteurs significatives excèdent 1.2 m environ 10 % du temps en été et atteignent 2.1 m 10 % du temps en hiver.
- ▶ Les houles les plus longues proviennent du Sud-Ouest, avec des périodes de pic typiquement comprises entre 9 et 13 secondes.

1.2.4. Analyse statistique extrême

Pour évaluer les conditions de houle extrêmes, la méthode **Peak Over Threshold** (POT) a été appliquée aux données HOMERE. Un critère de durée minimum de deux jours entre chaque point échantillonné a été retenu afin d'assurer l'indépendance des épisodes de forte houle. Une loi exponentielle a ensuite été ajustée aux données par la méthode **Maximum Likelihood Estimate** (MLE), permettant de déterminer le meilleur ajustement.

La valeur du seuil appliquée à la méthode POT a été déterminée en étudiant sa stabilité pour les distributions exponentielles et de Pareto généralisée. Une valeur de seuil d'un peu plus de 3m (percentile 99.7%) a donc été utilisée, permettant d'assurer une bonne représentativité des extrêmes tout en conservant un nombre d'évènements suffisant pour limiter les incertitudes.

La série temporelle échantillonnée grâce à la méthode POT est présentée en Figure 1.11, la courbe d'extrapolation des houles de projet en Figure 1.12 et le tableau synthétisant les hauteurs significatives correspondantes aux différentes périodes de retour dans le Tableau 1.

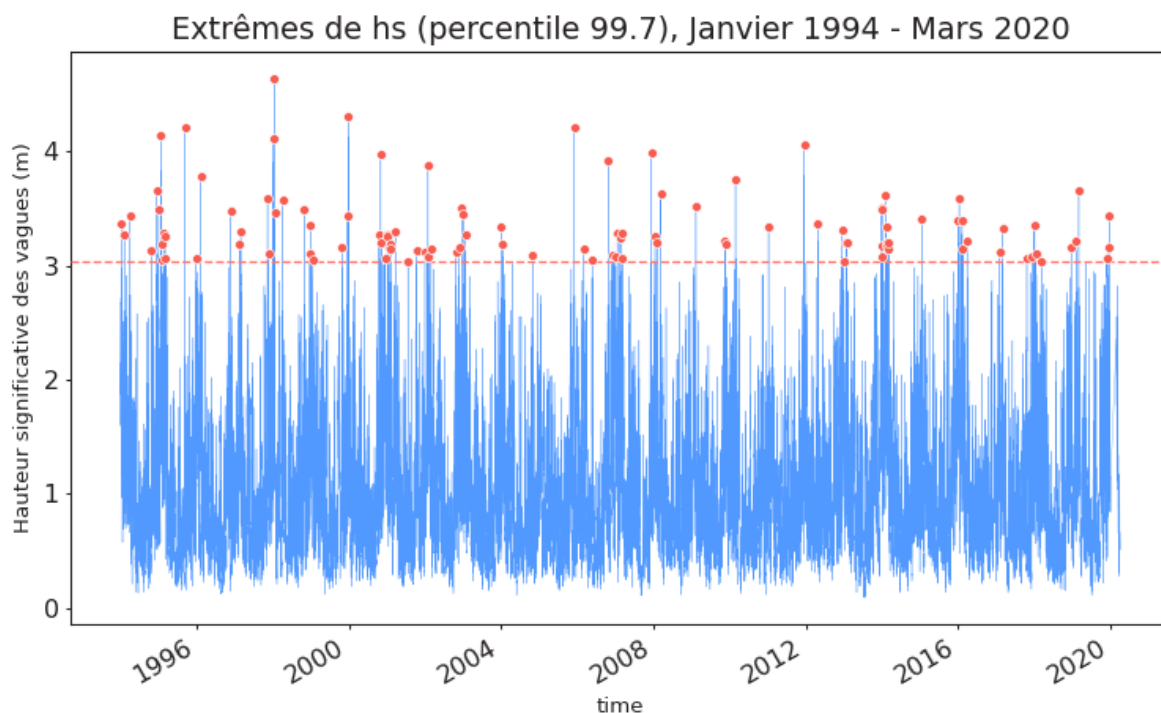


Figure 1.11 : Série temporelle des hauteurs significatives échantillonnée grâce à la méthode POT à partir des données de houle extraites du modèle Homere au point d'extraction entre janvier 1994 et mars 2020.

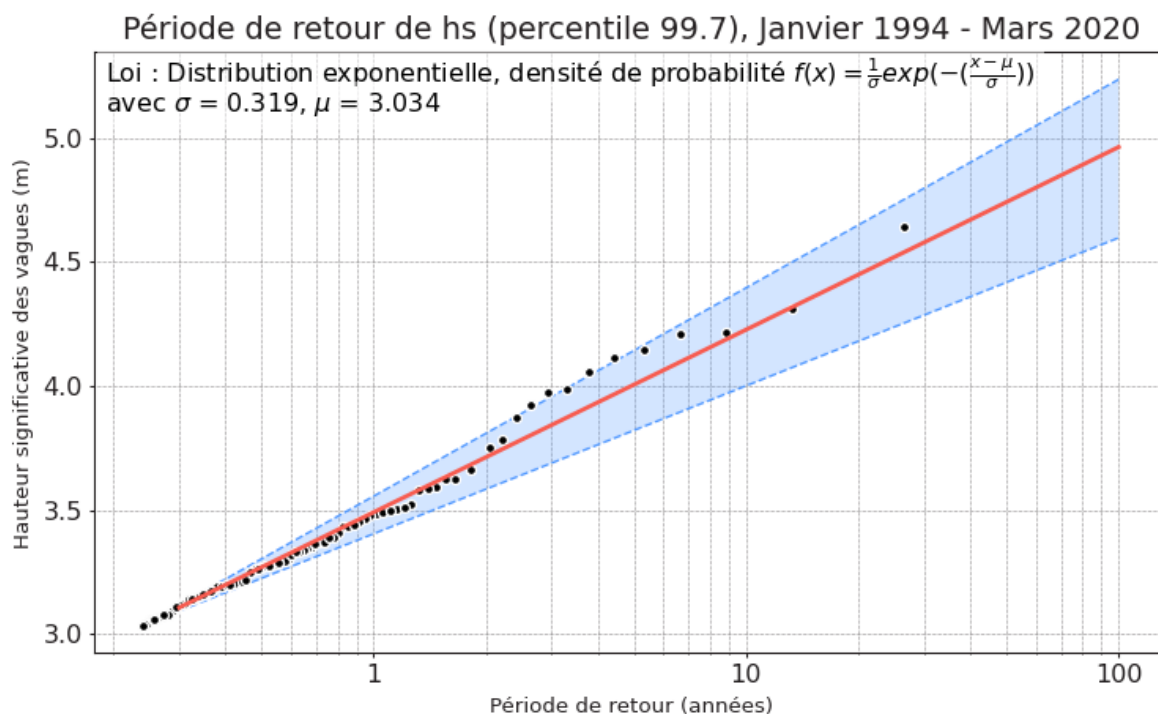


Figure 1.12 : Période de retour des Hm0 extrêmes au point d'extraction.

Tableau 1 : Tableau de synthèse des hauteurs significatives correspondantes aux différentes périodes de retour.

Période de retour (années)	Mode	Borne inférieure (95%)	Borne supérieure (95%)
1	3.49	3.40	3.56
5	4.01	3.82	4.14
10	4.23	4.00	4.40
20	4.45	4.18	4.65
30	4.58	4.29	4.80
50	4.74	4.42	4.98
100	4.96	4.60	5.23

1.3. Niveaux d'eau

1.3.1. Généralités sur la marée

La marée en Loire-Vendée se caractérise par un régime semi-diurne, avec deux pleines mers et deux basses mers par jour lunaire, soit environ 24 heures et 50 minutes. Cette zone présente des amplitudes de marée importantes, de l'ordre de 5,6m à Pornichet pour une marée maximale. Les marées de vives-eaux surviennent lors de la pleine lune ou de la nouvelle lune.

Les niveaux de marée caractéristiques sont fournis par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) au niveau du port de Portsall. Des extraits de la version 2020 des Références Altimétriques Maritimes du SHOM (« Références Altimétriques Maritimes » 2020) sont disponibles sur la Figure 1.13, Figure 1.14 et Figure 1.15.

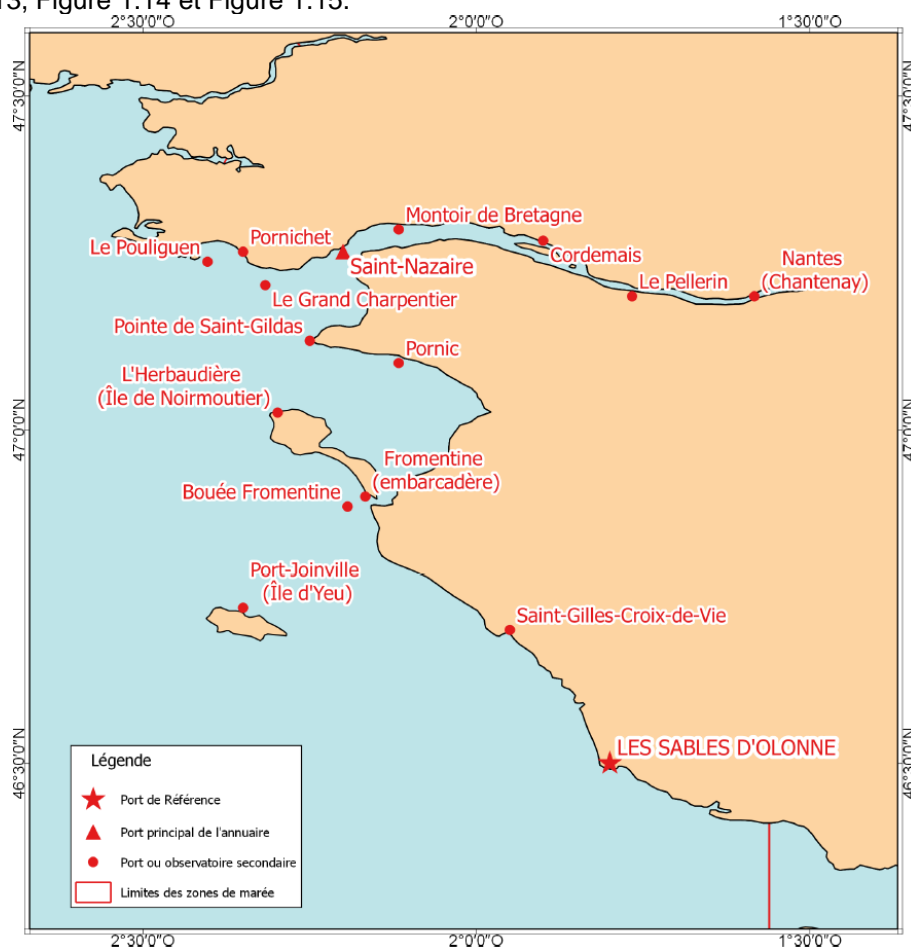


Figure 1.13 : Carte des différents sites d'observation de la marée autour de l'estuaire de la Loire (SHOM 2020).

Cas des marées de type semi-diurne

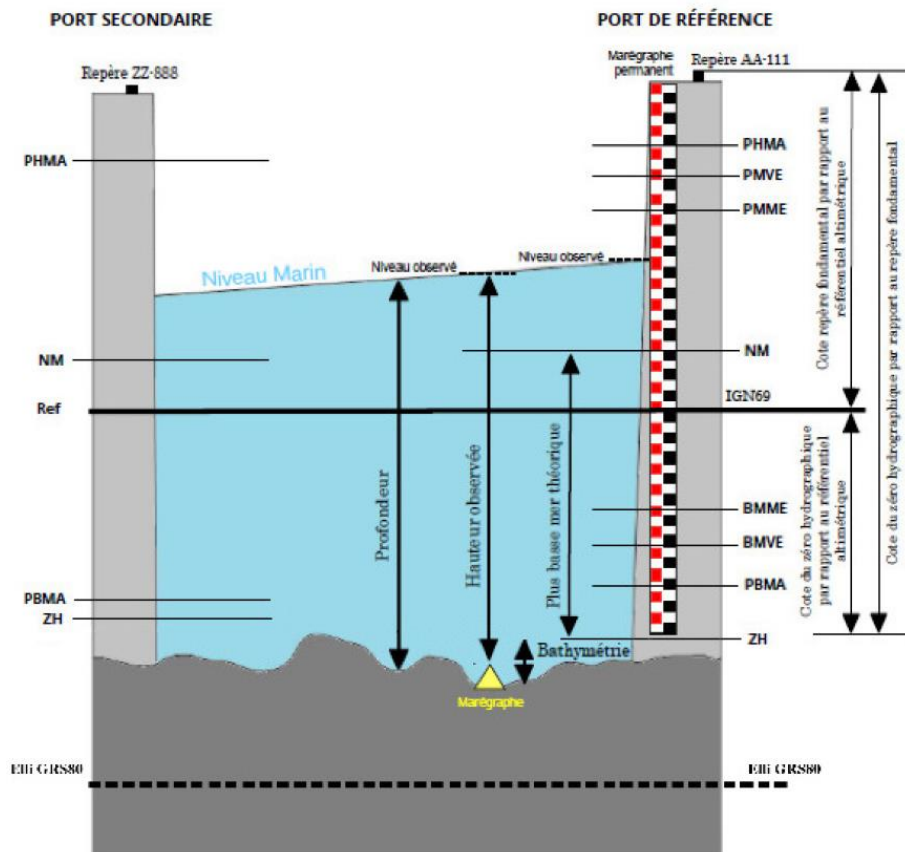


Figure 1.14 : Schéma récapitulatif des niveaux de marée (RAM, SHOM 2020)

Nom	Type	Lat.	Long.	Et.	Année CH	PHMA	PMVE	PMME	NM	BMME	BMVE	PBMA
Pornichet	S	47 15 N	02 21 W	3.41		06.22	05.55	04.40	03.41	02.20	00.80	-0.01
Nom	Repère fondamental					Organisme	Date	RF/ZH	RF/Ref	ZH/Ref	ZH/Elli	Ref
Pornichet	O.KS-35					IGN	1975	14.038	11.111	-2.927		IGN69

Figure 1.15 : Références altimétriques maritimes pour le site de Pornichet (RAM, SHOM 2020).

Au niveau de Pornichet, les niveaux extrêmes de la marée donnent un maximum de + 6.22 m CM et comme minimum -0.01 m CM. Les variations journalières de la marée sont de l'ordre de 3.5 m.

1.3.2. Hausse du niveau de la mer due au réchauffement climatique.

La planète Terre est dans une phase de réchauffement climatique fortement provoquée depuis le siècle dernier par l'activité humaine. Ce réchauffement climatique a une incidence sur la montée du niveau des océans et des mers à travers le monde. Le dernier rapport AR6 (publié le 09 Aout 2021) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) qui fait suite au rapport spécial intitulé « Le changement climatique, les océans et la cryosphère » a été publié en septembre 2019 présente les derniers résultats des différents modèles à l'horizon 2100.

Dans l'AR6, sur la base de cinq hypothèses différentes concernant la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise dans les années à venir (période 2000-2100), chaque scénario SSP (Shared socioeconomic pathway) Les scénarios SSP, sont basés sur des projections socio-économiques à l'échelle mondiale, qui prennent en compte des facteurs tels que la croissance démographique, l'urbanisation, l'évolution technologique et l'évolution des politiques. Les cinq scénarios SSP vont de SSP1 (développement durable) à SSP5 (développement non durable). Le chiffre associé à ces scénarios correspond à une valeur du forçage radiatif en watts par mètre carré (W/m²) en 2100 par rapport à l'année préindustrielle. Le forçage radiatif représente le changement d'équilibre énergétique de la Terre dû à un changement dans l'irradiance solaire, dans la composition de l'atmosphère ou dans la réflectivité de la surface de la Terre (albédo).

Les estimations de hausse du niveau des mers globale à l'échelle mondiale par rapport au niveau 1995-2014 et à l'échéance 2100 varient de la façon suivante selon les scénarios :

- ▶ +0,28-0,55 m pour le scénario SSP1-1.9 ;
- ▶ +0,32-0,62 m pour le scénario SSP1-2.6 ;
- ▶ +0,44-0,76 m pour le scénario SSP2-4.5 ;
- ▶ +0,63-1,01 m pour le scénario SSP5-8.5.

Dans le cadre de cette étude nous allons utiliser une surcote due au changement climatique de +0.43m, ce qui correspond à la surcote médiane calculée par le GIEC en 2075 pour le scénario pessimiste SSP5-8.5.

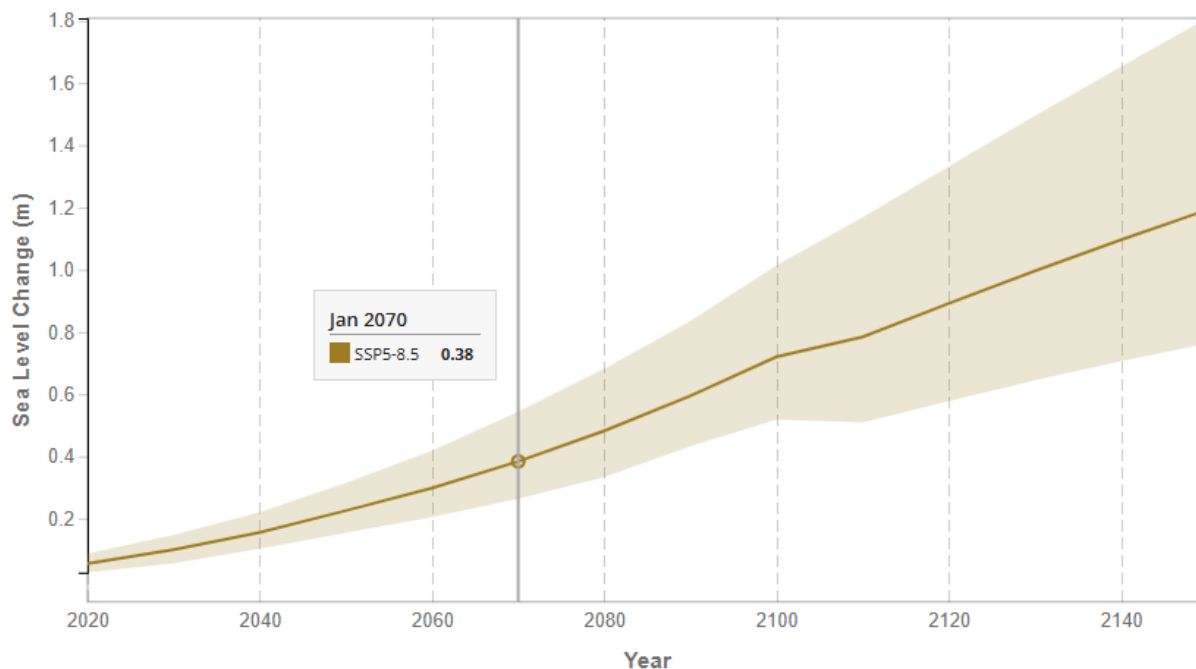


Figure 1.16 : Projections de l'élévation du niveau marin pour le scénario SSP5-8.5, GIEC 2025

1.3.3. Les niveaux d'eau extrêmes

1.3.3.1. Généralités sur les niveaux d'eau pendant une tempête

L'élévation du niveau de la mer pendant une tempête peut avoir pour conséquences des submersions marines. Les différents facteurs responsables de cette élévation du niveau de la mer sont recensés ci-dessous :

- ▶ **Marée astronomique :** La marée astronomique est la marée « maximale théorique ». Elle est calculée pour un coefficient théorique maximum de 120. Pour un coefficient de marée donné, cependant, la marée « réelle » est à distinguer de la marée théorique. La marée réelle n'est pas prédictible, elle est seulement relevée en temps réel par les marégraphes. Elle intègre en fait la surcote, qui correspond à la différence entre le niveau prédit et le niveau d'eau observé.
- ▶ **Surcote atmosphérique :** En période de mauvais temps et de vent, les phénomènes de dépressions créent une élévation du niveau local de la mer. Le phénomène dynamique induit une onde qui se propage et s'amplifie à l'approche des côtes. Les phénomènes induisent des surcotes importantes par rapport aux niveaux de marée astronomique.
- ▶ **Surcote liée au vent :** Lorsqu'il souffle en direction des terres, le vent est responsable d'une élévation locale du niveau de l'eau près des côtes en exerçant une contrainte à la surface de l'eau : les masses d'eau sont déplacées par phénomènes de friction sur le plan d'eau. Selon la configuration des côtes, cette action physique est susceptible de faire varier de manière importante le niveau moyen de la mer. Elle est responsable d'une surcote qui peut atteindre localement entre 0.5 et 1 m.
- ▶ **Surcote liée au déferlement (wave set-up) :** La propagation de trains de houle successifs créée, à l'approche des côtes, une élévation locale du niveau moyen de la mer. Cette augmentation locale du niveau moyen de la mer, peut atteindre, sur certains secteurs, une élévation de l'ordre de 10% de la hauteur des brisants.
- ▶ **Wave run-up :** A l'approche d'un ouvrage, les vagues vont venir se briser sur celui-ci et induire potentiellement du déferlement : un phénomène de va et vient (jet de rive) avec une ascension verticale des vagues sur le talus est alors constatée. La hauteur maximale atteinte par les vagues le long du talus, mesurée verticalement, est appelée run-up.

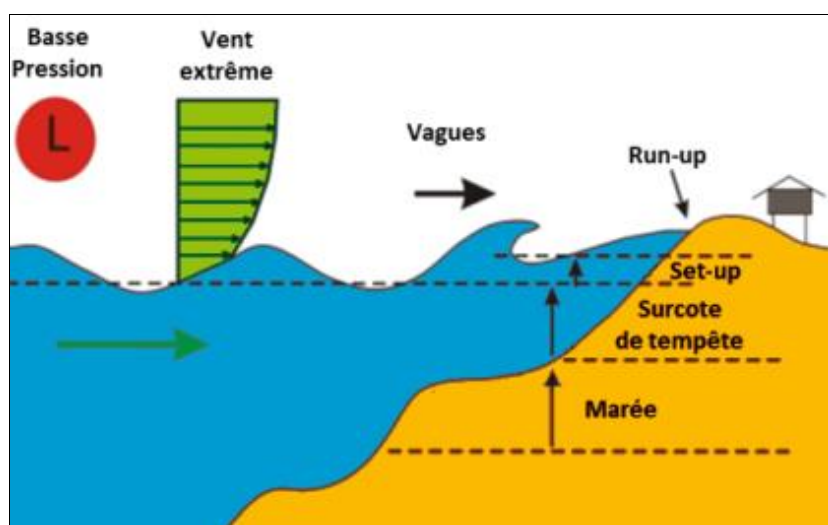


Figure 1.17 : Paramètres à considérer dans l'estimation des niveaux d'eau extrêmes (Gervais 2008).

1.3.3.2. Niveaux extrêmes observés

Les évènements marquants en termes de niveau d'eau sont fournis dans le rapport d'étude « Estimation des valeurs extrêmes de niveau d'eau » réalisé par le CEREMA en 2022, pour le port de Saint-Nazaire (le port le plus proche du site d'étude).

Ces données sont issues d'observations aux marégraphes de référence du SHOM sur une période d'acquisition de plusieurs décennies avec quelques périodes d'interruption dans les mesures et à ce titre, la liste des événements remarquables n'est pas exhaustive. Pour le marégraphe de Saint Nazaire la durée d'observation cumulée est de 116.57années entre le 25/05/1821 et le 31/12/2021.

Ces niveaux d'eau mesurés ont été utilisés pour calculer d'une part les surcotes extrêmes et d'autre part les niveaux d'eau (Figure 1.18).

Il faut toutefois noter que ces niveaux et surcotes calculées le sont au niveau du port de Saint-Nazaire se situant dans l'estuaire de la Loire. Ainsi les niveaux d'eau extrêmes au port de Pornichet sont probablement surestimés par l'effet d'embouchure.

Période de retour	Niveau PM (IGN69)		
		Int. Conf. 70 %	Int. Conf. 95 %
5 ans	3.76 m	3.75 m à 3.77 m	3.74 m à 3.78 m
10 ans	3.84 m	3.83 m à 3.86 m	3.82 m à 3.88 m
20 ans	3.93 m	3.91 m à 3.96 m	3.90 m à 3.99 m
50 ans	4.05 m	4.01 m à 4.09 m	3.99 m à 4.16 m
100 ans	4.14 m	4.09 m à 4.21 m	4.06 m à 4.30 m
200 ans	4.23 m	4.17 m à 4.33 m	4.13 m à 4.45 m
500 ans	4.36 m	4.27 m à 4.49 m	4.22 m à 4.69 m
1 000 ans	4.45 m	4.34 m à 4.63 m	4.28 m à 4.89 m

Figure 1.18 : Niveaux d'eau extrêmes à Saint-Nazaire, Cerema 2022.

