



DEPARTEMENT DES COTES D'ARMOR



Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 - ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

ARTELIA

6 rue de Lorraine

38130 - Echirolles

Tel. : +33 (0) 4 76 33 40 00

Fax : +33 (0) 4 76 33 43 33

DATE : SEPTEMBRE 2020 REF : 8 71 6177

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

SOMMAIRE

OBJET DE L'ETUDE	1
DEFINITIONS, ABREVIATIONS ET NOTATIONS	2
1. METHODOLOGIE	4
2. ANALYSE DES CONDITIONS METEO-OCEANIQUES	5
2.1. ETATS DE MER	5
2.1.1. ORIGINE DES DONNEES	5
2.1.2. CHOIX DES POINTS D'ANALYSE	5
2.1.3. CLIMAT D'ETATS DE MER	6
2.1.3.1. Etats de mer du large	6
2.1.3.2. Etats de mer côtiers	8
2.2. VENT	9
2.2.1. ORIGINE DES DONNEES	9
2.2.2. CLIMATS DE VENT	9
2.3. NIVEAU MARIN	9
2.3.1. PREAMBULE : COMPOSANTES DU NIVEAU MARIN	9
2.3.2. NIVEAUX CARACTERISTIQUES	10
2.3.2.1. Niveau moyen	10
2.3.2.2. Marée astronomique	11
2.3.3. MAREGRAPHE DE ST-MALO	11
2.4. IDENTIFICATION DES EVENEMENTS DE TEMPETE	12
2.4.1. PRINCIPES	12
2.4.2. DEROULEMENT DE L'ANALYSE	12
2.4.2.1. Échantillonnage	12
2.4.2.2. Dépendance	14
2.4.2.3. Distributions marginales	15
2.4.2.4. Distribution bivariée houle / niveau	17
2.4.3. INTERPRETATION : PERIODE DE RETOUR CONJOINTE	17
3. MODELISATION DES TEMPETES RETENUES DANS LA ZONE COTIERE (SWAN)	19
3.1. PRESENTATION DU CODE DE CALCUL	19
3.2. DEFINITION ET EMPRISE DES DOMAINES DE CALCUL	19
3.3. BATHYMETRIE	20
3.4. PARAMETRISATION	21
3.5. CAS DE CALCUL ET FORÇAGES	22
3.5.1. FORÇAGES	23

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

3.5.1.1. Forçage en houle	23
3.5.1.2. Forçage en vents	23
3.5.1.3. Forçage en niveaux	24
3.6. SORTIES DU MODELE	24
4. PROPAGATION SUR L'ESTRAN JUSQU'AU PIED D'OUVRAGE (HOCOULI)	27
4.1. PRESENTATION DU CODE DE CALCUL	27
4.2. RÉSULTATS	27
5. CONCLUSIONS	31
REFERENCES	32
ANNEXE A CLIMAT DES ETATS DE MER AUX POINTS D'ANALYSE	33
ANNEXE B ANALYSE DES COMBINAISONS HOULE-NIVEAU	34
ANNEXE C ÉPURES DE PROPAGATION COTIERE	35

FIGURES

Figure 1. Localisation du littoral d'étude	1
Figure 2. Localisation des points d'analyse HOMERE pour la zone d'étude	6
Figure 3. Rose de houle et courbe de dépassement au large	7
Figure 4. Rose de houle et courbe de dépassement au point HOMERE 55103.	8
Figure 5. Rose de vents au large au point HOMERE 55103.	9
Figure 6. Niveau marin et phénomènes physiques associés	10
Figure 7. Élévation du niveau moyen de la mer au XXI ^{ème} siècle par rapport à la fin du XX ^{ème} siècle pour les trois scénarios définis par l'ONERC (2010)	11
Figure 8. Identification des tempêtes par la fonction de réponse	13
Figure 9. Echantillon des évènements Hm0 / niveau retenus (en rouge), extraits de l'ensemble de la série temporelle (en gris)	14
Figure 10. Chi-plot niveau marin / Hm0	15
Figure 11. Extrapolation du niveau marin extrême à St-Malo	16
Figure 12. Extrapolation du Hm0 extrême au large	16
Figure 13. Sélection des tempêtes pour la modélisation (propagation à pied d'ouvrage). Analyse basée sur le point du large HOMERE 66282	17
Figure 14. Sélection des tempêtes pour la modélisation (propagation à pied d'ouvrage). Analyse basée sur le point à la côte HOMERE 55103	18
Figure 15. Domaines de calcul pour la propagation des états de mer du large vers le site d'étude. Modèle du large en rouge, modèle intermédiaire en vert et les deux modèles côtiers en bleu clair et foncé	20
Figure 16. Bathymétrie aux abords de la zone d'étude	21

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

Figure 17. Localisation des points de sortie du rejeu HOMERE (en bleu) dans la baie de Saint Brioux. Les points en rouge sont ceux retenus pour le forçage des niveaux et des vents, en jaune pour le forçage en houle.	24
Figure 18. Profils de plage retenus pour la propagation 1D sur l'estran	25
Figure 19. Exemple d'épure de houle sur l'emprise de la grille intermédiaire englobant les deux sites d'études le 10 mars 2008 à 19h UTC	26
Figure 20. Exemple de calcul de propagation le long du profil d'estran P12	28

OBJET DE L'ETUDE



Figure 1. Localisation du littoral d'étude

oOo

DEFINITIONS, ABBREVIATIONS ET NOTATIONS

Description des phénomènes météo-océaniques

Les définitions suivantes sont adoptées dans la présente étude :

- niveau marin :
 - Z_0 (m ZH) : niveau moyen,
 - Z_T (m ZH) : niveau de marée astronomique, incluant le niveau moyen Z_0 ,
 - S (m) : fluctuation du niveau moyen induit par les phénomènes atmosphériques (surcotes / décotes),
- état de mer :
 - H_{m0} ou H_s (m) : hauteur (de crête à creux) significative spectrale des vagues, défini par $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$, où m_0 est le moment d'ordre 0 de la densité spectro-angulaire,
 - T_p (s) : période de pic, définie comme l'inverse de la fréquence la plus énergétique du spectre de l'état de mer après sommation directionnelle,
 - θ_p ou Dir_p (°N) : direction de pic, définie comme la direction la plus énergétique de la bande de fréquence correspondant à T_p ,
 - σ (°) : étalement directionnel par rapport à la direction de pic,
 - γ (-) : facteur d'élanement du pic du spectre fréquentiel, calculé sous l'hypothèse d'un spectre de type JONSWAP,
- vent :
 - V_v (m/s) : vitesse du vent à 10 m, moyennée sur 10 minutes,
 - Dir_v (°N) : direction du vent associée à V_v .

En conformité avec les conventions nautiques, les directions se comprennent comme suit :

- direction **de provenance** des vagues ;
- direction **de provenance** du vent.

Système de coordonnées

Le système de coordonnées utilisé est le système **Lambert 93 Zone II**. Sauf indication contraire, toutes les cartes et les plans du présent rapport sont orientés verticalement suivant l'axe nord-sud.

Le référentiel altimétrique utilisé est le **Zéro IGN69**.

Les Références Altimétriques (RAM) 2019 du Shom (Réf. [1]) fournissent les relations suivantes entre le zéro de référence terrestre (IGN69) et les zéros de référence maritimes à Erquy et à Saint-Malo :

$$\begin{aligned} \text{Erquy : } 0 \text{ m ZH} &= -5,829 \text{ m IGN69} \\ \text{Saint-Malo : } 0 \text{ m ZH} &= -6,289 \text{ m IGN69} \end{aligned} \quad (1)$$

Définitions statistiques

Les **quantiles** sont les valeurs qui divisent un jeu de données ordonnées (i.e. triées) en intervalles consécutifs contenant le même nombre de données. On parle notamment de **centiles**, respectivement de **déciles** et de **quartiles**, lorsque l'échantillon est divisé en cent intervalles, respectivement dix et quatre. Ainsi le cinquantième centile (ou le cinquième décile, ou le deuxième quartile) correspondant à la médiane de l'échantillon. Les premiers et derniers quantiles sont les valeurs minimale et maximale de l'échantillon.

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

Un **nuage de points** (ou **scatterplot**) est une représentation graphique permettant de montrer les valeurs simultanées de deux variables issues d'une base de données. Les couples de données sont affichés sous forme de collection de points, la valeur du premier paramètre déterminant la position sur l'axe horizontal, la valeur du second celle sur l'axe vertical.

Un **diagramme quantile-quantile** (ou **Q-Q plot**) est une méthode graphique pour comparer les distributions statistiques de deux paramètres en affichant pour chaque quantile leur valeur respective.

Tableau 1 – Notations relatives aux paramètres statistiques d'un échantillon

Notation	Définition
Bias	Différence moyenne entre les deux séries
RMS	<i>Root Mean Square</i> : différence quadratique entre les deux séries
BI	Biais adimensionnel : biais / valeur moyenne
SI	<i>Scatter Index</i> : RMS / valeur moyenne
R	Coefficient de corrélation

La **période de retour**, ou temps de retour, est une **probabilité annuelle de dépassement** : ainsi un niveau marin de période de retour 100 ans est la valeur de niveau qui, chaque année, a une probabilité d'être dépassée de 1 %. Une erreur commune est de penser qu'il n'advient que tous les cent ans : cela serait vrai sur une très longue période dans un cadre stationnaire, mais une telle valeur peut être dépassée plusieurs fois sur une période donnée (et même dans une même année).

oOo

1. METHODOLOGIE

Les principales étapes de la méthodologie mise en œuvre pour propager les états de mer du large jusqu'au pied des ouvrages sont les suivantes :

- détermination des points d'analyse météo-océanique au droit du site d'étude :
 - niveau marin : marégraphe de St-Malo,
 - états de mer : points d'analyse issues de la base de données HOMERE (cf. [Figure 2](#)) :
 - point 66282 pour les conditions du large,
 - point 55103 pour les conditions proches du littoral d'étude,
- analyse des conditions météo-océaniques :
 - climat de houle au large et à la côte,
 - analyse bivariée des combinaisons houle / niveau,
- identification des évènements (tempêtes) susceptibles de générer des franchissements sur le littoral d'étude,
- modélisation des tempêtes sur le domaine côtier de la zone d'étude :
 - construction du modèle SWAN (emprise, bathymétrie),
 - extraction et traitement des forçages (houle, niveau, vent),
 - paramétrisation,
 - simulation des tempêtes jusqu'en bas de plage,
- modélisation de la propagation littorale sur l'estran jusqu'au pied d'ouvrage :
 - définition et extraction des profils de plage sur une vingtaine de points d'étude,
 - extraction des résultats depuis le modèle SWAN et simulation HOCOULI sur l'estran,
- extraction et traitement des résultats à pied d'ouvrage : hauteur de houle.

2. ANALYSE DES CONDITIONS METEO-OCEANIQUES

2.1. ETATS DE MER

2.1.1. Origine des données

Les états de mer sont issus de la base de données HOMERE de l'Ifremer. HOMERE est une base de données de rejeu d'états de mer, réalisée à l'aide du modèle WAVEWATCH III (version 4.11) sur une grille déstructurée couvrant la zone Manche - Golfe de Gascogne et portant sur la période 1994 – 2016 (23 années).

Le jeu de données disponibles rassemble 37 paramètres globaux et les spectres fréquentiels sur une grille très haute résolution (~110 000 points) ainsi que les spectres directionnels sur une grille haute résolution (4096 points), avec un pas de temps horaire.

2.1.2. Choix des points d'analyse

Le choix des points d'analyse dépend directement de l'emprise du modèle de propagation côtière présenté en section 3 et particulièrement 3.2.

Le littoral d'Erquy est partiellement abrité des houles atlantiques par les côtes du Trégor et du Goëlo. Il est tentant de limiter le modèle de propagation au littoral de la Penthièvre, approximativement entre St-Brieuc et le Cap Fréhel. Cependant, la bathymétrie très complexe et les très faibles profondeurs de la côte de Goëlo, notamment autour de l'île de Bréhat, nécessitent une bonne modélisation de ces zones peu profondes. Or, la base de données HOMERE n'est pas validée pour les faibles profondeurs et son maillage est trop lâche pour une représentation satisfaisante. En outre, le forçage en niveau marin demande une attention particulière.

Pour ces raisons, l'emprise du modèle de propagation englobe toute la baie de St-Brieuc jusqu'à l'embouchure du Jaudy environ en limite ouest. On sélectionne ainsi un point d'analyse dit du large en limite de cette emprise, en tant que point d'analyse principal, servant à définir les conditions en limite du modèle de propagation et notamment les tempêtes retenues. Néanmoins, du fait des effets complexes de réfraction, on retient également un point d'analyse plus à la côte de façon à croiser les deux analyses et valider les choix réalisés sur l'analyse du large.

Les deux points HOMERE choisis pour différencier les phénomènes du large de celles de la zone côtière au droit de la zone d'étude sont les suivants :

- le point 66282 (-2.933°W, 48.972°N) est situé au frontière du modèle du large. Il est suffisamment éloigné de la baie de Saint-Brieuc et des effets de réfraction dus à la bathymétrie complexe de la zone ;
- le point 55103 (-2.545°W, 48.659°N) est situé à 6 km au droit du site d'études et permet de mieux rendre compte de la transformation de la houle et notamment des événements extrêmes aux abords d'Erquy/Pléneuf-Val-André.

La **Figure 2** ci-dessous situe les deux points choisis pour l'étude des climats de vagues et de vent.

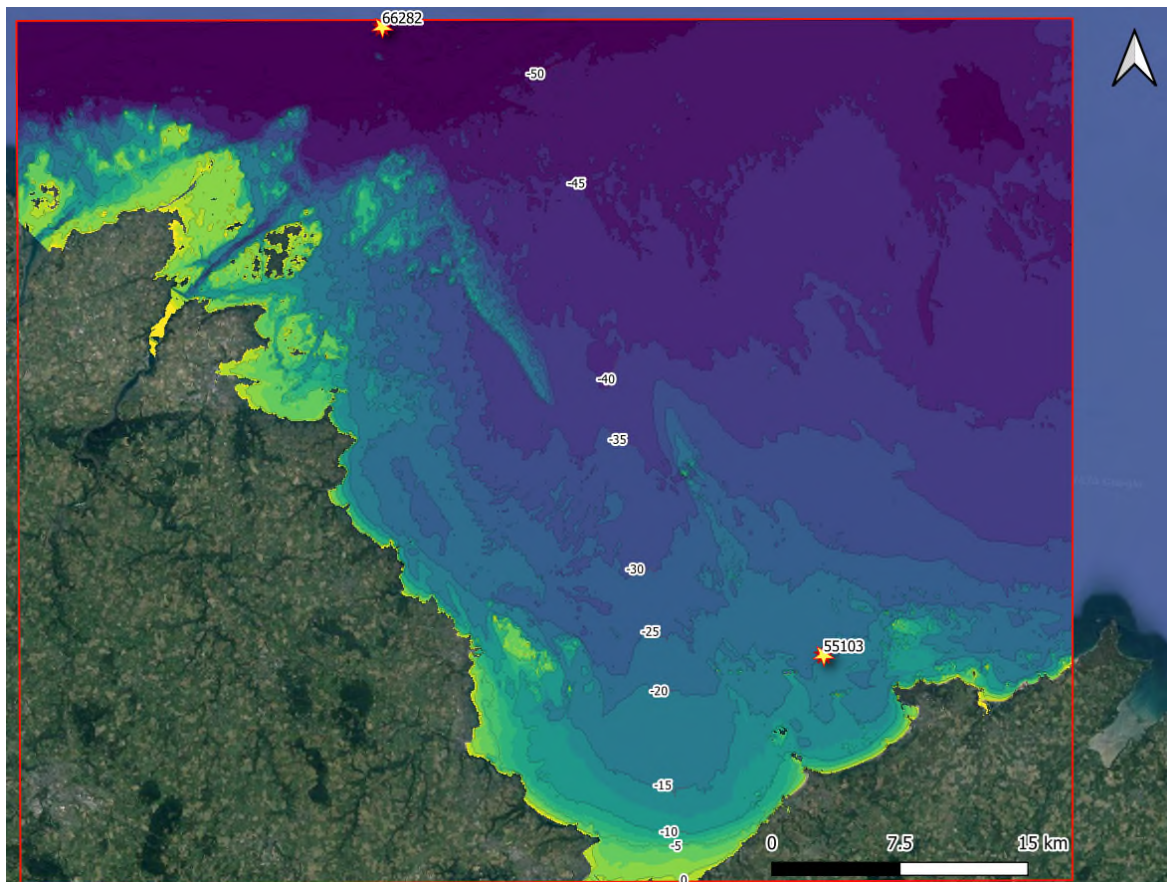


Figure 2. Localisation des points d'analyse HOMERE pour la zone d'étude

2.1.3. Climat d'états de mer

2.1.3.1. Etats de mer du large

Dans cette section, l'analyse du vent et des états de mer dits « du large » s'entend comme l'analyse au point HOMERE au large de la zone d'étude (point 66282 sur la **Figure 2**), où l'on examine les résultats issus directement de la base de données HOMERE.

Le climat de houle au point HOMERE 66282 est illustré dans l'Annexe A, sous la forme des figures suivantes :

- nuage de points H_{m0}/θ_p , H_{m0}/T_p et T_p/θ_p ;
- rose de H_{m0} et T_p par classes directionnelles ;
- courbe de dépassement en H_{m0} et T_p ;
- corrélogrammes H_{m0}/θ_p et T_p/θ_p des fréquences d'apparition.

La rose de houle en H_{m0} ainsi que la courbe de dépassement en H_{m0} sont également fournis en **Figure 3**.

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

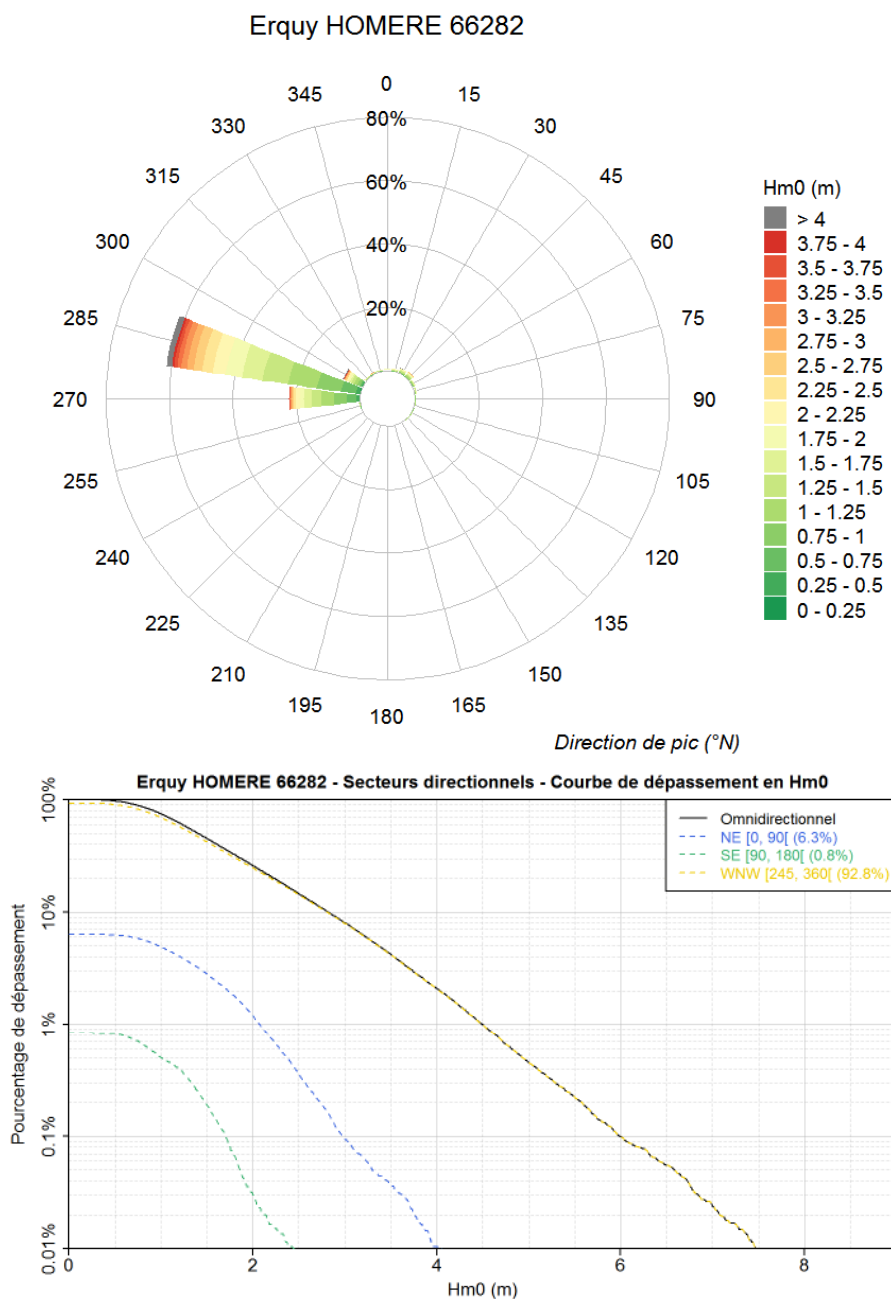


Figure 3. Rose de houle et courbe de dépassement au large

On constate qu'il existe un secteur prédominant :

- le secteur **Ouest-Nord-Ouest [245°N, 360°N]**, regroupant 92,8 % des états de mer .

Les deux autres secteurs sont les suivants :

- le secteur **Nord-Est [0°N, 90°N]**, comprenant les houles provenant du nord de la Manche ;
- le secteur **Sud-Est [90°N, 180°N]**, comprenant les clapots générés dans la baie de Saint-Brieuc.

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

2.1.3.2. Etats de mer côtiers

Le climat de houle au point HOMERE 55103 est fourni en Annexe A. La rose de houle en H_{m0} ainsi que la courbe de dépassement en H_{m0} , sont également illustrés sur la Figure 4 ci-après.

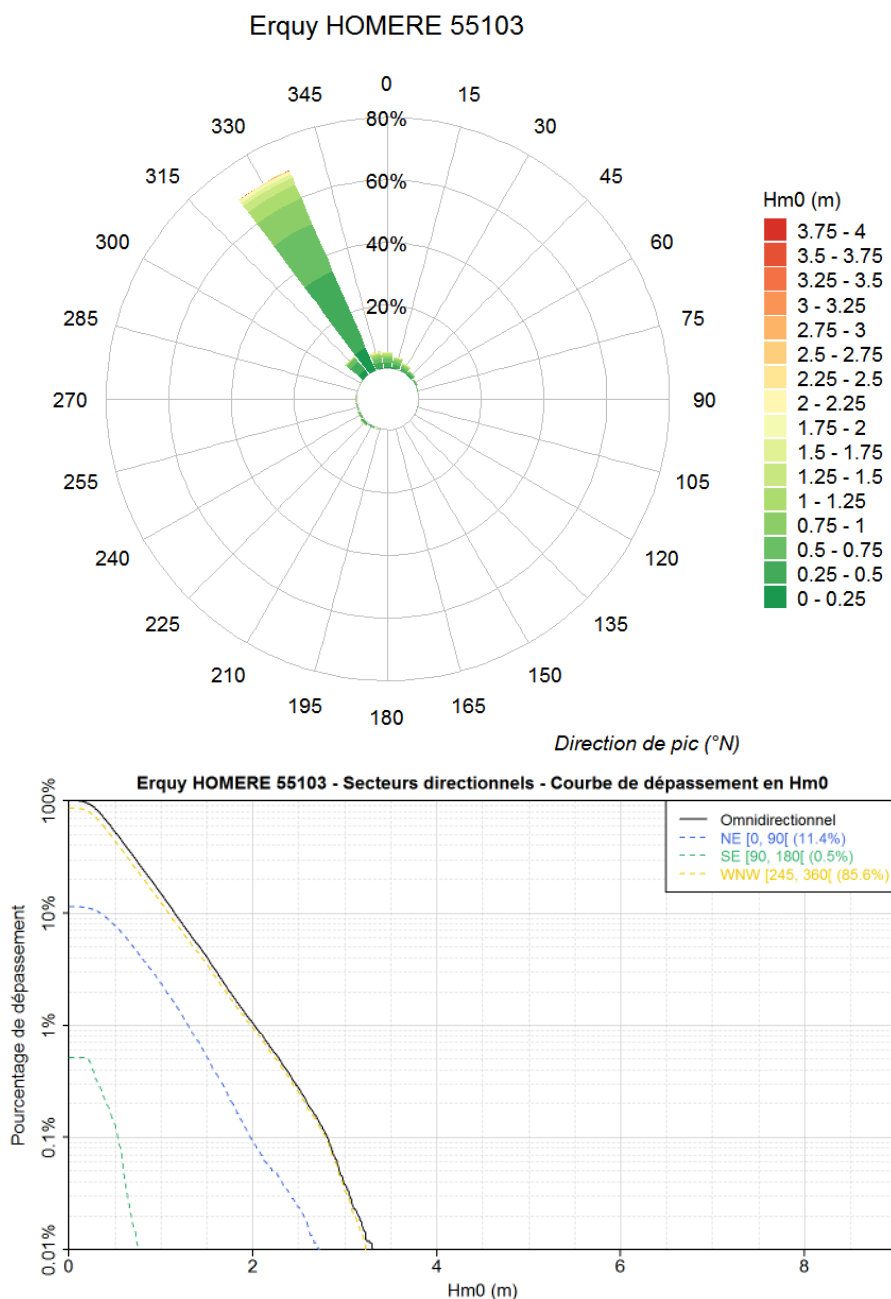


Figure 4. Rose de houle et courbe de dépassement au point HOMERE 55103

La comparaison avec le climat au large montre qu'au cours de la propagation dans la baie de Saint-Brieuc, les effets de réfraction tendent à orienter l'incidence de la houle vers le Nord. Le secteur Ouest-nord-ouest du large est ici redressé au nord-ouest ; les houles de secteur nord-est sont quant à elles peu transformées, ce qui explique la réduction de l'écart avec la courbe de dépassement en WNW. Enfin pour les états de mer levés par le vent de terre de secteur sud-est sont très faibles, du fait de la proximité de la côte.

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

2.2. VENT

2.2.1. Origine des données

Le vent est également issu de la base de données HOMERE.

2.2.2. Climats de vent

Le climat de vent aux points HOMERE 66282 et 55103 sont illustrés dans l'Annexe A, et la rose de vent pour le point 55103 est fournie en Figure 5. Les secteurs prédominants des vents sont le secteur OSO (Atlantique), entre 210°N et 300°N et le secteur NE (Nord Manche) entre 30°N et 90°N.

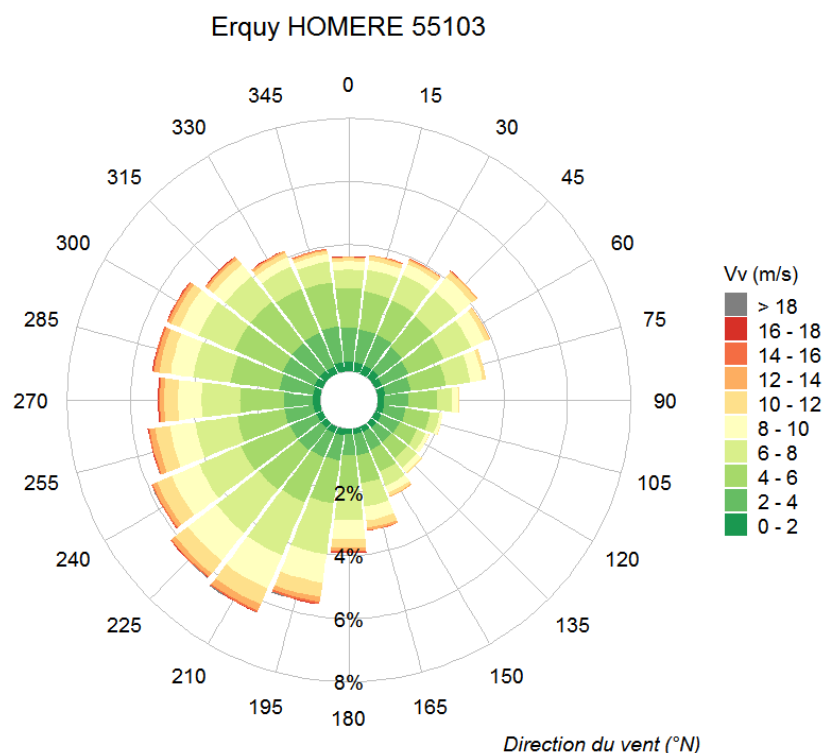


Figure 5. Rose de vents au large au point HOMERE 55103.

2.3. NIVEAU MARIN

2.3.1. Préambule : composantes du niveau marin

Le niveau d'eau est influencé par de nombreux phénomènes physiques, et peut ainsi être considéré comme la superposition des composantes suivantes :

- le niveau moyen, qui peut être défini sur de nombreuses échelles de temps et est soumis à des fluctuations à ces mêmes échelles : tendance de long-terme (remontée eustatique liée au changement climatique notamment), oscillations décennales, variations saisonnières, etc ;
- la marée astronomique, qui est un phénomène déterministe liée aux variations de l'attraction gravitationnelle du système Terre-Lune-Soleil ;
- la surcote ou décote météorologique, générée par l'évolution dans le temps et l'espace de la pression atmosphérique et du vent ;

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

- la surcote liée à l'effet des vagues (« *wave set-up* »), causée par le déferlement des vagues, qui peut générer en plus de la surcote des ondes à basse fréquence (périodes de 1 à 5 minutes) ;
- des phénomènes exceptionnels, causés par des séismes, éruptions volcaniques, glissements de terrain, etc.

À cela s'ajoute sur les plages le niveau instantané maximal (« *run-up* ») atteint par le jet de rive (« *swash* »).

Les principaux phénomènes à traiter sont illustrés sur la **Figure 6** ci-après.

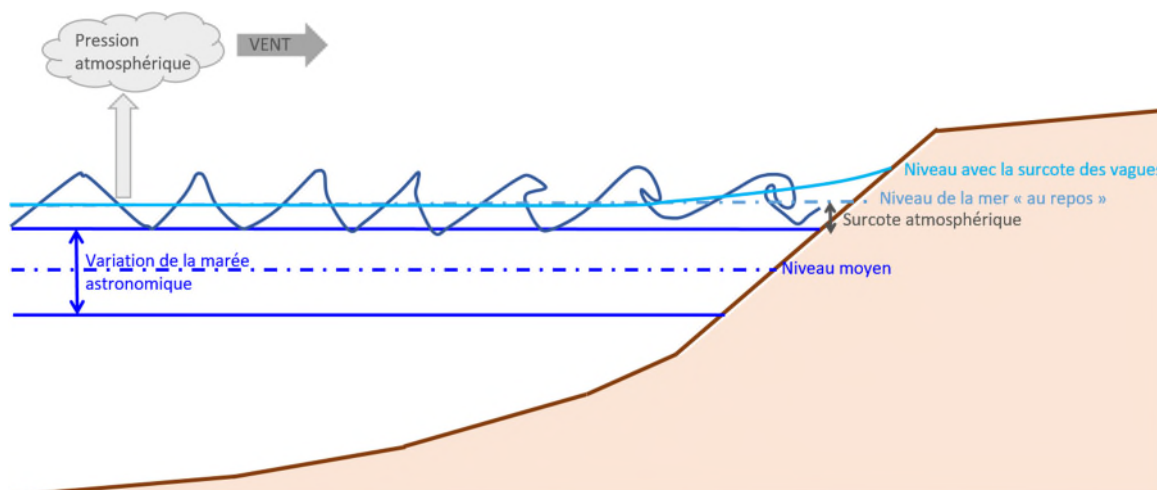


Figure 6. Niveau marin et phénomènes physiques associés

2.3.2. Niveaux caractéristiques

2.3.2.1. Niveau moyen

A. Niveau moyen actuel

D'après les Références Altimétriques Maritimes du Shom (Ref. [1]), le niveau moyen à Saint-Malo est de + 6,78 m ZH, soit + 0,49 m IGN69.

Ces valeurs sont de + 6,33 m ZH ou + 0,50 m IGN69 à Erquy.

B. Surélévation du niveau moyen (composante eustatique)

Le changement climatique projeté a pour effet d'ajouter une composante de long terme au niveau marin. Le taux futur d'élévation du niveau est inconnu car il dépend notamment du taux futur d'émissions de gaz à effet de serre ; cependant des scénarios peuvent être établis pour estimer cette surélévation tout au long du XXI^{ème} siècle.

En France, l'ONERC (*Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique*) a défini en 2010 trois scénarios à considérer pour les projets en métropole :

- un **scénario optimiste** : + 0.4 m à la fin du XXI^{ème} siècle par rapport à la fin du XX^{ème} siècle ;
- un **scénario pessimiste** : + 0.6 m à la fin du XXI^{ème} siècle par rapport à la fin du XX^{ème} siècle ;
- un **scénario extrême** : + 1.0 m à la fin du XXI^{ème} siècle par rapport à la fin du XX^{ème} siècle.

Ces trois scénarios, qui sont restés inchangés suite à la publication du 5^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (2013), sont illustrés sur la **Figure 7** ci-après.

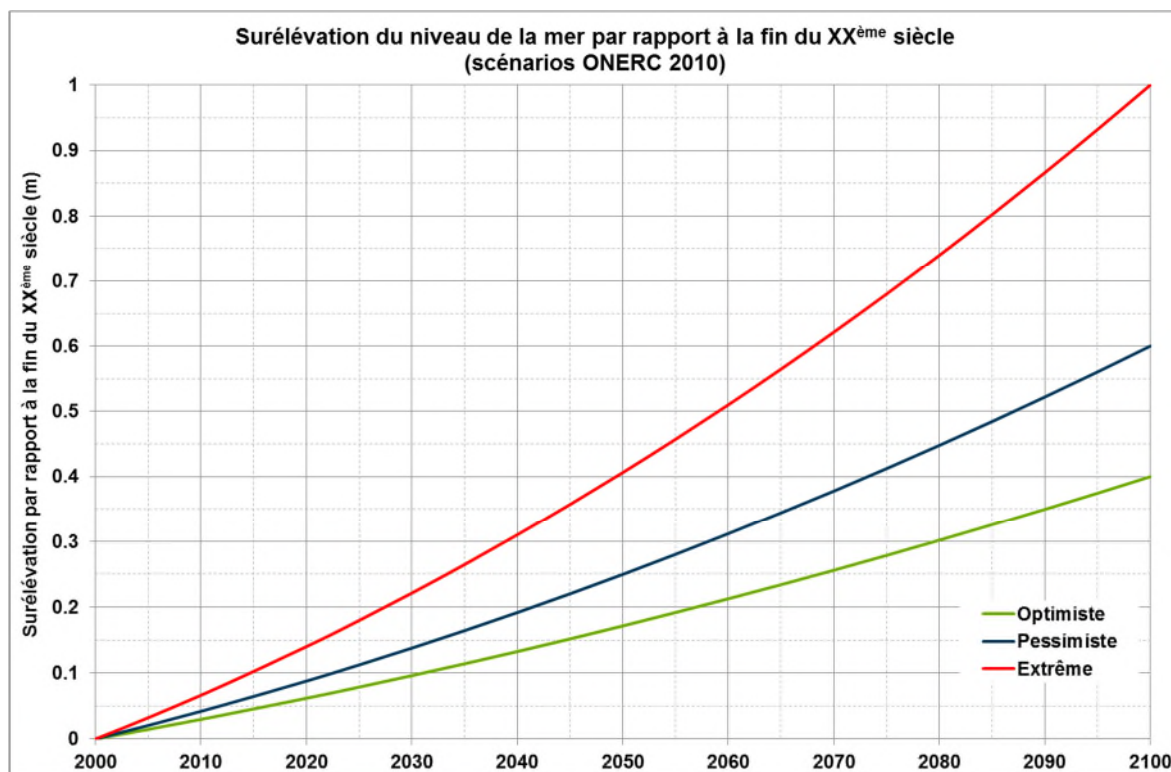


Figure 7. Élévation du niveau moyen de la mer au XXI^{ème} siècle par rapport à la fin du XX^{ème} siècle pour les trois scénarios définis par l'ONERC (2010)

Pour estimer cette composante de long terme, il est donc nécessaire de choisir :

- le **scénario** à retenir ;
- l'horizon à considérer, qui dépend de la **durée de vie du projet**.

Suite aux dernières observations et projections réalisées depuis la publication de ce rapport en 2010, qui tendent à suivre la courbe du scénario extrêmes, nous recommandons d'écarter le scénario optimiste. Quant à la durée de vie du projet, elle est estimée à 50 ans.

Par conséquent, il est décidé de retenir une valeur de **+ 0,60 m** pour la prise en compte du changement climatique dans cette étude.

2.3.2.2. Marée astronomique

D'après les Références Altimétriques Maritimes du Shom (Ref. [1]), le niveau de Plus Haute Mer Astronomique à Erquy, est de + 12,64 m ZH, soit + 6,81 m IGN69 (c'est-à-dire 6,3 m au-dessus du niveau moyen).

2.3.3. Marégraphe de St-Malo

Les données de niveau marin utilisées pour l'analyse des événements extrêmes sont les mesures au marégraphe de Saint-Malo. La série de donnée (allant de 1994 à 2016) est accessible sur le portail de diffusion du Shom (Hauteurs d'eau REFMAR).

2.4. IDENTIFICATION DES EVENEMENTS DE TEMPETE

2.4.1. Principes

Dans l'optique du dimensionnement des ouvrages vis-à-vis de phénomènes physiques (le franchissement et la submersion) dépendant à la fois des états de mer et du niveau marin, il est nécessaire de définir des couples de niveau et de houle en leur attribuant une période de retour bivariée (qui prend en compte les deux variables). La signification d'un tel évènement et de la période de retour associée sera précisée plus loin.

Pour cela, une méthode d'analyse développée au sein d'ARTELIA est appliquée. Cette méthodologie se décompose en quatre grandes étapes :

- échantillonnage de la série temporelle et définition de l'évènement houle / niveau ;
- analyse et modélisation de la structure de dépendance entre les deux variables ;
- ajustement des distributions marginales propres à chaque variable (univarié) ;
- établissement de la distribution bivariée houle / niveau et détermination des périodes de retour.

Cette analyse est réalisée sur :

- les états de mer du large (point HOMERE 66 282) et en particulier la hauteur significative H_{m0} ;
- le niveau marin à la côte, mesuré au marégraphe de St-Malo.

L'analyse est faite sur le point du large de façon à déterminer les conditions en limite du modèle de propagation, et c'est celle qui est détaillée dans la section ci-après. Néanmoins, elle est en outre appliquée au point d'analyse à la côte pour croiser les résultats et s'assurer de la pertinence des choix faits sur le point du large.

2.4.2. Déroutement de l'analyse

2.4.2.1. Échantillonnage

L'échantillonnage de la série temporelle conjointe houle / niveau est une opération qui consiste à établir l'échantillon i.i.d. (indépendant et identiquement distribué) sur lequel seront analysés :

- la dépendance houle / niveau ;
- les extrêmes univariés de houle et de niveau (lois marginales) ;
- la distribution conjointe houle / niveau.

On peut ainsi décrire l'échantillonnage comme une opération permettant :

- la **définition** de l'évènement ;
- l'**identification** de l'évènement ;
- la **description** de l'évènement.

On s'intéresse aux évènements météo-océaniques (combinaison houle / niveau) susceptibles de causer des franchissements et des submersions. Il faut donc repérer les combinaisons d'une houle venant frapper ce littoral abrité du secteur prédominant des tempêtes atlantiques, et d'un niveau suffisamment haut.

Une formule de réfraction analytique simple permet d'approcher la valeur de H_{m0} au droit du littoral d'étude, ce qui permet la prise en compte de la direction et de la période de la houle (ainsi les états de mer s'éloignant d'Erquy ou y arrivant très atténués ne sont pas pris en compte). Cette valeur approchée est normalisée et sommée au niveau marin lui-même normalisé par le marnage maximal,

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

ce qui donne une variable de réponse « fictive », nommée « niveau d'eau total », donnant à peu près la même importance au niveau et à la houle et permettant d'identifier ses pics (maximas) sur la période de modélisation. Les pics sont définis par rapport à un seuil correspondant au 98^{ème} centile de la série (soit 1,219 m dans l'exemple ci-après).

Bien que la valeur elle-même de ces pics soit très peu précise, il ne s'agit ici que d'identifier la date et l'heure de ces pics et de sélectionner les valeurs de H_{m0} au large et de niveau marin associés, de façon à construire l'échantillon des événements. La série temporelle de normalisation et simplification est illustrée dans la [Figure 8](#).

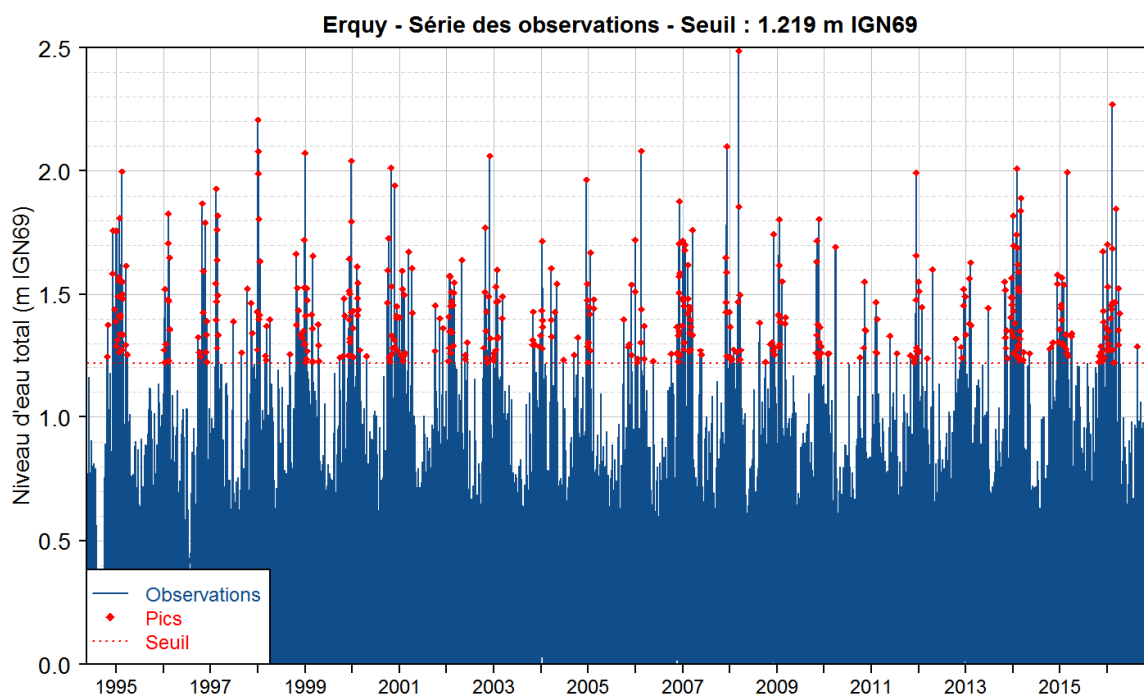


Figure 8. Identification des tempêtes par la fonction de réponse

L'échantillon ainsi constitué comprend au final 479 événements, soit environ 21,4 / an.

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

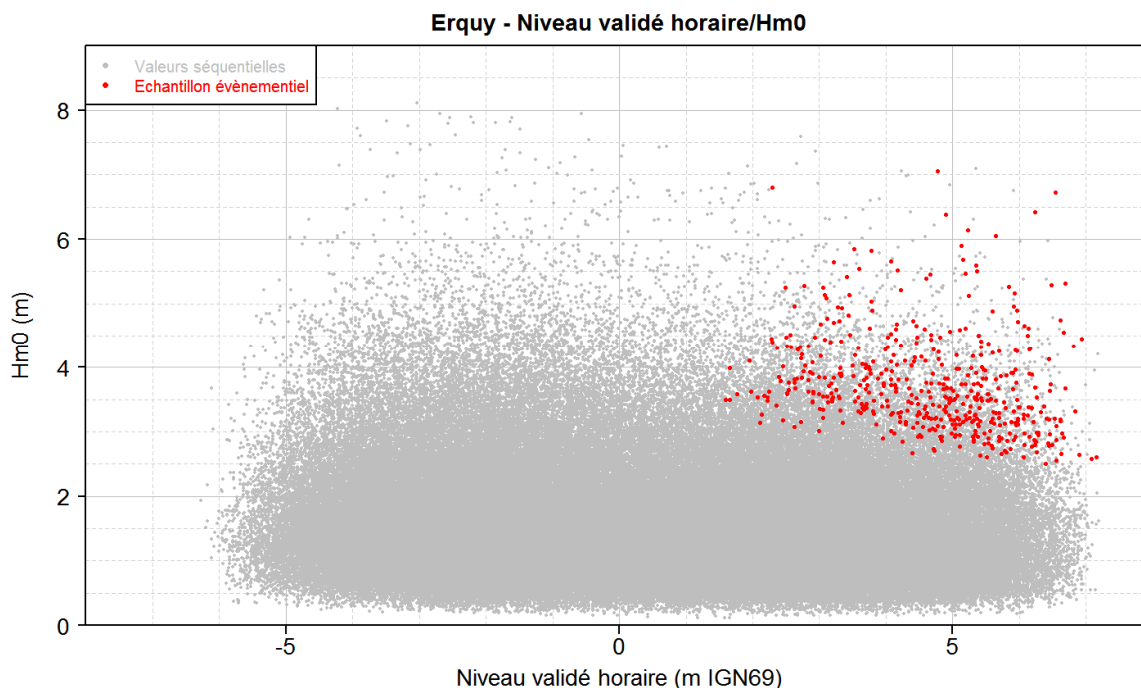


Figure 9. Echantillon des évènements H_{m0} / niveau retenus (en rouge), extraits de l'ensemble de la série temporelle (en gris)

2.4.2.2. Dépendance

La dépendance est évaluée entre la hauteur significative spectrale de l'état de mer, H_{m0} , et le niveau marin. Ce dernier étant très largement dominé par la marée astronomique, cette dépendance est très faible.

Les indicateurs montrent en effet une dépendance très faible, et même négative :

- le coefficient de dépendance caudale (*upper tail dependence coefficient*) est de -0,17 (0 signifie l'indépendance : la valeur d'une des variables n'apporte aucune information sur la valeur associée de l'autre variable ; 1 signifie la dépendance positive totale : une valeur forte d'une variable implique que la valeur associée de l'autre variable est également forte ; -1 implique la dépendance négative totale : une valeur forte d'une variable implique que la valeur associée de l'autre variable est faible) ;
- le chi-plot de Fisher et Switzer (2001), illustré Figure 10, montre que les paires houle / niveau restent proches de l'axe des abscisses, qui signifie l'indépendance (la dépendance totale positive, resp. négative, correspond à des valeurs verticales proches de 1, resp. -1). Les paires les plus faibles de l'échantillon des tempêtes montrent une dépendance négative, mais les paires les plus élevées, qui nous intéressent dans cette étude, sont très proches de l'indépendance.

La dépendance entre ces deux variables est modélisée par une copule de Gumbel, dont le paramètre est estimé par la méthode du maximum de vraisemblance canonique.

