

RAPPORT

Construction d'un hôtel 4* et d'un centre des congrès aux Trois-Ilets

Etude de la submersion marine

Août 2016

BERIM



BERIM

CONSTRUCTION D'UN HOTEL 4* ET D'UN CENTRE DES CONGRES AUX TROIS-ILETS

CLIENT

RAISON SOCIALE	BERIM
COORDONNÉES	
INTERLOCUTEUR <i>(nom et coordonnées)</i>	

CRÉOCÉAN

	Agence CREOCEAN Antilles-Guyane caraibes@creocean.fr	
COORDONNÉES	MARTINIQUE Le Lareinty 97232 LE LAMENTIN Tél. 05 96 42 10 14 Fax. 05 96 63 69 07	GUADELOUPE 7 rue Amédée FENGAROL – Lot VINCE, ARNOUVILLE 97170 PETIT-BOURG Tel : 05 90 41 16 88 Fax : 05 90 26 57 82
INTERLOCUTEUR	Monsieur Laurent THIEULLE E-mail : thieulle@creocean.fr	

RAPPORT

TITRE	Construction d'un hôtel 4* et d'un centre des congrès aux Trois-Ilets
NOMBRE DE PAGES	21
NOMBRE D'ANNEXES	-
OFFRE DE RÉFÉRENCE	
N° COMMANDE	-

SIGNATAIRE

RÉFÉRENCE	DATE	RÉVISION DU DOCUMENT	OBJET DE LA RÉVISION	RÉDACTEUR	CONTRÔLE QUALITÉ
16 0388	19/08/2016	Édition 1		FBL/ADE	AMO/LTI

Sommaire

1. Introduction.....	5
1.1. Contexte général	5
1.2. Objet de l'étude.....	5
2. Localisation géographique	6
3. Modélisation des conditions d'agitation au niveau de la pointe du Bout.....	7
3.1. Mise en place du modèle	7
3.1.1. Logiciel utilisé	7
3.1.2. Construction du modèle	7
3.1.2.1. Domaine de calcul.....	7
3.1.2.2. Maillage	7
3.1.2.3. Bathymétrie	7
3.1.3. Conditions aux limites et forçage du modèle	9
3.2. Détermination et simulation des conditions de projet.....	9
3.2.1. Houle du large	9
3.2.1.1. Hauteurs significatives de projet	9
3.2.1.2. Période de projet	10
3.2.2. Niveaux d'eau retenus pour le calcul de propagation de la houle du large et durée de la simulation.....	11
3.2.3. Validation du modèle	12
3.2.4. Résultats.....	12
4. Modélisation de la submersion terrestre.....	15
4.1. Méthodologie	15
4.2. Logiciels utilisés.....	15
4.3. Construction du modèle	15
4.3.1. Domaine de calcul	15
4.3.2. Maillage	15
4.3.3. Topographie	15
4.4. Estimation des franchissements à la côte.....	17
4.4.1. Généralités	17
4.4.2. Méthode de calcul	18
4.4.3. Résultats.....	20
4.5. Résultats du modèle de submersion terrestre	21
5. Références	22

Liste des figures

<i>Figure 1 : Localisation de la zone d'étude</i>	6
<i>Figure 2 : Bathymétrie du modèle</i>	8
<i>Figure 3 : Maillage du modèle aux abords de la zone d'étude</i>	8
<i>Figure 4 : Localisation des points de sortie du modèle Météo France</i>	9
<i>Figure 5 : diagramme de dispersion Hs/Tp relatif aux résultats du modèle WW3 NAH pour un point proche de l'entrée de la baie de Fort de France. Courbes en trait plein : relations Hs/Tp caractéristiques du secteur d'étude</i>	11
<i>Figure 6 : Conditions d'agitation de projet dans la baie de Fort-de-France</i>	13
<i>Figure 7 : Conditions d'agitation de projet aux abords de la pointe du Bout</i>	14
<i>Figure 8 : Topographie du modèle terrestre</i>	16
<i>Figure 9 : Maillage du modèle terrestre</i>	17
<i>Figure 10 : Paramètres d'ajustement utilisés par la méthode "Neural Network" pour le calcul des débits de franchissement des structures côtières</i>	18
<i>Figure 11 : Exemple de calcul des débits de franchissement</i>	20
<i>Figure 12 : Epaisseur d'eau maximale atteinte sur la zone d'étude</i>	22

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 : Hs de projet à l'entrée de la baie de Fort-de-France</i>	10
<i>Tableau 2: Synthèse des résultats du franchissement</i>	21

1. Introduction

1.1. Contexte général

Dans le cadre de la construction d'un hôtel 4* et d'un centre des congrès aux Trois-Ilets, la société BERIM a confié à CREOCEAN les études relatives à la protection du littoral faisant face au projet.

L'objectif de la mission vise dans un premier temps, à redéfinir précisément les conditions de site d'un point de vue hydrodynamique, et d'étudier sur la base de ces données, le risque de submersion marine en condition d'aménagement actuel.

Puis dans un second temps, selon les résultats obtenus dans la première phase, les ouvrages de protections seront redéfinis afin d'intégrer dans le dimensionnement des ouvrages au stade APS les résultats issus de la phase précédente.

1.2. Objet de l'étude

CREOCEAN s'est vu confier par la société BERIM, la réalisation des études suivantes :

- ▶ Etude de submersion marine,
- ▶ Etude d'avant-projet sommaire (APS),
- ▶ Etudes réglementaires au cas par cas requis par la nature, l'emplacement et le contexte du projet.

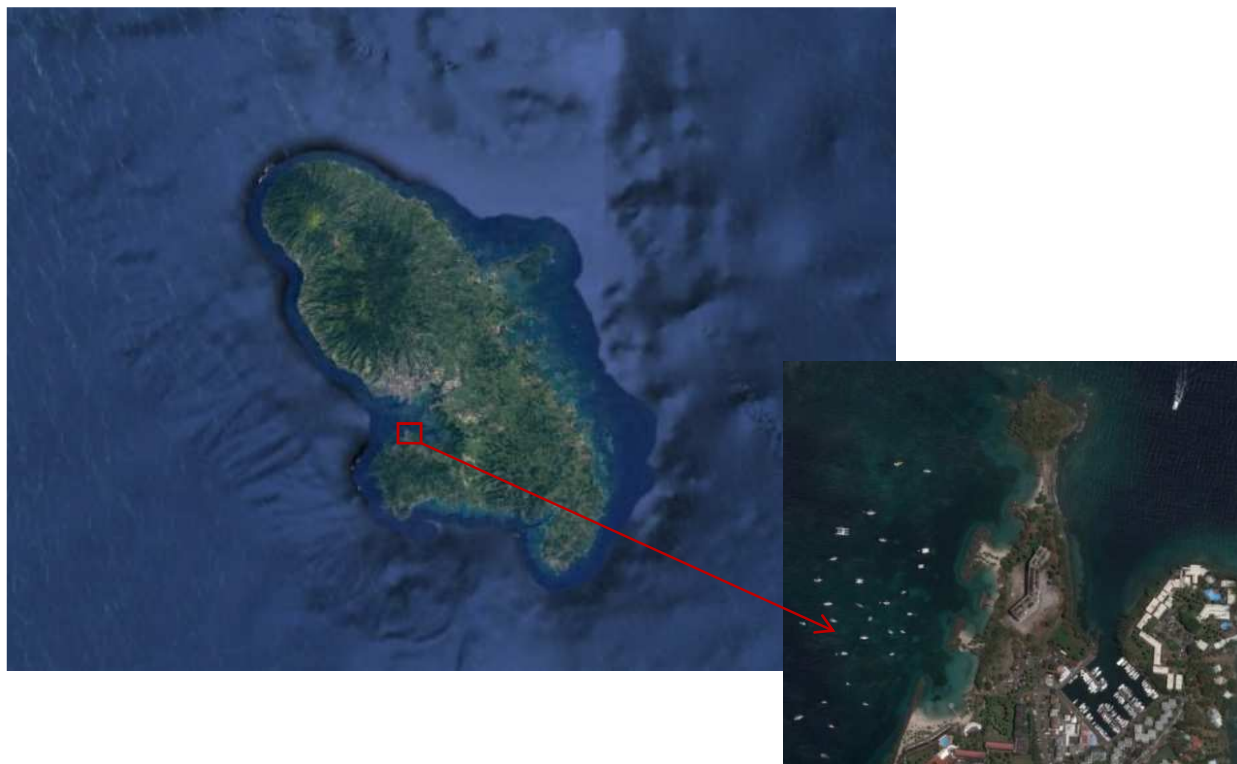
Le présent rapport constitue l'étude de submersion marine.