1.3.4. Niveaux de dimensionnement

L'analyse des conditions météo-océaniques a été utilisée pour élaborer des scénarios de dimensionnement, les probabilités conjointes de houles et niveaux d'eau ont été estimées à l'aide des recommandations du CEREMA dans le rapport « Analyse statistique des niveaux d'eaux extrêmes » (2013). Trois scénarios de modélisation ont ainsi été définis afin d'estimer la propagation de la houle depuis le point d'extraction Homère jusqu'à la digue nord :

- ▶ **Scénario Tempête 1 an :** Il prend en compte une houle de période de retour 1 an, combinée à un niveau d'eau de période de retour de 0,05 an, et intègre également les conditions climatiques projetées pour l'année 2075. **Le résultat de ce scénario est une élévation de +3,48 m IGN (+6,41 mètres CM).**
- ▶ **Scénario Tempête 10 ans :** Ce scénario considère une houle de période de retour 10 ans, associée à un niveau d'eau de période de retour de 0,2 an, avec les conditions climatiques projetées pour 2075. **Le résultat de ce scénario est une élévation de +3,68 m IGN (+6,61 mètres CM).**
- ▶ **Scénario Tempête 100 ans :** Pour ce scénario, une houle de période de retour 100 ans est prise en compte, avec un niveau d'eau de période de retour de 2 ans, en prenant également en considération les conditions climatiques projetées pour 2075. **Le résultat de ce scénario est une élévation de +3,98 m IGN (+6,91 mètres CM).**

Cette approche permet une évaluation précise des différentes situations potentielles en ce qui concerne la propagation de la houle vers la digue nord.

A noter que le niveau d'eau atteint lors de la tempête Xynthia était de l'ordre de +4.12 m IGN à Saint-Nazaire.

2. Stratégie de modélisation

2.1. Principes généraux

La modélisation hydrodynamique implique la mise en œuvre de deux modules du code de calcul TELEMAC-MASCARET :

- ▶ Modèle de propagation de la houle (modèle spectral) : TOMAWAC.
- ▶ Modèle d'agitation : ARTEMIS.

2.2. Modélisation de la propagation de la houle avec le modèle spectral TOMAWAC

Le modèle spectral TOMAWAC permet le calcul des paramètres caractéristiques de la houle sur les domaines côtiers, les lacs, et les estuaires à partir de conditions de houle fournies aux limites du domaine modélisé et/ou de conditions de vent. Il s'agit d'un modèle spectral : la houle est décrite à travers la répartition de l'énergie en fréquences et en directions. Le modèle est basé sur la résolution des équations de conservation de la densité d'action de houle en conditions stationnaires. Le modèle permet ainsi la prise en compte de la majeure partie des phénomènes influant sur la génération et la propagation d'une houle sur un domaine côtier :

- ▶ Phénomènes de réfraction liés à l'évolution des fonds et/ou à l'interaction avec le courant ;
- ▶ Génération des vagues par le vent ;
- ▶ Dissipation de l'énergie par frottement sur le fond ;
- ▶ Dissipation de l'énergie par déferlement ;
- ▶ Interaction des houles ;
- ▶ Shoaling (gonflement des houles avant déferlement).

2.3. Modélisation de l'agitation portuaire avec le modèle ARTEMIS

Le modèle d'agitation ARTEMIS simule la propagation des vagues dans les zones portuaires ou côtières en résolvant l'équation elliptique de pente douce. Il repose sur des hypothèses simplificatrices, telles qu'une faible pente des fonds marins et une faible inclinaison des vagues. Les principaux résultats générés sont les hauteurs d'onde, les phases, et les directions à chaque nœud du maillage.

ARTEMIS permet de représenter plusieurs phénomènes :

- ▶ Réflexion et diffraction des vagues autour des obstacles ;
- ▶ Réfraction due aux variations bathymétriques ;
- ▶ Effets dissipatifs comme le frottement sur le fond et le déferlement bathymétrique ;
- ▶ Vagues régulières et aléatoires, mono- ou multidirectionnelles.

Le modèle utilise une méthode des éléments finis sur des maillages triangulaires pour résoudre les équations d'ondes, en tenant compte des conditions aux limites et des phénomènes dissipatifs. Il est particulièrement adapté pour évaluer l'agitation dans les ports, étudier l'impact des infrastructures comme les digues, ou analyser les interactions vagues-obstacles.

Cependant, ARTEMIS ne prend pas en charge certains phénomènes comme la réfraction par les courants ou la gestion des zones sèches (vasières). Ce modèle, intégré dans le système TELEMAC, est validé par des cas tests standards qui définissent ses performances et limites.

3. Propagation des houles du large à la côte

3.1. Construction du système de modélisation

Le domaine de calcul s'étend du banc de Saint-Marc jusqu'à la pointe de Penchâteau afin de pouvoir représenter correctement les marées, la propagation de la houle et ses courants associés ainsi que l'impact du vent sur la courantologie.

Le maillage en éléments finis autorise une grande souplesse dans la représentation des zones complexes et dans la distorsion entre mailles, ce qui permet de raffiner localement les mailles aussi précisément que nécessaire.

Dans les zones d'intérêt (secteurs sensibles ou intégrant des phénomènes complexes à simuler), le maillage est fin. A l'extérieur des zones d'intérêt, le maillage est plus grossier avec des mailles allant jusqu'à 200m de large. La taille des différentes mailles est fournie dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Tableau de synthèse des tailles des mailles.

Zones	Taille des mailles
Port de Pornichet	20
Iles au large et hauts fonds	30
Baie de la Baule	60
Zone au large	200

Une bonne représentation de la bathymétrie est essentielle pour la précision des calculs de courantologie. Le modèle numérique de terrain (MNT) a été réalisé à partir de :

- ▶ MNT bathymétrique de façade Atlantique (projet HOMONIM du SHOM) pour la zone au large. Ce MNT à une résolution de 0.001° soit environ 100m ;
- ▶ Bathymétrie fournie par le client avec une résolution de 5m ;
- ▶ Lidar fourni par l'université de Nantes datant de 2018 dans la baie de la Baule (résolution 4m).

La Figure 3.1 présente le maillage interpolé au niveau de chaque site d'étude.

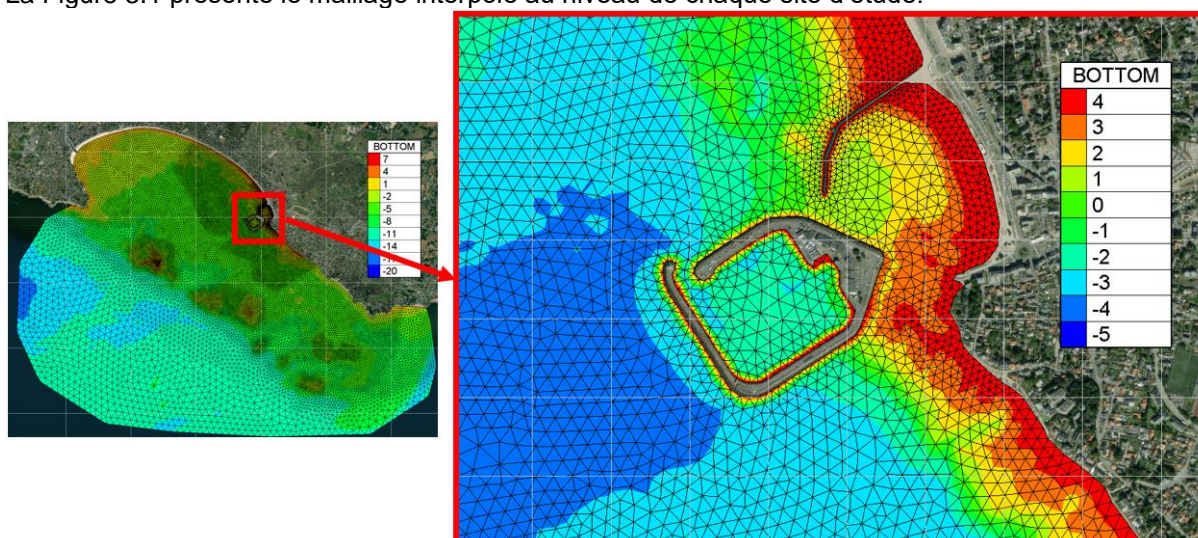


Figure 3.1 : Maillage interpolé au niveau du site d'étude.

3.2. Simulation des conditions hydrodynamiques

3.2.1. Scénarios simulés

L'analyse statistique des conditions météo-océaniques précédemment effectuée a permis de déterminer les houles usuelles et extrêmes. On a ainsi pu déterminer que les conditions usuelles étaient constituées de 3 types de houles principales, toujours provenant du sud-ouest mais avec des hauteurs et périodes différentes.

Les résultats de cette analyse ont directement été utilisés pour définir les conditions de forçage du modèle TOMAWAC explicitées dans le tableau suivant.

Nom scénario	Hm0 (m)	Tp (s)	Dir (°)	Niveau (mCM)
Cas 1	0.84	12.5	245	6.27 *
Cas 2	1.90	12.8	245	6.27 *
Cas 3	0.73	9.1	245	6.27 *
1 an niveau haut	3.49	12.5	245	6.41
1 an niveau moyen	3.49	12.5	245	3.41 **
10 ans niveau haut	4.23	13.5	245	6.61
10 ans niveau moyen	4.23	13.5	245	3.41 **
100 ans niveau haut	4.96	14.5	245	6.91
100 ans niveau moyen	4.96	14.5	245	3.41 **

* +6.27mCM correspond à la moyenne des niveaux de marée haute attendues à l'horizon 2075 à Pornichet.

** +3.41mCM correspond au niveau moyen observé à Pornichet, il s'agit d'un niveau pénalisant pour la stabilité de la butée de pied de la digue.

Les niveaux haut 1an, 10ans et 100ans sont issus du §1.3.4

En complément des conditions de houle de projet, deux directions de vent ont été simulées afin d'étudier l'agitation générée par les mers de vent sur le port. Les cas simulés sont :

- ▶ Un cas de vent de secteur Sud avec une intensité de 13 m/s
- ▶ Un cas de vent de secteur Sud-Est avec une intensité de 13 m/s

Pour rappel, cette condition de vent est dépassée en moyenne 4 jours par an (voir §1.1).

3.2.2. Résultats de la modélisation

Cette partie présente les résultats du modèle de propagation de houle TOMAWAC. On pourra retrouver dans cette partie des cartes d'emprises différentes représentant les houles pour certains des scénarios modélisés ainsi que des graphiques représentant la hauteur des houles le long de différents profils présentés dans les figures ci-dessous (les lignes noires en pointillés matérialisent les points d'extraction de la houle).

Pour éviter d'alourdir le rapport, toutes les figures réalisées ne seront pas présentées ici mais pourront être trouvées en annexe.

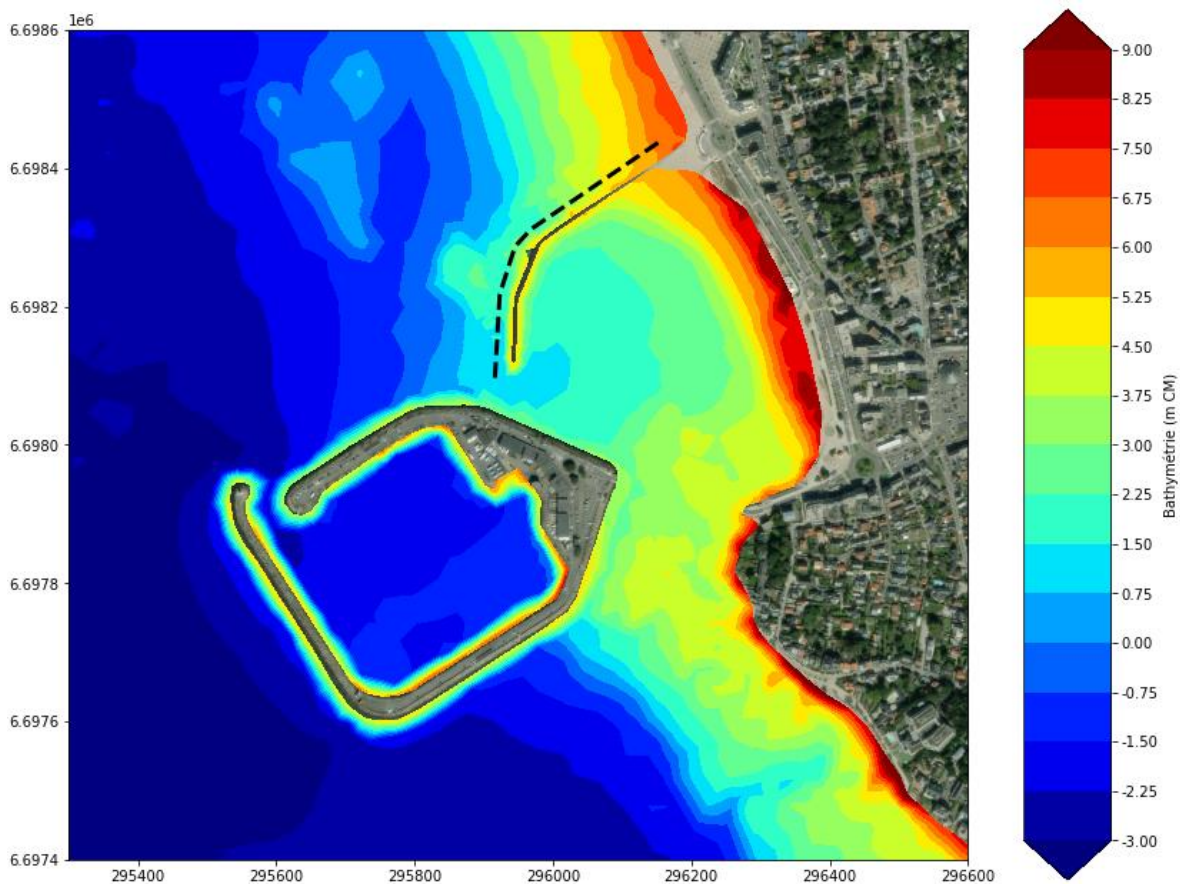


Figure 3.2 : Bathymétrie autour du port de Pornichet et position de la ligne d'extraction des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage.

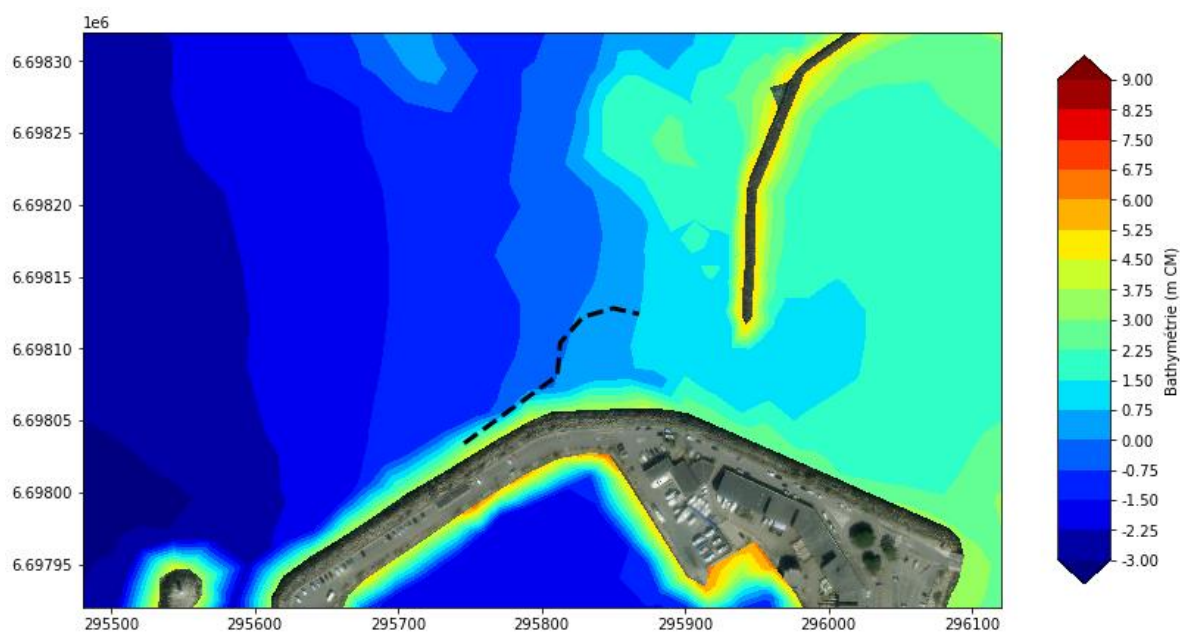


Figure 3.3 : Bathymétrie autour du port de Pornichet et position de la ligne d'extraction des houles au niveau du terre-plein.

3.2.2.1. Conditions usuelles

L'objectif principal de ces simulations est de représenter les conditions courantes auxquelles sont soumis les ouvrages portuaires de Pornichet. Les houles observées dans cette région proviennent presque exclusivement du sud-ouest, ce qui influence fortement leur comportement et leur impact. Ainsi, pour les trois scénarios simulés, les directions des houles sont identiques. La distinction entre ces scénarios réside dans les variations de hauteur et de période des houles, permettant de modéliser différentes intensités et fréquences d'événements usuels.

Les résultats des trois simulations montrent des schémas de propagation globalement similaires. La houle se propage depuis le large en direction de la côte, traversant des zones de profondeur décroissante jusqu'à atteindre le plateau continental peu profond qui s'étend jusqu'à l'entrée de la baie de La Baule. Ce plateau est délimité par des éléments géographiques clés tels que les îles des Evens, la pierre percée, et le phare du Grand-Charpentier.

Lors de la transition vers ce plateau, la rencontre avec les hauts-fonds provoque deux phénomènes physiques majeurs :

- ▶ **Réfraction de la houle** : La houle est légèrement déviée vers le nord, en raison de la diminution progressive de la profondeur.
- ▶ **Convergence locale des houles** : Les hauts-fonds induisent des zones de concentration énergétique, créant des zones où la houle est plus importante en amplitude. Ces zones se situent particulièrement à l'entrée du plateau continental, où l'interaction des vagues avec le relief sous-marin est la plus marquée.

Une fois cette étape franchie, la profondeur d'eau se stabilise, permettant à la houle de se propager sans subir de transformations significatives jusqu'au proche côtier.

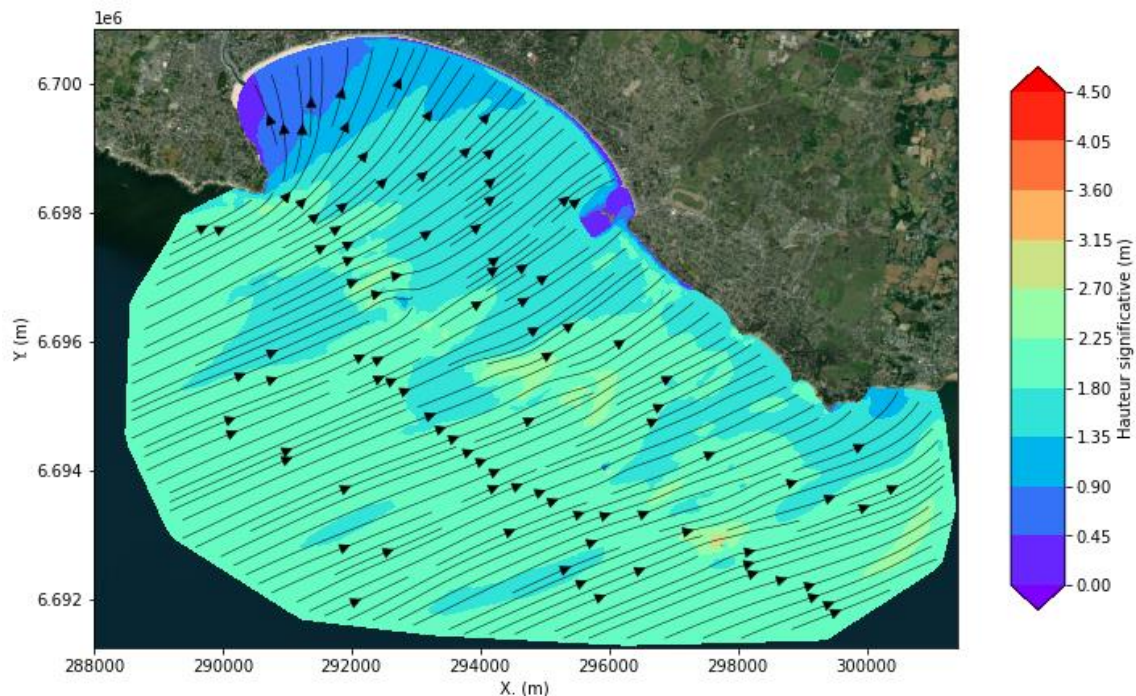


Figure 3.4 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario cas 2.

À l'approche de la côte, la houle subit des modifications importantes dues à la configuration locale :

- ▶ **Réfraction** : La houle contourne le port de Pornichet en s'ajustant aux variations de profondeur et aux structures portuaires.
- ▶ **Impact sur la digue** : La houle atteint finalement la digue protégeant le port d'échouage, avec une énergie réduite (atténuation) et sous un certain angle d'incidence.

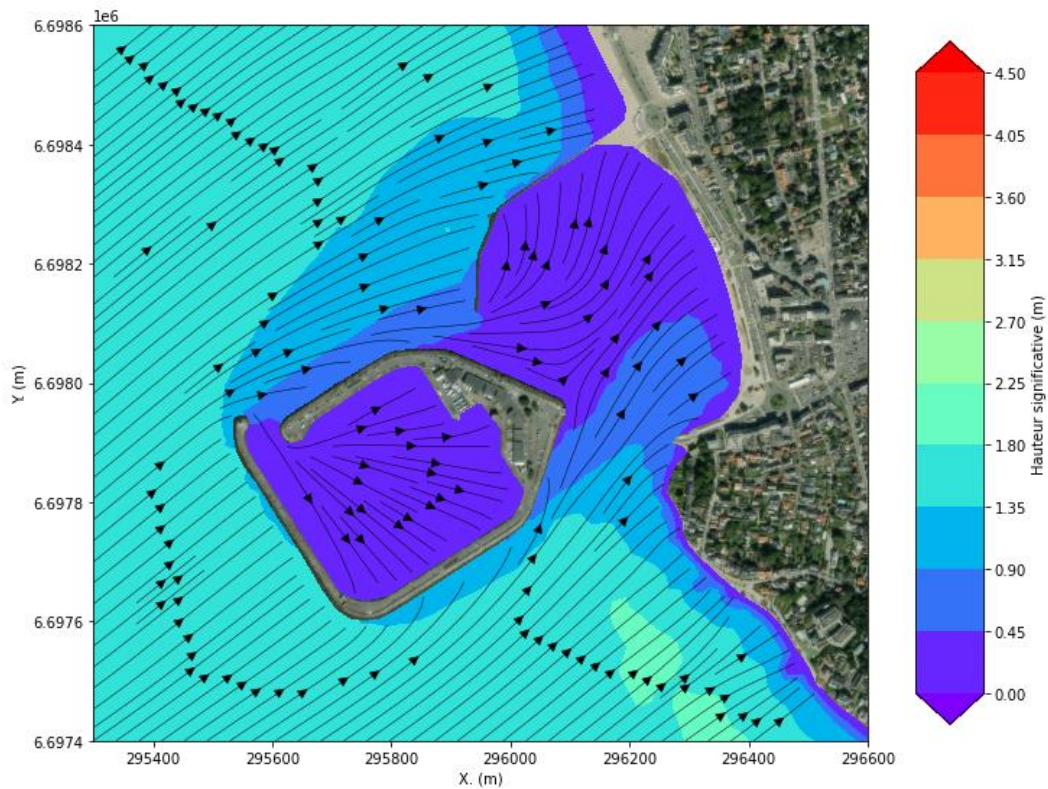


Figure 3.5 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario cas 2.

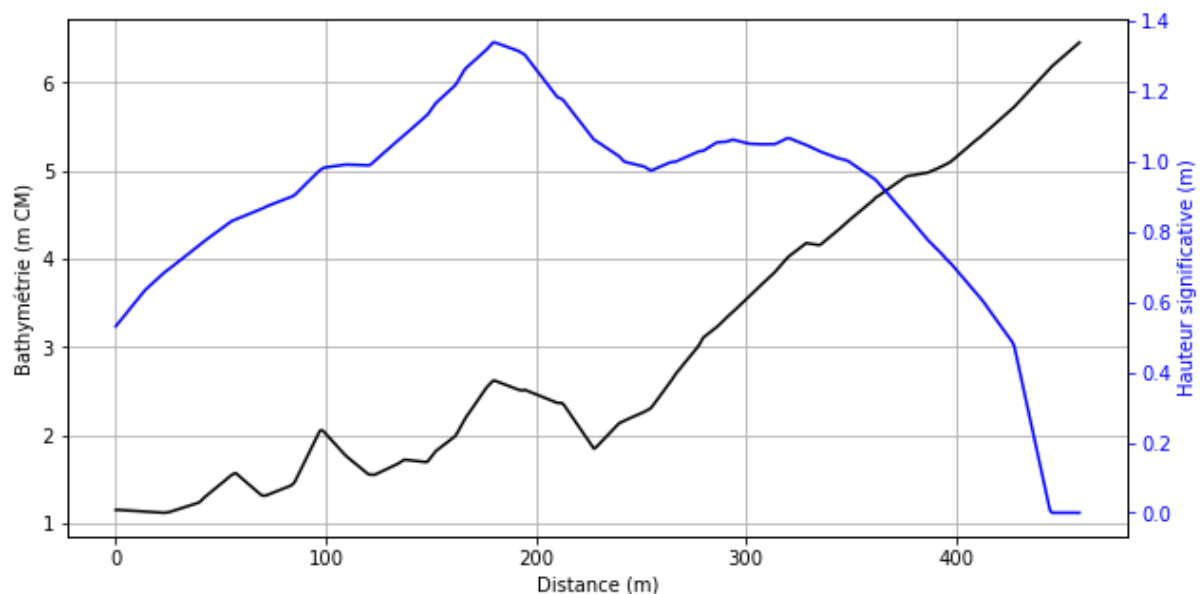


Figure 3.6 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario cas 2.