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

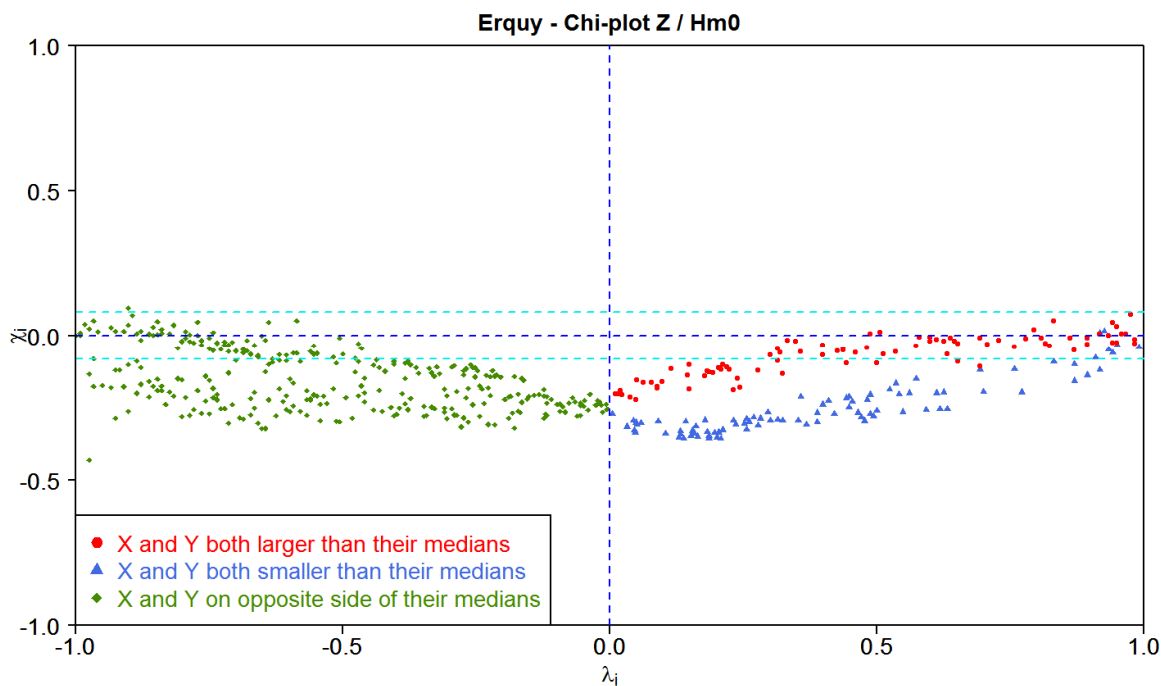


Figure 10. Chi-plot niveau marin / Hm0

2.4.2.3. Distributions marginales

Les distributions marginales de chaque composante H_{m0} et Z de l'échantillon bivarié sont estimées en extrapolant cet échantillon sur des périodes de retour de 1 à 100 ans. L'estimation des niveaux marins extrêmes à St-Malo est ajustée en fonction des niveaux marins extrêmes estimés par le Cerema (2018, Ref. [3]) et prise comme référence, à savoir + 7,6 m IGN69 pour le niveau centennal.

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

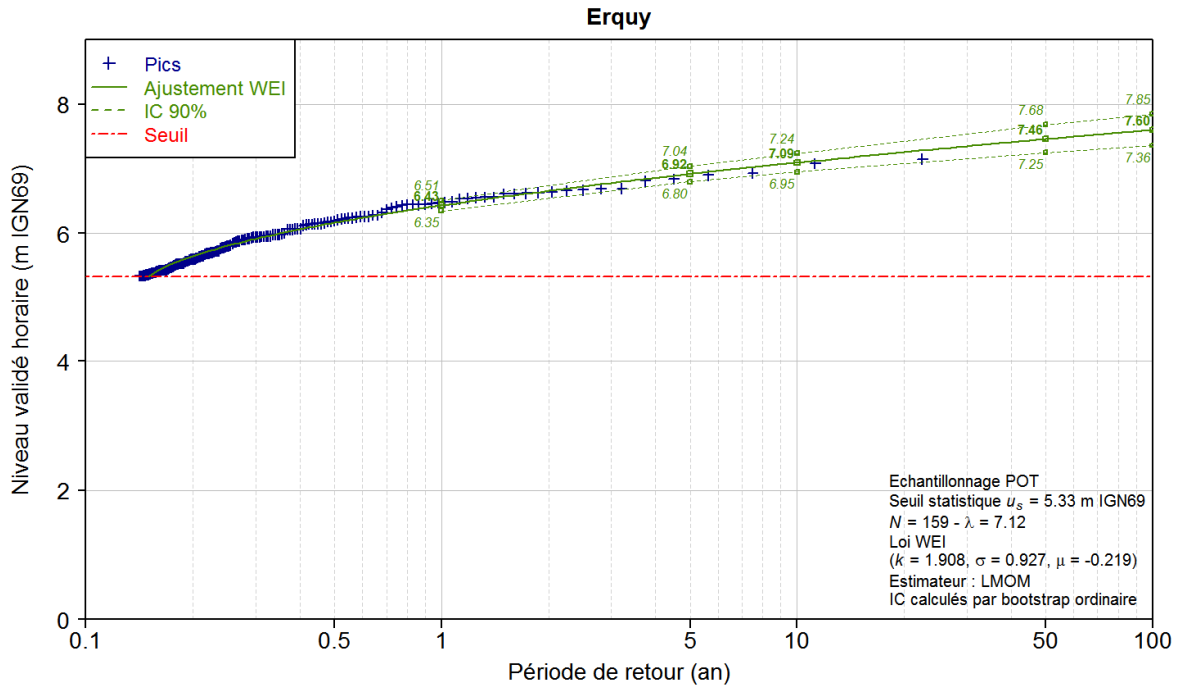


Figure 11. Extrapolation du niveau marin extrême à St-Malo

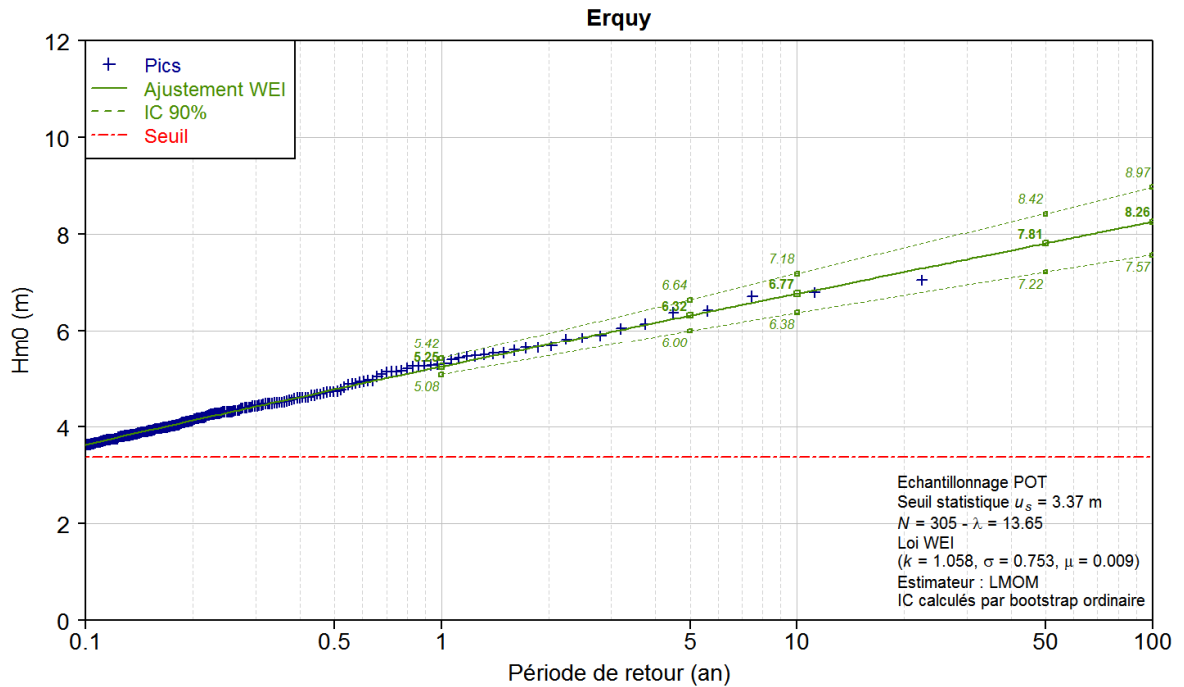


Figure 12. Extrapolation du Hm0 extrême au large

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

2.4.2.4. Distribution bivariée houle / niveau

On obtient, en combinant les distributions marginales de H_s et du niveau à la structure de dépendance, la distribution bivariée qu'il s'agit alors d'interpréter.

2.4.3. Interprétation : période de retour conjointe

Parmi le grand nombre de définitions possibles de la période de retour bivariée, on s'intéresse à la période de retour notée T_{AND} , qui correspond à la probabilité de dépassement conjoint.

En tout point situé sur le contour de $T_{AND} = 100$ ans, par exemple, la probabilité de dépasser **simultanément** la valeur correspondante de niveau (en abscisse) **et** la valeur correspondante de H_m0 (en ordonnée) correspond à une période de retour de 100 ans, c'est-à-dire à une probabilité annuelle de 0,01.

Le tracé des isolignes de T_{AND} est illustré **Figure 13**. Il permet, pour chaque tempête (point rouge de l'échantillon), d'apprécier sa propre valeur de période de retour de dépassement conjoint. On constate la forte indépendance entre niveau et houle au large, très peu d'évènements combinant une période de retour élevée en niveau marin seul ET en H_s seul. Il faut néanmoins garder à l'esprit l'incertitude sur la valeur de la dépendance et donc sur la courbure des lignes, et *a fortiori* sur la valeur de la période de retour bivariée.

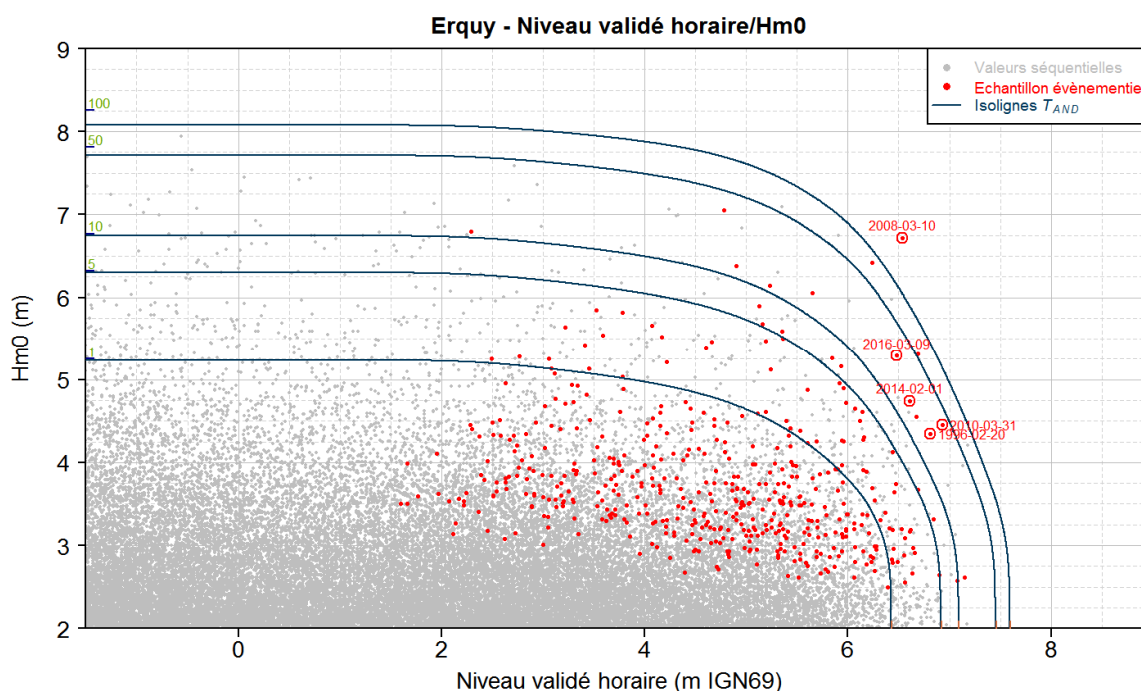


Figure 13. Sélection des tempêtes pour la modélisation (propagation à pied d'ouvrage). Analyse basée sur le point du large HOMERE 66282

Ce graphe permet la sélection de cinq évènements (tempête) dont les caractéristiques de concomitance d'une forte houle et d'un niveau élevé les rendent propices à générer des franchissements sur le littoral d'Erquy et Pléneuf :

- 20 février 1996 à 07h ;
- 10 mars 2008 à 20h ;
- 31 mars 2010 à 07h ;

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

- 01 février 2014 à 07h ;
- 09 mars 2016 à 19h.

Si l'on refait la même analyse en se basant sur le point 55103 plus proche de la côte, ces tempêtes gardent leur pertinence (Figure 14).

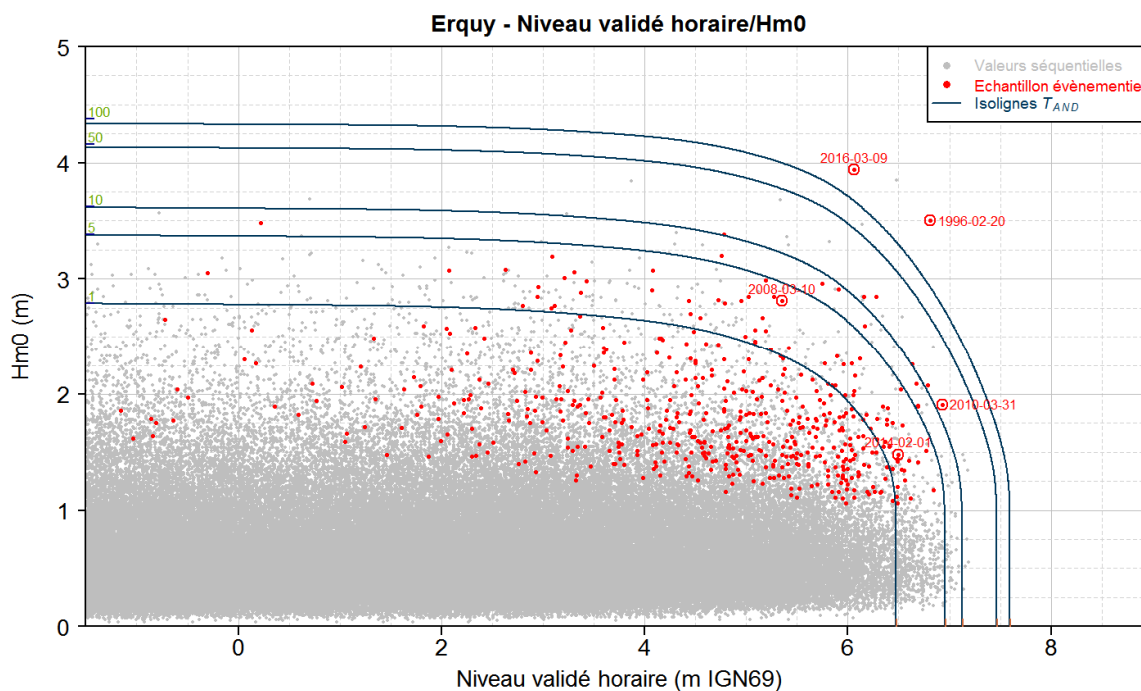


Figure 14. Sélection des tempêtes pour la modélisation (propagation à pied d'ouvrage). Analyse basée sur le point à la côte HOMERE 55103

Il faut en outre garder en mémoire que d'autres paramètres comme la période T_p , non représentés sur ces graphes, peuvent jouer un rôle important : ainsi, la tempête du 10/03/2008 est très atténuée et semble peu intéressante, mais sa période très élevée (17-18 s) est susceptible de générer du *shoaling* et du *set-up* lors de la propagation sur le profil de plage final. Il convient donc de la maintenir dans l'analyse.

3. MODELISATION DES TEMPETES RETENUES DANS LA ZONE COTIERE (SWAN)

3.1. PRESENTATION DU CODE DE CALCUL

La propagation de la houle est réalisée à l'aide du code calcul SWAN (*Simulating WAves in the Nearshore*), développé par l'Université de Delft, Pays-Bas. Ce modèle de troisième génération, basé sur l'équation d'action d'onde, permet la génération par le vent et / ou la propagation des états de mer tout en maintenant le forçage atmosphérique. Il prend en compte le caractère aléatoire et multidirectionnel de la houle et est spécifique des influences côtières. En particulier, il permet la prise en compte des phénomènes suivants :

- réfraction sur les fonds ;
- levée par les fonds (*shoaling*) ;
- diffraction par les ouvrages et les obstacles naturels ;
- déferlement par profondeur et cambrure limite ;
- dissipation de l'énergie sur les fonds.

3.2. DEFINITION ET EMPRISE DES DOMAINES DE CALCUL

Le choix de l'emprise du modèle de propagation côtière a été discuté en section 2.1.2 ci-avant.

Un modèle de génération / propagation en zone côtière est mis en œuvre pour propager la série temporelle des spectres d'états de mer issus de la base de données HOMERE présentée en section 2.1.1. Le forçage en vent est maintenu sur toute l'emprise (variable en temps et en espace), et le niveau marin varie pour tenir compte de la marée astronomique ainsi que de la surcote de tempête (effet barométrique inverse et surcote induite par le vent).

Quatre grilles de calcul à 3 niveaux d'emboîtement permettent de raffiner progressivement le pas de calcul pour obtenir une résolution de 10 m autour de l'ouvrage, qui permettra par la suite de définir les conditions d'entrée des modèles de franchissement.

L'emboîtement des domaines de calcul du large jusqu'au site d'étude, à la résolution spatiale de plus en plus raffinée, est illustré sur la [Figure 15](#) ci-après.

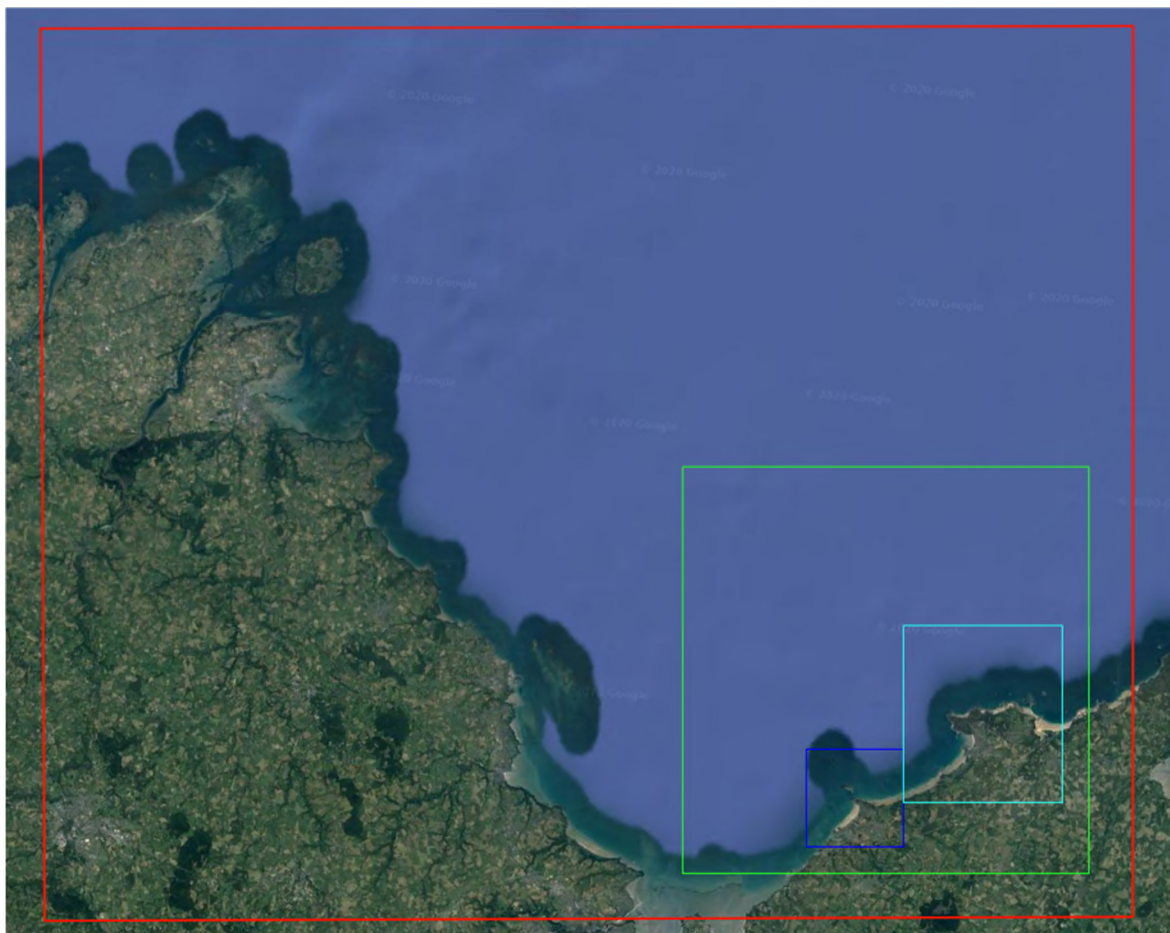


Figure 15. *Domaines de calcul pour la propagation des états de mer du large vers le site d'étude. Modèle du large en rouge, modèle intermédiaire en vert et les deux modèles côtiers en bleu clair et foncé*

3.3. BATHYMETRIE

La bathymétrie du modèle est construite sur la base des cartes marines locales, du MNT bathymétrique HOMONIM (Shom) et du levé LIDAR effectué en 2011 par laser aéroporté par l'IGN dans le cadre du programme national Litto3D® (Fichier « Grille_1m.asc »).

Elle est illustrée sur la [Figure 2](#) ci-avant et plus en détail sur la [Figure 16](#) ci-après.

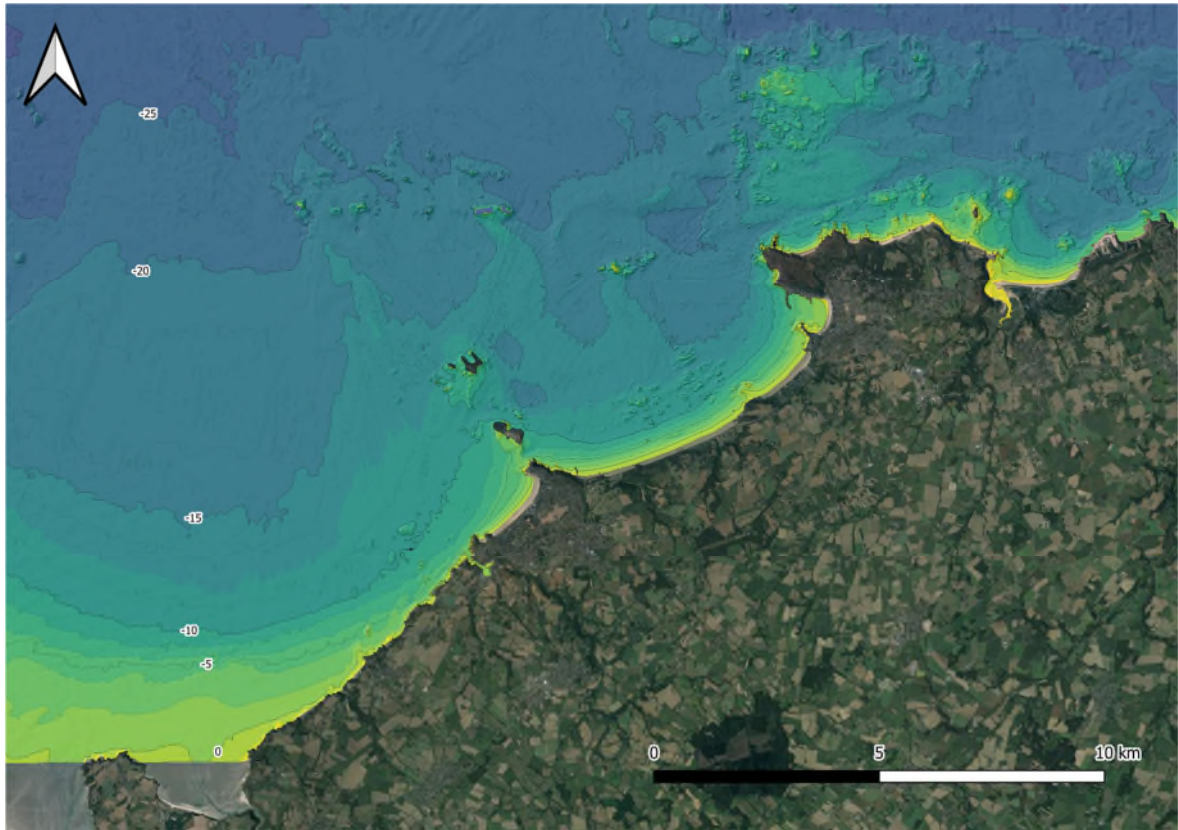


Figure 16. Bathymétrie aux abords de la zone d'étude

3.4. PARAMETRISATION

La configuration et la paramétrisation des modèles emboîtés (illustrés en [Figure 15](#)) sont détaillées dans le [Tableau 2](#) ci-après.

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

Tableau 2 – Configuration et paramétrisation des modèles d'états de mer à la côte

		Grille régionale	Grille intermédiaire	Grilles locales Erquy/Pléneuf
Code de calcul		SWAN v 41.01		
Grilles de calcul				
Projection		Lambert 93 Zone 2		
Limite Nord		6 891 300	6 866 500	6 857 500/6 850 500
Limite Sud		6 841 000	6 271 000	6 847 500/6 845 000
Limite Ouest		244 800	281 000	293 500/288 000
Limite Est		306 400	304 000	302 500/293 500
Résolution spatiale		200 m	50 m	10 m
Emprise		61,6 x 50,3 km	23 x 23 km	9 x 10km / 5,5 x 5,5km
Paramétrisation				
Pas de temps		1 h		
Résolution directionnelle		5°		
Fréquences	Nombre	30		
	Intervalle (Hz)	0.0373 – 1.0000		
Déferlement	Formulation	Battjes et Janssen (1978)		
	Paramètres	$\alpha = 1, \gamma = 0,73$		
Données d'entrée et forçages				
Période de modélisation		Période de la tempête		
Bathymétrie		Cartes marines et levés bathymétriques		
Niveau marin		Variable (HOMERE)	Variable (HOMERE)	Variable (HOMERE)
Vent	Source	Données HOMERE		
	Résolution	10 km x 12 km		
	Pas de temps	1 h		
Vagues : conditions aux limites	Source	HOMERE	Grille régionale	Grille intermédiaire
	Résolution	Voir Figure 17	200 m	50 m
	Pas de temps	1 h	1 h	1 h

3.5. CAS DE CALCUL ET FORÇAGES

Un cas de calcul est défini de la façon suivante :

- une configuration topo-bathymétrique (état actuel) ;
- un niveau d'eau au repos, prenant en compte le niveau moyen, la marée astronomique et la surcote / décote météorologique (marée de tempête) ;
- un état de mer défini par ses paramètres réduits :
 - une hauteur significative H_s (m),

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

- une période de pic T_p (s),
- une direction de pic θ_p (°N) ;
- un étalement directionnel σ (°).

Les cas de calcul correspondent aux cinq tempêtes identifiées dans l'analyse combinée houle / niveau, et jugées susceptibles de générer des submersions. En outre, ces cinq cas sont doublés en considérant, en sus des niveaux extrêmes actuels, la surélévation de 0,6 m du niveau de la mer liée changement climatique (section 2.3.2.1.B). On fait par ailleurs l'hypothèse que le régime extrême des états de mer au large n'est pas modifié par le changement climatique.

Les cas de calculs liés aux tempêtes historiques retenues sont détaillés dans le **Tableau 3** ci-après :

Tableau 3 – Cas de calcul simulés

Nom du cas de calcul	Date de la tempête ou Période de retour	Point HOMERE 66282 (large)			Niveau au marégraphe de St-Malo (m IGN69)
		H_{m0} (m)	θ_p (°N)	T_p (s)	
1996	20/02/1996 7h	4.34	19	8.6	+ 6.81
2008	10/03/2008 19h	7.09	284	18.2	+ 6.54
2010	31/03/2010 7h	4.45	285	11.2	+ 6.93
2014	01/02/2014 7h	3.96	282	12.7	+ 7.14
2016	09/03/2016 18h	5.59	286	10.9	+ 6.06
1996_CC	20/02/1996 7h	4.34	19	8.6	+ 7.41 ¹
2008_CC	10/03/2008 19h	7.09	284	18.2	+ 7.14 ¹
2010_CC	31/03/2010 7h	4.45	285	11.2	+ 7.53 ¹
2014_CC	01/02/2014 7h	3.96	282	12.7	+ 7.74 ¹
2016_CC	09/03/2016 18h	5.59	286	10.9	+ 6.66 ¹

3.5.1. Forçages

Une sélection de points a été effectuée à partir de la base de données HOMERE afin de générer les forçages en houle, vents et niveaux².

3.5.1.1. Forçage en houle

Les points représentés en jaune dans la **Figure 17** ci-après représentent les points HOMERE utilisés en forçage du modèle de propagation. Les points les plus proches de la frontière du modèle ont été utilisés. Le modèle de propagation interpole ensuite entre les valeurs renseignées en forçage.

3.5.1.2. Forçage en vents

Les points représentés en rouge dans la **Figure 17** ci-après représentent la grille de vent utilisée en forçage du modèle de propagation. La méthode « nearest » a été utilisée pour interpoler les valeurs

¹ Niveaux fictifs comprenant le niveau du marégraphe de Saint-Malo au moment de la tempête auquel on ajoute une surcote de changement climatique de 60 cm.

² Nota : les courants ne sont pas considérés

de la grille de vent (i.e. on a gardé les valeurs des points de la BD HOMERE - en bleu - les plus proches de ceux la grille - en rouge).

3.5.1.3. Forçage en niveaux

La méthode utilisée pour les forçages en niveaux est la même que pour les forçages en vent, après avoir recalé la grille des niveaux par rapport aux observations de St-Malo.

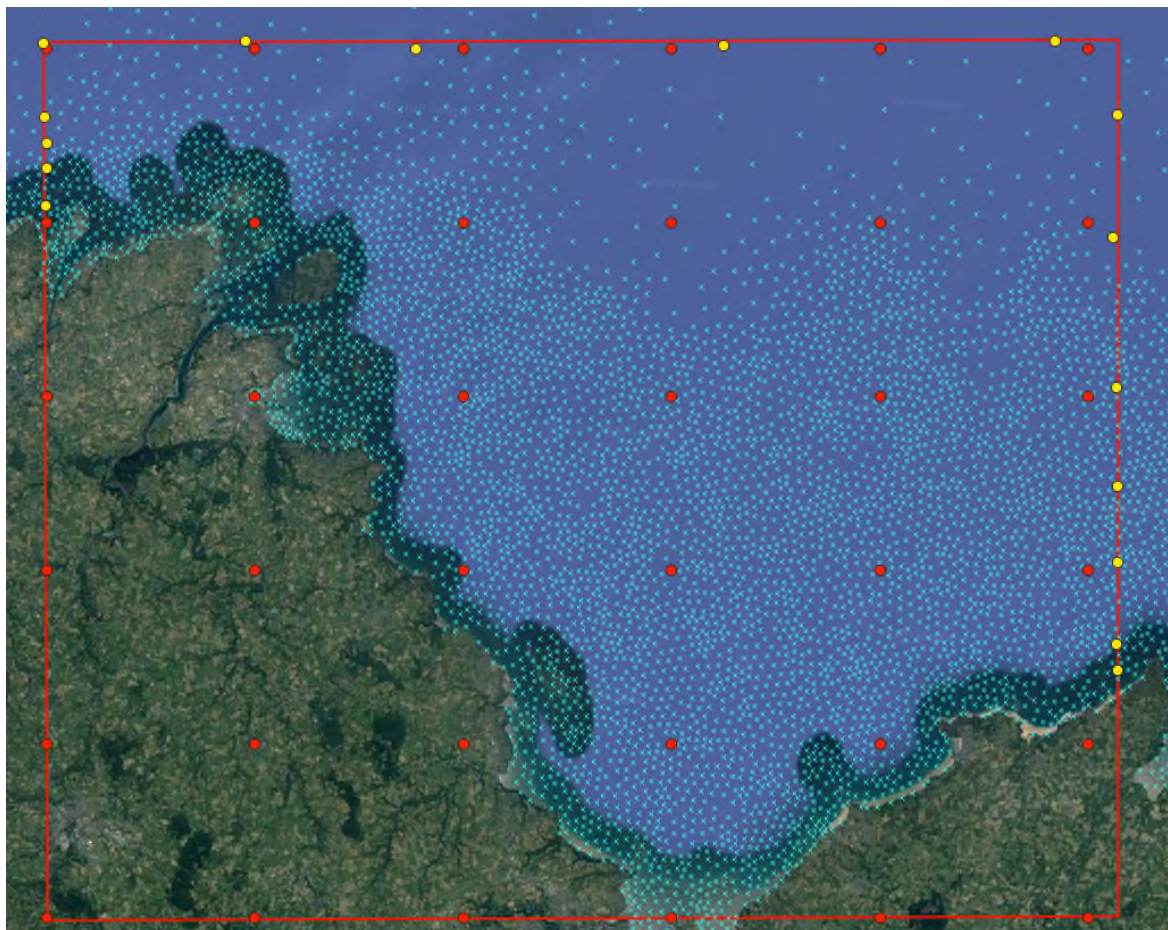


Figure 17. Localisation des points de sortie du rejeu HOMERE (en bleu) dans la baie de Saint Brieux. Les points en rouge sont ceux retenus pour le forçage des niveaux et des vents, en jaune pour le forçage en houle.

3.6. SORTIES DU MODELE

Les sorties du modèle consistent en :

- des épures de propagation de houle (cartes d'iso-valeurs de H_{m0}) sur l'emprise du modèle ;
- des valeurs de houle en une vingtaine de points d'analyse répartis le long du linéaire d'étude, à une profondeur de - 5 m IGN69 (avant la zone de déferlement, traitée dans la section suivante).

Les points d'analyse correspondent à l'extrémité « large » des profils d'estran répartis sur la zone d'étude (Figure 18) et courant de l'isobathe - 5 m IGN69 au pied d'ouvrage, considéré se trouver à la cote + 5 m IGN69. La propagation sur l'estran est traitée en section suivante par le code de calcul HOCOULI.

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

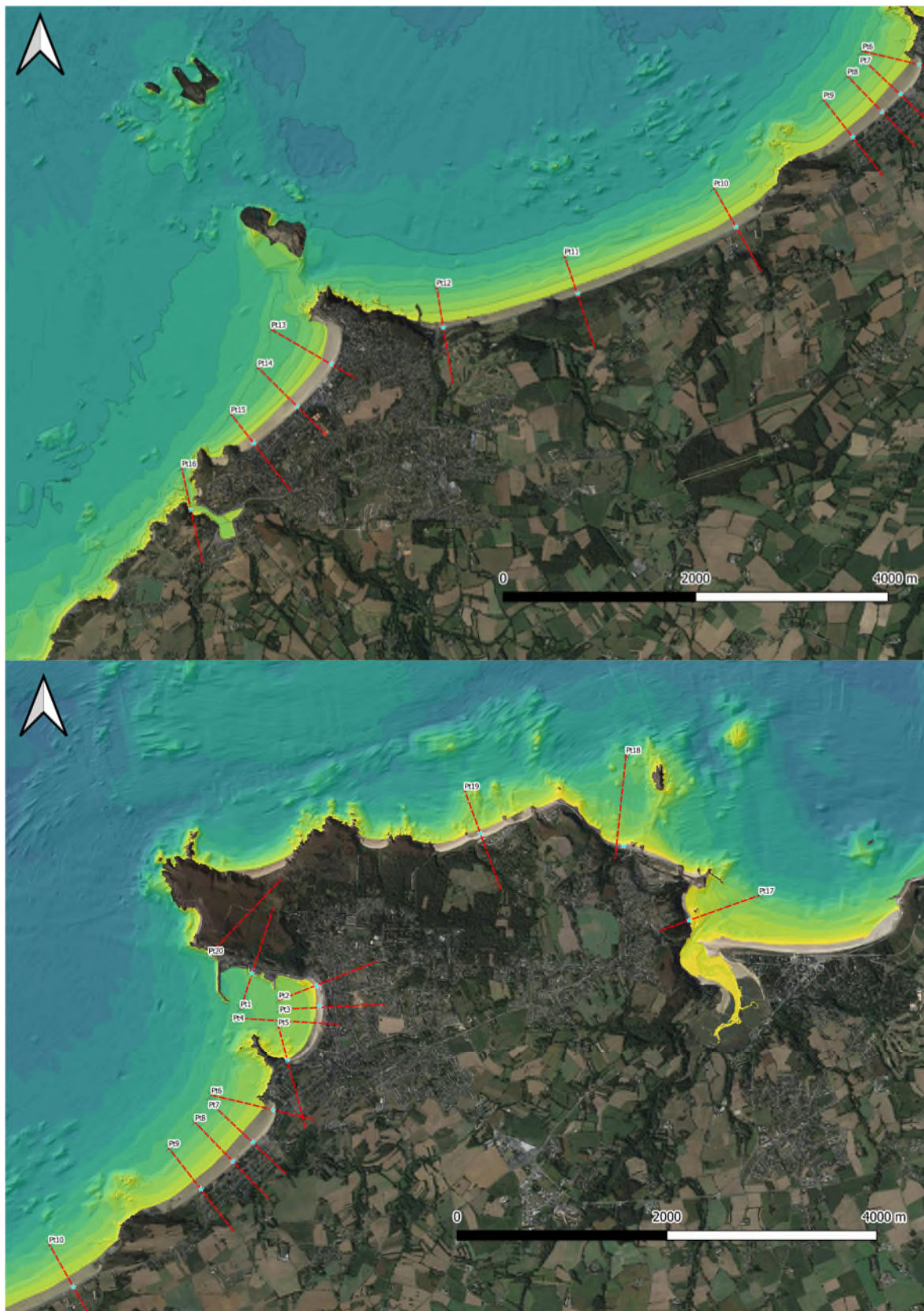


Figure 18. Profils de plage retenus pour la propagation 1D sur l'estran

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

Les résultats des calculs sont illustrés en Annexe C, sous la forme d'épures de propagation à l'échelle du modèle **SWAN** complet, à une échelle englobant les deux sites d'intérêt (Pléneuf-Val-André et Erquy) et à l'échelle de chaque site.

Les épures obtenues illustrent :

- un effet de réfraction marqué autour de la pointe de l'Arcouest depuis le large jusque dans la baie de Saint-Brieuc. L'encaissement de la baie tend à atténuer fortement les houles d'ouest (voir la tempête du 1^{er} février 2014) ;
- la propagation inhomogène des vagues (voir Figure 19) à l'approche de la côte du fait de la bathymétrie complexe due aux multiples récifs autour de la zone d'étude.

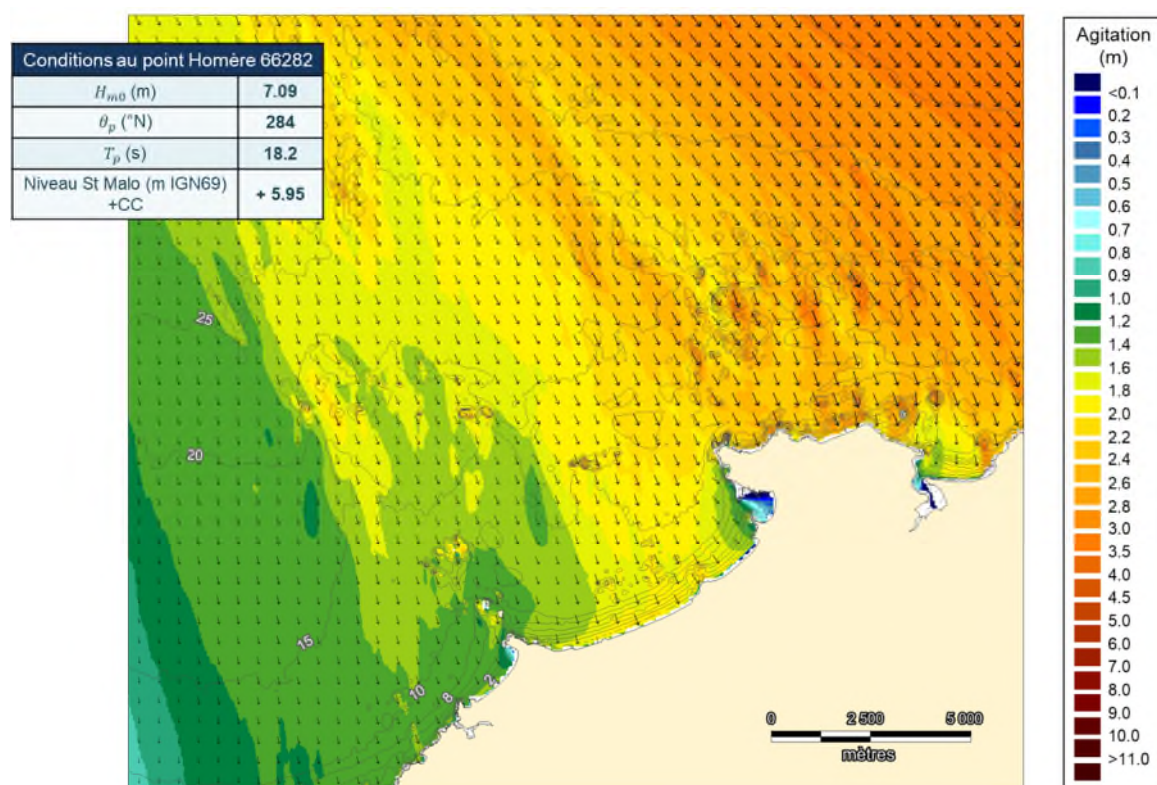


Figure 19. Exemple d'épure de houle sur l'emprise de la grille intermédiaire englobant les deux sites d'études le 10 mars 2008 à 19h UTC

4. PROPAGATION SUR L'ESTRAN JUSQU'AU PIED D'OUVRAGE (HOCOULI)

4.1. PRESENTATION DU CODE DE CALCUL

La propagation des houles de tempête le long de l'estran jusqu'au droit de l'ouvrage est simulée à l'aide d'un code de calcul 1D spécifique, nommé HOCOULI, spécifique à la zone de déferlement.

HOCOULI, développé par ARTELIA, est basé sur une approche spectrale paramétrique et repose sur le modèle de déferlement de Battjes et Janssen (1978) calibré par Battjes et Stive (1985). Il fournit pour un profil des fonds donné les paramètres de houle utiles à la conception des ouvrages et en particulier la hauteur de houle significative au droit des futurs ouvrages et la surélévation du niveau marin due au déferlement (*wave setup*), utilisée en entrée des formules de pré-dimensionnement.

L'utilisation de HOCOULI en zone de déferlement a été préférée à celle de SWAN car ce code reproduit plus fidèlement la dissipation de l'énergie par le déferlement et le *set-up*, paramètres clés pour la détermination des conditions en pied d'ouvrage.

4.2. RÉSULTATS

La propagation des 10 états de mer de tempête (5 tempêtes retenues avec et sans surélévation du niveau de la mer) est réalisée sur les 19 profils d'estran (190 calculs).

Plan de Prévention des Risques Littoraux et d'inondation (PPRL-i) des communes de Pléneuf-Val-André et Erquy

RAPPORT DE PHASE 2 – ANNEXE 1 : MODELISATION DES PHENOMENES DE HOULE

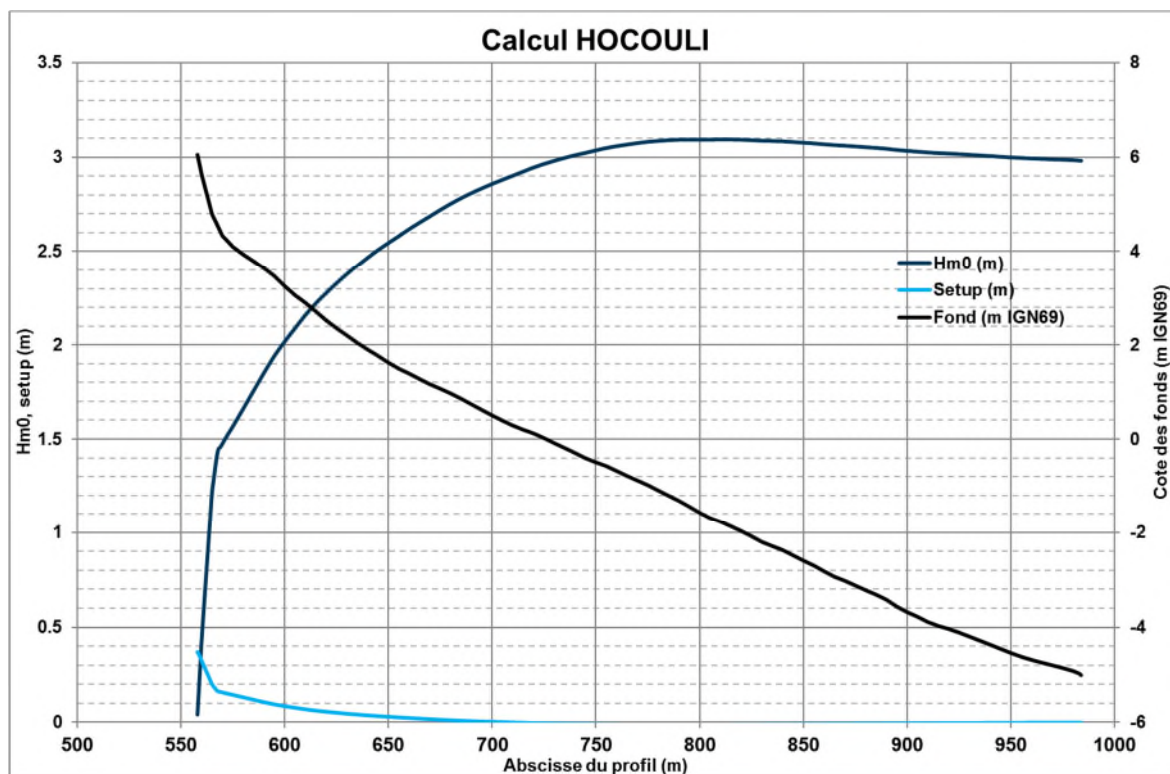


Figure 20. Exemple de calcul de propagation le long du profil d'estran P12

Les résultats des propagations de tempêtes extrêmes au pied des ouvrages pour chaque profil 1 à 19 (voir Figure 18), à la cote de + 5 m IGN69, sont fournis dans les [Tableau 4](#) (hauteur significative H_{m0}), [Tableau 5](#) (niveau marin incluant l'effet des vagues) et [Tableau 6](#) (période de pic T_p).

