

ANNEXE 5

Rapport de phase 2 : Caractérisation des aléas

Date d'approbation : 18 JUIL. 2017

Signature :

Préfet de la région Bretagne,
Préfet d'Ille-et-Vilaine



Christophe MIRMAND

Plan de prévention des risques littoraux de Saint Malo

Rapport de phase 2

Caractérisation des aléas



Direction départementale des
territoires et de la mer d'Ille et Vilaine

Plan de prévention des risques littoraux de Saint Malo

Rapport de phase 2

Caractérisation des aléas

Préparé pour Direction départementale des territoires et de la mer
d'Ille et Vilaine

Représenté par Mr Peinturier



Chef de projet	Jean-Paul Ducatez
Numéro de projet	21800246
Date de validation	26 mai 2016
Révision	1.0
Catégorie	Ouvert



1. The information and data provided in this
 report are for informational purposes only.
 2. The information and data provided in this
 report are for informational purposes only.
 3. The information and data provided in this
 report are for informational purposes only.



4. The information and data provided in this
 report are for informational purposes only.
 5. The information and data provided in this
 report are for informational purposes only.

6. The information and data provided in this
 report are for informational purposes only.
 7. The information and data provided in this
 report are for informational purposes only.



SOMMAIRE

1	Introduction	1
2	Phénomènes étudiés sur la commune de Saint Malo	1
2.1	Description des phénomènes de submersion marine	1
2.2	Détermination des phénomènes sur la commune de Saint Malo	3
2.3	L'aléa recul du trait de côte sur le domaine d'étude	4
3	La caractérisation des phénomènes de submersion, principes généraux	5
3.1	Prise en compte des forçages météo marins	5
3.2	Prise en compte des événements conjoints niveaux / houle	6
3.3	Principes de caractérisation des phénomènes	7
4	Détermination de l'événement de référence	9
4.1	Calcul de l'événement centennal	9
4.1.1	Les niveaux marins	9
4.1.2	Estimation de la houle au large de Saint Malo	9
4.1.3	Analyse conjointe houle / niveau marin	14
4.1.4	Définition des ensembles Niveaux / Houle / Période / Incidence	15
4.1.5	Propagation des états de mer	16
4.1.6	Modélisation des conditions de mer au pied de l'ouvrage	21
4.1.7	Détermination du niveau marin centennal	24
4.2	Qualification des événements historiques	25
4.3	Conclusion : choix de l'événement de référence	25
5	Détermination du scénario de référence	26
5.1	Rappels méthodologiques	26
5.2	Analyse des systèmes de défense contre la submersion marine	27
5.3	Hypothèses formulées pour les défaillances des ouvrages	30
6	Prise en compte du réseau d'assainissement	32
7	Le modèle de franchissement	36
7.1	Détail de la chaîne de calcul	36
7.2	Calage du modèle de franchissement	43
8	Principe d'établissement des cartes d'aléa	44
8.1	Caractérisation des aléas submersion marine.....	44
8.2	Modélisation des phénomènes	44
8.2.1	Présentation du logiciel de modélisation	44
8.2.2	Mise en œuvre du modèle hydraulique	45
8.2.3	Les intensités de l'aléa submersion marine	48
8.2.4	Bandes de précautions	49
8.2.5	Bandes de chocs mécaniques	50
9	Cartographie des aléas	52
9.1	Les scénarios	52
9.2	Les cartes	52

FIGURES

Figure 2-1 : Exemple de débordement dans le quartier des Bas Sablons lors de la tempête de mars 2008 (source Ville de Saint Malo).....	1
Figure 2-2: Exemple de rupture dans une digue maritime (Source : CCIN).....	2
Figure 2-3: Franchissement de la Digue du Sillon – 10 mars 2008 (in Cariolet 2011).....	2
Figure 2-4 : Répartition spatiale des tempêtes	3
Figure 2-5 : Répartition des événements (en rouge les franchissements, en bleu les dégradations d'ouvrage).....	4
Figure 3-1 : Effet de la surcote de déferlement de la houle sur le niveau de la mer à l'approche de la côte	5
Figure 3-2 : Description des relations entre les différents processus	5
Figure 3-3 : Effet d'une surcote météorologique et d'une surcote de déferlement sur le niveau de pleine mer.....	6
Figure 3-4 : Méthodologie pour la modélisation de débordements et ruptures d'ouvrages.....	7
Figure 3-5 : Illustration du jet de rive sur un ouvrage.....	8
Figure 3-6 : Méthodologie pour la modélisation de franchissements.....	8
Figure 4-1 : Emprise du modèle régional.....	10
Figure 4-2 : Calage du modèle régional.....	10
Figure 4-3 : modèle régional – Hindcast 1988 2007	11
Figure 4-4 : Ajustement de Weibull des houles au large de Saint Malo	12
Figure 4-5 : Densité de probabilité et fonction de répartition des houles au large de Saint Malo	13
Figure 4-6 : Fréquence au dépassement des houles au large de Saint Malo	13
Figure 4-7 : Courbe des probabilités conjointes.....	14
Figure 4-8 : Corrélation Hs Tp.....	15
Figure 4-9 : Rose des houles au large de Saint Malo	15
Figure 4-10 : Données bathymétriques relevées par l'IFREMER dans le cadre du projet GIRAC.....	16
Figure 4-11 : Bathymétrie et emprise du modèle local de houle spectrale.....	17
Figure 4-12 : Modélisation du couple niveau 6,71 / houle 6,37 / période 12 s / $\theta = 315^\circ$	18
Figure 4-13 : Modélisation du couple niveau 7,49 / houle 1,92 / période 8 s / $\theta = 315^\circ$	18
Figure 4-14 : Modèle de houle SW - Hs 6,37 m / période 12 s / $\theta = 315^\circ$	19
Figure 4-15 : Evolution des surcotes de déferlement	19
Figure 4-16 : Surcote de déferlement du couple (7.49 m ; Hs=1.92 m).....	20
Figure 4-17 : Surcote de déferlement du couple (7,20 m ; Hs=3,90m) et du couple 3 (6,71m ; Hs=6,37m).....	20
Figure 4-18 : Niveau marin et hauteur de houle, au large et au pied de l'ouvrage.....	21
Figure 4-19 : Localisation des profils 1D.....	21
Figure 4-20 : Surcote de déferlement devant la digue du Sillon et de Paramé	22
Figure 4-21 : Conditions au large et au pied de l'ouvrage du Sillon et de Paramé.....	23
Figure 4-22 : Couples niveau d'eau hauteur significative de houle pour les différents événements de tempêtes identifiés.....	25
Figure 5-1 : Logigramme de prise en compte des digues.....	26
Figure 5-2 : Typologie des ouvrages – SOCOTEC 2013.....	27
Figure 5-3 : Position et désignation des ouvrages (source : Annexe 1 - Arrêté préfectoral du 29 Mars 2011).....	28
Figure 5-4 : Altimétries du système de protection.....	30
Figure 5-5 : Synthèse des hypothèses – scénario de référence.....	31
Figure 6-1 : Fonctionnement du réseau lors d'une submersion.....	32
Figure 6-2 : Réseau d'assainissement modélisé sur la zone d'étude.....	33
Figure 6-3 : Bassins de collecte au sud de la station de pompage de Rocabey	34
Figure 6-4 : Exemple de prise en compte des ouvrages spéciaux.....	34
Figure 7-1 : Chaîne de calcul – en rouge étapes décrites dans ce chapitre.....	36
Figure 7-2 : Position des six profils extraits sur la plage de Saint Malo.....	37
Figure 7-3 : Profil de la digue du Sillon	38

Figure 7-4 : Profil de la digue de Paramé.....	38
Figure 7-5 : Division de la digue de Saint Malo en tronçons d'altitude homogène	39
Figure 7-6 : Figure des différents tronçons de calcul des débits de franchissement	40
Figure 7-7 : Linéaire de la digue sur lequel des débits franchissant ont été injectés dans le modèle hydrodynamique de submersion.....	42
Figure 7-8 : Résultat du calage du modèle de franchissement pour la tempête de décembre 1999	43
Figure 8-1 : Logigramme du choix de la méthode de caractérisation de l'aléa submersion marine	44
Figure 8-2 : Topographie du modèle hydraulique	45
Figure 8-3 : Passage piéton sous la voie ferrée.....	46
Figure 8-4 : Coefficient de Strickler sur le domaine modélisé.....	46
Figure 8-5 : Représentation des brèches.....	47
Figure 8-6 : Détermination de l'arase des brèches	47
Figure 8-7 : Possibilités de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (Source : DDE 84).....	48
Figure 8-8 : Représentation de la bande de précaution à la suite d'une défaillance d'ouvrage (Source : Circulaire du 27/07/2011).....	50
Figure 8-9 : Calcul de la charge hydraulique.....	50
Figure 8-10 : Logigramme de détermination des chocs mécaniques	52

TABLEAUX

Tableau 3-1 : Statistiques croisées entre le niveau d'eau et la hauteur de houle.....	7
Tableau 4-1 : Périodes de retour des niveaux marins au marégraphe de Saint Malo – SHOM 2012.....	9
Tableau 4-2 : Détermination des niveaux marins.....	9
Tableau 4-3 : Périodes de retour des houles au large de Saint Malo.....	12
Tableau 4-4 : Détermination des houles au large de Saint Malo	14
Tableau 4-5 : Probabilités conjointes- en orange valeurs SHOM CETMEF, en rose extrapolation loi de Weibull	14
Tableau 4-6 : Couples Niveaux / Hs retenus.....	15
Tableau 4-7 : Niveaux centennaux.....	24
Tableau 4-8 : Liste des événements historiques.....	25
Tableau 7-1 : Tableau des différents tronçons de calcul des débits de franchissement	39
Tableau 8-1 : Définition de l'aléa en fonction des hauteurs et vitesses instantanées.....	48
Tableau 8-2 : Prise en compte des bandes de précaution dans la qualification de l'aléa submersion.....	49
Tableau 8-3 : Prise en compte des bandes de précaution dans la qualification de l'aléa submersion.....	51

ANNEXES

- A – Analyse du système de protection
- B – Carte informative
- C - Analyse du remplissage des bassins portuaires : scénario franchissement et débordement





1 Introduction

La vulnérabilité d'une grande partie du littoral français s'illustre à travers des phénomènes tels que le recul du trait de côte, la submersion marine ou l'érosion des dunes. Ces processus directement liés à l'action marine peuvent être aggravés par les activités humaines.

Le littoral constitue également une zone de forte fréquentation, ce qui se traduit par une urbanisation intensive de plus en plus proche de la mer et donc de plus en plus vulnérable aux risques liés à la mer.

Dans l'objectif de limiter la vulnérabilité des biens et des personnes, des plans de prévention des risques littoraux (PPRL) sont élaborés.

Afin d'élaborer la cartographie des aléas au sens de la méthodologie proposée par le Ministère de l'écologie et du développement durable, la présente étude a été confiée par la DDTM d'Ille-et-Vilaine à DHI.

Le présent rapport traite de la caractérisation des aléas littoraux.

2 Phénomènes étudiés sur la commune de Saint Malo

2.1 Description des phénomènes de submersion marine

La submersion marine est une inondation temporaire de la zone côtière par la mer dans des conditions météorologiques et maritimes sévères provoquées par une onde de tempête. Trois phénomènes peuvent alors se produire :

Débordement : la mer envahit par débordement les terres situées sous le niveau exceptionnel de la mer.



Figure 2-1 : Exemple de débordement dans le quartier des Bas Sablons lors de la tempête de mars 2008 (source Ville de Saint Malo)

Rupture : les protections telles que les digues et les cordons dunaires peuvent céder sous l'effet de la mer et créer des raz-de-marée.



Figure 2-2: Exemple de rupture dans une digue maritime (Source : CCIN)

Franchissement : les terres situées au-dessus du niveau de la mer peuvent parfois aussi être inondées, lorsque des projections d'eau de mer franchissent les ouvrages de protection sous l'effet de la houle. Le niveau atteint par les inondations peut alors être supérieur au niveau de la mer.



Figure 2-3: Franchissement de la Digue du Sillon – 10 mars 2008 (in Cariolet 2011)

Ces trois phénomènes peuvent se produire conjointement ou indépendamment.

2.2 Détermination des phénomènes sur la commune de Saint Malo

L'analyse historique des tempêtes couplée à la synthèse bibliographique concernant les forçages météo marins ainsi que leur conséquence en termes de flux hydro sédimentaires ont permis de mettre en évidence les phénomènes sur le littoral malouin. Les principaux phénomènes survenus à Saint Malo sont par ordre d'importance :

- Les franchissements ;
- Les dégradations d'ouvrage et les reculs du trait de côte ;
- Les débordements.

La figure ci-dessous précise la répartition spatiale des tempêtes ayant entraîné des dégâts tous types de phénomènes confondus.

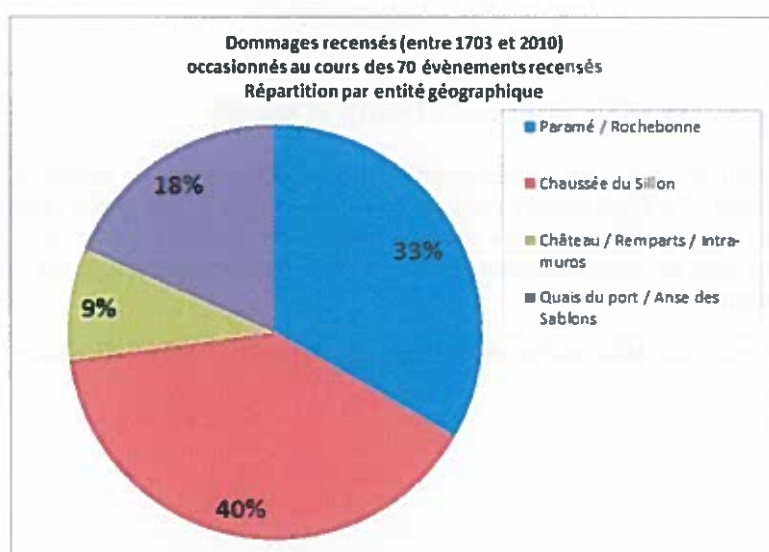


Figure 2-4 : Répartition spatiale des tempêtes

Les submersions par débordements concernent essentiellement le port de Saint Malo, jusqu'à l'Anse Solidor en passant par le port des Bas Sablons.

Les franchissements concernent l'intégralité de la digue du Sillon et de l'ouvrage de Paramé dans sa continuité. C'est le phénomène le plus fréquent, parfois spectaculaire, mais dont les volumes resteront inférieurs aux intrusions marines dues à une défaillance de l'ouvrage.

Les dégradations sur l'ouvrage recensées ont parfois été importantes (1905, 1967, 1990) sans pour autant provoquer de brèches traversant la totalité de la digue. En conséquence, aucune intrusion marine due à une brèche n'a encore été vécue à Saint Malo. Les dégradations de l'ouvrage sont a priori réparties sur l'ensemble du linéaire.

Une analyse historique plus fine montre cependant que dans la période contemporaine l'ouvrage entre Rochebonne et l'épi de la Hoguette a subi plus de dégradations que l'ouvrage entre l'épi de la Hoguette et l'Intra Muros. Les dégradations sur le Sillon sont nombreuses avant la constitution de la digue (avant 1900). Depuis la constitution de la digue du Sillon, une dégradation de l'ouvrage a été recensée. Corollairement, le phénomène prépondérant sur la digue du Sillon est devenu le franchissement par paquets de mer. Les dégradations sur Paramé restent importantes avant et après la constitution de la digue. La figure ci-dessous illustre le propos :

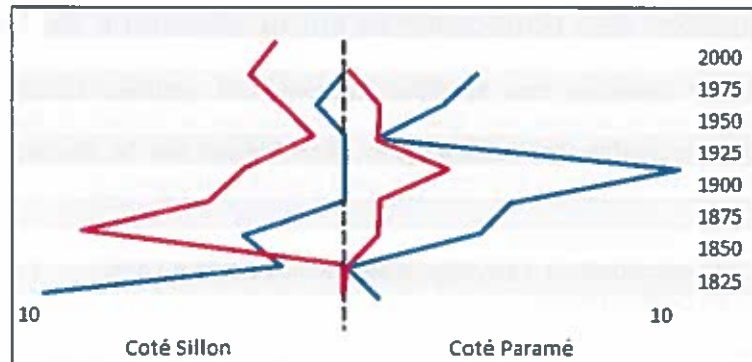


Figure 2-5 : Répartition des événements (en rouge les franchissements, en bleu les dégradations d'ouvrage)

2.3 L'aléa recul du trait de côte sur le domaine d'étude

L'évolution du trait de côte est le déplacement de la limite entre le domaine marin et le domaine continental. Ce déplacement peut se faire vers l'intérieur des terres (érosion) ou vers la mer (accrétion). Ces déplacements sont la conséquence d'une perte ou d'un gain de matériaux sous l'effet de l'érosion marine et du transit sédimentaire, combinée parfois à des actions continentales.

Sur la commune de Saint Malo aucun risque de recul du trait de côte n'est présent.

3 La caractérisation des phénomènes de submersion, principes généraux

3.1 Prise en compte des forçages météo marins

Les fluctuations du niveau de la mer sont liées aux facteurs astronomiques et climatiques. Le niveau marin extrême est défini comme la combinaison d'un signal de marée, d'une surcote météorologique et d'une surcote de déferlement qui se produit dans la zone de déferlement de la houle. La surcote de déferlement correspond à une surcote locale du niveau marin provenant du déferlement de la houle. La figure ci-dessous illustre ce phénomène.

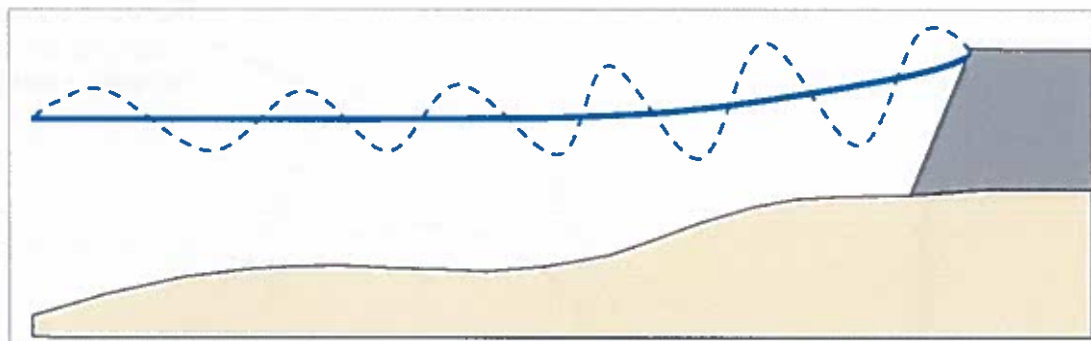


Figure 3-1 : Effet de la surcote de déferlement de la houle sur le niveau de la mer à l'approche de la côte

La hauteur d'eau mesurée par les marégraphes est une combinaison de la marée et de la surcote météorologique. Ainsi les événements de référence sont étudiés par une méthode statistique sur le niveau de la mer mesuré par les marégraphes, définissant les niveaux marins extrêmes, auxquels il convient éventuellement d'ajouter l'effet local de la surcote de déferlement. Ce niveau marin extrême est variable le long du littoral.

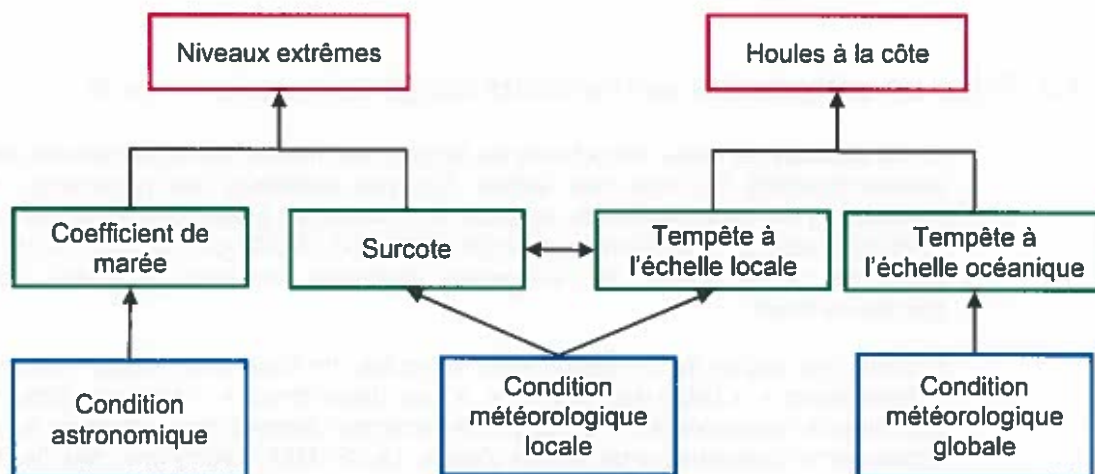


Figure 3-2 : Description des relations entre les différents processus.

Il est important de noter que la période de retour T d'un niveau extrême n'est pas égale à la combinaison d'un niveau (marée + surcote) de période de retour T et d'une surcote de déferlement de même période T . Il est donc nécessaire de prendre en compte la corrélation de ces événements et d'effectuer une analyse statistique croisée selon la méthode du « Beach Management Manual ».

La surcote de déferlement s'applique donc sur les sites significativement exposés à la houle. Elle se traduit par une augmentation locale du niveau de la mer, sur toute la durée durant laquelle une forte houle est observée. Afin d'illustrer le phénomène, la figure ci-après présente la comparaison de :

- une marée astronomique (marée « théorique », sans effet de la tempête), en rouge ;
- une marée présentant une surcote météorologique, en vert ;
- une marée présentant une surcote météorologique et de déferlement, en violet.

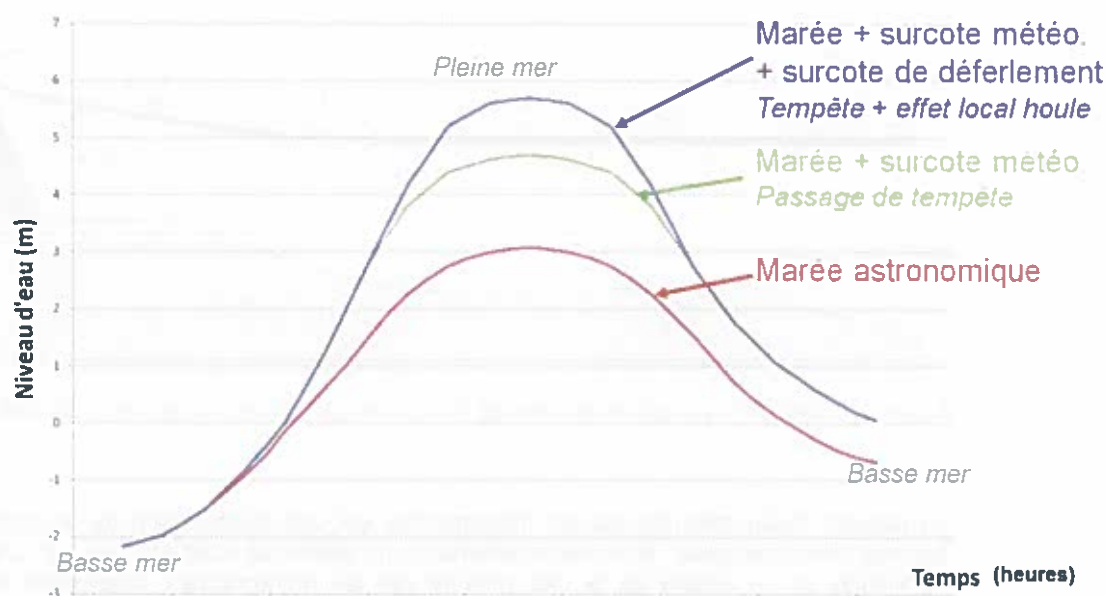


Figure 3-3 : Effet d'une surcote météorologique et d'une surcote de déferlement sur le niveau de pleine mer

3.2 Prise en compte des événements conjoints niveaux / houle

Si les périodes de retour de la houle au large et les niveaux extrêmes peuvent être estimés indépendamment les uns des autres, l'analyse statistique des paramètres croisés est nécessaire pour définir la période de retour de l'événement global. La méthode préconisée par le département de l'environnement anglais (DEFRA), décrite par Hawkes (2005) permet de définir les caractéristiques de l'événement centennal combinant un niveau d'eau et une hauteur de houle.

Il existe cinq degrés de corrélation entre la hauteur de houle et le niveau d'eau qui sont : « indépendance », « faible dépendance », « forte dépendance », « très forte dépendance », « dépendance exceptionnelle ». Ce degré de corrélation dépend des paramètres en jeu et de la configuration géographique de la zone d'étude. Le CETMEF a établi une carte des facteurs de corrélation sur tout le littoral français. A Saint Malo, le coefficient de corrélation est de 0,13. D'après le tableau de correspondance du CETMEF, ce coefficient correspond à un facteur de dépendance compris entre 2,5 et 25. Il est ainsi conseillé de définir ce facteur de dépendance à 25 (signifiant : « faible dépendance »). Ce paramètre est donc fixé à 25 dans le cas de cette

étude. Les valeurs correspondantes à la période de retour conjointe de 100 ans sont consignées dans le tableau ci-dessous.

Période de retour conjointe centennale															
Niveau d'eau (m IGN 69)	Période de retour	100	50	20	10	5	3,5	2	1,8	1	0,7	0,4	0,2	0,07	0,04
Hauteur de houle (m)	Période de retour	0,04	0,07	0,2	0,4	0,7	1	1,8	2	3,5	5	10	20	50	100

Tableau 3-1 : Statistiques croisées entre le niveau d'eau et la hauteur de houle

3.3 Principes de caractérisation des phénomènes

Nous présentons dans ce chapitre les différentes étapes de calcul des forçages météo marins influençant la submersion marine.

Modélisation des ruptures par brèches et des débordements

Dans le cas des ruptures d'ouvrage par brèche, ruine généralisée et pour les débordements, le paramètre qui influence la submersion marine est le niveau marin. Le logigramme suivant précise les différentes étapes du calcul des niveaux marins appliqués sur les ouvrages.

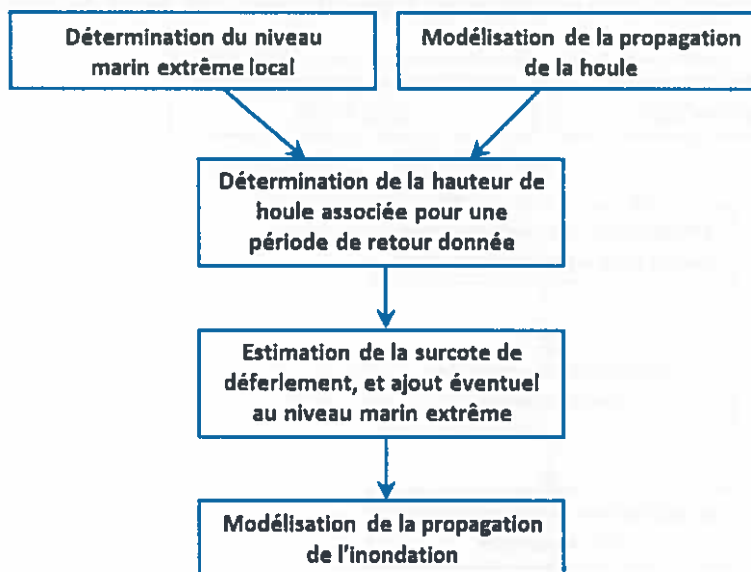


Figure 3-4 : Méthodologie pour la modélisation de débordements et ruptures d'ouvrages

Modélisation des franchissements par paquet de mer

Les parties d'ouvrage soumises au franchissement sont situées au-dessus du niveau extrême de la mer. Les inondations ne peuvent donc pas être étudiées grâce à la seule connaissance du niveau (même en tenant compte de la surcote de déferlement), mais doivent être analysées en estimant le débit franchissant l'ouvrage. Ce débit dépend tout autant du niveau moyen de la mer que de la hauteur de la houle au pied de l'ouvrage, mais aussi de la géométrie de l'ouvrage (pente et hauteur).



Figure 3-5 : Illustration du jet de rive sur un ouvrage

Le logigramme suivant précise les différentes étapes du calcul des débits de franchissement.

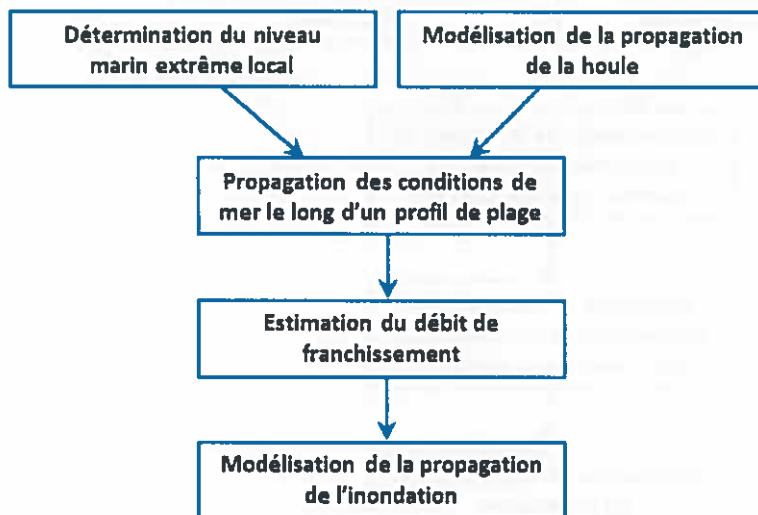


Figure 3-6 : Méthodologie pour la modélisation de franchissements

4 Détermination de l'événement de référence

4.1 Calcul de l'événement centennal

4.1.1 Les niveaux marins

Suite aux discussions avec le CETMEF, les niveaux marins de pleine mer seront issus du document du SHOM / CETMEF de 2012 au port de référence de Saint Malo. Les niveaux s'établissent ainsi :

Période de retour	Niveaux marins (exprimés en m NGF)
5 ans	7,20
10 ans	7,27
20 ans	7,34
50 ans	7,43
100 ans	7,49

Tableau 4-1 : Périodes de retour des niveaux marins au marégraphe de Saint Malo – SHOM 2012

Pour les périodes de retour inférieures à 5 ans qui ne sont pas définies par le SHOM et le CETMEF, nous avons testé l'ajustement statistique des niveaux marins réels enregistrés au marégraphe de Saint Malo à une loi de Weibull.

Ainsi les valeurs de niveau sont les suivantes :

Niveau marin (m NGF)	Période de retour	100	50	20	10	5	3,5	2	1,8	1	0,7	0,4	0,2	0,07	0,04
		valeur (m)	7,49	7,43	7,34	7,27	7,20	7,12	7,06	7,05	6,98	6,93	6,85	6,71	6,71

Tableau 4-2 : Détermination des niveaux marins

4.1.2 Estimation de la houle au large de Saint Malo

Le modèle régional

Un modèle régional a été développé et calé au large de Saint Malo. Ce modèle couvre la période octobre 1988 – mars 2007, soit 19 années. Les données du réseau CANDHIS au niveau du banc des Minquiers ont été mobilisées aux fins de calage du modèle de houle. Ci-après une figure de l'emprise du modèle régional est présentée ainsi que les chroniques de calage de ce modèle avec les données enregistrées aux Minquiers.