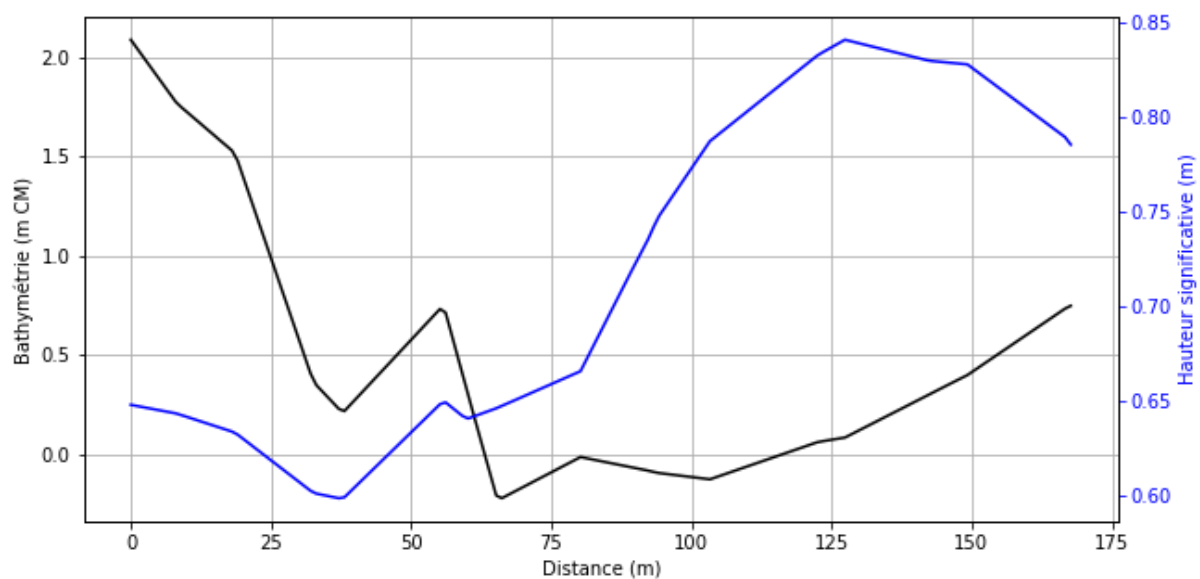


Figure 3.7 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario cas 2.

3.2.2.2. Conditions extrêmes

Ces simulations ont pour objectif de représenter les conditions extrêmes susceptibles de mettre à l'épreuve les ouvrages portuaires de Pornichet. Dans cette région, les houles proviennent majoritairement du sud-ouest, un facteur déterminant pour leur propagation et leur intensité. Afin de couvrir un éventail d'événements extrêmes, trois scénarios de houles ont été modélisés pour deux niveaux d'eau distincts : un niveau d'eau moyen et un niveau d'eau élevé. Bien que les directions des houles soient identiques pour les trois scénarios, les variations de hauteur et de période permettent de simuler des événements de gravité croissante.

Pour un niveau d'eau moyen, les simulations montrent un effet de seuil marqué au niveau du plateau continental. À leur arrivée dans cette zone, les houles subissent des transformations importantes liées à l'interaction avec les hauts-fonds. Ces transformations incluent :

- ▶ **Une réduction significative de la hauteur de houle** : Malgré des conditions initiales contrastées (hauteurs de forçage différentes), la houle atteignant l'entrée de la baie de La Baule présente des hauteurs relativement proches.
- ▶ **Une atténuation énergétique homogène** : Les caractéristiques topographiques du plateau jouent ici un rôle égalisateur, réduisant les écarts de hauteur entre les scénarios avant que la houle ne se propage plus en profondeur dans la baie.

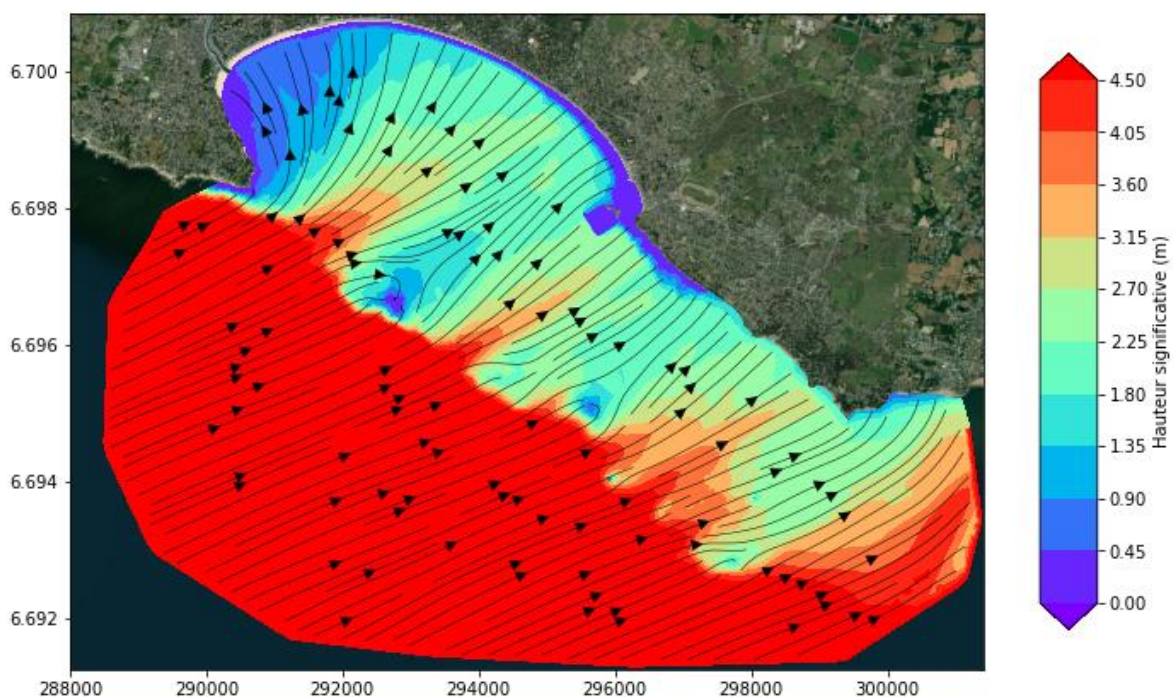


Figure 3.8 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario 100 ans niveau moyen.

À l'approche de la côte, la houle continue de se transformer de manière similaire pour les trois scénarios étudiés. Lorsqu'elle atteint finalement la digue de protection du port d'échouage, les hauteurs de houle sont quasiment identiques, quel que soit le scénario initial. Ces résultats mettent en lumière le rôle majeur des hauts-fonds et de la configuration locale dans la modulation de l'intensité des houles avant leur interaction avec les ouvrages portuaires.

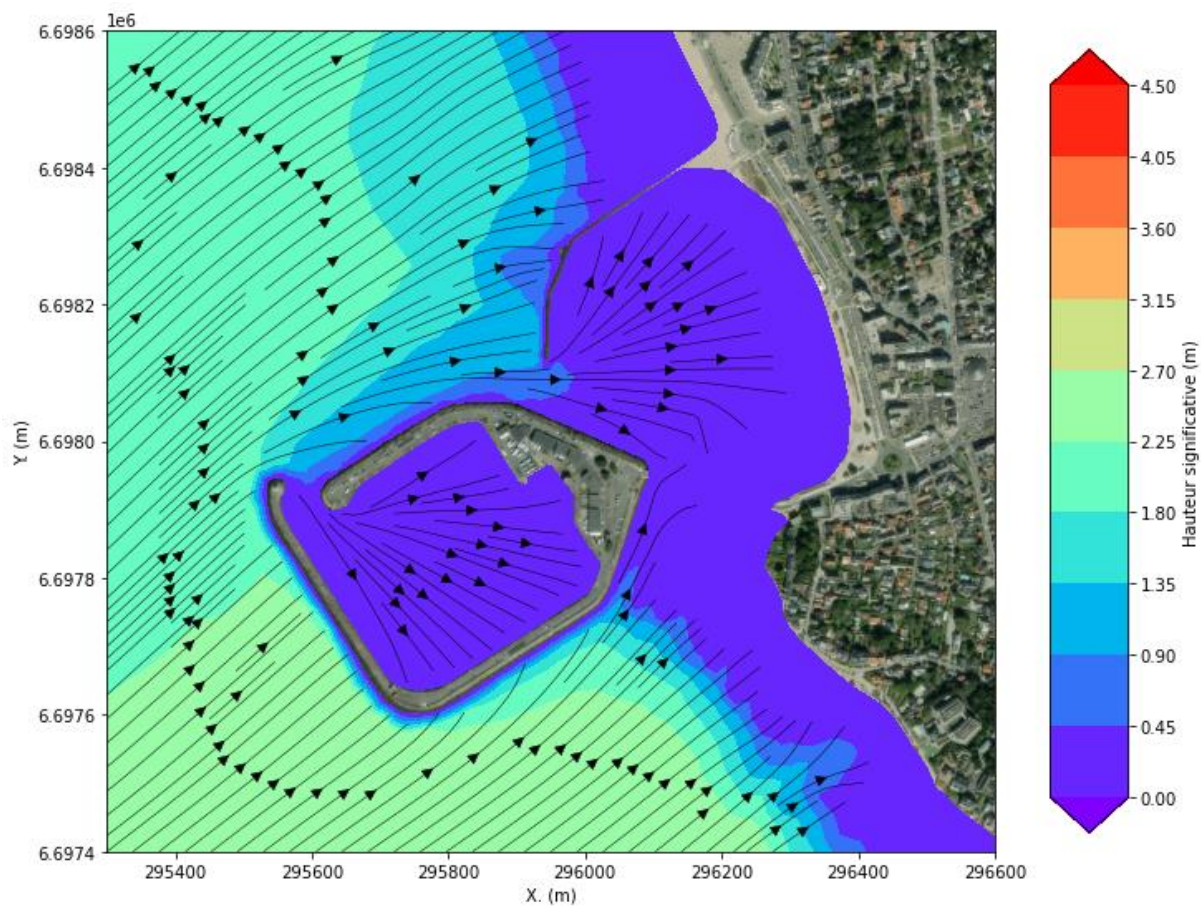


Figure 3.9 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario 100 ans niveau moyen.

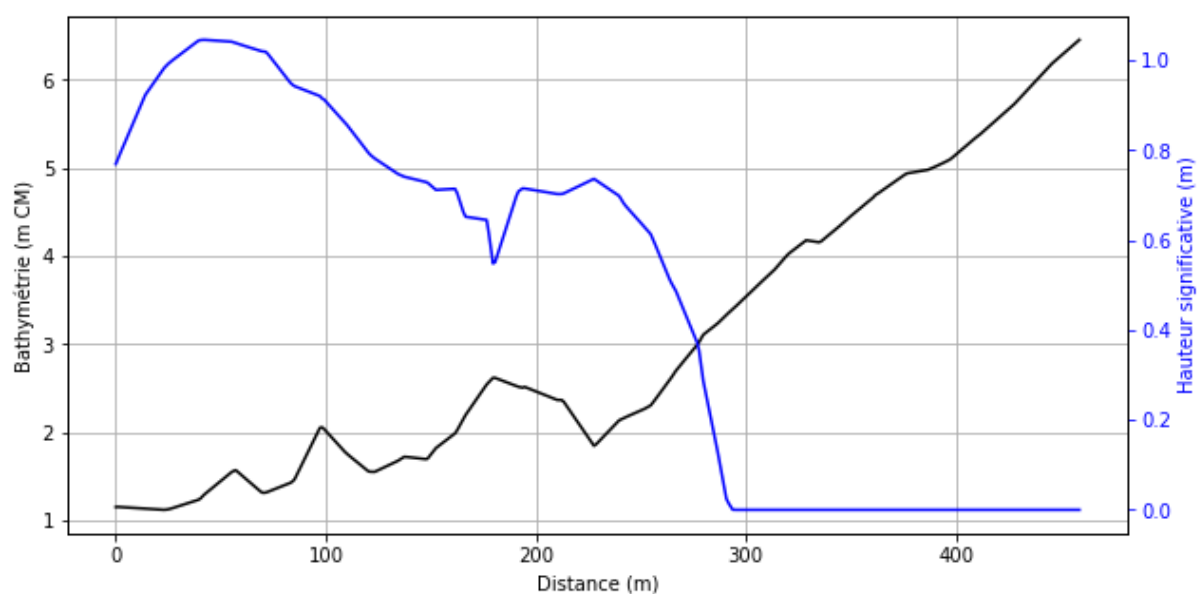


Figure 3.10 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario 100 ans niveau moyen.

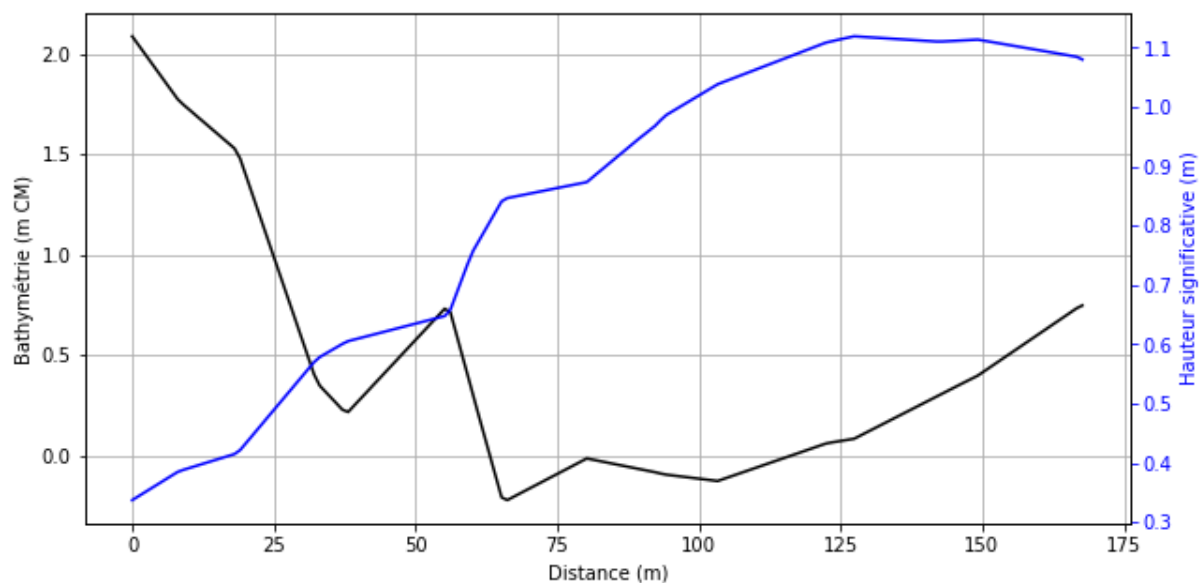


Figure 3.11 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario 100 ans niveau moyen.

Pour un niveau d'eau élevé, l'effet de seuil au niveau des îles marquant l'entrée de la baie de la Baule est moins marqué (bien que toujours visible). Les houles passent donc cette étape avec des caractéristiques (en particulier une hauteur significative) différente selon les scénarios. A l'instar des différentes simulations présentées précédemment, les houles, lorsqu'elles arrivent au niveau du port de Pornichet, sont réfractées et atteignent la digue avec une forte incidence ainsi qu'une légère atténuation. La Figure 3.12 présente la hauteur significative le long de la ligne d'extraction au droit de la digue de protection du port d'échouage. On remarque que les houles modélisées sont largement supérieures à celle du scénario centennal (même forçage au large) mais avec un niveau d'eau moyen. Cet exemple montre la forte incidence du niveau d'eau sur la propagation de la houle au niveau de ce site d'étude.

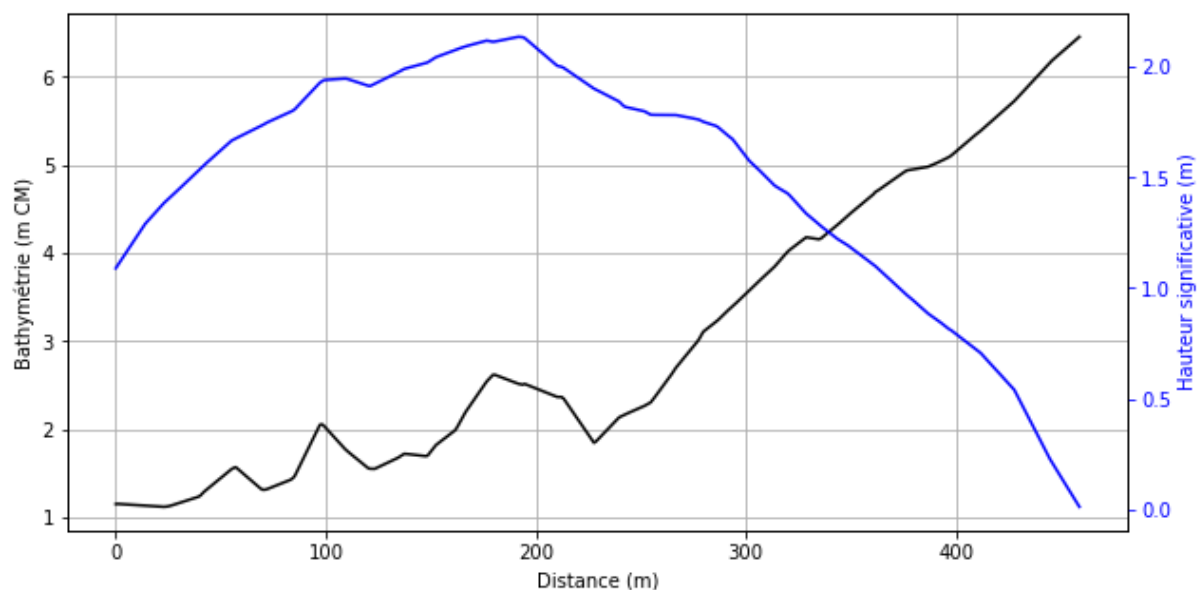


Figure 3.12 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario 100 niveau d'eau élevé.

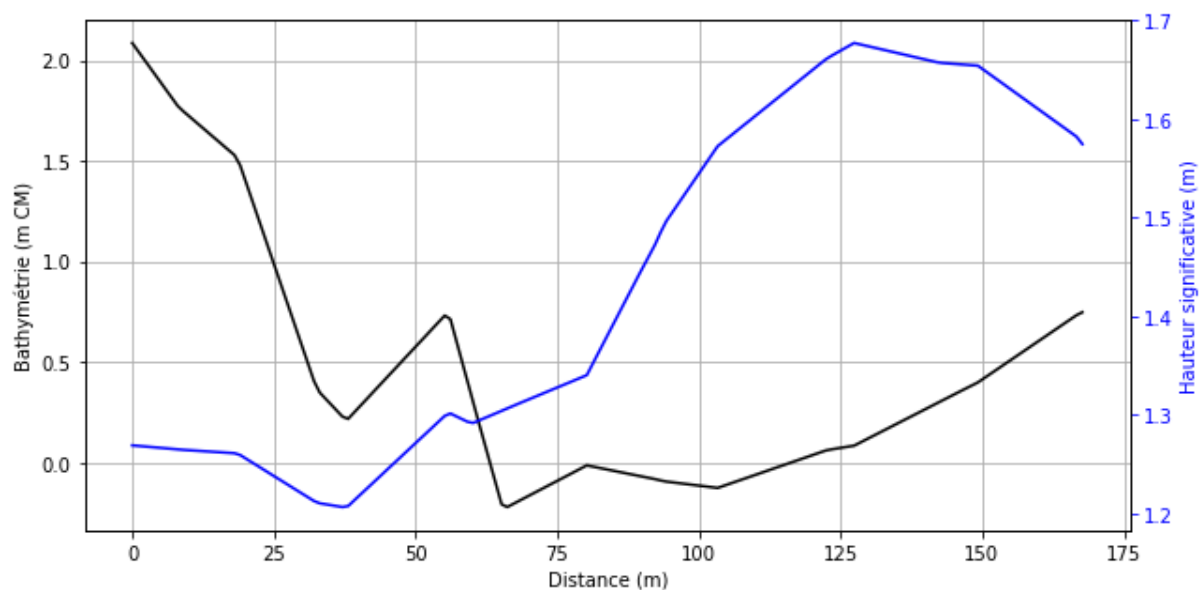


Figure 3.13 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario 100 niveau d'eau élevé.

3.2.3. Synthèse des résultats du modèle TOMAWAC

Les houles modélisées le long des lignes d'extraction situées au niveau de la digue et du terre-plein ont été analysées pour chaque simulation. Afin de tenir compte de l'orientation variable de la digue par rapport aux houles, celles-ci ont été divisées en cinq tronçons. Pour chaque simulation et pour chacun de ces tronçons, la hauteur significative maximale atteinte a été relevée. Les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous.

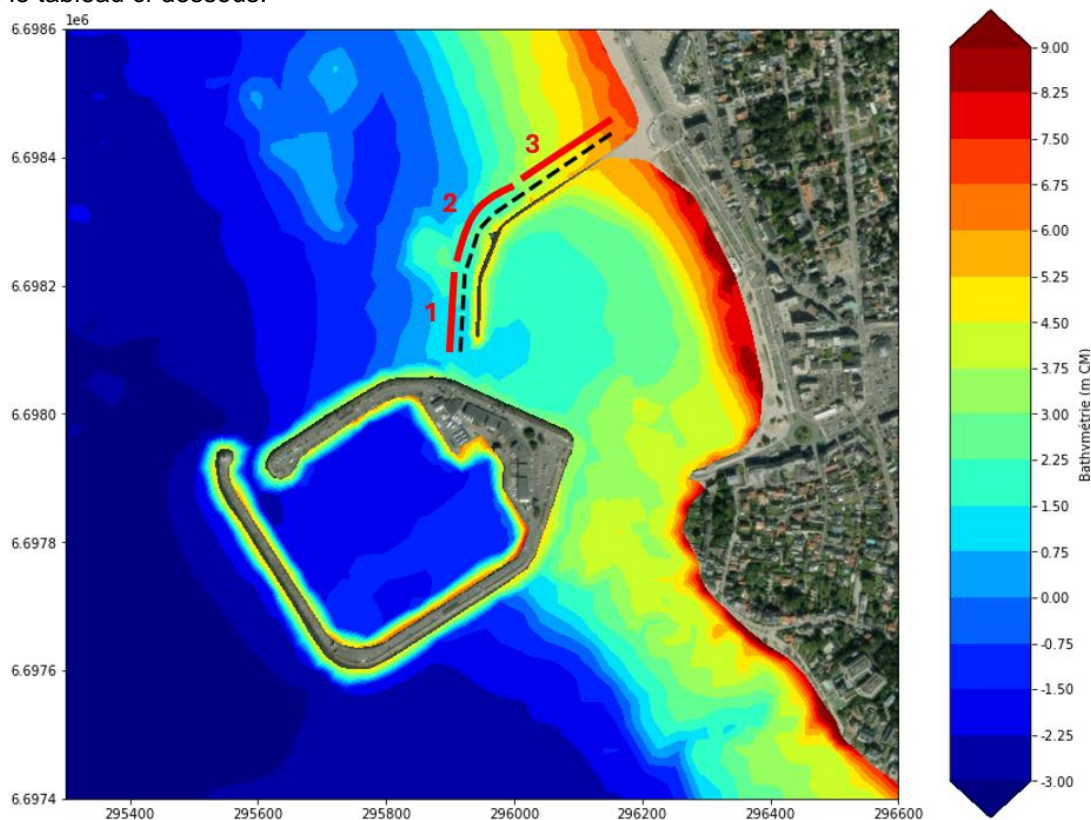


Figure 3.14 : Position de la ligne d'extraction et découpage des tronçons 1,2 et 3.

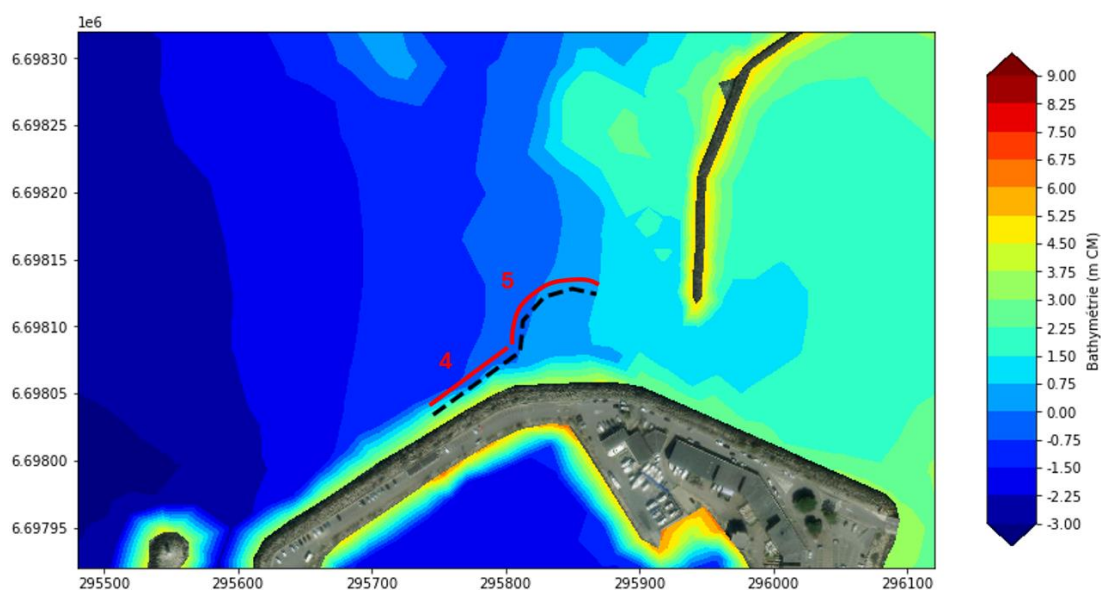


Figure 3.15 : Position de la ligne d'extraction et découpage des tronçons 4 et 5.