Tableau 4 – Hauteur significative des vagues à pied d'ouvrage (+ 5 m IGN69)

Tempête	H_{m0} (m)																		
	P01	P02	P03	P05	P04	P06	P07	P08	P09	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19
1996	0,46	0,20	0,24	0,39	1,06	1,02	1,01	1,09	1,17	1,31	1,45	1,51	1,21	1,21	1,34	1,41	1,52	1,85	1,73
2008	0,75	0,23	0,29	0,61	1,15	1,10	1,10	1,13	1,14	1,19	1,15	1,13	1,06	1,15	1,11	1,13	1,30	1,33	1,24
2010	0,64	0,24	0,33	0,56	1,31	1,17	1,14	1,21	1,26	1,31	1,36	1,35	1,15	1,16	1,27	1,39	1,19	1,65	1,55
2014	0,41	0,17	0,21	0,35	1,02	1,11	1,11	1,14	1,17	1,15	1,09	1,02	0,94	0,93	0,96	0,97	0,87	1,56	1,45
2016	1,24	0,44	0,65	0,91	1,01	0,93	0,91	0,99	1,07	1,14	1,09	1,06	0,96	1,02	1,00	1,02	1,26	1,40	1,27
1996_CC	0,44	0,26	0,25	0,38	1,13	1,28	1,27	1,35	1,45	1,60	1,77	1,86	1,21	1,53	1,62	1,96	1,81	2,41	2,19
2008_CC	0,73	0,22	0,35	0,59	1,59	1,53	1,48	1,56	1,64	1,70	1,66	1,64	1,06	1,51	1,61	1,63	1,74	1,84	1,74
2010_CC	0,62	0,24	0,31	0,54	1,40	1,41	1,39	1,44	1,49	1,51	1,51	1,46	1,15	1,32	1,39	1,47	1,22	2,04	1,90
2014_CC	0,40	0,17	0,20	0,34	1,00	1,17	1,17	1,20	1,21	1,15	1,07	1,00	0,94	0,93	0,94	0,94	0,84	1,56	1,48
2016_CC	1,21	0,44	0,65	1,02	1,56	1,29	1,25	1,34	1,42	1,52	1,65	1,62	0,96	1,39	1,55	1,57	1,62	1,99	1,87

Tableau 5 – Niveau d'eau avec effet des vagues (setup) à pied d'ouvrage (+ 5 m IGN69)

Tempête	$Z + Setup$ (m IGN69)																		
	P01	P02	P03	P05	P04	P06	P07	P08	P09	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19
1996	6,48	6,53	6,53	6,57	6,54	6,56	6,54	6,52	6,58	6,55	6,54	6,61	6,54	6,54	6,52	6,57	6,76	6,83	6,78
2008	6,24	6,30	6,30	6,33	6,35	6,39	6,36	6,31	6,40	6,35	6,34	6,39	6,29	6,29	6,30	6,35	6,53	6,68	6,62
2010	6,61	6,67	6,67	6,70	6,67	6,68	6,66	6,80	6,68	6,61	6,57	6,62	6,55	6,57	6,56	6,59	6,84	6,89	6,83
2014	6,79	6,85	6,84	6,88	6,84	6,83	6,81	6,81	6,83	6,77	6,75	6,80	6,72	6,74	6,75	6,79	7,01	7,01	6,94
2016	6,05	6,12	6,11	6,16	6,28	6,28	6,26	6,11	6,29	6,25	6,25	6,31	6,20	6,20	6,21	6,30	6,44	6,60	6,54
1996_CC	7,09	7,14	7,14	7,18	7,14	7,14	7,12	7,14	7,15	7,12	7,11	7,17	7,10	7,11	7,09	7,17	7,34	7,35	7,31
2008_CC	6,88	6,94	6,94	6,97	6,92	6,94	6,92	6,93	6,94	6,89	6,87	6,92	6,82	6,84	6,84	6,95	7,07	7,21	7,15
2010_CC	7,22	7,28	7,27	7,31	7,26	7,26	7,24	7,25	7,26	7,19	7,16	7,21	7,13	7,15	7,16	7,19	7,44	7,44	7,38
2014_CC	7,39	7,44	7,44	7,48	7,44	7,42	7,40	7,41	7,42	7,37	7,35	7,41	7,32	7,34	7,35	7,39	7,61	7,61	7,54
2016_CC	6,69	6,76	6,76	6,79	6,83	6,85	6,83	6,84	6,86	6,80	6,78	6,84	6,75	6,77	6,74	6,90	7,00	7,12	7,06

Tableau 6 – Périodes de pic à pied d'ouvrage (+ 5 m IGN69)

Tempête	T_p (s)																		
	P01	P02	P03	P05	P04	P06	P07	P08	P09	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16	P17	P18	P19
1996	8,5	8,4	8,5	8,5	8,4	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3	8,4	8,4	8,5	8,5	8,5	8,0	8,2	8,2
2008	18,0	18,0	18,0	18,0	18,0	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	18,0	17,7	17,8	17,8
2010	11,2	11,1	11,3	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,3	11,2	11,2
2014	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,2	12,2	12,3	12,3	12,4	12,4
2016	10,1	6,6	10,1	10,0	10,1	10,0	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,0	10,0	10,0	10,1	9,9	10,0	10,1
1996_CC	8,5	8,5	8,5	8,5	8,4	8,2	8,3	8,3	8,3	8,3	8,4	8,4	8,5	8,5	8,5	8,5	8,0	8,2	8,2
2008_CC	18,0	18,1	18,0	18,0	18,0	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	18,0	18,0	17,7	17,8	17,8
2010_CC	11,2	11,2	11,3	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,2	11,3	11,2	11,2
2014_CC	12,4	12,3	12,3	12,4	12,4	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,4	12,4
2016_CC	10,1	6,9	10,1	10,1	10,1	10,0	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,0	10,0	10,0	10,0	9,8	10,1	10,1

5. CONCLUSIONS

Une analyse combinée houle / niveau réalisée au large de la baie de St-Brieuc a permis l'identification et la sélection de cinq tempêtes historiques susceptibles d'avoir généré des submersions sur le littoral d'étude : 20 février 1996, 10 mars 2008, 31 mars 2010, 1^{er} février 2014 et 9 mars 2016. Ces cinq états de mer tempêteux ont été propagés jusqu'à la côte avec leur niveau marin historique d'une part, et en tenant compte de l'élévation du niveau de la mer attendue du fait du changement climatique d'autre part.

Un modèle de propagation côtière SWAN a été mis en œuvre sur le golfe de St-Brieuc pour propager les états de mer issus de la base de données HOMERE de l'Ifremer, en prenant en compte les effets du vent et de la variation du niveau marin. Des grilles de calcul emboîtées ont permis d'arriver à une résolution spatiale de 10 m au droit du littoral d'étude.

Enfin, le code de calcul 1D HOCOULI, spécifique de la zone de déferlement, a été appliqué le long d'une vingtaine de profils d'estran de façon à calculer finement la hauteur de houle H_{m0} , la période de pic T_p et le niveau marin incluant l'action des vagues au pied des ouvrages de protection, à la cote de + 5 m IGN69.

Ces résultats peuvent ainsi être utilisés pour le calcul des franchissements des ouvrages de protection et l'estimation de l'aléa submersion marine du littoral étudié.

o0o

REFERENCES

- [1] *Référence altimétriques maritimes – Ports de France métropolitaine et d'outre-mer – Cote du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée* – Shom – 2020.
- [2] REFMAR – DATA.SHOM.FR – *Information géographique maritime et littorale de référence* – [10.17183/REFMAR#410](https://data.shom.fr/10.17183/REFMAR#410) – Shom – 2020
- [3] Cerema, 2018. Les niveaux marins extrêmes. Ports de métropole.

oOo

ANNEXE A

CLIMAT DES ETATS DE MER AUX POINTS D'ANALYSE

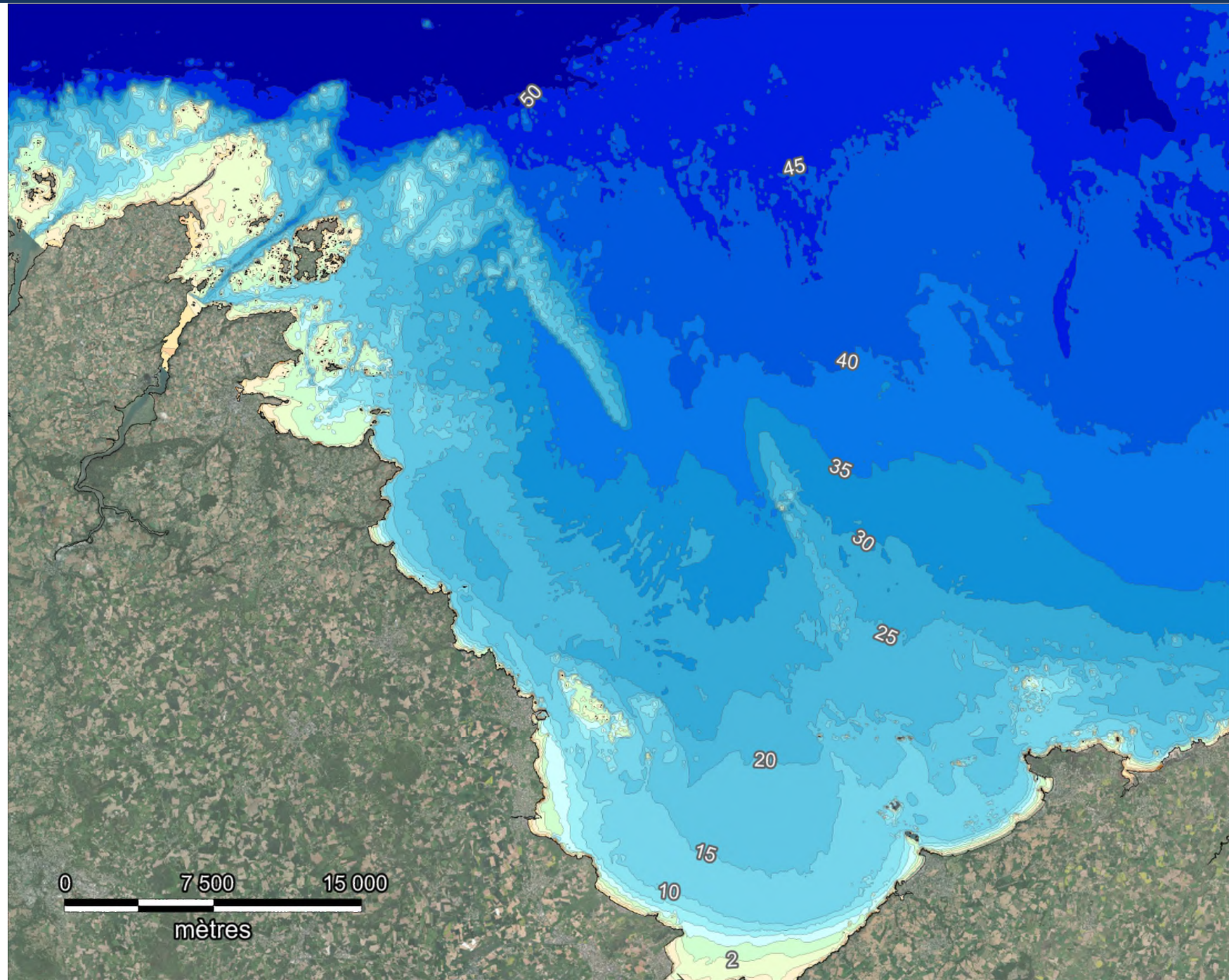
Erquy - Pléneuf

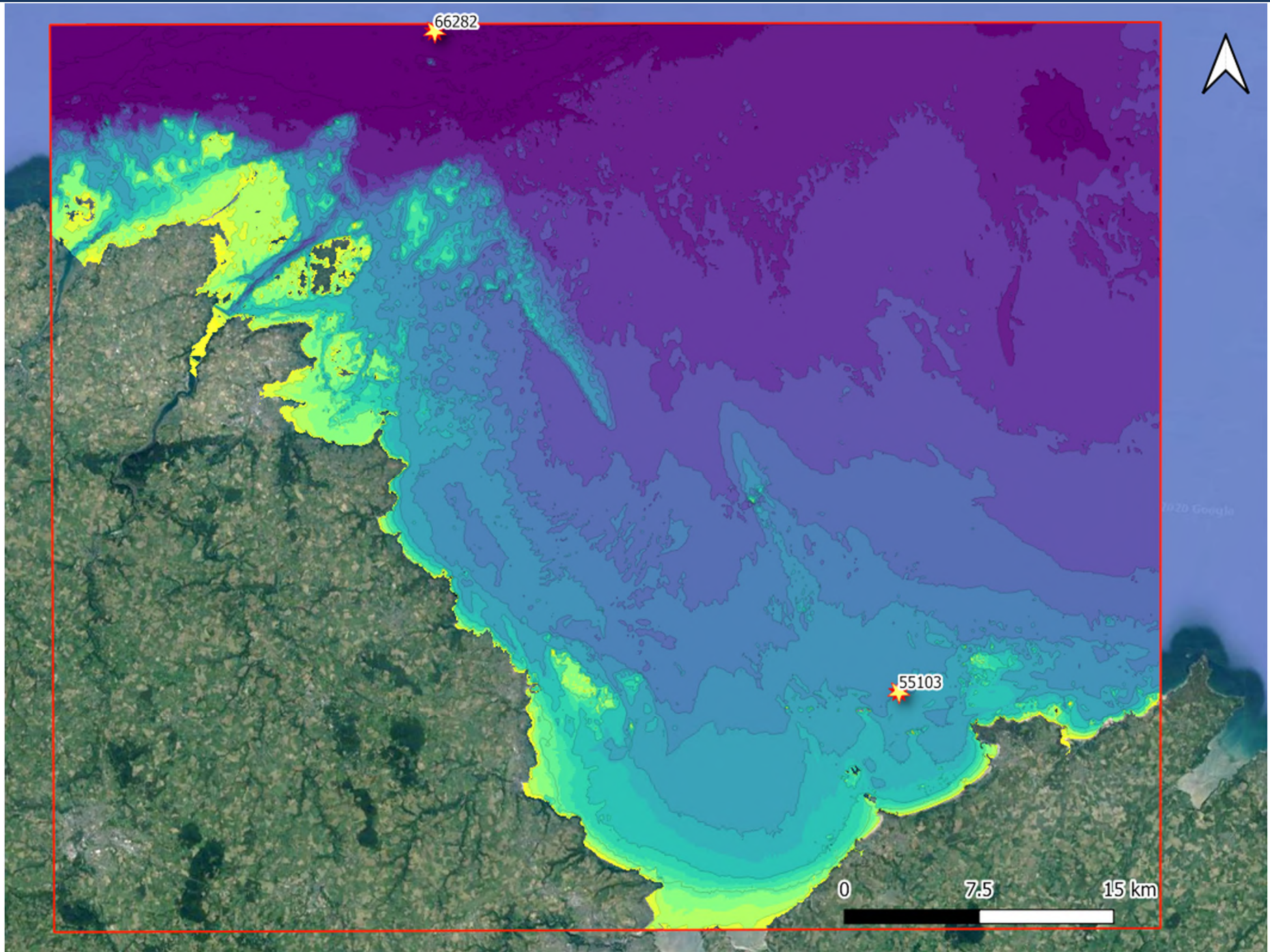
Détermination des conditions d'entrée pour le calcul du franchissement le long du littoral d'étude

Annexe A –

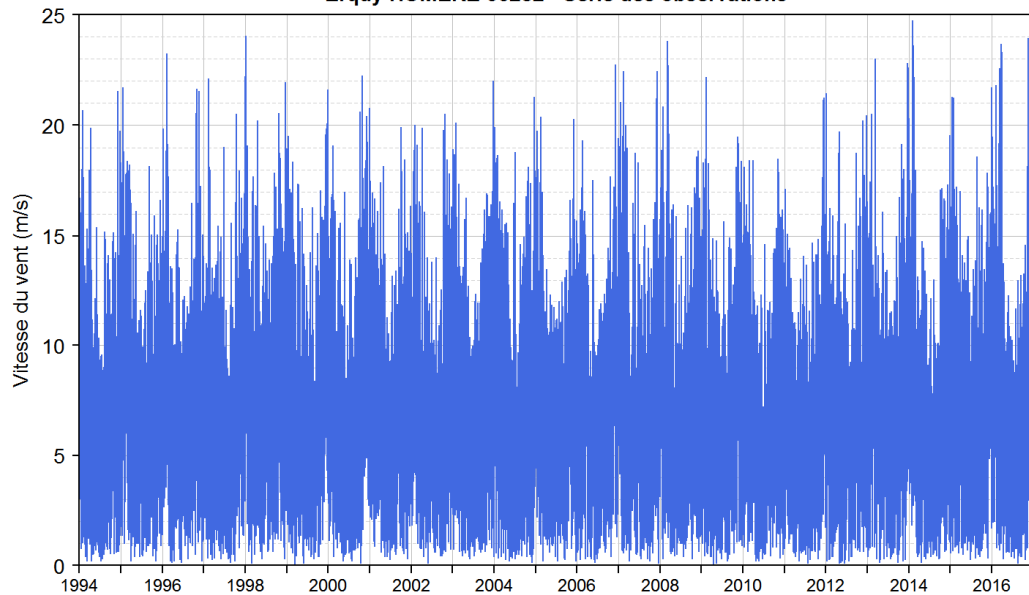
Analyse des climats de vagues au large et à la côte



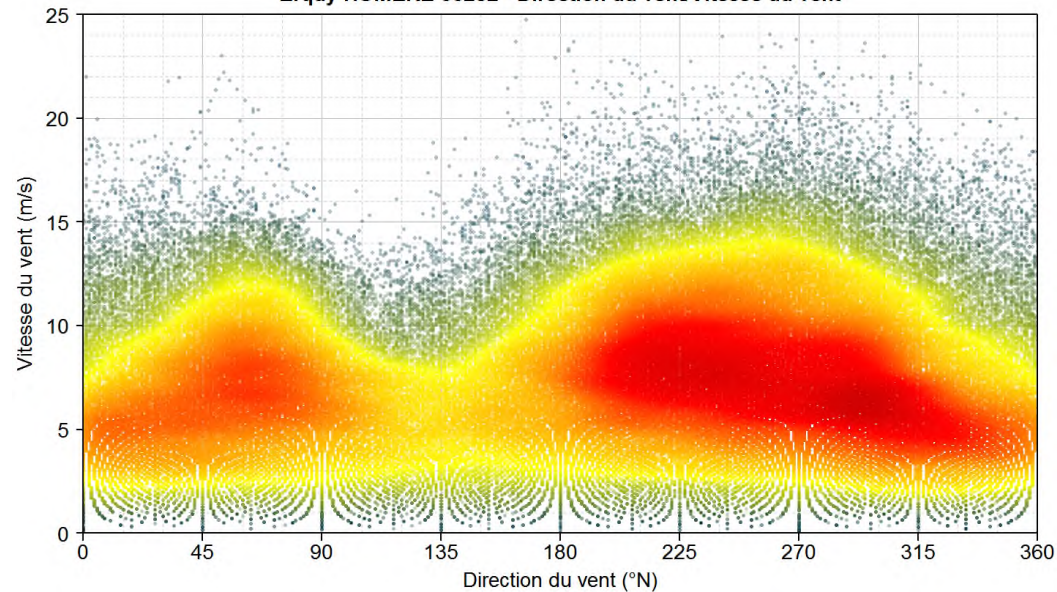




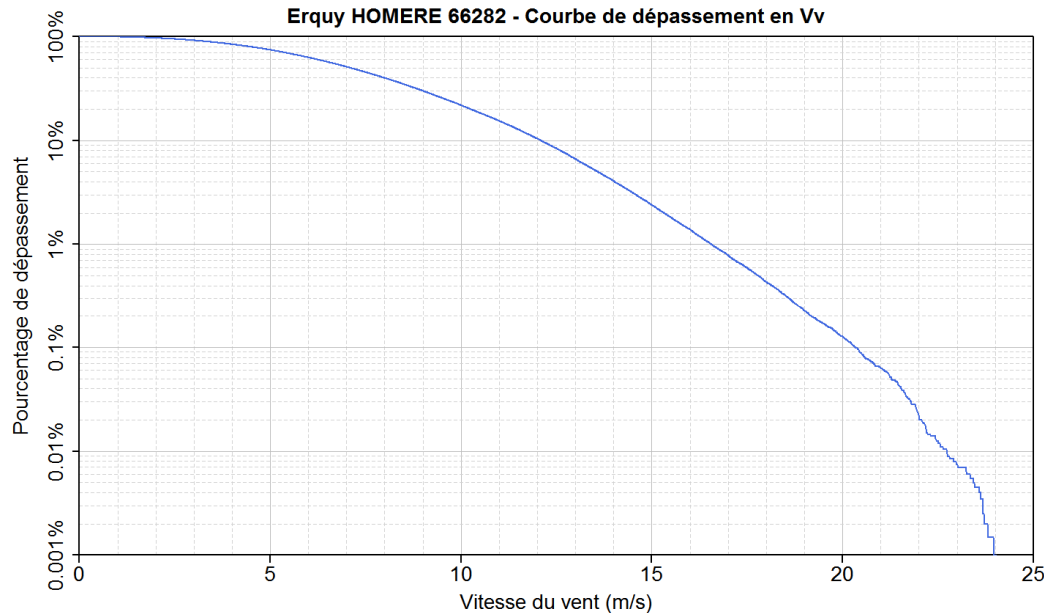
Erquy HOMERE 66282 - Série des observations



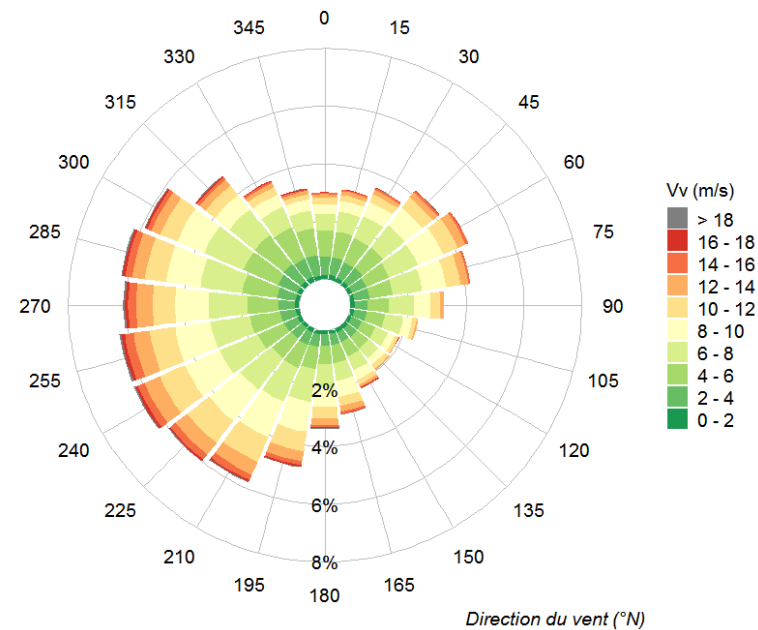
Erquy HOMERE 66282 - Direction du vent/Vitesse du vent



Erquy HOMERE 66282 - Courbe de dépassement en Vv



Erquy HOMERE 66282



Erquy HOMERE 66282 - Corrélogramme Vv / Dirv

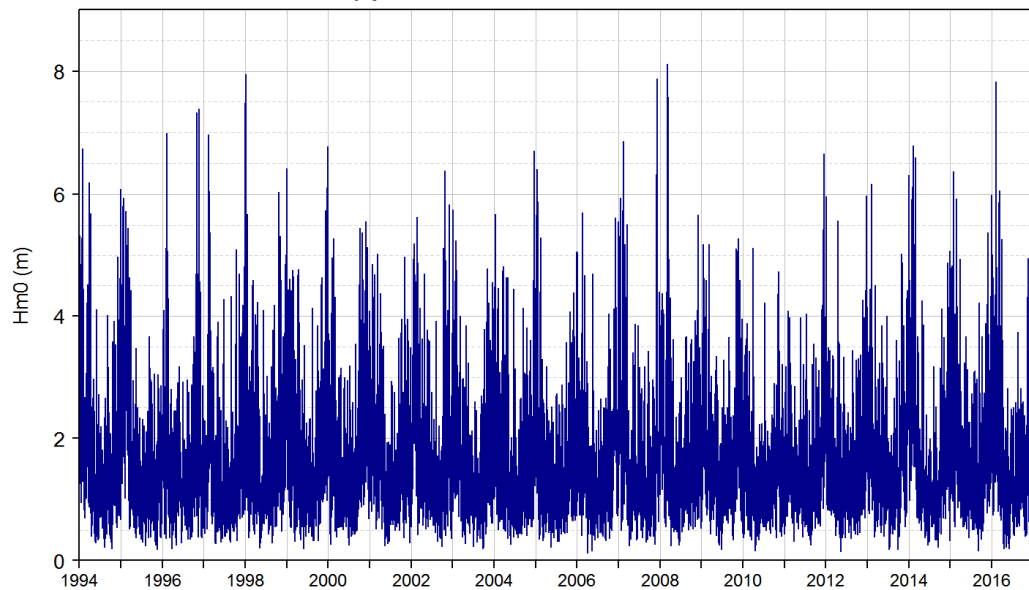
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	Total %	
Vitesse du vent (m/s)	[0,2]	0.15	0.16	0.15	0.15	0.14	0.14	0.15	0.13	0.11	0.13	0.13	0.11	0.12	0.13	0.14	0.12	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14	0.17	0.17	0.15	3.36
[2,4]	0.63	0.62	0.59	0.62	0.54	0.51	0.46	0.44	0.4	0.39	0.36	0.4	0.4	0.43	0.48	0.46	0.51	0.53	0.56	0.63	0.72	0.74	0.69	0.7	12.81	
[4,6]	0.92	0.9	0.91	0.89	0.86	0.84	0.75	0.65	0.52	0.5	0.57	0.63	0.65	0.8	0.86	0.88	1	1.06	1.07	1.22	1.32	1.29	1.17	0.95	21.2	
[6,8]	0.56	0.71	0.82	0.97	1.07	1.01	0.85	0.62	0.48	0.45	0.52	0.62	0.79	1.12	1.26	1.38	1.41	1.38	1.35	1.48	1.47	1.13	0.77	0.62	22.84	
[8,10]	0.35	0.38	0.55	0.77	0.96	0.85	0.57	0.34	0.24	0.26	0.34	0.56	0.67	1.05	1.34	1.38	1.32	1.25	1.18	1.21	1.03	0.64	0.47	0.39	18.08	
[10,12]	0.22	0.2	0.29	0.45	0.55	0.52	0.31	0.14	0.13	0.16	0.19	0.32	0.42	0.68	0.93	0.96	0.97	0.9	0.77	0.73	0.62	0.43	0.28	0.18	11.36	
[12,14]	0.12	0.13	0.16	0.22	0.31	0.25	0.13	0.04	0.04	0.05	0.08	0.19	0.22	0.35	0.48	0.52	0.58	0.56	0.57	0.45	0.34	0.24	0.15	0.12	6.31	
[14,16]	0.05	0.05	0.06	0.08	0.09	0.08	0.02	0.00	0.00	0.01	0.04	0.07	0.08	0.14	0.21	0.23	0.25	0.3	0.28	0.23	0.16	0.11	0.07	0.05	2.66	
[16,18]	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.06	0.09	0.12	0.1	0.1	0.07	0.05	0.03	0.03	0.95	
[18,20]	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00				0.00	0.00	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.04	0.04	0.03	0.02	0.01	0.00	0.01	0.31	
[20,22]	0.00		0.00	0.00	0.00							0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.1	
[22,24]				0.00	0.00							0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.02	
>24												0.00						0.00							0.00	
Total %	3.02	3.17	3.54	4.17	4.53	4.21	3.25	2.37	1.91	1.97	2.24	2.93	3.41	4.78	5.81	6.01	6.3	6.29	6.09	6.25	5.9	4.82	3.82	3.2	100%	

Dirv : 15 =]7.5,22.5]

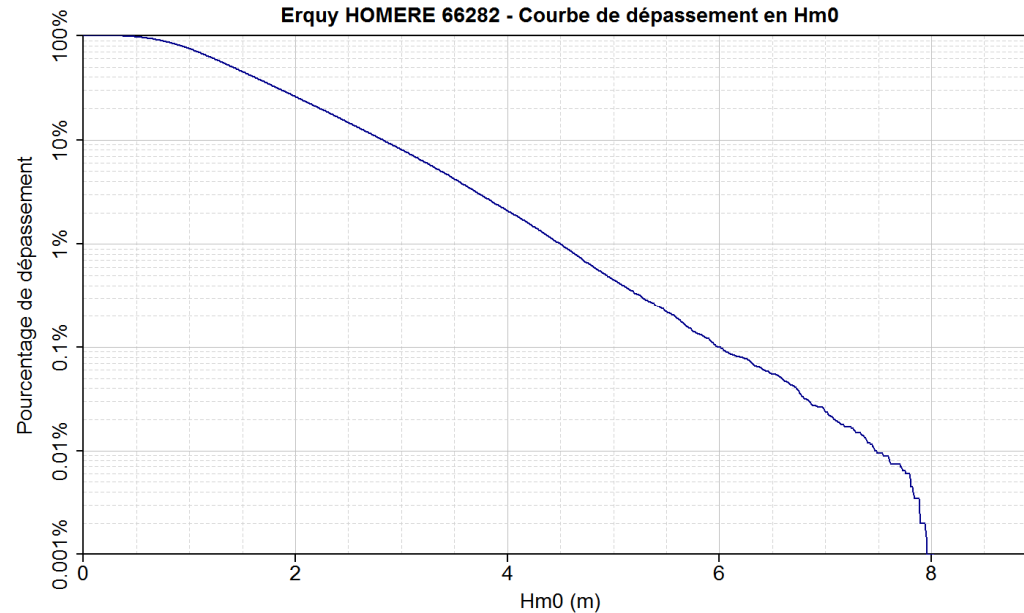
Vv Calmes : 0 %

Direction du vent (°N)

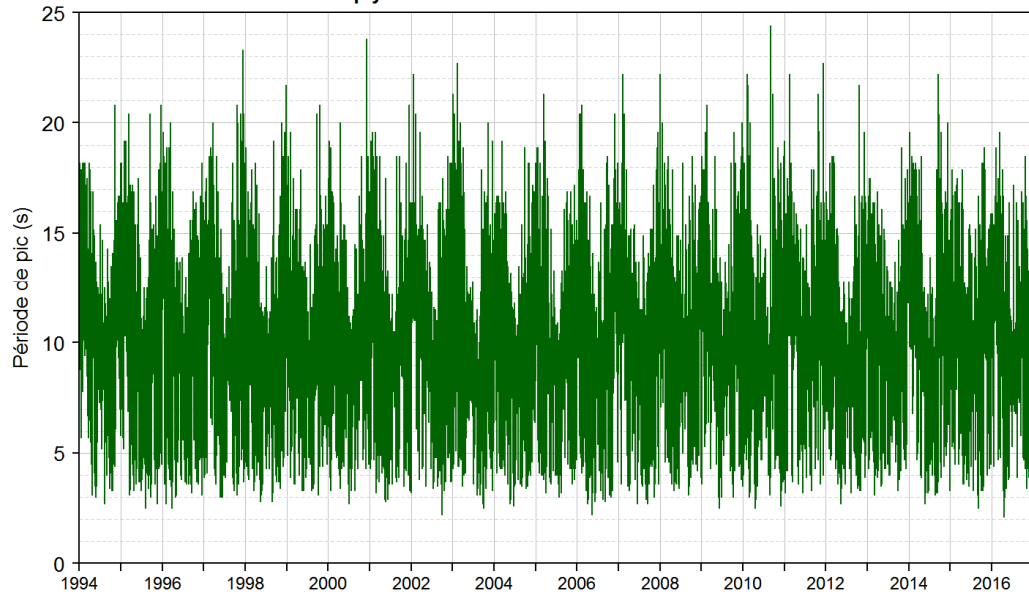
Erquy HOMERE 66282 - Série des observations



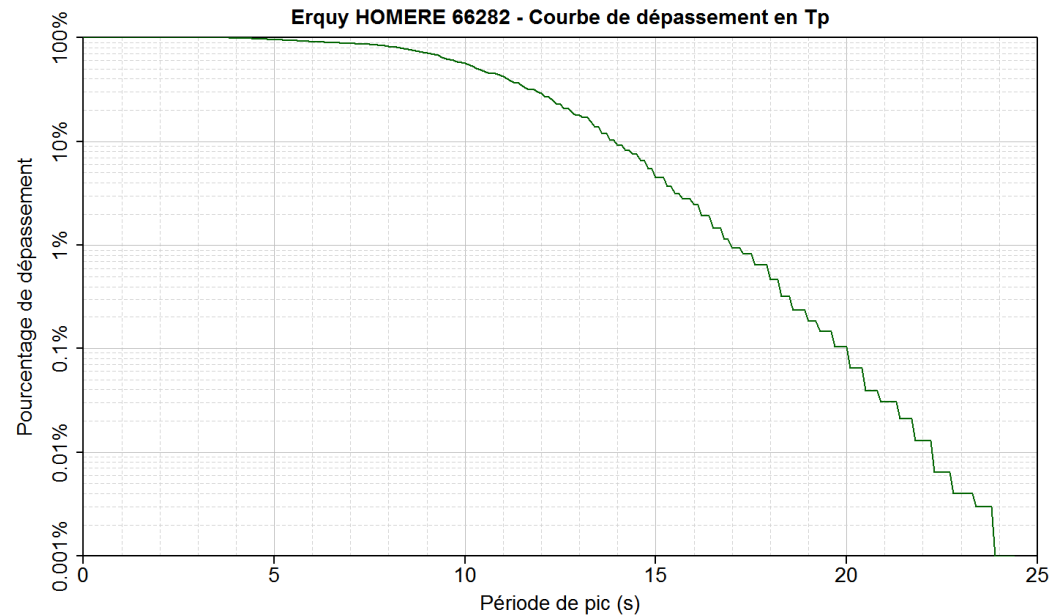
Erquy HOMERE 66282 - Courbe de dépassement en Hm0



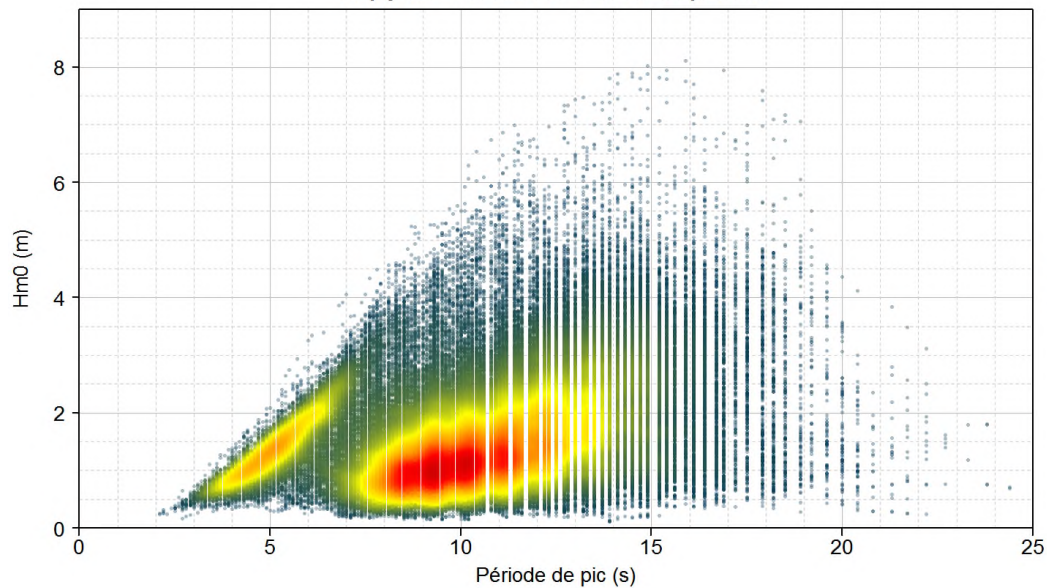
Erquy HOMERE 66282 - Série des observations



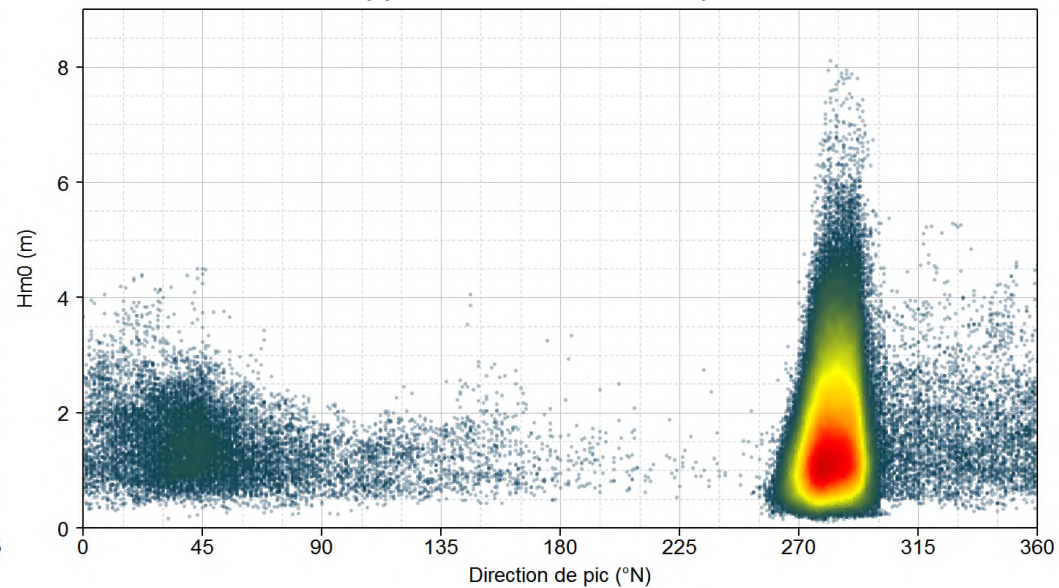
Erquy HOMERE 66282 - Courbe de dépassement en Tp



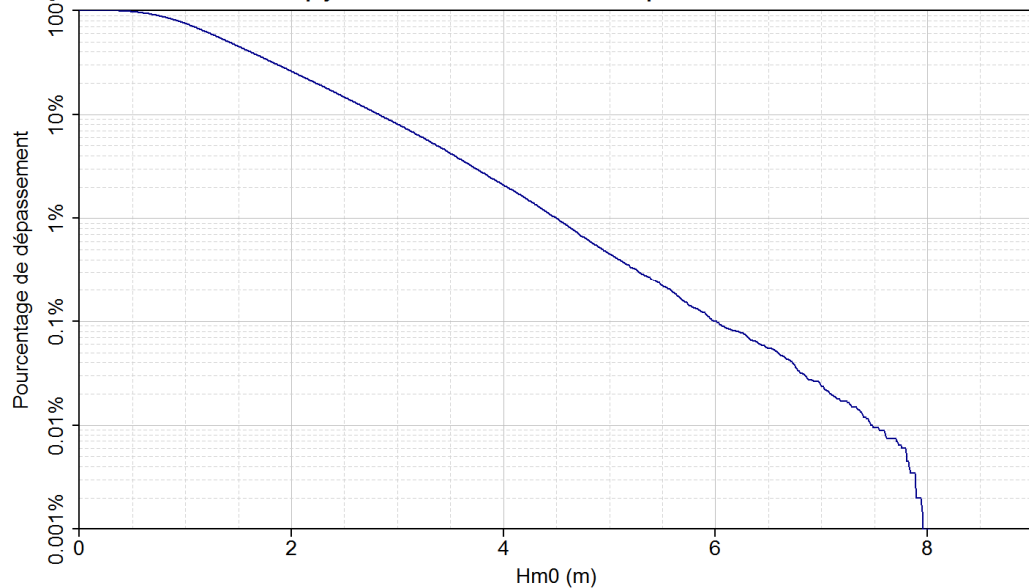
Erquy HOMERE 66282 - Période de pic/Hm0



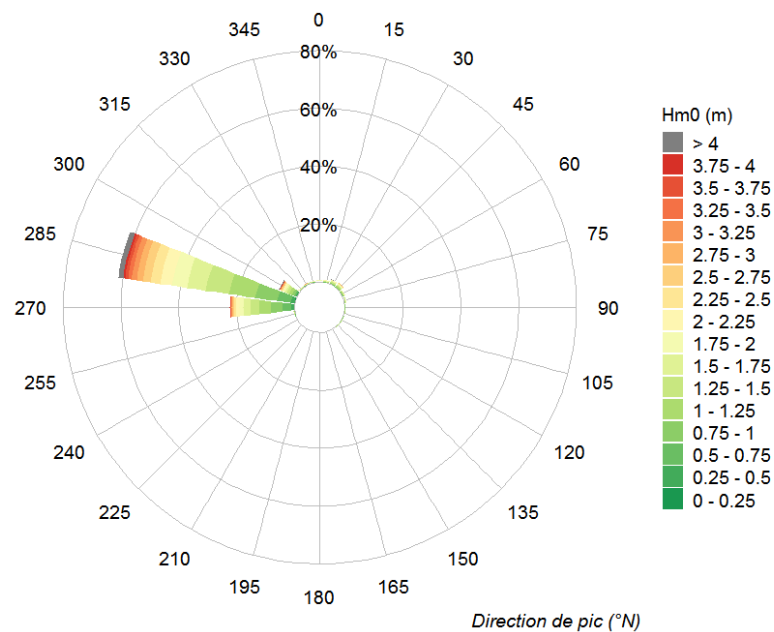
Erquy HOMERE 66282 - Direction de pic/Hm0

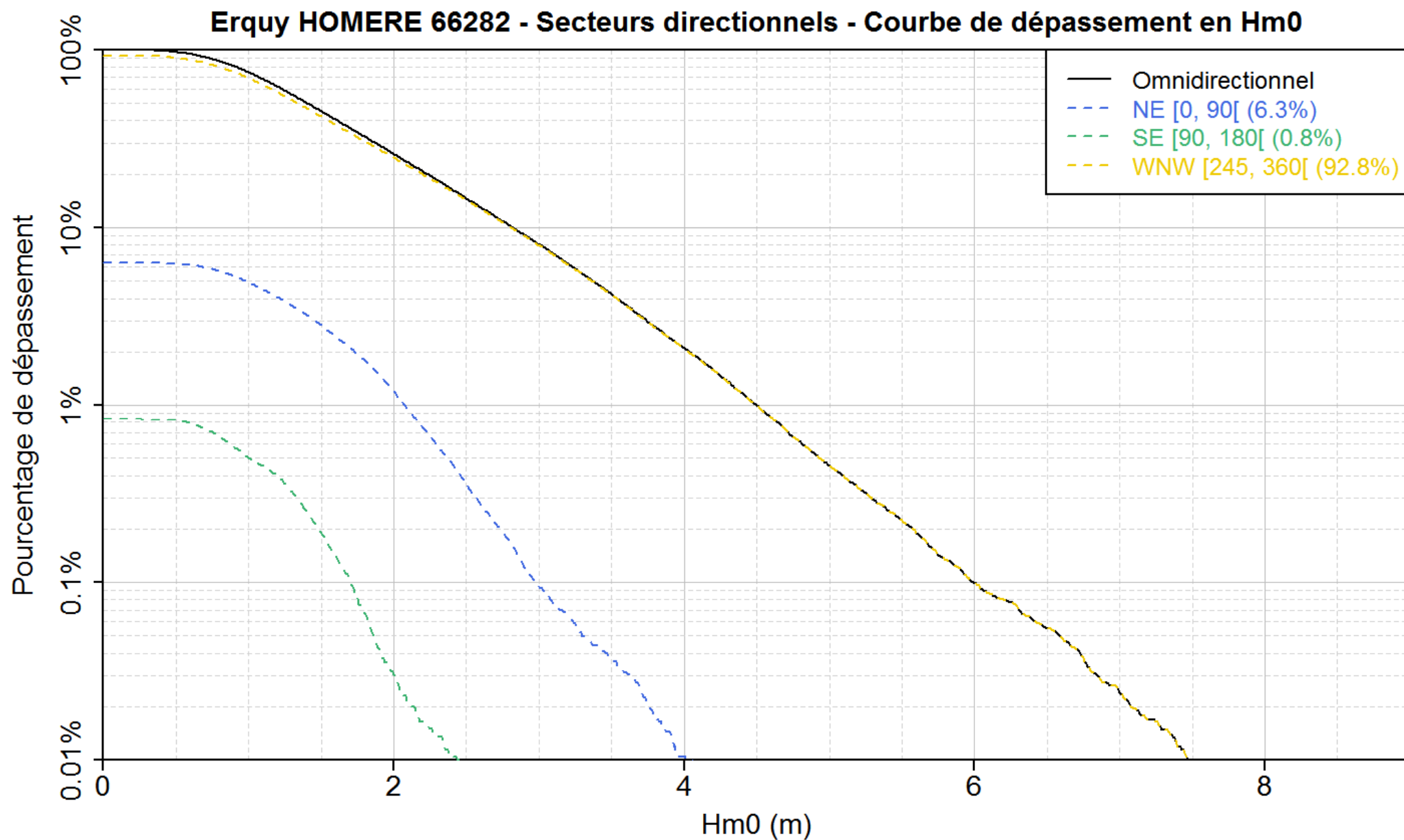


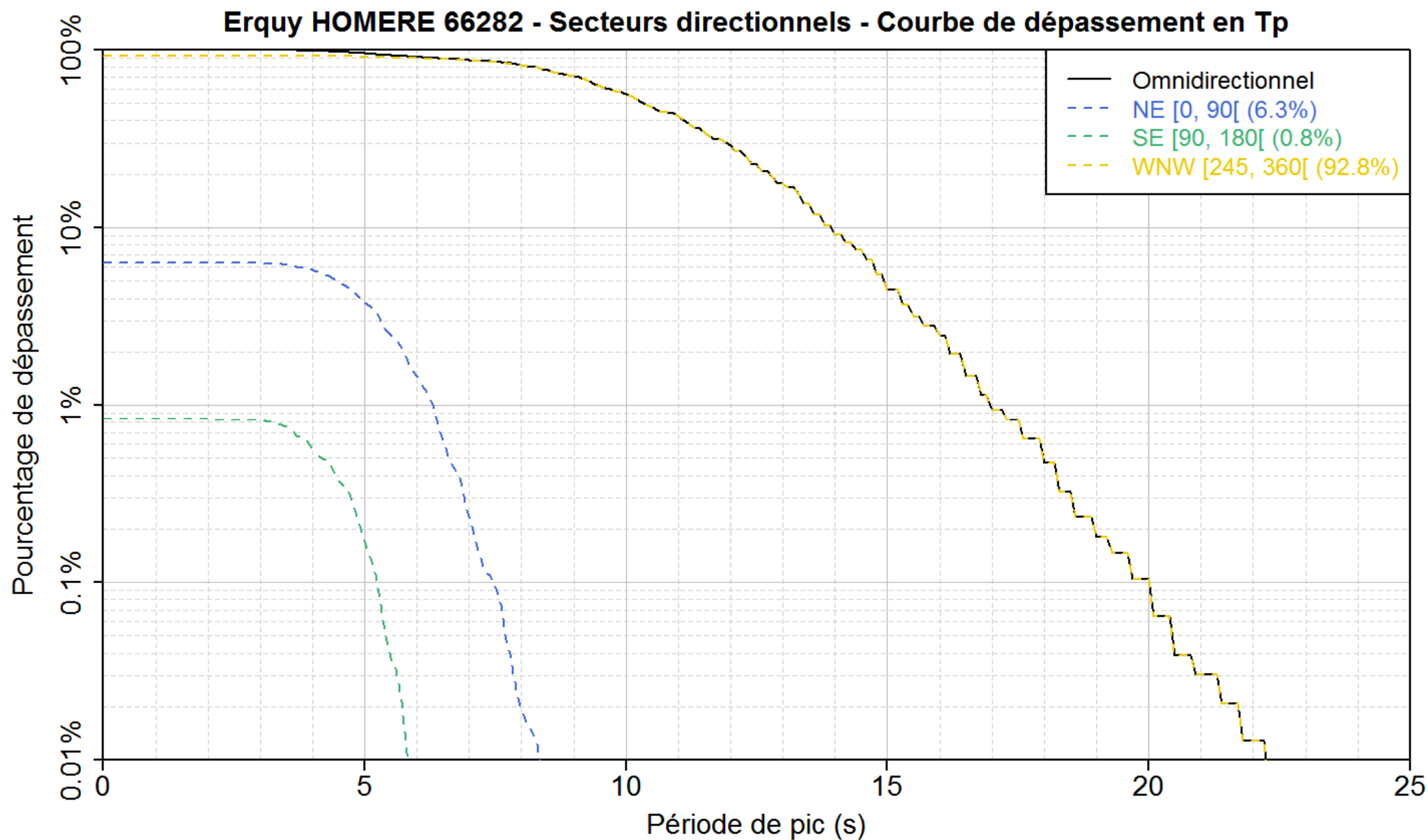
Erquy HOMERE 66282 - Courbe de dépassement en Hm0



