

# Modélisation et étude des états de mer sur la zone EMR de Dunkerque

Fabien Leckler  
Cyril Lathuilière  
Héloïse Michaud  
Audrey Pasquet  
Nadine Le Bec  
Eric Duporte

6 Avril 2017

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>4</b>
1.1	1. Description de la zone . . . . .	4
1.2	Les processus dominants sur la zone de Dunkerque . . . . .	4
1.2.1	Le levage ( <i>shoaling</i> ) . . . . .	5
1.2.2	La réfraction . . . . .	6
1.2.3	Les effets des courants . . . . .	6
1.2.4	Le déferlement . . . . .	7
1.3	Les modèles spectraux d'état de mer . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Mise en place du modèle d'état de mer WAVEWATCH III®</b>	<b>9</b>
2.1	Discrétisation spectrale du modèle . . . . .	10
2.2	Paramétrisations physiques du modèle . . . . .	10
2.3	Les grilles de calculs . . . . .	11
2.3.1	La grille MANGAS : Manche - Gascogne . . . . .	11
2.3.2	La grille DUNK : Zone EMR de Dunkerque . . . . .	11
2.4	Les forçages . . . . .	12
2.4.1	Le vent . . . . .	12
2.4.2	Les conditions aux limites . . . . .	13
2.4.3	Les courants et hauteurs d'eau . . . . .	13
2.5	Les dates rejouées . . . . .	13
2.6	Les paramètres intégrés des vagues . . . . .	14
2.7	Validation des modèles . . . . .	16
2.7.1	Validation avec les satellites altimétriques . . . . .	17
2.7.2	Validation avec les bouées houlographes du réseau CANDHIS . . . . .	19
2.7.3	Validation du forçage de vent avec la base de données GLOBWAVE . . . . .	25
2.7.4	Validation avec les profileurs de courant houlographes . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Analyse statistique : modèle MANGAS 2005-2016</b>	<b>30</b>
3.1	Analyse de l'état de mer total . . . . .	30
3.2	Analyse de l'état de mer en fonction de la direction moyenne des vagues . . . . .	31
3.3	Analyse de l'état de mer par systèmes de vagues . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Analyse spatiale : modèle DUNK</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>Conclusions de l'étude</b>	<b>48</b>
<b>6</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>49</b>
<b>A</b>	<b>Validations Modèle/Altimètres par années</b>	<b>52</b>
A.1	Année 2005 . . . . .	52
A.2	Année 2006 . . . . .	53
A.3	Année 2007 . . . . .	54
A.4	Année 2008 . . . . .	55
A.5	Année 2009 . . . . .	56
A.6	Année 2010 . . . . .	57
A.7	Année 2011 . . . . .	58
A.8	Année 2012 . . . . .	59

A.9	Année 2013	60
A.10	Année 2014	61
A.11	Année 2015	62
A.12	Année 2016	63
<b>B</b>	<b>Validations Modèle/bouées (CANDHIS)</b>	<b>64</b>
B.1	Bouée 05902 : Ruytingen	64
B.2	Bouée 06202 : Calais	65
B.3	Bouée 06201 : Vergoyer	66
B.4	Bouée 05008 : Cherbourg (extérieur)	67
B.5	Bouée 07601 : Antifer	68
B.6	Bouée 02204 : Bréhat	69
B.7	Bouée 02203 : Les Minquiers Nord	70
B.8	Bouée 02202 : Les Minquiers2	71
B.9	Bouée 02910 : Roscoff (Port de Bloscon)	72
B.10	Bouée 02902 : Ouessant large	73
B.11	Bouée 02919 : Kereon	74
B.12	Bouée 02911 : Les Pierres Noires	75
B.13	Bouée 02917 : Ouessant sud	76
B.14	Bouée 02916 : Ile de Sein Nord	77
B.15	Bouée 02920 : Ile de Sein	78
B.16	Bouée 02915 : Ile de Sein Sud	79
B.17	Bouée 02921 : Esquibien	80
B.18	Bouée 02914 : Penmarc'h	81
B.19	Bouée 05602 : Belle-Ile	82
B.20	Bouée 04403 : Plateau du Four	83
B.21	Bouée 04401 : Saint Nazaire	84
B.22	Bouée 08504 : Ile d'Yeu Nord	85
B.23	Bouée 01704 : Oléron Large	86
B.24	Bouée 01703 : Oléron (SHOM)	87
B.25	Bouée 03302 : Cap Ferret	88
B.26	Bouée 06402 : Anglet	89
B.27	Bouée 06403 : Saint-Jean-de-Luz	90
<b>C</b>	<b>Validations Modèle/bouées (GLOBWAVE)</b>	<b>91</b>
C.1	Bouée WMO62170	91
C.2	Bouée WMO62304	92
C.3	Bouée WMO62305	93
<b>D</b>	<b>Validations Modèle/AWAC</b>	<b>94</b>
<b>E</b>	<b>Détails des fichiers fournis dans les livrables</b>	<b>94</b>
E.1	Fichiers de sortie du modèle MANGAS	95
E.2	Fichiers de sortie du modèle DUNK	97
E.3	Détails des données issues des profileurs de courant houlographes	98

# 1 Introduction

## 1.1 1. Description de la zone

La présente étude s'intéresse aux états de mer sur les zones A et B de l'appel d'offre pour les EMR au large de Dunkerque. Les zones sont tracées sur la carte marine 6735 (Pas de Calais - De Boulogne-sur-Mer à Zeebrugge - Estuaire de la Tamise) en figure 1. La zone retenue pour l'appel d'offre est une zone de faibles profondeurs, avec des profondeurs allant de 25m à 1.5m (par rapport au Zéro Hydrographique, ZH). Par ailleurs, la bathymétrie présente de forts gradients avec la présence de grands bancs de sable (Est-Ouest), eux-mêmes surmontés de dunes dynamiques (cf. rapport de sédimentologie). Enfin, la zone est soumise à de fortes variations tidales du courant et de la hauteur d'eau (cf. rapport Marée/Courant).

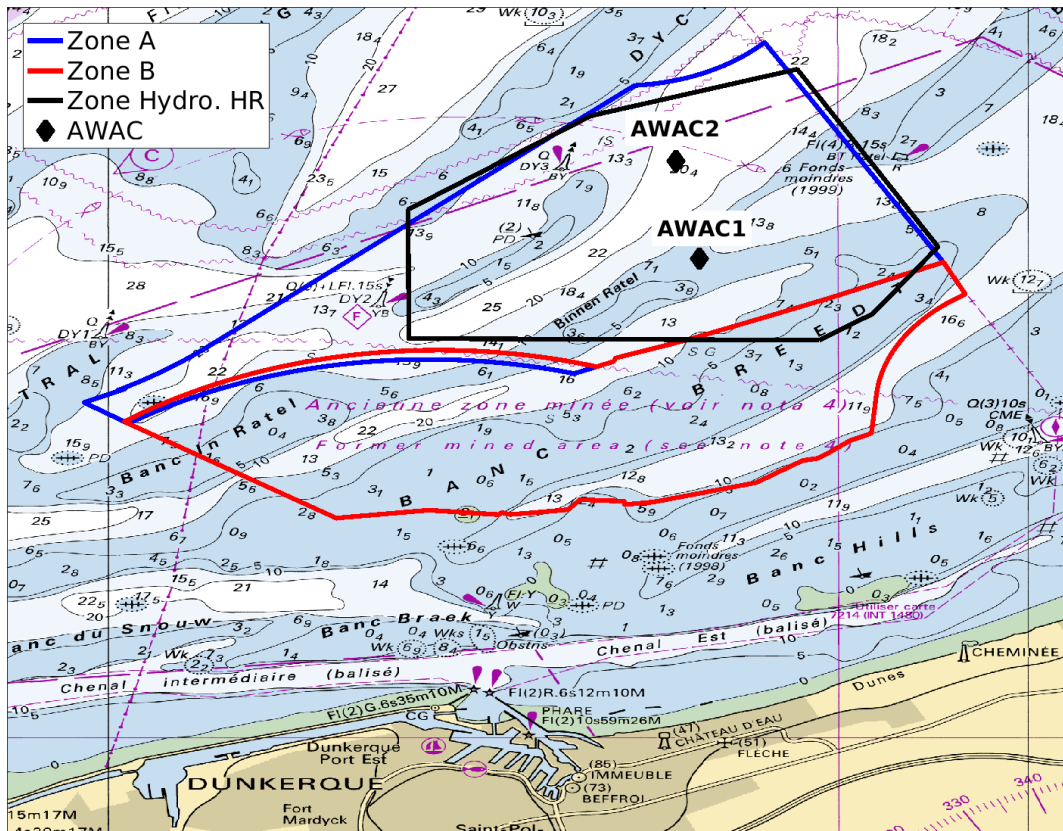


FIGURE 1 – Les zones A et B de l'appel d'offre EMR Dunkerque sont respectivement tracées en bleu et en rouge. La zone hydrographiée à très haute résolution est tracée en noir. Les positions des profilers de courant houlographiques (AWAC) mis en place en septembre 2016 sont représentées par les points noirs. Le fond de carte est la carte marine n°6735 (Pas de Calais - De Boulogne-sur-Mer à Zeebrugge - Estuaire de la Tamise).

## 1.2 Les processus dominants sur la zone de Dunkerque

En zone côtière, les principales caractéristiques des vagues (amplitude, longueur d'onde et direction) sont affectées par la profondeur d'eau limitée. Ces effets sont modulés par la variation tidale du niveau de la mer qui modifie la hauteur d'eau vue par les vagues. Par ailleurs, les courants dus à la marée ont également une influence sur la propagation des vagues. Les principaux processus physiques qui entrent en jeu sur la zone de Dunkerque sont donc :

- Le levage : modification de l’amplitude des vagues associée à la variation de leur vitesse de groupe ;
- La réfraction : modification de la direction (et de l’amplitude) des vagues due à des variations de vitesse de phase le long des crêtes de vagues ;
- La dissipation par déferlement bathymétrique ;
- La dissipation par frottement sur le fond ;
- L’effet des courants de marée.

### 1.2.1 Le levage (*shoaling*)

Les vagues monochromatiques (dites vagues d’Airy) qui se propagent au-dessus d’un fond avec des pentes faibles et en l’absence de courant conservent leur fréquence (ou leur pulsation) en respectant la relation de dispersion donnée par la théorie linéaire (Airy, 1841) :

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (1)$$

Leur longueur d’onde décroît donc avec la profondeur, et leur vitesse de phase (i.e. vitesse des crêtes) va diminuer donc elle aussi, suivant :

$$C_p = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \quad (2)$$

De même, avec la diminution de la profondeur, la vitesse de groupe augmente légèrement avant de chuter, suivant :

$$C_g = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) C_p \quad (3)$$

Ces variations de la vitesse de groupe (Fig. 2), qui correspond à la vitesse de propagation de l’énergie des vagues, ont des conséquences importantes sur l’énergie locale  $E$  et donc sur l’amplitude  $a$ , qui, dans le cas d’une onde monochromatique, sont reliées par la relation :

$$a = \sqrt{2E/\rho g} \quad (4)$$

avec  $\rho$ , la masse volumique de l’eau et  $g$ , l’accélération de la pesanteur. En négligeant les termes de dissipation et d’interactions non-linéaires, on a conservation du flux d’énergie des vagues. Dans le cas d’une vague d’Airy se propageant perpendiculairement aux isobathes sur une plage linéaire, la conservation du flux d’énergie donne :

$$C_{g,1}E_1 = C_{g,2}E_2 \quad (5)$$

avec  $C_{g,1}$ ,  $C_{g,2}$  les vitesses de groupes et  $E_1$ ,  $E_2$  l’énergie de la vague d’Airy, respectivement en deux points P1 et P2 le long du rayon de propagation de la vague. Ainsi, en combinant les équations 4 et 5, on obtient le levage d’une onde d’Airy se propageant perpendiculairement aux isobathes sur une plage linéaire telle que :

$$a_2 = \sqrt{\frac{C_{g,2}}{C_{g,1}}} a_1, \quad (6)$$

avec  $a_1$  et  $a_2$  les amplitudes, respectivement aux points P1 et P2. Ainsi, la conservation du flux d’énergie des vagues implique une diminution de l’énergie locale des vagues et donc de leur amplitude (Eq. 4) lorsque la vitesse de groupe augmente. Inversement, une augmentation de l’énergie locale des vagues et donc de leur amplitude se produit lorsque la vitesse de groupe diminue.

Cette modification porte le nom de levage ou *shoaling*, du mot *shoal* qui signifie haut-fond. Dans le cas d’une plage linéaire, le levage entraînera donc d’abord une légère diminution de l’amplitude avant de l’augmenter fortement. Evidemment, en réalité, de nombreux phénomènes limitent l’effet du levage comme le déferlement, la friction sur le fond, ou encore la réfraction (voir paragraphe 1.2.2) si l’on considère une topographie complexe.

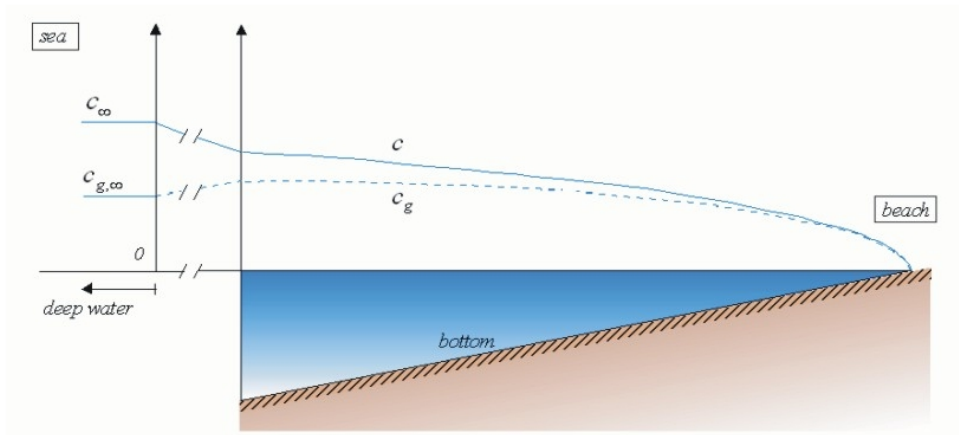


FIGURE 2 – Evolution de la vitesse de phase,  $C_p$ , (ici notée  $C$ ) et de la vitesse de groupe,  $C_g$ , en fonction de la profondeur. Figure extraite de Holthuijsen (2007).

### 1.2.2 La réfraction

La réfraction désigne un changement de direction de propagation des vagues dû à des variations de la vitesse de crête le long de la crête elle-même. Cette variation peut être due à des gradients de profondeur ou de courants le long de la crête. En effet, la vitesse de phase est dépendante de la profondeur (Eq. 2). Lorsque la profondeur sous une crête de vague varie, la vitesse de la crête va donc elle aussi varier. Les crêtes se propageant plus vite en eau profonde qu'en eau peu profonde, la crête tend donc à s'enrouler autour des régions les moins profondes.

Si l'on se place dans le cas d'une plage linéaire, toute vague se propageant avec un angle non nul par rapport à l'axe de la plage change lentement de direction, et les crêtes des vagues s'alignent avec les isobathes de la plage (Fig. 3).

L'effet de la réfraction ne se limite pas à la direction des vagues, elle affecte aussi leur amplitude. L'énergie contenue entre deux rayons est conservée en l'absence de processus dissipatifs. Par conséquent, la convergence des rayons des vagues entraîne une augmentation de l'énergie locale des vagues, et à l'inverse, la divergence des rayons entraîne une diminution de l'énergie locale des vagues. Ainsi, un dôme sous-marin se comporte comme une lentille convergente, avec une forte augmentation de l'amplitude de l'onde derrière le dôme.

### 1.2.3 Les effets des courants

Ils peuvent avoir plusieurs effets :

- levage
- réfraction
- changement de fréquence (effet Doppler)
- transfert d'énergie entre vagues et courants

L'effet du courant introduit un décalage Doppler des vitesses de phase et de groupe :

$$C'_p = C_p + U \quad (7)$$

$$C'_g = C_g + U \quad (8)$$

Dans un repère fixe, la fréquence observée est la fréquence absolue :

$$\omega' = \omega + \mathbf{k} \cdot \mathbf{U} \quad (9)$$

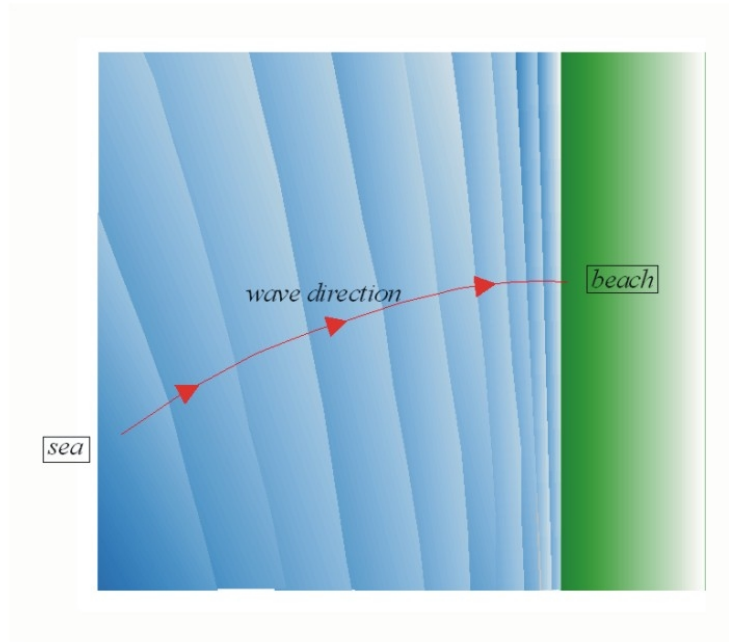


FIGURE 3 – Illustration de la réfraction : une vague tourne toujours vers les profondeurs les plus faibles. Figure extraite de Holthuijsen (2007).

La relation définissant la vitesse de groupe est toujours valable :

$$C'_g = \frac{\partial \omega'}{\partial k} \quad (10)$$

Dans le cas où le courant est dans la direction opposée à la propagation et s'accélère, la vitesse de groupe de l'onde  $\mathbf{C}'_g = \mathbf{C}_g + \mathbf{U}$  diminue au fur et à mesure que l'onde se propage. Par conservation du flux d'énergie, un ajustement local de l'énergie des vagues entraîne une augmentation de l'amplitude des vagues, donc un levage.

Comme les variations de profondeurs, les variations locales de courant induisent de la réfraction. Si la vitesse du courant varie le long de la crête, la vitesse de celle-ci  $\mathbf{C}'_p = \mathbf{C}_p + \mathbf{U}$  varie le long de la crête entraînant une modification de la direction de propagation.

#### 1.2.4 Le déferlement

Le principal puits d'énergie des vagues est le déferlement. Cette énergie est alors transférée vers l'océan principalement sous forme de turbulence. On séparera le déferlement bathymétrique dû à la diminution de la profondeur et le déferlement par moutonnement, ayant lieu en eau profonde sous l'action du vent. Dans ces deux cas, le déferlement apparaît lorsque les vitesses orbitales des particules d'eau à la crête des vagues atteignent ou dépassent la vitesse de phase ( $u_c/C_p \geq 1$ ). Miche (1944) a montré que la cambrure maximale de vagues régulières (cambrure atteinte lorsque  $u_c/C_p = 1$ ) était donnée par :

$$\frac{H}{\lambda} = 0.14 \tanh(kd) \quad (11)$$

avec  $H$  la hauteur crête à creux de l'onde et  $\lambda$  la longueur d'onde. Les observations de Rapp and Melville (1990) et Stansell and MacFarlane (2002) suggèrent que ce critère ( $u_c/C_p \geq 1$ ) est également applicable

aux vagues irrégulières. Ce critère signifie simplement que lorsque la cambrure d’une vague devient trop importante, la vague devient instable et déferle.

En eau profonde, les vagues croissent sous l’effet du vent. Une partie de l’énergie est redistribuée dans le spectre par interactions résonantes non-linéaires vers les vagues de plus grande longueur d’onde. La majeure partie va cependant faire croître la taille  $H$  des vagues et ainsi augmenter leur cambrure jusqu’au déferlement.

Lorsque les vagues entrent en zone peu profonde, leur amplitude augmente (levage) tandis que leur longueur d’onde diminue. Cela entraîne une forte augmentation de la cambrure de l’onde et mène à son déferlement. Ainsi en faible profondeur, la hauteur des vagues est contrôlée par la profondeur  $d$  :

$$H = \gamma d \quad (12)$$

avec  $\gamma$  une constante qui varie de 0.2 à 1, suivant la pente de la bathymétrie et la profondeur adimensionnelle  $kd$ .

### 1.3 Les modèles spectraux d’état de mer

Les modèles spectraux sont très appropriés pour la modélisation des vagues à grande échelle et sur de longues périodes. Ils ont initialement été développés pour des échelles de variation du champ de vagues très grandes devant la longueur d’onde (Gelci et al., 1957). Cependant, cette modélisation s’avère également pertinente à plus petite échelle (Magne et al., 2007; Michaud et al., 2012; Ardhuin et al., 2012), tant que les phases des différentes composantes du champ de vagues peuvent être considérées comme indépendantes. Le spectre des vagues contient l’ensemble des statistiques d’élévations de surface. Cependant, les modèles spectraux dits à phases moyennées ne considèrent pas la phase des vagues et sont donc incapables de reproduire l’évolution de l’élévation de surface de manière absolue. Néanmoins, l’application de phases aléatoires permet de retrouver une élévation de surface statistiquement identique.

Les modèles spectraux d’état de mer calculent donc en chaque point  $(x, y)$  de la grille de calcul et à chaque temps  $t$ , le spectre des vagues. Ce spectre correspond à la répartition de la variance de l’élévation de surface (i.e. l’énergie des vagues) sur les nombres d’ondes  $k$  (ou sur les fréquences  $f$ ) et les directions  $\theta$ . L’évolution de la densité spectrale d’énergie  $F$  est résolue selon la formulation proposée par Gelci et al. (1957) :

$$\frac{dF}{dt} = S_{\text{atm}} + S_{\text{nl}} + S_{\text{oc}} + S_{\text{bt}} + \dots \quad (13)$$

où la dérivé lagrangienne de la densité spectrale  $dF/dt$  (terme de gauche) est égale à la somme des termes sources (termes de droite). La dérivé lagrangienne représente la somme de l’évolution temporelle locale  $\partial F/\partial t$  et de l’advection dans les espaces physique  $\nabla_{x,y}$  et spectral  $\nabla_{k,\theta}$ . L’advection de l’énergie des vagues dans les domaines physique et spectral s’appuie sur la théorie linéaire des vagues proposée par Airy (1841). Cette théorie considère la propagation d’ondes planes progressives (dites vagues d’Airy) telles que :

$$\eta(\mathbf{x}, t) = a \sin(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{x}) \quad (14)$$

respectant la relation de dispersion

$$\omega^2 = gk \tanh(kd). \quad (15)$$

avec :

- $\mathbf{x} = (x, y)$ , le vecteur position,
- $t$ , l’instant,
- $a$ , l’amplitude de l’onde plane progressive,
- $\omega$ , la fréquence angulaire (pulsation),
- $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$ , le vecteur d’onde,
- et  $d$ , la profondeur.



L'advection spatiale correspond à la propagation de l'énergie des vagues dans l'espace physique  $(x, y)$  à la vitesse de groupe des vagues  $C_g$ , telle que :

$$\mathbf{C}_g = \frac{\partial \omega}{\partial \mathbf{k}} = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) \mathbf{C}_p \quad (16)$$

où  $\mathbf{C}_p$  est la vitesse de phase de l'onde telle que

$$C_p = \|\mathbf{C}_p\| = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \quad (17)$$

En présence de courants, la vitesse du courant s'ajoute à la vitesse de groupe et on obtient alors la vitesse de propagation de l'énergie des vagues dans l'espace physique  $(C_x, C_y)$  telle que

$$(C_x, C_y) = \mathbf{C}_g + \mathbf{u}. \quad (18)$$

L'advection spectrale représente la propagation de l'énergie des vagues dans l'espace spectral  $(k, \theta)$ . En utilisant la théorie linéaire avec des variations de profondeur et de courant lentes, la conservation du nombre de crêtes et l'hypothèse d'irrotationnalité des vagues, on obtient les vitesses de propagation  $C_\omega$  et  $C_\theta$  dans l'espace spectral telles que (Whitham, 1974; Mei, 1984) :

$$C_\omega = \frac{\partial \omega}{\partial d} \left( \frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla_{\mathbf{x}} d \right) - C_g \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{s}} \quad (19)$$

et

$$C_\theta = -\frac{1}{k} \left( \frac{\partial \omega}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{m}} \right) \quad (20)$$

avec  $\mathbf{m}$ , le vecteur unité le long de la crête et  $\mathbf{n}$ , le vecteur unité dirigé dans la direction de propagation formant un repère orthonormé.

Le terme de gauche de l'équation 13 résout donc, à l'aide de la théorie linéaire, la propagation des vagues, les phénomènes de levage et de réfraction ainsi que l'effet des courants. Les autres phénomènes ne sont pas directement résolus par le modèle mais sont paramétrés à l'aide des termes sources qui forment le terme de droite de l'équation 13.

Ainsi, le modèle permet d'implémenter des termes sources/puits qui modélisent l'apport, le retrait et/ou la redistribution de l'énergie dans le spectre des vagues dus à divers processus. Les termes sources peuvent être classés en deux grandes familles. Tout d'abord, les termes  $S_{\text{atm}}$ ,  $S_{\text{nl4}}$  et  $S_{\text{oc}}$  qui correspondent aux termes de développement de l'état de mer.

- $S_{\text{atm}}$  est le terme de transfert d'énergie du vent vers les vagues. Ce terme source est responsable de la croissance des vagues.
- $S_{\text{nl4}}$  est le terme de transfert d'énergie à l'intérieur du spectre par interaction entre quadruplet de vagues. Ce terme est responsable du transfert d'énergie vers les vagues de plus grandes longueurs d'ondes (i.e. vers les basses fréquences).
- $S_{\text{oc}}$  est le terme de transfert d'énergie des vagues vers l'océan. Ce terme représente principalement le déferlement en eau profonde (moutonnement) qui dissipe l'énergie des vagues, transférée à l'océan sous forme de turbulence.

Le modèle propose également divers autres termes sources correspondants aux différents processus en eau peu profonde. De nombreux termes sources sont disponibles dans le modèle et peuvent être activés ou désactivés selon les besoins et la pertinence pour l'étude réalisée.

## 2 Mise en place du modèle d'état de mer WAVEWATCH III®

Le modèle spectral d'état de mer WAVEWATCH III® v5.16 (Tolman and the WAVEWATCHIII® Development Group, 2014) utilisé dans cette étude est un modèle d'état de mer à phase moyennée de

troisième génération, développé et maintenu par la NOAA/NCEP/NWS [Tolman, 2002a]. Ces dernières années, le modèle a profité de développements majeurs, notamment par les équipes françaises du Shom et de l'IFREMER, qui en font un modèle de choix pour l'étude des états de mer à différentes échelles. En effet, le modèle intègre à la fois les dernières paramétrisations en termes de processus hauturiers de croissances des vagues mais prend également en compte les processus côtiers d'interaction avec les courants et avec la bathymétrie.

## 2.1 Discrétisation spectrale du modèle

Comme précisé dans le paragraphe 1.3, les modèles spectraux d'état de mer résout l'évolution du spectre des vagues,  $F$ . (Eq. 13. Dans le modèle WAVEWATCH III<sup>®</sup>, le spectre des vagues est discrétisé en fréquences  $f$  et directions  $\theta$ , tel que  $F = F(f, \theta)$ . L'ensemble des modèles mis en place dans cette étude considère la même discrétisation spectral pour assurer la cohérence des spectres aux frontières ouvertes des modèles emboîtés (voir paragraphe 2.4.2). Le spectre est ainsi discrétisé en 24 directions,  $\theta_i$ , linéairement réparties sur le cercle et en 32 fréquences,  $f_i$ , exponentiellement réparties de  $f_{\min} = 0.0373$  Hz ( $T_{\max} \approx 26.8$  s) à  $f_{\max} = 0.716$  Hz ( $T_{\min} \approx 1.4$  s), telles que :

$$\forall i \in \llbracket 1, 32 \rrbracket, \quad f_i = 1.1^{(i-1)} f_{\min}. \quad (21)$$

## 2.2 Paramétrisations physiques du modèle

Ce paragraphe précise les paramétrisations **physiques** utilisées dans le modèle pour la création du rejeu de vagues qui sera exploité pour la présente étude. Le choix de l'implémentation des différents termes et de leur paramétrisation conditionne de la capacité du modèle à reproduire l'état de mer observé. Les paramétrisations des termes sources détaillées ci-après considèrent non seulement les processus physiques dominants sur la zone de Dunkerque, mais également les paramétrisations relatives à la croissance des vagues qui déterminent la qualité du modèle global qui est utilisé pour fournir les conditions aux frontières du modèle raffiné. Pour garantir la cohérence, le modèle global et **les modèles raffinés** sont implémentés avec les mêmes paramétrisations.

La paramétrisation des processus de croissance des vagues utilisée dans cette étude est celle proposée par Ardhuin et al. (2010). Cette paramétrisation est aujourd'hui largement utilisée par la communauté scientifique car elle produit les meilleurs résultats en termes de prévision et de rejeu d'état de mer. Initialement développée dans le modèle WAVEWATCH III<sup>®</sup>, cette paramétrisation a depuis été implémentée dans la plupart des modèles spectraux et a ainsi entraîné une avancée considérable dans la modélisation des états de mer. Cette paramétrisation consiste en deux termes sources interdépendants  $S_{\text{atm}}$  et  $S_{\text{oc}}$ . La force de cette paramétrisation est principalement liée à une nouvelle paramétrisation de la dissipation de la houle par frottement avec l'air. La dissipation de la houle a été ajustée grâce aux observations (par les satellites altimétriques) de la dissipation de la houle sur de grandes distances proposée par Ardhuin et al. (2009). Par ailleurs, la dissipation par moutonnement a elle aussi été grandement améliorée, grâce à une paramétrisation plus physique basée sur le spectre en saturation. Le modèle bénéficie également de la correction sur la dissipation de la houle proposée par Leckler et al. (2013). Pour plus de détails, le lecteur se référera au paragraphe 2.3.9 du manuel de WAVEWATCH III<sup>®</sup> (Tolman and the WAVEWATCHIII<sup>®</sup> Development Group, 2014).

En grande et moyenne profondeur d'eau, les transferts d'énergie s'effectuent principalement sous l'effet d'interactions résonnantes entre quadruplets de vagues respectant les conditions suivantes, nécessaire à la résonance :

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4 \quad (22)$$

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega_3 + \omega_4 \quad (23)$$

Ces interactions résonantes entre quadruplet de vagues redistribuent l'énergie sur le spectre et sont notamment responsables du transfert d'énergie vers les vagues de plus basse fréquence. S'il existe une équation exacte, établie indépendamment par Hasselmann (1962) et Zakharov (1968), son calcul est extrêmement coûteux en calcul, ce qui le rend peu adéquat pour faire des rejeux sur de grandes périodes. Ainsi, la paramétrisation des interactions entre quadruplets de vagues implémentée ici est celle proposée par Hasselmann et al. (1985) utilisant l'approximation des interactions discrètes (*Discrete Interaction Approximation, DIA*). Cette paramétrisation propose une approximation acceptable des interactions entre quadruplets de vagues avec un coût de calcul limité.

La paramétrisation de la dissipation par frottement sur fond,  $S_{bt}$ , est celle proposée par Tolman (1994) et ajustée par Ardhuin et al. (2003) sur les données des campagnes DUCK94 et SHOWEX (Plateau continental de la Caroline du Nord). Cette paramétrisation est basée sur la paramétrisation de la viscosité turbulente proposée par Grant and Madsen (1979) et un paramétrage de rugosité qui inclut la formation de rides sur les fonds sableux. Pour plus de détails, le lecteur se référera au paragraphe 2.3.13 du manuel de WAVEWATCH III® (Tolman and the WAVEWATCHIII® Development Group, 2014).

La paramétrisation du déferlement bathymétrique,  $S_{db}$ , est celle proposée par Battjes and Janssen (1978). Cette paramétrisation applique une loi de Rayleigh pour obtenir en tout point du modèle la répartition des hauteurs de vagues individuelles. Les vagues dont la hauteur dépasse le seuil  $H_{max}$  définie par le critère de Miche (1944) déferlent. Un taux de dissipation est ensuite appliqué aux vagues déferlantes pour obtenir l'énergie dissipée par déferlement bathymétrique. Pour plus de détails, le lecteur se référera au paragraphe 2.3.16 du manuel de WAVEWATCH III® (Tolman and the WAVEWATCHIII® Development Group, 2014).

## 2.3 Les grilles de calculs

Pour cette étude, le modèle de vagues WAVEWATCH III® a été mis en place sur deux maillages non structurés. Les maillages non-structurés ont de nombreux avantages pour la modélisation côtière des vagues. Tout d'abord, la descente d'échelle du large vers la côte ne nécessite qu'une seule même grille de calcul, alors que l'utilisation de grilles rectilinéaires nécessite souvent plusieurs grilles intermédiaires pour atteindre la résolution finale souhaitée. Par ailleurs, le mailleur POLYMESH développé par A. Roland utilisé pour créer les maillages non structurés permet un raffinement de la grille dans les zones d'intérêt. Ainsi, les maillages produits seront raffinés pour mieux décrire des bathymétries complexes, alors que le maillage sera plus grossier dans les zones avec une bathymétrie plus lisse pour économiser des nœuds de calcul. Ainsi, les grilles non-structurées permettent, avec un nombre de nœuds de calcul limité (et donc un temps de calcul restreint) d'effectuer à la fois la descente d'échelle vers la résolution souhaitée, et permet le raffinement du maillage dans les zones où une bonne résolution de la physique des vagues le nécessite.

### 2.3.1 La grille MANGAS : Manche - Gascogne

La première grille utilisée dans le cadre de la présente étude est la grille non structurée créée par Michaud et al. (2015) dans le cadre du projet HOMONIM, visant à l'amélioration du dispositif de Vigilance Vagues Submersion (VVS). Cette grille a été mise en production opérationnelle pour la VVS à Météo France. Il s'agit d'une grille non structurée (éléments finis, triangulaires) possédant 92 757 nœuds de calcul (soit 175634 éléments triangulaires), avec une résolution allant de 10km aux frontières ouvertes du domaine et se raffinant jusqu'à environ 200m de résolution à la côte. Le maillage est présenté en figure 4. Ce maillage s'appuie sur le modèle numérique de terrain (MNT) à 100m de résolution réalisé par le Shom dans le cadre du projet HOMONIM (Biscara et al., 2014; Biscara, 2015). Dans la suite du rapport, ce maillage sera nommé MANGAS.

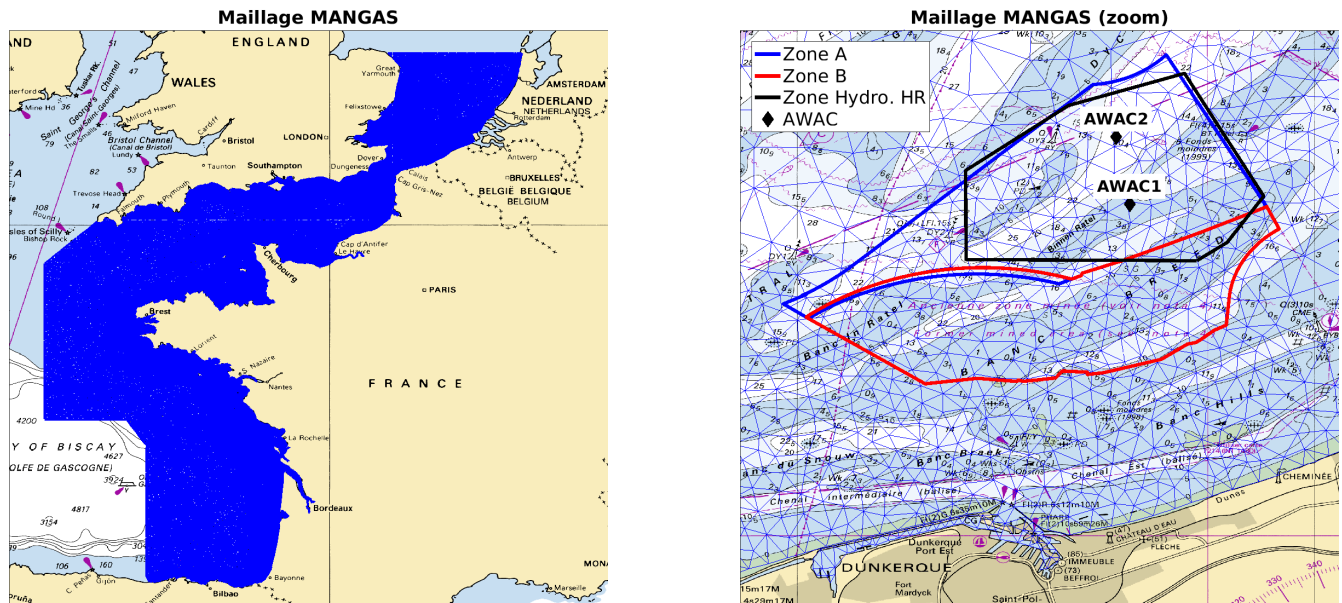


FIGURE 4 – Maillage MANGAS : résolution de 10km au large se raffinant à environ 200m à la côte. A gauche : couverture complète du maillage MANGAS, à droite : zoom sur la zone EMR de Dunkerque.

### 2.3.2 La grille DUNK : Zone EMR de Dunkerque

Un second maillage a été créé spécifiquement pour cette étude afin d'évaluer l'impact de la résolution sur la zone de Dunkerque, présentant de forts gradients de bathymétrie. Ce second maillage s'appuie sur la bathymétrie à très haute résolution réalisée dans le cadre de la présente étude (cf. rapport bathymétrie). Un maillage de 44 717 nœuds de calcul (soit 89 432 éléments triangulaires) a ainsi été réalisé avec le mailleur POLYMESH avec un raffinement de la grille sur les forts gradients de bathymétrie. Le maillage présente une résolution d'environ 20m et couvre la zone hydrographiée à haute résolution. Le maillage est présenté en figure 5. Dans la suite du rapport, ce maillage sera nommé DUNK.

## 2.4 Les forçages

### 2.4.1 Le vent

Les champs de vent utilisés pour le forçage du modèle sont issus des réanalyses ERA-Interim produites par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF). La base de données ERA-Interim est issue du système IFS (*Integrated Forecasting System*) qui inclut l'assimilation des données observées à l'aide d'une analyse de type 4DVAR. Pour plus de détails, le lecteur pourra se référer à l'article de Dee et al. (2011). Ces vents sont connus pour sous-estimer les vents très forts (Ardhuin et al., 2011; Hanafin et al., 2012). Cependant, cette sous-estimation des vents forts est partiellement corrigée par la paramétrisation du terme de croissance des vagues (Leckler et al., 2013).

### 2.4.2 Les conditions aux limites

Une grille de calcul à 0.5 degré de résolution couvrant l'ensemble des océans est utilisée. Ce modèle global est lui aussi forcé par les vents réanalysés du centre Européen ECMWF (décrits ci-dessus). Il permet le développement des états de mer dans l'ensemble du bassin Atlantique et permet de fournir les spectres de vagues aux frontières ouvertes du maillage MANGAS. **Les spectres de vagues aux frontières du modèle à haute résolution DUNK sont quant à eux extraits du modèle MANGAS.**

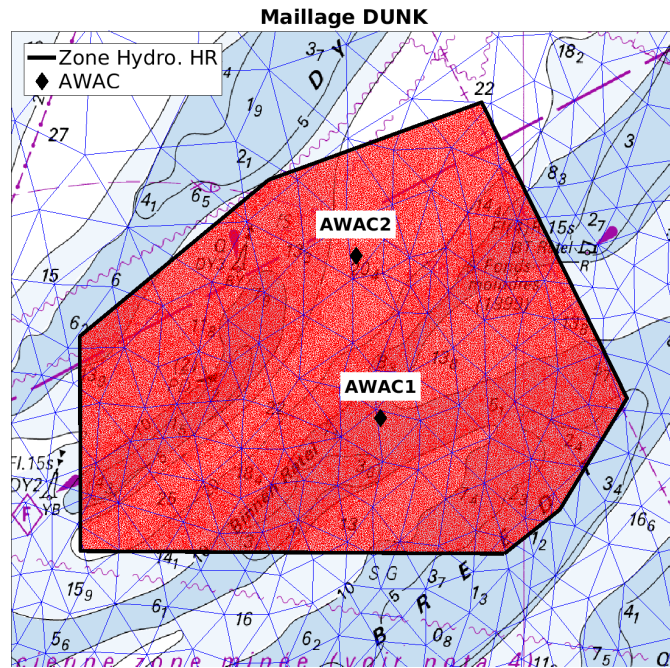


FIGURE 5 – Maillage DUNK : résolution d'environ 20m couvrant la zone hydrographiée à haute résolution.

### 2.4.3 Les courants et hauteurs d'eau

La façade atlantique étant fortement soumise à la marée, et plus particulièrement la zone de Dunkerque, l'effet des variations de courant et de hauteur d'eau induit par la marée doit être pris en compte pour le calcul des vagues (Michaud and Pasquet, 2016).

Les courants et niveaux sont issus d'une simulation de marée du modèle HYCOM (Bleck, 2002) dans la version du SHOM (Baraille and Filatoff, 1995), en formalisme barotrope. La dynamique est modélisée sur un domaine couvrant de 43°N à 62°N en latitude et de 9°W à 10°E en longitude. La grille utilisée est curvilinéaire (voir Fig. 6) et permet une résolution inférieure au kilomètre sur les côtes françaises (env. 900m de résolution autour de Dunkerque). Le modèle utilise les MNT à 500m et à 100m de résolution du Shom réalisés dans le cadre du projet HOMONIM (Biscara et al., 2014; Biscara, 2015) et gère les bancs découvrants. Le modèle est forcé aux frontières en élévation de surface par l'atlas de marée NEA 2011 du LEGOS comportant les 15 composantes : M2, N2, K2, S2, O1, P1, Q1, K1, MS4, M4, 2N2(2NM2), L2(2MN2), MU2(2MS2), NU2 et T2. La friction de fond choisie est spatialement adaptée à la configuration (Boutet, 2015). Cette configuration a été développée dans le cadre du projet HOMONIM, par le Shom (A., 2016) en collaboration avec Météo France. Le passage en opérationnel dans le système Vigilance Vagues-Submersion de Météo France est prévu courant 2017. Une simulation a été réalisée en marée pure (sans forçages météorologiques) pour la période du 30 décembre 2016 au 31 décembre 2017, avec des sorties à une résolution temporelle de 20 minutes.

Les courants et la hauteur d'eau modélisés par le modèle HYCOM ont ensuite été interpolés à chaque point des maillages du modèle d'état de mer. En chaque point, une analyse harmonique des courants et des hauteurs d'eau a été réalisée à l'aide du code T-TIDE. Ainsi, une prédiction des hauteurs d'eau et des courants a pu être faite pour l'ensemble des points du modèle de vagues sur les 11 ans de rejeu (de 2005 à 2016). Pour les points situés en zone intertidale (points découvrants à marée basse), l'analyse harmonique et donc la prédiction n'est pas possible. Pour ces points, la série temporelle de hauteur d'eau et de courant a été extrapolée du point "mouillé" le proche. Cette approche n'est pas problématique pour les hauteurs d'eau mais peut entraîner des erreurs plus importantes sur les courants. Cependant, la zone EMR de Dunkerque ne possédant pas de point découvrant, l'extrapolation mise en place ici n'a aucun impact sur les résultats qui seront présentés par la suite.

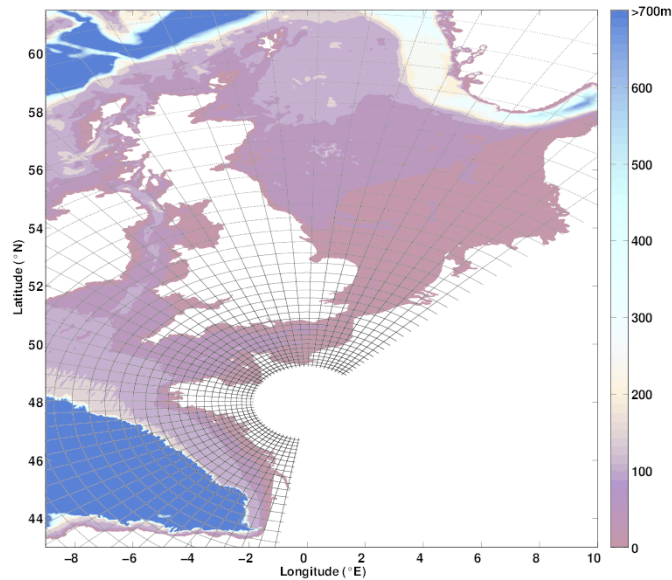


FIGURE 6 – Grille du modèle HYCOM développée dans le cadre du projet HOMONIM. Pour plus de clarté, seulement un point sur 30 est tracé.

## 2.5 Les dates rejouées

Le super ordinateur CAPARMOR a été utilisé pour faire tourner le modèle. Celui-ci permet le lancement du modèle en mode parallélisé sur plusieurs cœurs de calcul. La parallélisation du modèle est assurée par la norme MPI (*Message Passing Interface*).

Un jeu a été créé de 2005 à 2016 sur le maillage MANGAS à 200m de résolution. Pour cela, le modèle a tout d'abord été lancé sur la grille globale à 0.5 degrés de résolution sur l'ensemble de la période 2005-2016 afin de créer les conditions aux frontières ouvertes du maillage MANGAS. Rejouer le modèle pendant une année sur la grille globale a pris environ 16 heures de calcul pour le modèle lancé en parallèle sur 128 cœurs de calcul. Ensuite, le modèle a pu être rejoué sur la grille MANGAS à 200m de résolution sur cette même période. Un mois de jeu sur ce maillage coûte environ 14 heures de calcul (respectivement 8 heures de calcul) lorsque le modèle est lancé en parallèle sur 64 cœurs de calcul (respectivement 128 cœurs de calcul) auxquelles il faut ajouter environ 1 à 2 heures de post et pre-processing pour préparer les forçages et extraire les résultats. Le pas de temps d'intégration du modèle pour le maillage MANGAS est de 180 secondes. Les sorties du modèle MANGAS sont faites à une résolution horaire pour chacun des nœuds de calcul présents dans la zone EMR de Dunkerque. Le détail des fichiers est donné en annexe E.1.

