



Dossier de l'état de connaissance initiale de la macro-zone EMR Golfe de Gascogne

Volet HOULE

Lot 1 – référence T1.H_RAP

Auteurs : Thomas FAIDHERBE, Laurent LEBALLEUR

Référence : convention Shom/DGEC n°96/2024 relative à la réalisation d'études de reconnaissance environnementale de site en vue d'appels d'offres pour l'implantation d'éoliennes en mer au large des côtes françaises

Suivi des révisions

Révision	Date	Commentaire
Rév. B1	12/07/2024	1 ^{ère} version du rapport portant sur la macro-zone Rochebonne (zones Est et Ouest).
Rév. A	18/04/2025	Version finale mise à jour à la suite de la réduction de la macro-zone d'étude, avec changement de nom en Golfe de Gascogne (zones Nord et Sud toutes les deux contenues dans l'ancienne zone Rochebonne Ouest). Les illustrations figurant les 2 anciennes zones Rochebonne Est et Ouest ont été mises à jour. Les références aux zones Rochebonne Est et Ouest ont été supprimées. Les 4 points sélectionnés pour l'analyse statistique de la section 4 du rapport n'ont, eux, pas été modifiés, comme demandé par la DGEC. Le rapport couvre donc une zone plus large que la macro-zone Golfe de Gascogne.

Table des matières

Glossaire.....	9
1. Introduction.....	10
1.1 Description de la zone d'étude.....	10
1.2 Principaux processus affectant les vagues	11
1.2.1 Le levage (<i>shoaling</i>)	11
1.2.2 La réfraction	12
1.2.3 L'effet des courants	12
1.2.4 Le déferlement.....	13
1.3 Les modèles spectraux d'états de mer.....	13
2. Description du rejetu d'états de mer utilisé.....	16
2.1 Le rejetu HYWAT.....	16
2.2 Le modèle spectral WAVEWATCH III®.....	16
2.3 La grille de calcul.....	16
2.4 Discrétisation spectrale du modèle.....	18
2.5 Paramétrisation physique	18
2.6 Les forçages.....	18
2.6.1 Conditions aux limites	18
2.6.2 Forçage atmosphérique	18
2.6.3 Forçage hydrodynamique.....	18
2.7 Les dates rejouées.....	20
2.8 Les paramètres intégrés	20
3. Validation du rejetu d'états de mer	22
3.1 Validation à l'aide des satellites.....	24
3.2 Validation grâce aux bouées houlographes du réseau CANDHIS	28
4. Analyse des états de mer dans la zone d'étude	35
4.1 Analyse de l'état de mer total.....	35
4.2 Analyse de l'état de mer en fonction de la direction moyenne des vagues	43

4.3	Analyse de l'état de mer par systèmes de vagues	50
5.	Conclusion.....	57
6.	Bibliographie	58
	Annexe 1. Coordonnées WGS 84 des points P1 à P4.....	61
	Annexe 2. Corrélogrammes pour les autres secteurs directionnels.....	62

Liste des figures

Figure 1: Localisation de la zone d'étude sur la carte marine Shom 6990 (2023). Les coordonnées (latitude et longitude) sont exprimées dans le système géodésique WGS 84.....	10
Figure 2 : Maillage du modèle (couverture complète).....	17
Figure 3 : Maillage du modèle (zoom sur la macro-zone d'étude, polygones rouges).....	17
Figure 4 : Grille du modèle HYCOM développée dans le cadre du projet HOMONIM (pour plus de clarté, seulement un point sur 30 est tracé)	19
Figure 5 : Carte des H_s moyennes observées par altimètre sur la période 1991-2017, à une résolution de 0.5°. Les chiffres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul.....	25
Figure 6 : Carte des moyennes quadratiques des H_s observées par altimètre sur la période 1991-2017, à une résolution de 0.5°. Les chiffres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul.....	25
Figure 7 : Carte des biais normalisés NBIAS(H_s) sur la période 1991-2017, à une résolution de 0.5°. Les numéros indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul.	25
Figure 8 : Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées NRMSE(H_s) sur la période 1991-2017, à une résolution de 0.5°. Les numéros indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul.	25
Figure 9 : Qualification des erreurs (BIAS, RMSE, SI) de H_s en fonction des échelles de H_s sur la période 1991-2017.....	26
Figure 10 : Corrélation des valeurs de H_s observées et modélisées sur la période 1991-2017..	26
Figure 11 : Qualification des erreurs (BIAS, RMSE, SI) de H_s en fonction des échelles de H_s observées dans une cellule au voisinage de la zone d'étude sur la période 1991-2017.....	27
Figure 12 : Corrélation des valeurs de H_s modélisées et observées au voisinage de la zone d'étude sur la période 1991-2017.....	27
Figure 13 : Carte illustrant les positions des bouées du réseau CANDHIS utilisées pour la validation du rejet HYWAT.....	28
Figure 14 : Carte illustrant les zones Golfe de Gascogne Nord et Sud ainsi que les bouées du réseau CANDHIS les plus proches.....	29
Figure 15 : Carte des H_s moyennes modélisées sur la période 1979-2022.....	36
Figure 16 : Carte des H_s maximales modélisées sur la période 1979-2022.....	36
Figure 17 : Répartition des H_s aux points P1, P2, P3 et P4. Les intervalles utilisés pour le calcul de la distribution sont de 0.2 m (ex : [0, 0.2[).....	37
Figure 18 : Répartition des T_{m02} aux points P1, P2, P3 et P4. Les intervalles utilisés pour le calcul de la distribution sont de 0.5 s (ex : [5, 5.5[).....	38