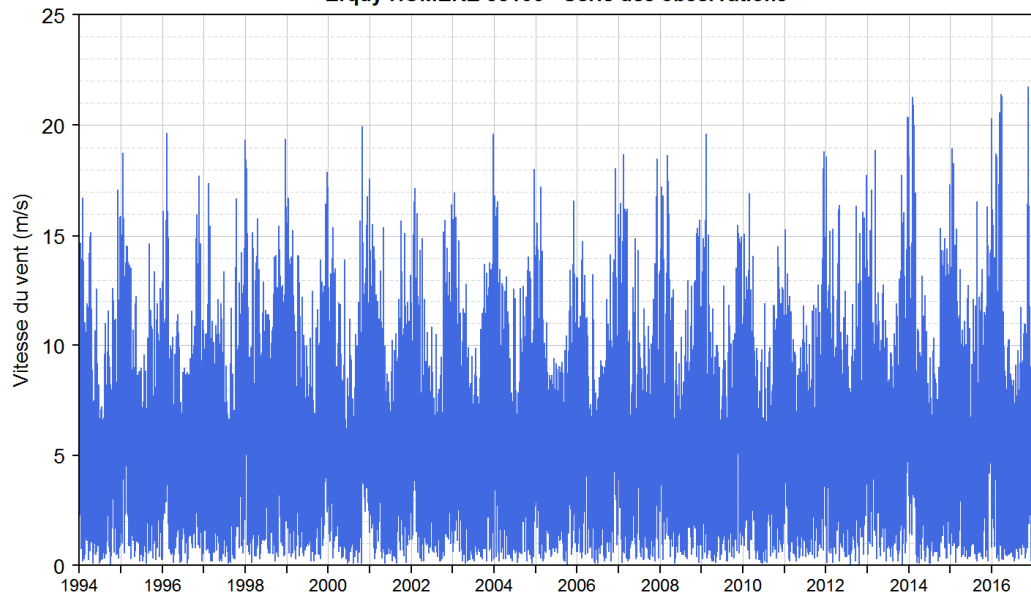
Erquy HOMERE 66282



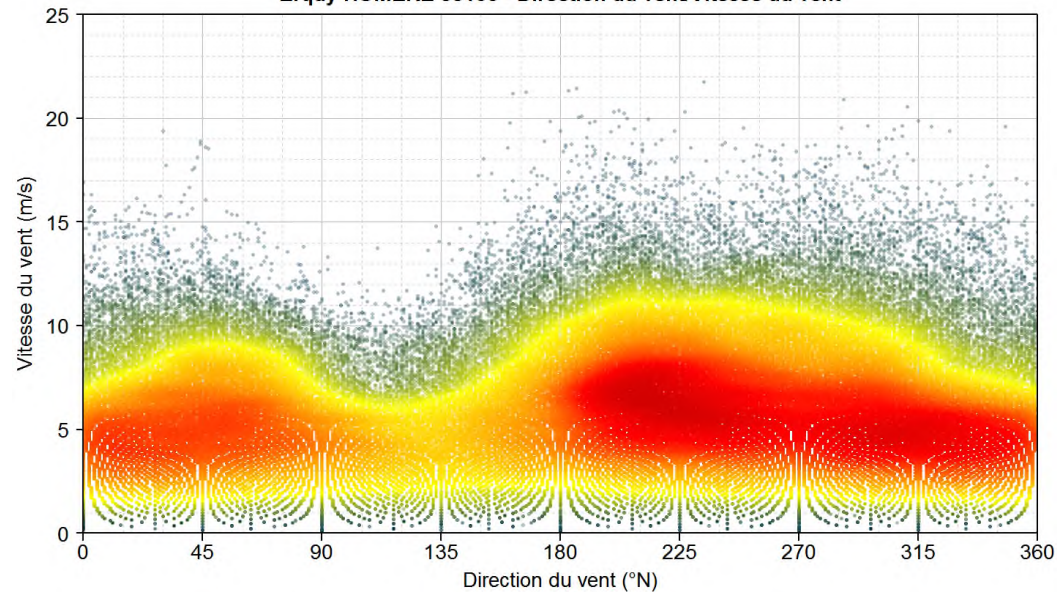




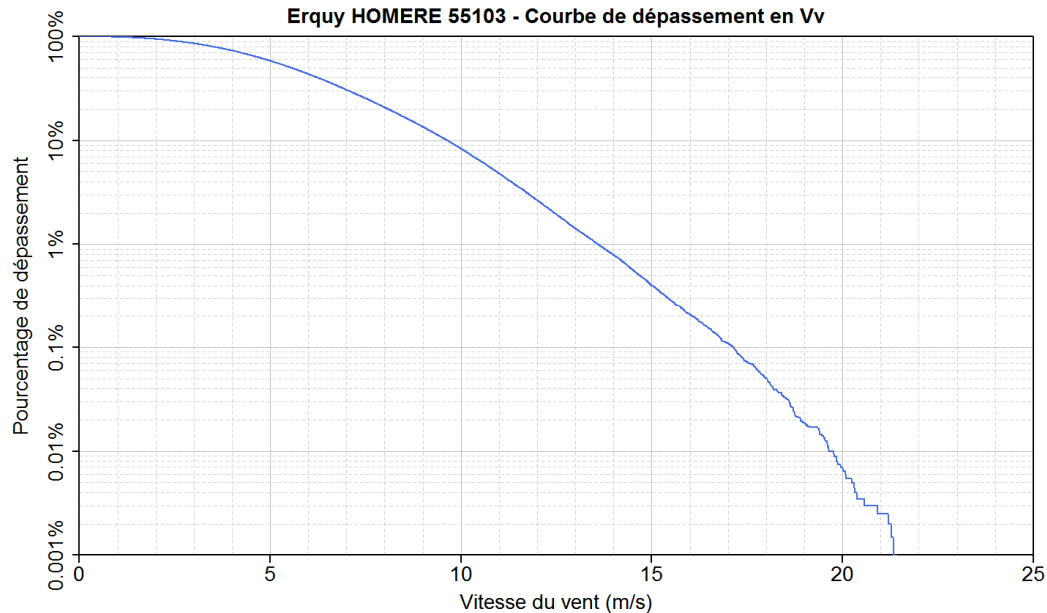
Erquy HOMERE 55103 - Série des observations



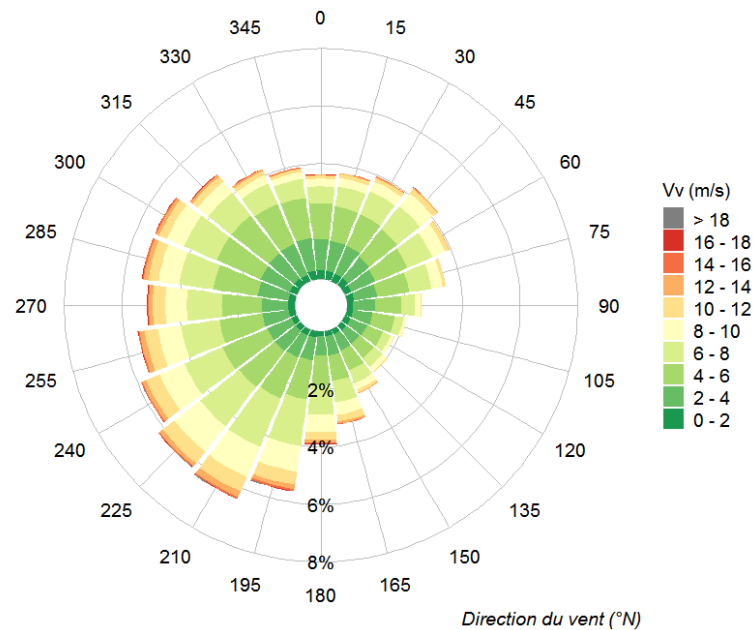
Erquy HOMERE 55103 - Direction du vent/Vitesse du vent



Erquy HOMERE 55103 - Courbe de dépassement en Vv



Erquy HOMERE 55103



Erquy HOMERE 55103 - Corrélogramme Vv / Dirv

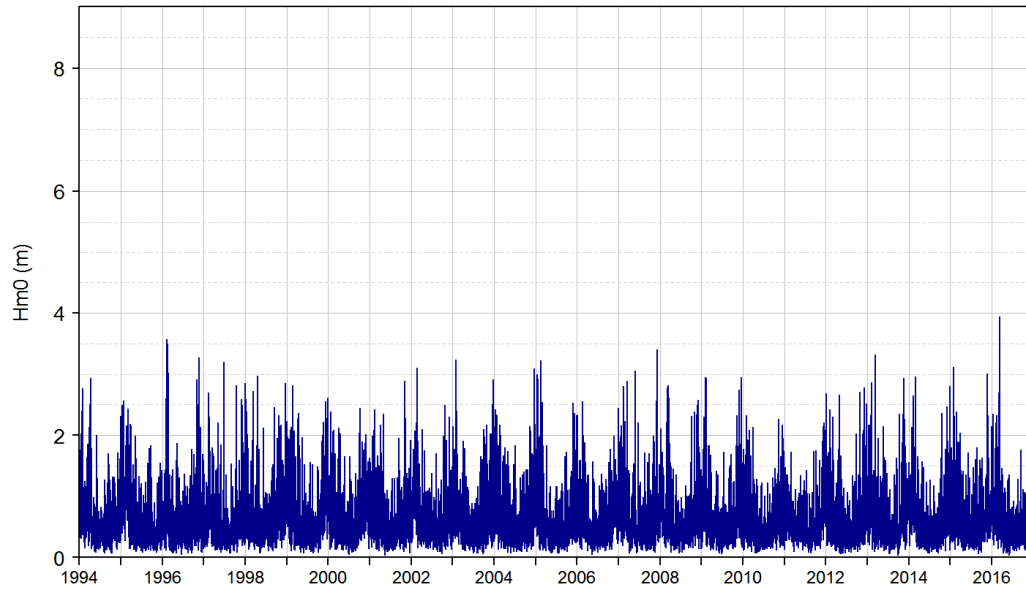
	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	Total %	
Vitesse du vent (m/s)	[0,2]	0.31	0.3	0.28	0.29	0.24	0.24	0.2	0.21	0.21	0.22	0.2	0.19	0.18	0.22	0.21	0.22	0.21	0.21	0.22	0.24	0.26	0.28	0.26	0.29	5.7
[2,4]	1.05	1.05	1.04	0.95	0.91	0.82	0.78	0.68	0.62	0.58	0.61	0.69	0.68	0.82	0.85	0.88	0.92	0.94	0.92	1.08	1.1	1.12	1.17	1.16	1.16	21.4
[4,6]	1.28	1.21	1.19	1.22	1.2	1.12	0.92	0.77	0.6	0.63	0.75	0.88	1.04	1.37	1.55	1.6	1.66	1.49	1.39	1.55	1.67	1.64	1.5	1.41	1.41	29.65
[6,8]	0.57	0.69	0.88	1.02	0.93	0.79	0.45	0.31	0.28	0.39	0.49	0.74	1	1.62	1.84	1.73	1.45	1.34	1.21	1.19	1.23	1.02	0.77	0.65	0.65	22.58
[8,10]	0.26	0.3	0.38	0.57	0.49	0.39	0.21	0.11	0.13	0.2	0.23	0.46	0.6	0.91	1.12	1.12	0.94	0.83	0.76	0.74	0.65	0.48	0.3	0.23	0.23	12.41
[10,12]	0.11	0.14	0.14	0.19	0.14	0.11	0.04	0.02	0.02	0.04	0.1	0.23	0.29	0.47	0.55	0.51	0.51	0.47	0.43	0.36	0.29	0.23	0.15	0.11	0.11	5.64
[12,14]	0.03	0.03	0.04	0.05	0.02	0.01	0.00	0.00		0.01	0.04	0.07	0.1	0.15	0.21	0.15	0.14	0.18	0.14	0.16	0.11	0.09	0.07	0.04	0.04	1.85
[14,16]	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00				0.00	0.00	0.02	0.03	0.06	0.06	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	0.04	0.04	0.03	0.02	0.02	0.58
[16,18]	0.00	0.00	0.00	0.00							0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.16
[18,20]			0.00	0.00							0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04
[20,22]												0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			0.00		0.00				0.01
[22,24]																										
>24																										
Total %	3.63	3.74	3.96	4.29	3.96	3.47	2.59	2.1	1.87	2.07	2.43	3.28	3.94	5.63	6.42	6.27	5.89	5.51	5.13	5.39	5.38	4.9	4.24	3.92	100%	

Dirv : 15 =]7.5,22.5]

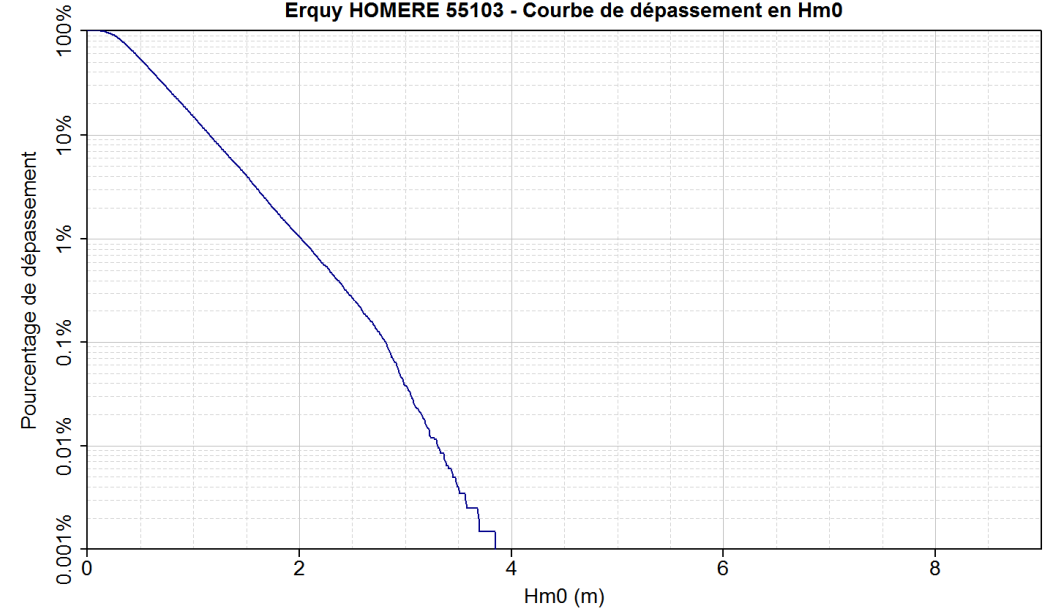
Vv Calmes : 0 %

Direction du vent (°N)

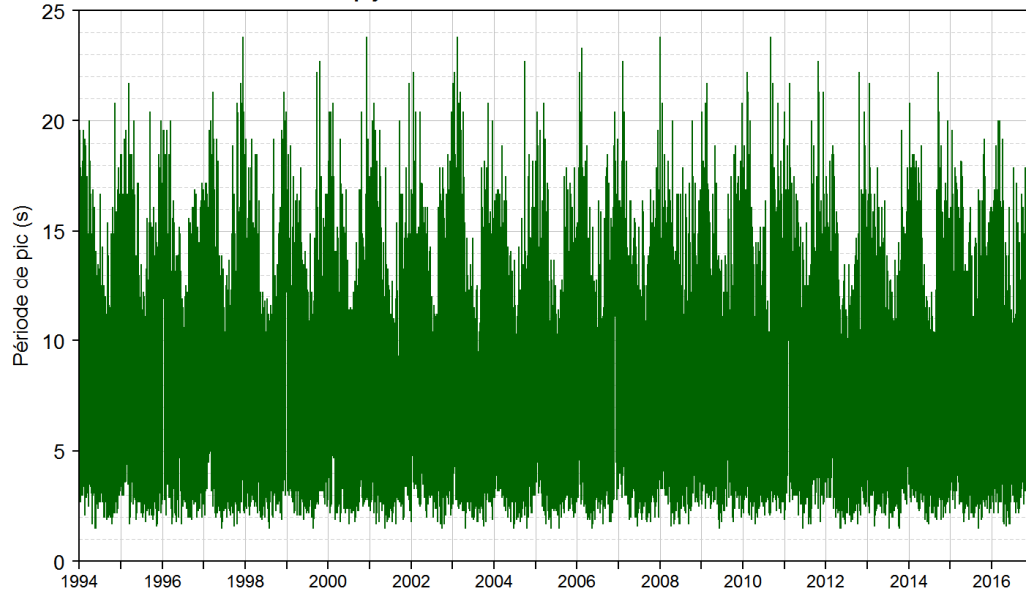
Erquy HOMERE 55103 - Série des observations



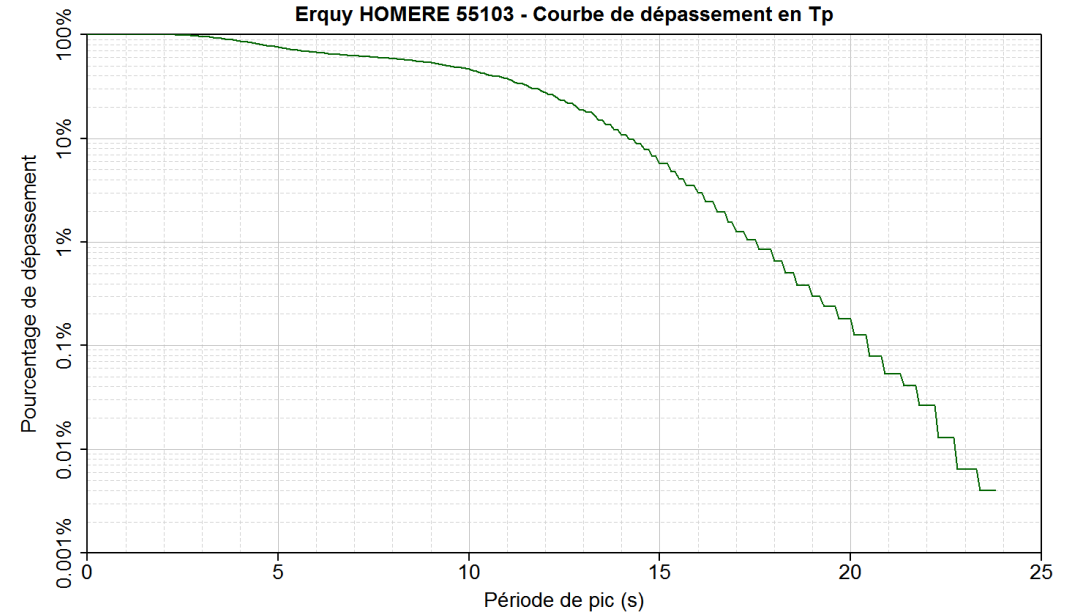
Erquy HOMERE 55103 - Courbe de dépassement en Hm0



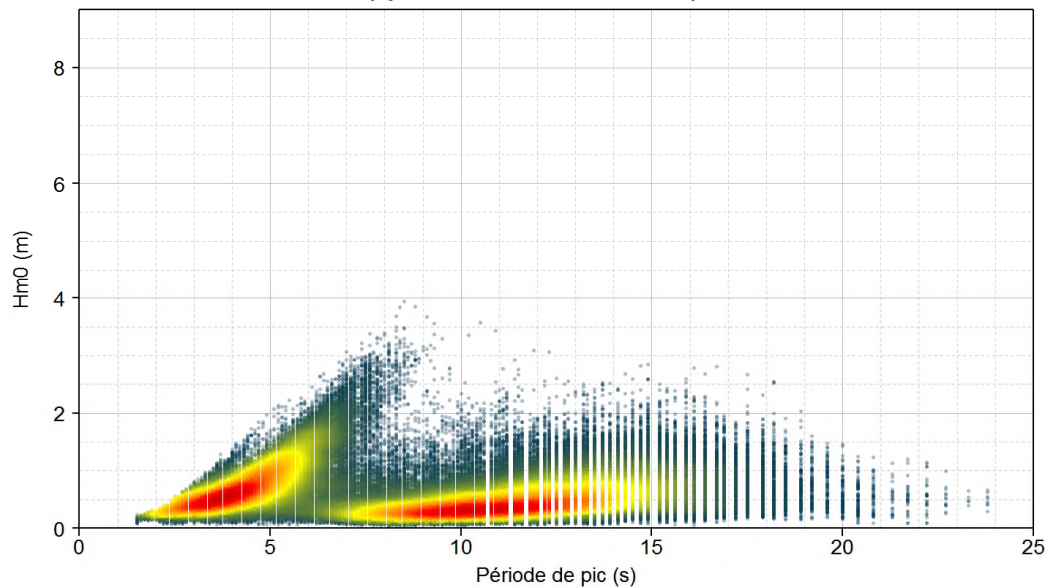
Erquy HOMERE 55103 - Série des observations



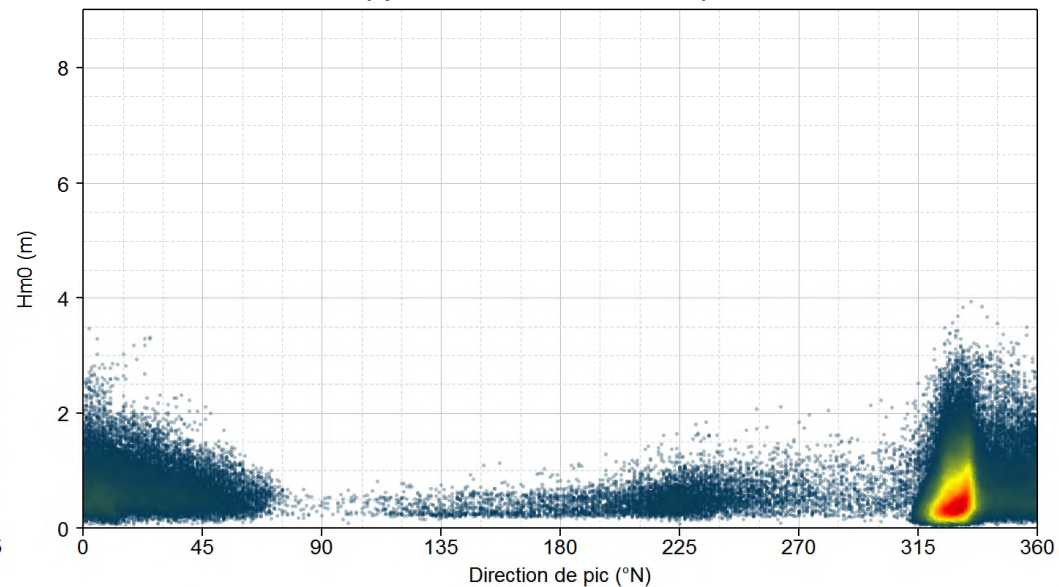
Erquy HOMERE 55103 - Courbe de dépassement en Tp



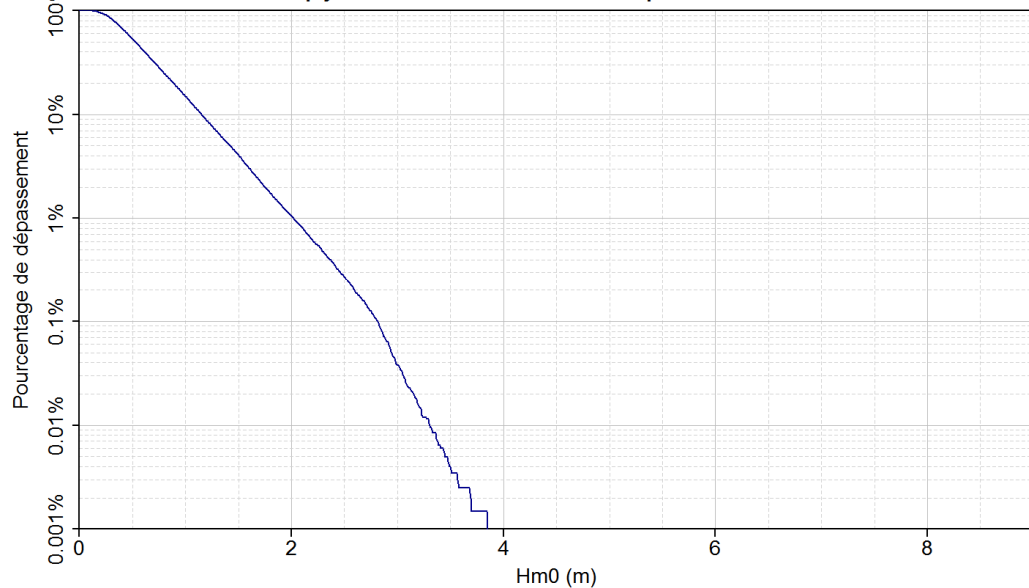
Erquy HOMERE 55103 - Période de pic/Hm0



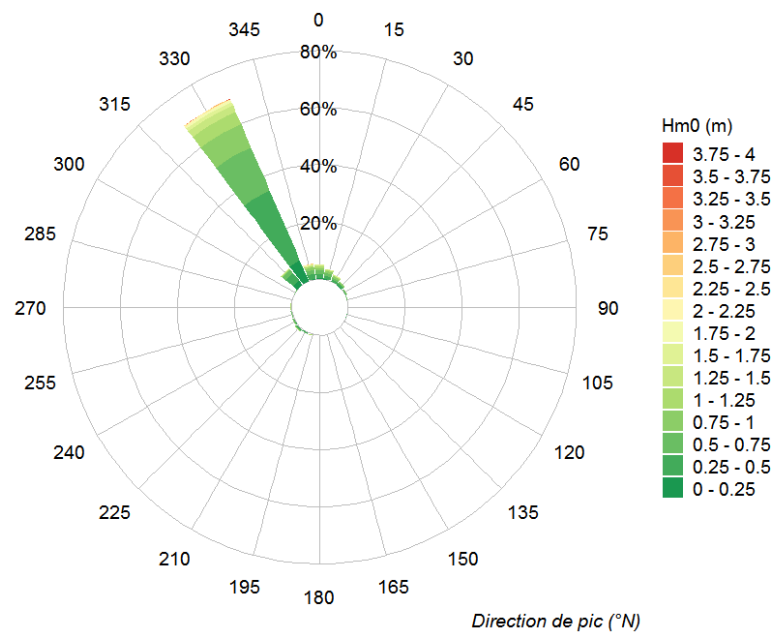
Erquy HOMERE 55103 - Direction de pic/Hm0

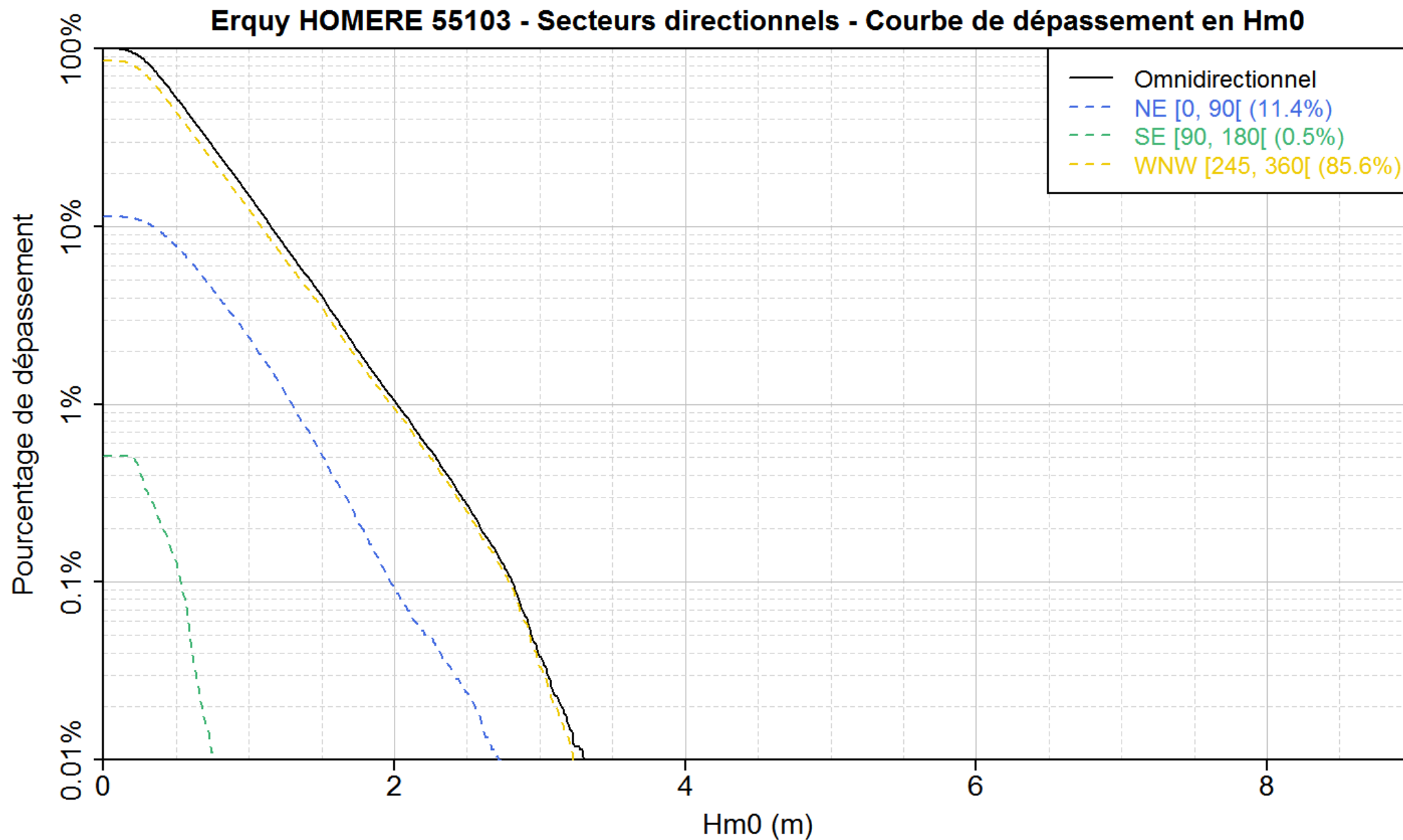


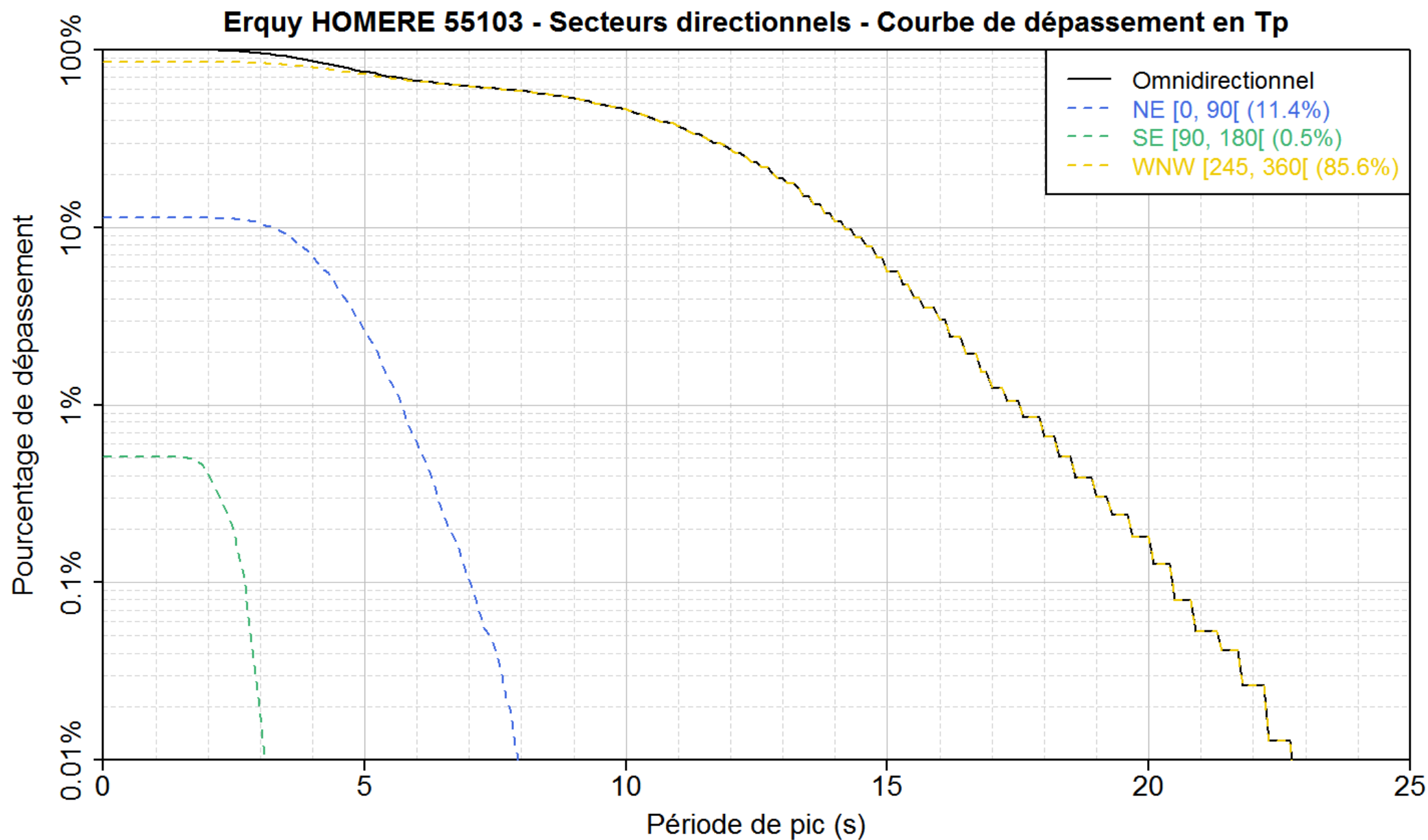
Erquy HOMERE 55103 - Courbe de dépassement en Hm0



Erquy HOMERE 55103







ANNEXE B

ANALYSE DES COMBINAISONS HOULE- NIVEAU

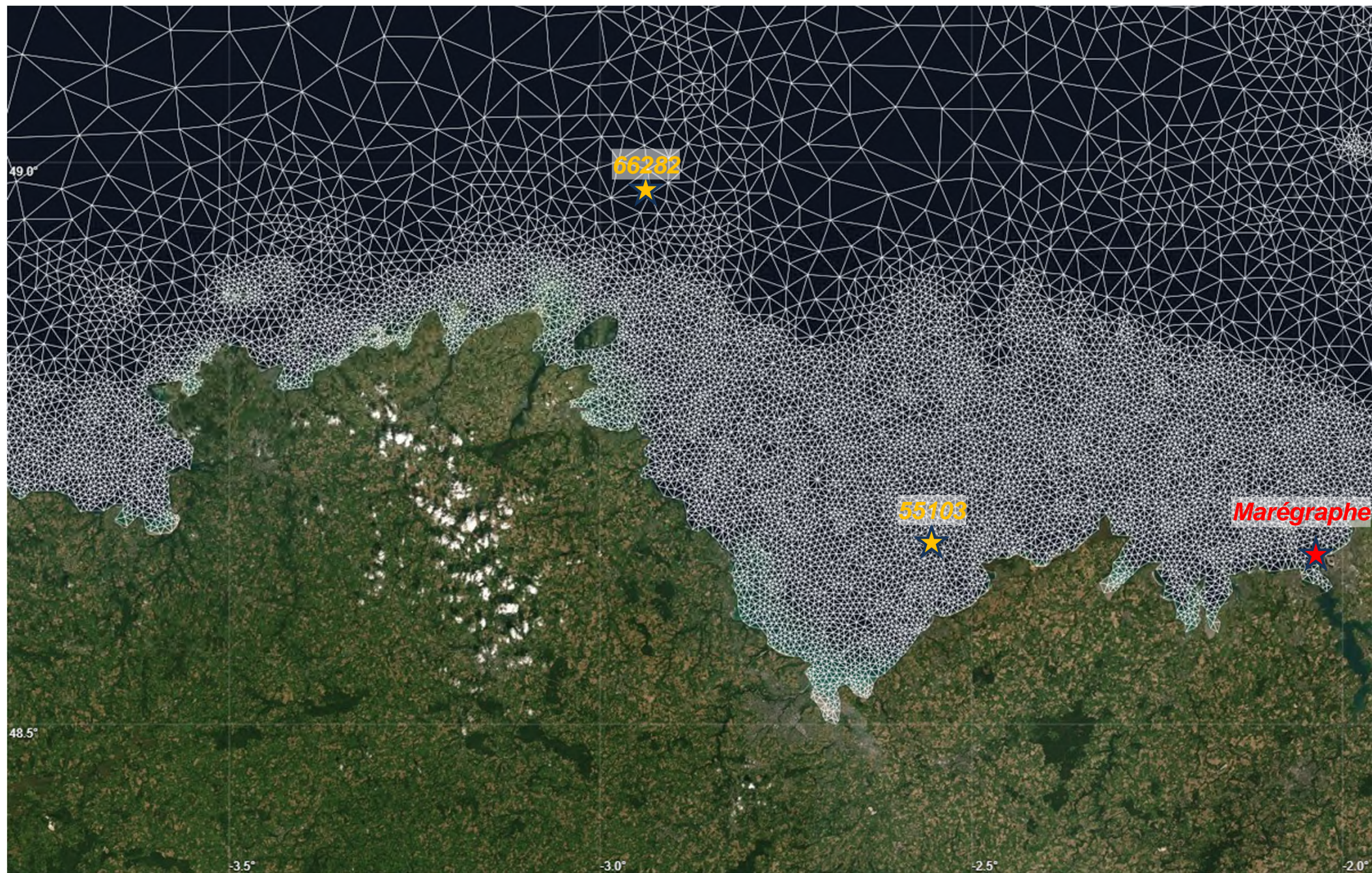
Erquy - Pléneuf

Détermination des conditions d'entrée pour le calcul du franchissement le long du littoral d'étude

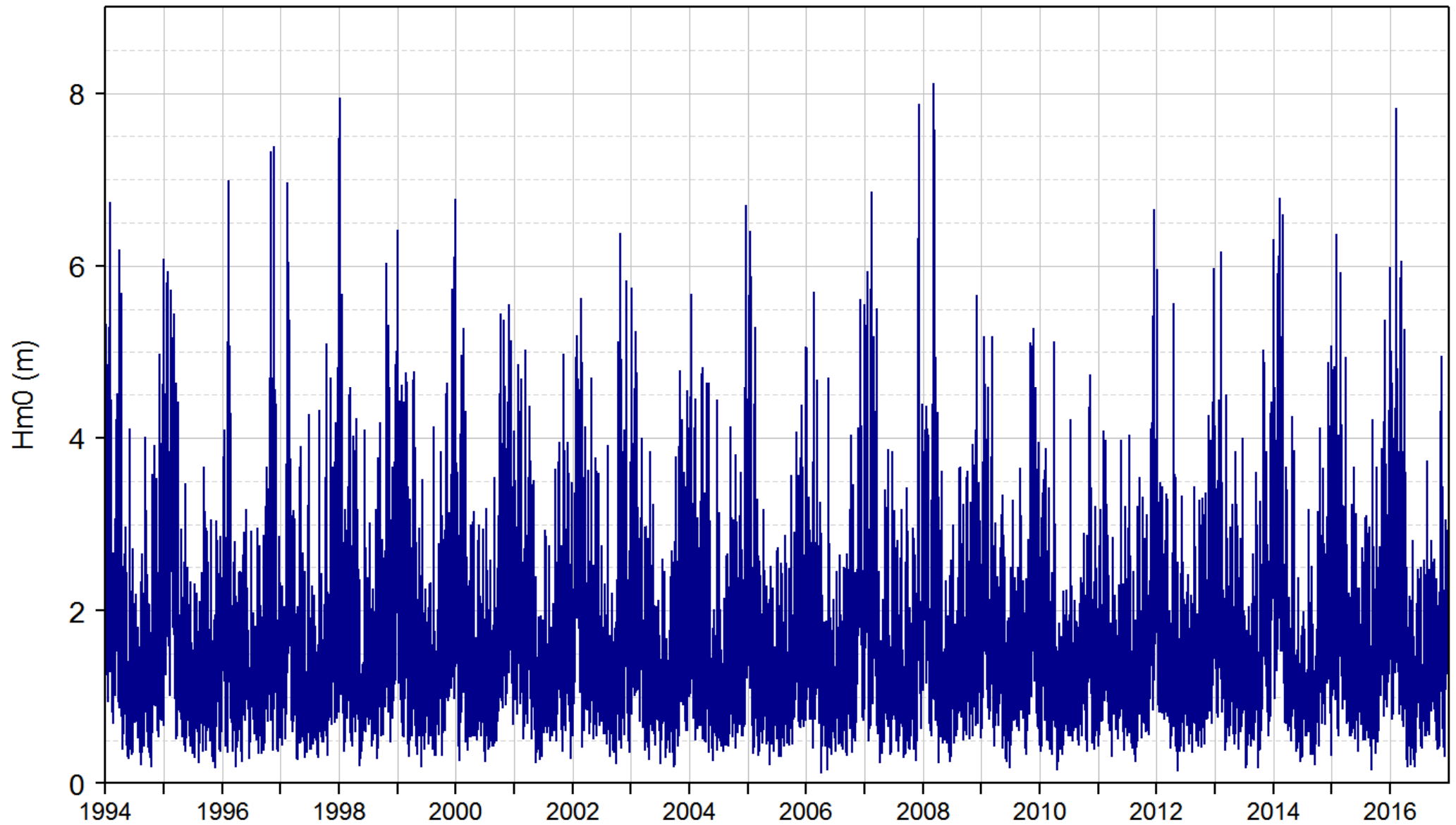
*Annexe B - Analyse des combinaisons houle –
niveau disponibles*



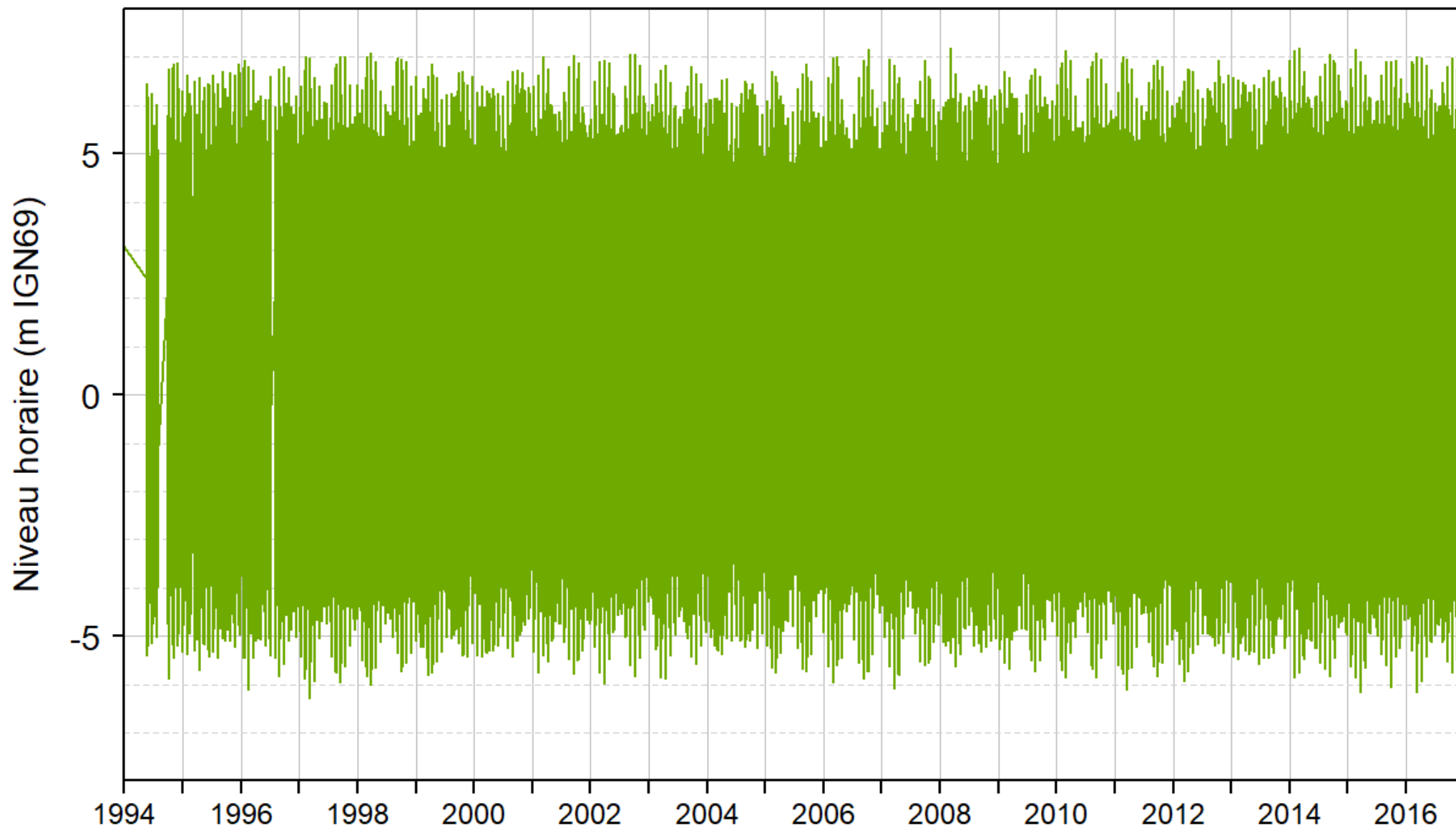
DONNÉES DISPONIBLES



Erquy HOMERE 66282 - Série des observations



St-Malo Marégraphe - Série des observations



ECHANTILLONNAGE

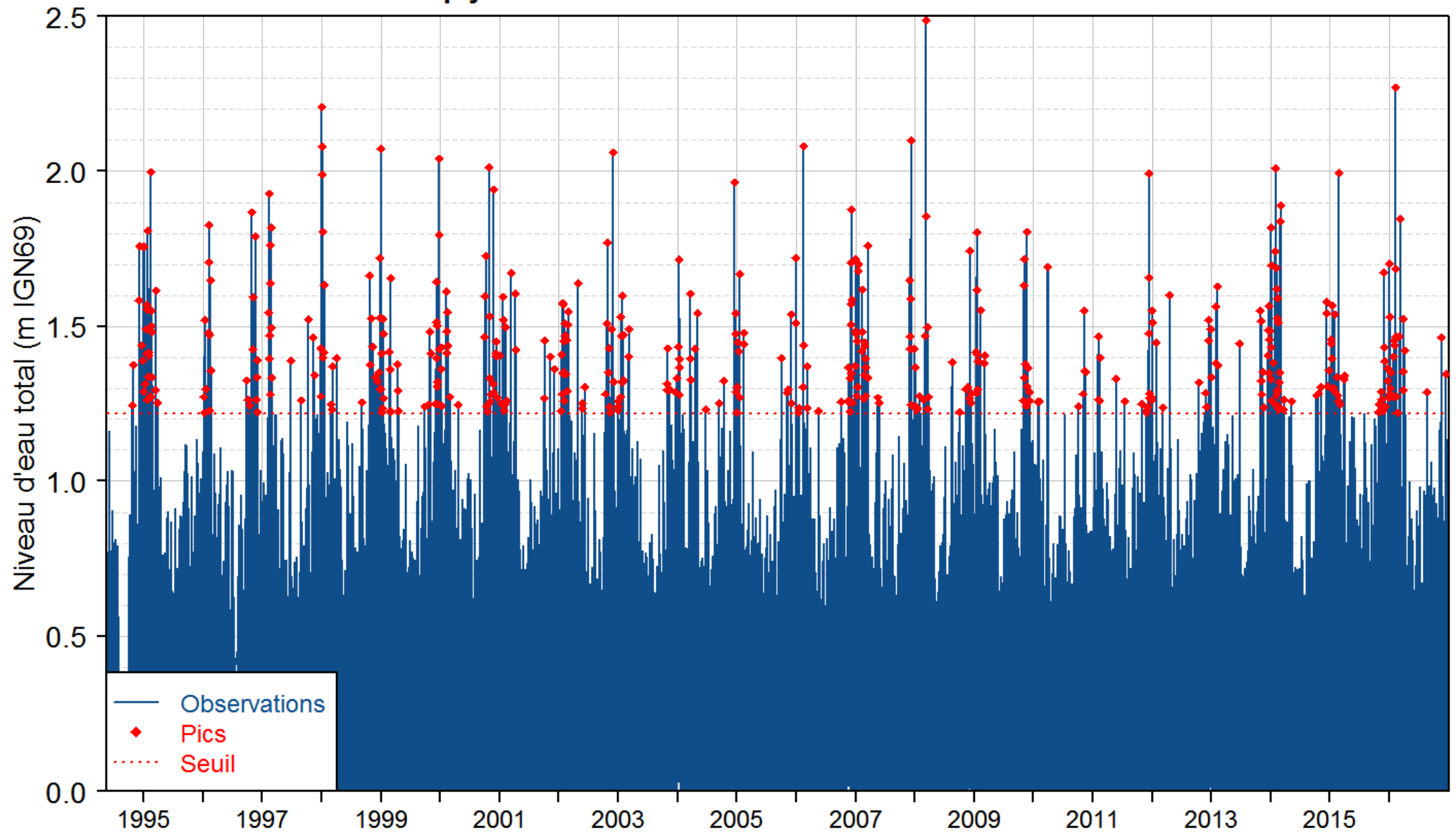
SIGNIFICATION DE L'ÉCHANTILLONNAGE

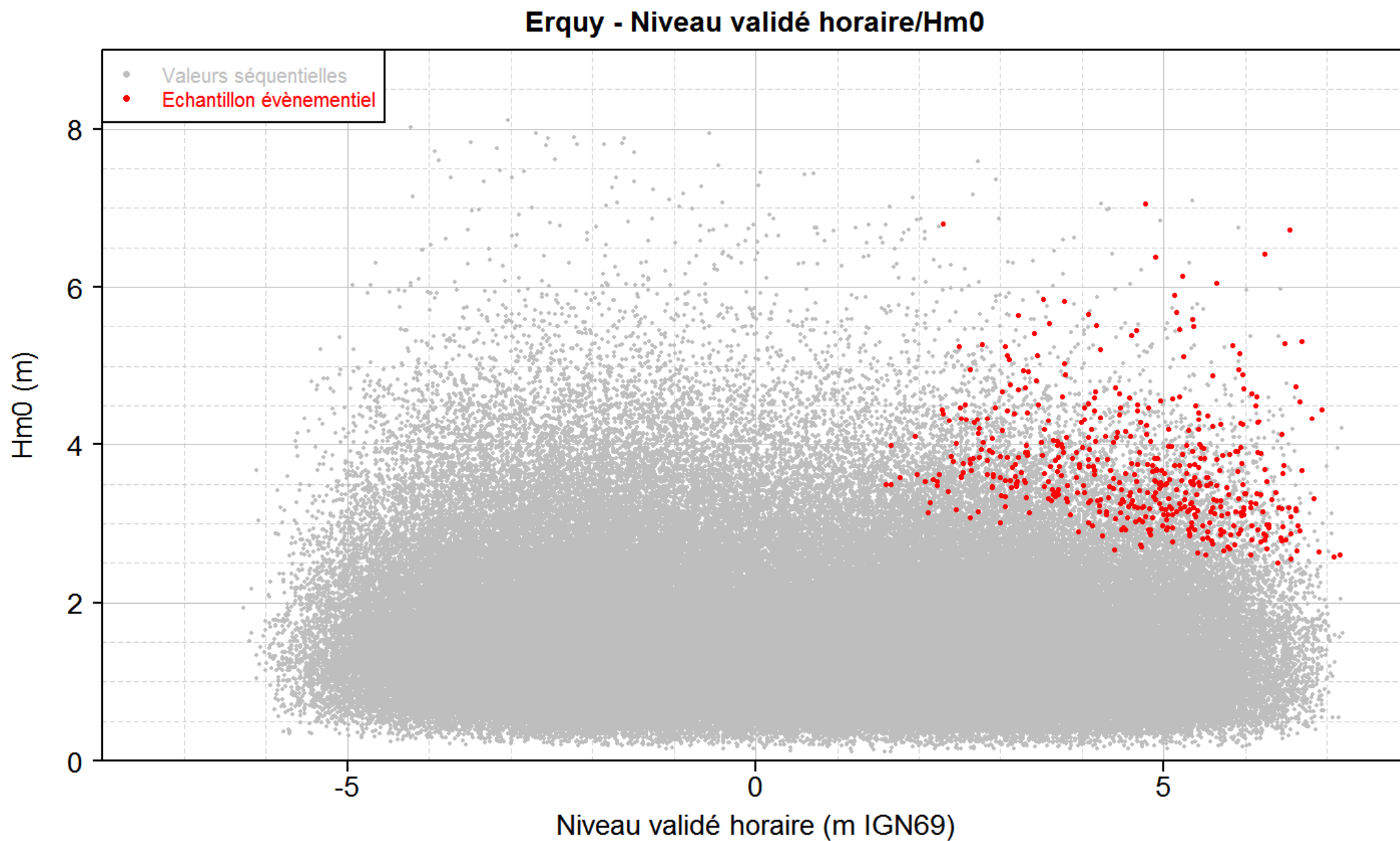
- L'échantillonnage de la série temporelle conjointe houle / niveau est une opération qui consiste à établir l'échantillon i.i.d. (indépendant et identiquement distribué) sur lequel seront analysés :
 - ✓ la dépendance houle / niveau ;
 - ✓ les extrêmes univariés de houle et de niveau (lois marginales) ;
 - ✓ la distribution conjointe houle / niveau.
- On peut ainsi décrire l'échantillonnage comme une opération permettant :
 - ✓ la définition de l'évènement ;
 - ✓ l'identification de l'évènement ;
 - ✓ la description de l'évènement.