Tableau 3 : Synthèse des résultats des modélisations pour chaque tronçon et chaque scénario.

Nom scénario	Hm0 max tronçon 1	Hm0 max tronçon 2	Hm0 max tronçon 3	Hm0 max tronçon 4	Hm0 max tronçon 5
Cas 1	0.44	0.60	0.61	0.28	0.36
Cas 2	1.00	1.35	1.07	0.66	0.84
Cas 3	0.37	0.50	0.53	0.25	0.32
1 an niveau haut	1.64	2.00	1.55	1.10	1.38
1 an niveau moyen	0.99	0.73	0.00	0.79	1.02
10 ans niveau haut	1.82	2.09	1.62	1.24	1.55
10 ans niveau moyen	1.02	0.75	0.00	0.85	1.06
100 ans niveau haut	1.95	2.13	1.65	1.37	1.68
100 ans niveau moyen	1.05	0.78	0.00	0.87	1.11

3.2.3.1. Conditions usuelles

Les simulations des houles courantes montrent une propagation homogène depuis le large jusqu'à la côte, en traversant un plateau continental caractérisé par des hauts-fonds notables (îles des Evens, pierre percée, phare du Grand-Charpentier). Ce relief provoque deux phénomènes majeurs :

- ▶ **Réfraction de la houle** : une déviation progressive des houles vers le nord en raison de la diminution de la profondeur.
- ▶ **Convergence locale** : une concentration énergétique générant des zones de houle amplifiée à l'entrée du plateau.

En zone côtière, les houles se réfractent autour des ouvrages portuaires et subissent une atténuation avant d'atteindre la digue de protection sous des angles spécifiques. Ces transformations sont similaires pour les trois scénarios simulés, confirmant l'importance de la configuration bathymétrique locale.

3.2.3.2. Conditions extrêmes

Pour les conditions extrêmes, les résultats soulignent le rôle clé des hauts-fonds dans l'atténuation des houles lors de leur passage sur le plateau continental. Avec un niveau d'eau moyen, les houles présentent des hauteurs similaires à l'entrée de la baie malgré des conditions initiales contrastées, témoignant d'un effet de nivellement énergétique. En revanche, avec un niveau d'eau élevé, cet effet est réduit, et les caractéristiques des houles varient davantage selon les scénarios.

À proximité de la côte, les houles, réfractées et atténuées, atteignent la digue avec des hauteurs significatives plus élevées pour les scénarios de niveau d'eau élevé. Cela met en évidence l'impact crucial du niveau d'eau sur la propagation et l'intensité des houles dans cette région.

4. Modélisation de l'agitation portuaire

4.1. Objectifs et méthodologie

L'objectif du modèle d'agitation portuaire est d'étudier les effets de la houle sur le plan d'eau, en tenant compte des interactions houle/structure de type réflexion et diffraction qui sont des phénomènes importants en milieu portuaire. Les simulations permettent de caractériser l'agitation dans le port.

4.2. Méthodologie

4.2.1. Description du logiciel

Le logiciel ARTEMIS (« Agitation and Réfraction with TELEMAC on Mild Slope ») a été utilisé afin de simuler l'agitation portuaire au sein du port de Boulogne-sur-Mer. Ce logiciel, tout comme TOMAWAC, appartient à la chaîne de modélisation TELEMAC développée par le LNHE.

Le code de calcul d'ARTEMIS résout, par une formulation de type éléments finis, l'équation de Berkhoff (ou « Mild Slope Equation ») régissant la modification des caractéristiques de houle sous l'effet de la réfraction, de la diffraction du déferlement et de la réflexion par la côte ou par des obstacles. La répartition en fréquence et en direction de l'énergie de la houle (houle aléatoire mono ou multi-directionnelle) est également prise en compte par ARTEMIS. Le code restitue les caractéristiques principales de la houle en chaque point du domaine de calcul : hauteur significative et incidence de la houle, taux de déferlement...

L'utilisation d'un tel logiciel permet d'estimer avec beaucoup plus de précision les hauteurs de houle propagées dans l'enceinte portuaire, que ne peut le faire un simple logiciel de propagation de houle. Cette amélioration repose notamment sur une meilleure prise en compte des interactions houle-structure telles que la réflexion et la diffraction.

Ainsi, les calculs d'agitation réalisés dans le cadre de cette étude prennent en compte les paramètres physiques suivants :

- ▶ **la réflexion et l'amortissement contre les ouvrages ;**
- ▶ **la diffraction autour des obstacles ;**
- ▶ **la réfraction due aux changements de profondeur ;**
- ▶ **le déferlement bathymétrique.**

4.2.2. Domaine, maillage et bathymétrie

L'emprise et le maillage du modèle ont été fixés afin de représenter fidèlement l'ensemble du site et des phénomènes physiques modélisés. Les mailles présentent une taille de l'ordre de 2 m sur l'ensemble du domaine. Au total le modèle compte plus de 1.8 millions de mailles.

L'ensemble des données bathymétriques disponibles ont été compilées pour l'élaboration du modèle numérique de terrain (MNT).



Figure 4.1 : Visualisation du maillage utilisé pour le modèle d'agitation portuaire

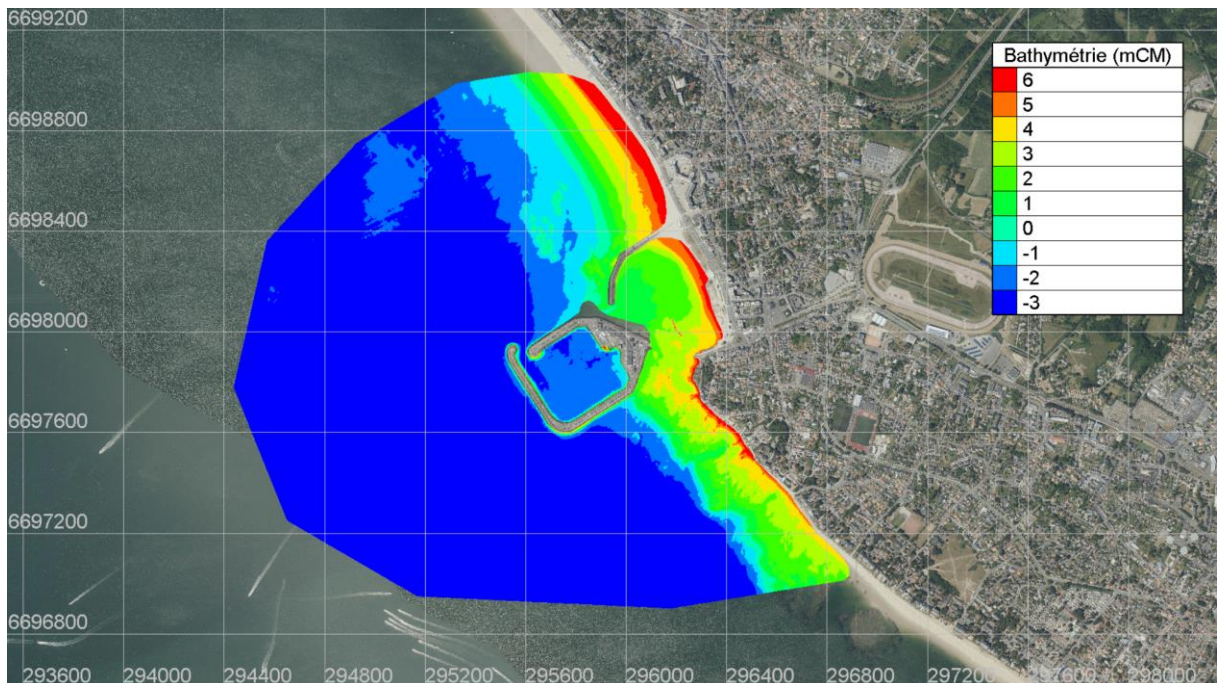


Figure 4.2 : Visualisation de la bathymétrie utilisée dans le modèle d'agitation portuaire

4.2.3. Conditions aux limites

4.2.3.1. Frontière liquide

Les houles incidentes sont appliquées aux frontières liquides localisées au sud du port. Les hauteurs significatives H_{m0} , Période de pic T_p et Direction de Pic D_p , sont extraites des simulations de propagation depuis le large (TOMAWAC, voir chapitre précédent) puis imposées le long des frontières liquides du modèle ARTEMIS.

4.2.3.2. Frontières solides

Chaque limite solide est représentée par un coefficient de réflexion lui correspondant, les coefficients sont en accord avec les valeurs préconisées par le CEREMA (CIRIA, CUR, CEREMA, 2014).

Le coefficient de réflexion est attribué à chaque ouvrage ou segment homogène du trait de côte en fonction de :

- ▶ La nature et la rugosité de l'ouvrage (béton, encochement, blocométrie...)
- ▶ De la pente et l'inclinaison (quai vertical, enrochement à plat...)
- ▶ La cambrure et le degré d'exposition à la houle.

La figure ci-après illustre les coefficients de réflexion retenus dans le cadre de cette étude.



Figure 4.3 : Coefficients de réflexion utilisés dans le modèle

4.2.4. Scénarios modélisés

Les résultats des simulations d'agitation menées dans cette étude ont été repris, avec des conditions aux limites du modèle d'agitation portuaire imposées à partir des résultats du modèle de propagation.

Tous les cas usuels présentés dans le chapitre 3.2.1 ont été simulés. En ce qui concerne les cas extrêmes, seules les configurations associées à des niveaux d'eau « Haut » ont été prises en compte. Enfin, les deux cas relatifs aux mers de vent ont également été simulés.

Le tableau ci-après récapitule les cas de houle simulés. Les cas des mers de vent présentés dans le chapitre de propagation des vagues ont été également simulés.

Nom scénario	Hm0 (m)	Tp (s)	Dir (°)	Niveau (mCM)
Cas 1	0.84	12.5	245	6.27 *
Cas 2	1.90	12.8	245	6.27 *
Cas 3	0.73	9.1	245	6.27 *
1 an niveau haut	3.49	12.5	245	6.41
10 ans niveau haut	4.23	13.5	245	6.61
100 ans niveau haut	4.96	14.5	245	6.91

4.3. Critères d'agitation portuaire

Concernant la détermination des besoins en termes d'agitation du plan d'eau, le guide du PIANC n°149 « Guidelines for marina design, 2016 » fournit des recommandations de hauteurs de houle limites en fonction de la période de retour des événements considérés pour des marinas accueillant des bateaux de plaisance de 12 à 61 mètres de long. La figure ci-dessous illustre la tolérance des critères d'agitation (hauteurs des vagues en pieds), basée sur l'aversion au risque et la qualité d'amarrage perçue.

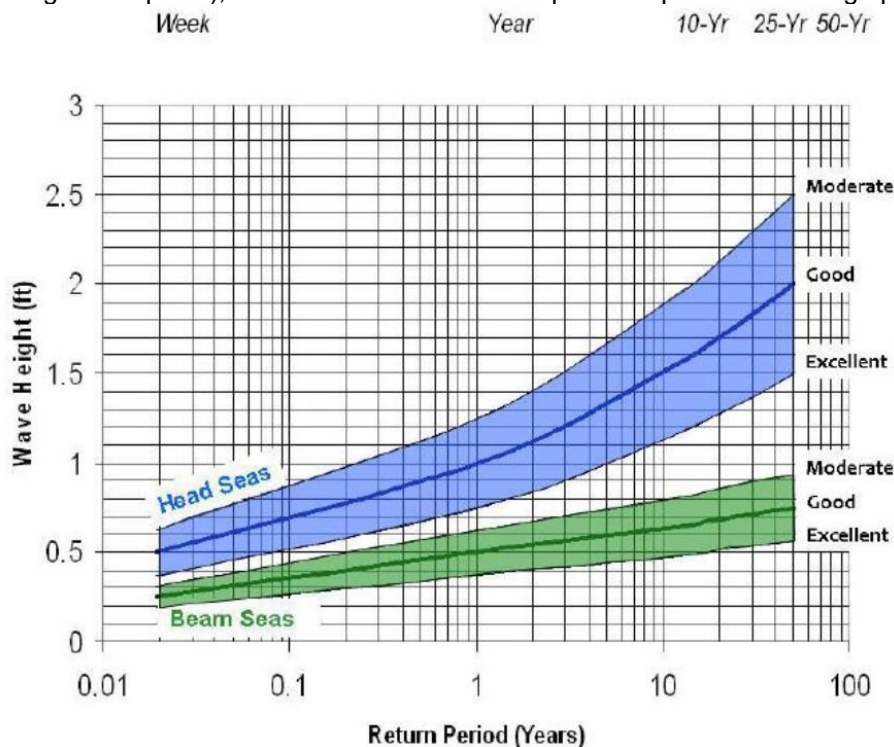


Figure 4.4 : Hauteurs de houle limites (en pieds) à ne pas dépasser pour un bassin portuaire de plaisance (PIANC, 2016)

Par ailleurs, la notice du CETMEF « Mouvements des navires amarrés – Agitations admissibles, 1992 » préconise des valeurs d'agitation de :

- ▶ 0.2m pour des petits navires de 5 à 12 mètres sans pont
- ▶ 0.3m pour des petits navires de 5 à 12 mètres avec pont

Ainsi, pour un événement annuel, il est raisonnable de ne pas dépasser une agitation de 0.2m au niveau des pontons. Cette agitation peut atteindre 0.4m pour un événement décennal ou supérieur.

4.4. Résultats

Les résultats sont présentés sous forme de cartes, où chaque nœud de calcul du domaine d'étude a été post-traité et superposé à un fond de carte du port de Pornichet.

Des extractions de résultats ont été effectuées sur les quatre zones d'intérêt du modèle. Dans ces zones, les extractions ont été réalisées avec une résolution d'un mètre. Par la suite, des calculs de l'agitation maximale et moyenne ont été menés sur ces zones. La figure ci-après illustre les zones d'extraction.

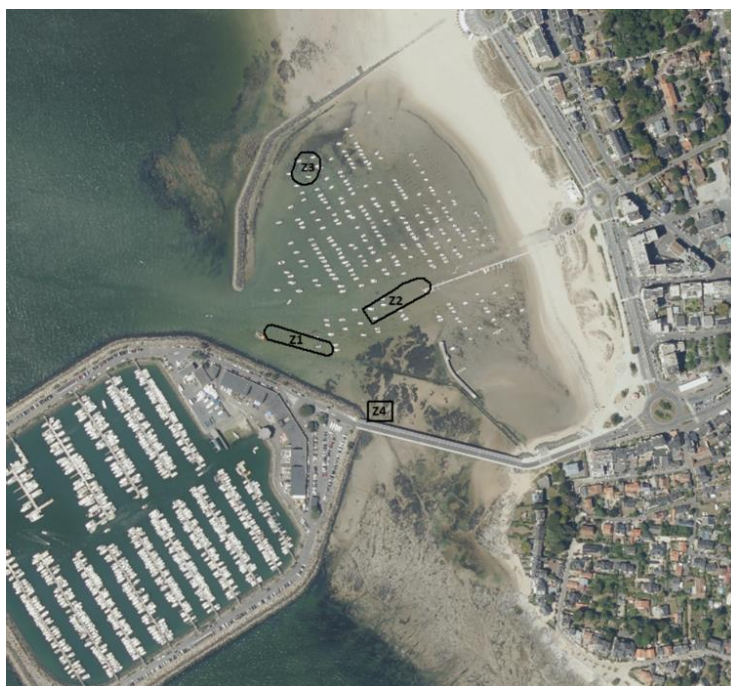


Figure 4.5 : Visualisation des zones d'extraction

4.4.1. Résultats des cas usuels

Pour les cas usuels, un schéma de propagation similaire est observé : les houles proviennent du secteur Sud-Ouest, et la digue d'enclôture du port de plaisance atténue la majeure partie de l'agitation en provenance du large. Cependant, une partie des houles contourne le port de plaisance par le Nord et le Sud.

Certaines houles pénètrent la zone du port d'échouage par le Sud, entre la Pointe du Bec et le port de plaisance, puis s'atténuent progressivement avant de déferler sur la plage.

L'agitation contournant le port par le Nord ne parvient pas à pénétrer à l'intérieur du port d'échouage. En effet, la nouvelle configuration du site, avec l'aménagement du terre-plein, réduit significativement l'énergie des vagues.

Le « vieux môle », situé en amont du boulevard du Port, joue également un rôle essentiel dans l'atténuation des houles, ce qui est particulièrement visible dans les résultats du cas 2 pour les cas usuels.

Dans l'ensemble des cas usuels, l'agitation résiduelle au sein du bassin d'échouage reste négligeable, voire nulle dans certaines zones, notamment au niveau des pontons d'amarrage. En revanche, une agitation plus marquée est observée au sud du port d'échouage.

Comme mentionné précédemment et afin de compléter l'analyse des résultats, des extractions ont été réalisées sur les quatre zones d'intérêt. Le tableau ci-après présente ces résultats en détail.

Tableau 4 : Tableau illustrant l'agitation maximale et moyenne au niveau des zones d'extraction - Cas usuels

Zone	Agitation maximale (m)	Agitation Moyenne (m)
CAS 1		
Z1	0.10	0.07
Z2	0.10	0.08
Z3	0.06	0.05
Z4	0.15	0.11
CAS 2		
Z1	0.14	0.08
Z2	0.13	0.10
Z3	0.10	0.08
Z4	0.28	0.17
CAS 3		
Z1	0.08	0.05
Z2	0.07	0.05
Z3	0.06	0.04
Z4	0.14	0.10

Le tableau d'extraction confirme nos observations précédentes : l'agitation moyenne, toutes zones et tous cas confondus, ne dépasse pas 0.17 m. Cependant, elle peut atteindre un maximum de 0.28 m en zone 4 pour le cas 2.

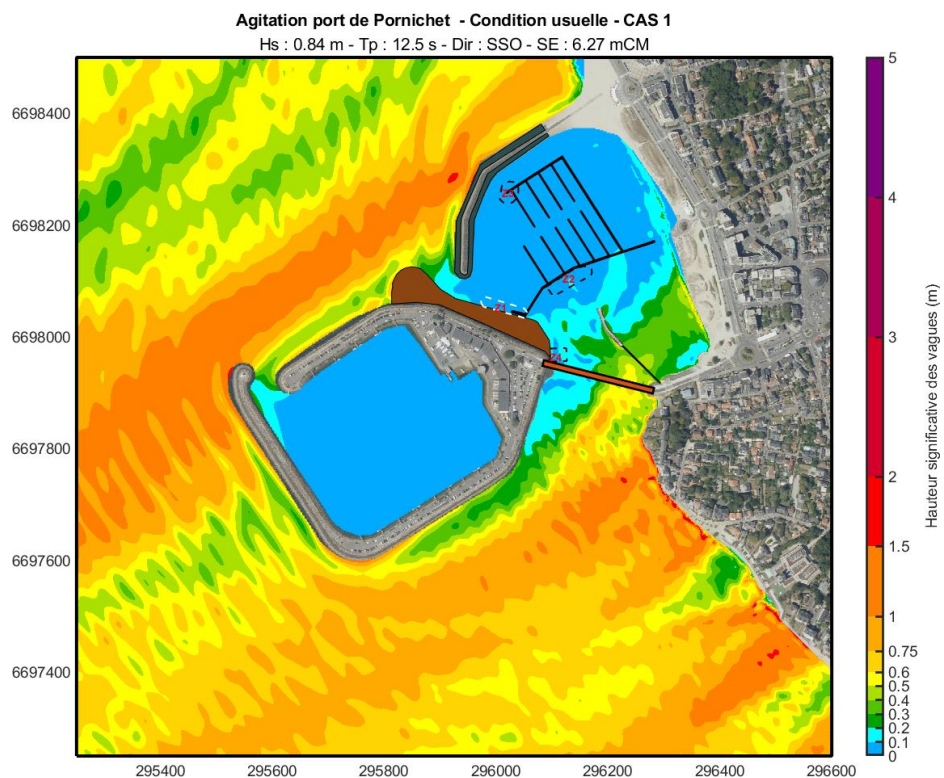


Figure 4.6 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour le cas 1 - Zoom sur le port

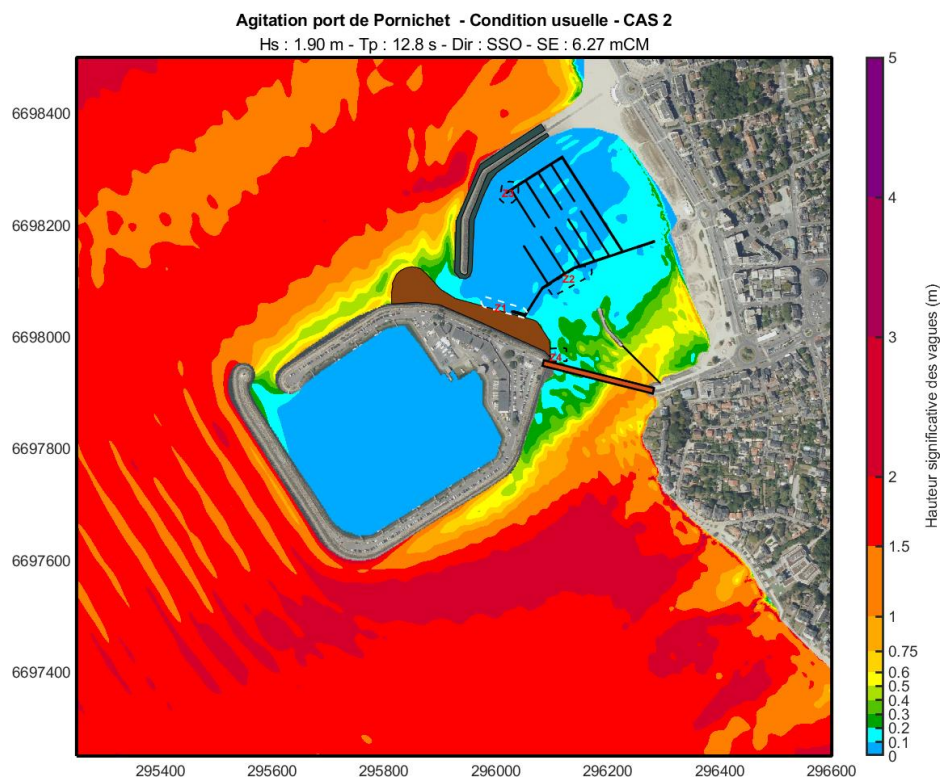


Figure 4.7 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour le cas 2 - Zoom sur le port

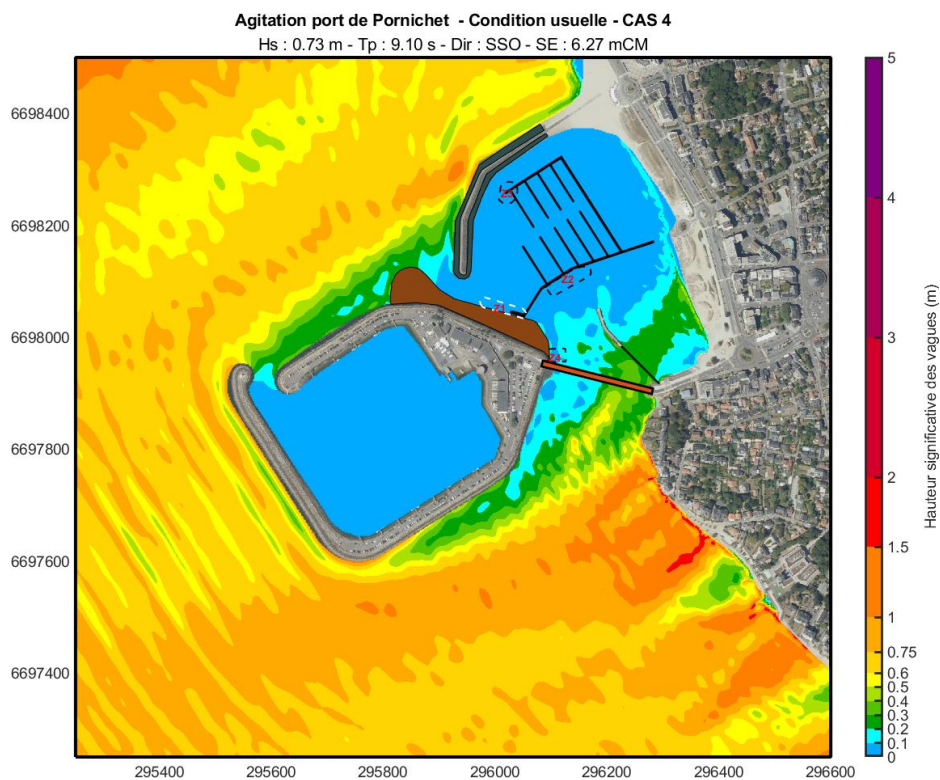


Figure 4.8 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour le cas 3 - Zoom sur le port

4.4.2. Résultats des cas extrêmes

Les cas extrêmes ont été simulés pour des périodes de retour annuelle, décennale et centennale. Comme mentionné précédemment, seules les conditions extrêmes avec un niveau haut ont été prises en compte pour l'étude de l'agitation portuaire.