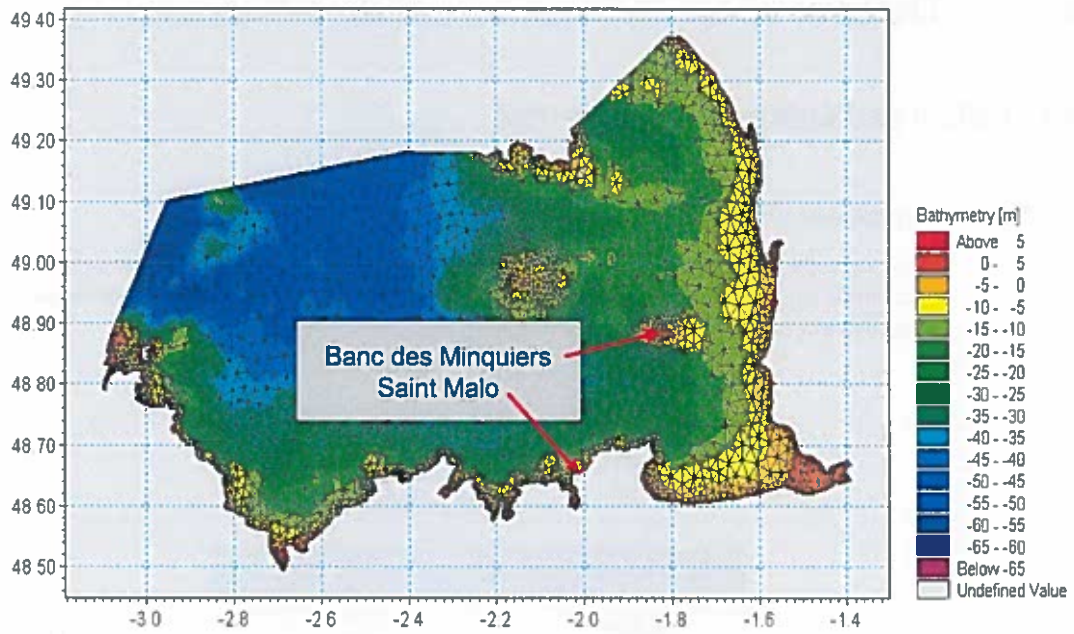


Figure 4-1 : Emprise du modèle régional

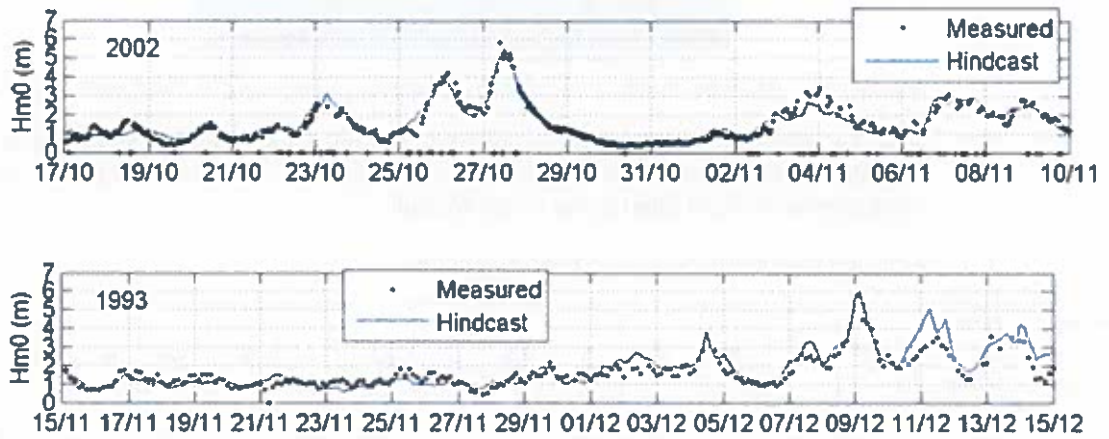


Figure 4-2 : Calage du modèle régional



Détermination des valeurs extrêmes

Les valeurs extrêmes de hauteurs significatives de houle sont déterminées au large de Saint Malo par ajustement statistique de l'échantillon disponible sur les 19 années du hindcast (reconstitution passées des états de mer) réalisé par DHI sur la période octobre 1988 – mars 2007. Le point d'extraction se situe au large de Saint Malo à l'isobathe -30 m.

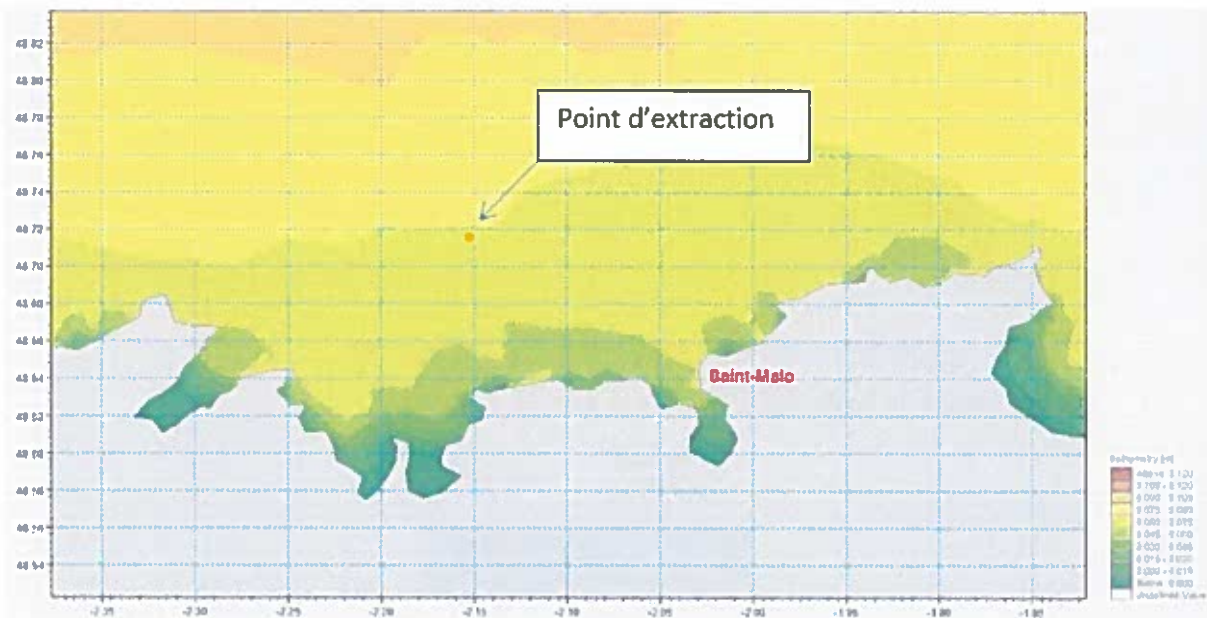


Figure 4-3 : modèle régional – Hindcast 1988 2007

Les états de mer de l'ensemble de la chronique ont été extraits à pleine mer. Suites aux recommandations du CETMEF, nous avons considéré des états de mer maximums sur 3h de part et d'autre de la pleine mer.

L'échantillon ainsi extrait a été ajusté par la méthode POT (peak over threshold). Nous avons testé plusieurs seuils de constitution de l'échantillon $2n$, $4n$ et $8n$, n étant le nombre d'années de l'échantillon total.

Plusieurs lois d'ajustement ont été testées. Ces lois sont :

- GEV
- Pareto
- Exponentielle
- Gumbel tronqué
- Weibull

La loi la plus représentative est retenue sur la détermination graphique ainsi que sur un test du χ^2 . L'ajustement retenu est une loi de Weibull sur 76 valeurs.

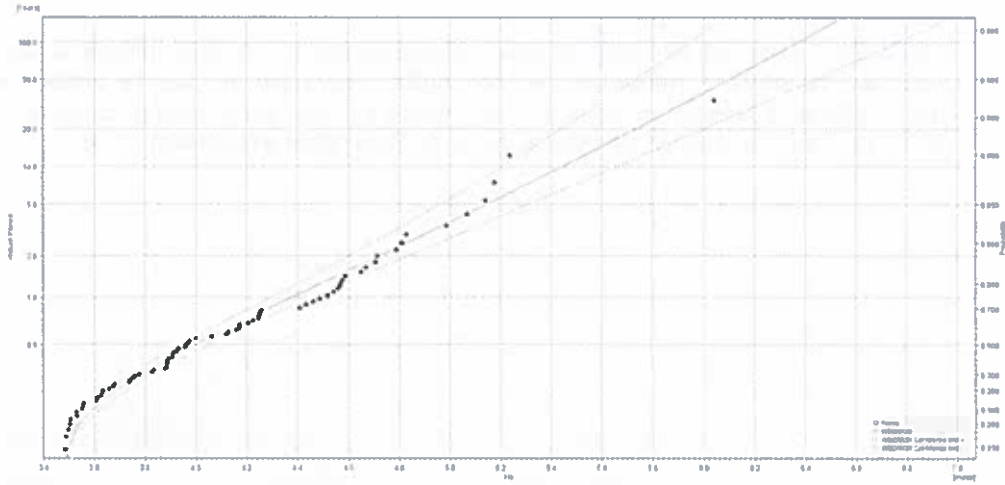


Figure 4-4 : Ajustement de Weibull des houles au large de Saint Malo

Les valeurs de houle ainsi déterminées sont les suivantes :

Période de retour	Hs (m)
1	4,38
1,8	4,67
2	4,72
3,5	4,99
5	5,14
10	5,45
20	5,73
50	6,10
100	6,37

Tableau 4-3 : Périodes de retour des houles au large de Saint Malo



Détermination des valeurs pour les périodes de retour inférieures à 1 an

L'ensemble des états de mer de durée 3h à pleine mer a été traité pour déterminer les occurrences inférieures à 1 an. La densité de probabilité et la fonction de répartition sont précisées ci-dessous.

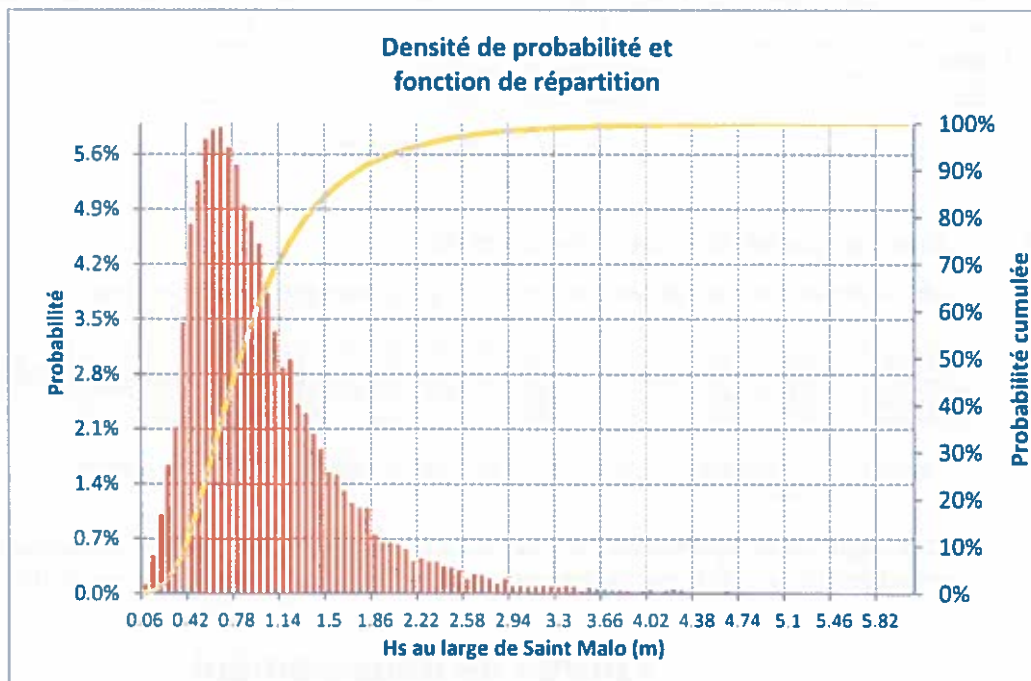


Figure 4-5 : Densité de probabilité et fonction de répartition des houles au large de Saint Malo

De cette analyse, nous pouvons établir la courbe de fréquence au dépassement suivante :

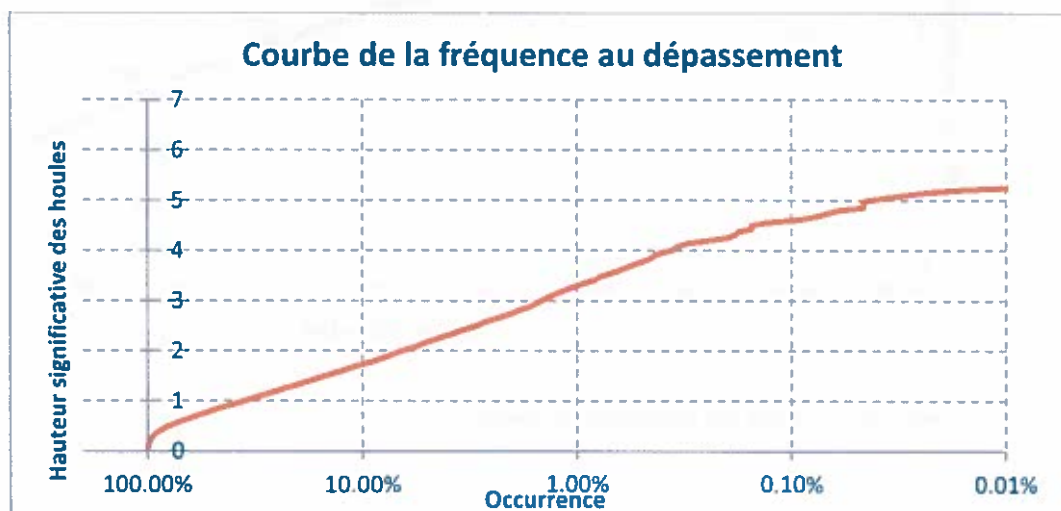


Figure 4-6 : Fréquence au dépassement des houles au large de Saint Malo

Ainsi les valeurs de houle significative qui seront utilisées pour les probabilités conjointes seront :

Houle – H_s (m)	Période de retour	0,04	0,07	0,2	0,4	0,7	1	1,8	2	3,5	5	10	20	50	100
		valeur (m)	1,92	2,28	3	3,48	3,9	4,38	4,67	4,72	4,99	5,14	5,45	5,73	6,10

Tableau 4-4 : Détermination des houles au large de Saint Malo

4.1.3 Analyse conjointe houle / niveau marin

Les tableaux des probabilités conjointes (cf. § 3.2) sont précisés ci-dessous:

		Tc = 100 ans - Facteur de dépendance 25														
WL	Tn (années)	100	50	20	10	5	3,5	2	1,8	1	0,7	0,4	0,2	0,07	0,04	
		valeur (m)	7,41	7,41	7,34	7,27	7,20	7,12	7,06	7,05	6,98	6,93	6,85	6,71	6,71	6,72
Hs	Tv (années)	0,04	0,07	0,2	0,4	0,7	1	1,8	2	3,5	5	10	20	50	100	
	valeur (m)	1,92	2,28	3	3,48	3,9	4,38	4,67	4,72	4,99	5,14	5,45	5,73	6,1	6,37	

Tableau 4-5 : Probabilités conjointes- en orange valeurs SHOM CETMEF, en rose extrapolation loi de Weibull

Ces valeurs sont représentées ci-après sous forme graphique. La courbe représentée en bleu correspond à la courbe des événements concomitants centennaux au large de Saint Malo.

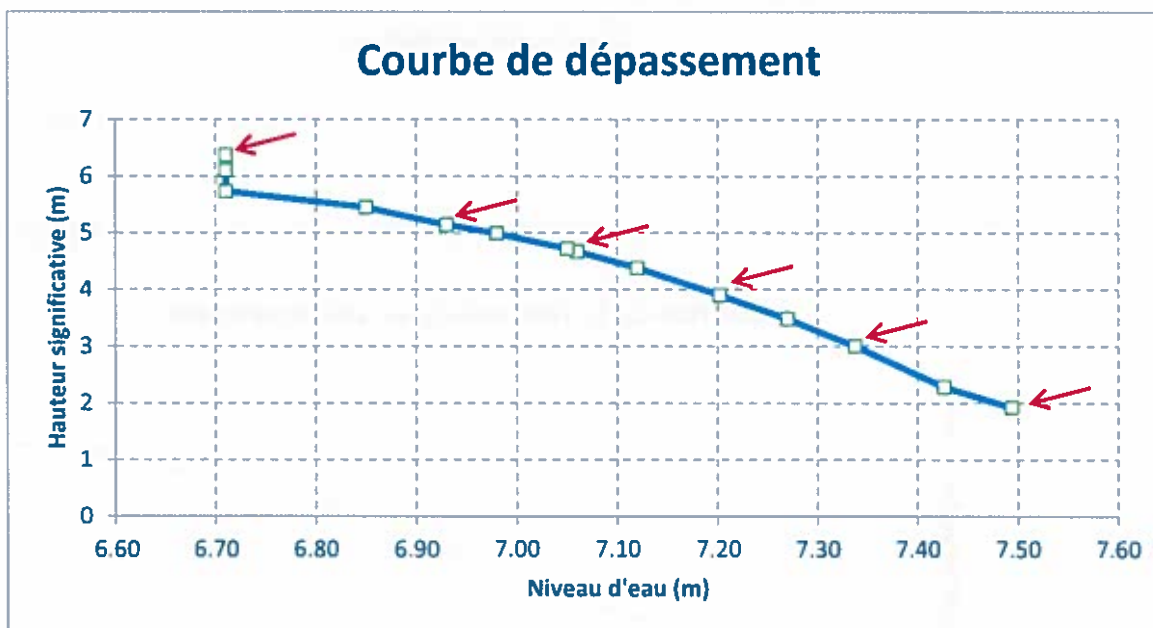


Figure 4-7 : Courbe des probabilités conjointes

4.1.4 Définition des ensembles Niveaux / Houle / Période / Incidence

La connaissance des états de mer au pied des ouvrages nécessite que les différents états de mer centennaux au large soient propagés dans un modèle local. Les couples suivants ont été propagés jusque sur l'estran face à la digue de Paramé et à la digue du Sillon :

	Niveau	Hs
Couple 1	7,49	1,92
Couple 2	7,34	3,00
Couple 3	7,20	3,90
Couple 4	7,06	4,67
Couple 5	6,93	5,14
Couple 6	6,71	6,37

Tableau 4-6 : Couples Niveaux / Hs retenus

La période de la houle est déterminée à partir des corrélations établies entre la période des houles modélisées et la hauteur significative des houles modélisés sur le hindcast :

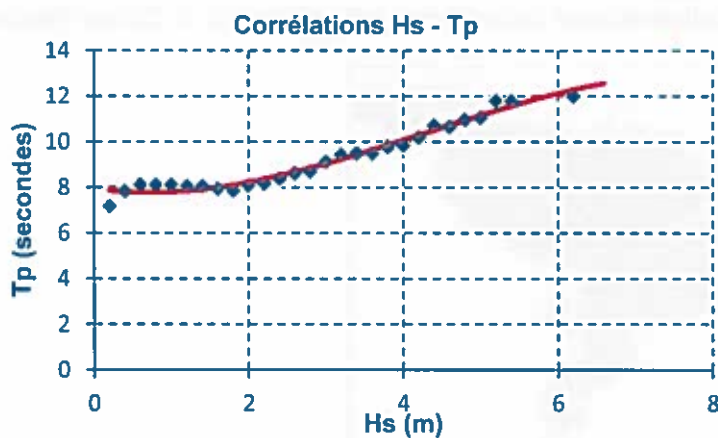


Figure 4-8 : Corrélation Hs Tp

Les secteurs privilégiés d'incidence de la houle sont issus de l'extraction des états de mer sur le hindcast régional couvrant la période 1988 2007 :

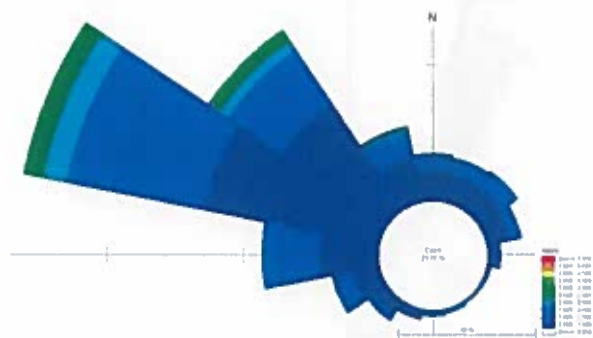


Figure 4-9 : Rose des houles au large de Saint Malo

Ainsi, les secteurs d'incidence préférentiels tant en occurrence qu'en intensité sont :

- 270°
- 292,5°
- 315°
- 340°

4.1.5 Propagation des états de mer

La caractérisation de la surcote de déferlement est effectuée par la modélisation de la propagation des états de mers dans un modèle local. Le but poursuivi dans cette partie d'étude est de déterminer la variabilité spatiale de la surcote de déferlement sur l'estran et les principaux paramètres d'influence.

Bathymétrie

Les données bathymétriques nécessaires à la construction du modèle de houle spectrale sont issues :

- des données bathymétriques LIDAR issues du programme GIRAC mises à disposition par l'IFREMER,
- des données bathymétriques terrestres issues du programme GIRAC mises à disposition par l'IFREMER,
- des données topographiques LIDAR mises à disposition par la DDTM35 (litto3D),
- des données SHOM,
- des données bathymétriques du port mises à disposition par le Conseil Régional.

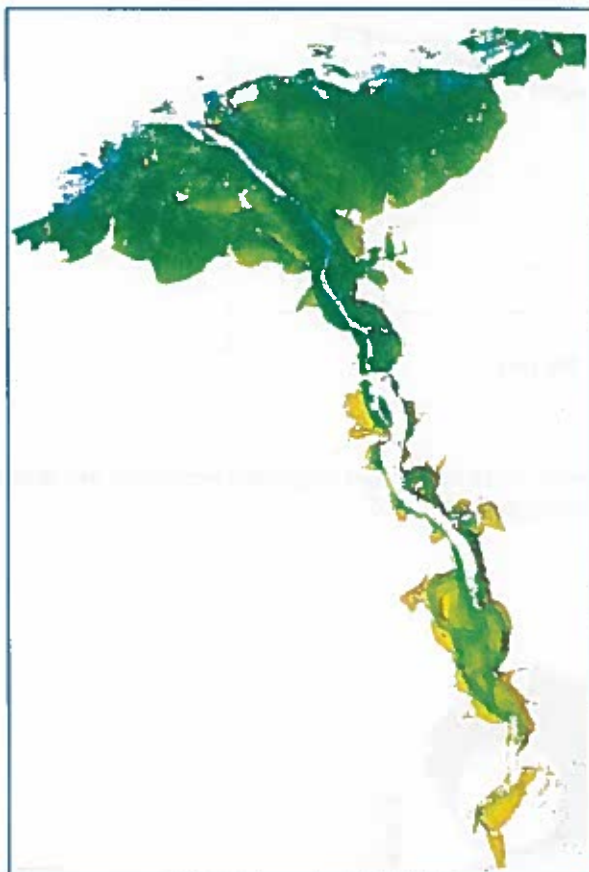


Figure 4-10 : Données bathymétriques relevées par l'IFREMER dans le cadre du projet GIRAC

Le modèle ainsi développé présente l'emprise suivante :

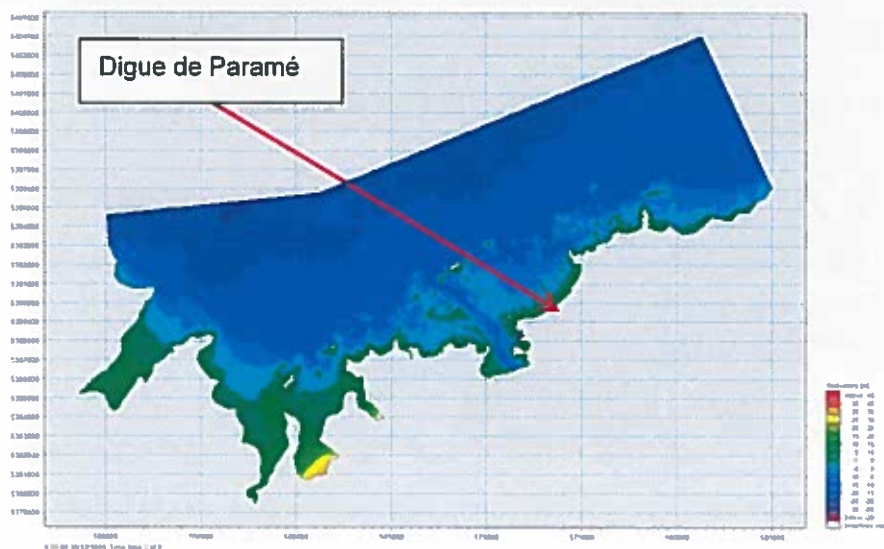


Figure 4-11 : Bathymétrie et emprise du modèle local de houle spectrale

Les conditions aux limites

Les forçages du modèle de houle sont :

- Les couples de niveaux marins / Hs définis au Tableau 4-6 : Couples Niveaux / Hs retenus;
- La période de la houle définie à la Figure 4-8 : Corrélation Hs Tp ;
- L'incidence de la provenance des houles définie à la Figure 4-9 : Rose des houles au large de Saint Malo.

Modélisation 2D couplée houle hydrodynamique

Le modèle de houle a été couplé au modèle hydrodynamique de manière à :

- déterminer la répartition spatiale de la surcote de déferlement ;
- appréhender l'évolution de celle-ci le long de la courbe théorique centennale ;
- estimer la sensibilité de la réponse à la direction de la houle incidente.

Ce travail permet de propager les états de mer depuis le large jusqu'au bas estran.

Localisation des surcotes de déferlement

Les figures suivantes permettent de visualiser la répartition spatiale de la surcote de déferlement s'appliquant sur le littoral de Saint Malo.

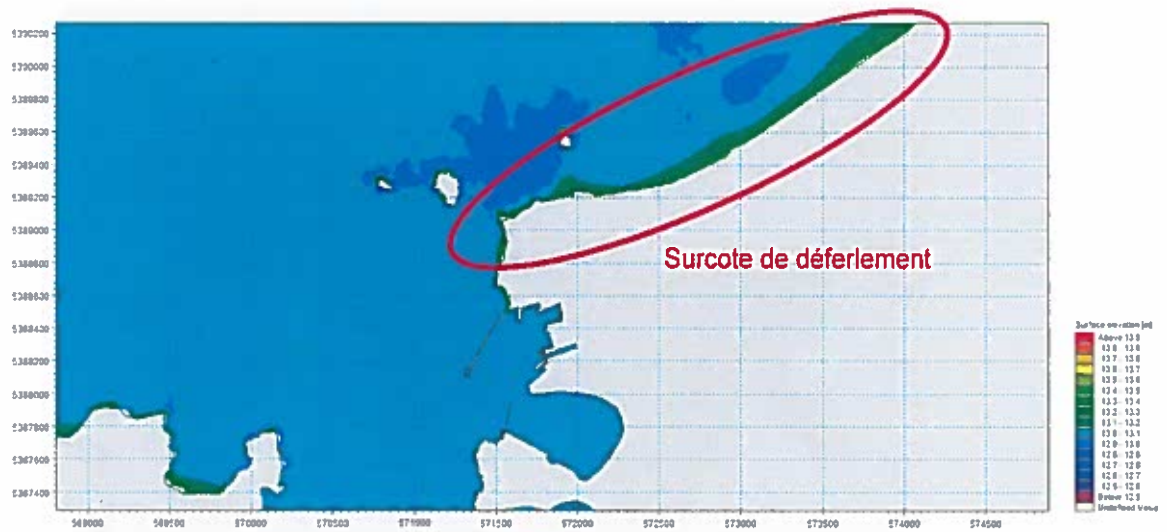


Figure 4-12 : Modélisation du couple niveau 6,71 / houle 6,37 / période 12 s / $\theta = 315^\circ$

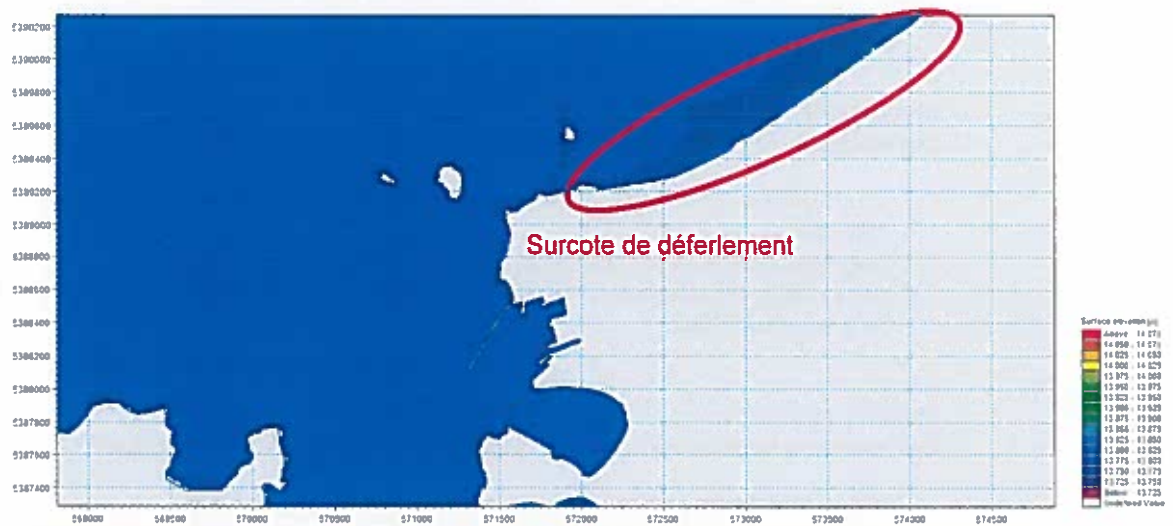


Figure 4-13 : Modélisation du couple niveau 7,49 / houle 1,92 / période 8 s / $\theta = 315^\circ$

La surcote de déferlement ne s'applique que sur la digue du Sillon et de Paramé ainsi que, pour les plus fortes houles, le long de l'intra-muros. Aucune surcote due à la houle ne s'observe sur le port en raison de la profondeur de l'avant-port et de la protection apportée par le môle des Noires comme le montre la figure suivante :



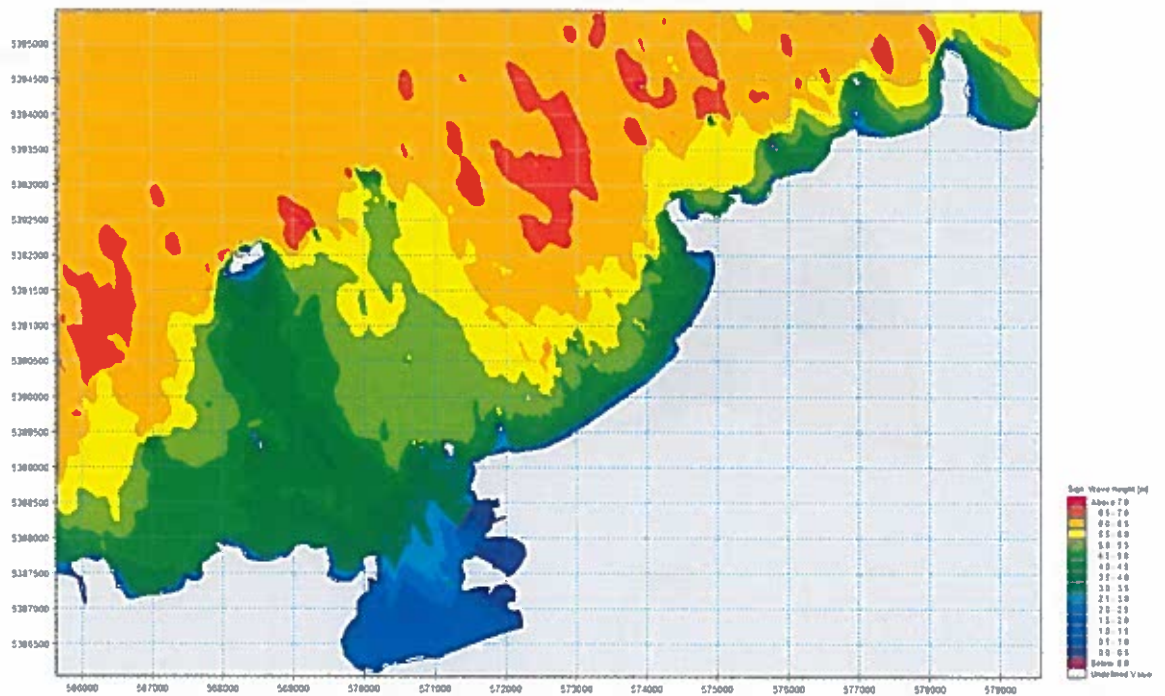


Figure 4-14 : Modèle de houle SW - Hs 6,37 m / période 12 s / $\theta = 315^\circ$

Evolutions de la surcote de déferlement le long de la courbe des probabilités conjointes

Nous avons testé trois couples sur la courbe des probabilités conjointes centennale. Les résultats présentés ci-dessous ont été extraits dans la zone de déferlement le long de la digue du Sillon et de Paramé depuis l'intra-muros jusqu'à Rochebonne.

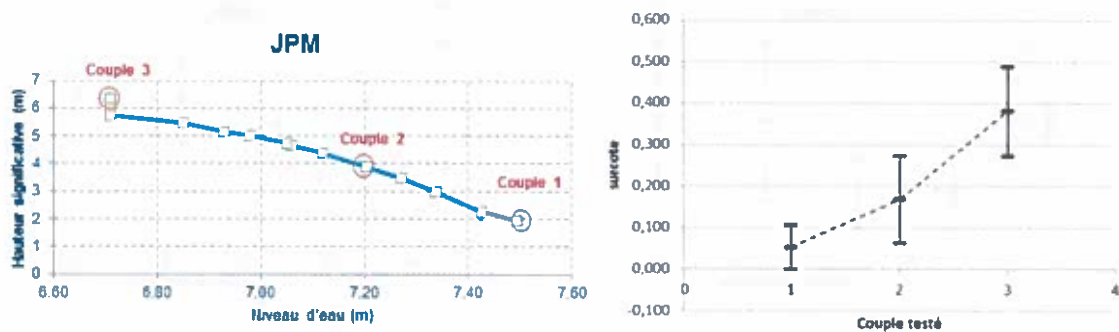
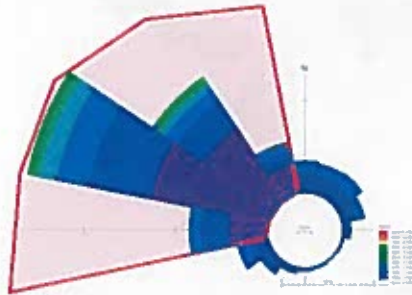


Figure 4-15 : Evolution des surcotes de déferlement

La surcote de déferlement est ainsi une fonction croissante de l'énergie de la houle.