ECHANTILLONNAGE RETENU

- On s'intéresse aux évènements météo-océaniques (combinaison houle / niveau) susceptibles de causer des franchissements et des submersions.
- Il faut donc repérer les combinaisons d'une houle venant frapper ce littoral abrité du secteur prédominant des tempêtes atlantiques, et d'un niveau suffisamment haut.
- Une formule de réfraction analytique simple permet d'approcher la valeur de H_m0 au droit du littoral d'étude, ce qui permet la prise en compte de la direction et de la période de la houle (ainsi les états de mer s'éloignant d'Erquy ou y arrivant très atténués ne sont pas pris en compte). Cette valeur approchée est normalisée et sommée au niveau marin lui-même normalisé par le marnage maximal, ce qui donne une variable de réponse « fictive », nommée « niveau d'eau total », donnant à peu près la même importance au niveau et à la houle et permettant d'identifier ses pics (maximas) sur la période de modélisation.
- Bien que la valeur de ces pics soit très peu précise, les dates des principaux évènements à considérer dans l'analyse peuvent être facilement identifiées.
- L'échantillon ainsi constitué comprend au final 479 évènements, soit environ 21,4 / an.

Erquy - Série des observations - Seuil : 1.219 m IGN69



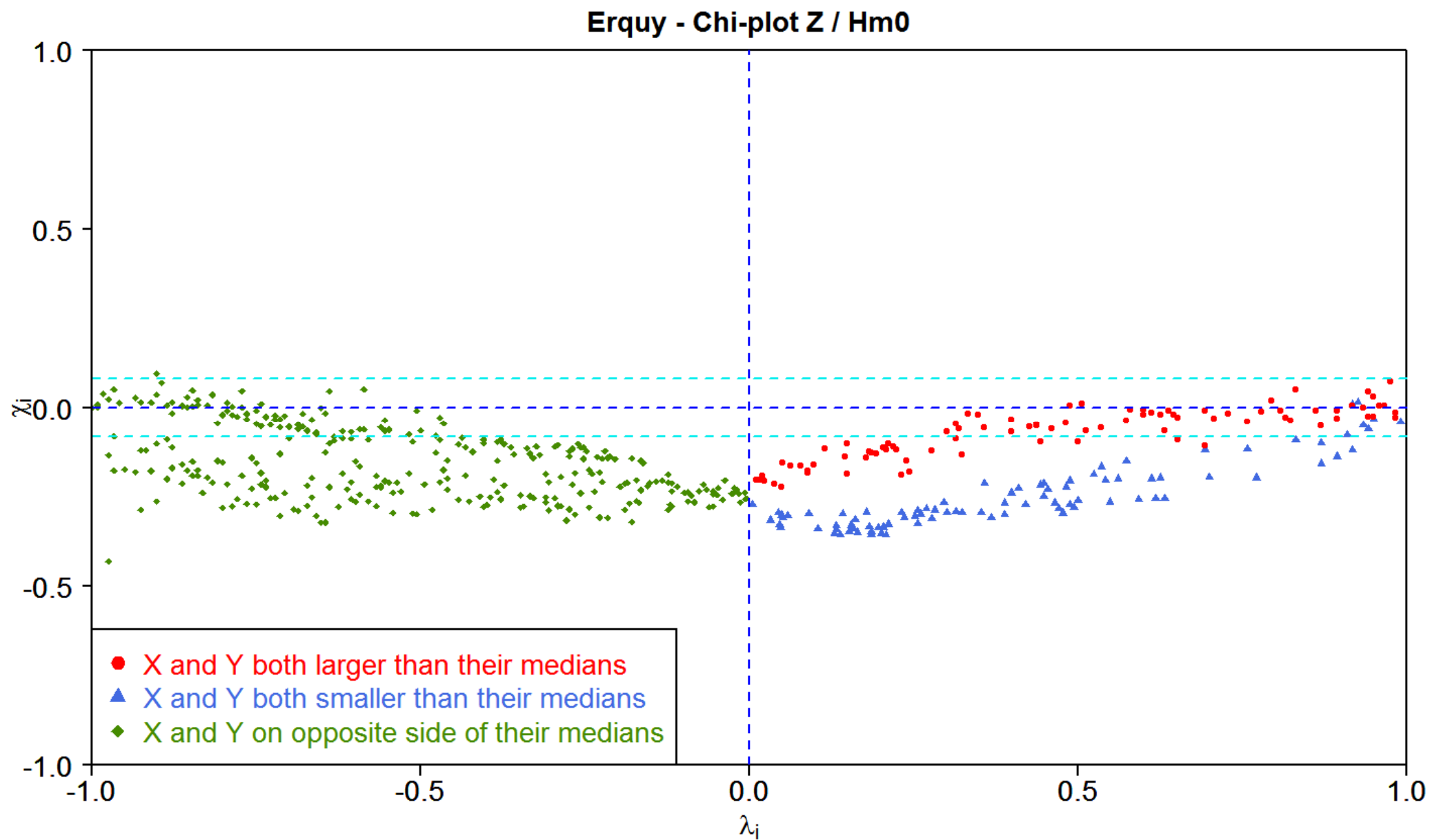


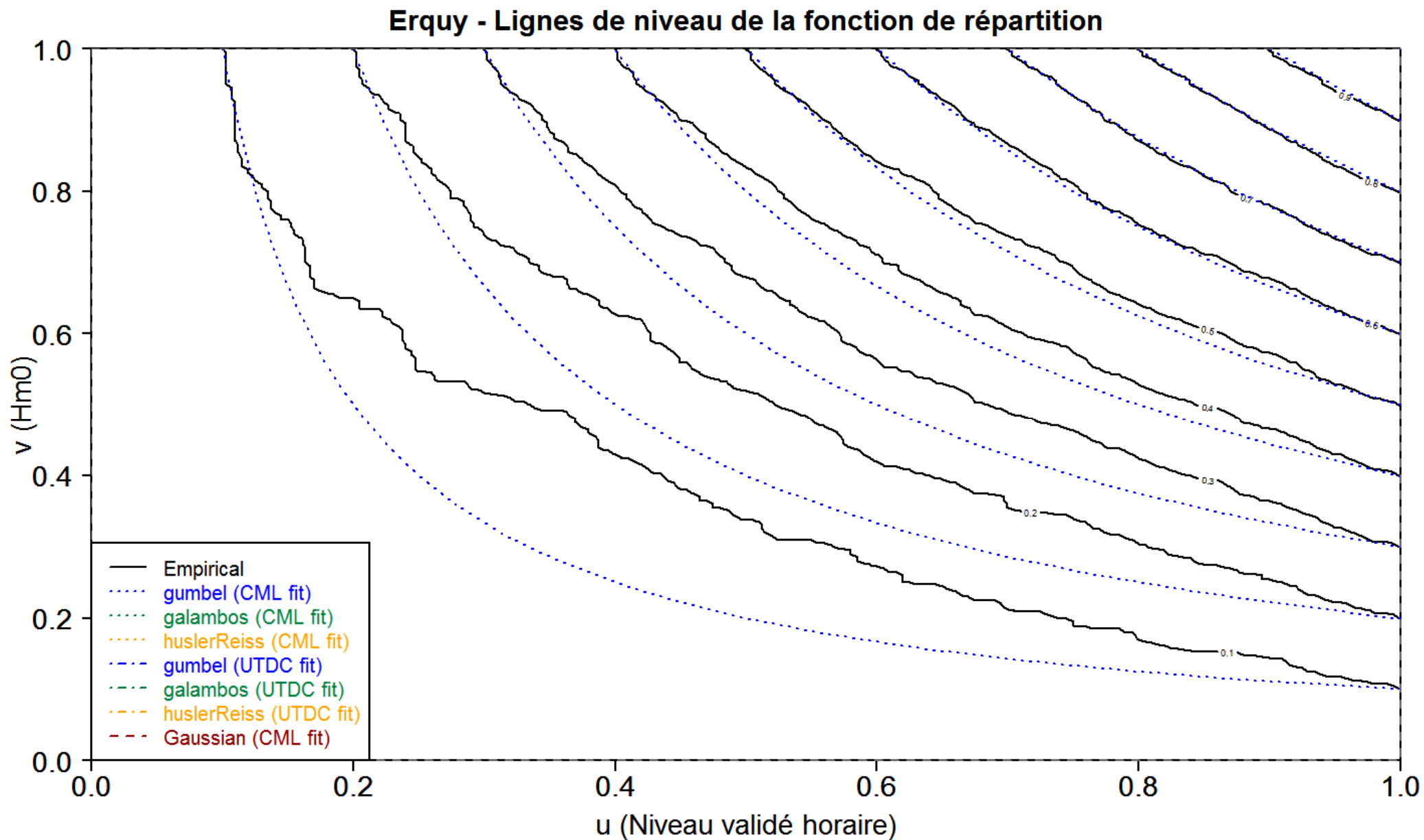
DÉPENDANCE

- La dépendance est évaluée entre la hauteur significative spectrale de l'état de mer, H_m0 , et le niveau marin. Ce dernier étant très largement dominé par la marée astronomique, cette dépendance est très faible.

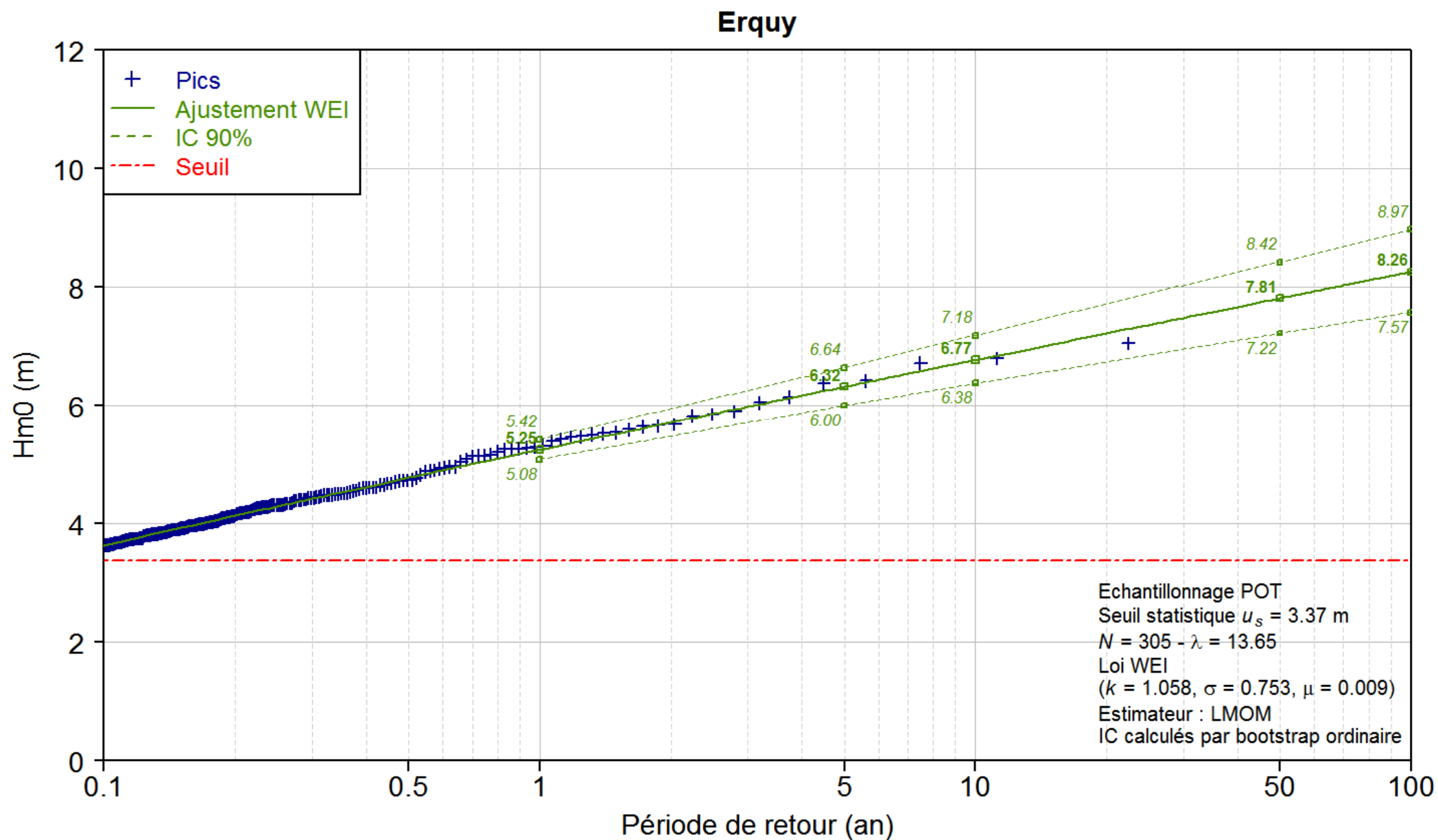
- Les indicateurs montrent en effet une dépendance très faible, et même négative :
 - ✓ le coefficient de dépendance caudale (*upper tail dependence coefficient*) est de -0,17 (0 signifie l'indépendance, 1 la dépendance positive totale, -1 la dépendance négative totale) ;
 - ✓ le chi-plot de Fisher et Switzer (2001) montre que les paires houle / niveau restent proches de l'axe des abscisses, qui signifie l'indépendance (la dépendance totale positive, resp. négative, correspond à des valeurs verticales proches de 1, resp. -1). Les paires les plus faibles de l'échantillon des tempêtes montrent une dépendance négative, mais les paires les plus élevées, qui nous intéressent dans cette étude, sont très proches de l'indépendance.

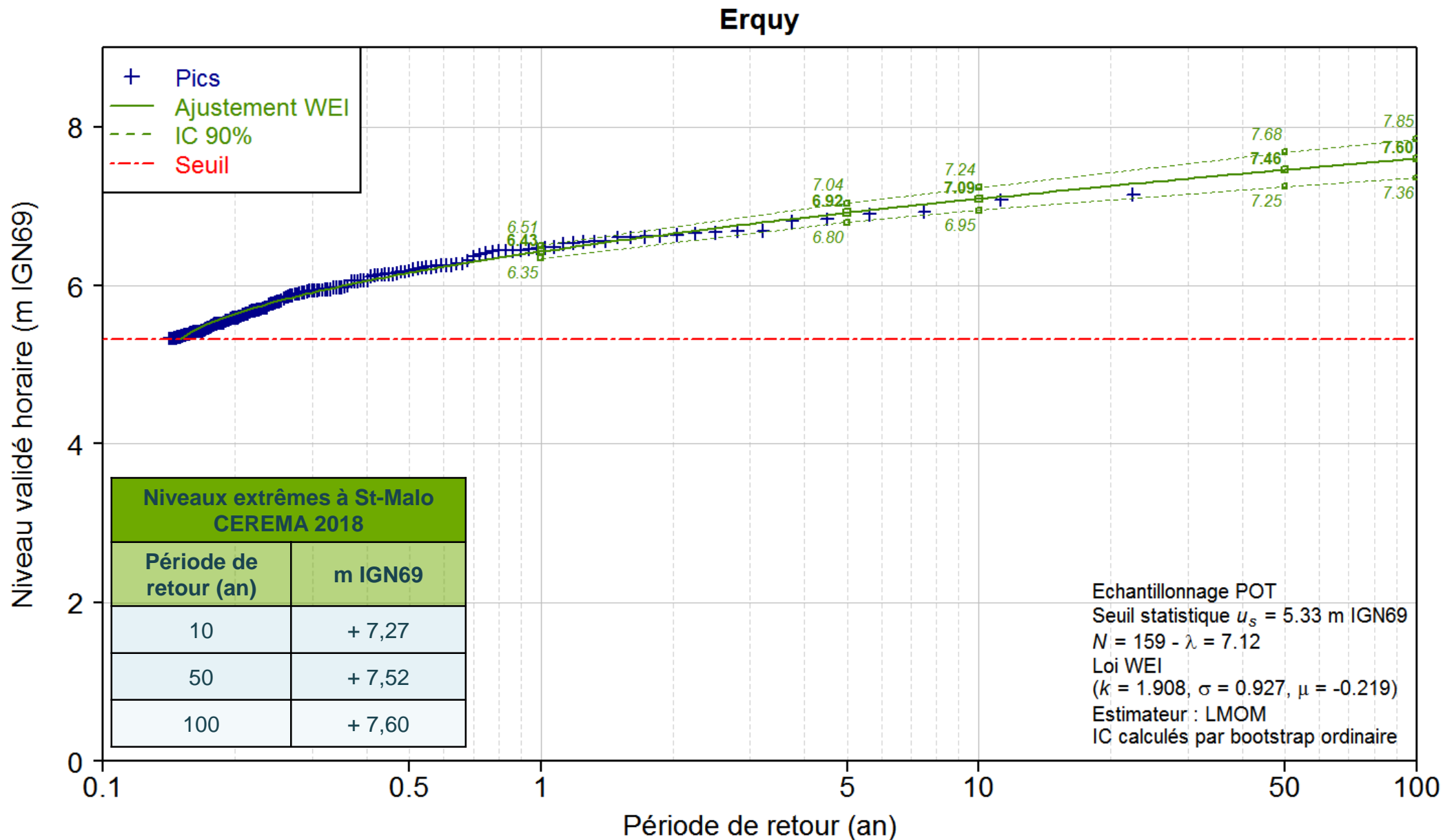
- La dépendance entre ces deux variables est modélisée par une copule de Gumbel, dont le paramètre est estimé par la méthode du maximum de vraisemblance canonique.





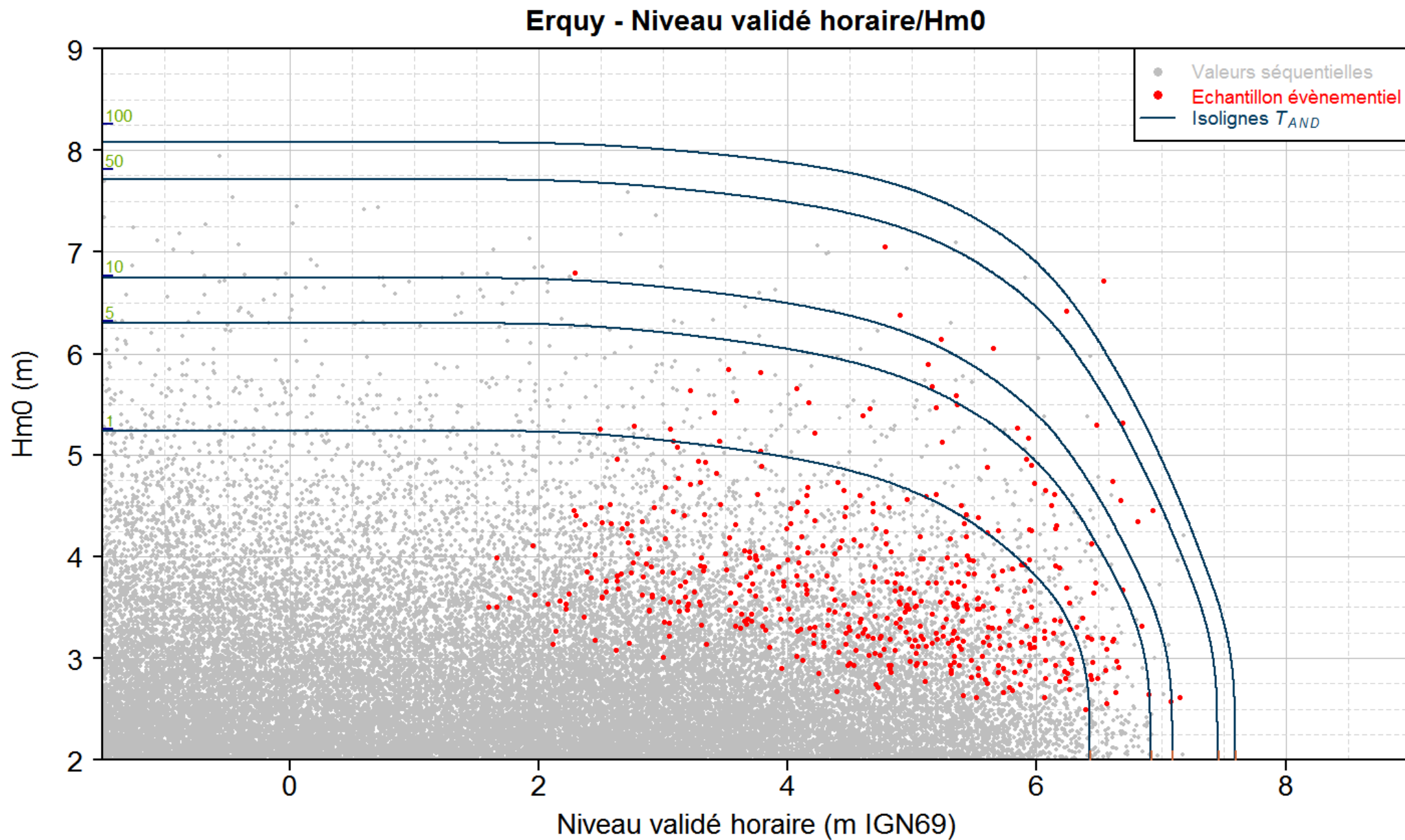
MARGINALES



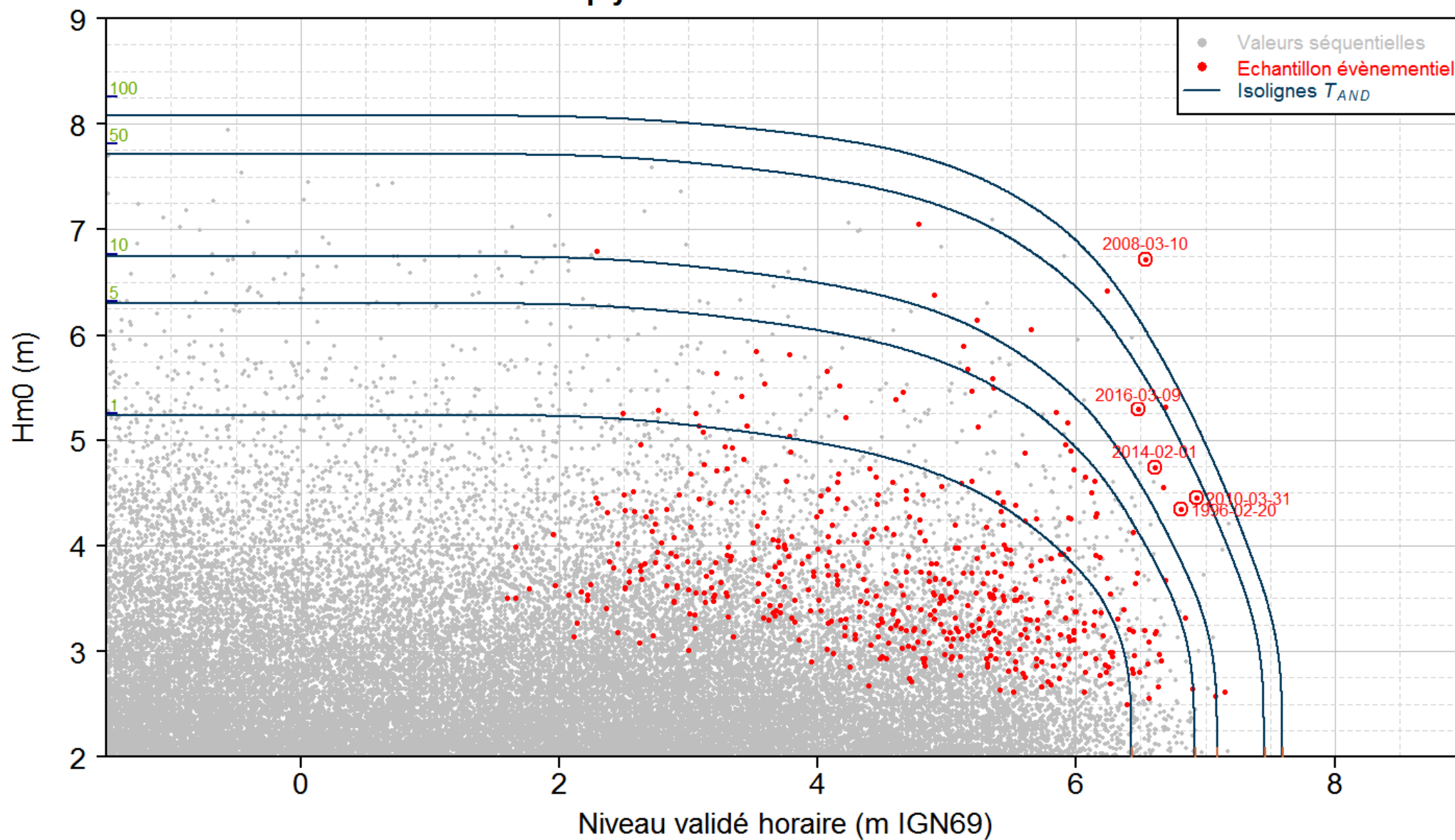


PÉRIODE DE RETOUR CONJOINTE

- On considère la période de retour \mathcal{T}_{AND} , qui correspond à la probabilité de dépassement conjoint.
- En tout point situé sur le contour de $\mathcal{T}_{AND} = 100$ ans, par exemple, la probabilité de dépasser SIMULTANEMENT la valeur correspondante de niveau (en abscisse) ET la valeur correspondante de H_m0 (en ordonnée) correspond à une période de retour de 100 ans, c'est-à-dire à une probabilité annuelle de 0,01.

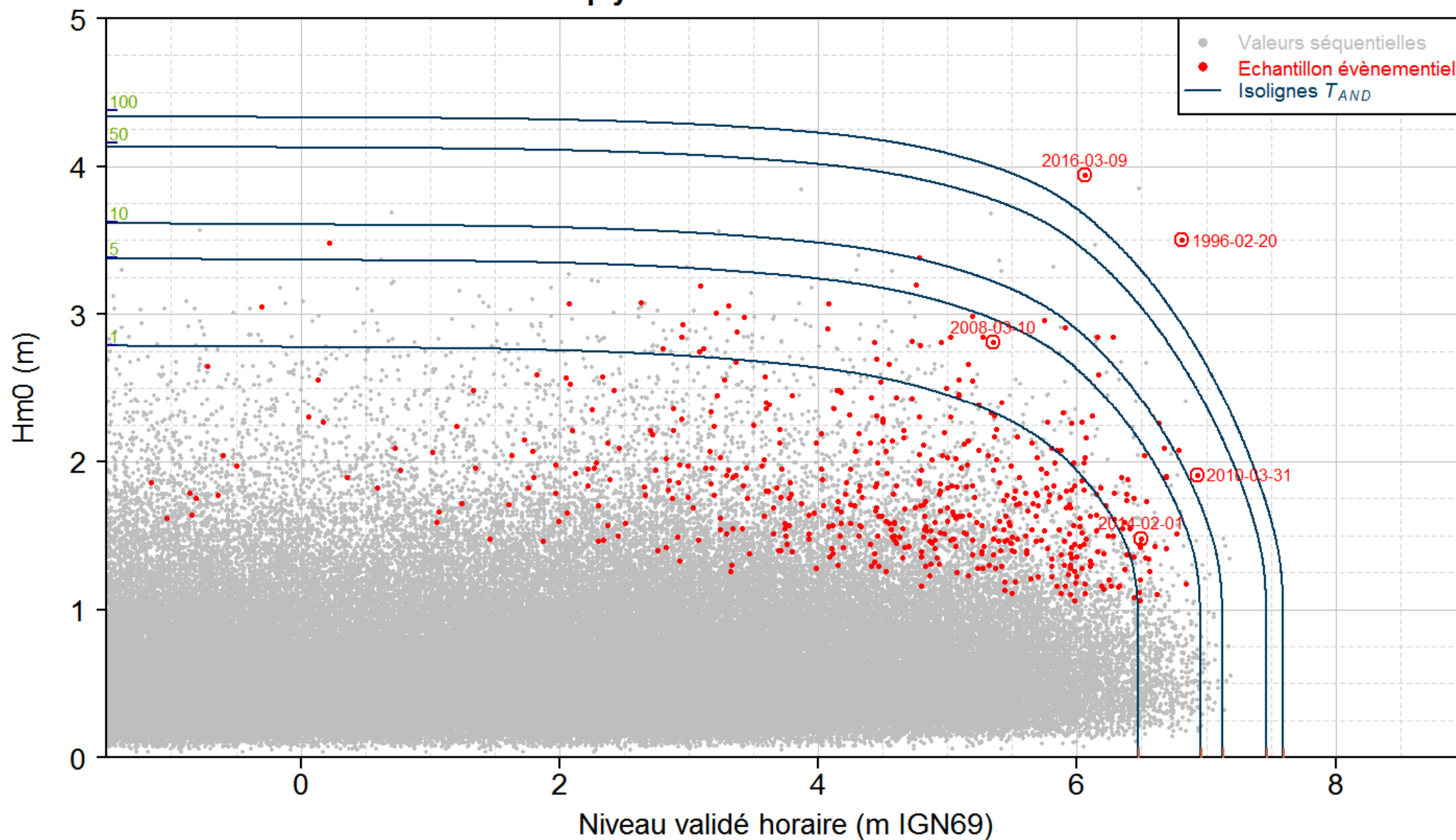


Erquy - Niveau validé horaire/Hm0



-
- On peut croiser cette analyse réalisée au point HOMERE 66282 du large avec le point 55103 plus proche de la côte.
 - Du fait des effets de direction et période de la houle, on observe que les évènements semblant les plus pénalisants au large ne le sont plus forcément à la côte.
 - Les tempêtes de 1996 et 2016 sortent du lot. Cependant, il faut garder à l'esprit les covariables de la houle : par exemple, la tempête du 10/03/2008 est très atténuée mais sa période très élevée (17-18 s) est susceptible de générer du *shoaling* et du *set-up* lors de la propagation sur le profil de plage final. Il convient donc de la maintenir dans l'analyse.

Erquy - Niveau validé horaire/Hm0



ANNEXE C

ÉPURES DE PROPAGATION COTIERE

Erquy - Pléneuf

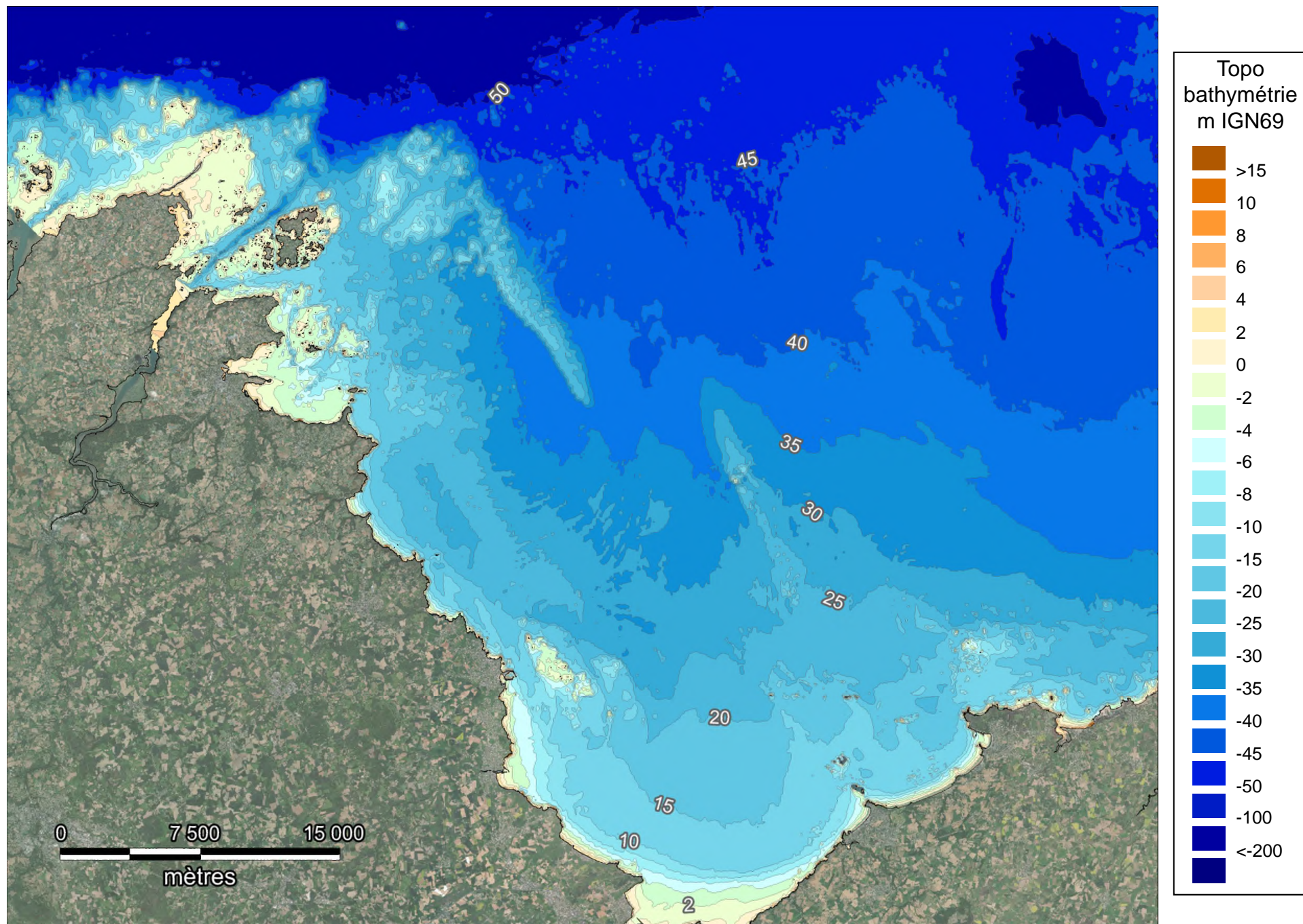
Détermination des conditions d'entrée pour le calcul du franchissement le long du littoral d'étude

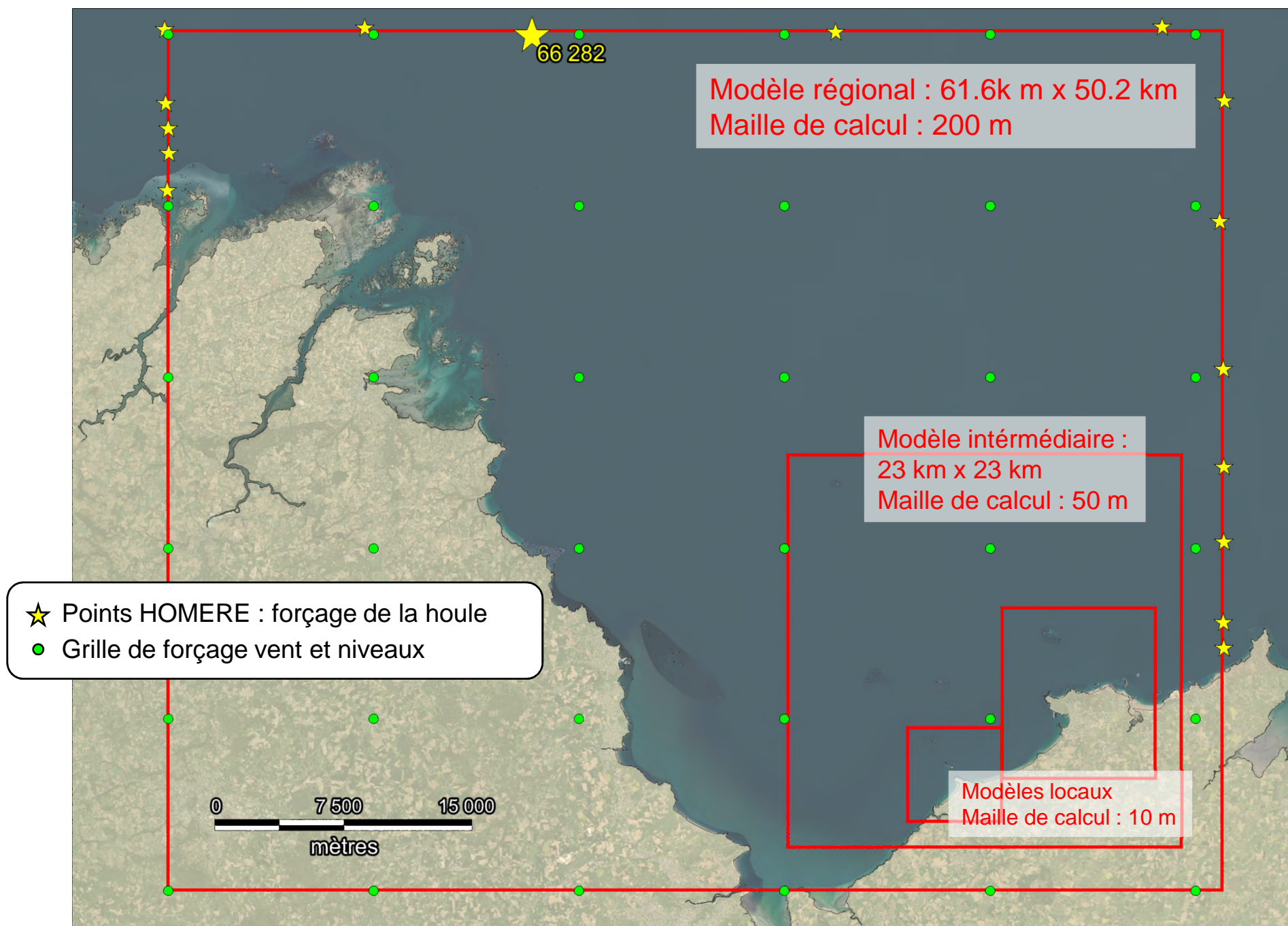
Annexe C - Epures de propagation côtière



CARACTÉRISTIQUES DU MODÈLE DE PROPAGATION



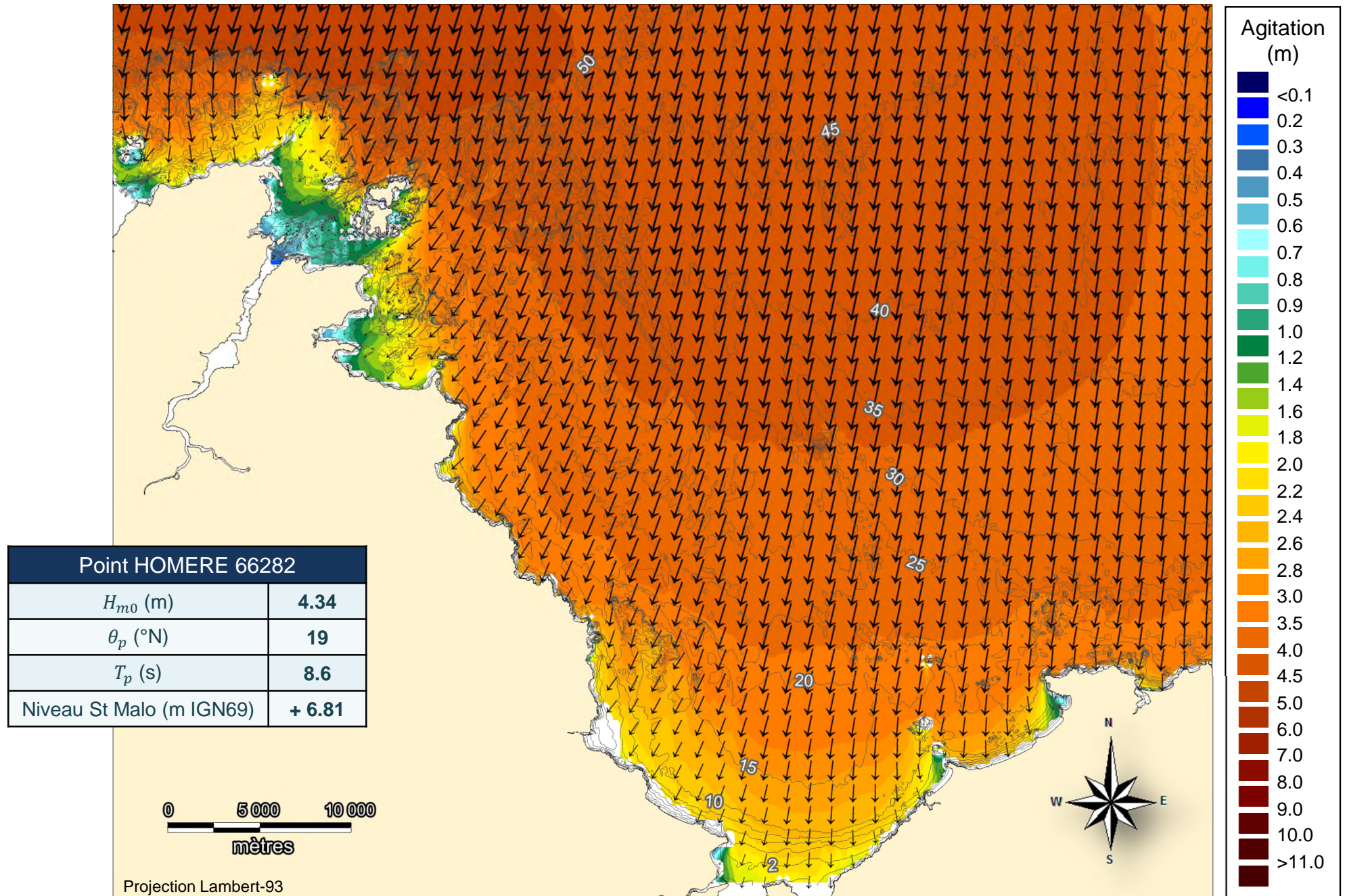




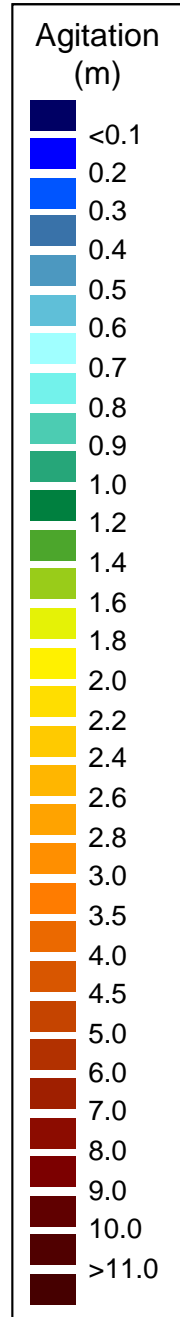
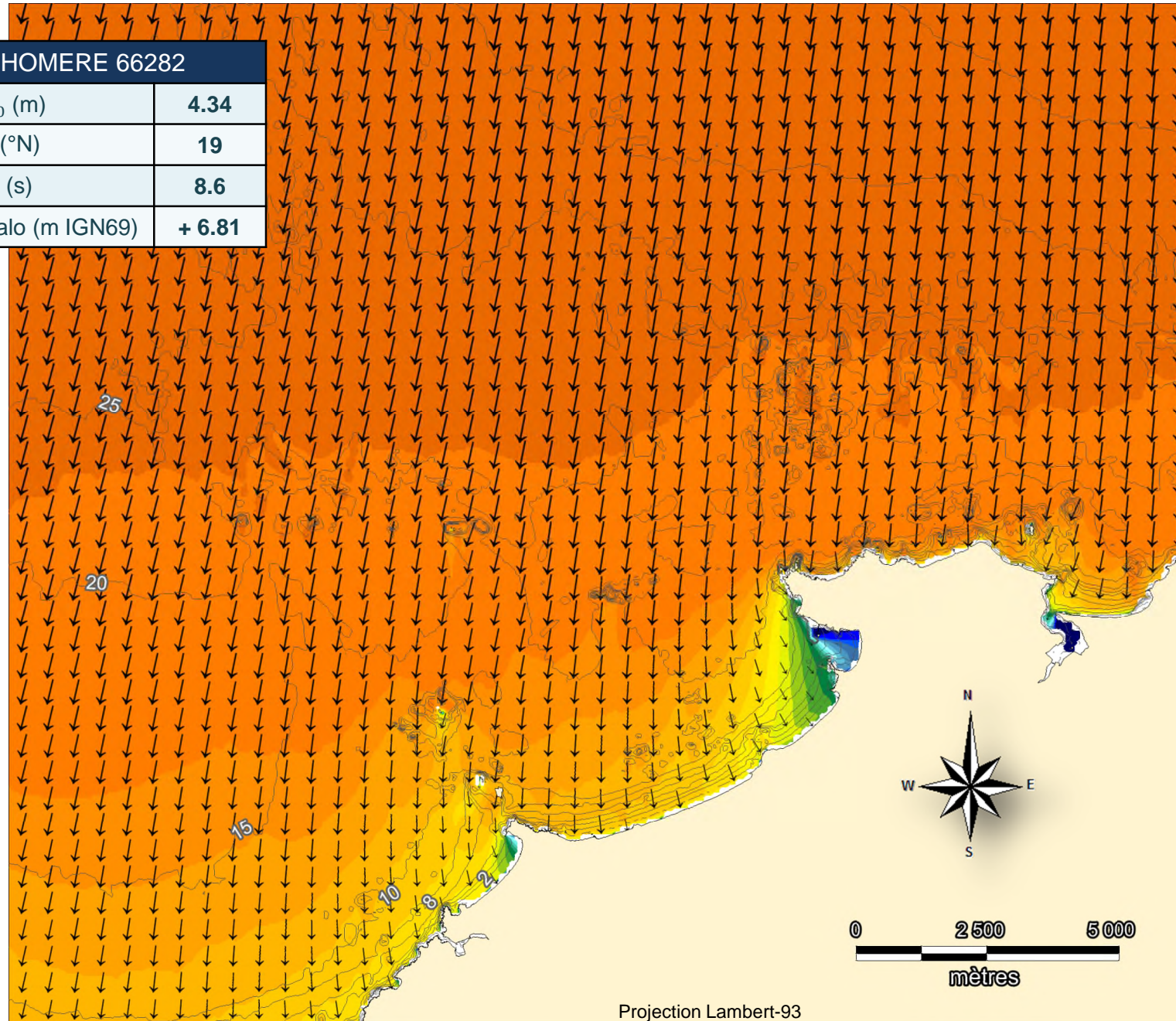