Le schéma de propagation des houles reste similaire à celui observé dans les cas usuels : le port de Pornichet atténue une grande partie des houles en provenance du large, un contournement des houles par le Sud et le Nord est également constaté.

Cependant, dans les cas extrêmes, l'agitation à l'intérieur du bassin du port d'échouage est nettement plus marquée. L'agitation résiduelle à l'intérieur du port d'échouage peut dépasser 0,5 m pour une période de retour centennale.

Contrairement aux cas usuels, une pénétration de l'agitation par le Nord est également observée, au niveau de la zone située entre l'aménagement du terre-plein et la digue.

Les extractions réalisées dans les zones d'intérêt permettent une analyse plus détaillée des résultats, qui sont présentés dans le tableau ci-après.

Tableau 5 : Tableau illustrant l'agitation maximale et moyenne au niveau des zones d'extraction - Cas extrêmes

Zone	Agitation maximale (m)	Agitation Moyenne (m)
1 an Niveau haut		
Z1	0.19	0.14
Z2	0.18	0.11
Z3	0.11	0.09
Z4	0.33	0.21
10 ans niveau haut		
Z1	0.26	0.17
Z2	0.24	0.19
Z3	0.13	0.11
Z4	0.28	0.22
100 ans niveau haut		
Z1	0.33	0.26
Z2	0.28	0.22
Z3	0.16	0.13
Z4	0.69	0.33

Les extractions effectuées dans les zones d'intérêt indiquent qu'en moyenne, l'agitation ne dépasse pas 0.3 m, sauf dans le cas centennal où elle peut être légèrement supérieure.

Concernant l'agitation maximale enregistrée, la zone 4 apparaît comme la plus exposée, avec des valeurs pouvant atteindre 0.7 m lors d'une période de retour centennale.

Il est observé également dans le tableau que l'agitation maximale dans la zone 4 est légèrement plus élevée pour la période de retour annuelle que pour la décennale. Cette différence s'explique par une propagation légèrement différente des houles entre les deux cas, comme le montrent les figures 2D des simulations. Toutefois, en moyenne, l'agitation reste plus importante dans le cas décennal.

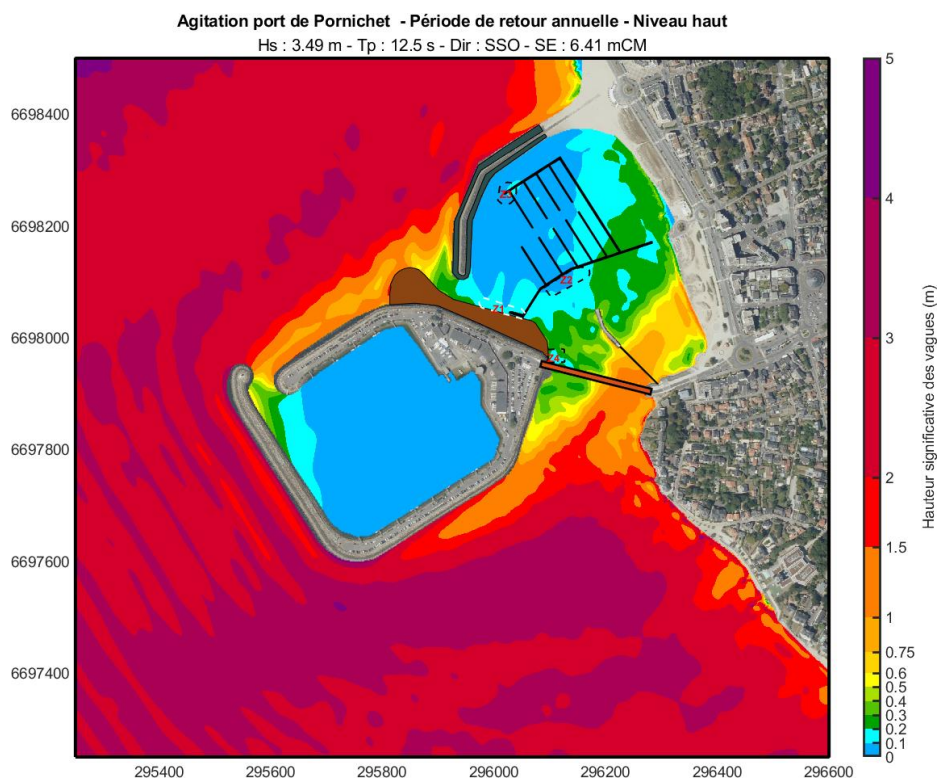


Figure 4.9 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour le cas de période de retour annuelle - Zoom sur le port

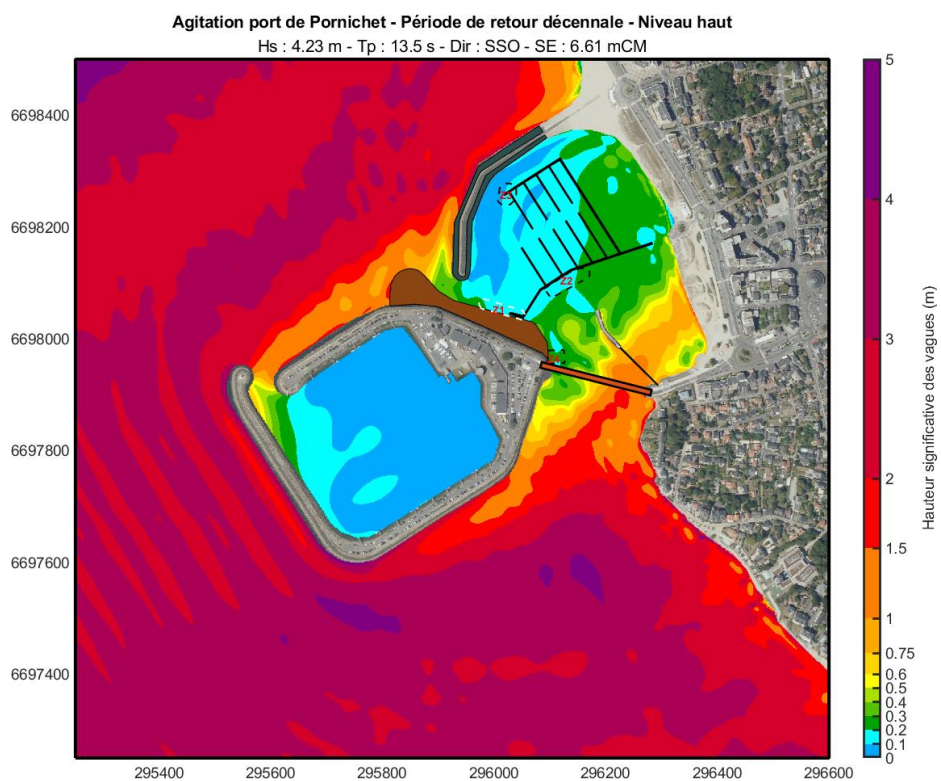


Figure 4.10 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour le cas de période de retour décennale - Zoom sur le port

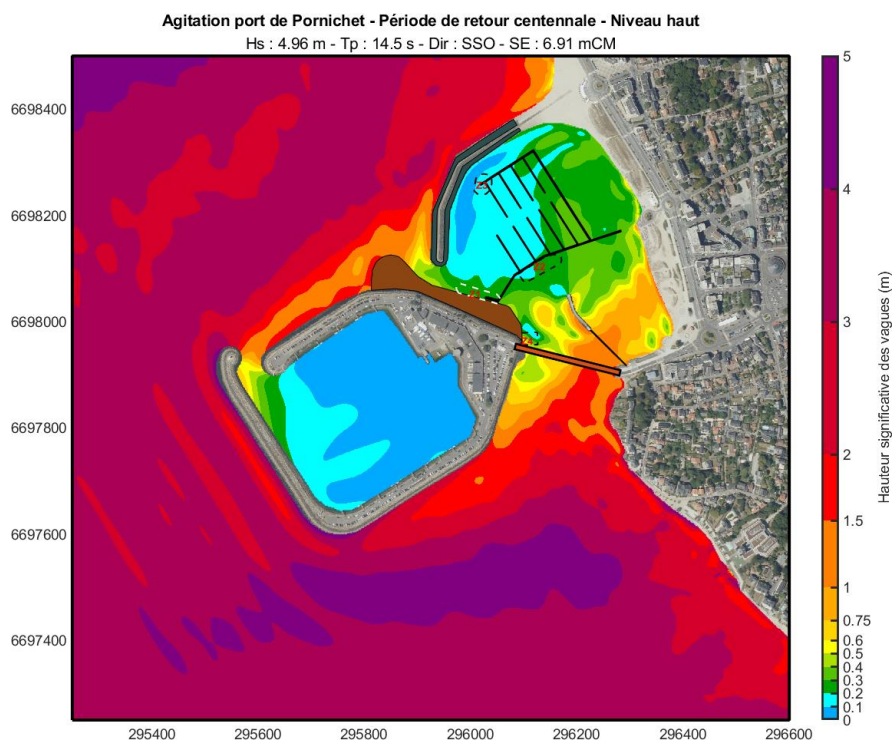


Figure 4.11 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour le cas de période de retour centennale - Zoom sur le port

4.4.3. Résultats des cas de mer de vent

Afin d'évaluer l'impact des mers de vent sur l'agitation au sein du port d'échouage, deux directions de vent ont été simulées : un cas provenant du Sud et l'autre du Sud-Est. Comme indiqué en §1.1, la condition de vent modélisée est dépassée en moyenne 0.5j par saison estivale et 3.5j par saison hivernale (soit 4j par an).

Les valeurs d'agitation relevées dans les zones d'extraction sont détaillées dans le tableau ci-après.

Zone	Agitation maximale (m)	Agitation Moyenne (m)
Cas vent Sud		
Z1	0.18	0.09
Z2	0.26	0.16
Z3	0.10	0.06
Z4	0.35	0.21
CAS vent Sud-Est		
Z1	0.11	0.06
Z2	0.34	0.22
Z3	0.16	0.11
Z4	0.38	0.23

Dans les zones d'intérêt, l'agitation générée par les mers de vent reste globalement similaire pour les deux directions de vent.

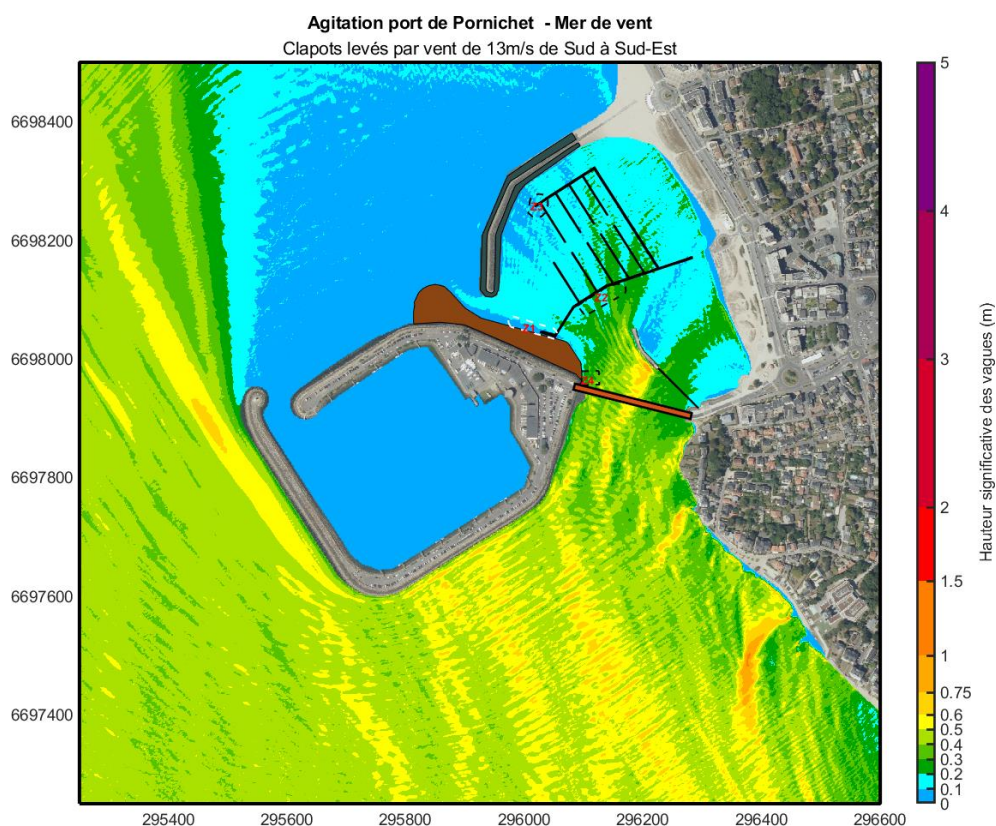


Figure 4.12 : Illustration du résultat de l'agitation portuaire pour un vent de 13m/s de direction Sud à Sud-Est - Zoom sur le port

4.4.4. Conclusion sur les résultats de l'agitation portuaire

Pour les cas usuels, L'agitation qui pénètre par le Sud entre la Pointe du Bec et le port de plaisance s'atténue progressivement avant de déferler sur la plage. Celle qui contourne le port par le Nord ne parvient pas à pénétrer à l'intérieur du port d'échouage, grâce à l'aménagement du terre-plein. Le « vieux môle » situé en amont du boulevard du Port contribue également à atténuer l'agitation

Pour les cas usuels, l'agitation résiduelle reste globalement faible, notamment aux pontons d'amarrage. Une agitation légèrement plus marquée est observée au sud du port d'échouage.

Pour les cas extrêmes, une augmentation de l'agitation à l'intérieur du bassin du port d'échouage est observée par rapport aux cas usuels, une pénétration de l'agitation par le Nord est enregistrée, notamment dans la zone entre l'aménagement du terre-plein et la digue. Pour la période de retour centennale, l'agitation résiduelle peut dépasser 0.5 m, atteignant 0.7 m dans la zone 4.

Pour les cas de mers de vent, les vagues pénètrent le port par le Sud, mais le « vieux môle » limite leur intensité. Une agitation résiduelle moyenne d'environ 0.2 m à 0.3 m est tout de même observée.

ANNEXES

ANNEXE 1 : FIGURES DES RESULTATS DE MODELISATION TOMAWAC. RESULTATS CAS1

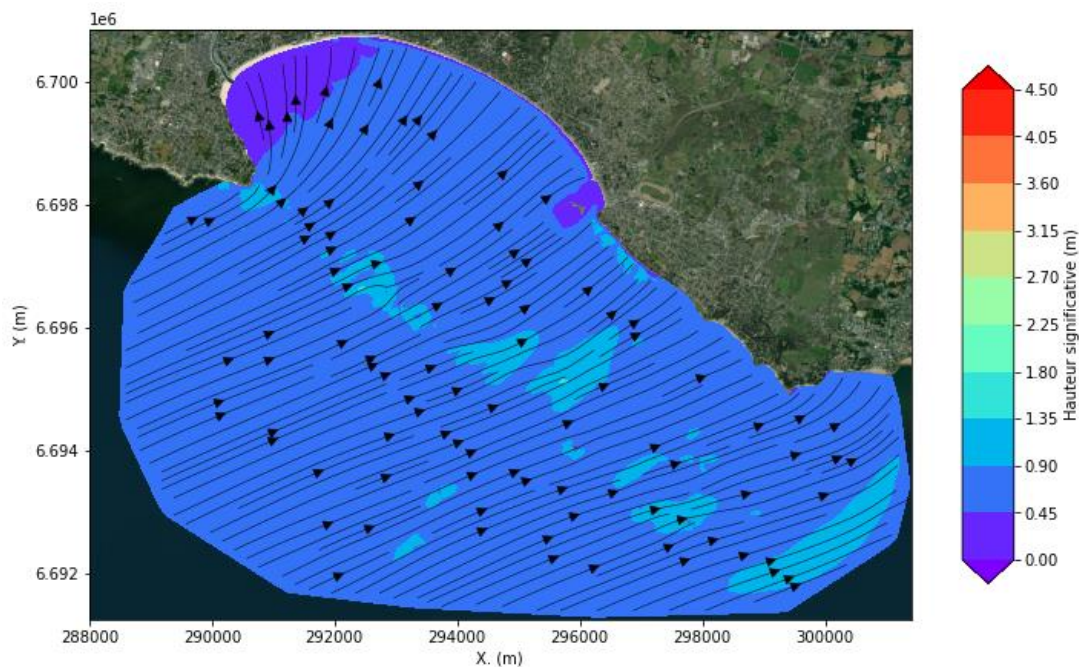


Figure 4.13 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario cas 1.

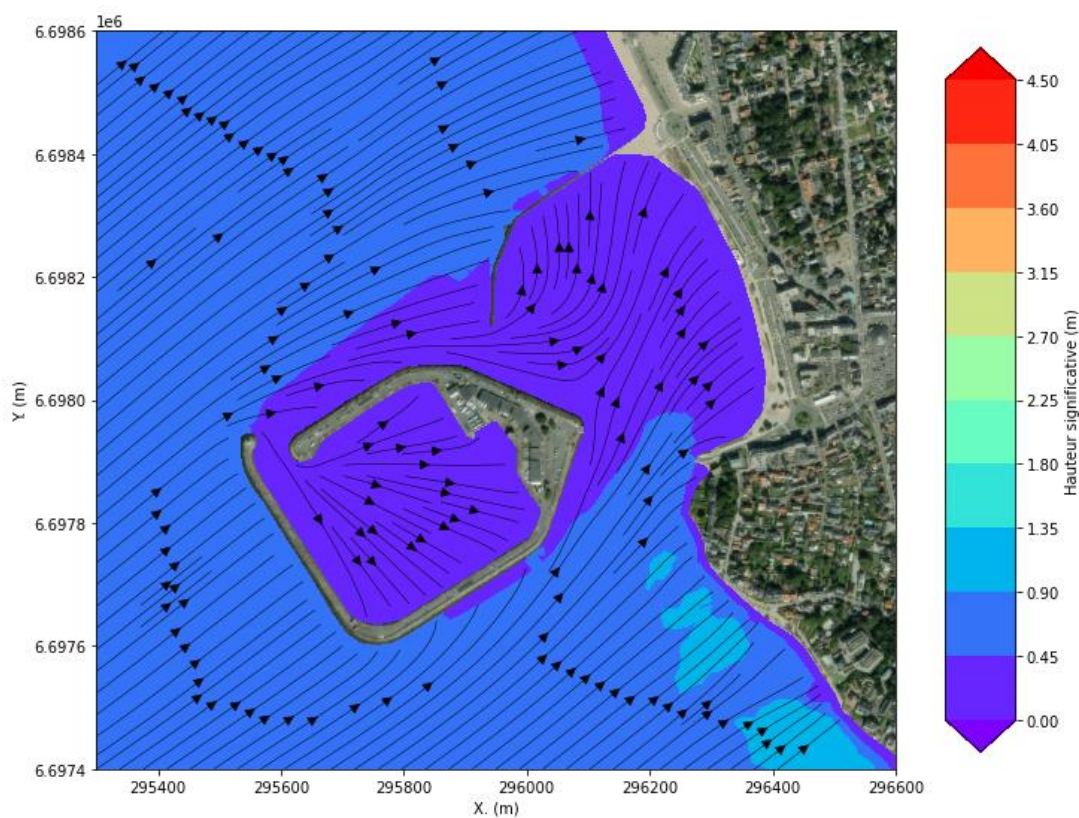


Figure 4.14 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario cas 1.

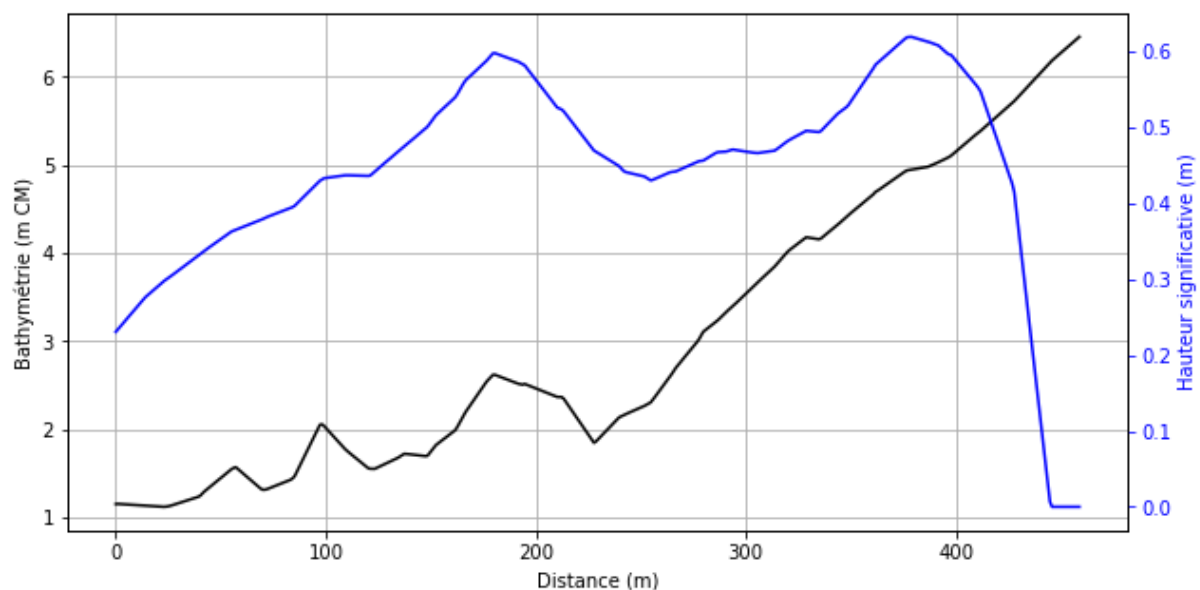


Figure 4.15 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario cas 1.

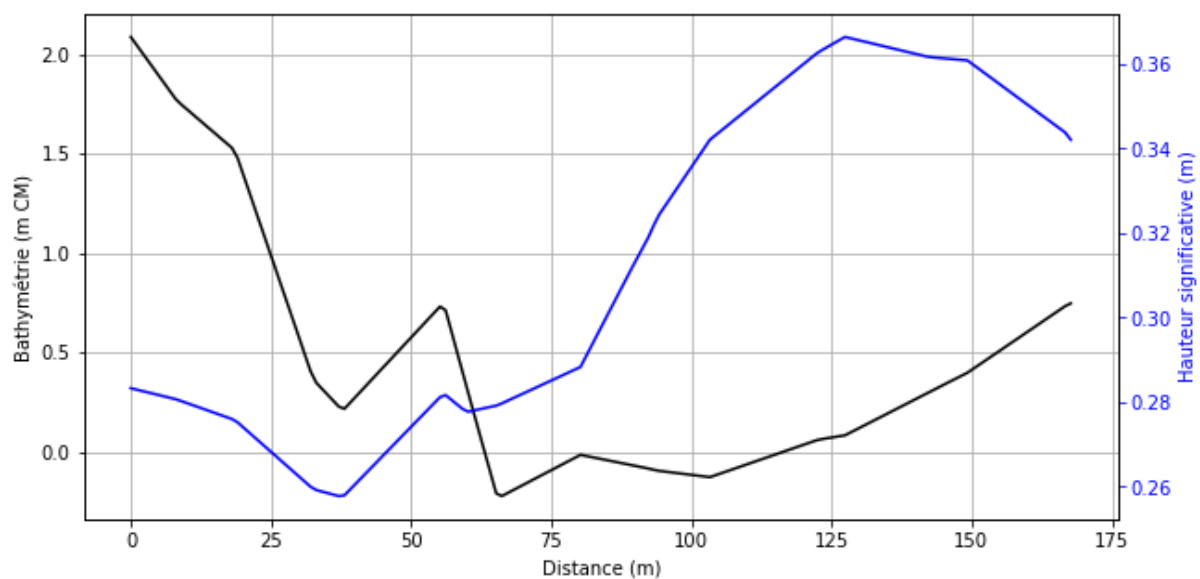


Figure 4.16 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario cas 1.