2. Localisation géographique

La zone d'étude est située sur la commune de Trois-Ilets, au sud-ouest de La Martinique sur la presqu'île du Diamant.

A l'échelle de la commune, la zone est localisée sur le secteur de la Pointe du Bout, à l'emplacement de l'ancien Hôtel Le Méridien devenu Kalenda par la suite.

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude



Source : Google Earth

3. Modélisation des conditions d'agitation au niveau de la pointe du Bout

3.1. Mise en place du modèle

3.1.1. Logiciel utilisé

La modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel de modélisation **MIKE** développé par DHI. Ce logiciel permet de simuler numériquement et en trois dimensions les phénomènes physiques régissant l'hydraulique des milieux maritimes et fluviaux tels que notamment les variations de niveau d'eau, les courants, les vagues, ainsi que leurs interactions. L'étude de modélisation a nécessité l'utilisation des modèles hydrodynamique (**HD**) et de vague (**SW**) de MIKE.

Le code du modèle HD résout les équations tridimensionnelles de l'hydraulique. Ce qui permet, entre autres, de simuler les variations de courants et de niveaux d'eau générés notamment par la marée astronomique et les phénomènes météorologiques. Le code de calcul est capable de prendre en compte l'influence d'ouvrages hydrauliques, tels que des déversoirs ou des conduites.

Le modèle SW permet le calcul des paramètres caractéristiques des vagues, et leur propagation, à partir de conditions de houle fournies aux limites du domaine modélisé et/ou de conditions de vent.

Si besoin, le couplage des 2 modèles permet de calculer les phénomènes engendrés par la houle sur l'écoulement des masses d'eau, tels que les courants de dérive littorale et les phénomènes de set-up (surélévation locale du plan d'eau, en fonction de la configuration locale des fonds sur les zones de déferlement).

3.1.2. Construction du modèle

3.1.2.1. Domaine de calcul

Le domaine de calcul est centré sur la Martinique, et s'étend sur une cinquantaine de kilomètres vers le large, autour de l'île.

3.1.2.2. Maillage

Le maillage en éléments finis autorise une grande souplesse dans la représentation des zones complexes et dans la distorsion entre mailles, ce qui permet d'affiner localement la résolution du modèle. Au niveau de la pointe du Bout, les éléments ont une taille d'environ **10 à 20 mètres** de côté.

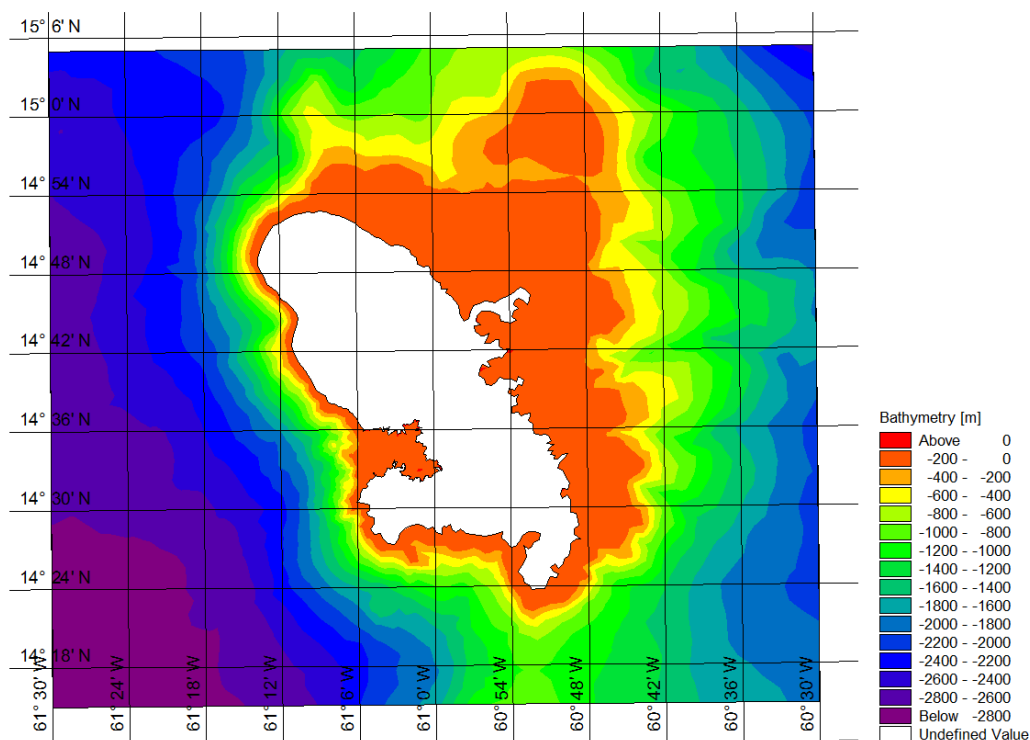
3.1.2.3. Bathymétrie

Une bonne représentation des profondeurs est essentielle pour la précision des calculs de propagation de la houle. Le modèle numérique de terrain a été réalisé à partir de :

- ▶ Levés bathymétriques fournis par le Maître d'ouvrage ;
- ▶ Litto3D IGN (levé Lidar) ;
- ▶ Produits numériques de bathymétrie (dalles bathymétriques) fournis par le SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine) ;
- ▶ Cartes SHOM ;
- ▶ Base de données GEBCO (GEneral Bathymetric Chart of the Ocean) pour le large.

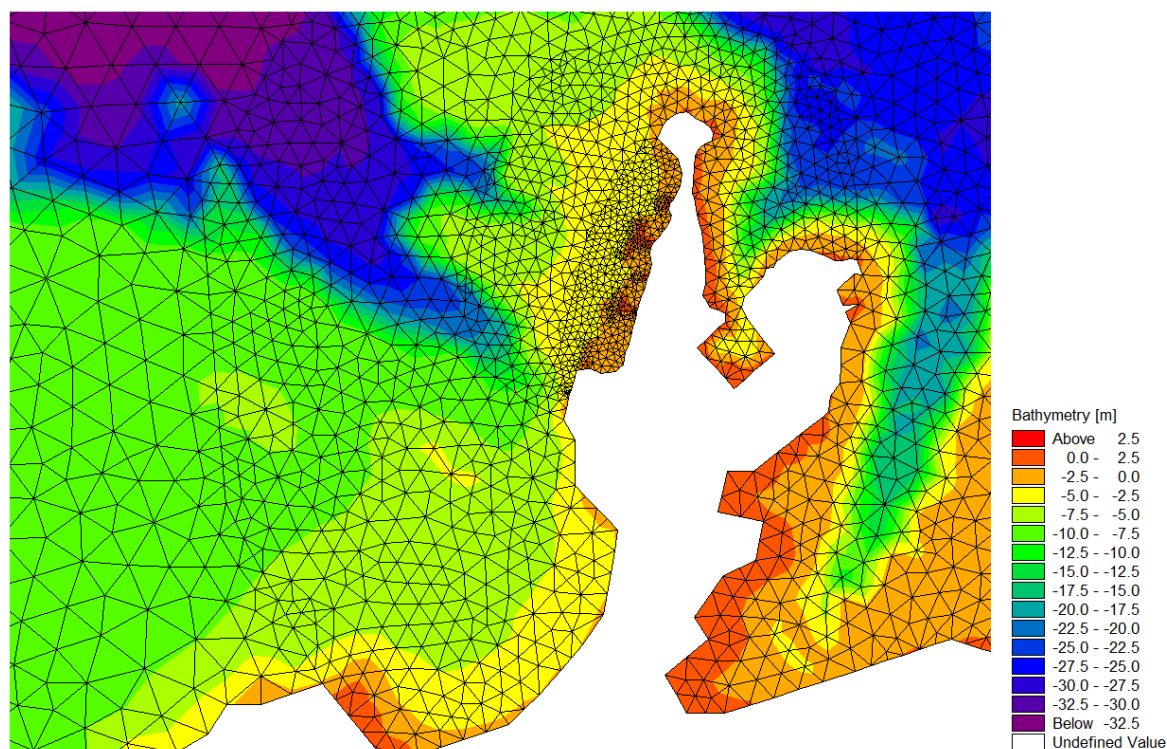
L'emprise du modèle, le maillage associé et la bathymétrie sont présentés sur les figures suivantes.

