



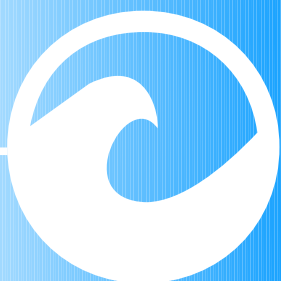
Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Le Préfet du Calvados

PPRL Bessin & Dives-Orne

Méthodologie générale et conditions hydrodynamiques

Analyse statistique des conditions hydrodynamiques



Maître d'ouvrage :

DDTM Calvados

**Alp'Géorisques
IMDC**



Références

Alp'Géorisques
D1301002

IMDC
12107

Version

4.0

Édition du 29/10/2015


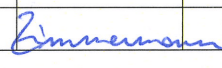

Date

31/10/2015

Identification du document

Projet	PPRL Bessin & Dives-Orne		
Titre	Méthodologie générale et conditions hydrodynamiques - Analyse statistique des conditions hydrodynamiques		
Document	RA14137_Phase2_Rapport_statistiques_v4.0.odt		
Références	Réf. Alp'Géorisques D1301002	Réf. IMDC 12107	
Proposition n°	D1301002	Référence commande	
Maître d'ouvrage	DDTM Calvados	Adresse	
Maître d'œuvre ou AMO		Adresse	

Modifications

Version	Date	Description	Auteur	Vérifié	Approuvé
1.0	17/06/2014	Rapport concept	PHI	ABO	MSA
2.0	23/09/2014	Ajout couples par section homogène	PHI	ABO / NZI	GVH
3.0	18/02/2015	Document de travail interne	PHI	ABO	GVH
4.0	31/10/2015	Rapport final - ajout commentaires DDTM	PHI	NZI	GVH
					

Diffusion

Alp'Géorisques	Jean-Pierre Rossetti	04 76 77 92 00	jeanpierre.rossetti@akpgeorisques.com
IMDC	Annelies Bolle	+32 (0)3 270 92 90	Annelies.Bolle@imdc.be
Diffusion	Papier		
	Numérique	✓	IMDC

Archivage

N° d'archivage (référence)	
Titre	PPRL Bessin & Dives-Orne – Méthodologie générale et conditions hydrodynamiques
Département	Calvados
Commune(s) concernée(s)	
Cours d'eau concerné(s)	Sans objet
Région naturelle	Basse-Normandie
Thème	Cartographie réglementaire
Mots-clefs	Submersion marine risque littoral PPRL

Résumé

Ce rapport s'inscrit dans le cadre de la Phase 2 de la procédure PPRL des secteurs Bessin et Dives-Orne en Basse-Normandie. Il concerne l'analyse statistique menant au choix de l'événement de référence du PPRL.

Il décrit la méthodologie appliquée dans la phase 2 pour la cartographie des aléas littoraux (Chapitre 1 Error: Reference source not found), l'analyse statistique des conditions hydrodynamiques (Chapitre 2) et la sélection de l'événement de référence extrême (Chapitre 3).

Table des matières

1.INTRODUCTION.....	1
1.1.Contexte de l'étude.....	1
1.2.Objet de l'étude.....	1
1.3.Démarche de l'étude.....	1
1.4.Avant-propos et objet du rapport.....	3
2.MÉTHODOLOGIE POUR LA CARTOGRAPHIE DES ALÉAS LITTORAUX.....	4
2.1.Définition des événements naturels à étudier.....	4
2.1.1Approche générale.....	4
2.1.2Méthode de détermination de l'événement de référence.....	7
2.2.L'aléa de submersion marine.....	9
2.2.1Approche générale.....	9
2.2.2Inventaire et collecte des données.....	9
2.2.3Analyse des données et identification des zones faibles.....	9
2.2.4Quantification des phénomènes marins côté mer.....	10
2.2.5Propagation et transformation de ces phénomènes côté terre.....	11
2.2.6Détermination de l'aléa de submersion.....	21
2.2.7Cartographie de l'aléa de submersion.....	22
2.3.aléa érosion.....	24
2.3.1Approche générale.....	24
2.3.2Taux d'avancement moyen annuel.....	25
2.3.3Les reculs ponctuels.....	27
2.3.4Combinaison des deux phénomènes.....	28
2.3.5Aléa de migration dunaire.....	28
2.3.6Cartographie de l'aléa d'érosion.....	28
3.ANALYSE STATISTIQUE DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES.....	29
3.1.Introduction.....	30
3.2.Données.....	31
3.2.1Localisation des points étudiés.....	31
3.2.2Houles.....	32
3.2.3Surcote de pleine mer (PM).....	34
3.3.Analyse des variables aléatoires marginales.....	34
3.3.1La houle H_{m0}	36
3.3.2La surcote de pleine mer.....	43
3.3.3Validation des résultats.....	47
3.3.4Le niveau d'eau : méthode de convolution.....	51
3.4.Copule.....	52
3.4.1Introduction.....	52
3.4.2Concomitance de surcotes au Havre avec des houles d'Ouest.....	53
3.4.3Concomitance de surcotes avec des houles du secteur N-NE.....	64
3.4.4Comparaison des niveaux d'eau obtenus de l'analyse bivariable et des niveaux de référence de la portée à connaissance de la DREAL.....	71
3.5.Niveaux d'eau par section homogène.....	72
4.SÉLECTION DE L'ÉVÉNEMENT DE RÉFÉRENCE.....	75

<u>4.1.Comparaison des résultats de l'analyse statistique aux tempêtes historiques.</u>	<u>75</u>
<u>4.1.1Conditions d'Ouest</u>	<u>75</u>
<u>4.1.2Conditions de N-NE</u>	<u>77</u>
<u>4.2.Choix de l'événement de référence</u>	<u>78</u>
<u>4.2.1PPRL</u>	<u>78</u>
<u>4.2.2TRI</u>	<u>79</u>
<u>5.RÉFÉRENCES</u>	<u>80</u>
<u>6.ANNEXES</u>	<u>82</u>

Table des tableaux

Tableau 2.1: Périodes couvertes par les données disponibles du niveau d'eau et de la houle.....	6
Tableau 2.2: Évaluation de la dynamique de submersion en classes « lente », « modérée » et « rapide »...	22
Tableau 2.3: Méthode de définition des aléas submersion marine.....	22
Tableau 3.1: Période de retour de la houle Hm0 (COAST 2525) – Secteur Ouest.....	39
Tableau 3.2: Période de retour de la houle Hm0 (COAST 2525) – Secteur Nord – Nord-Est.....	41
Tableau 3.3: Période de retour de la houle Hm0 (COAST 2525) – Omnidirectionnel.....	43
Tableau 3.4: Période de retour de la surcote (Le Havre) – Omnidirectionnel.....	45
Tableau 3.5: Période de retour de la surcote (Cherbourg) – Omnidirectionnel.....	47
Tableau 3.6: Période de retour de la houle Hm0(COAST 2525) – Omnidirectionnelle.....	47
Tableau 3.7: Période de retour de la houle Hm0(COAST 2865) Loi GPD – Omnidirectionnel (CETMEF / EDF R&D-LNHE 2010/2011).....	48
Tableau 3.8: Période de retour de la houle Hm0(COAST 2865) Loi exponentielle – Omnidirectionnel (CETMEF / EDF R&D-LNHE 2010/2011).....	49
Tableau 3.9: Période de retour de la surcote (Le Havre) – Omnidirectionnel.....	50
Tableau 3.10: Résultat de l'analyse de la surcote au Havre (SHOM/CETMEF, 2012).....	50
Tableau 3.11: Période de retour de la surcote (Cherbourg) – Omnidirectionnel.....	50
Tableau 3.12: Résultat de l'analyse de la surcote à Cherbourg (SHOM/CETMEF, 2012).....	51
Tableau 3.13: Test de corrélation (Houles Coast-2525 ; Surcote Cherbourg).....	54
Tableau 3.14: Sélection des couples Hm0 et niveau d'eau pour la période de retour T100 pour le secteur Ouest.....	59
Tableau 3.15: Sélection des couples Hm0 et niveau d'eau pour la période de retour T100 – Intervalle 95 % pour le secteur Ouest.....	59
Tableau 3.16: Sélection des couples Hm0 et Niveau d'eau pour la période de retour T10 pour le secteur Ouest.....	59
Tableau 3.17: Sélection des couples Hm0 et Niveau d'eau pour la période de retour T10 – Intervalle 95 % pour le secteur Ouest.....	60
Tableau 3.18: Sélection des couples Hm0 et Niveau d'eau pour la période de retour T1000 pour le secteur Ouest.....	60
Tableau 3.19: Sélection des couples Hm0 et Niveau d'eau pour la période de retour T1000 – Intervalle 95 % pour le secteur Ouest.....	61
Tableau 3.20: Couples T100 par secteur du PPRL Calvados (borne supérieure de l'intervalle de confiance de 95 %) pour le secteur ouest.....	63
Tableau 3.21: Couples T10 par secteur du PPRL Calvados (borne supérieure de l'intervalle de confiance de 95 %) pour le secteur ouest.....	63
Tableau 3.22: Couples T1000 par secteur du PPRL Calvados (borne supérieure de l'intervalle de confiance de 95 %) pour le secteur ouest.....	64
Tableau 3.23: Couples T100 par secteur du PPRL Calvados (valeurs moyennes) pour les conditions N-NE	68
Tableau 3.24: Couples T100 par secteur du PPRL Calvados (borne supérieure de l'intervalle de 95 %) pour les conditions N-NE.....	69
Tableau 3.25: Couples T10 par secteur du PPRL Calvados (valeurs moyennes) pour les conditions N-NE.	69
Tableau 3.26: Couples T10 par secteur du PPRL Calvados (borne supérieure de l'intervalle de 95 %) pour	

les conditions N-NE.....	70
Tableau 3.27: Couples T1000 par secteur du PPRL Calvados (valeurs moyennes) pour les conditions N-NE.....	70
Tableau 3.28: Couples T1000 par secteur du PPRL Calvados (borne supérieure de l'intervalle de 95 %) pour les conditions N-NE.....	71
Tableau 3.29: Comparaison du niveau de référence de la portée à connaissance aux niveaux maximaux des couples T100 (valeurs en m IGN69).....	72
Tableau 3.30: Niveaux d'eau par scénario et par section homogène, secteur Dives-Orne (valeurs maximales et minimales en m IGN69). Élévation du niveau marin et set-up de la houle exclus.....	73
Tableau 3.31: Niveaux d'eau par scénario et par section homogène, secteur Bessin (valeurs maximales et minimales en m IGN69), Élévation du niveau marin et set-up de la houle exclus.....	73

Table des Figures

Figure 2.1: Les principaux mécanismes à l'origine de l'élévation du niveau marin dans le cas d'une tempête (source : Pedreros et al., 2010).....	5
Figure 2.2: Schéma pour la qualification de la submersion marine.....	9
Figure 2.3: Exemple de l'évolution du niveau de la crête de la dune et le niveau marin au cours de la tempête (Les Moutiers-en-Retz).....	17
Figure 3.1: Hm0 – Distribution des valeurs extrêmes (COAST 2525) – Secteur Ouest.....	38
Figure 3.2: Hm0 – Distribution des valeurs extrêmes (COAST 2525) – Secteur Nord – Nord-Est.....	40
Figure 3.3: Hm0 – Distribution des valeurs extrêmes (COAST 2525) – Omnidirectionnel.....	42
Figure 3.4: Surcote – Distribution des valeurs extrêmes (Le Havre) – Omnidirectionnel.....	44
Figure 3.5: Surcote – Distribution des valeurs extrêmes (Cherbourg) – Omnidirectionnel.....	46
Figure 3.6: Distribution GPD des houles omnidirectionnelles au point COAST 2865.....	48
Figure 3.7: Distribution exponentielle des valeurs extrêmes de houles omnidirectionnelles au point COAST 2865.....	49
Figure 3.8: Couples Hm0 (en haut) – Surcote (en bas) avec la série temporelle.....	54
Figure 3.9: Espace multivarié divisé en trois domaines extrêmes.....	55
Figure 3.10: à gauche : les valeurs de u, v des couples Hm0 – surcote (en rouge) avec les échantillons stratifiés de la copule Gumbel. À droite : la copule de Gumbel en fonction de u et v.....	55
Figure 3.11: à gauche : les valeurs de X, Y des couples Hm0 – surcote (en rouge) avec les échantillons stratifiés de la copule Gumbel. À droite : copule de Gumbel pour les valeurs extrêmes de la houle et de la surcote.....	56
Figure 3.12: Courbe d'iso-probabilité de T100 ans pour le secteur Ouest (hauteur de houle [m] – niveau d'eau [m CM]).....	57
Figure 3.13: Courbe d'iso-probabilité de T1000 ans pour le secteur Ouest (hauteur de houle [m] – niveau d'eau [m CM]).....	58
Figure 3.14: Courbe d'iso-probabilité de T10 ans pour le secteur Ouest (hauteur de houle [m] – niveau d'eau [m CM]).....	58
Figure 3.15: Histogramme des surcotes (> 0 m) et décotes (< 0 m) au Havre, correspondant aux valeurs POT de houle du secteur Nord-Nord-Est.....	65
Figure 3.16: Courbe d'iso-probabilité et borne supérieure de l'intervalle de confiance (95 %, pointillé) de houle de N-NE et niveau d'eau astronomique au Havre, période de retour 100 ans (hauteur de houle [m] – niveau d'eau [m CM]).....	66
Figure 3.17: Courbe d'iso-probabilité et borne supérieure de l'intervalle de confiance (95 %, pointillé) de houle de N-NE et niveau d'eau astronomique au Havre, période de retour 10 ans (hauteur de houle [m] – niveau d'eau [m CM]).....	67
Figure 3.18: Courbe d'iso-probabilité et borne supérieure de l'intervalle de confiance (95 %, pointillé) de houle de N-NE et niveau d'eau astronomique au Havre, période de retour 1000 ans (hauteur de houle [m] – niveau d'eau [m CM]).....	68
Figure 3.19: Niveaux de référence +20cm d'élévation par section homogène, secteur Dives-Orne (conditions d'Ouest et du N-NE, valeurs supérieures et inférieures, set-up de la houle exclu).....	74
Figure 3.20: Niveaux de référence +20cm par section homogène, secteur Bessin (conditions d'Ouest et du N-NE, valeurs supérieures et inférieures, set-up de la houle exclu).....	74
Figure 4.1: Comparaison des couples valeurs POT (Hm0 – Z0) historiques à la courbe d'isoprobabilité T100 – secteur ouest.....	76

Figure 4.2: Comparaison des couples valeurs POT (Hm0 – Z0) historiques à la courbe d'iso-probabilité T10 – secteur ouest.....	77
Figure 4.3: Comparaison des couples valeurs POT (Hm0 – PM) historiques à la courbe d'isoprobabilité T100 – secteur N-NE.....	78

PPRL Bessin & Dives-Orne

Méthodologie générale et conditions hydrodynamiques

1. introduction

1.1. Contexte de l'étude

La Direction Départementale des Territoires de la Manche a en charge l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux (PPRL) sur le département. Elle a confié la réalisation des études techniques à Alp'Géorisques et IMDC.

Le PPRL est un cas particulier du Plan de Prévention des Risques Naturels prévisibles (PPRN) mis en place à la suite de la tempête meurtrière et très dévastatrice Xynthia qui a fortement impacté le littoral français entre le 26 février et le 1^{er} mars 2010 (59 morts et près de deux milliards d'euros de dommages).

1.2. Objet de l'étude

L'étude doit aboutir à une caractérisation précise des aléas littoraux et d'inondations terrestres consécutives aux submersions marines sur le territoire de ces communes ainsi qu'à l'établissement de cartographies en vue de l'élaboration de PPRL couvrant la zone étudiée.

1.3. Démarche de l'étude

La mission comporte **six phases** :

Phase 1 : Analyse du fonctionnement du littoral sur l'ensemble du littoral de la zone d'étude.

L'analyse du site permet de connaître :

- les phénomènes naturels entant en jeu sur le périmètre d'étude ;
- l'historique des événements majeurs et de leurs conséquences ;
- la description du trait de côte (recensement des ouvrages de défense notamment).

Une carte informative des phénomènes naturels sera ainsi élaborée. Cette analyse sera réalisée sur l'ensemble du littoral de la zone d'étude. La compréhension du fonctionnement des secteurs géographiques permettra de choisir les hypothèses et la méthode de caractérisation des aléas les plus adaptées.

Phase 2 : Caractérisation et cartographie des aléas littoraux par secteur

Cette phase 2 consiste à :

- définir l'événement de référence ;
- caractériser l'aléa de submersion marine ;
- caractériser l'aléa d'évolution du trait de côte et d'avancées dunaires ;
- définir les phénomènes concomitants d'inondation au niveau des cours d'eau côtiers.

Cette phase permet ainsi d'élaborer la carte des aléas.

Phase 3 : Définition et cartographie des enjeux.

Cette phase consiste à :

- Définir les enjeux surfaciques (type d'occupation du sol, enjeux potentiels, enjeux fonctionnels, zones protégées par un ouvrage) ;
- Définir les enjeux stratégiques (enjeux opérationnels, à sensibilité particulière, et spécifiques) ;
- Relever les infrastructures de transport.

Une carte des enjeux est ainsi établie. L'analyse de cette carte permet d'apprécier la population exposée avec une précision satisfaisante.

Le croisement entre la cartes des enjeux et la carte des aléas permet de produire la carte des enjeux exposés.

Phase 4 : Cartographie de zonage réglementaire et proposition de règlement.

La cartographie de zonage réglementaire peut définir :

- Une zone inconstructible ;
- Une zone de projet possible sous maîtrise collective (le cas échéant) ;
- Une zone constructible sous conditions.

Une carte est établie afin de distinguer les zones naturelles exposées au phénomène de référence, les zones urbaines classiques et à enjeux fort en fonction du niveau d'aléa.

Le règlement précise en particulier :

- La définition des objectifs ;
- Les principes généraux ;
- Les interdictions ;
- Les prescriptions ;
- Les recommandations ;
- Les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde.

Phase 5 : Consultation – Rédaction des pièces.

Cette phase consiste à rédiger une note de présentation et réaliser le montage des dossiers :

- Le rapport de présentation ;
- La cartographie des aléas ;
- La cartographie des enjeux ;
- Le zonage réglementaire ;
- Le projet de règlement.

Phase 6 : Assistance à la maîtrise d'ouvrage avant et après l'enquête publique

1.4. Avant-propos et objet du rapport

Le chapitre 1 du rapport rappelle et résume la méthodologie générale de la cartographie des aléas pris en compte dans le PPRL des secteurs Bessin et Dives-Orne et décrit les processus à considérer.

Le PPRL étudie trois types d'aléas :

- l'aléa submersion marine ;
- l'aléa érosion ;
- l'aléa de migration dunaire.

Ces aléas sont associés à différents processus physiques, mais sont tous liés par les conditions extrêmes qui les génèrent : les tempêtes marines. De plus, ces aléas peuvent influencer les uns sur les autres. Ainsi, l'aléa de submersion marine peut augmenter du fait du recul de la côte à échéance 100 ans. Les conditions tempétueuses pour lesquelles ces aléas sont déterminés, sont définies par différents paramètres hydrodynamiques et météorologiques (niveau d'eau, conditions de houle à la mer, vent, etc.).

Les conditions tempétueuses sont définies par rapport à leur période de retour (c'est-à-dire leur probabilité de se produire pendant une quelconque année). Trois périodes de retour sont définies dans le cadre de la présente étude :

- Une période de retour de 100 ans : Elle correspond aux conditions de référence du PPRL et au phénomène « moyen » du TRI¹ (abrégé en « T100 » ci-après) ;
- période de retour 10 ans : phénomène « fréquent » du TRI (abrégé en « T10 » ci-après) ;
- période de retour de 1000 ans : « phénomène » extrême du TRI (abrégé en « T1000 » ci-après).

Pour le PPRL, le phénomène de référence (T100) est décomposé en trois scénarios :

- **scénario de référence** : niveau centennal +20 cm d'élévation du niveau d'eau ;
- scénario à échéance 100 ans : niveau centennal +60 cm d'élévation du niveau d'eau et avec prise en compte du recul de côte après 100 ans ;
- scénario de ruine généralisée : niveau centennal.

L'objet principal de ce rapport, est la définition statistique de ces conditions T10, T100 et T1000, pour la détermination des aléas du PPRL et du TRI. Cette analyse statistique est effectuée au chapitre 3..

¹ TRI : Territoires à risque important d'inondation. Ces territoires doivent être identifiés dans le cadre de l'application de la directive européenne 2007/60/CE relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation (dite « Directive inondation »). Les études réalisées pour l'élaboration du PPRL seront exploitées pour l'évaluation préliminaire des risques d'inondation (EPRI), qui constitue la première phase de la mise en œuvre de la Directive inondation.

Au chapitre 4., les conditions T100 sont comparées aux phénomènes historiques connus (à partir des données collectées lors de la phase n°1 de l'étude). La méthodologie d'élaboration des PPRL prévoit en effet que les phénomènes historiques doivent être considérés et retenus comme phénomène de référence s'ils sont supérieurs aux conditions centennales (T100).

Il est important de noter que la détermination du phénomène de référence ne peut pas être définitive à ce stade de l'étude : les conditions du T100 sont définies au large, et doivent encore être traduites en conditions près de la côte (modélisation de houle, set-up de la houle). Une condition critique au large, peut se transformer en condition moins critique près de la côte. Pour cette raison, l'ensemble des conditions T100 et historiques seront étudiées dans le modèle de houle, et le couple le plus pénalisant est retenu (pour chaque aléa et pour chaque secteur étudié).

Ainsi, « la condition T100 » (centennale) est en réalité constituée de l'ensemble des couples (H_{m0} , Z_0) ayant une probabilité 1/100 d'apparaître chaque année (et de manière analogue pour les conditions T10 et T1000, avec des probabilités respectives de 1/10 et 1/1000). En effet, une condition de niveau marin extrême, conjuguée à une houle plutôt moyenne, peut avoir la même probabilité de se produire qu'une autre condition, caractérisée par une houle extrême, avec un plus faible niveau marin. Ces deux phénomènes sont statistiquement égaux, et doivent tous deux être considérés pour la définition des aléas. Par conséquent, il n'y a pas une, mais **plusieurs conditions de référence**.

Pour chaque scénario, pour chaque aléa et pour chaque zone géographique étudiée, le couple le plus pénalisant doit être retenu. Dans une phase ultérieure du PPRL, les conditions (H_{m0} , Z_0) seront traduites du large vers la côte (à l'aide de plusieurs modélisations et méthodes décrites dans rapport de modélisation, IMDC 2014).

L'ensemble des couples sera ainsi étudié près de la côte, et leurs impacts sur la côte (submersion, action des houles sur les digues, érosion des plages et dunes) seront comparés afin de retenir le plus pénalisant. Pour cette raison, il est impossible de définir à ce stade « le scénario de référence ».

Au chapitre 3 du présent rapport, les conditions T10, T100 et T1000 sont résumées et comparées aux conditions historiques.

2. Méthodologie pour la cartographie des aléas littoraux

2.1. Définition des événements naturels à étudier

L'événement de référence dans le cadre des PPRL est défini comme « un événement centennal ou un événement historique si celui-ci est supérieur ». (voir § 1.4. page 3 et § 4 page 74).

2.1.1 Approche générale

Les événements extrêmes seront caractérisés par au moins deux paramètres : le niveau marin à la côte et la hauteur significative de la houle. La définition des événements extrêmes consistera donc à identifier plusieurs couples de niveau d'eau (Z_0) et de hauteur de houle (H_{m0}) ayant une période de retour de 100 ans. Selon les situations, l'un ou l'autre de ces couples sera le plus défavorable vis-à-vis des débits générant les inondations.

Les principaux mécanismes à l'origine de l'élévation du niveau marin dans le cas d'une tempête sont présentés en Figure 2.1. Le niveau marin total (à la côte) est produit par :

- la marée ;
- la surcote atmosphérique ;
- le set-up créé par la houle (Z_s).

Localement sur la plage, la houle cause aussi du run-up. Une marge de sécurité peut être ajoutée afin de prendre en compte la précision des mesures, les incertitudes des extrapolations statistiques et des interpolations des niveaux d'eau, etc.

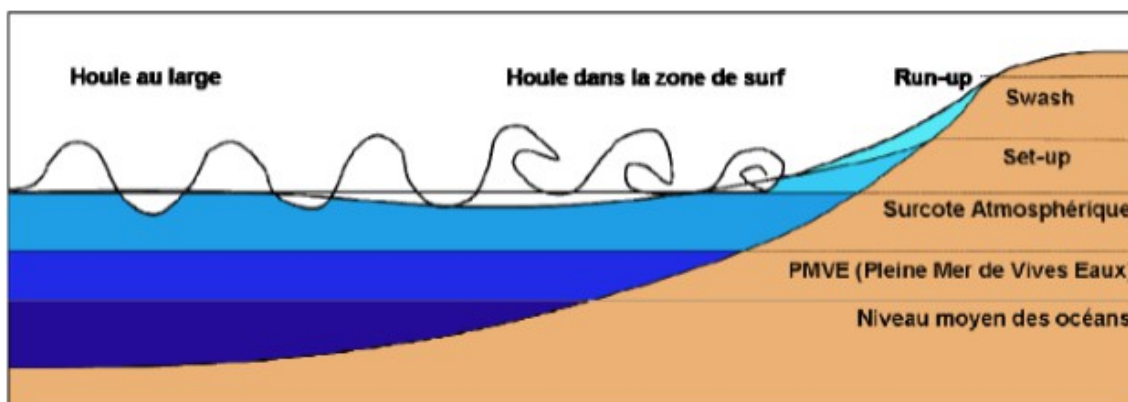


Figure 2.1: Les principaux mécanismes à l'origine de l'élévation du niveau marin dans le cas d'une tempête (source : Pedreros et al., 2010).

L'analyse statistique est faite sur les séries temporelles de la houle (H_{m0}) du point ANEMOC COAST 2525 et des mesures de niveaux d'eau au Havre. Les valeurs extrêmes sont étudiées selon les instructions du guide méthodologique PPRL (DGPR, 2013 ; version finale). Les niveaux extrêmes seront donc déterminés à partir des surcotes de pleine mer, comme définies par le CETMEF : la différence entre le niveau d'eau maximum observé au voisinage de la pleine mer et le niveau de pleine mer prédit. La probabilité de la concomitance surcote – houle est déterminée en appliquant la copule de Gumbel (§ 3.4.2.1). Les différentes surcotes (après discrétisation en strates ou « stratification ») étudiées sont couplées aux pleines mers astronomiques, avec prise en compte des probabilités des deux phénomènes (§ 3.4.2.2).

La marée astronomique ainsi que les surcotes varient le long de la côte. Deux bases de données de mesures marégraphiques le long de la côte sont disponibles : celles de Cherbourg et du Havre. L'analyse statistique a été faite sur ces deux bases de données et les résultats comparés avec la littérature disponible. Les valeurs se révélant très proches, il a finalement été décidé de travailler avec les niveaux d'eau du Havre.

2.1.1.1 Données disponibles

Les données disponibles consistent principalement en :

- Des mesures de séries temporelles du niveau d'eau ;
- Des séries temporelles de modèles (base de données ANEMOC pour la houle – ANEMOC, 2013) ;
- Des séries temporelles réelles de houle (OCEANOR) ;
- Des séries temporelles réelles de vent (OCEANOR) ;
- Des valeurs résultant des analyses ou études antérieures (p.e. SHOM, 2012).

Le tableau ci-dessous montre les données des niveaux d'eau et de hauteur de houle disponibles dans la zone d'étude.

Tableau 2.1: Périodes couvertes par les données disponibles du niveau d'eau et de la houle.

Base de données	Période couverte
Marée – Cherbourg	01/1995 – 03/2013
Marée – Le Havre	12/1994 – 03/2013
Houle – ANEMOC Coast 2525	01/1979 – 08/2002
Houle – OCEANOR	07/1998 – 05/2011
Vent – OCEANOR	07/1998 – 05/2011

Pour l'analyse statistique des hauteurs de houle (§ 3.3.1), le point ANEMOC COAST 2525 (voir figure 2.1) est pris comme donnée de base, car il se situe en eaux suffisamment profondes pour appliquer les théories statistiques et pour étudier la propagation de la houle. La série de mesures OCEANOR au point de coordonnées 50°N et 01°O a été utilisée pour compléter les données du point COAST 2525, à partir d'une relation établie entre ces deux points.

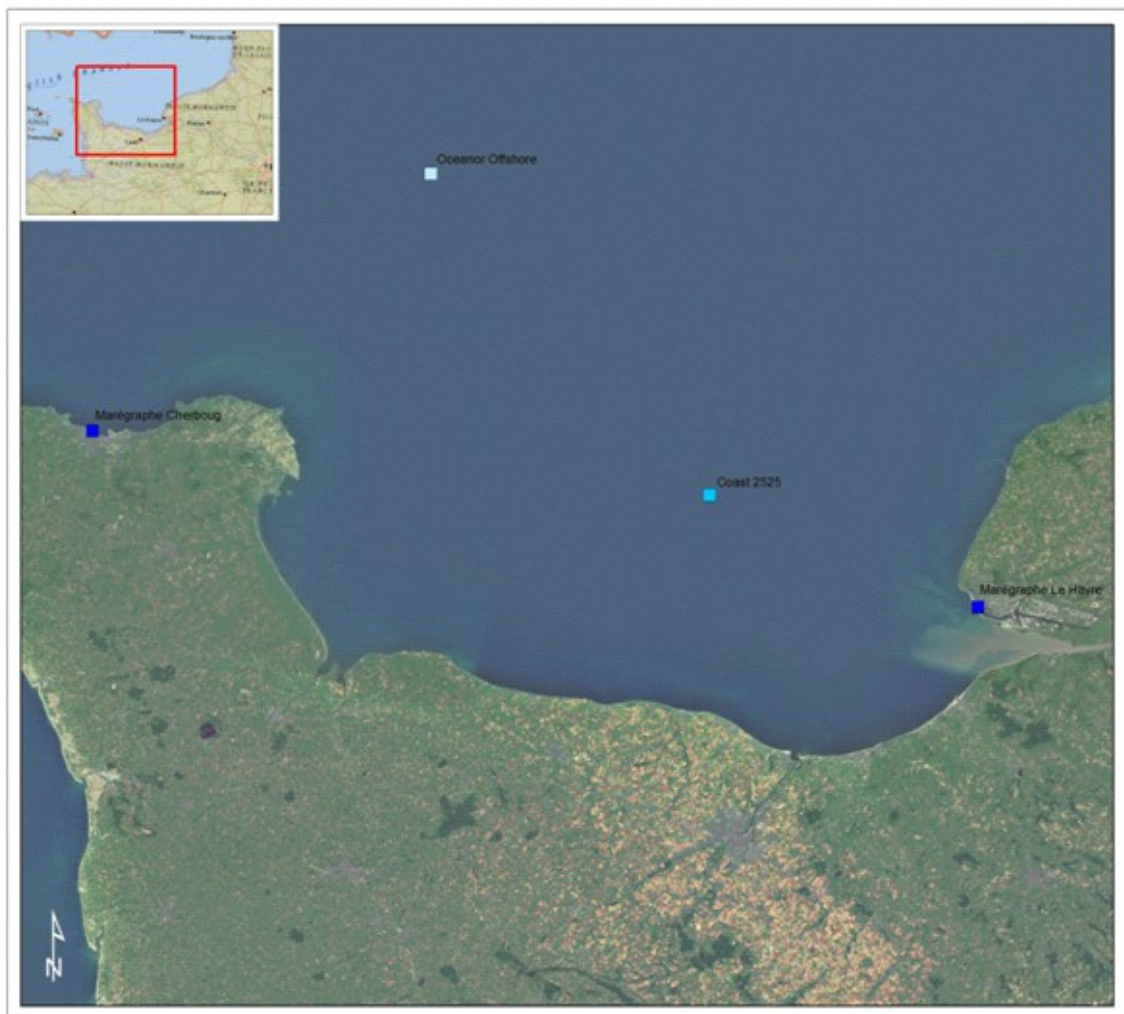


Figure 2.1: Positions des séries temporelles utilisées pour l'analyse statistique.

Les mesures marégraphiques du port du Havre, couvrant une période représentative de 18 ans de mesures, sont utilisées pour l'analyse statistique des surcotes de pleine mer.

2.1.1.2 Détermination des couples niveau d'eau (Z_0) – houle (H_{m0})

Pour étudier la concomitance de houles extrêmes et de niveaux d'eau extrêmes, la probabilité jointe des couples H_{m0} - Z_0 est étudiée. Cette distribution bivariable entre H_{m0} et Z_0 est établie à partir de la convolution des surcotes de pleine mer avec les pleines mers astronomiques d'une part (voir §3.3.4), et d'une copule entre les H_{m0} et les surcotes de pleine mer, qui est ensuite combinée avec toutes les pleines mers, d'autre part (voir § 3.4.).

Deux méthodes statistiques peuvent être mise en œuvre : la méthode de copule de Gumbel et la méthode de convolution.

La méthode de Gumbel.

La méthode de copule de Gumbel est utilisée pour déterminer le couplage H_{m0} – surcote de pleine mer. Le domaine bidimensionnel de H_{m0} – surcote est stratifié en 100 x 100 strates, dont la probabilité de la copule est connue (§ 3.4.2.2). La distribution empirique des niveaux astronomiques est également stratifiée en 100 strates. Chacune des 10 000 strates de la copule est alors combinée avec chacune des 100 strates de marées astronomiques. On obtient ainsi un ensemble de 1 000 000 de combinaisons, dont le niveau d'eau est connu (Z_0 = niveau astronomique + surcote de pleine mer de la strate de copule) et dont la probabilité est le produit des probabilités des strates combinées.

La méthode de convolution.

Cette méthode permet d'étudier directement la probabilité de la concomitance niveau astronomique – surcote de pleine mer. La convolution a pour avantage d'éviter la discrétisation en strates, mise en œuvre dans la première méthode, qui sont ensuite combinées en « toutes combinaisons possibles ». En revanche, la validité de la méthode de convolution est limitée par un seuil de niveau d'eau sous lequel la distribution n'est plus valable (à moins d'établir une extrapolation empirique).

Dans ce document, nous avons opté pour l'application de la première méthode, et une validation par comparaison avec les résultats de la seconde méthode (sans extrapolation pour les niveaux inférieurs au seuil). Il ressort de cette analyse que les différences entre les deux méthodes sont négligeables, et que les deux méthodes fournissent des résultats très comparables (§ 3.4.2.3).

Au terme de cette analyse statistique, on obtient des couples H_{m0} – niveau d'eau de période de retour 100 ans (T100) sur la « courbe isoprobabilité » des distributions bivariées (§ 3.4.2.2).

Les autres variables comme la vitesse de vent, et la période de la houle sont déterminées au moyen d'une courbe de régression, conditionnelle à la variable principale H_{m0} . Le modèle de houle permet ensuite une estimation précise des paramètres de houle à la côte à partir des conditions au large.

2.1.2 Méthode de détermination de l'événement de référence

Ce paragraphe résume la méthodologie appliquée de manière détaillée au chapitre 4..

Les cotes et la hauteur de vagues avec une période de retour de 100 ans résultent de l'analyse statistique des séries temporelles des niveaux d'eau / surcote et de la houle.

Une comparaison est faite avec les données :

- du rapport du SHOM « Statistiques des niveaux marins extrêmes le long des côtes de France » (SHOM / CETMEF, 2012), qui donne le niveau du plan d'eau statique de la mer au moment d'une pleine mer d'occurrence centennale conjuguant un niveau marégraphique observé élevé et une surcote météorologique (basse pression atmosphérique et vent soufflant vers la côte) ;
- les conditions extrêmes de la houle de la base de données ANEMOC (CETMEF / EDF R&D-LNHE 2010/2011).

La monographie des tempêtes et les fiches tempêtes réalisées dans la phase 1 donne un résumé de tous les événements tempétueux documentés dans la région. Ceci définit, par comparaison de l'événement historique majeur aux résultats statistiques, **l'événement naturel de référence au large**.

Outre les marées et les surcotes, **l'élévation du niveau de la mer liée au réchauffement climatique** est évaluée et prise en compte dans l'événement naturel de référence et dans les scénarios de submersion, comme le recommandent les récentes circulaires (*directive TRI v15 § 3.2, circulaire 27 juillet 2011, méthodologie PPRL (DGPR, 2013) § 2.4.3.c*) :

- les scénarios retenus pour la détermination de l'aléa de référence (scénarios à court terme) intègrent une marge d'élévation du niveau de la mer de 0,20 m qui est ajoutée au niveau d'eau de référence ;
- une élévation de 0,60 m du niveau moyen de la mer en 2100 liée à l'impact du changement climatique sera prise en compte pour les scénarios à long terme (à échéance 100 ans), selon le « scénario pessimiste » de l'ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique).

Si les **incertitudes** ne peuvent pas être estimées avec assez de précision, une marge de 0,25 m par défaut est rajoutée selon la *méthodologie PPRL (DGPR, 2013) §2.4.3.c*). Dans le cas du PPRL Bessin et Dives-Orne, une analyse des incertitudes des valeurs des couples (H_{m0} , Z_0), a été réalisée (voir §3.4.2.3). Nous retiendrons les valeurs correspondant à la borne supérieure des intervalles de confiance (95 %) obtenus par cette analyse et la marge par défaut n'est donc pas retenue.

Ces conditions au large sont traduites en **conditions aux limites à proximité de la côte** pour estimer les débits de débordement et de franchissement et pour identifier les zones sensibles à la formation de brèches (voir §2.2.5).

Pour les vagues par exemple, la présence d'un estuaire peu profond cause une importante diminution de la hauteur des vagues à cause du déferlement. Les zones qui se situent derrière un tel endroit où l'eau est peu profonde sont par conséquent moins exposées aux actions directes des vagues. Le déferlement des vagues induit également une élévation locale du niveau de la mer à la côte (**le set-up** Z_s). Dans les zones où il n'y pas de déferlement, le phénomène du set-up devient moins important, en raison de la faible pénétration des houles. Enfin, la détermination des conditions de houle locales est également importante pour le calcul des débits de franchissement par paquets de mer.

La transformation des conditions hydrodynamiques du large vers la côte est typiquement faite avec un modèle numérique de houle (SWAN, test des digues / dunes en pied de digue ou dune, voir § 2.2.5).

2.2. L'aléa de submersion marine

2.2.1 Approche générale

L'approche générale pour la détermination de l'aléa de submersion marine est illustrée dans la figure ci-dessous. Chacun de ces aspects sera décrit plus en détail dans les sections suivantes.