ANNEXE 2 : FIGURES DES RESULTATS DE MODELISATION TOMAWAC. RESULTATS CAS3

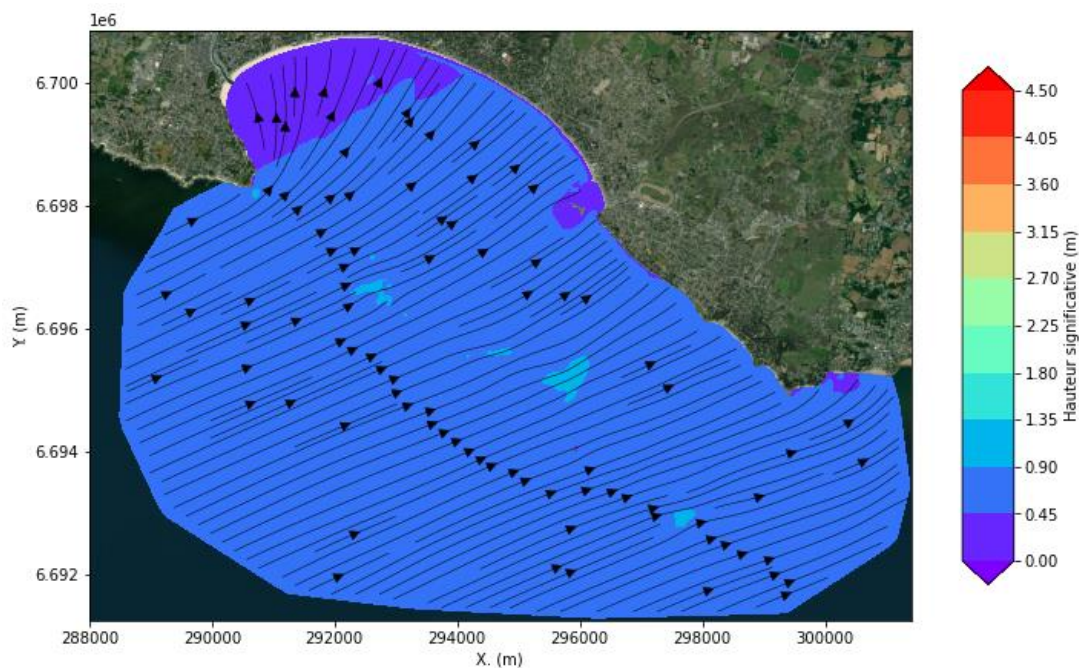


Figure 4.17 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario cas 2.

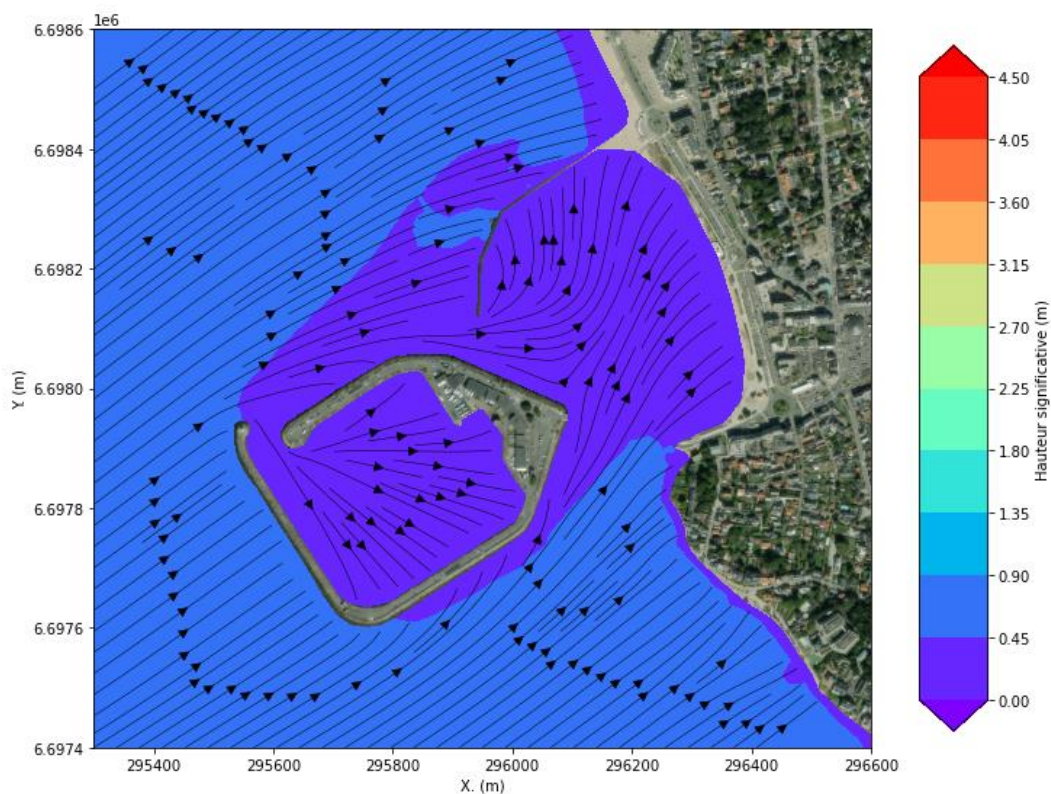


Figure 4.18 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario cas 3.

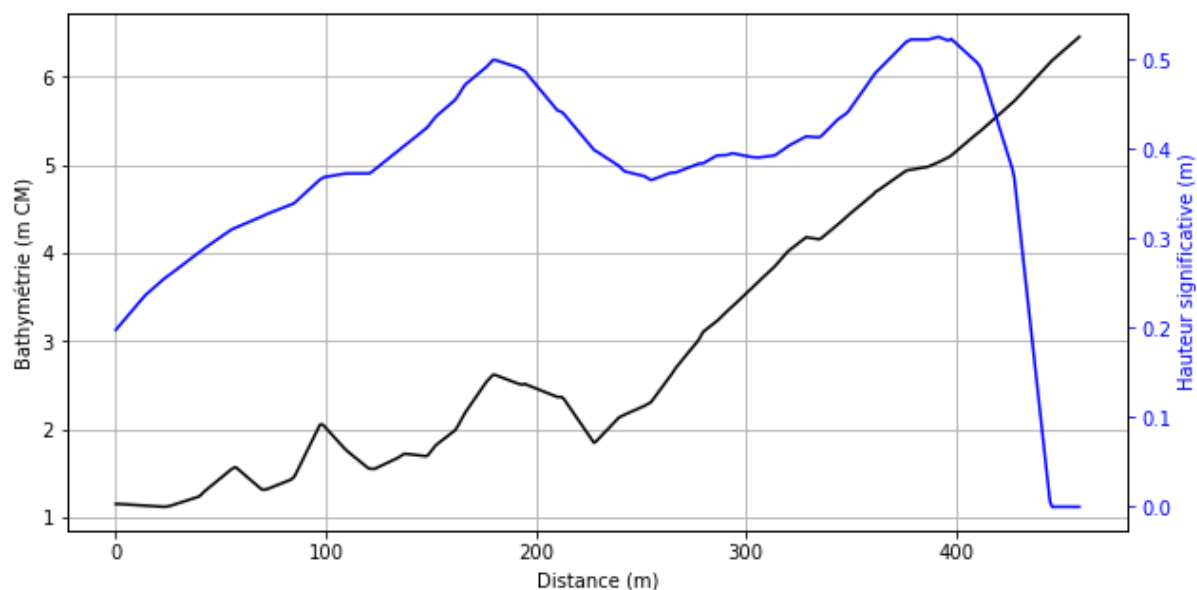


Figure 4.19 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario cas 3.

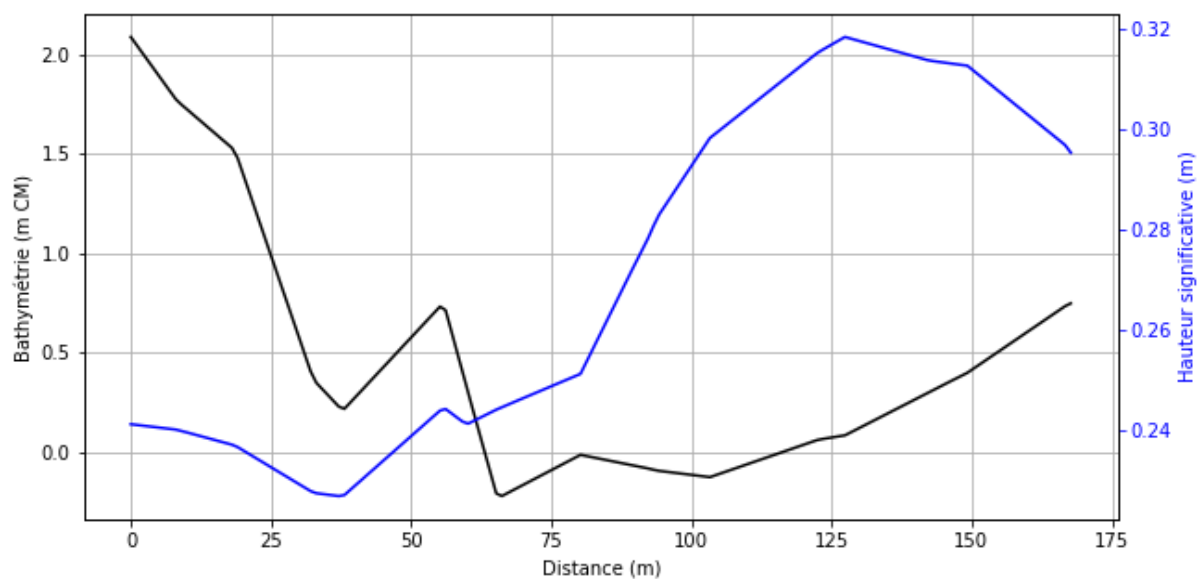


Figure 4.20 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario cas 3.

ANNEXE 3 : FIGURES DES RESULTATS DE MODELISATION TOMAWAC. RESULTATS SCENARIO 1 AN NIVEAU MOYEN

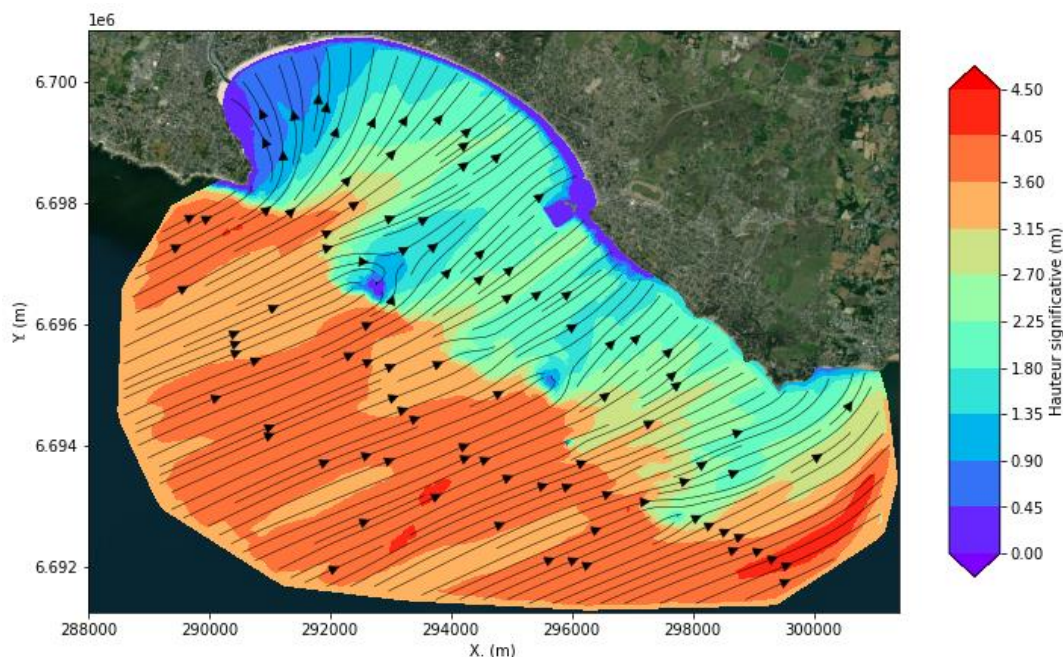


Figure 4.21 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario 1 an niveau moyen.

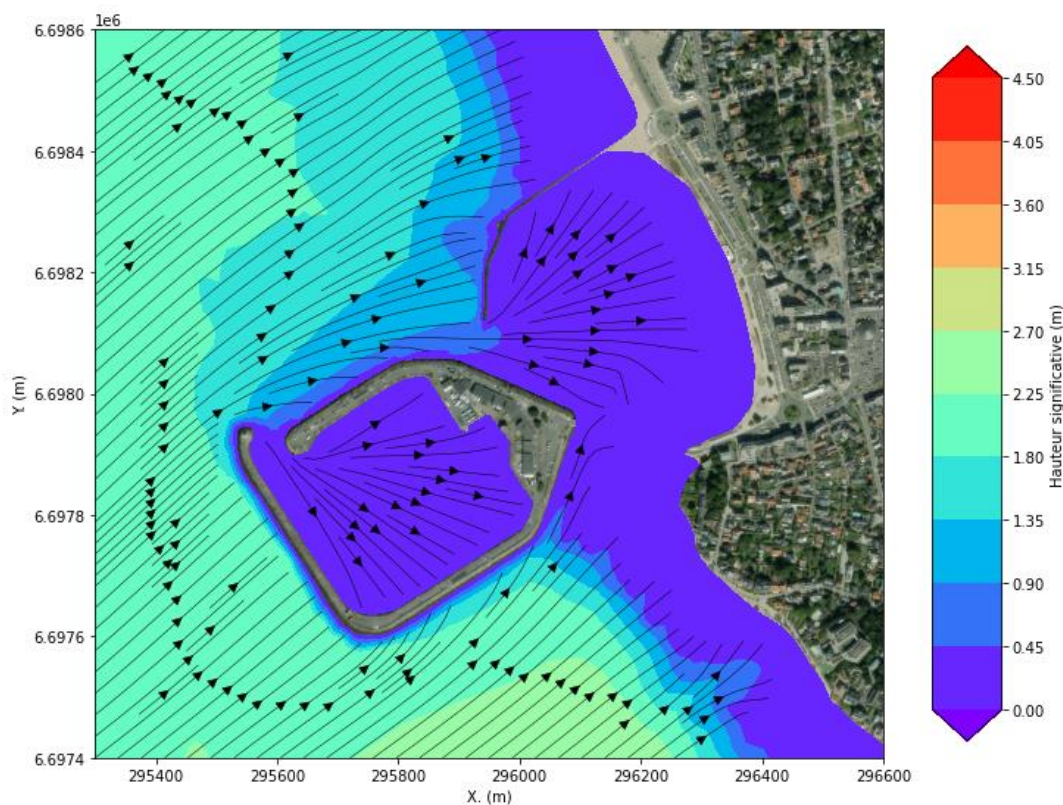


Figure 4.22 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario 1 an niveau moyen.

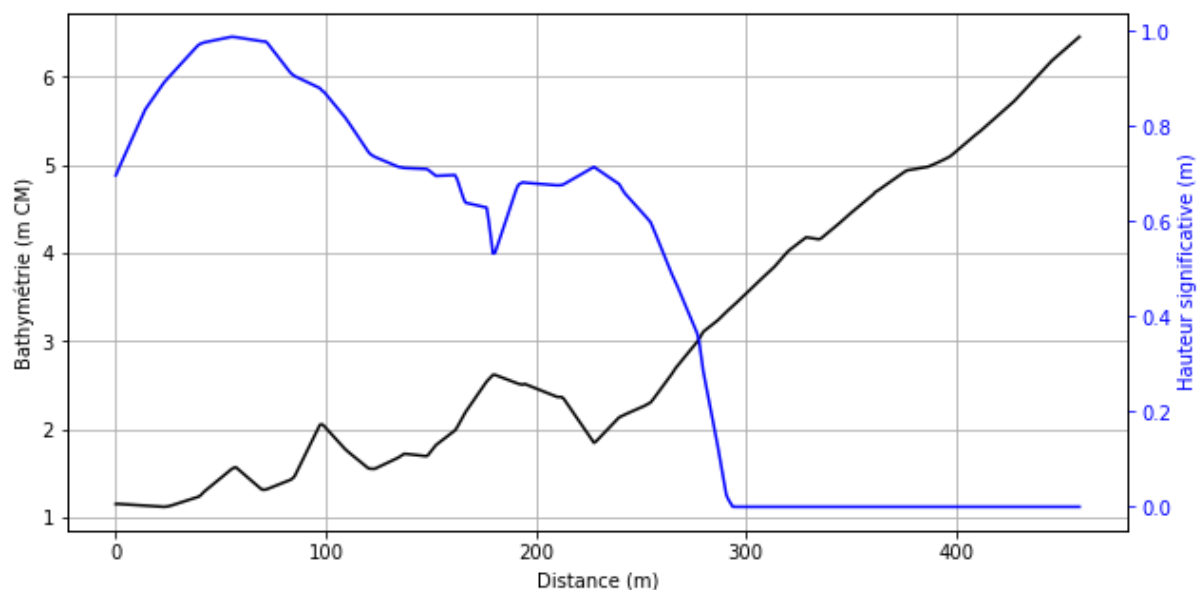


Figure 4.23 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario 1 an niveau moyen.

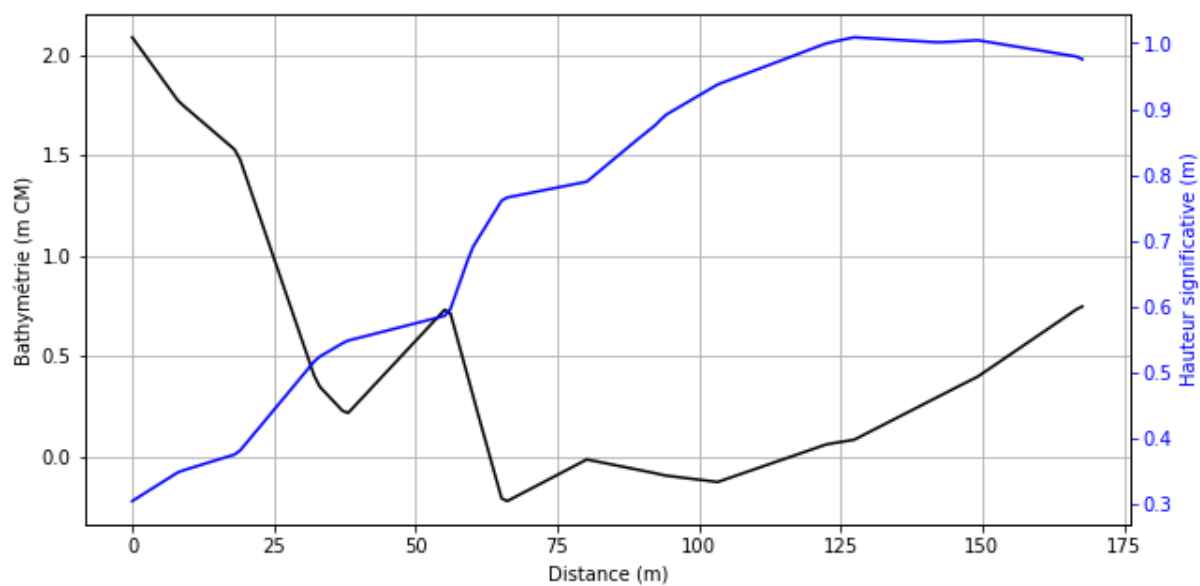


Figure 4.24 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario 1 an niveau moyen.

ANNEXE 4 : FIGURES DES RESULTATS DE MODELISATION TOMAWAC. RESULTATS SCENARIO 10 ANS NIVEAU MOYEN

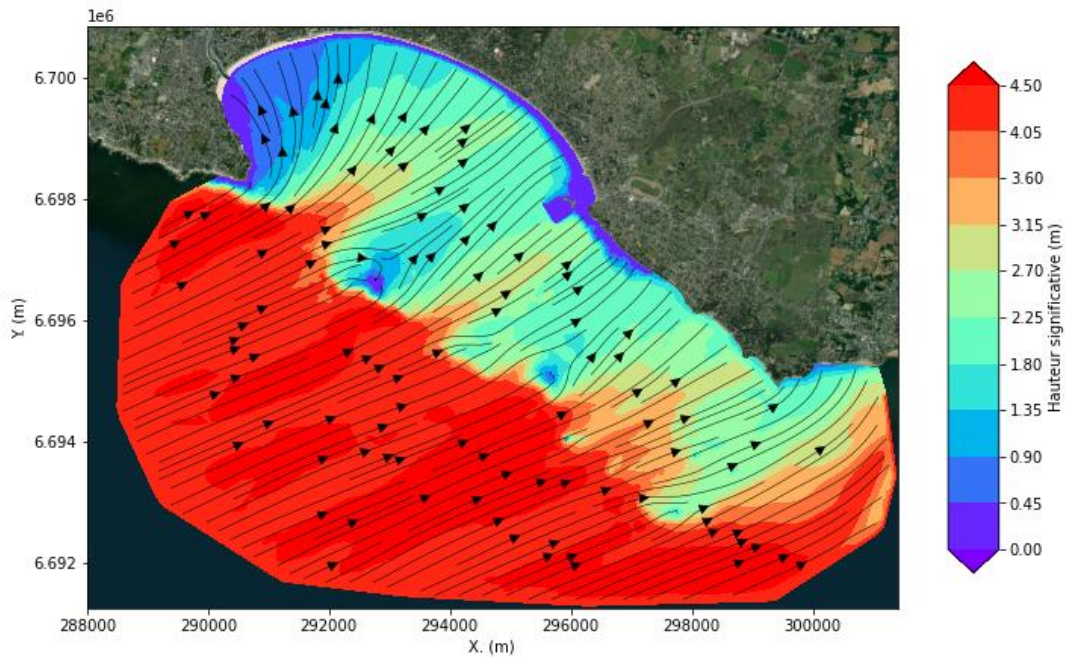


Figure 4.25 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario 10 ans niveau moyen.

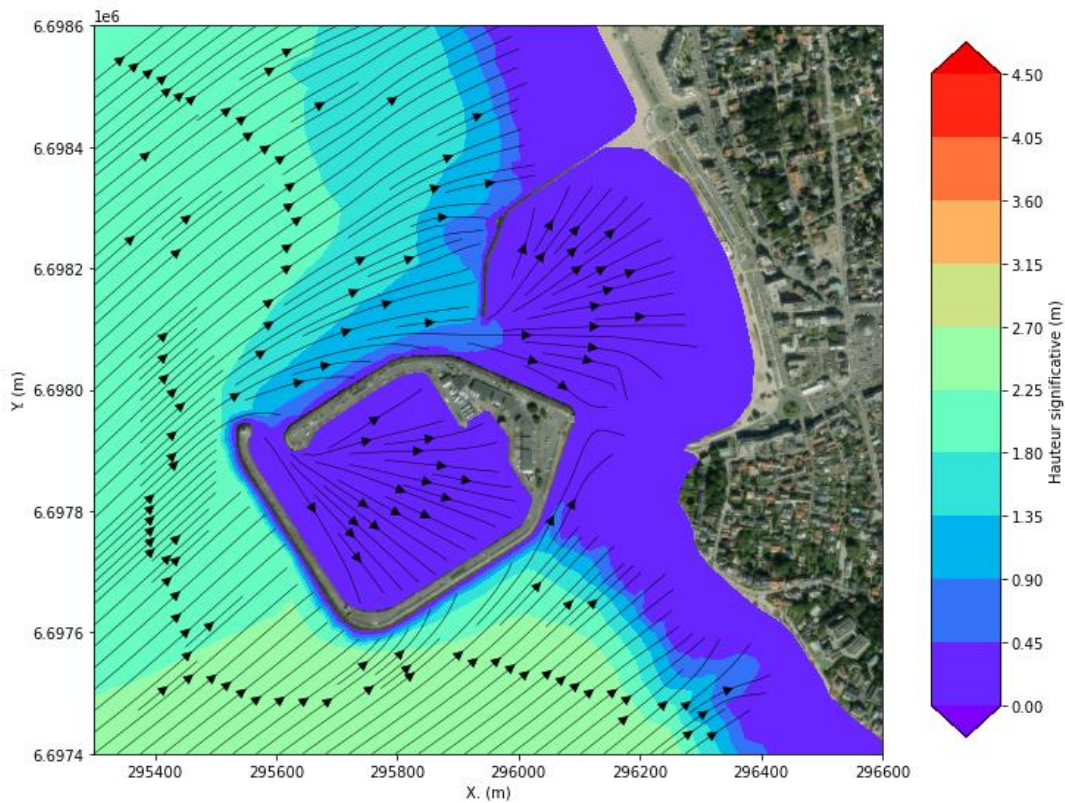


Figure 4.26 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario 10 ans niveau moyen.

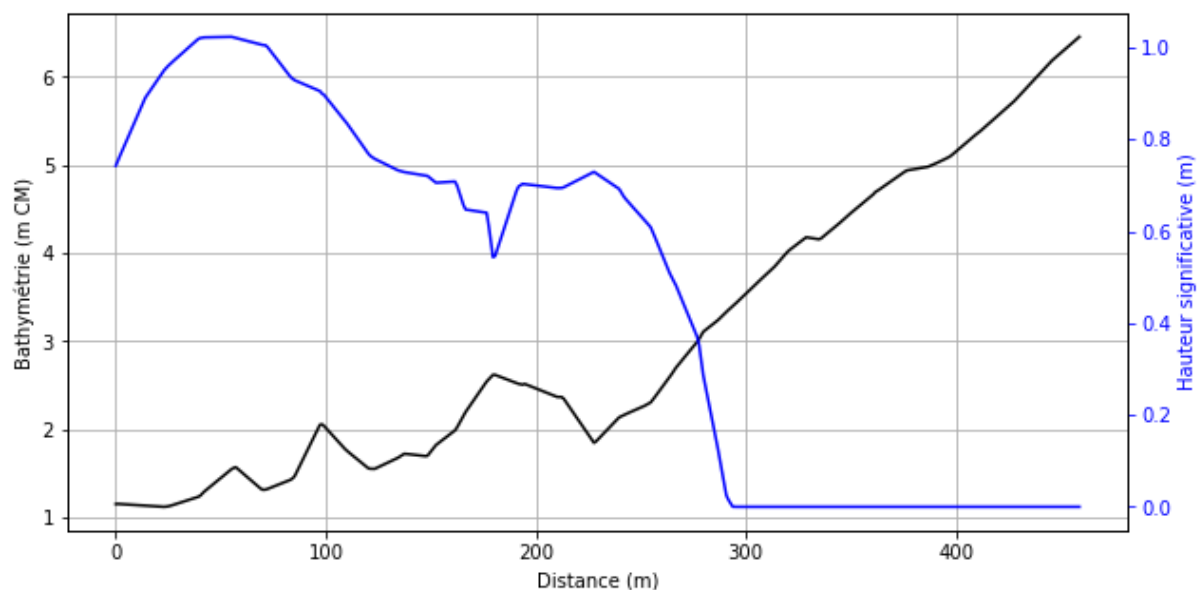


Figure 4.27 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario 10 ans niveau moyen.