Figure 2 : Bathymétrie du modèle



Source : CREOCEAN

Figure 3 : Maillage du modèle aux abords de la zone d'étude



Source : CREOCEAN

3.1.3. Conditions aux limites et forçage du modèle

Les caractéristiques de la houle du large (hauteur significative, période pic, direction et étalement spectral) sont spécifiées en limite du modèle ainsi que les variations de niveau dans le temps et l'espace. De plus, un forçage atmosphérique (intensité et direction du vent) est appliqué uniformément sur tout le domaine.

3.2. Détermination et simulation des conditions de projet

L'analyse de la littérature scientifique a permis de déterminer, dans un premier temps, les conditions extrêmes d'agitation au large susceptibles de produire les états de mer les plus défavorables pour la zone d'étude. La propagation de ces conditions d'agitation extrêmes dans la baie de Fort-de-France a ensuite été simulée afin de déterminer les conditions de projets au niveau de la pointe du Bout.

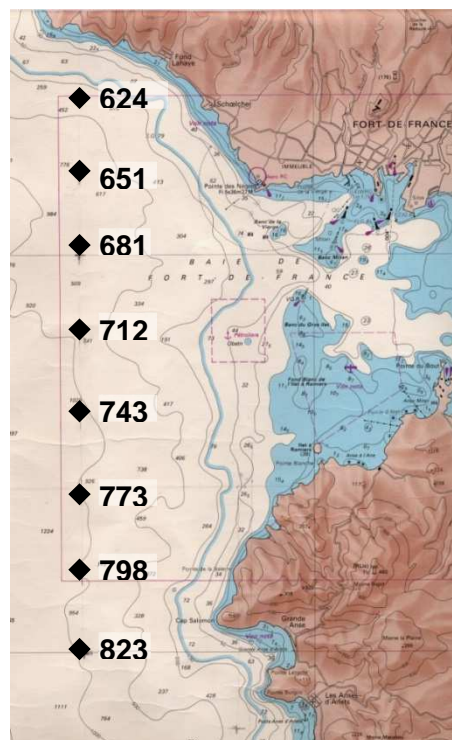
3.2.1. Houle du large

3.2.1.1. Hauteurs significatives de projet

L'analyse des conditions nominales extrêmes à l'entrée de la baie de Fort-de-France s'appuie essentiellement sur les estimations de Météo-France (2005) réalisées à partir des simulations hindcast (rétrospectives) de tous les cyclones sur la période 1964-1999. Les résultats de l'étude Météo France indiquent que les houles les plus fortes observées à l'entrée de la baie de Fort-de-France proviennent du **secteur Sud-ouest**. Le secteur de la pointe du Bout est relativement bien exposé aux houles de Sud-Ouest.

La localisation des nœuds du modèle analysés par Météo-France est présentée en page suivante.

Figure 4 : Localisation des points de sortie du modèle Météo France



Source : Météo-France

Les hauteurs significatives de vagues associées aux différentes périodes de retour sont listées pour 3 points dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Hs de projet à l'entrée de la baie de Fort-de-France

Période de retour Point	10 ans Toutes directions	100 ans Toutes directions	100 ans Nord-Ouest	100 ans Ouest	100 ans Sud-Ouest
624	4 m	7.5 m	3.9 m	6.4 m	7.5 m
743	4.3 m	7.9 m	6.1 m	6.7 m	8 m
823	4.8 m	8.9 m	6.6 m	7.2 m	8.4 m

Source : Météo-France, 2005

3.2.1.2. Période de projet

Dans un premier temps, un diagramme de dispersion (nuage de points) Hs/Tp a été tracé pour les résultats du modèle WW3 NAH (North Atlantic Hurricane, modèle régional dédié aux cyclones de la NOAA) pour un point proche de l'entrée de la baie de Fort-de-France (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Une première analyse visuelle nous indique que pour les plus hautes valeurs de Hs (=4 à 5m) simulées par le modèle WW3 NAH, les périodes de pic Tp sont globalement comprises entre 7 et 11s.

Nous ne disposons pas de données pour les conditions de projet correspondant à une occurrence centennale (de l'ordre de 8 m). Les données existantes Hs/Tp ont donc été extrapolées pour des événements extrêmes. La méthode d'extrapolation est décrite ci-après.

A partir d'une distribution spectrale de type JONSWAP - adaptée dans notre cas, pour les événements de haute énergie, car les spectres dans la zone de projet sont de type unimodal et correspondent à une condition locale de cyclone (e.g. Holthuijsen, 2007) - il est possible d'obtenir une relation entre Hs et Tp (e.g. Boccotti, 2000) :

$$T_p = \sqrt[4]{\frac{1}{0.305A}} 2\pi \sqrt{\frac{H_s}{4g}}$$

Avec A (paramètre de Philips) qui tient compte des processus de génération des vagues :

$$A = 0.076 \left(\frac{gF}{u^2}\right)^{-0.22}$$

F étant la longueur de fetch et u la vitesse du vent.

Des courbes ont été établies à partir de la relation type proposée par Boccotti, en considérant :

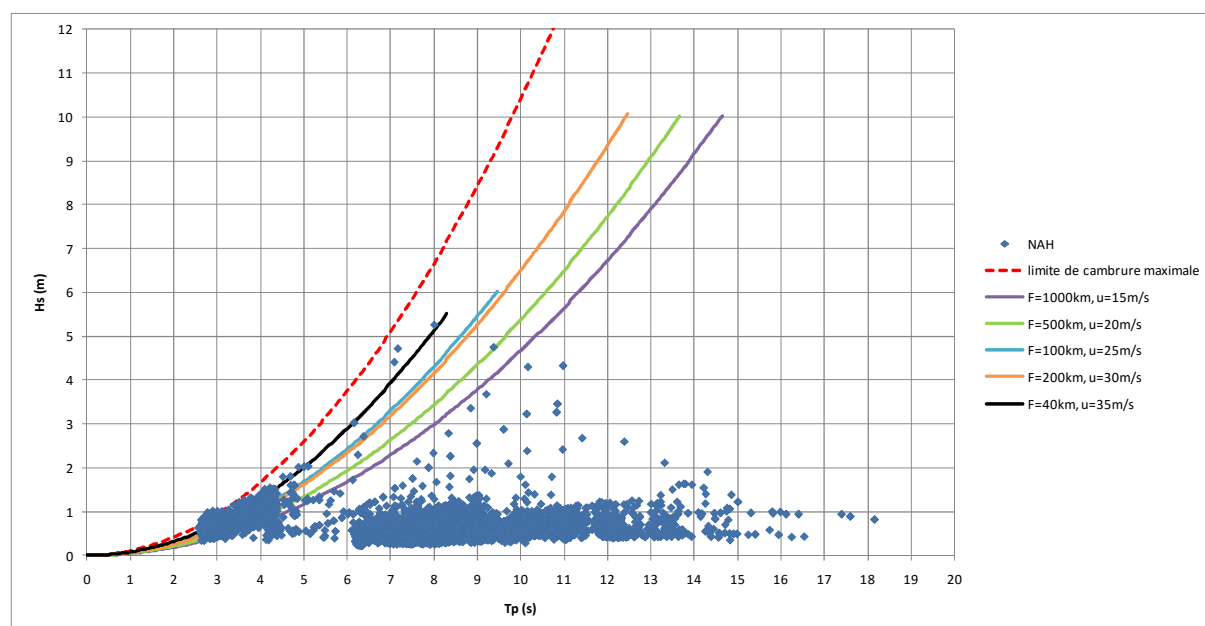
- ▶ Des longueurs de fetch cohérentes avec les trajectoires de cyclone en Mer des Caraïbes
- ▶ Des vitesses de vents extrêmes sur la zone de projet
- ▶ Des abaques classiques du Shore Protection Manual (1984) qui indiquent les valeurs maximales de Hs pour une longueur de fetch et une vitesse de vent donnée.