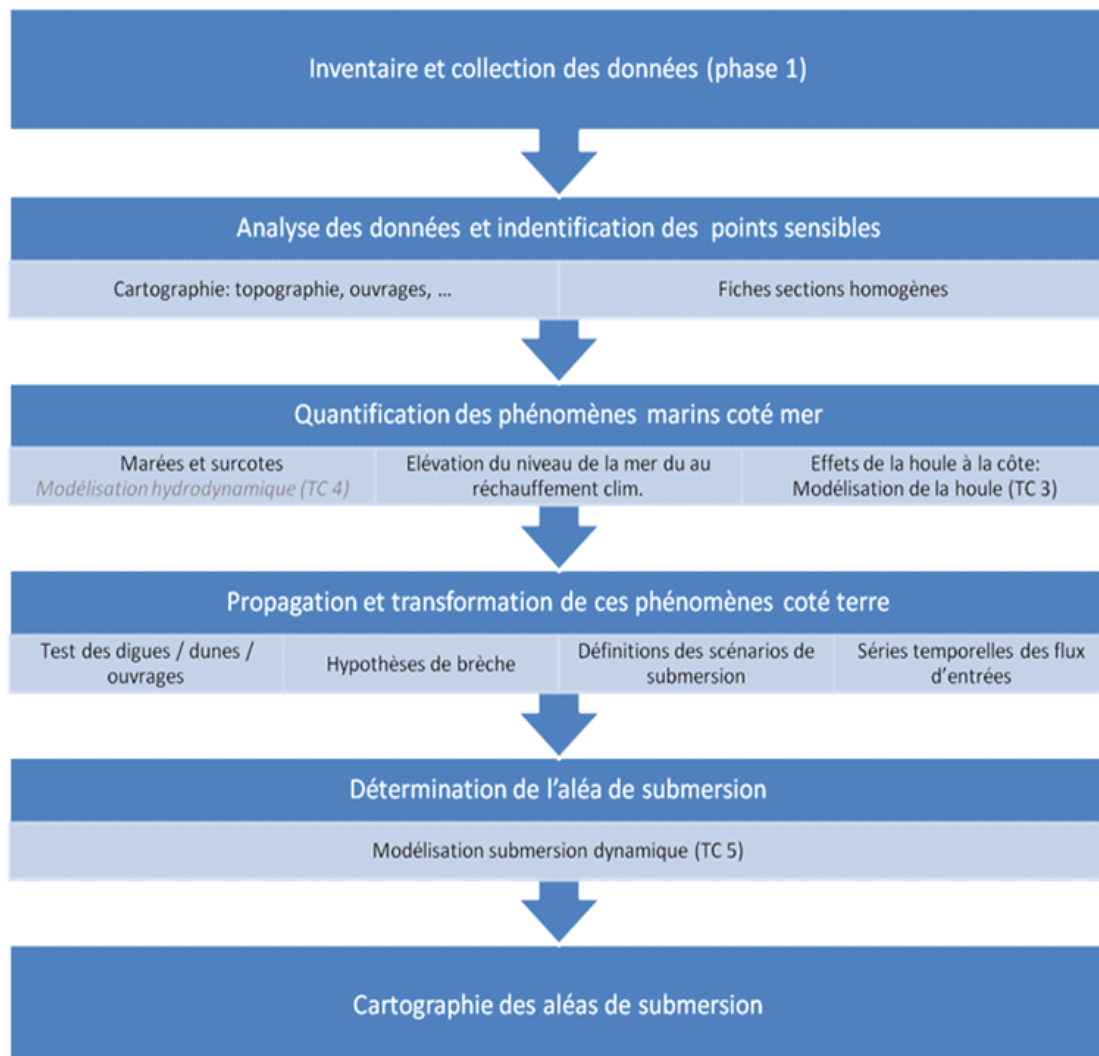


Figure 2.2: Schéma pour la qualification de la submersion marine.

2.2.2 Inventaire et collecte des données

Les résultats des recherches de la phase 1 sont décrits dans le rapport de cette phase (Alp'Géorisques & IMDC, 2014). Ces données forment le point de départ de la phase 2.

2.2.3 Analyse des données et identification des zones faibles

À partir de l'analyse de la phase 1, les zones les plus sensibles du cordon défensif de la côte sont identifiées. Il s'agit des digues à protection basse, des secteurs sans protection, des secteurs situés dans des positions moins favorables vis-à-vis des phénomènes hydro-météorologiques, et des ouvrages faibles (fréquemment endommagés ou submergés).

Pour aboutir à la carte des aléas littoraux selon la méthode proposée, il est nécessaire de découper le trait de côte en sections homogènes en fonction des caractéristiques topographiques des terrains, du type de protection et d'aspects particuliers (désordres, ouvrage hydraulique, etc.).

Ce découpage permet de :

- identifier les endroits sensibles (par rapport aux aléas étudiés) du trait de côte ;
- pouvoir étudier les différents processus hydrodynamiques par section (érosion, propagation des houles, franchissements...). Les sections homogènes sont traitées comme « unités » de la côte.

À la fin de la phase 1, un découpage en sections homogènes a été proposé.

Au moins un point « sensible » ou « fragile » est défini par section homogène, et intégré pour l'analyse de la section en seconde phase. Le(s) point(s) sensible(s) est (sont) représentatif(s) pour la section homogène (approche prudente). La défaillance du système de protection (la section homogène) est analysée au niveau de ce (de ces) point(s). Un point sensible est par exemple défini par :

- Un secteur topographiquement bas le long de la côte de cette zone, ou même une brèche importante dans le système de défense ;
- une zone de digue plus mince (plus vulnérable à la rupture) ;
- un point particulier (exemple : bâtiments proches des plages ou falaises).

Si aucune particularité n'est trouvée dans le système de protection (par exemple un perré avec un niveau de crête et dimensionnement constant sur toute sa longueur, sans faiblesses apparentes ni variation du niveau et des enjeux de l'arrière-pays), un profil caractéristique est choisi.

Chacune des sections homogènes sera ainsi classée dans l'une des catégories suivantes : cordon dunaire, estran & digue/remblai, construction hydraulique, etc. Pour chaque catégorie, la méthodologie de la caractérisation de la submersion est spécifiée en tenant compte des processus pertinents. Outre le niveau d'eau, pour les digues c'est surtout la surverse qui joue un rôle important.

Toutes ces informations sont résumées dans une fiche préétablie pour chaque section homogène. Ces fiches constituent la base de l'analyse de la transformation des conditions hydrodynamiques au large à la côte.

2.2.4 Quantification des phénomènes marins côté mer

L'évaluation de l'aléa de submersion concerne le niveau d'eau atteint pour une occurrence centennale ou l'événement le plus fort connu. Le phénomène considéré est calculé à pleine mer et inclut les surcotes hydrométéorologiques. La détermination et la sélection de l'événement de référence sont décrites au §2.1..

Pour chaque zone homogène, des conditions aux limites près de la côte seront déduites des conditions de l'événement de référence, en tenant compte de la morphologie avant-côtière et côtière. L'analyse des conditions hydrométéorologiques à proximité de la côte et leur effet sur le cordon défensif débouchera sur une hypothèse pour l'évolution des débits et de l'évolution de la géométrie dans le temps des brèches et/ou des débits. Cela doit aboutir à plusieurs séries temporelles de débits qui sont utilisés comme conditions amont pour un modèle hydrodynamique de submersion de la plaine côtière de chaque secteur.

2.2.5 Propagation et transformation de ces phénomènes côté terre

Les processus pertinents lors de la propagation et transformation de ces phénomènes côté terre sont :

- l'érosion ;
- le débordement ;
- le franchissement par paquets de mer ;
- la rupture / formation de brèche.

Pour la modélisation des submersions marines, des scénarios spécifiques sont définis pour l'événement marin de référence : par exemple un système de protection fonctionnel, des brèches dans les ouvrages ou la ruine généralisée (voir *méthodologie TRI v7 (CETMEF, 2012)*, § 3.3).

Au niveau des digues et des autres systèmes de protection côtière, les submersions marines sont dues au franchissement par des paquets de mer, au débordement ou à la rupture de ces structures. Ces différents types d'entrée d'eau sont analysés sur l'ensemble du littoral, en particulier au niveau des zones basses proches du trait de côte. En premier lieu, la possibilité d'une rupture de digue est examinée (voir § 2.2.5.3). Sur les tronçons où une brèche est physiquement possible, l'hypothèse de brèche de digue littorale de 100 m de largeur est appliquée (voir § 2.2.5.1). Il en résulte une évolution des débits vers l'arrière-pays pour le modèle de submersion.

Aux endroits où il n'y a pas de brèche, les volumes débordant la crête sont calculés (voir § 2.2.5.3). Les effets des vagues, et le niveau élevé de l'eau sont à l'origine des débits. Dans ce cas aussi, l'évolution des débits vers l'arrière-pays pour le modèle d'inondation est connue.

Les remblais faisant obstacle à l'écoulement d'eau (principalement des infrastructures de transports : autoroute, voie ferrée), sont considérés comme précisé dans le guide PPRL : ils ne seront pas pris en compte comme ouvrage de protection, mais comme élément topographique (tels qu'ils sont décrits par le MNT utilisé), prenant ainsi en compte les accumulations en amont, ainsi que les écoulements rapides potentiellement générés par des ouvertures sous les voies. Les caractéristiques des ouvertures sont déterminées à partir des données disponibles.

2.2.5.1 Les hypothèses de brèches

Les hypothèses de brèches qui seront adoptées sont cadrées par la méthodologie nationale du ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Énergie (guide méthodologique PPRL et lettres circulaires des services du MEDDTL). Elles seront listées dans le rapport méthodologique (IMDC , 2014a) et seront répétées ci-dessous pour raisons de clarté. On fait la distinction entre :

- Les digues (littorales, fluviales et des marais) ;
- Les cordons dunaires ;
- Les constructions hydrauliques (écluses, vannes, etc.).

Des hypothèses de brèches sont formulées seulement pour des « digues » qui sont définies comme un ouvrage ou une protection d'une zone en cuvette qui se trouve derrière. Les quais portuaires par exemple (avec derrière un terrain qui se trouve à la même hauteur ou plus haut que le niveau du quai) ne sont pas classés comme « digues », ainsi que les falaises.

Tout d'abord le choix entre deux modes de défaillance sera fait : ruine généralisée (effacement complet) ou défaillances ponctuelles (brèches). Ce choix sera fait sur la base de toutes les informations disponibles : informations historiques, état de l'ouvrage, sollicitations hydrauliques, test de digues, études techniques...

Dans le cas d'une défaillance ponctuelle, plusieurs hypothèses de brèches sont envisagées selon le type d'ouvrage : digue littorale ou fluviale, digue dans le marais, cordon dunaires, etc. **Les hypothèses de brèches retenues** dans cette étude sont :

1. Pour les digues littorales et fluviales, si la ruine généralisée n'est pas retenue, une hypothèse de rupture en deux temps est envisagée :

a) Une brèche par système de protection ou tronçon homogène est définie :

- le test de digues indique les endroits où des débits importants peuvent causer des dommages (ou des brèches dans le cas extrême). Ces informations seront complétées par les informations historiques et les informations des études de dangers (le cas échéant) :
- une rupture (rectangulaire) de 100 m sera simulée 1 heure avant la pleine mer à l'endroit le plus fragile identifié.

b) Des brèches supplémentaires seront introduites dans le même tronçon homogène s'il y a une surverse de plus de 0,20 m au-dessus des ouvrages, ailleurs que sur les secteurs subissant une brèche de 100 mètres. Une brèche supplémentaire (du type effacement total / ruine généralisée) sera alors simulée sur toute la largeur surversée (avec une largeur minimale de 50 mètres) à partir du moment où il y a surverse. La surverse est estimée à partir des cotes de crête des ouvrages de protection et du niveau d'eau dans le modèle de submersion.

Le critère défini par le guide méthodologique imposant « au moins une brèche de 100 m par secteur homogène » est donc accompli, car on ne simule jamais une brèche inférieure à 100 m sans qu'une autre brèche de 100 m existe dans la même zone homogène.

Nota. En cas de surverse de plus de 0,20 m, la « brèche » simulée est bien l'effacement de toute la partie de la digue dont la crête se trouve à la même hauteur. Dans une zone homogène, il est possible que la cote de la crête varie ; dans ce cas spécifique, on peut distinguer plusieurs tronçons, qui seront effacés successivement dès que la surverse est supérieure à 0,20 m afin d'éviter une approche trop sécuritaire.

c) Les débits correspondants à des surverses de moins de 0,20 m sont pris en compte dans le modèle sur la largeur surversée, sans conséquence pour l'état de la digue (débordement, mais pas de rupture).

2. Pour les digues des marais :

a) La méthodologie de choix des défaillances sera adaptée puisque les digues ne sont pas forcément des éléments de protection contre les inondations. D'une manière générale une brèche se formera dès qu'il y aura surverse d'une lame d'eau de plus de 0,20 m, sur l'ensemble de la section surversée. Une largeur minimale de 50 m est respectée, sauf si le tronçon de digue est moins long (dans ce cas une brèche de largeur égale au tronçon est prise en compte).

b) On considère uniquement des brèches dans les digues des marais du premier rang, les autres tiennent. Notons que toutes les digues de chaque rang sont incluses dans le MNT. La surverse par-dessus les digues est donc intrinsèquement incluse dans le modèle.

c) Les endroits avec des enjeux importants seront traités plus en détail, et il sera décidé cas par cas s'il est nécessaire de considérer d'une manière plus précise les défaillances des digues des marais. Des arguments pour la méthodologie retenue seront alors formulés.

Note 1 : toutes les digues de chaque rang sont inclus dans le MNT. La surverse par-dessus les digues est donc intrinsèquement incluse dans le modèle. Seules les digues des marais de premier rang, avec une surverse de plus de 0,20 m rompront dans le modèle, sur toute la largeur surversée.

Note 2 : le choix de cette méthodologie est basé sur le constat que dans les marais les digues de second rang ont généralement des niveaux de crête inférieurs à celles de premier rang. Les secondes digues situées derrière des sections surversées ou rompues de premier rang seront donc largement surversées aussi. Elles seront donc considérées comme éléments de topographie, permettant ainsi la propagation de l'inondation dans le modèle. Un recensement des digues de second rang et l'inventaire de leur niveau de crête seront inclus dans le rapport des aléas de submersion.

3. Pour les cordons dunaires :

a) La ruine généralisée du cordon sera retenue dès lors que l'événement de référence induit une surverse de plus de 0,01 m au-dessus de la crête du cordon considéré dans l'état actuel et avant calcul de l'érosion.

b) Si le résultat du test des dunes (modélisation des phénomènes d'érosion) indique qu'une brèche ou un abaissement de la crête de la dune se produit dans le cordon dunaire à cause de l'érosion dunaire pendant l'événement de référence, une série temporelle des dimensions de la brèche et des débits sera construite.

c) Dans le cas où le test de dunes indique que le cordon dunaire résiste à l'événement considéré, on ne retient pas d'hypothèse de brèche.

4. Pour les constructions hydrauliques (écluses, vannes,...)

a) Dans le cas général, les constructions hydrauliques, comme les ouvrages de protection, sont supposées incapables de résister à la tempête de référence et sont, par conséquent, modélisées comme brèches.

b) Dans le cas où il existe des documents ou études qui prouvent que la construction hydraulique reste fonctionnelle pour les conditions envisagées, on ne retient pas d'hypothèse de brèche.

2.2.5.2 Test des dunes : érosion des cordons dunaires

L'érosion ponctuelle lors des tempêtes peut être modélisée avec des logiciels comme Durosta, Duros+ et XBeach (en mode 1D). Lors de la phase 1, la zone d'étude a été découpée en sections homogènes (voir rapport phase 1). Dans chaque secteur, le profil le plus critique sera sélectionné.

Pour le calcul de l'érosion et la rupture éventuelle des dunes, nous proposons d'utiliser Duros+. Ce logiciel est utilisé en Belgique et aux Pays-Bas (TAW, 1984/1999 & RIKZ, 2007) pour le test des cordons dunaires lors des événements extrêmes. Ce modèle monodimensionnel permet l'évaluation rapide d'un grand nombre de profils et calcule le profil dunaire résiduel après la tempête.

Le test de dunes – comme le test des digues – est un moyen pour définir les hypothèses. Les structures naturelles ayant un rôle de protection sont distinguées des ouvrages de protection et une analyse spécifique dans ce cas est mise en œuvre : « le test des dunes ». Le test de dunes nous donne, pour l'événement sélectionné, comme résultat des informations sur le comportement du cordon dunaire : s'il y a de l'érosion, un abaissement de la crête de la dune qui permet des franchissements ou des débordements avec éventuellement la formation d'une brèche. Cela nous permet alors de prendre en compte les conséquences d'un événement tempétueux majeur sur la morphologie du trait de côte et la disparition éventuelle des cordons naturels. Ces calculs nous fournissent une base solide pour la définition des hypothèses, dans le cas où les cordons dunaires sont explicitement destinés à la protection contre la submersion par un gestionnaire disposant des compétences et des moyens appropriés pour assurer cette mission.

Le test des dunes est fondé sur la méthodologie néerlandaise (approuvée par le gouvernement des Pays-Bas (RIKZ, 2007) et par les administrations Flamandes). Cette méthodologie est conçue pour l'évaluation des cordons dunaires avec une fonction de protection contre les submersions. Les éléments principaux de cette méthodologie sont les conditions hydrodynamiques et les données topographiques et sédimentaires. Aux Pays-Bas aussi, il est admis qu'il y a encore des incertitudes à cause des processus qui ne sont pas pris en compte par ce modèle 1D.

C'est pourquoi on soustrait un volume supplémentaire du profil, outre le volume érodé, afin de tenir compte des effets de variations de la durée de la tempête et des incertitudes du modèle (modèle 1D, qui ne prend pas en compte les effets des pluies et du vent, autre que la houle et les effets 2D le long de la côte). Ce volume supplémentaire est défini comme 25 % du volume érodé.

Pour l'aléa à échéance 100 ans, on prendra d'abord en compte l'évolution du trait de côte sur cette période (surtout à cause du transport littoral), et on ajoutera l'effet ponctuel d'une tempête avec le test des dunes.

Un exemple d'un calcul avec Duros+ pour le test de dunes sur le secteur Bessin (dune du marais de Graye- et Ver-sur-Mer) est présenté en Figure 2.2. On constate une évolution du profil de la dune post-tempête (ligne noire) par rapport à la dune originale (pointillée noire) (pente plus douce, correspondant à la pente d'équilibre d'un sable grossier de $D_{50} = 1$ mm). Le volume érodé total est de $11,2 \text{ m}^3$ par mètre linéaire de dune (sur cette section), dont $4,2 \text{ m}^3/\text{m}$ au-dessus du niveau marin. Un volume supplémentaire est soustrait du profil érodé, pour prendre en compte les incertitudes du modèle (25 % du volume de sable érodé au-dessus du niveau marin, $1,1 \text{ m}^3/\text{m}$). Un profil limite est également défini, en exigeant que la dune résiduelle doit avoir une certaine cote de crête, pente de face littorale et largeur (RIKZ, 2007). Si ce profil peut être intégré dans les restants de la dune après la tempête de référence, alors le cordon dunaire peut être considéré comme protection côtière, selon la méthode Néerlandaise.

Ce contrôle visuel (des figures) et numériques (des paramètres calculés) aidera lors de la définition des hypothèses de brèches dans les cordons dunaires.

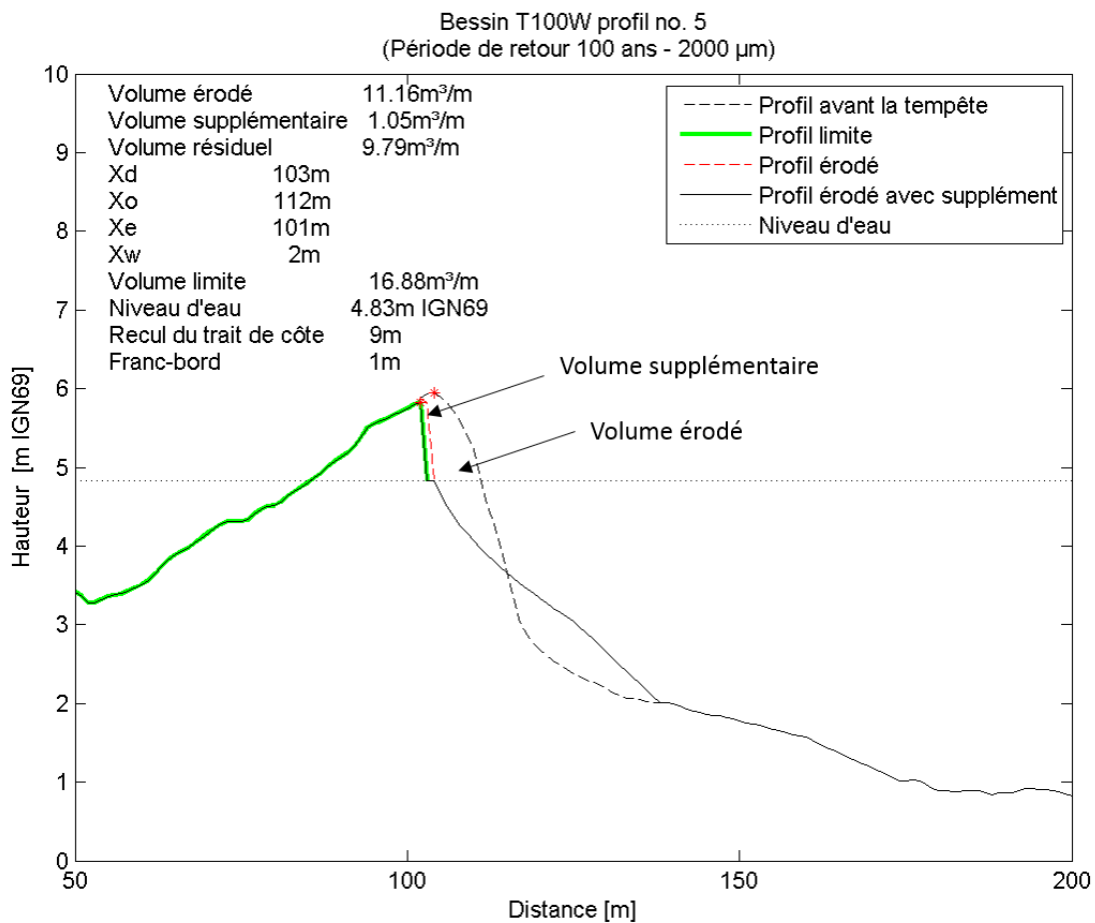


Figure 2.2: Exemple du test de dune, effectué sur un profil de la dune du marais de Graye – Ver-sur-Mer ; le profil érodé sans (rouge) et avec (noir) soustraction du « supplément » (25 % du volume érodé au-dessus du niveau de l'eau). Le « profil limite » (vert) continue sur l'arrière pays (situé sous le niveau marin), et la dune ne résiste par conséquent pas aux conditions testées.

Ce modèle ne permet pas de prendre en compte les ouvrages en pied des dunes. Si ces ouvrages sont supposés assez résistants comme ouvrage de protection, les calculs peuvent être faits avec Durosta, de la même façon que les digues (voir § 3.2 Test de digue).

L'érosion des dunes sera évaluée pour les événements naturels sélectionnés (p.ex. tempête synthétique avec période de retour $T_r = 100$ ans) pour chaque scénario. Comme pour la submersion marine, nous déterminerons un couple extrême (z_0, H) qui induit un recul important.

Les événements historiques bien documentés (conditions hydrodynamiques, bathymétrie et topographie avant et après l'événement) peuvent servir pour la validation des modèles.

De ce test des dunes, deux résultats peuvent être obtenus :

- les dunes sont érodées, mais le volume de sable résiduel reste assez grand pour garantir la protection côtière : il n'y a ni brèche dans les dunes, ni débit vers l'arrière-pays.
- une brèche se produit dans le cordon dunaire : une série temporelle des dimensions de la brèche (ou de baissement du niveau de la crête de dune) et des débits vers l'arrière-pays sera construite, qui prend en compte l'évolution temporelle de la tempête. Cette série temporelle des débits sera simulée comme entrée d'eau à partir de la mer dans le modèle hydrodynamique de submersion. Un exemple de l'évolution du profil dunaire au cours de la tempête et le niveau de la crête résultant est présenté dans les deux figures ci-dessous.

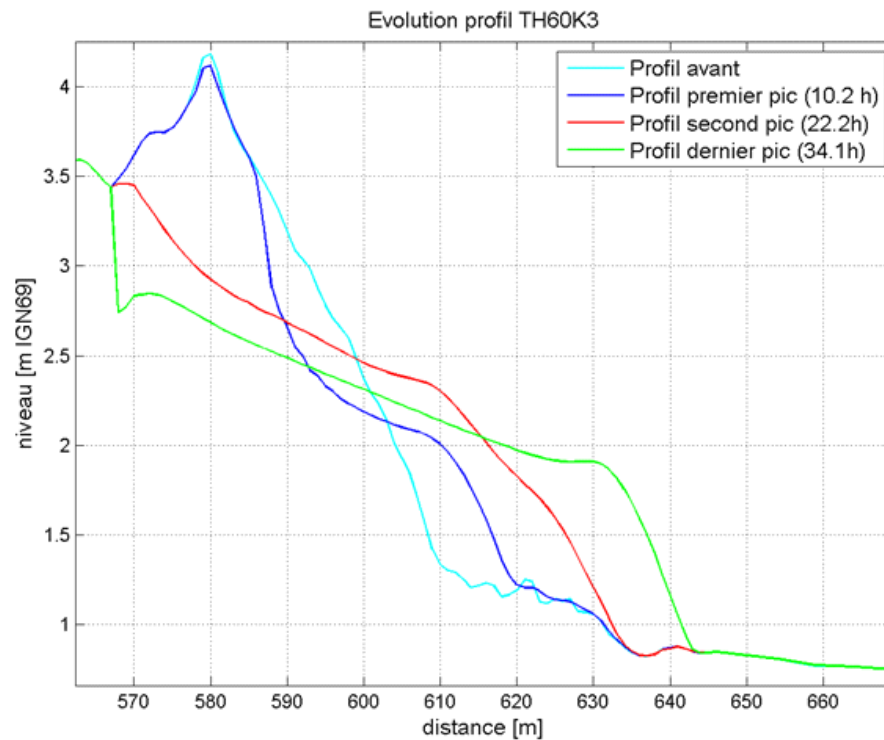


Figure 2.3: Exemple de l'évolution du profil dunaire au cours de la tempête (Les Moutiers-en-Retz, Loire-Atlantique)

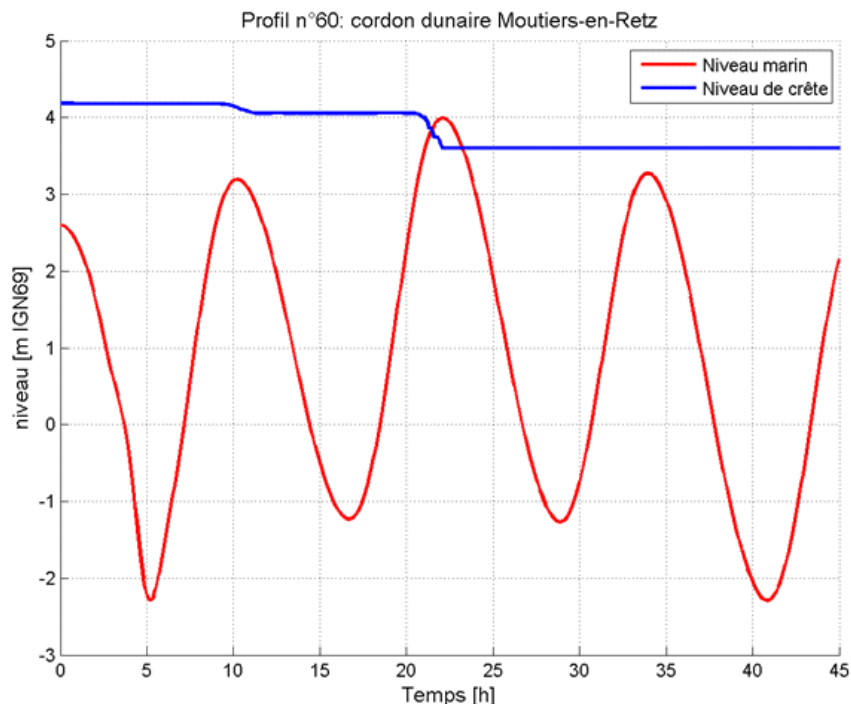


Figure 2.3: Exemple de l'évolution du niveau de la crête de la dune et le niveau marin au cours de la tempête (Les Moutiers-en-Retz).

2.2.5.3 Test de digue : évolution de l'estran devant la digue et détermination des conditions hydrodynamiques près de la digue

Ce test utilise le logiciel Durosta, le modèle de houle Swan et un outil de calcul de débit de franchissement (selon le guide Eurotop, 2007). Ce test permet de prendre en compte les débits de franchissement et de faire le choix entre une bonne résistance contre les conditions étudiées, une ruine totale ou une rupture des structures étudiées. Le wave set-up (Z_s) est compris dans ce calcul.

Le test de digue est un calcul mené en trois temps :

- le calcul d'érosion de plage devant une digue rigide (avec Durosta) ;
- la modélisation de la propagation de houle sur le profil érodé après la tempête (avec SWAN) ;
- le calcul des débits de franchissement selon le guide Eurotop.

Calcul d'érosion avec Durosta

Au cours d'une tempête, l'estran ou les marais situés devant la digue peuvent s'éroder. Du fait de l'approfondissement du fond, les vagues se déplacent plus aisément vers le pied de la digue. Il importe donc de calculer l'érosion pour connaître la hauteur de vague au pied de la digue. Le logiciel le plus adapté pour le calcul de l'érosion des plages devant les digues, les perrés ou autres ouvrages « rigides » est Durosta (Steetzel, 1993).

Durosta est un modèle monodimensionnel dépendant du temps, qui détermine la transformation de la hauteur de vague pour une bathymétrie donnée en utilisant un modèle interne de vague. Les principaux paramètres du modèle sont les paramètres hydrodynamiques et le diamètre des grains. Le modèle tient compte de l'effet de structures solides, comme les digues de mer. Les vagues transformées provoquent un transport de sable transversal par rapport à la côte et une possible perte de sable du côté mer. Après la tempête, un nouveau profil de plage est obtenu.

Propagation des houles sur le profil de plage avec SWAN

En principe, la hauteur et la période de vague doivent être déterminées au pied de la digue pour les calculs de franchissement et de formation des brèches. Pour le profil érodé, les paramètres de houle au pied de la digue sont déterminés avec un modèle 1D (SWAN) en utilisant comme paramètres d'entrée le niveau d'eau Z_0 et les paramètres de houle (H_{m0} et type de spectre en bordure littoral) pendant le pic de la tempête, qui correspondent avec le couple (Z_0 , H_{m0}) considéré. Cette approche est prudente, car le profil calculé par Durosta continue à évoluer après le pic de tempête en conditions plus clémentes ; au moment du pic de tempête, il est en réalité moins érodé qu'à la fin de la tempête.

Cependant, la plupart des modèles de vague (SWAN, Endec, etc.) produisent des hauteurs de vagues moins fiables dans des eaux très peu profondes. C'est pourquoi on utilise la hauteur de vague à une distance de 5 fois la hauteur de vague significative au large en partant du pied de la digue. Néanmoins il est évident que la hauteur de vague ne peut excéder la profondeur d'eau au pied de la digue. Celle-ci est par conséquent utilisée comme valeur limite.

La validation de SWAN sur les plages est faite sur la base d'études existantes (RIKZ, 2002 ; Zimmerman et al. 1999 ; WL|Delft Hydraulics & Alkyon, 2003) et une analyse faite par IMDC sur des mesures faites à Ostende (Belgique) (IMDC, 2007). Il est conclu de ces études que les simulations avec SWAN sur les plages peu profondes sont relativement bonnes. Le choix des paramètres est primordial : les spectres de houle, l'activation des interactions « triades » dans SWAN², le choix de la fréquence de coupure des spectres mesurés, etc.

Débits de franchissement (guide Eurotop, 2007)

Tous les calculs de franchissement par paquets de mer seront faits selon le guide « Eurotop » (2007). Ce guide est proposé dans la *méthodologie PPRL (DGPR, 2013) § 2.4.3.c.7* et IMDC est bien au fait du domaine de validité de ces méthodes, qui ont déjà été mises en œuvre dans le cadre d'autres projets. Pour plus d'informations sur les formules de calcul du débit de franchissement, le lecteur peut se référer au Guide EuroTop (2007).

2 Triades : les interactions non-linéaires entre les vagues

Tableau 2.1: Impact des débits franchissants, adapté du guide Eurotop (2007).

Débit franchissant [l/s/m]	Impact
< 0,1	<i>Aucun dégât sur les digues à talus. Dégâts sur les bâtiments, potentiellement dangereux pour les piétons et véhicules</i>
2-20	<i>Dégâts si la crête de la digue n'est pas protégée Aucun dégât sur revêtement ou protection de terre-plein Dégâts voire naufrage de petits bateaux</i>
20-50	<i>Dégâts si le talus arrière de la digue n'est pas protégé Aucun dégât sur revêtement ou protection de terre-plein Naufrage de petits bateaux, dégâts sur grands bateaux</i>
50-200	<i>Dégâts sur les digues même si la protection est complète Dégât sur revêtement ou protection de terre-plein si arase non protégée Dégâts voire naufrage de grands bateaux</i>
> 200	<i>Dégâts sur les digues même si la protection est complète Dégât sur revêtement ou protection de terre-plein même si arase protégée</i>

Résultats

Les résultats sont présentés sous forme de graphes (Figure 2.4), sur lequel le profil original et érodé sont montrés (axe gauche) ainsi que les hauteurs de houle (H_{m0} sur axe de droite) en fonction de la distance horizontale le long du profil. La hauteur et la période de pic de houle en pied d'ouvrage et le débit de franchissement sont affichés dans le titre de la figure.

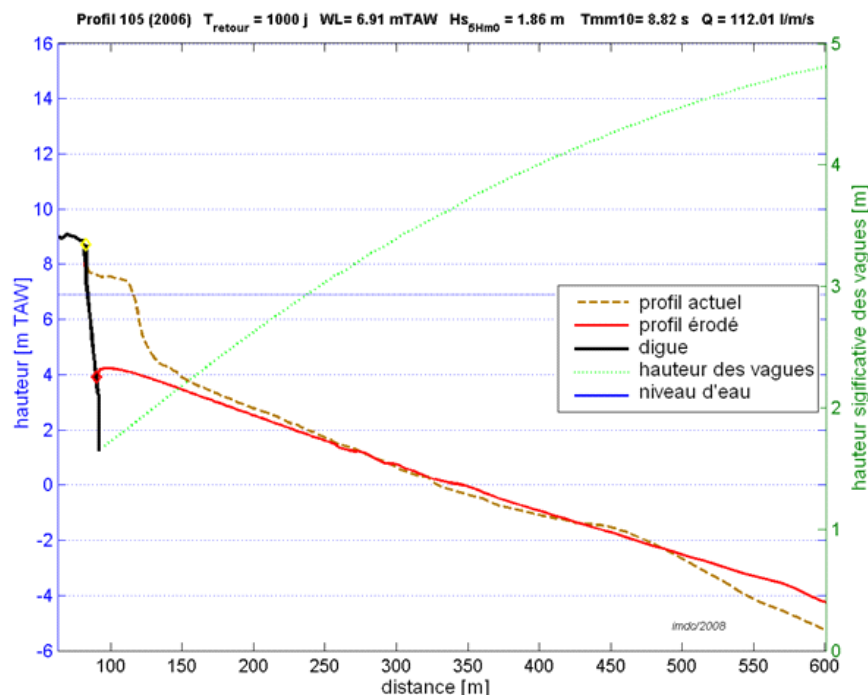


Figure 2.4: Exemple du test de digue.

Ce test permet de prendre en compte les débits de franchissement et de faire le choix entre une bonne résistance contre les conditions étudiées, une ruine totale ou une rupture des structures étudiées. Le wave set-up est également compris dans ce calcul (Eurotop, 2007).

De ce test des digues, deux résultats peuvent être obtenus :

Si le franchissement par les vagues se produit, le débit au pic de la tempête est calculé automatiquement. Ce débit permet une première évaluation des effets :

- Si le débit reste au-dessous du débit limite qui endommage le revêtement de la digue, le franchissement par paquets de mer se produit, mais il n'y a pas de risque de rupture de la digue. Cette série temporelle des débits sera utilisée dans le de submersion comme condition aval ;
- Si par contre le débit dépasse la limite, la stabilité de l'ouvrage est en danger et une brèche ou ruine peut se former. Diverses hypothèses sur l'évolution des brèches permettent le calcul d'une série temporelle des débits qui est alors utilisée dans le modèle de submersion comme condition aval.

2.2.5.4 Définition des scénarios de submersion

Les différents scénarios étudiés dans le PPRL sont :

- **scénario de référence** : déterminé à partir de l'événement naturel de référence, aboutissant à la cartographie de l'aléa de référence ;
- **scénario à échéance de 100 ans** : déterminé à partir de l'événement de référence prenant en compte l'élévation du niveau de la mer liée à l'impact du changement climatique, aboutissant à la cartographie de l'aléa à échéance 100 ans ;
- **scénario en l'absence d'ouvrages** (hypothèse de ruine généralisée de l'ensemble des ouvrages de protection), déterminé à partir de l'événement de référence. Ce scénario donnera lieu à une cartographie à titre indicatif ;

D'autre part, deux scénarios additionnels sont envisageables :

- **scénario basé sur un événement fréquent**, de forte probabilité (**10 ans**) ;
- **scénario extrême, basé sur un événement extrême**, de faible probabilité, supérieur à l'événement de référence (**1000 ans**).

Pour chaque scénario, les séries temporelles des débits sont transférées dans un modèle de courant 2D, comprenant le niveau de la mer à la hauteur des brèches comme condition aval et les séries temporelles des débits comme entrées du modèle. Cette dernière série sera fonction de la formation et de l'évolution des brèches.

Pour le scénario à échéance 100 ans, la position du trait de côte à échéance 100 ans est à considérer. La détermination de ce trait de côte est décrite au paragraphe § 2.3..

2.2.6 Détermination de l'aléa de submersion

Pour la modélisation des submersions marines, des scénarios spécifiques sont définis pour l'événement marin de référence.

Les débits calculés pour les différents scénarios sont introduits comme conditions aux limites du modèle de submersion pour le calcul de :

- l'extension maximale des inondations ;
- les hauteurs d'eau maximales en chaque point ;
- les vitesses d'écoulement maximales en chaque point ;

Un modèle hydraulique sera mis en œuvre afin de simuler la submersion. Pour cela le logiciel Infoworks sera utilisé. Le module 2D de ce logiciel permet de calculer les vitesses et hauteurs d'eau en chaque point d'un maillage non structuré.

Il est également possible de corriger le MNT pour intégrer des obstacles dans la modélisation 2D (présence de maisons insubmersibles, de murs submersibles à partir d'une certaine hauteur (dits poreux), aménagements futurs, etc.). La complexité de la zone 2D est ainsi prise en compte dans les écoulements ; ceci permet d'envisager l'étude précise des écoulements en milieu urbain après débordement ou par rupture de digue.

Les données d'entrée du modèle numérique sont les suivantes :

- Le MNT, qui inclut les spécificités du terrain ;
- Les séries temporelles des débits (franchissements par les vagues, brèches, etc.) comme conditions aval (voir §2.2.5.1, §2.2.5.2, §2.2.5.3) ;
- Pour les rivières : un débit typique comme condition amont déterminé à partir de mesures limnimétriques. Dans le cadre du PPRL on fera l'hypothèse qu'il n'y a pas d'interdépendance entre la force de l'événement marin et l'écoulement des cours d'eau.

L'étendue du modèle est choisie en fonction de la topographie et des niveaux d'eau de l'événement extrême. Le maillage non structuré permet de modéliser plus en détail certaines zones choisies.

Lorsque des mesures sont disponibles sur des événements historiques, celles-ci sont utilisées pour valider les résultats du modèle.

2.2.7 Cartographie de l'aléa de submersion

Les cartes d'aléa submersion marine sont établies à l'échelle du 1/5 000.

La dynamique de submersion est qualifiée à partir des vitesses de courants horizontaux et la vitesse de submersion selon le schéma suivant :

Tableau 2.2: Évaluation de la dynamique de submersion en classes « lente », « modérée » et « rapide »

Dynamique de submersion		Vitesse de courant		
		Faible	Moyenne	Forte
Vitesse de submersion	Lente	Lente	Modérée	Rapide
	Modérée	Modérée	Modérée	Rapide
	Rapide	Rapide	Rapide	Rapide

La cartographie de l'aléa de submersion respectera (a priori) les trois ou quatre classes d'aléa établies selon les critères hauteur – vitesse. Cette grille pourra être de la forme :

Tableau 2.3: Méthode de définition des aléas submersion marine

Aléa submersion marine		Dynamique de submersion		
		Lente	Modérée	Rapide
Hauteur d'eau	Faible	Faible	Moyen	Fort
	Moyenne	Moyen	Moyen	Fort
	Forte	Fort	Fort	Très fort

Les vitesses et les hauteurs d'eau sont issues de la modélisation numérique de la submersion. A priori, les critères suivants sont utilisés :

- Les seuils de hauteur d'eau (*méthodologie PPRL (DGPR, 2013) § 2.4.5.b*) :
 - $H > 1,0$ m Hauteur d'eau « forte »
 - $0,5 < H < 1,0$ m Hauteur d'eau « moyenne »
 - $0 < H < 0,5$ m Hauteur d'eau « faible »
- Les seuils pour les vitesses d'écoulement horizontales (*méthodologie PPRL (DGPR, 2013) §2.4.5.b & méthodologie TRI v7 § 3.6 pour l'événement extrême*) :
 - $V > 0,5$ m/s Vitesse « forte »
 - $0,2 < V < 0,5$ m/s Vitesse « moyenne »
 - $0 < V < 0,2$ m/s Vitesse « faible »

Pour certaines zones particulières, l'aléa est défini différemment (outre les résultats de la modélisation de la submersion) : il s'agit des bandes de précaution et des zones exposées aux franchissements par paquets de mer et chocs mécaniques.