Tests de sensibilité à l'incidence de la houle

Quatre directions de houle ont été testées pour estimer la sensibilité du modèle à ce paramètre.



- $\theta_1 = 270^\circ$
- $\theta_2 = 292,5^\circ$
- $\theta_3 = 315^\circ$
- $\theta_4 = 340^\circ$

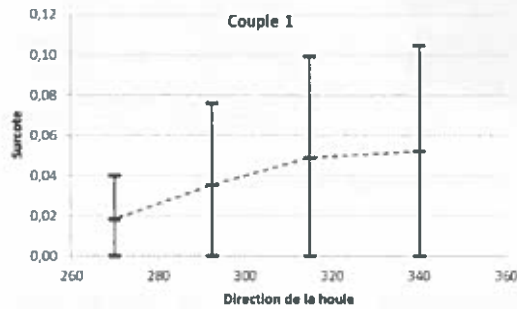


Figure 4-16 : Surcote de déferlement du couple (7,49 m ; Hs=1,92 m)

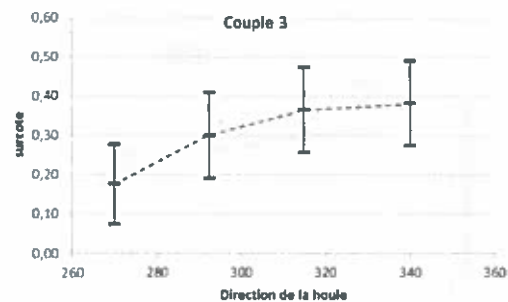
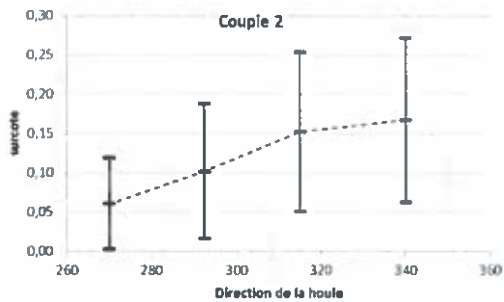


Figure 4-17 : Surcote de déferlement du couple (7,20 m ; Hs=3,90m) et du couple 3 (6,71m ; Hs=6,37m)

L'analyse montre que la surcote de déferlement tend vers une asymptote à mesure que la houle est injectée perpendiculairement à la plage.



4.1.6 Modélisation des conditions de mer au pied de l'ouvrage

Principes

Les états de mer sont propagés dans un modèle 1D perpendiculairement à l'ouvrage de manière à déterminer précisément les conditions de houle et de niveaux au pied de l'ouvrage.

Le principe est résumé dans le schéma ci-dessous :

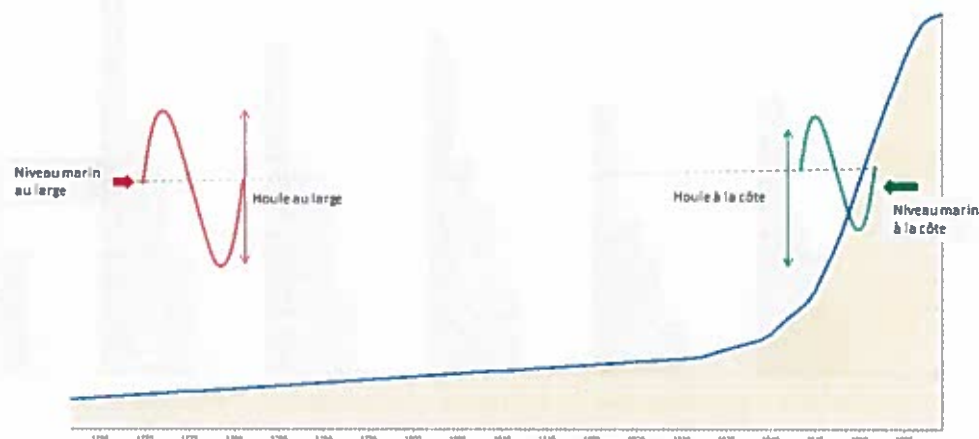


Figure 4-18 : Niveau marin et hauteur de houle, au large et au pied de l'ouvrage

Hypothèses

Le littoral devant la digue du Sillon et la digue de Paramé a été discrétisé en 6 tronçons dont les caractéristiques sont représentatives des évolutions bathymétriques et des changements de géométrie de l'ouvrage. Les caractéristiques des états de mer sont issues du modèle 2D présenté ci-dessus.



Figure 4-19 : Localisation des profils 1D

Résultats

Les valeurs présentées ci-dessous correspondent aux valeurs maximales calculées par le modèle 1D suivant les directions [315° ; 340°] pour les 6 couples (cf. Tableau 4-6 : Couples Niveaux / Hs retenus).

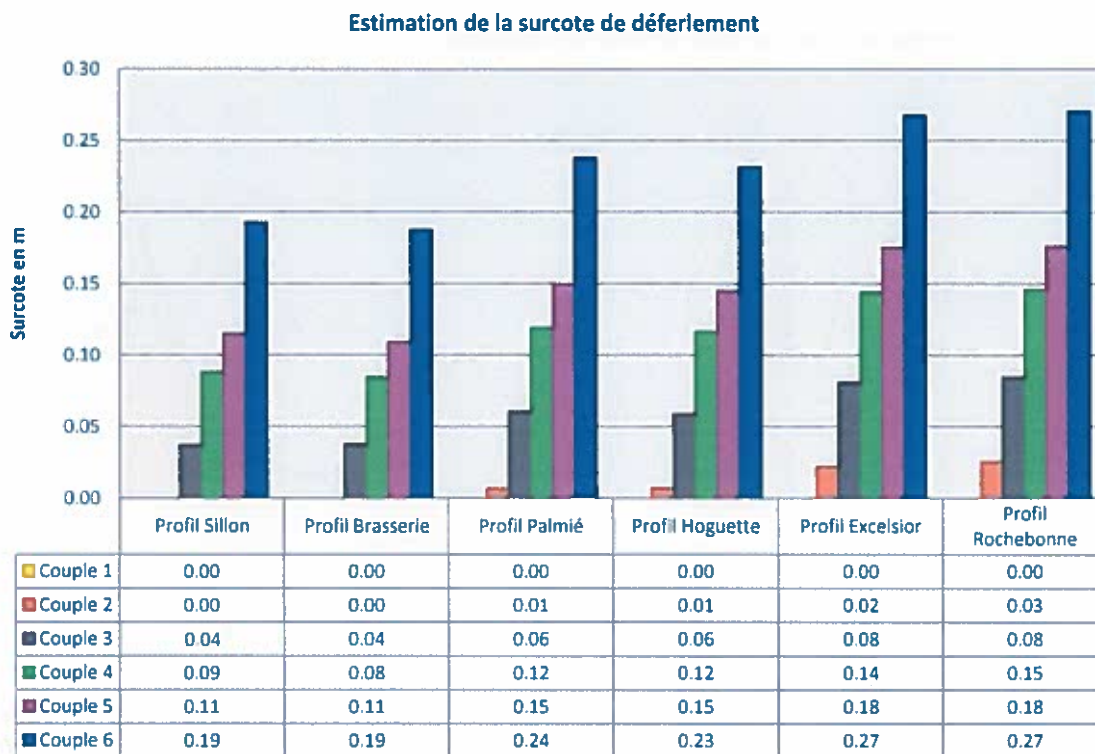
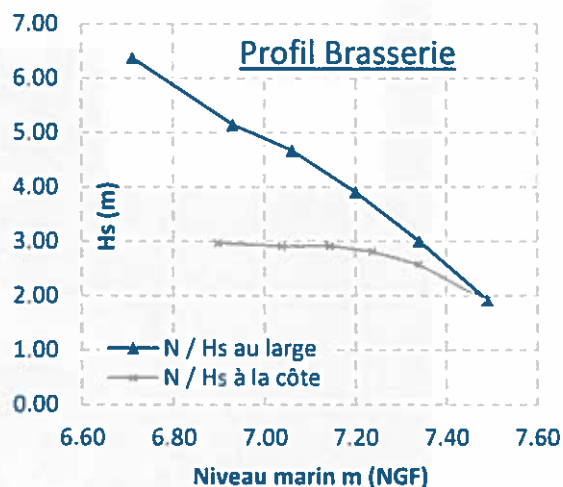
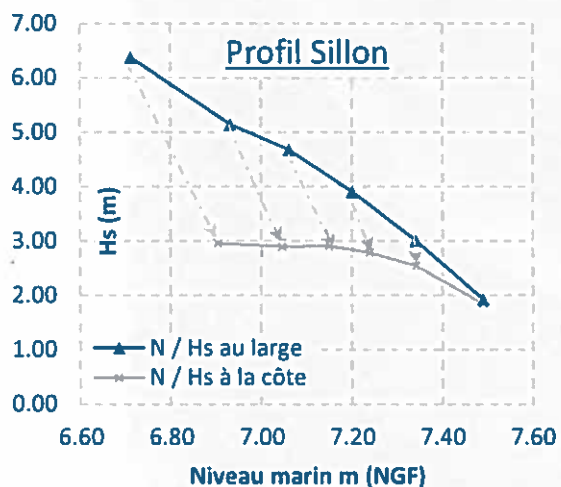


Figure 4-20 : Surcote de déferlement devant la digue du Sillon et de Paramé

Par profil, les résultats sont les suivants :



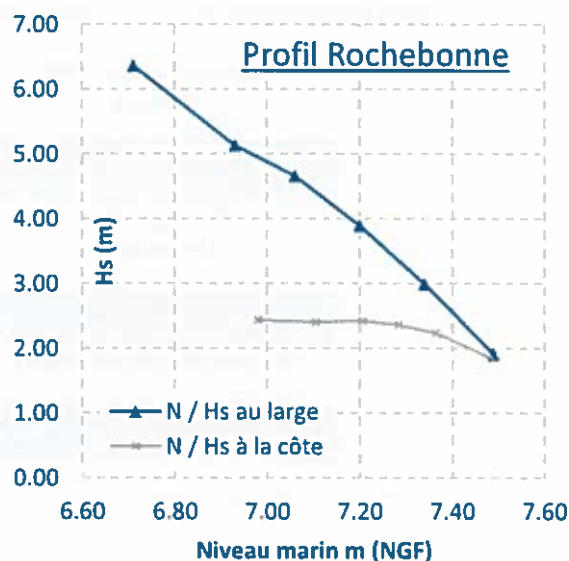
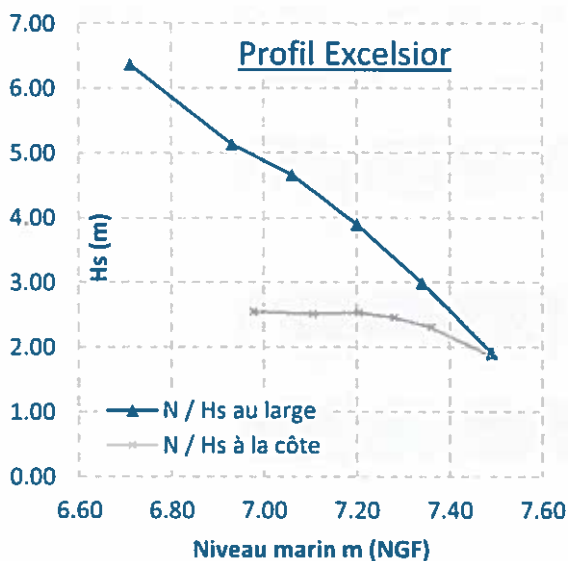
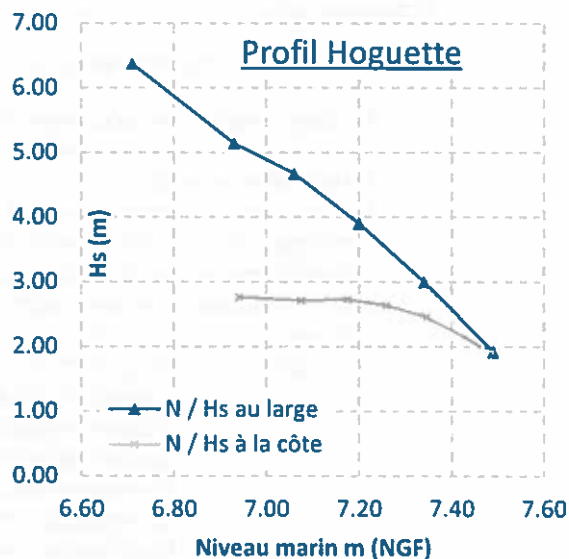
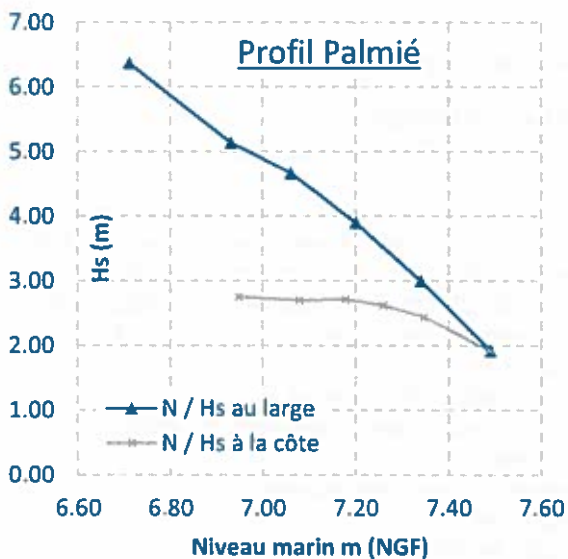


Figure 4-21 : Conditions au large et au pied de l'ouvrage du Sillon et de Paramé

Les enseignements que nous retirons de la modélisation de la houle à Saint Malo sont les suivants :

- Pour les niveaux marins les plus élevés, il n'y a pas de surcote de déferlement due à la houle ;
- Au pied de la digue, la houle tend vers une asymptote comprise entre 2,50 m et 3,00 m ;
- Il existe un faible gradient de dissipation de l'énergie de la houle Sud-Ouest / Nord-Est

4.1.7 Détermination du niveau marin centennal

Le niveau marin centennal retenu pour le PPRL est constitué :

- du niveau centennal calculé par le SHOM et le CEREMA ;
- de la surcote de déferlement liée à la houle. Dans le cas présent, la surcote de déferlement est nulle ;
- des impacts du rehaussement marin lié à la prise en compte du réchauffement climatique. Deux horizons sont déterminés, l'horizon actuel avec une prise en compte de l'élévation des niveaux marins à court terme (+ 0,20 m) et moyen terme (+ 0,60 m) ;
- des incertitudes. Une estimation forfaitaire de 25 cm a été ajoutée au niveau marin de référence. Les incertitudes dans l'établissement des niveaux marins de référence se retrouvent tout au long de la chaîne de calcul et se cumulent :
 - Acquisition de données aux ports de référence ;
 - Traitement statistique des niveaux marins aux ports de référence ;
 - Spatialisation de l'information ;
 - Traitement statistique de la houle et propagation ;
 - Données topo-bathymétriques ;
 - Modélisation de la surcote de déferlement.

Ainsi les composantes sur le littoral Malouin des niveaux marins centennaux s'établissent à :

Composantes des niveaux	Aléa actuel	Aléa 2100
Niveau 100 ans	7,49 m NGF	7,49 m NGF
Changement climatique	0,20 m	0,60 m
Incertitudes	0,25 m	0,25 m
Surcote de déferlement	0,00 m	0,00 m
Niveau total	7,94 m NGF	8,34 m NGF

Tableau 4-7 : Niveaux centennaux



4.2 Qualification des événements historiques

Différents événements de tempêtes ont été répertoriés. Les informations extraites de la bibliographie sont résumées dans le tableau ci-dessous. Les éléments en jaune sont ceux pour lesquels il existe une incertitude assez forte.

Dates de tempêtes	Heure	Hauteur significative Hs (m)	Source	Niveau d'eau (m NGF)	Source
27 Février 1990	Matin	5.10	Hindcast DHI	6.98	Ville Saint Malo
1 ^{er} Avril 1994	Nuit	4.27	Hindcast DHI	5.61	Doc Archives Syndicat Digue de Paramé
26 - 27 Décembre 1999	Soir	4.46	Hindcast DHI	5.65	Marégramme St Malo
10 Mars 2008	Soir	6.90	Cariolet 2011	6.57	Marégramme St Malo
31 Mars 2010	Matin	2.55	Modèle houle IOWAGA	6.91	Marégramme St Malo

Tableau 4-8 : Liste des événements historiques

Les informations historiques ont été replacées sur la courbe des probabilités centennales conjointes niveau / houle. L'événement de février 1990 est positionné sur la courbe centennale. Cet événement avait été à l'origine de graves détériorations sur l'ouvrage de Paramé.

Courbe de dépassement

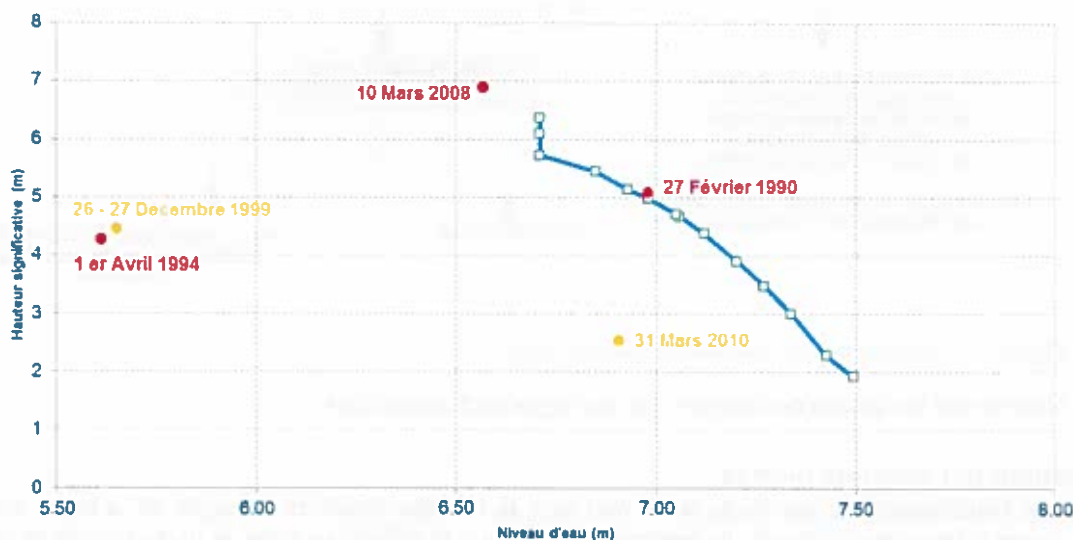


Figure 4-22 : Couples niveau d'eau hauteur significative de houle pour les différents événements de tempêtes identifiés

4.3 Conclusion : choix de l'événement de référence

L'événement de référence retenu sur Saint Malo est l'événement centennal qui est jugé le plus défavorable.

5 Détermination du scénario de référence

Les scénarios se réfèrent aux différents modes de submersion :

- Débordement
- Défaillance d'ouvrage
- Franchissements par paquets de mer

5.1 Rappels méthodologiques

Débordement

Une analyse topographique est utilisée pour définir les sites vulnérables au débordement. La topographie du terrain naturel est comparée au niveau marin de référence. Si l'analyse montre la possibilité d'une intrusion marine par débordement, ce phénomène sera étudié.

Défaillance sur le système de protection

Aucun ouvrage ne pouvant être considéré comme infaillible, il est important de déterminer le comportement des différents ouvrages constituant le système de protection. Le logigramme ci-dessous présente la démarche adoptée.

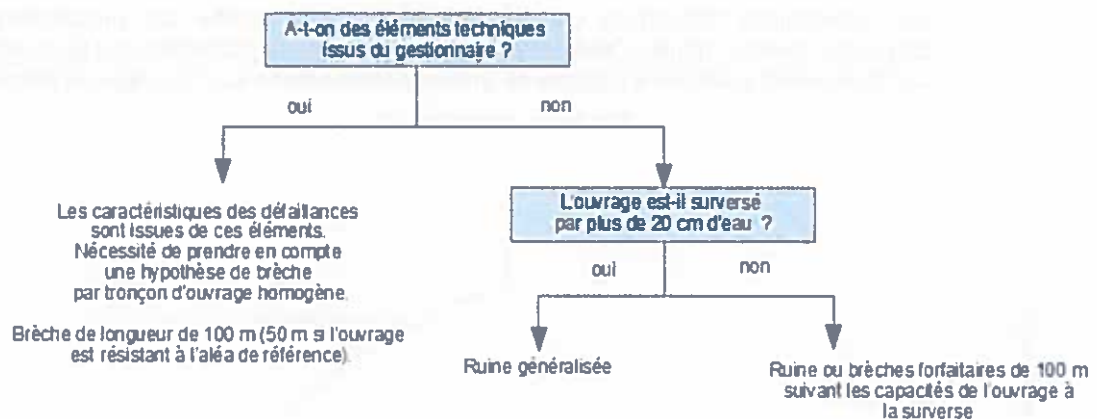


Figure 5-1 : Logigramme de prise en compte des digues

Notons que les études de dangers des ouvrages sont disponibles.

Franchissement par paquets de mer

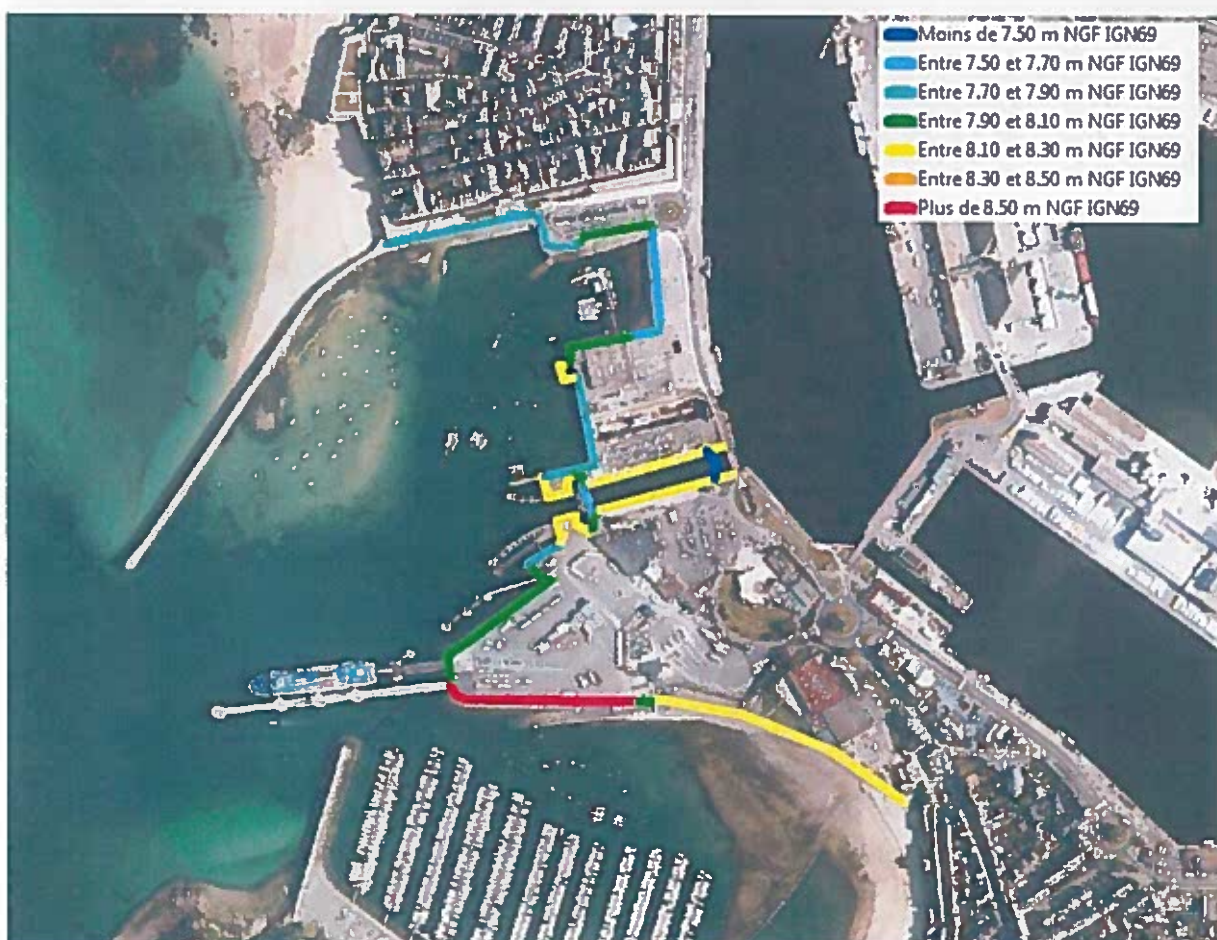
Les franchissements par paquets de mer sont la transformation de l'énergie de la houle au contact d'ouvrages réfléchis. Ils apparaissent lorsque la différence entre le niveau marin et la cote de l'ouvrage est faible. Les sites à franchissement par paquet de mer sont principalement identifiés par l'analyse historique et les forçages météo marins.

5.2 Analyse des systèmes de défense contre la submersion marine

Une typologie du système de protection a été réalisée dans le cadre des études de dangers.



Figure 5-2 : Typologie des ouvrages – SOCOTEC 2013



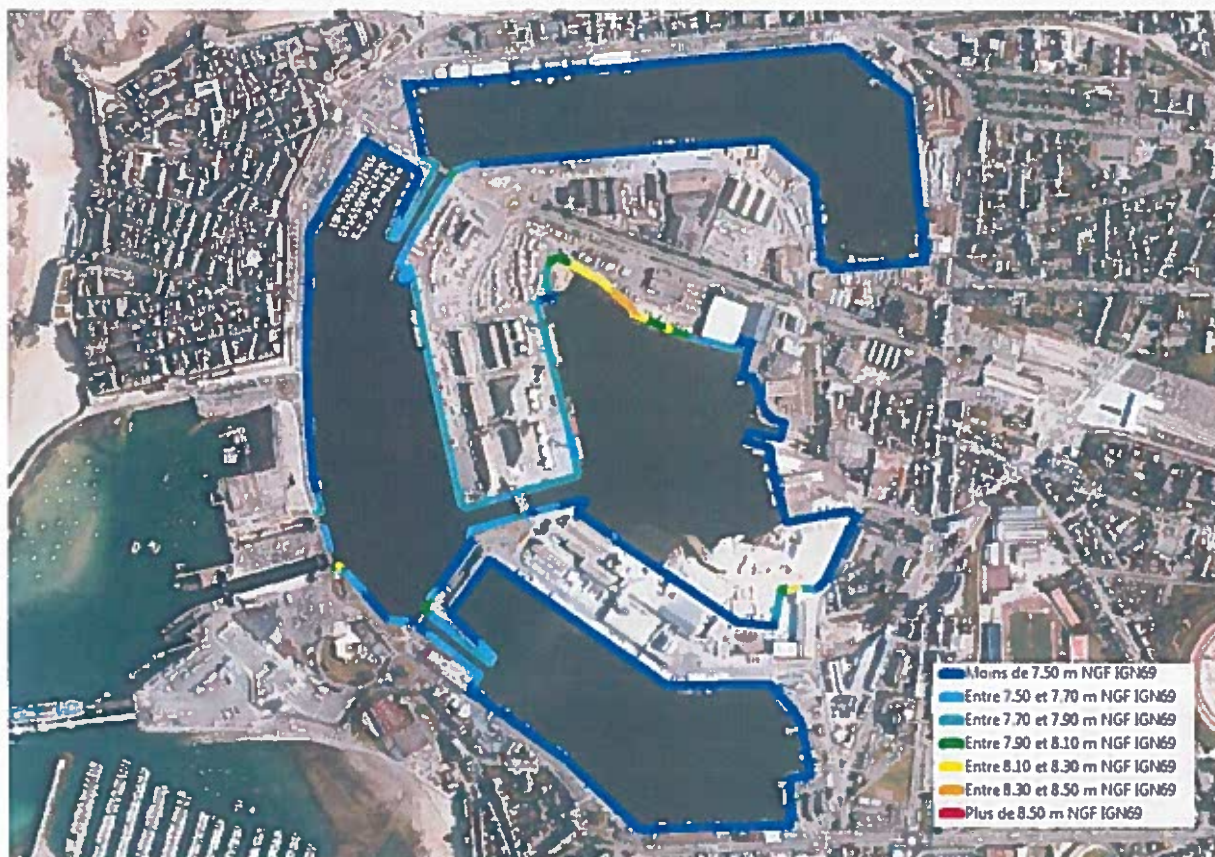


Figure 5-4 : Altimétries du système de protection

Les profils en travers et les profils en long des ouvrages sont détaillés en annexe A.

5.3 Hypothèses formulées pour les défaillances des ouvrages

Comme le précise la circulaire du 27 juillet 2011 :

- Aucun ouvrage ne peut être considéré comme infaillible, quelles que soient ses caractéristiques et sa résistance présumée ;
- Les défaillances peuvent être de grande ampleur (ruine totale de l'ouvrage) ou plus locale (apparition de brèches) ;
- Pour l'élaboration de la carte d'aléa, pour chaque tronçon d'ouvrage, une hypothèse de défaillance doit être définie ;
- Le choix du scénario de défaillance doit provenir des éléments techniques fournis par le gestionnaire (dans le cadre de la réalisation des études de danger) ;
- Dans le cas d'un ouvrage résistant à l'aléa de référence et à la condition que le gestionnaire fournisse les études techniques nécessaires (validées par l'État), cette largeur pourra être diminuée, mais sans être inférieure à 50 m.

Les études de danger ont permis de conclure que les ouvrages du système de protection de la ville de Saint Malo étaient résistants à l'événement de référence. En conséquence, des défaillances localisées par brèches de 50 mètres ont été retenues pour la caractérisation de l'aléa.



L'analyse du système de protection a conduit à la formulation des hypothèses suivantes :

- Une brèche de 50 mètres est positionnée sur la digue du Sillon au droit du point d'altimétrie le plus bas du tronçon de l'ouvrage ;
- Une brèche de 50 mètres est étudiée sur la digue de Paramé. Deux positions ont été définies. Elles correspondent aux endroits au droit desquels le profil en travers est le plus défavorable ;
- La défaillance des écluses du Port de Saint Malo ont été considérées ;
- Les franchissements par paquet de mer sont pris en compte concomitamment à la défaillance des ouvrages de protection. Ce phénomène concerne l'ensemble du linéaire de la digue du Sillon et de la digue de Paramé ;
- Les débordements sur le terre-plein de la bourse, sur l'anse des Sablons et l'anse Solidor sont pris en compte.