Ces courbes ont été superposées au diagramme de dispersion Hs/Tp. Il faut bien noter que d'autres courbes auraient pu être tracées. Le choix des couples (longueur de fetch, vitesses de vent) a été

réalisé pour représenter au mieux la variabilité des conditions de vagues en tenant compte des caractéristiques météo-océaniques de la zone de projet.

La courbe indiquant la limite de cambrure des vagues, au-delà de laquelle une partie de l'énergie est dissipée par déferlement (moutonnement pour les profondeurs importantes), est également reportée sur le graphique. Une cambrure $(2\frac{H_s}{gT_p^2})$ limitée à 1/15 est considérée (Holthuijsen, 2007).

Figure 5 : diagramme de dispersion H_s/T_p relatif aux résultats du modèle WW3 NAH pour un point proche de l'entrée de la baie de Fort de France. Courbes en trait plein : relations H_s/T_p caractéristiques du secteur d'étude



Source : CREOCEAN

On note que pour une longueur de fetch de quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres, et pour un vent moyen d'intensité comprise entre 25 et 30 m/s (représentatifs d'un événement cyclonique), les courbes de relation H_s/T_p caractéristiques d'une houle de 8 m indiquent une **période pic d'environ 11 secondes**.

3.2.2. Niveaux d'eau retenus pour le calcul de propagation de la houle du large et durée de la simulation

Le modèle de propagation des conditions d'agitation extrêmes en baie de Fort-de-France a été couplé à un modèle de marée associé à une surcote cyclonique centennale au large de 45cm. Cette surcote a été déterminée par Météo France et présentée dans un rapport d'étude sur les surcotes cycloniques en baie de Fort-de-France. Ce niveau d'eau peut raisonnablement être associé à une houle centennale d'origine cyclonique. Il existe en effet une forte probabilité conjointe de voir ces deux phénomènes se produire simultanément durant un événement cyclonique centennal.

Par ailleurs, les effets de site sur la surcote en Baie de Fort-de-France et le set-up lié au déferlement des vagues à la côte sont calculés explicitement par le modèle. Les effets du changement climatique sur l'élévation future du niveau marin (rapports du GIEC) n'ont toutefois pas été pris en compte.

La durée de l'évènement simulé, paramètre essentiel pour une étude de submersion, a été établie à 24h. Cette durée correspond à un temps de passage réaliste d'un cyclone en Martinique et elle permet de couvrir différentes conditions de marée.

3.2.3. Validation du modèle

Différents tests de sensibilité ont été conduits afin de déterminer le couple forçage atmosphérique/condition de houle en limite du modèle permettant de recréer les niveaux d'agitation correspondant à la houle de Sud-ouest centennale estimée par Météo France. Les tests ont ainsi porté sur la hauteur de houle en limite du modèle et l'intensité du vent.

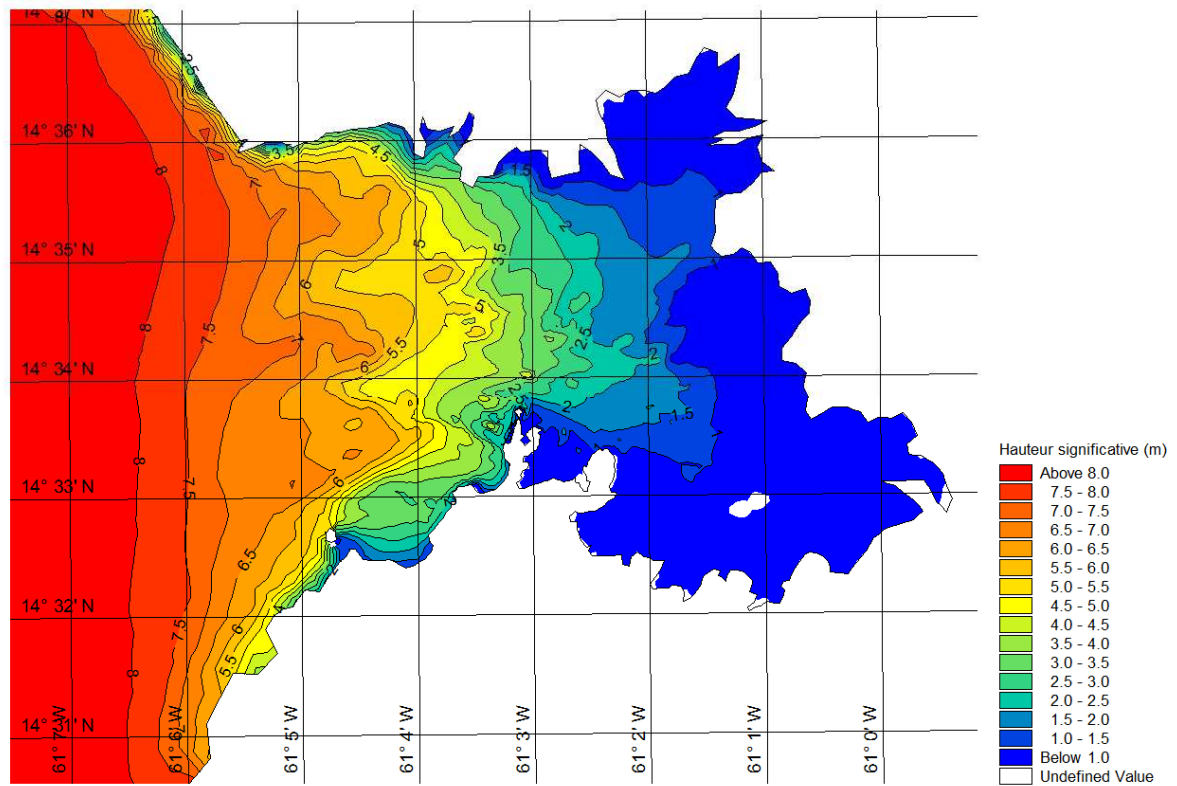
Au final, une combinaison réaliste de ces différents paramètres a permis de recréer l'agitation centennale au point de sortie 743 du modèle Météo France avec une grande précision.

3.2.4. Résultats

Les planches d'agitation de projet dans la baie de Fort-de-France et au niveau de la pointe du Bout sont présentées sur les figures suivantes.