Bande de précaution

Une bande de précaution sera définie systématiquement pour les digues de premier rang (protégeant une zone en cuvette).

Selon le guide PPRL, la bande de précaution est définie avec une largeur de $100 \times h$, h étant la différence entre le niveau du terrain derrière la digue et le niveau d'eau considéré, sans que cette largeur ne soit inférieure à 50 m. Il faut donc que h soit supérieure à 0,50 m pour dépasser la largeur minimale de 50 m. Si le niveau marin est supérieur à la cote de crête de l'ouvrage (donc en cas de surverse), h est défini comme la différence entre le terrain naturel et ce niveau de crête (et non le niveau marin).

Afin d'éviter des variations trop fréquentes de la bande de sécurité, des classes de hauteurs d'ouvrages sont adoptées et par conséquent, des classes de largeur de bandes de sécurité.

Dans les cas où le terrain derrière la digue remonte à une cote au-dessus du niveau marin de référence, dans la largeur de la bande déterminée comme ci-dessus, la bande de précaution s'arrête à ce point-là. Les zones qui se trouvent à une cote au-dessus du niveau marin de référence sont alors exclues de la bande de précaution.

Derrière les ouvrages de second rang (dans les marais), une bande de précaution sera définie au niveau des zones à enjeux, notamment si l'ouvrage de second rang est proche de l'ouvrage de premier rang (et dans sa bande de précaution).

2.2.7.1 Zones exposées aux franchissements et aux chocs mécaniques

Les zones soumises à des franchissements par paquets de mer, des chocs mécaniques ou à des projections sont définies sur la base des données historiques (dégâts aux ouvrages d'après les fiches tempêtes, IMDC & AGR, 2014) et des résultats des tests de digues.

Lors de ce test, le débit de franchissement est calculé, puis est interprété selon le guide Eurotop (voir §2.2.5.3) pour déterminer les conséquences éventuelles pour l'aléa de submersion marine.

Les zones soumises à l'action des vagues (chocs mécaniques et projections) seront caractérisées par des aléas de moyen à fort.

2.3. aléa érosion

La zone d'aléa recul du trait de côte correspond à la zone de mobilité du trait de côte sous l'effet de l'érosion ou de la submersion à échéance 100 ans. Cette zone est délimitée par le trait de côte actuel et par celui à échéance 100 ans. L'échéance 100 ans est adaptée au temps de la planification territoriale.

2.3.1 Approche générale

Lorsque l'aléa migration dunaire est associé à l'aléa recul de trait de côte, ces deux phénomènes sont traités simultanément.

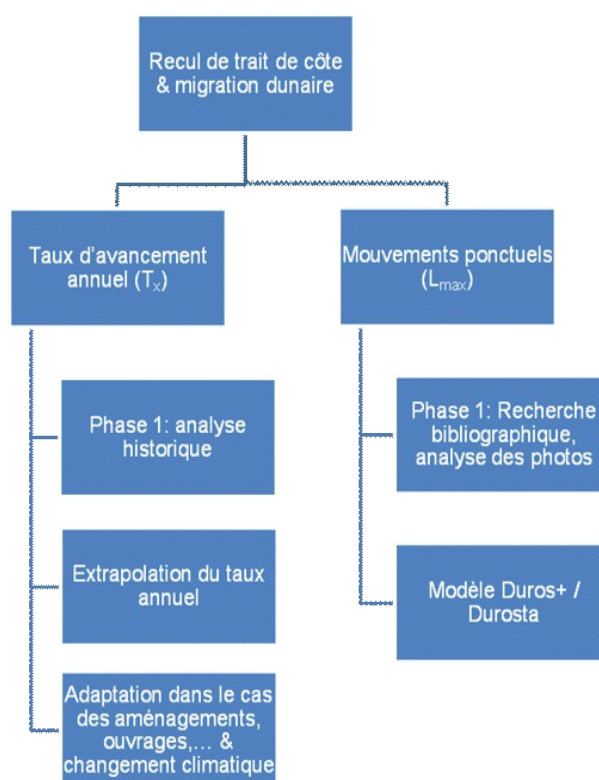


Figure 2.5: Schéma pour la qualification du recul du trait de côte et la migration dunaire.

La méthodologie ci-après ne concerne que les côtes basses meubles. Pour les côtes à falaises, le calcul du recul de trait de côte suit un principe similaire. Un mouvement ponctuel correspond alors à un effondrement majeur. Les zones d'aléa érosion de falaises tiennent compte de la zone soumise au recul (comme pour l'érosion dunaire), ainsi que d'une zone d'impact en bas de falaise des blocs détachés. Pour plus de détails sur la méthodologie recul de falaise, on réfère aux rapports de cartographie des aléas littoraux (AGR & IMDC, 2015).

2.3.2 Taux d'avancement moyen annuel

2.3.2.1 Détermination du taux d'avancement moyen annuel

La détermination du taux d'avancement ou de recul moyen annuel du trait de côte suppose de choisir un indicateur du trait de côte, en fonction de l'échelle temporelle d'intérêt et de la géomorphologie côtière. Le rapport de phase 1 présente déjà une description de tels critères (IMDC & AGR, 2014) ainsi que le calcul du taux moyen annuel. Lorsque cela est possible le taux moyen obtenu est comparé à la littérature.

2.3.2.2 Extrapolation pour l'horizon 2100

Le taux d'avancement moyen annuel permet ensuite d'extrapoler le recul pour l'horizon 2100. Après comparaison du taux moyen annuel avec la littérature, un taux annuel « brut » est retenu :

- **L'extrapolation du taux annuel « brut » implique des conditions dynamiques invariantes** dans le temps (situation A, figure 2.6 et situation B, figure 2.7). Ainsi une partie de l'incertitude liée au caractère aléatoire des tempêtes et de leurs effets y est inclus ;
- L'extrapolation du taux d'évolution annuel (basée sur une période pluri-décennale) peut **être révisée en tenant compte d'une évolution non-linéaire** due à l'effet réactif d'aménagements ou une modification des apports fluviaux ou littoraux, notamment :
 - Des effets des rechargements de plage, qui apportent des sédiments de l'extérieur. Le taux brut est alors corrigé avec les volumes apportés, afin d'obtenir le taux « naturel » ou « corrigé » ;
 - L'effet de la construction d'un port. Dans ce cas le taux annuel est déterminé à partir des données disponibles sur la période postérieure à cet aménagement.

Autrement dit, ce taux brut peut être corrigé à dire d'expert.

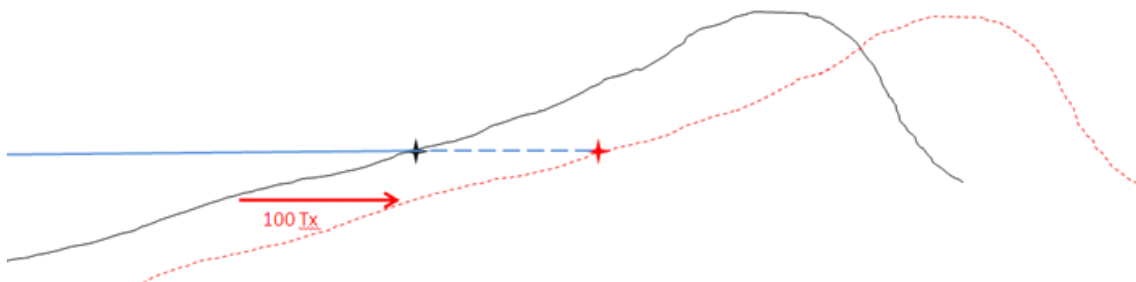


Figure 2.6: A – Trait de côte actuel (noir) et pour l'horizon de 100 ans (rouge) pour les plages et cordons dunaires sans ouvrage

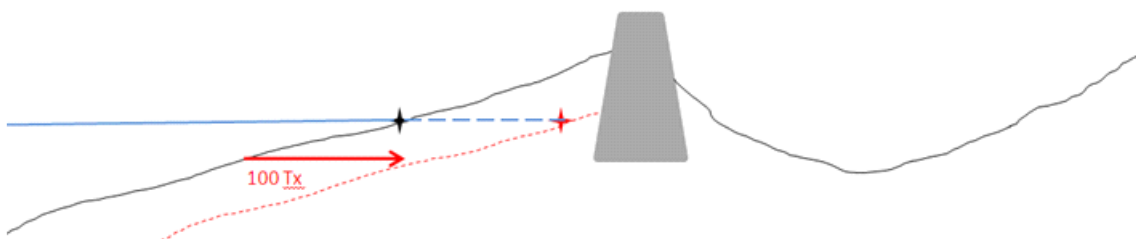


Figure 2.7: B – Trait de côte actuel (noir) et à l'horizon de 100 ans (rouge) en présence d'ouvrage lorsque la plage ne disparaît pas totalement

En présence **d'ouvrages de protection**, la méthode de détermination du taux de recul moyen annuel est à adapter dès lors que ceux-ci peuvent jouer un rôle sur le long terme. L'effet des ouvrages sur leur secteur d'implantation et sur les secteurs avoisinants doit être évalué et leur capacité à contenir le recul à long terme et à résister aux sollicitations lors des événements tempétueux est appréciée à dire d'expert. La défaillance de l'ouvrage doit toujours être envisagée :

- Pour les ouvrages qui ne fixent pas le trait de côte, la *méthodologie PPRL (DGPR, 2013)* prescrit l'extrapolation de l'évolution passée. ;
 - L'effet des épis par exemple est donc déjà inclus dans le taux annuel « brut » ;
- Pour les ouvrages qui fixent le trait de côte un phénomène d'érosion peut se traduire par un abaissement du profil, des affouillements en pied d'ouvrages, etc. ;
 - soit l'ouvrage reste fonctionnel et stabilise le trait de côte (situation C, figure 2.8) ;
 - soit l'ouvrage est considéré comme défaillant et la côte recule jusqu'à derrière la position de l'ouvrage (situation D ou E, figures 2.9 et 2.10).

En cas de disparition de la plage et de défaillance probable de l'ouvrage, on peut envisager d'utiliser le taux de recul des zones adjacentes s'il est plus « naturel » que le taux de recul devant la structure avant défaillance.

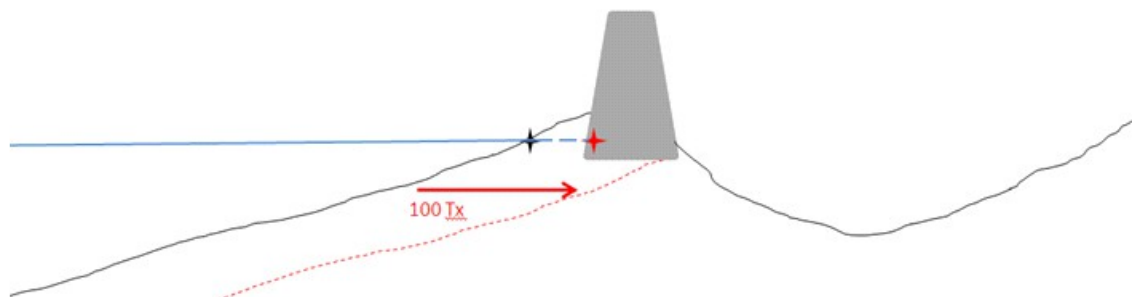


Figure 2.8: Situation C – Trait de côte actuel (noir) et à l'horizon 100 ans (rouge) dans le cas où l'érosion atteint l'ouvrage mais où celui-ci reste fonctionnel.

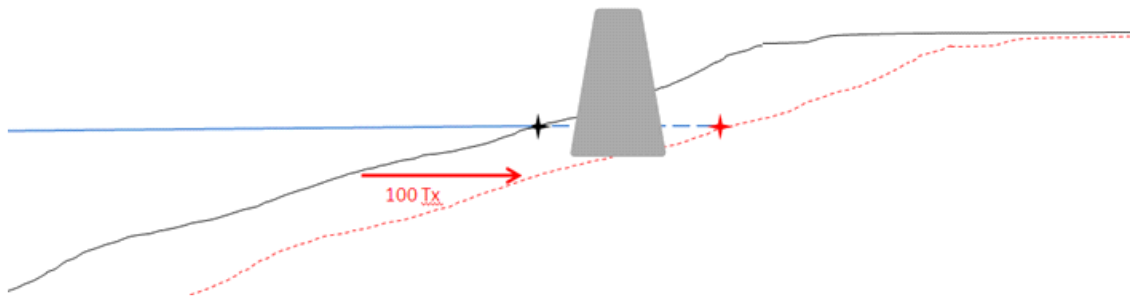


Figure 2.9: Situation D – Trait de côte actuel (noir) et à l'horizon de 100 ans (rouge) dans le cas où l'érosion atteint l'ouvrage et où une défaillance est probable.

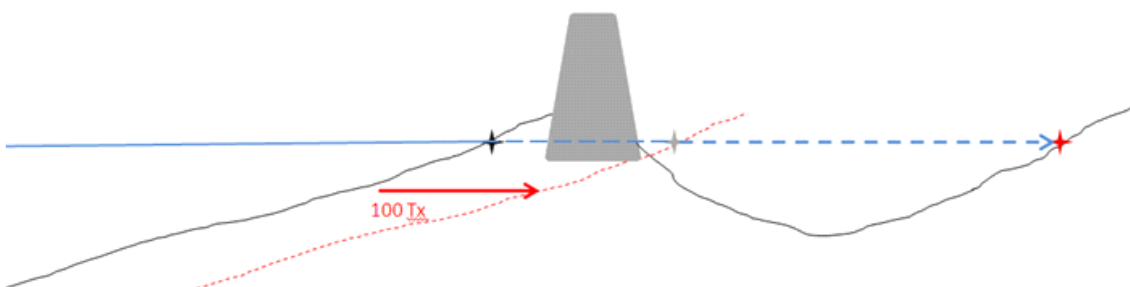


Figure 2.10: Situation E – Trait de côte actuel (noir) et pour l'horizon de 100 ans (croix rouge) dans le cas où l'érosion atteint l'ouvrage et où une défaillance est probable en combinaison avec une zone basse derrière l'ouvrage.

Le **changement climatique** peut accélérer le processus d'érosion en cas d'élévation du niveau des océans. Cependant il n'existe pas de méthode unique adaptée pour quantifier cet impact, la prise en compte du changement climatique n'est donc pas obligatoire (*méthodologie PPRL (DGPR, 2013) §2.2.5*). Nous proposons de prendre en compte l'effet de l'élévation du niveau d'eau à cause du changement climatique, par la sélection du trait de côte initial (pour cette analyse) à la cote de PMVE (pleine mer de vive eau) +20 cm et +60 cm respectivement (scénario à 100 ans sans et avec changement climatique).

Les incertitudes liées aux données et l'intervalle de confiance lié au calcul du taux de recul annuel doivent être quantifiées autant que possible.

2.3.3 Les reculs ponctuels

Un événement exceptionnel peut mener à un recul ponctuel bien supérieur au recul moyen à long terme, puis souvent à un rétablissement du profil sur plusieurs mois sous l'action d'une houle plus modérée. Ces événements peuvent avoir des conséquences significatives pour l'urbanisation et doivent donc être quantifiés.

L'étude historique peut fournir des informations sur l'occurrence des reculs ponctuels lors des tempêtes historiques. Si ces données sont disponibles, l'événement le plus fort ou celui qui correspond le mieux à l'événement de référence peut être exploité plus en détail, afin d'estimer le volume érodé et son effet sur le trait de côte. Ces résultats peuvent servir pour la validation des calculs d'érosion pour l'événement de référence.

Les reculs ponctuels peuvent être quantifiés à l'aide d'un **modèle numérique morphologique** comme le test des dunes (côtes meubles, § 2.2.5.2) ou le test des digues (côtes avec ouvrage, § 2.2.5.3). L'événement de référence à échéance 100 ans est appliqué sous forme de série temporelle de niveau

d'eau et de houle à des profils choisis. Plusieurs couples (Z_0 , Hs) de niveau d'eau et de houle de même période de retour peuvent être testés pour déterminer le volume érodé maximal. Remarquons que ce test des digues et des dunes est le même que celui permettant d'évaluer la stabilité ou non d'ouvrages, de calculer les débits de franchissements et les brèches dans les cordons dunaires.

Les résultats de recul ponctuel issus de la modélisation sont comparés aux données lorsque celles-ci existent afin de valider le modèle.

2.3.4 Combinaison des deux phénomènes

La zone soumise à l'aléa est définie à partir du recul à 100 ans issu de la **projection des tendances passées**, auquel est ajouté le recul susceptible d'intervenir lors d'un **événement ponctuel majeur** (*méthodologie PPRL (DGPR, 2013) §2.2.2 ; figure 2.5*).

La largeur de la zone d'aléa de recul est estimée selon la méthode synthétisée par la formule suivante :

$$L_r = 100 \times T_x + L_{max}$$

L_r : largeur de la zone d'aléa (m)

T_x : Taux moyen de recul annuel (m/an)

L_{max} : Recul ponctuel maximal pour un événement extrême (m)

Ces deux bandes d'aléas (taux moyen et recul ponctuel) sont combinées pour chaque zone homogène.

2.3.5 Aléa de migration dunaire

L'aléa de migration dunaire est quantifié de manière similaire à l'aléa de recul du trait de côte, à savoir avec un taux moyen et un recul ponctuel (*méthodologie PPRL (DGPR, 2013) §2.3*). Pour cela on se base dans les deux cas sur une analyse historique de la position du front dunaire.

2.3.6 Cartographie de l'aléa d'érosion

Le recul du trait de côte et la migration dunaire sont des risques considérés comme étant **irréversibles** : l'aléa est donc **toujours qualifié de fort**.

Les résultats de cette partie de l'étude sont des cartes de synthèse de l'aléa de recul du trait de côte à l'échelle du 1/5 000.

3. Analyse statistique des conditions hydrodynamiques

Pour les scénarios PPRL et TRI des couples de concomitances de hauteur (H_{m0}) de houle liée à un niveau d'eau extrême (Z_0) sont déterminés à l'aide d'une analyse statistique. La période de retour (de 10, 100 ou 1000 ans) exprime donc la probabilité d'occurrence des deux paramètres en même temps.

Ainsi, une période de retour donnée (par exemple 100 ans) correspond à plusieurs couples (H_{m0} , Z_0) : une combinaison d'une houle extrême avec un niveau d'eau moins extrême peut avoir une période de retour de 100 ans, mais un événement avec un niveau d'eau plus élevée et une houle plus clémente, peut avoir la même période de retour. L'ensemble des couples T10, T100 et T1000 sera étudiée dans une phase ultérieure (rapport de modélisation n°1, AGR & IMDC, 2015) pour tenir compte des transformations du large vers la côte, des effets locaux sur les plages, etc.).

Pour l'analyse statistique, les données de houle au large sont tirées de la base données ANEMOC (§ 3.2.2). Ces données sont complétées avec une suite temporelle tirée des données OCEANOR afin d'élargir la période couverte. Pour l'étude des niveaux d'eau, les données du marégraphe du Havre sont utilisées ; ces données seront transposées vers les côtes du Calvados (§3.5.) Ces niveaux d'eau n'intègrent pas le set-up de la houle sur les plages (qui sera déterminé ultérieurement à l'aide du modèle de houle).

La côte du Calvados connaît deux types de tempêtes : les tempêtes d'Ouest et les tempêtes du Nord à Nord-Nord-Est (NNE).

Les tempêtes d'Ouest sont générées dans la Manche, où des champs de houle se développent. Ces houles se propagent ensuite vers la Baie de la Seine en contournant le Cotentin. Ces houles d'Ouest touchent la côte sous un angle de provenance d'Ouest à Nord-Ouest. Ces houles ne génèrent pas les plus fortes conditions de houle à la côte, mais il existe une forte corrélation entre les conditions d'Ouest et les surcotes au Havre. Les tempêtes (H_{m0} , Z_0) d'Ouest se caractérisent donc par des niveaux d'eau plus élevés, et des conditions de houle moins fortes à la côte.

Les tempêtes (provenant) du Nord et du Nord – Nord-Est sont caractérisées par un vent provenant de cette direction, et générant des houles qui se dirigent vers le Sud et le Sud-Sud-Ouest, c'est-à-dire droit sur les côtes du Calvados. Les conditions de houle près des côtes sont donc plus extrêmes dans ce cas. Par contre la relation entre les tempêtes du Nord – Nord-Est et les surcotes atmosphériques au Havre est beaucoup plus faible. Les tempêtes du Nord – Nord-Est sont donc caractérisées par des niveaux d'eau moins élevés, avec des houles plus importantes sur la côte.

Cette différence entre les conditions d'Ouest et Nord – Nord-Est, nécessitent différentes méthodes statistiques pour l'établissement des couples (H_{m0} , Z_0). Dans un premier temps, une analyse des valeurs extrêmes de chaque paramètre est faite (houle § 3.3.1, surcote § 3.3.2) et comparée à des études antérieures (§ 3.3.3).

Pour les conditions d'Ouest une statistique dite « bi-variée » (deux variables) est effectuée sur les surcotes (atmosphériques) de pleine mer au Havre et les conditions de houle au large, à l'aide d'une « copule » (§ 3.4.). Les surcotes de pleine mer se superposent à une marée haute, et donnent ainsi en un « niveau d'eau » Z_0 . Cette traduction en niveaux d'eau est faite à l'aide de la méthode de convolution (§ 3.3.4).

Pour les conditions du Nord – Nord-Est, on ne peut pas établir une distribution bi-variée des houles et surcotes, car la relation entre ces deux paramètres est trop faible. Les houles extrêmes sont donc combinées avec les pleines mers astronomiques (avec une méthode que s'inspire de la méthode de convolution), permettant ainsi d'établir la distribution des houles extrêmes du Nord – Nord-Est concomitantes avec une pleine mer astronomique.

3.1. Introduction

L'analyse statistique est faite sur les séries temporelles de la houle (H_{m0}) des points ANEMOC au large des côtes du Calvados et des mesures de niveaux d'eau à Cherbourg et Le Havre. Les valeurs extrêmes sont étudiées selon les instructions du guide méthodologique PPRL de la DGPR du MEDDTL (2011) et les accords faits lors des discussions avec le CETMEF (2013b).

Les niveaux extrêmes seront donc déterminés à partir des surcotes de pleine mer, comme définies par le CETMEF : la différence entre le niveau d'eau maximum observée au voisinage de la pleine mer et le niveau de pleine mer prédit. La probabilité de la concomitance surcote – houle est déterminée en appliquant la copule de Gumbel. Les différentes surcotes (après stratification) étudiées sont couplées aux pleines mers astronomiques, avec prise en compte des probabilités des deux phénomènes, par la méthode de la « convolution » (voir §3.3.4).

Les autres variables comme la vitesse de vent, et la période de la houle sont déterminées avec une courbe de régression, conditionnelle à la variable principale H_{m0} .

L'analyse statistique résultera alors dans des couples (H_{m0} au large, Z_0 dans le port de référence), pour plusieurs périodes de retour. Le principe est montré dans la 3.1. Après sélection de la période de retour (p.ex. 100 ans dans le cas du PPRL), la réponse du système sera déterminée pour les couples (H_{m0} , Z_0) retenus.

Le modèle de houle permet ensuite une estimation précise des paramètres de houle à la côte à partir des conditions au large.

L'étude de l'évolution du niveau marin le long de la côte permet de définir le niveau marin local (p.ex. par zone homogène), en tenant compte des variations de la marée.

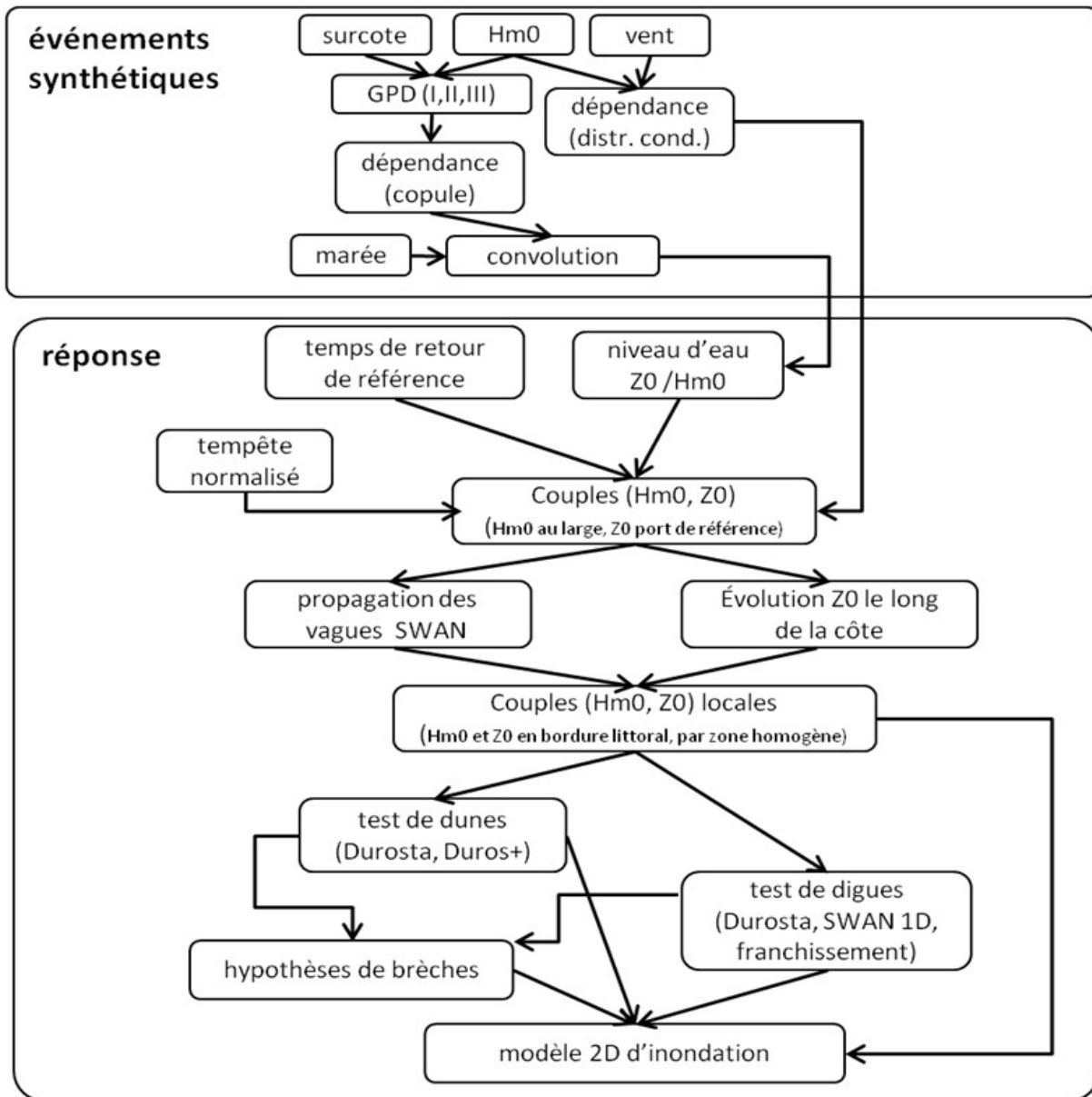


Figure 3.1: Schéma d'analyse des conditions hydrodynamiques

Ces couples (H_{m0} , Z_0) locaux serviront comme paramètres d'entrée pour le test des dunes, le test des digues, la définition des hypothèses de brèches, et enfin le modèle de submersion marine.

3.2. Données

Le présent paragraphe discute des données disponibles qui sont utilisées pour l'étude statistique. Les paramètres étudiés sont les hauteurs de houle au large (ANEMOC et OCEANOR) et les niveaux marins mesurés au marégraphe du Havre.

3.2.1 Localisation des points étudiés

Les positions des séries temporelles de houle et de niveau d'eau utilisées pour l'analyse statistique sont localisées sur la figure 2.1.

3.2.2 Houles

Pour l'analyse statistique des hauteurs de houle, le point COAST 2525 (30 km au large de Courseulles-sur-Mer) de la base ANEMOC (CETMEF / EDF R&D-LNHE, 2010/2011) est pris comme donnée de base. La série de mesures OCEANOR au point de coordonnées 50°N et 01°O (70 km au large de la Baie des Veys) a été utilisée pour compléter les données du point COAST 2525, à partir d'une relation établie entre ces deux points, car le chevauchement des données OCEANOR avec les données de niveau d'eau est plus important.

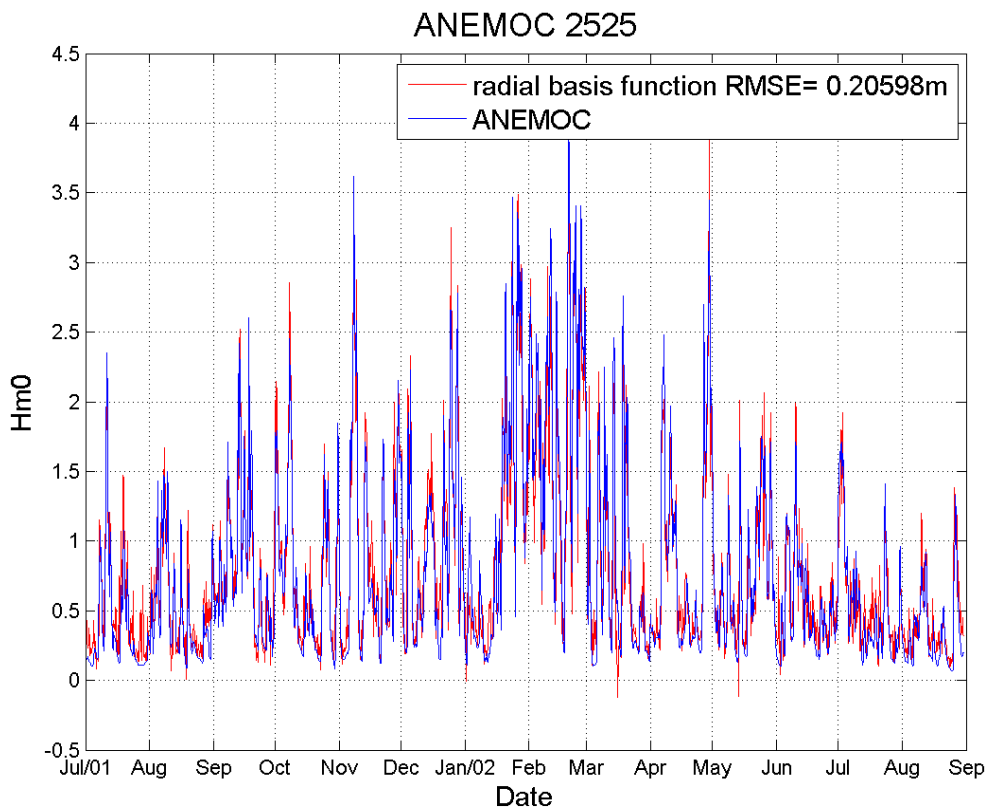


Figure 3.2: Résultats basés sur la fonction radiale et données ANEMOC.

Dans un premier temps, les mesures OCEANOR sont transformées vers le point COAST 2525, sur la base d'une fonction à base radiale (RBF³) entre ces deux points sur une partie de leur période de chevauchement (2 ans).

La fonction radiale comparée aux données ANEMOC est montrée dans les figures 3.2 et 3.3 Une erreur quadratique moyenne de 0,21 m sur les hauteurs de houles significatives est obtenue, et la fonction cumulative de distribution indique une très bonne similitude (légère surestimation des houles >60 % de non-dépassement).

Dans un second temps, les données du point OCEANOR chevauchantes avec les données de niveau d'eau du Havre (du 09/2002 à 2011) sont propagées vers le point COAST 2525 en utilisant la fonction radiale trouvée sur l'ensemble de la période chevauchante (3 ans).

Les données du point COAST 2525, complétées par les données propagées à partir du point OCEANOR, seront donc utilisées pour l'analyse statistique et la modélisation de la houle (voir figure 3.4).

³ La fonction à base radiale (Angl. Radial Basis Function, RBF), est une méthode statistique de prévision ou déduction d'un paramètre ou processus sur la base d'un ou plusieurs autres paramètres numériques. Cette méthode est utilisée ici pour déduire les paramètres de houle dans un point au large (OCEANOR) à partir des données de houle dans un autre point au large (COAST 2525).

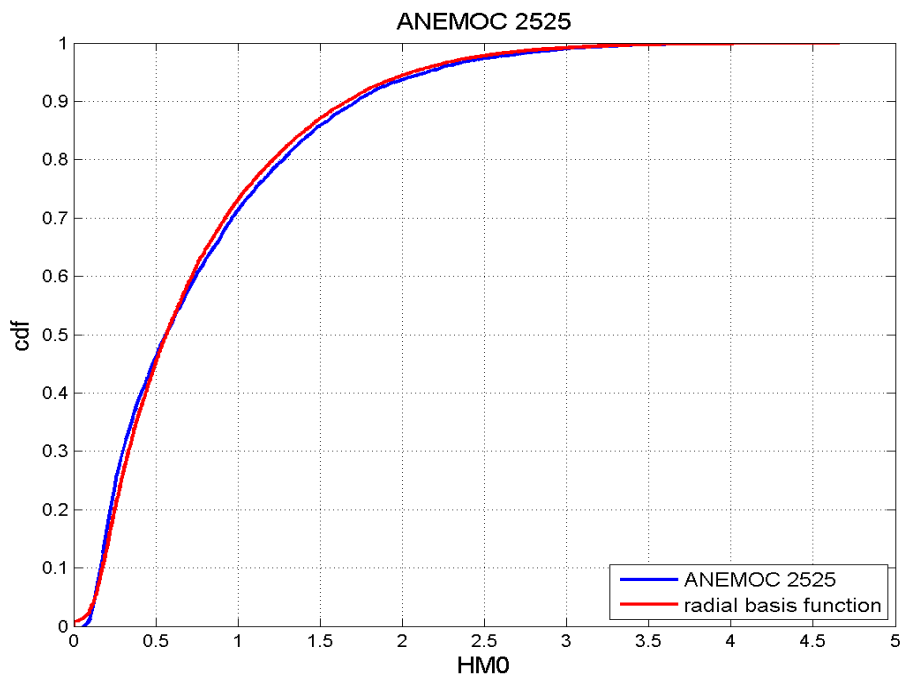


Figure 3.3: Fonction cumulative de distribution (Fonction radiale et données ANEMOC) : probabilité cumulée de non-dépassement de la hauteur de houle donnée.

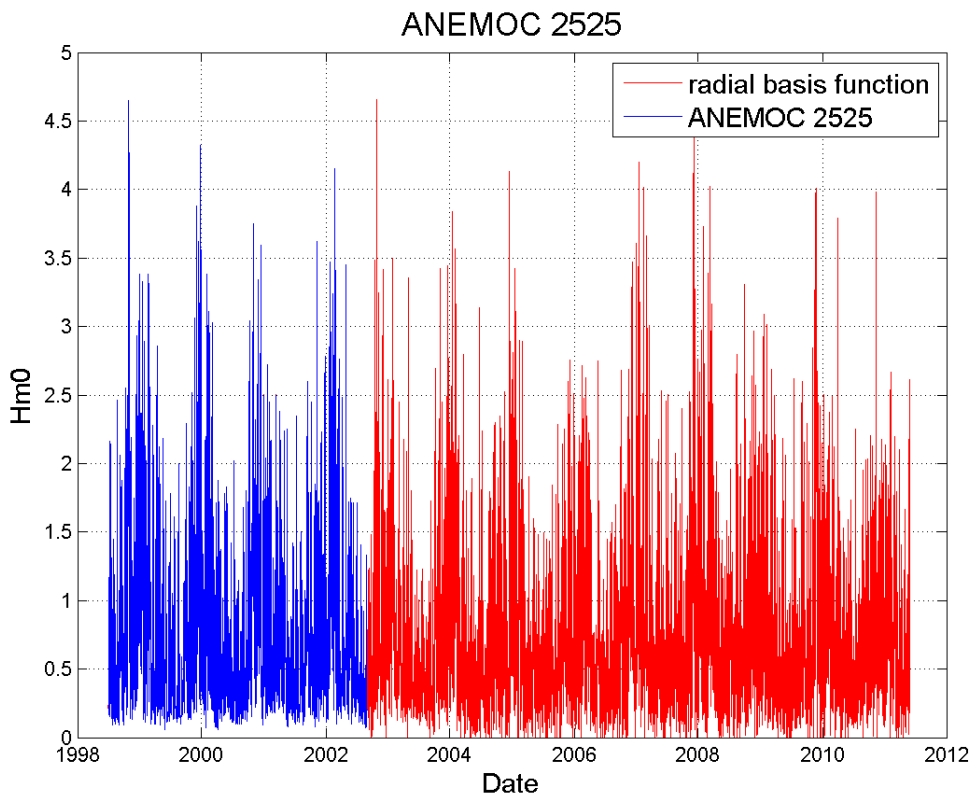


Figure 3.4: Données ANEMOC complétées à partir du point OCEANOR.

3.2.3 Surcote de pleine mer (PM)

Les surcotes sont définies selon la méthodologie PPRL (DGPR du MEDDTL, 2011). Elles correspondent à la différence entre le niveau d'eau maximal mesuré au voisinage de la pleine mer astronomique, et la pleine mer astronomique (voir figure 3.5). Le déphasage entre ces deux valeurs maximales n'est donc pas pris en compte.

La ligne verte de la figure 3.5 correspond à la marée astronomique prédite au Havre, et la ligne bleue est le niveau d'eau (marée + surcote météorologique) mesuré au même moment et au même endroit (données REFMAR). Les flèches rouges indiquent la surcote de pleine mer. On constate un déphasage entre la première haute mer prédite et mesurée de la figure. Le niveau mesuré de la prochaine pleine mer est plus bas que le niveau astronomique (surcote négative ou décote).

Les mesures du niveau d'eau à Cherbourg et au Havre couvrent une période de 18 ans. Les surcotes extrêmes maximales de ces bases de données sont de 0,72 m à Cherbourg (tempête du 14 novembre 2002) et 1,24 m au Havre (tempête du 17 décembre 2004).

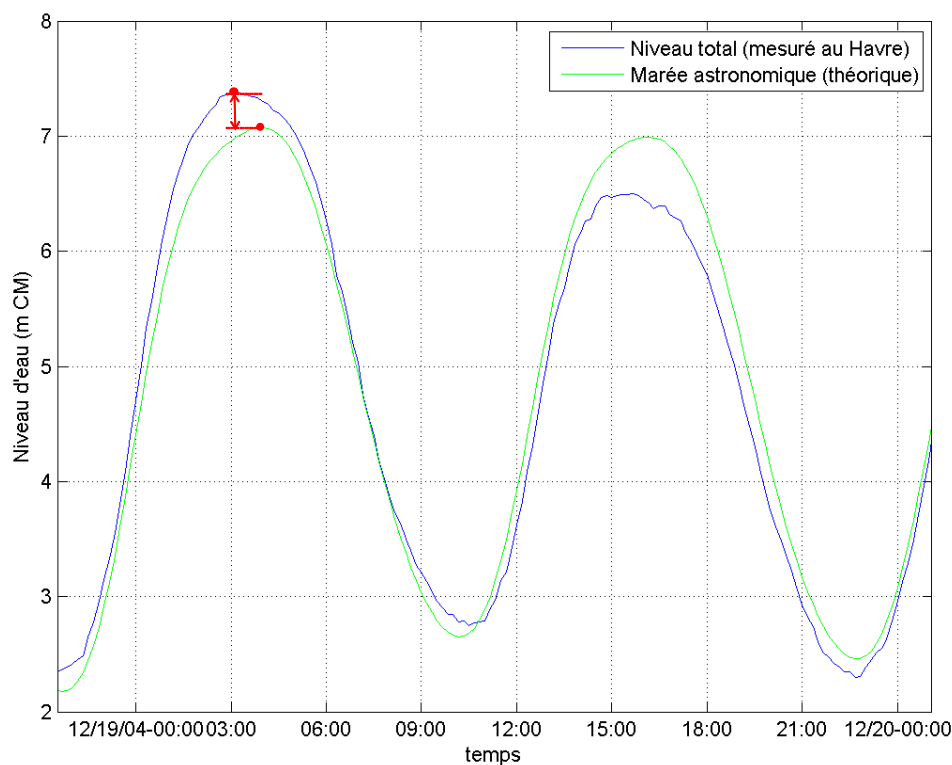


Figure 3.5: Surcote de pleine mer : définition

3.3. Analyse des variables aléatoires marginales

Les distributions des valeurs extrêmes univariées sont analysées dans le présent paragraphe. On s'intéresse donc aux distributions des houles extrêmes et des surcotes atmosphériques extrêmes sans étudier leur concomitance. Il est important d'étudier ces distributions univariées pour le couplage des distributions dans la copule (voir § 3.4.). Les lois statistiques retenues décrivent le comportement de chaque paramètre, et les résultats obtenus sont comparés à d'autres études antérieures et ils sont validés en fin de paragraphe.