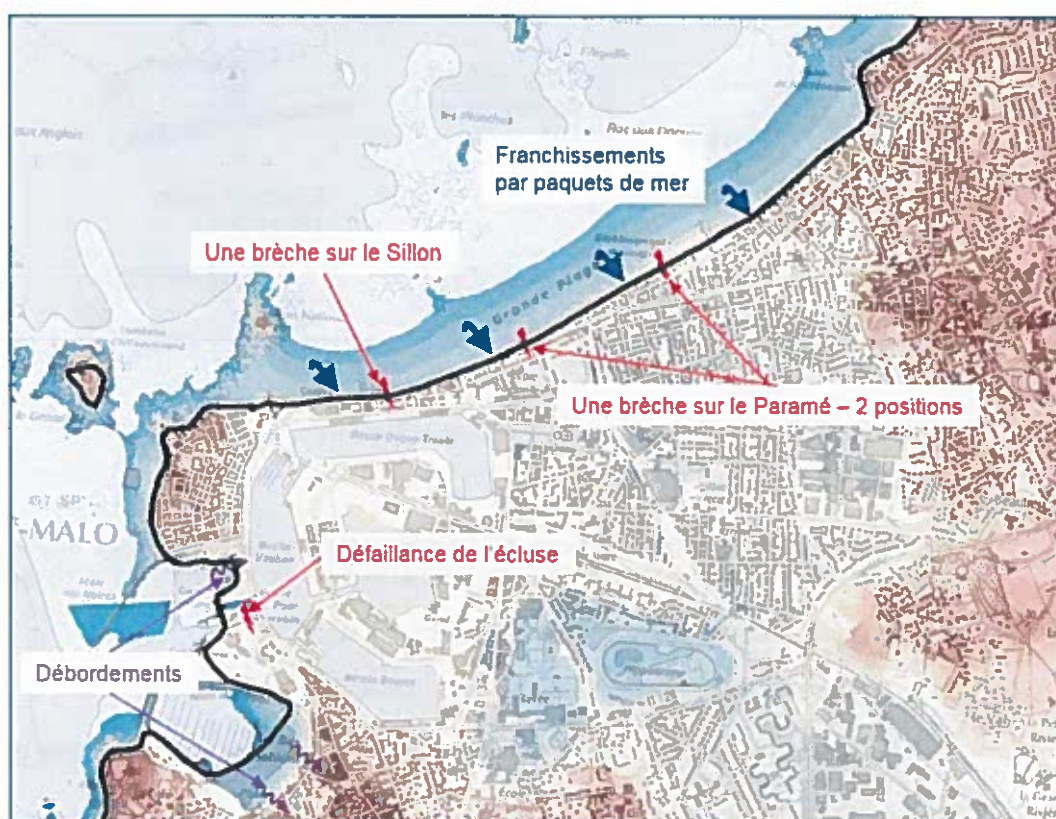


Figure 5-5 : Synthèse des hypothèses – scénario de référence

6 Prise en compte du réseau d'assainissement

La propagation de l'onde de submersion est influencée par les effets du réseau d'assainissement des eaux pluviales de la ville de Saint Malo.

Les phénomènes sont de deux natures :

- Phénomène d'engouffrement : la propagation de la submersion est atténuée par la présence du réseau ;
- Phénomène de résurgence : le réseau saturé déborde aux points topographiques les plus bas.

Les schémas ci-après illustrent ces deux phénomènes :

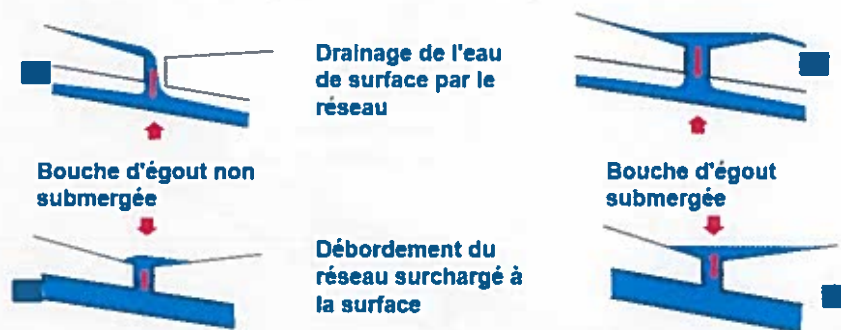


Figure 6-1 : Fonctionnement du réseau lors d'une submersion

Les données concernant le réseau d'assainissement ont été récupérées auprès du service assainissement de la commune de Saint Malo et auprès de son délégataire VEOLIA.

Au final, sur la zone d'étude sont représentés dans le modèle :

- 2246 sous bassins versants / bassins de collecte ;
- 2304 nœuds ainsi que 23 exutoires ;
- 2353 conduites circulaires, 3 conduites rectangulaires, soit environ 85.5km de réseau ;
- 13 pompes ;
- 9 seuils régulés ;
- 5 orifices.

La vue suivante présente la zone d'étude et le réseau modélisé :





Figure 6-2 : Réseau d'assainissement modélisé sur la zone d'étude

Les interactions entre la surface et le réseau d'assainissement sont régies par des lois d'orifice sur les avaloirs au niveau des bassins de collecte. C'est pourquoi les bassins de collecte sont particulièrement détaillés. Un exemple est présenté ci-dessous :

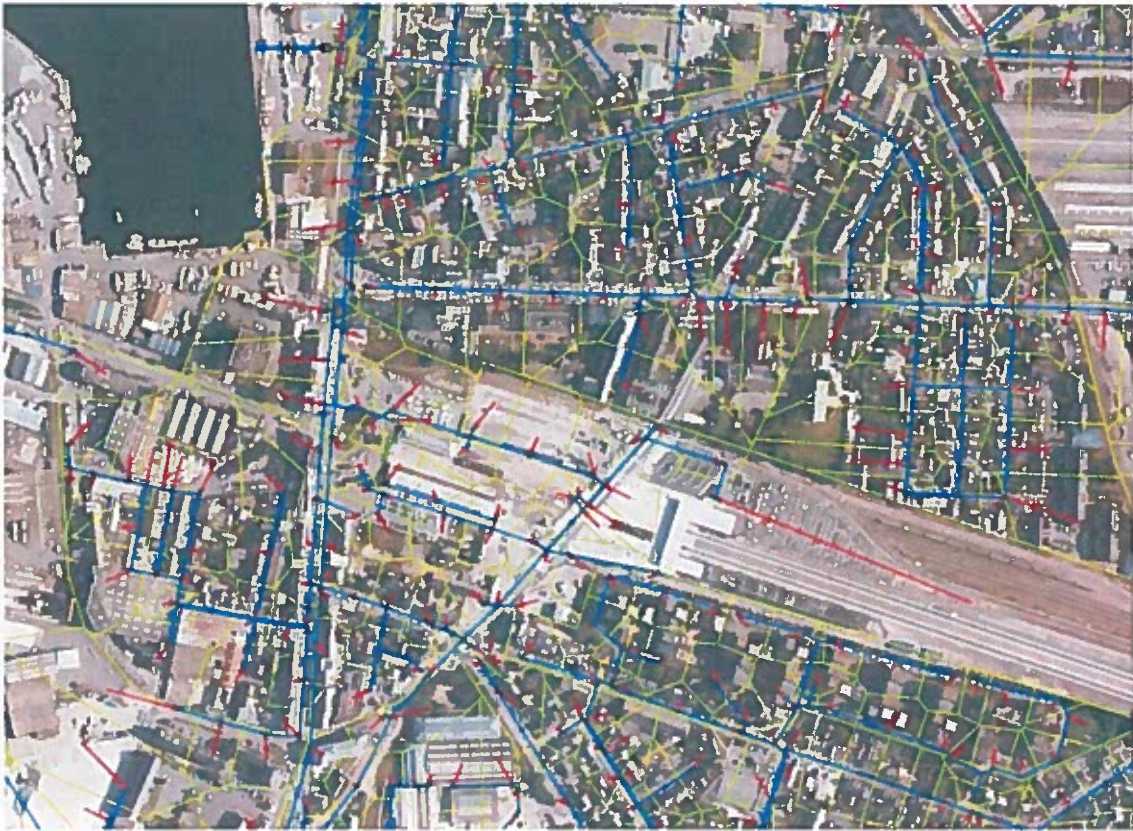


Figure 6-3 : Bassins de collecte au sud de la station de pompage de Rocabey

Les ouvrages spéciaux sont intégrés au modèle (intercepteurs, bassins, postes de pompage,...). Le poste de pompage de l'usine du Naye est présenté ci-dessous à titre d'exemple :



Figure 6-4 : Exemple de prise en compte des ouvrages spéciaux

Les hypothèses retenues pour la caractérisation des aléas sont les suivantes :

- Pas de saturation préalable des réseaux. Nous considérons alors que la submersion liée à une onde de tempête n'est pas concomitante avec une pluie importante ;
- Les intercepteurs sont en position évacuation. En effet, les phénomènes de saturation des réseaux sont très rapides lors de la propagation d'une onde de submersion. Les différents ouvrages se remplissent très rapidement. Le passage de la position stockage vers la position évacuation est négligeable pour la caractérisation des aléas ;
- Le poste de pompage du Naye est considéré comme défaillant. Une rupture de l'alimentation électrique des équipements est en effet possible dans la configuration actuelle. Un test de sensibilité à cette hypothèse a été réalisé et a permis de montrer que la défaillance des pompes n'avait pas d'effets notables sur la propagation de la submersion.

7 Le modèle de franchissement

7.1 Détail de la chaîne de calcul

Ce chapitre s'intéresse aux dernières étapes de la chaîne de calcul développé pour calculer les débits de franchissement au-dessus des ouvrages de protection de la plage de Saint Malo.

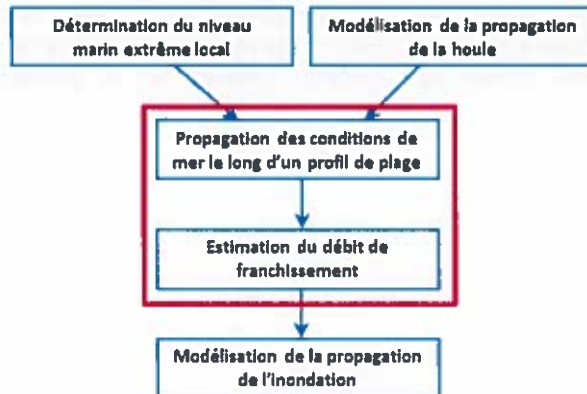


Figure 7-1 : Chaîne de calcul – en rouge étapes décrites dans ce chapitre

Les profils de plage et propagation des états de mer

Le profil transversal de la plage de Saint Malo n'est pas homogène. Six profils en travers ont été extraits. Ces profils différents ont été nommés d'Ouest en Est :

- Profil "Sillon";
- Profil "Brasserie";
- Profil "Palmié";
- Profil "Hoguette";
- Profil "Excelsior";
- Profil "Rochebonne".

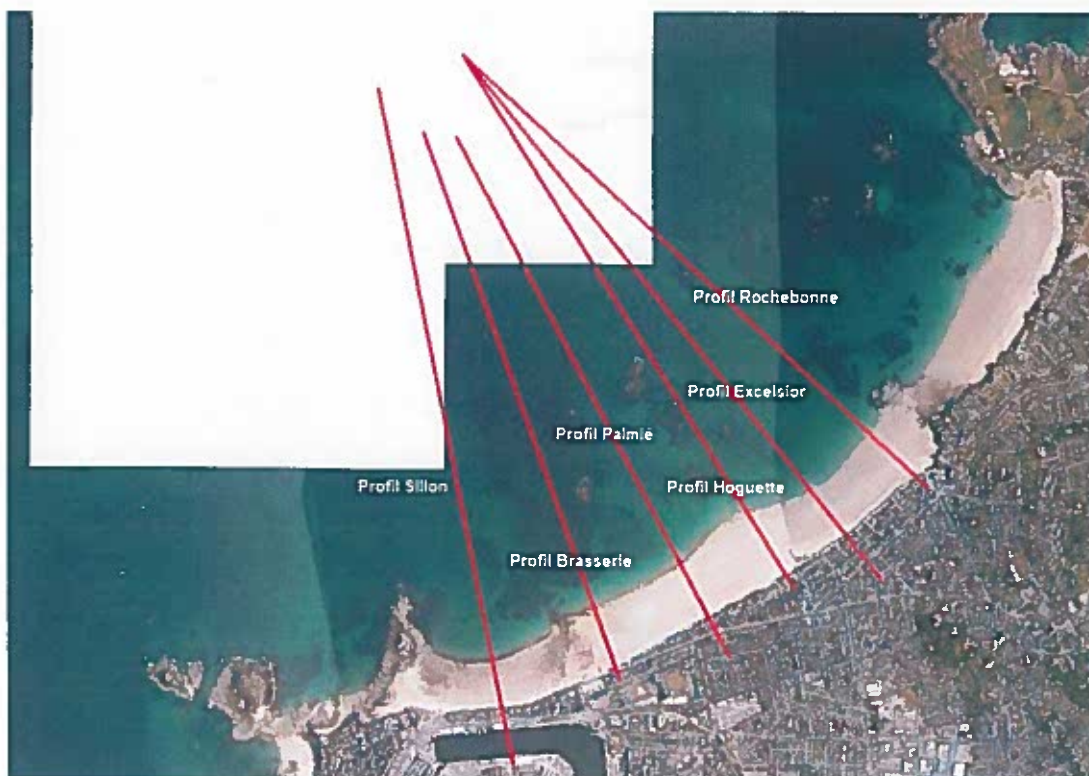


Figure 7-2 : Position des six profils extraits sur la plage de Saint Malo

La propagation des états de mer dans les différents profils est détaillée au paragraphe 4.1.6.

Les différentes configurations prise en compte

La digue de la plage de Saint Malo est composée de deux digues de formes différentes :

- La digue du Sillon sur la partie Ouest, de l'Intramuros jusqu'à la Brasserie du Sillon ;
- la digue de Paramé, qui s'étend sur la partie Est, de la Brasserie du Sillon jusqu'à Rochebonne.

Ces deux digues présentent un profil différent qui va influencer sur les débits franchissant les ouvrages.

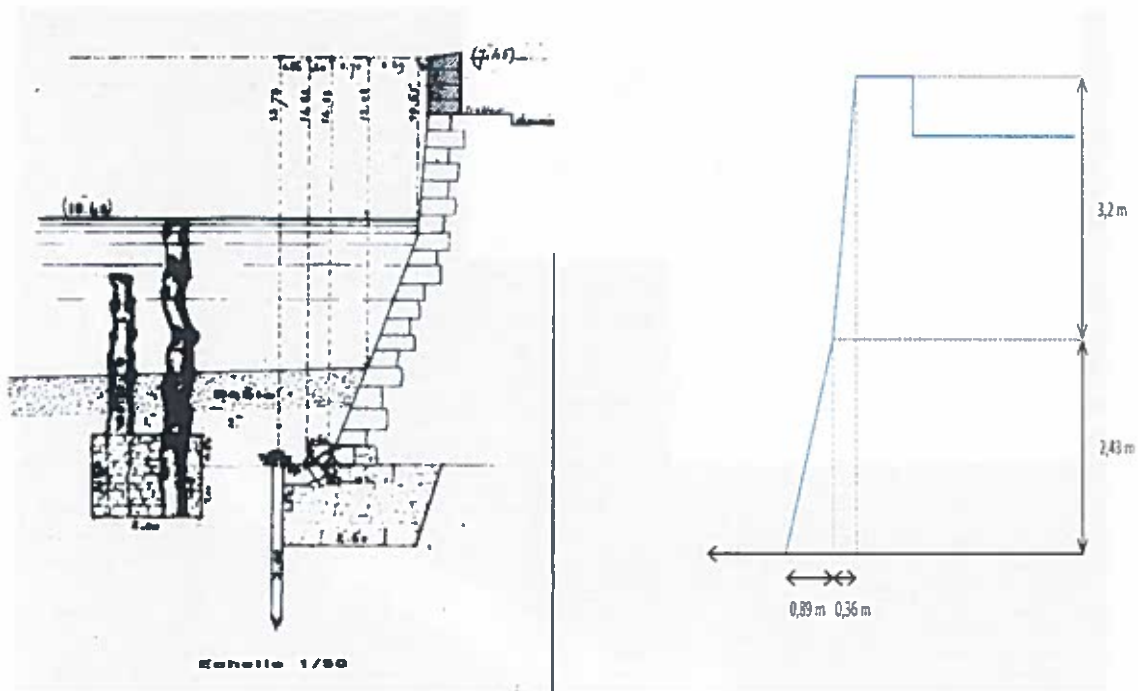


Figure 7-3 : Profil de la digue du Sillon

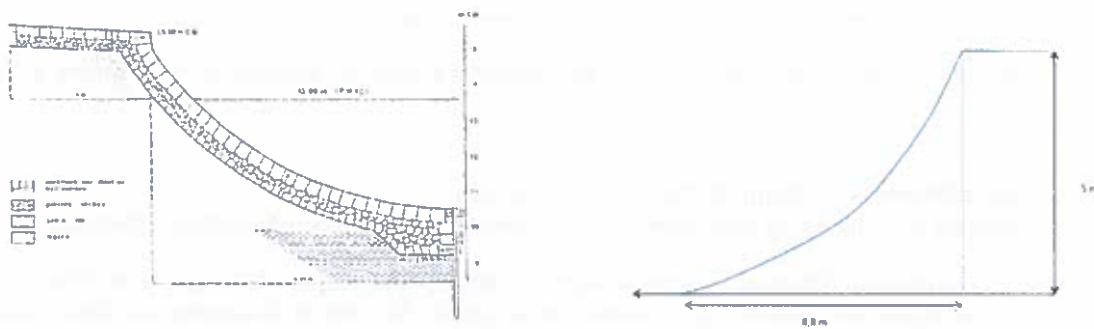


Figure 7-4 : Profil de la digue de Paramé

De plus, l'altitude de la digue n'est pas homogène sur tout son linéaire. La digue a donc été divisée en plusieurs tronçons, comme présenté dans la figure suivante.



Figure 7-5 : Division de la digue de Saint Malo en tronçons d'altitude homogène

L'altitude de la digue sur ces tronçons est homogène, sauf sur les tronçons 2, 3 et 4. Il est à noter que les cotes présentées dans le tableau ci-dessous ne prennent pas en compte le couronnement sur la digue du Sillon. La hauteur moyenne du couronnement étant d'en moyenne 1 m, il sera rajouté dans le calcul de franchissement. Le tronçon n°1 n'est pas traité car la dimension du mur de soutènement ne permet pas la génération de débits de franchissement.

Tronçon	Type de profil d'ouvrage	Altitude de la digue m IGN 69 (m CM)	Profil de plage associé	Couronnement
2 – Partie Ouest	Sillon	9 m (15,29 m)	Sillon	Oui
2 – Partie Est	Sillon	8 m (14,29 m)	Sillon	Oui
3 – Partie Ouest	Sillon	8 m (14,29 m)	Sillon	Oui
3 – Partie Est	Sillon	8,5 m (14,79 m)	Sillon	Oui
4 – Partie Ouest	Sillon	8,8 m (15,09 m)	Brasserie	Oui
4 – Partie Est	Sillon	9 m (15,29 m)	Brasserie	Oui
5	Paramé	9,5 m (15,79 m)	Brasserie	Non
6	Paramé	9,5 m (15,79 m)	Palmié	Non
7	Paramé	9,5 m (15,79 m)	Hoguette	Non
8	Paramé	9,5 m (15,79 m)	Excelsior	Non
9	Paramé	9,5 m (15,79 m)	Excelsior	Non
10	Paramé	9,5 m (15,79 m)	Rochebonne	Non

Tableau 7-1 : Tableau des différents tronçons de calcul des débits de franchissement

La figure suivante synthétise ce tableau :



Figure 7-6 : Figure des différents tronçons de calcul des débits de franchissement

Le calcul des débits de franchissement

Le calcul des débits franchissant pour chaque tronçon a été effectué à l'aide d'un logiciel mis en place par HR Wallingford. Ce logiciel fonctionne à partir de la formule empirique proposée dans le "Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures – Assessment Manual". Ce logiciel calcule le débit linéique franchissant l'ouvrage (en l/s/mètre linéaire).

Pour chaque calcul, les paramètres injectés dans cette formule sont :

- La période de la houle en pied d'ouvrage ;
- La hauteur significative de la houle en pied d'ouvrage ;
- La pente de l'ouvrage (les deux pentes dans le cas d'ouvrage composite comme pour la digue du Sillon) ;
- La revanche de la crête de la digue au niveau d'eau ;
- Un coefficient représentant la rugosité du revêtement de l'ouvrage.

Injection des débits dans le modèle terrestre

Les débits calculés sont des débits linéiques ($m^3/s/mètres$ linéaires). Pour les besoins de la modélisation, les débits injectés ont été regroupés tous les 9 mètres (correspondant à 3 mailles de 3 mètres). Les débits calculés sont été injectés en tant que sources d'eau au niveau du sommet de la digue dans le modèle hydrodynamique de submersion.

Les points sources ont été positionnés de façon régulière sur toute la partie correspondant à la digue du Sillon. Sur la partie correspondant à la digue de Paramé, les points sources sont placés au droit des rues transversales et des ouvertures du front de mer.





Figure 7-7 : Linéaire de la digue sur lequel des débits franchissant ont été injectés dans le modèle hydrodynamique de submersion

7.2 Calage du modèle de franchissement

Trois événements historiques de tempêtes ont été sélectionnés pour ajuster le calcul des débits franchissant. Il s'agit des tempêtes de Décembre 1999, Mars 2008 et Mars 2010, qui sont les événements les plus contemporains. Les niveaux de la mer sont connus (les données marégraphiques sont disponibles) ainsi que la hauteur de houle au large.

La tempête de 1999 n'a quasiment provoqué aucun écoulement par franchissements sur le secteur protégé par la digue de Paramé et permet donc d'effectuer un paramétrage pour restituer les débits de franchissement calculés vers des valeurs proches de 0.

Les deux autres tempêtes permettent de paramétrer et caler les débits franchissant de manière à obtenir une ampleur d'inondation cohérente avec les renseignements obtenus grâce à une enquête de terrain.

Chacun des couples hauteur d'eau à pleine mer et hauteur significative des houles au large est propagé jusqu'en pied d'ouvrage, permettant le calcul des débits de franchissement. Pour ces tests, le réseau d'assainissement et la pluviométrie réelle ont été intégrés. Un exemple de restitution du modèle de franchissement est présenté ci-après.



Figure 7-8 : Résultat du calage du modèle de franchissement pour la tempête de décembre 1999

8 Principe d'établissement des cartes d'aléa

8.1 Caractérisation des aléas submersion marine

Le guide méthodologique d'élaboration des PPRL précise schématiquement les différentes approches pour qualifier l'aléa submersion marine.

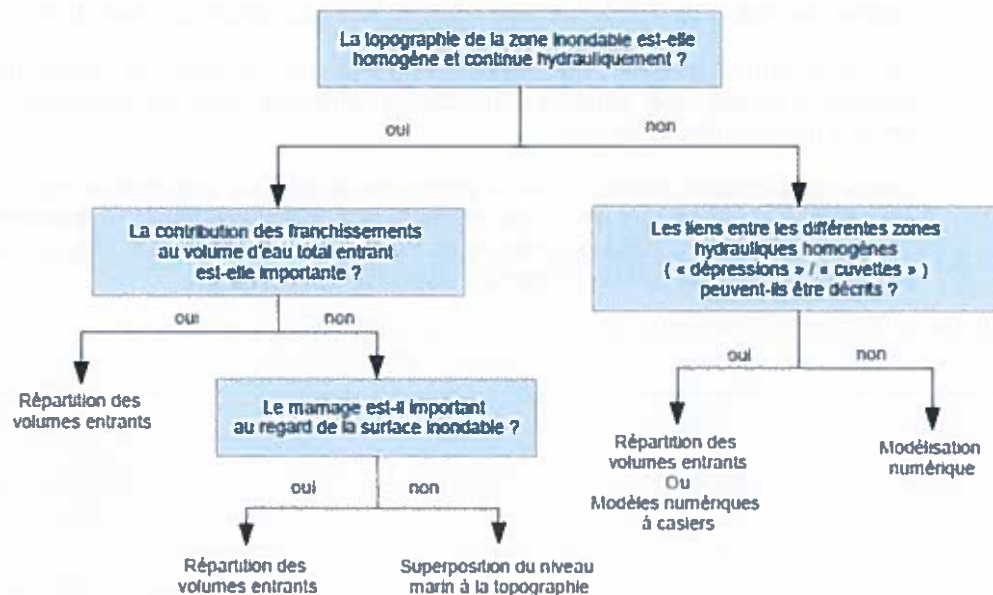


Figure 8-1 : Logigramme du choix de la méthode de caractérisation de l'aléa submersion marine

Au regard de la complexité des zones submersibles, la caractérisation de l'aléa submersion marine sera réalisée à partir de la modélisation hydraulique.

8.2 Modélisation des phénomènes

8.2.1 Présentation du logiciel de modélisation

Le modèle de submersion a été élaboré à l'aide du logiciel MIKE 21. Il utilise une description bidimensionnelle permettant de représenter les écoulements à surface libre, tant dans les zones côtières que dans les lacs, les rivières et les estuaires. Le code résout les équations de Barré-de-Saint-Venant en différences finies pour les régimes transitoires. Pour la présente étude, il permet de simuler les écoulements en tenant compte du frottement sur le fond, des écoulements torrentiels, présents essentiellement dans les ruptures, et du recouvrement / découverte de zones sèches. Les débits au travers des brèches sont calculés à l'aide d'une loi de seuil.

8.2.2 Mise en œuvre du modèle hydraulique

Description de la topographie

La topographie du modèle est issue du MNT de la base de données LITTO3D et se présente sous la forme d'un maillage régulier avec une résolution de 3 mètres. Cette taille de maille permet de tenir compte des différentes singularités pouvant contraindre les écoulements.

Ainsi les ouvrages conditionnant la propagation des inondations, autres que les ouvrages littoraux (remblais routiers ou digues de protection), sont directement inclus dans la topographie. De ce fait, lorsque le niveau de l'inondation dépasse le niveau de ces ouvrages, le modèle reproduit automatiquement le débordement.

La figure ci-après présente la topographie modélisée.

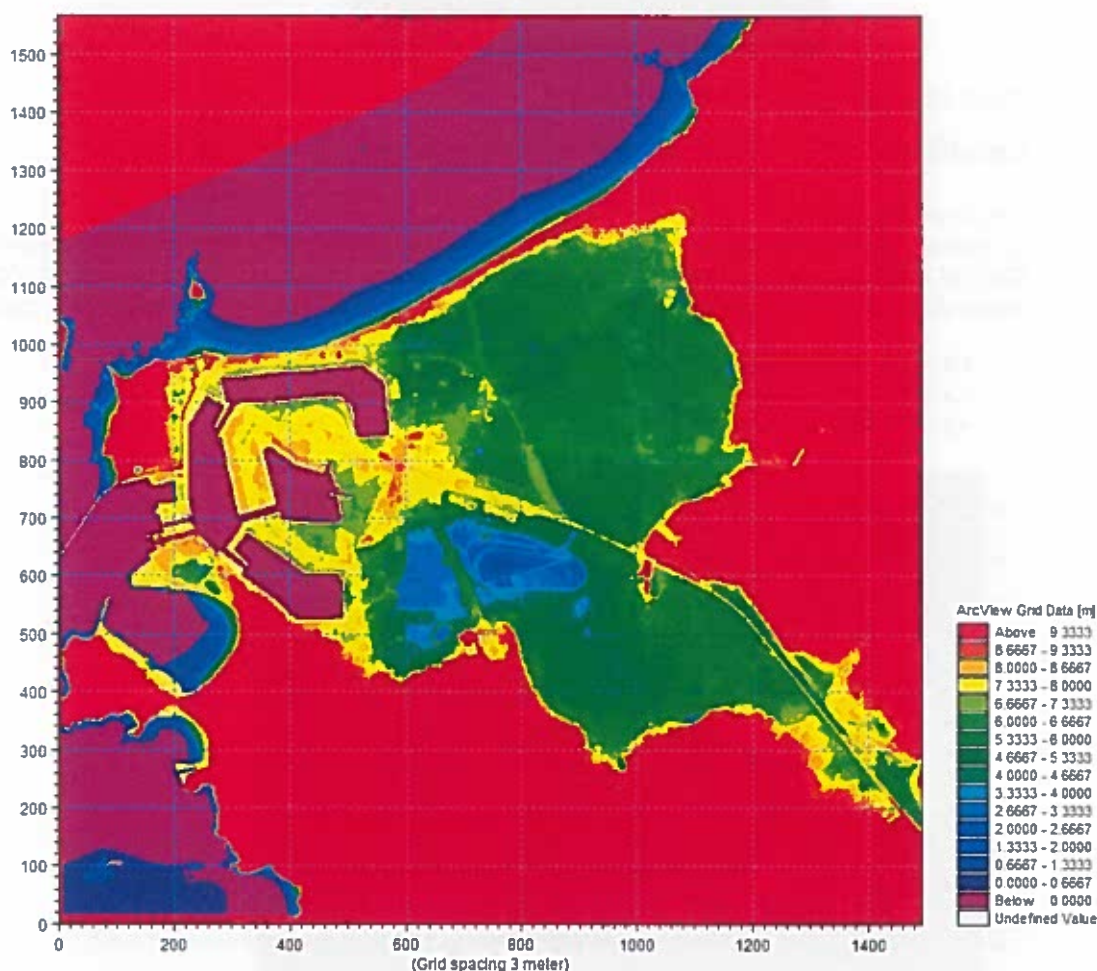


Figure 8-2 : Topographie du modèle hydraulique

Quelques ajustements ont été effectués sur le LIDAR pour rendre compte de la réalité du terrain. Pour exemple, le passage sous la voie ferrée rue de la Compagnie des Indes n'est pas visible sur le LIDAR. Nous avons, de ce fait corrigé les altitudes afin de permettre le passage de l'eau.



Figure 8-3 : Passage piéton sous la voie ferrée

Les bâtiments ont été intégrés dans le modèle hydraulique sous forme de rugosité.

Le paramétrage du modèle

Le paramètre hydraulique sur le domaine modélisé est donné par le coefficient de Strickler. Celui-ci a été paramétré à dire d'expert, aucune possibilité de calage de ce paramètre n'étant disponible. Nous avons retenu des valeurs communément admises en milieu urbain, à savoir :

- $K_s = 30$ sur les surfaces non bâties,
- $K_s = 3$ sur les secteurs bâtis,
- $K_s = 60$ dans les bassins.

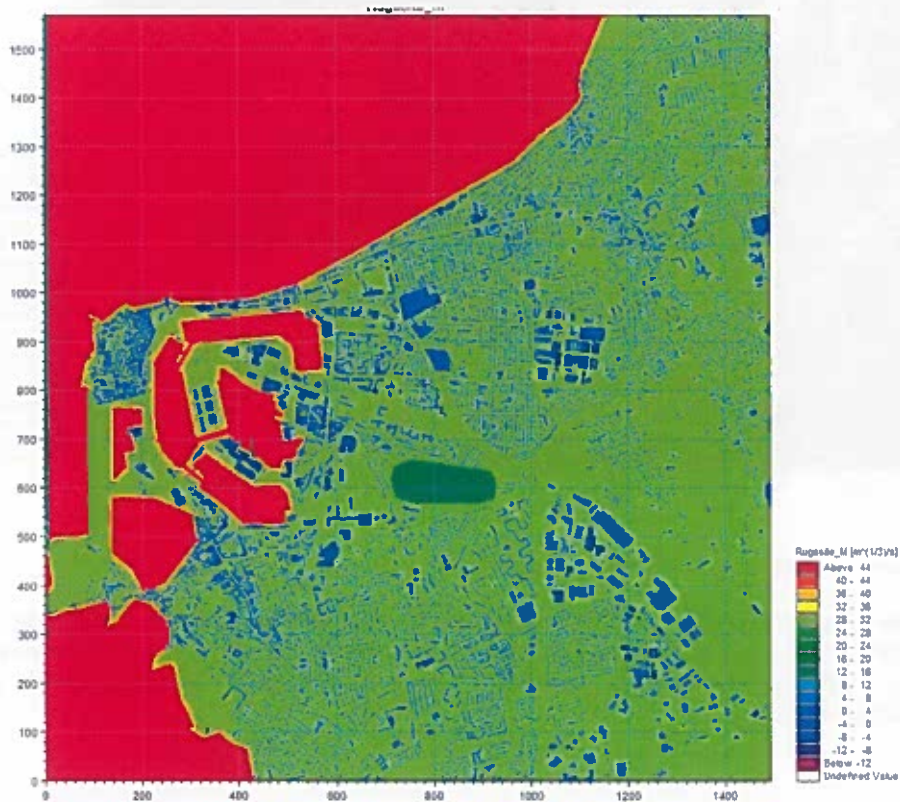


Figure 8-4 : Coefficient de Strickler sur le domaine modélisé



Paramétrage des ruptures par brèches

Le débit pénétrant sur le site étudié est calculé automatiquement en fonction des caractéristiques de la brèche, à l'aide d'une équation de seuil. La brèche est représentée de manière simplifiée compte tenu des incertitudes existant sur sa géométrie exacte. La géométrie d'une brèche dépend en effet fortement de plusieurs facteurs tels que l'état de l'ouvrage à l'instant de la rupture ou les conditions de la mer. Il n'est donc pas possible de définir avec certitude quelle sera la forme de la brèche pour un site donné. Par conséquent, la brèche est représentée avec une largeur fixe dans le temps.

La brèche est caractérisée par une forme trapézoïdale, comme illustré ci-dessous.

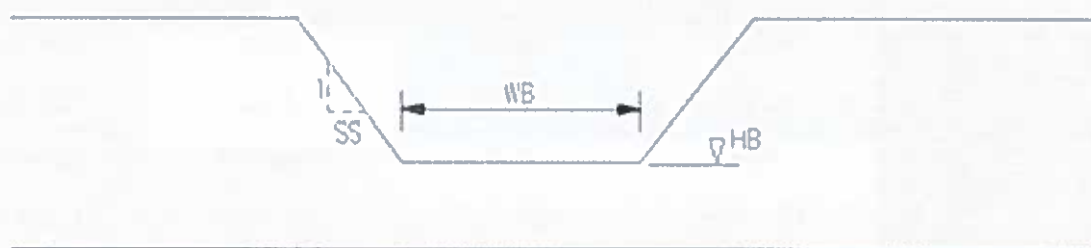


Figure 8-5 : Représentation des brèches

La brèche est ainsi décrite par trois paramètres : la largeur au point bas de la brèche (notée WB), la cote de ce point bas (HB), ainsi que la pente transversale (SS).