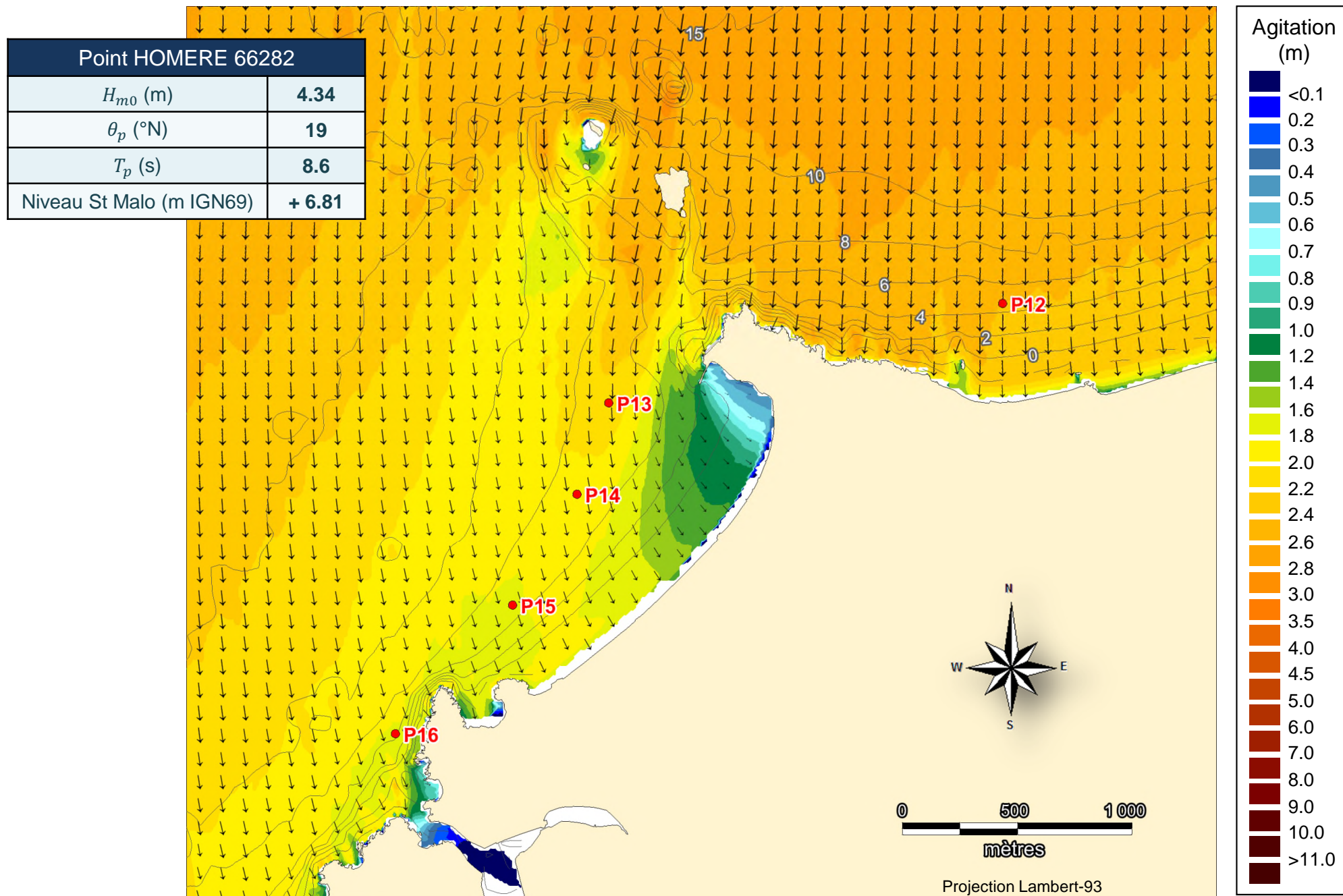
	HOMERE 66282			St-Malo	+ Changement Climatique
Date (UTC)	Hm0 (m)	Dirp (°N)	Tp (s)	Z (m IGN69)	
20/02/1996 07:00	4.34	19	8.6	6.81	+ 0.60
10/03/2008 19:00	7.09	284	18.2	6.54	
31/03/2010 07:00	4.45	285	11.2	6.93	
01/02/2014 07:00	3.96	282	12.7	7.14	
09/03/2016 18:00	5.59	286	10.9	6.06	

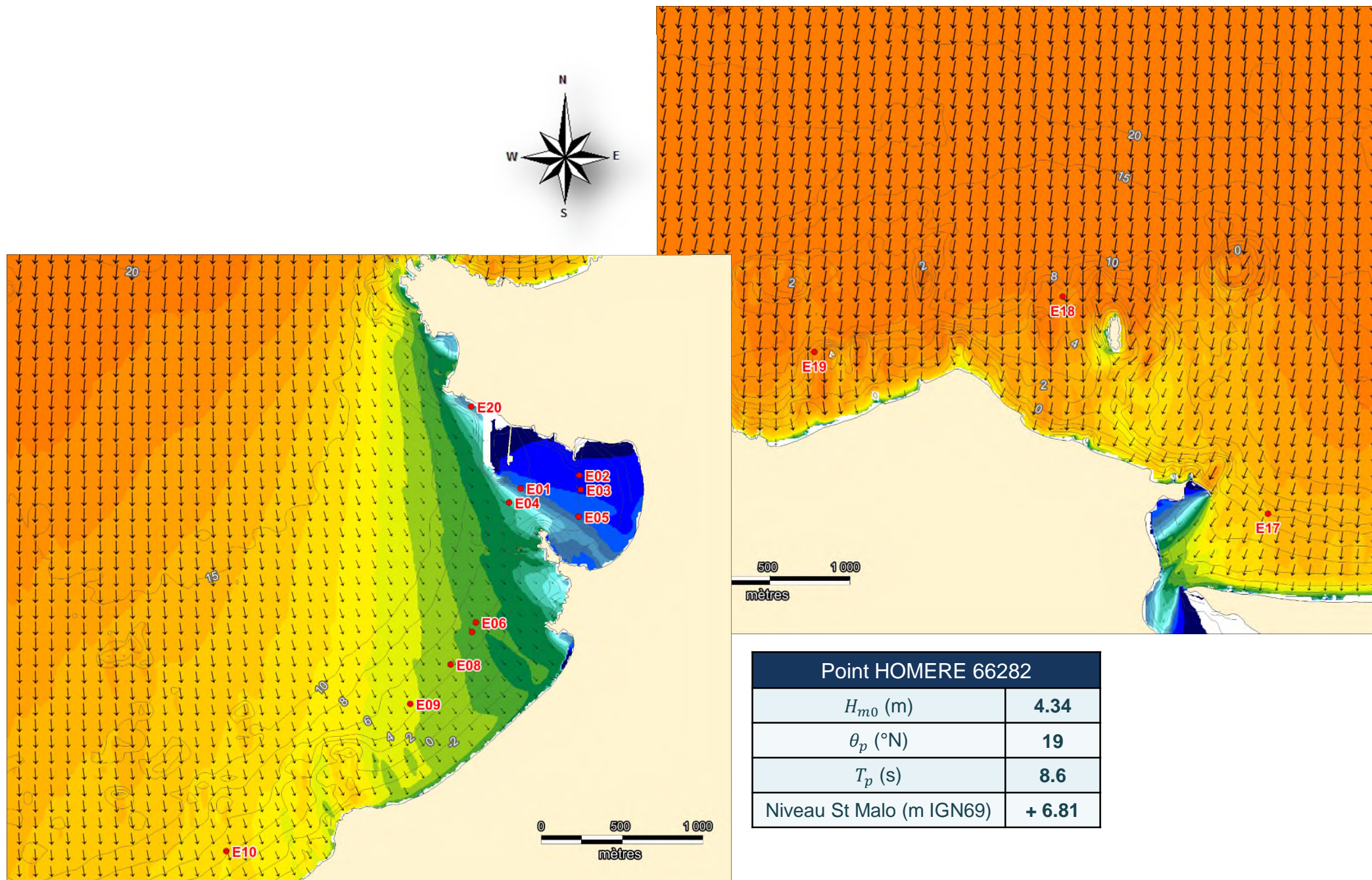
EPURES DE PROPAGATION

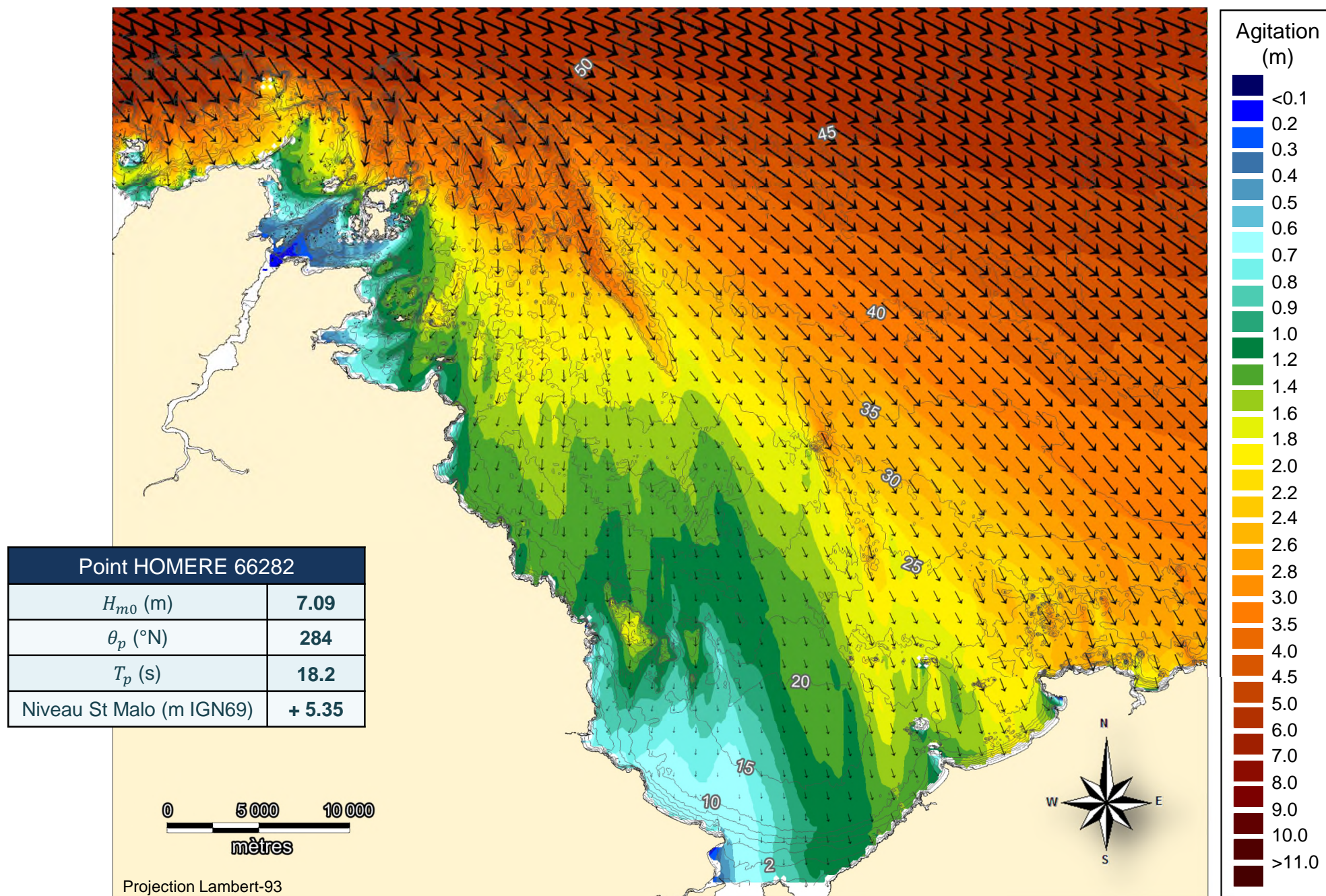


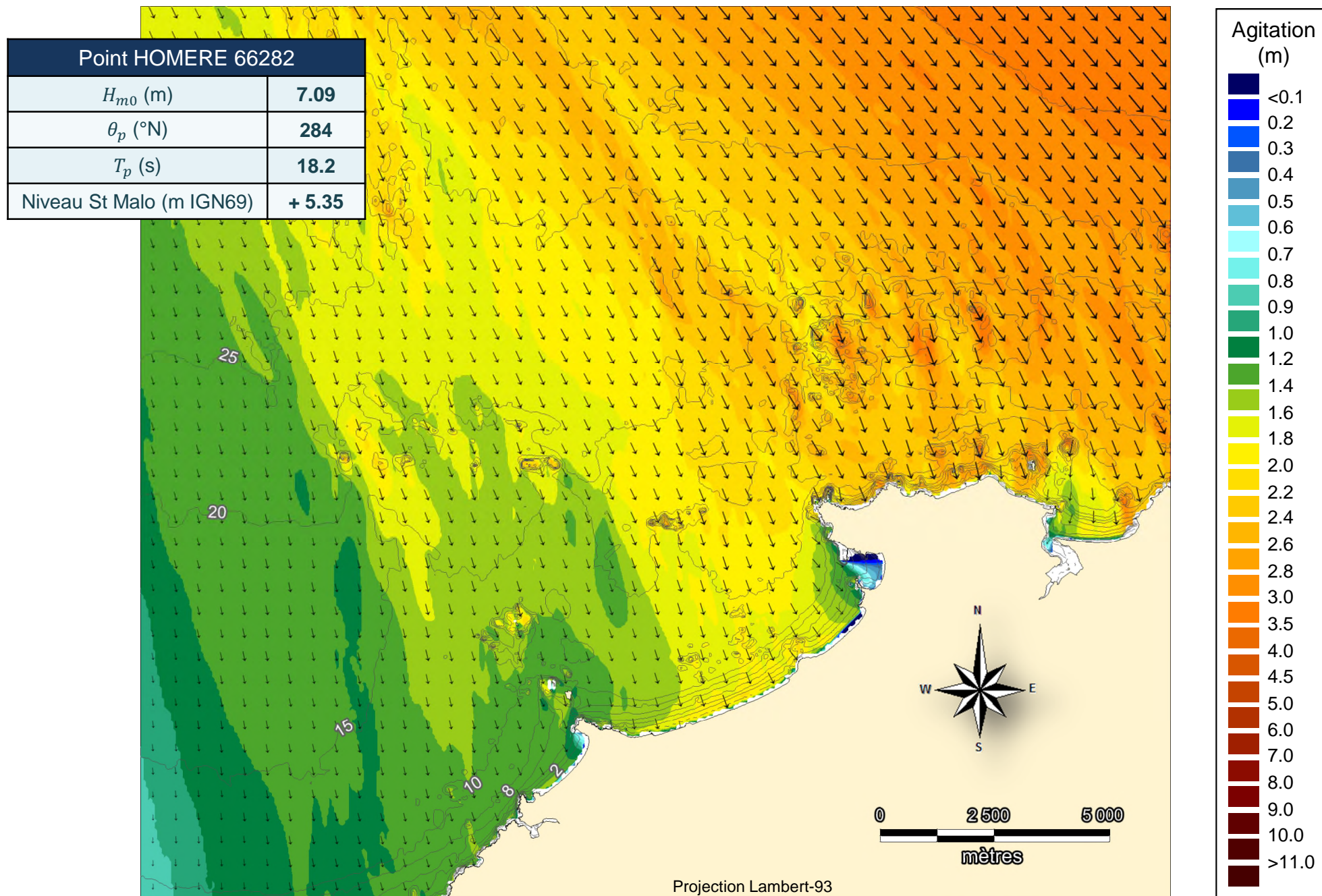
Point HOMERE 66282	
H_{m0} (m)	4.34
θ_p (°N)	19
T_p (s)	8.6
Niveau St Malo (m IGN69)	+ 6.81