Pour l'analyse des valeurs extrêmes, les valeurs maximales de houle et de surcotes de pleine mer dépassant un certain seuil sont retenues séparément. Ces valeurs retenues sont appelées les valeurs "POT" (Peak Over Threshold). Les valeurs POT sont toujours sélectionnées sur la durée totale d'une série temporelle, afin d'optimiser la représentativité de la sélection POT dans le domaine d'extrapolation. L'indépendance des valeurs POT est assurée en exigeant une période minimale de 24 heures et un facteur « inter-event » de 0,37 entre deux valeurs POT successives.

Les deux séries de valeurs POT (houle et surcote de pleine mer PM) qui sont ainsi retenues contiennent des valeurs extrêmes de surcote et de houle simultanées (c'est-à-dire sur un même intervalle de temps), ou ainsi que séparées.

Les valeurs de houles extrêmes et de surcotes extrêmes simultanées seront étudiées dans un modèle de copule statistique, pour analyser la probabilité que ces deux phénomènes se produisent simultanément. Les autres valeurs POT sont considérées comme indépendantes.

Dans le rapport de la phase 1 du PPRL (IMDC & AGR, 2014), les roses de houle des points ANEMOC ont mis en évidence la prédominance de deux directions de houle (voir aussi la figure 3.6) :

- les houles de secteur Ouest, allant de 245°N à 345°N ;
- les houles de secteur Nord-Nord-est, allant de 345°N à 70°N.

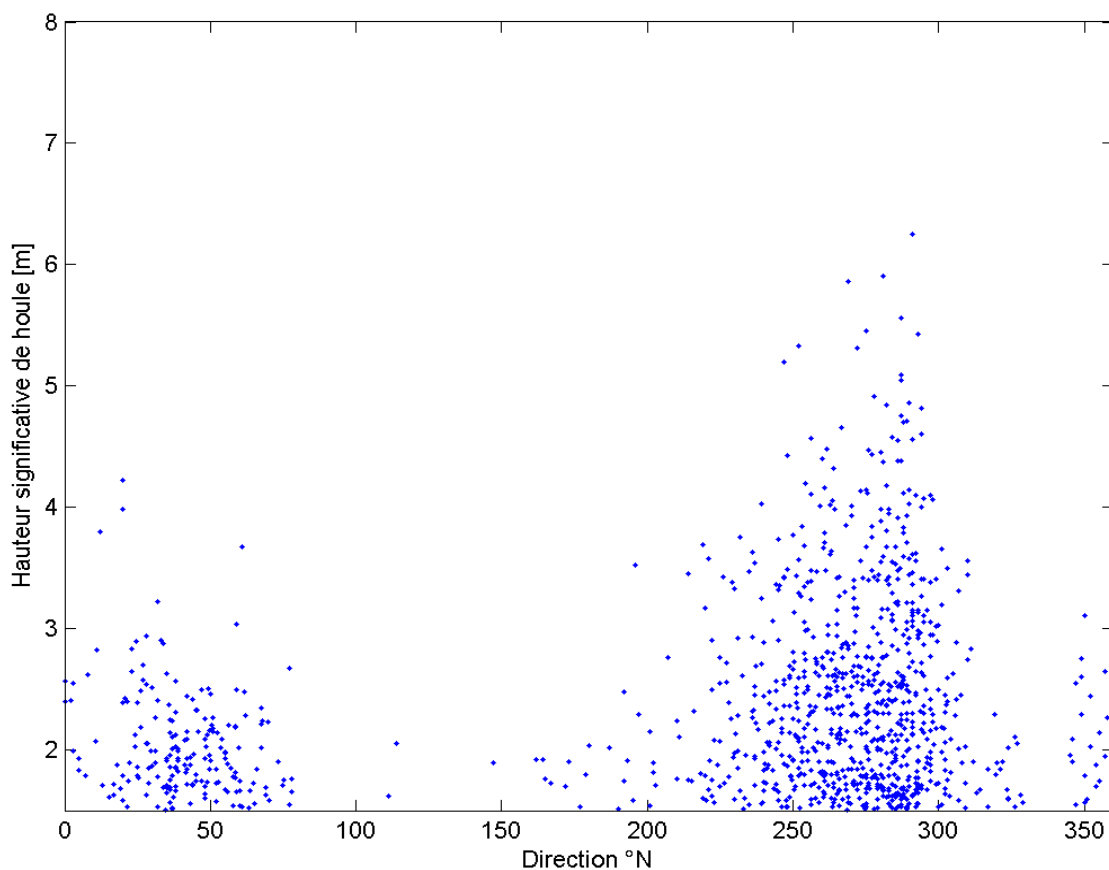


Figure 3.6: Directions des POT de la houle au point ANEMOC 2525.

3.3.1 La houle H_{m0}

3.3.1.1 Houles de secteur Ouest

Trois lois statistiques ont été testées pour l'analyse des conditions de houle de secteur Ouest : la loi de Pareto généralisée, la loi conditionnelle de Weibull et la loi exponentielle. Selon des critères statistiques (l'échantillonnage de la fonction moyenne d'excès, et l'analyse du comportement des paramètres de forme en fonction du nombre de POT retenus) la loi conditionnelle de Weibull (« *Conditional Weibull* » ou CWD) est ici la plus appropriée pour les houles extrêmes du secteur Ouest.

COAST2525

Cond. Weibull distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u)^\tau)$$

$$Returnlevel : X = u + (\frac{1}{\lambda} \log(\frac{T^{*k}}{A}))^{(1/\tau)}$$

$\tau = 1.21$
 $\lambda = 1.0948$
 $u = 2.4552$
 $A = 32.4107$
 $k = 328$

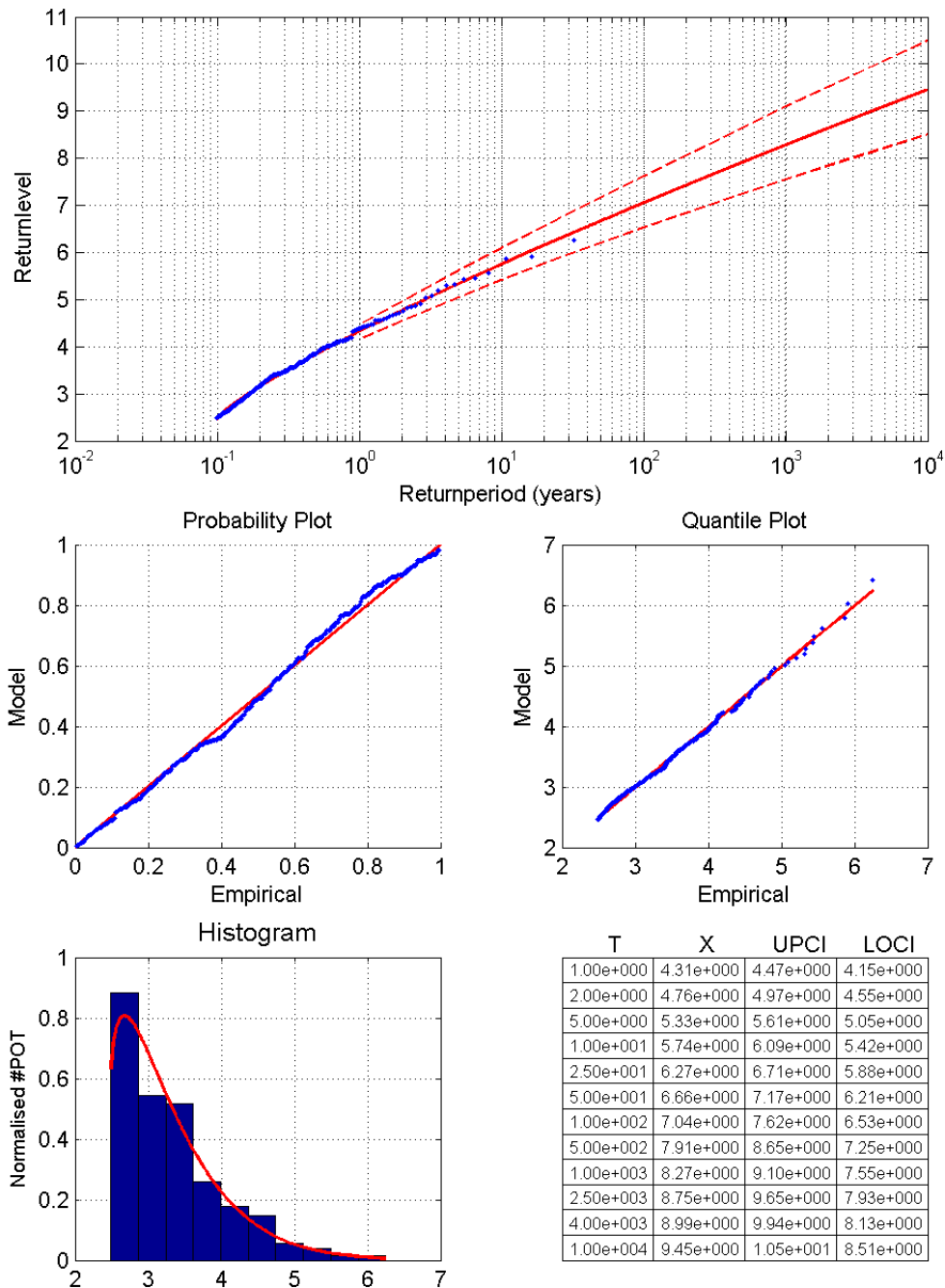


Figure 3.1: H_{m0} – Distribution des valeurs extrêmes (COAST 2525) – Secteur Ouest.

La figure Figure 3.1 montre en effet un bon ajustement visuel de la courbe Weibull aux valeurs extrêmes de la houle. Les valeurs POT se situent entre les bornes de l'intervalle de confiance de 95 % (lignes pointillées rouges). Les périodes de retour sont présentées dans le Tableau 3.1. Le seuil POT est figé à 2,45 m de hauteur de houle, afin d'obtenir un ajustement de courbe optimale avec une erreur quadratique minimale. Les autres distributions sont présentées en Annexe A.

Tableau 3.1: Période de retour de la houle H_{m0} (COAST 2525) – Secteur Ouest

T [années]	H_{m0} [m]	Intervalle de confiance (95 %)	
		Borne supérieure [m]	Borne inférieure [m]
1	4,31	4,47	4,15
2	4,76	4,97	4,55
5	5,33	5,61	5,05
10	5,74	6,09	5,42
25	6,27	6,71	5,88
50	6,66	7,17	6,21
100	7,04	7,62	6,53
500	7,91	8,65	7,25
1000	8,27	9,10	7,55

3.3.1.2 Secteur Nord Nord-est

La deuxième direction prédominante de houle est celle du Nord à Nord-est. Les tempêtes de cette direction sont néanmoins moins fréquentes et moins extrêmes que les tempêtes d'Ouest. Pour obtenir un nombre de valeurs POT représentatif, le seuil est abaissé par rapport aux conditions d'Ouest : $H_{m0, \text{seuil}} = 1,76$ m. Les quatre valeurs POT supérieures à ce seuil correspondent aux tempêtes suivantes :

- 05/01/1979 : $H_{m0} = 3,67$ m, Dir. : 61°N
- 10/12/1990 : $H_{m0} = 3,80$ m, Dir. : 12°N
- 20/11/1991 : $H_{m0} = 3,98$ m, Dir. : 20°N
- 20/02/1996 : $H_{m0} = 4,22$ m, Dir. : 20°N

La loi exponentielle, qui est un cas particulier de la loi générale de Pareto (GPD), est ici la loi la plus appropriée sur la base de critères statistiques (l'échantillonnage de la fonction excès, le comportement des paramètres de forme des lois en fonction du nombre de valeurs POT et une erreur quadratique minimale).

La figure Figure 3.2 montre en effet un bon ajustement visuel de la courbe exponentielle aux valeurs extrêmes de la houle de secteur Nord – Nord-Est, car elle parvient à prendre en compte les quatre valeurs POT majeures susmentionnées dans l'extrapolation des valeurs extrêmes. Les périodes de retour sont présentées dans le Tableau 3.2.

Les autres distributions sont présentées en Annexe A.

COAST2525

Exponential distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u))$$

$$\begin{aligned} \lambda &= 2.1012 \\ u &= 1.7602 \\ A &= 32.4107 \\ k &= 149 \end{aligned}$$

$$Returnlevel : X = u + \frac{1}{\lambda} \log\left(\frac{T+k}{A}\right)$$

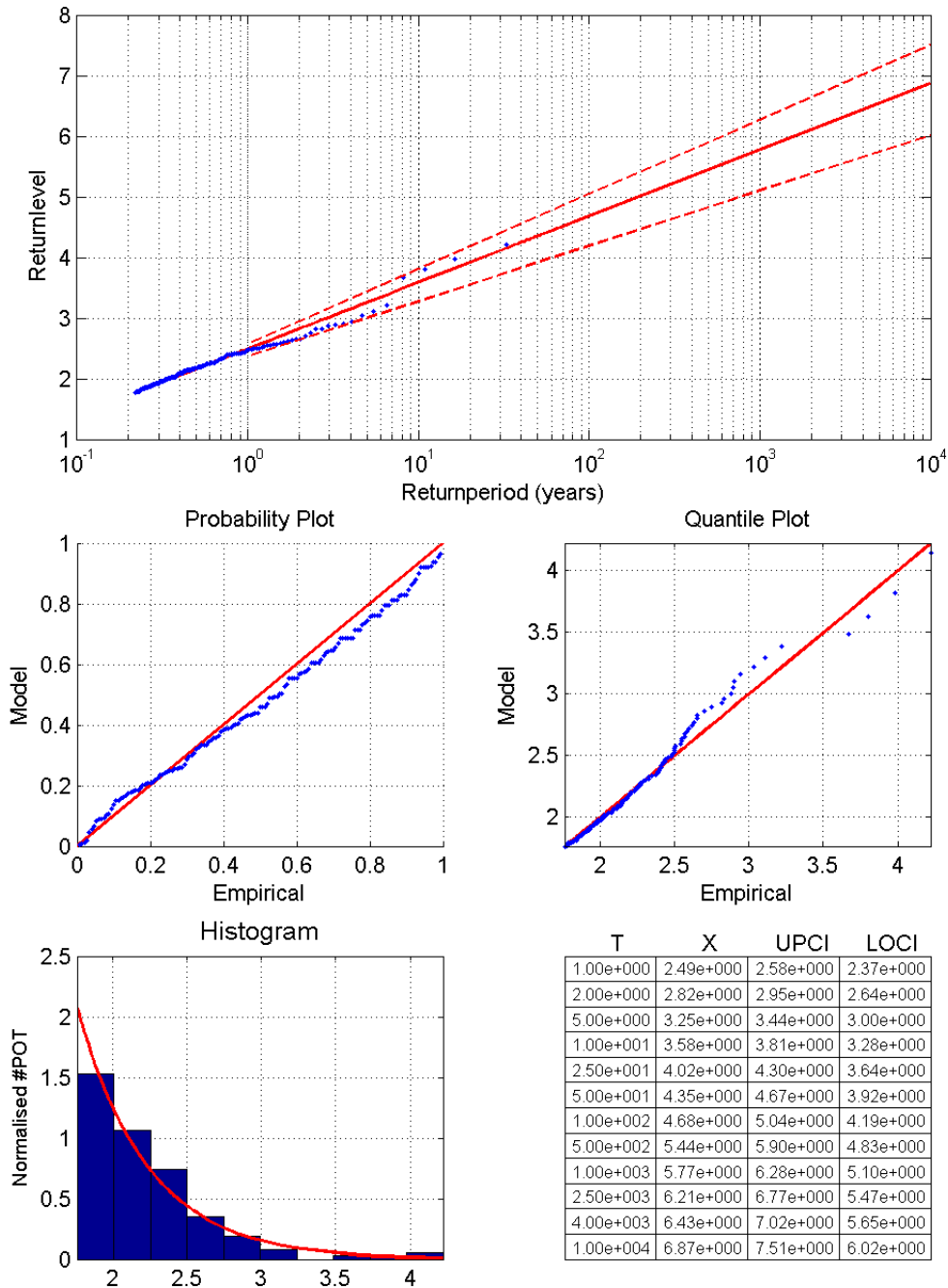


Figure 3.2: H_{m0} – Distribution des valeurs extrêmes (COAST 2525) – Secteur Nord – Nord-Est.

Tableau 3.2: Période de retour de la houle H_{m0} (COAST 2525) – Secteur Nord – Nord-Est.

T [années]	H_{m0} [m]	Intervalle de confiance (95 %)	
		Borne supérieure [m]	Borne inférieure [m]
1	2,49	2,58	2,37
2	2,82	2,95	2,64
5	3,25	3,44	3,00
10	3,58	3,81	3,28
25	4,02	4,3	3,64
50	4,35	4,67	3,92
100	4,68	5,04	4,19
500	5,44	5,90	4,83
1000	5,77	6,28	5,10

3.3.1.3 Houles omnidirectionnelles

La loi conditionnelle de Weibull (CWD) est ici la plus appropriée pour les houles extrêmes omnidirectionnelles, selon des critères statistiques (l'échantillonnage de la fonction excès, le comportement des paramètres de forme des lois en fonction du nombre de valeurs POT et une erreur quadratique minimale).

La figure Figure 3.3 montre clairement que la distribution représente bien le comportement des extrêmes de la houle. Les périodes de retour sont présentées dans le Tableau 3.3.

Les autres distributions sont présentées en Annexe A.

COAST2525

Cond. Weibull distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u)^\tau)$$

$$Returnlevel : X = u + (\frac{1}{\lambda} \log(\frac{T^{*k}}{A}))^{(1/\tau)}$$

$\tau = 1.229$
 $\lambda = 1.1438$
 $u = 2.4328$
 $A = 32.4107$
 $k = 389$

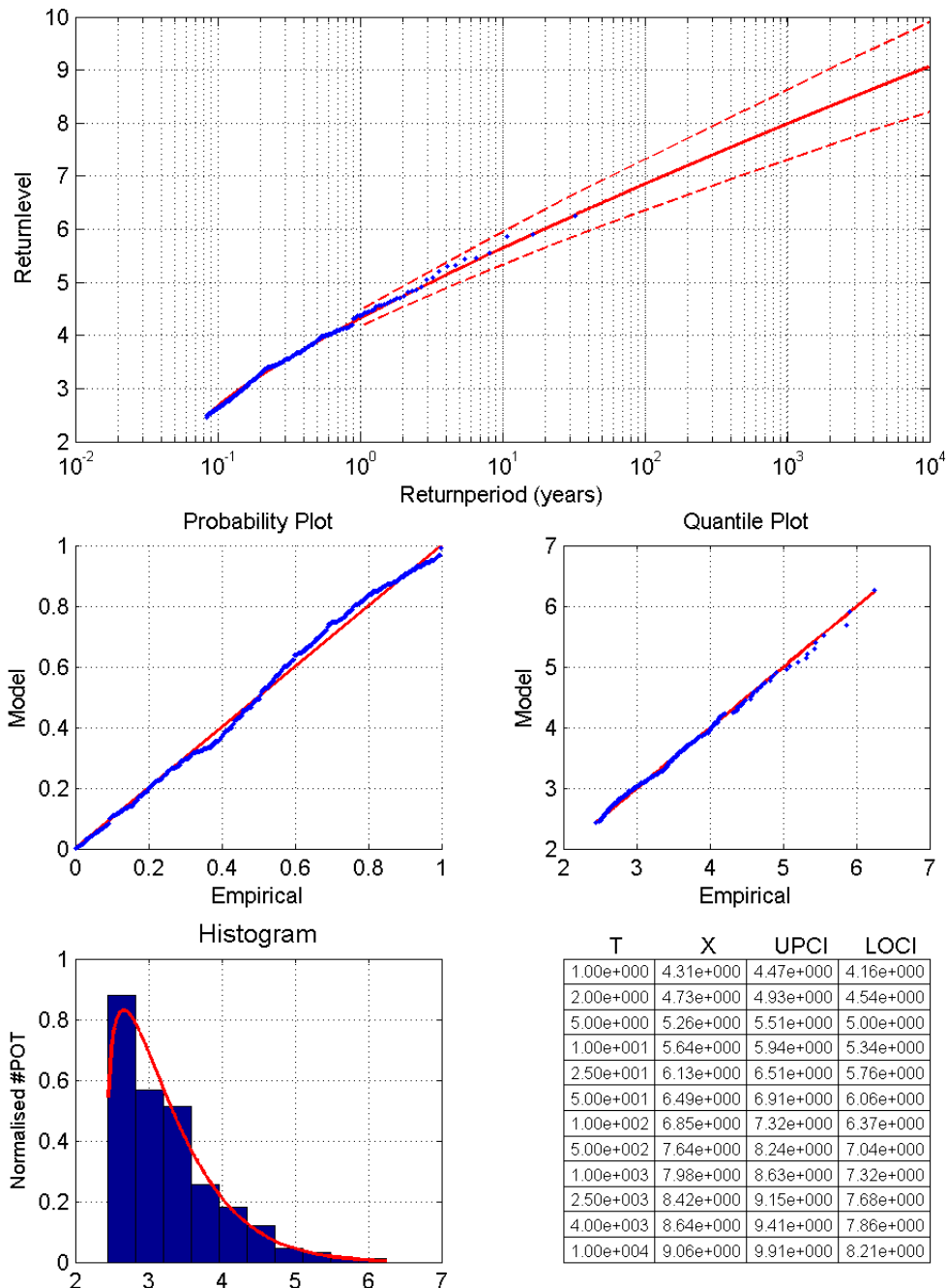


Figure 3.3: Hm0 – Distribution des valeurs extrêmes (COAST 2525) – Omnidirectionnel

Tableau 3.3: Période de retour de la houle H_{m0} (COAST 2525) – Omnidirectionnel.

T [années]	H_{m0} [m]	Intervalle de confiance (95 %)	
		Borne supérieure [m]	Borne inférieure [m]
1	4,31	4,47	4,16
2	4,73	4,93	4,54
5	5,26	5,51	5,00
10	5,64	5,94	5,34
25	6,13	6,51	5,76
50	6,49	6,91	6,06
100	6,85	7,32	6,37
500	7,64	8,24	7,04
1000	7,98	8,63	7,32

3.3.2 La surcote de pleine mer

3.3.2.1 Les données du Havre

Les valeurs extrêmes de surcote au Havre sont étudiées dans ce paragraphe. Les trois mêmes lois statistiques sont appliquées sur la suite temporelle de surcotes de pleine mer.

La valeur maximale de surcotes de pleine mer de 1,24 m (le 17/12/2004) est suivie de valeurs POT de l'ordre de 0,9 m. Cette différence sur une période assez courte (18 ans, enregistrement effectif d'un peu plus de 16 ans), se traduit par un point divergeant de la tendance des valeurs POT retenues dans le graphe supérieur de la figure Figure 3.4.

Il y a deux possibilités :

- l'événement de 2004 est une aberration dans les données disponibles (par exemple par une erreur de mesures du marégraphe),
- cet événement a une période de retour supérieure aux 16 ans enregistrés par le marégraphe. Il est dans les deux cas plus judicieux de faire abstraction de ce point divergeant pour l'ajustement de la courbe exponentielle. Ainsi, la période de retour de 1,24 m devient plus haute (ordre de 50 ans), et on évite de surestimer l'événement de 2004.

La distribution aléatoire (univariée) exponentielle des valeurs extrêmes représente le mieux la distribution des valeurs POT de surcote omnidirectionnelle au Havre. Le seuil retenu est de 0,27 m, et 216 valeurs POT sont sélectionnées. Plus de détails sur cette analyse sont résumés dans la fiche de la figure Figure 3.4. Les périodes de retour sont présentées dans le Tableau 3.4.

Les autres distributions sont présentées en Annexe A.

Le Havre

Exponential distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u))$$

$$Returnlevel : X = u + \frac{1}{\lambda} \log\left(\frac{T+k}{A}\right)$$

$\lambda = 6.5437$
 $u = 0.26768$
 $A = 16.6418$
 $k = 216$

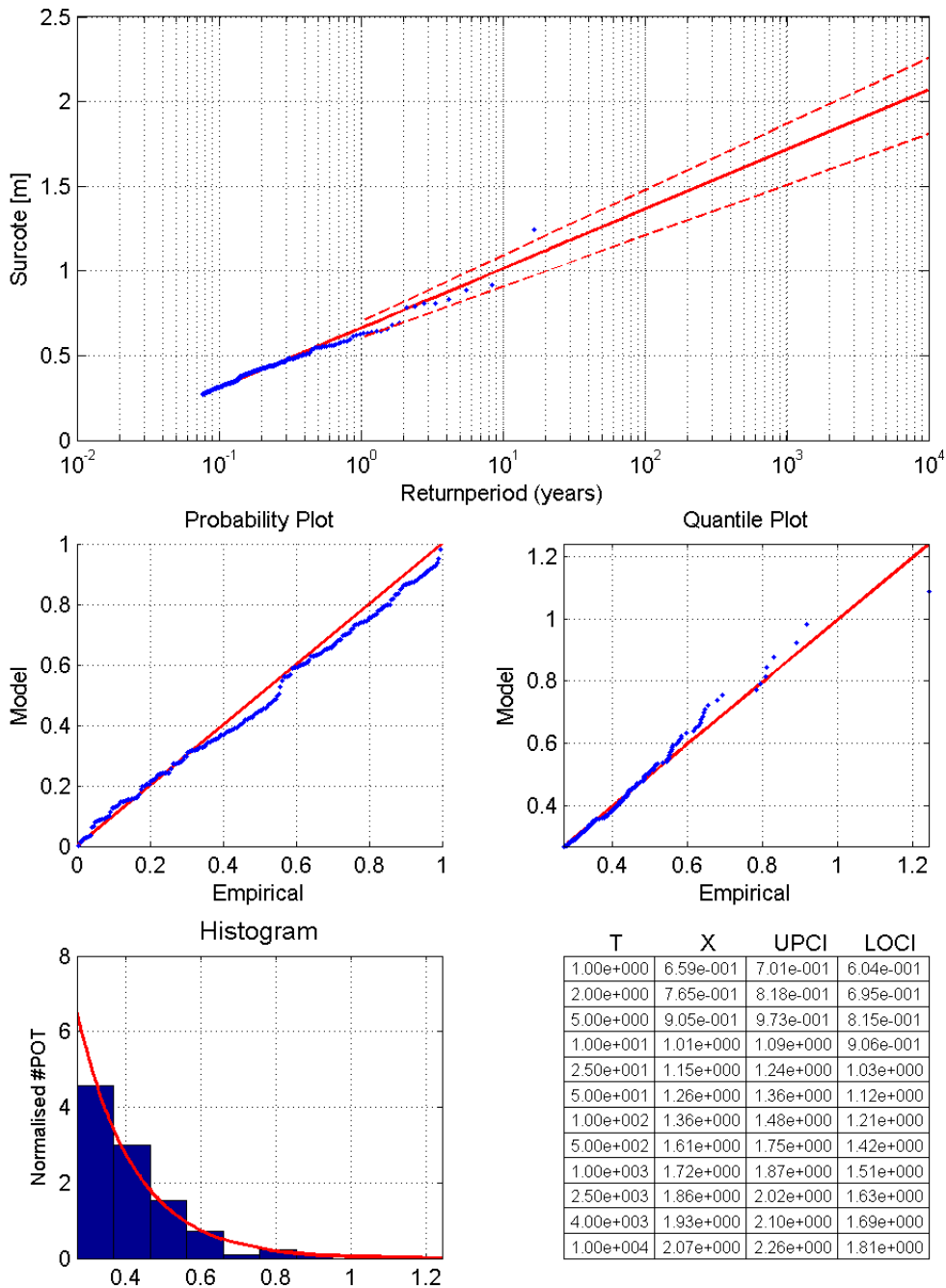


Figure 3.4: Surcote – Distribution des valeurs extrêmes (Le Havre) – Omnidirectionnel

Tableau 3.4: Période de retour de la surcote (Le Havre) – Omnidirectionnel

<i>T [années]</i>	<i>H_{mo} [m]</i>	<i>Intervalle de confiance (95 %)</i>	
		<i>Borne supérieure [m]</i>	<i>Borne inférieure [m]</i>
1	0,66	0,70	0,60
2	0,77	0,82	0,70
5	0,91	0,97	0,82
10	1,01	1,09	0,91
25	1,15	1,24	1,03
50	1,26	1,36	1,12
100	1,36	1,48	1,21
500	1,61	1,75	1,42
1000	1,72	1,87	1,51

3.3.2.2 Les données de Cherbourg

De l'analyse des paramètres ξ et τ des lois GPD et Weibull, il est observé que la loi qui se prête le mieux pour la distribution des surcotes à Cherbourg est la loi exponentielle. Plus de détails sur cette analyse sont résumés dans la fiche de la figure Figure 3.5. Les périodes de retour sont présentées dans le Tableau 3.5.

Les autres distributions sont présentées en Annexe A.

Cherbourg Omni

Exponential distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u))$$

$$Returnlevel : X = u + \frac{1}{\lambda} \log\left(\frac{T+k}{A}\right)$$

$\lambda = 10.3691$
 $u = 0.3172$
 $A = 18,2019$
 $k = 127$

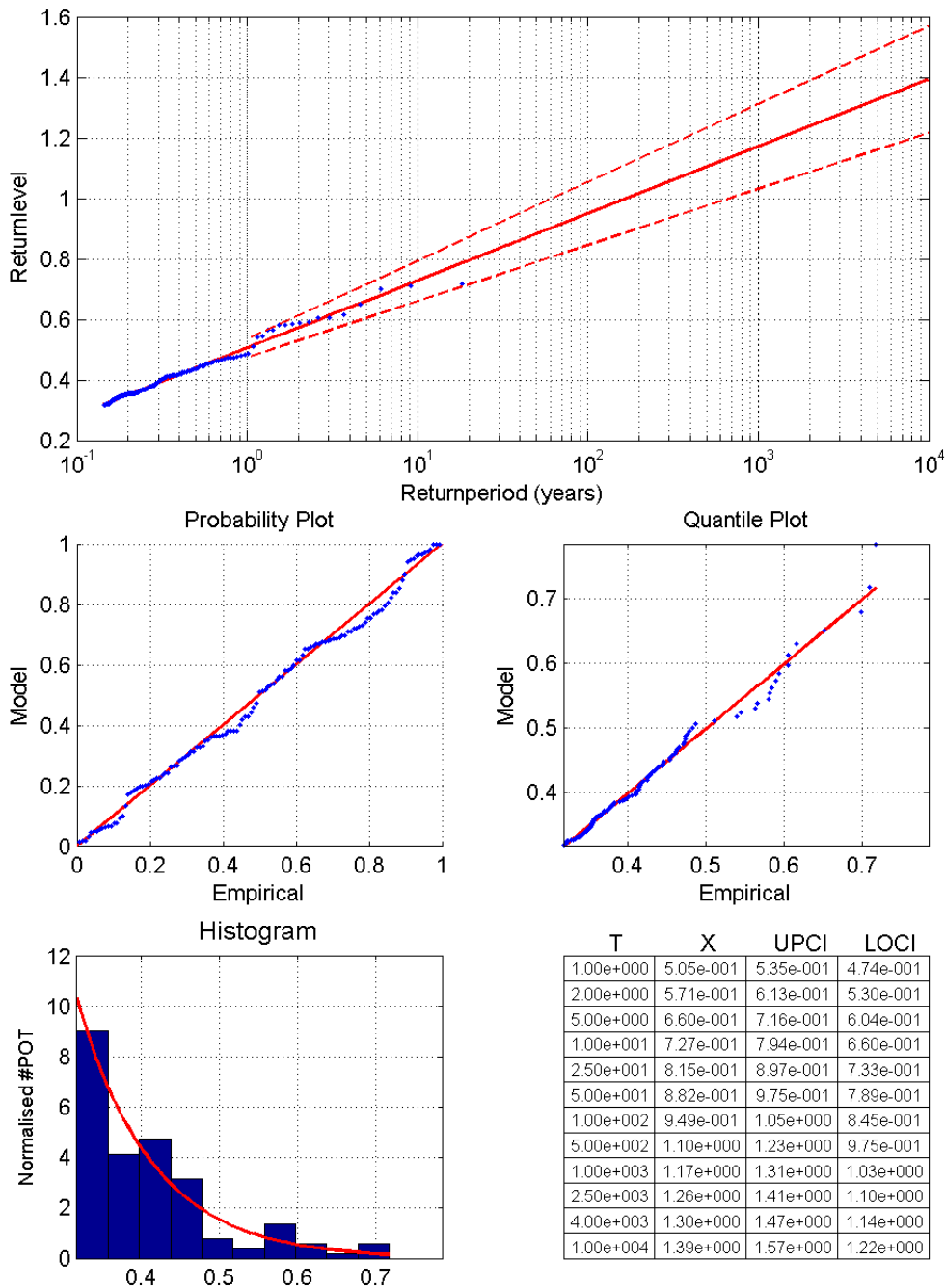


Figure 3.5: Surcote – Distribution des valeurs extrêmes (Cherbourg) – Omnidirectionnel.

Tableau 3.5: Période de retour de la surcote (Cherbourg) – Omnidirectionnel

T [années]	Surcote [m]	Intervalle de confiance (95 %)	
		Borne supérieure [m]	Borne inférieure [m]
1	0,50	0,54	0,47
2	0,57	0,61	0,53
5	0,66	0,72	0,6
10	0,73	0,79	0,66
25	0,81	0,90	0,73
50	0,88	0,97	0,79
100	0,95	1,05	0,85
500	1,10	1,23	0,98
1000	1,17	1,31	1,03

3.3.3 Validation des résultats

Les études disponibles ne différencient pas les secteurs directionnels. La présente section traite donc uniquement des valeurs extrêmes omnidirectionnelles de houle et de surcote.

3.3.3.1 La houle H_{m0}

Résultats omnidirectionnels

L'analyse omnidirectionnelle est présentée en §3.3.1.3, les résultats sont résumés dans le Tableau 3.6.

Tableau 3.6: Période de retour de la houle H_{m0} (COAST 2525) – Omnidirectionnelle

[années]	H_{m0} [m]	Intervalle de confiance (95 %)	
		Borne supérieure [m]	Borne inférieure [m]
1	4,31	4,47	4,16
10	5,64	5,94	5,34
50	6,49	6,91	6,06
100	6,85	7,32	6,37

Étude disponible

Le CETMEF a effectué une analyse statistique des valeurs extrêmes sur une sélection des points de sorties du modèle ANEMOC, dits « *points de niveau 1* ». Le point ANEMOC de niveau 1 le plus proche du point Coast 2525 et situé à une distance comparable de la côte est le point COAST 2865.

Les valeurs extrêmes des distributions établies par le CETMEF sont reprises dans les tableaux 3.7 et 3.8 (CETMEF / EDF R&D-LNHE 2010/2011). Les résultats ont été obtenues par des lois de Pareto généralisée (GPD) et exponentielle.

Tableau 3.7: Période de retour de la houle H_{m0} (COAST 2865) Loi GPD – Omnidirectionnel (CETMEF / EDF R&D-LNHE 2010/2011).

T [années]	H_{m0} [m] (estimation ponctuelle)	Intervalle de confiance (70 %)	
		Borne supérieure [m]	Borne inférieure [m]
1	4,22	4,10	4,34
10	5,43	5,17	5,69
50	6,09	5,60	6,59
100	6,34	5,72	6,96

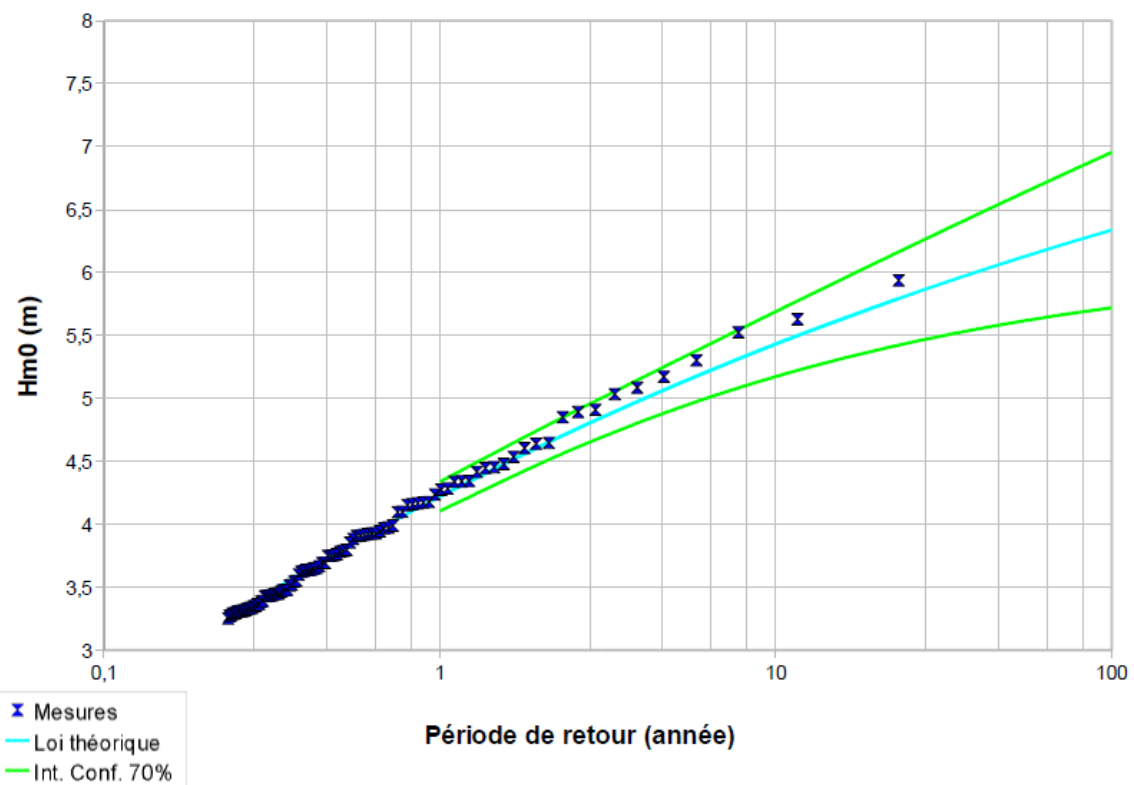


Figure 3.6: Distribution GPD des houles omnidirectionnelles au point COAST 2865.

Tableau 3.8: Période de retour de la houle H_{m0} (COAST 2865) Loi exponentielle – Omnidirectionnel (CETMEF / EDF R&D-LNHE 2010/2011).