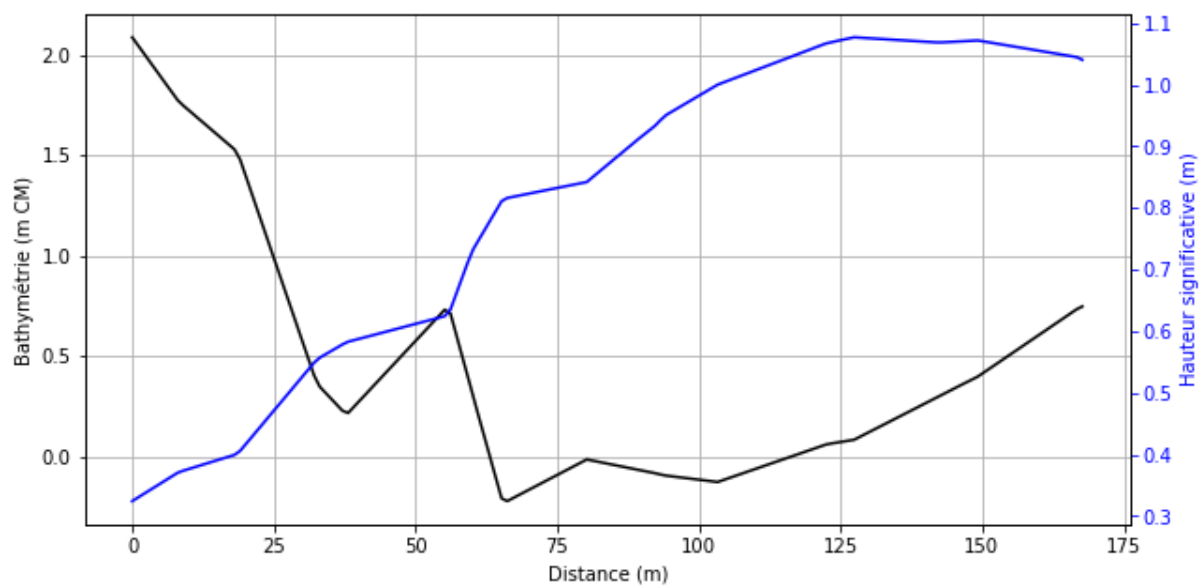


Figure 4.28 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario 10 ans niveau moyen.

ANNEXE 5 : FIGURES DES RESULTATS DE MODELISATION TOMAWAC. RESULTATS SCENARIO 1 AN NIVEAU ELEVE

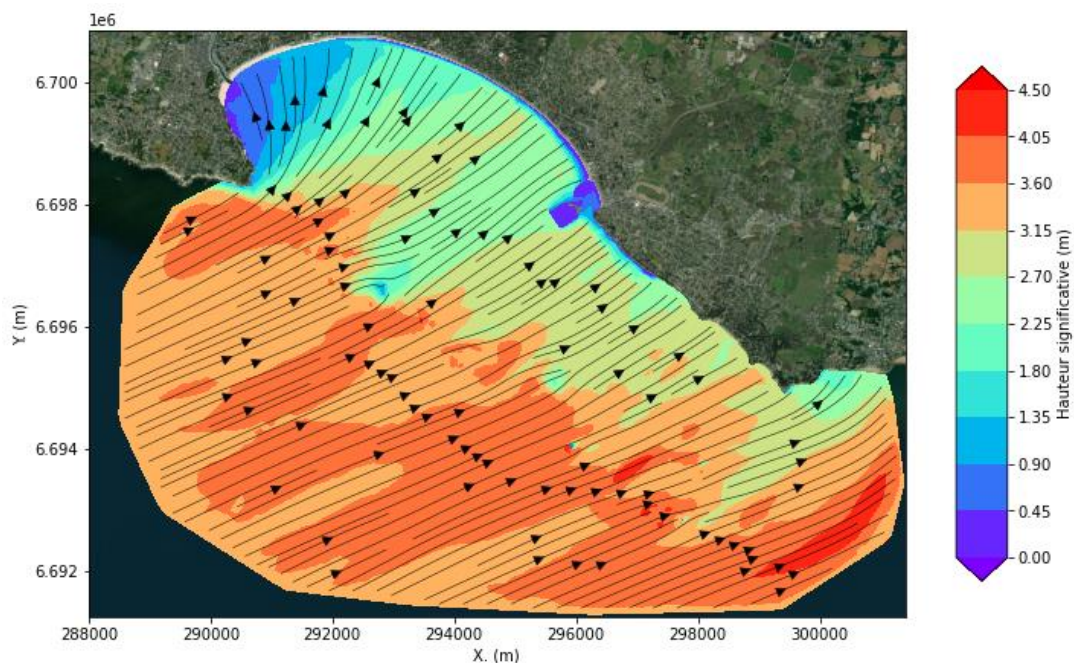


Figure 4.29 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario 1 an niveau élevé.

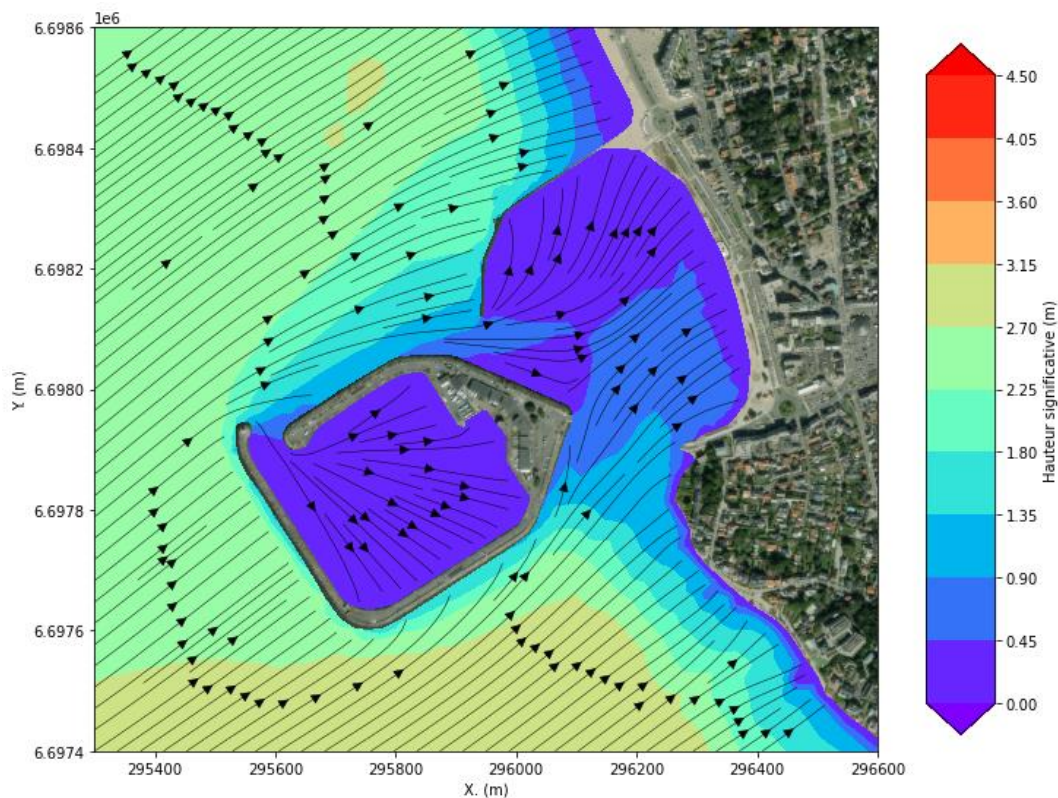


Figure 4.30 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario 1 an niveau élevé.

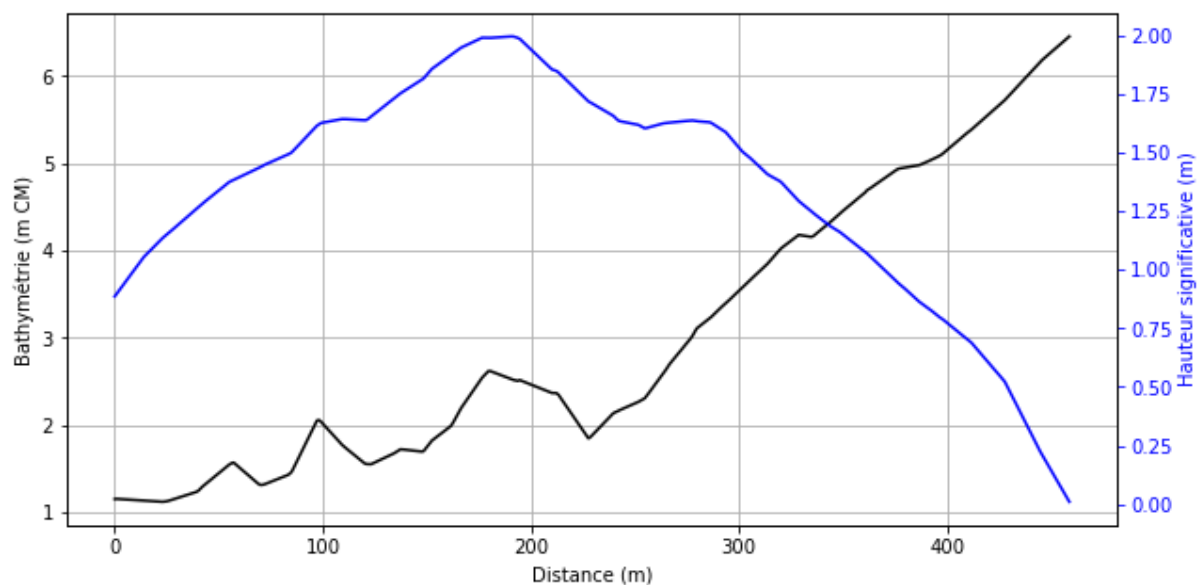


Figure 4.31 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario 1 an niveau élevé.

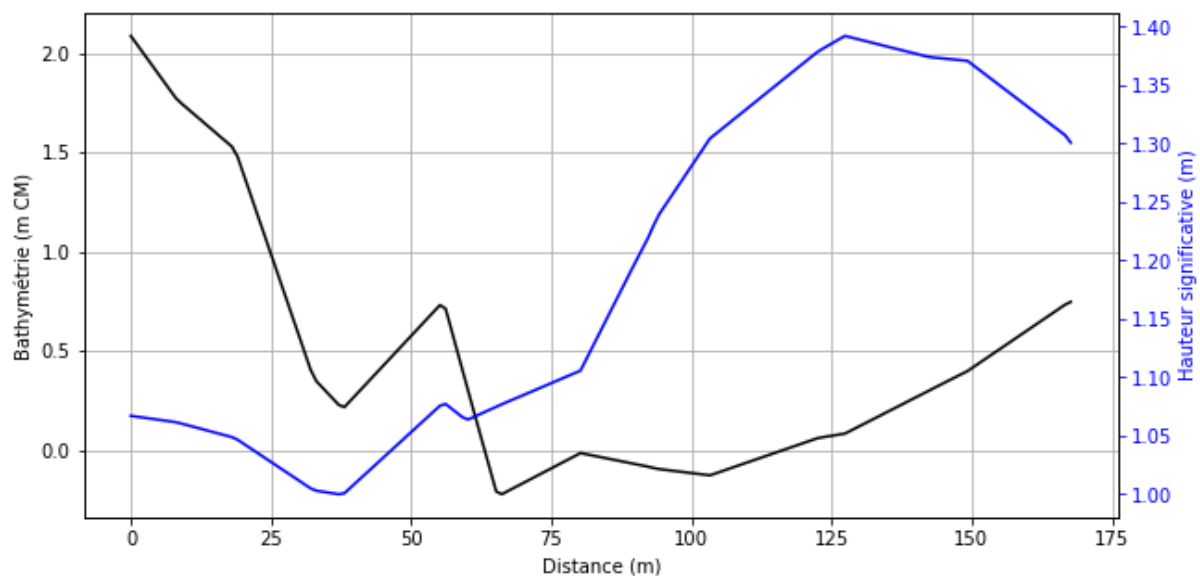


Figure 4.32 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario 1 an niveau élevé.

ANNEXE 6 : FIGURES DES RESULTATS DE MODELISATION TOMAWAC. RESULTATS SCENARIO 10 ANS NIVEAU ELEVE

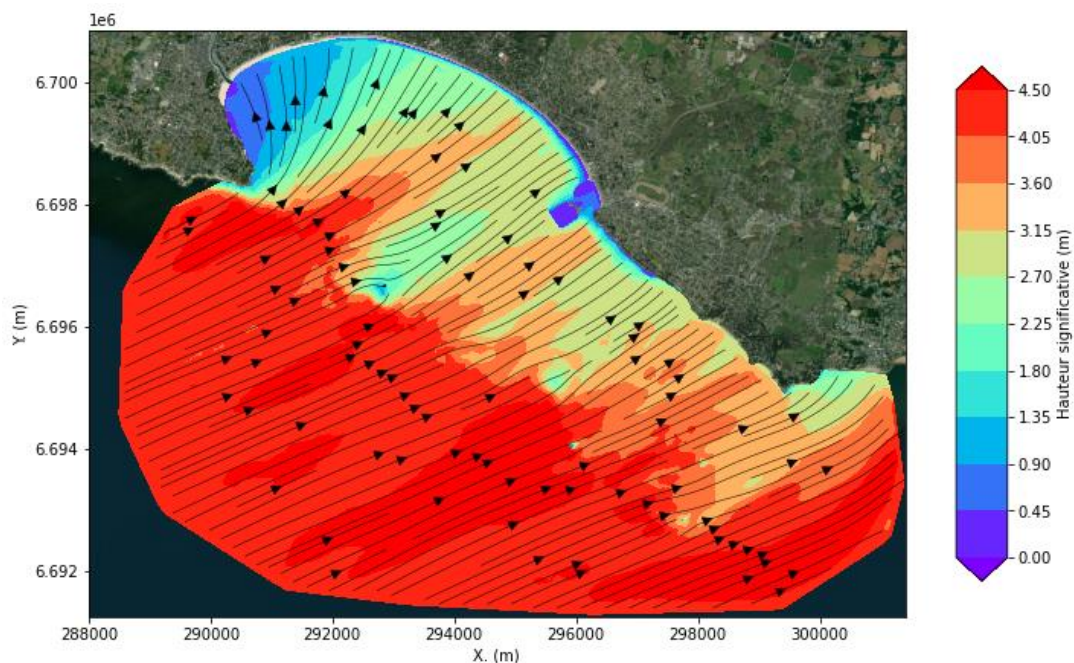


Figure 4.33 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario 10 ans niveau élevé.

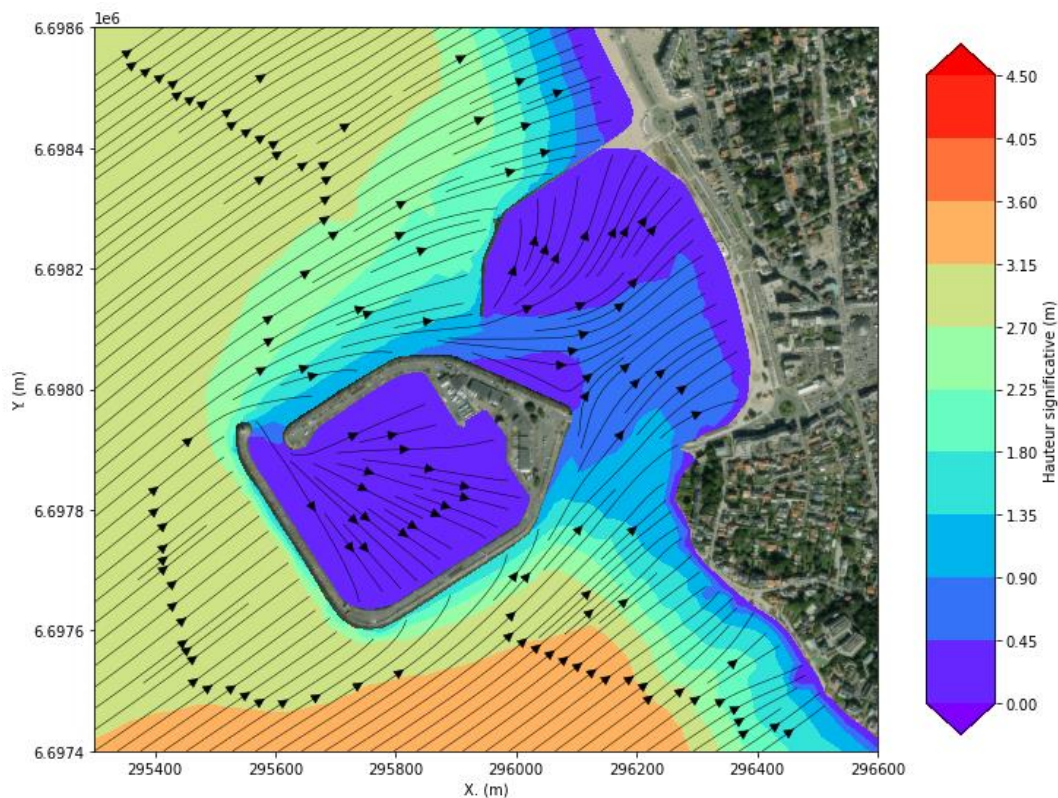


Figure 4.34 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario 10 ans niveau élevé.

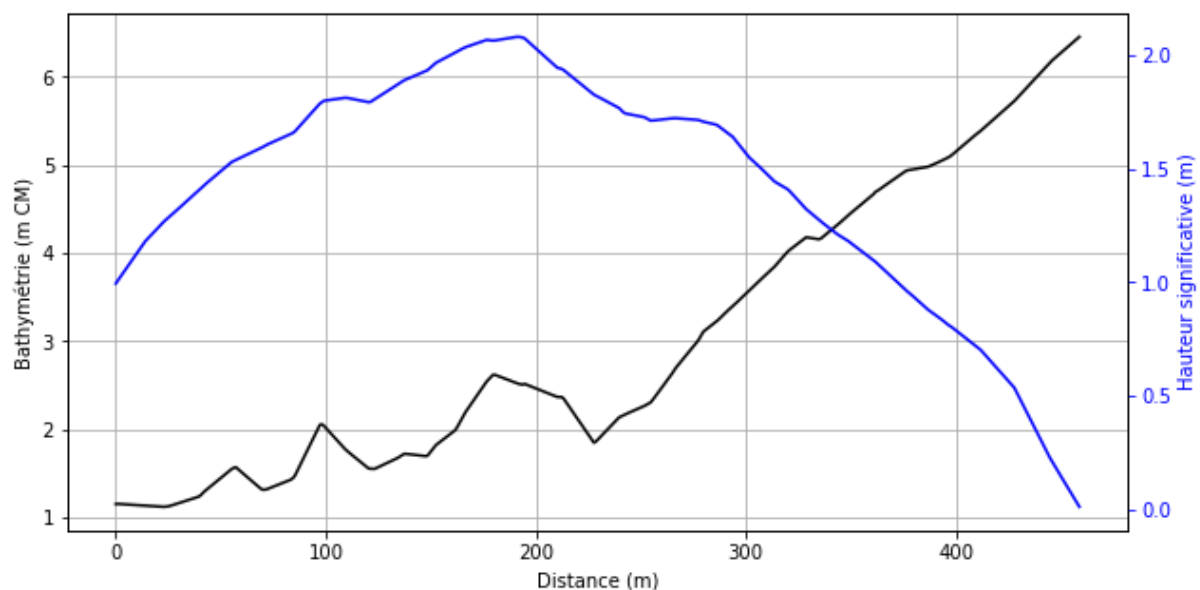


Figure 4.35 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau de la digue de protection du port d'échouage. Scénario 10 ans niveau élevé.

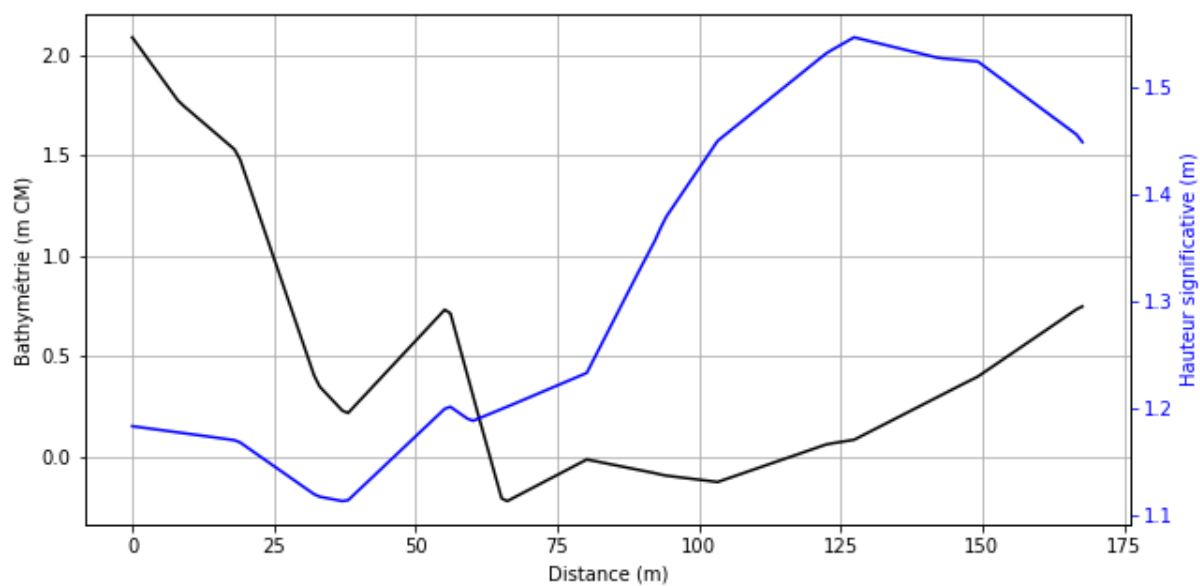


Figure 4.36 : Bathymétrie et hauteur significative des houles au niveau du terre-plein. Scénario 10 ans niveau élevé.

ANNEXE 7 : FIGURES DES RESULTATS DE MODELISATION TOMAWAC. RESULTATS SCENARIO 100 ANS NIVEAU ELEVE

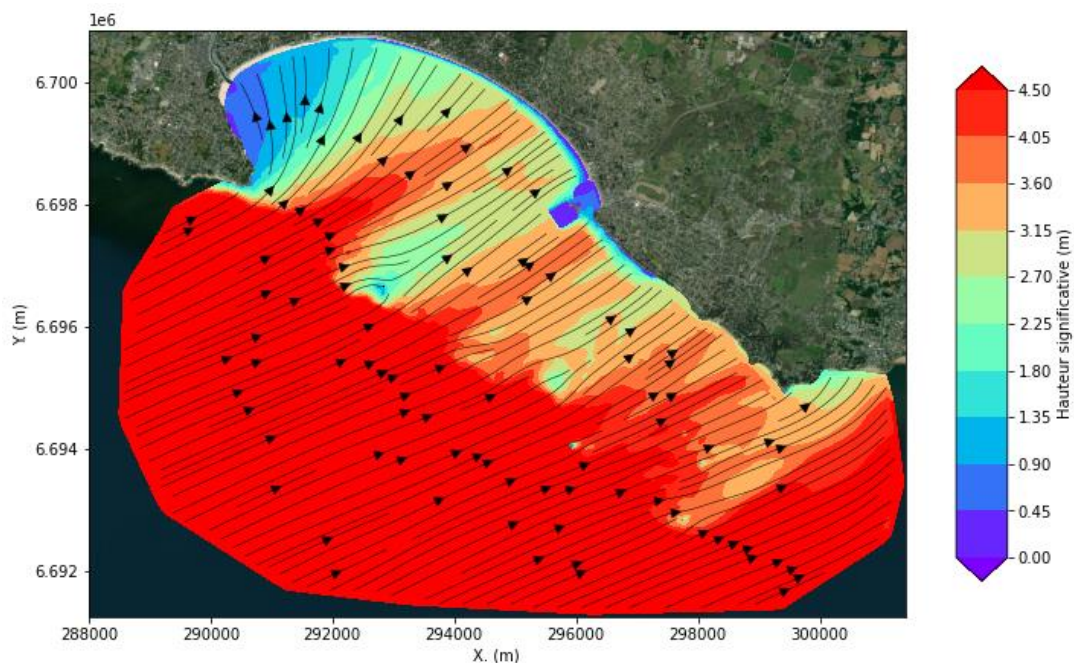


Figure 4.37 : Propagation de la houle du large à la côte. Scénario 100 ans niveau élevé.