Pour les brèches représentées dans le cadre de cette étude, la pente transversale est de 1/1 (1 m vertical pour 1 m horizontal).

La cote du point bas de la brèche est variable dans le temps : elle est initialement égale à la cote initiale de l'ouvrage, puis s'abaisse jusqu'à la cote d'arase finale sur une durée de 15 minutes. Cette durée, résulte d'un choix sécuritaire, puisqu'elle permet à la mer de s'engouffrer rapidement au-delà de l'ouvrage. Cette hypothèse reste cependant réaliste, contrairement à une rupture instantanée qui néglige totalement la durée d'affaissement de l'ouvrage. Cet abaissement rapide de la brèche est initié une heure avant la pleine mer.

La cote d'arase des brèches correspond au niveau pour lequel 50 m² de profil en travers sont mobilisables lors d'une tempête.

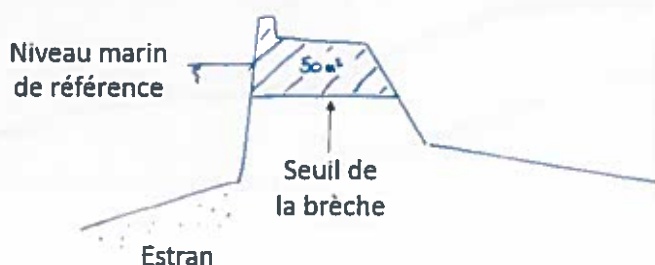


Figure 8-6 : Détermination de l'arase des brèches

Les conditions aux limites

Les conditions aux limites maritimes sont appliquées sur deux cycles de marées. Le premier cycle correspond à la tempête de projet centennale. Le second cycle comprend un résidu de tempête (30 % de la surcote de projet).

8.2.3 Les intensités de l'aléa submersion marine

L'aléa instantané est défini par croisement des hauteurs et des vitesses. Le tableau ci-dessous présente les différentes classes d'aléa retenues en fonction du croisement de ces deux variables.

Croisement H-V Classes d'aléas	$v < 0,25$ m/s	$0,25 < v < 0,5$ m/s	$v > 0,5$ m/s	$v > 1,25$ m/s
$H < 0,5$ m	Faible	Moyen	Fort	Très Fort
$0,5 \text{ m} < H < 1$ m	Moyen	Moyen	Fort	Très Fort
$1 \text{ m} < H < 1$ m	Fort	Fort	Très Fort	Très Fort
$H > 2$ m	Très Fort	Très Fort	Très Fort	Très Fort

Tableau 8-1 : Définition de l'aléa en fonction des hauteurs et vitesses instantanées

L'utilisation de ces catégories est justifiée par le danger croissant auquel les personnes sont exposées, lorsque la hauteur de l'inondation et/ou la vitesse d'écoulement augmente. Le graphique suivant montre ainsi que la capacité de déplacement d'une personne est fortement réduite dès lors que la hauteur d'eau dépasse 0,5 m ou la vitesse 0,25 m/s. Cette capacité est encore réduite pour un enfant ou pour un adulte non sportif. De ce fait, lorsque les fortes hauteurs et les fortes vitesses sont combinées, le déplacement à pieds n'est plus possible, et toute évacuation requiert l'utilisation de bateaux motorisés.

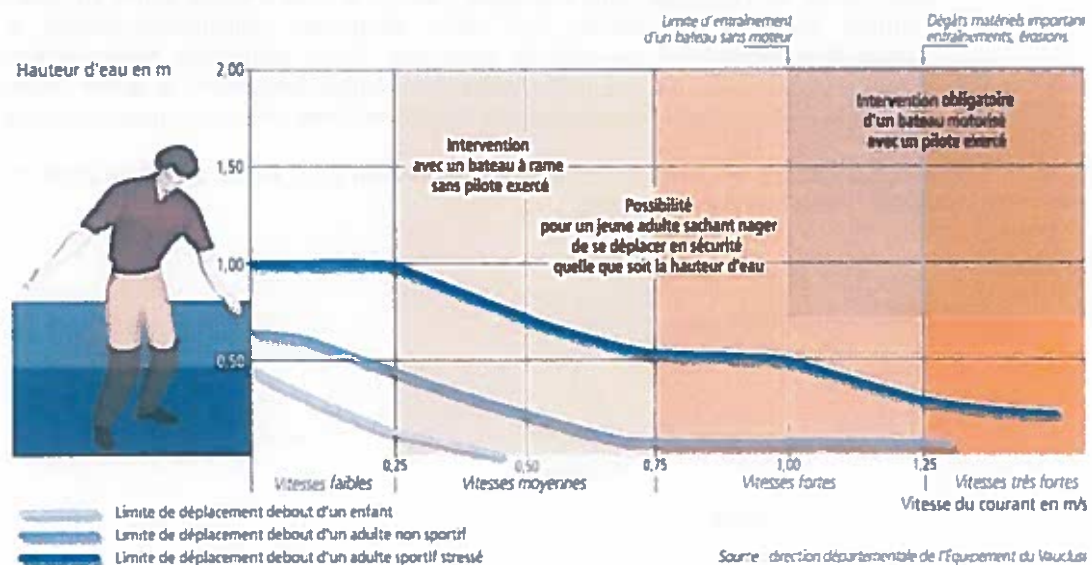


Figure 8-7 : Possibilités de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et de la vitesse d'écoulement (Source : DDE 84)

L'aléa instantané est ainsi calculé tout au long de la propagation de l'inondation à l'aide de cette classification. Au final, l'aléa cartographié se réfère à l'aléa maximal obtenu, en chaque point de l'espace, par comparaison de l'aléa instantané tout au long de la propagation de l'inondation. L'aléa maximal modélisé est donc issu d'un calcul instantané de l'aléa, et non d'un croisement des hauteurs maximales et des vitesses maximales qui surestimerait l'aléa.

Il est à noter que le guide méthodologique PPRL évoque la distinction dans la qualification de la dynamique de submersion des zones de montée lente ou rapide des eaux. L'objectif de cette méthodologie est ensuite d'appliquer un tableau de croisement distinct suivant la vitesse de montée. La valeur seuil pour distinguer les deux classes de vitesse de montée a été fixée à 1,5 m/h.

Les résultats des simulations ont cependant montré que la vitesse de montée calculée est systématiquement inférieure ce seuil. Par conséquent, seul le tableau de croisement ci-dessus, initialement destiné aux secteurs pour lesquels la vitesse de montée est inférieure à 1,5 m/h, a été appliqué.

8.2.4 Bandes de précautions

Rappels méthodologiques

La circulaire du 27 juillet 2011 précise que, dans la qualification des aléas submersion, des bandes de précaution (ou bandes de sécurité) doivent être appliquées afin de ne pas sous-estimer l'aléa local induit pas les phénomènes à l'origine des submersions. Le phénomène à l'origine de la prise en compte de bandes forfaitaires de précautions sont les survitesses induites par la création de brèches dans les ouvrages ou cordons dunaires.

Localisation des bandes	Référence	Événement pris en compte	Phénomènes observés	Dénomination de la bande	Détermination de la largeur	Niveau d'aléa
A l'arrière des tronçons de digue de premier rang ou des cordons dunaires vulnérables aux submersions	Circulaire du 27/07/2011 et guide	Rupture localisée de l'ouvrage ou de la structure	Formation d'une onde de rupture à partir de la brèche formée	L_r	$L_r = 100 * (\text{niveau marin de référence} - \text{TN aval})$ avec un minimum égal à 50 m	Très fort

Tableau 8-2 : Prise en compte des bandes de précaution dans la qualification de l'aléa submersion

Dans le cas d'une rupture d'ouvrage, la bande de précaution doit être prise à partir du sommet aval de l'ouvrage. D'autre part, la largeur de la bande de précaution peut être réduite si la cote du terrain naturel aval dépasse la cote du niveau marin de référence (cf. figure suivante). Toutefois la bande forfaitaire "ne pourra dans aucun cas être inférieure à 50 mètres (sauf si le terrain naturel atteint la cote NGF du niveau marin de référence du PPRL)" comme inscrit dans la circulaire 27/07/2011.

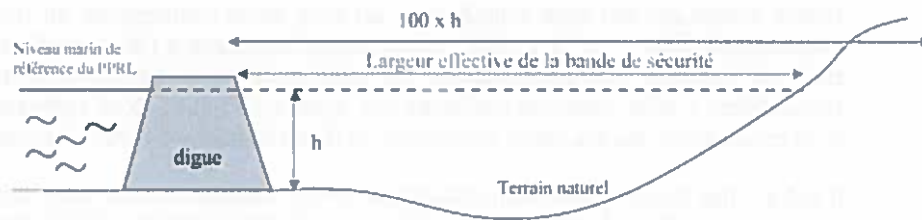


Figure 8-8 : Représentation de la bande de précaution à la suite d'une défaillance d'ouvrage (Source : Circulaire du 27/07/2011)

Adaptation

La largeur de la bande de précaution a été calculée par application de la charge hydraulique sur la cote d'arase de la brèche.

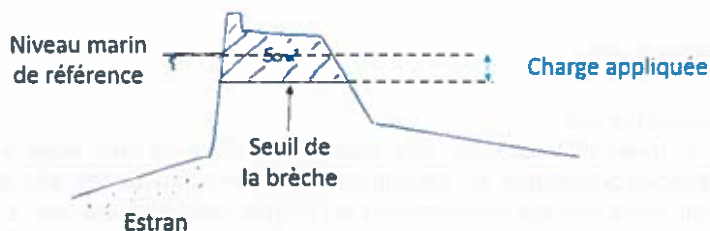


Figure 8-9 : Calcul de la charge hydraulique

Cette adaptation est par ailleurs justifiée par les résultats du modèle hydraulique.

Toutefois la limite inférieure (50 m) de la bande de précaution a été maintenue.

8.2.5 Bandes de chocs mécaniques

Rappels méthodologiques

« La zone soumise aux franchissements est sujette à des contraintes spécifiques, en particulier à des chocs mécaniques de vagues et de projections. L'aléa choc mécanique des vagues est donc distinct de l'aléa inondation. Lorsque des zones de franchissements importants sont identifiées, une analyse spécifique de la topographie en arrière et des efforts et pressions d'impact des franchissements de vagues peut être menée afin de déterminer la largeur de la zone concernée. Dans les zones caractérisées par des franchissements modérés, la largeur de la zone soumise au déferlement peut être considérée par défaut comme égale à 25 m et étendue à 50 m dans un contexte cyclonique.

Cette bande ne prend pas en compte les éventuelles projections de matériaux (sables, galets, etc...). Les secteurs soumis aux projections, autre aléa lié à la submersion marine, doivent être par conséquent identifiés » (*Guide méthodologique : plan de prévention des risques littoraux – mai 2014 – ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie – page 111*).

La bande de précaution liée aux chocs mécaniques se traduit par la bande littorale impactée par la dissipation de l'énergie des vagues à la côte.

Le guide de la méthodologie des PPRL précise que dans la qualification des aléas submersion, les zones soumises à des chocs de vagues ou franchissements par paquets de mer doivent être classées en aléa Fort à Très Fort :

Localisation des zones	Référence	Evénement pris en compte	Phénomènes observés	Dénomination de la bande	Détermination de la largeur	Niveau d'aléa
A l'arrière des perrés et ouvrages soumis à des franchissements par paquets de mer	Guide méthodo PPRL (page 125)	Surcote de déferlement (wave set-up)	Chocs mécaniques des vagues et projections	L_p	$L_p = 25$ m minimum ou évaluée à partir des observations historiques (RETEX)	Fort à Très fort

Tableau 8-3 : Prise en compte des bandes de précaution dans la qualification de l'aléa submersion

Application

La détermination des secteurs soumis aux chocs mécaniques se base sur les critères suivant :

- La nature du trait de côte
- Exposition à la houle
- L'historique des dégradations
- Les zones de dissipation de l'énergie sur l'avant littoral
- La topographie

La nature du trait de côte : Les chocs mécaniques ne s'appliquent que sur les ouvrages de protection.

L'exposition à la houle est le principal facteur conditionnant les chocs mécaniques.

Evénements historiques ayant entraîné des dommages sur le littoral : L'analyse historique apporte une information à prendre en compte. Les dégradations d'ouvrages côtiers constituent un indicateur indirect des sollicitations auxquels sont soumis les ouvrages.

Les conditions particulières de terrain : une visite spécifique de terrain a été menée pour appréhender et identifier toutes les particularités qui sont susceptibles de moduler la bande de dissipation de l'énergie de la houle.

L'approche adoptée se synthétise par l'arbre de décision suivant :

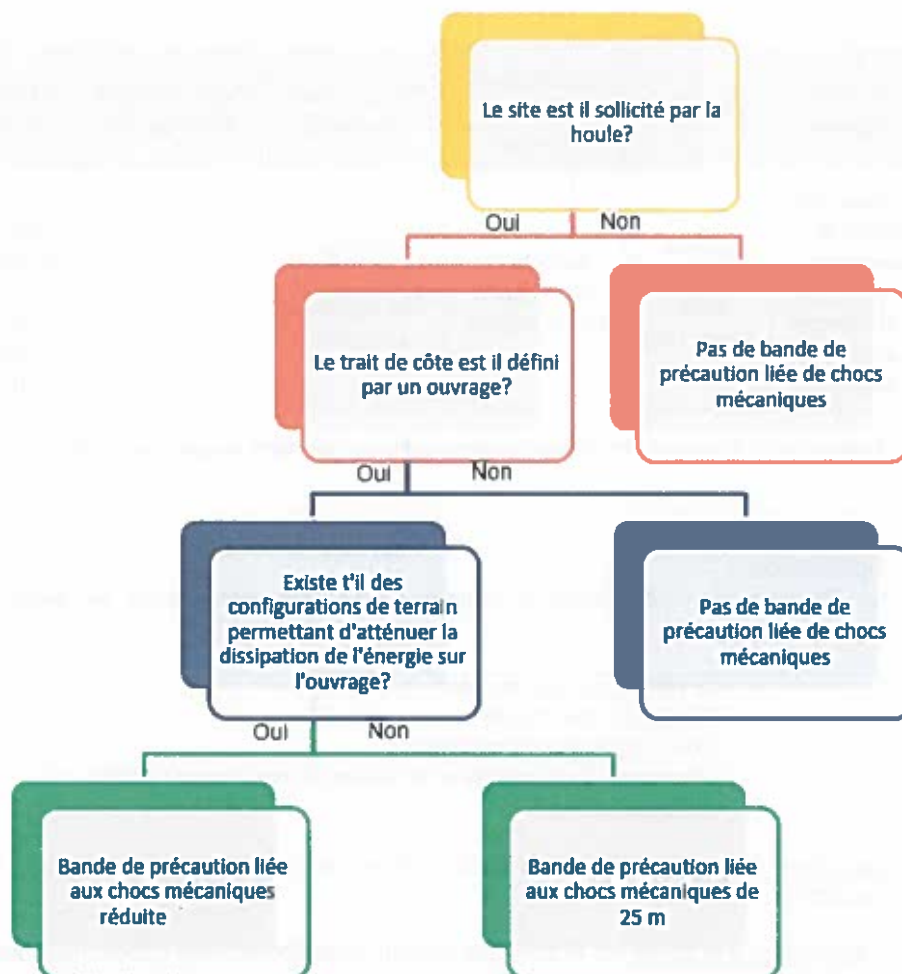


Figure 8-10 : Logigramme de détermination des chocs mécaniques

9 Cartographie des aléas

9.1 Les scénarios

Ci-après sont présentées 3 cartes :

- La carte des aléas de référence actuels (y compris la bande de précaution et la bande relative aux chocs mécaniques) ;
- La carte des aléas à l'horizon 2100 ;
- La carte informative en absence d'ouvrage.

9.2 Les cartes



Zone littorale
 Zone inondable
 Zone à risque
 Eau de mer
 Eau douce
 Eau de pluie
 Eau de ruissellement

0 100 200 300 400 500

Rédaction : M. de Saint-Malo (D1)
 Publication : D1 - novembre 2011



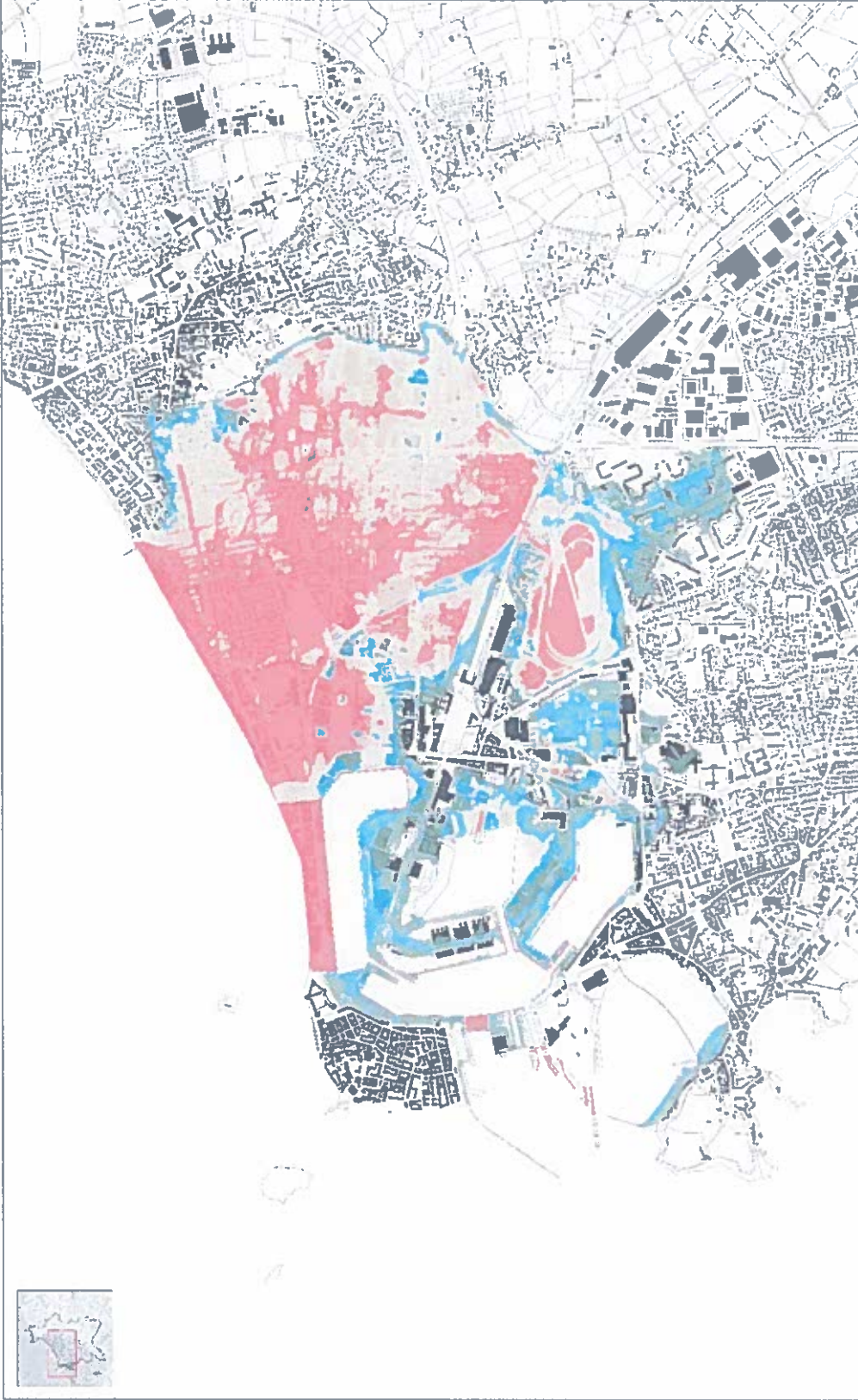


Aélas totale
Aélas moyen
Aélas faible
Zone soustraite des crues maritimes
Zone soustraite des crues littorales
Bâtiments

Échelle : 1/25 000
Mars 2016



Plan de Prévention des Risques Littoraux de Saint-Malo
Aléas pour l'événement centennal en absence d'ouvrage