T [années]	H_{m0} [m]	Intervalle de confiance (70 %)	
		Borne supérieure [m]	Borne inférieure [m]
1	4.19	4.07	4.31
10	5.68	5.42	5.94
50	6.72	6.35	7.08
100	7.16	6.75	7.58

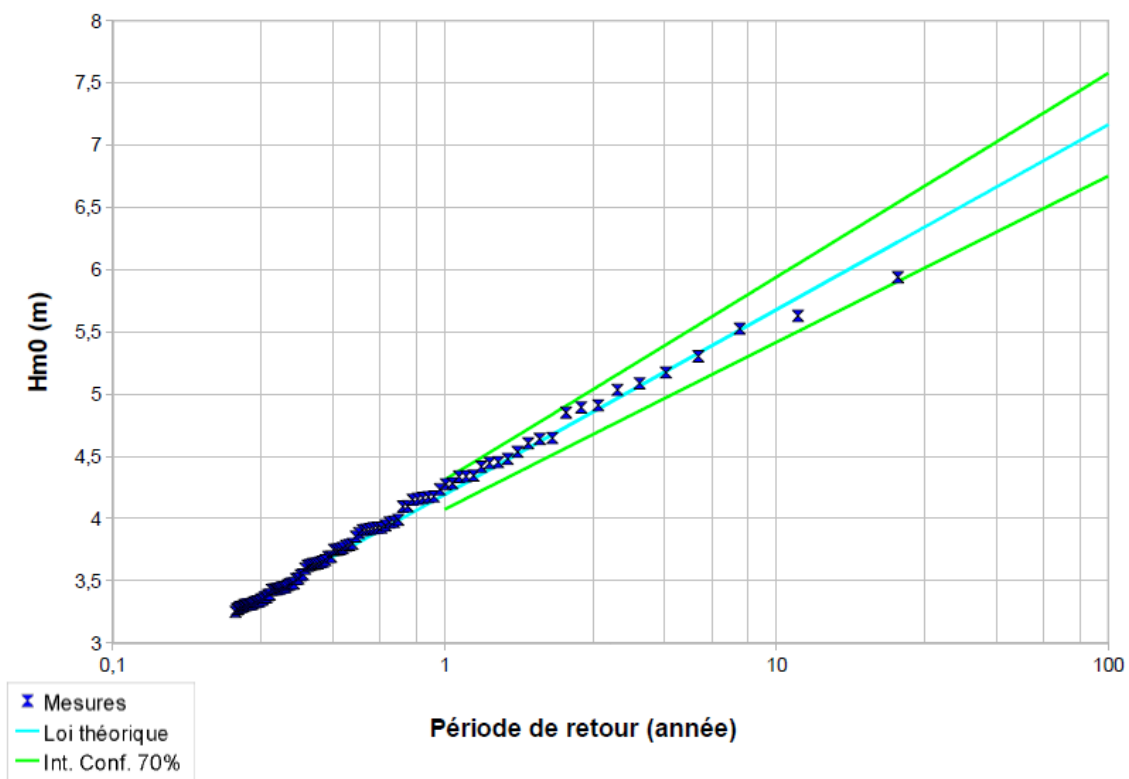


Figure 3.7: Distribution exponentielle des valeurs extrêmes de houles omnidirectionnelles au point COAST 2865.

L'intervalle de confiance définie par le CETMEF est de 70 % contre 95 % dans l'analyse du paragraphe 3.3.1.3, les valeurs comparées concernent donc les estimations ponctuelles des distributions.

Les ordres de grandeurs des valeurs des résultats de notre analyse univariée, sur une série temporelle élargie correspondent bien aux valeurs du CETMEF. Les hauteurs de houle de notre analyse sont de 2 à 8 % au-dessus des valeurs du CETMEF selon la loi GPD et de 3 % au-dessus à 4 % en dessous des valeurs de la loi exponentielle. La loi exponentielle est préférée à la loi GPD, qui sous-estime les valeurs POT supérieures à 4,7 m. La loi conditionnelle de Weibull (CWD), qui est appliquée au paragraphe 3.3.1.3, se trouve entre ces deux distributions et semble bien capter les valeurs POT de la suite temporelle des données COAST 2525-OCEANOR.

Les deux analyses statistiques correspondent bien, malgré la distance entre les points comparés et l'application d'une autre loi statistique.

3.3.3.2 La surcote de pleine mer

Les données du Havre

L'analyse omnidirectionnelle est présentée en § 3.3.2.1, les résultats sont résumés dans le Tableau 3.9.

Tableau 3.9: Période de retour de la surcote (Le Havre) – Omnidirectionnel

T [années]	Surcote [m]	Intervalle de confiance (95 %)	
		Borne supérieure [m]	Borne inférieure [m]
1	0,66	0,70	0,60
10	1,01	1,09	0,91
50	1,26	1,36	1,12
100	1,36	1,48	1,21

Ces résultats sont comparés à l'analyse statistique de la surcote au Havre effectuées par le SHOM/CETMEF (2012). Les surcotes extrêmes de cette étude sont présentées dans le Tableau 3.10.

La comparaison avec les résultats de notre analyse univariée, montre une bonne correspondance, ce qui donne confiance dans les résultats obtenus.

Tableau 3.10: Résultat de l'analyse de la surcote au Havre (SHOM/CETMEF, 2012).

T [années]	Surcote [m]
1	0,75
10	1,02
50	1,20
100	1,30

Les données de Cherbourg

Les résultats de l'analyse statistique de la surcote à Cherbourg faite par le SHOM/CETMEF (2012) sont présentés dans le Tableau 3.12.

Tableau 3.11: Période de retour de la surcote (Cherbourg) – Omnidirectionnel.

T [années]	Surcote [m]	Intervalle de confiance (95 %)	
		Borne supérieure [m]	Borne inférieure [m]
1	0,50	0,54	0,47
10	0,66	0,66	0,60
50	0,88	0,97	0,79
100	0,95	1,05	0,85

La comparaison avec les résultats de notre analyse univariée, montre une bonne correspondance, ce qui confirme les résultats obtenus.

Tableau 3.12: Résultat de l'analyse de la surcote à Cherbourg (SHOM/CETMEF, 2012).

<i>T [années]</i>	<i>Surcote [m]</i>
1	0,55
10	0,73
50	0,88
100	0,93

3.3.4 Le niveau d'eau : méthode de convolution

Le niveau d'eau de pleine mer est composé de la pleine mer prédite (astronomique) et de la surcote de pleine mer (météorologique, dont la probabilité est étudiée en § 3.3.2), alors que la statistique des paragraphes précédents traitait seulement des surcotes de pleine mer.

Pour trouver un niveau d'eau Z_0 d'une certaine période de retour, il est impossible de prendre la somme d'une surcote de la période de retour avec une quelconque pleine mer astronomique : on ne saurait dire de quelle probabilité est cette combinaison, et on perdrait donc l'information sur la période de retour de ce niveau d'eau. Une approche intégrant les deux phénomènes (astronomique et météorologique) s'impose.

Supposant que la marée haute prédite est indépendante de la surcote de pleine mer, les périodes de retour des niveaux d'eau extrêmes peuvent être déterminées à l'aide d'une méthode de convolution. Les valeurs obtenues sont seulement valables à partir de la combinaison de la plus haute marée astronomique et le seuil POT des surcotes de pleine mer. Une loi empirique permet cependant d'estimer les périodes de retour des niveaux plus bas. Cette extrapolation empirique n'est pas appliquée ici, car la méthode de convolution sera utilisée pour contrôler les résultats du modèle de copule (voir paragraphe suivant).

Le couplage de la marée astronomique à la surcote météorologique de pleine mer est fait par une fonction de convolution présentée ci-dessous.

$$p(h > h_1) = \int p(h_a) \cdot f(s > (h_1 - h_a)) dh_a$$

h_1 : niveau d'eau dont on cherche la probabilité

h_a : niveau de la marée astronomique

s : surcote météorologique

$p(h_a)$: densité de probabilité de h_a

$f(s)$: loi de probabilité de la surcote météorologique (Blanckaert, 2005 ; Kergadallan, 2013)

La fonction de densité de probabilité de la marée astronomique est établie à partir de toutes les hautes mers disponibles (environ 18 ans de données). Les composantes astronomiques sont déterminées par an avec une correction nodale selon Pawlowicz. L'analyse est faite sur l'ensemble des 18 ans de points de mesures, pour augmenter le nombre de points considérés.

3.4. Copule

Les distributions uni-variées de chaque paramètre ont été étudiées au chapitre précédent (voir chapitre 3.3, Analyse des variables aléatoires marginales). Dans le présent chapitre, on s'intéresse à la concomitance des houles et niveaux extrêmes. D'abord le rapport entre les deux est étudié. Pour les conditions d'Ouest une statistique dite « bi-variée » (deux variables) est effectuée sur les surcotes (atmosphériques) de pleine mer et les houles extrêmes, à l'aide d'une « copule ». Les surcotes de pleine mer se superposent à une marée haute, et résultent ainsi en un « niveaux d'eau » Z_0 . Cette traduction en niveaux d'eau est faite à l'aide de la méthode de convolution. Pour les conditions du NNE on ne peut pas établir une distribution bi-variée des houles et surcotes, car la relation entre les deux est trop faible. Les houles extrêmes sont donc combinées avec les pleines mers astronomiques (avec une méthode que s'inspire de la méthode de convolution), permettant ainsi d'établir la distribution des houles extrêmes du NNE concomitantes avec une pleine mer astronomique.

Le but de l'analyse statistique décrite dans ce chapitre est d'établir les courbes d'iso-probabilité de période de retour de 10 ans, 100 ans et 1000 ans (exemple : figure 3.12). Ces courbes relient tous les points ayant la même probabilité d'occurrence, et donc la même période de retour, dans l'espace $H_{m0} - Z_0$.

Une sélection d'une dizaine de points est faite sur ces courbes. Ces points correspondent aux couples T10, T100 et T1000 retenus et pour lesquelles les phénomènes sont étudiés dans le cadre du PPRL et du TRI.

Ces couples (H_{m0}, Z_0) correspondent aux conditions de hauteurs de houle au large et de niveaux d'eau au Havre.

Ces conditions de houle au large seront transformées en conditions de houle en bordure littorale à l'aide d'un modèle de houle (voir rapport AGR & IMDC, 2015). Les niveaux d'eau au Havre de chaque couple sont transformés en niveaux d'eau le long des côtes de Calvados selon une démarche décrite au chapitre 3.5..

3.4.1 Introduction

La méthodologie PPRL de la définition des conditions hydrodynamiques à étudier, recommande une analyse de la concomitance des différents processus. Dans le cadre de la présente étude, la concomitance des houles extrêmes (tempêtes de mer) liées à une surcote importante est analysée. Cette approche statistique de deux paramètres ensemble est appelée une approche « bivariée » (au lieu de l'approche « univariée » des paragraphes précédents, n'analysant qu'un paramètre à la fois). Par cette statistique bivariée, on évite de surestimer les forçages hydrodynamiques, en liant une tempête de houle centennale à une surcote centennale. En effet, la probabilité que ces deux phénomènes se produisent ensemble, peut être inférieure à 1 sur 100 (centennal).

La statistique « bivariée » est calculée avec une « copule ». D'abord, des phénomènes de concomitance sont recherchés dans les valeurs POT : les valeurs de houle extrêmes qui se trouvent dans un certain intervalle autour des surcotes extrêmes sont couplées dans un phénomène de concomitance. Ensuite, les distributions univariées des deux paramètres sont couplées dans la copule, et appliquées sur ces couples POT (H_{m0}, Z_0) ⁴, permettant la définition de la distribution bivariée. Enfin, des couples d'isoprobabilité (période de retour de 10, 100 et 1000 ans) sont obtenus à partir de la distribution des valeurs extrêmes bivariées (H_{m0}, Z_0)

4 Les surcotes de pleine mer sont converties en niveau d'eau total Z_0 par la méthode de convolution, décrite au chapitre 3.3.4.

3.4.2 Concomitance de surcotes au Havre avec des houles d'Ouest

3.4.2.1 Copule Surcote – H_{m0}

Les distributions univariées sont combinées dans une copule en respectant la dépendance statistique entre les différentes variables. Pour cela, on fait usage de la théorie des copules des valeurs extrêmes. La copule la plus appropriée pour des valeurs extrêmes est la copule de Gumbel.

La distribution aléatoire bivariée définit la probabilité de chaque couple H_{m0} – surcote. Pour l'ajustement de la copule, des couples de houle et de surcote extrême se produisant pendant une même tempête sont utilisées (figure Figure 3.8). Ce couplage des POT concomitants est fait automatiquement dans un intervalle maximale de 48 h. Ensuite, toutes les valeurs POT sont contrôlées manuellement.

Parmi les 254 valeurs POT de la surcote du Havre, 106 valeurs ont pu être couplées à des valeurs POT de houle. En médiane, les hauteurs de houle significatives extrêmes ont lieu 1,6 heures avant les surcotes extrêmes. Il n'y a pas de corrélation entre ce décalage entre les extrêmes et leurs valeurs absolues. Malgré ce décalage, les houles et les surcotes extrêmes seront appliquées simultanément dans les modèles numériques (car les modèles numériques sont stationnaires). C'est une approche sécuritaire. Le domaine bidimensionnel des valeurs extrêmes de houle–surcote, peut être divisé en trois zones (figure Figure 3.9a, figure Figure 3.10) qui contiennent respectivement :

- les extrêmes de houle et surcote simultanées (« Area 1 ») ;
- les valeurs de houle extrêmes couplées à des surcotes plus fréquentes (« Area 2 ») ;
- la zone contenant les surcotes extrêmes couplées à des houles plus fréquentes (« Area 3 »).

La copule est valable dans la zone 1. La probabilité d'occurrence de cette zone est beaucoup plus grande que celle des deux autres zones, du fait de la forte corrélation entre la houle et les surcotes. L'isoligne⁵ d'une période de retour fixée (p.e. T100) aura une probabilité d'occurrence plus faible en zones 2 et 3.

Pour les événements des zones 2 et 3 de la figure Figure 3.9, correspondant aux zones univariées où l'autre des deux paramètres n'est pas extrême, on retient la valeur POT pour ce paramètre non extrême. Ceci est une approche prudente (sous-estimation de la période de retour de l'événement). La probabilité d'occurrence des événements dans ces deux zones résulte de la distribution univariée du paramètre extrême, qui est factorisée par rapport à la fréquence d'occurrence de cette zone (zone 2 ou zone 3).

La copule Gumbel est décrite par la fonction suivante :

$$C(u, v) = \exp\left[-\left((-\ln(u))^\alpha + (-\ln(v))^\alpha\right)^{\frac{1}{\alpha}}\right]$$

$$\alpha \in [1, \infty]$$

α : paramètre de la copule

$$\alpha = 1,1011$$

u, v : fréquence d'excès des distributions univariées

Les couples utilisés pour la calibration de la copule sont présentés en Figure 3.8.

⁵ *Isoligne ou ligne d'iso-probabilité* : une courbe dans le domaine bidimensionnel (H_{m0}, Z_0) qui lie tous les points d'une même probabilité. Les couples finaux T10, T100 et T1000 sont donc des points sélectionnés sur les isolignes T10, T100 et T1000 (resp.).

La corrélation est testée au moyen du « test p » de Pearson, Spearman et Kendal. Si la valeur de p est inférieure à une marge prédéterminée (0,05), l'hypothèse nulle d'indépendance peut être écartée. Les couples associés aux valeurs copules sont présentés dans les figures Figure 3.10 et Figure 3.11. Dans le cas de la copule calculée sur les surcotes et houles Ouest, le test p indique une dépendance des deux paramètres (Tableau 3.13).

Tableau 3.13: Test de corrélation (Houles Coast-2525 ; Surcote Cherbourg).

	<i>Rho/Tau</i>	<i>Test p (corrélation)</i>
<i>Pearson</i>	0,38491	4,6205e-005
<i>Kendall</i>	0,26391	6,2031e-005
<i>Spearman</i>	0,38191	5,3545e-005

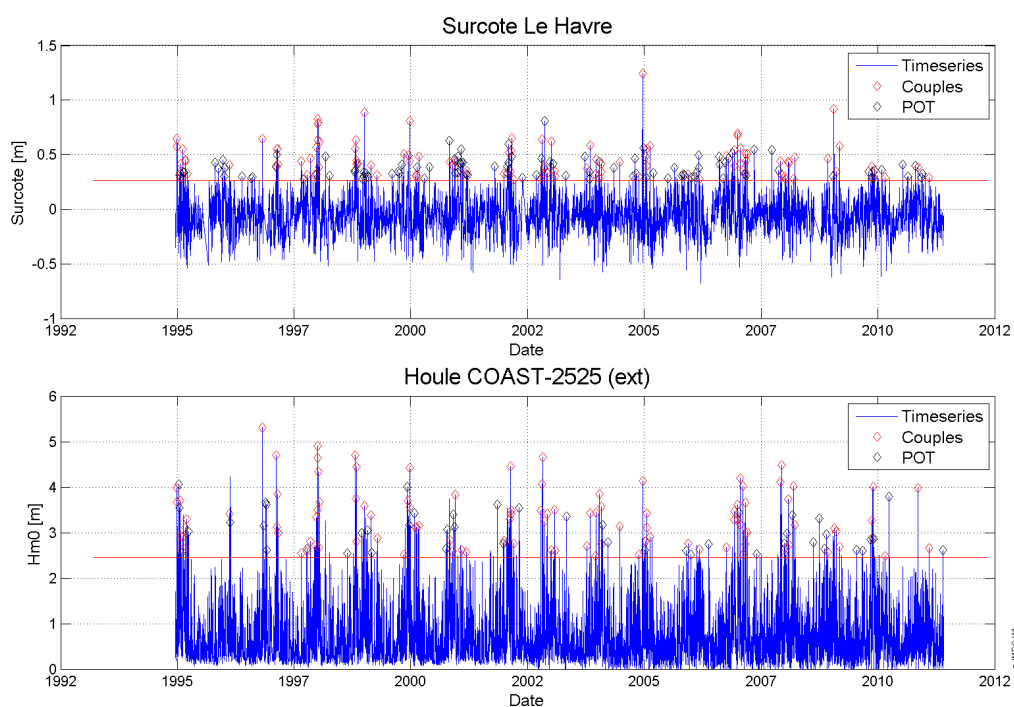


Figure 3.8: Couples H_{m0} (en haut) – Surcote (en bas) avec la série temporelle.

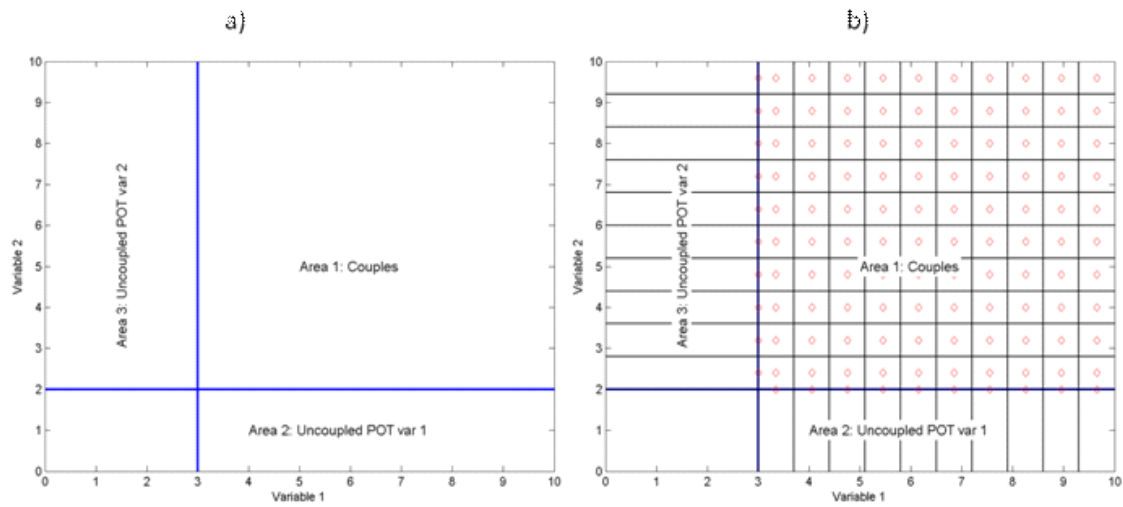


Figure 3.9: Espace multivarié divisé en trois domaines extrêmes.

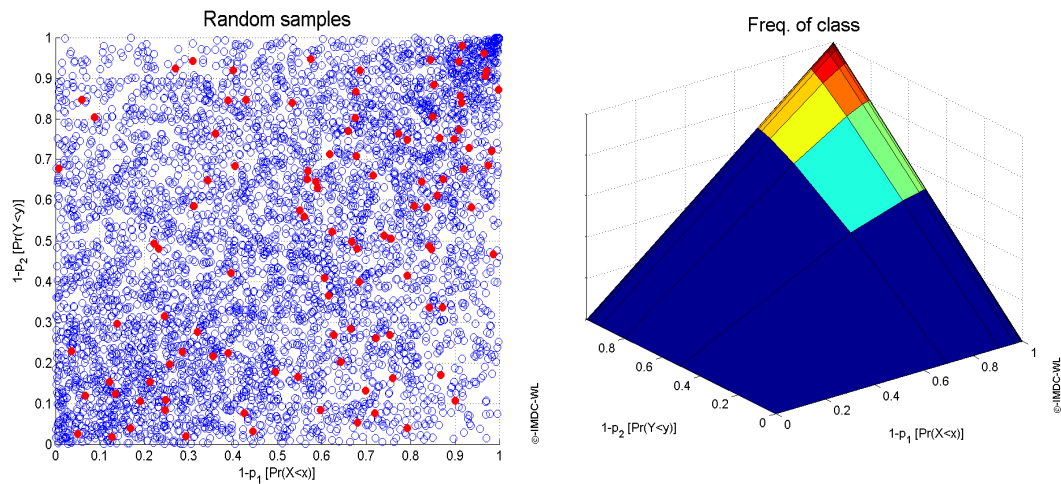


Figure 3.10: à gauche : les valeurs de u, v des couples H_{m_0} – surcote (en rouge) avec les échantillons stratifiés de la copule Gumbel. À droite : la copule de Gumbel en fonction de u et v .

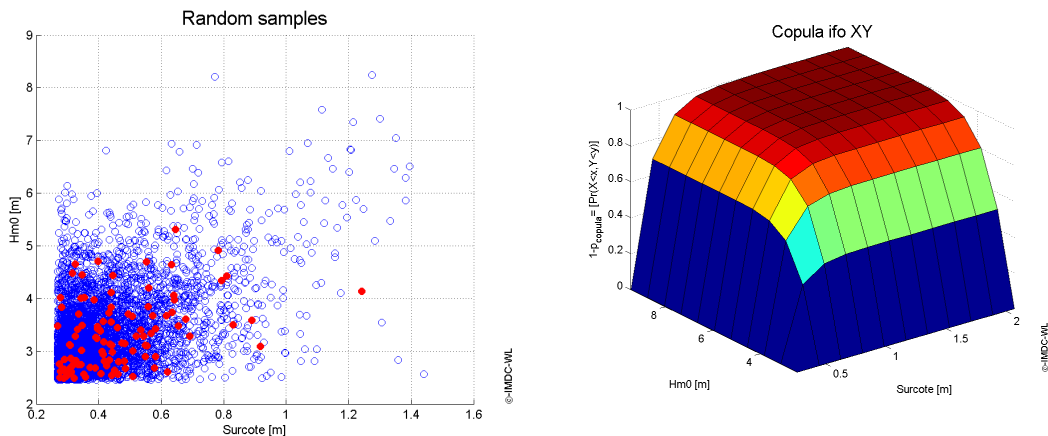


Figure 3.11: à gauche : les valeurs de X, Y des couples H_{m0} – surcote (en rouge) avec les échantillons stratifiés de la copule Gumbel. À droite : copule de Gumbel pour les valeurs extrêmes de la houle et de la surcote.

3.4.2.2 Copule Niveau marin – H_{m0} : stratification du domaine H_{m0} - Z_0

On peut ajouter un troisième paramètre à la copule bivariée de H_{m0} -surcote, en appliquant la méthode de convolution. La convolution est utilisée comme contrôle sur la méthode de stratification.

Le domaine des copules est stratifié sur la base des probabilités d’occurrence (voir par exemple figure Figure 3.9b). La probabilité d’occurrence de chaque strate sur une période d’un an est calculée comme suit :

$$p(i, j) = \frac{k_1}{A_1} (C(i+1, j+1) - C(i, j+1) - C(i+1, j) + C(i, j))$$

C : probabilité de dépassement obtenu de la copule

k : nombre de couples de la strate

A : nombre d’années couvertes par la base de données

Les strates sont caractérisées par les valeurs médianes des deux paramètres. Dans ce cas particulier, le domaine de la copule est stratifié en $100 \times 100 = 10\,000$ strates. L’amplitude des strates et les bornes supérieures du domaine de stratification par période de retour sont montées dans le tableau suivant.

La distribution empirique des pleines mers astronomiques est également stratifiée en 100 strates. Supposant que la surcote météorologique et la marée astronomique sont indépendantes, la probabilité conjointe d’occurrence d’une strate 3D (H_{m0} , surcote de pleine mer et pleine mer astronomique) peut être calculée selon la formule suivante :

$$P(H_{m0}, surcote, PM_{astro}) = P(H_{m0}, surcote) \times P(PM_{astro})$$

Les strates de la copule peuvent être combinées avec celles des pleines mers astronomiques, ce qui produit un million de couples ($10\,000 \times 100$). En additionnant les pleines mers et les surcotes, on obtient des strates de niveau d’eau total (Z_0) et de hauteur de houle (H_{m0}).

La probabilité de dépassement d’une strate pareille ($H_{m0} - Z_0$) est égale à la somme de toutes les

probabilités d'occurrence des strates avec un H_{m0} et un niveau d'eau supérieur. La période de retour d'une strate $H_{m0} - Z_0$ est l'inverse de cette probabilité de dépassement. Puisqu'en théorie le nombre de strates est illimité vers le haut (borne supérieure vers l'infini), mais qu'en pratique, nous avons traité un nombre défini de strates (voir tableau ci-dessus), la probabilité de dépassement calculée comme ci-dessus est donc une (légère) sous-estimation. En prenant une borne supérieure du domaine de stratification assez haute, cette sous-estimation devient négligeable.

La ligne continue dans la figure Figure 3.12 indique les points avec une période de retour constante de 100 ans, et est appelée ci-après courbe isoprobabilité. La ligne discontinue indique l'intervalle de confiance à 95 %. Compte tenu de la discrétisation de la méthode de stratification, on se permet de petites déviations positives (donc prudentes) de la période de retour afin d'établir la courbe d'isoprobabilité (sélection de points discrets).

Les véritables périodes de retour des points retenus de la courbe isoprobabilité sont listées dans le Tableau 3.20 et Tableau 3.14.

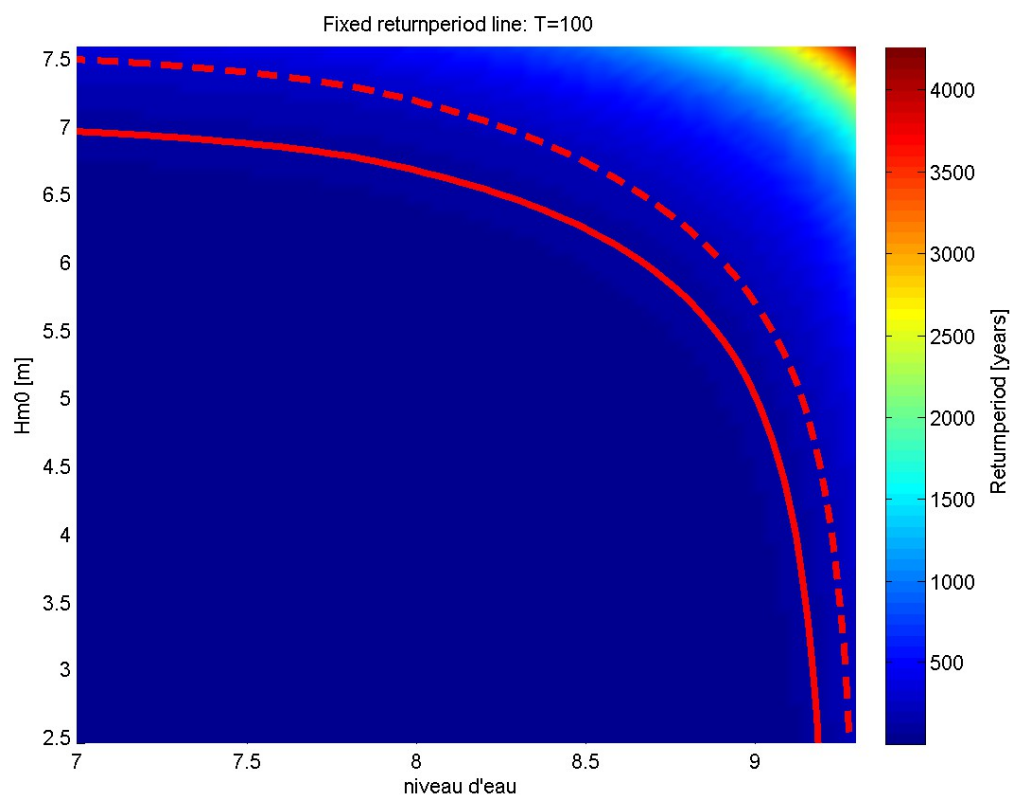


Figure 3.12: Courbe d'iso-probabilité de T100 ans pour le secteur Ouest (hauteur de houle [m] – niveau d'eau [m CM]).

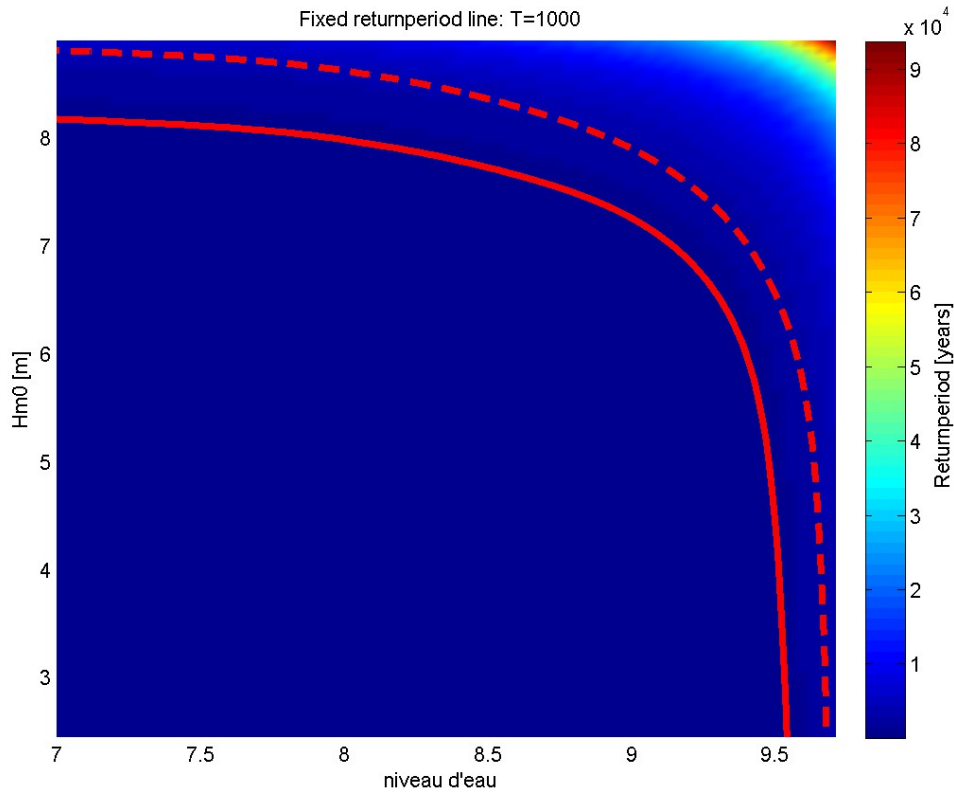


Figure 3.13: Courbe d'iso-probabilité de T1000 ans pour le secteur Ouest (hauteur de houle [m] – niveau d'eau [m CM]).

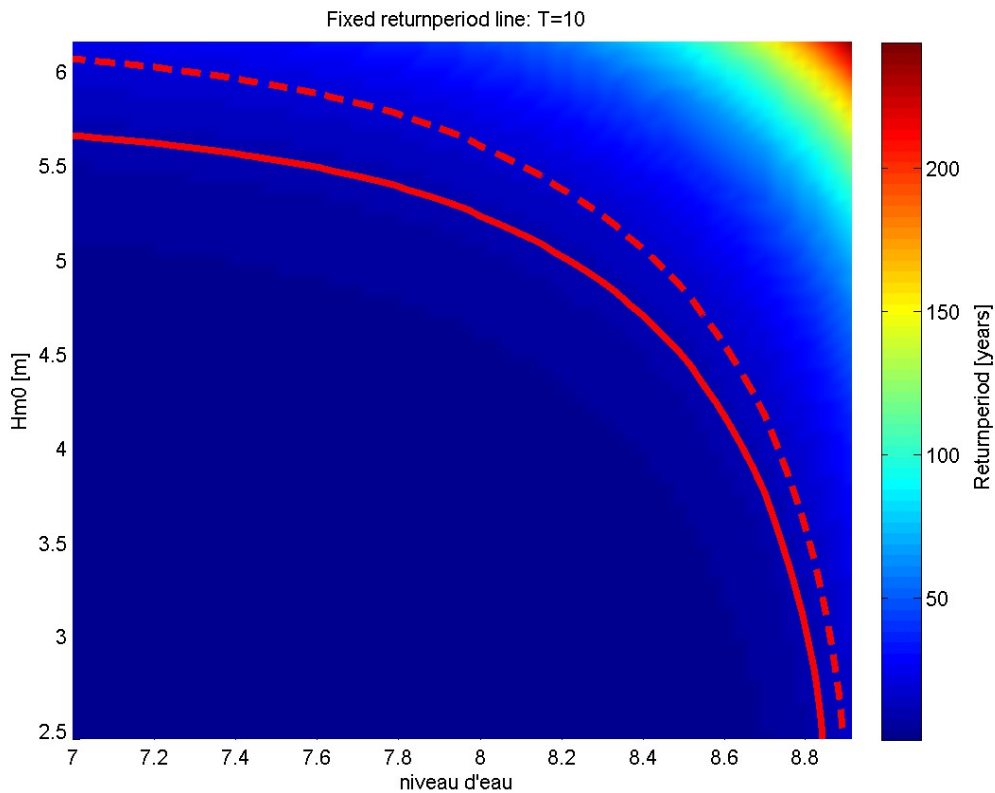


Figure 3.14: Courbe d'iso-probabilité de T10 ans pour le secteur Ouest (hauteur de houle [m] – niveau d'eau [m CM]).

Tableau 3.14: Sélection des couples H_{m0} et niveau d'eau pour la période de retour T100 pour le secteur Ouest.

Couple	Niveau d'eau [m CM]	Niveau d'eau [m IGN69]	H_{m0} Ouest [m]	Période de retour [ans]
1	7,04	2,66	6,95	100,98
2	7,42	3,05	6,89	101,62
3	7,85	3,47	6,76	102,96
4	8,24	3,86	6,51	102,72
5	8,48	4,11	6,26	100,85
6	8,84	4,46	5,64	102,09
7	9,05	4,67	4,70	100,82
8	9,12	4,74	4,02	101,26
9	9,16	4,78	3,39	101,21
10	9,19	4,81	2,83	109,99

Tableau 3.15: Sélection des couples H_{m0} et niveau d'eau pour la période de retour T100 – Intervalle 95 % pour le secteur Ouest.

Couple	Niveau d'eau 95 % [m CM]	Niveau d'eau 95 % [m IGN69]	H_{m0} 95 % [m]	Période de retour 95 % [ans]
1	7,25	2,87	7,45	101,50
2	7,53	3,15	7,39	101,93
3	7,85	3,47	7,26	100,24
4	8,24	3,86	7,01	102,54
5	8,59	4,21	6,64	104,63
6	8,87	4,50	6,07	100,67
7	9,09	4,71	5,33	100,28
8	9,19	4,81	4,51	100,79
9	9,23	4,85	4,02	100,88
10	9,26	4,88	3,20	100,72

Tableau 3.16: Sélection des couples H_{m0} et Niveau d'eau pour la période de retour T10 pour le secteur Ouest.

Couple	Niveau d'eau [m CM]	Niveau d'eau [m IGN69]	H_{m0} Ouest [m]	Période de retour [ans]
1	7,00	2,62	5,65	10,04
2	7,27	2,89	5,60	10,10
3	7,61	3,23	5,49	10,09
4	7,91	3,53	5,32	10,26
5	8,24	3,86	4,99	10,52

Couple	Niveau d'eau [m CM]	Niveau d'eau [m IGN69]	H_{m0} Ouest [m]	Période de retour [ans]
6	8,48	4,11	4,55	10,51
7	8,67	4,29	3,94	10,49
8	8,79	4,41	3,12	10,00
9	8,85	4,47	2,46	10,78

Tableau 3.17: Sélection des couples H_{m0} et Niveau d'eau pour la période de retour T10 – Intervalle 95 % pour le secteur Ouest.

Couple	Niveau d'eau 95 % [m CM]	Niveau d'eau 95 % [m IGN69]	H_{m0} 95 % [m]	Période de retour 95 % [ans]
1	7,00	2,62	6,09	10,58
2	7,33	2,96	5,98	10,12
3	7,61	3,23	5,87	10,01
4	7,97	3,59	5,65	10,30
5	8,27	3,89	5,27	10,02
6	8,55	4,17	4,71	10,20
7	8,70	4,32	4,16	10,00
8	8,85	4,47	3,12	10,15
9	8,88	4,50	2,68	10,02

Tableau 3.18: Sélection des couples H_{m0} et Niveau d'eau pour la période de retour T1000 pour le secteur Ouest.

Couple	Niveau d'eau [m CM]	Niveau d'eau [m IGN69]	H_{m0} Ouest [m]	Période de retour [ans]
1	7,00	2,62	8,18	1038,29
2	7,44	3,07	8,11	1002,21
3	8,01	3,63	7,97	1005,21
4	8,45	4,08	7,76	1022,29
5	8,82	4,44	7,47	1018,73
6	9,22	4,84	6,84	1057,96
7	9,42	5,05	5,78	1019,33
8	9,51	5,13	4,22	1011,74
9	9,55	5,17	2,46	1053,88

Tableau 3.19: Sélection des couples H_{m0} et Niveau d'eau pour la période de retour T1000 – Intervalle 95 % pour le secteur Ouest.

Couple	Niveau d'eau 95 % [m CM]	Niveau d'eau 95 % [m IGN69]	H_{m0} 95 % [m]	Période de retour 95 % [ans]
1	7,00	2,62	8,82	1051,08
2	7,48	3,11	8,74	1015,87
3	8,01	3,63	8,60	1000,06
4	8,58	4,20	8,32	1049,54
5	8,90	4,52	8,04	1046,87
6	9,30	4,93	7,33	1025,83
7	9,55	5,17	6,27	1031,78
8	9,63	5,25	5,14	1002,45
9	9,67	5,29	3,30	1000,57

3.4.2.3 Marges d'incertitude sur les copules

L'analyse statistique des couples $H_{m0} - Z_0$ est effectuée sur la base de suites temporelles relativement courtes, par rapport au domaine d'extrapolation (100 ans). Ces périodes courtes engendrent des incertitudes d'échantillonnage et d'extrapolation sur les couples retenus.

Afin de quantifier une marge d'incertitude de 95 %, un ré-échantillonnage « bootstrap » est effectué pour les houles ainsi que les niveaux d'eau. Pour chaque série de valeurs POT une distribution univariée est définie. Toutes ces valeurs pourraient être combinées, afin de calibrer la copule, ce qui exigerait un temps de calcul trop long. Une méthode alternative consiste en la sélection de 50 distributions par paramètre (H_{m0} et Z_0). Ces distributions sont utilisées pour le calage de 2 500 copules. La stratification de cette série de copules dans les mêmes strates que la copule originelle, résulte en 2 500 occurrences par strates. En triant ces strates, une marge d'incertitude de 95 % est définie pour les strates $H_{m0} - Z_0$. Ensuite, une convolution par stratification des niveaux hauts astronomiques est effectuée, de manière analogue à celle des fréquences d'occurrence des strates $H_{m0} - Z_0$. Les bornes supérieures des intervalles de confiance à 95 % de la courbe d'isoprobabilité T100 sont affichées en lignes pointillées sur la figure suivante. Les marges sont au maximum de 0,20 m au-dessus des niveaux extrêmes des couples T100.

De manière analogue à la méthode de convolution, qui n'est pas applicable pour des niveaux d'eau en dessous de la valeur POT, il est à noter que l'incertitude de la méthode de stratification – convolution devient elle aussi surtout importante pour les niveaux astronomiques bas, avec des décotes, car les décotes ne sont pas prises en compte dans la méthode. Pour analyser les probabilités d'occurrences de niveaux d'eaux liés à des marées astronomiques moyennes, il faudrait donc mieux appliquer une distribution empirique. Puisque dans le cadre du PPRL on étudie surtout des niveaux d'eaux extrêmes, qui sont liés à des coefficients de marée importants, la méthode de stratification – convolution est préférée.