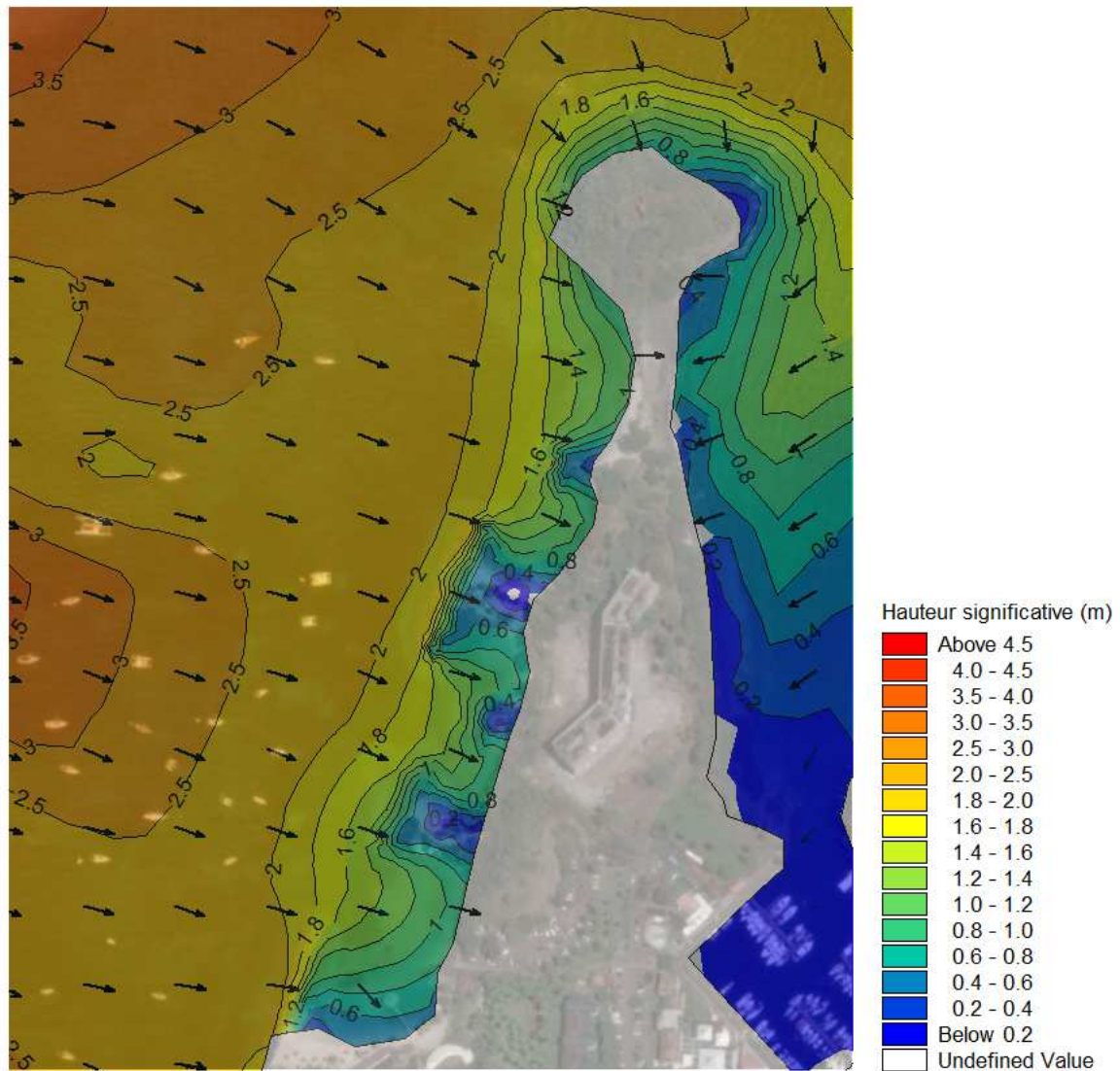
La relative courte période de la houle du large favorise sa propagation au sein de la baie de Fort-de-France, celle-ci étant moins sujette qu'une houle longue aux phénomènes dissipant l'énergie sur les hauts-fonds (réfraction, frottements sur le fond). De plus, le vent de forte intensité soufflant également sur la baie et dans la direction de propagation de la houle continue d'apporter de l'énergie au spectre des états de mer, notamment dans les hautes fréquences (courtes périodes).

On note que les hauteurs significatives simulées sur la face ouest de la Pointe du Bout atteignent environ **2 m** au droit des digues avec des périodes de l'ordre de **11s**. A la côte, l'agitation est faible à nulle à l'arrière des digues qui remplissent bien leur rôle de protection, entre les différentes digues l'agitation atteint au maximum 80cm à 1m.

Figure 6 : Conditions d'agitation de projet dans la baie de Fort-de-France

Source : CREOCEAN

Figure 7 : Conditions d'agitation de projet aux abords de la pointe du Bout



Source : CREOCEAN

4. Modélisation de la submersion terrestre

4.1. Méthodologie

Un modèle spécifique a été mis en place pour simuler la submersion terrestre. La méthodologie consiste à utiliser les résultats des précédentes modélisations comme conditions aux limites et à étendre les calculs aux zones terrestres.

4.2. Logiciels utilisés

Pour cette phase de l'étude, le module HD de MIKE 21 a été utilisé, il s'agit de la version en 2D du module Mike HD présenté au paragraphe 3.1.1.

4.3. Construction du modèle

4.3.1. Domaine de calcul

Le domaine de calcul est centré sur la pointe du Bout, il inclut la partie terrestre objet de cette étude ainsi que les zones maritimes englobant la pointe sur quelques dizaines à centaines de mètres.

4.3.2. Maillage

Le maillage a été raffiné à terre afin de représenter fidèlement la topographie des lieux. Les éléments sur la partie terrestre mesurent moins de 5m de côté, les points hauts ou « cuvettes » topographiques essentiels à la bonne simulation de l'écoulement ne sont ainsi pas trop lissés lors de l'interpolation du MNT du modèle.

4.3.3. Topographie

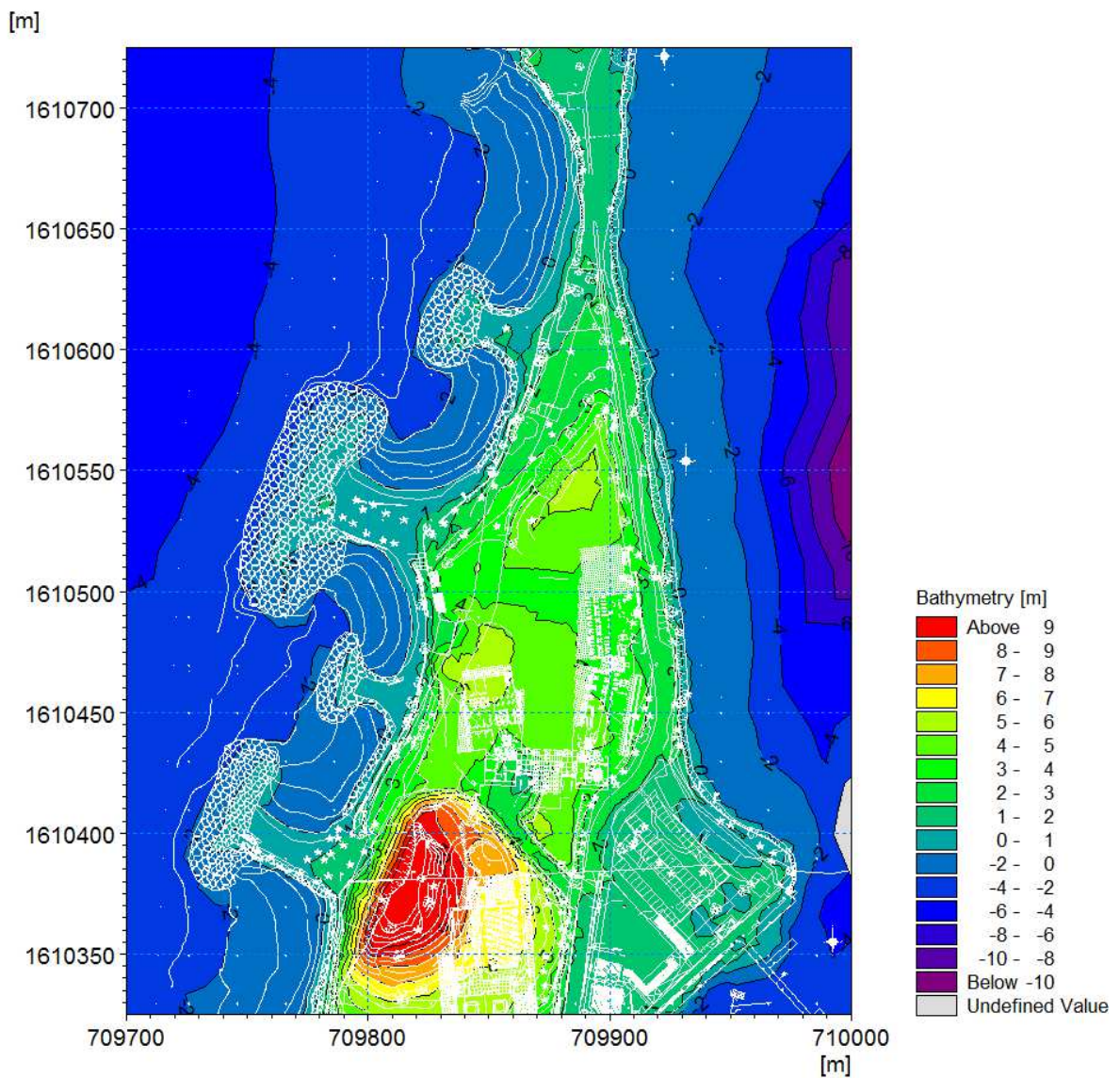
Une bonne représentation de la topographie est essentielle pour la précision des calculs de submersion terrestre. Le modèle numérique de terrain a été réalisé à partir de :