Zone Inondable
Zone à fort risque
Zone à risque

0 100 200 300 400 500 m

Service des Risques de la Mairie de Saint-Malo



ANNEXES





ANNEXE A

Analyse du système de protection



ANNEX 4
to the contract for the design and construction of the

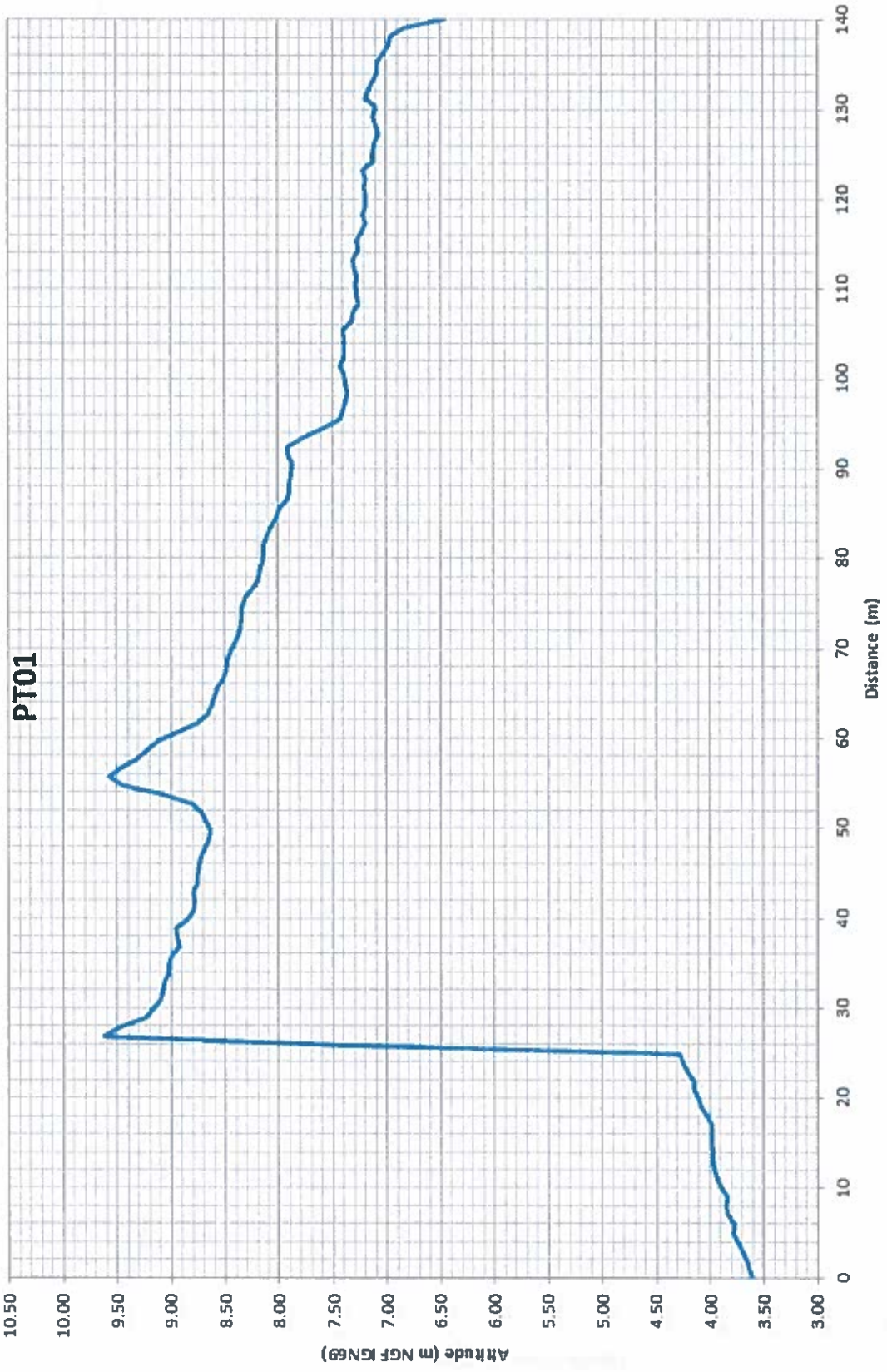


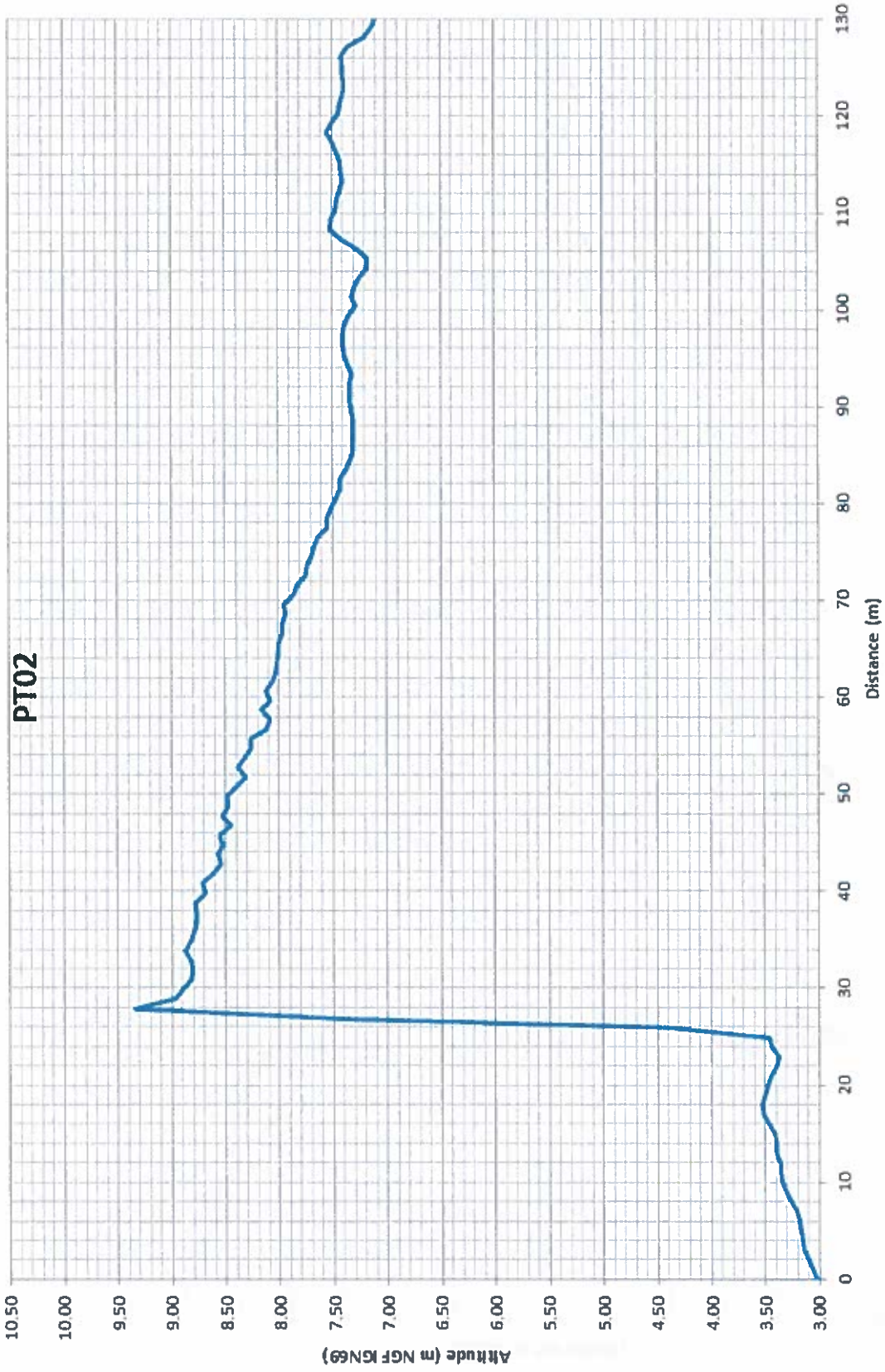


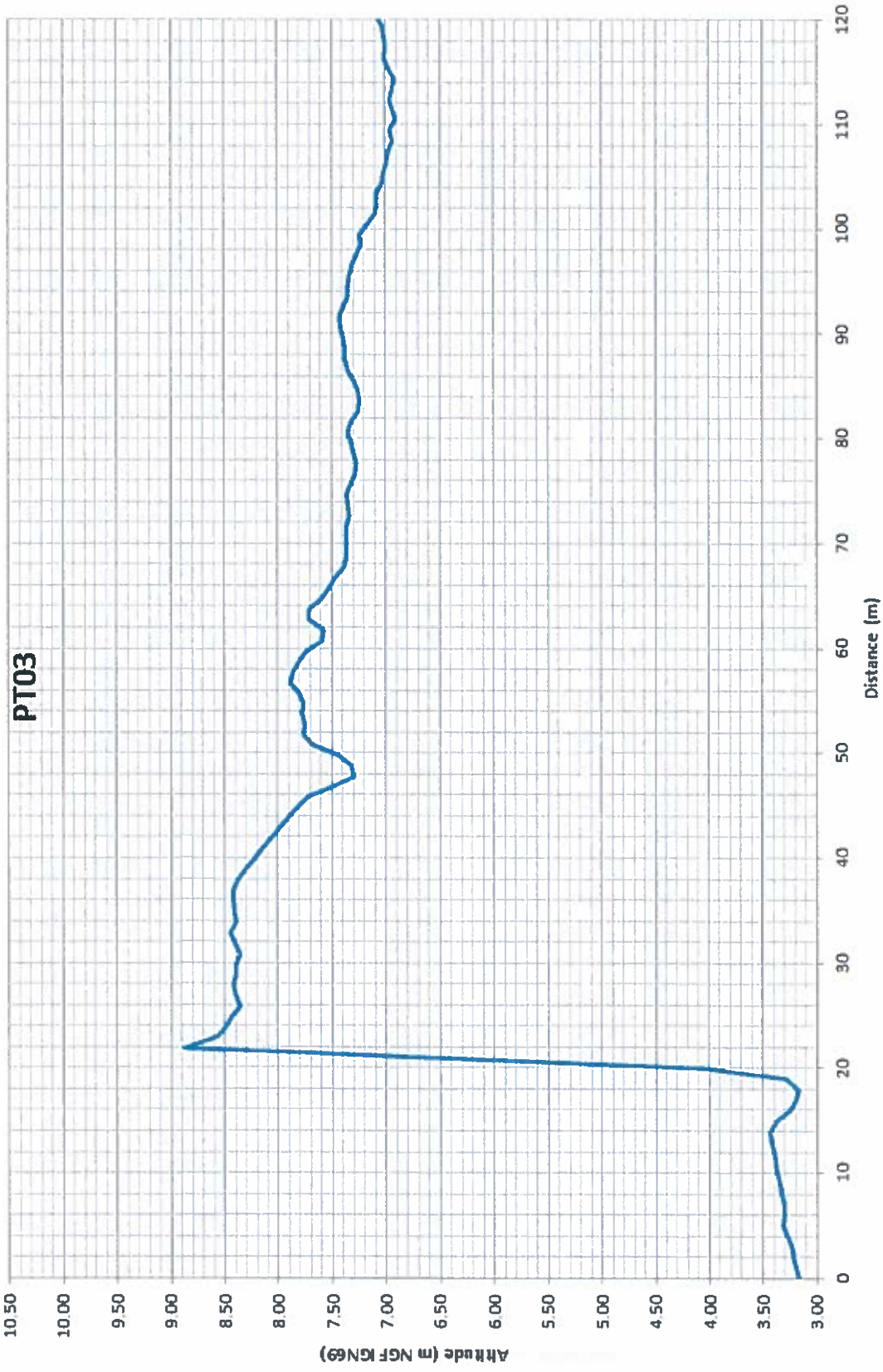


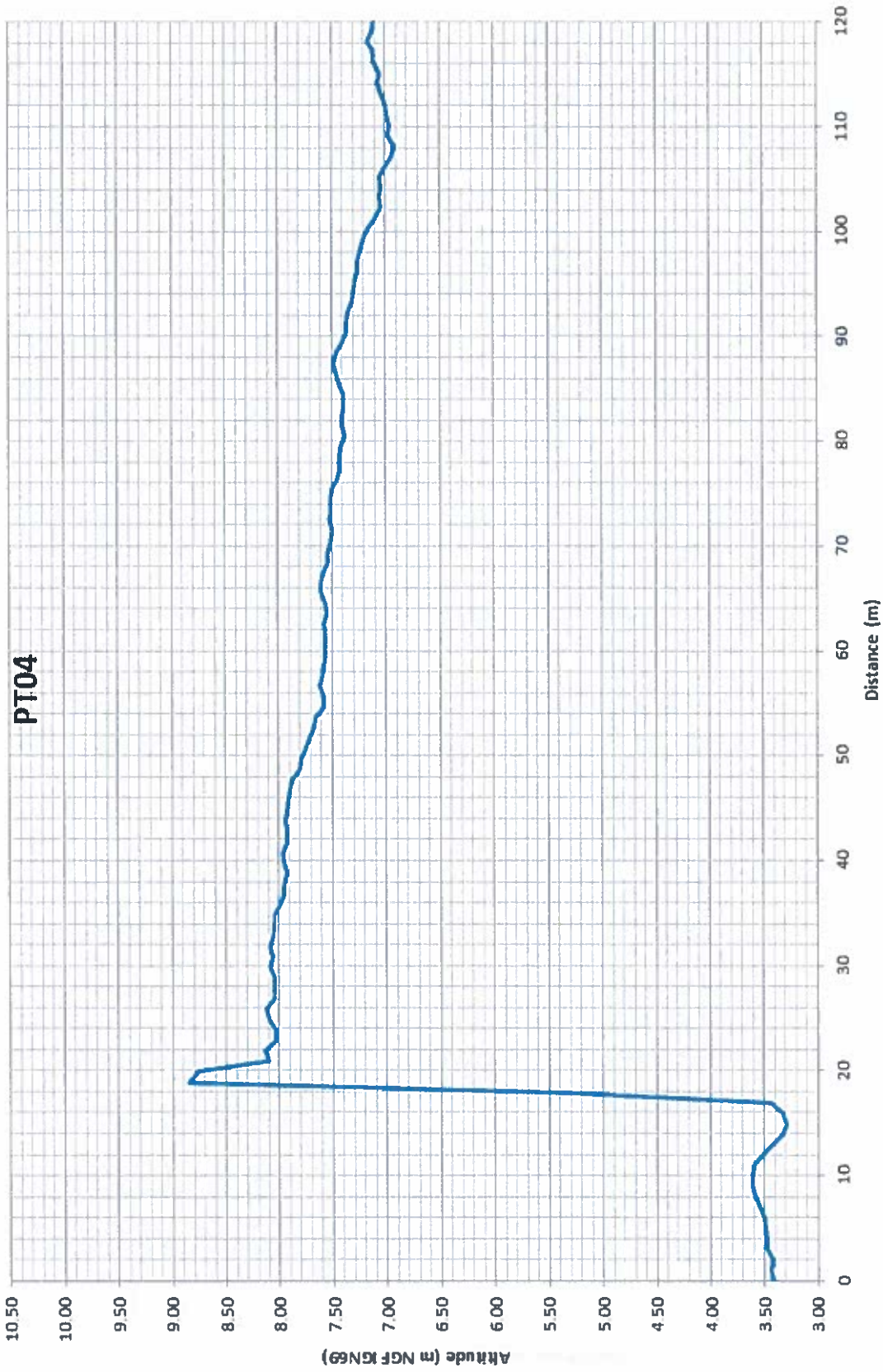


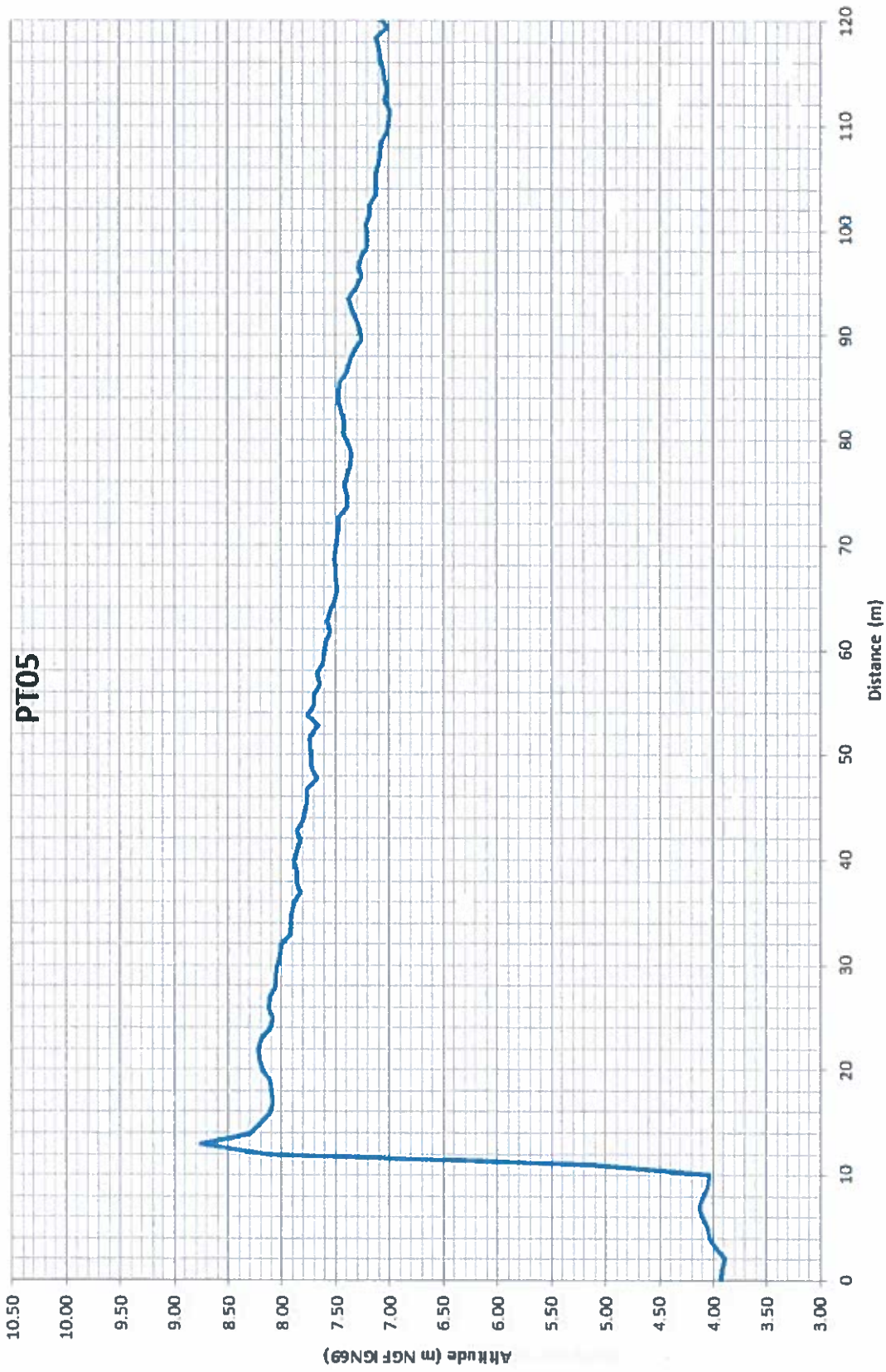


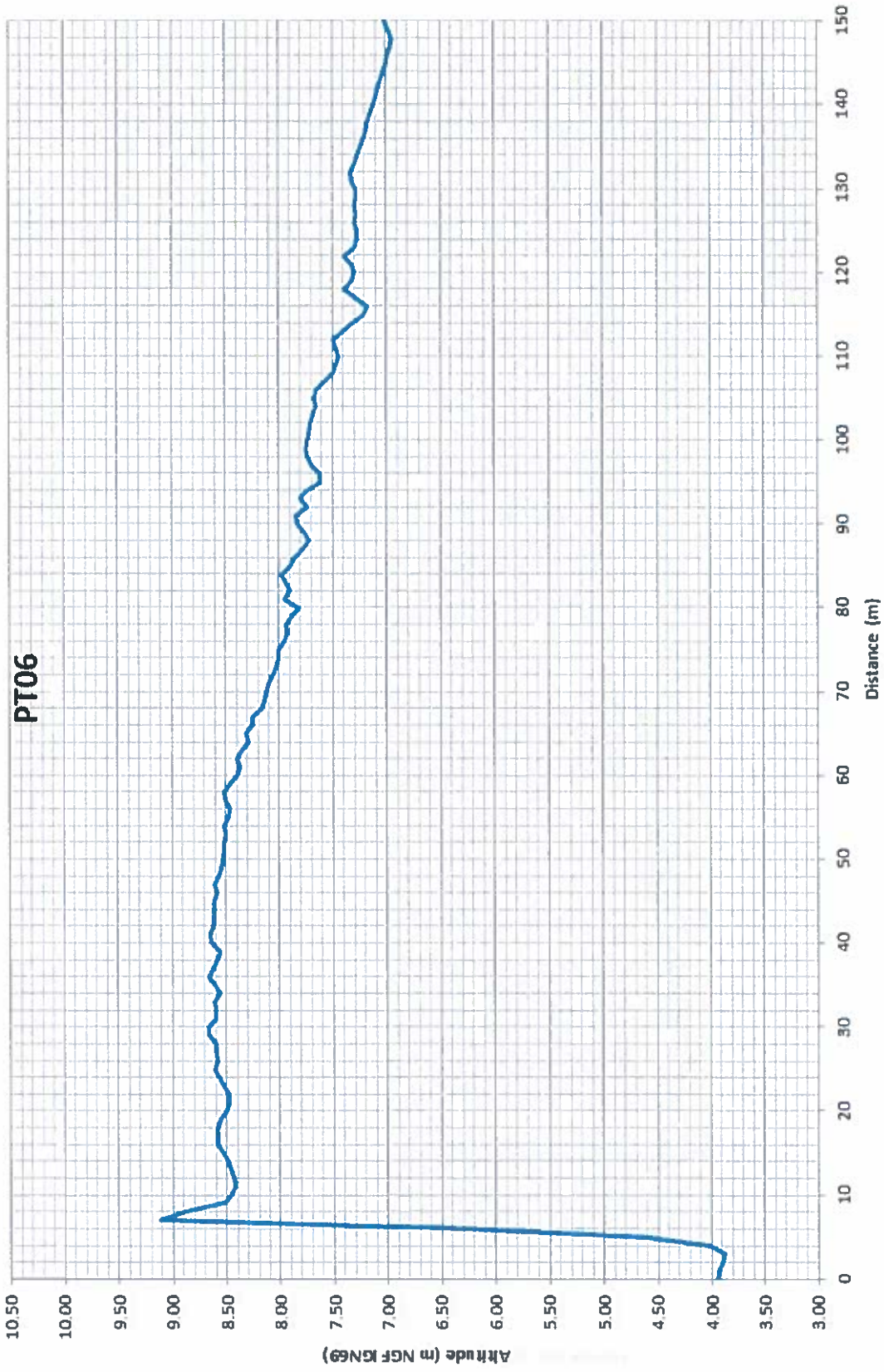


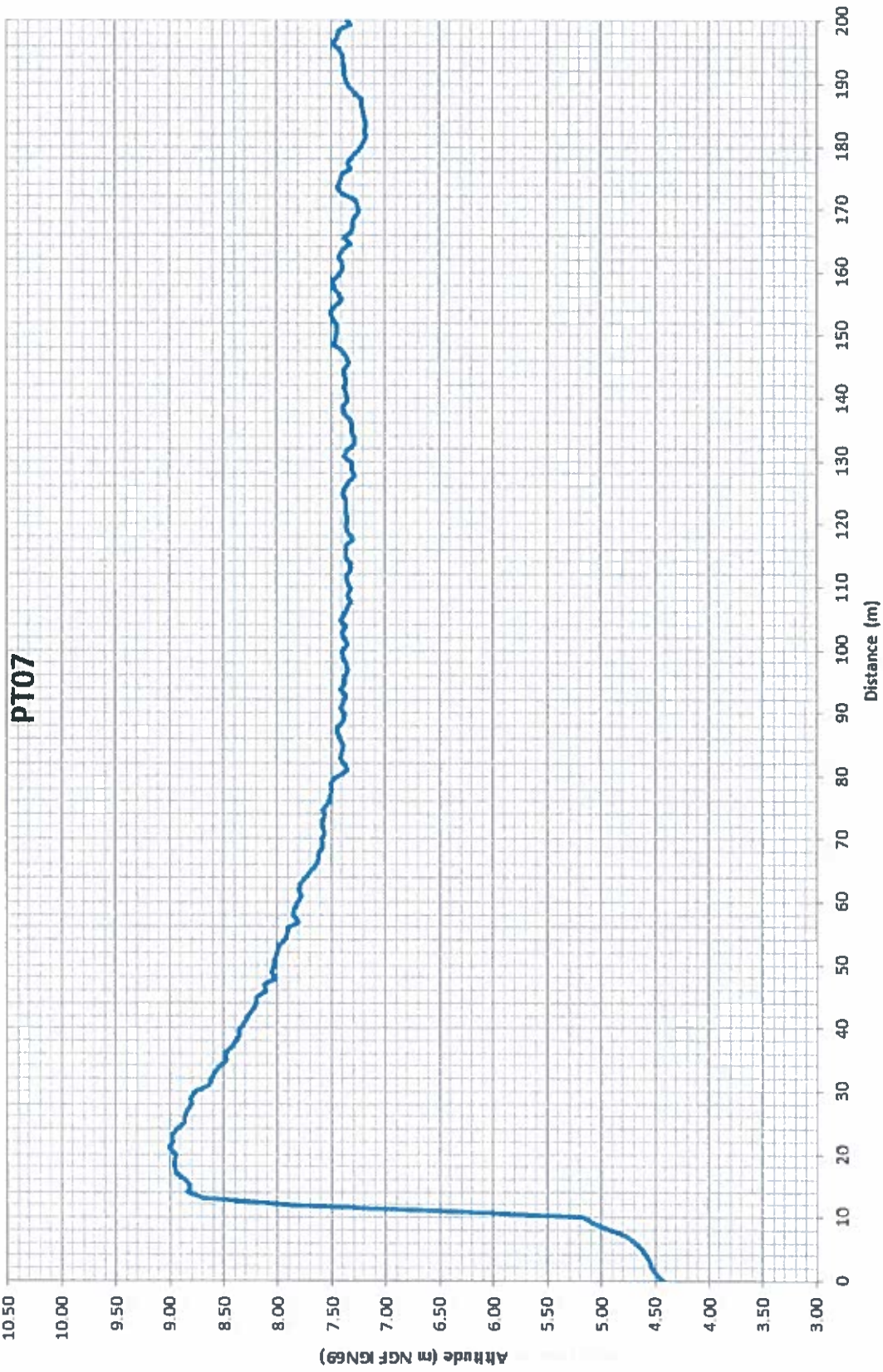


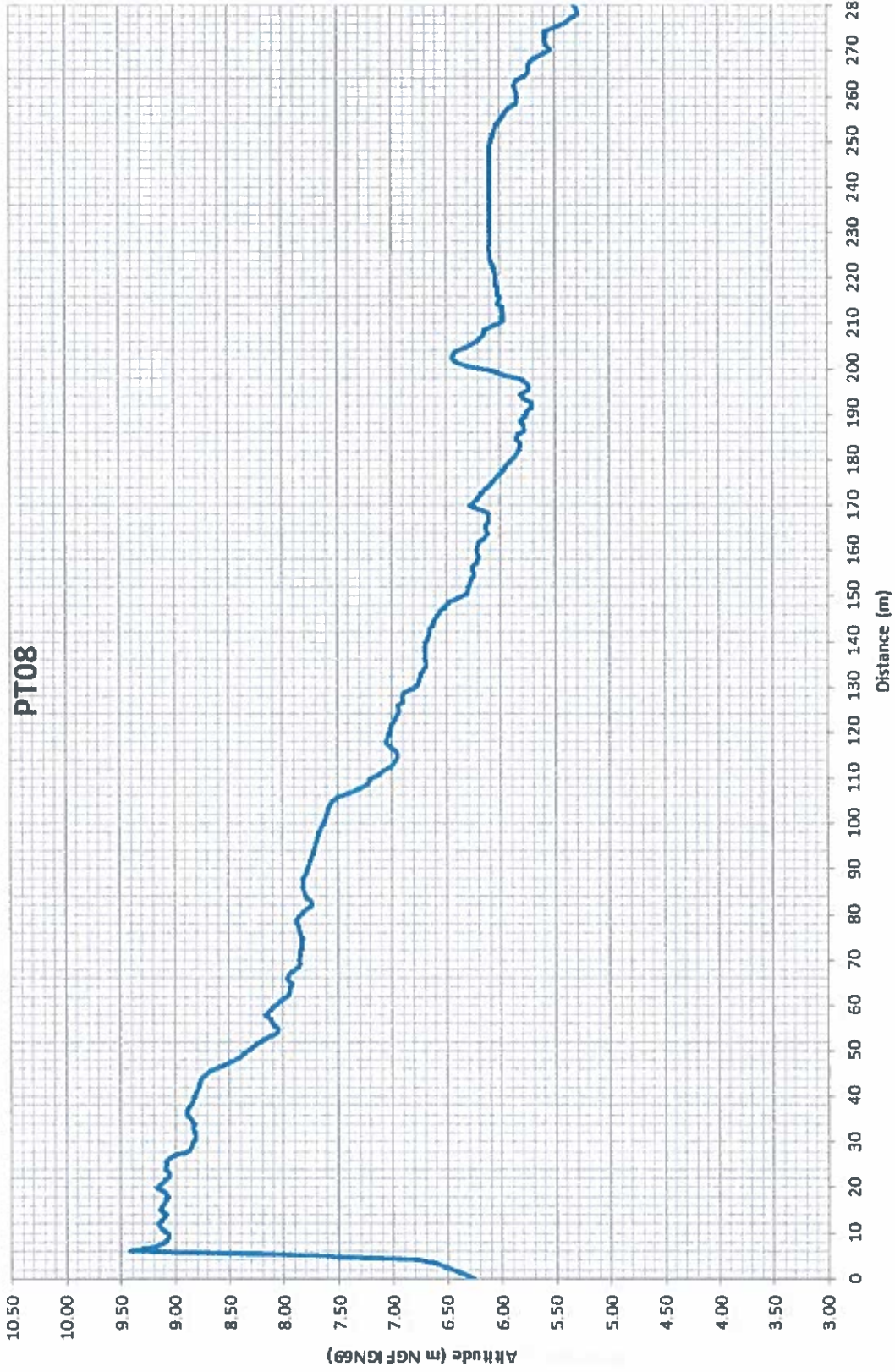


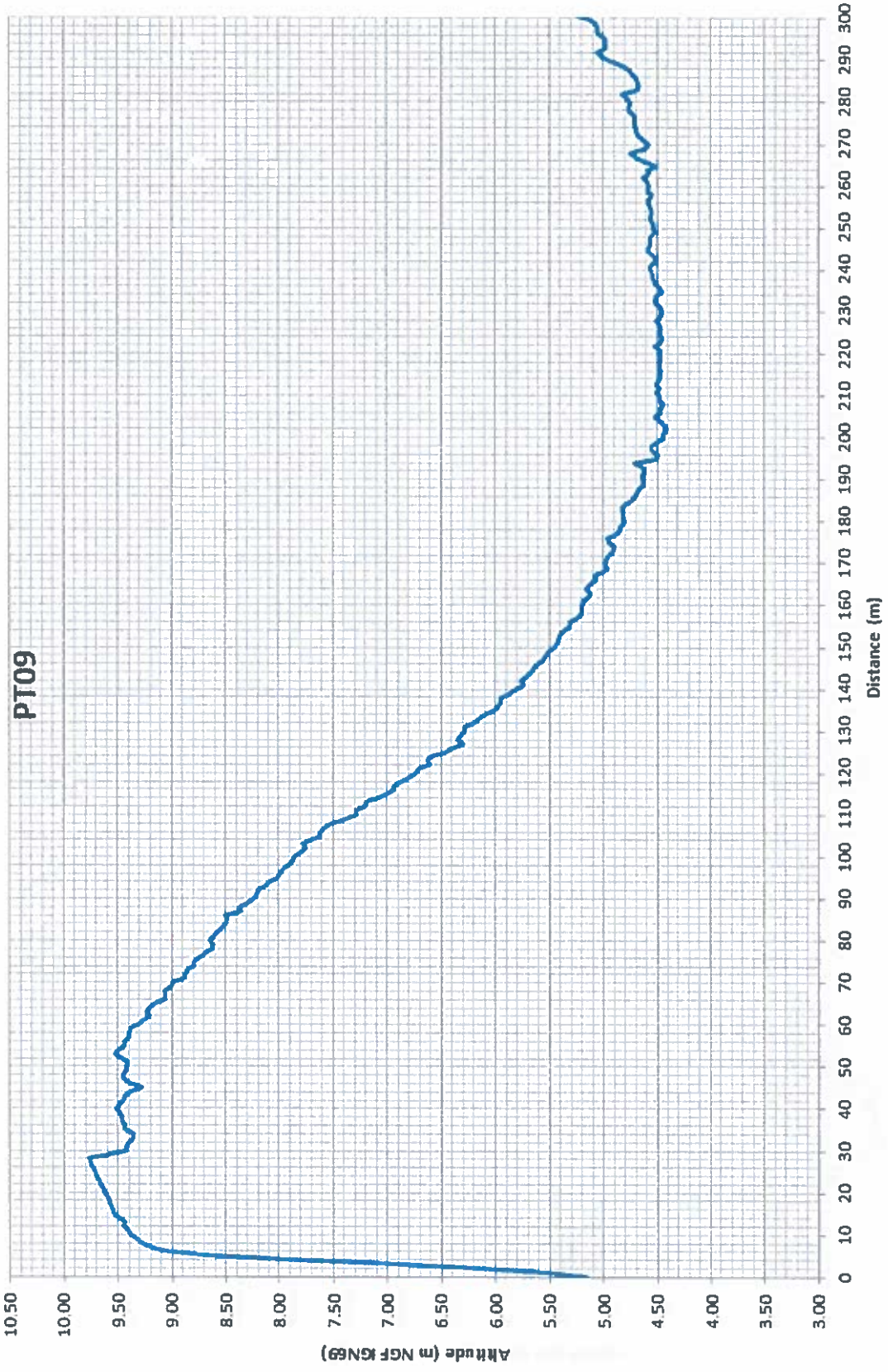