3.4.2.4 Interpolation des niveaux extrêmes pour le secteur Ouest le long des côtes du Calvados

L'analyse statistique de la concomitance de houles et niveaux d'eau extrêmes est faite sur la base des surcotes et marées astronomiques au Havre. Les niveaux Z_0 des couples (H_{m0} , Z_0) définis au paragraphe 3.4.2.2 sont donc applicables pour le port du Havre et doivent être convertis vers les côtes étudiées du Calvados. Cette conversion est faite sur la base de l'étude des niveaux extrêmes le long des côtes de la France métropolitaine, faite par le SHOM/CETMEF (2012). Cette interpolation est réalisée sur la base de la méthode de la plaque mince de (Duchon, 1977) entre Le Havre et Cherbourg.

Le résultat de cette interpolation réalisée par le SHOM/CETLEF (2012) pour les niveaux maximaux avec période de retour centennale est présenté en annexe B.

L'analyse de concomitance des valeurs POT de surcotes a mis en évidence une forte dépendance entre les surcotes au Havre et à Cherbourg et les conditions de houles provenant d'Ouest (voir Tableau 3.13 et Figure Figure 3.11). Par contre, les conditions du Nord – Nord-Est semblent indépendantes des surcotes extrêmes (voir section 3.4.3.1).

Les contours d'interpolation du SHOM/CETMEF (2012, voir l'annexe B) peuvent donc être appliqués dans la Baie de Seine pour des conditions d'Ouest. Cette interpolation est faite de manière relative, par rapport au niveau extrême centennial au Havre de 4,8 m IGN69, déterminé dans le document du SHOM/CETMEF. Cette valeur est du même ordre que la cote centennale du couple 10 présenté plus haut (voir tableau 3.15 page 58).

Les niveaux sont transformés vers les zones suivantes (pour un découpage plus fin, voir § 3.5.) :

- Dives-sur-Mer ;
- Ouistreham ;
- Courseulles-sur-Mer ;
- Arromanches-les-Bains.

Tableau 3.20: Couples T100 par secteur du PPRL Calvados (borne supérieure de l'intervalle de confiance de 95 %) pour le secteur ouest.

Couple	Niveau d'eau 95 % [m IGN69]				$H_{m0} 95 \% [m]$
	Dives	Ouistreham	Courseulles	Arromanches	
1	2,87	2,69	2,63	2,54	7,45
2	3,15	2,96	2,89	2,79	7,39
3	3,47	3,25	3,18	3,07	7,26
4	3,86	3,62	3,54	3,42	7,01
5	4,21	3,95	3,86	3,73	6,64
6	4,5	4,21	4,12	3,98	6,07
7	4,71	4,41	4,32	4,17	5,33
8	4,81	4,51	4,41	4,26	4,51
9	4,85	4,55	4,45	4,29	4,02
10	4,88	4,58	4,48	4,32	3,20

Tableau 3.21: Couples T10 par secteur du PPRL Calvados (borne supérieure de l'intervalle de confiance de 95 %) pour le secteur ouest.

Couple	Niveau d'eau 95 % [m IGN69]				$H_{m0} 95 \% [m]$
	Dives	Ouistreham	Courseulles	Arromanches	
1	2,62	2,46	2,40	2,32	6,09
2	2,96	2,77	2,71	2,62	5,98
3	3,23	3,03	2,96	2,86	5,87
4	3,59	3,37	3,29	3,18	5,65
5	3,89	3,65	3,57	3,45	5,27
6	4,17	3,91	3,82	3,69	4,71
7	4,32	4,05	3,96	3,82	4,16
8	4,47	4,19	4,10	3,96	3,12
9	4,5	4,22	4,13	3,99	2,68

Tableau 3.22: Couples T1000 par secteur du PPRL Calvados (borne supérieure de l'intervalle de confiance de 95 %) pour le secteur ouest.

Couple	Niveau d'eau 95 % [m IGN69]				$H_{m0,95\%}$ [m]
	Dives	Ouistreham	Courseulles	Arromanches	
1	2,62	2,46	2,40	2,32	8,82
2	3,11	2,91	2,85	2,75	8,74
3	3,63	3,41	3,33	3,22	8,6
4	4,2	3,94	3,85	3,72	8,32
5	4,52	4,24	4,14	4,00	8,04
6	4,93	4,62	4,51	4,36	7,33
7	5,17	4,84	4,74	4,58	6,27
8	5,25	4,92	4,81	4,65	5,14
9	5,29	4,96	4,85	4,68	3,30

3.4.3 Concomitance de surcotes avec des houles du secteur N-NE

3.4.3.1 Indépendance des houles du N-NE et des surcotes au Havre et Cherbourg

L'analyse des valeurs POT de surcotes au Havre et Cherbourg et des houles du secteur Nord – Nord-Est a mis en évidence une faible dépendance entre ces paramètres. Sur plus de 200 valeurs POT de surcotes au Havre, à peine une dizaine de concomitances sont trouvées. La correspondance entre la houle de Nord – Nord-Est et les surcotes à Cherbourg est encore plus faible qu'au Havre. La plupart des houles extrêmes du Nord – Nord-Est sont caractérisées par des décotes au Havre.

La figure Figure 3.15 montre l'histogramme des surcotes et décotes correspondant aux valeurs POT de houle (dans un intervalle de 7 heures autour de la valeur POT des houles). La moyenne des cotes ainsi obtenues est une décote de -0,22 m. L'histogramme montre que les cotes sont distribuées autour de cette moyenne, et que les décotes liées aux conditions du Nord-Nord-est sont plus fréquentes que les surcotes. La dépendance entre les surcotes au Havre et les houles du Nord-Nord-Est est donc inexistante.

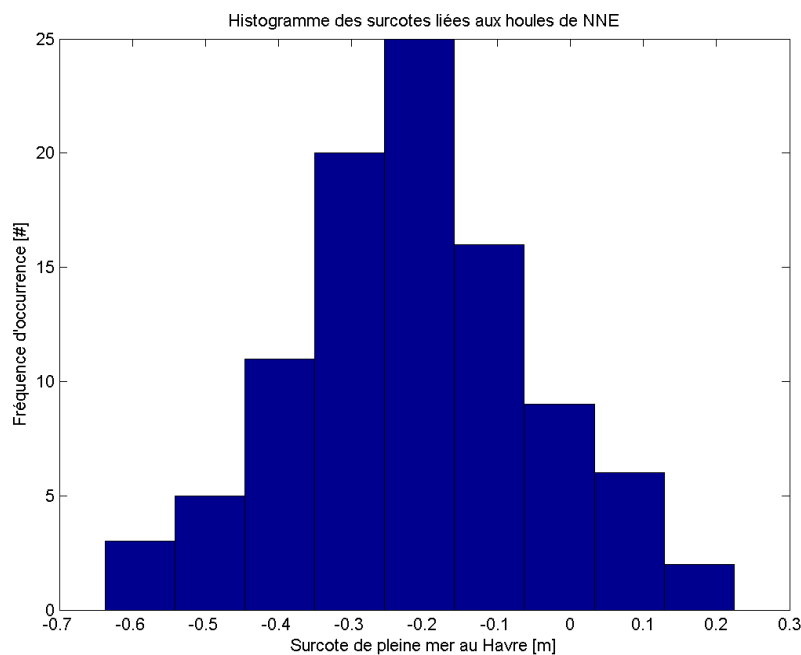


Figure 3.15: Histogramme des surcotes (> 0 m) et décotes (< 0 m) au Havre, correspondant aux valeurs POT de houle du secteur Nord-Nord-Est.

Avec les données de niveaux marins au Havre et à Cherbourg disponibles, il n'est donc pas possible de mettre en évidence une relation entre les houles du Nord-Nord-Est et des surcotes importantes. L'approche de la statistique bivariable par une copule de ces deux paramètres n'est, par conséquent, pas justifiée (voire impossible). Une autre approche est donc appliquée.

3.4.3.2 Combinaison des distributions de houles (N-NE) et des pleines mers astronomiques au Havre

La distribution des valeurs extrêmes des hauteurs de houle de Nord-Nord-Est est combinée avec la distribution empirique des hautes mers astronomiques au Havre. Ces deux distributions sont stratifiées en 250 strates. La borne inférieure des strates de H_{m0} est prise égale au seuil de la distribution des H_{m0} et la borne supérieure est la valeur de période de retour de 10 000 ans. Pour la distribution des pleines mers astronomiques les bornes sont respectivement la plus basse et la plus haute pleine mer de la suite temporelle disponible.

Toutes ces strates sont ensuite combinées, menant au total à 62 500 couples, et les probabilités des H_{m0} et marées sont multipliées pour obtenir la probabilité de chaque couple. Ainsi, on suppose une indépendance entre les H_{m0} et les marées astronomiques, et on analyse la probabilité d'une tempête du Nord – Nord-Est concomitante avec une marée haute astronomique sans surcote. Le même calcul est fait avec la borne supérieure de l'intervalle de confiance de 95 % obtenue de la distribution des H_{m0} . Les courbes d'iso-probabilité de période de retour de 10, 100 et 1000 ans, sont finalement obtenues avec la distribution combinée des couples (H_{m0} , Pm_{astro}).

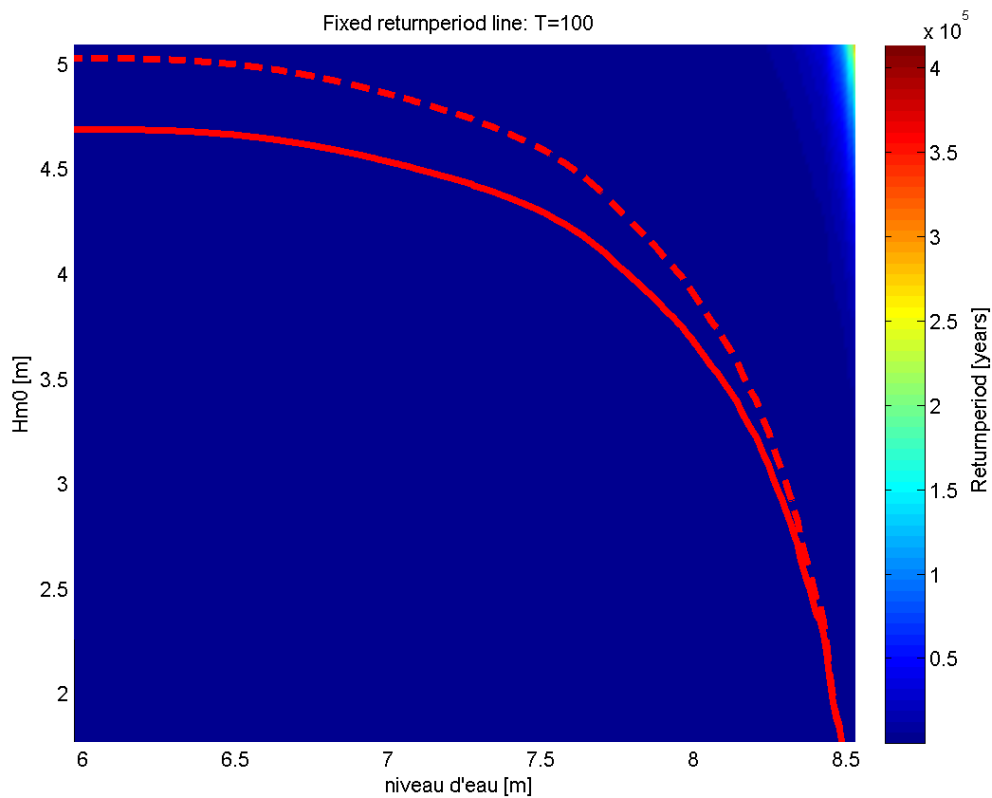


Figure 3.16: Courbe d'iso-probabilité et borne supérieure de l'intervalle de confiance (95 %, pointillé) de houle de N-NE et niveau d'eau astronomique au Havre, période de retour 100 ans (hauteur de houle [m] – niveau d'eau [m CM]).

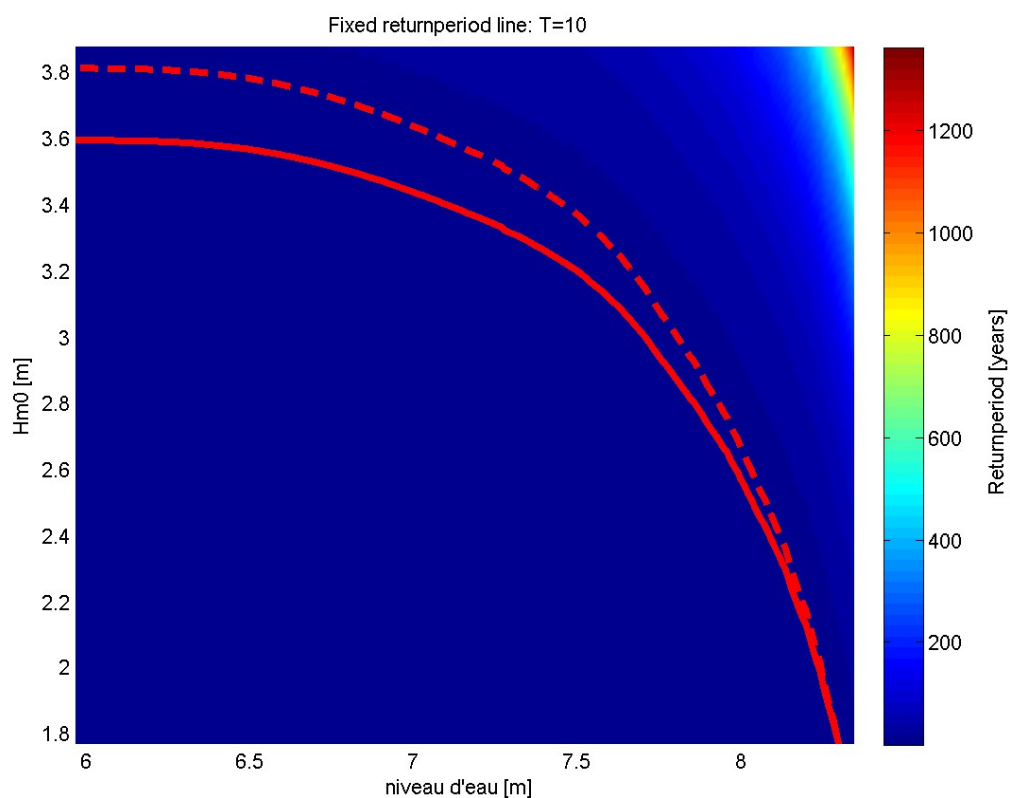


Figure 3.17: Courbe d'iso-probabilité et borne supérieure de l'intervalle de confiance (95 %, pointillé) de houle de N-NE et niveau d'eau astronomique au Havre, période de retour 10 ans (hauteur de houle [m] – niveau d'eau [m CM]).

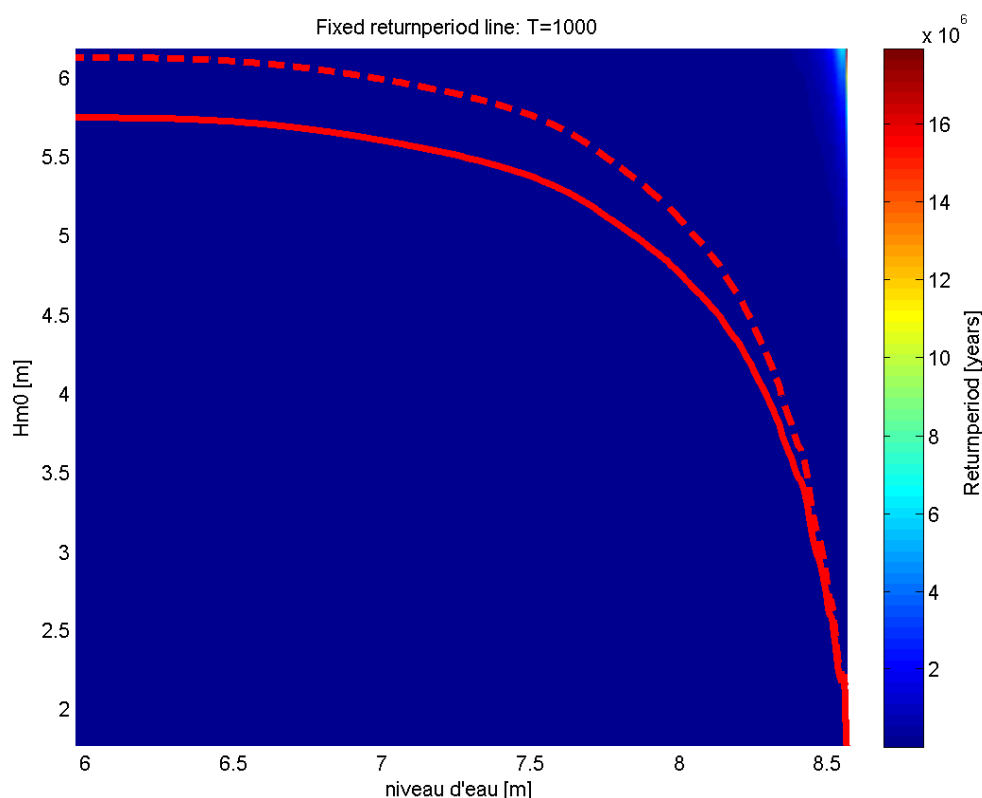


Figure 3.18: Courbe d'iso-probabilité et borne supérieure de l'intervalle de confiance (95 %, pointillé) de houle de N-NE et niveau d'eau astronomique au Havre, période de retour 1000 ans (hauteur de houle [m] – niveau d'eau [m CM]).

Pour chacune de ces périodes de retour, une sélection de couples (H_{m0} , PM_{astro}) est faite dans les tableaux suivants. Les coefficients de marée correspondants aux niveaux marins des couples retenues sont repérés. Ces niveaux astronomiques sont convertis aux trois ports de la zone d'étude : Dives-sur-Mer, Ouistreham et Courseulles-sur-Mer sur la base des coefficients de marées locaux.

Tableau 3.23: Couples T100 par secteur du PPRL Calvados (valeurs moyennes) pour les conditions N-NE

Cou-ple	H_{m0} [m]	PM_{astro} Le Havre [m CM/IGN69]	Coeff. de marée	Niveau Dives-sur-Mer [m CM/IGN69]	Niveau Ouistreham [m CM/IGN69]	Niveau Courseulles [m CM/IGN69]	Niveau Arromanches [m CM/IGN69]
1	4.69	5.97 / 1.59	26	6.14 / 1.55	5.66 / 1.58	5.50 / 1.51	5.40 / 1.38
2	4.67	6.36 / 1.98	36	6.54 / 1.95	6.05 / 1.97	5.84 / 1.85	5.77 / 1.75
3	4.59	6.81 / 2.43	49	7.02 / 2.43	6.51 / 2.43	6.25 / 2.26	6.21 / 2.19
4	4.45	7.22 / 2.84	65	7.46 / 2.87	6.92 / 2.84	6.65 / 2.66	6.62 / 2.60
5	4.24	7.56 / 3.18	78	7.83 / 3.24	7.26 / 3.18	6.98 / 2.99	6.96 / 2.94
6	3.90	7.86 / 3.48	90	8.15 / 3.56	7.56 / 3.48	7.27 / 3.28	7.26 / 3.25
7	3.43	8.13 / 3.75	101	8.42 / 3.83	7.79 / 3.71	7.54 / 3.55	7.51 / 3.49
8	2.81	8.31 / 3.93	109	8.60 / 4.01	7.94 / 3.86	7.75 / 3.76	7.68 / 3.66
9	2.30	8.42 / 4.04	114	8.70 / 4.11	8.01 / 3.93	7.86 / 3.87	7.77 / 3.75
10	1.77	8.48 / 4.10	117	8.76 / 4.17	8.06 / 3.98	7.93 / 3.94	7.82 / 3.80

Tableau 3.24: Couples T100 par secteur du PPRL Calvados (borne supérieure de l'intervalle de 95 %) pour les conditions N-NE

Cou- ple	H_{m0} [m]	PM_{astro} Le Havre [m CM/IGN69]	Coeff. de marée	Niveau Dives-sur- Mer [m CM/IGN69]	Niveau Ouire- ham [m CM/IGN69]	Niveau Courseul- les [m CM/IGN69]	Niveau Arro- manches [m CM/IGN69]
1	5.04	5.97 / 1.59	26	6.14 / 1.55	5.66 / 1.58	5.50 / 1.51	5.40 / 1.38
2	5.00	6.44 / 2.06	38	6.63 / 2.04	6.14 / 2.06	5.92 / 1.93	5.85 / 1.83
3	4.92	6.82 / 2.44	50	7.03 / 2.44	6.52 / 2.44	6.26 / 2.27	6.22 / 2.20
4	4.73	7.28 / 2.90	67	7.52 / 2.93	6.98 / 2.90	6.71 / 2.72	6.68 / 2.66
5	4.51	7.59 / 3.21	79	7.86 / 3.27	7.29 / 3.21	7.01 / 3.02	6.99 / 2.97
6	4.08	7.91 / 3.53	91	8.20 / 3.61	7.61 / 3.53	7.31 / 3.32	7.31 / 3.29
7	3.49	8.17 / 3.79	103	8.46 / 3.87	7.83 / 3.75	7.59 / 3.60	7.55 / 3.53
8	2.83	8.34 / 3.96	110	8.62 / 4.03	7.95 / 3.87	7.77 / 3.78	7.69 / 3.67
9	2.26	8.43 / 4.05	114	8.71 / 4.12	8.02 / 3.94	7.88 / 3.89	7.78 / 3.76
10	1.77	8.48 / 4.10	117	8.76 / 4.17	8.06 / 3.98	7.93 / 3.94	7.82 / 3.80

Tableau 3.25: Couples T10 par secteur du PPRL Calvados (valeurs moyennes) pour les conditions N-NE

Couple	H_{m0} [m]	PM_{astro} Le Havre [m CM/IGN69]	Coeff. de marée	Niveau Dives-sur- Mer [m CM/IGN69]	Niveau Ouire- ham [m CM/IGN69]	Niveau Courseul- les [m CM/IGN69]	Niveau Arro- manches [m CM/IGN69]
1	3.61	5.97 / 1.59	26	6.14 / 1.55	5.66 / 1.58	5.50 / 1.51	5.40 / 1.38
2	3.57	6.47 / 2.09	39	6.66 / 2.07	6.17 / 2.09	5.95 / 1.96	5.88 / 1.86
3	3.43	7.04 / 2.66	58	7.26 / 2.67	6.74 / 2.66	6.47 / 2.48	6.44 / 2.42
4	3.22	7.47 / 3.09	75	7.73 / 3.14	7.17 / 3.09	6.89 / 2.90	6.87 / 2.85
5	2.71	7.92 / 3.54	92	8.21 / 3.62	7.62 / 3.54	7.32 / 3.33	7.32 / 3.30
6	2.44	8.07 / 3.69	98	8.37 / 3.78	7.76 / 3.68	7.48 / 3.49	7.46 / 3.45
7	2.04	8.23 / 3.85	105	8.52 / 3.93	7.87 / 3.79	7.66 / 3.67	7.60 / 3.58
8	1.79	8.29 / 3.91	108	8.58 / 3.99	7.92 / 3.84	7.73 / 3.74	7.66 / 3.64

Tableau 3.26: Couples T10 par secteur du PPRL Calvados (borne supérieure de l'intervalle de 95 %) pour les conditions N-NE

Couple	H_{m0} [m]	PM_{astro} Le Havre [m CM/IGN69]	Coeff. de marée	Niveau Dives-sur-Mer [m CM/IGN69]	Niveau Ouistreham [m CM/IGN69]	Niveau Courseulles [m CM/IGN69]	Niveau Arromanches [m CM/IGN69]
1	3.81	5.97 / 1.59	26	6.14 / 1.55	5.66 / 1.58	5.50 / 1.51	5.40 / 1.38
2	3.77	6.54 / 2.16	41	6.73 / 2.14	6.23 / 2.15	5.98 / 1.99	5.94 / 1.92
3	3.61	7.07 / 2.69	59	7.30 / 2.71	6.77 / 2.69	6.51 / 2.52	6.47 / 2.45
4	3.34	7.53 / 3.15	77	7.79 / 3.20	7.23 / 3.15	6.95 / 2.96	6.93 / 2.91
5	2.73	7.97 / 3.59	94	8.27 / 3.68	7.67 / 3.59	7.37 / 3.38	7.37 / 3.35
6	2.47	8.09 / 3.71	99	8.39 / 3.80	7.77 / 3.69	7.51 / 3.52	7.48 / 3.46
7	2.04	8.24 / 3.86	106	8.53 / 3.94	7.88 / 3.80	7.67 / 3.68	7.61 / 3.59
8	1.77	8.30 / 3.92	109	8.59 / 4.00	7.93 / 3.85	7.74 / 3.75	7.67 / 3.65

Tableau 3.27: Couples T1000 par secteur du PPRL Calvados (valeurs moyennes) pour les conditions N-NE

Couple	H_{m0} [m]	PM_{astro} Le Havre [m CM/IGN69]	Coeff. de marée	Niveau Dives-sur-Mer [m CM/IGN69]	Niveau Ouistreham [m CM/IGN69]	Niveau Courseulles [m CM/IGN69]	Niveau Arromanches [m CM/IGN69]
1	5.76	5.97 / 1.59	26	6.14 / 1.55	5.66 / 1.58	5.50 / 1.51	5.40 / 1.38
2	5.71	6.49 / 2.11	40	6.68 / 2.09	6.19 / 2.11	5.97 / 1.98	5.90 / 1.88
3	5.59	7.02 / 2.64	57	7.24 / 2.65	6.72 / 2.64	6.45 / 2.46	6.42 / 2.40
4	5.37	7.51 / 3.13	76	7.77 / 3.18	7.21 / 3.13	6.93 / 2.94	6.91 / 2.89
5	5.00	7.84 / 3.46	89	8.13 / 3.54	7.54 / 3.46	7.25 / 3.26	7.24 / 3.22
6	4.55	8.11 / 3.73	100	8.40 / 3.81	7.78 / 3.70	7.52 / 3.53	7.49 / 3.47
7	3.69	8.36 / 3.98	111	8.64 / 4.05	7.97 / 3.89	7.79 / 3.8	7.71 / 3.69
8	2.85	8.48 / 4.10	117	8.76 / 4.17	8.06 / 3.98	7.93 / 3.94	7.82 / 3.80
9	2.18	8.55 / 4.17	119	8.82 / 4.23	8.11 / 4.03	8.00 / 4.01	7.88 / 3.86

Tableau 3.28: Couples T1000 par secteur du PPRL Calvados (borne supérieure de l'intervalle de 95 %) pour les conditions N-NE

Couple	H_{m0} [m]	PM_{astro} Le Havre [m CM/IGN69]	Coeff. de marée	Niveau Dives-sur- Mer [m CM/IGN69]	Niveau Ouire- ham [m CM/IGN69]	Niveau Courseul- les [m CM/IGN69]	Niveau Arro- manches [m CM/IGN69]
1	6.12	5.97 / 1.59	26	6.14 / 1.55	5.66 / 1.58	5.50 / 1.51	5.40 / 1.38
2	6.08	6.60 / 2.22	42	6.79 / 2.20	6.30 / 2.22	6.06 / 2.07	5.90 / 1.88
3	5.96	7.07 / 2.69	59	7.30 / 2.71	6.77 / 2.69	6.51 / 2.52	6.47 / 2.45
4	5.69	7.58 / 3.20	79	7.85 / 3.26	7.28 / 3.20	7.00 / 3.01	6.98 / 2.96
5	5.27	7.92 / 3.54	92	8.21 / 3.62	7.62 / 3.54	7.32 / 3.33	7.32 / 3.30
6	4.73	8.16 / 3.78	102	8.45 / 3.86	7.82 / 3.74	7.57 / 3.58	7.54 / 3.52
7	3.69	8.40 / 4.02	113	8.68 / 4.09	8.00 / 3.92	7.84 / 3.85	7.75 / 3.73
8	2.87	8.49 / 4.11	117	8.77 / 4.18	8.07 / 3.99	7.95 / 3.96	7.83 / 3.81
9	2.24	8.55 / 4.17	119	8.82 / 4.23	8.11 / 4.03	8.00 / 4.01	7.88 / 3.86

3.4.4 Comparaison des niveaux d'eau obtenus de l'analyse bivariée et des niveaux de référence de la portée à connaissance de la DREAL

Pour la cartographie topographique de l'aléa de submersion marine, des niveaux de référence centennaux sont obtenus de l'étude des niveaux extrêmes du SHOM/CETMEF (2012). Ces niveaux sont déterminés sur la base des contours de niveaux extrêmes centennaux sur trois secteurs du Calvados. Par secteur, le contour de niveau maximal est retenu. Par rapport aux niveaux centennaux définis par le CETMEF, une élévation de 0,20 m du niveau de référence est prévue pour tenir compte du changement climatique à court terme.

Les valeurs retenues par la portée à connaissance sont comparées aux valeurs maximales des couples T100 des conditions d'Ouest de l'analyse bivariée (voir tableau 3.29). C'est-à-dire avec les valeurs du couple centennal ayant le niveau marin le plus élevé mais une hauteur de houle faible (les autres couples T100 ont un niveau d'eau moins élevé, mais une hauteur de houle plus forte).

Une bonne correspondance est trouvée entre les niveaux omnidirectionnels centennaux du SHOM/CETMEF et les niveaux maximaux (T100) des conditions d'Ouest de l'analyse statistique. Il est à noter que l'élévation du niveau de mer devra également être pris en compte pour le PPRL (0,20 m et 0,60 m selon le scénario étudié). Les conditions de Nord – Nord-Est sont caractérisées par des houles moins extrêmes. Ces niveaux étant étudiés par rapport aux pleines mers astronomiques, les valeurs sont inférieures aux niveaux extrêmes du SHOM/CETMEF qui intègrent les surcotes de pleine mer dans leur analyse.

Tableau 3.29: Comparaison du niveau de référence de la portée à connaissance aux niveaux maximaux des couples T100 (valeurs en m IGN69)

		<i>Dives-Varaville</i>	<i>Franceville-Hermanville</i>	<i>Bernières-Tracy</i>
DREAL (SHOM/CETMEF, 2012)		4.90 +0.20	4.50 +0.20	4.40 +0.20
Niveau maximal des couples T100 W	<i>Ponctuel</i>	4.91 +0.20/0.60	4.51 +0.20/0.60	4.41 +0.20/0.60
	<i>CI 95 %</i>	4.99 +0.20/0.60	4.58 +0.20/0.60	4.48 +0.20/0.60
Niveau maximal des couples T100 N-NE	<i>Ponctuel</i>		4.02 +0.20/0.60	3.94 +0.20/0.60
	<i>CI 95 %</i>		4.02 +0.20/0.60	3.94 +0.20/0.60

3.5. Niveaux d'eau par section homogène

Pour les différents scénarios étudiés dans le cadre du PPRL, une interpolation plus fine des niveaux d'eau par section homogène de la côte est proposée. Une approche différente est appliquée pour les conditions d'Ouest et du Nord – Nord-Est :

- Secteur Ouest : ces niveaux extrêmes correspondent à une pleine mer astronomique importante, liée à une surcote atmosphérique (par convolution). Les isolignes de l'étude des niveaux extrêmes le long des côtes françaises du SHOM/CETMEF (2012) sont utilisées pour déterminer les niveaux de chaque section homogène par rapport au niveau au Havre (comme expliqué dans le chapitre 3.4.2.4).
- Secteur Nord – Nord-Est : l'analyse statistique des niveaux extrêmes est faite sur les pleines mers astronomiques sans surcotes atmosphériques (en raison de la faible corrélation entre ces deux phénomènes, voir §3.4.3). L'interpolation des cotes extrêmes est, par conséquent, faite sur la base des pleines mers astronomiques aux ports de la zone PPRL : Dives-sur-Mer, Ouistreham, Courseulles-sur-Mer et Arromanches-les-Bains. Les zones situées entre ces ports sont interpolées à dire d'expert.

Les valeurs obtenues par section homogène sont listées au tableau 3.30 pour les conditions d'Ouest et au tableau 3.31 pour les conditions de Nord – Nord-Est. Pour prendre en compte les marges d'incertitude des données et de l'analyse statistique, la borne supérieure de l'intervalle de confiance de 95 % est considérée. Les valeurs des tableaux ne prennent pas en compte l'élévation due au réchauffement climatique, ni d'autres effets locaux tels que le set-up de houle (qui sera étudié dans le modèle de houle).

Tableau 3.30: Niveaux d'eau par scénario et par section homogène, secteur Dives-Orne (valeurs maximales et minimales en m IGN69). Élévation du niveau marin et set-up de la houle exclus.

	NNE			West		
	T10 (CI 95 %)	T100 (CI 95 %)	T1000 (CI 95 %)	T10 (CI 95 %)	T100 (CI 95 %)	T1000 (CI 95 %)
DOSH 01	1.55 – 4.00	1.55 – 4.17	1.55 – 4.23	2.62 – 4.5	2.87 – 4.88	2.62 – 5.29
DOSH 02	1.55 – 4.00	1.55 – 4.17	1.55 – 4.23	2.62 – 4.5	2.87 – 4.88	2.62 – 5.29
DOSH 03	1.58 – 3.85	1.55 – 3.98	1.58 – 4.03	2.59 – 4.45	2.84 – 4.83	2.59 – 5.23
DOSH 04	1.58 – 3.85	1.55 – 3.98	1.58 – 4.03	2.54 – 4.36	2.78 – 4.73	2.54 – 5.12
DOSH 05	1.58 – 3.85	1.55 – 3.98	1.58 – 4.03	2.46 – 4.22	2.69 – 4.58	2.46 – 4.96
DOSH 06	1.58 – 3.85	1.55 – 3.98	1.58 – 4.03	2.46 – 4.22	2.69 – 4.58	2.46 – 4.96
DOSH 07	1.58 – 3.85	1.55 – 3.98	1.58 – 4.03	2.46 – 4.22	2.69 – 4.58	2.46 – 4.96
DOSH 08	1.58 – 3.85	1.55 – 3.98	1.58 – 4.03	2.46 – 4.22	2.69 – 4.58	2.46 – 4.96
DOSH 09	1.58 – 3.85	1.55 – 3.98	1.58 – 4.03	2.46 – 4.22	2.69 – 4.58	2.46 – 4.96
DOSH 10	1.58 – 3.85	1.55 – 3.98	1.58 – 4.03	2.46 – 4.22	2.69 – 4.58	2.46 – 4.96
DOSH 11	1.58 – 3.85	1.55 – 3.98	1.58 – 4.03	2.46 – 4.22	2.69 – 4.58	2.46 – 4.96

Tableau 3.31: Niveaux d'eau par scénario et par section homogène, secteur Bessin (valeurs maximales et minimales en m IGN69), Élévation du niveau marin et set-up de la houle exclus.

	NNE			West		
	T10 (CI 95 %)	T100 (CI 95 %)	T1000 (CI 95 %)	T10 (CI 95 %)	T100 (CI 95 %)	T1000 (CI 95 %)
BSH 01	1.51 – 3.75	1.55 – 3.94	1.51 – 4.01	2.40 – 4.13	2.63 – 4.48	2.40 – 4.85
BSH 02	1.51 – 3.75	1.55 – 3.94	1.51 – 4.01	2.40 – 4.13	2.63 – 4.48	2.40 – 4.85
BSH 03	1.51 – 3.75	1.55 – 3.94	1.51 – 4.01	2.40 – 4.13	2.63 – 4.48	2.40 – 4.85
BSH 04	1.51 – 3.75	1.55 – 3.94	1.51 – 4.01	2.40 – 4.13	2.63 – 4.48	2.40 – 4.85
BSH 05	1.51 – 3.75	1.55 – 3.94	1.51 – 4.01	2.38 – 4.08	2.6 – 4.43	2.38 – 4.79
BSH 06	1.44 – 3.70	1.55 – 3.94	1.44 – 3.94	2.38 – 4.08	2.6 – 4.43	2.38 – 4.79
BSH 07	1.44 – 3.70	1.55 – 3.87	1.44 – 3.94	2.38 – 4.08	2.6 – 4.43	2.38 – 4.79
BSH 08	1.44 – 3.70	1.55 – 3.87	1.44 – 3.94	2.35 – 4.03	2.57 – 4.38	2.35 – 4.74
BSH 09	1.44 – 3.70	1.55 – 3.87	1.44 – 3.94	2.35 – 4.03	2.57 – 4.38	2.35 – 4.74
BSH 10	1.38 – 3.65	1.55 – 3.8	1.38 – 3.86	2.35 – 4.03	2.57 – 4.38	2.35 – 4.74
BSH 11	1.38 – 3.65	1.55 – 3.8	1.38 – 3.86	2.32 – 3.99	2.54 – 4.32	2.32 – 4.68
BSH 12	1.38 – 3.65	1.55 – 3.8	1.38 – 3.86	2.32 – 3.99	2.54 – 4.32	2.32 – 4.68
BSH13	1.38 – 3.65	1.55 – 3.8	1.38 – 3.86	2.32 – 3.99	2.54 – 4.32	2.32 – 4.68
BSH14	1.38 – 3.65	1.55 – 3.8	1.38 – 3.86	2.29 – 3.94	2.51 – 4.27	2.29 – 4.63

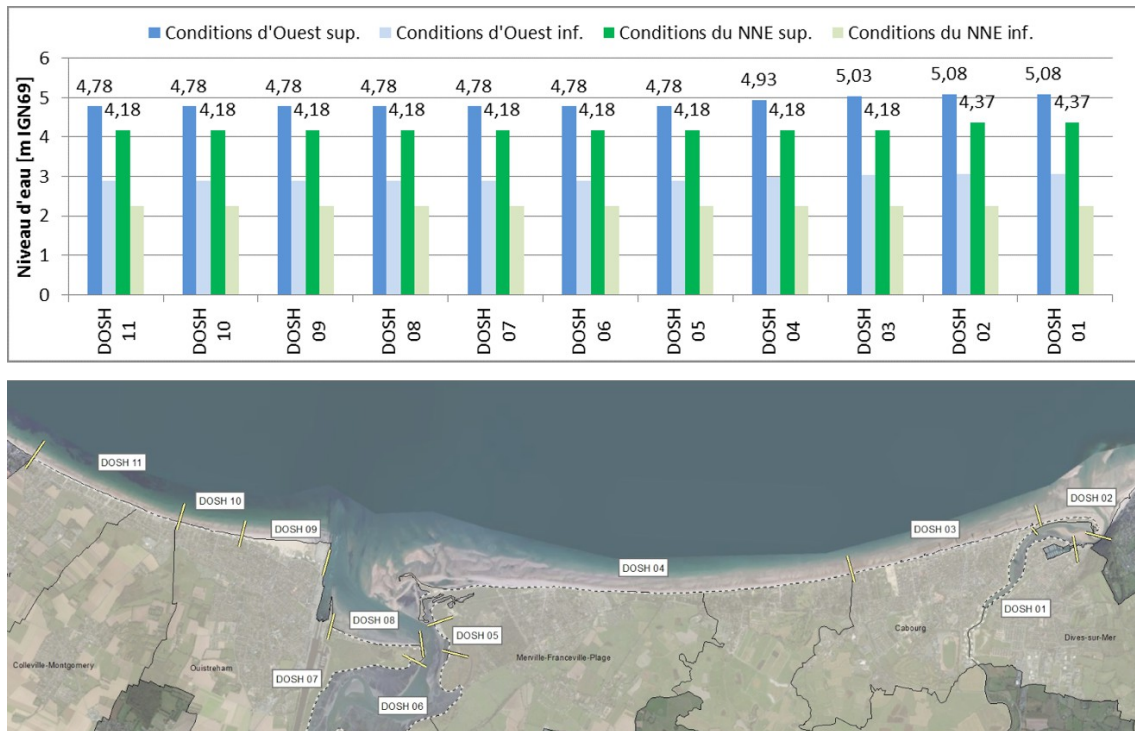


Figure 3.19: Niveaux de référence +20cm d'élévation par section homogène, secteur Dives-Orne (conditions d'Ouest et du N-NE, valeurs supérieures et inférieures, set-up de la houle exclu).