Enfin certaines dates ont été rejouées sur le maillage à haute résolution DUNK (résolution d'environ 20m). En effet, avec une telle résolution, le respect de la condition de stabilité du modèle nécessite une forte réduction du pas de temps d'intégration du modèle. De plus, un pas de temps d'intégration du modèle faible assure une bonne résolution de la réfraction et du déferlement bathymétrique à ces échelles. Ainsi, pour le maillage DUNK, le pas de temps d'intégration du modèle a été réduit à 1 seconde. Ainsi, le jeu de 24 heures d'états de mer sur le maillage DUNK a pris environ 17 heures de calcul. Ces coûts de calcul ne permettent pas un jeu sur l'ensemble de la période 2005-2016. Le choix a donc été fait de rejouer certaines journées, associées à des événements particuliers. Tout d'abord, les journées du 16 septembre 2016 et du 2 octobre 2016 ont été rejouées. Elles correspondent aux événements présentant les hauteurs significatives les plus importantes respectivement sur les profilers de courant houlographes (AWAC) 1 et 2 mouillés dans le cadre de cette étude. Ces deux journées permettent la validation du modèle sur le maillage DUNK (voir paragraphe 2.7.4). Ensuite, 5 événements ont été choisis, : le 10 Octobre 2013, le 23 Mars 2013, le 24 Décembre 2013, le 18 Janvier 2007 et le 5 Mars 2012, car ces dates présentent les plus fortes hauteurs significatives (calculées en moyennes sur l'ensemble de la zone EMR à partir des résultats

obtenus sur le maillage MANGAS) pour des directions de provenance des vagues du Nord, Est, Sud, Ouest, et Nord-Ouest respectivement. Les sorties du modèle DUNK sont faites sous forme de champs de paramètres intégrés toutes les heures. Le détail des fichiers est donné en annexe E.2.

## 2.6 Les paramètres intégrés des vagues

Dans cette étude, divers paramètres intégrés de vagues sont utilisés pour qualifier les états de mers. Leurs calculs à partir du spectre de vagues  $E(f, \theta)$  (en  $m^2/Hz/rad$ ) sont rappelés ici. La hauteur significative des vagues  $H_{sig}$  est calculée selon la formule suivante :

$$H_{sig} = 4 \sqrt{E} \quad (24)$$

avec  $E$  la variance de l'élévation de surface (en  $m^2$ ) telle que :

$$E = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \int_1^{2\pi} E(f, \theta) df d\theta. \quad (25)$$

La période moyenne des vagues  $T_{m(0,-1)}$  est calculée selon la formule suivante :

$$T_{m(0,-1)} = \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} f^{-1} E(f) df}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df}, \quad (26)$$

et la période moyenne des vagues  $T_{m(0,2)}$  est calculée selon la formule suivante :

$$T_{m(0,2)} = \left( \frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} f^2 E(f) df d\theta}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df} \right)^{-0.5}, \quad (27)$$

avec

$$E(f) = \int_1^{2\pi} E(f, \theta) d\theta. \quad (28)$$

La direction moyenne des vagues  $\theta_m$  est calculée selon la formule suivante :

$$\theta_m = \arctan \left( \frac{a}{b} \right), \quad (29)$$

avec

$$a = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \int_1^{2\pi} \cos(\theta) E(f, \theta) df d\theta, \quad (30)$$

$$b = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \int_1^{2\pi} \sin(\theta) E(f, \theta) df d\theta. \quad (31)$$

La convention utilisée pour les directions est la convention nautique : la direction  $\theta$  indique la direction de provenance des vagues (cf. Fig. 7).

## 2.7 Validation des modèles

Ce paragraphe discute de la validation du modèle par rapport aux mesures des satellites altimètres et des observations *in situ* réalisées à l'aide de bouées houlographes et de profileurs de courant houlographes. La validation complète du modèle global n'est pas fournie dans ce rapport. Cependant une information détaillée sur les scores du modèle global pour l'année 2006 est disponible dans l'article de Leckler et al. (2013).

La validation proposée ici s'appuie sur diverses mesures statistiques dont les formules mathématiques sont les suivantes. Pour un paramètre  $X$ , les résultats du modèle sont notés  $X_{mod}$  et les observations sont

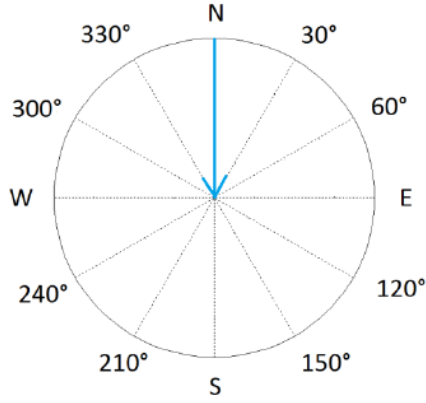


FIGURE 7 – Convention des directions pour les directions des paramètres globaux, vague de direction 0°. Figure extraite du manuel de l'utilisateur de la base de données HOMERE.

notées  $X_{\text{obs}}$ ,  $N$  représente le nombre de valeurs colocalisées disponibles (i.e. le nombre de correspondance en un même lieu  $(x, y)$  pour un même instant  $t$  de valeurs modélisées  $X_{\text{mod}}(x, y, t)$  et de valeurs observées  $X_{\text{obs}}(x, y, t)$ ). Les valeurs statistiques ne sont calculées que lorsque le nombre de valeurs à comparer est suffisant pour être représentatif.

Les valeurs quadratiques moyennes (RMS, *Root Mean Square*) sont calculées selon les formules suivantes :

$$\text{RMS}(X_{\text{obs}}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N X_{\text{obs}}^2} \quad (32)$$

$$\text{RMS}(X_{\text{mod}}) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N X_{\text{mod}}^2} \quad (33)$$

Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE, *Root Mean Square Error*) entre les résultats du modèle  $X_{\text{mod}}$  et les observations  $X_{\text{obs}}$  sont calculées selon la formule suivante :

$$\text{RMSE}(X) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (X_{\text{mod}} - X_{\text{obs}})^2}, \quad (34)$$

et les erreurs quadratiques moyennes normalisées (NRMSE, *Normalized Root Mean Square Error*) selon la formule suivante :

$$\text{NRMSE}(X) = \frac{\text{RMSE}(X)}{\text{RMS}(X_{\text{obs}})}, \quad (35)$$

Les biais BIAIS entre les résultats du modèle  $X_{\text{mod}}$  et les observations  $X_{\text{obs}}$  sont calculés selon la formule suivante :

$$\text{BIAIS}(X) = \frac{1}{N} \sum_1^N (X_{\text{mod}} - X_{\text{obs}}) \quad (36)$$

et les biais normalisés NBIAIS selon la formule suivante :

$$\text{NBIAIS}(X) = \frac{\text{BIAIS}(X)}{\text{RMS}(X_{\text{obs}})}. \quad (37)$$

Les *Scatter Index* SI sont calculés selon la formule suivante :

$$\text{SI}(X) = \frac{1}{\text{RMS}(X_{\text{obs}})} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (X_{\text{mod}} - X_{\text{obs}} - \text{BIAIS}(X))^2} \quad (38)$$



Les régressions linéaires ( $X_{\text{obs}} = a X_{\text{mod}} + b$ ) sont calculées par la méthode des moindres carrés :

$$a = \frac{\hat{\sigma}_{X_{\text{obs}}X_{\text{mod}}}}{(\hat{\sigma}_{X_{\text{mod}}})^2}, \quad (39)$$

$$b = \overline{X_{\text{obs}}} - a \overline{X_{\text{mod}}}, \quad (40)$$

$$(41)$$

et les coefficients de corrélations  $R^2$  sont calculés selon la formule suivante :

$$R^2 = \left( \frac{\hat{\sigma}_{X_{\text{obs}}X_{\text{mod}}}}{\hat{\sigma}_{X_{\text{obs}}}\hat{\sigma}_{X_{\text{mod}}}} \right)^2, \quad (42)$$

avec

$$\hat{\sigma}_{X_{\text{obs}}X_{\text{mod}}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{obs}}(i) - \overline{X_{\text{obs}}}) \times (X_{\text{mod}}(i) - \overline{X_{\text{mod}}}), \quad (43)$$

$$\hat{\sigma}_{X_{\text{obs}}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{obs}}(i) - \overline{X_{\text{obs}}})^2}, \quad (44)$$

$$\hat{\sigma}_{X_{\text{mod}}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{\text{mod}}(i) - \overline{X_{\text{mod}}})^2}, \quad (45)$$

$$\overline{X_{\text{obs}}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{\text{obs}}(i), \quad (46)$$

$$\overline{X_{\text{mod}}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_{\text{mod}}(i) \quad (47)$$

qui sont respectivement des estimateurs de la covariance, des écarts-types et des espérances des variables  $X_{\text{obs}}$  et  $X_{\text{mod}}$ .

### 2.7.1 Validation avec les satellites altimétriques

Les satellites altimétriques fournissent une information sur les hauteurs significatives de vagues. En effet, les satellites altimétriques proposent des observations denses sur l'ensemble des océans offrant ainsi un outil de validation des modèles de vagues à grande échelle. Notons cependant, que le calcul des hauteurs significatives à partir de l'observation altimétrique s'appuie sur la forme d'onde rétrodiffusée par la surface de la mer sur une empreinte de l'ordre du kilomètre. Ainsi, les mesures altimétriques sont particulièrement adaptées aux zones hauturières, lorsque le champ de vagues peut être considéré comme homogène sous l'empreinte du satellite. En zone côtière, la valeur de hauteur significative calculée à partir du signal rétrodiffusé est susceptible de combiner des hauteurs significatives localement très différentes. Les comparaisons des hauteurs significatives calculées à partir des altimètres avec les valeurs issues du modèle doivent donc être interprétées avec précaution.

Pour chaque valeur de  $H_{\text{sig}}$  donnée par chacun des altimètres, la valeur de  $H_{\text{sig,mod}}$  colocalisée sous la trace du satellite au même instant est extraite des résultats du modèle. Afin de minimiser le bruit présent dans les valeurs observées, une moyenne est ensuite faite pour les valeurs observées et modélisées le long de la trace du satellite tous les 0.5 degré de latitude. Ces valeurs moyennées sous la trace sont ensuite utilisées pour le calcul des statistiques d'erreur.

Le présent paragraphe concerne la validation du modèle sur l'ensemble de la période 2005-2016. Les figures pour chaque année sont données en annexes A. La figure 8 montre les hauteurs significatives quadratiques moyennes observées par altimètre sur l'ensemble de la grille MANGAS avec une résolution de

0.5 degré. Sur la zone de Dunkerque, la moyenne quadratique des hauteurs significatives observées par les altimètres est inférieure à 2 m. La figure 9 montre la couverture spatiale des erreurs quadratiques moyennes normalisées de hauteurs significatives sur l'ensemble de la grille MANGAS, calculée pour l'ensemble de la période 2005-2016. On observe sur la zone de Dunkerque une erreur quadratique moyenne normalisée autour de 20%. Globalement, les erreurs observées en Manche sont supérieures à celles observées en Atlantique. Cela est dû au fait qu'il s'agit d'erreurs normalisées par la hauteur quadratique moyenne des vagues, plus faible en Manche. En effet, la figure 10 représente les erreurs observées en fonction des échelles de hauteurs significatives. On observe, que les erreurs normalisées présentent des valeurs importantes pour les états de mer peu énergétiques (i.e. avec de faibles valeurs de  $H_{sig}$ ) mais, les erreurs absolues sont très faibles. Enfin, la figure 11 montre la corrélation entre les valeurs observées et modélisées. Le coefficient de corrélation  $R^2 = 0.95$ , ainsi que les valeurs de la régression linéaire avec une pente ( $a = 1.009$ ) très proche de 1 et une ordonnée à l'origine ( $b = 0.033$ ) très proche de 0, confirment la capacité du modèle à reproduire les hauteurs significatives observées par altimètre.

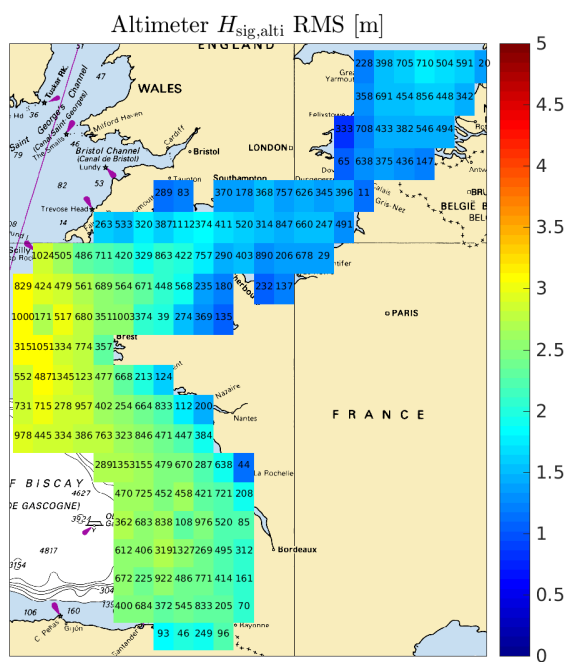


FIGURE 8 – Carte des hauteurs significatives quadratiques moyennes observées par altimètre pour l'ensemble de la période 2005-2016 avec une résolution de 0.5 degré. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

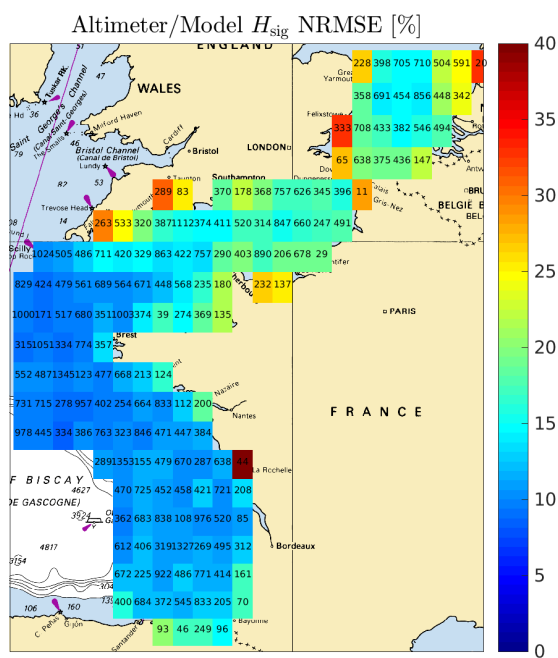


FIGURE 9 – Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées de  $H_{sig}$  pour l'ensemble de la période 2005-2016 avec une résolution de 0.5 degré. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

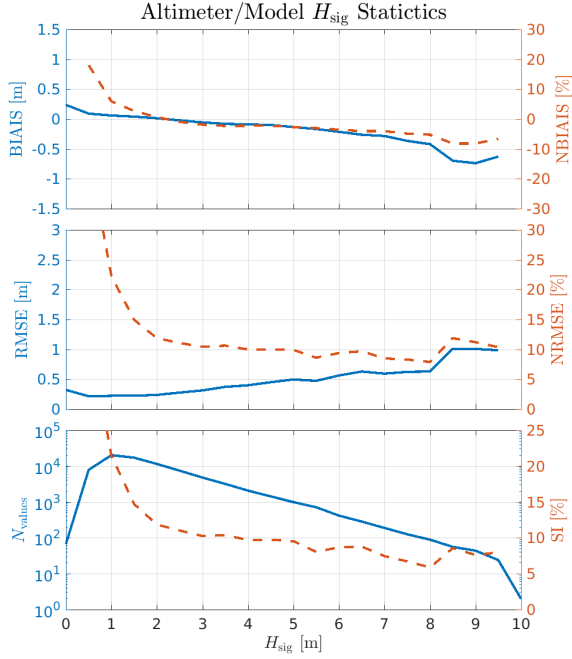


FIGURE 10 – Qualification des erreurs (BIAIS, RMSE, SI) de  $H_{sig}$  en fonction des échelles de  $H_{sig}$  pour l’ensemble de la période 2005-2016.

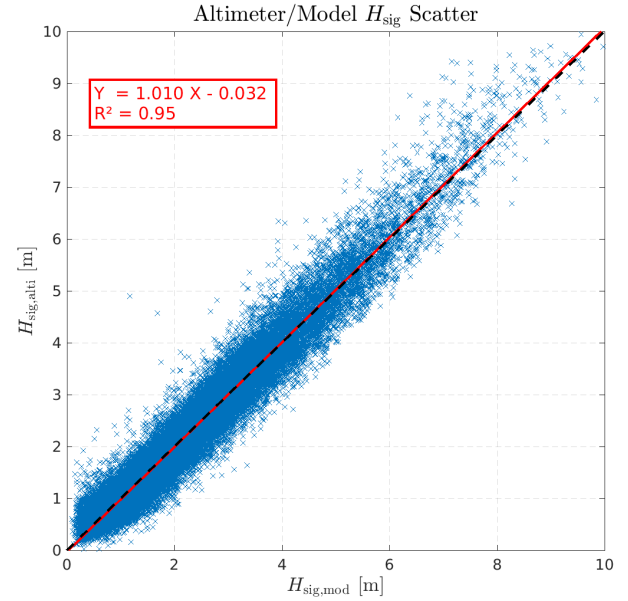


FIGURE 11 – Corrélation des valeurs de  $H_{sig}$  observées et modélisées pour l’ensemble de la période 2005-2016.

### 2.7.2 Validation avec les bouées houlographes **du réseau CANDHIS**

L’observation *in situ* par les bouées houlographes permet une validation du modèle plus précise que les altimètres, notamment proche de la côte, mais il s’agit d’une validation ponctuelle. Pour l’étude, des points de sorties du modèle ont été paramétrés à l’emplacement de chaque bouée disponible afin de pouvoir comparer les valeurs observées par les bouées et modélisées. Dans un premier temps, des données de bouées issues du réseau d’observation CANDHIS ont été utilisées. Comme pour les altimètres, une colocalisation en temps et en espace des valeurs observées par les bouées et des valeurs modélisées a été réalisée et les valeurs statistiques ont ensuite été calculées.

La figure 12 donne les positions des campagnes CANDHIS utilisées pour cette étude **et le tableau 1 donne les informations relatives aux différentes campagnes**. Les tableaux 2, 3 et 4 donnent les scores du modèle calculés sur l’ensemble de la période 2005-2016, respectivement pour les variables  $H_{sig}$ ,  $T_{m(0,-1)}$  et  $\theta_m$ , pour chaque bouée. Les comparaisons modèle/observations sont données en annexe B.

Les résultats des comparaisons aux observations des bouées du réseau CANDHIS montrent une très bonne capacité du modèle à reproduire les caractéristiques des états de mers sur la façade atlantique. Ces scores sont conformes à l’état de l’art actuel en modélisation spectrale des états de mer. Seule la bouée 02910 (Port de Roscoff) présente des résultats particulièrement faibles. Cette bouée est partiellement abritée derrière la digue du port de Roscoff. Or, avec une résolution de 200 m à la côte, le maillage MANGAS ne résout pas cette digue, ce qui provoque des erreurs importantes. Les régressions linéaires et les coefficients de corrélation sont eux aussi tout à fait satisfaisants. Les erreurs importantes de la pente et de l’ordonnée à l’origine sont principalement dues au très faible étalement des valeurs de certains paramètres de vagues, notamment la direction moyenne  $\theta_m$  (voir figures en annexe B).

Code campagne	Nom campagne	Longitude [deg]	Latitude [deg]	Profondeur [m]	N obs.	Date de début [JJ/MM/AAAA]	Date de fin [JJ/MM/AAAA]
05902	Ruytingen	1.76700	51.16083	25	2904	01/01/2010	15/02/2010
06202	Calais	1.75833	51.02167	30	6747	23/05/2012	01/10/2012
06201	Vergoyer	1.37000	50.65917	30	30282	21/01/2010	27/05/2013
05008	Cherbourg (extérieur)	-1.62000	49.69500	25	159328	13/01/2005	01/01/2008
07601	Antifer	0.12645	49.64873	17	35841	01/06/2005	07/09/2010
02204	Bréhat	-2.88947	49.02642	50	5815	21/06/2016	31/12/2016
02203	Les Minquiers Nord	-2.34300	48.98842	35	34570	30/03/2011	24/10/2013
02202	Les Minquiers2	-2.44300	48.89250	38	54504	30/11/2005	16/05/2009
02910	Roscoff (Port de Blosscon)	-3.96067	48.71667	5	125914	21/10/2005	01/03/2015
02902	Ouessant large	-5.75000	48.50000	110	86959	31/03/2005	27/11/2011
02919	Kereon	-5.02767	48.42833	25	19952	02/10/2012	17/04/2014
02911	Les Pierres Noires	-4.96833	48.29033	60	148594	15/10/2005	26/10/2016
02917	Ouessant sud	-5.15233	48.24700	94	4271	30/01/2014	29/04/2014
02916	Ile de Sein Nord	-4.92050	48.08133	70	9745	02/10/2012	22/04/2013
02920	Ile de Sein	-4.86367	48.02133	25	8555	14/10/2013	10/04/2014
02915	Ile de Sein Sud	-4.92050	48.00600	45	9744	02/10/2012	22/04/2013
02921	Esquibien	-4.54617	47.99137	16	10468	03/12/2013	30/09/2014
02914	Penmarc'h	-4.45000	47.65000	105	3906	09/11/2009	27/02/2010
05602	Belle-Ile	-3.28500	47.28500	45	96092	18/10/2010	31/12/2016
04403	Plateau du Four	-2.78700	47.23900	30	117728	01/04/2008	31/12/2016
04401	Saint Nazaire	-2.33833	47.15333	17	13681	02/01/2005	30/12/2006
08504	Ile d'Yeu Nord	-2.29500	46.83322	14	155934	21/06/2005	30/11/2016
01704	Oléron Large	-1.83362	45.91633	52	39301	03/07/2014	19/10/2016
01703	Oléron (SHOM)	-1.81367	45.84033	57	22122	02/01/2010	08/04/2011
03302	Cap Ferret	-1.44667	44.65250	54	120031	06/07/2007	29/09/2016
06402	Anglet	-1.61500	43.53217	50	104215	24/11/2009	31/12/2016
06403	Saint-Jean-de-Luz	-1.67433	43.40300	20	57444	24/04/2013	30/11/2016

TABLE 1 – Informations relatives aux différentes campagnes CANDHIS utilisées pour cette étude.

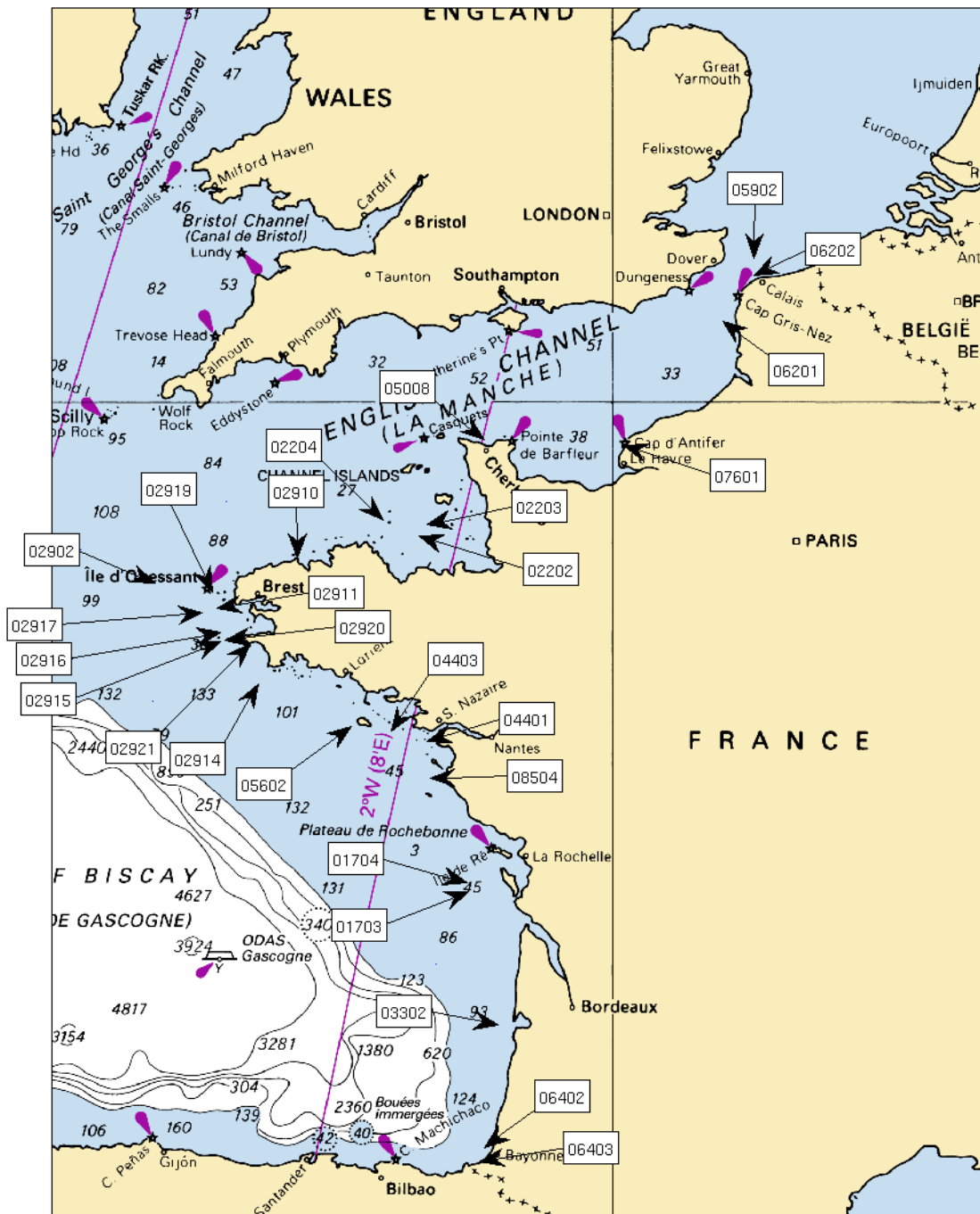


FIGURE 12 – Carte des bouées houlographe du réseau CANDHIS utilisées pour la validation du modèle MANGAS sur la période 2005-2016.

Name	BIAIS [m]	RMS <sub>obs</sub> [m]	RMSE [m]	NRMSE [%]	SI[%]	$a$	$b$ [m]	$R^2$
05902	0.07	1.30	0.28	21.74	21.03	1.06	-0.15	0.85
06202	0.11	0.95	0.23	23.77	20.55	0.99	-0.10	0.85
06201	0.13	1.20	0.24	19.74	16.64	1.01	-0.14	0.91
05008	0.27	0.84	0.36	43.19	29.55	0.84	-0.11	0.79
07601	0.34	0.82	0.44	52.88	32.57	0.86	-0.21	0.75
02204	0.12	1.56	0.23	14.59	12.36	1.06	-0.21	0.90
02203	0.28	1.12	0.33	29.60	15.65	0.86	-0.11	0.91
02202	0.18	1.32	0.27	20.24	14.96	0.93	-0.09	0.91
02910	0.06	0.53	0.21	39.77	38.13	0.91	-0.01	0.61
02902	0.30	2.23	0.47	21.11	16.26	0.86	0.01	0.91
02919	0.33	2.02	0.68	33.60	29.48	0.82	0.05	0.71
02911	0.21	2.40	0.35	14.64	11.60	1.00	-0.22	0.95
02917	-0.06	4.16	0.46	10.96	10.88	1.10	-0.27	0.97
02916	0.30	2.75	0.47	17.24	13.31	1.01	-0.32	0.91
02920	0.46	2.58	0.57	22.10	13.27	0.89	-0.17	0.94
02915	0.34	2.76	0.48	17.43	12.19	0.91	-0.08	0.93
02921	0.09	1.24	0.20	16.35	14.72	1.06	-0.15	0.95
02914	0.13	3.36	0.37	10.87	10.18	1.02	-0.20	0.96
05602	0.05	2.25	0.26	11.49	11.30	1.05	-0.15	0.96
04403	0.08	1.49	0.20	13.46	12.21	0.94	-0.01	0.95
04401	0.15	1.23	0.22	17.72	13.19	0.93	-0.06	0.95
08504	0.13	1.36	0.19	13.87	10.34	0.96	-0.08	0.96
01704	0.08	1.96	0.22	11.25	10.54	1.03	-0.12	0.95
01703	0.10	1.94	0.24	12.34	11.32	1.02	-0.12	0.95
03302	0.05	2.09	0.27	12.87	12.68	1.10	-0.23	0.95
06402	-0.05	2.00	0.32	16.16	15.95	1.18	-0.24	0.93
06403	-0.05	1.91	0.32	16.63	16.47	1.15	-0.19	0.93

TABLE 2 – Scores du modèle MANGAS pour la hauteur significative  $H_{\text{sig}}$  sur la période 2005-2016 : comparaison avec les bouées du réseau CANDHIS. Les colonnes sont respectivement le numéro de la campagne, le biais BIAIS entre le modèle et les observations, la moyenne quadratique observée à la bouée  $\text{RMS}_{\text{obs}}$ , l’erreur quadratique moyenne RMSE, l’erreur quadratique moyenne normalisée NRMSE, le *Scatter Index* SI, la pente  $a$  et l’ordonnée à l’origine  $b$  de la régression linéaire ( $H_{\text{sig,obs}} = a H_{\text{sig,mod}} + b$ ), et enfin le coefficient de corrélation  $R^2$ .

Name	BIAIS [deg]	RMSE [deg]	$a$	$b$ [deg]	$R^2$
05902	0.51	38.17	0.98	2.57	0.92
06202	-7.44	35.21	0.90	29.65	0.90
06201	4.14	30.07	0.94	9.26	0.92
05008	-17.14	52.20	0.93	31.79	0.88
02204	-0.98	20.04	0.78	59.70	0.85
02203	-1.30	26.62	0.84	41.24	0.90
02202	-3.47	22.14	0.91	26.05	0.93
02910	-24.97	89.22	0.09	31.34	0.22
02919	4.87	34.72	0.53	115.25	0.55
02911	5.52	18.56	0.77	56.77	0.80
02917	-0.82	13.86	0.84	42.89	0.85
02916	-6.51	21.26	0.87	41.90	0.88
02920	11.94	18.35	0.68	68.69	0.55
02915	9.85	19.06	0.86	27.06	0.83
02921	6.87	27.46	0.27	167.09	0.43
02914	3.50	28.22	0.73	64.17	0.73
05602	0.59	15.23	0.88	31.73	0.83
04403	-1.15	29.60	0.80	48.40	0.91
01704	0.17	14.73	0.91	24.92	0.94
01703	-2.50	22.83	0.89	29.75	0.92
03302	-1.87	12.92	0.87	38.58	0.79
06402	-4.47	11.32	0.84	53.42	0.77
06403	-1.65	12.92	0.59	127.89	0.46

TABLE 3 – Scores du modèle MANGAS pour la direction moyenne des vagues  $\theta_m$  sur la période 2005-2016 : comparaison avec les bouées du réseau CANDHIS. Les colonnes sont respectivement le numéro de la campagne, le biais BIAIS entre le modèle et les observations, l’erreur quadratique moyenne RMSE, la pente  $a$  et l’ordonnée à l’origine  $b$  de la régression linéaire ( $\theta_{m,obs} = a \theta_{m,mod} + b$ ), et enfin le coefficient de corrélation  $R^2$ .

Name	BIAIS [s]	RMS <sub>obs</sub> [s]	RMSE [s]	NRMSE [%]	SI[%]	$a$	$b$ [s]	$R^2$
05902	-0.32	5.57	0.85	15.33	14.23	1.01	0.24	0.50
06202	0.12	4.88	0.57	11.62	11.36	0.77	1.00	0.44
06201	0.05	5.69	0.92	16.14	16.11	0.95	0.24	0.52
05008	-0.19	5.23	0.93	17.78	17.42	0.62	2.07	0.33
07601	0.04	5.26	0.89	17.02	17.01	0.87	0.65	0.41
02204	-0.21	8.62	0.89	10.28	10.00	1.04	-0.08	0.83
02203	0.29	7.09	0.90	12.67	11.99	0.98	-0.15	0.80
02202	-0.11	7.86	0.87	11.01	10.92	1.07	-0.38	0.85
02910	-2.73	7.06	3.47	49.20	30.48	0.57	4.45	0.16
02902	-0.13	8.52	0.73	8.57	8.43	0.85	1.34	0.84
02919	-0.63	9.07	1.57	17.28	15.84	0.63	3.71	0.51
02911	-0.24	9.08	0.81	8.96	8.56	0.93	0.83	0.83
02917	-0.36	10.48	0.76	7.20	6.33	1.07	-0.38	0.88
02916	-0.11	9.46	0.78	8.29	8.21	1.04	-0.30	0.85
02920	0.64	8.97	1.05	11.71	9.29	0.80	1.27	0.74
02915	0.15	9.27	0.73	7.89	7.72	0.92	0.57	0.85
02921	-0.59	8.37	1.17	14.01	12.12	0.92	1.21	0.79
02914	0.07	9.74	0.85	8.68	8.65	0.98	0.09	0.84
05602	-0.01	8.72	0.70	8.07	8.07	1.02	-0.20	0.88
04403	0.03	7.51	0.88	11.71	11.70	0.88	0.82	0.80
04401	0.32	7.27	0.94	12.88	12.12	0.91	0.37	0.82
08504	0.25	8.15	0.85	10.47	10.03	0.99	-0.16	0.86
01704	-0.02	8.72	0.73	8.31	8.31	1.08	-0.69	0.90
01703	0.27	8.52	0.92	10.81	10.34	1.03	-0.52	0.85
03302	0.01	8.96	0.78	8.75	8.75	1.13	-1.11	0.88
06402	-0.10	9.27	0.90	9.72	9.66	1.13	-1.07	0.86
06403	-0.20	9.54	0.97	10.16	9.95	1.05	-0.22	0.86

TABLE 4 – Scores du modèle MANGAS pour la période moyenne des vagues  $T_{m(0,-1)}$  sur la période 2005-2016 : comparaison avec les bouées du réseau CANDHIS. Les colonnes sont respectivement le numéro de la campagne, le biais BIAIS entre le modèle et les observations, la moyenne quadratique observée à la bouée RMS<sub>obs</sub>, l’erreur quadratique moyenne RMSE, l’erreur quadratique moyenne normalisée NRMSE, le *Scatter Index* SI, la pente  $a$  et l’ordonnée à l’origine  $b$  de la régression linéaire ( $T_{m(0,-1),obs} = a T_{m(0,-1),mod} + b$ ), et enfin le coefficient de corrélation  $R^2$ .



### 2.7.3 Validation du forçage de vent avec la base de données GLOBWAVE

Les données d’observation obtenues à partir des bateaux-feux (*LightVessel*) de l’UK Met Office ont été extraites de la base de données GLOBWAVE<sup>1</sup>. La figure 13 indique les positions de ces observations. Les données combinent des mesures de hauteurs significatives des vagues  $H_{\text{sig}}$  ainsi que des mesures de vitesse et de direction du vent à 10 mètres ( $U_{10}$  et  $\theta_{U_{10}}$ ). Bien que les données de hauteurs significatives des vagues obtenues à partir des bateaux-feux de l’UK Met Office aient longtemps été utilisées pour la validation des modèles de vagues, la qualité de ces observations a récemment été remise en cause. En effet, les comparaisons entre les observations de vagues issues des bateaux-feux et le modèle WAM du centre européen (ECMWF) montrent des biais positifs en moyenne d’environ 30 cm pour les hauteurs significatives (Turton and Carse, 2013). Or, ces biais ne sont pas retrouvés dans les comparaisons du modèle WAM avec les observations provenant d’autres instruments. La validité des observations de hauteurs significatives des vagues à partir des bateaux-feux est donc douteuse, et il est donc à présent recommandé de ne pas utiliser ces données pour la validation des modèles de vagues. Les scores du modèle ont cependant été calculés sur l’ensemble de la période 2005-2016 pour la hauteur significative des vagues  $H_{\text{sig}}$  et sont rapportés dans le tableau 5. Comme pour le modèle WAM du centre Européen, des biais importants sont observés entre le modèle MANGAS et les observations de hauteurs significatives issues des bateaux-feux, alors que ces biais ne sont pas observés dans les comparaisons aux observations des bouées du réseau CANDHIS. Ces biais importants entraînent les fortes valeurs d’erreur quadratique moyenne normalisée NRMSE reportées dans le tableau. Les scores du modèle MANGAS sont donc cohérents avec les conclusions de Turton and Carse (2013). Cependant, l’incertitude sur les observations ne permet pas de juger de la performance du modèle MANGAS. En revanche, les observation de vitesse et direction du vent à 10 mètres sont fiables et ont donc été utilisées pour valider le forçage du vent ERA-Interim sur la zone. Les résultats de la validation sont donnés dans les tableaux 6 et 7, respectivement pour la vitesse du vent à 10m  $U_{10}$  et la direction du vent  $\theta_{U_{10}}$ . Les scores sur le forçage du vent sont très satisfaisants. Les figures montrant les comparaisons modèle/observations et forçage/observations sont données en annexe C.

Name	BIAIS [m]	RMS <sub>obs</sub> [m]	RMSE [m]	NRMSE [%]	SI [%]	$a$	$b$ [m]	$R^2$
WMO62170	0.44	0.84	0.53	63.30	35.00	0.72	-0.13	0.80
WMO62304	0.33	0.99	0.51	51.26	38.97	0.82	-0.14	0.66
WMO62305	0.52	1.09	0.61	55.86	28.81	0.79	-0.24	0.86

TABLE 5 – Scores du modèle MANGAS pour la hauteur significative  $H_{\text{sig}}$  sur la période 2005-2016 : comparaison avec les bouées du réseau GLOBWAVE. Les colonnes sont respectivement le numéro de la campagne, le biais BIAIS entre le modèle et les observations, la moyenne quadratique observée à la bouée RMS<sub>obs</sub>, l’erreur quadratique moyenne RMSE, l’erreur quadratique moyenne normalisée NRMSE, le *Scatter Index* SI, la pente  $a$  et l’ordonnée à l’origine  $b$  de la régression linéaire ( $H_{\text{sig,obs}} = a H_{\text{sig,mod}} + b$ ), et enfin le coefficient de corrélation  $R^2$ .

1. La base de données GLOBWAVE a été créée par l’IFREMER et réunit un grand nombre de données d’observations sur l’ensemble des océans.

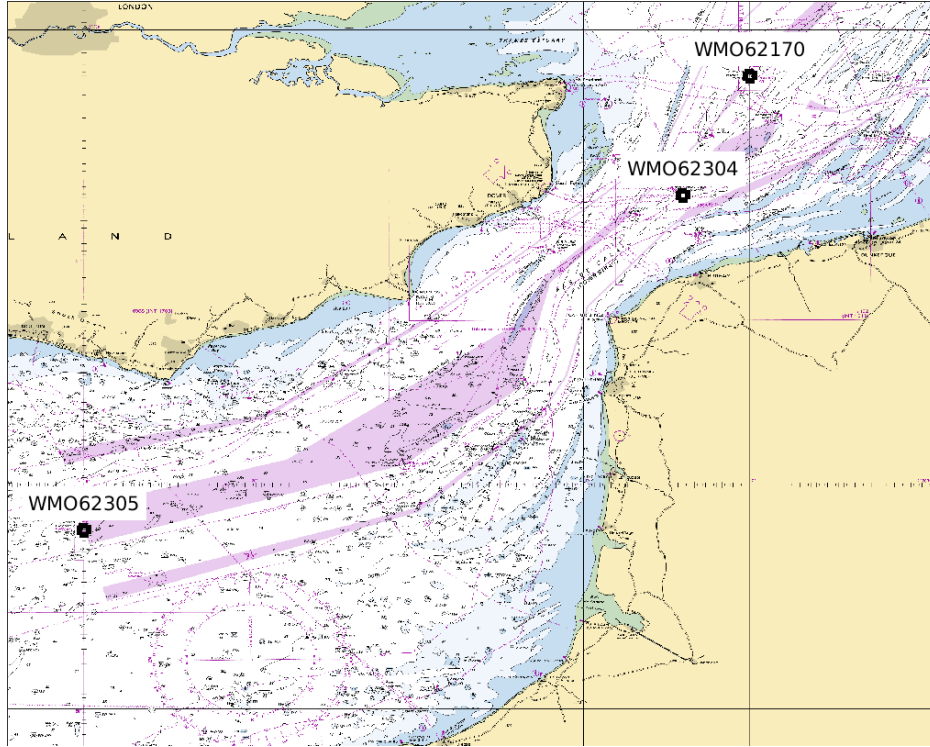


FIGURE 13 – Carte des bouées houlographes utilisées pour la validation du modèle MANGAS sur la période 2005-2016.

Name	BIAIS [m]	RMS <sub>obs</sub> [m]	RMSE [m]	NRMSE [%]	SI [%]	$a$	$b$ [m]	$R^2$
WMO62170	-1.20	9.66	2.19	22.71	19.01	1.10	0.46	0.80
WMO62304	-1.67	9.73	2.69	27.62	21.67	1.21	0.21	0.79
WMO62305	-1.19	9.98	2.13	21.34	17.68	1.11	0.36	0.84

TABLE 6 – Scores du modèle MANGAS pour la vitesse du vent à 10m  $U_{10}$  sur la période 2005-2016 : comparaison avec les bouées du réseau GLOBWAVE. Les colonnes sont respectivement le biais BIAIS entre le modèle et les observations, la moyenne quadratique observée à la bouée RMS<sub>obs</sub>, l'erreur quadratique moyenne RMSE, l'erreur quadratique moyenne normalisée NRMSE, le *Scatter Index* SI, la pente  $a$  et l'ordonnée à l'origine  $b$  de la régression linéaire ( $H_{\text{sig,obs}} = a H_{\text{sig,mod}} + b$ ), et enfin le coefficient de corrélation  $R^2$ .

Name	BIAIS [deg]	RMSE [deg]	$a$	$b$ [deg]	$R^2$
WMO62170	5.89	24.36	0.96	1.84	0.94
WMO62304	9.70	27.41	0.96	-0.89	0.93
WMO62305	4.37	24.44	0.98	-0.32	0.94

TABLE 7 – Scores du modèle MANGAS pour la direction du vent  $\theta_{U_{10}}$  sur la période 2005-2016 : comparaison avec les bouées du réseau GLOBWAVE. Les colonnes sont respectivement le biais BIAIS entre le modèle et les observations, l'erreur quadratique moyenne RMSE, la pente  $a$  et l'ordonnée à l'origine  $b$  de la régression linéaire ( $\theta_{\text{m,obs}} = a \theta_{\text{m,mod}} + b$ ), et enfin le coefficient de corrélation  $R^2$ .

## 2.7.4 Validation avec les profileurs de courant houlographes

Dans le cadre de la présente étude, deux profileurs de courant houlographe ont été mouillés dans la zone EMR de Dunkerque (voir figure 14). Les profileurs de courant mouillés dans le cadre de cette étude sont des AWAC de la marque Nortek. L'instrument mesure la vitesse et direction du courant sur des couches de 1 m du fond jusqu'à la surface et permet la mesure de tous types de houles, incluant les houles longues, les houles de tempêtes et les mers de vent. L'AWAC est principalement utilisé en zone côtière. Le capteur est monté sur une cage tripode posée sur le fond. Les données brutes sont enregistrées dans la mémoire interne et traitées après récupération de l'appareil. Les AWAC mouillés dans le cadre de cette étude possède la technologie AST (*Acoustic Surface Tracking*). Le principe de l'AST est basé sur la mesure de l'écho de la surface avec un faisceau central vertical. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de s'affranchir des limites de profondeurs imposées pour les méthodes de mesures basées sur la pression. De plus, cette technologie donne accès à la série temporelle d'élévation de la surface et ainsi permet de déterminer les paramètres de houle à partir des analyses temporelles (dites analyse vagues à vagues), tels que  $H_{\max}$ ,  $H_{1/3}$ ,  $H_{1/10}$ , ... Des détails supplémentaires sont disponibles sur la brochure du constructeur ([http://www.nortekmed.com/lib/brochures/datasheet-awac/at\\_download/file](http://www.nortekmed.com/lib/brochures/datasheet-awac/at_download/file)).

Il est à noter que si l'AST permet d'obtenir des spectres de vagues  $E(f)$  non-directionnels jusqu'à des fréquences de l'ordre de 1Hz, les spectres directionnels des vagues  $E(f, \theta)$  ne sont obtenus que jusqu'à des fréquences d'environ 0.5Hz et 0.3Hz respectivement pour les instruments AWAC 1 et AWAC 2 (forte dépendance à la profondeur de mouillage). Dans des conditions de vagues très courtes et faiblement énergétiques comme celles observées durant la campagne de mesure sur la zone de Dunkerque, l'énergie contenue dans les hautes fréquences est non négligeable devant l'énergie totale des vagues. Ainsi, l'absence de distribution directionnelle pour les hautes fréquences peut avoir un impact non négligeable sur le calcul des directions moyennes  $\theta_m$  (Eq. 29).

La figure 15 montre l'évolution temporelle de l'état de mer durant la période du mouillage. Durant cette période, les instruments ont observé des états de mer peu énergétiques, avec vagues courtes, soit des conditions d'état de mer typique des conditions estivales de la zone.

Comme pour les bouées, des points de sorties du modèle ont été paramétrés à l'emplacement de chaque AWAC afin de pouvoir comparer les valeurs observées par les AWAC et modélisées. Le premier instrument (AWAC1) a été mouillé en faible profondeur (env. 4 m HZ) du 1 au 23 septembre 2016. Le second instrument (AWAC2) a été mouillé dans une zone plus profonde (env. 20 m HZ) du 6 au 9 octobre 2016.

Les tableaux 8, 9 et 10 donnent les valeurs statistiques des comparaisons entre les valeurs de hauteurs significatives  $H_{\text{sig}}$ , de direction moyenne  $\theta_m$  et de période moyenne  $T_{m(0,2)}$  observées par les profileurs de courant houlographes et les résultats du modèle MANGAS, calculés sur l'ensemble des observations disponibles du 1 septembre au 9 octobre 2016. Les tableaux 11, 12 et 13 donnent les valeurs statistiques entre ces mêmes valeurs observées par les profileurs de courant houlographes et les résultats du modèle DUNK pour les deux journées du 16 septembre 2016 et du 2 octobre 2016 (cf paragraphe 2.5). Les valeurs entre parenthèses sont ces mêmes scores, calculés avec les résultats du modèle MANGAS sur cette même période (le 16 septembre 2016 et le 2 octobre 2016 seulement). Les comparaisons modèle/observations sont données en annexe D.

Les scores du modèle sur le mois de septembre sont tout à fait satisfaisants avec des erreurs quadratiques moyennes faibles. Les périodes de vagues sont cependant assez mal résolues par le modèle en raison de vagues très courtes résolues dans le modèle par un nombre limité de composantes spectrales. Les erreurs RMS restent cependant tout à fait acceptables pour calculer les statistiques d'états de mer sur la zone EMR de Dunkerque (Section résultats 3).