- ▶ Levés bathymétriques fournis par le Maître d'ouvrage ;
- ▶ Litto3D IGN (levé Lidar).

De plus, certains obstacles à l'écoulement tels que les murs ont été pris en compte implicitement dans le modèle.

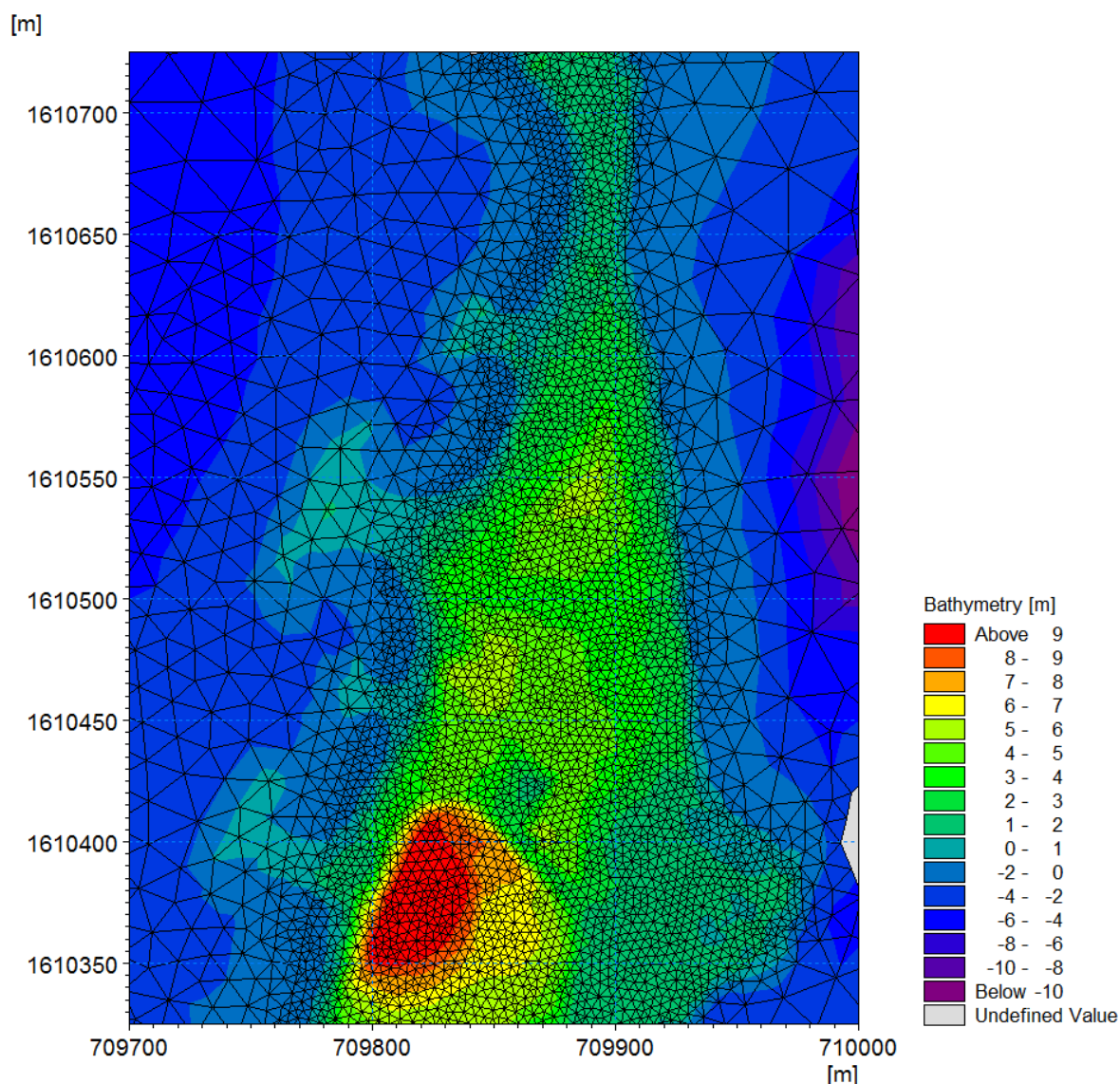
L'emprise du modèle, le maillage associé et la topographie sont présentés sur les figures suivantes.

Figure 8 : Topographie du modèle terrestre



Source : CREOCEAN

Figure 9 : Maillage du modèle terrestre



Source : CREOCEAN

4.4. Estimation des franchissements à la côte

4.4.1. Généralités

A l'approche d'un ouvrage (digue à talus en enrochements par exemple), les vagues vont venir se briser dessus 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 constaté. La hauteur maximale atteinte par les vagues est appelée run-up. Cette hauteur est définie verticalement par rapport au niveau moyen de l'eau (donc sans tenir compte de l'agitation).

Cette valeur est un paramètre essentiel à intégrer dans le dimensionnement des ouvrages de protection contre les submersions. En effet, si le niveau du run-up est supérieur à la cote d'arase de l'ouvrage de protection et si les ouvrages en arrière ne sont pas capables de contenir ces masses d'eau, il y a franchissement hydraulique. Selon leur intensité et leur fréquence, les débits de

franchissement générés par les vagues peuvent être plus ou moins dangereux pour les zones en retrait. Il est donc nécessaire de les évaluer pour différentes conditions d'aménagement. Compte tenu de la très grande irrégularité des hauteurs de vague (pour une hauteur significative de données), le débit de franchissement (exprimé habituellement en litres par seconde et par mètre linéaire de digue : l/s/ml) est en fait un débit moyenné sur un nombre important de vagues successives

4.4.2. Méthode de calcul

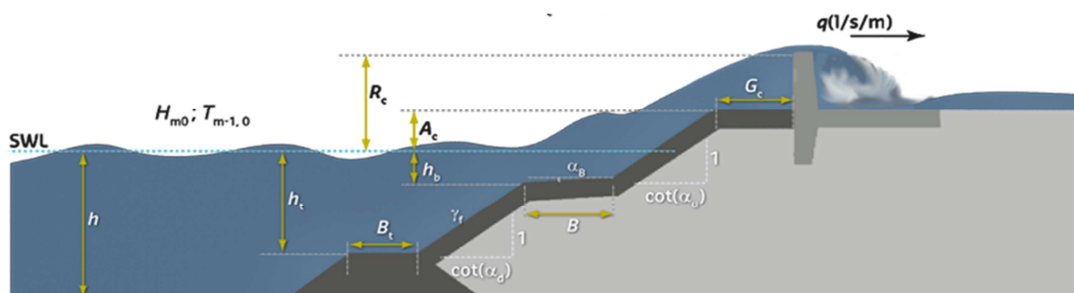
Les méthodes utilisées pour calculer les débits de franchissement sont basées sur les derniers programmes de recherche et de développement européens appelés EUROTOP (T.Pullen, Allsop HR Wallingford, 2007). Pour cette étude, nous utilisons la méthode appelée "Neural Network"¹ développée par DELTARES/DEFT HYDRAULICS, avec l'agrément de la commission européenne et le concours du Projet européen CLASH².