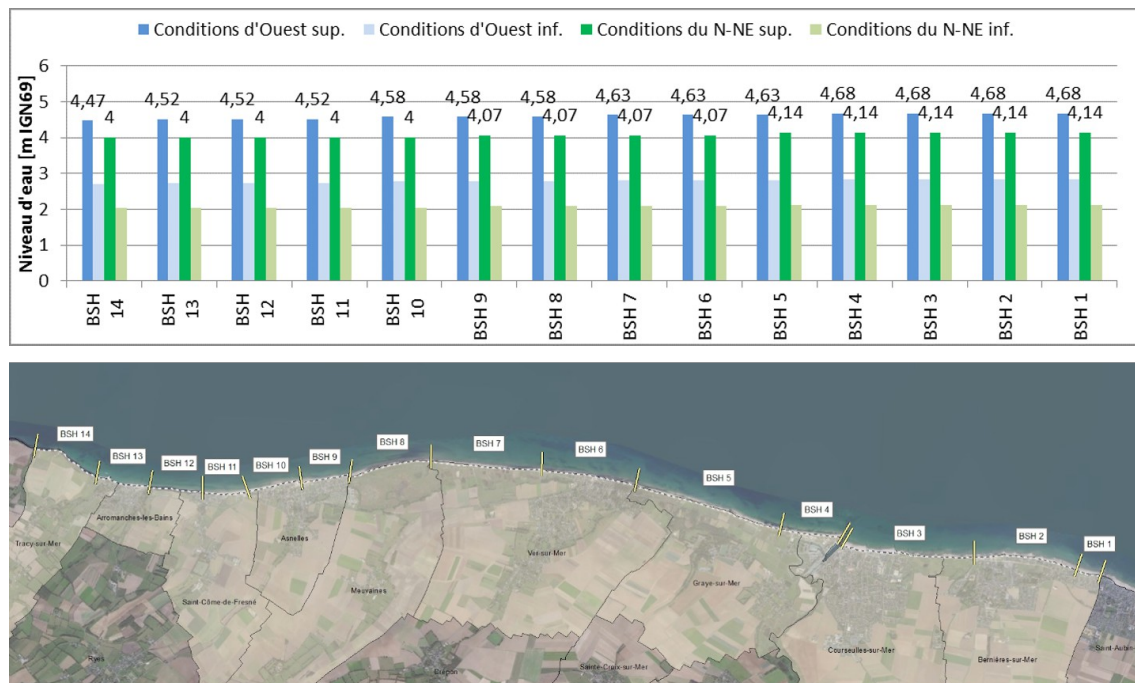


Figure 3.20: Niveaux de référence +20cm par section homogène, secteur Bessin (conditions d'Ouest et du N-NE, valeurs supérieures et inférieures, set-up de la houle exclu).

4. Sélection de l'événement de Référence

Les couples T10, T100 et T1000 établis aux paragraphes précédents sont comparés aux conditions historiques connues. La méthode PPRL précise que les conditions de référence sont soit des conditions centennales, soit des conditions historiques si leur période de retour est supérieure.

Dans le présent rapport, une première comparaison est faite dans l'espace (H_{m0} , Z_0). Les courbes d'iso-probabilité sont comparées aux événements extrêmes connus. Les points historiques qui dépassent les courbes sont plus extrêmes (au large), et peuvent, en théorie, être retenus comme conditions de référence PPRL. Les conditions de références ne pourront toutefois être choisies définitivement qu'après l'étude de la transformation des houles vers la bordure littorale.

Pour les conditions d'Ouest, aucune tempête historique ne dépasse l'isoligne T100. On peut donc immédiatement conclure que l'ensemble des couples T100 Ouest seront plus extrêmes, et constitueront le phénomène de référence du PPRL.

Il est trouvé que quelques tempêtes historiques dépassent le niveau centennal (§4.1.2) pour le secteur Nord. Pour l'étude PPRL ces tempêtes seront considérées pour la détermination des aléas PPRL (recul de côte, submersion marine), avec les couples T100 N-NE.

Dans une prochaine étape, les effets causés par chacun de ces couples en termes d'érosion et en termes des débits entrants (submersion) sont déterminés avec les modèles de test de digue et de dunes. Ces résultats permettront de sélectionner le couple le plus pénalisant pour l'événement de référence, qui sera ensuite utilisé pour la détermination des aléas.

4.1. Comparaison des résultats de l'analyse statistique aux tempêtes historiques

Les distributions bivariées et les courbes d'iso-probabilité obtenues par l'analyse statistique exposée ci-dessus sont comparées aux conditions réelles extrêmes. Cette comparaison est essentielle pour la sélection de l'événement de référence pour le PPRL, qui est un événement théorique centennal ou un événement historique si celui-ci est supérieur. Il est important de noter que ce choix de l'événement de référence ne se fait pas uniquement sur la comparaison des variables (H_{m0} , Z_0), mais que d'autres processus devront être analysés avant de faire le choix définitif (à savoir la transformation des houles du large vers les côtes, l'effet local sur l'érosion du trait de côtes et les différentes entrées d'eau).

Pour comparer l'intensité des phénomènes historiques aux distributions bivariées, les valeurs POT couplées sont présentées dans les mêmes graphes que les courbes d'isoprobabilité.

4.1.1 Conditions d'Ouest

Le graphe suivant montre que les couples POT sont tous inférieurs aux conditions centennales de la distribution bivariée. Trois tempêtes historiques se trouvent plus proche de cette courbe :

- Le 29/10/1996 : cote de 8,6 m CM au Havre et houle de 5,31 m au point COAST-2525
- Le 25/12/1999 : cote de 8,9 m CM au Havre et houle de 4,43 m au point COAST-2525 (tempête Lothar)
- Le 26/02/1990 : cote de 8,95 m CM au Havre et houle de 5,05 m au point COAST-2525 (tempête Vivian)

Malgré la violence de ces trois tempêtes, elles n'atteignent pas la borne supérieure du niveau de retour de 100 ans, et ne peuvent à priori pas être considérées comme événement de référence.

La même démarche est mise en œuvre pour les conditions décennales. Plusieurs tempêtes dépassent la courbe d'isoprobabilité et ont donc une période de retour supérieure à 10 ans. Les tempêtes suivantes sont les plus proches de la courbe :

- 03 Novembre 1998 : le niveau de 8,5 m CM au Havre et la hauteur significative de houle 4,44 m au point COAST-2525 correspondent à un niveau de retour de 10 ans ;
- 13 Décembre 2000 : le niveau de 8,64 m CM et la houle de 3,84 m sont inférieurs au niveau de retour de 10 ans ;
- 29 Octobre 2000 : le niveau de 8,65 m CM et la houle de 3,75 m sont inférieurs au niveau de retour de 10 ans ;
- 28 Février 2010 : le niveau de 8,843 m CM au Havre et la houle de 2,49 m au point COAST-2525 (Tempête Xynthia) correspondent à un niveau de retour de 10 ans.

Quelques tempêtes correspondent mieux à la borne supérieure de l'intervalle de confiance de 95 % de la courbe de probabilité de 10 ans :

- 17 Décembre 2004 : 8,69 m CM au Havre et $H_{m0}=4,135$ m au point COAST-2525 correspond à la borne supérieure T10 ;
- 03 Janvier 1998 et 04-Jan-1998 : avec 8,6 m CM et $H_{m0} = 4,64$ m et 8,52 m CM et $H_{m0} = 4,91$ m respectivement, cette tempête est légèrement supérieure à la borne supérieure de 95 %;
- 10 Mars 2008 : le niveau de 8,8 m CM et les houles de 4,019 m sont supérieurs à la borne supérieure de 95 % (Tempête Johanna).

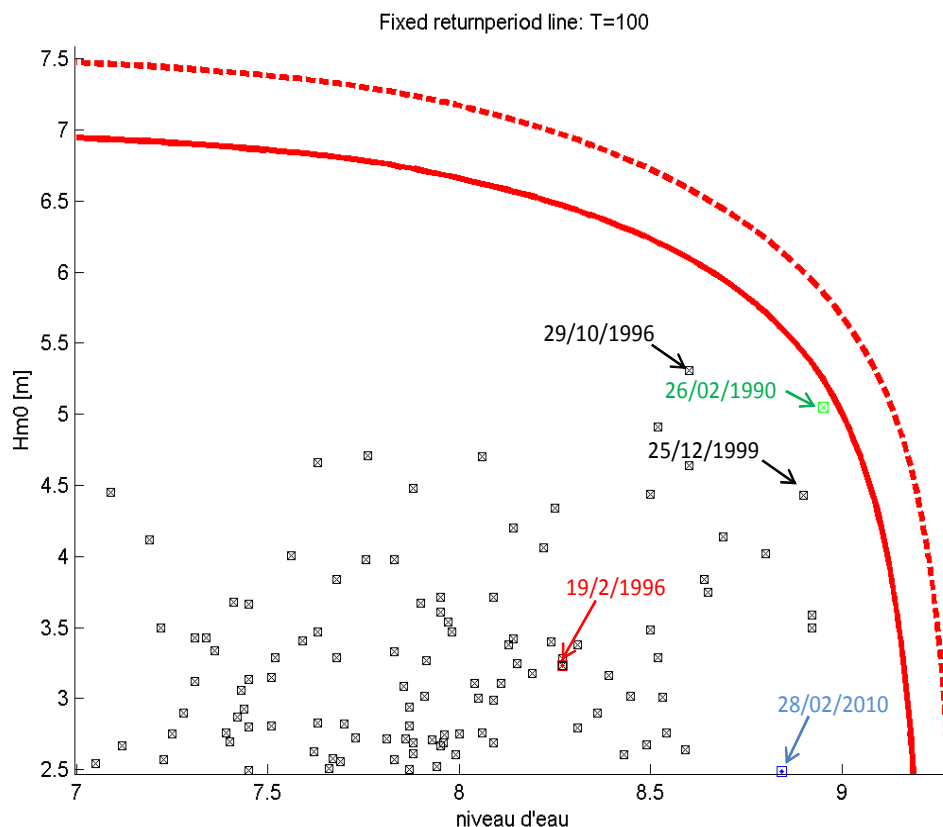


Figure 4.1: Comparaison des couples valeurs POT ($H_{m0} - Z_0$) historiques à la courbe d'isoprobabilité T100 – secteur ouest.

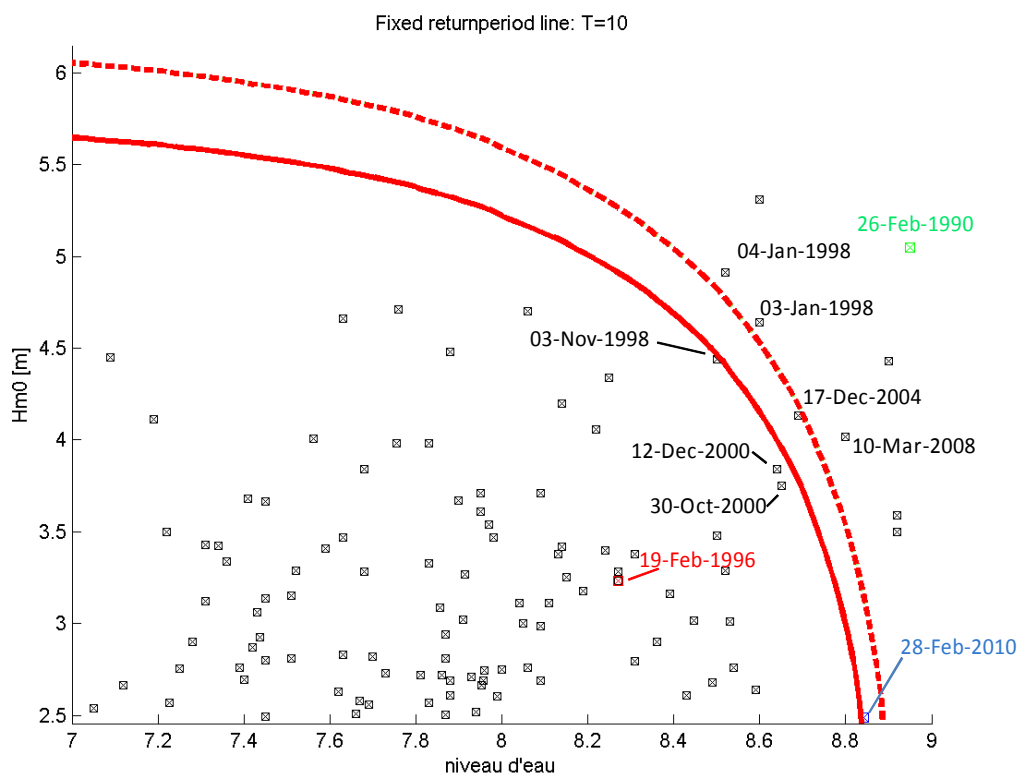


Figure 4.2: Comparaison des couples valeurs POT ($Hm_0 - Z_0$) historiques à la courbe d'iso-probabilité T10 – secteur ouest.

4.1.2 Conditions de N-NE

Il est constaté au paragraphe 3.4.3 que peu de concomitances de houle et surcotes sont observés dans les suites temporelles disponibles, et que les valeurs POT de ces houles sont le plus souvent couplées à des décotes au havre. La statistique des conditions de niveau d'eau et houles extrêmes est donc faite sur les niveaux d'eau astronomiques au Havre, sans prise en compte des surcotes/décotes astronomiques, comme approche sécuritaire. La comparaison avec les phénomènes historiques est donc également faite sur la concomitance des marées hautes astronomiques et houles au large de Nord – Nord-Est.

Les valeurs couplées et la courbe d'iso-probabilité T100 sont représentées sur le graphe de la figure.

3 phénomènes semblent dépasser la borne supérieure de l'intervalle de confiance de la courbe de 100 :

- 20-Feb-1996 : une marée haute au Havre de 8,83 m CM couplée à une houle de 4,22 m au point COAST-2525 ;
- 18-Sep-2001 : une marée haute au Havre de 8,44 m CM avec des houles atteignant une hauteur de 2,6 m ;
- 08-Oct-1998 : une marée haute au Havre de 8,4 m CM avec des houles atteignant une hauteur de 2,55 m, proche de la courbe T100.

Ces trois événements sont supérieurs aux conditions centennales définies par la statistique des pleines mers astronomiques concomitantes à une houle élevée au point COAST-2525, et sont donc de potentielles événements de référence pour les conditions de Nord – Nord-Est.

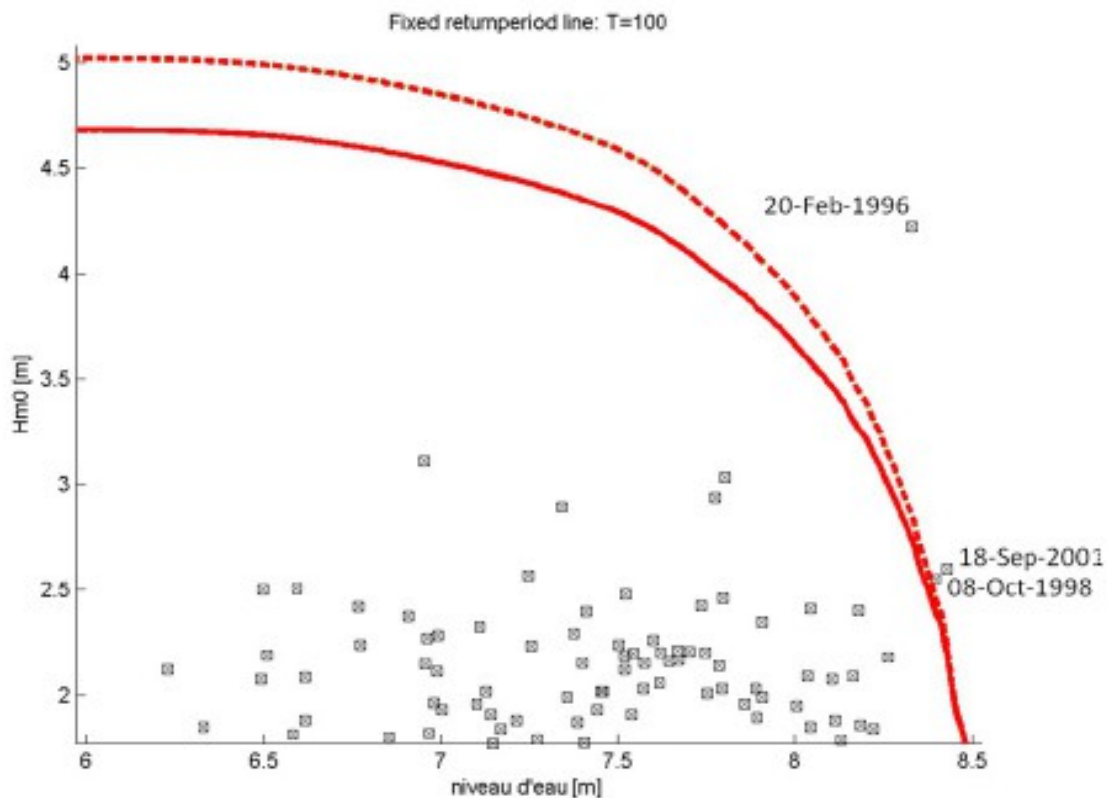


Figure 4.3: Comparaison des couples valeurs POT ($H_{m0} - PM$) historiques à la courbe d'isoprobabilité T100 – secteur N-NE.

4.2. Choix de l'événement de référence

4.2.1 PPRL

L'événement de référence pour le PPRL est soit un événement centennal ou soit un événement historique si celui-ci est supérieur.

Comme démontré dans le paragraphe précédent, les couples (H_{m0} , Z_0) théoriques avec une période de retour de 100 ans pour la direction d'Ouest ont tous des valeurs supérieures à celles des tempêtes historiques connues. On retient alors les couples théoriques comme événement de référence.

Pour les directions de Nord à Nord-Est, trois tempêtes historiques sont supérieures à la courbe d'isoprobabilité T100 : ce sont les tempêtes des 20/02/1996, 08/10/1998 et 18/09/2001. On constate néanmoins que les couples théoriques peuvent avoir un niveau d'eau supérieur à ces tempêtes historiques (mais avec une hauteur de houle moins élevée), ou une hauteur de houle plus importante (mais avec un niveau d'eau plus bas). Il ne semble pas justifiable de supprimer ces deux extrêmes de l'étude PPRL. L'ensemble des couples théoriques et les trois tempêtes historiques sera donc pris en compte.

Le choix final du couple, où l'événement de référence dépend du phénomène considéré :

- pour la surverse, le couple avec le niveau d'eau le plus élevé sera le plus critique ;
- pour les franchissements par paquets de mer et l'érosion des plages et des dunes, les couples avec des hauteurs de houle plus importantes et niveaux (un peu) moins extrêmes peuvent devenir critiques.

Les conditions les plus critiques pour les franchissements par paquets de mer et l'érosion seront identifiées sur la base à partir des tests de dunes et de digues.

Pour les scénarios du PPRL le niveau d'eau de l'événement de référence sera augmenté de 20 cm (scénario actuel) ou de 60 cm (scénario à échéance 100 ans) afin de prendre en compte les effets du réchauffement climatique sur le niveau d'eau, comme prescrit par le guide PPRL.

4.2.2 TRI

Pour le TRI, un scénario moyen (qui correspond au scénario PPRL) sera considéré, ainsi que deux scénarios supplémentaires : un scénario fréquent et un scénario extrême.

Pour le scénario fréquent, un événement de période de retour de l'ordre de 10 ans sera considéré. Comme le montre la figure Figure 4.2, plusieurs événements historiques peuvent être sélectionnés pour la direction Ouest :

- pour la surverse, l'événement du 28/02/2010 sera critique ;
- pour l'érosion et les franchissements par paquets de mer il est proposé de considérer les tempêtes de janvier 1998 ou celle de décembre 2004.

Pour le scénario extrême, un événement de période de retour de l'ordre de 1000 ans sera sélectionné. Compte tenu de la relative brièveté des enregistrements de mesures de houle et de marées, il est évident qu'aucune donnée historique n'atteint la période de retour de 1000 ans (voir les couples présentés aux tableaux 3.19 et 3.28), on retient les couples théoriques pour la direction d'Ouest.

L'analyse des différentes directions (Ouest et Nord – Nord-Est) qui sera faite pour le PPRL indiquera si les couples de la direction Nord à Nord-Est doivent aussi être considérés. A priori, on s'attend à ce que les conditions de Nord à Nord-Est soient moins pénalisantes en termes de débits entrants, puisque les niveaux d'eau sont inférieurs par rapport aux conditions de secteur Ouest.

5. Références

- Alp'Géorisques & IMDC, 2014. *Plan de Prévention de Risques littoraux : Bessin & Dives-Orne. Phase 1 : Analyse préalable des sites*. Rapport I/RA/12107/13.197/MCO v3.0
- Alp'Géorisques & IMDC, 2015. *Plan de Prévention de Risques Littoraux : Cartographie des aléas littoraux : Submersion marine et érosion, secteur Bessin*. Rapport I/RA/12107/14,137/PHI v2,0.
- Blanckaert J, Trouw K, 2005. *Extreme hydrodynamic boundary conditions in Ostend (Belgium)*
- CETMEF / EDF R&D-LNHE 2010/2011. *ANEMOC – Atlas Numérique d'Etats de Mer Océanique et Côtier*. version : 1.1, disponible de : <http://anemoc.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/>, consulté avril 2012.
- CETMEF, 2012. *Étape de cartographie des surfaces inondables et des risques dans le cadre de la directive « inondations », Rapport de la mission 5 « Inondations par submersions marines et tsunamis », version 7 du Mai 2012 (méthodologie TRI v7)*
- CETMEF, 2012b. *CANDHIS – Centre d'Archivage National de Données de Houle In Situ v2.0.0*. Disponible de <http://candhis.cetmef.developpement-durable.gouv.fr>
- CETMEF, 2012c. *Analyse des surcotes extrêmes le long des côtes métropolitaines*, Rapport version 4, 14 Novembre 2012.
- CETMEF, Kergadallan X., 2013 *Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes – Environnements maritime et estuarien*.
- CETMEF, 2013b. *Compte rendu des échanges CETMEF – IMDC sur la méthodologie statistique à suivre pour le PPRL Loire-Atlantique*, I/VV/12086/13.173/ABO, 29 et 30 avril 2013.
- Coles, S. 2001. *An introduction to statistical modeling of extreme values*. London : Springer-Verlag
- DGPR/SRNH, 2011. *La circulaire du 27 juillet 2011 relative à la prise en compte du risque de submersion marine dans les plans de prévention des risques naturels littoraux. (circulaire 27 juillet 2011)*
- DGPR du MEDDTL, 2011. *Premiers éléments méthodologiques pour l'élaboration des PPRL, analyse et cartographie des aléas littoraux, version 11 du 23 novembre 2011 (méthodologie PPRL v11)*
- DGPR/SRNH/BRM, 2012. *Directives et recommandations pour l'élaboration de la cartographie des surfaces inondables et des risques, version 15 du 16 mai 2012 (directives TRI v15)*
- DGPR, 2013. *Lettre du 19 avril 2013 concernant la détermination du niveau marin « extrême » dans le cadre de l'aléa submersion marine de la directive « inondations », du Service Risques Naturels et Hydrauliques ; Bureau des risques météorologiques*.
- EDF R&D, 2011. *TOMAWAC Software for sea state modeling on unstructured grids over oceans and coastal seas*, disponible de <http://www.opentelemac.org/index.php/modules-list/20-tomawac>
- Eurotop, 2007. *Wave overtopping of sea defences and related structures : assessment manual*. EA, ENW et KFKI, 2007.
- IMDC, 2005. *Sigmaplan Maatschappelijke KostenBatenAnalyse. Deelopdracht 1, Faserapport 2 : Nulalternatief : waterstanden, overstromingskaarten, schade, slachtoffers en risico*. Rapport RA/14082/04.017, v 2.0 (en Néerlandais).
- IMDC, 2007. *Geïntegreerd Kustveiligheidsplan – DO1. Leidraad Toetsen 2007*. Rapport I/RA/11310/07.129/ABO v2 (en Néerlandais).
- IMDC, University of Ghent, Blanckaert, J 2005, *A probabilistic detailed level approach to flood risk assessment in the Scheldt estuary*.

Kergadallan X., 2013. *Analyse statistique des niveaux d'eau extrêmes – environnements maritime et estuarien*. CETMEF.

MEDDTL, 2007. Circulaire du

RIKZ, 2007. *Technisch rapport duinafslag, beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering ten behoeve van Voorschrift Toetsing op Veiligheid 2006* (TRDA2006, *rapport technique de l'érosion des dunes, de l'évaluation de la sécurité des dunes comme protection côtière*). Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee (RIKZ), 2007 (en Néerlandais).

RIKZ, 2002. *Betrouwbaarheid SWAN*, RIKZ/OS-2002.116.

SHOM, 2011. *Références Altimétriques Maritimes Ports de France métropolitaine et d'outre-mer. Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée*. Édition 2011. ISBN 978-2-11-097286-6

SHOM, 2012. *REFMAR Réseaux de référence des observations marégraphiques*, disponible de <http://refmar.shom.fr>

SHOM / CETMEF, 2012. *Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique)*. ISBN 978-2-11-128331-2

Sogreah, 2009. *Etude relative à la gestion du trait de côte des Pays de la Loire – Note explicative sur la modélisation numérique de propagation des états de mer*. Note ref. 1711836/070409.

Sogreah, 2012. *Étude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des pays de la Loire*. Mars 2012, Rapport N° 1711836R1.

Steezel H.J., 1993. *Cross shore transport during storm surges*. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands.

TAW, 1984. *Leidraad voor de beoordeling van de veiligheid van duinen als waterkering (guide pour l'évaluation de la sécurité des dunes comme protection côtière)*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), 1984 (en Néerlandais).

TAW, 1999. *Leidraad Toetsen op veiligheid (LTV, guide pour les tests de sécurité)*. Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen (TAW), 1999 (en Néerlandais).

WL|Delft Hydraulics & Alkyon, 2003. *Reliability of SWAN at the Petten Sea Defence*. Report H4197/A1044, in opdracht van RIKZ.

Zimmerman et al. 1999. *Applicability of wave models in shallow coastal waters*.

6. Annexes

A Distributions univariées

A.1 Houle COAST2525 – étendu – secteur W

A.1.1 Loi Pareto Généralisée

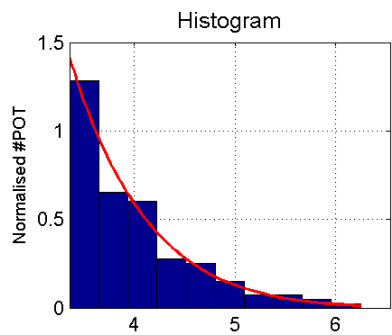
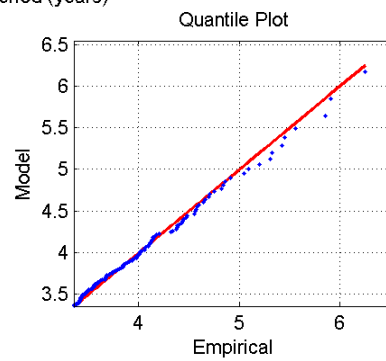
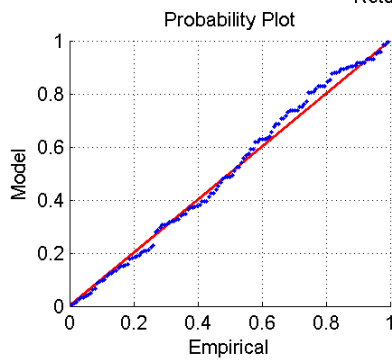
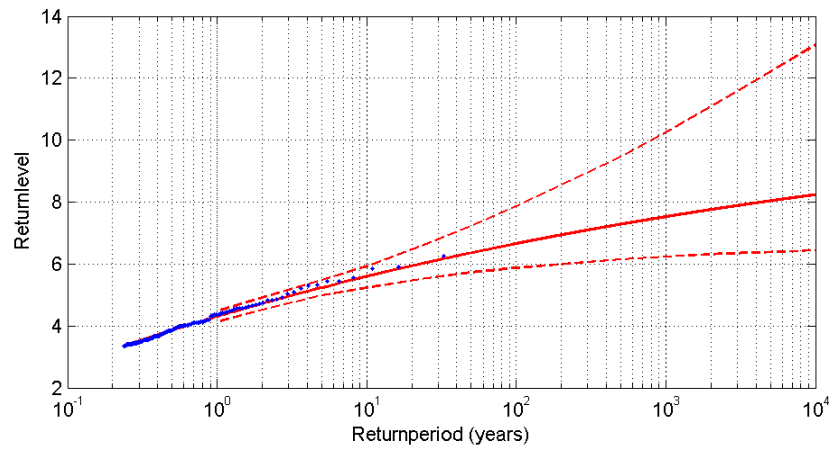
COAST2525

GPD distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - (1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi}}$$

$$Returnlevel : x = u + \frac{\sigma}{\xi} * ((\frac{T+u}{A})^\xi - 1)$$

$\xi = -0.086847$
 $\sigma = 0.70281$
 $u = 3.3524$
 $A = 32.4107$
 $k = 137$



T	X	UPCI	LOCI
1.00e+000	4.30e+000	4.48e+000	4.13e+000
2.00e+000	4.72e+000	4.92e+000	4.52e+000
5.00e+000	5.24e+000	5.49e+000	4.98e+000
1.00e+001	5.60e+000	5.93e+000	5.24e+000
2.50e+001	6.05e+000	6.65e+000	5.54e+000
5.00e+001	6.36e+000	7.23e+000	5.73e+000
1.00e+002	6.66e+000	7.86e+000	5.88e+000
5.00e+002	7.28e+000	9.48e+000	6.15e+000
1.00e+003	7.53e+000	1.03e+001	6.23e+000
2.50e+003	7.83e+000	1.14e+001	6.33e+000
4.00e+003	7.97e+000	1.19e+001	6.37e+000
1.00e+004	8.24e+000	1.31e+001	6.44e+000

©IMDC-WY

A.1.2 Loi Weibull

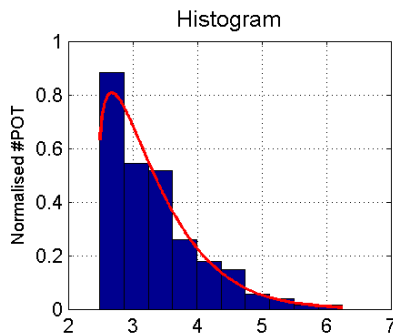
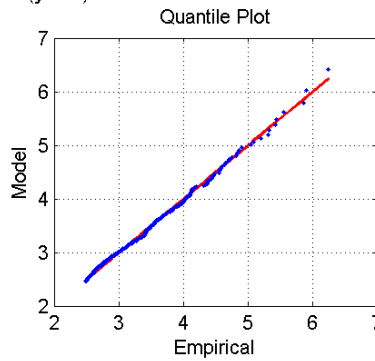
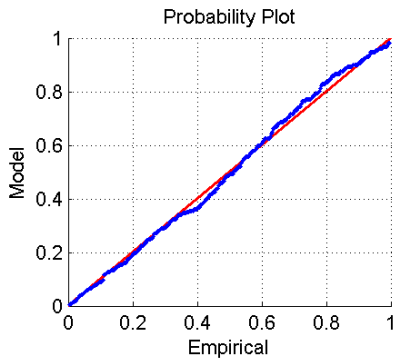
COAST2525

Cond. Weibull distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y|x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u)^\tau)$$

$$Returnlevel : X = u + (\frac{1}{\lambda} \log(\frac{T+k}{A}))^{(1/\tau)}$$

$\tau = 1.21$
 $\lambda = 1.0948$
 $u = 2.4552$
 $A = 32.4107$
 $k = 328$



T	X	UPCI	LOCI
1.00e+000	4.31e+000	4.47e+000	4.15e+000
2.00e+000	4.76e+000	4.97e+000	4.55e+000
5.00e+000	5.33e+000	5.61e+000	5.05e+000
1.00e+001	5.74e+000	6.09e+000	5.42e+000
2.50e+001	6.27e+000	6.71e+000	5.88e+000
5.00e+001	6.66e+000	7.17e+000	6.21e+000
1.00e+002	7.04e+000	7.62e+000	6.53e+000
5.00e+002	7.91e+000	8.65e+000	7.25e+000
1.00e+003	8.27e+000	9.10e+000	7.55e+000
2.50e+003	8.75e+000	9.65e+000	7.93e+000
4.00e+003	8.99e+000	9.94e+000	8.13e+000
1.00e+004	9.45e+000	1.05e+001	8.51e+000

©IMDC-WZ

A.1.3 Loi exponentielle

COAST2525

Exponential distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u))$$

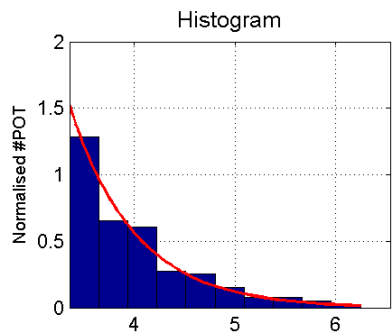
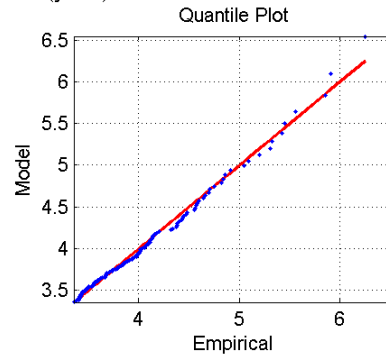
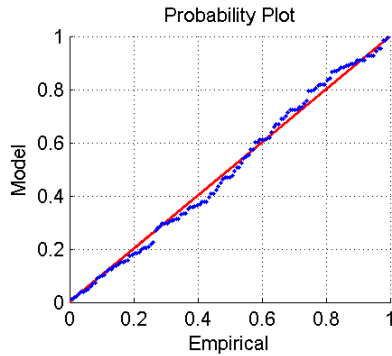
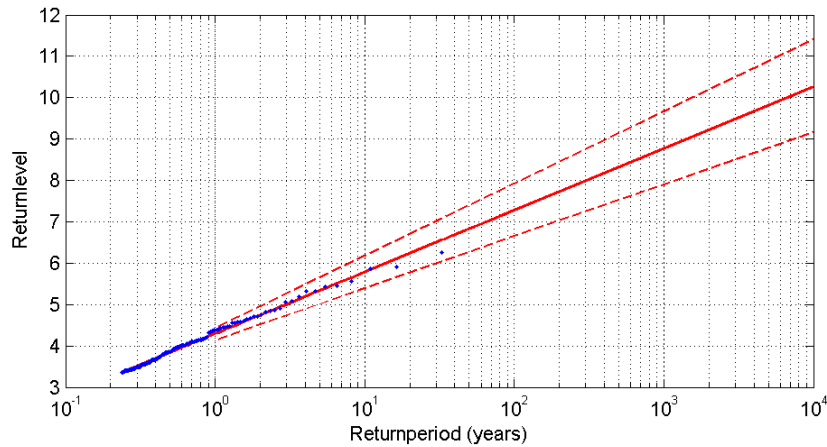
$$\lambda = 1.5423$$

$$u = 3.35$$

$$A = 32.4107$$

$$k = 137$$

$$Returnlevel : X = u + \frac{1}{\lambda} \log\left(\frac{T}{A}\right)$$



T	X	UPCI	LOCI
1.00e+000	4.28e+000	4.44e+000	4.14e+000
2.00e+000	4.73e+000	4.96e+000	4.52e+000
5.00e+000	5.33e+000	5.66e+000	5.02e+000
1.00e+001	5.78e+000	6.18e+000	5.39e+000
2.50e+001	6.37e+000	6.87e+000	5.89e+000
5.00e+001	6.82e+000	7.40e+000	6.27e+000
1.00e+002	7.27e+000	7.92e+000	6.65e+000
5.00e+002	8.31e+000	9.14e+000	7.53e+000
1.00e+003	8.76e+000	9.66e+000	7.91e+000
2.50e+003	9.36e+000	1.04e+001	8.41e+000
4.00e+003	9.66e+000	1.07e+001	8.66e+000
1.00e+004	1.03e+001	1.14e+001	9.16e+000