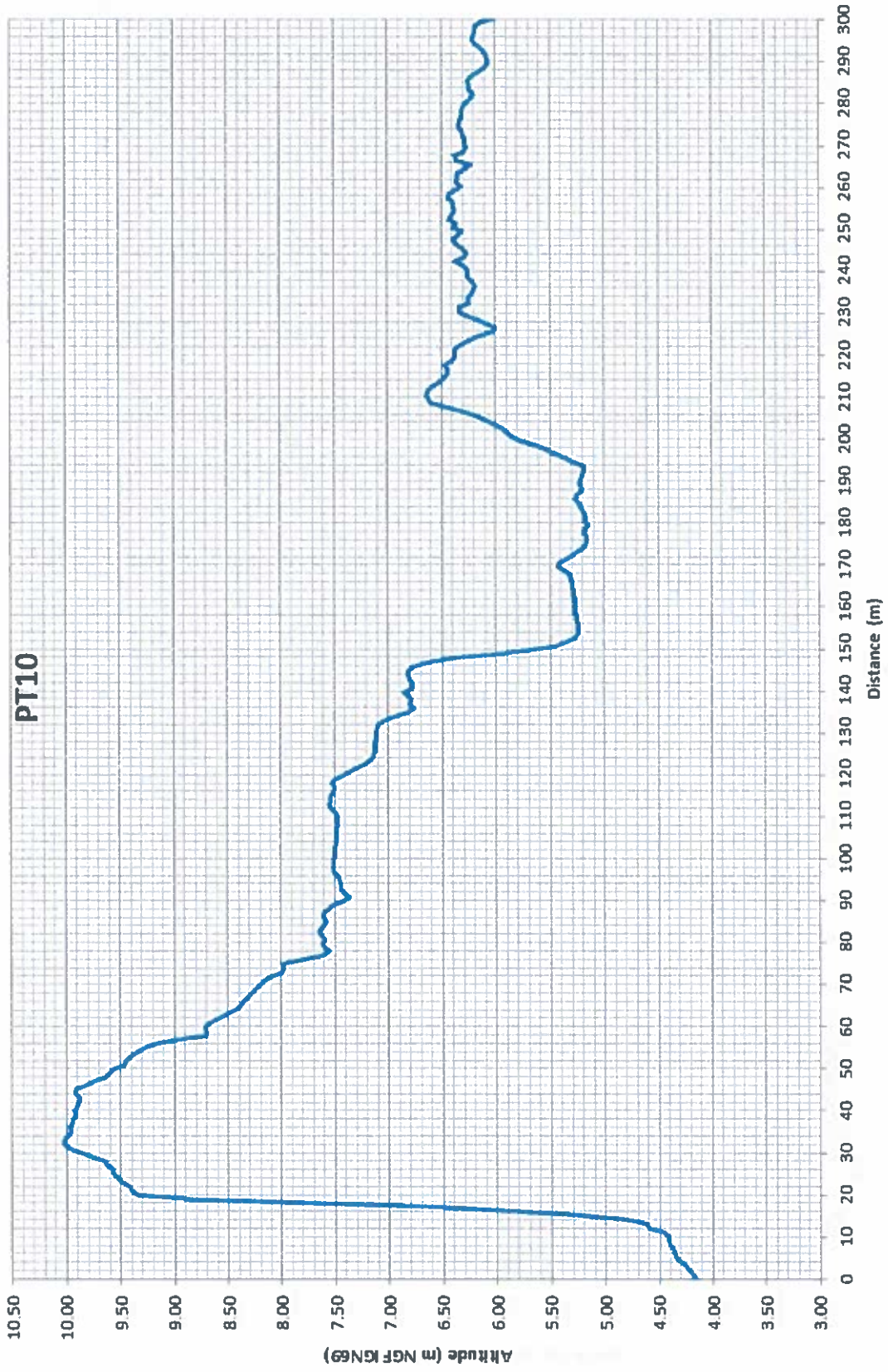


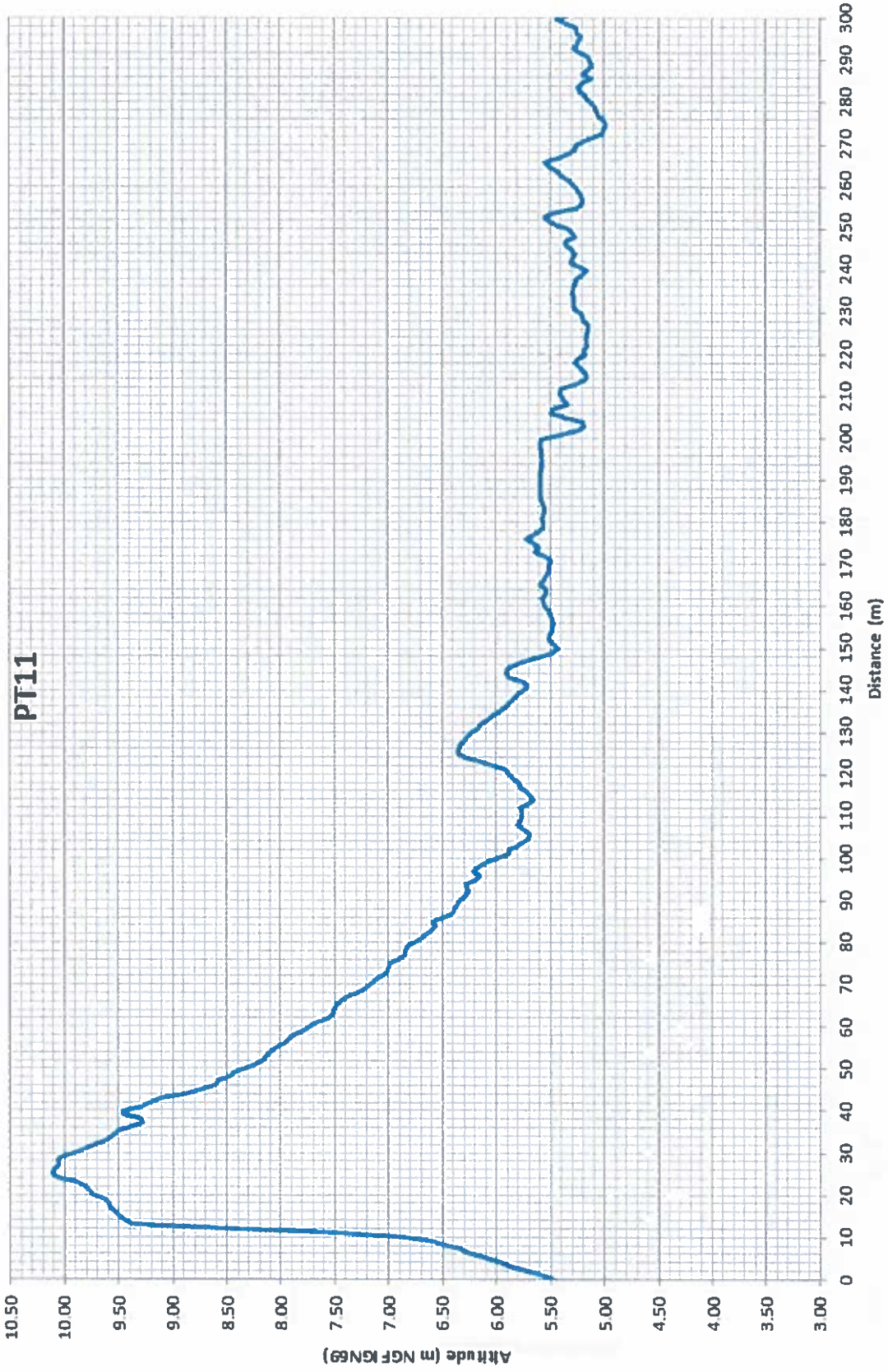


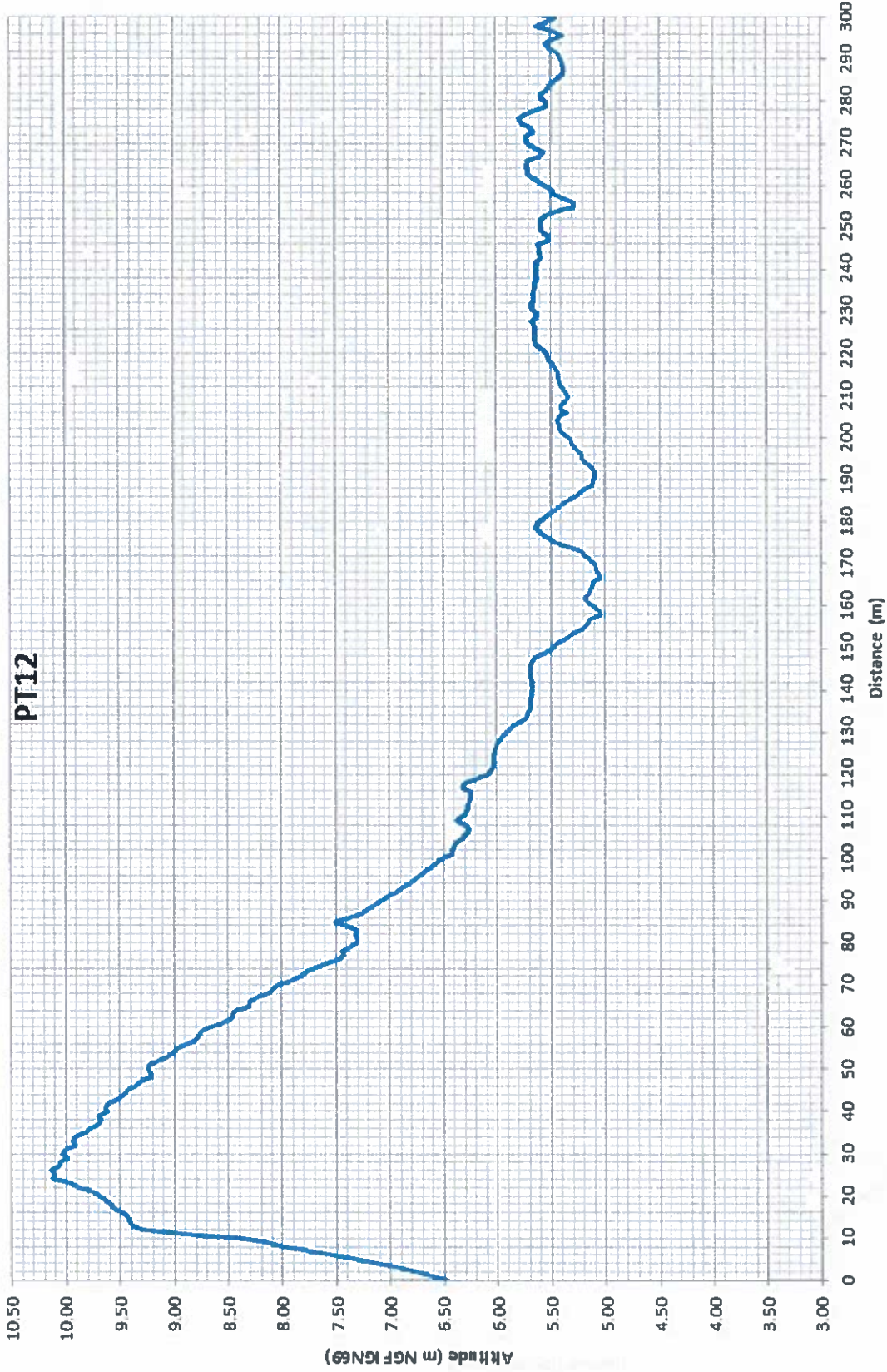


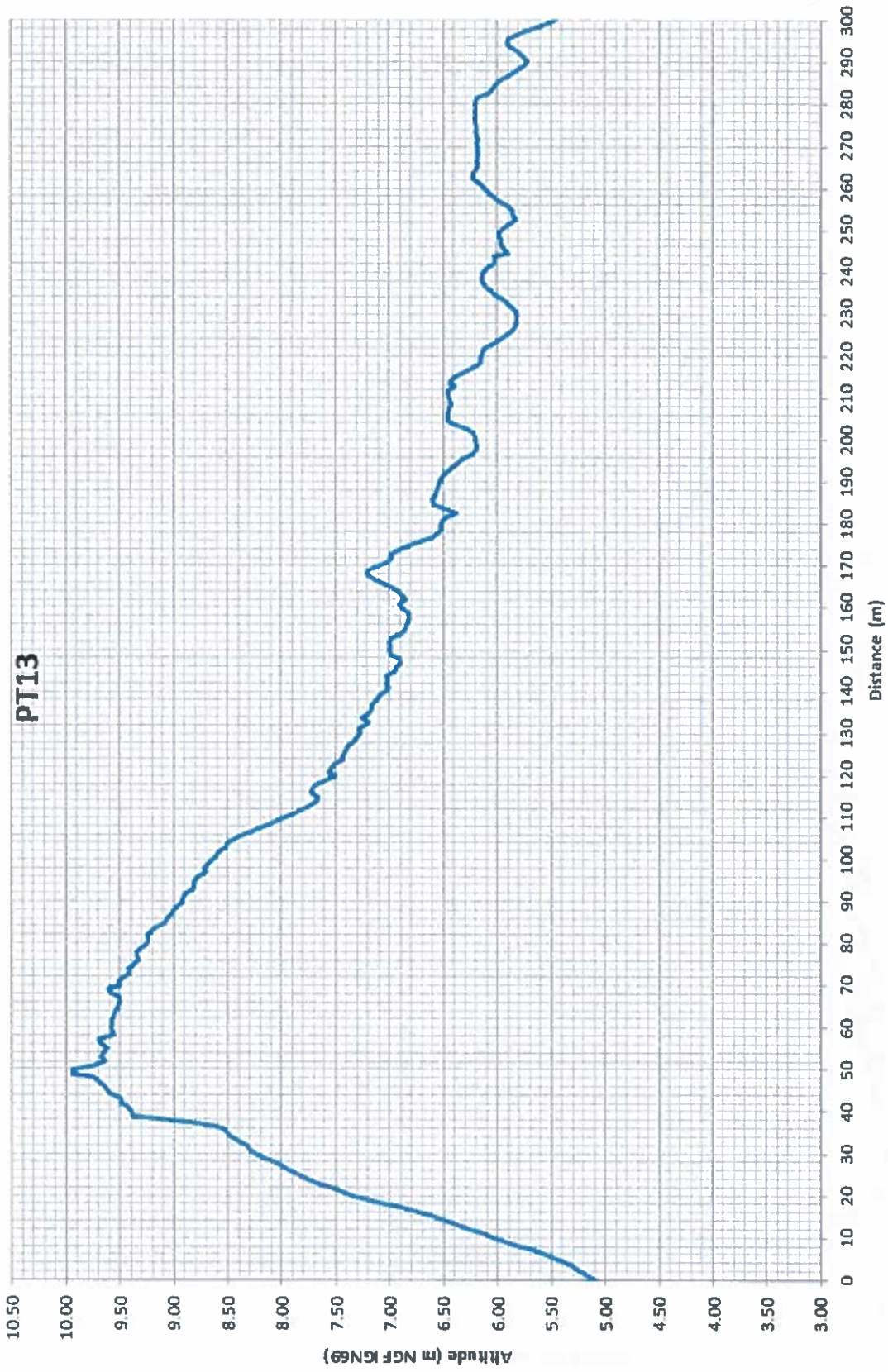


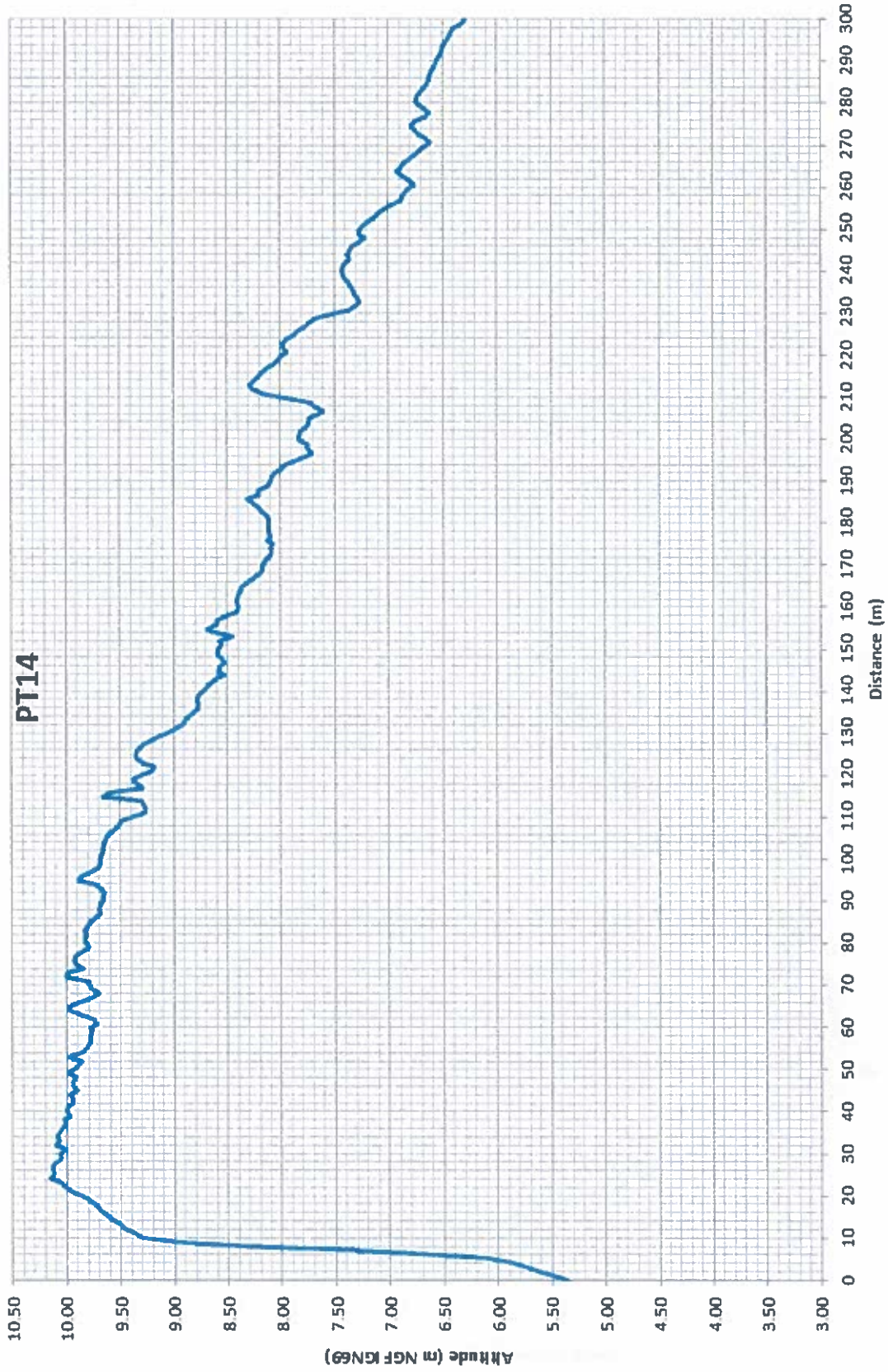


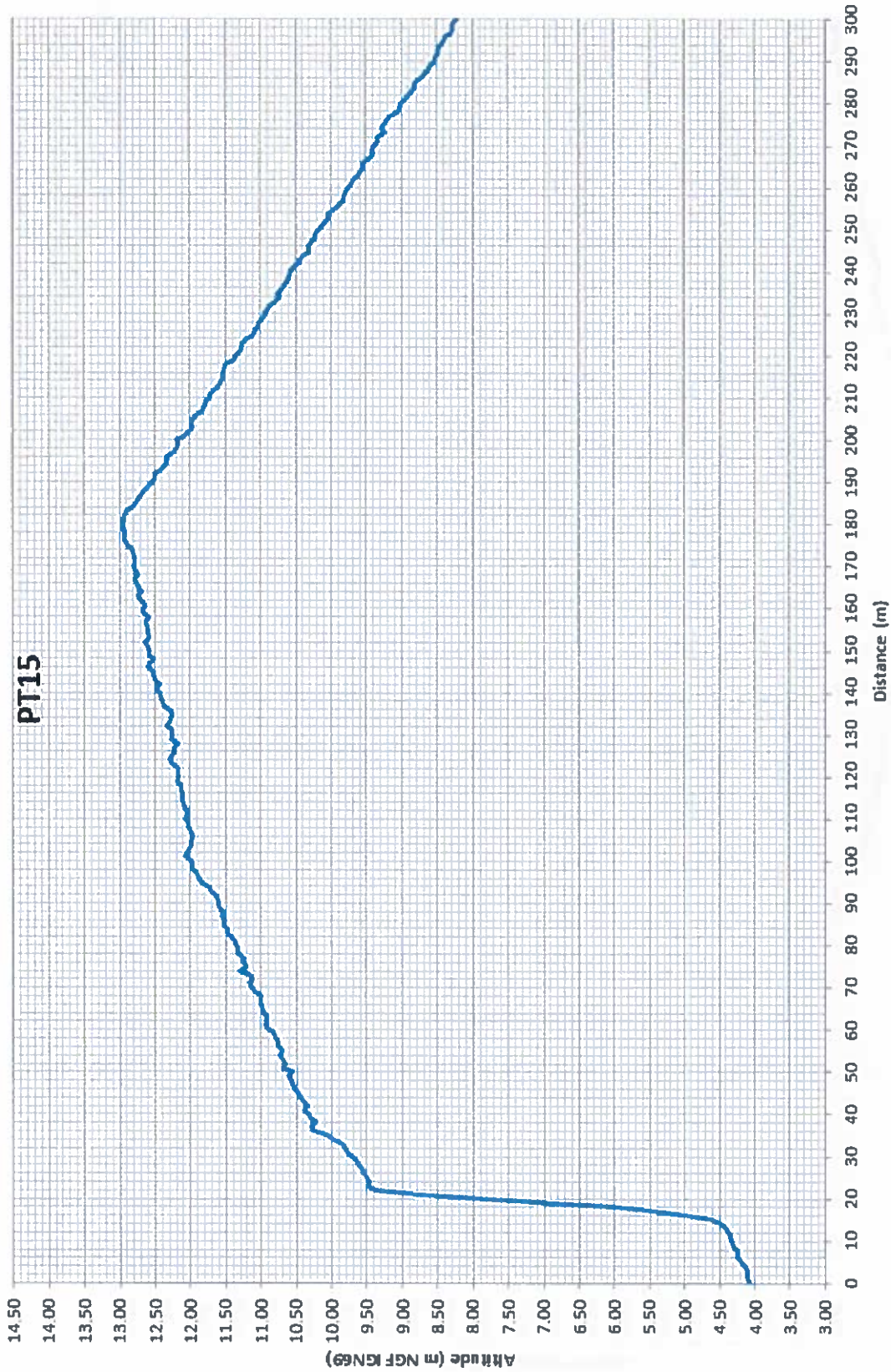


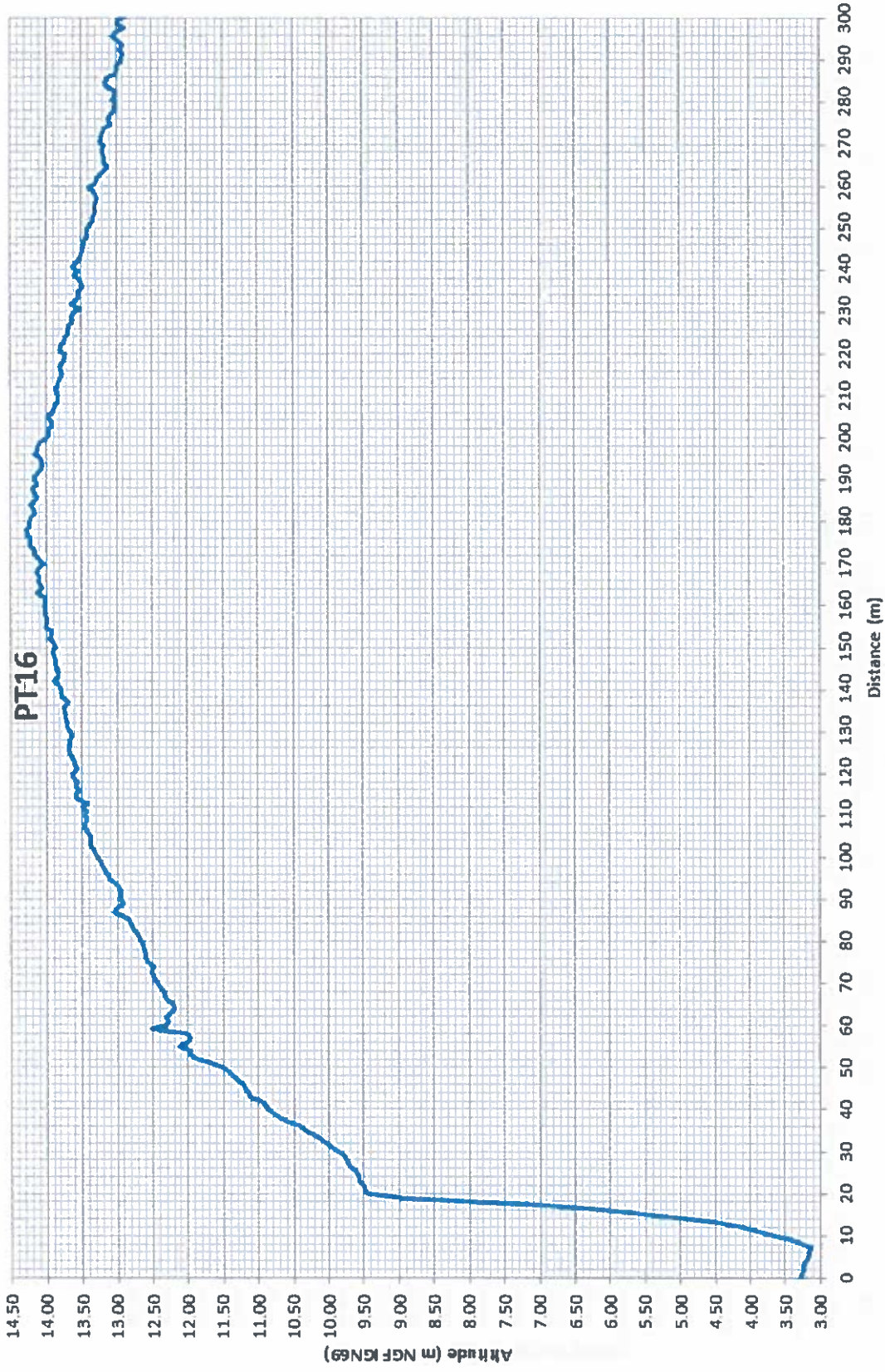






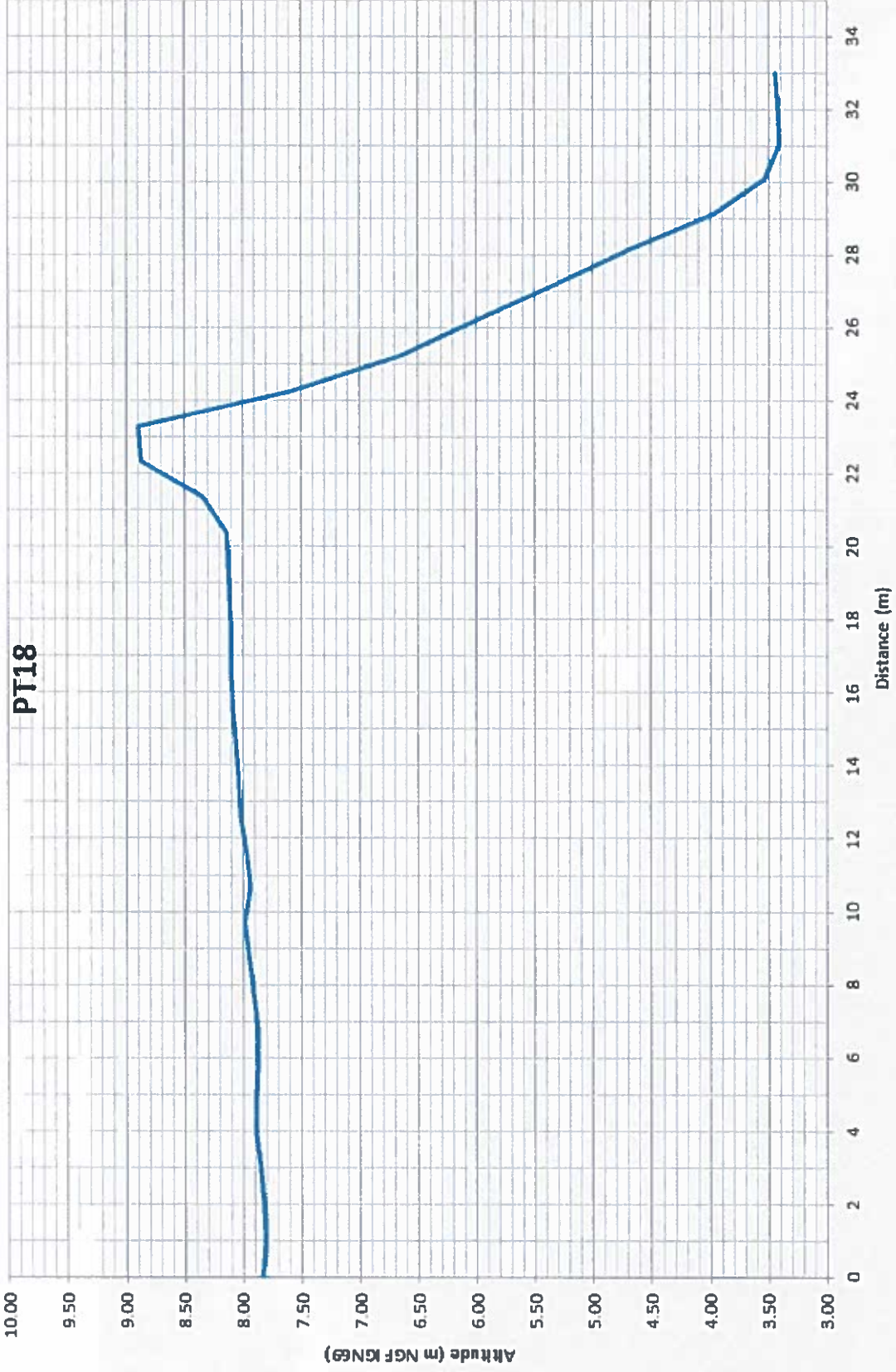




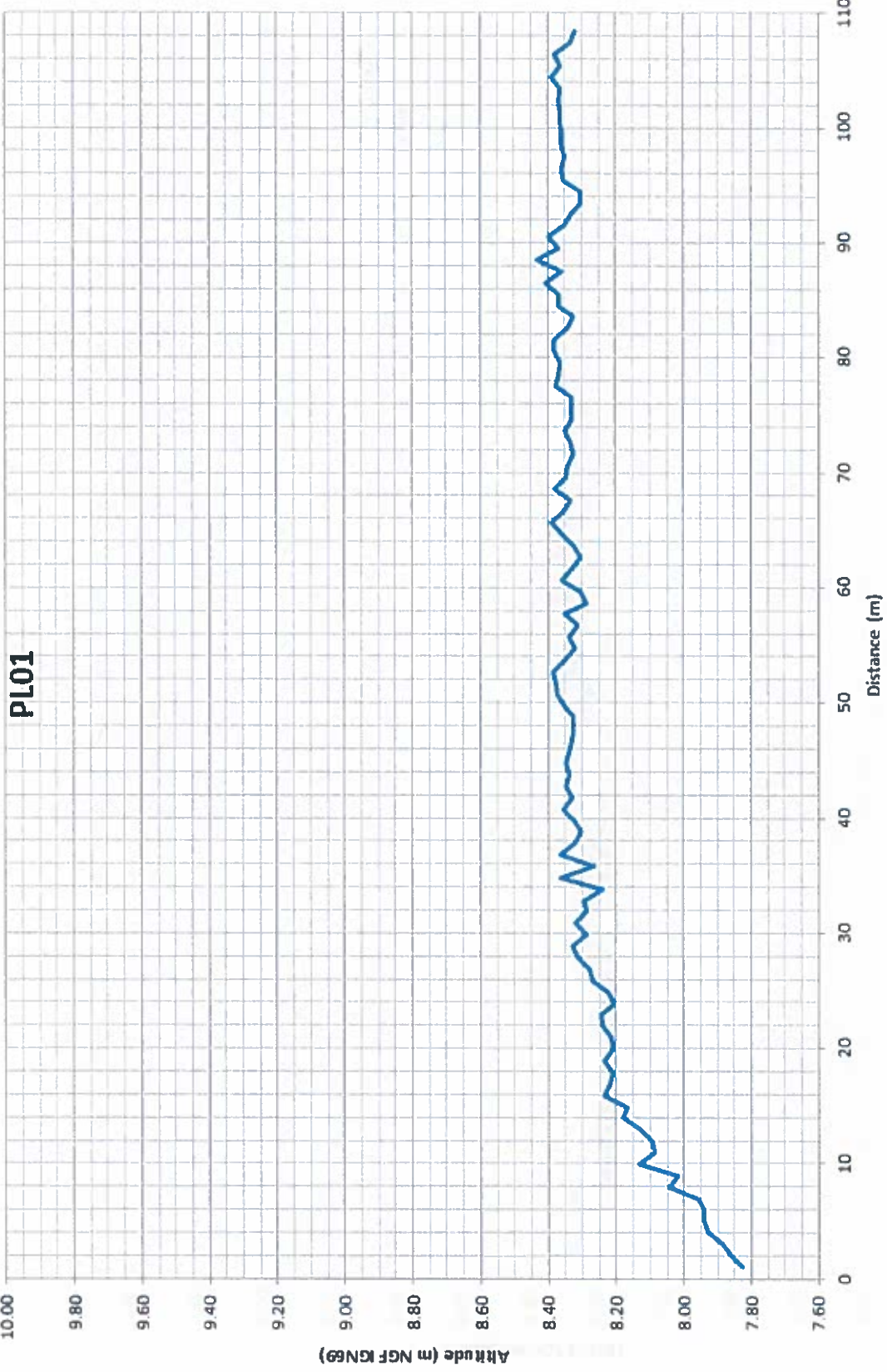


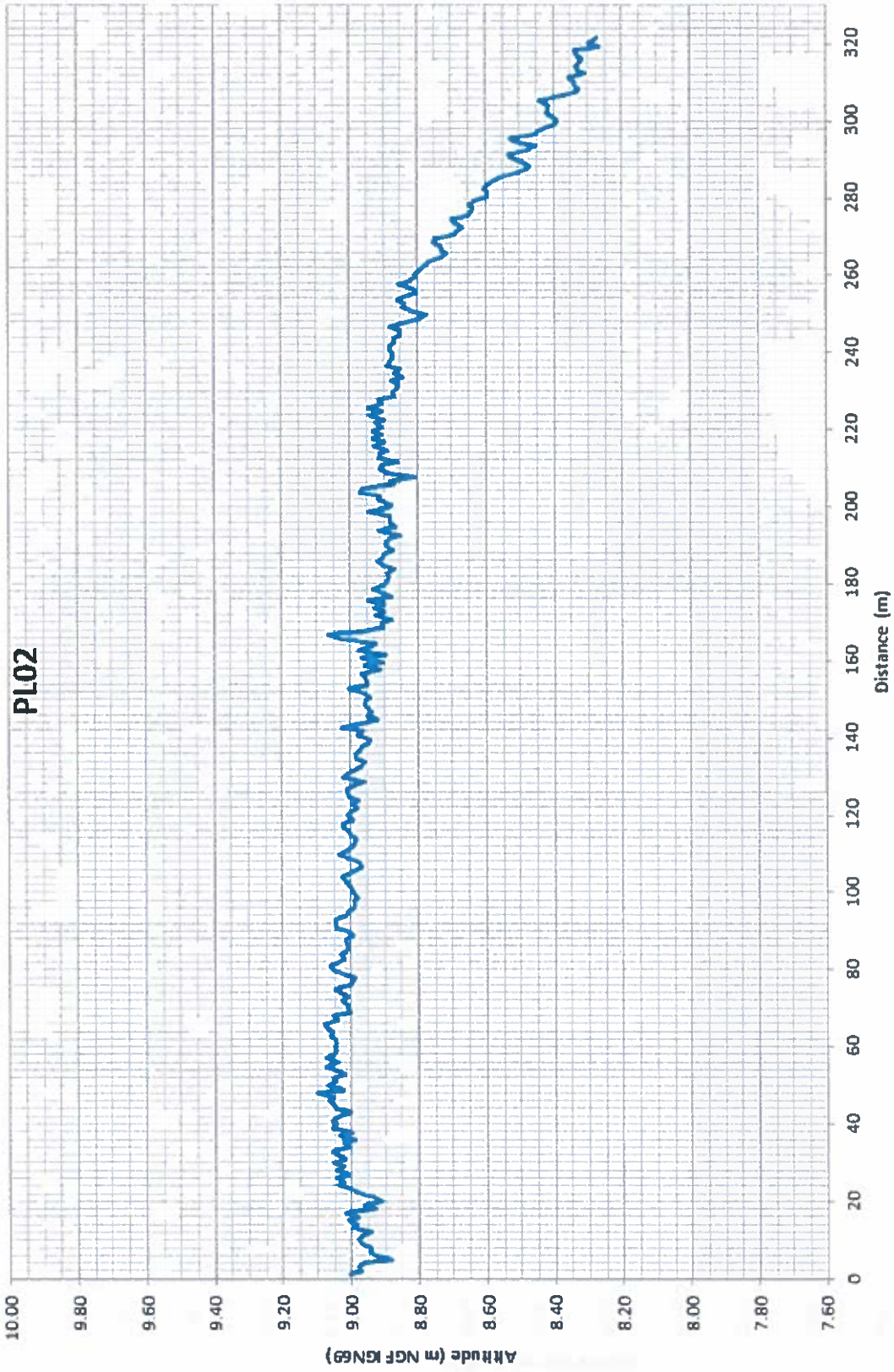


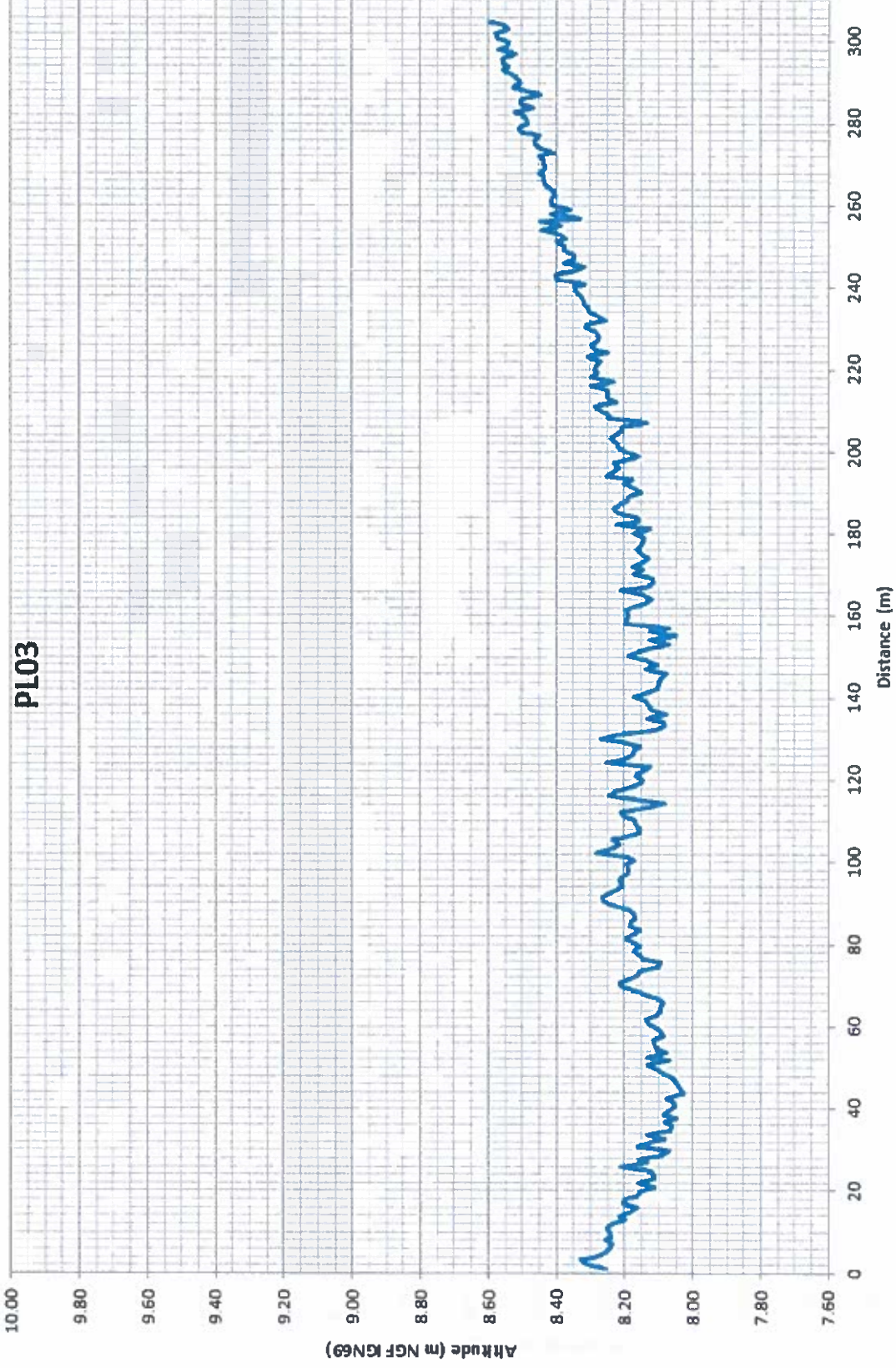


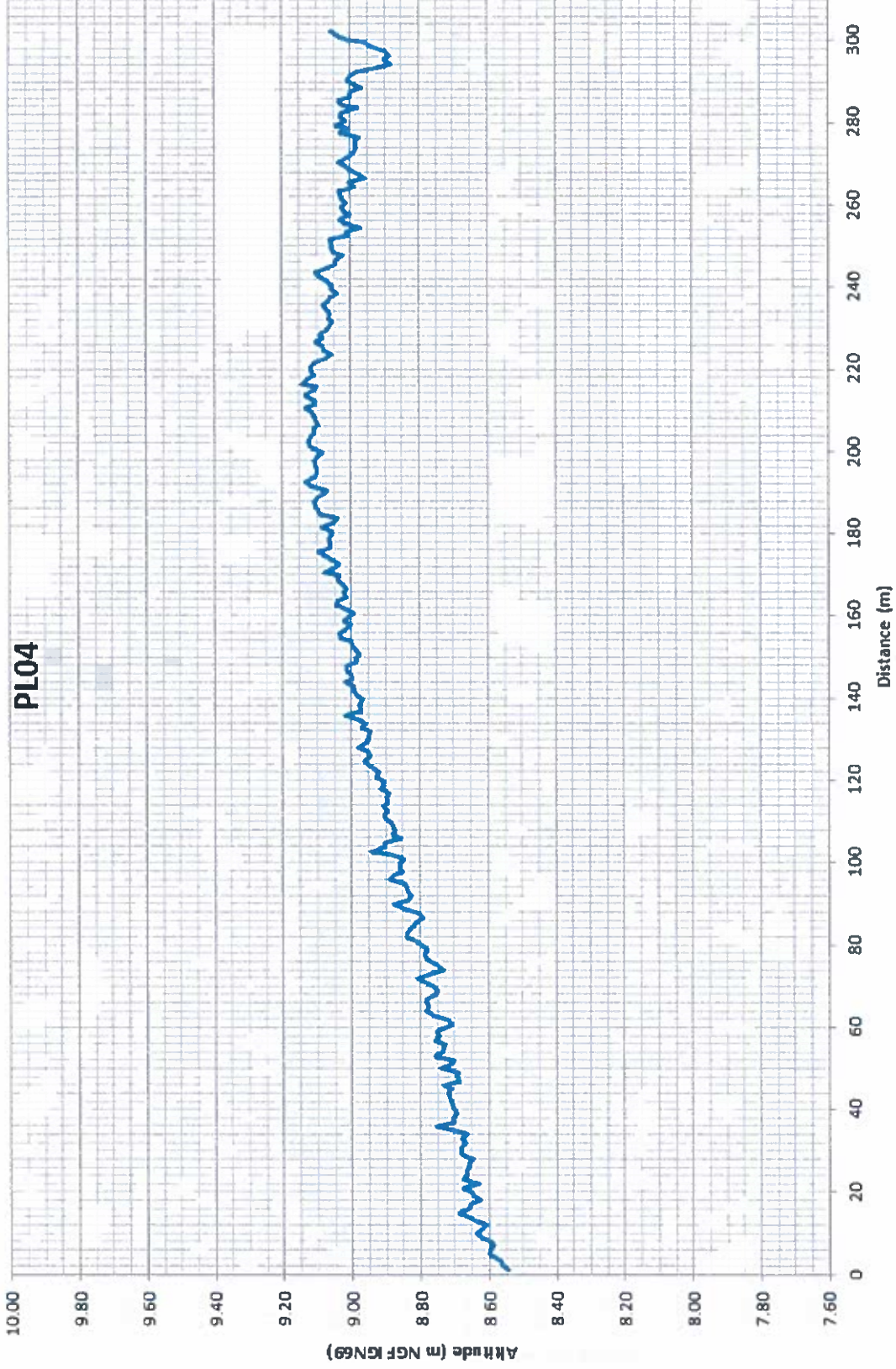


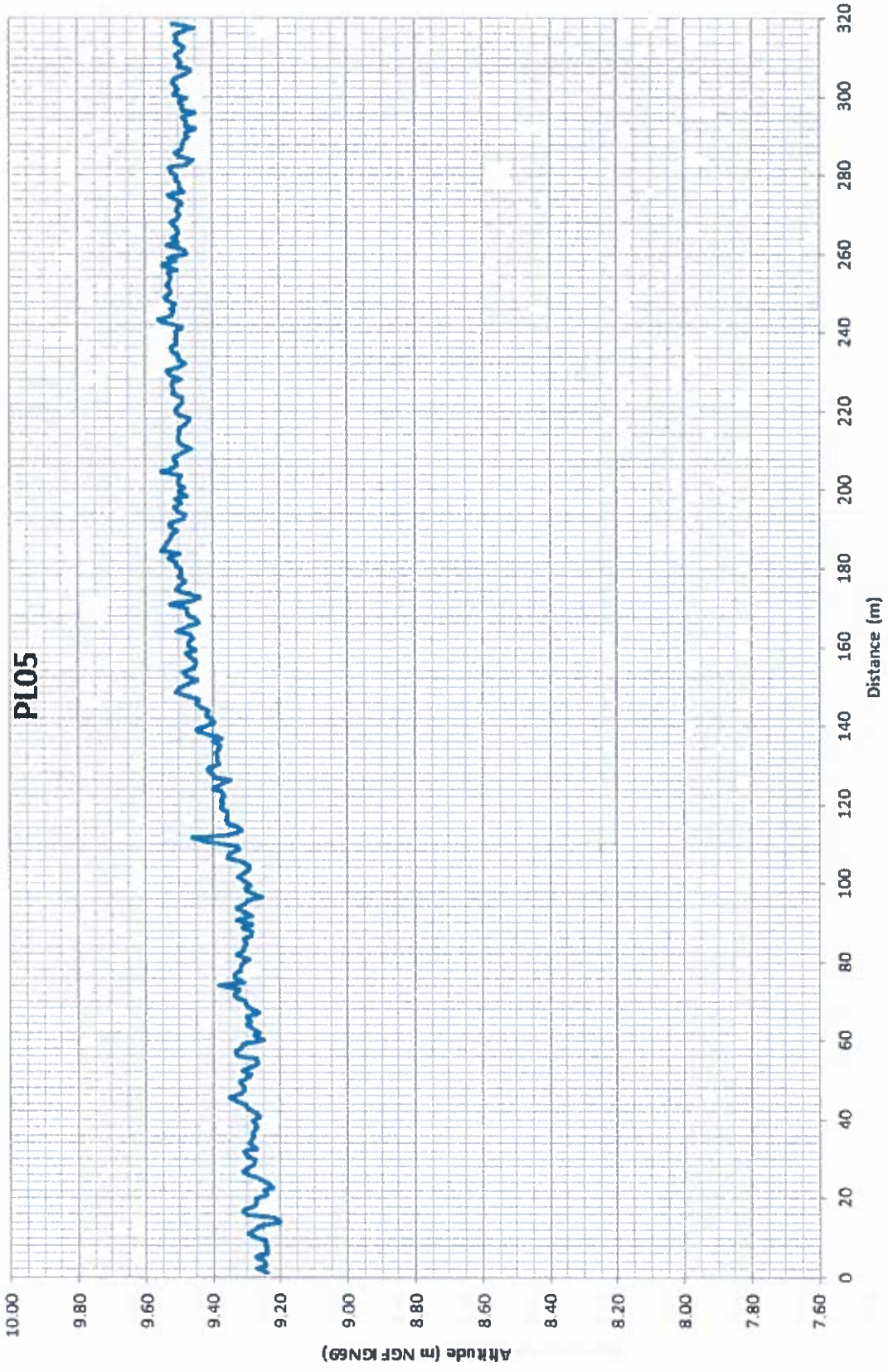


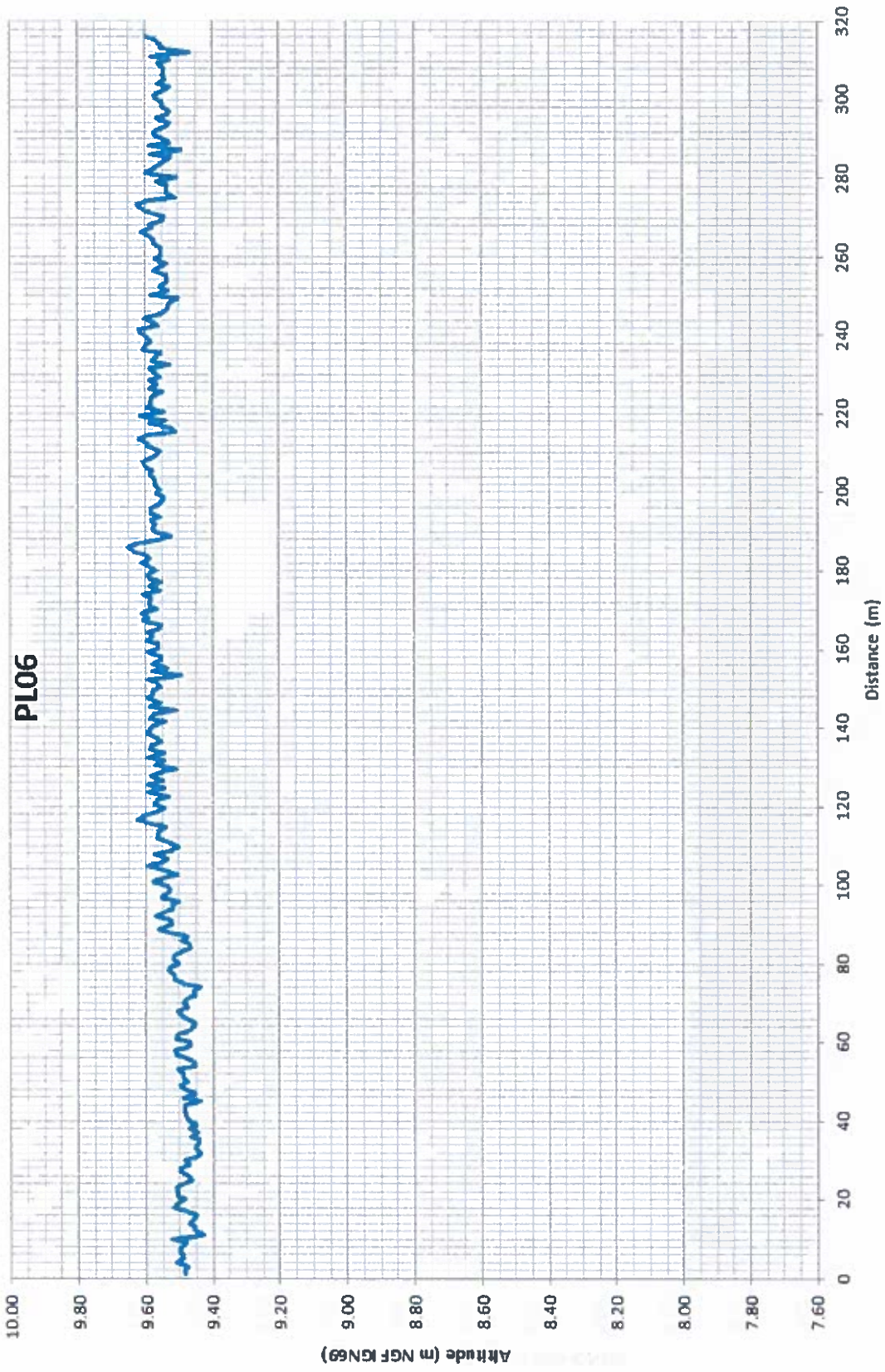