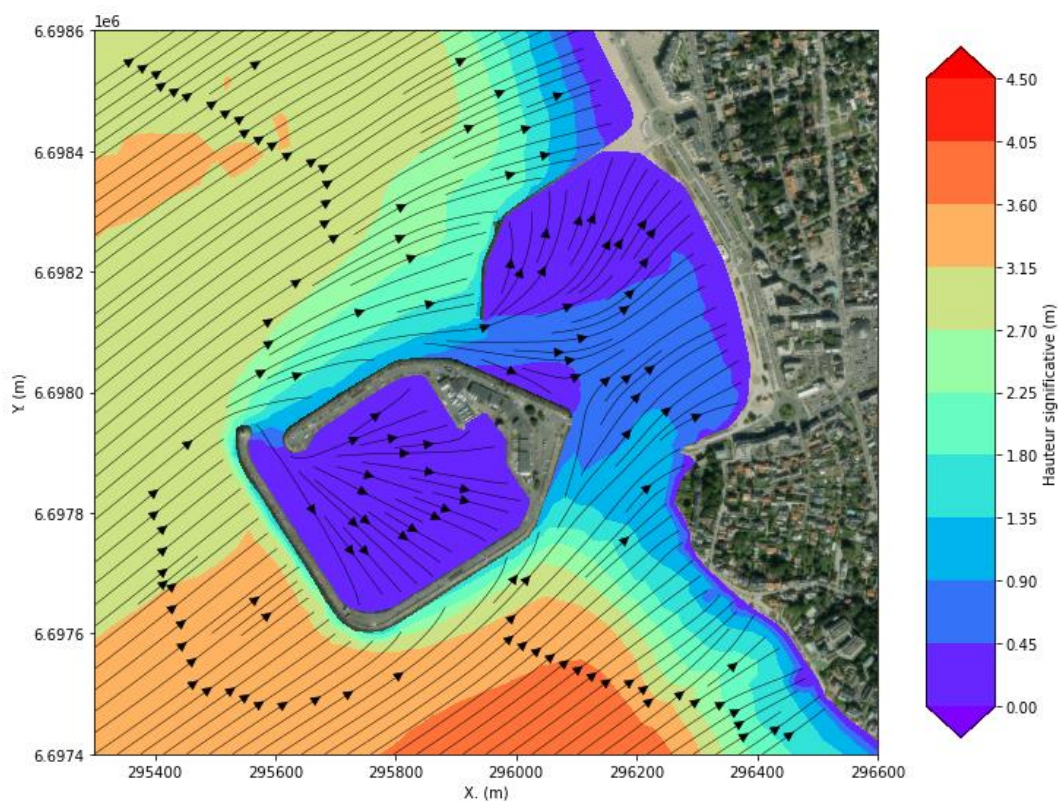


Figure 4.38 : Propagation de la houle au niveau du port de Pornichet. Scénario 100 ans niveau élevé.

CHARIER GENIE CIVIL

CONCEPTION ET REALISATION DU PROGRAMME D'AMENAGEMENT DES PORTS DE PLAISANCE DE PORNICHET

ANNEXE 8 : PROFILS BATHYMETRIQUES

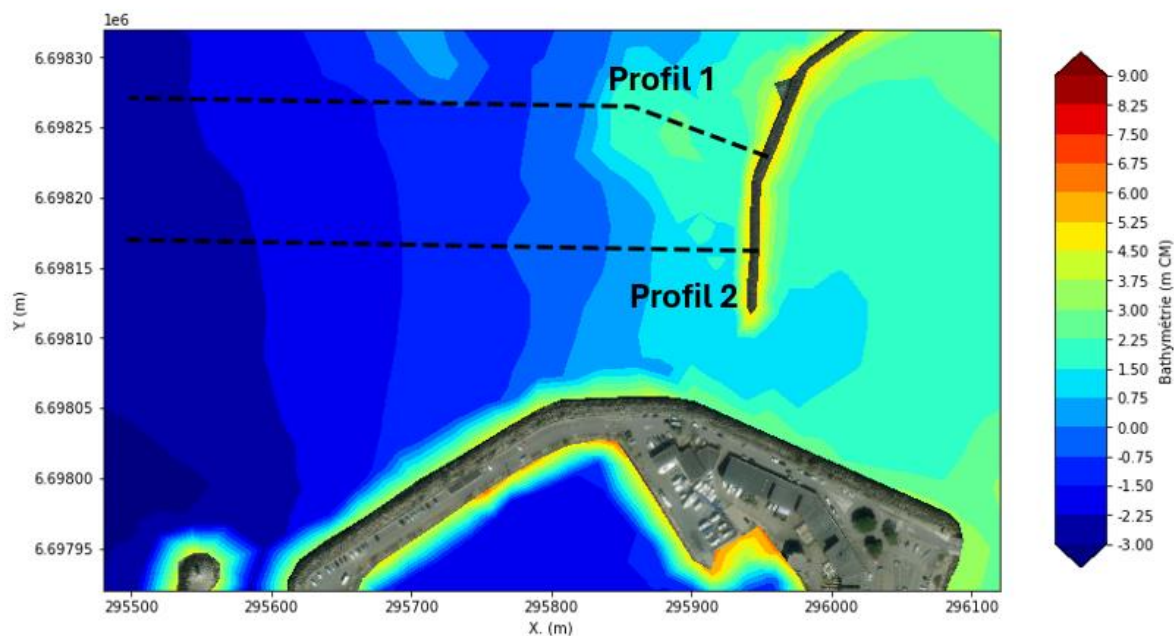


Figure 4.39 : Position des deux profils bathymétriques.

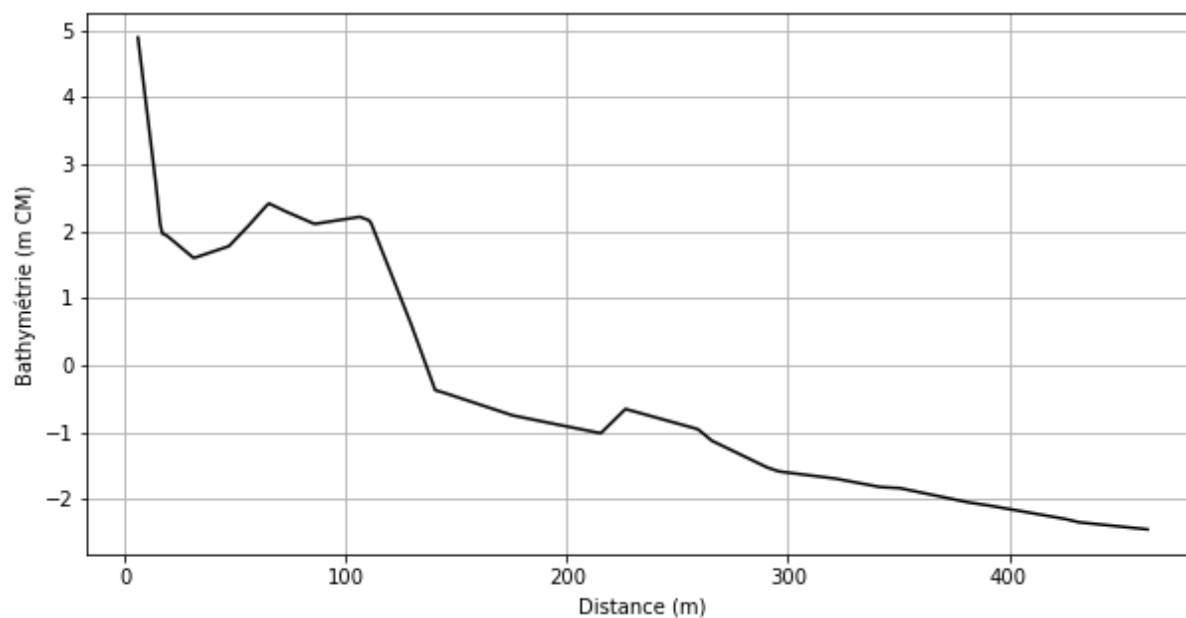


Figure 4.40 : Profil 1.

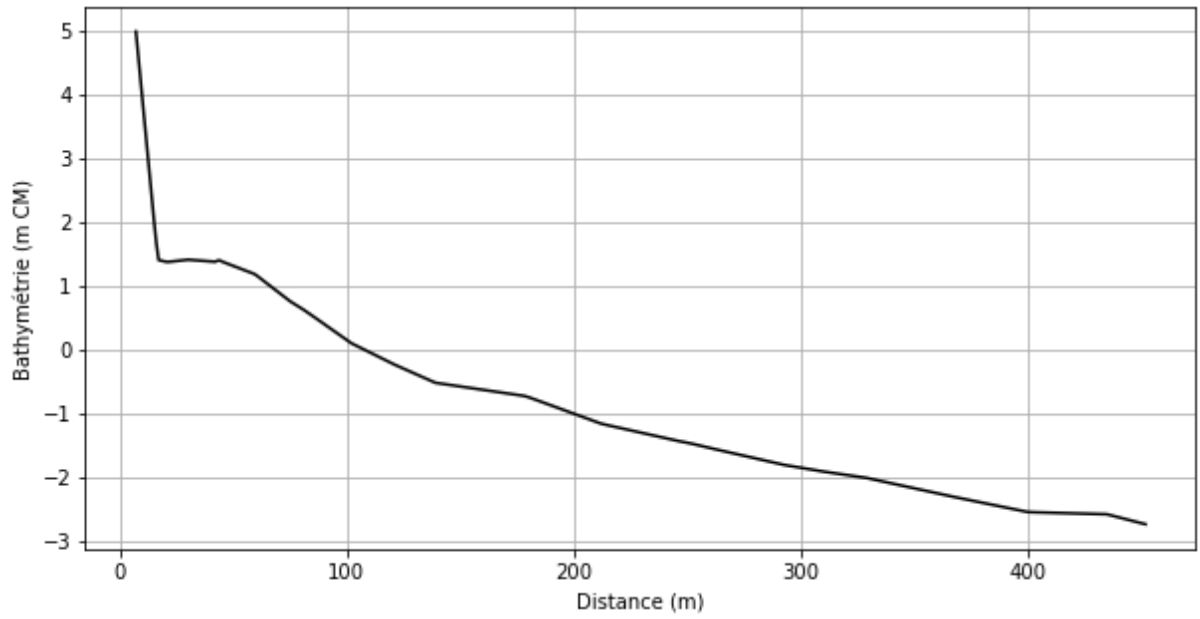
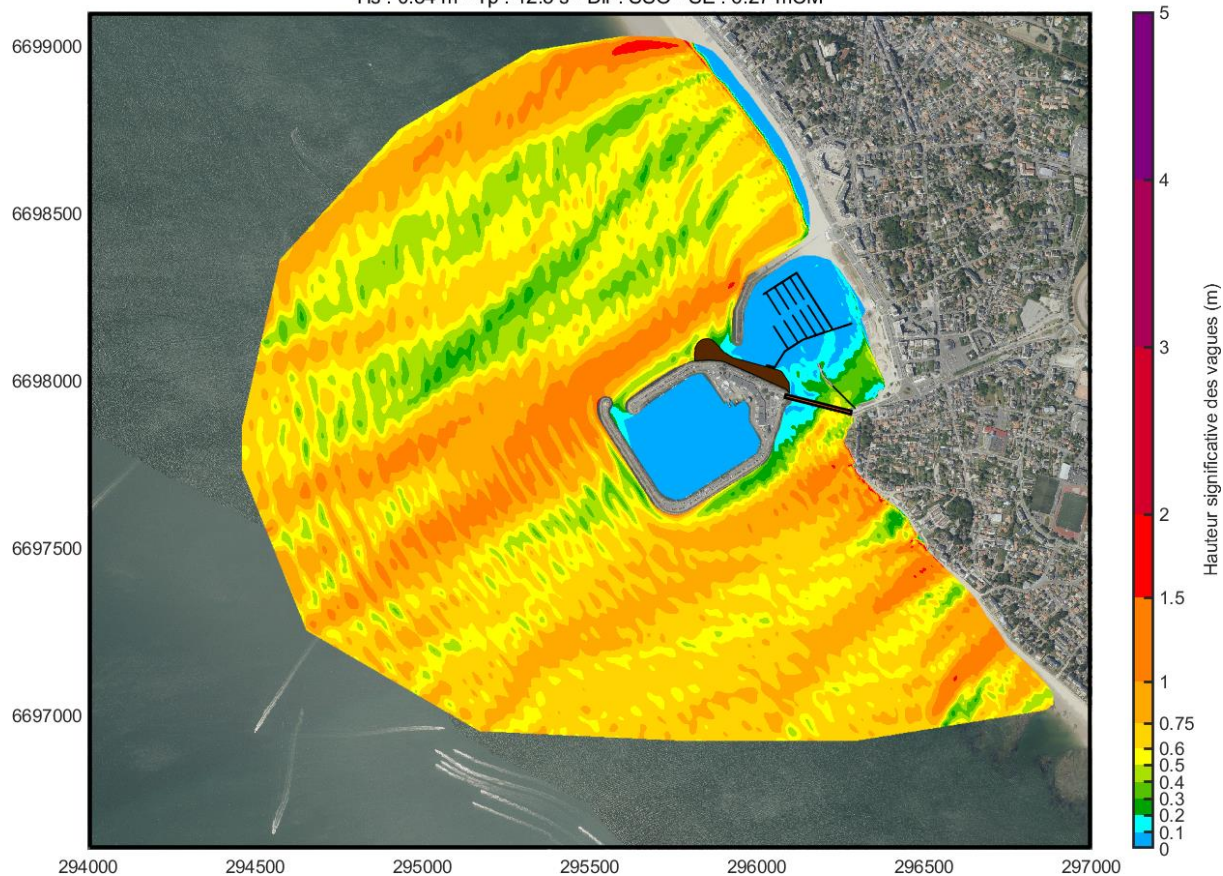


Figure 4.41 : Profil 2.

ANNEXE 9 : RESULTATS DE L'AGITATION PORTUAIRE

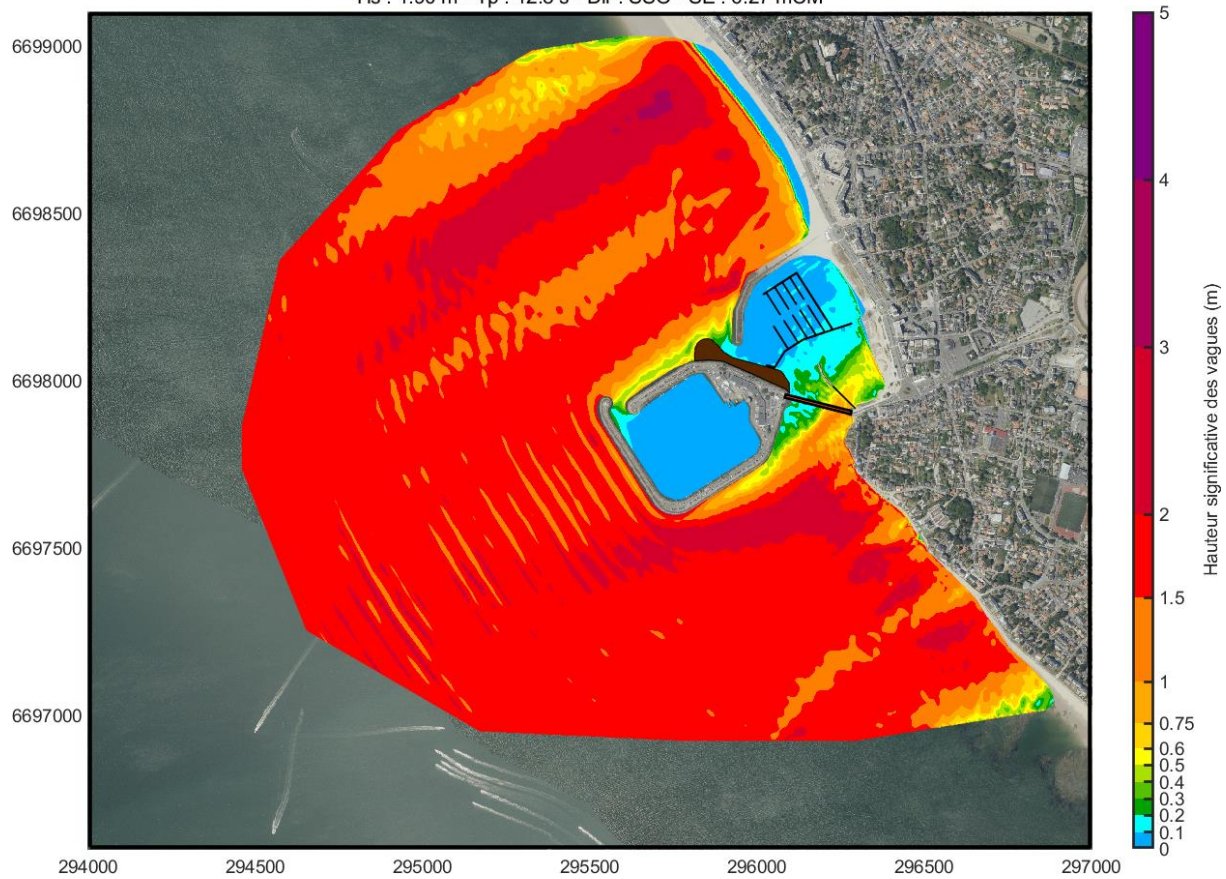
Agitation port de Pornichet - Condition usuelle - CAS 1

Hs : 0.84 m - Tp : 12.5 s - Dir : SSO - SE : 6.27 mCM



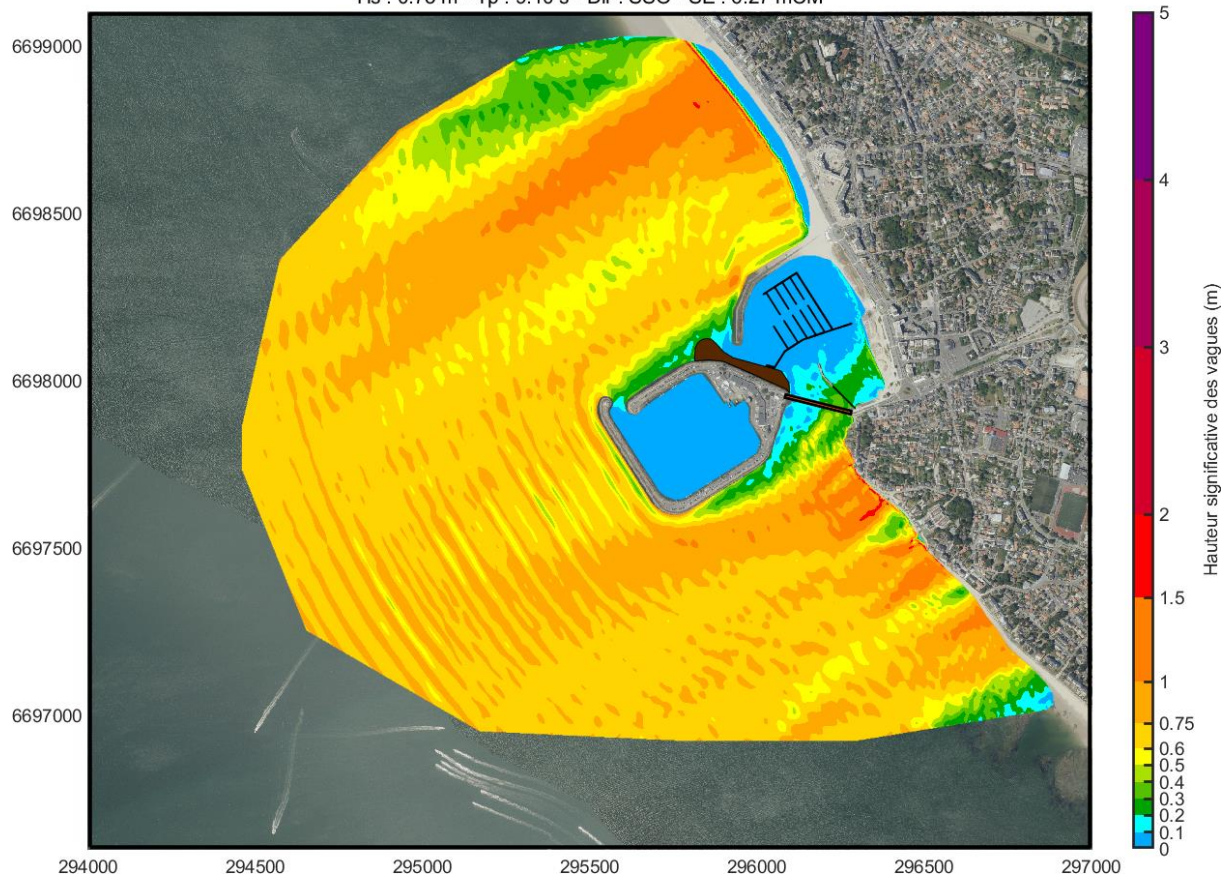
Agitation port de Pornichet - Condition usuelle - CAS 2

Hs : 1.90 m - Tp : 12.8 s - Dir : SSO - SE : 6.27 mCM



Agitation port de Pornichet - Condition usuelle - CAS 4

Hs : 0.73 m - Tp : 9.10 s - Dir : SSO - SE : 6.27 mCM



Agitation port de Pornichet - Période de retour annuelle - Niveau haut

Hs : 3.49 m - Tp : 12.5 s - Dir : SSO - SE : 6.41 mCM



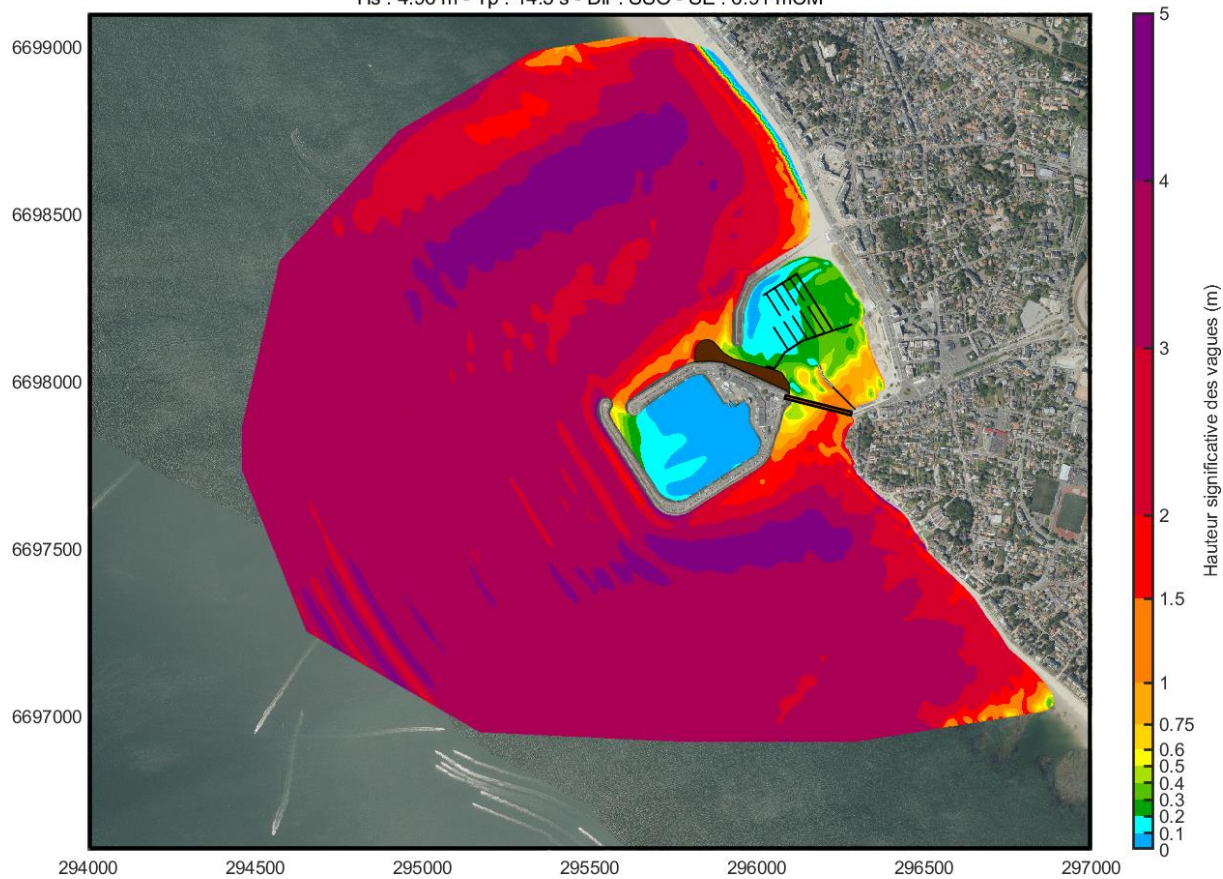
Agitation port de Pornichet - Période de retour décennale - Niveau haut

Hs : 4.23 m - Tp : 13.5 s - Dir : SSO - SE : 6.61 mCM



Agitation port de Pornichet - Période de retour centennale - Niveau haut

Hs : 4.96 m - Tp : 14.5 s - Dir : SSO - SE : 6.91 mCM





www.creocean.fr



[GROUPE KERAN](#)