Des facteurs de correction et d'ajustement ont été intégrés à travers les nombreux essais réalisés sur des modèles physiques.

La méthode "Neural Network" permet ainsi de tester les franchissements sur des ouvrages côtiers relativement complexes qui intègrent :

- ▶ Intégration de la profondeur d'eau en pied d'ouvrage,
- ▶ La présence et les caractéristiques d'une berme en enrochements,
- ▶ La présence et les caractéristiques d'une butée de pied,
- ▶ Intégration de pentes variables sur le profil des ouvrages,
- ▶ Présence d'un mur de couronnement,
- ▶ Porosité selon le type de revêtements

Figure 10 : Paramètres d'ajustement utilisés par la méthode "Neural Network" pour le calcul des débits de franchissement des structures côtières



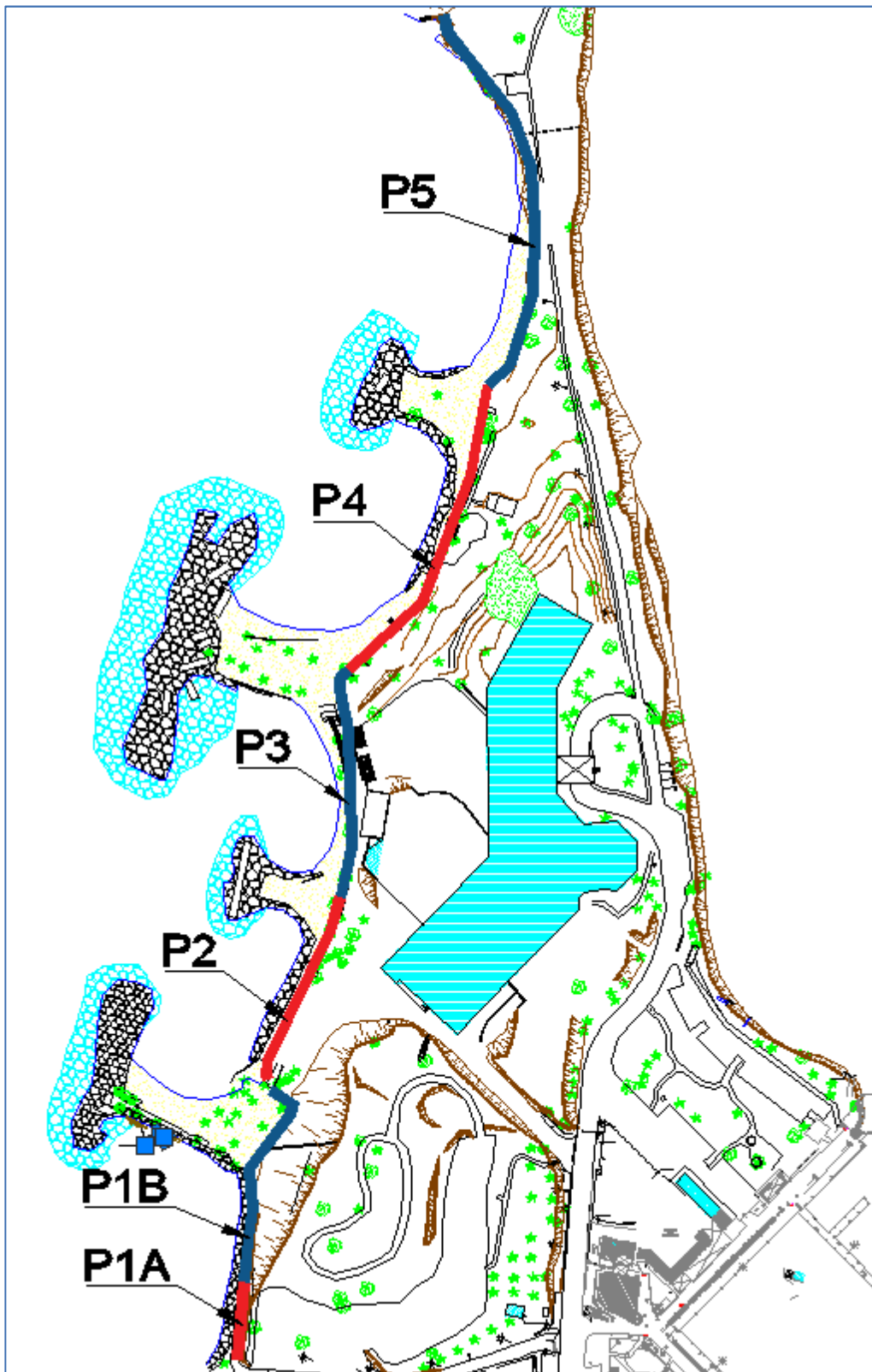
Le littoral d'étude a été découpé en six sections homogènes à la fois d'un point de vue géométrique et hydrodynamique afin de calculer pour chaque section, les débits de franchissement instantanés, et les volumes cumulés pendant 24H.

La figure en page suivante présente la localisation des six sections utilisées pour le calculs du franchissement.

¹ (Marcel R.A Van Gent, F.P Van den Boogaard, Beatriz Pozueta, Josep R. Medina - 2007)

² Le projet européen CLASH a permis de collecter des données issues de résultats d'essais réalisés sur modèles physiques, afin de créer une vaste base de données européennes sur les franchissements liés aux vagues dans de multiples configurations.

Figure 11 : Localisation des sections utilisées pour le calcul du franchissement

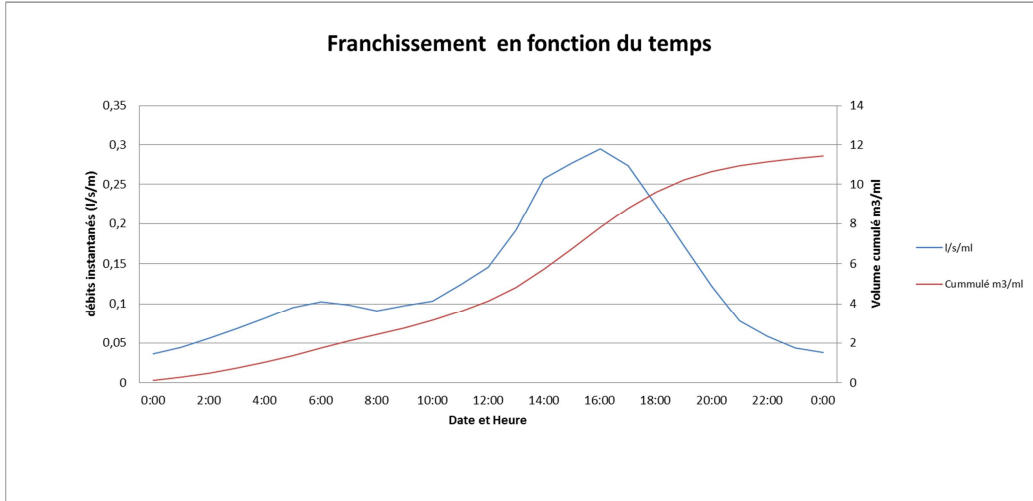
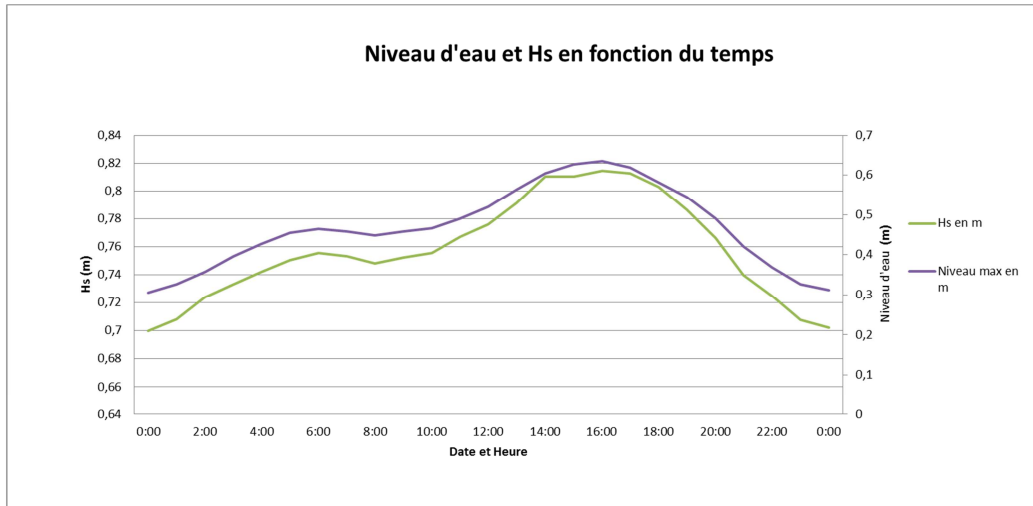