Pour le modèle à haute résolution DUNK, le nombre de valeurs comparées entre les observations et le modèle sont de 48 valeurs pour l'AWAC1 (1 jour à une fréquence d'échantillonnage d'une mesure toutes les 30 minutes) et de 96 (2 jours) pour l'AWAC2. Les valeurs statistiques d'erreurs calculées sont très satisfaisantes mais ne suffisent pas pour valider le modèle DUNK. Les résultats obtenus avec le modèle

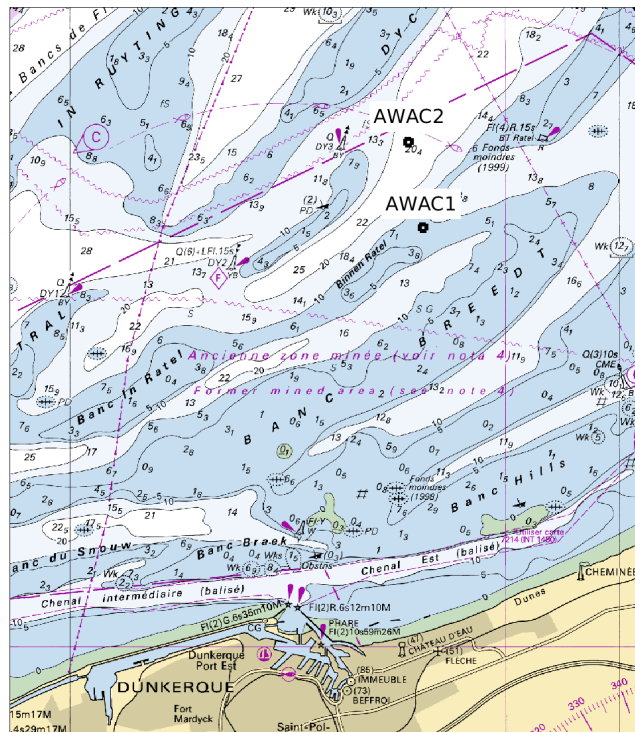


FIGURE 14 – Carte des profilers de courant houlographes de type AWAC mouillés dans la zone EMR de Dunkerque.

DUNK sont donc à prendre avec précaution.

Name	BIAIS [m]	RMS <sub>obs</sub> [m]	RMSE [m]	NRMSE [%]	SI [%]
AWAC1	-0.03	0.66	0.12	18.12	17.43
AWAC2	0.01	0.63	0.11	17.21	17.16

TABLE 8 – Scores du modèle MANGAS pour la hauteur significative  $H_{sig}$  sur la période du 1 septembre au 9 octobre 2016 : comparaison avec les profilers de courant houlographes mouillés dans la zone EMR de Dunkerque. Les colonnes sont respectivement le nom du capteur, le biais BIAIS entre le modèle et les observations, la moyenne quadratique observée par le courantomètre houlographe RMS<sub>obs</sub>, l'erreur quadratique moyenne RMSE, l'erreur quadratique moyenne normalisée NRMSE et le *Scatter Index* SI.

Name	BIAIS [deg]	RMSE [deg]
AWAC1	-7.84	48.17
AWAC2	-11.68	55.50

TABLE 9 – Scores du modèle MANGAS pour la direction moyenne des vagues  $\theta_m$  sur la période du 1 septembre au 9 octobre 2016 : comparaison avec les profilers de courant houlographes mouillés dans la zone EMR de Dunkerque. Les colonnes sont respectivement le nom du capteur, le biais BIAIS entre le modèle et les observations et l'erreur quadratique moyenne RMSE.

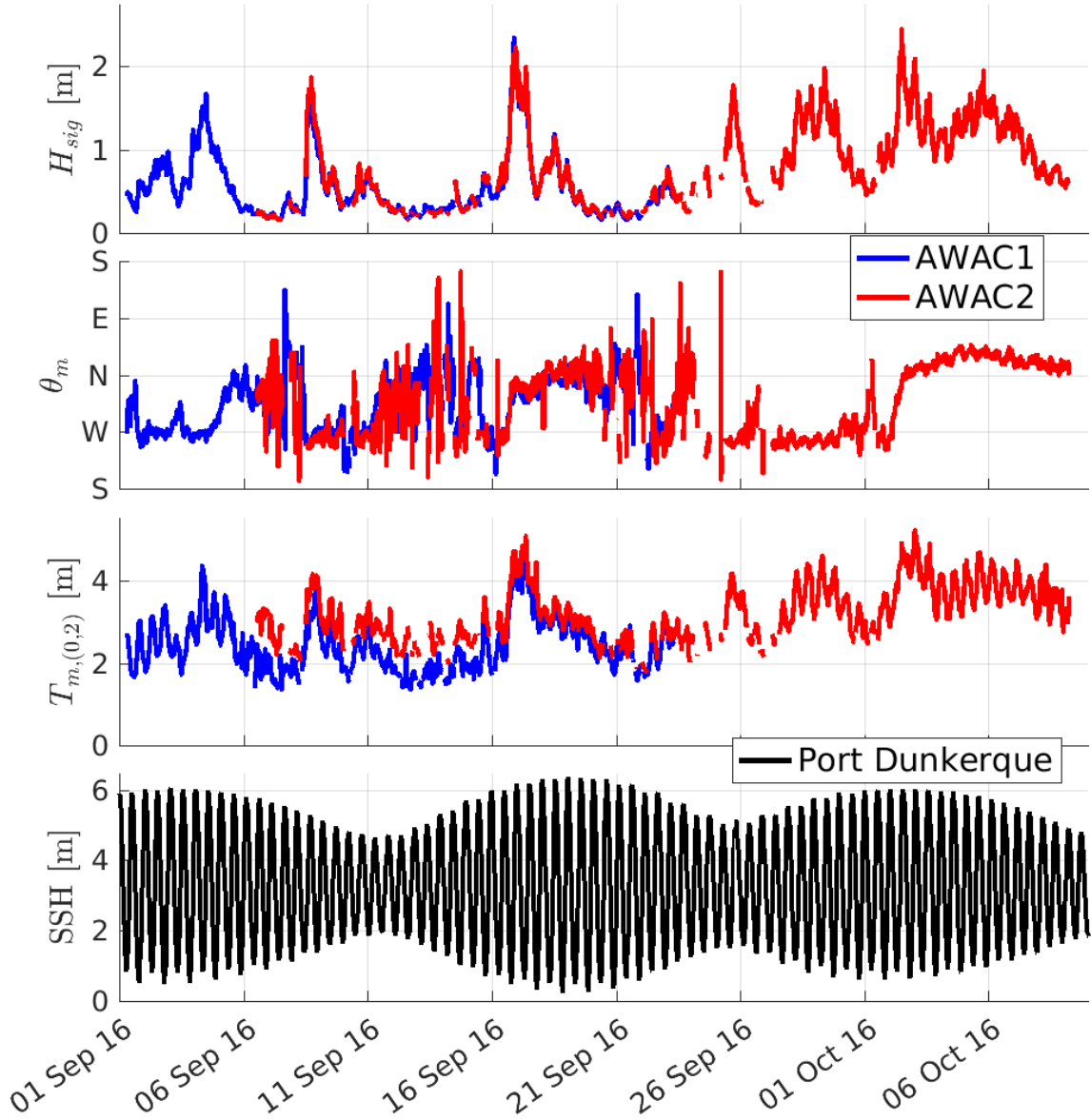


FIGURE 15 – Series temporelles de hauteurs significatives  $H_{sig}$ , de directions moyennes  $\theta_m$  et de périodes moyennes  $T_{m(0,2)}$  des vagues observées par les profileurs de courant houlographes mouillés dans la zone EMR de Dunkerque. La courbe noire donne la série temporelle de hauteur d'eau (prédiction de marée) au niveau du port de Dunkerque (au zéro hydrographique).

Name	BIAIS [s]	RMS <sub>obs</sub> [s]	RMSE [s]	NRMSE [%]	SI [%]
AWAC1	0.80	2.52	1.05	41.53	26.67
AWAC2	0.94	2.47	1.16	46.88	27.46

TABLE 10 – Scores du modèle MANGAS pour la période moyenne des vagues  $T_{m(0,2)}$  sur la période du 1 septembre au 9 octobre 2016 : comparaison avec les profileurs de courant houlographes mouillés dans la zone EMR de Dunkerque. Les colonnes sont respectivement le nom du capteur, le biais BIAIS entre le modèle et les observations, la moyenne quadratique observée par le courantomètre houlographe RMS<sub>obs</sub>, l'erreur quadratique moyenne RMSE, l'erreur quadratique moyenne normalisée NRMSE et le *Scatter Index* SI.

Name	BIAIS [m]	RMS <sub>obs</sub> [m]	RMSE [m]	NRMSE [%]	SI [%]
AWAC1	-0.17 ( -0.18)	1.17	0.26 ( 0.26)	21.84 ( 21.93)	16.65 ( 15.93)
AWAC2	-0.09 ( -0.10)	1.17	0.22 ( 0.20)	18.53 ( 17.46)	16.68 ( 15.35)

TABLE 11 – Scores du modèle DUNK pour la hauteur significative  $H_{\text{sig}}$  calculés sur les deux journées du 16 septembre 2016 et du 2 octobre 2016 : comparaison avec les profileurs de courant houlographes mouillés dans la zone EMR de Dunkerque. Les colonnes sont respectivement le nom du capteur, le biais BIAIS entre le modèle et les observations, la moyenne quadratique observée par le courantomètre houlographe RMS<sub>obs</sub>, l’erreur quadratique moyenne RMSE, l’erreur quadratique moyenne normalisée NRMSE et le *Scatter Index* SI. Les valeurs entre parenthèses sont ces mêmes scores, calculés avec les résultats du modèle MANGAS sur cette même période de deux jours.

Name	BIAIS [deg]	RMSE [deg]
AWAC1	-21.16 ( -22.29)	26.58 ( 27.85)
AWAC2	-19.98 ( -22.38)	25.13 ( 27.93)

TABLE 12 – Scores du modèle DUNK pour la direction moyenne des vagues  $\theta_m$  calculés sur les deux journées du 16 septembre 2016 et du 2 octobre 2016 : comparaison avec les profileurs de courant houlographes mouillés dans la zone EMR de Dunkerque. Les colonnes sont respectivement le nom du capteur, le biais BIAIS entre le modèle et les observations et l’erreur quadratique moyenne RMSE. Les valeurs entre parenthèses sont ces mêmes scores, calculés avec les résultats du modèle MANGAS sur cette même période de deux jours.

Name	BIAIS [s]	RMS <sub>obs</sub> [s]	RMSE [s]	NRMSE [%]	SI [%]
AWAC1	0.29 ( 0.26)	3.05	0.49 ( 0.47)	16.03 ( 15.57)	12.97 ( 13.11)
AWAC2	0.37 ( 0.36)	3.05	0.55 ( 0.54)	18.04 ( 17.74)	13.19 ( 13.12)

TABLE 13 – Scores du modèle DUNK pour la période moyenne des vagues  $T_{m(0,2)}$  calculés sur les deux journées du 16 septembre 2016 et du 2 octobre 2016 : comparaison avec les profileurs de courant houlographes mouillés dans la zone EMR de Dunkerque. Les colonnes sont respectivement le nom du capteur, le biais BIAIS entre le modèle et les observations, la moyenne quadratique observée par le courantomètre houlographe RMS<sub>obs</sub>, l’erreur quadratique moyenne RMSE, l’erreur quadratique moyenne normalisée NRMSE et le *Scatter Index* SI. Les valeurs entre parenthèses sont ces mêmes scores, calculés avec les résultats du modèle MANGAS sur cette même période de deux jours.

### 3 Analyse statistique : modèle MANGAS 2005-2016

#### 3.1 Analyse de l’état de mer total

La figure 16 montre le champ de vagues ( $H_{\text{sig}}$  et  $\theta_m$ ) moyen (à gauche) et présentant la hauteur significative maximum (et la direction correspondante) pour chaque point (à droite) sur la période 2005-2016. La direction moyenne des vagues du Nord-Ouest est peu significative car elle est la moyenne d’événements provenant principalement du Nord ou de l’Ouest (voir figure 21). L’état de mer est en moyenne peu énergétique sur la zone ( $H_{\text{sig,mean}} < 1$  m) et des événements forts avec des hauteurs significatives ne dépassant pas les 3.5 m. La hauteur significative décroît rapidement avec la profondeur, ce qui indique la présence de déferlements bathymétriques sur la zone.

Les figures 17, 18, 19 et 20 montrent respectivement les fonctions de densité de probabilité (PDF, *Probability Density Function*) des hauteurs significatives  $H_{\text{sig}}$ , les PDF des périodes moyennes  $T_{m(0,-1)}$  et les corrélogrammes  $H_{\text{sig}} - T_{m(0,-1)}$  pour le nœud de calcul 080984 (respectivement le nœud de calcul 081624) présentant la plus forte (respectivement la plus faible) hauteur significative en moyenne sur la période 2005-2016 et correspondant à la profondeur la plus importante (respectivement la plus faible) de

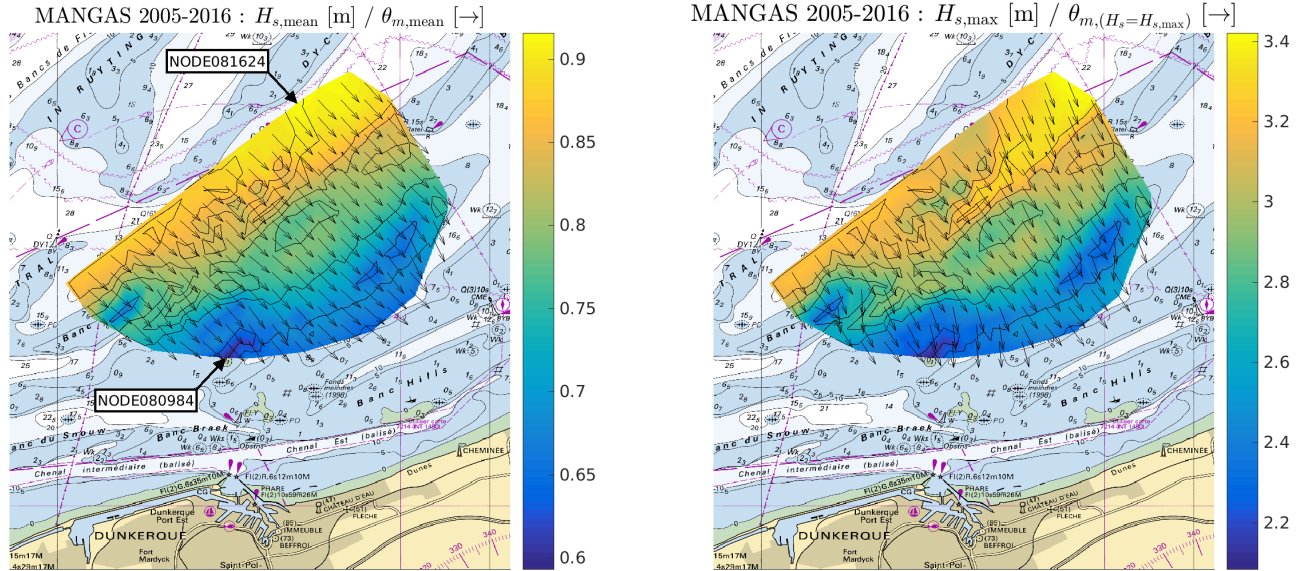


FIGURE 16 – Champ de vagues ( $H_{sig}$  et  $\theta_m$ ) moyen (à gauche) et présentant la hauteur significative maximum (et la direction correspondante) pour chaque point (à droite) sur la période 2005-2016. Les nœuds de calcul 080984 et 081624 présentent respectivement la plus forte et la plus faible hauteur significative en moyenne sur la période 2005-2016.

la zone. Ces fortes variations des distributions des vagues montrent un effet important de frottement sur le fond et du déferlement bathymétrique dans la zone, lorsque les vagues se propagent sur les hauts fonds. Le tableau 14 donne les statistiques pour ces deux mêmes points. La zone présente principalement des mers de vent, liée au vent local : des vagues courtes mais pouvant avoir des amplitudes assez fortes lors de forts coups de vents. En effet, l'Angleterre protège la zone des houles longues provenant de l'Atlantique et seules de faibles houles de nord provenant de la mer du Nord atteignent parfois la zone. Lors de forts coups de vent local, la mer de vent présente des pentes de vagues fortes (vagues courtes avec une grande amplitude) et donc de nombreux déferlements (moutonnement). En observant la différence entre les corrélogrammes des deux points, on observe que les vagues longues et de fortes amplitudes observées au point le plus profond (081624) n'atteignent pas le point le moins profond (080984). Cela révèle la présence de déferlement bathymétrique sur la zone, qui dissipe les vagues longues et de forte amplitude.

Mesh Node	$H_s$ [m]					$T_{m,(0,-1)}$ [s]				
	max	mean	median	90 <sup>e</sup> perc.	99 <sup>e</sup> perc.	max	mean	median	90 <sup>e</sup> perc.	99 <sup>e</sup> perc.
081624	3.22	0.92	0.84	1.57	2.22	10.27	4.87	4.80	5.99	7.13
080984	2.08	0.59	0.54	1.01	1.45	10.69	4.54	4.45	5.70	7.01

TABLE 14 – Statistiques des paramètres  $H_{sig}$  et  $T_{m,(0,-1)}$  sur la période 2005-2016 pour les nœuds de calcul 080984 et 081624 présentant respectivement la plus forte et la plus faible hauteur significative en moyenne.

### 3.2 Analyse de l'état de mer en fonction de la direction moyenne des vagues

La figure 21 montre la répartition des hauteurs significatives des vagues  $H_{sig,max}$  en fonction de la direction  $\theta_m$  pour l'ensemble de la période 2005-2016. Deux régimes de vagues apparaissent clairement avec des

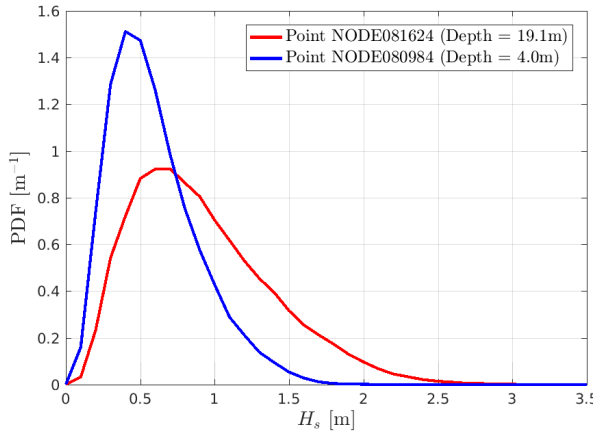


FIGURE 17 – PDF des hauteurs significatives  $H_{\text{sig}}$  pour les points 080984 et 081624 présentant la plus forte et la plus faible hauteur significative en moyenne sur la période 2005-2016.

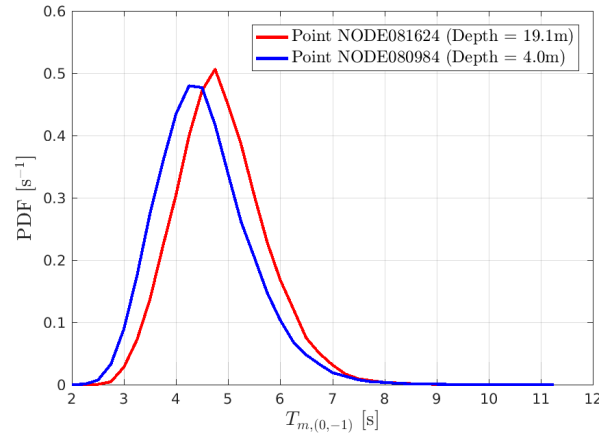


FIGURE 18 – PDF des périodes moyennes  $T_{m(0,-1)}$  pour les points 080984 et 081624 présentant la plus forte et la plus faible hauteur significative en moyenne sur la période 2005-2016.

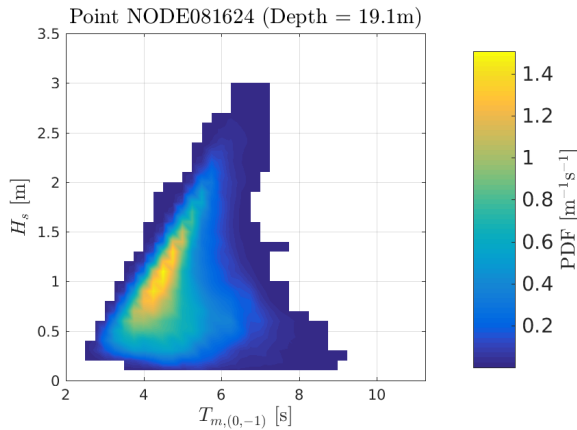


FIGURE 19 – Correlogramme  $H_{\text{sig}} - T_{m(0,-1)}$  pour le point 081624 présentant la plus haute hauteur significative en moyenne sur la période 2005-2016.

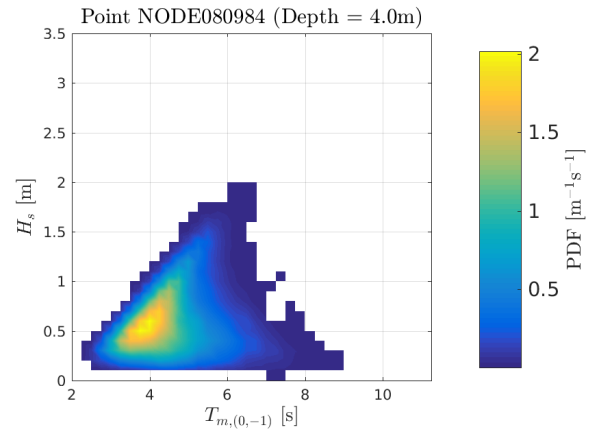


FIGURE 20 – Correlogramme  $H_{\text{sig}} - T_{m(0,-1)}$  pour le point 080984 présentant la plus faible hauteur significative en moyenne sur la période 2005-2016.

vagues provenant soit de l'ouest soit du nord. Les états de mer dont la hauteur significative des vagues est supérieure à 2 m montrent une provenance des vagues principalement du nord. Cela est dû à un fetch bien plus important dans la direction du nord, qui permet un développement plus important des vagues. Cependant, sur la période 2005-2016, les hauteurs significatives les plus importantes (en moyenne sur la zone) ont été modélisées le 21 octobre 2014 à 21h30 avec des vagues provenant du nord-ouest. Ces fortes hauteurs significatives sont dues à un fort coup de vent du nord-ouest.

Pour la suite du rapport, l'analyse des états de mer est faite en fonction de la direction moyenne de provenance des vagues. Ainsi, 5 secteurs sont définis tels que :



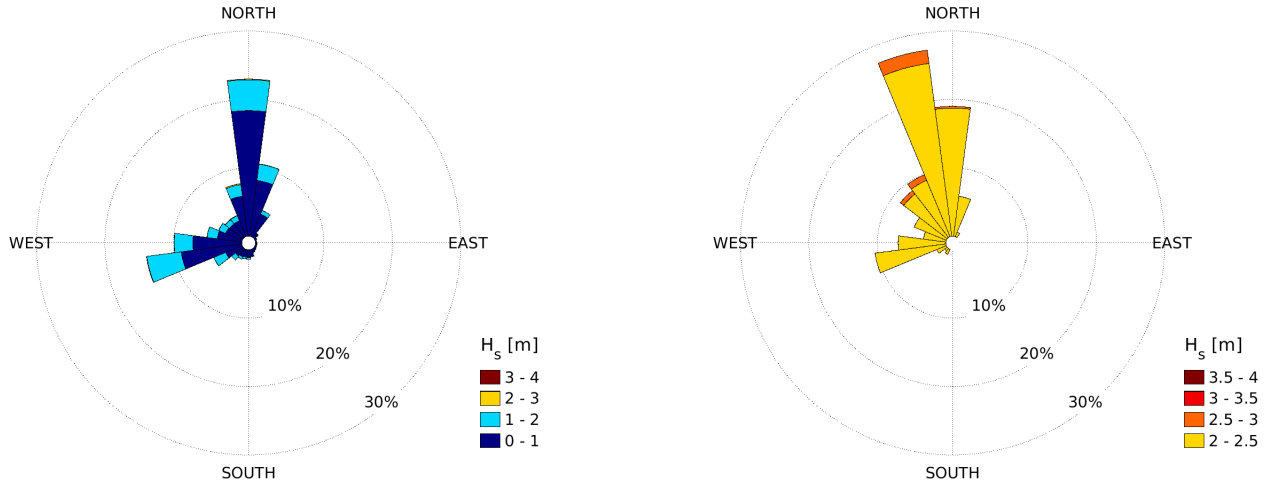


FIGURE 21 – Répartition des hauteurs significatives des vagues  $H_{\text{sig}}$  en fonction de la direction moyenne  $\theta_m$  pour l'ensemble de la période 2005-2016. La figure de gauche considère l'ensemble des états de mer. La figure de droite considère les états de mer dont la hauteur significative des vagues est supérieure à 2 m.

Nord	$-22.5^\circ < \theta_m < 45.0^\circ$
Est	$45.0^\circ < \theta_m < 135.0^\circ$
Sud	$135.0^\circ < \theta_m < 225.0^\circ$
Ouest	$225.0^\circ < \theta_m < 292.5^\circ$
Nord-Ouest	$292.5^\circ < \theta_m < 337.5^\circ$

Les figures 22, 23, 24, 25 et 26 montrent l'évolution temporelle des hauteurs significatives (à gauche) et le champ de vagues au moment du pic de  $H_{\text{sig}}$  pour les événements présentant les hauteurs significatives les plus importantes (en moyenne sur la zone) sur la périodes 2005-2016, respectivement pour des directions de provenance des vagues de nord (le 10 octobre 2013 à 18h00), d'est (le 23 mars 2013 à 23h30), de sud (le 24 décembre 2013 à 4h30), d'ouest (le 18 janvier 2007 à 12h30), et de nord-ouest (le 05 mars 2012 à 10h30). Les séries temporelles montrent une très forte dépendance de la hauteur significative des vagues avec la marée, et notamment avec la variation de la hauteur d'eau. Cela révèle une nouvelle fois la présence très probable de nombreux déferlements bathymétriques sur les zones de hauts-fonds.

Les figures 27 et 28 donnent les fonctions de densité de probabilité (PDF) respectivement pour les paramètres  $H_{\text{sig}}$  et  $T_{m(0,-1)}$ . Les figures 29, 30, 31, 32 et 33 montrent les corrélogrammes  $H_{\text{sig}} - T_{m(0,-1)}$  pour les vagues provenant respectivement du nord, de l'est, du sud, de l'ouest et du nord-ouest. Le tableau 15 donnent les statistiques des paramètres  $H_{\text{sig}}$  et  $T_{m(0,-1)}$  sur la période 2005-2016 par direction de provenance des vagues. L'effet limitant du fetch est visible sur la zone. Le fetch dans les directions est et sud étant très faible, les vagues provenant de ces directions sont très courtes (resp.  $T_{m(0,-1)} < 6$  s et  $T_{m(0,-1)} < 7$  s). Le fetch est plus important dans les directions nord et nord-ouest. Cela permet un développement plus important des vagues qui peuvent ainsi être plus longues et dont les périodes moyennes atteignent des valeurs maximales de 9 et 11 secondes respectivement. La présence de l'Angleterre limite le fetch à l'ouest, avec une valeur maximale de la période moyenne  $T_{m(0,-1)}$  approchant les 8 s. Bien que ces périodes moyennes soient relativement faibles comparées aux valeurs maximales de  $T_{m(0,-1)}$  observées pour les houles longues en Atlantique, la zone est parfois soumise à des vents forts qui donnent des valeurs de  $H_{\text{sig}}$  relativement importantes par rapport à la période moyenne des vagues (i.e. par rapport à longueur d'onde des vagues). Ces épisodes de vents forts se traduisent donc par des vagues très pentues et donc de nombreux déferlements (déferlements bathymétriques et moutonnement). Ces événements de vents forts sont aussi caractérisés par des étalements directionnels importants, qui donnent un aspect chaotique de

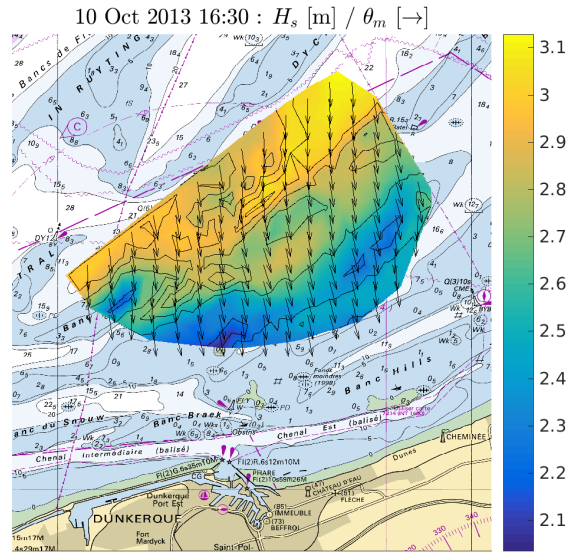
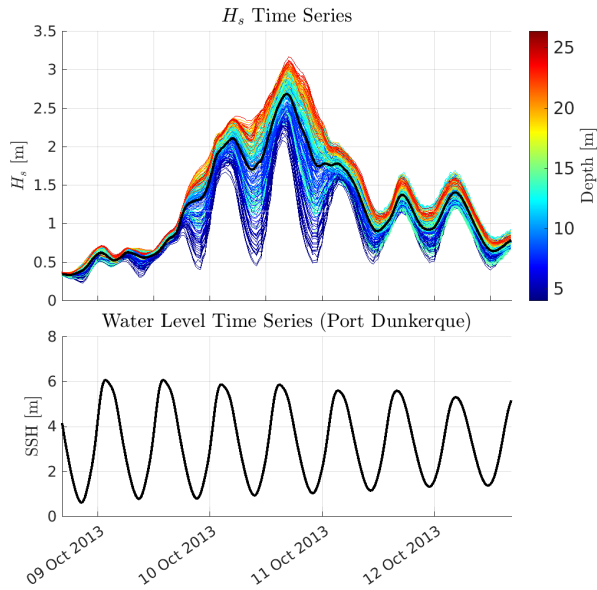


FIGURE 22 – Séries temporelles (à gauche) et champ de vagues (à droite) pour l'événement de vagues du nord, le 10 octobre 2013. Les couleurs représentent respectivement les profondeurs (à gauche) et les hauteurs significatives (à droite). Les flèches montrent la direction de propagation des vagues (à droite).

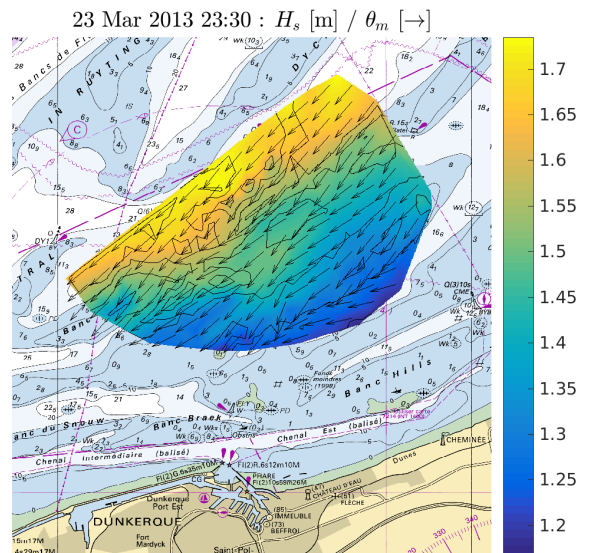
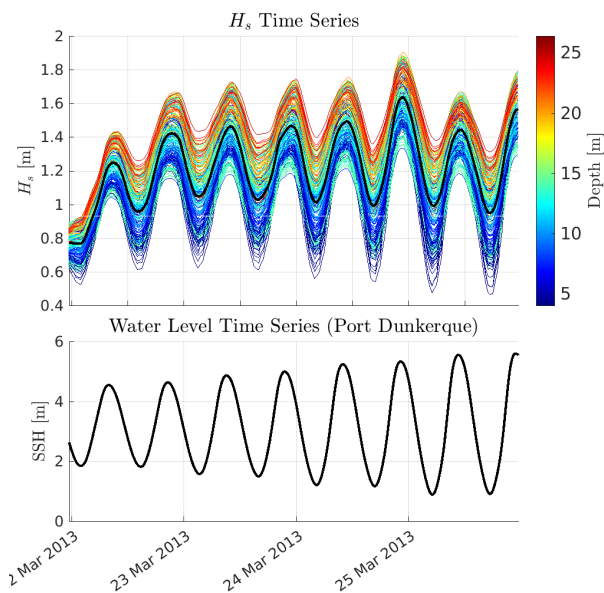


FIGURE 23 – Séries temporelles (à gauche) et champ de vagues (à droite) pour l'événement de vagues de l'est, le 23 mars 2013. Les couleurs représentent respectivement les profondeurs (à gauche) et les hauteurs significatives (à droite). Les flèches montrent la direction de propagation des vagues (à droite).

la surface de mer avec des crêtes très courtes.

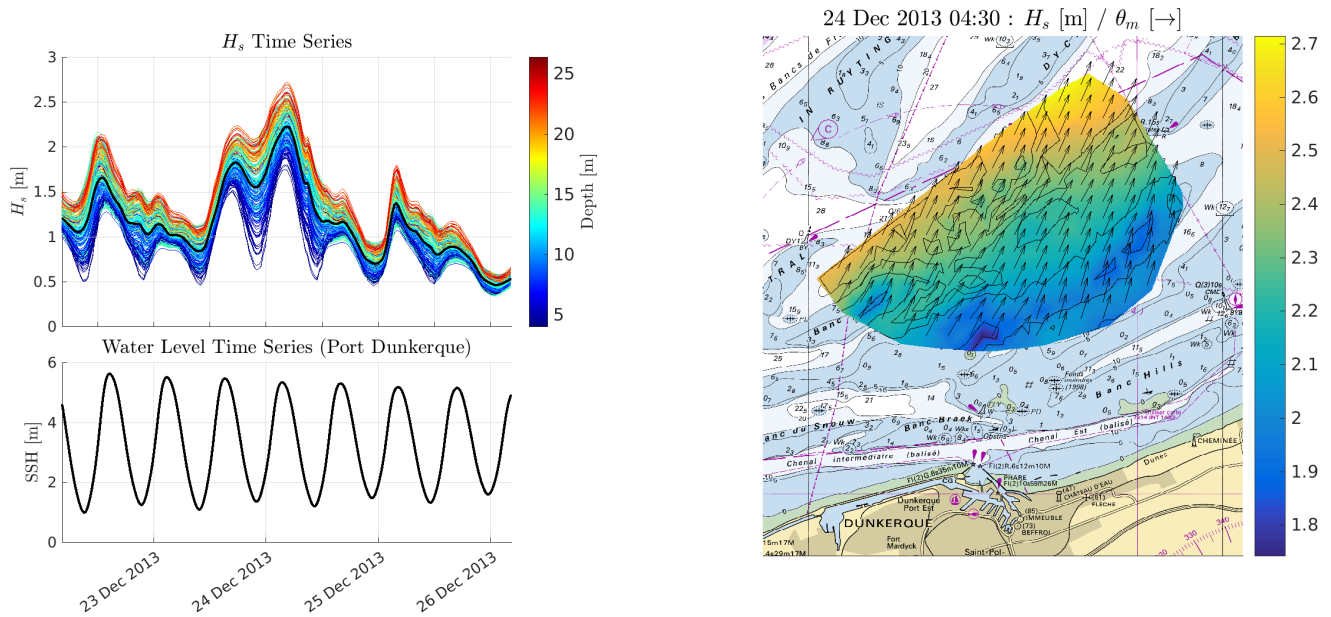


FIGURE 24 – Séries temporelles (à gauche) et champ de vagues (à droite) pour l'événement de vagues du Sud le 24 décembre 2013. Les couleurs représentent respectivement les profondeurs (à gauche) et les hauteurs significatives (à droite). Les flèches montrent la direction de propagation des vagues (à droite).

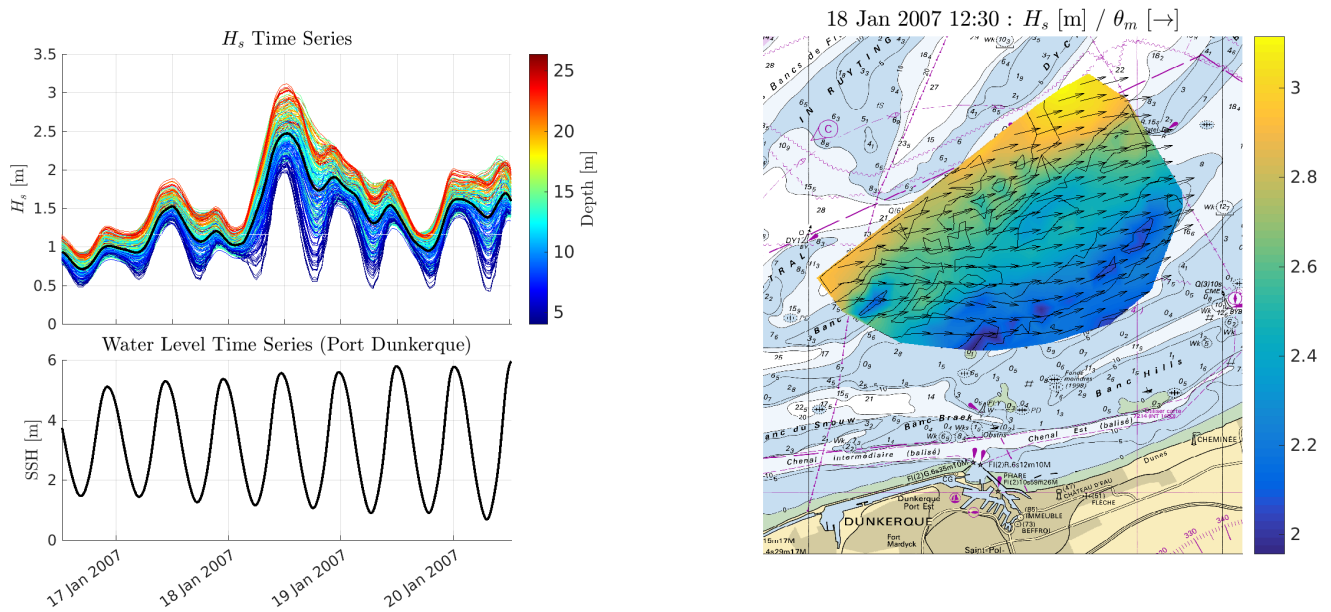


FIGURE 25 – Séries temporelles (à gauche) et champ de vagues (à droite) pour l'événement de vagues de l'ouest le 18 janvier 2007. Les couleurs représentent respectivement les profondeurs (à gauche) et les hauteurs significatives (à droite). Les flèches montrent la direction de propagation des vagues (à droite).

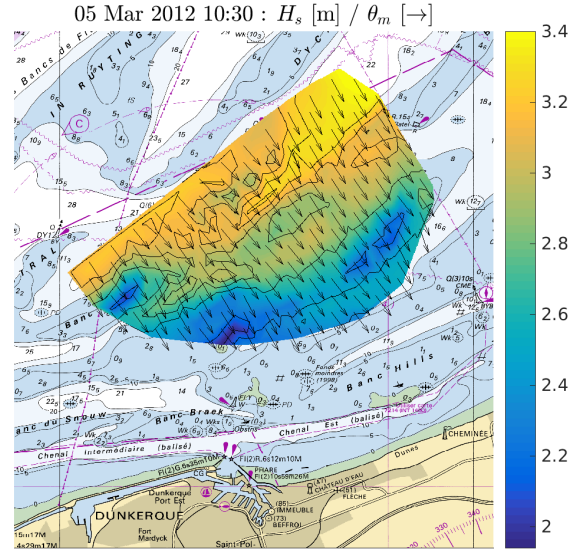
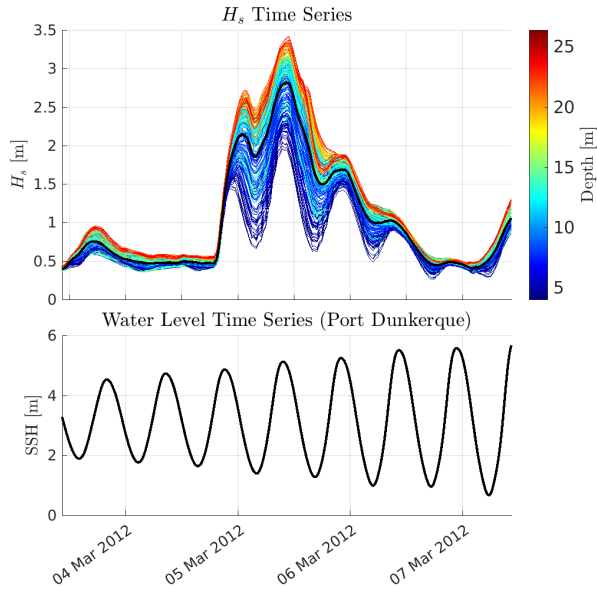


FIGURE 26 – Séries temporelles (à gauche) et champ de vagues (à droite) pour l'événement de vagues du Nord-Ouest le 05 mars 2012. Les couleurs représentent respectivement les profondeurs (à gauche) et les hauteurs significatives (à droite). Les flèches montrent la direction de propagation des vagues (à droite).

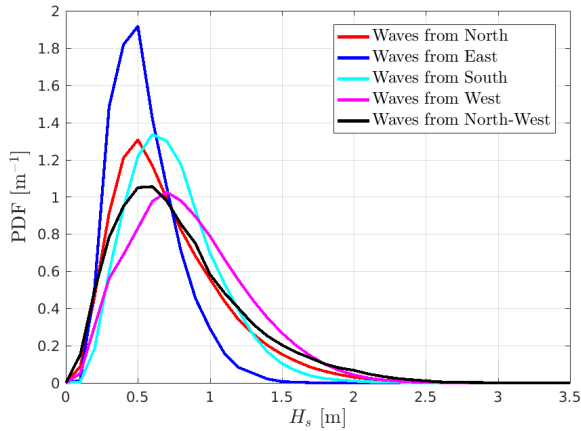


FIGURE 27 – PDF des hauteurs significatives  $H_{sig}$  par direction de provenance des vagues sur la période 2005-2016.

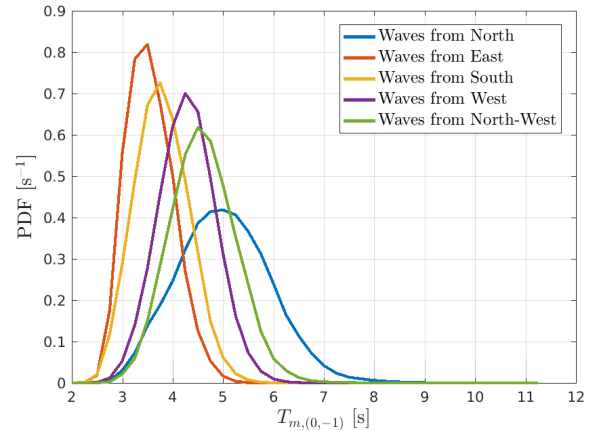


FIGURE 28 – PDF des périodes moyennes  $T_{m(0,-1)}$  par direction de provenance des vagues sur la période 2005-2016.

Wave Dir.	$H_s$					$T_{m(0,-1)}$				
	max	mean	median	90 <sup>e</sup> perc.	99 <sup>e</sup> perc.	max	mean	median	90 <sup>e</sup> perc.	99 <sup>e</sup> perc.
North	3.17	0.72	0.64	1.26	1.94	11.01	5.02	4.99	6.20	7.35
East	1.75	0.55	0.51	0.86	1.23	5.86	3.56	3.51	4.17	4.74
South	2.72	0.75	0.70	1.17	1.65	6.76	3.79	3.77	4.48	5.07
West	3.12	0.86	0.81	1.42	1.96	7.84	4.29	4.28	5.01	5.64
North-West	3.42	0.79	0.70	1.41	2.15	9.30	4.60	4.58	5.44	6.22

TABLE 15 – Statistiques des paramètres  $H_{sig}$  et  $T_{m(0,-1)}$  sur la période 2005-2016 par direction de provenance des vagues.

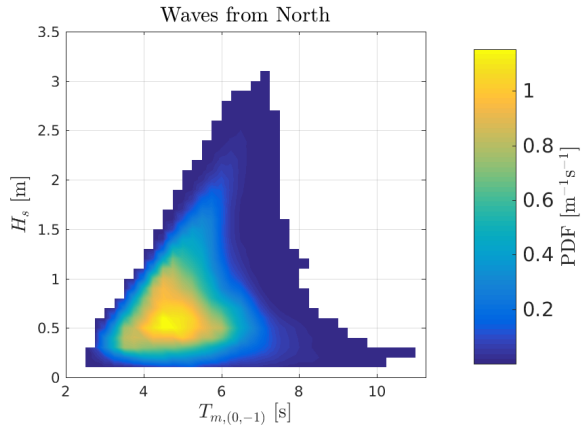


FIGURE 29 – Corrélogramme  $H_{\text{sig}} - T_{m(0,-1)}$  pour les vagues provenant du nord ( $-22.5^\circ < \theta_m < 45.0^\circ$ ) sur la période 2005-2016.

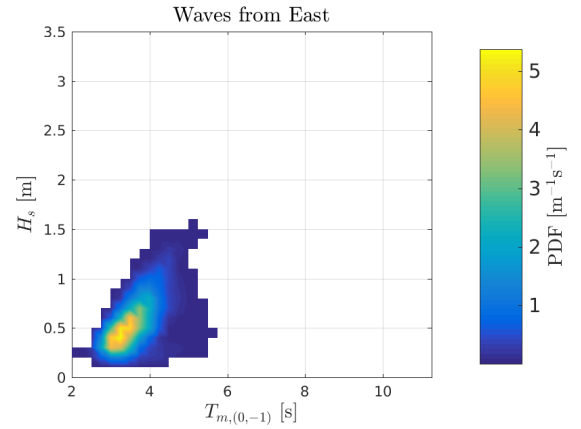


FIGURE 30 – Corrélogramme  $H_{\text{sig}} - T_{m(0,-1)}$  pour les vagues provenant de l'est ( $45.0^\circ < \theta_m < 135.0^\circ$ ) sur la période 2005-2016.