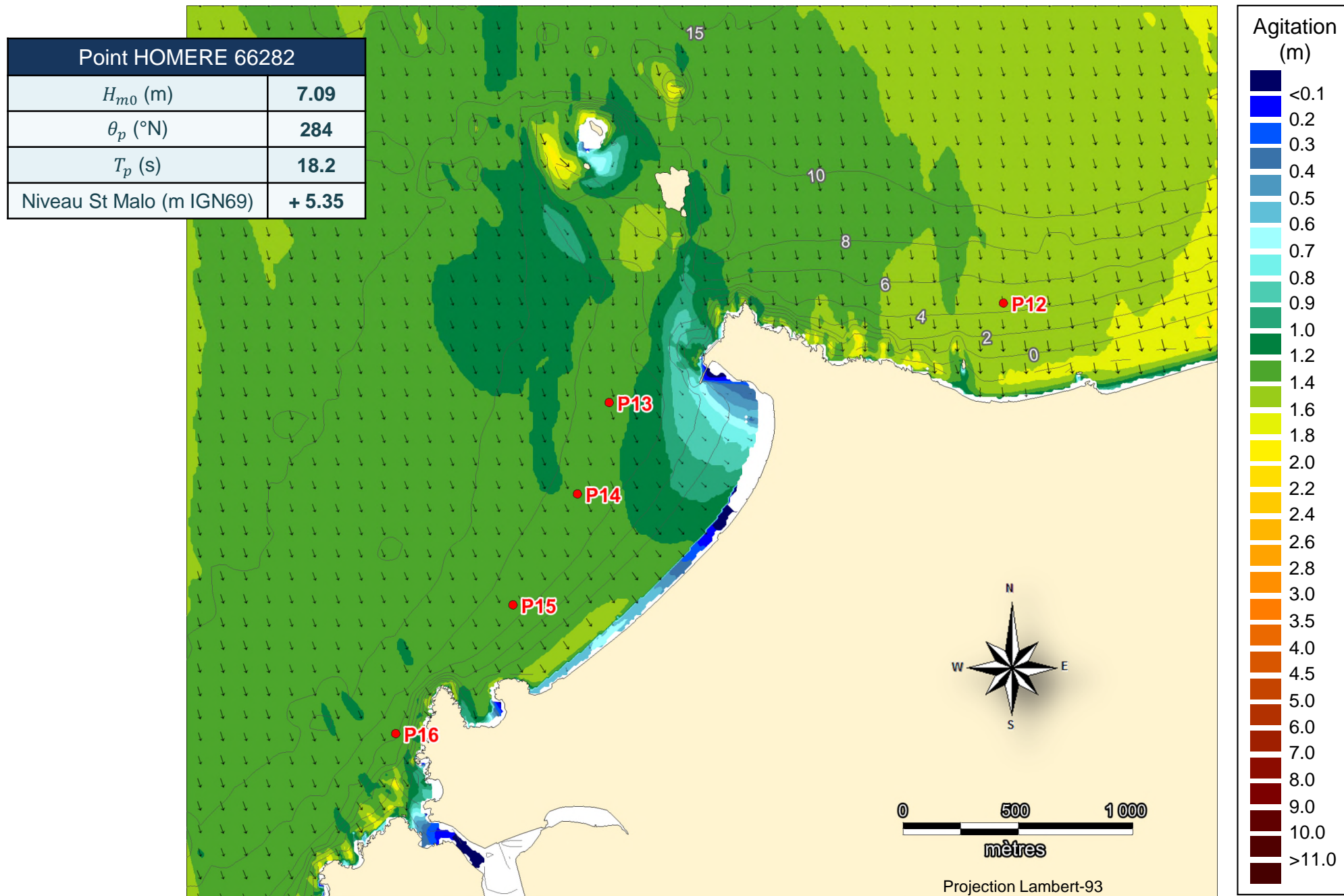


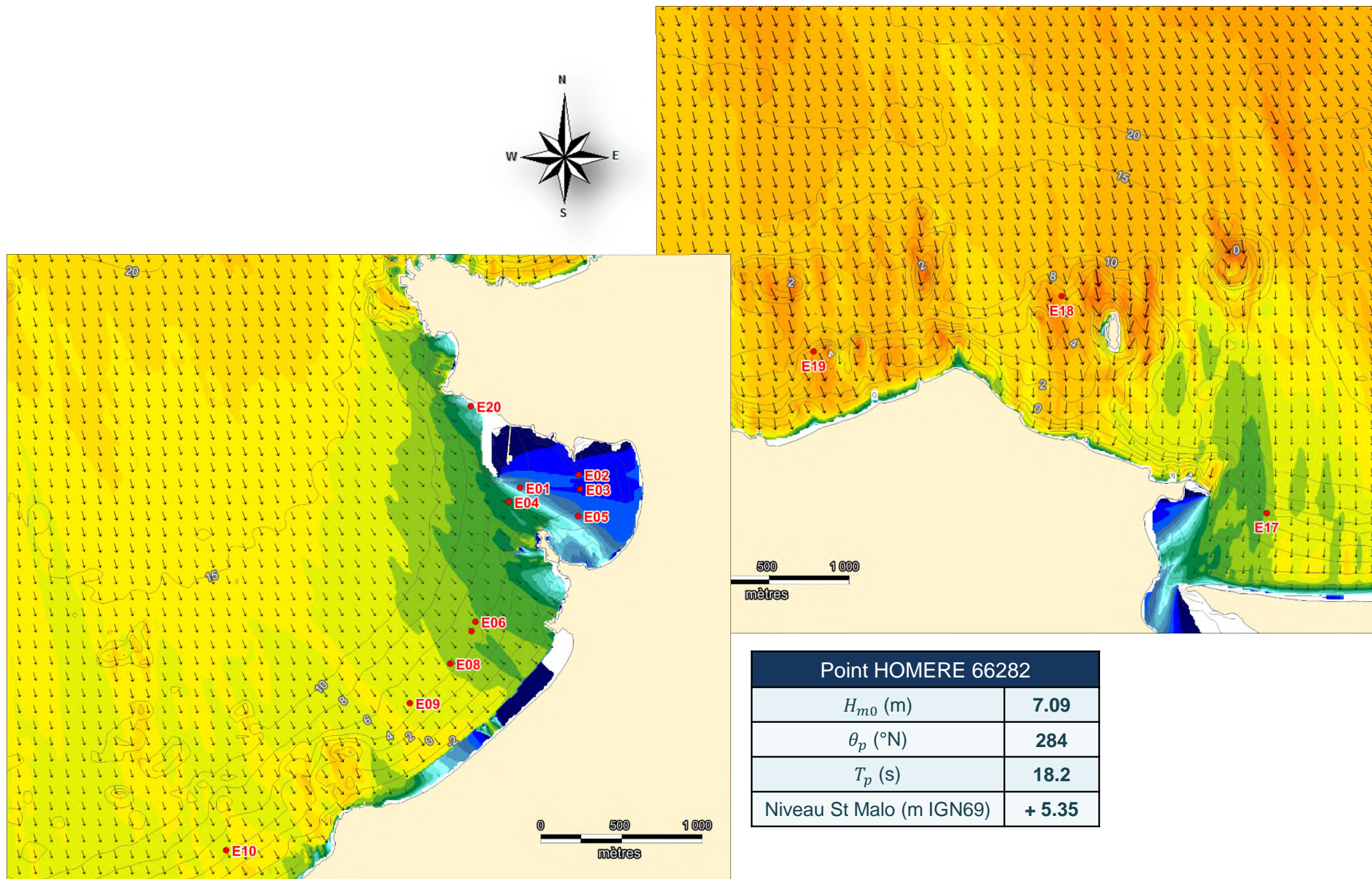


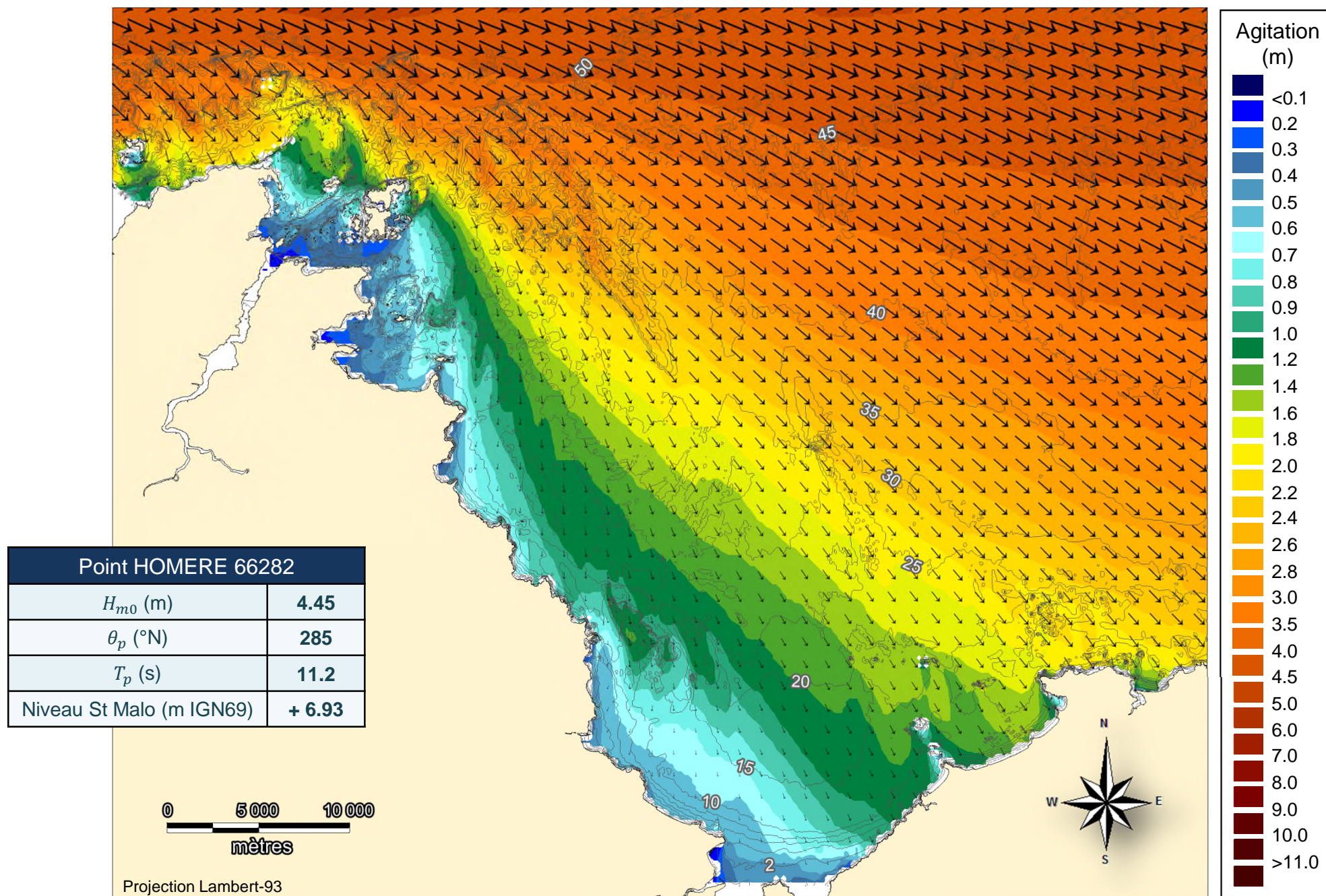


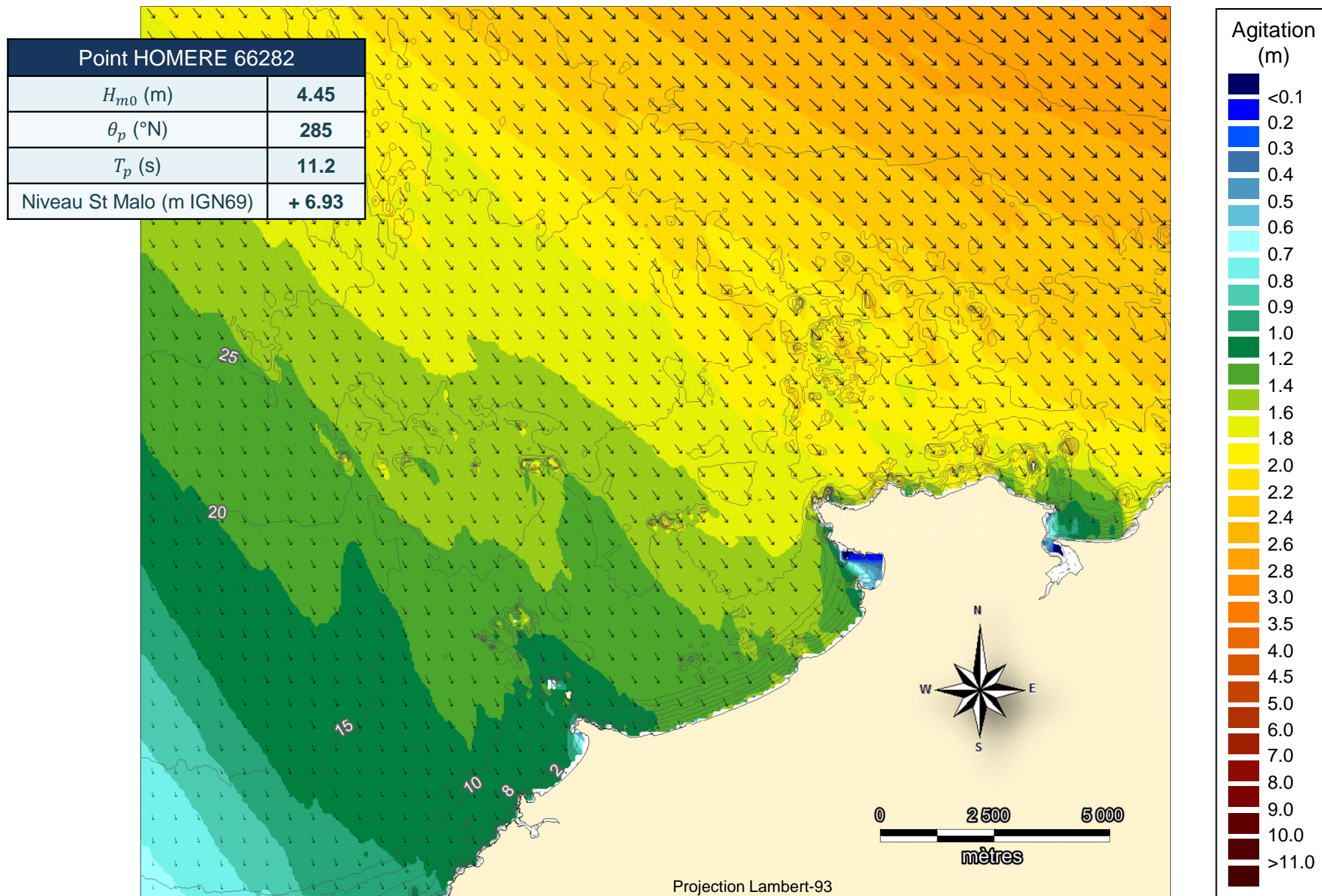


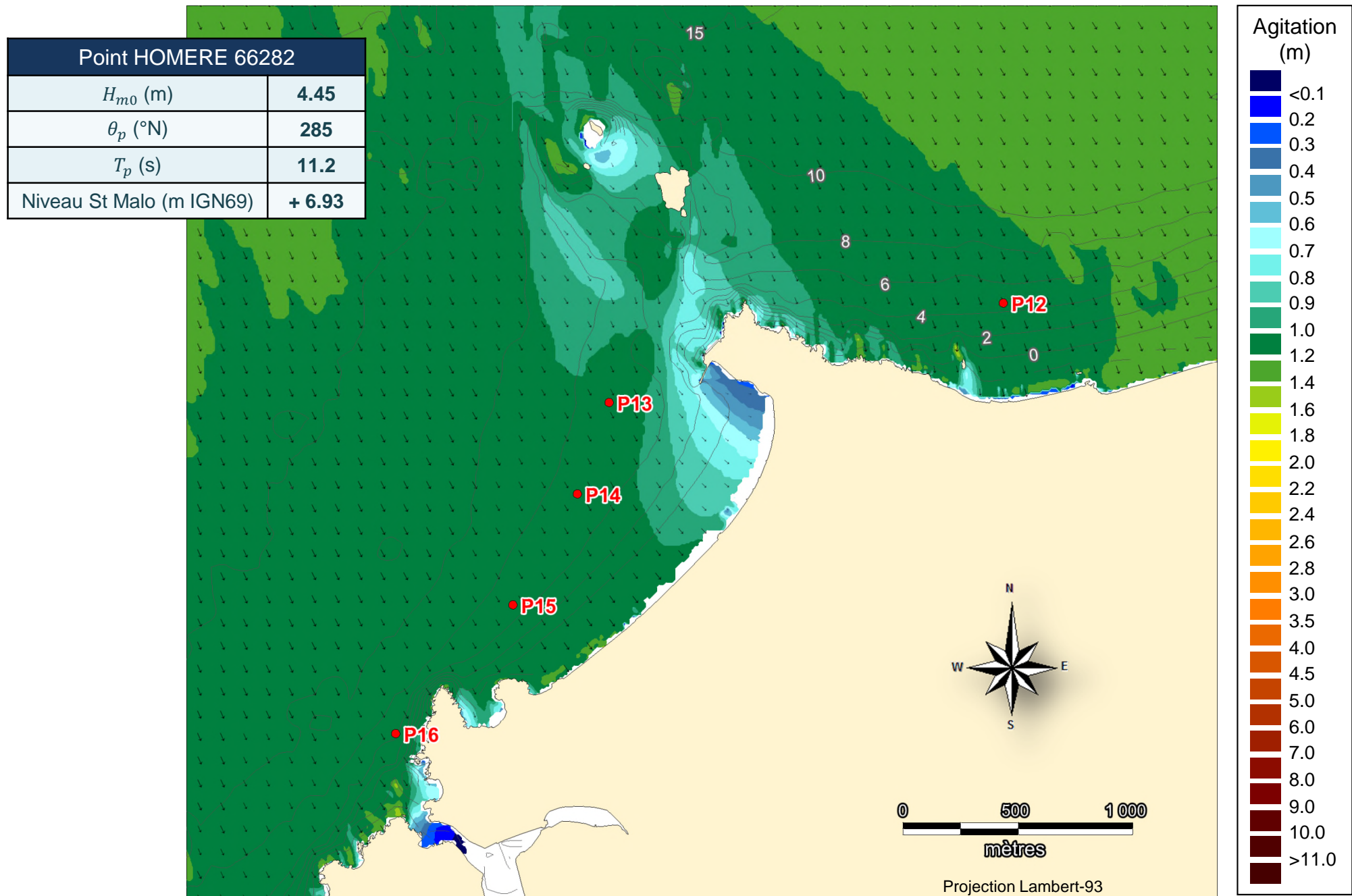


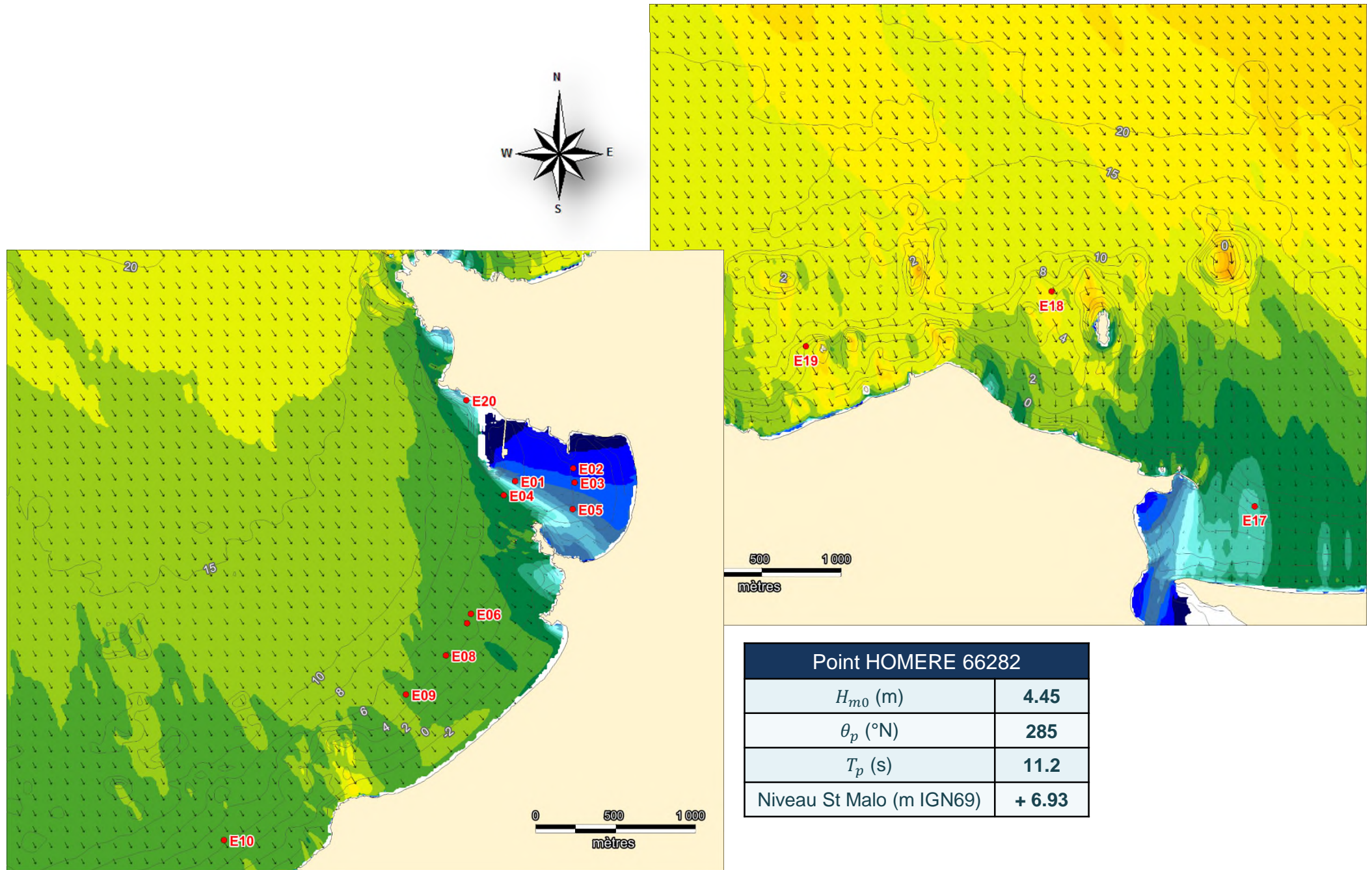


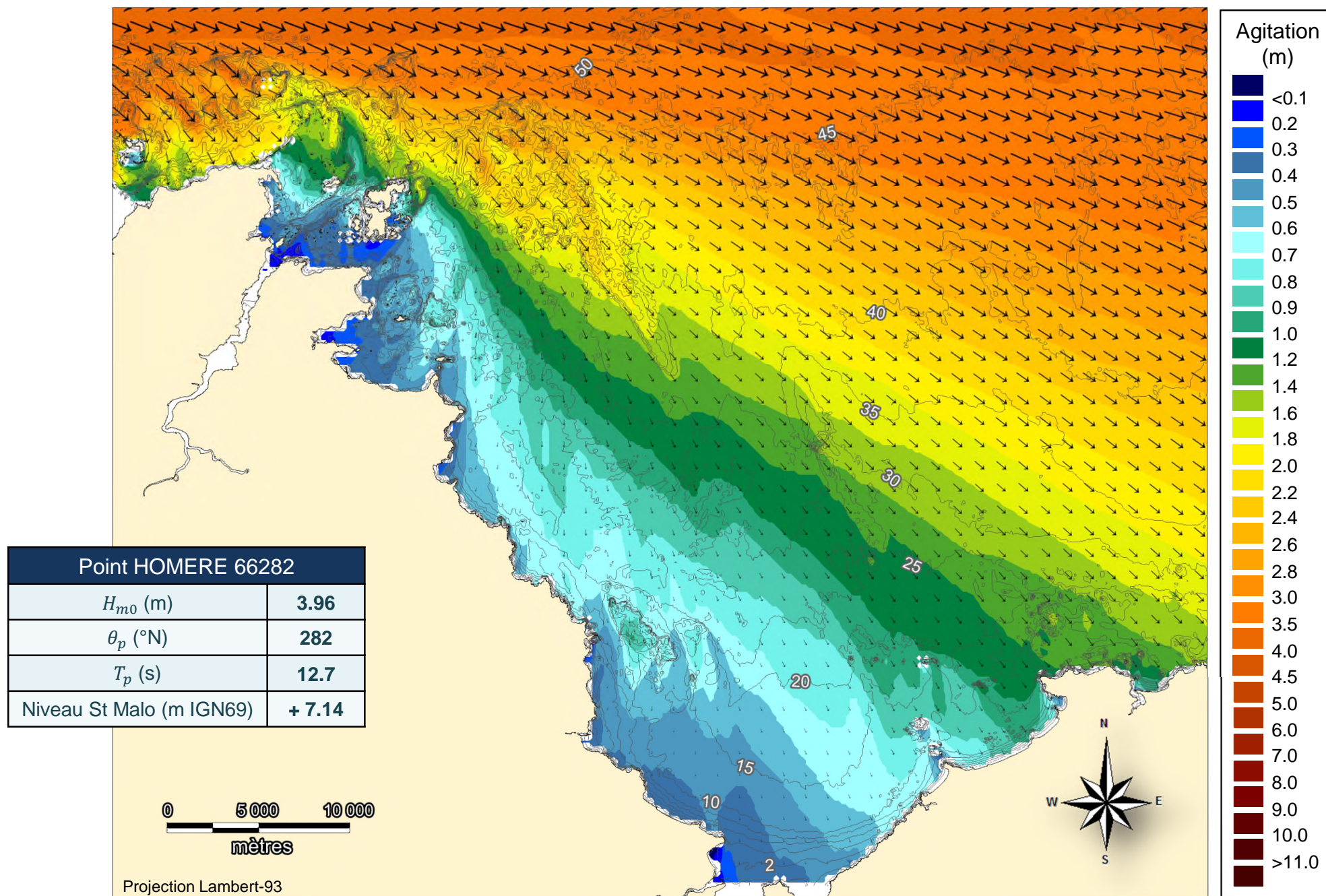


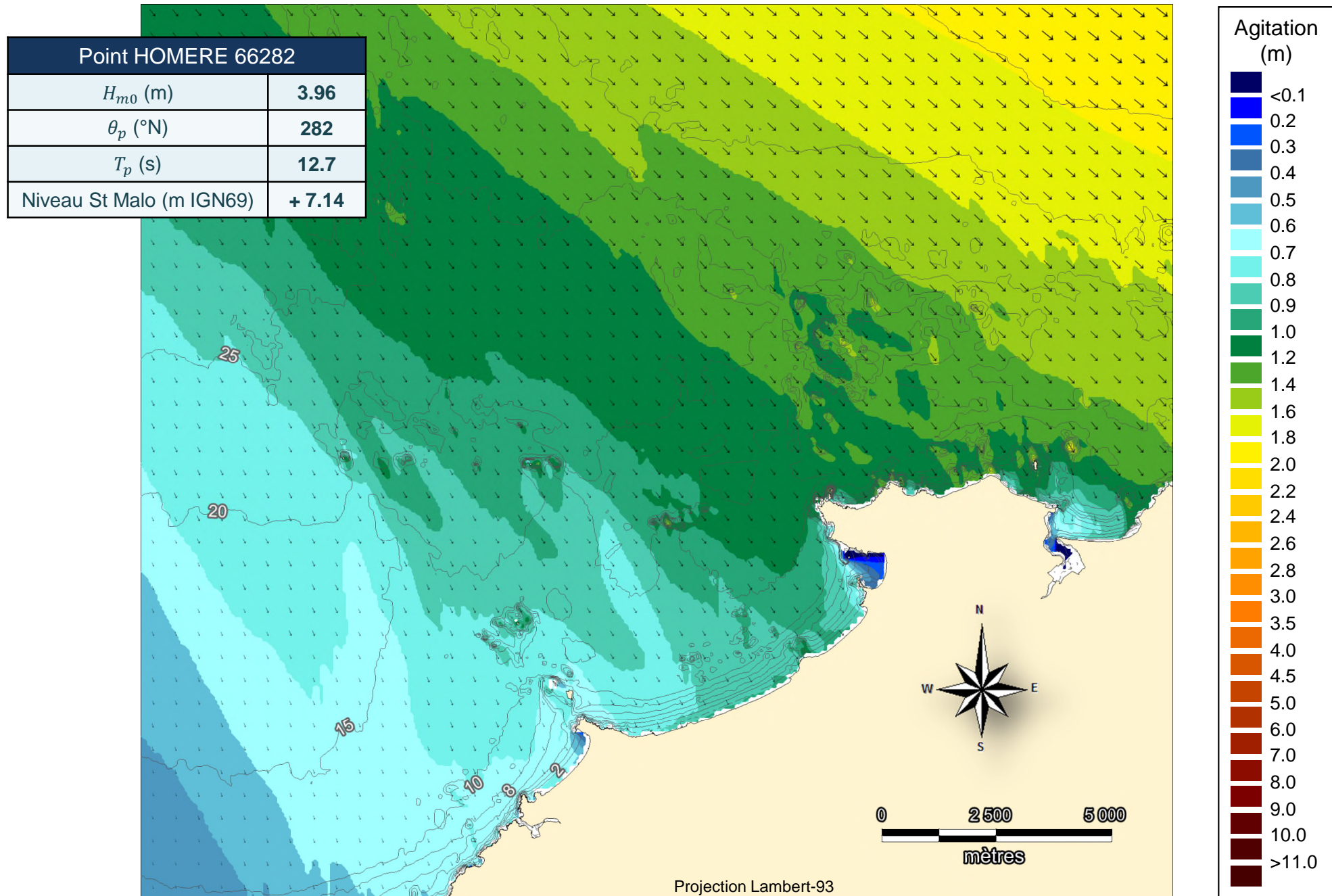


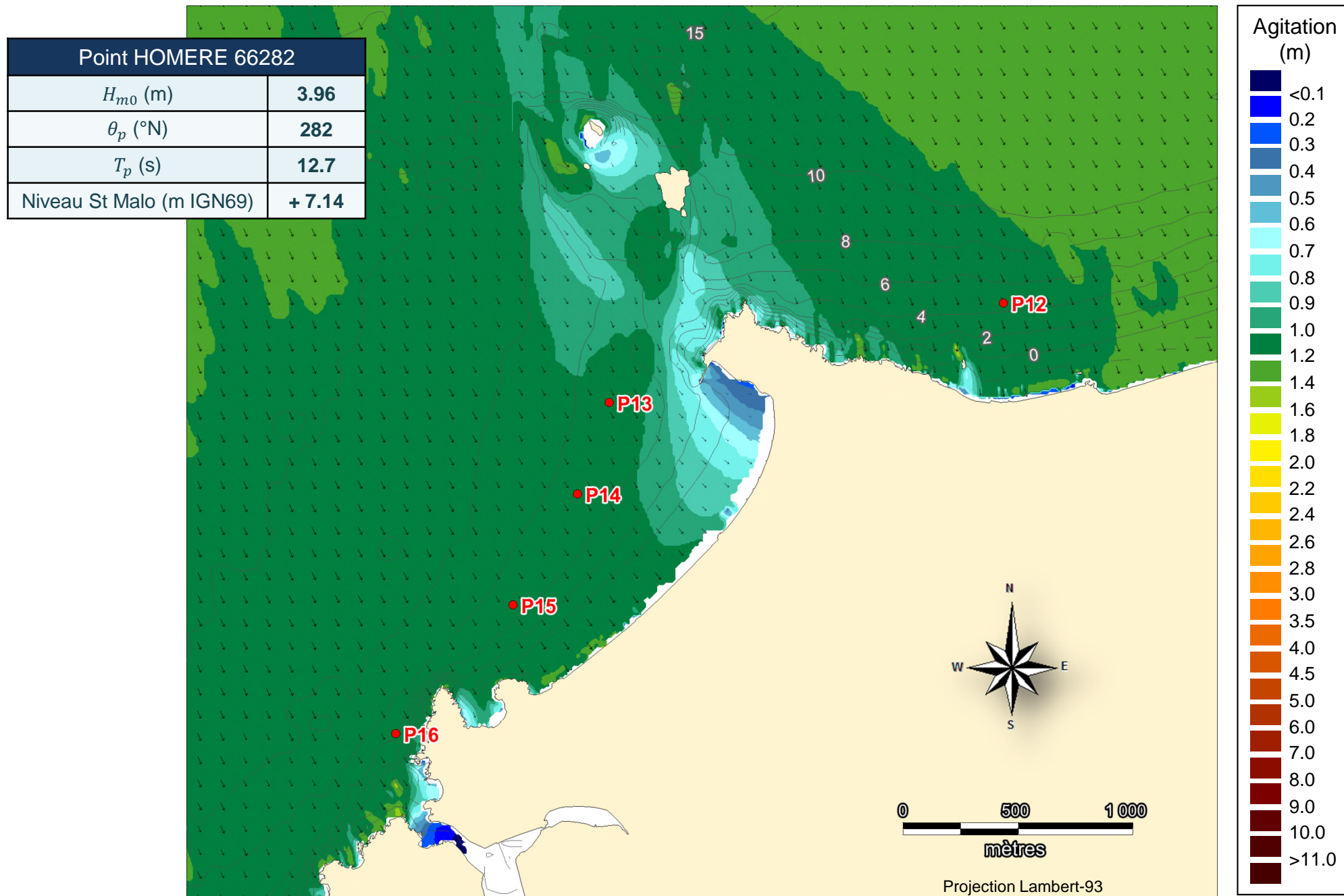


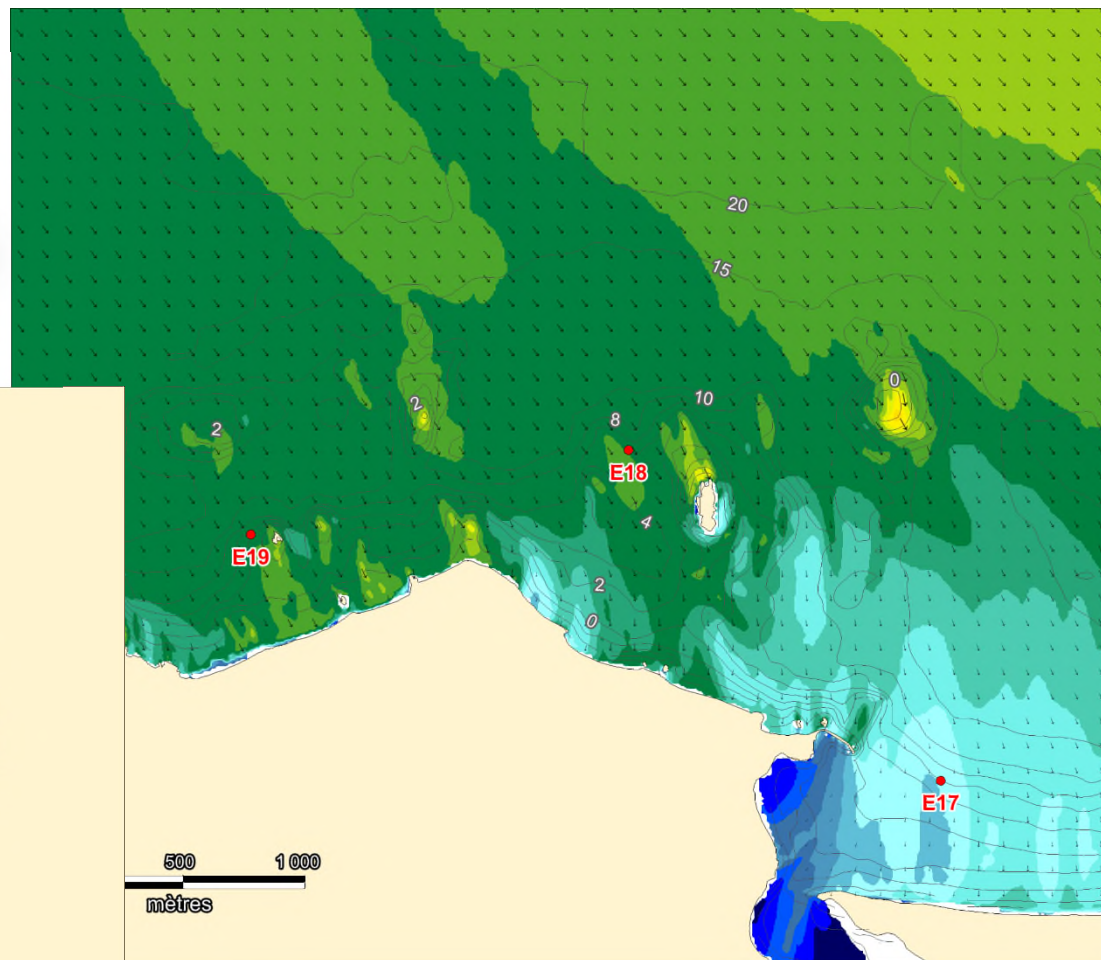
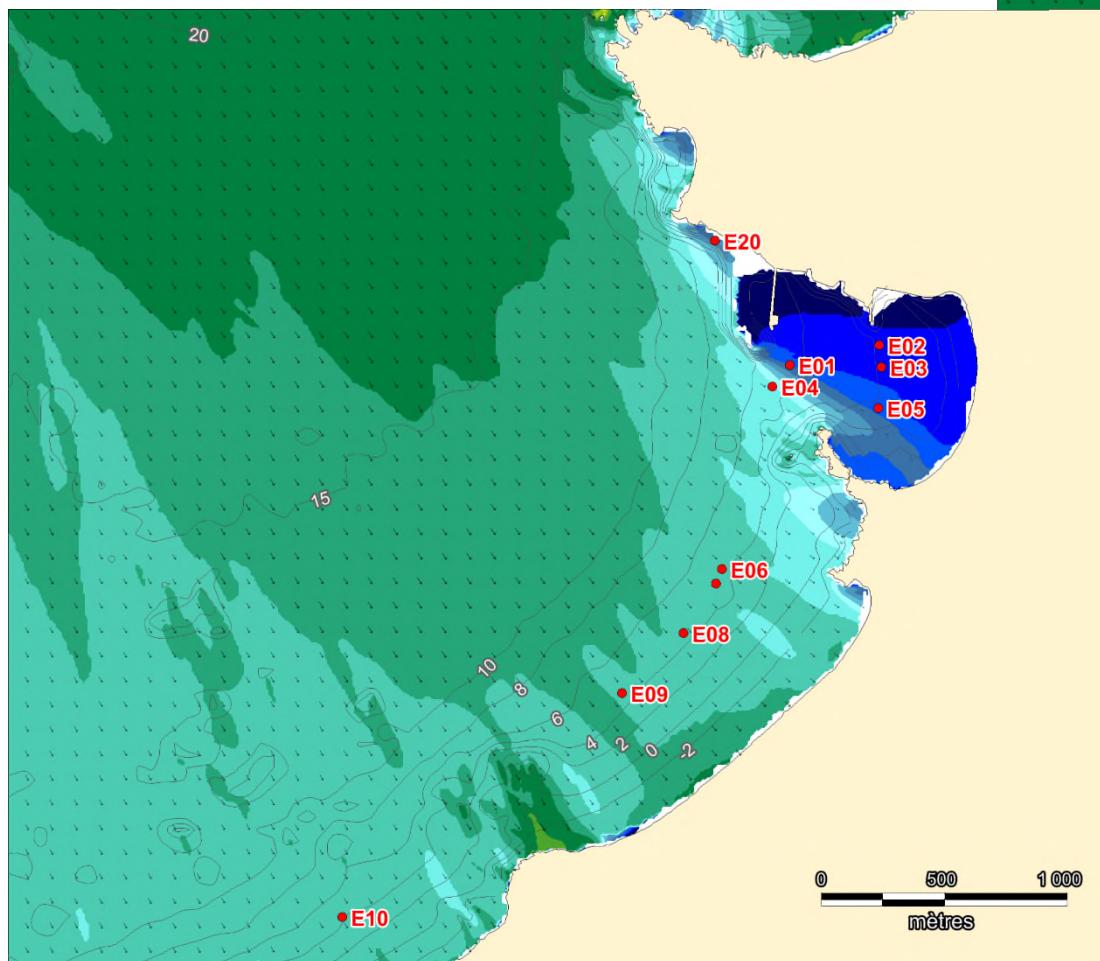




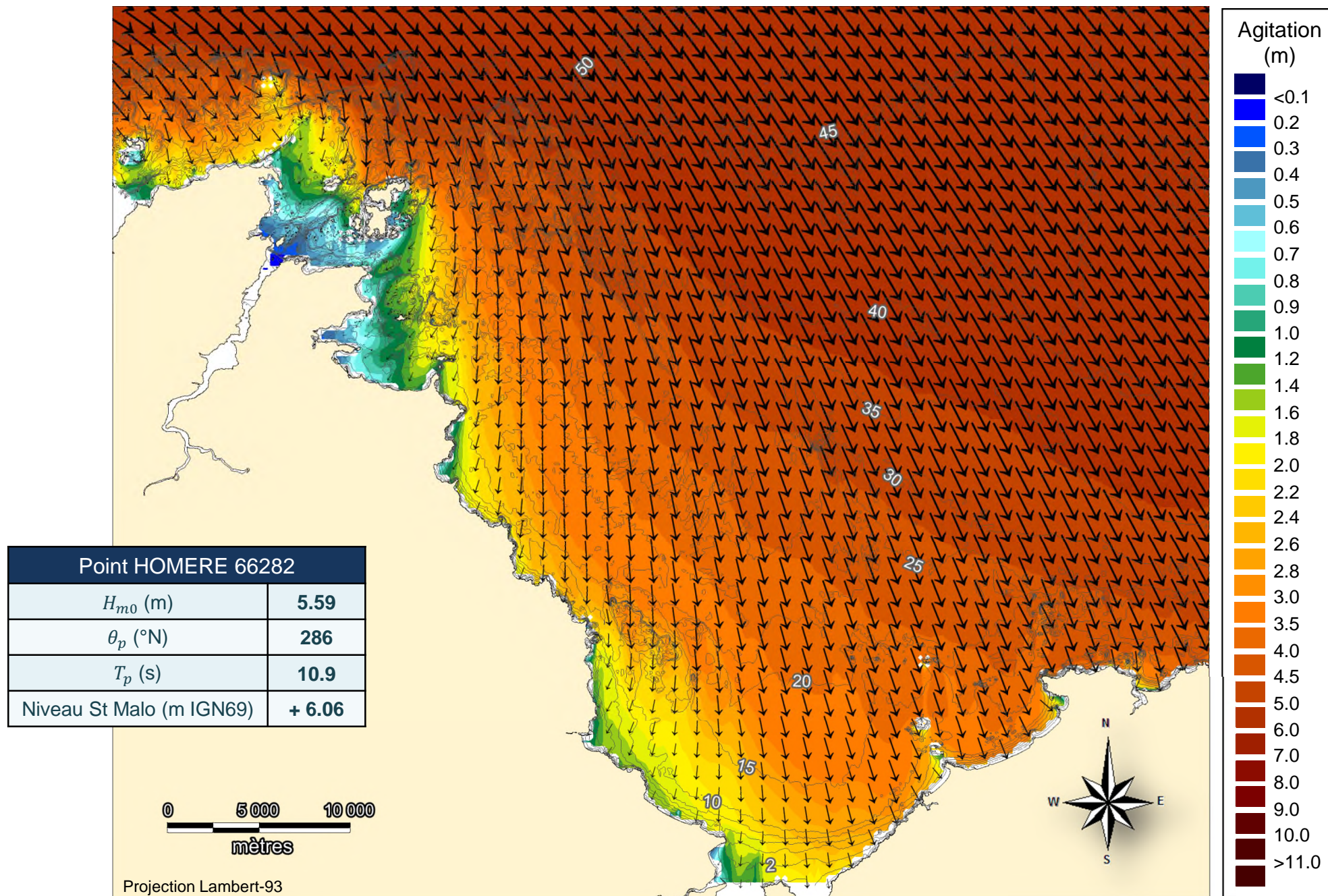




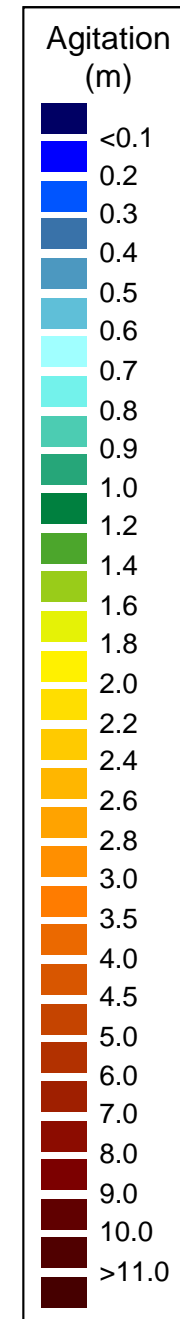
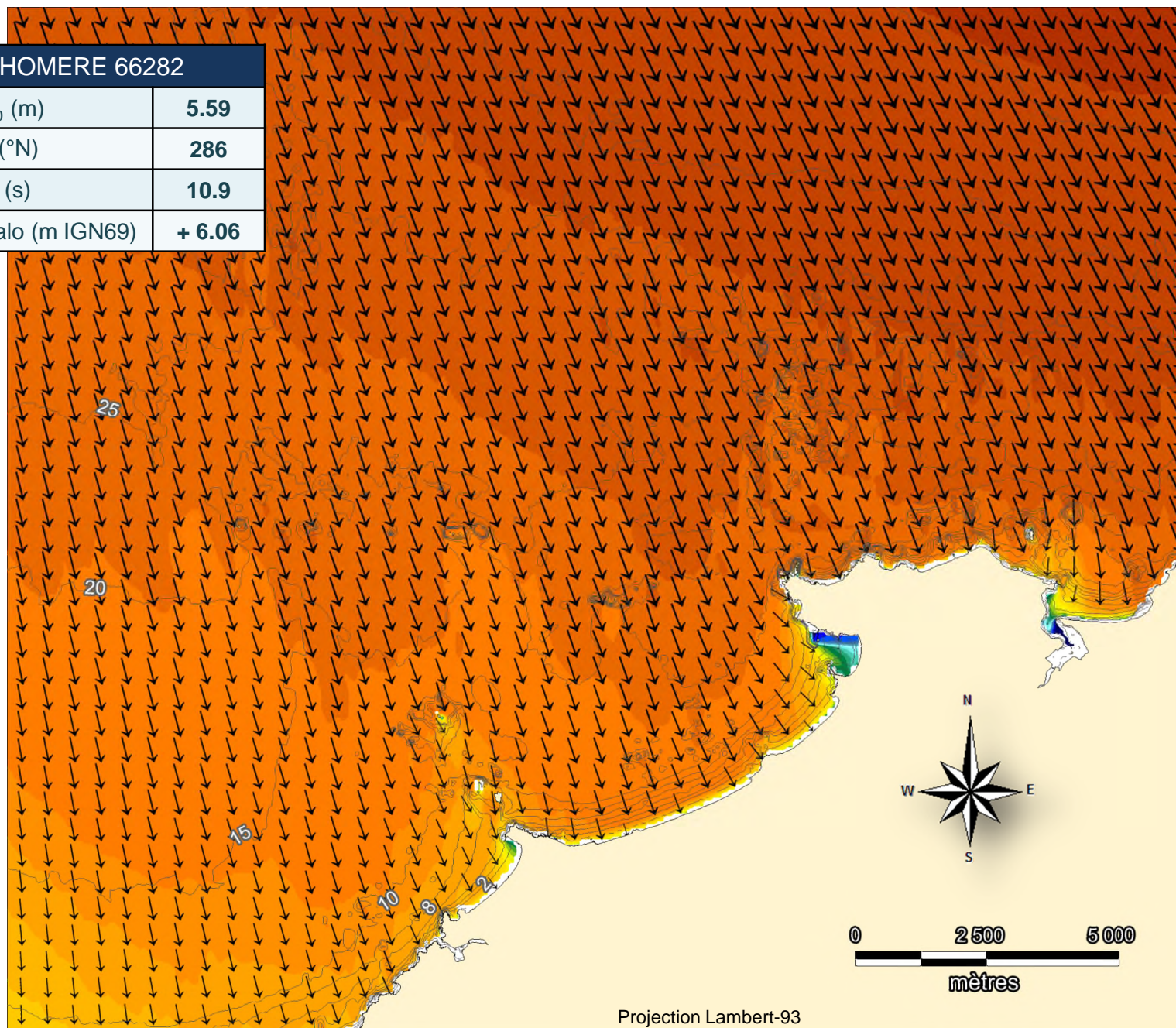


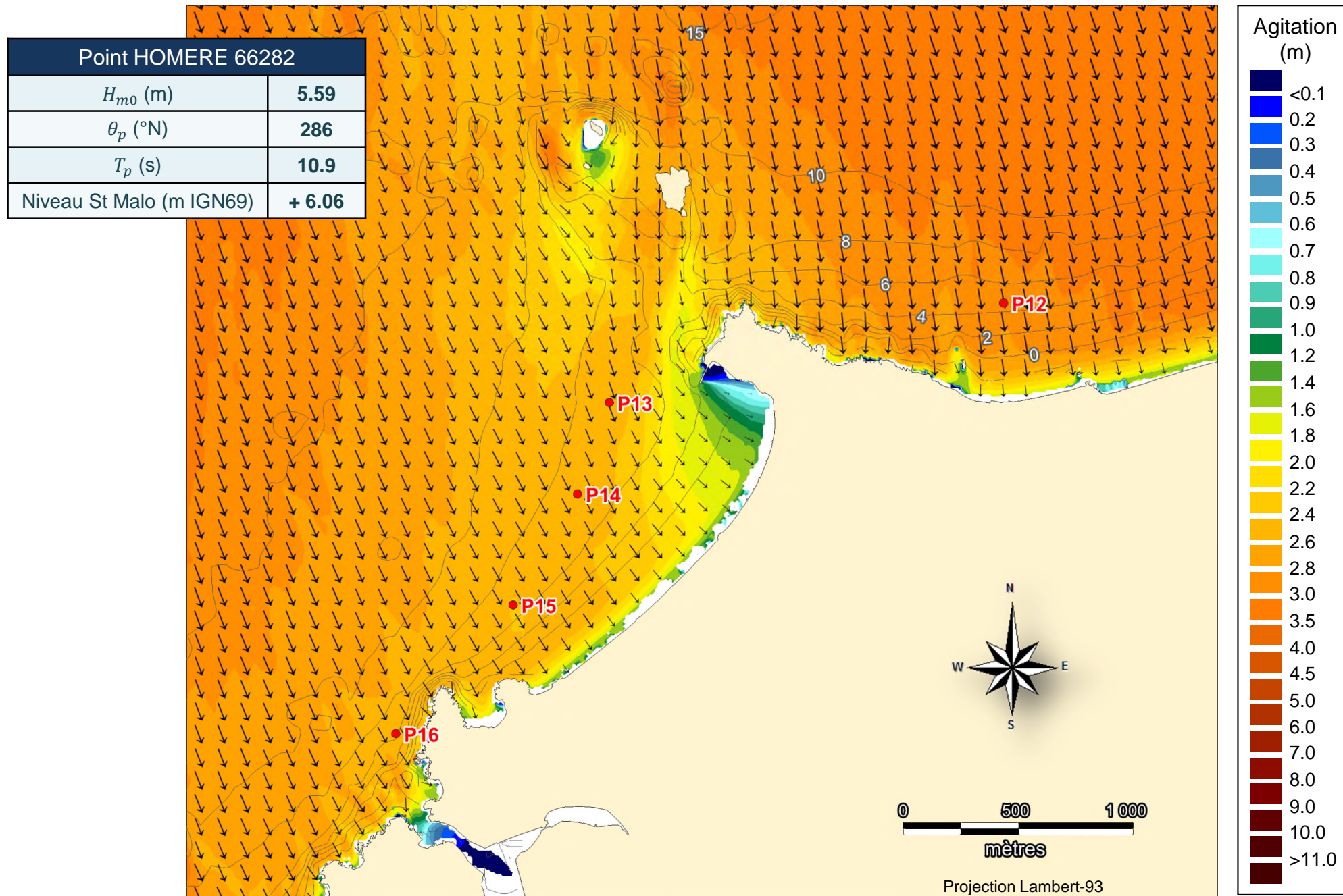


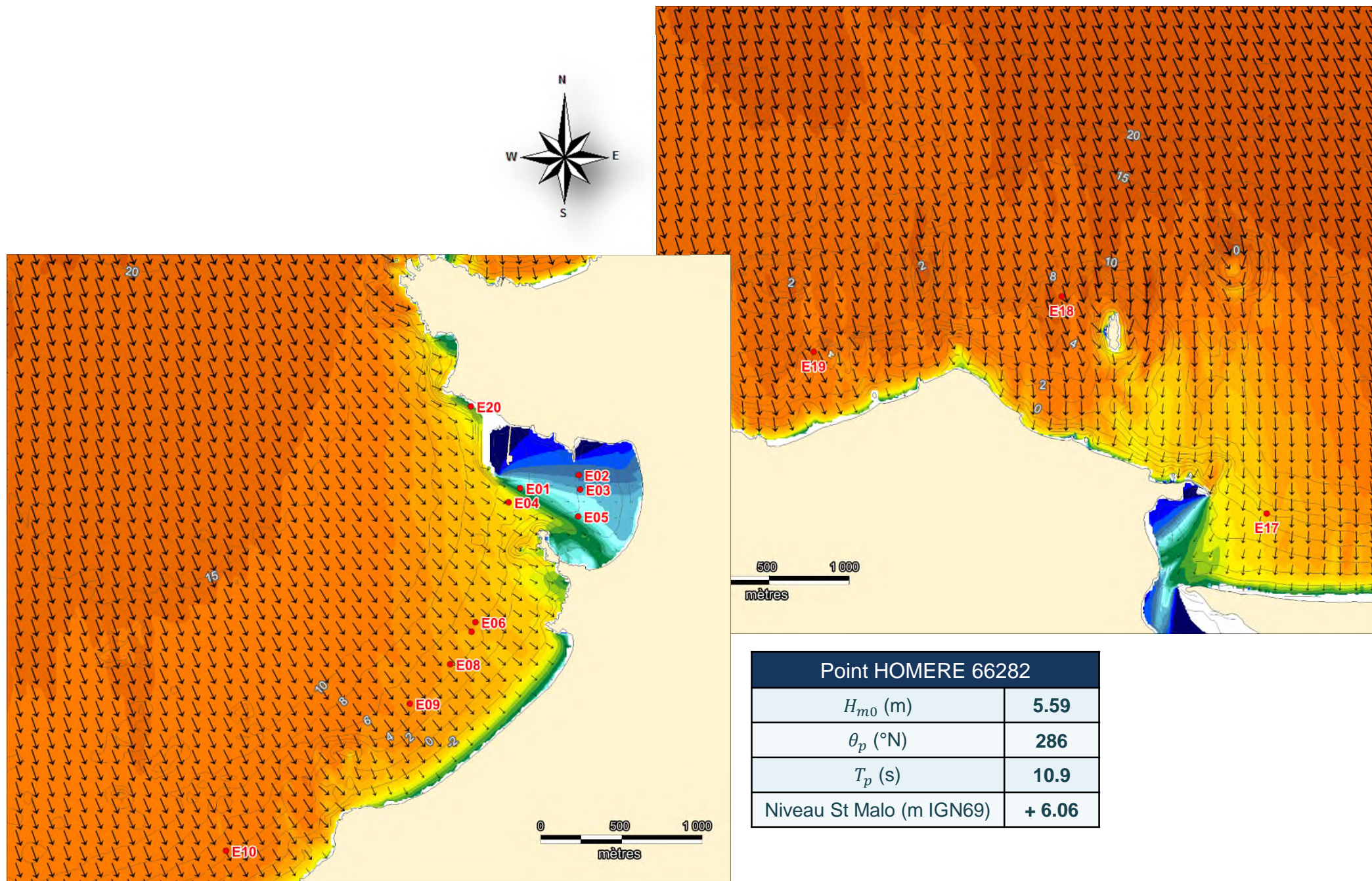
Point HOMERE 66282	
H_{m0} (m)	3.96
θ_p ($^{\circ}$ N)	282
T_p (s)	12.7
Niveau St Malo (m IGN69)	+ 7.14



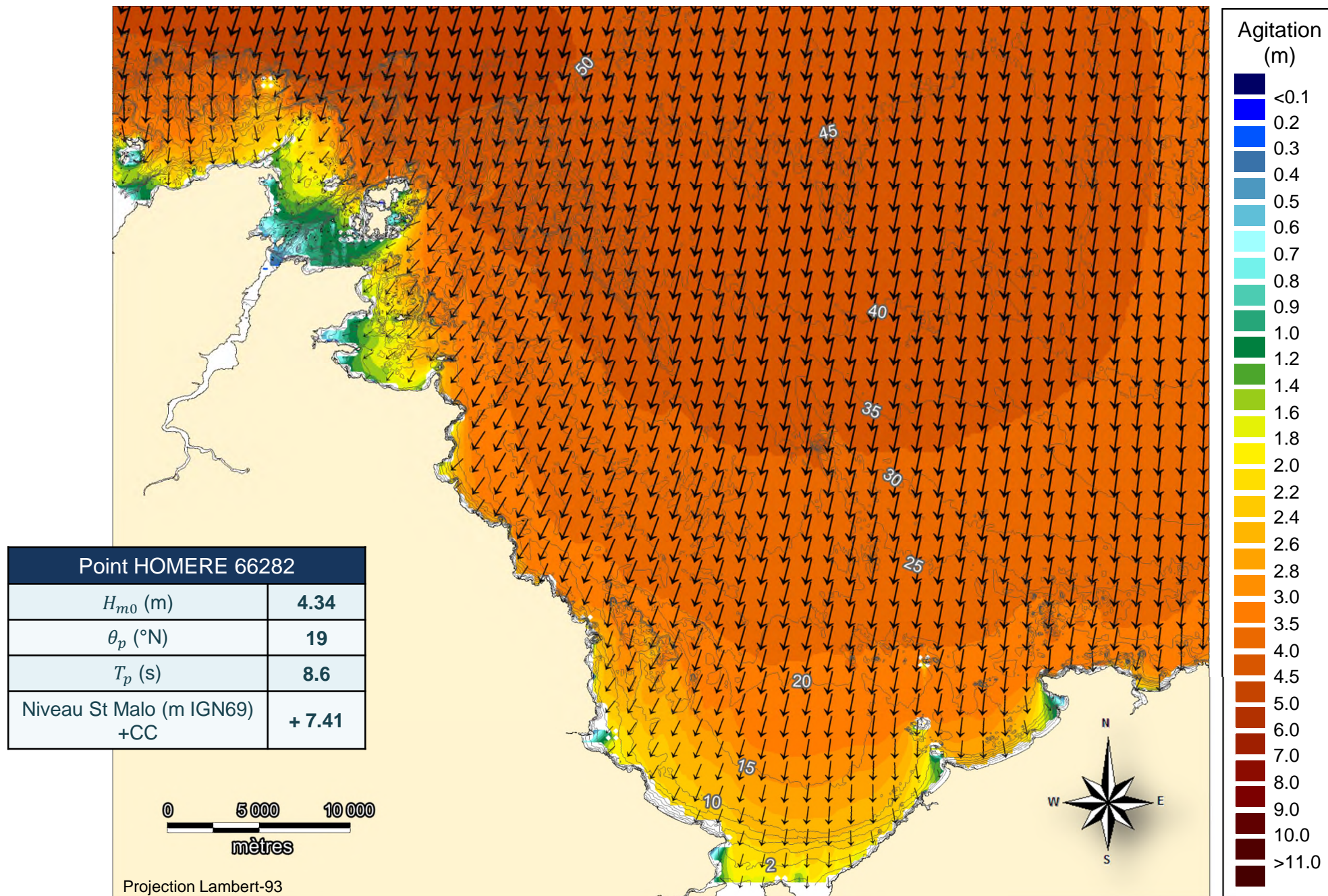
Point HOMERE 66282	
H_{m0} (m)	5.59
θ_p (°N)	286
T_p (s)	10.9
Niveau St Malo (m IGN69)	+ 6.06