©IMDC-WZ

A.2 Houle COAST2525 – étendu – secteur N-NE

A.2.1 Loi Pareto Généralisée

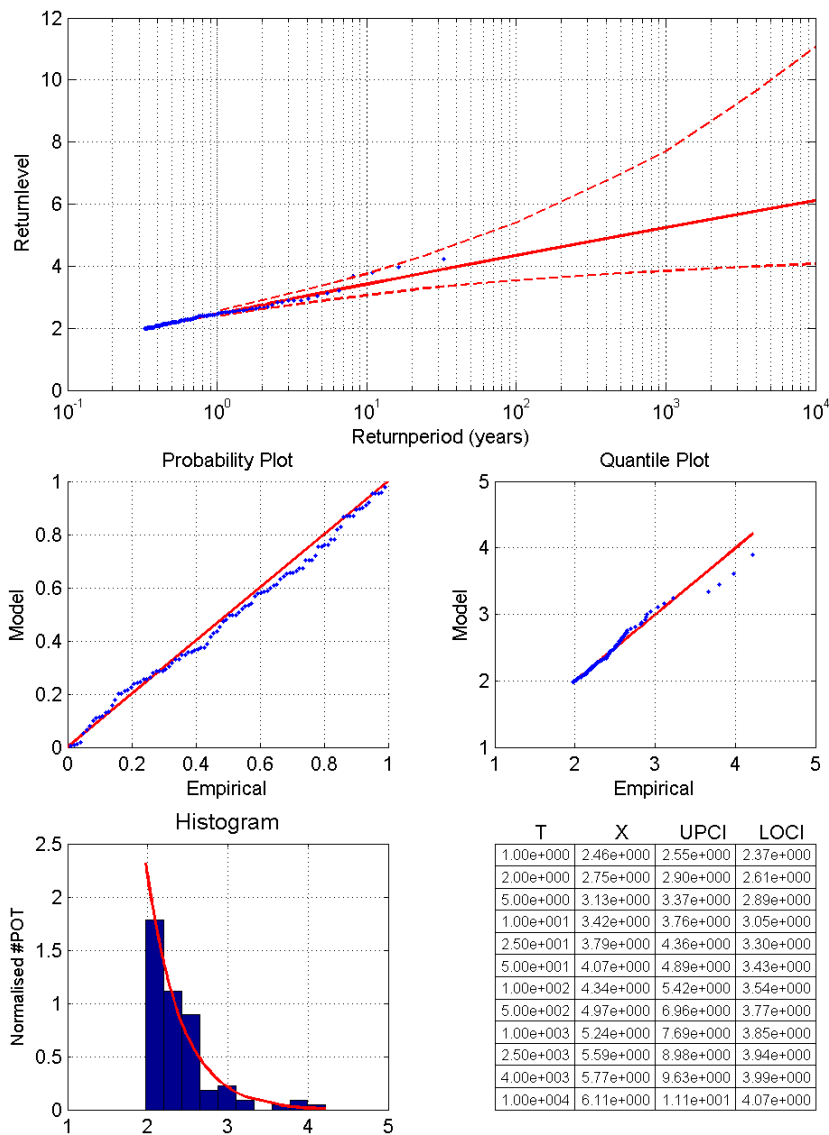
COAST2525

GPD distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - (1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi}}$$

$$Returnlevel : x = u + \frac{\sigma}{\xi} * ((\frac{T}{A})^\xi - 1)$$

$\xi = -0.013945$
 $\sigma = 0.42938$
 $u = 1.9773$
 $A = 32.4107$
 $k = 100$



©IMDC-VL

A.2.2 Loi Weibull

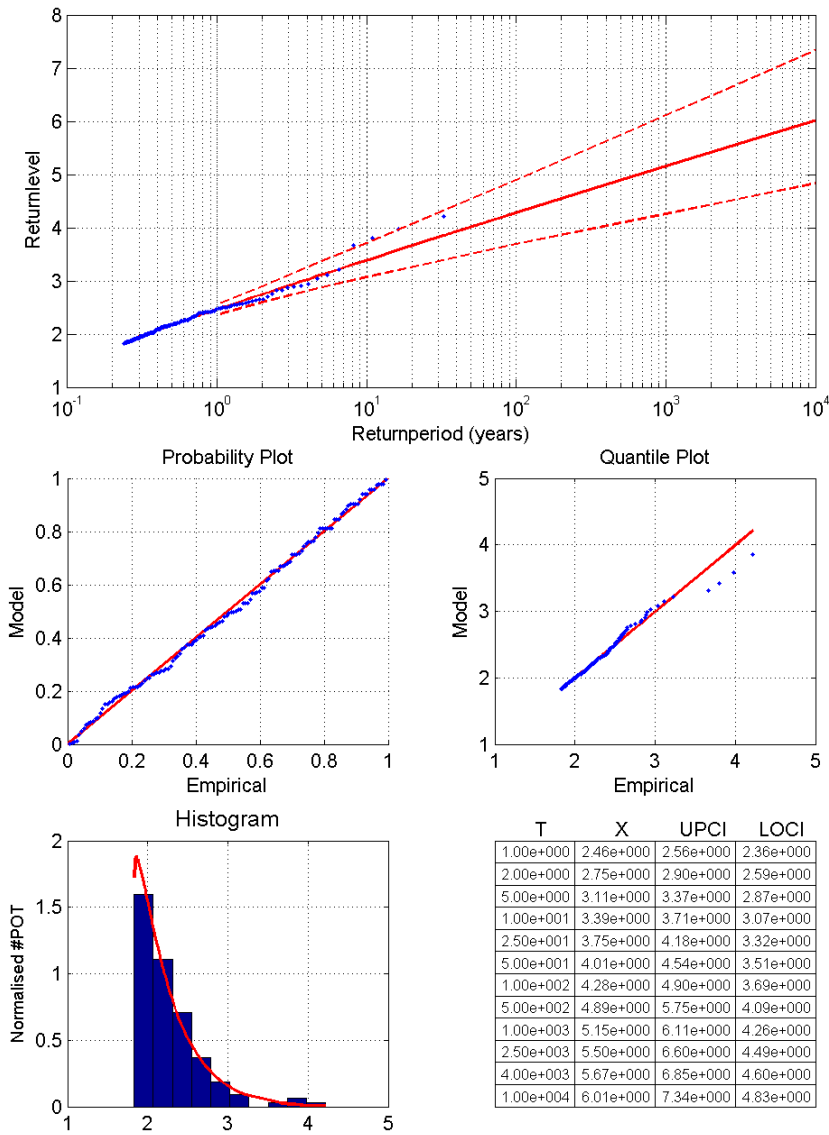
COAST2525

Cond. Weibull distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u)^\tau)$$

$$Returnlevel : X = u + (\frac{1}{\lambda} \log(\frac{T+k}{A}))^{(1/\tau)}$$

$\tau = 1.0616$
 $\lambda = 2.3286$
 $u = 1.8269$
 $A = 32.4107$
 $k = 136$



© IMDC-WZ

A.2.3 Loi exponentielle

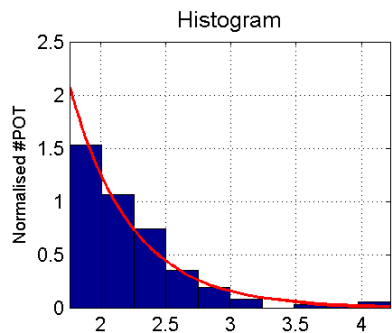
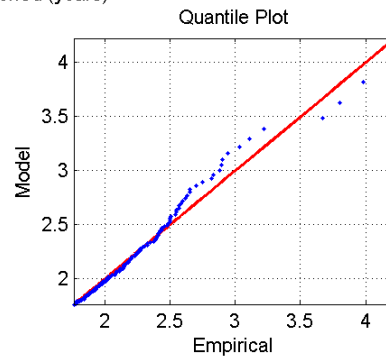
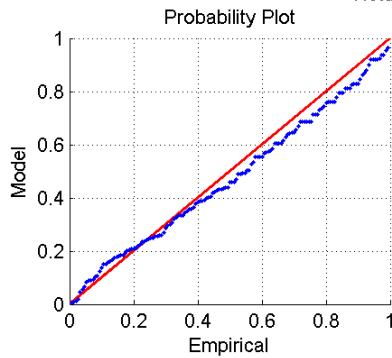
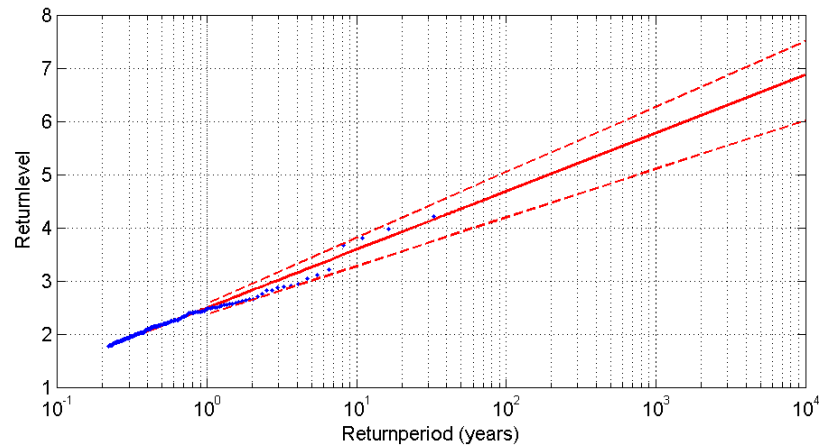
COAST2525

Exponential distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u))$$

$$Returnlevel : X = u + \frac{1}{\lambda} \log\left(\frac{T}{A}\right)$$

$$\begin{aligned} \lambda &= 2.1012 \\ u &= 1.7602 \\ A &= 32.4107 \\ k &= 149 \end{aligned}$$



T	X	UPCI	LOCI
1.00e+000	2.49e+000	2.58e+000	2.37e+000
2.00e+000	2.82e+000	2.95e+000	2.64e+000
5.00e+000	3.25e+000	3.44e+000	3.00e+000
1.00e+001	3.58e+000	3.81e+000	3.28e+000
2.50e+001	4.02e+000	4.30e+000	3.64e+000
5.00e+001	4.35e+000	4.67e+000	3.92e+000
1.00e+002	4.68e+000	5.04e+000	4.19e+000
5.00e+002	5.44e+000	5.90e+000	4.83e+000
1.00e+003	5.77e+000	6.28e+000	5.10e+000
2.50e+003	6.21e+000	6.77e+000	5.47e+000
4.00e+003	6.43e+000	7.02e+000	5.65e+000
1.00e+004	6.87e+000	7.51e+000	6.02e+000

©IMDC-WZ

A.3 Houle COAST2525 – étendu – omnidirectionnel

A.3.1 Loi Pareto Généralisée

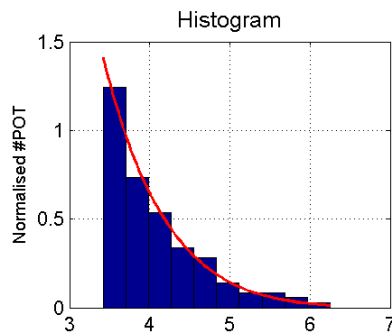
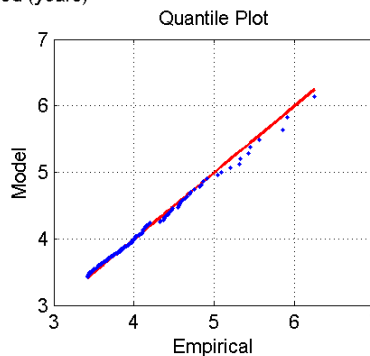
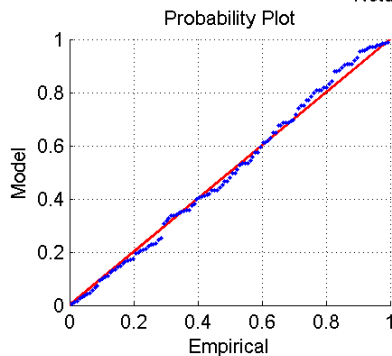
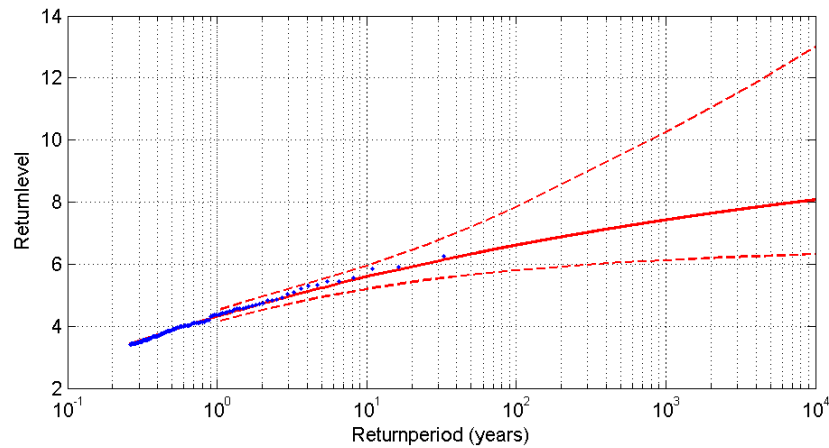
COAST2525ext

GPD distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - (1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi}}$$

$$Returnlevel : x = u + \frac{\sigma}{\xi} * ((\frac{T}{A})^\xi - 1)$$

$\xi = -0.097935$
 $\sigma = 0.70731$
 $u = 3.4185$
 $A = 32.4107$
 $k = 125$



T	X	UPCI	LOCI
1.00e+000	4.31e+000	4.50e+000	4.15e+000
2.00e+000	4.73e+000	4.95e+000	4.53e+000
5.00e+000	5.24e+000	5.50e+000	4.94e+000
1.00e+001	5.59e+000	5.95e+000	5.20e+000
2.50e+001	6.02e+000	6.62e+000	5.49e+000
5.00e+001	6.33e+000	7.19e+000	5.66e+000
1.00e+002	6.61e+000	7.83e+000	5.80e+000
5.00e+002	7.20e+000	9.53e+000	6.05e+000
1.00e+003	7.42e+000	1.03e+001	6.12e+000
2.50e+003	7.70e+000	1.13e+001	6.22e+000
4.00e+003	7.83e+000	1.19e+001	6.25e+000
1.00e+004	8.07e+000	1.30e+001	6.32e+000

©IMDC-VL

A.3.2 Loi Weibull

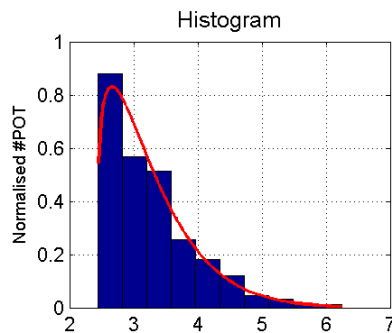
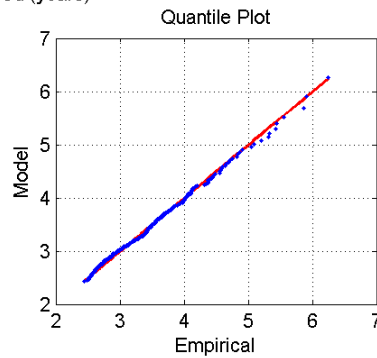
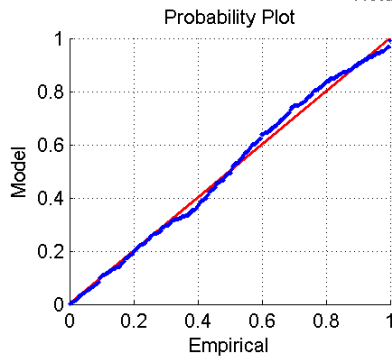
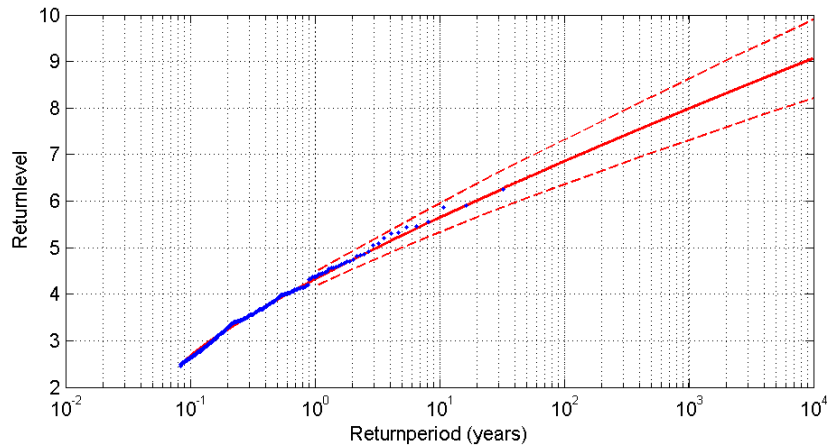
COAST2525

Cond. Weibull distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u)^\tau)$$

$$Returnlevel : X = u + (\frac{1}{\lambda} \log(\frac{T+k}{A}))^{(1/\tau)}$$

$\tau = 1.229$
 $\lambda = 1.1438$
 $u = 2.4328$
 $A = 32.4107$
 $k = 389$



T	X	UPCI	LOCI
1.00e+000	4.31e+000	4.47e+000	4.16e+000
2.00e+000	4.73e+000	4.93e+000	4.54e+000
5.00e+000	5.26e+000	5.51e+000	5.00e+000
1.00e+001	5.64e+000	5.94e+000	5.34e+000
2.50e+001	6.13e+000	6.51e+000	5.76e+000
5.00e+001	6.49e+000	6.91e+000	6.06e+000
1.00e+002	6.85e+000	7.32e+000	6.37e+000
5.00e+002	7.64e+000	8.24e+000	7.04e+000
1.00e+003	7.98e+000	8.63e+000	7.32e+000
2.50e+003	8.42e+000	9.15e+000	7.68e+000
4.00e+003	8.64e+000	9.41e+000	7.86e+000
1.00e+004	9.06e+000	9.91e+000	8.21e+000

© IMDC-WL

A.3.3 Loi exponentielle

COAST2525ext

Exponential distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u))$$

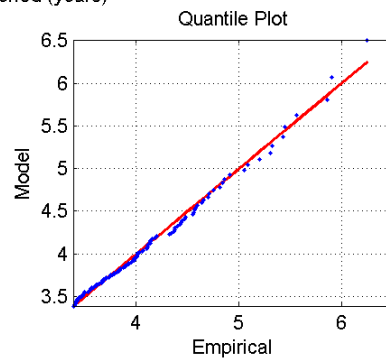
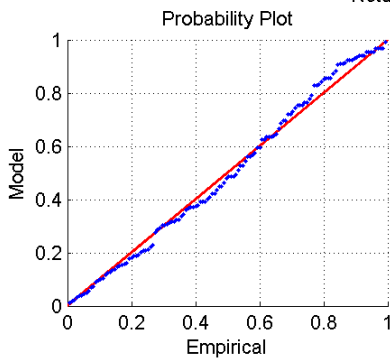
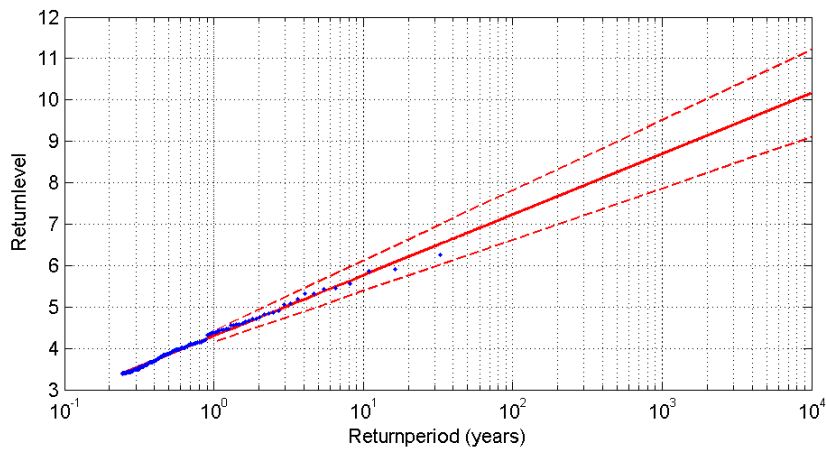
$$\lambda = 1.5683$$

$$u = 3.3814$$

$$Returnlevel : X = u + \frac{1}{\lambda} \log\left(\frac{T}{A}\right)$$

$$A = 32.4107$$

$$k = 134$$



T	X	UPCI	LOCI
1.00e+000	4.29e+000	4.43e+000	4.15e+000
2.00e+000	4.73e+000	4.94e+000	4.52e+000
5.00e+000	5.31e+000	5.61e+000	5.01e+000
1.00e+001	5.75e+000	6.12e+000	5.39e+000
2.50e+001	6.34e+000	6.80e+000	5.88e+000
5.00e+001	6.78e+000	7.31e+000	6.25e+000
1.00e+002	7.22e+000	7.82e+000	6.63e+000
5.00e+002	8.25e+000	9.00e+000	7.49e+000
1.00e+003	8.69e+000	9.51e+000	7.87e+000
2.50e+003	9.28e+000	1.02e+001	8.36e+000
4.00e+003	9.57e+000	1.05e+001	8.61e+000
1.00e+004	1.02e+001	1.12e+001	9.11e+000

©IMDC-WZ

A.4 Surcotes Le Havre

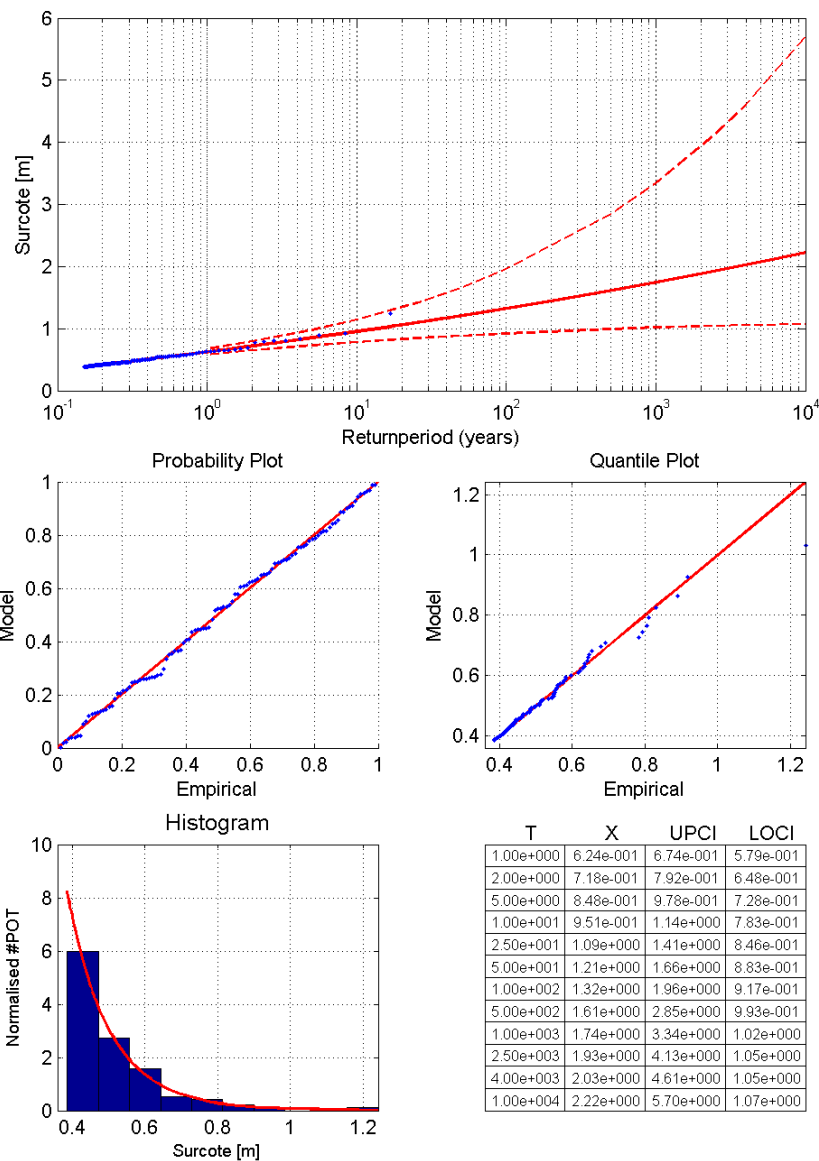
A.4.1 Loi Pareto Généralisée

Le Havre
GPD distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - \left(1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}}$$

$$Returnlevel : x = u + \frac{\sigma}{\xi} * \left(\left(\frac{T}{A}\right)^\xi - 1\right)$$

$\xi = 0.055354$
 $\sigma = 0.11988$
 $u = 0.38421$
 $A = 16.6418$
 $k = 111$



©IMDC-WZ

A.4.2 Loi Weibull

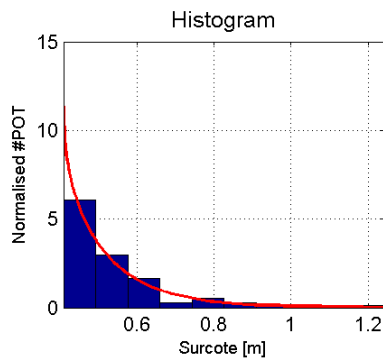
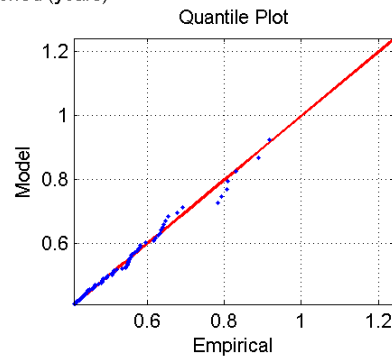
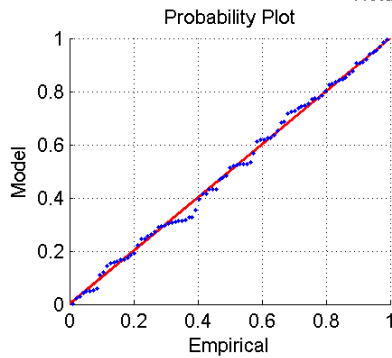
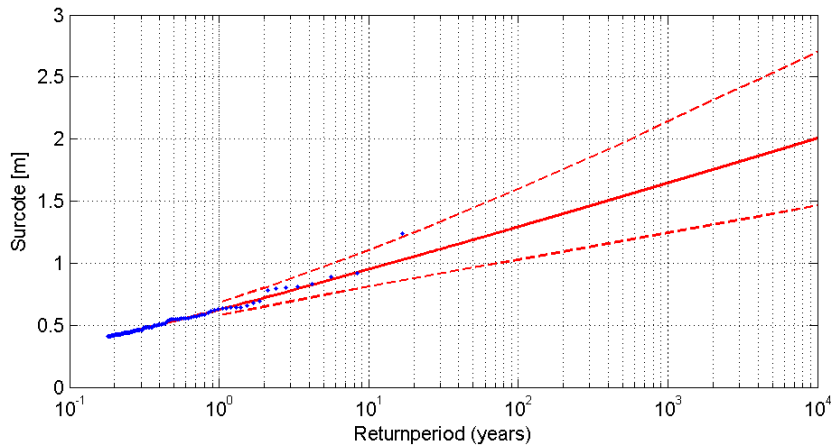
Le Havre

Cond. Weibull distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u)^\tau)$$

$$Returnlevel : X = u + (\frac{1}{\lambda} \log(\frac{T+k}{A}))^{1/\tau}$$

$\tau = 0.92505$
 $\lambda = 7.091$
 $u = 0.40863$
 $A = 16.6418$
 $k = 93$



T	X	UPCI	LOCI
1.00e+000	6.25e-001	6.80e-001	5.78e-001
2.00e+000	7.21e-001	8.00e-001	6.48e-001
5.00e+000	8.50e-001	9.75e-001	7.43e-001
1.00e+001	9.51e-001	1.11e+000	8.11e-001
2.50e+001	1.09e+000	1.29e+000	9.00e-001
5.00e+001	1.19e+000	1.45e+000	9.63e-001
1.00e+002	1.29e+000	1.60e+000	1.03e+000
5.00e+002	1.54e+000	1.97e+000	1.18e+000
1.00e+003	1.64e+000	2.14e+000	1.24e+000
2.50e+003	1.79e+000	2.37e+000	1.33e+000
4.00e+003	1.86e+000	2.47e+000	1.38e+000
1.00e+004	2.01e+000	2.70e+000	1.46e+000

©IMDC-WL

A.4.3 Loi exponentielle

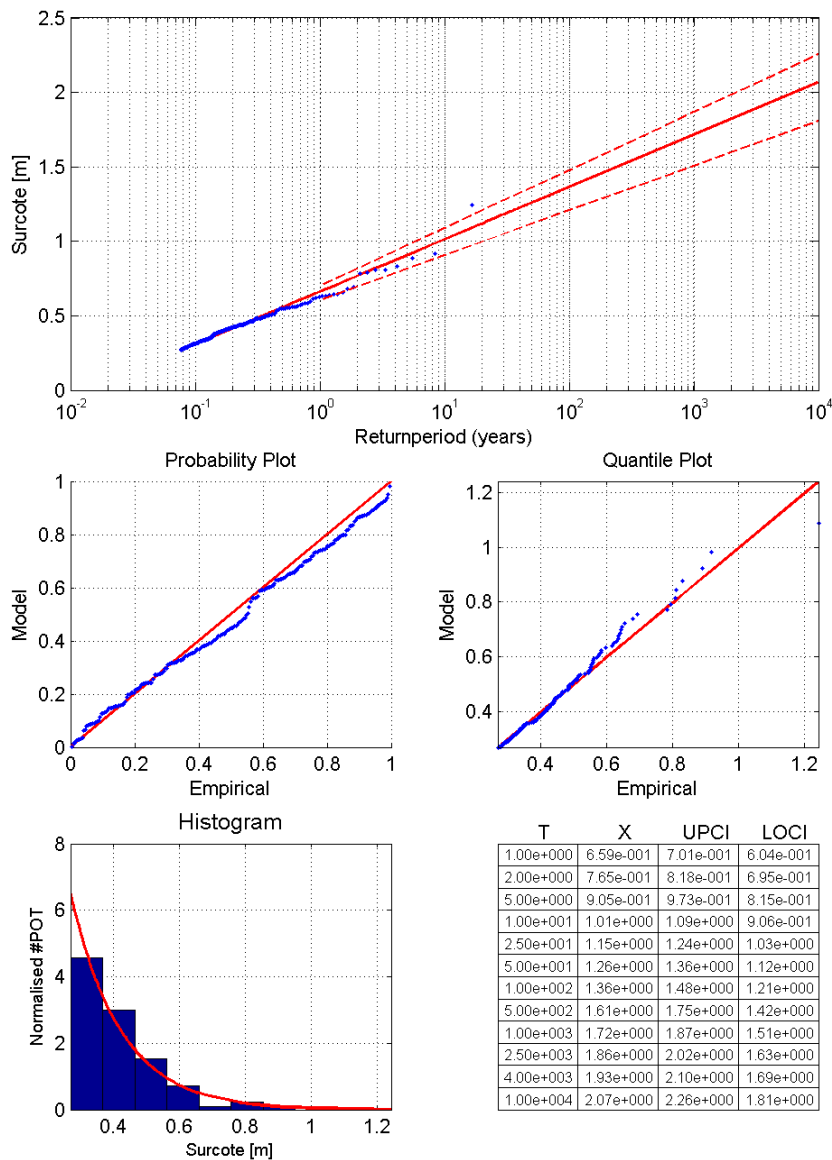
Le Havre

Exponential distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u))$$

$$Returnlevel : X = u + \frac{1}{\lambda} \log\left(\frac{T * \lambda}{A}\right)$$

$$\begin{aligned} \lambda &= 6.5437 \\ u &= 0.26768 \\ A &= 16.6418 \\ k &= 216 \end{aligned}$$



©IMDC-WZ

A.5 Surcotes Cherbourg

A.5.1 Loi Pareto Généralisée

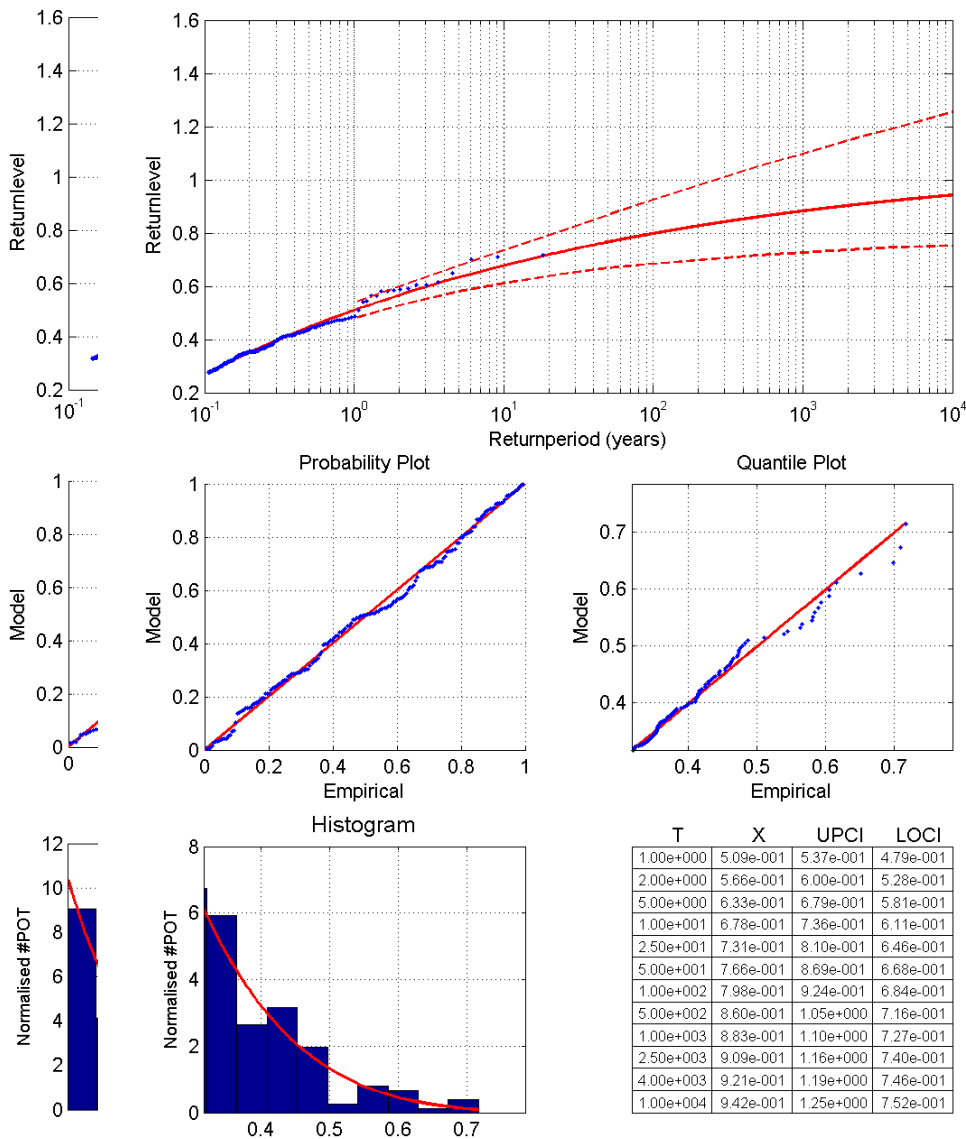
Cherbourg Omni

GPD distribution

$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - (1 + \frac{\xi(x-u)}{\sigma})^{-\frac{1}{\xi}}$

 $\xi = -0.15081$
 $\sigma = 0.12221$
 $u = 0.27615$
 $A = 18.2019$
 $k = 172$

$Returnlevel : x = u + \frac{\sigma}{\xi} * ((\frac{T+k}{A})^\xi - 1)$



©IMDC-WZ

A.5.2 Loi Weibull

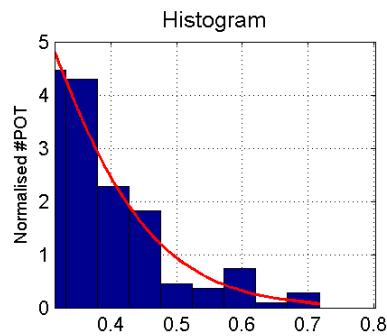
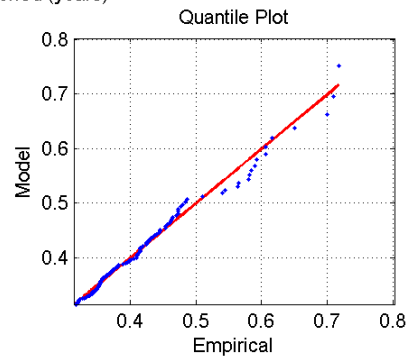
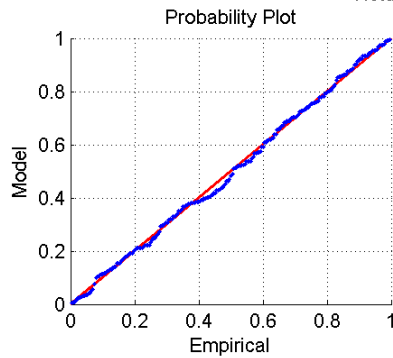
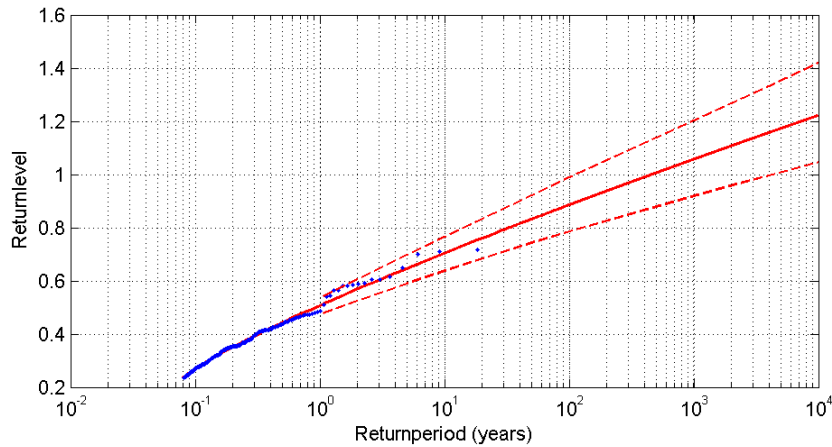
Cherbourg Omni

Cond. Weibull distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y | x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u)^\tau)$$

$$Returnlevel : X = u + (\frac{1}{\lambda} \log(\frac{T+k}{A}))^{(1/\tau)}$$

$\tau = 1.1942$
 $\lambda = 11.8936$
 $u = 0.23279$
 $A = 18.2019$
 $k = 227$



T	X	UPCI	LOCI
1.00e+000	5.08e-001	5.35e-001	4.75e-001
2.00e+000	5.67e-001	6.07e-001	5.26e-001
5.00e+000	6.45e-001	6.99e-001	5.91e-001
1.00e+001	7.03e-001	7.66e-001	6.38e-001
2.50e+001	7.76e-001	8.54e-001	6.98e-001
5.00e+001	8.31e-001	9.21e-001	7.43e-001
1.00e+002	8.94e-001	9.88e-001	7.85e-001
5.00e+002	1.01e+000	1.14e+000	8.79e-001
1.00e+003	1.06e+000	1.20e+000	9.20e-001
2.50e+003	1.12e+000	1.29e+000	9.71e-001
4.00e+003	1.16e+000	1.33e+000	9.96e-001
1.00e+004	1.22e+000	1.42e+000	1.05e+000

©IMDC-WL

A.5.3 Loi Exponentielle

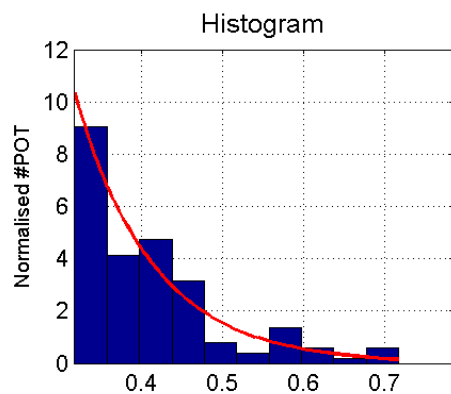
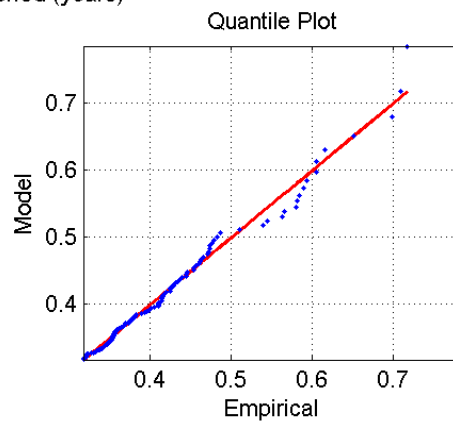
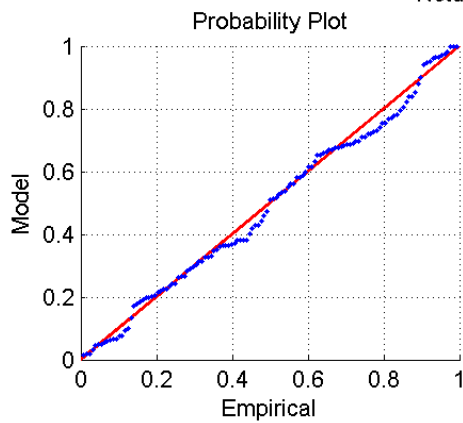
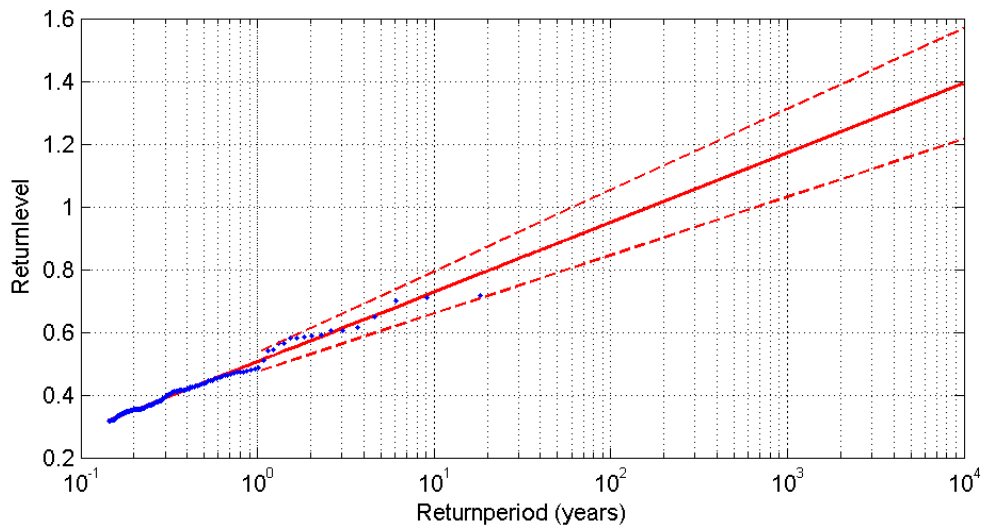
Cherbourg Omni

Exponential distribution

$$cdf : 1 - Pr(x > u + y|x > u) = 1 - exp(-\lambda(x - u))$$

$\lambda = 10.3691$
 $u = 0.3172$
 $A = 18.2019$
 $k = 127$

$$Returnlevel : X = u + \frac{1}{\lambda} \log\left(\frac{T^{*k}}{A}\right)$$



T	X	UPCI	LOCI
1.00e+000	5.05e-001	5.35e-001	4.74e-001
2.00e+000	5.71e-001	6.13e-001	5.30e-001
5.00e+000	6.60e-001	7.16e-001	6.04e-001
1.00e+001	7.27e-001	7.94e-001	6.60e-001
2.50e+001	8.15e-001	8.97e-001	7.33e-001
5.00e+001	8.82e-001	9.75e-001	7.89e-001
1.00e+002	9.49e-001	1.05e+000	8.45e-001
5.00e+002	1.10e+000	1.23e+000	9.75e-001
1.00e+003	1.17e+000	1.31e+000	1.03e+000
2.50e+003	1.26e+000	1.41e+000	1.10e+000
4.00e+003	1.30e+000	1.47e+000	1.14e+000
1.00e+004	1.39e+000	1.57e+000	1.22e+000

©IMDC-WL

B Niveau d'eau SHOM / CETMEF 2012

Contours d'interpolation pour la hauteur de pleine mer T100