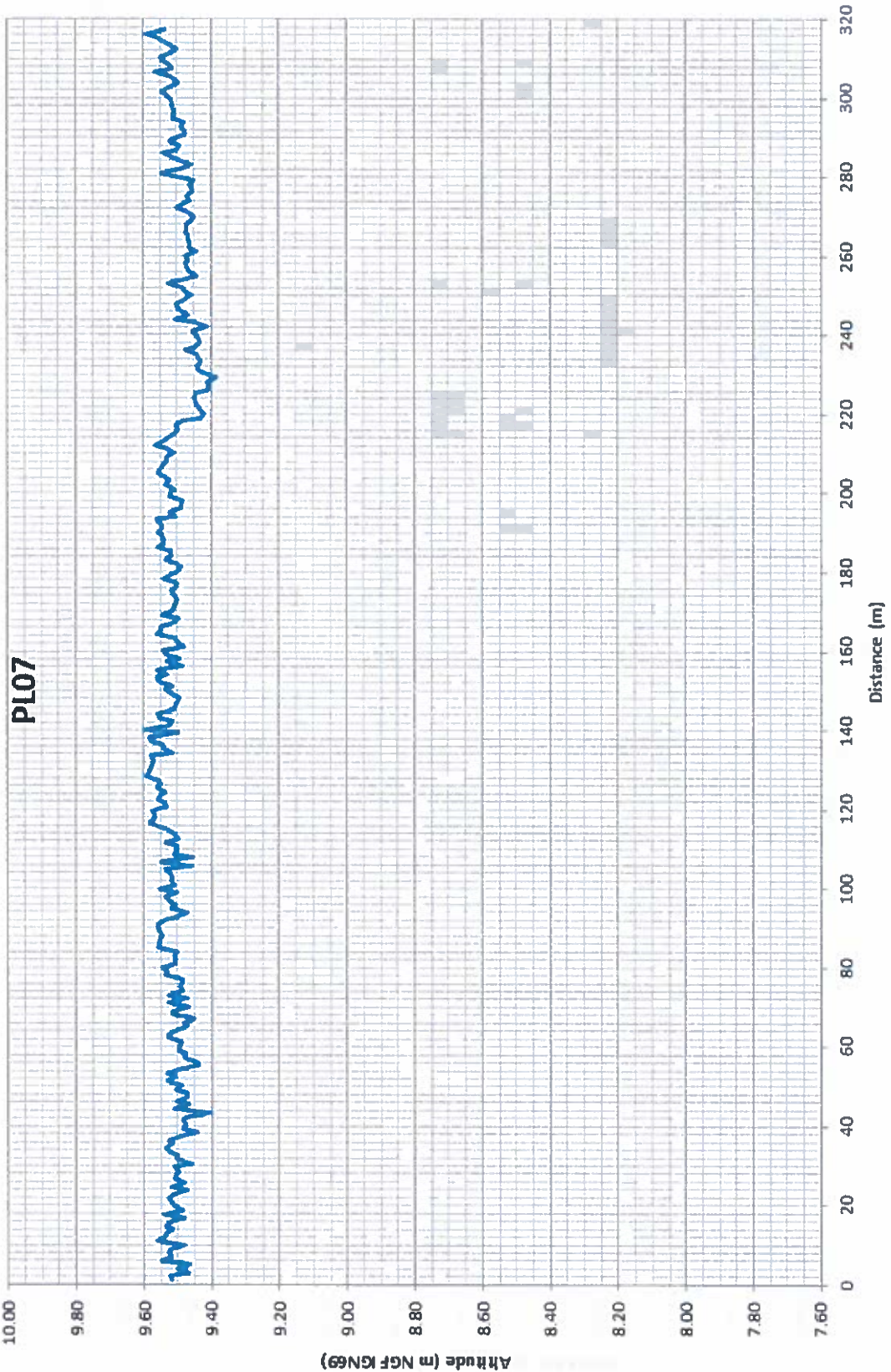


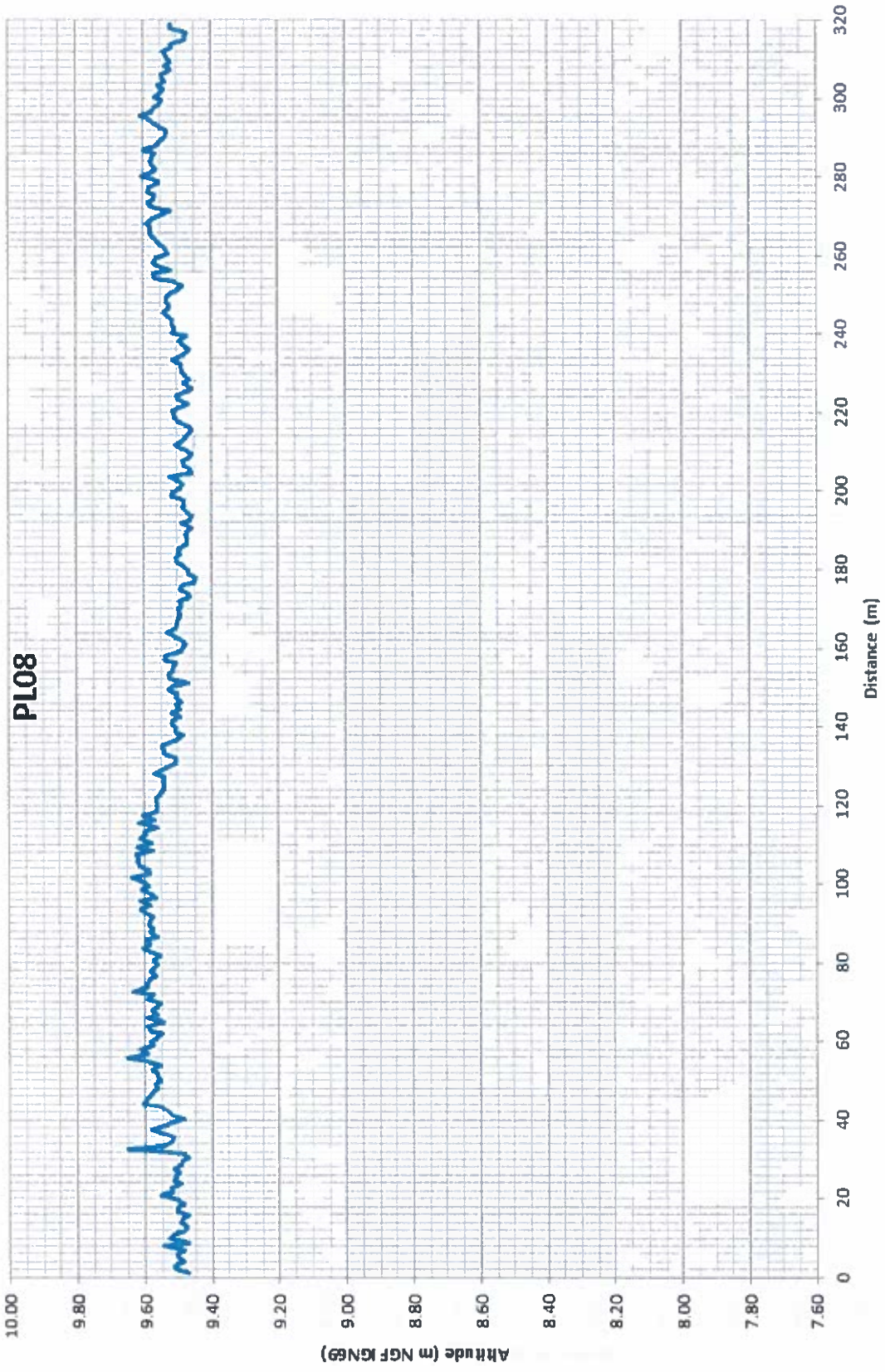


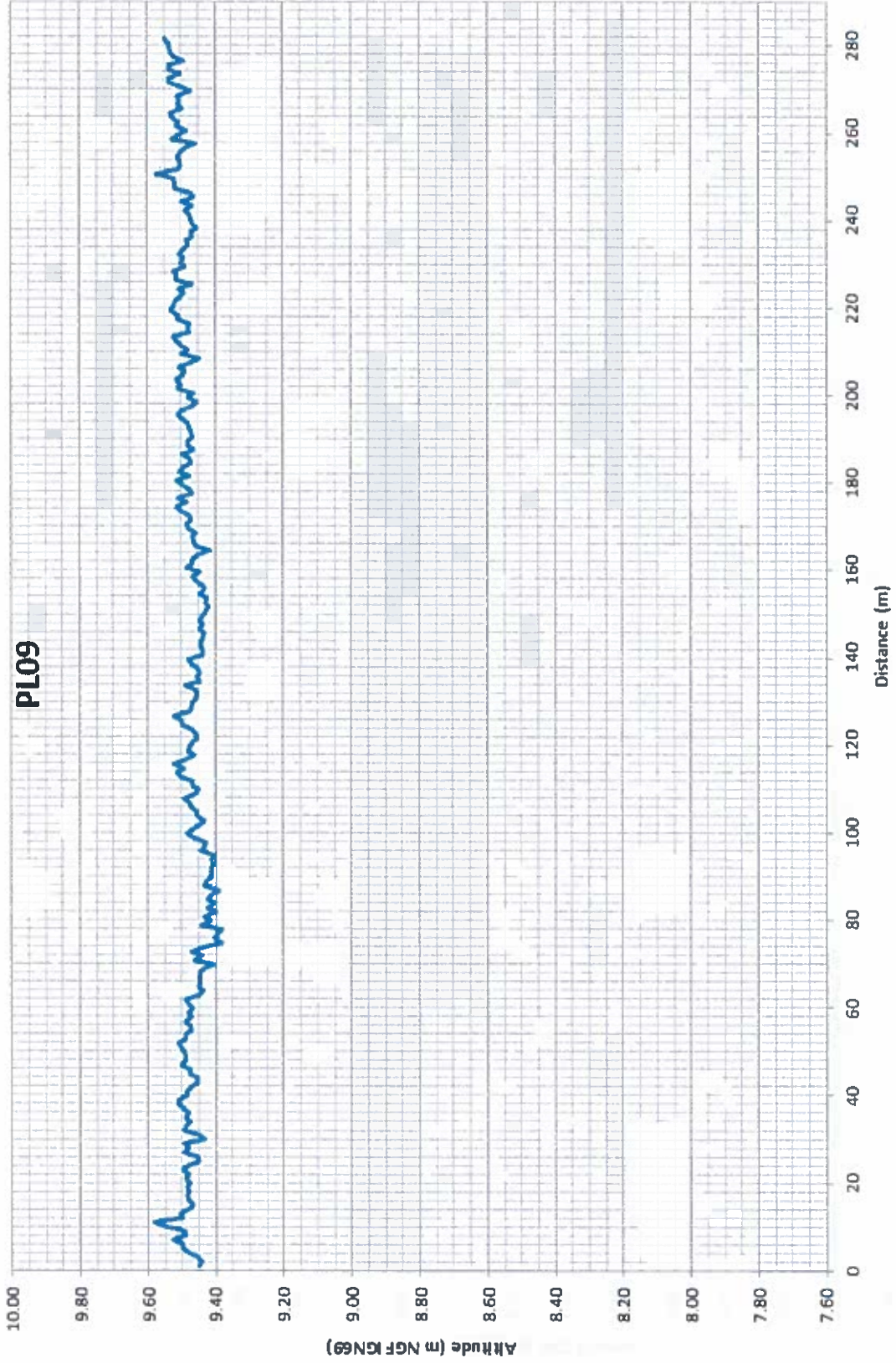


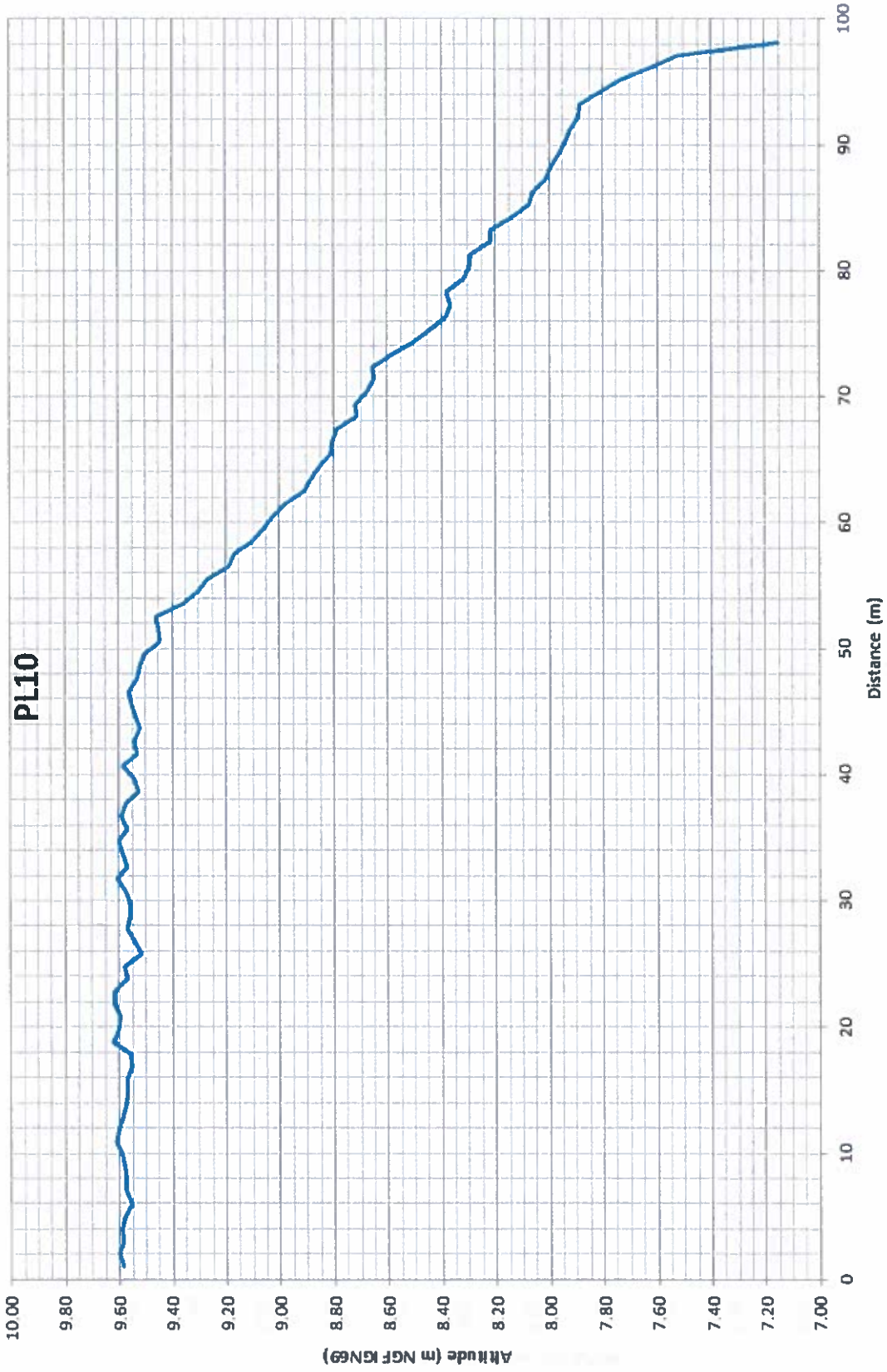


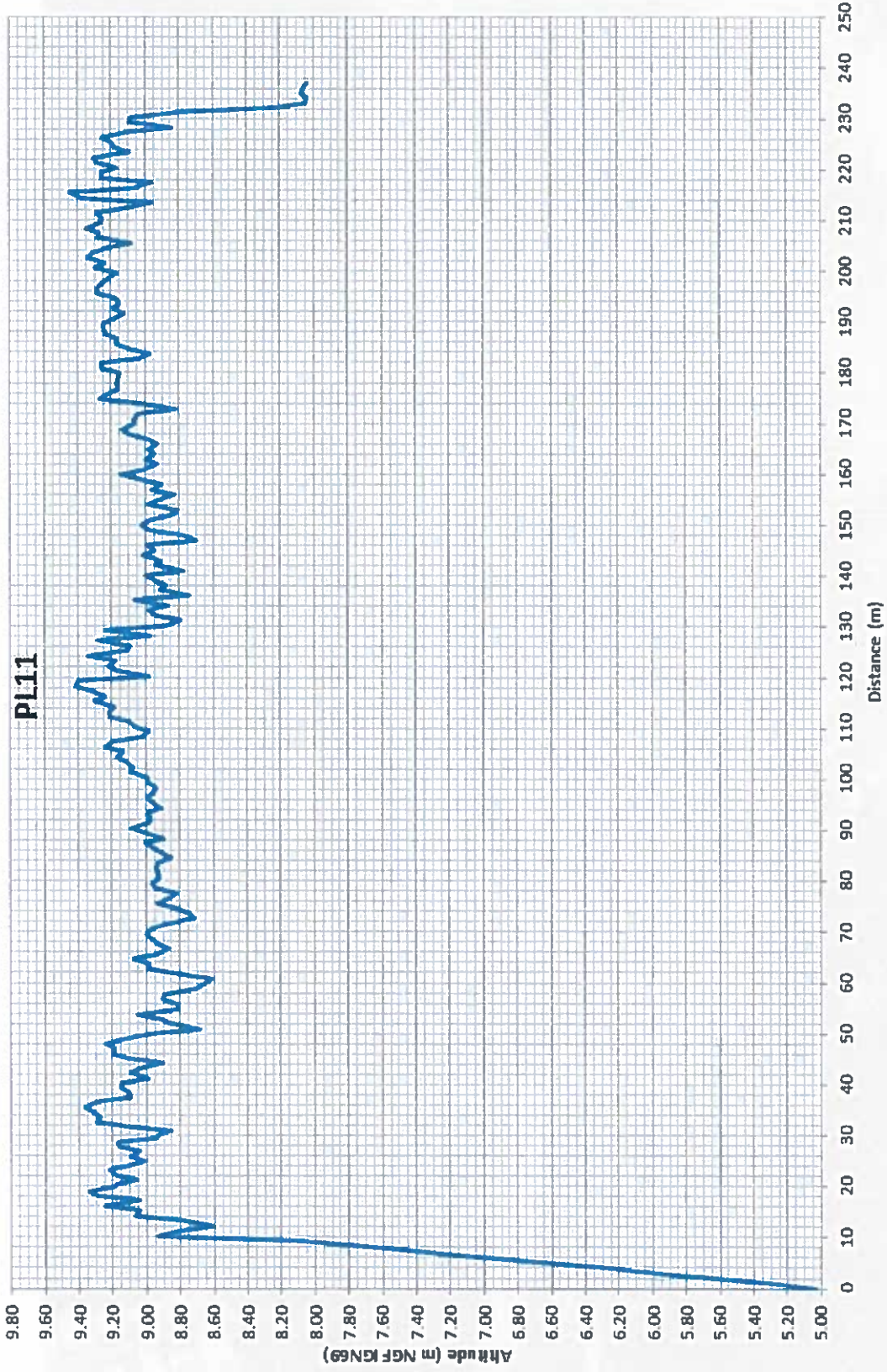












ANNEXE B

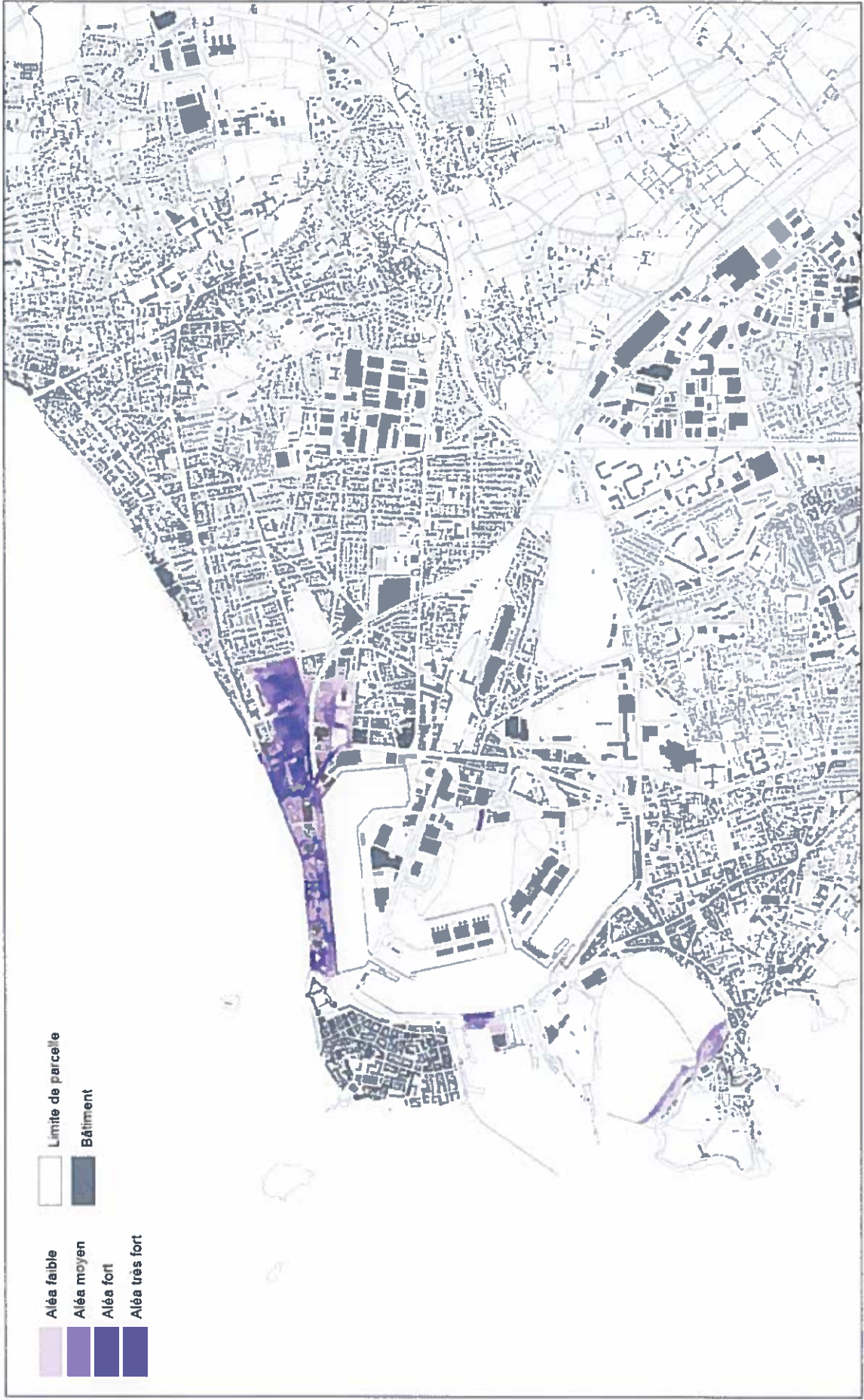
Carte informative





11

Plan de Prévention des Risques Littoraux de Saint-Malo
Aléas pour l'évènement actuel (débordements + franchissements)





ANNEXE C

Analyse du remplissage des bassins portuaires : scénario franchissement et débordement



Niveaux dans les bassins de Saint-Malo - événement de référence actuel