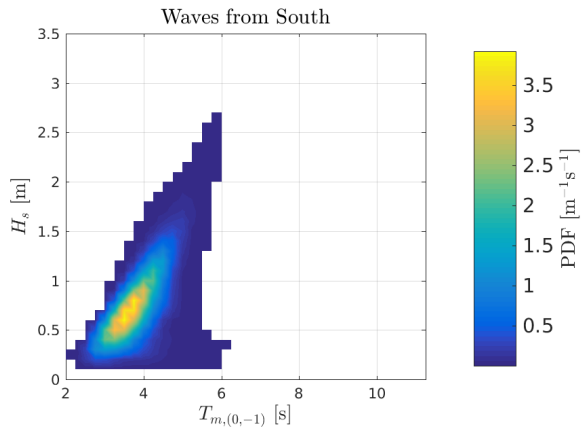


FIGURE 31 – Corrélogramme  $H_{\text{sig}} - T_{m(0,-1)}$  pour les vagues provenant du sud ( $135.0^\circ < \theta_m < 225.0^\circ$ ) sur la période 2005-2016.

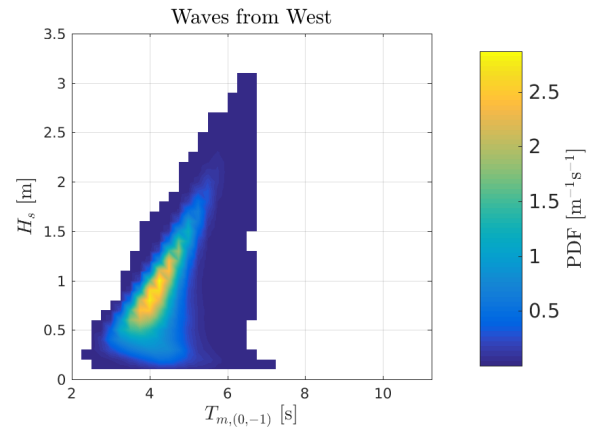


FIGURE 32 – Corrélogramme  $H_{\text{sig}} - T_{m(0,-1)}$  pour les vagues provenant de l'ouest ( $225.0^\circ < \theta_m < 292.5^\circ$ ) sur la période 2005-2016.

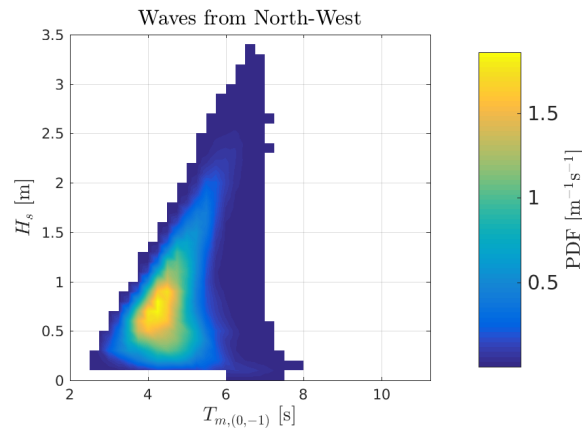


FIGURE 33 – Corrélogramme  $H_{\text{sig}} - T_{m(0,-1)}$  pour les vagues provenant du nord-ouest ( $292.5^\circ < \theta_m < 337.5^\circ$ ) sur la période 2005-2016.

### 3.3 Analyse de l'état de mer par systèmes de vagues

L'état de mer peut être potentiellement séparé en divers systèmes de vagues. On distingue la mer de vent, présentant des vagues en cours de développement sous l'effet du vent local et un ou plusieurs systèmes de houle, correspondant à la propagation de vagues formées précédemment et qui se sont propagées. La mer de vent se traduit par des étalements fréquentiels et directionnels importants (Leckler et al., 2015) tandis que les systèmes de houles présentent généralement des spectres d'énergie plus étroits en fréquence et direction. Le modèle WAVEWATCH III<sup>®</sup> permet une séparation des différents systèmes de vagues. Dans la suite du rapport, une analyse par partition de vagues est proposée.

La figure 34 donne la fonction de probabilité du nombre de systèmes de vagues détectés sur la zone. De très nombreux systèmes de vagues sont détectés, jusqu'à 11 systèmes, soit le maximum proposé par le modèle. Ces statistiques doivent être prises avec une grande précaution. En effet, ce très grand nombre de systèmes de vagues détectés sur la zone n'est pas représentatif du nombre réel de systèmes de vagues, mais est lié directement à la bathymétrie et à la réfraction des vagues qu'elle implique. En effet, lorsque les vagues se propagent sur un haut fond, la réfraction entraîne une modification de la direction de propagation des vagues de chaque côté du haut fond. Les multiples réfractions s'interférant sur la zone impliquent de multiples pics d'énergie dans le spectre, qui sont détectés par l'algorithme de WAVEWATCH III<sup>®</sup> comme différents systèmes de houle. La figure 35 illustre ce propos : trois spectres d'état de mer ont été extraits du champ de vagues le 20 janvier 2016 à 12h00. Ces spectres montrent principalement une mer de vent (vagues courtes,  $f_p \approx 0.60$  Hz) de l'ouest, une houle primaire de nord ( $f_p \approx 0.17$  Hz) et une houle secondaire de nord, avec des vagues plus courtes ( $f_p \approx 0.35$  Hz) et étalement directionnel important. Cette houle secondaire correspond aux résidus des mers de vent des jours précédents. On remarque également des pics d'énergie avec des intensités et des directions variant d'un spectre à l'autre. Ces pics d'énergie sont révélateurs d'une forte influence de la réfraction sur la zone. Bien que la hauteur significative soit limitée, cette large dispersion de l'énergie des vagues en fréquences et en directions implique une surface de mer chaotique avec des crêtes très courtes.

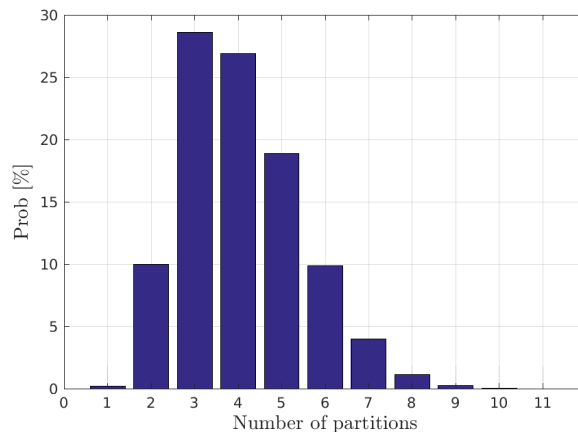


FIGURE 34 – Fonction de probabilité du nombre de systèmes de vagues détectés sur la zone.

La figure 36 montre la répartition des hauteurs significatives  $H_{sig}$  des partitions de vagues en fonction de la direction des vagues au pic d'énergie  $\theta_p$ , pour la mer de vent et pour les deux systèmes de houle les plus énergétiques. Les mers de vent observées sur la zone sont principalement d'ouest-sud-ouest, en accord avec les vents dominants sur la zone. Des mers de vent de nord-nord-ouest sont également observées. Du fait des fetchs courts, les vents venant de l'est et du sud développent des mers de vent moins énergétiques. Lorsqu'un ou plusieurs systèmes de houle sont détectés sur la zone, la houle primaire (la plus énergétique) provient principalement du nord avec des hauteurs significatives relativement faibles, généralement inférieures à 1 mètre. Ces deux systèmes de vagues (mer de vent d'ouest et houle résiduelle de nord) sont caractéristiques de la zone. En observant la répartition du troisième système de vagues détecté

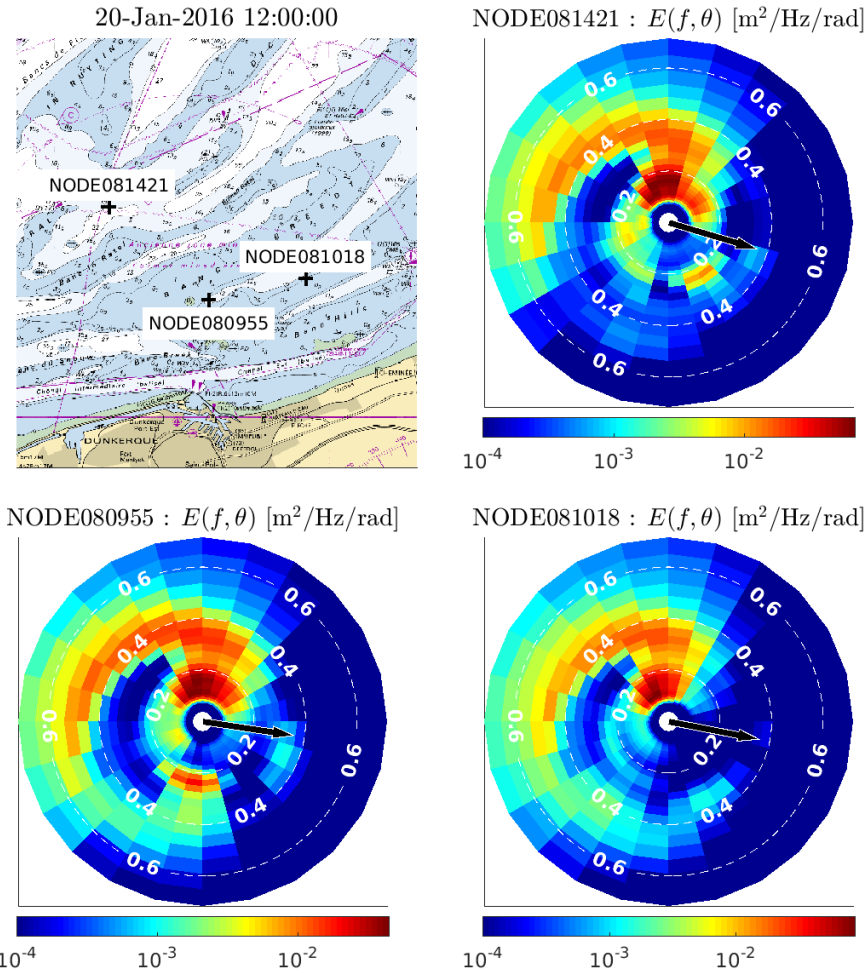


FIGURE 35 – Spectres des vagues aux nœuds de calcul 81421, 80955 et 81018, le 20 janvier 2016 à 12h00 : 11, 6 et 3 partitions de vagues ont été respectivement détectés par l’algorithme du modèle WAVEWATCH III® pour chacun de ces spectres.

sur la zone, on observe des hauteurs significatives très faibles, sans direction de propagation privilégiée. Il s’agit principalement des effets de la réfraction des différents systèmes de vagues sur la bathymétrie complexe de la zone (voir paragraphe 1.2.2).

Les figures 37 et 38 donnent les fonctions de densité de probabilité (PDF) respectivement pour les paramètres  $H_{sig}$  et  $T_{m(0,-1)}$  pour les trois systèmes de houles les plus énergétiques présents sur la zone. Les figures 39 et 40 montrent les corrélogrammes  $H_{sig} - T_{m(0,-1)}$  pour les vagues correspondant respectivement à la mer de vent et à la houle primaire. Le tableau 16 donne les statistiques pour les différents systèmes de vagues. Les mers de vent sont principalement composées de vagues courtes avec des périodes pics généralement inférieures à 8 secondes (4.4 secondes en moyenne) et des hauteurs significatives généralement inférieures à 2 mètres (0.8 mètres en moyenne). Cependant, lors de forts coups de vent, les hauteurs significatives peuvent dépasser les 3 mètres. La houle primaire détectée sur la zone est statistiquement peu énergétique avec des hauteurs significatives faibles (0.3 mètre en moyenne) mais pouvant atteindre 2 mètres dans de rares cas.. Il s’agit principalement d’une houle courte avec une période pic  $T_p$  en moyenne de 6.5 secondes. Les rares épisodes de houles du nord avec des périodes dépassant les 8 secondes présentent des hauteurs significatives inférieures à 1 mètre.

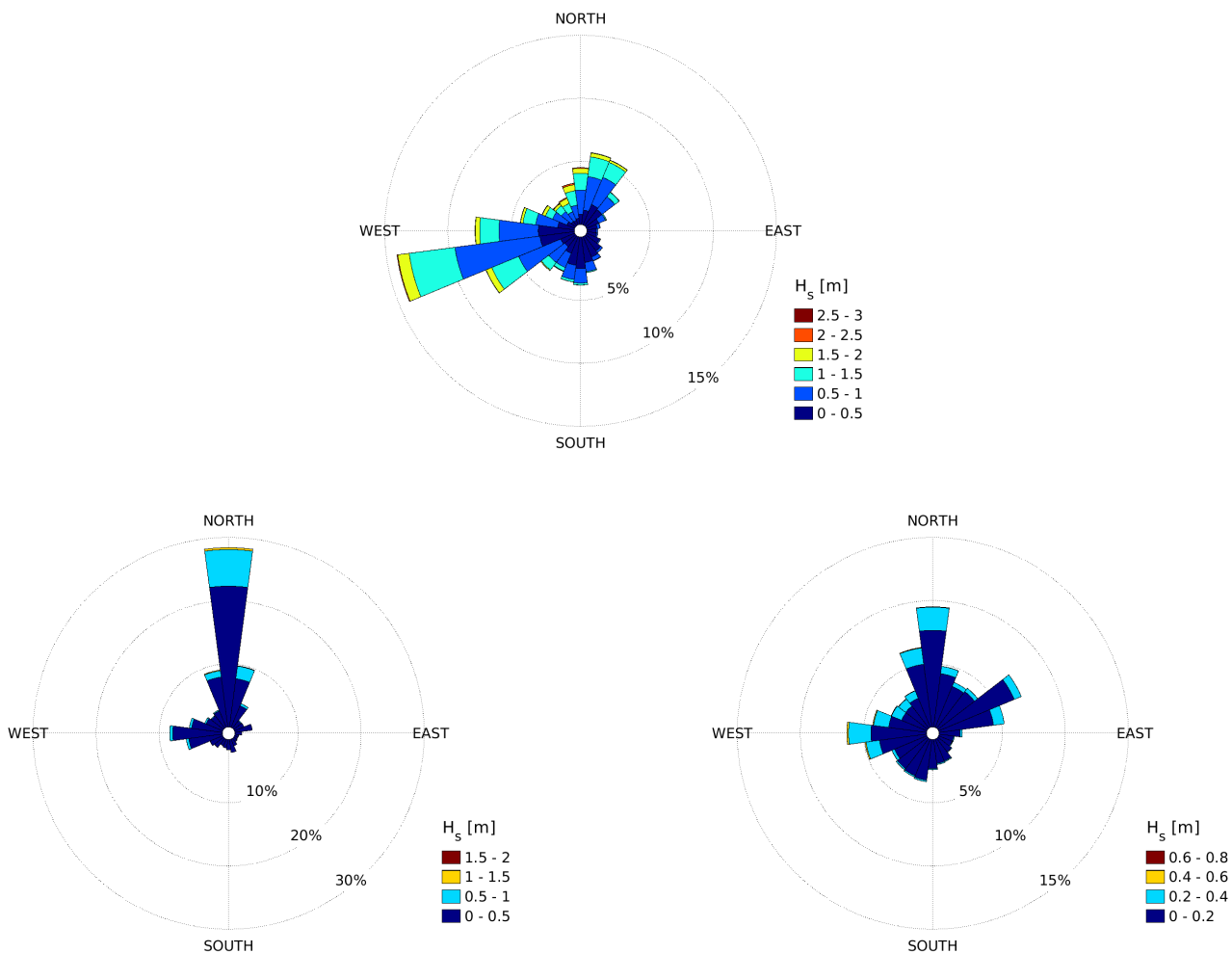


FIGURE 36 – Répartition des hauteurs significatives  $H_{sig}$  des partitions de vagues en fonction de la direction des vagues au pic d'énergie  $\theta_p$  pour l'ensemble de la période 2005-2016. La figure en haut montre la répartition pour la partition assimilée à la mer de vent. Les figures en bas correspondent à la houle primaire (à gauche) et secondaire (à droite) détectée.

Wave System	$H_s$					$T_p$				
	max	mean	median	90 <sup>e</sup> perc.	99 <sup>e</sup> perc.	max	mean	median	90 <sup>e</sup> perc.	99 <sup>e</sup> perc.
Wind Sea	3.42	0.77	0.71	1.38	2.01	18.68	4.39	4.32	6.29	7.80
Swell #1	2.06	0.31	0.26	0.59	1.00	21.01	6.45	6.27	8.68	11.96
Swell #2	1.05	0.15	0.13	0.27	0.44	21.93	6.37	5.84	9.62	13.24

TABLE 16 – Statistiques des paramètres  $H_{sig}$  et  $T_p$  sur la période 2005-2016 par système de vagues.



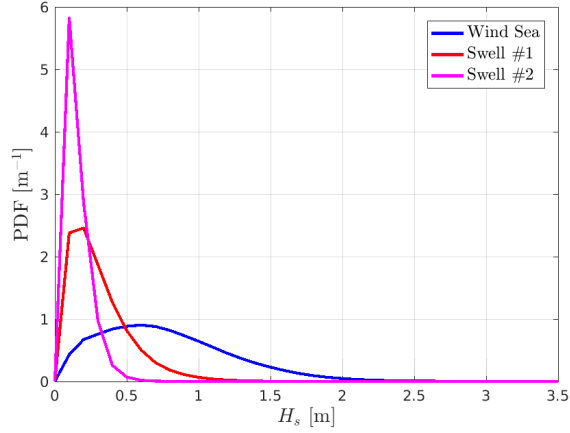


FIGURE 37 – PDF des hauteurs significatives  $H_{\text{sig}}$  pour les différents systèmes de vagues sur la zone sur la période 2005-2016. La courbe bleue représente la PDF des hauteurs significatives pour la mer de vent, les courbes rouge et magenta pour les deux systèmes de houles les plus énergétiques (houle primaire et secondaire).

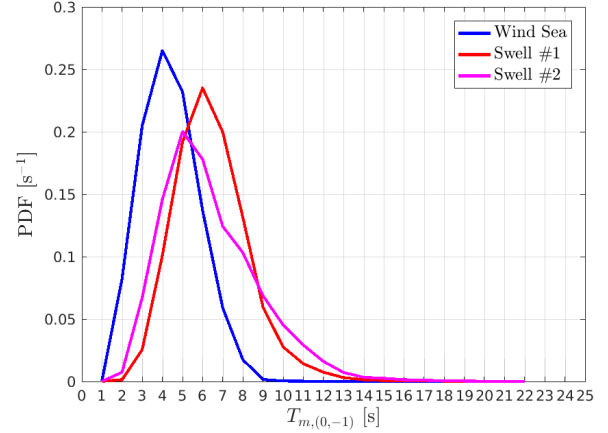


FIGURE 38 – PDF des périodes moyennes  $T_{m(0,-1)}$  pour les différents systèmes de vagues sur la zone sur la période 2005-2016. La courbe bleue représente la PDF des hauteurs significatives pour la mer de vent, les courbes rouge et magenta pour les deux systèmes de houles les plus énergétiques (houle primaire et secondaire).

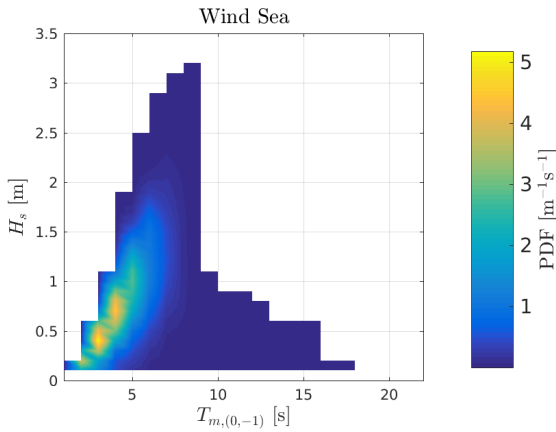


FIGURE 39 – Corrélogramme  $H_{\text{sig}} - T_{m(0,-1)}$  pour le système de vagues correspondant à la mer de vent sur la période 2005-2016.

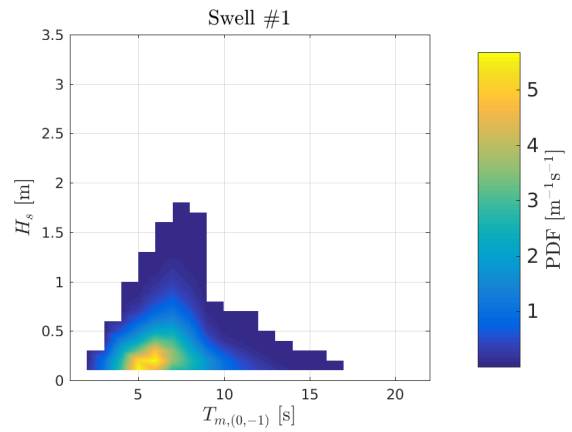


FIGURE 40 – Corrélogramme  $H_{\text{sig}} - T_{m(0,-1)}$  pour le système de vagues correspondant à la houle primaire sur la période 2005-2016.

## 4 Analyse spatiale : modèle DUNK

Cette partie propose l'analyse des 5 événements rejoués à l'aide du modèle à 20 mètres de résolution sur la zone hydrographiée à haute résolution (voir 2.5). Pour chaque jour rejoué, le champ de vague a été extrait à pleine et à basse mer.

Les figures 42, 43, 44, 45 et 46 montrent les champs de vagues à pleine mer et à basse mer pour les événements du 10 Octobre 2013, 23 Mars 2013, 24 Décembre 2013, 18 Janvier 2007 et 5 Mars 2012. Ces événements correspondent respectivement à des directions moyennes de provenance des vagues du Nord, Est, Sud, Ouest, et Nord-Ouest. La figure 41 montre les bathymétries telles que prises en compte par les modèles DUNK (à gauche) et MANGAS (à droite).

On observe tout d'abord une bonne cohérence entre les distributions de hauteurs significatives sur la zone obtenues avec chacun des deux modèles. Cependant, le léger biais observé (en moyenne sur la zone) entre les deux modèles renseigne que les statistiques calculées avec le modèle MANGAS sont très légèrement sous-estimées sur la zone.

En revanche, bien que le biais moyen sur la zone soit faible, le biais peut localement être important aux abords des sommets des bancs de sable. En effet, avec une meilleure résolution, les faibles profondeurs au sommet des bancs de sable sont mieux résolues dans la bathymétrie du modèle DUNK et le phénomène de levage est donc également mieux résolu. Cela implique des hauteurs significatives plus importantes localement dans le modèle DUNK que dans le modèle MANGAS au sommet des bancs de sable. La meilleure résolution des faibles profondeurs implique également une meilleure prise en compte du déferlement bathymétrique au sommet des bancs de sable. Ainsi, de légers biais négatifs sont observés (principalement à basse mer) derrière les bancs de sable, les bancs de sable se comportant comme des brise-lames.

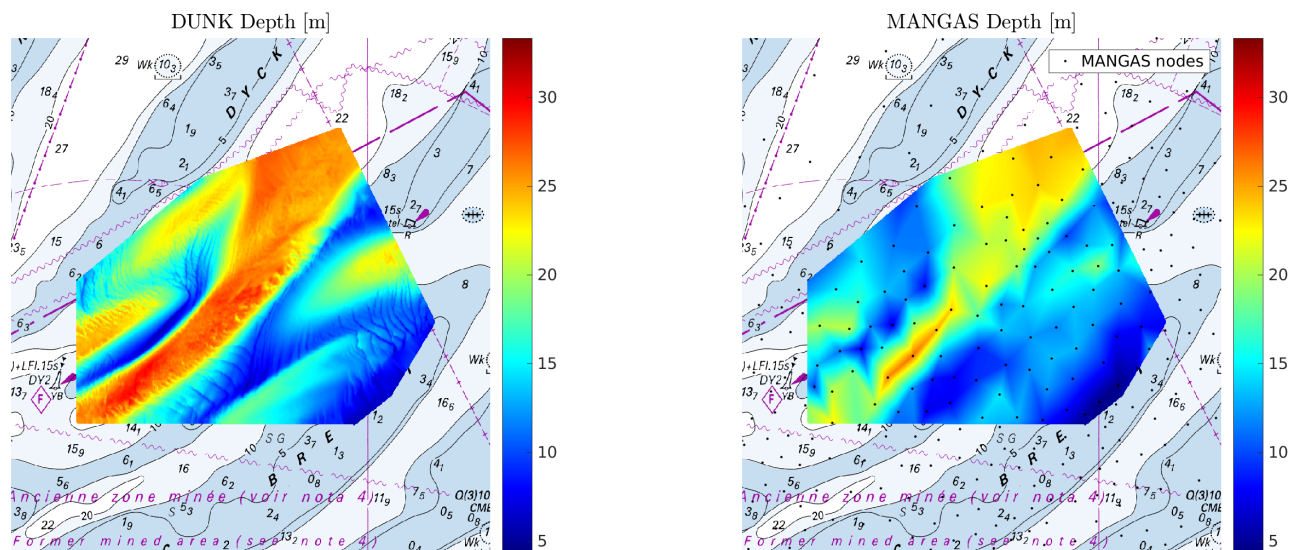


FIGURE 41 – Bathymétries telles que prises en compte par les modèles DUNK (à gauche) et MANGAS (à droite).

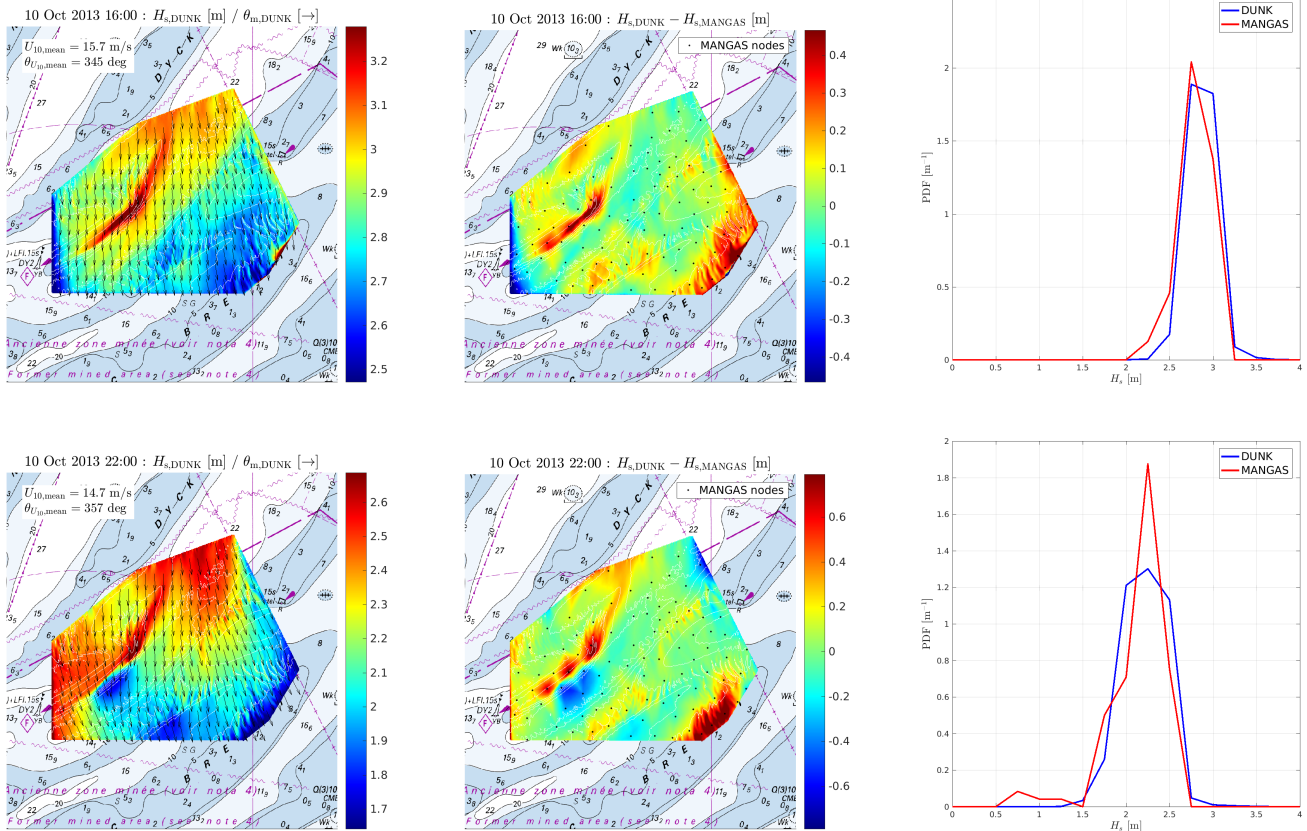


FIGURE 42 – Événement du 10 Octobre 2013 à la pleine mer (en haut) et à basse mer (en bas). A gauche : le champ de vagues ( $H_{sig}$  et  $\theta_m$ ) issu du modèle DUNK à 20 mètres de résolution (Les couleurs représentent les hauteurs significatives, les flèches sont la direction moyenne des vagues  $\theta_m$ ). Au centre : différence entre le champ de hauteurs significatives  $H_{sig}$  issu du modèle DUNK à 20 mètres de résolution et celui obtenu avec le modèle MANGAS à 200m de résolution. A droite : comparaison des fonctions de densité de probabilité (PDF) de  $H_{sig}$  sur la zone obtenues avec le modèle DUNK (en bleu) et avec le modèle MANGAS (en rouge).

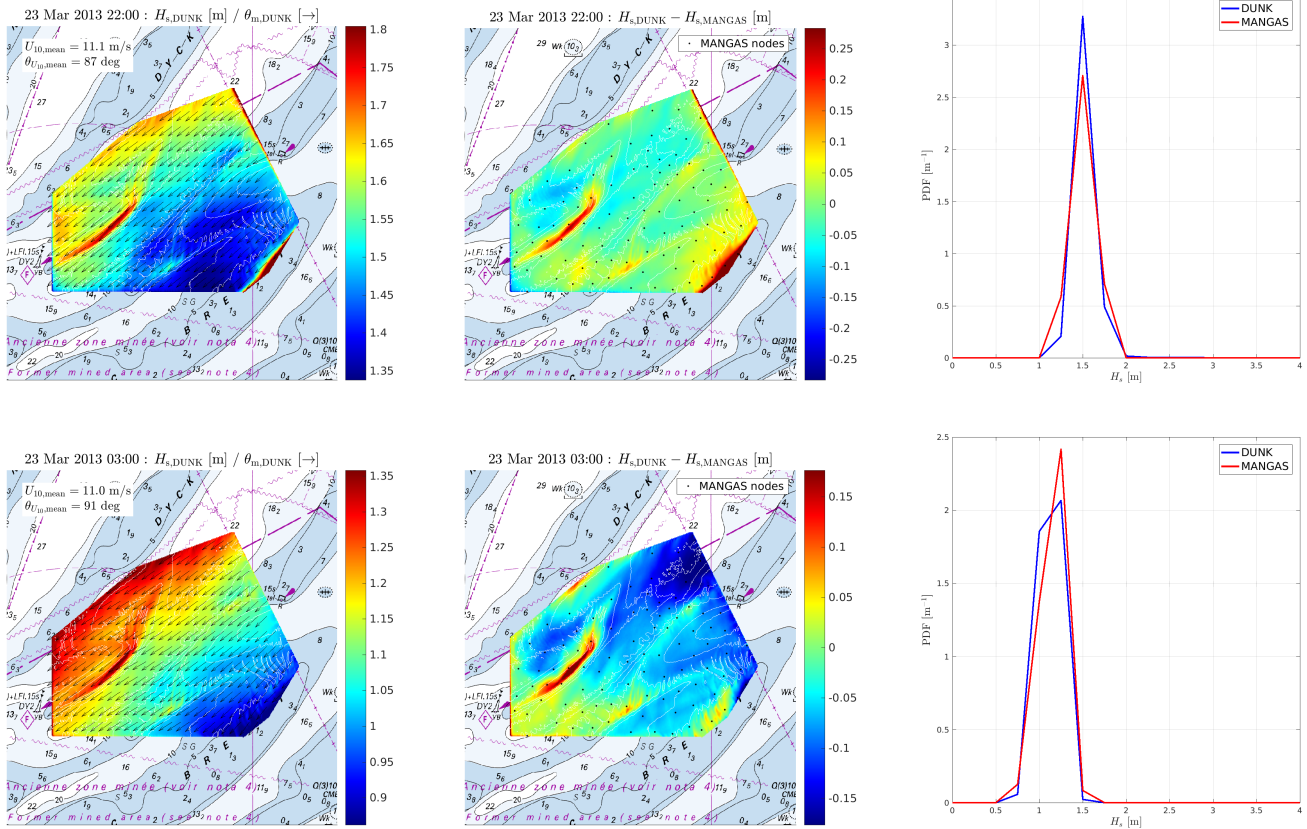


FIGURE 43 – Événement du 23 Mars 2013 à la pleine mer (en haut) et à basse mer (en bas). A gauche : le champ de vagues ( $H_{sig}$  et  $\theta_m$ ) issu du modèle DUNK à 20 mètres de résolution (Les couleurs représentent les hauteurs significatives, les flèches sont la direction moyenne des vagues  $\theta_m$ ). Au centre : différence entre le champ de hauteurs significatives  $H_{sig}$  issu du modèle DUNK à 20 mètres de résolution et celui obtenu avec le modèle MANGAS à 200m de résolution. A droite : comparaison des fonctions de densité de probabilité (PDF) de  $H_{sig}$  sur la zone obtenues avec le modèle DUNK (en bleu) et avec le modèle MANGAS (en rouge).

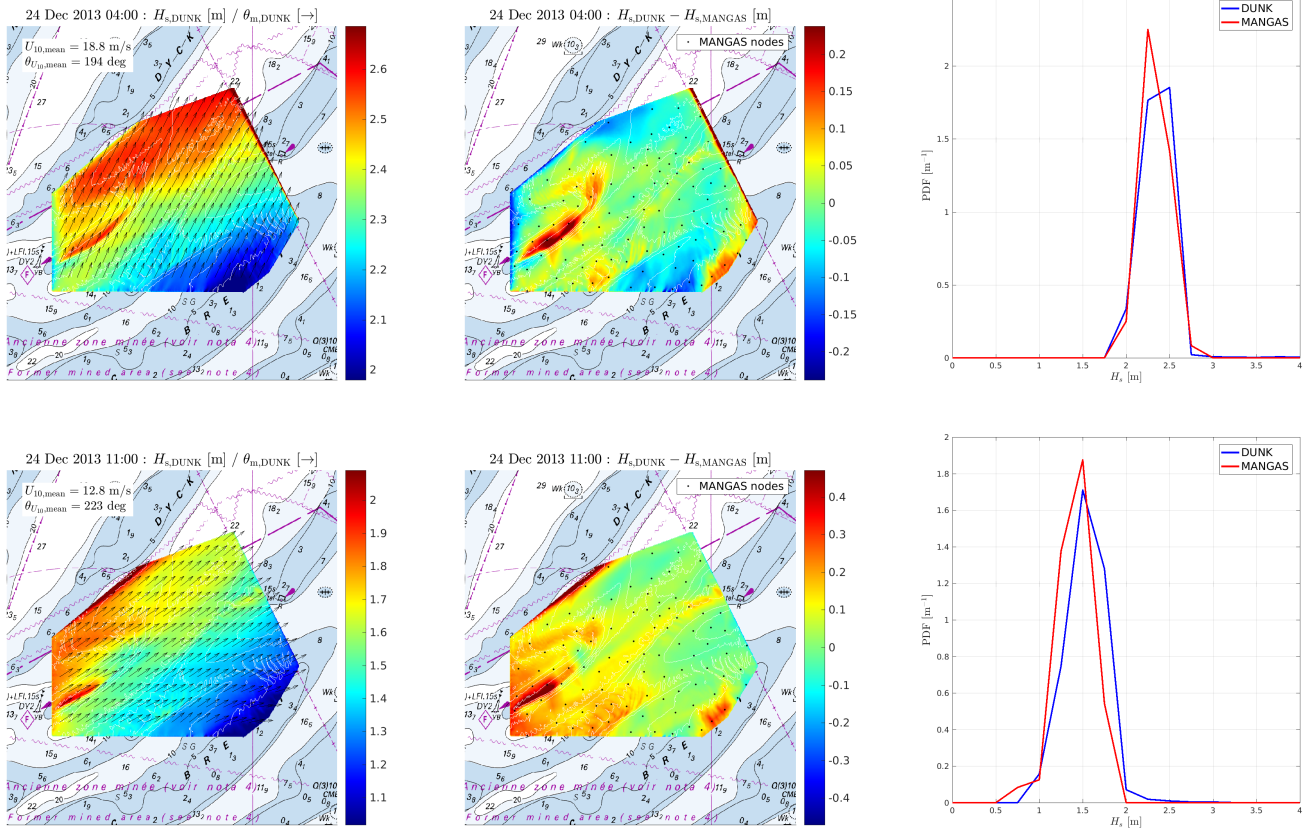


FIGURE 44 – Événement du 24 Décembre 2013 à la pleine mer (en haut) et à basse mer (en bas). A gauche : le champ de vagues ( $H_{sig}$  et  $\theta_m$ ) issu du modèle DUNK à 20 mètres de résolution (Les couleurs représentent les hauteurs significatives, les flèches sont la direction moyenne des vagues  $\theta_m$ ). Au centre : différence entre le champ de hauteurs significatives  $H_{sig}$  issu du modèle DUNK à 20 mètres de résolution et celui obtenu avec le modèle MANGAS à 200m de résolution. A droite : comparaison des fonctions de densité de probabilité (PDF) de  $H_{sig}$  sur la zone obtenues avec le modèle DUNK (en bleu) et avec le modèle MANGAS (en rouge).

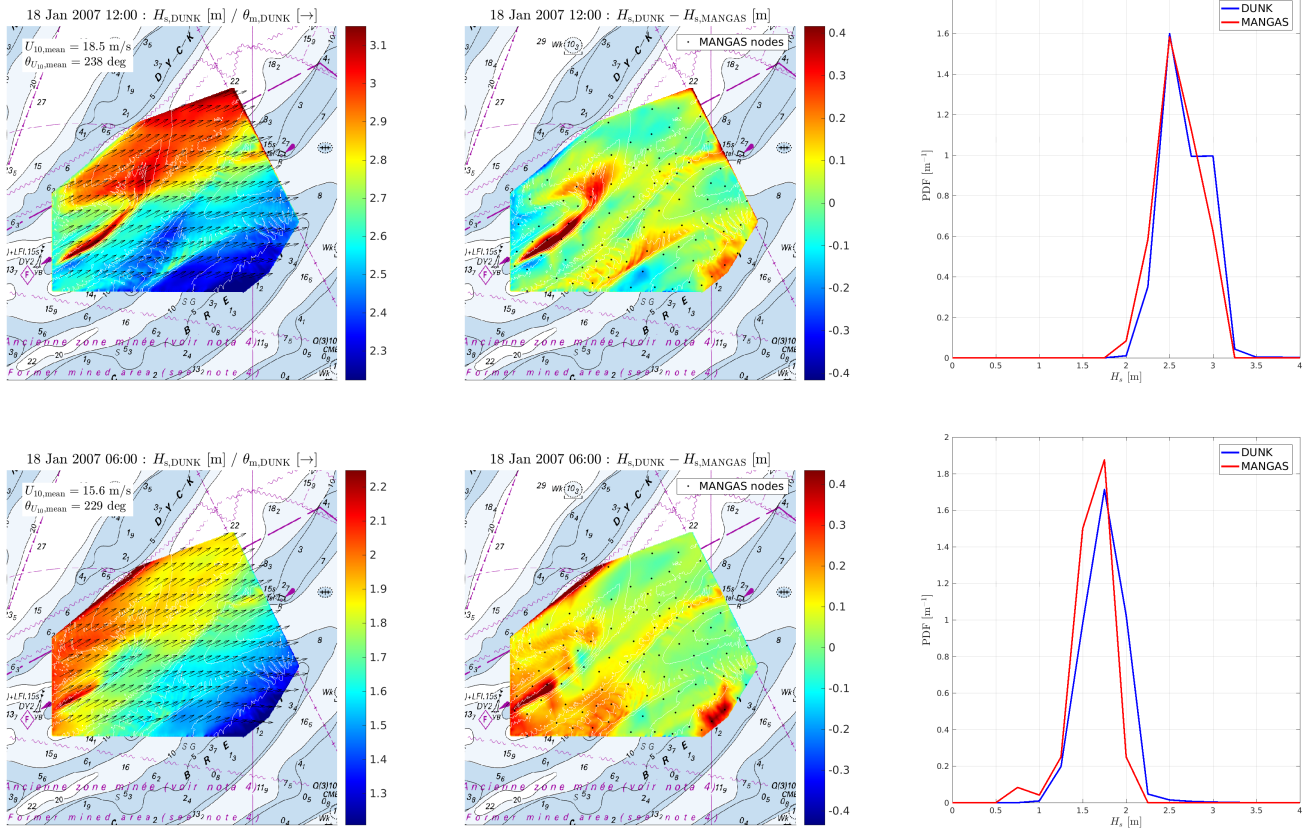


FIGURE 45 – Événement du 18 Janvier 2007 à la pleine mer (en haut) et à basse mer (en bas). A gauche : le champ de vagues ( $H_{sig}$  et  $\theta_m$ ) issu du modèle DUNK à 20 mètres de résolution (Les couleurs représentent les hauteurs significatives, les flèches sont la direction moyenne des vagues  $\theta_m$ ). Au centre : différence entre le champ de hauteurs significatives  $H_{sig}$  issu du modèle DUNK à 20 mètres de résolution et celui obtenu avec le modèle MANGAS à 200m de résolution. A droite : comparaison des fonctions de densité de probabilité (PDF) de  $H_{sig}$  sur la zone obtenues avec le modèle DUNK (en bleu) et avec le modèle MANGAS (en rouge).

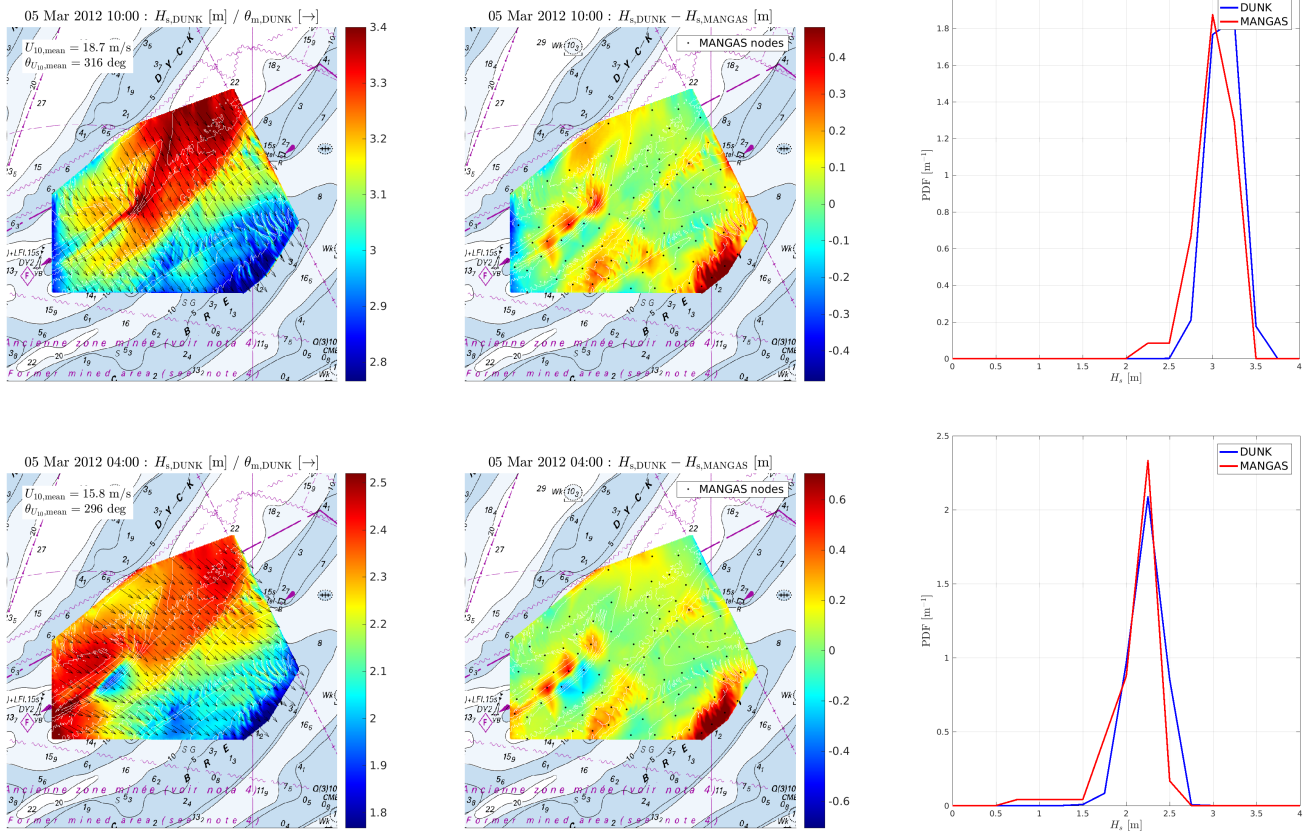


FIGURE 46 – Événement du 5 Mars 2012 à la pleine mer (en haut) et à basse mer (en bas). A gauche : le champ de vagues ( $H_{sig}$  et  $\theta_m$ ) issu du modèle DUNK à 20 mètres de résolution (Les couleurs représentent les hauteurs significatives, les flèches sont la direction moyenne des vagues  $\theta_m$ ). Au centre : différence entre le champ de hauteurs significatives  $H_{sig}$  issu du modèle DUNK à 20 mètres de résolution et celui obtenu avec le modèle MANGAS à 200m de résolution. A droite : comparaison des fonctions de densité de probabilité (PDF) de  $H_{sig}$  sur la zone obtenues avec le modèle DUNK (en bleu) et avec le modèle MANGAS (en rouge).

## 5 Conclusions de l'étude

Dans le cadre de cette étude, un jeu des états de mer a été réalisé à l'aide du modèle numérique spectral d'état de mer WAVEWATCH III® sur la période 2005-2016. Une validation approfondie a été réalisée en utilisant diverses sources d'observation des vagues (satellites altimétriques et bouées houlographes). Les résultats de la validation démontrent une bonne capacité du modèle à rejouer les états de mer sur la façade Atlantique et en Manche. Le manque d'observations de longue durée à proximité de la zone EMR de Dunkerque est toutefois à noter. Cependant, la comparaison des résultats du modèle aux observations des profilers de courant houlographes mouillés dans la zone EMR de Dunkerque dans le cadre de cette étude est très satisfaisante, malgré la complexité de la bathymétrie de la zone. Globalement, le modèle montre des résultats très satisfaisants et au niveau de l'état de l'art en modélisation spectrale des états de mer : de très bons résultats en termes de hauteurs significatives, et des résultats satisfaisants en termes de directions et de périodes. Cinq événements considérant des directions moyennes de vagues différents ont également été rejoués à haute résolution avec le modèle DUNK à 20 mètres de résolution.