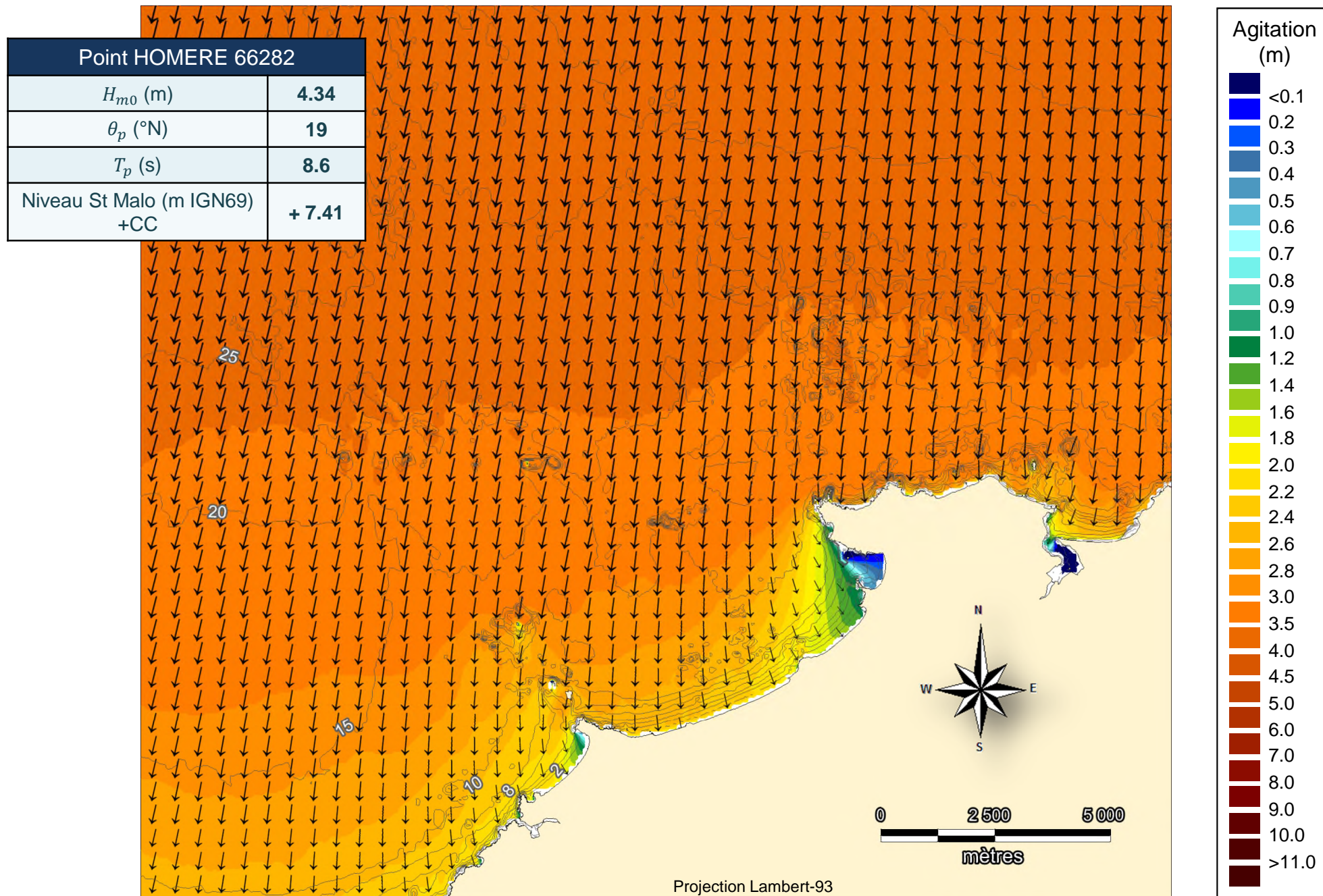


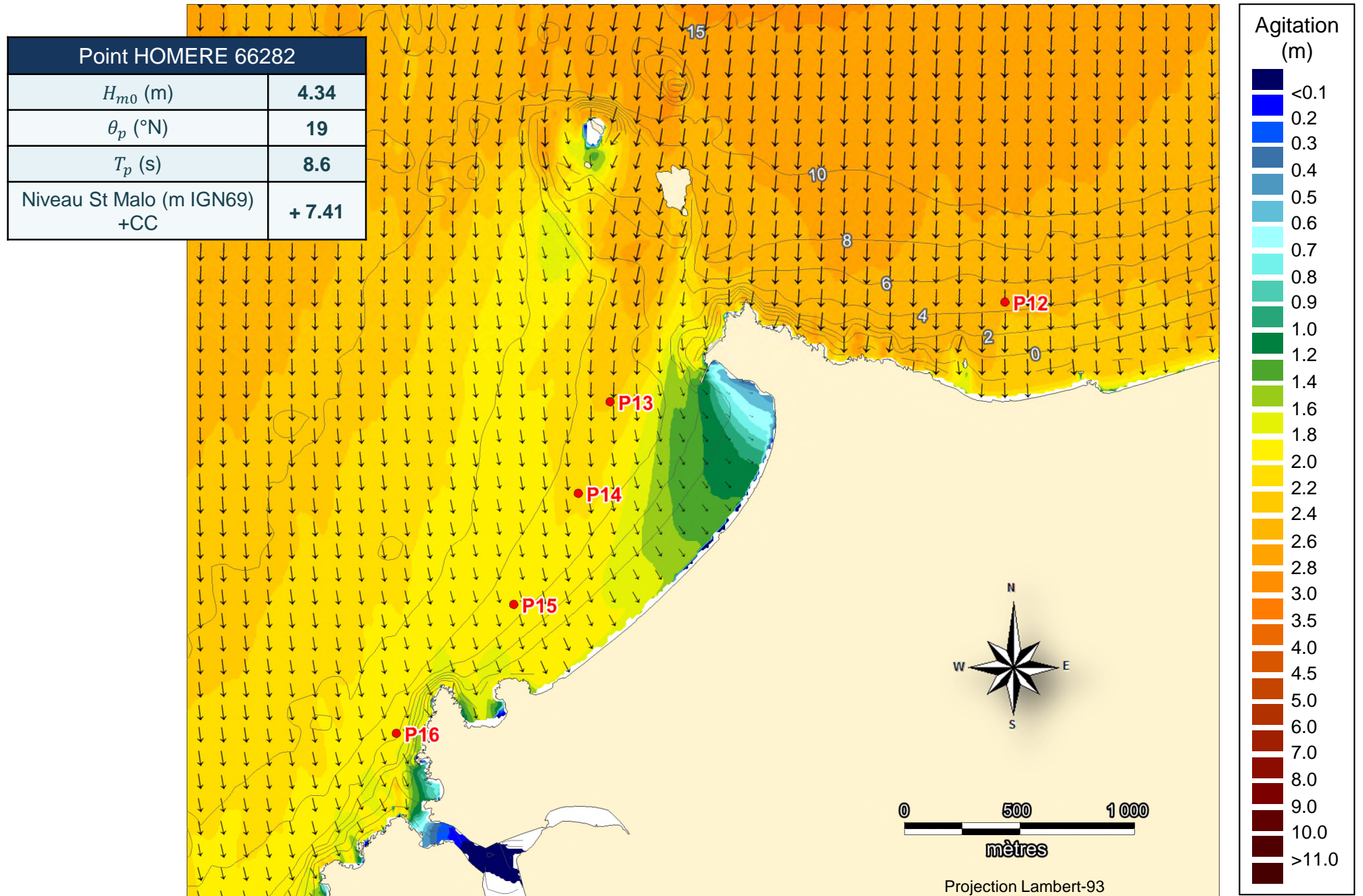


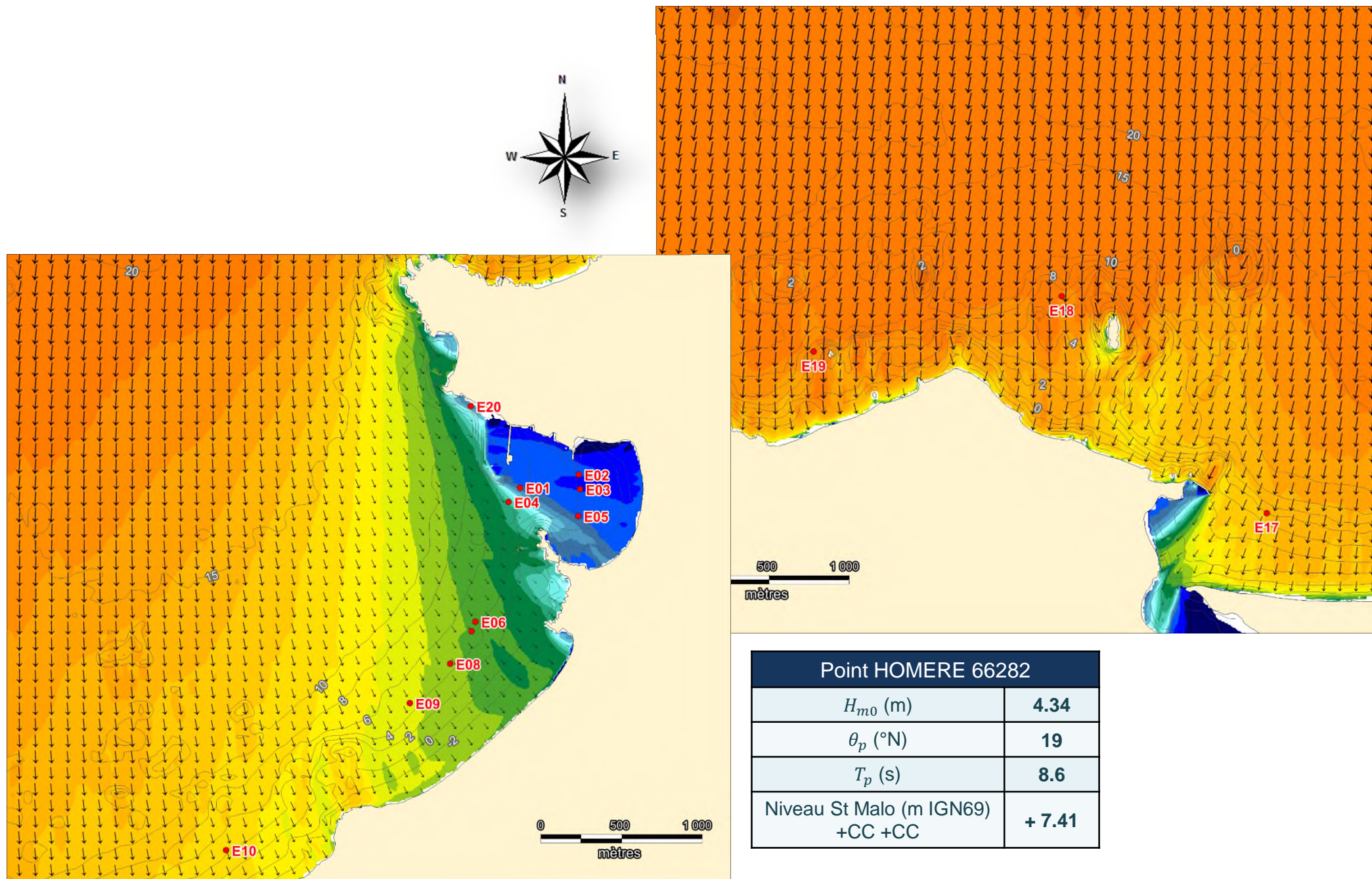


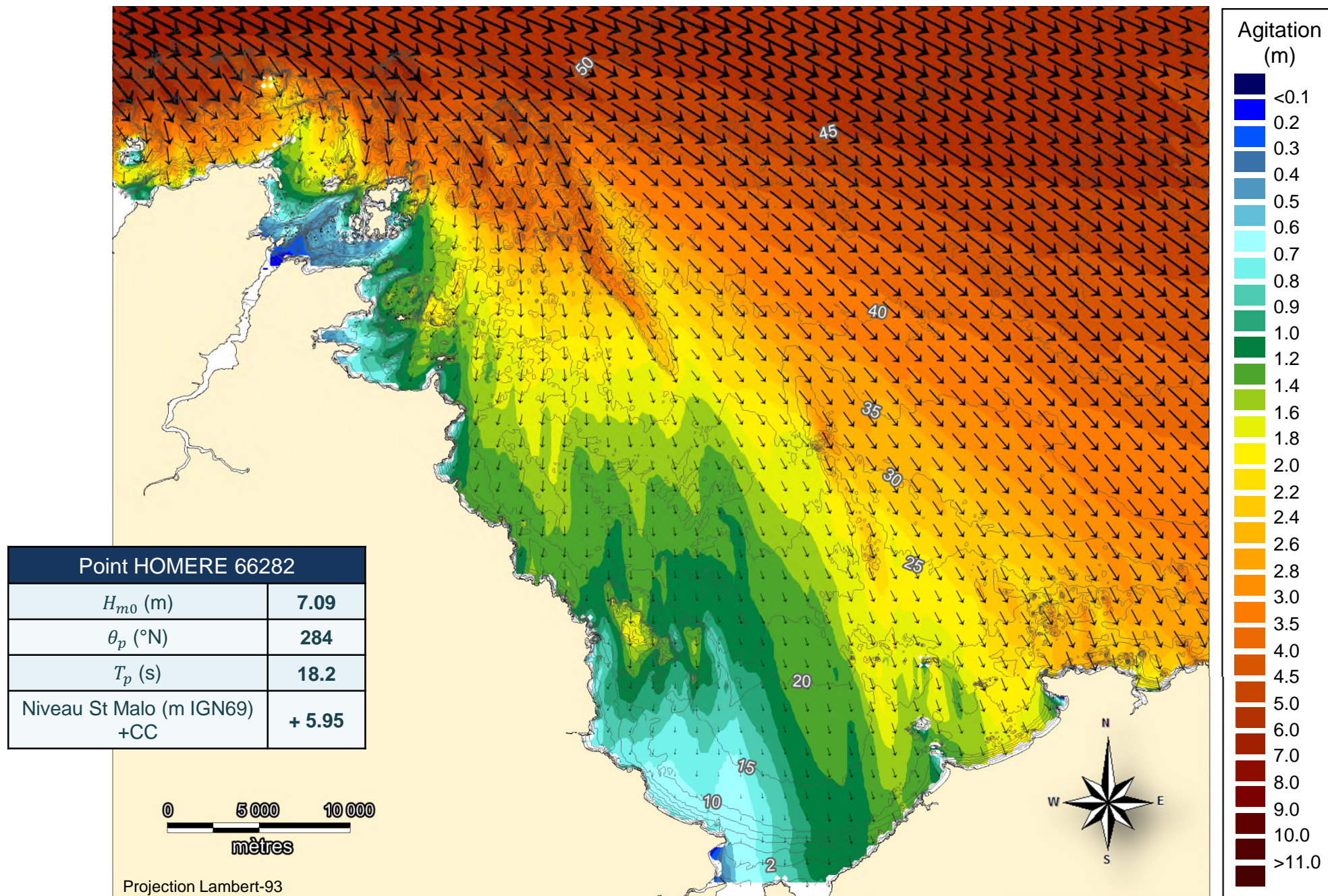
EPURES DE PROPAGATION AVEC CHANGEMENT CLIMATIQUE

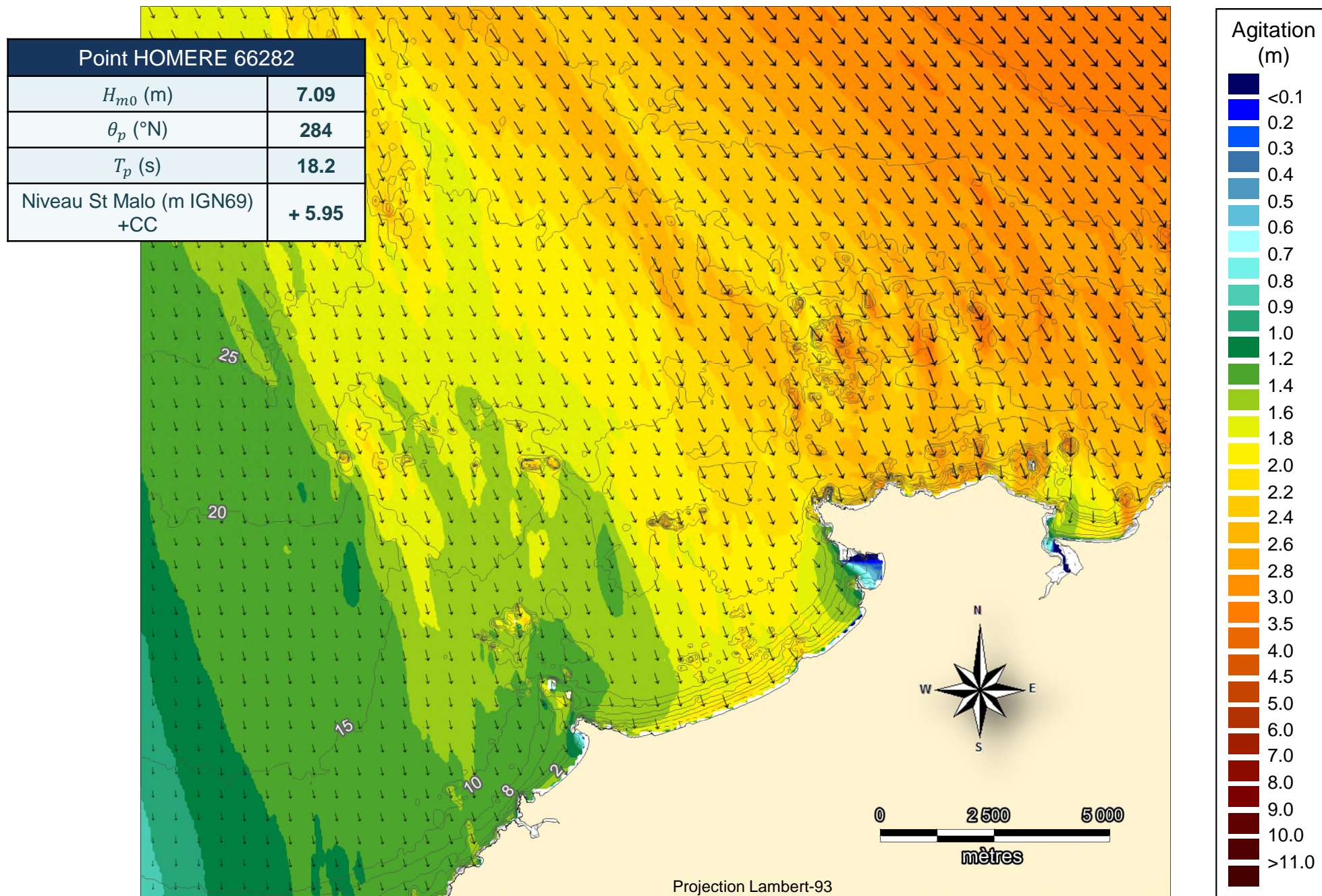


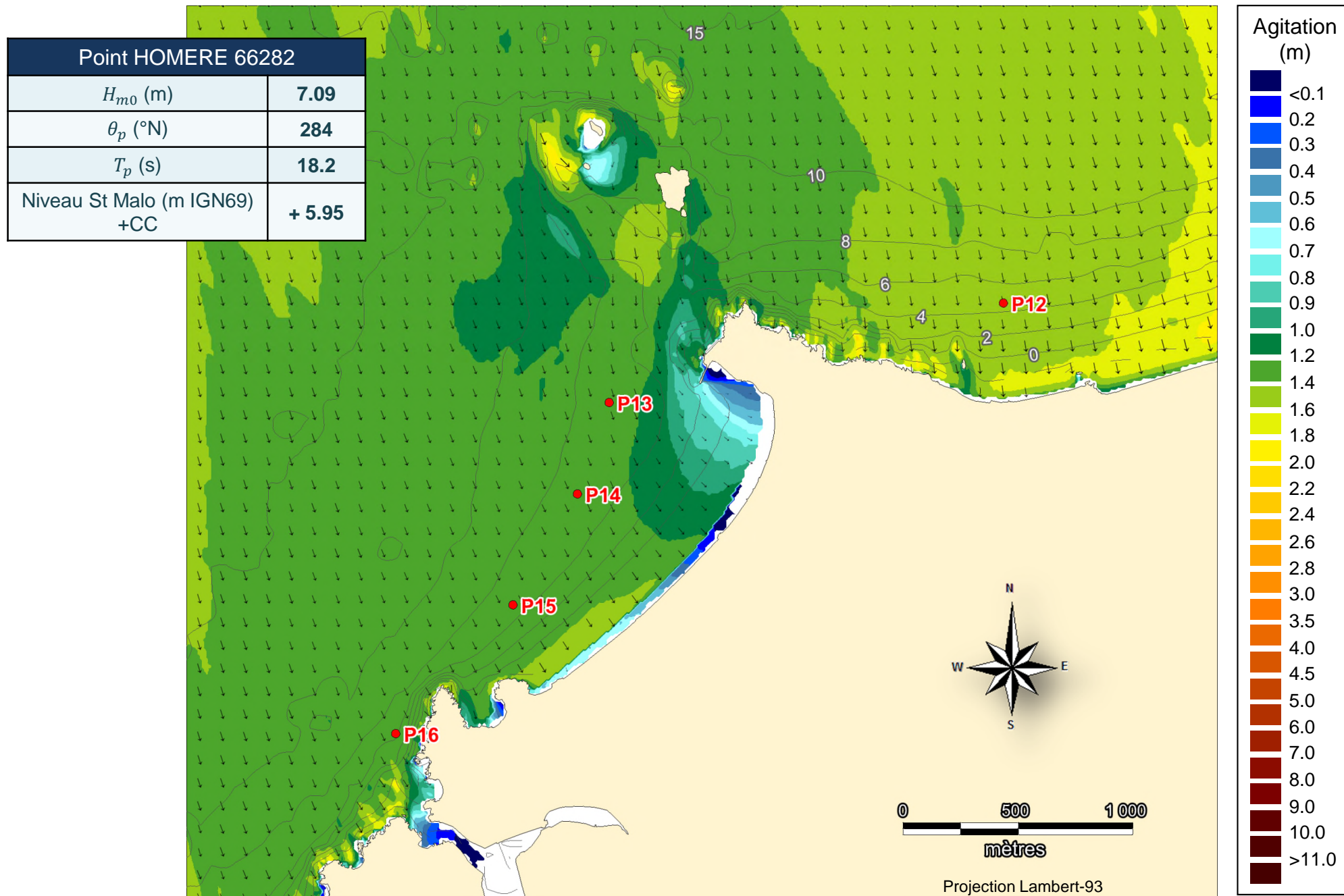


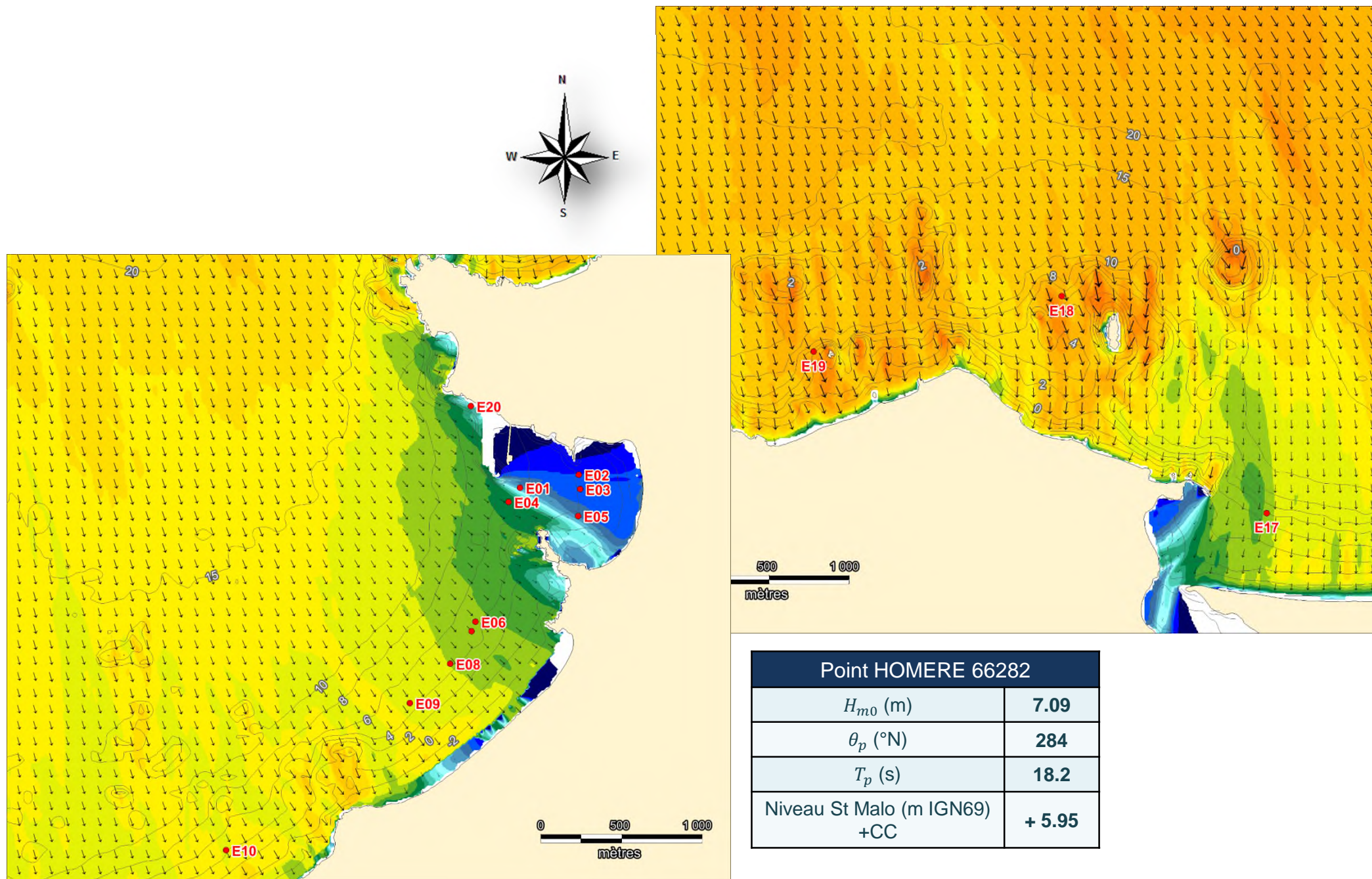


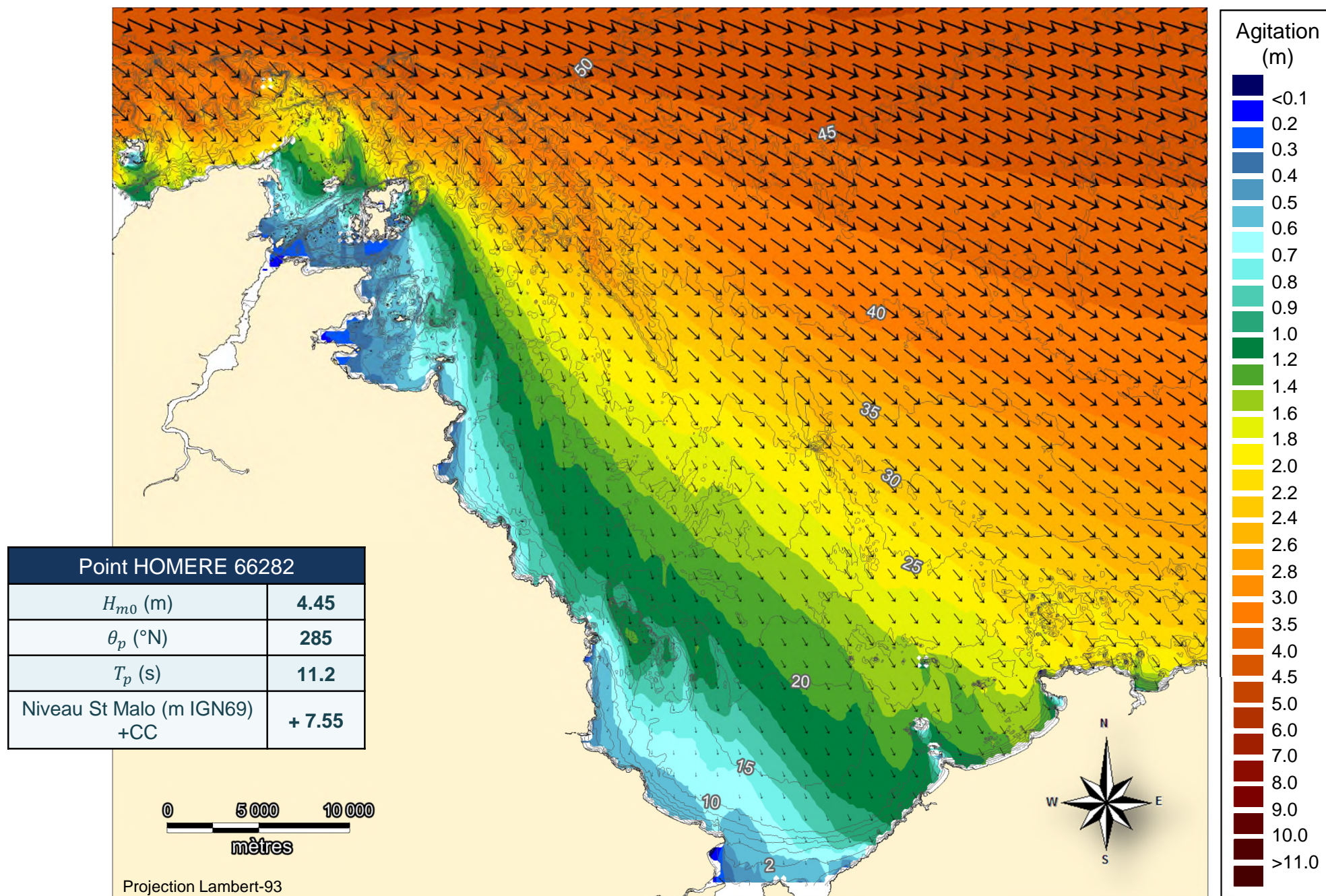


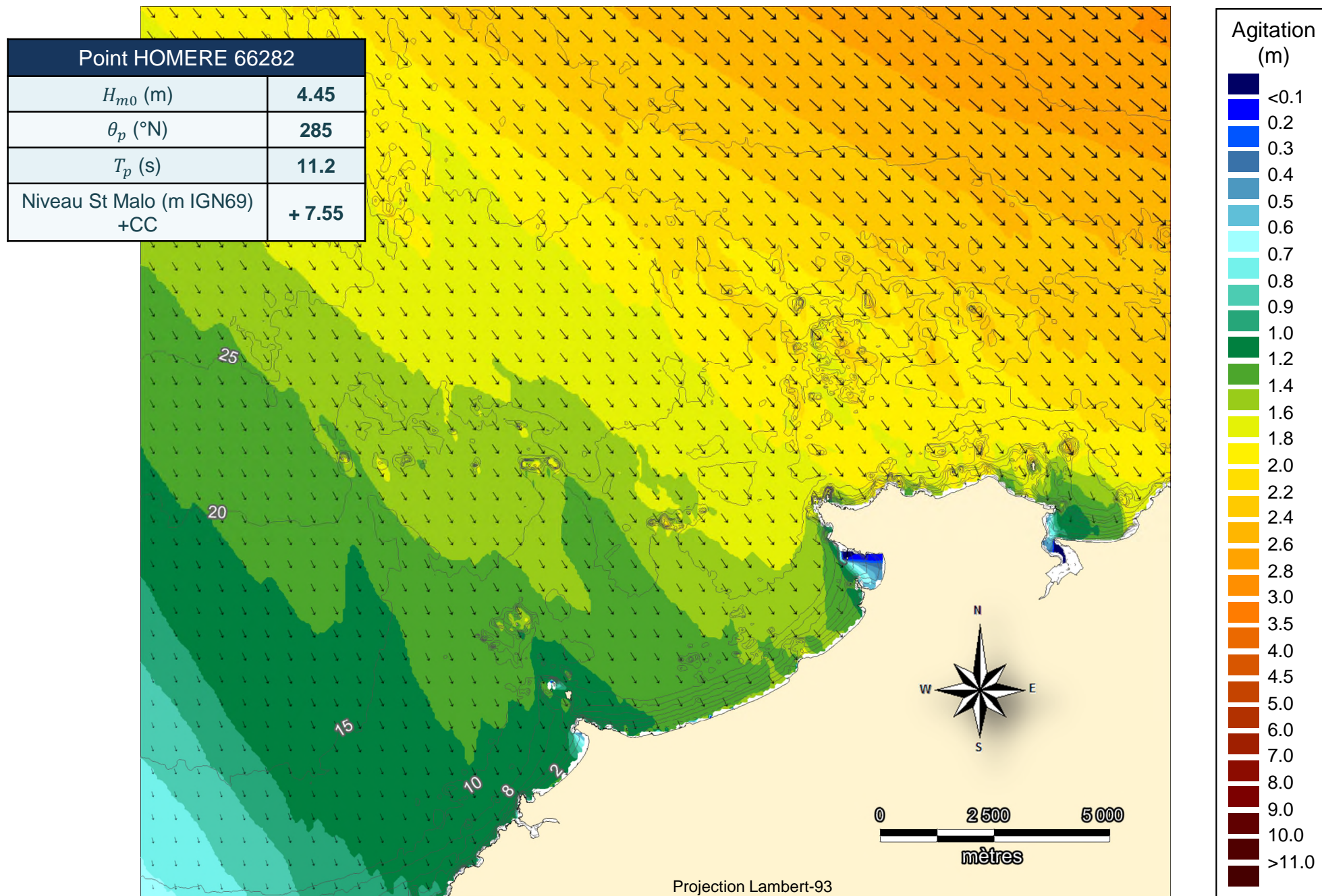


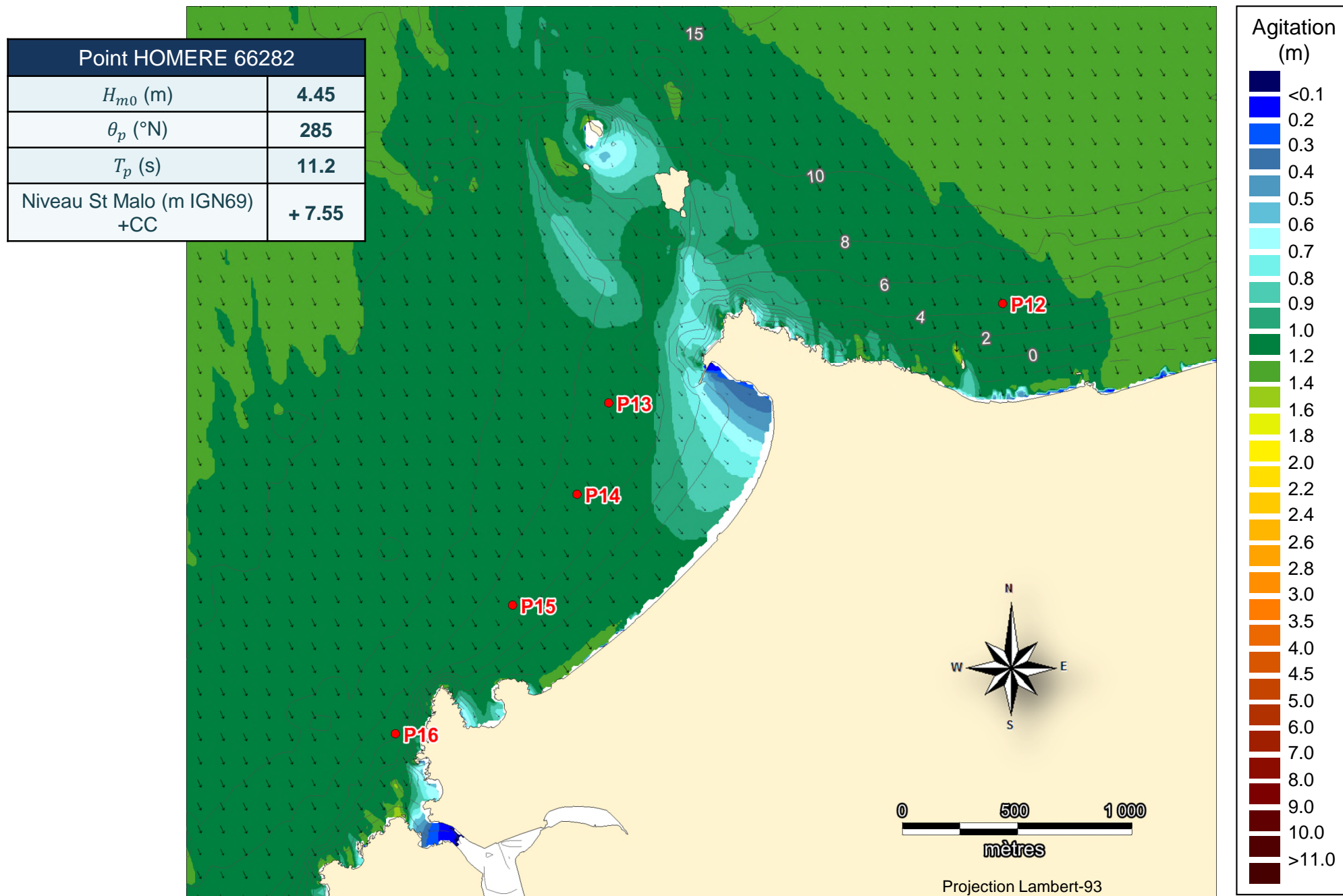


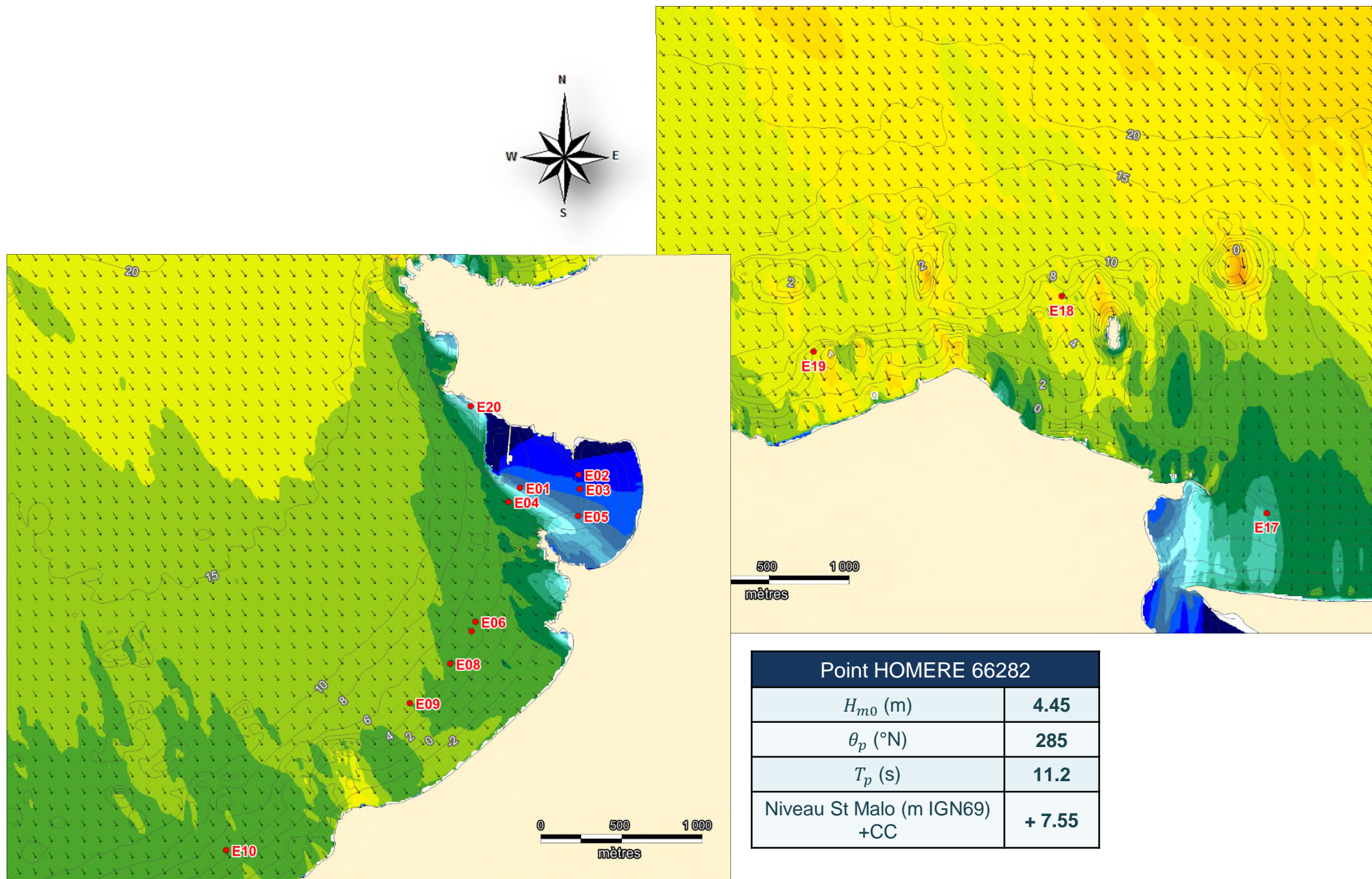


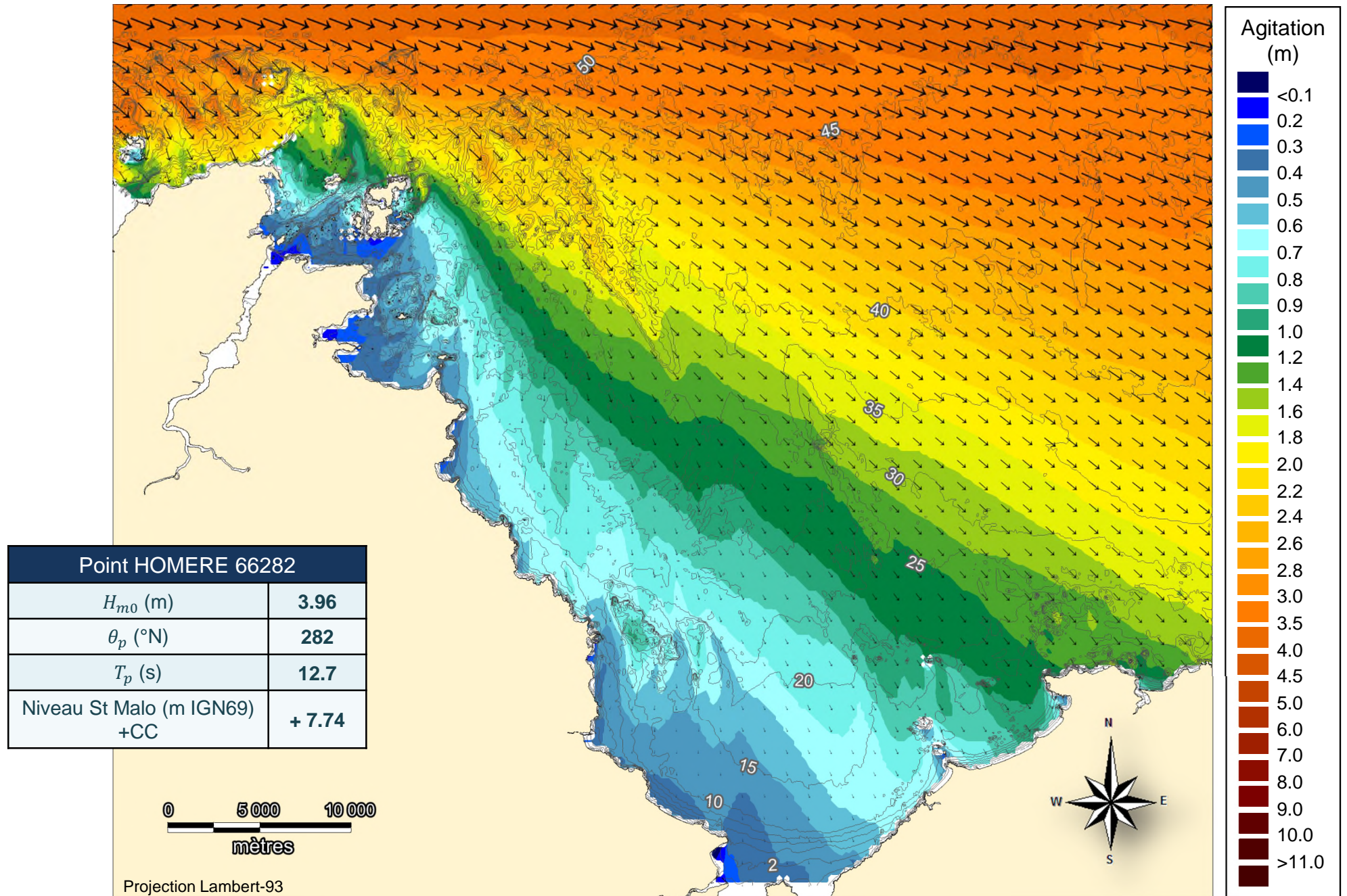


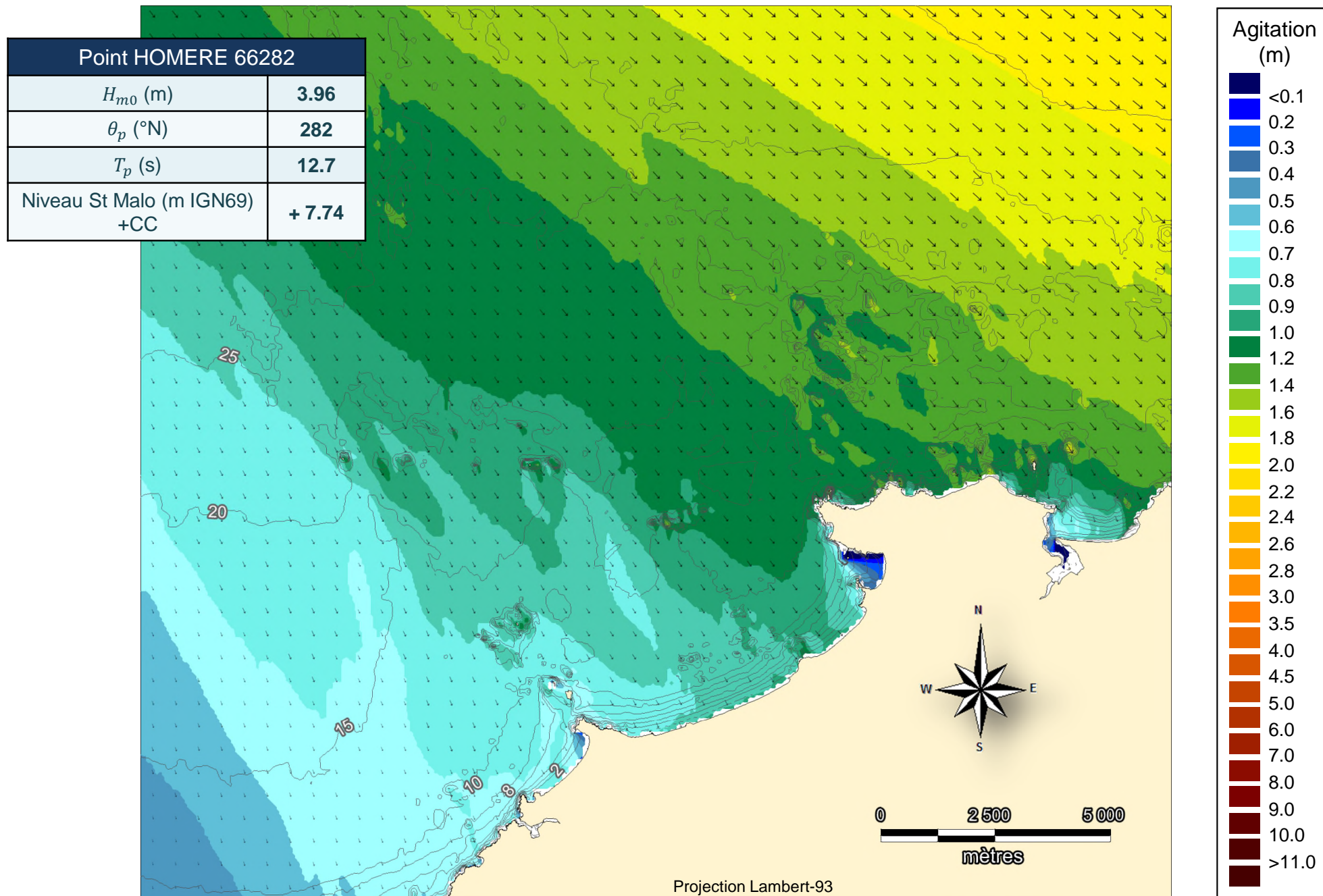


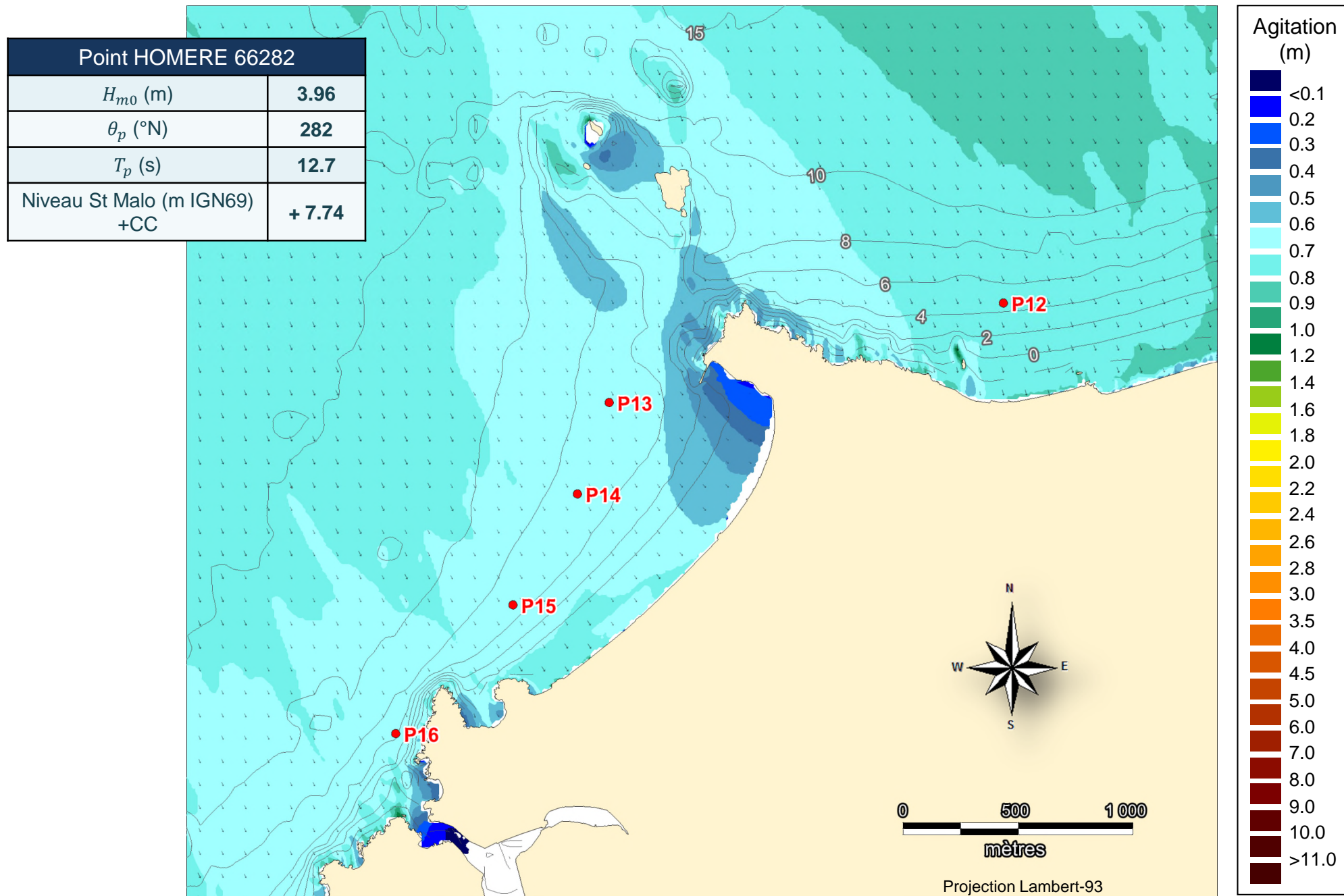


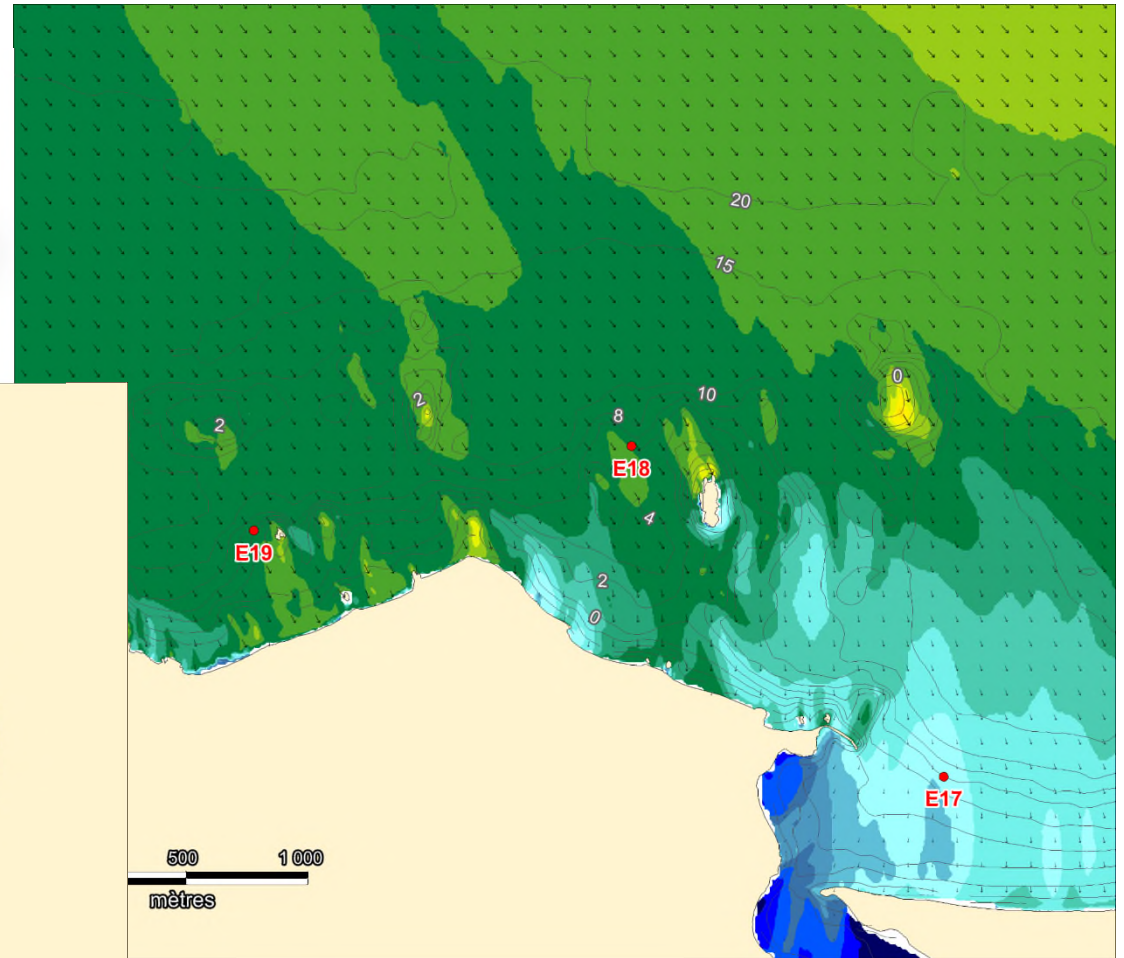
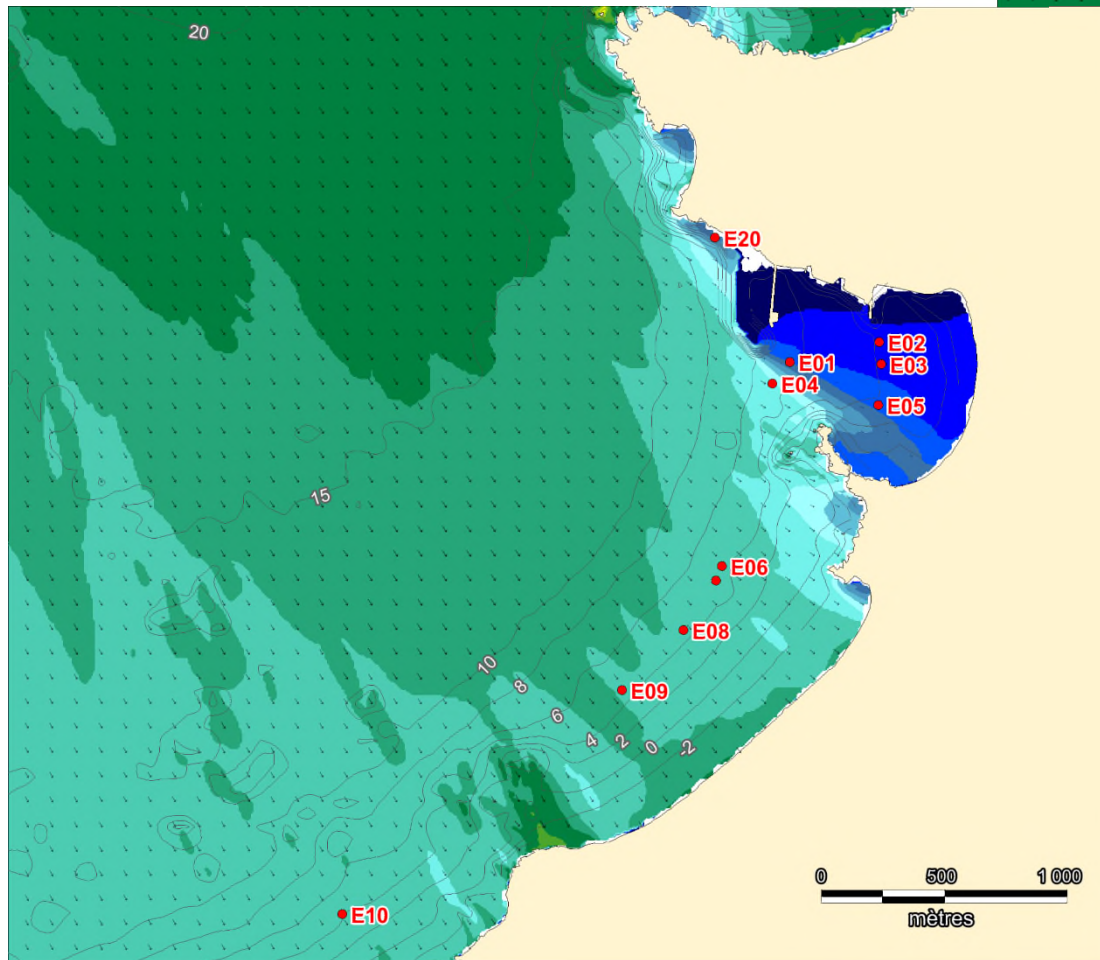




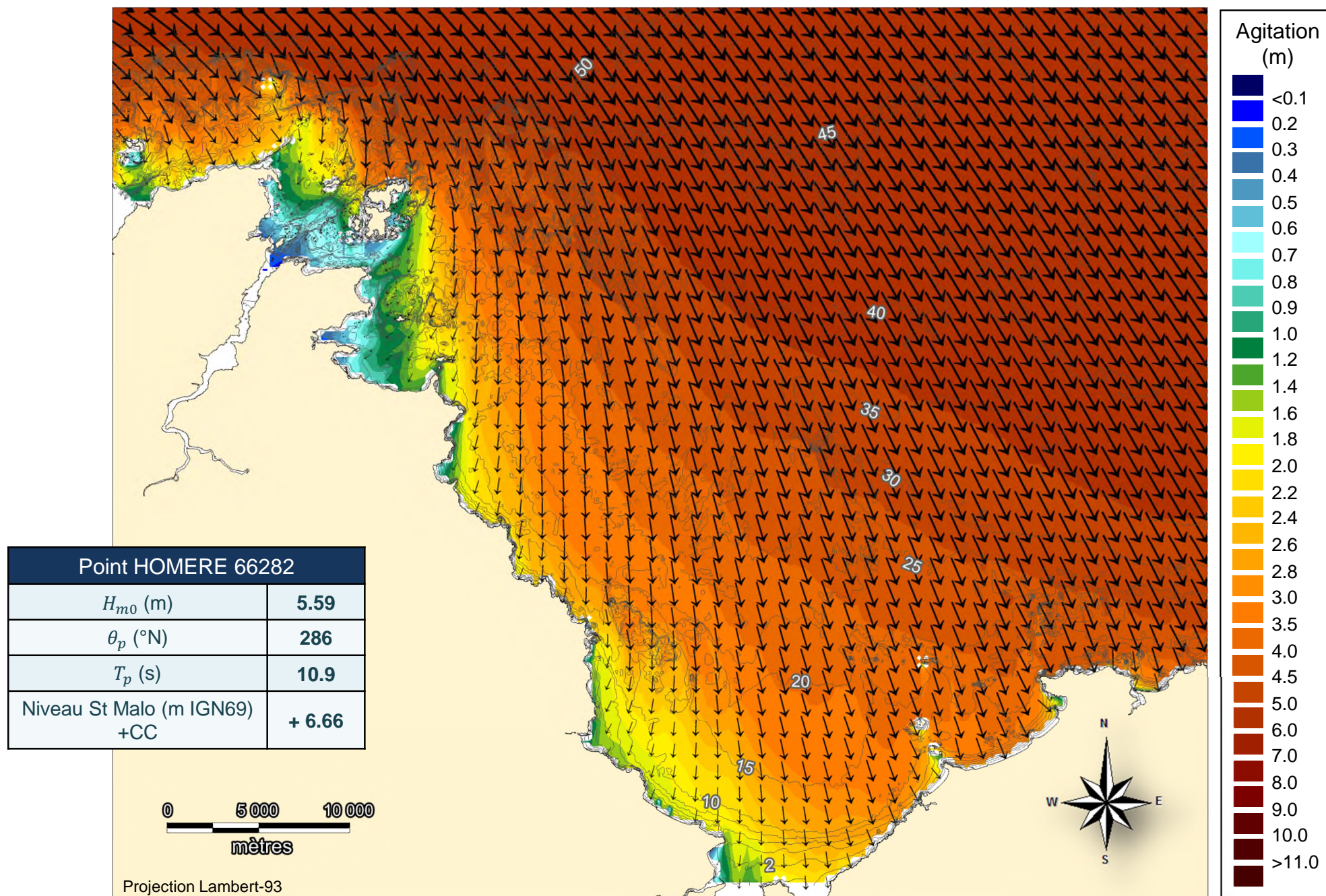








Point HOMERE 66282	
H_{m0} (m)	3.96
θ_p (°N)	282
T_p (s)	12.7
Niveau St Malo (m IGN69) +CC	+ 7.74



Point HOMERE 66282	
H_{m0} (m)	5.59
θ_p (°N)	286
T_p (s)	10.9
Niveau St Malo (m IGN69) +CC	+ 6.66