Source : CREOCEAN

4.4.3. Résultats

Le calcul des débits de franchissement a donc été estimé selon cette dernière méthode. Les **valeurs** sont calculées pendant toute la durée de la tempête et intègrent les variations de niveau d'eau et d'agitation au cours du temps. Les valeurs de débits de franchissement sont calculées à l'arrière du muret de protection. Un exemple de résultat est présenté ci-dessous :

Figure 12 : Exemple de calcul des débits de franchissement



Source : CREOCEAN

Le tableau ci-dessous synthétise les résultats obtenus pour chaque section étudiée.

Tableau 2: Synthèse des résultats du franchissement

	Longueur de la section	Débit de franchissement maximum en 24H	Volume cumulé en 24H en m ³ /m	Volume cumulé en 24h sur la section en m ³
Section 1A	24 ml	34.6 l/m/s	1 638.4	39 320.4
Section 1B	66 ml	190.3 l/m/s	10471,5	691116,6
Section 2	61 ml	0.30 l/m/s	11.5	698.3
Section 3	71 ml	0.92 l/m/s	45	3 194.5
Section 4	101 ml	0.61 l/m/s	27	2 730.2
Section 5	125 ml	67.24 l/m/s	3 105	388 129.5

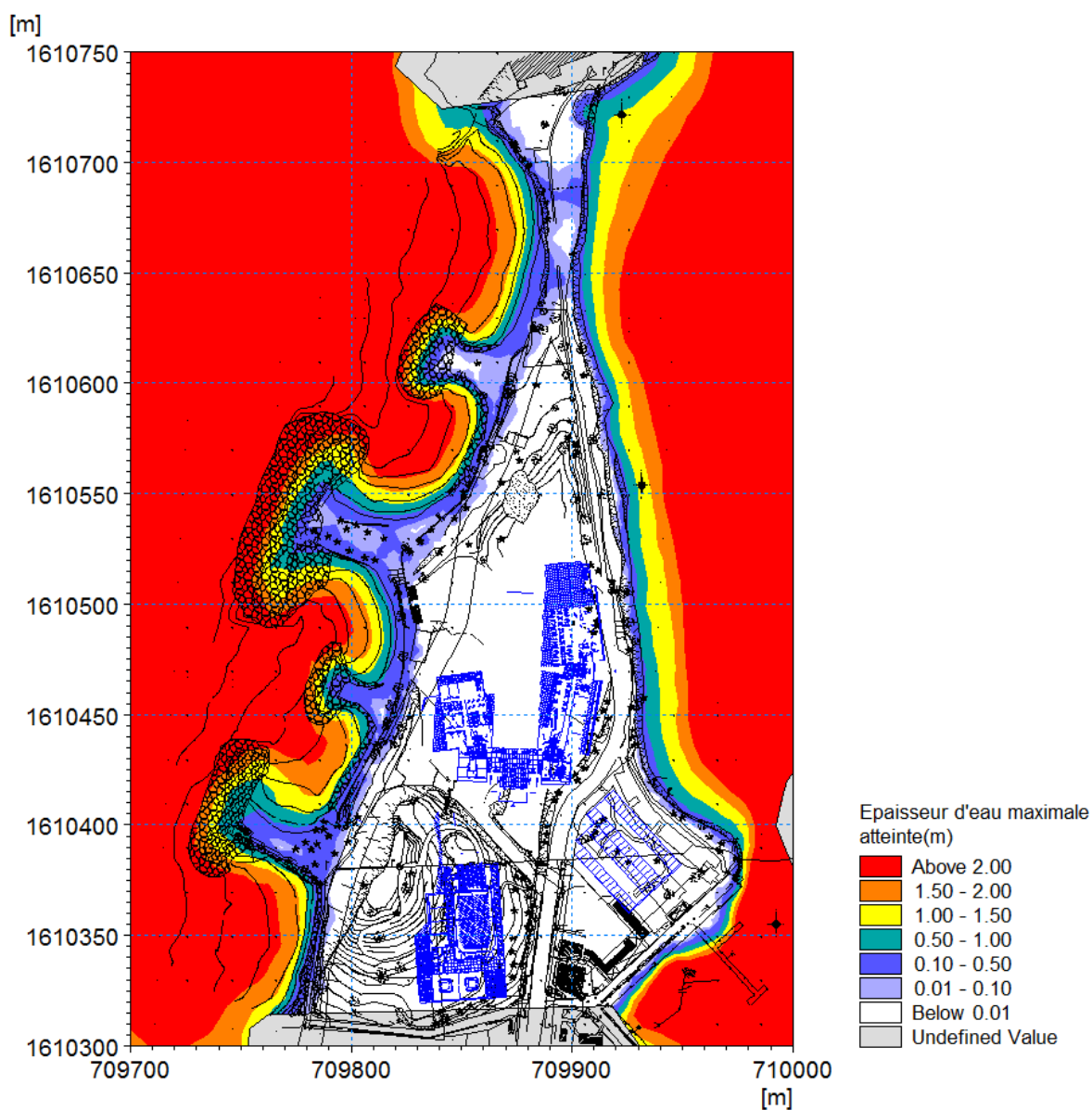
Source : CREOCEAN

Les débits ci-dessous sont ensuite intégrés sur tout le linéaire concerné et assimilés dans le temps et l'espace par le modèle de submersion terrestre afin de simuler l'écoulement des masses d'eau franchissant la protection frontale.

4.5. Résultats du modèle de submersion terrestre

La figure suivante présente les épaisseurs maximales d'eau atteintes pendant les 24h de tempête simulée. On remarque que la topographie de la pointe du Bout la protège naturellement de la submersion marine. En effet, seuls le tombolo ainsi qu'une frange côtière de quelques mètres sont submergés sous moins de 50cm d'eau, et ce malgré des volumes d'eau assez importants franchissant le rivage. La pente naturelle du terrain produit un retour à la mer des masses d'eau. Le futur hôtel et le futur centre de conférence, situés à quelques mètres de hauteur au-dessus du niveau atteint par la mer, ne sont pas impactés par les inondations.

Figure 13 : Epaisseur d'eau maximale atteinte sur la zone d'étude



Source : CREOCEAN

5. Références

Météo-France, 2005. Estimation des durées de retour des houles cycloniques à l'entrée de la Baie de Fort-de-France (Météo-France, Direction Interrégionale Antilles-Guyane).

Bocotti P., 2000. Wave mechanics for ocean engineering. Elsevier oceanography series. Elsevier Science B.V.

Holthuijsen L., 2007. Waves in Oceanic and Coastal Waters. Cambridge University Press, 387 pages.



www.creocean.fr

GROUPE KERAN