Du fait de sa position, la zone EMR est protégée des houles longues de l'Atlantique. L'état de mer sur la zone est ainsi principalement constitué de la mer de vent liée au vent local, parfois accompagnée d'une faible houle résiduelle se propageant depuis la mer du Nord. Les fetchs très courts dans les directions sud et est ne permettent pas le développement de mers de vent très énergétiques dans ces directions. En revanche, les directions ouest et nord proposent des fetchs plus longs et donc des mers de vent plus énergétiques peuvent donc se développer dans ces directions.

L'analyse des résultats du modèle sur la période 2005-2016 sur la zone EMR de Dunkerque montre un état de mer généralement peu énergétique (en moyenne,  $H_{sig} < 1$  m). L'état de mer sur la zone EMR principalement constitué d'une mer de vent, généralement d'ouest. Cette mer de vent présente généralement des vagues courtes avec une période du pic d'énergie  $T_p$  de la mer en moyenne de 4.4 secondes, et généralement inférieure à 7.8 secondes. Lors de forts coups de vent, la hauteur significative de la mer de vent peut atteindre et dépasser les 3 mètres, cependant, celle-ci est en moyenne de moins de 1 mètre. Cette mer de vent s'additionne généralement à une faible houle résiduelle de nord avec une hauteur significative en moyenne de 0.3 mètre, mais pouvant atteindre les 2 mètres en de rares cas. Cette houle est très courte comparée aux houles observées en Atlantique avec une période moyenne au pic d'énergie de 6.3 secondes et inférieure à 8 secondes pour les houles significatives ( $H_{sig} > 1$  m).

La bathymétrie de la zone EMR de Dunkerque présente de faibles profondeurs (de 25m à 1.5m par rapport au Zéro Hydrographique) avec de forts gradients dus à la présence de grands bancs de sable (est-ouest), eux-mêmes surmontés de dunes (nord-sud). De plus, la zone est également soumise à de fortes variations tidales de hauteurs d'eau. Lors des événements d'états de mer énergétiques sur la zone, on observe un seuillage des valeurs maximum de hauteur significative en fonction de la profondeur, ce qui révèle une forte dissipation par déferlement bathymétrique sur la zone. Ainsi, les zones de faibles profondeurs, au sommet des bancs de sable, entraînent le déferlement des vagues les plus hautes et limitent ainsi la hauteur significative des vagues. Cette bathymétrie complexe implique une forte réfraction des vagues. Ainsi, la zone présente des spectres de vagues avec un très grand étalement de l'énergie des vagues en direction. Cela se traduit par des crêtes de vagues très courtes sur la zone et donne à la surface de mer un aspect chaotique.

Enfin, les résultats du modèle DUNK à haute résolution sont cohérents avec les résultats du modèle MANGAS. Un léger biais est cependant observé entre les modèles et indique une légère sous-estimation des statistiques calculées avec le modèle MANGAS. Le modèle DUNK renseigne également une forte hétérogénéité du champ de vagues sur la zone. Les faibles profondeurs au sommet des bancs de sable entraînent une forte amplification des vagues par levage, puis leur déferlement (effet brise lame).



## 6 Bibliographie

### Références

- A., P., 2016 : Homonim – phase ii. version v4 du système de prévision des surcotes. configuration atl. rapport interne shom. Technical report, Shom.
- Airy, G. B., 1841 : Tides and waves. *Encyclopedia metropolitana (1817–1845)*, H. J. R. et al., ed., London.
- Ardhuin, F., B. Chapron, and F. Collard, 2009 : Observation of swell dissipation across oceans. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L06607.
- Ardhuin, F., F. Dumas, A.-C. Bennis, A. Roland, A. Sentchev, P. Forget, J. Wolf, F. Girard, P. Osuna, and M. Benoit, 2012 : Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves : Part ii, evaluation in conditions with strong currents, and general validation of wave models in currents. *J. Phys. Oceanogr.*, submitted.
- Ardhuin, F., J. Hanafin, Y. Quilfen, B. Chapron, P. Queffeuou, M. Obrebski, J. Sienkiewicz, and D. Vandemark, 2011 : calibration of the IOWAGA global wave hindcast (1991–2011) using ECMWF and CFSR winds. *Proceedings, 12th Int. Workshop of Wave Hindcasting and Forecasting, Hawaii*.
- Ardhuin, F., W. C. O’Reilly, T. H. C. Herbers, and P. F. Jessen, 2003 : Swell transformation across the continental shelf. part I : Attenuation and directional broadening. *J. Phys. Oceanogr.*, **33**, 1921–1939.
- Ardhuin, F., E. Rogers, A. Babanin, J.-F. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. van der Westhuysen, P. Queffeuou, J.-M. Lefevre, L. Aouf, and F. Collard, 2010 : Semi-empirical dissipation source functions for wind-wave models : part I, definition, calibration and validation. *J. Phys. Oceanogr.*, **40**, 1917–1941.
- Baraille, R. and N. Filatoff, 1995 : Modele shallow-water multicouches isopycnal de miami.
- Battjes, J. A. and J. P. F. M. Janssen, 1978 : Energy loss and set-up due to breaking of random waves. *Proceedings of the 16th international conference on coastal engineering*, ASCE, 569–587.
- Biscara, L., 2015 : Mnt bathymétrie de façade atlantique (projet homonim). *SHOM*.
- Biscara, L., T. Schmitt, S. Corréard, and R. Creach, 2014 : Modèles numériques de bathymétrie pour la prévision hydrodynamique du dispositif vigilance vagues-submersions. *Actes des XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie*, **155**, 2–4.
- Bleck, R., 2002 : An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-cartesian coordinates. *Ocean modelling*, **4**, 55–88.
- Boutet, M., 2015 : *Estimation du frottement sur le fond pour la modélisation de la marée barotrope*. Ph.D. thesis, Université de Bretagne Occidentale.
- Dee, D., S. Uppala, A. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, et al., 2011 : The era-interim reanalysis : Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the royal meteorological society*, **137**, 553–597.
- Gelci, R., H. Cazalé, and J. Vassal, 1957 : Prévision de la houle. La méthode des densités spectroangulaires. *Bulletin d’information du Comité d’Océanographie et d’Etude des Côtes*, **9**, 416–435.
- Grant, W. D. and O. S. Madsen, 1979 : Combined wave and current interaction with a rough bottom. *J. Geophys. Res.*, **84**, 1797–1808.

- Hanafin, J., Y. Quilfen, F. Ardhuin, D. Vandemark, B. Chapron, H. Feng, J. Sienkiewicz, P. Queffelec, M. Obrebski, B. Chapron, N. Reul, F. Collard, D. Cormand, E. B. de Azevedo, D. Vandemark, and E. Stutzmann, 2012 : Phenomenal sea states and swell radiation : a comprehensive analysis of the 12-16 February 2011 North Atlantic storms. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, in press.
- Hasselmann, K., 1962 : On the non-linear energy transfer in a gravity wave spectrum, part 1 : general theory. *J. Fluid Mech.*, **12**, 481–501.
- Hasselmann, S., K. Hasselmann, J. Allender, and T. Barnett, 1985 : Computation and parameterizations of the nonlinear energy transfer in a gravity-wave spectrum. Part II : Parameterizations of the nonlinear energy transfer for application in wave models. *J. Phys. Oceanogr.*, **15**, 1378–1391.
- Holthuijsen, L., 2007 : Waves in coastal and oceanic waters.
- Leckler, F., F. Ardhuin, J.-F. Filipot, and A. Mironov, 2013 : Dissipation source terms and whitecap statistics. *Ocean Modelling*, **70**, 62–74.
- Leckler, F., F. Ardhuin, C. Peureux, A. Benetazzo, F. Bergamasco, and V. Dulov, 2015 : Analysis and interpretation of frequency–wavenumber spectra of young wind waves. *Journal of Physical Oceanography*, **45**, 2484–2496.
- Magne, R., K. Belibassakis, T. H. C. Herbers, F. Ardhuin, W. C. O’Reilly, and V. Rey, 2007 : Evolution of surface gravity waves over a submarine canyon. *J. Geophys. Res.*, **112**, C01002.
- Mei, C. C., 1984 : The applied dynamics of ocean surface waves. *Ocean Engineering*, **11**, 321.
- Michaud, H., P. Marsaleix, Y. Leredde, C. Estournel, F. Bourrin, F. Lyard, C. Mayet, and F. Ardhuin, 2012 : Three-dimensional modelling of wave-induced current from the surf zone to the inner shelf. *Ocean Science*, **8**, 657.
- Michaud, H. and A. Pasquet, 2016 : Impact du courant de marée et des variations de niveau sur la configuration atlantique ww3 pendant les tempêtes de l’hiver 2013-2014 – version v3. projet homonim. rapport interne shom. Technical report, Shom.
- Michaud, H., A. Pasquet, R. Baraille, F. Leckler, L. Aouf, A. Dalphiné, M. Huchet, A. Roland, M. Dutour-Sikiric, F. Ardhuin, et al., 2015 : Implementation of the new french operational coastal wave forecasting system and application to a wave-current interaction study. *14th International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, and 5 Coastal Hazard Symposium*.
- Miche, A., 1944 : Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur croissante ou décroissante. forme limite de la houle lors de son déferlement. application aux digues maritimes. exposé préliminaire. *Annales des Ponts et Chaussées*, **Tome 114**, 25–42.
- Rapp, R. J. and W. Melville, 1990 : Laboratory measurements of deep-water breaking waves. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **331**, 735–800.
- Stansell, P. and C. MacFarlane, 2002 : Experimental investigation of wave breaking criteria based on wave phase speeds. *Journal of physical oceanography*, **32**, 1269–1283.
- Tolman, H. L., 1994 : Wind waves and moveable-bed bottom friction. *J. Phys. Oceanogr.*, **24**, 994–1,009.
- Tolman, H. L. and the WAVEWATCHIII® Development Group, 2014 : User manual and system documentation of wavewatch iii version 5.16. Technical report.

- Turton, J. and F. Carse, 2013 : Wave measurement comparisons from moored buoys and light vessels. *29th Science & Technology Workshop, 23-27 Sept. 2013, Paris, France.*
- Whitham, G. B., 1974 : *Linear and nonlinear waves*. Wiley, New York, 636 p.
- Zakharov, V. E., 1968 : Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid. *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **2**, 190–194.

# A Validations Modèle/Altimètres par années

## A.1 Année 2005

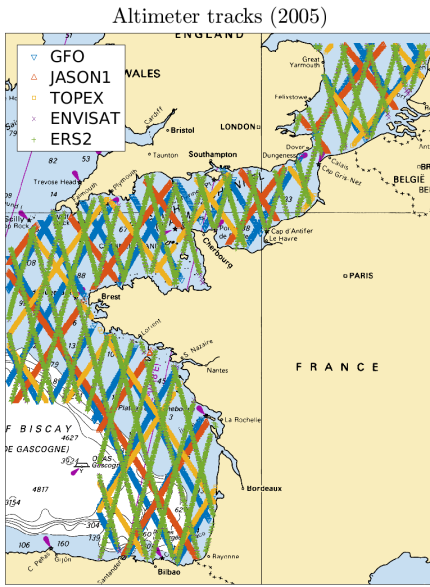


FIGURE 47 – Cartes des traces satellite altimétrique pour l'année 2005.

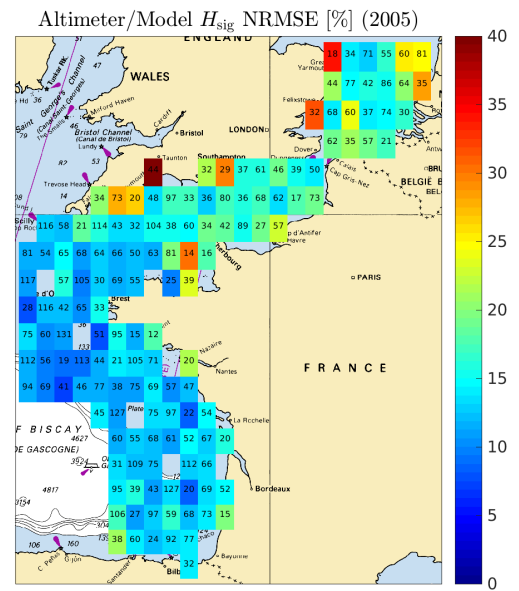


FIGURE 48 – Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées de  $H_{sig}$  pour l'année 2005 avec une résolution de 0.5 degrés. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

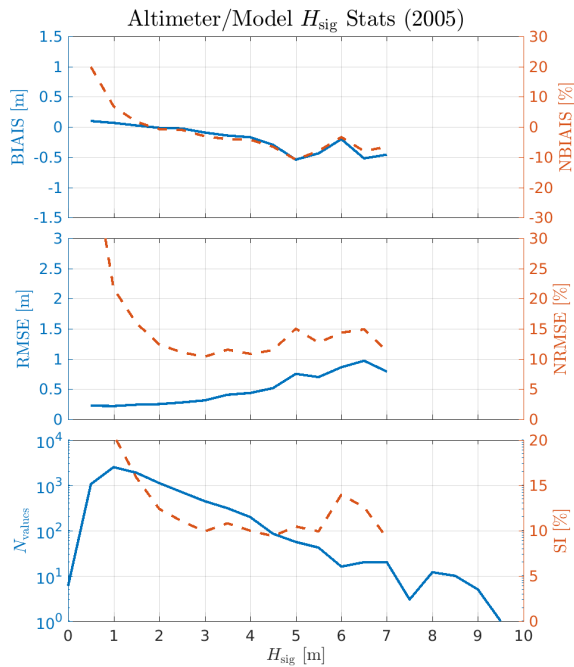
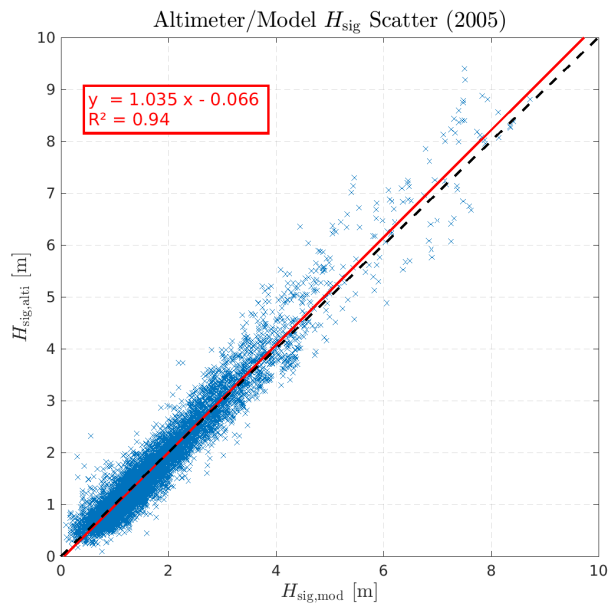


FIGURE 49 – Qualification des erreurs (BIAIS, RMSE, SI) de  $H_{sig}$  en fonction des échelles de observées et modélisées pour l'année 2005.



## A.2 Année 2006

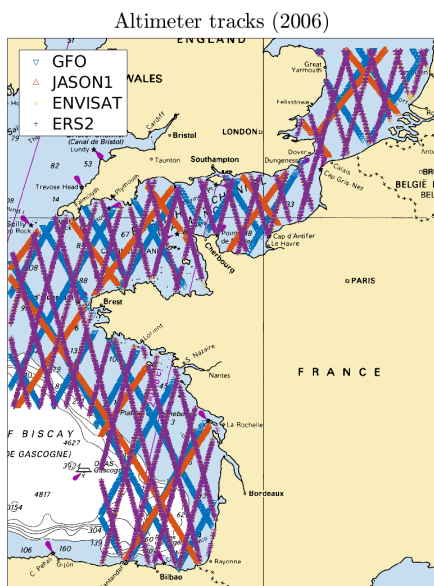


FIGURE 51 – Cartes des traces satellite altimétrique pour l'année 2006.

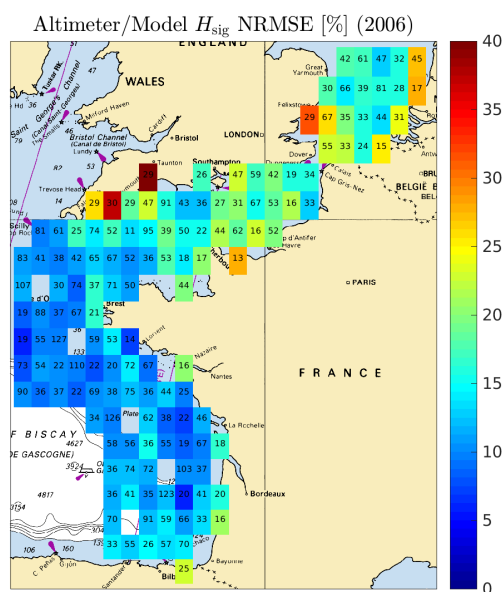


FIGURE 52 – Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées de  $H_{sig}$  pour l'année 2006 avec une résolution de 0.5 degrés. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

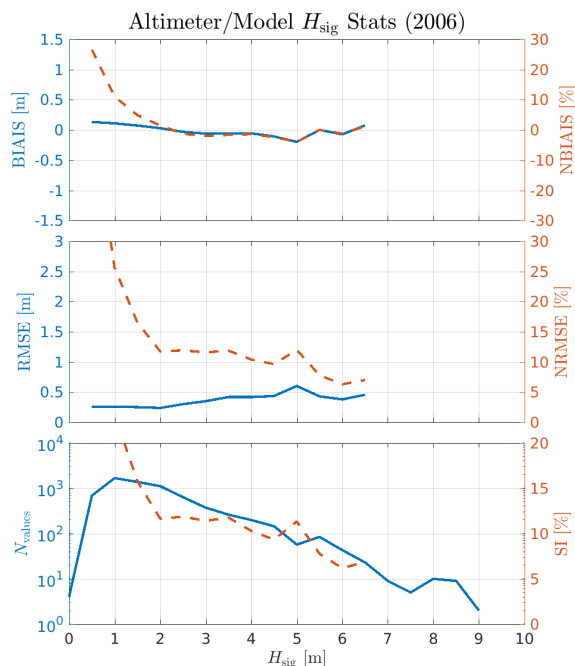


FIGURE 53 – Qualification des erreurs (BIAIS, RMSE, SI) de  $H_{sig}$  en fonction des échelles de  $H_{sig}$  pour l'année 2006.

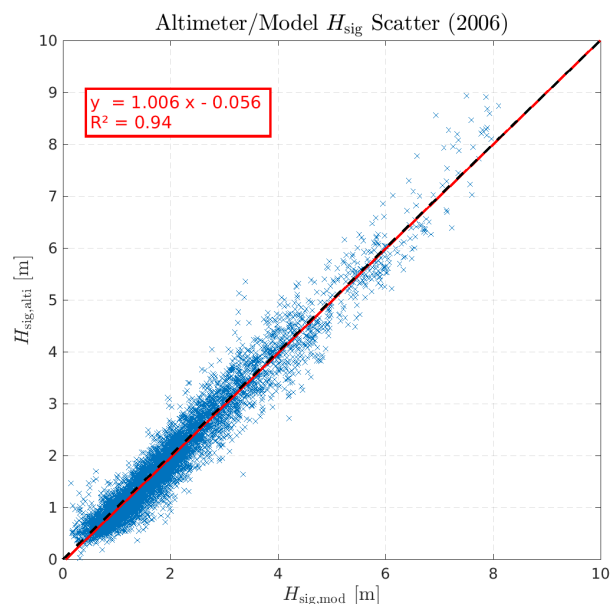


FIGURE 54 – Corrélation des valeurs de  $H_{sig}$  observées et modélisées pour l'année 2006.

### A.3 Année 2007

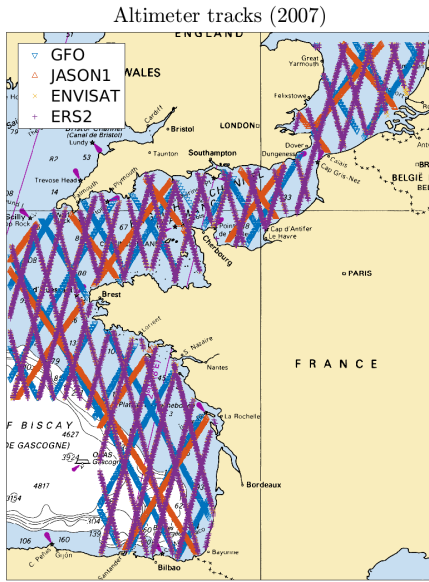


FIGURE 55 – Cartes des traces satellite altimétrique pour l'année 2007.

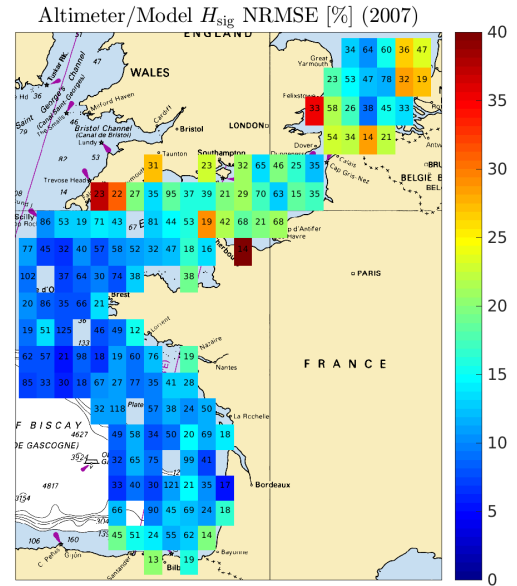


FIGURE 56 – Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées de  $H_{sig}$  pour l'année 2007 avec une résolution de 0.5 degrés. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

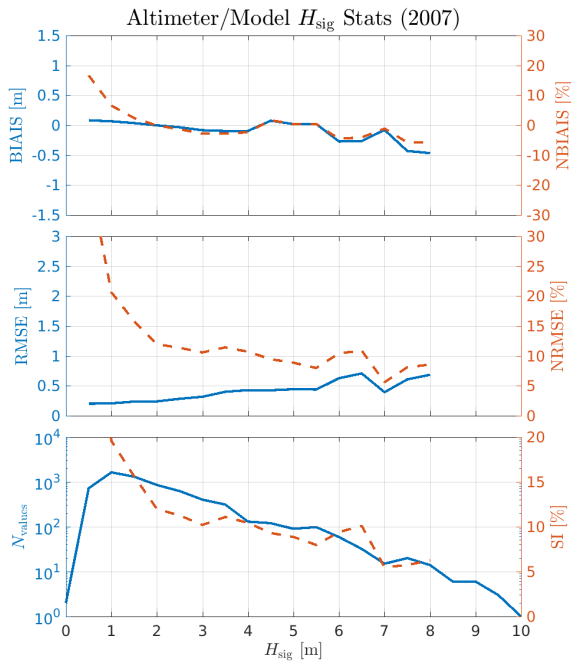


FIGURE 57 – Qualification des erreurs (BIAS, RMSE, SI) de  $H_{sig}$  en fonction des échelles de  $H_{sig}$  pour l'année 2007.

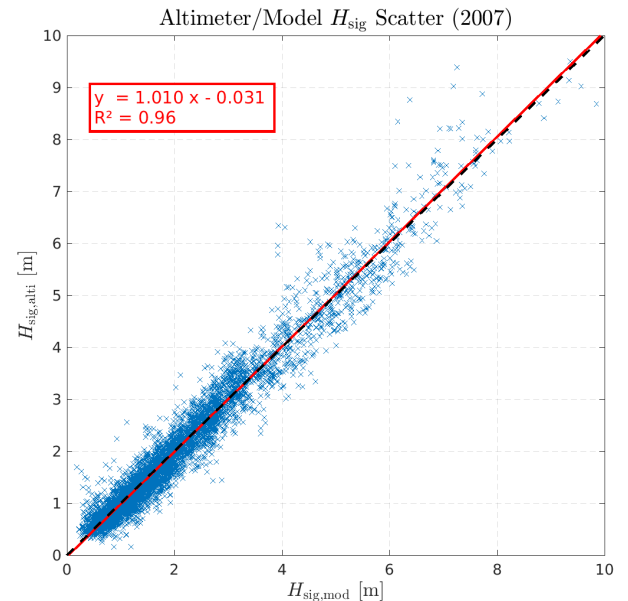


FIGURE 58 – Corrélation des valeurs de  $H_{sig}$  observées et modélisées pour l'année 2007.

## A.4 Année 2008



FIGURE 59 – Cartes des traces satellite altimétrique pour l'année 2008.

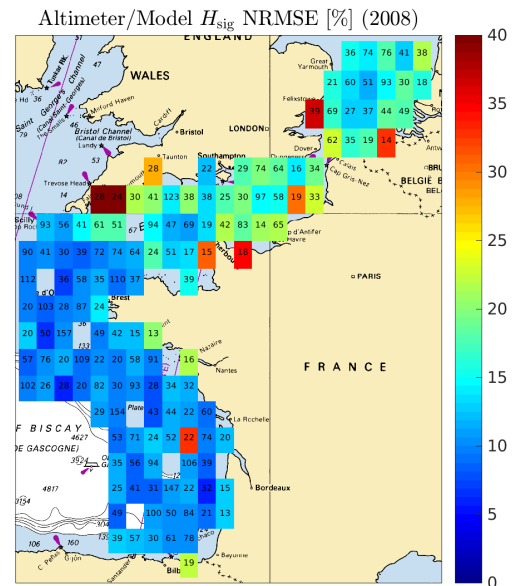


FIGURE 60 – Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées de  $H_{sig}$  pour l'année 2008 avec une résolution de 0.5 degrés. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

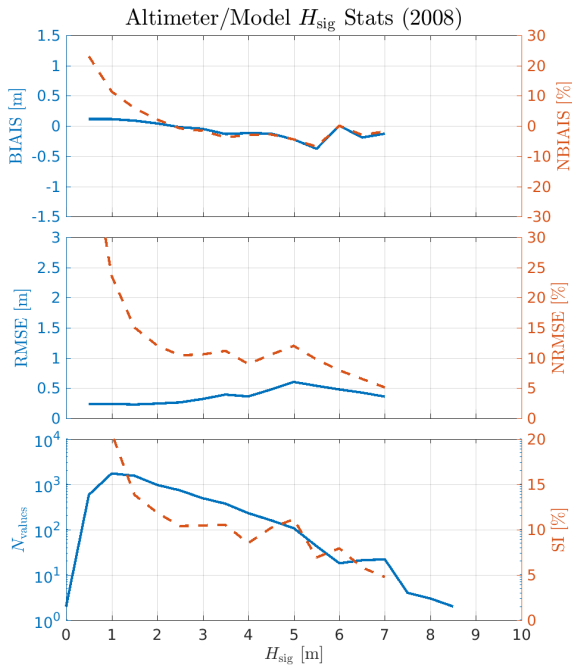


FIGURE 61 – Qualification des erreurs (BIAIS, RMSE, SI) de  $H_{sig}$  en fonction des échelles de  $H_{sig}$  pour l'année 2008.

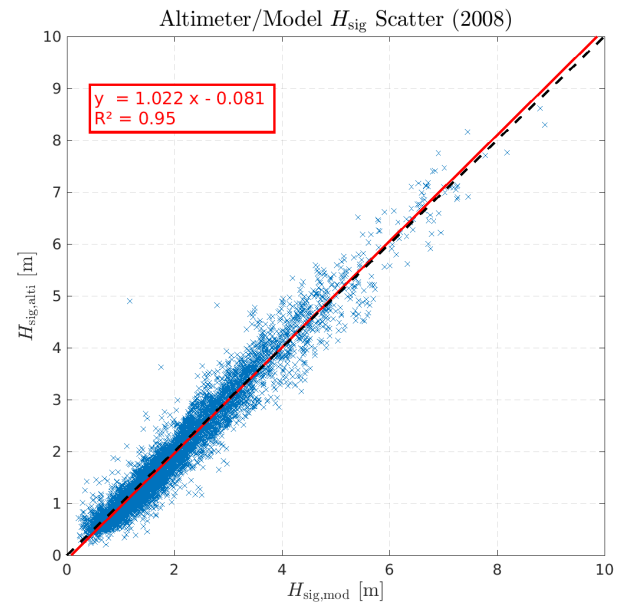


FIGURE 62 – Corrélation des valeurs de  $H_{sig}$  observées et modélisées pour l'année 2008.

## A.5 Année 2009

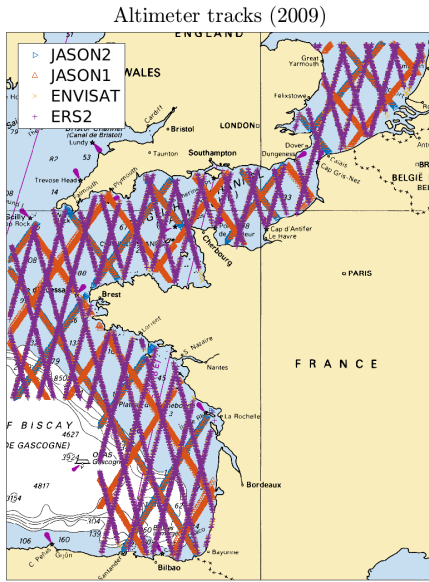


FIGURE 63 – Cartes des traces satellite altimétrique pour l'année 2009.

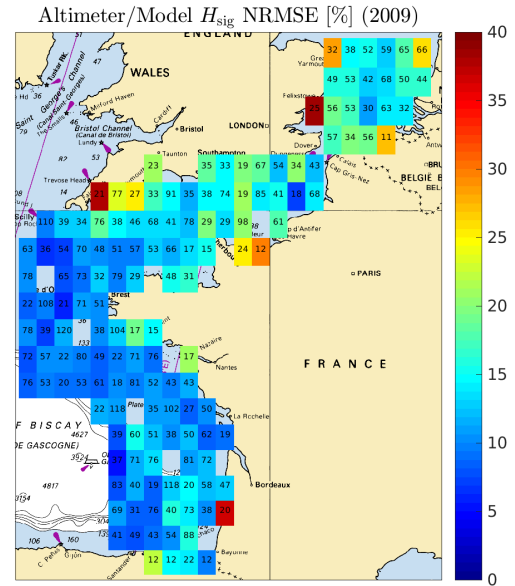


FIGURE 64 – Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées de  $H_{sig}$  pour l'année 2009 avec une résolution de 0.5 degrés. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

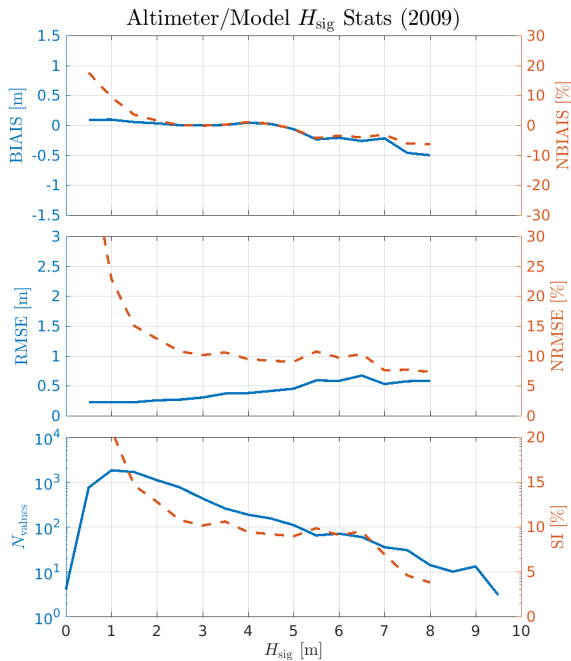


FIGURE 65 – Qualification des erreurs (BIAIS, RMSE, SI) de  $H_{sig}$  en fonction des échelles de  $H_{sig}$  pour l'année 2009.

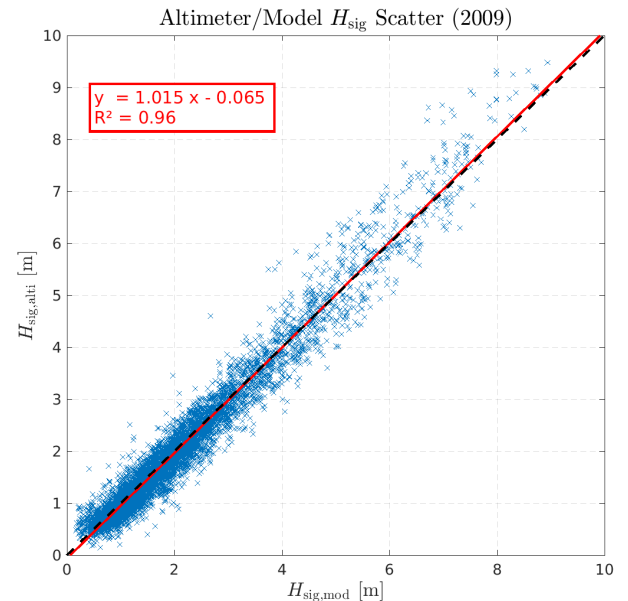


FIGURE 66 – Corrélation des valeurs de  $H_{sig}$  observées et modélisées pour l'année 2009.



## A.6 Année 2010

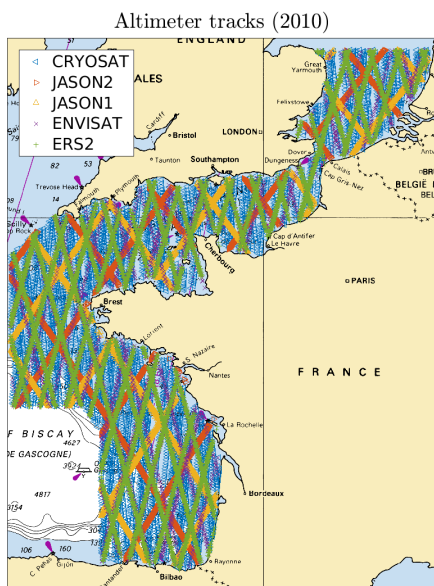


FIGURE 67 – Cartes des traces satellite altimétrique pour l'année 2010.

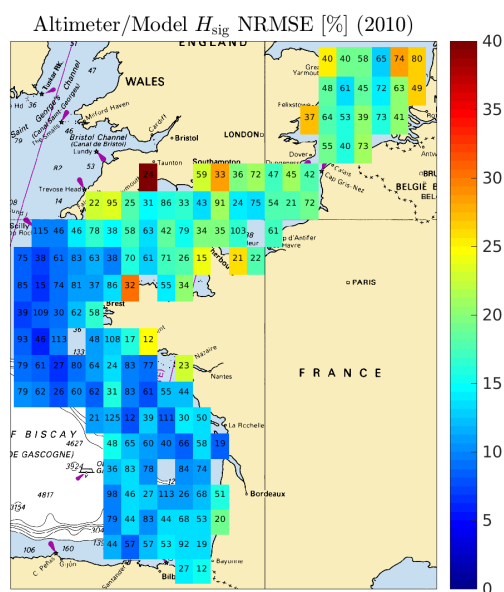


FIGURE 68 – Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées de  $H_{sig}$  pour l'année 2010 avec une résolution de 0.5 degrés. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

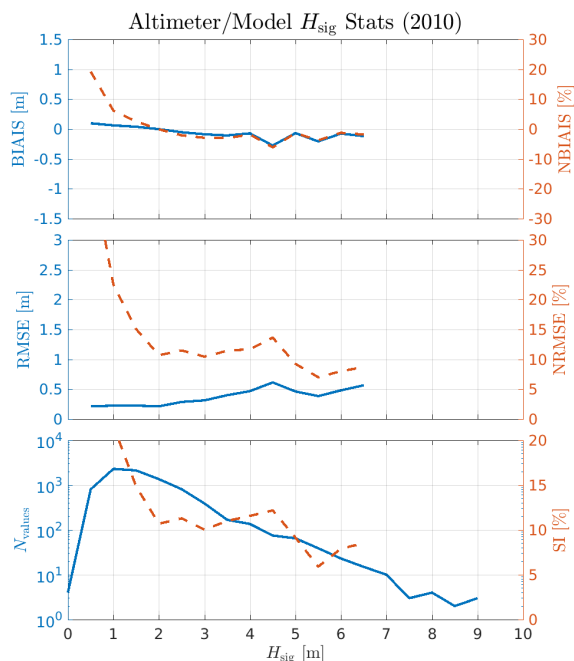


FIGURE 69 – Qualification des erreurs (BIAIS, RMSE, SI) de  $H_{sig}$  en fonction des échelles de  $H_{sig}$  pour l'année 2010.

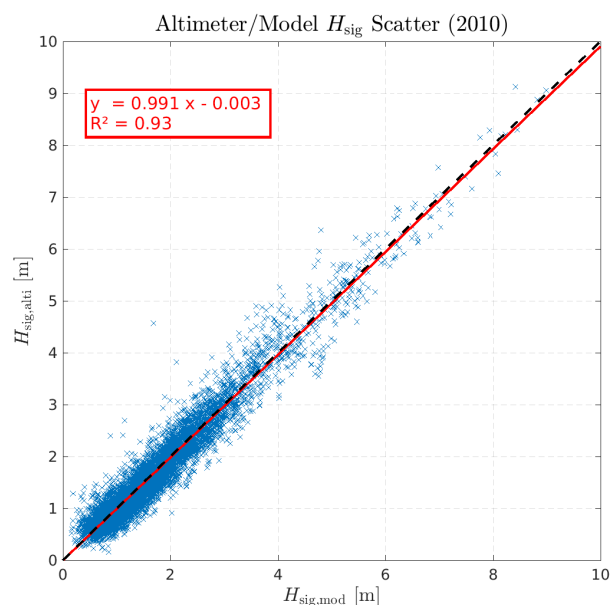


FIGURE 70 – Corrélation des valeurs de  $H_{sig}$  observées et modélisées pour l'année 2010.

## A.7 Année 2011

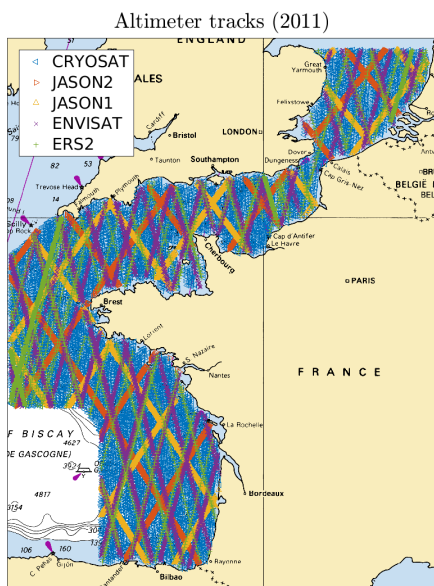


FIGURE 71 – Cartes des traces satellite altimétrique pour l'année 2011.

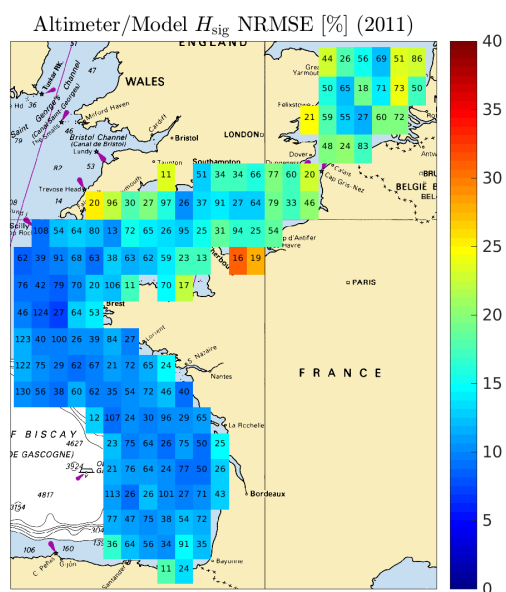


FIGURE 72 – Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées de  $H_{sig}$  pour l'année 2011 avec une résolution de 0.5 degrés. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

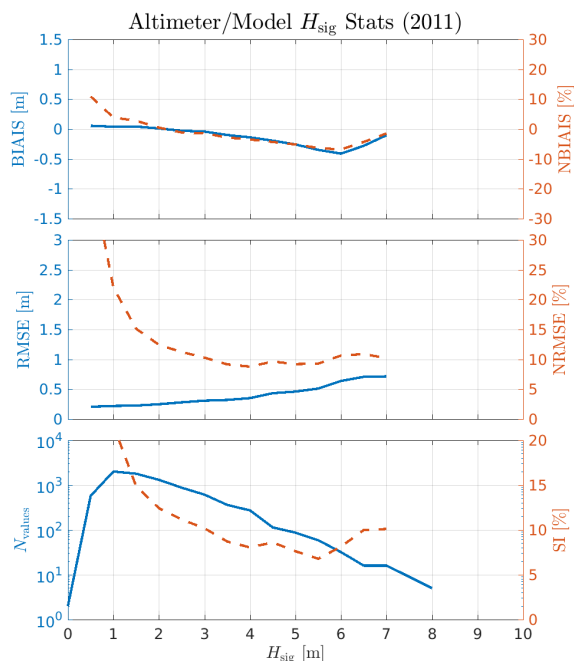


FIGURE 73 – Qualification des erreurs (BIAIS, RMSE, SI) de  $H_{sig}$  en fonction des échelles de  $H_{sig}$  pour l'année 2011.

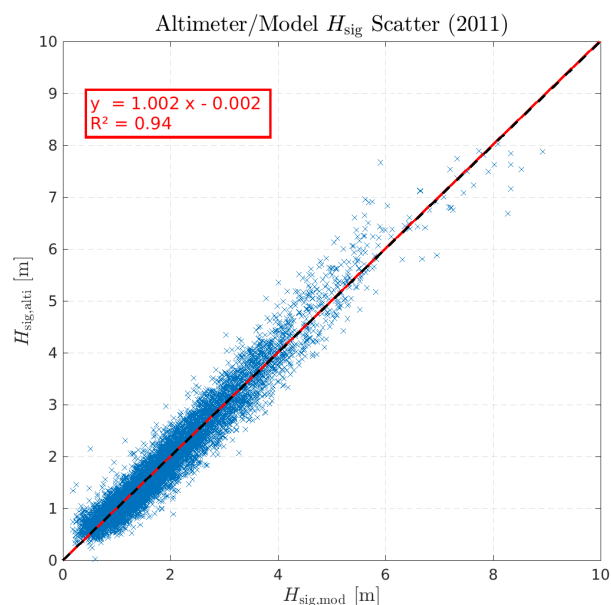


FIGURE 74 – Corrélation des valeurs de  $H_{sig}$  observées et modélisées pour l'année 2011.

## A.8 Année 2012



FIGURE 75 – Cartes des traces satellite altimétrique pour l'année 2012.

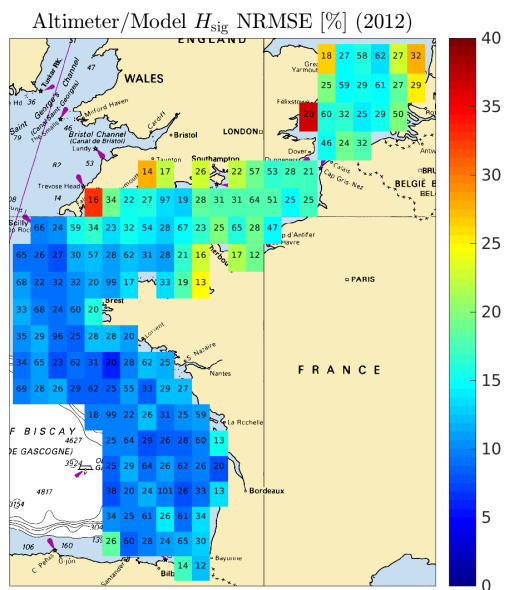


FIGURE 76 – Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées de  $H_{sig}$  pour l'année 2012 avec une résolution de 0.5 degrés. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

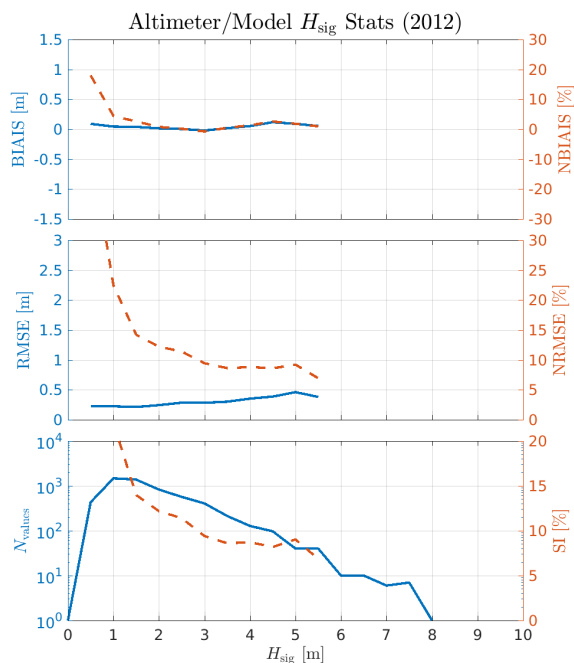


FIGURE 77 – Qualification des erreurs (BIAS, RMSE, SI) de  $H_{sig}$  en fonction des échelles de  $H_{sig}$  pour l'année 2012.

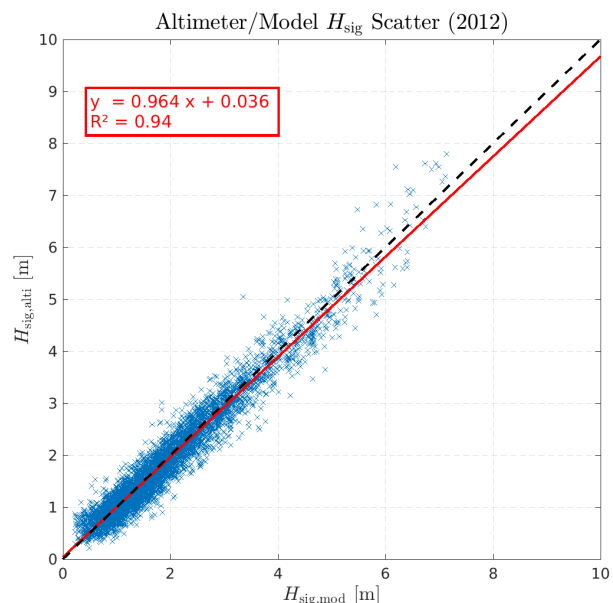


FIGURE 78 – Corrélation des valeurs de  $H_{sig}$  observées et modélisées pour l'année 2012.

## A.9 Année 2013

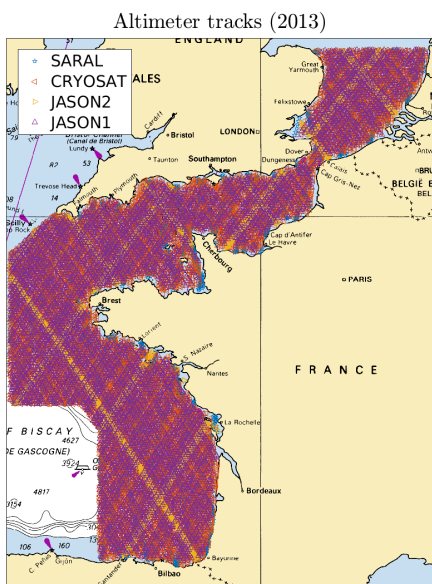


FIGURE 79 – Cartes des traces satellite altimétrique pour l'année 2013.

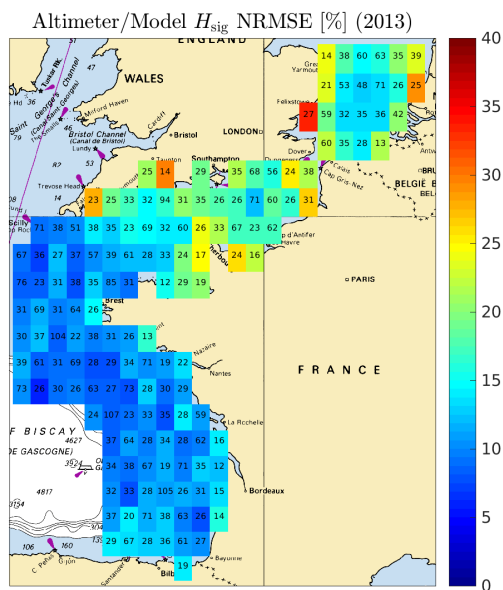


FIGURE 80 – Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées de  $H_{sig}$  pour l'année 2013 avec une résolution de 0.5 degrés. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

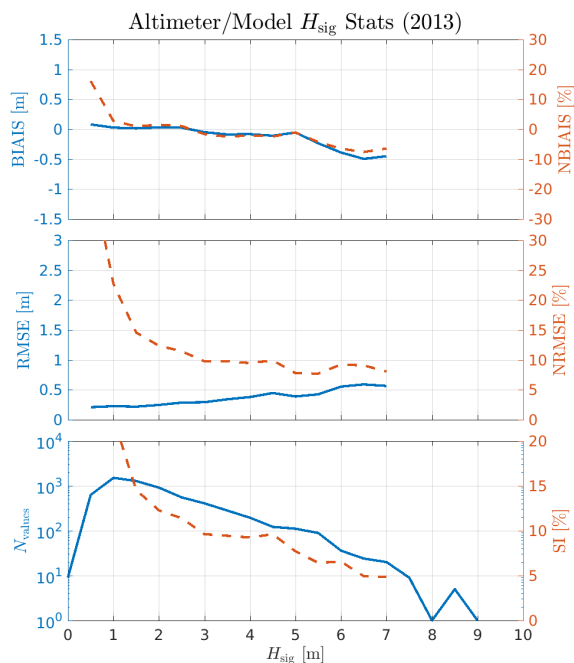


FIGURE 81 – Qualification des erreurs (BIAS, RMSE, SI) de  $H_{sig}$  en fonction des échelles de  $H_{sig}$  pour l'année 2013.

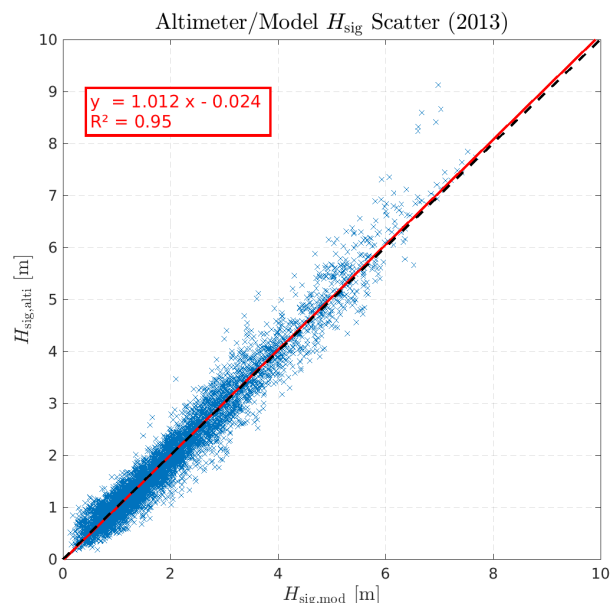


FIGURE 82 – Corrélation des valeurs de  $H_{sig}$  observées et modélisées pour l'année 2013.

## A.10 Année 2014

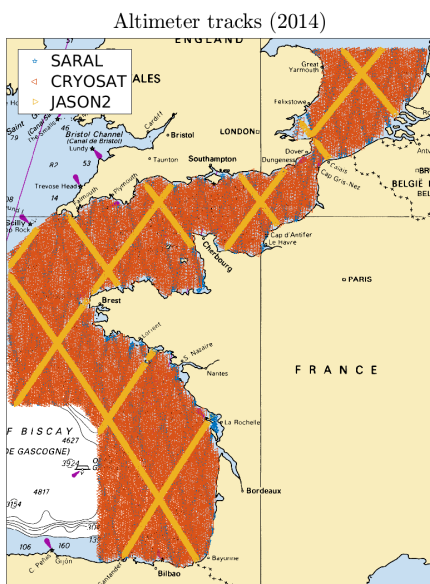


FIGURE 83 – Cartes des traces satellite altimétrique pour l’année 2014.

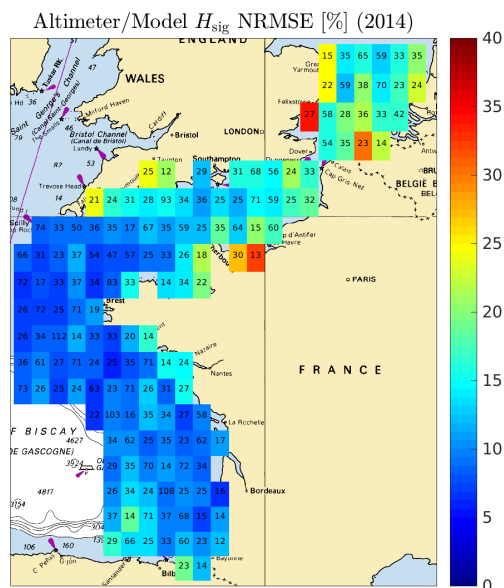


FIGURE 84 – Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées de  $H_{sig}$  pour l’année 2014 avec une résolution de 0.5 degrés. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

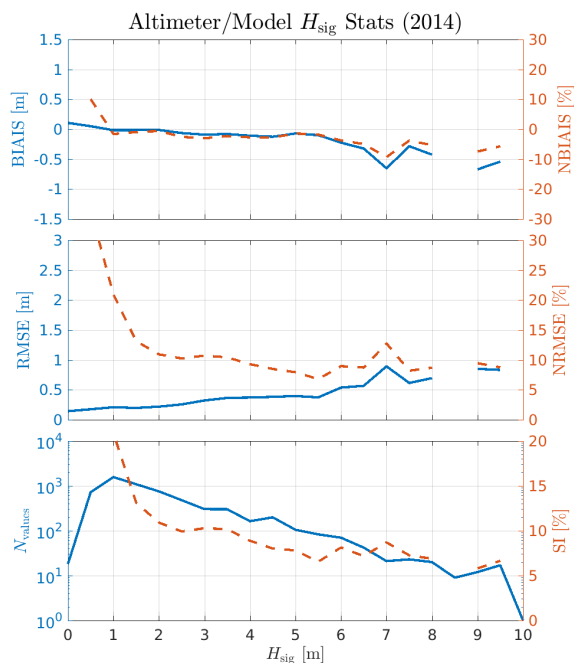


FIGURE 85 – Qualification des erreurs (BIAS, RMSE, SI) de  $H_{sig}$  en fonction des échelles de  $H_{sig}$  pour l’année 2014.

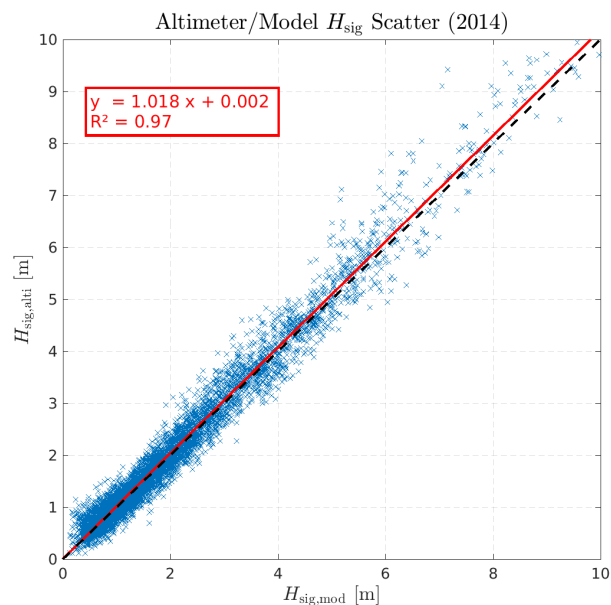


FIGURE 86 – Corrélation des valeurs de  $H_{sig}$  observées et modélisées pour l’année 2014.

## A.11 Année 2015

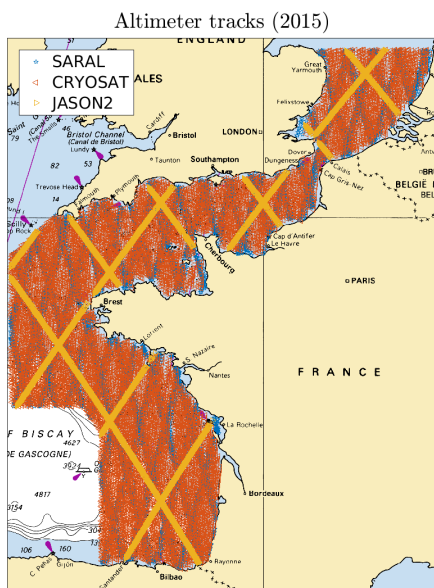


FIGURE 87 – Cartes des traces satellite altimétrique pour l'année 2015.

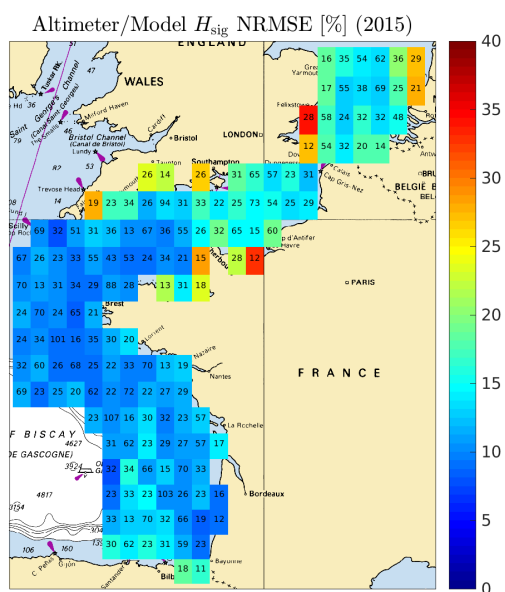


FIGURE 88 – Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées de  $H_{sig}$  pour l'année 2015 avec une résolution de 0.5 degrés. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

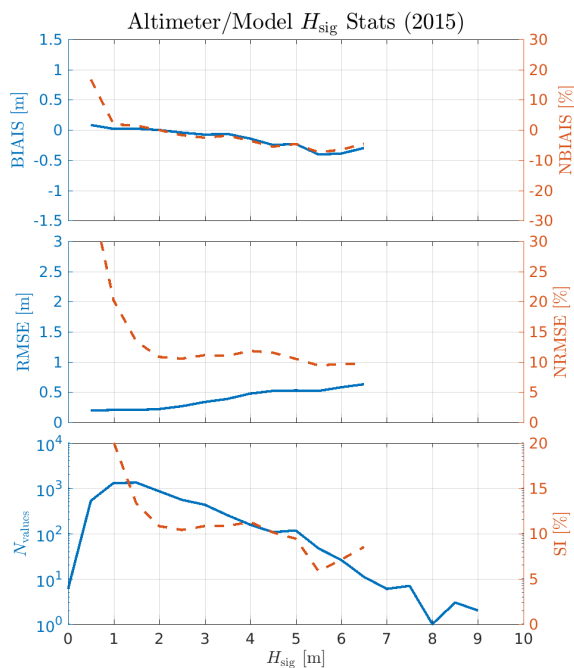


FIGURE 89 – Qualification des erreurs (BIAIS, RMSE, SI) de  $H_{sig}$  en fonction des échelles de  $H_{sig}$  pour l'année 2015.

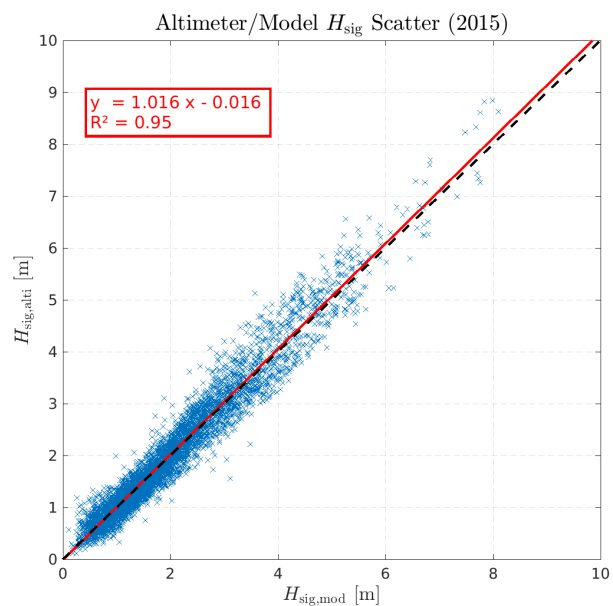


FIGURE 90 – Corrélation des valeurs de  $H_{sig}$  observées et modélisées pour l'année 2015.

## A.12 Année 2016



FIGURE 91 – Cartes des traces satellite altimétrique pour l'année 2016.

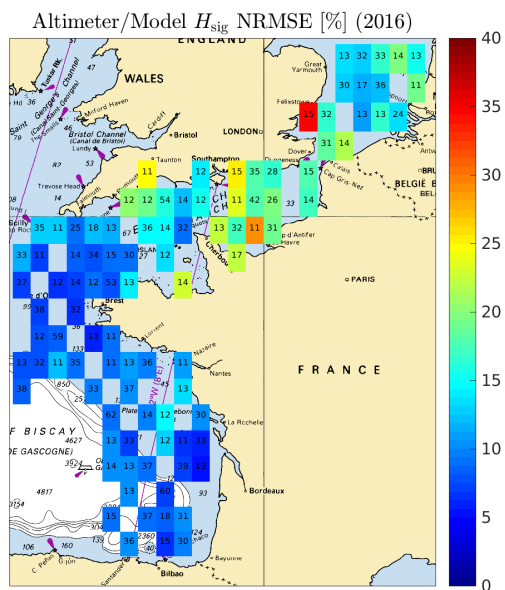


FIGURE 92 – Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées de  $H_{sig}$  pour l'année 2016 avec une résolution de 0.5 degrés. Les nombres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul de la NRMSE.

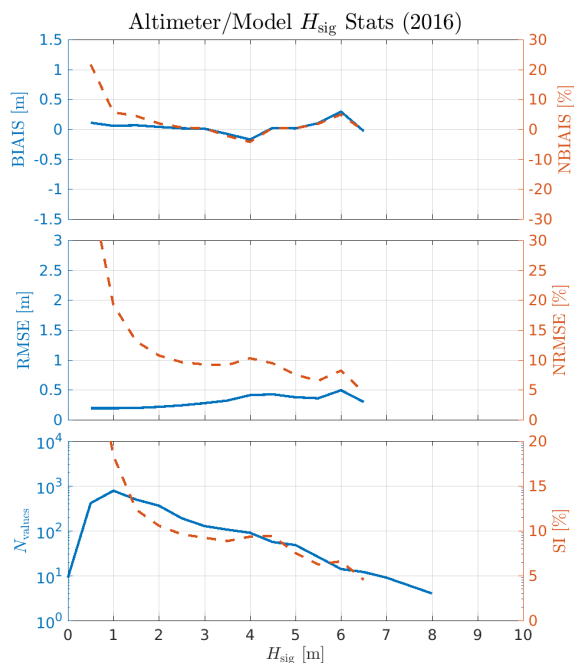


FIGURE 93 – Qualification des erreurs (BIAIS, RMSE, SI) de  $H_{sig}$  en fonction des échelles de  $H_{sig}$  pour l'année 2016.

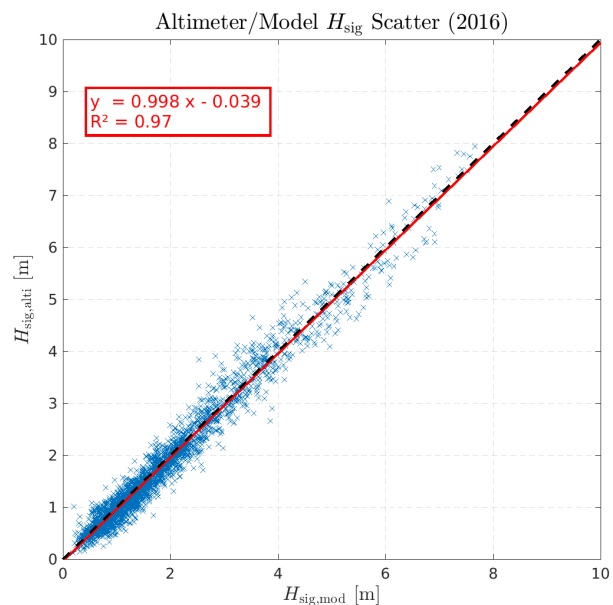


FIGURE 94 – Corrélation des valeurs de  $H_{sig}$  observées et modélisées pour l'année 2016.

## B Validations Modèle/bouées (CANDHIS)

### B.1 Bouée 05902 : Ruytingen

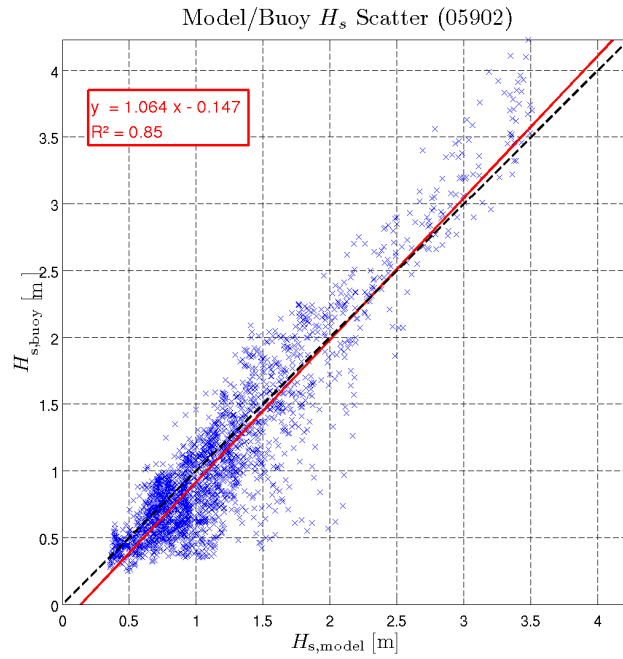


FIGURE 95 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 05902.

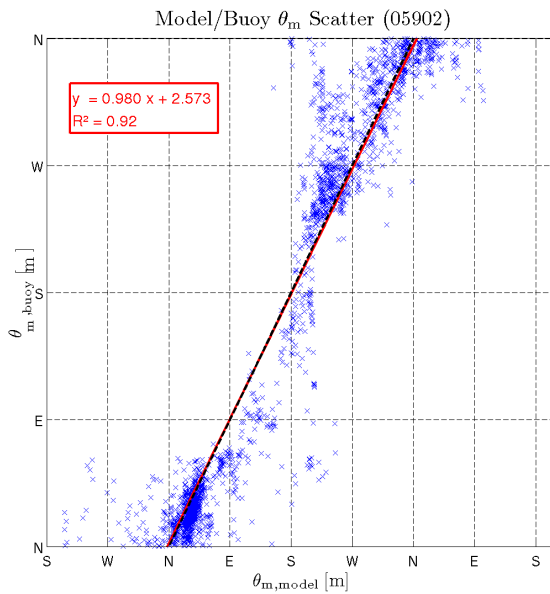


FIGURE 96 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 05902.

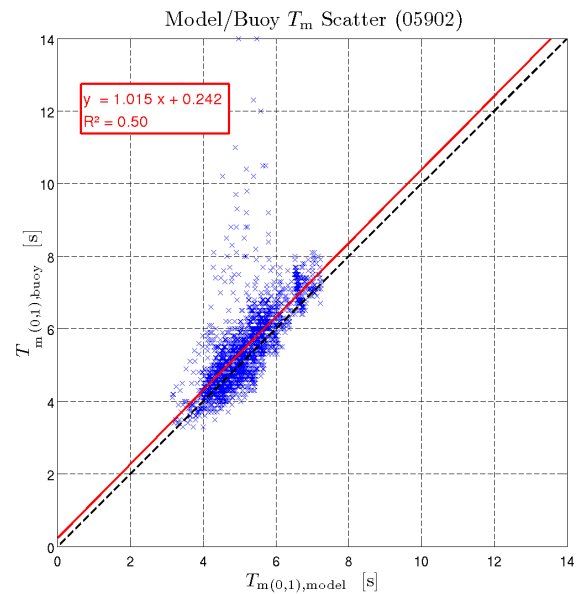


FIGURE 97 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 05902.



## B.2 Bouée 06202 : Calais

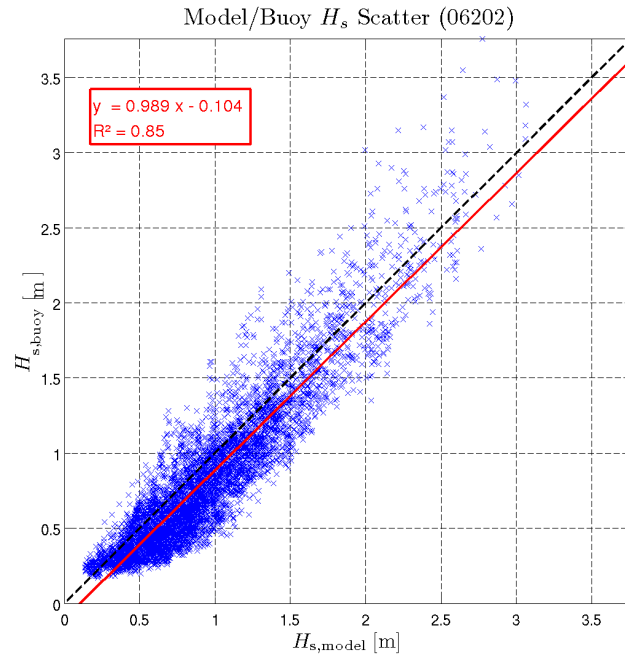


FIGURE 98 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 06202.

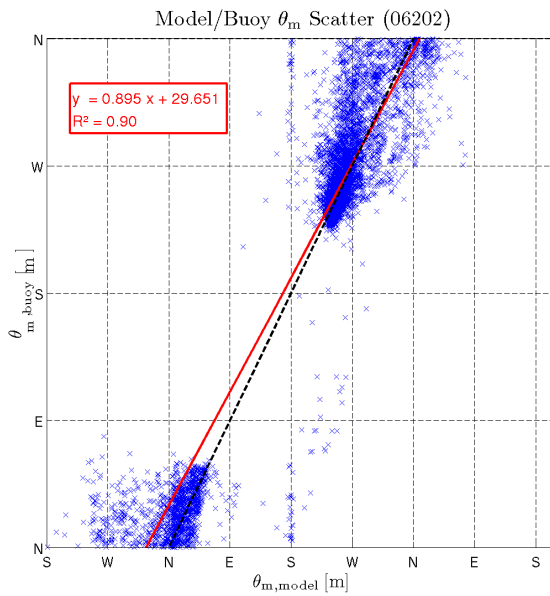


FIGURE 99 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 06202.

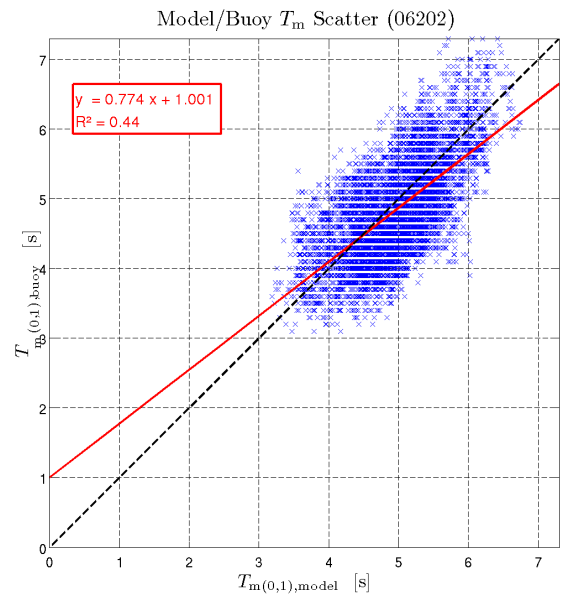


FIGURE 100 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 06202.

### B.3 Bouée 06201 : Vergoyer

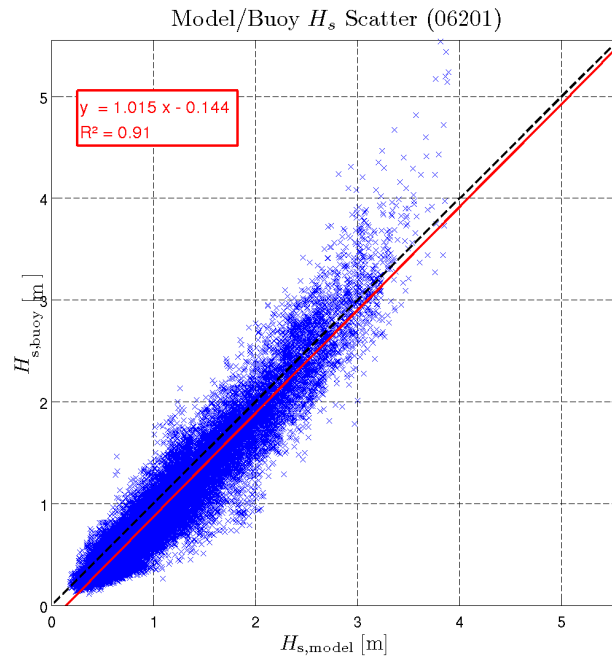


FIGURE 101 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 06201.

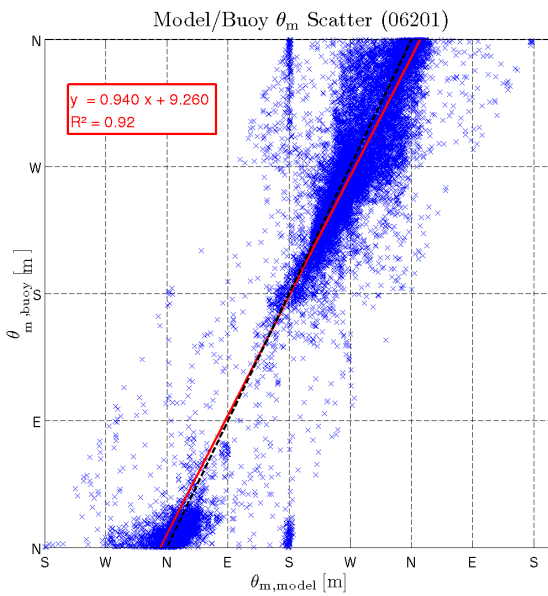


FIGURE 102 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 06201.

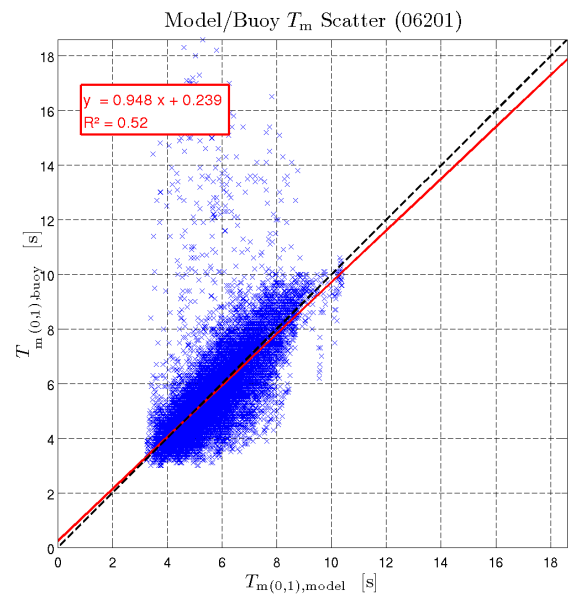


FIGURE 103 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 06201.

## B.4 Bouée 05008 : Cherbourg (extérieur)

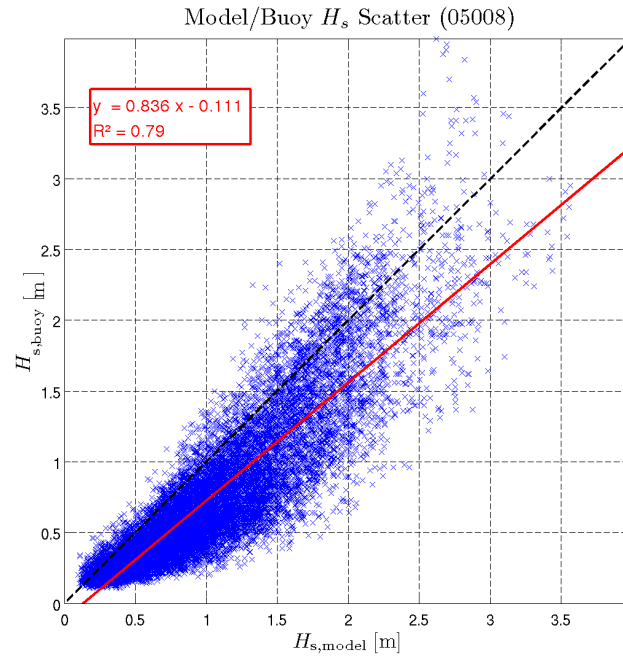


FIGURE 104 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 05008.

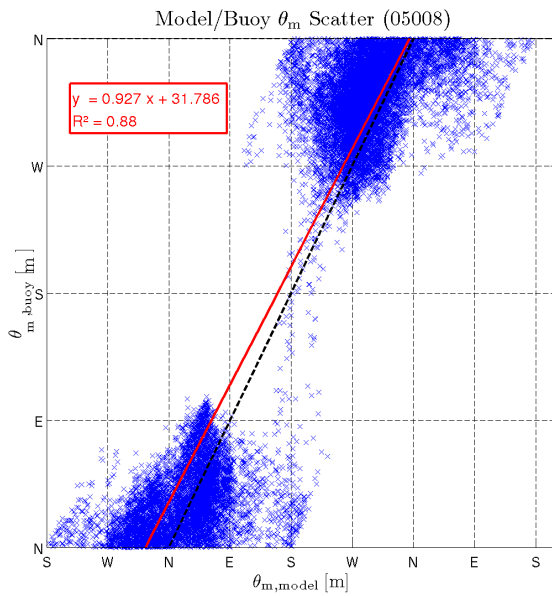


FIGURE 105 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 05008.

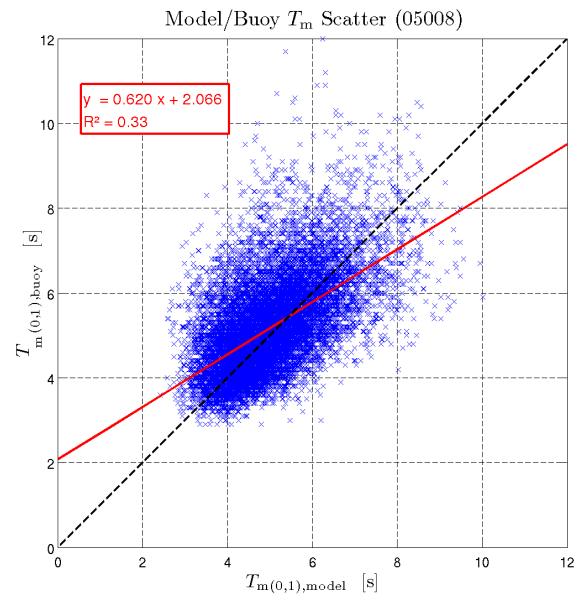


FIGURE 106 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 05008.

## B.5 Bouée 07601 : Antifer

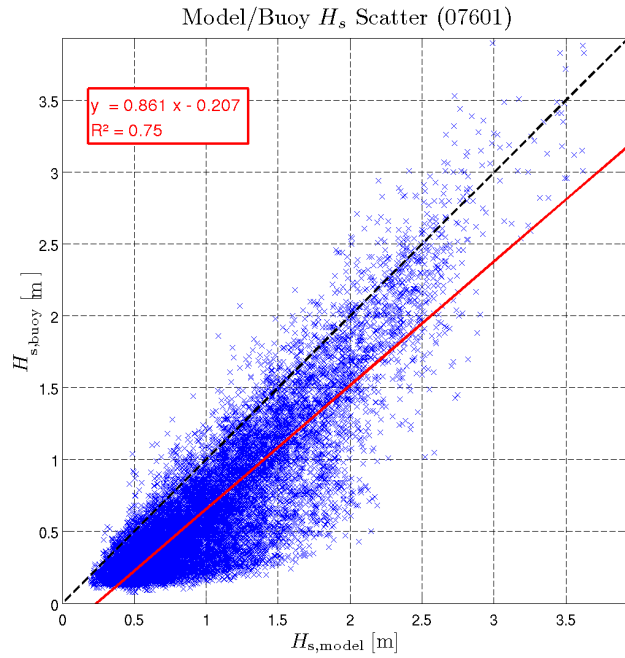


FIGURE 107 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 07601.

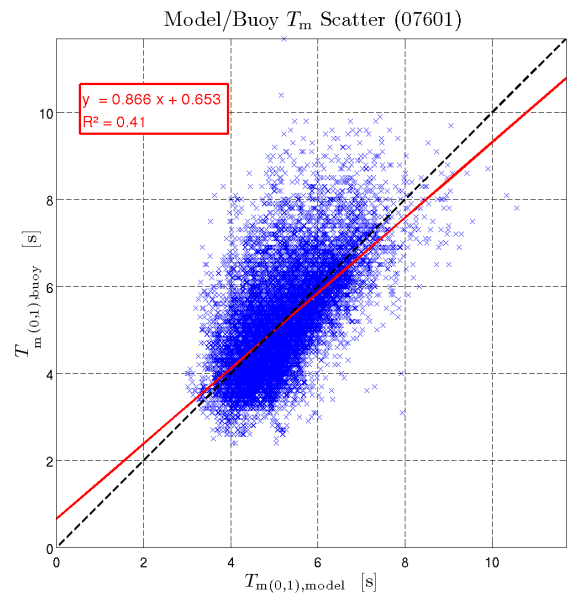


FIGURE 108 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 07601.

## B.6 Bouée 02204 : Bréhat

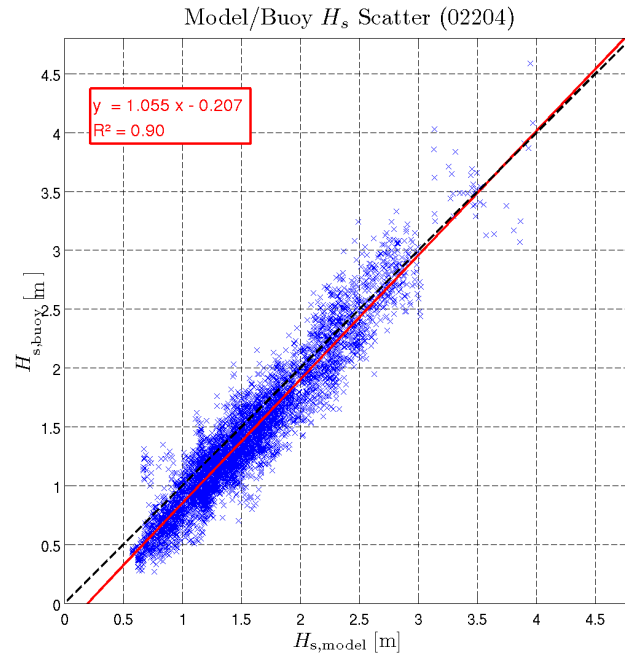


FIGURE 109 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 02204.

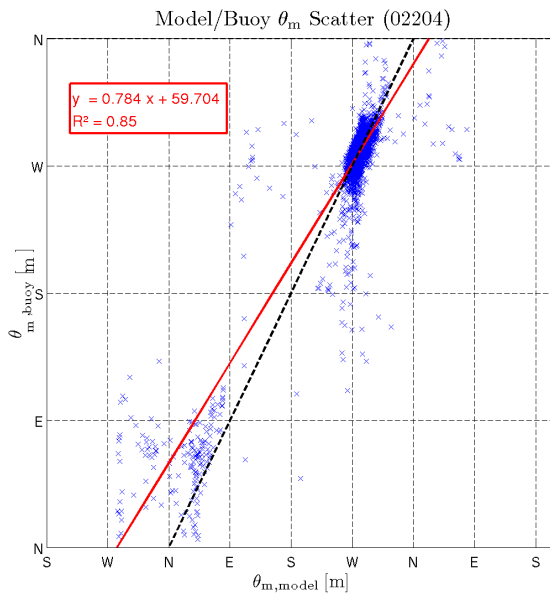


FIGURE 110 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 02204.

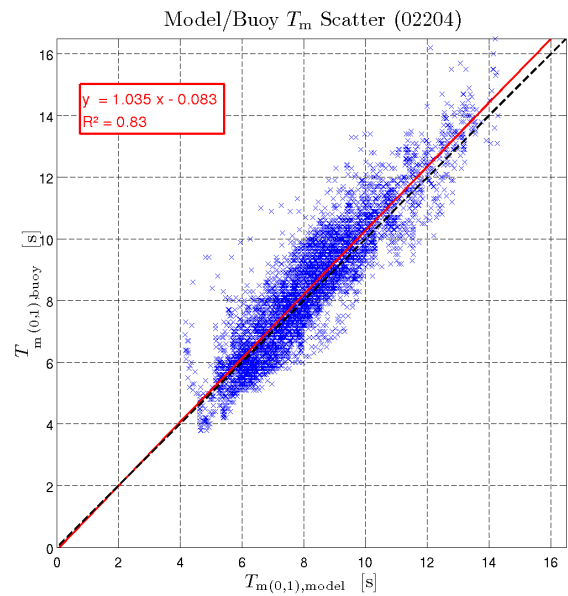


FIGURE 111 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 02204.

## B.7 Bouée 02203 : Les Minquiers Nord

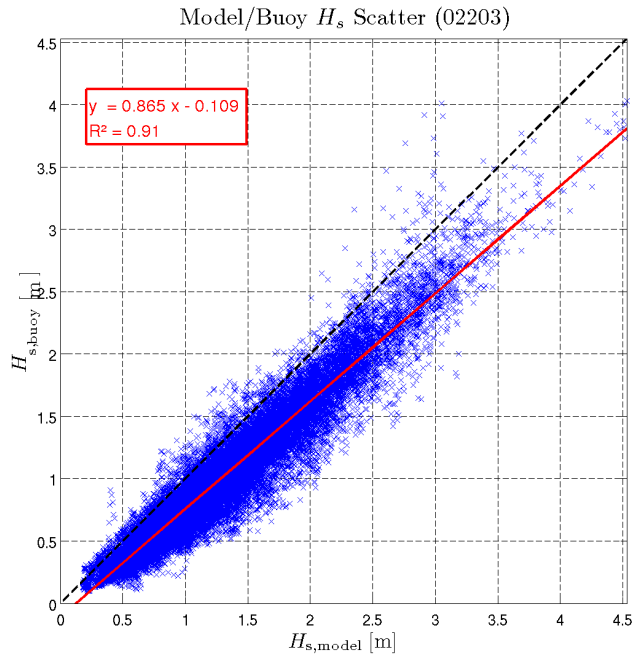


FIGURE 112 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 02203.

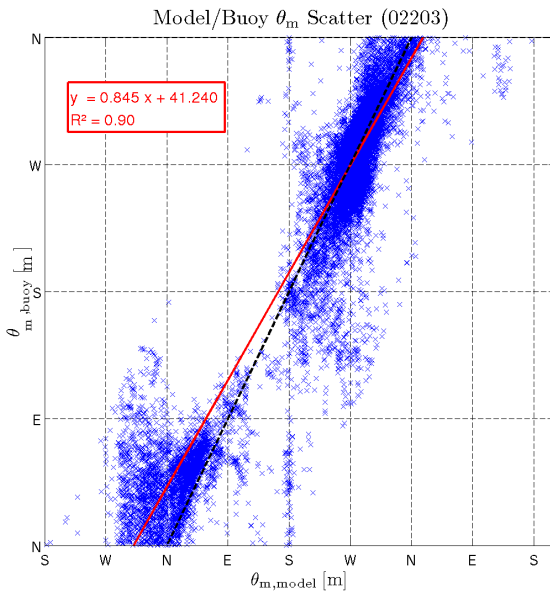


FIGURE 113 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 02203.

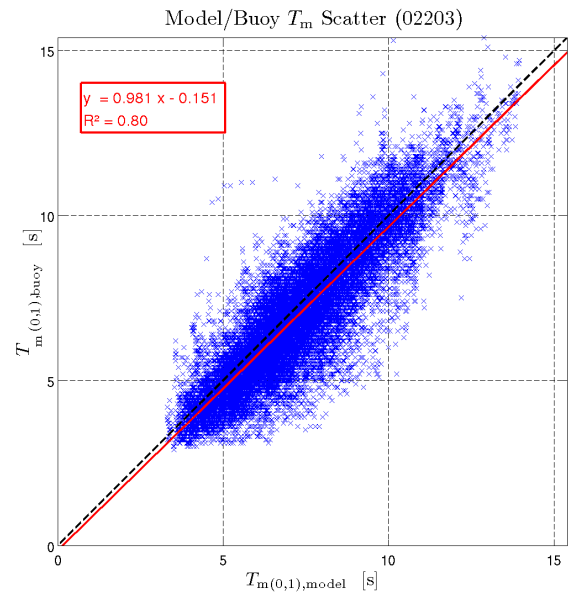


FIGURE 114 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 02203.

## B.8 Bouée 02202 : Les Minquiers2

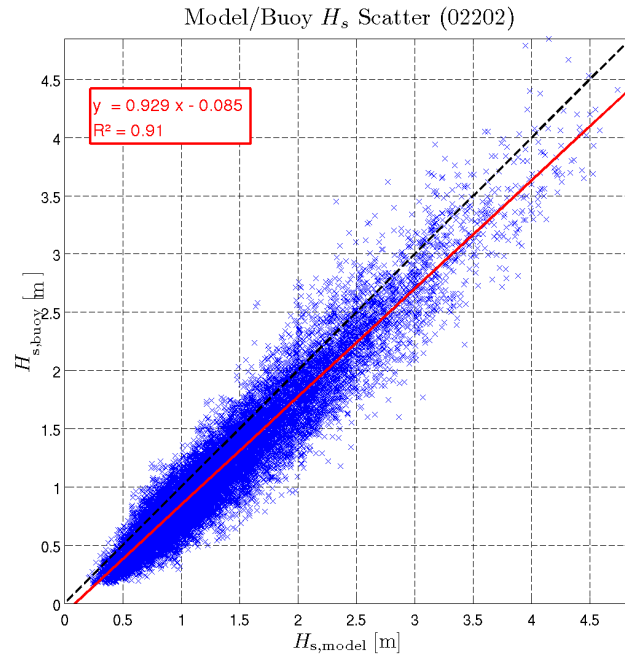


FIGURE 115 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 02202.

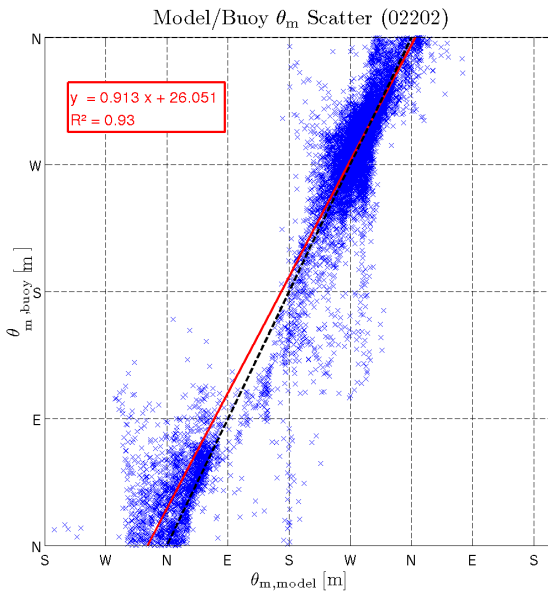


FIGURE 116 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 02202.

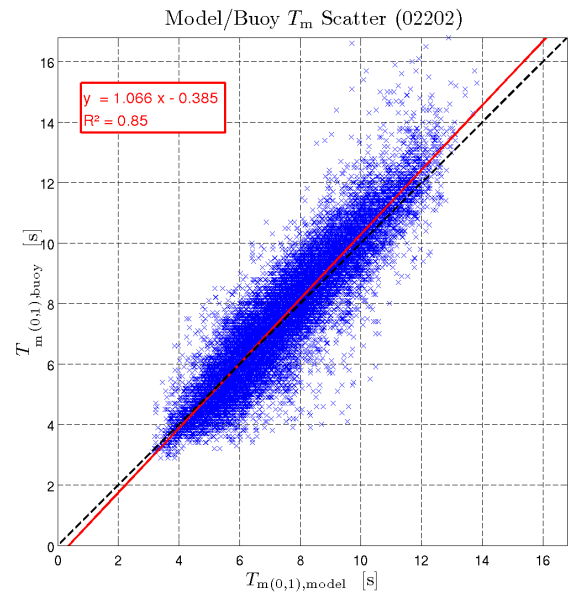


FIGURE 117 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 02202.

## B.9 Bouée 02910 : Roscoff (Port de Bloscon)

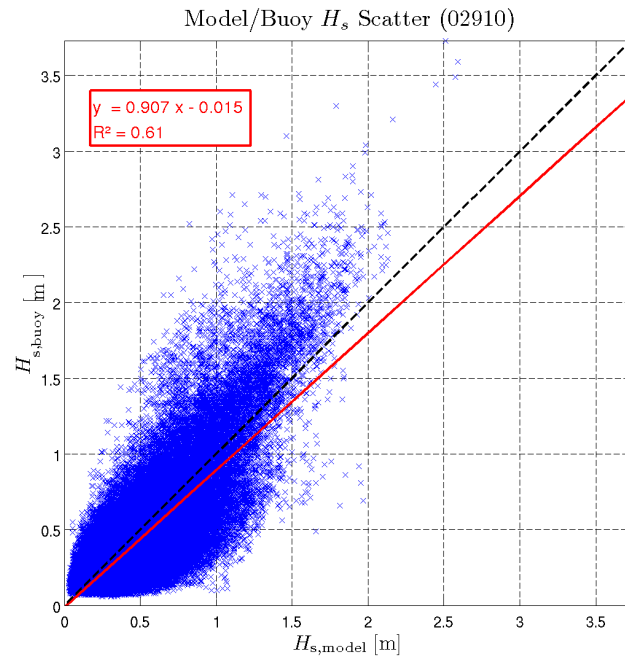


FIGURE 118 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 02910.

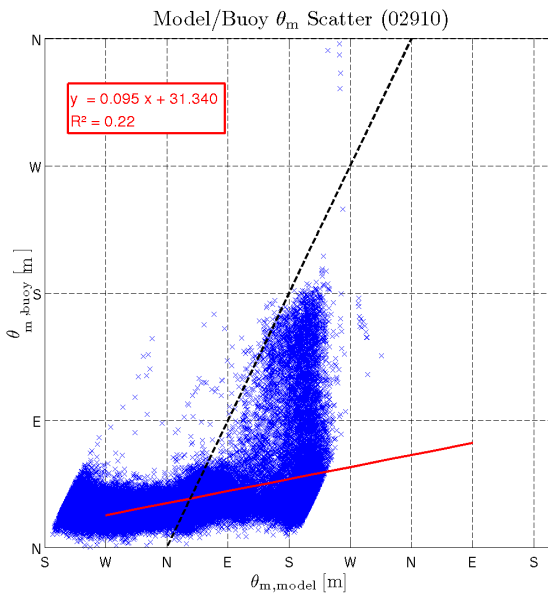


FIGURE 119 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 02910.

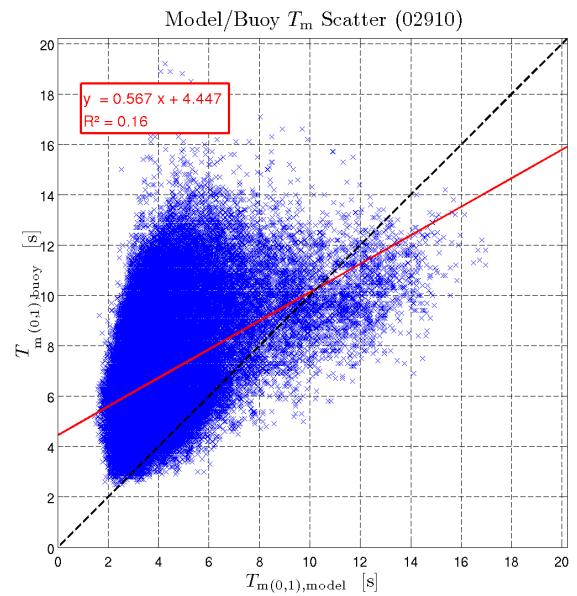


FIGURE 120 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 02910.



## B.10 Bouée 02902 : Ouessant large

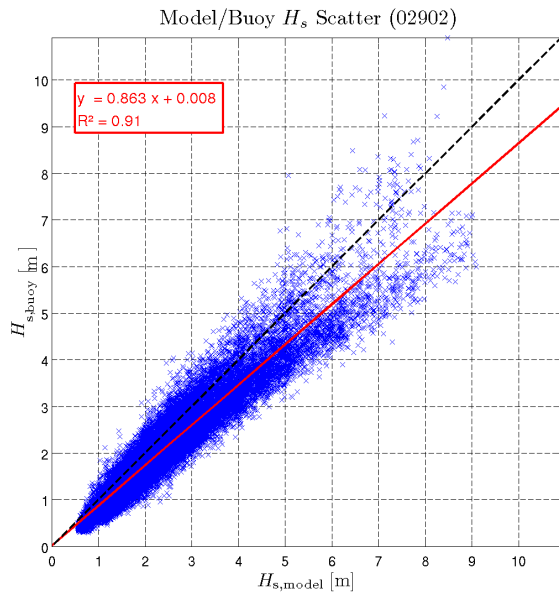


FIGURE 121 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 02902.

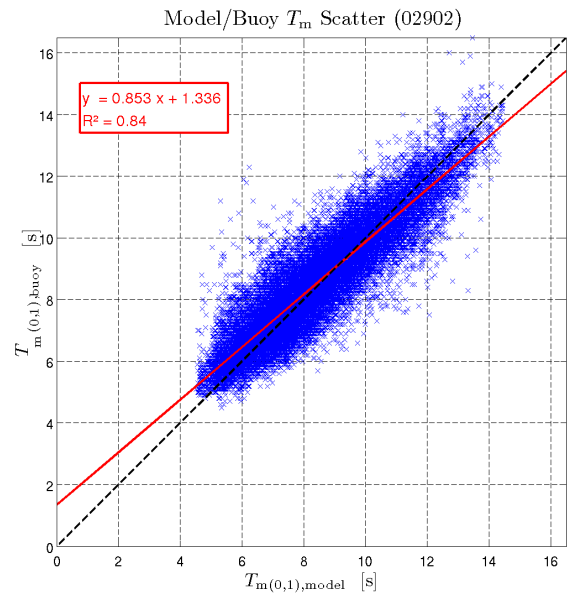


FIGURE 122 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 02902.

## B.11 Bouée 02919 : Kereon

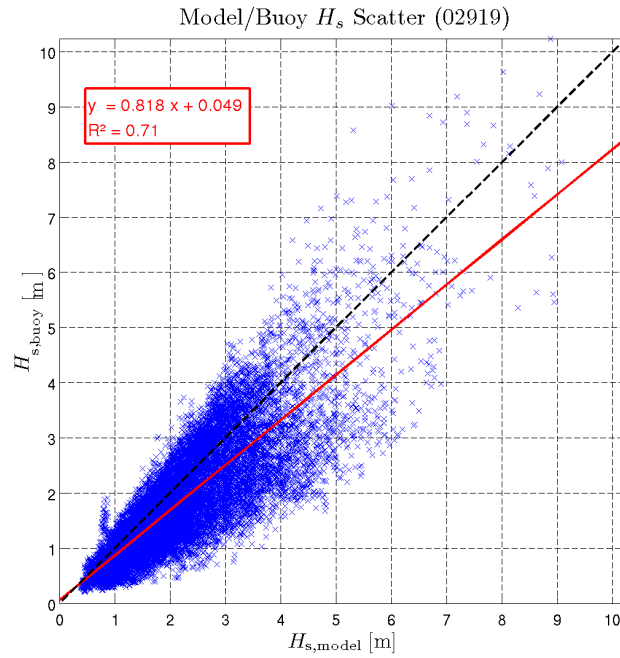


FIGURE 123 –  $Q$ - $Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 02919.

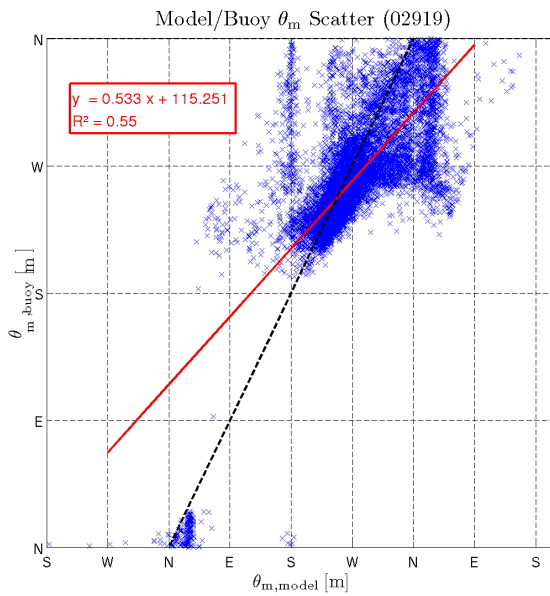


FIGURE 124 –  $Q$ - $Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 02919.

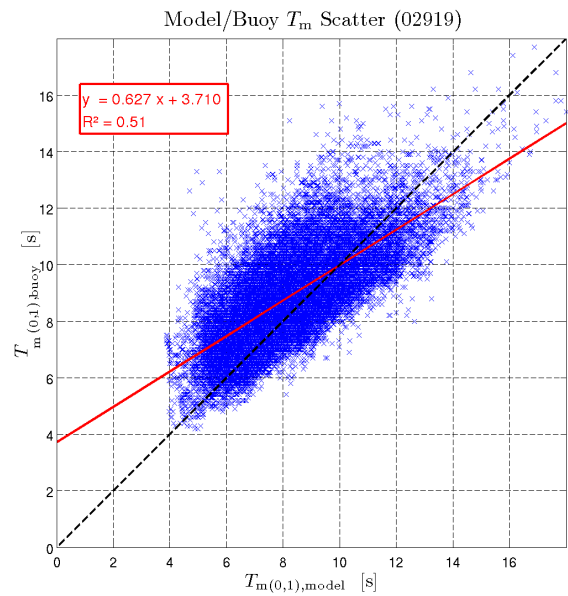


FIGURE 125 –  $Q$ - $Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 02919.

## B.12 Bouée 02911 : Les Pierres Noires

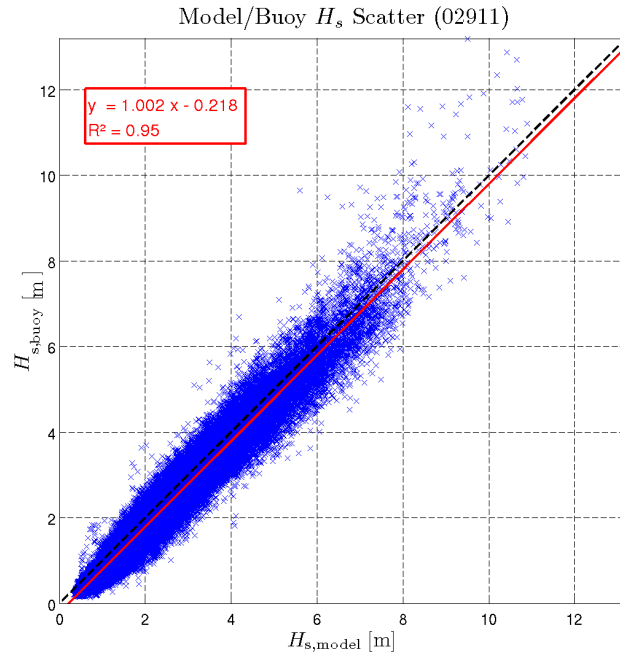


FIGURE 126 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 02911.

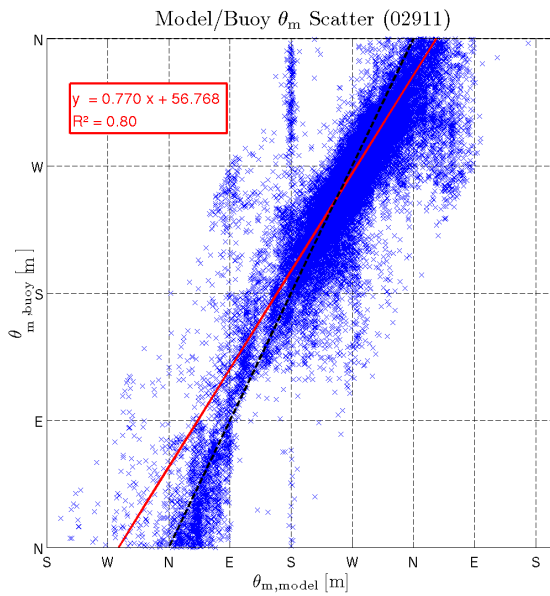


FIGURE 127 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 02911.

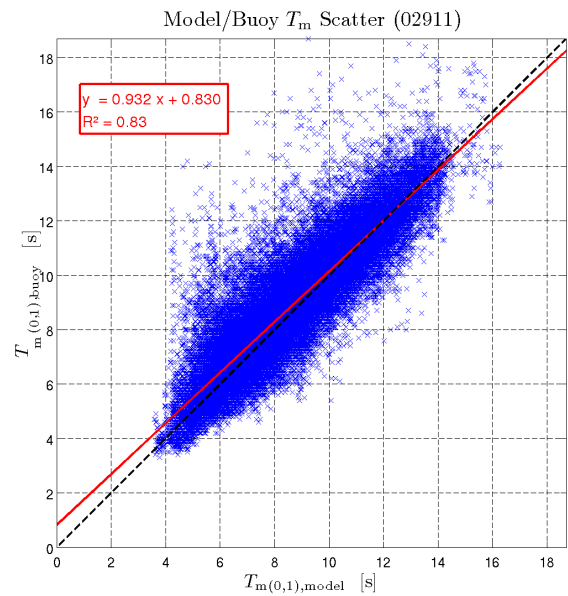


FIGURE 128 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 02911.

### B.13 Bouée 02917 : Ouessant sud

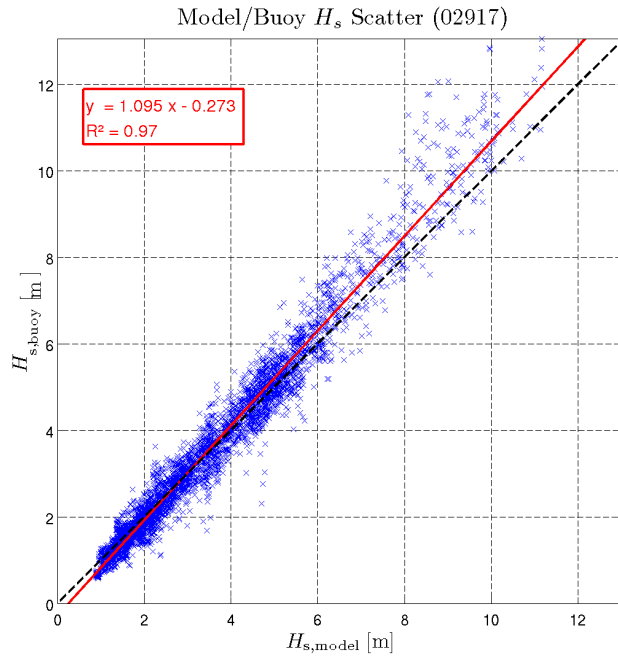


FIGURE 129 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 02917.

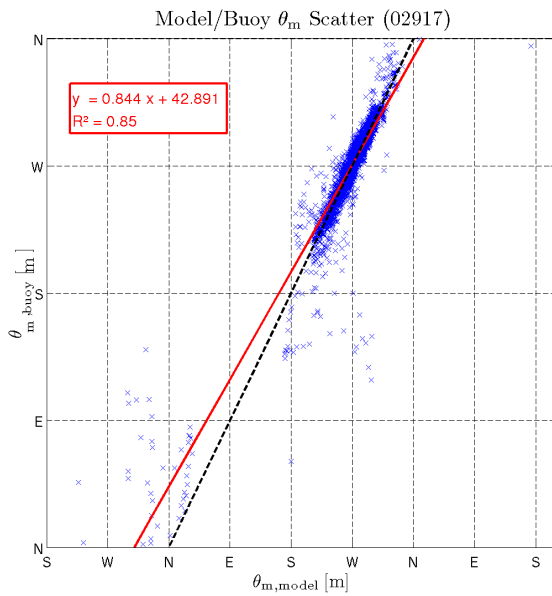


FIGURE 130 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 02917.

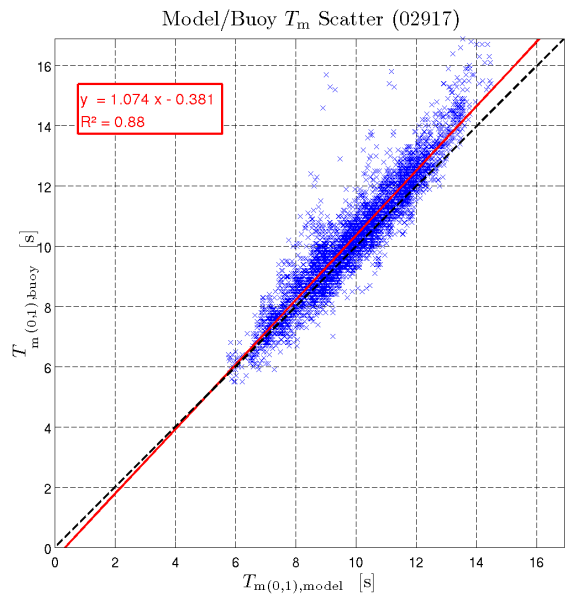


FIGURE 131 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 02917.

## B.14 Bouée 02916 : Ile de Sein Nord

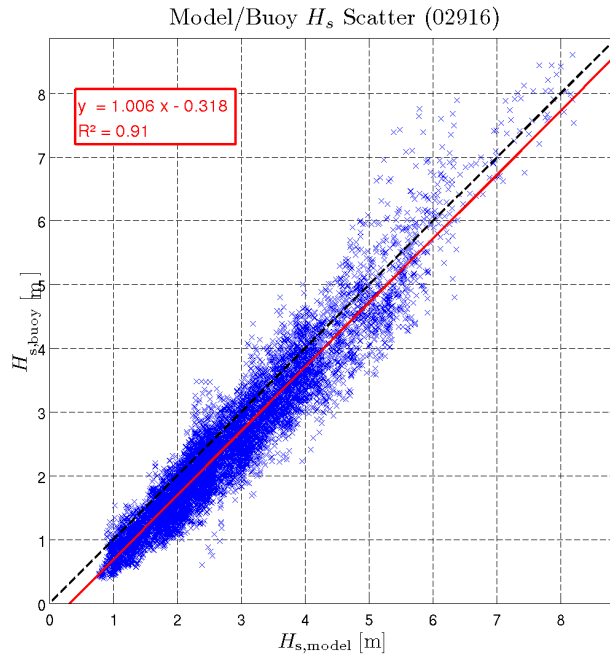


FIGURE 132 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 02916.

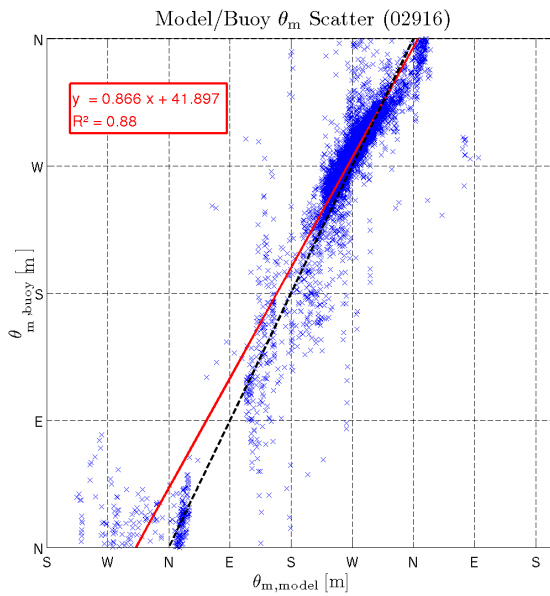


FIGURE 133 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 02916.

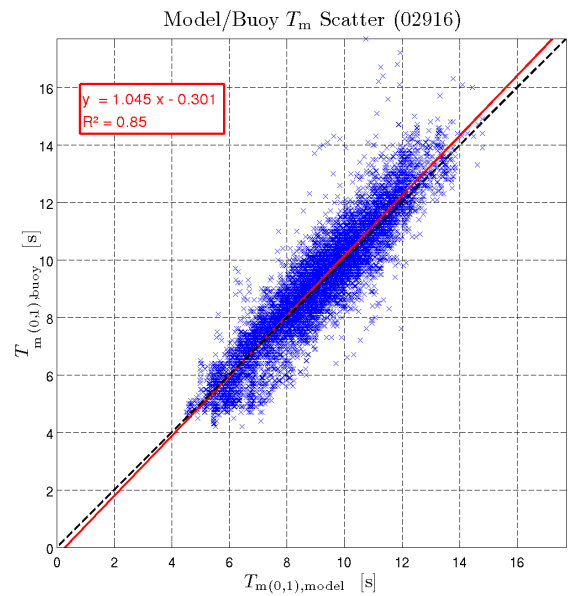


FIGURE 134 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 02916.

## B.15 Bouée 02920 : Ile de Sein

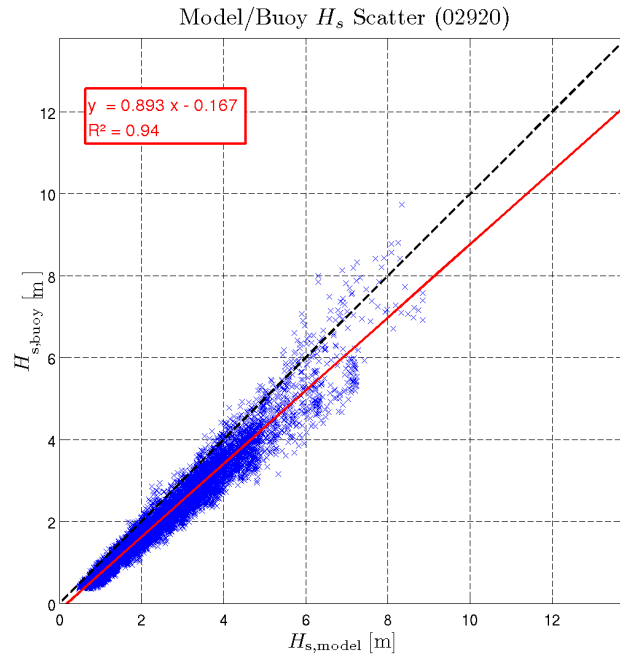


FIGURE 135 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 02920.

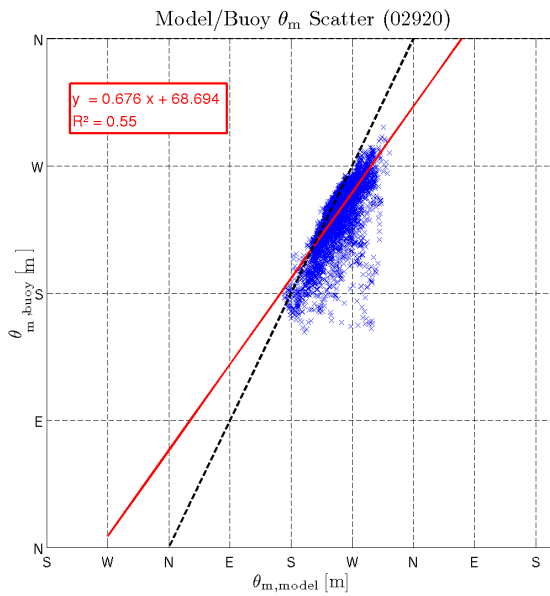


FIGURE 136 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 02920.

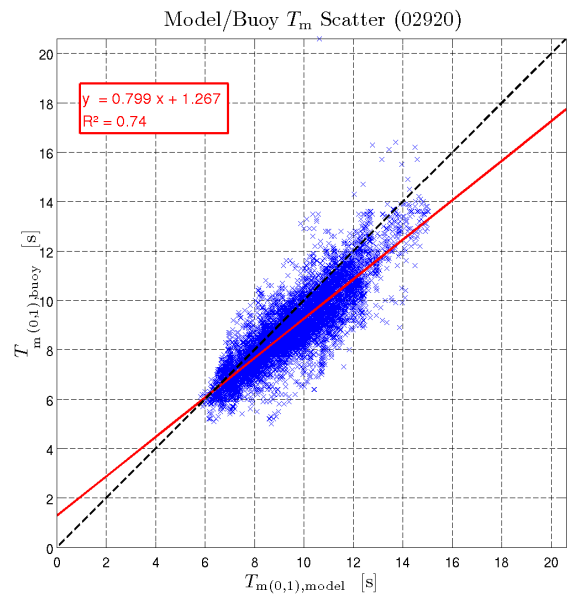


FIGURE 137 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 02920.

## B.16 Bouée 02915 : Ile de Sein Sud

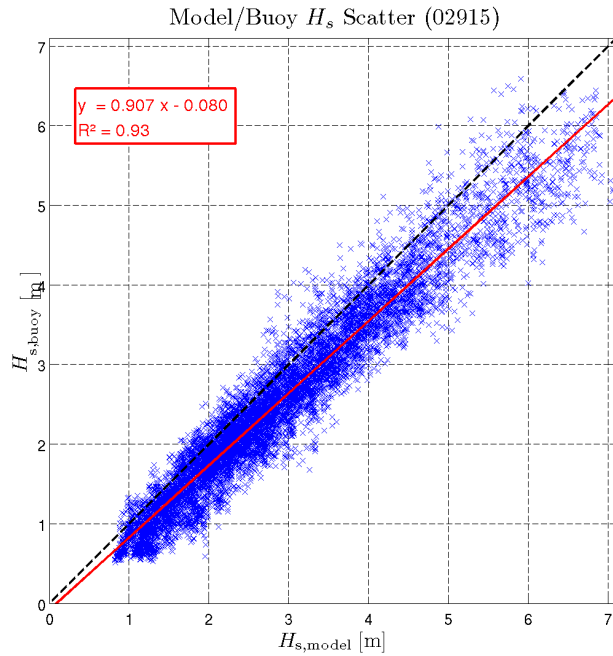


FIGURE 138 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 02915.

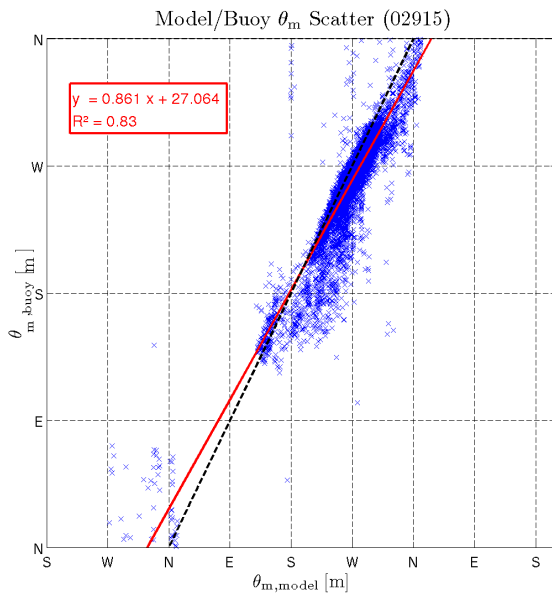


FIGURE 139 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 02915.

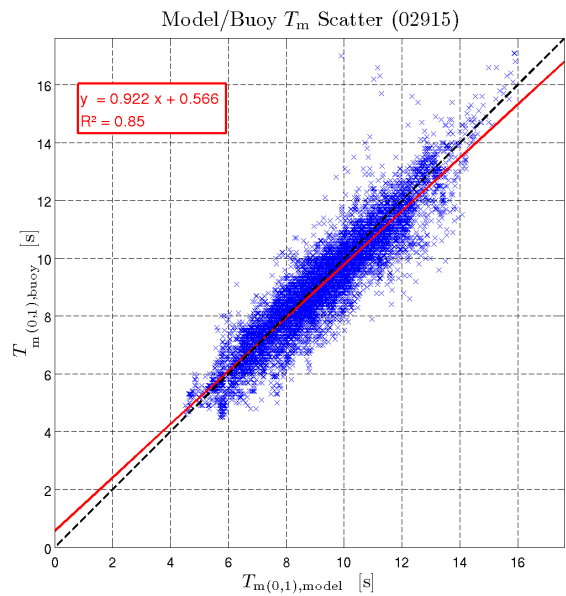


FIGURE 140 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 02915.

## B.17 Bouée 02921 : Esquibien

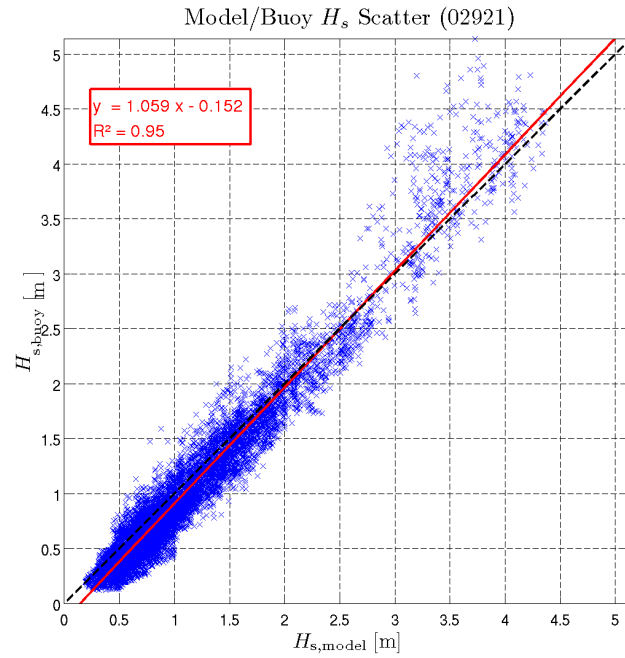


FIGURE 141 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 02921.

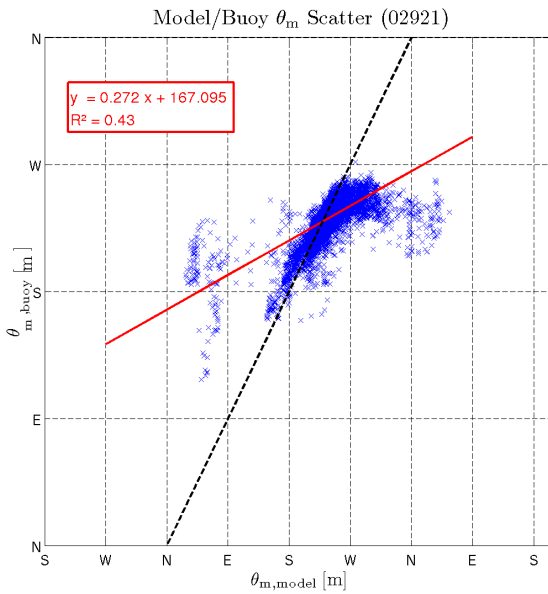


FIGURE 142 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 02921.

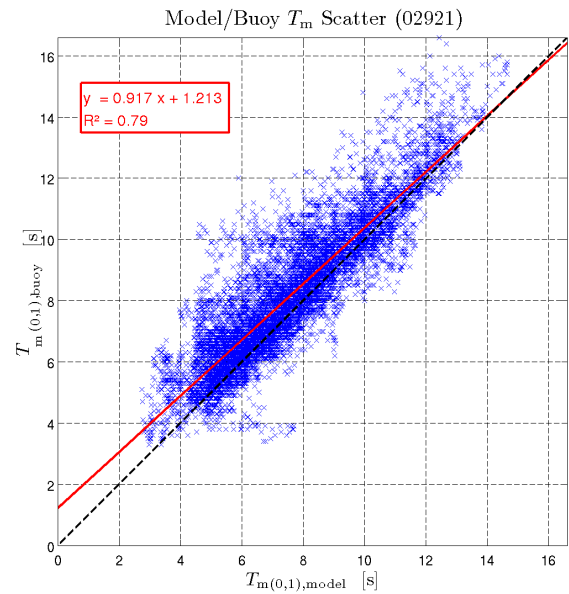


FIGURE 143 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 02921.



## B.18 Bouée 02914 : Penmarc'h

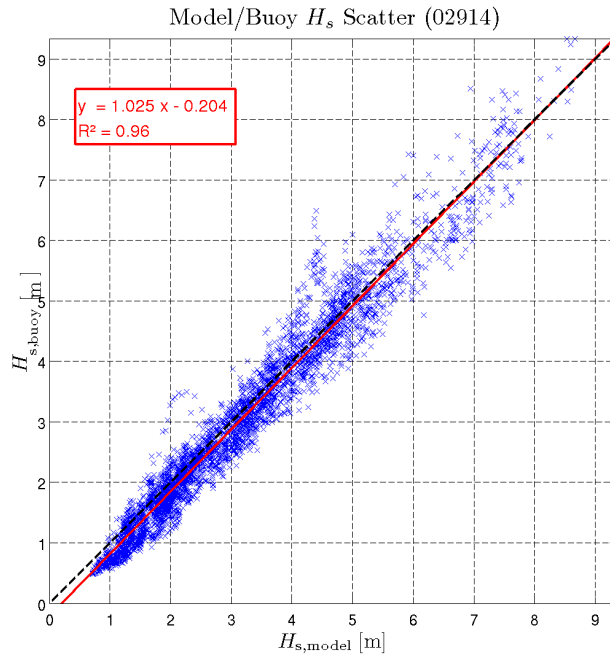


FIGURE 144 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 02914.

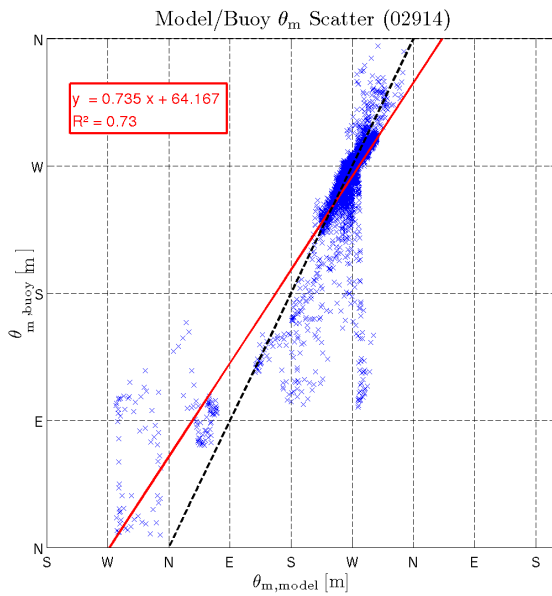


FIGURE 145 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 02914.

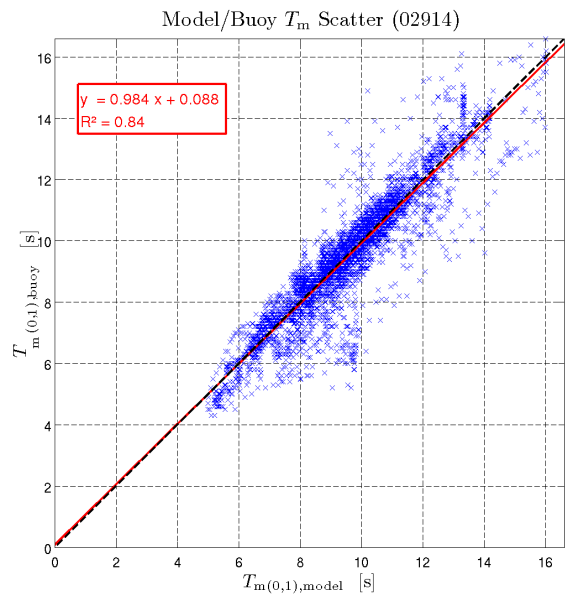


FIGURE 146 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 02914.

B.19 Bouée 05602 : Belle-Ile

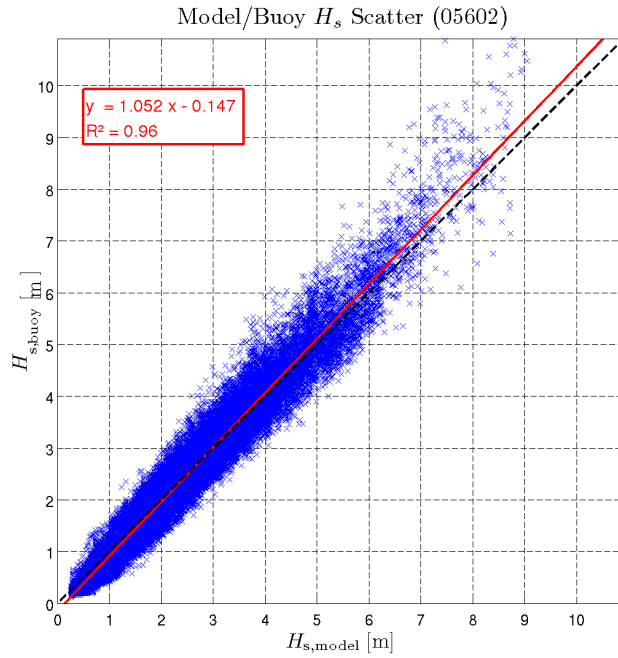


FIGURE 147 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 05602.

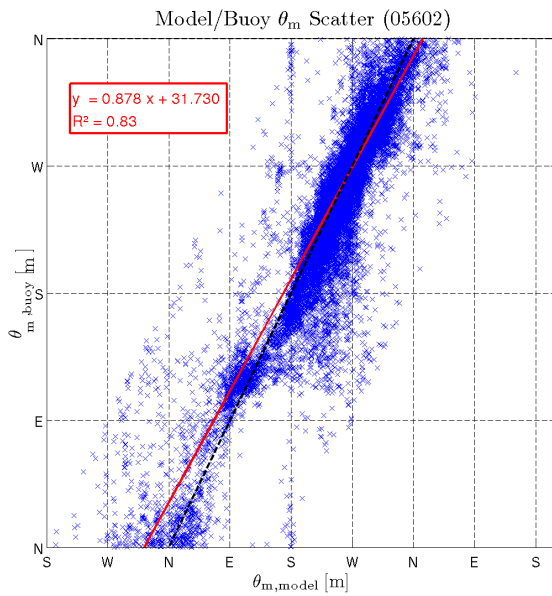


FIGURE 148 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 05602.

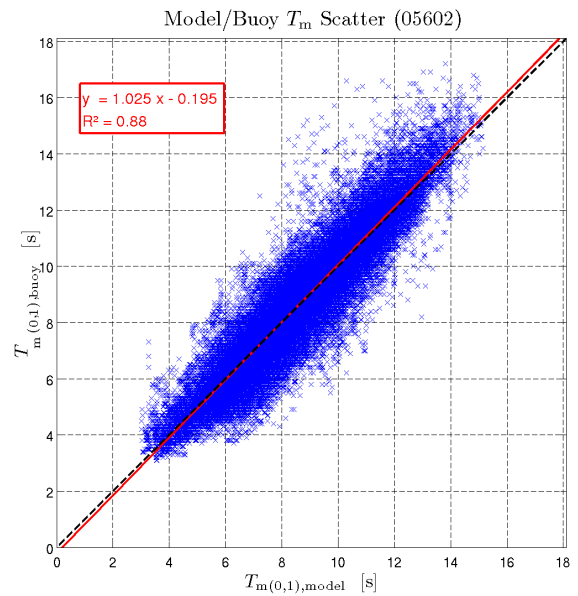


FIGURE 149 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 05602.

## B.20 Bouée 04403 : Plateau du Four

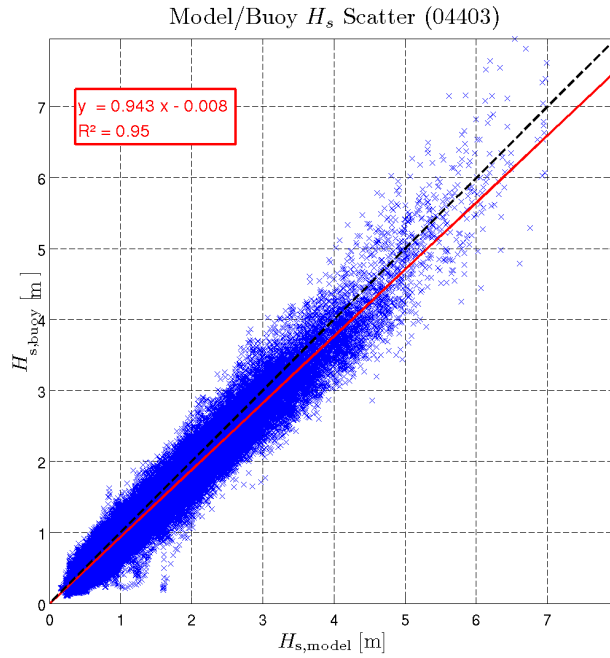


FIGURE 150 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 04403.

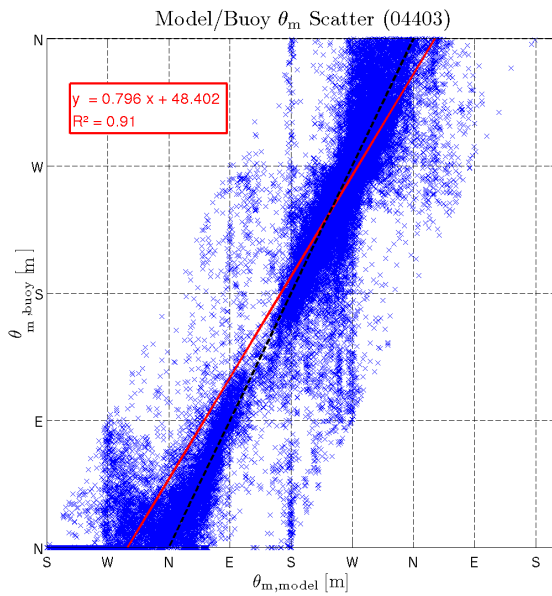


FIGURE 151 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 04403.

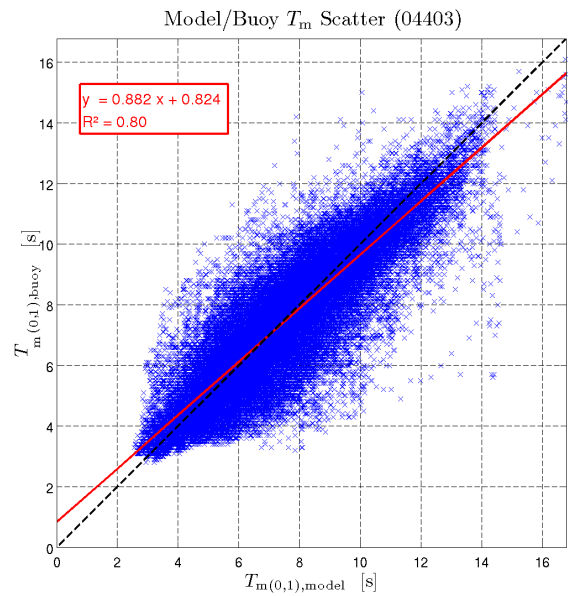


FIGURE 152 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 04403.

## B.21 Bouée 04401 : Saint Nazaire

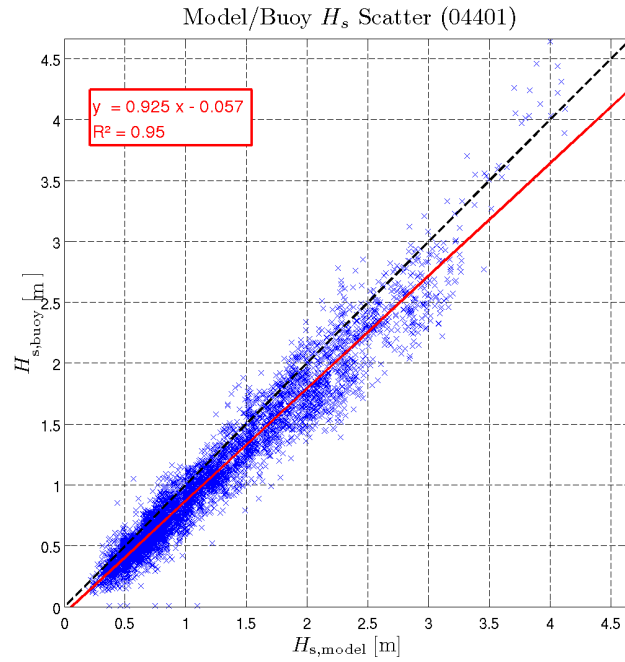


FIGURE 153 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{\text{sig}}$ , pour la bouée CANDHIS 04401.

## B.22 Bouée 08504 : Ile d'Yeu Nord

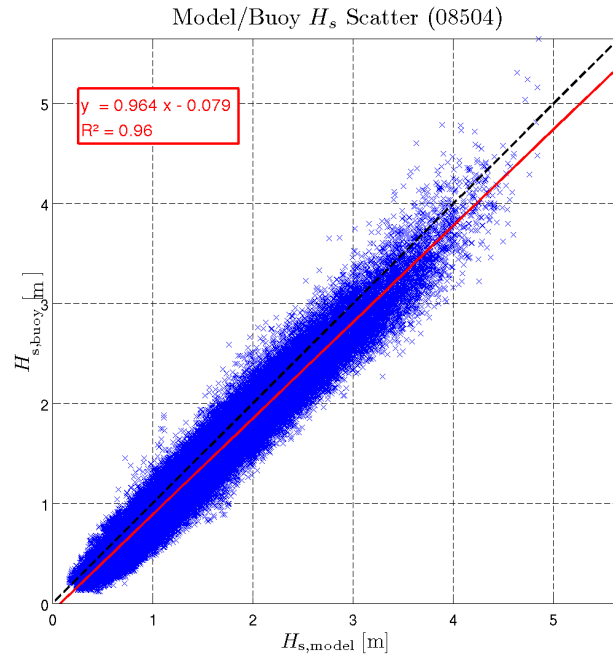


FIGURE 154 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{\text{sig}}$ , pour la bouée CANDHIS 08504.

## B.23 Bouée 01704 : Oléron Large

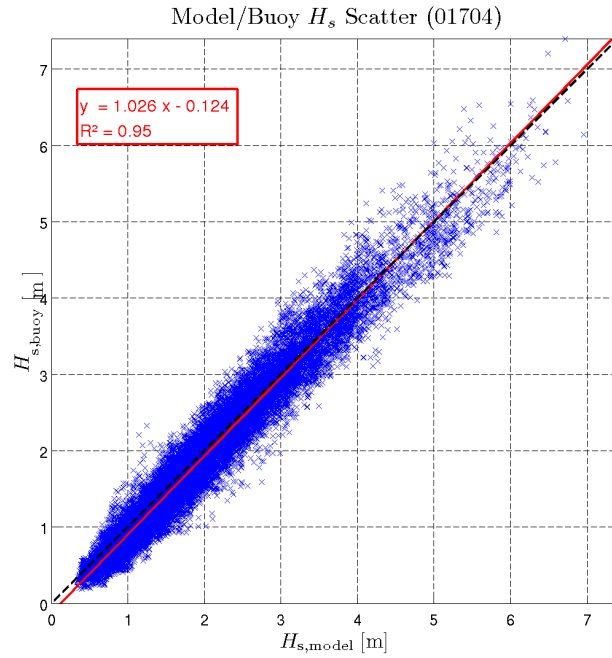


FIGURE 155 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 01704.

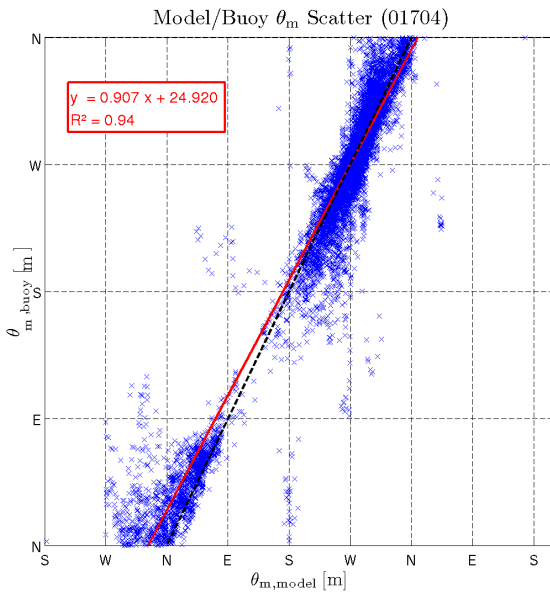


FIGURE 156 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 01704.

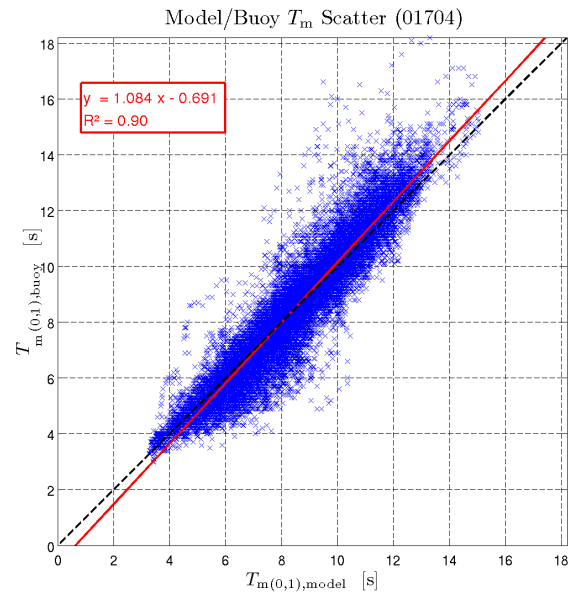


FIGURE 157 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 01704.

B.24 Bouée 01703 : Oléron (SHOM)

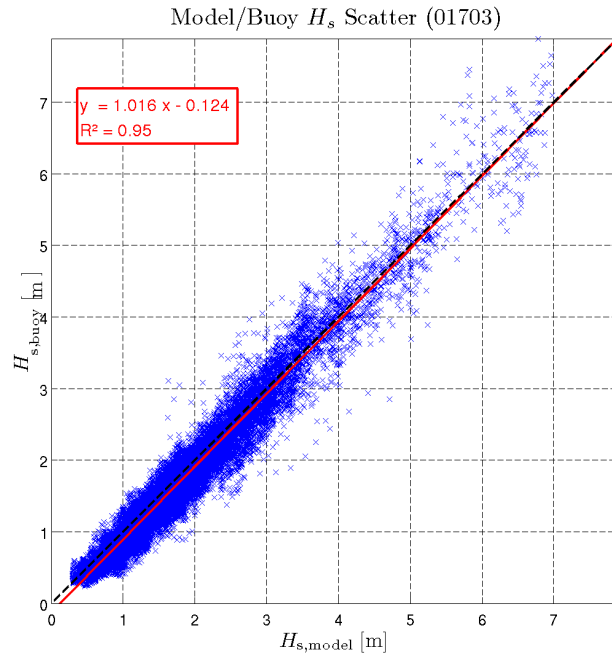


FIGURE 158 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 01703.

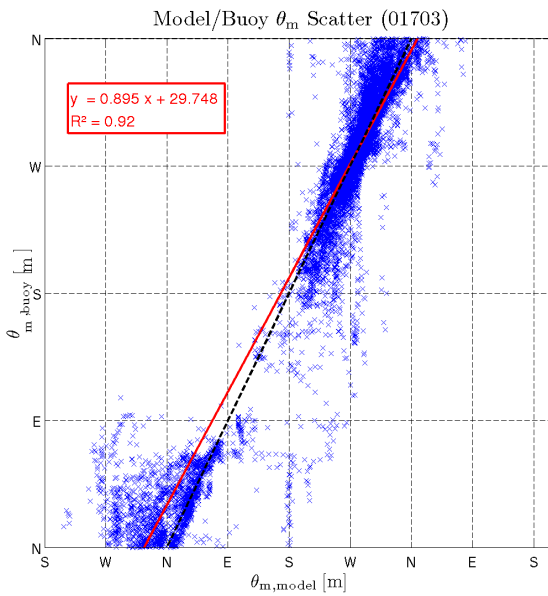


FIGURE 159 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 01703.

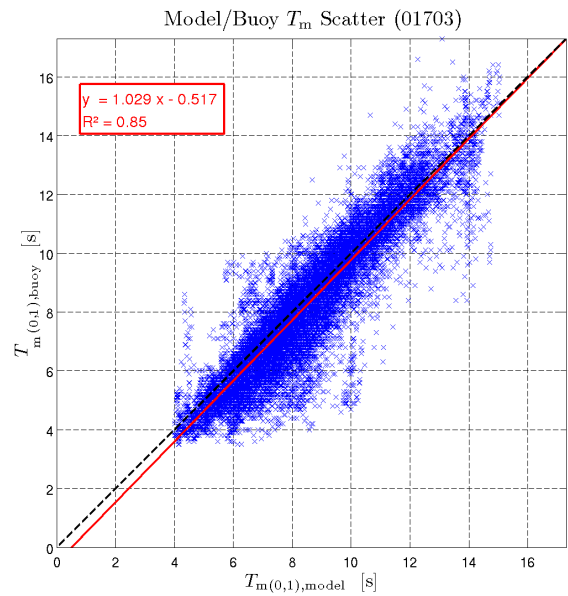


FIGURE 160 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 01703.

## B.25 Bouée 03302 : Cap Ferret

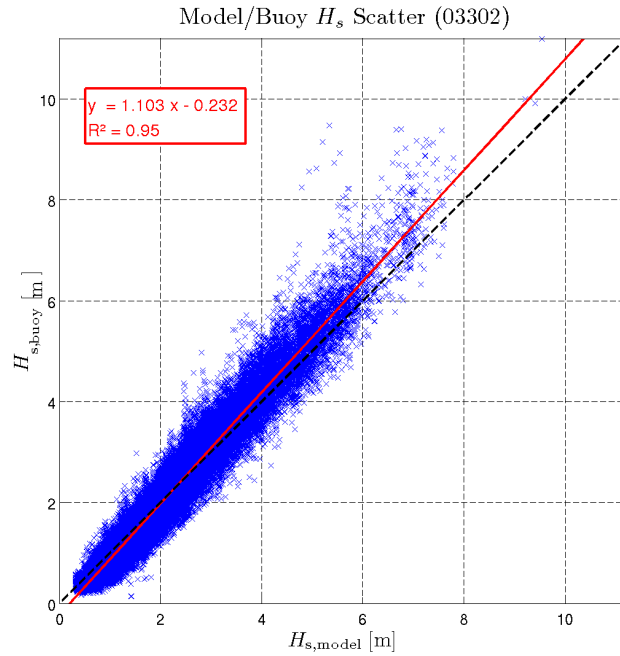


FIGURE 161 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 03302.

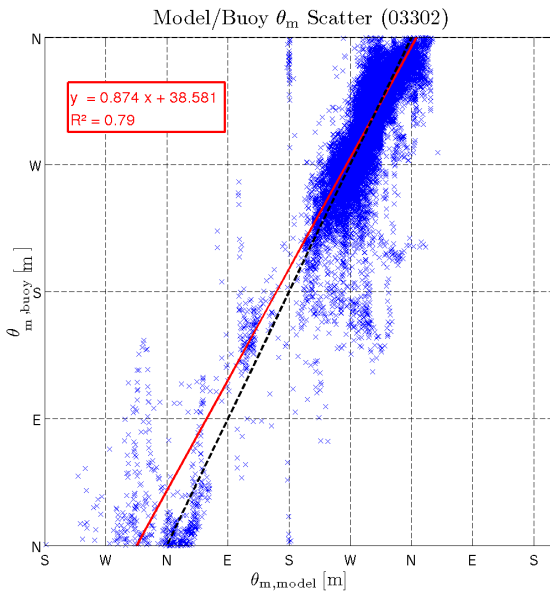


FIGURE 162 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 03302.

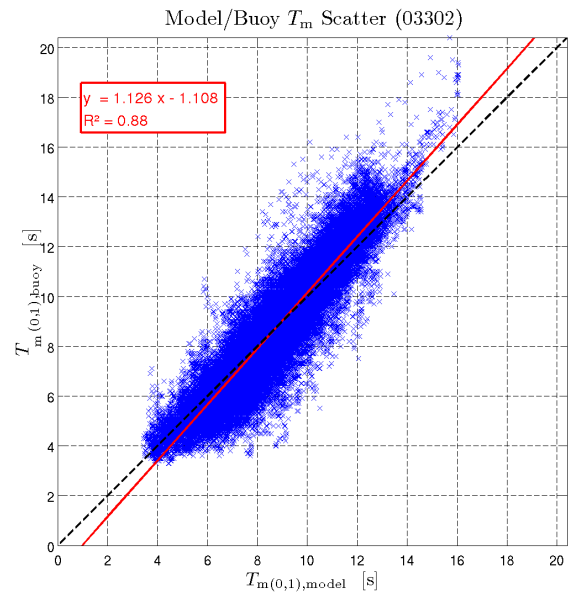


FIGURE 163 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 03302.



## B.26 Bouée 06402 : Anglet

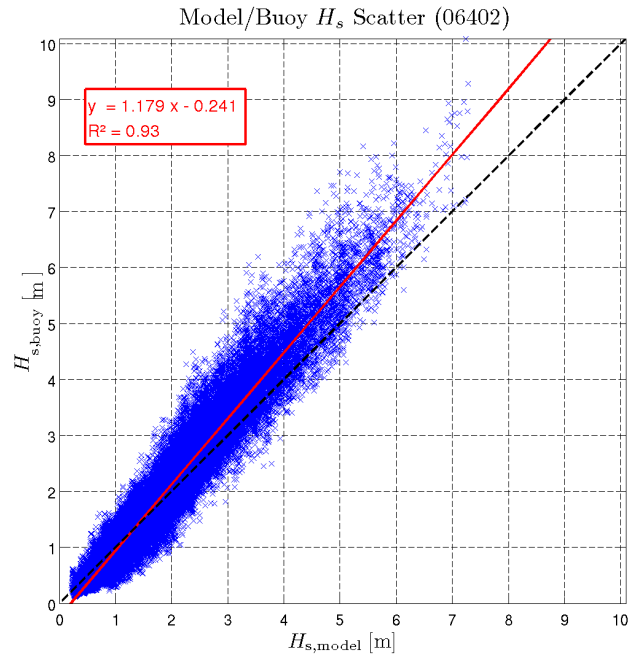


FIGURE 164 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 06402.

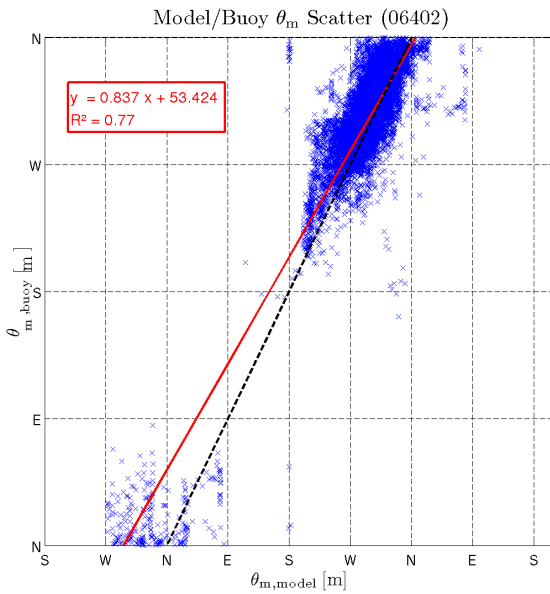


FIGURE 165 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 06402.

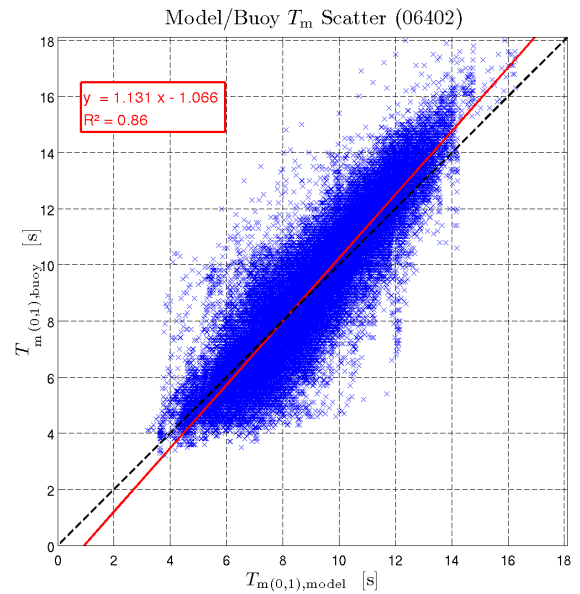


FIGURE 166 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 06402.

## B.27 Bouée 06403 : Saint-Jean-de-Luz

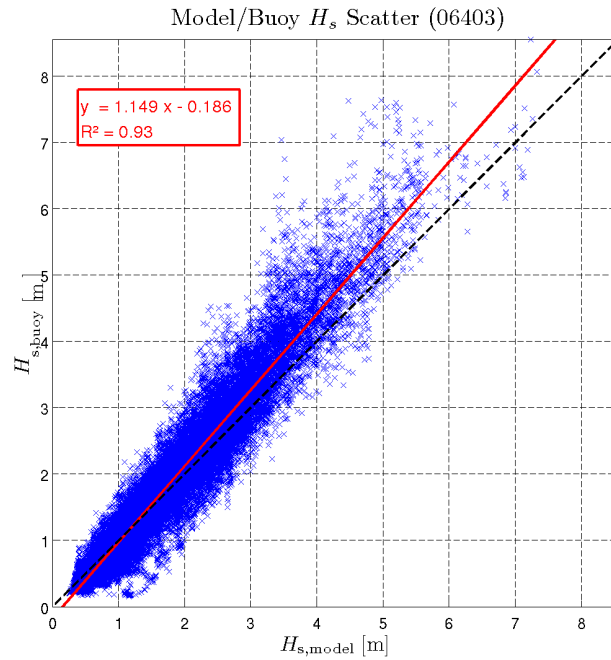


FIGURE 167 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée CANDHIS 06403.

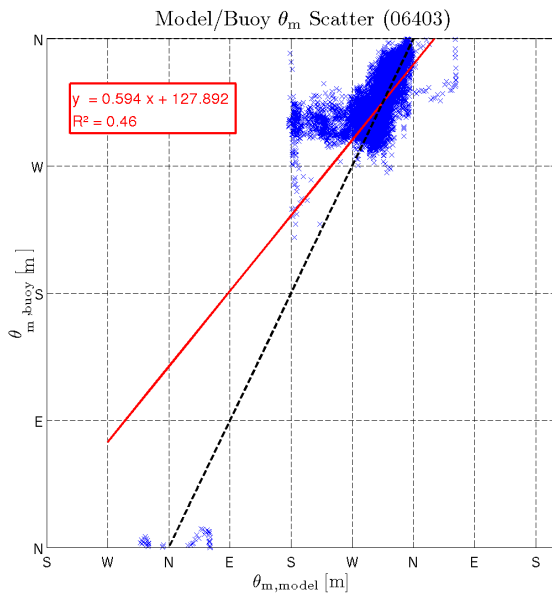


FIGURE 168 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_m$ , pour la bouée CANDHIS 06403.

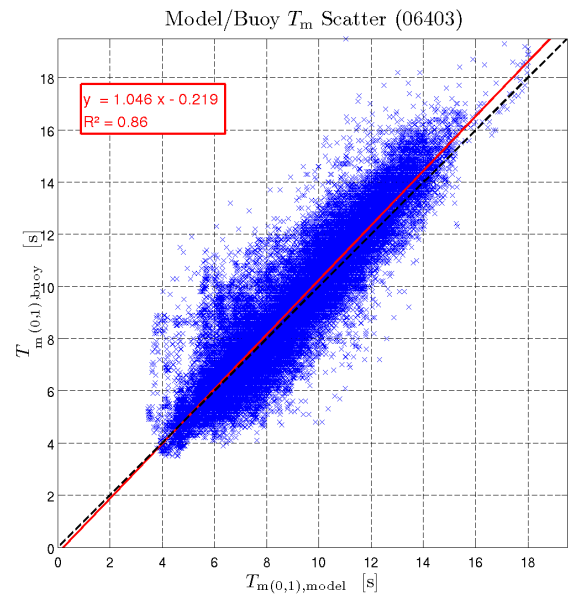


FIGURE 169 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $T_{m(0,-1)}$ , pour la bouée CANDHIS 06403.

# C Validations Modèle/bouées (GLOBWAVE)

## C.1 Bouée WMO62170

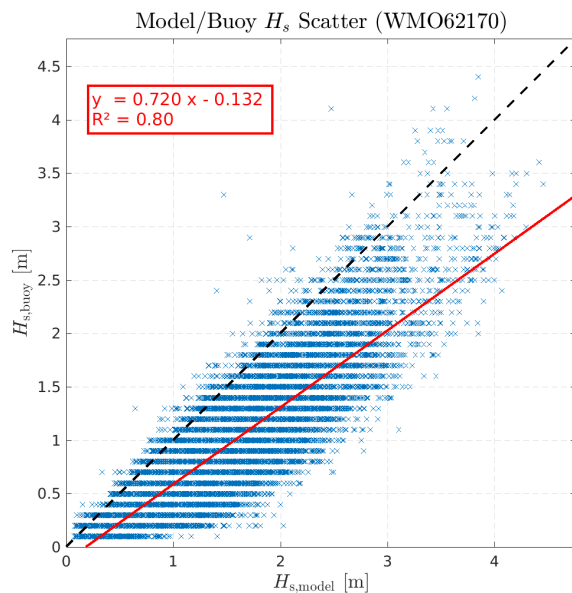


FIGURE 170 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée GLOBWAVE WMO62170.

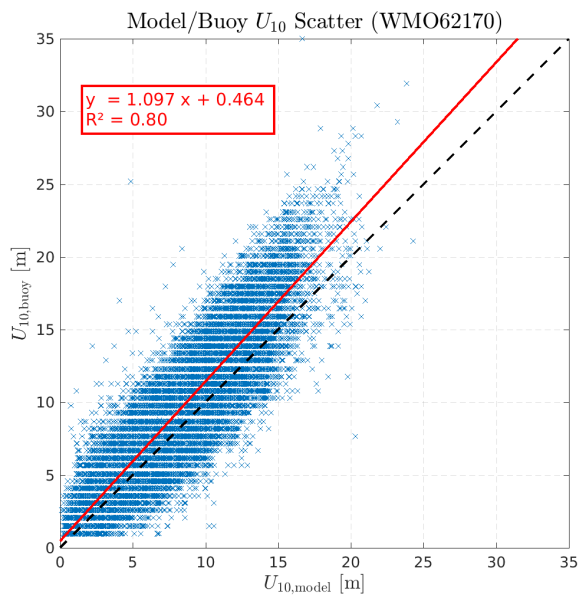


FIGURE 171 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $U_{10}$ , pour la bouée GLOBWAVE 01703.

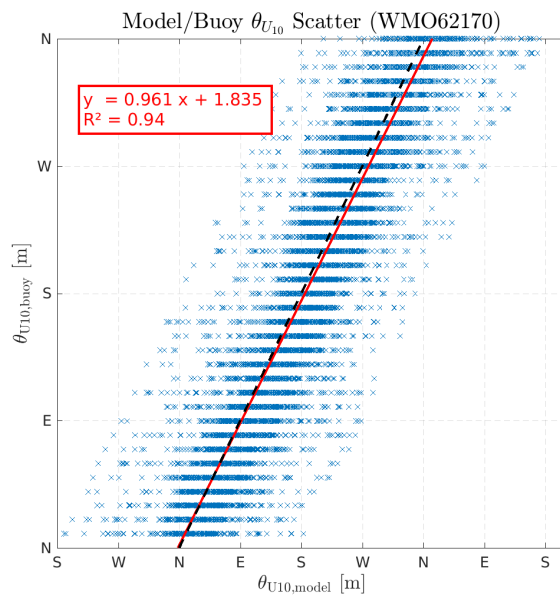


FIGURE 172 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_{U_{10}}$ , pour la bouée GLOBWAVE .

## C.2 Bouée WMO62304

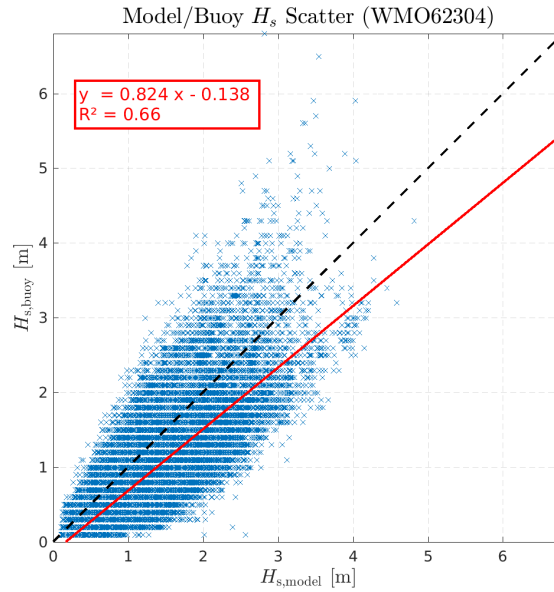


FIGURE 173 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{\text{sig}}$ , pour la bouée GLOBWAVE WMO62304.

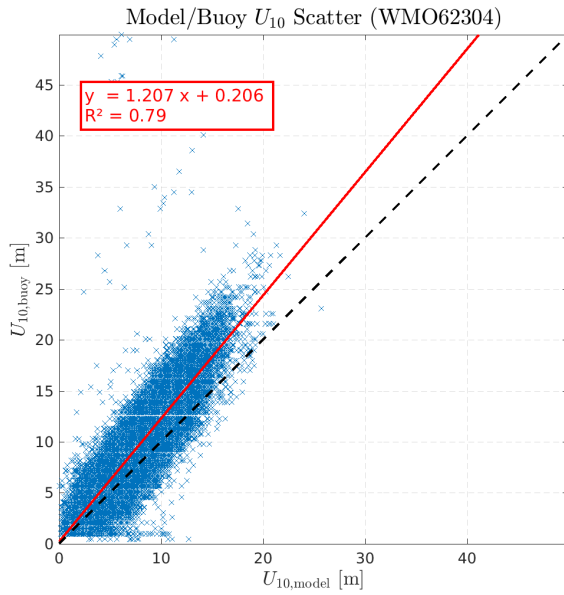


FIGURE 174 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $U_{10}$ , pour la bouée GLOBWAVE 01703.

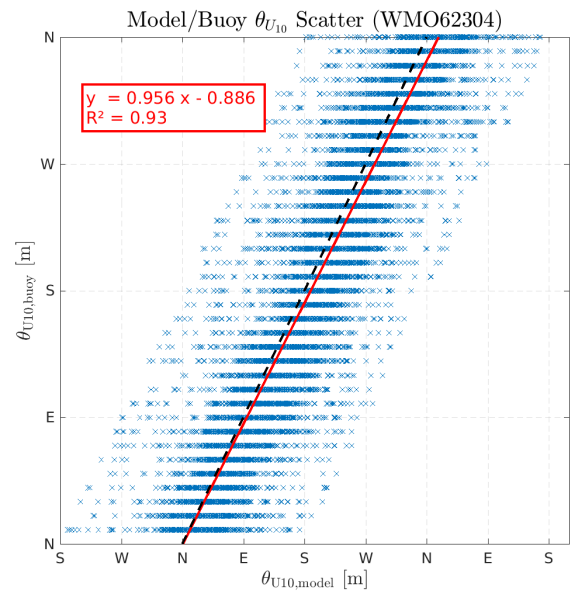


FIGURE 175 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_{U_{10}}$ , pour la bouée GLOBWAVE .

### C.3 Bouée WMO62305

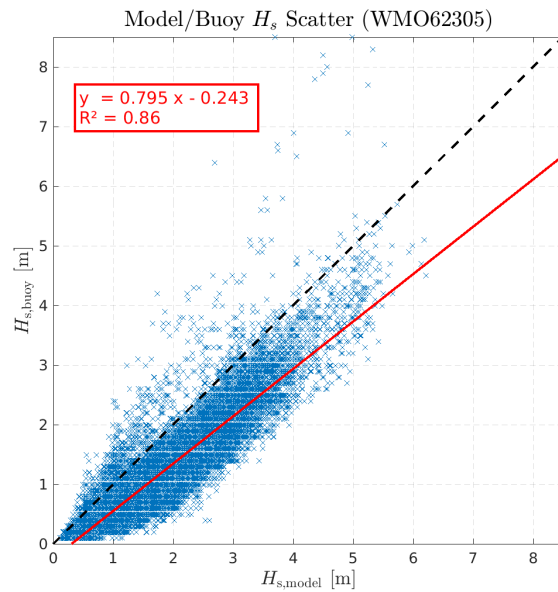


FIGURE 176 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $H_{sig}$ , pour la bouée GLOBWAVE WMO62305.

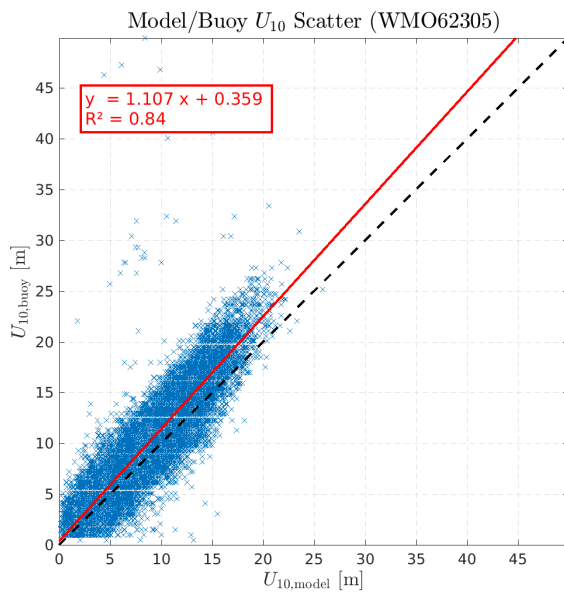


FIGURE 177 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $U_{10}$ , pour la bouée GLOBWAVE 01703.

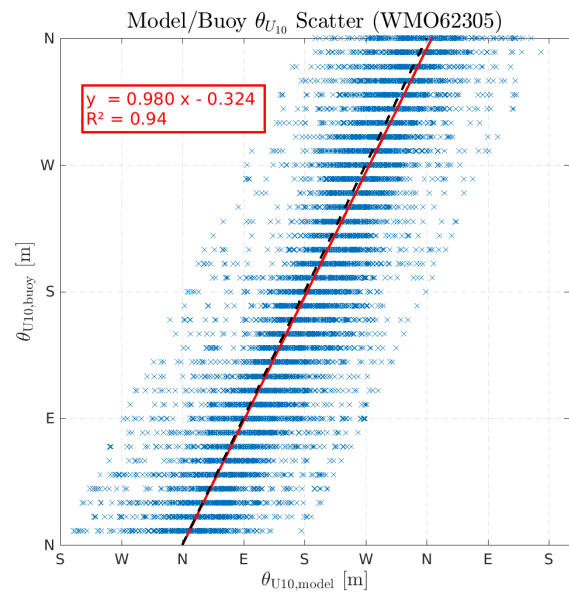


FIGURE 178 –  $Q-Q$  plot pour la variable  $\theta_{U_{10}}$ , pour la bouée GLOBWAVE .

## D Validations Modèle/AWAC

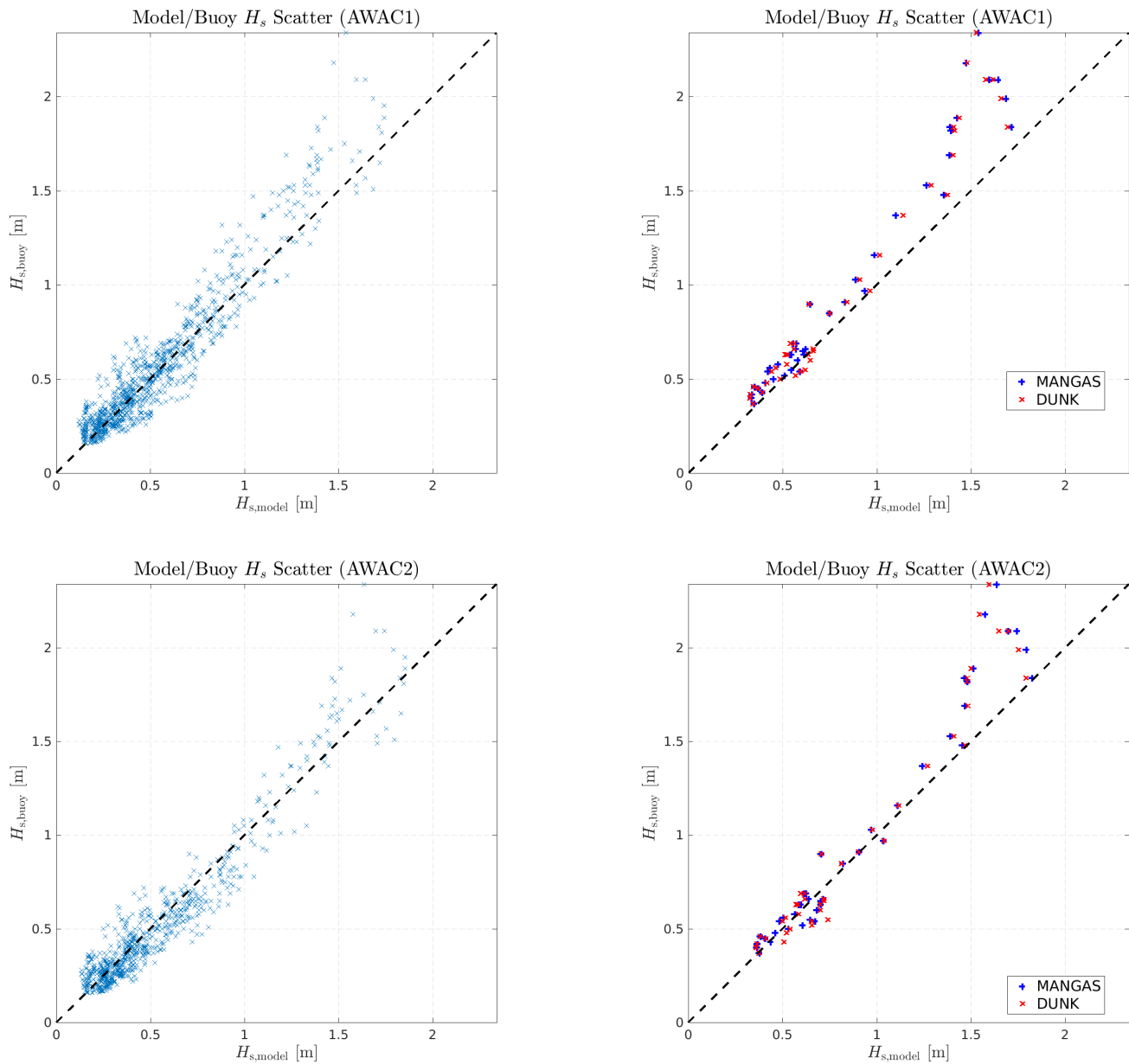


FIGURE 179 –  $Q-Q$  plot entre les valeurs observées par les profileurs de courant houlographes (AWAC1 en haut, AWAC2 en bas) de hauteurs significatives  $H_{sig,obs}$  et les résultats des modèles  $H_{sig,mod}$ . A gauche : AWAC/MANGAS pour l'ensemble des données disponibles, à droite : AWAC/MANGAS (en bleu) AWAC/DUNK (en rouge) pour les deux journées ( 16/9/2016 et 2/10/2016) simulées avec le modèle DUNK.

## E Détails des fichiers fournis dans les livrables

Les fichiers de sortie du modèle sont au format NetCDF4, et contiennent ainsi l'ensemble des méta-données nécessaires à leur compréhension et utilisation. Néanmoins, les principales variables contenues

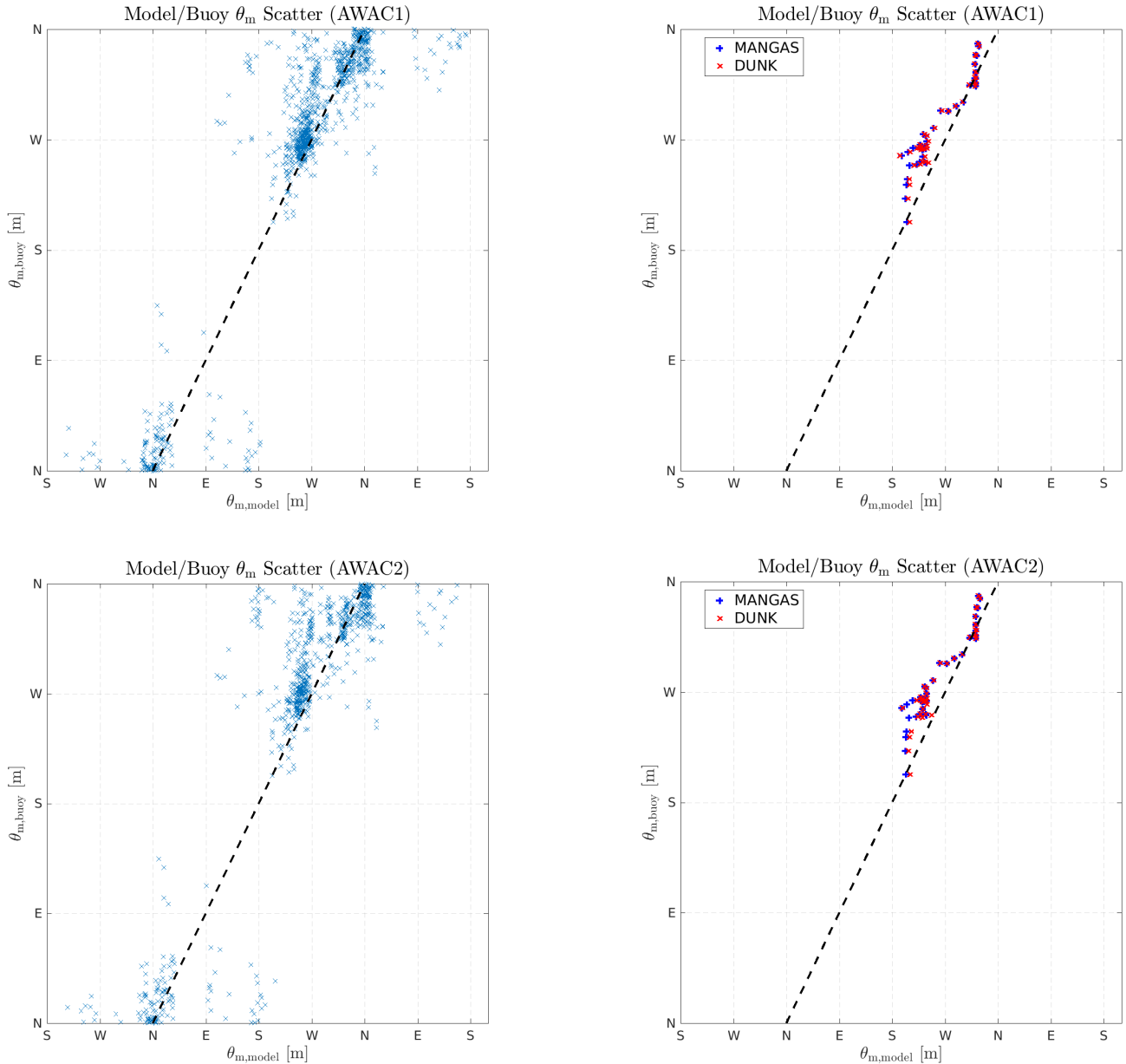


FIGURE 180 –  $Q-Q$  plot entre les valeurs observées par les profileurs de courant houlographes (AWAC1 en haut, AWAC2 en bas) de direction moyenne des vagues  $\theta_{m,obs}$  et les résultats des modèles  $\theta_{m,mod}$ . A gauche : AWAC/MANGAS pour l'ensemble des données disponibles, à droite : AWAC/MANGAS (en bleu) AWAC/DUNK (en rouge) pour les deux journées ( 16/9/2016 et 2/10/2016) simulées avec le modèle DUNK.

dans chaque fichier sont listées dans cette annexe. Pour plus de précision, le lecteur est invité à se référer au paragraphe 2.4 du manuel de WAVEWATCH III® (Tolman and the WAVEWATCHIII® Development Group, 2014).

### E.1 Fichiers de sortie du modèle MANGAS

Les résultats du modèle MANGAS sont fournis sous la forme de fichiers mensuels au format NetCDF4 pour l'ensemble de la période 2005-2016. Deux fichiers mensuels sont fournis pour chaque nœud de cal-

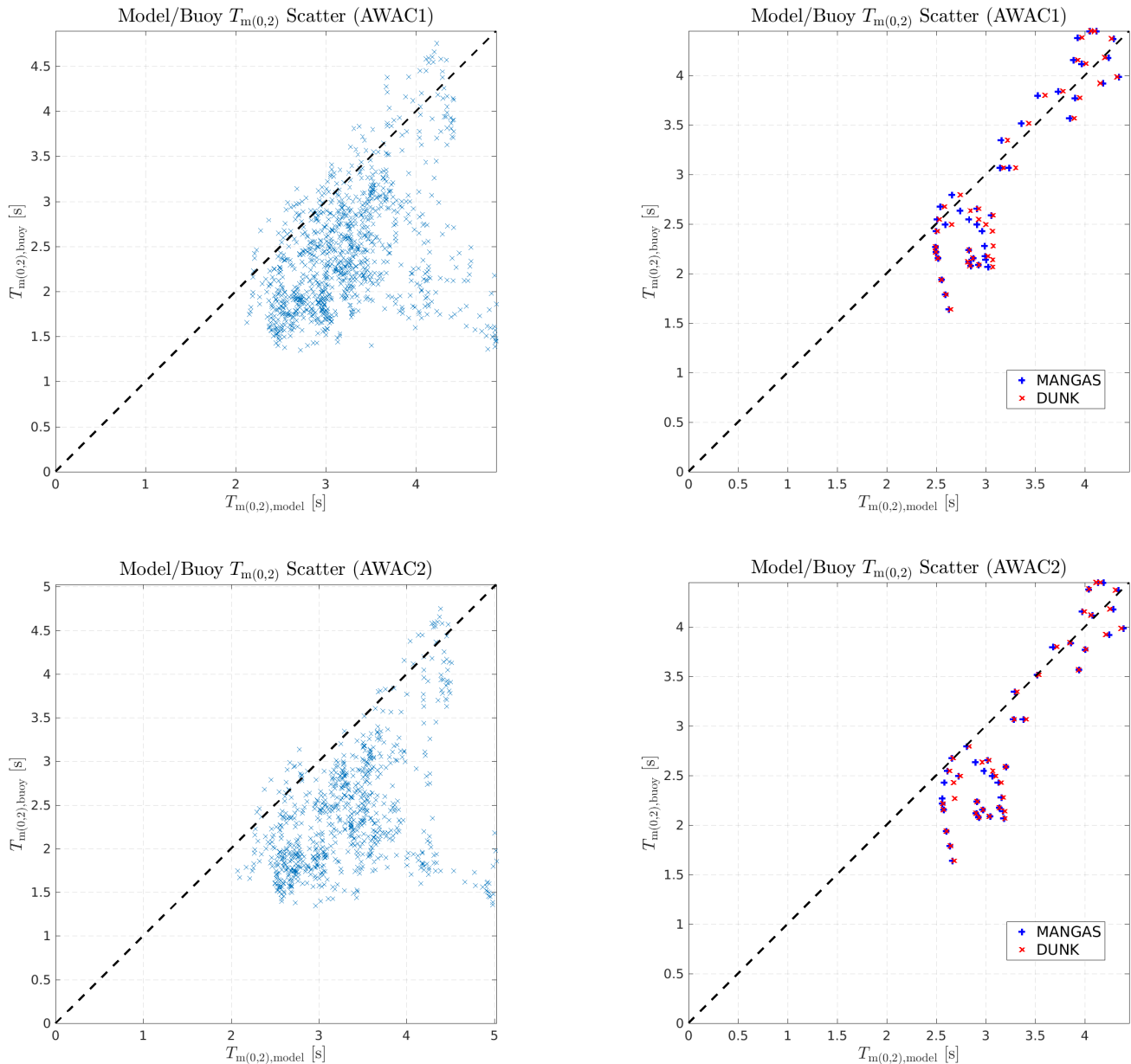


FIGURE 181 –  $Q-Q$  plot entre les valeurs observées par les profileurs de courant houlographiques (AWAC1 en haut, AWAC2 en bas) de période moyenne des vagues  $T_{m(0,2),obs}$  et les résultats des modèles  $T_{m(0,2),mod}$ . A gauche : AWAC/MANGAS pour l'ensemble des données disponibles, à droite : AWAC/MANGAS (en bleu) AWAC/DUNK (en rouge) pour les deux journées ( 16/9/2016 et 2/10/2016) simulées avec le modèle DUNK.

cul présent dans la zone EMR de Dunkerque : **ww3.XXXXXXXXXX\_AAAAMM\_spec.nc** et **ww3.XXXXXXXXXX\_AAAAMM\_tab.nc**, avec **XXXXXXXXXX** correspondant au nom du nœud de calcul, **AAAA** étant l'année et **MM** étant le mois.

Les fichiers **ww3.XXXXXXXXXX\_AAAAMM\_spec.nc** contiennent les variables :



time	Dates UTC des sorties, en jours julien (décimaux) depuis de 01/01/1900
longitude	Coordonnées du point en degrés NGF93
latitude	Coordonnées du point en degrés NGF93
dpt	Profondeur en mètres
wnd	Vitesse du vent à 10 mètres $U_{10}$ (forçage)
wnddir	Direction du vent à 10 mètres $\theta U_{10}$ (forçage, convention nautique)
cur	Vitesse du courant (forçage)
curdir	Direction du courant (forçage)
frequency	Discrétisation en fréquences $f$ du spectre de vagues en Hertz
direction	Discrétisation en direction $\theta$ du spectre de vagues en degrés (convention nautique)
efth	Le spectre 2D des vagues en densité de variance ( $m^2/Hz/rad$ ) $E(f, \theta)$

Les fichiers **ww3.XXXXXXXXXX\_AAAAMM\_tab.nc** contiennent les variables :

time	Dates UTC des sorties, en jours julien (décimaux) depuis de 01/01/1900
longitude	Coordonnées du point en degrés NGF93
latitude	Coordonnées du point en degrés NGF93
hs	Hauteur significative des vagues $H_{sig}$ en mètres
lm	Longueur d'onde moyenne des vagues $L_m$ en mètres
th1p	Direction moyenne des vagues au pic d'énergie du spectre en degré (convention nautique)
sth1p	Etalement directionnel des vagues au pic d'énergie du spectre en degré
fp	Fréquence du pic d'énergie du spectre en Hertz
th1m	Direction moyenne des vagues $\theta_m$ en degré (convention nautique)
sth1m	Etalement directionnel des vagues en degré

## E.2 Fichiers de sortie du modèle DUNK

Les résultats du modèle DUNK sont fournis sous la forme d'un fichier au format NetCDF4 pour chaque événement rejoué. Chaque fichier se présente sous la forme **ww3.AAAAMMJJ.nc**, **AAAA** étant l'année, **MM** étant le mois et **JJ** étant le jour.

Chaque fichier **ww3.AAAAMMJJ.nc** contient les champs des paramètres intégrés suivant :

time	Dates UTC des sorties, en jours julien (décimaux) depuis de 01/01/1900
longitude	Coordonnées des points en degrés NGF93
latitude	Coordonnées des points en degrés NGF93
dpt	Profondeur en mètres
ucur (vcur)	Vitesse zonale (méridionale) du courant en mètres par seconde (forçage)
uwnd (vwnd)	Vitesse zonale (méridionale) du vent à 10 mètres $U_{10}$ en mètres par seconde (forçage)
wlv	Hauteur d'eau en mètres (forçage)
hs	Hauteur significative des vagues $H_{\text{sig}}$ en mètres
t02	Période moyenne des vagues $T_{m(0,2)}$ en secondes
t0m1	Période moyenne des vagues $T_{m(0,-1)}$ en secondes
t01	Période moyenne des vagues $T_{m(0,1)}$ en secondes
fp	Fréquence du pic d'énergie du spectre en Hertz
dir	Direction moyenne des vagues $\theta_m$ en degré (convention nautique)
spr	Étalement directionnel des vagues en degré
dp	Direction des vagues au pic d'énergie du spectre en degré (convention nautique)
mssx (mssy)	<i>Mean Squared Slopes</i> zonale (méridionale) sans unité
pnr	Nombre de partitions de vagues détectées
phsN	Hauteur significative des vagues $H_{\text{sig}}$ en mètres pour la partition de vagues $N$
ptpN	Période du pic d'énergie en seconde pour la partition de vagues $N$
pdirN	Direction moyenne des vagues $\theta_m$ en degré (convention nautique) pour la partition de vagues $N$

### E.3 Détails des données issues des profileurs de courant houlographes

Deux archives correspondantes à chacun des deux profileurs de courant houlographes (AWAC1 et AWAC2) sont fournies avec le rapport. Chaque archive contient un fichier binaire avec l'extension *wpr* qui contient les données brutes enregistrées par l'instrument. Ce fichier n'est lisible qu'à l'aide d'un des logiciels proposés par le constructeur et nécessitant une licence payante.

Pour la présente étude, les données des profileurs de courant houlographes ont été traitées à l'aide du logiciel constructeur **Nortek Storm V1.17.05 (64-bit)** et les résultats ont été extraits au format ASCII et mis à disposition dans les archives pré-citées. Le fichier PREFIX.whr indique dans une première partie la paramétrisation de l'appareil ainsi que les méthodes utilisées pour le traitement des données brutes. Par la suite, le fichier resume l'ensemble des fichiers issus du traitement avec le détail de l'organisation de chaque fichier permettant la lecture des informations.

Les fichiers contenant les données d'état de mer sont les suivants :

- le fichier PREFIX.wap qui contient les paramètres intégrés des vagues ;
- le fichier PREFIX.was qui contient les spectres  $E(f)$  en  $\text{m}^2/\text{Hz}$  ;
- et le fichier PREFIX.wsp qui contient l'étalement directionnel  $M(f, \theta)$  (sans dimension) tel que :

$$E(f, \theta)d\theta = M(f, \theta)E(f) \quad (48)$$