Figure 19 : Répartition des D_m aux points P1, P2, P3 et P4. Les intervalles utilisés pour le calcul de la distribution sont de 22.5° (ex : [11.25, 33.75[). ..	39
Figure 20 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ pour les points P1, P2, P3 et P4.....	40
Figure 21 : Distributions mensuelles des H_s aux points P1 et P2. Les extrémités des boîtes correspondent au 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartile de la distribution mensuelle, les segments inférieurs et supérieurs aux valeurs minimales et maximales du mois. Les traits orange sont les valeurs médianes mensuelles et les triangles verts les moyennes mensuelles.....	41
Figure 22 : Distributions mensuelles des H_s aux points P3 et P4. Les extrémités des boîtes correspondent au 1 ^{er} et 3 ^{ème} quartile de la distribution mensuelle, les segments inférieurs et supérieurs aux valeurs minimales et maximales du mois. Les traits orange sont les valeurs médianes mensuelles et les triangles verts les moyennes mensuelles.....	42
Figure 23 : Distribution des H_s en fonction de D_m aux points P1 et P2. Les secteurs directionnels couvrent chacun un intervalle de 22.5°. La colonne de gauche considère l'ensemble des états de mer sur la période 1979-2022, la colonne de droite uniquement ceux dont la hauteur significative dépasse 7 m.	44
Figure 24 : Distribution des H_s en fonction de D_m aux points P3 et P4. Les secteurs directionnels couvrent chacun un intervalle de 22.5°. La colonne de gauche considère l'ensemble des états de mer sur la période 1979-2022, la colonne de droite uniquement ceux dont la hauteur significative dépasse 7 m.	45
Figure 25 : Répartition des H_s et T_{m02} par secteur directionnel aux points P1 et P2. Les intervalles utilisés pour le calcul des distributions sont de 0.2 m pour H_s et de 0.5 s pour T_{m02}	47
Figure 26 : Répartition des H_s et T_{m02} par secteur directionnel aux points P3 et P4. Les intervalles utilisés pour le calcul des distributions sont de 0.2 m pour H_s et de 0.5 s pour T_{m02}	48
Figure 27 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant de l'ouest ($247.5^\circ < D_m \leq 292.5^\circ$).....	49
Figure 28 : Répartition des H_s , T_p et D_p pour les trois systèmes de vagues aux points P1 et P2.	51
Figure 29 : Répartition des H_s , T_p et D_p pour les trois systèmes de vagues aux points P3 et P4.	52
Figure 30 : Corrélogrammes $H_s - T_p$ aux points P1 et P2 pour les trois systèmes de vagues : mer de vent (en haut), houle primaire (au milieu) et houle secondaire (en bas).	53
Figure 31: Corrélogrammes $H_s - T_p$ aux points P3 et P4 pour les trois systèmes de vagues : mer de vent (en haut), houle primaire (au milieu) et houle secondaire (en bas).	54
Figure 32 : Distribution des H_s en fonction de D_p aux points P1 et P2 pour les trois systèmes de vagues : mer de vent (en haut), houle primaire (au milieu) et houle secondaire (en bas).	55
Figure 33 : Distribution des H_s en fonction de D_p aux points P3 et P4 pour les trois systèmes de vagues : mer de vent (en haut), houle primaire (au milieu) et houle secondaire (en bas).	56
Figure 34 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant du nord ($337.5^\circ < D_m \leq 22.5^\circ$).	62
Figure 35 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant du nord-est ($22.5^\circ < D_m \leq 67.5^\circ$).	63

Figure 36 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant de l'est ($67.5^\circ < D_m \leq 112.5^\circ$).....	64
Figure 37 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant du sud-est ($112.5^\circ < D_m \leq 157.5^\circ$).....	65
Figure 38 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant du sud ($157.5^\circ < D_m \leq 202.5^\circ$).....	66
Figure 39 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant du sud-ouest ($202.5^\circ < D_m \leq 247.5^\circ$).....	67
Figure 40 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant du nord-ouest ($292.5^\circ < D_m \leq 337.5^\circ$).....	68

Liste des tableaux

Tableau 1 : Informations relatives aux différentes bouées du réseau CANDHIS considérées pour la validation du jeu HYWAT.....	30
Tableau 2 : Scores (voir Glossaire) du jeu HYWAT pour la hauteur significative H_s sur la période de mesure de chaque bouée du réseau CANDHIS considérée pour la validation.....	32
Tableau 3 : Scores (voir Glossaire) du jeu HYWAT pour la période moyenne T_{m02} sur la période de mesure de chaque bouée du réseau CANDHIS considérée pour la validation.....	33
Tableau 4 : Scores (voir Glossaire) du jeu HYWAT pour la direction moyenne D_m sur la période de mesure de chaque bouée du réseau CANDHIS considérée pour la validation.....	34
Tableau 5: Statistiques (valeurs moyenne, maximale, médiane, 90 ^e et 99 ^e centiles) des paramètres H_s et T_{m02} aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude.....	35
Tableau 6: Statistiques (valeurs moyenne, maximale, médiane, 90 ^e et 99 ^e centiles) des paramètres H_s et T_{m02} en fonction de D_m pour les points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude.	46

Glossaire

a	Pente de la droite de régression linéaire
b	Ordonnée à l'origine de la droite de régression linéaire
Bias	Biais statistique
CANDHIS	Centre d'Archivage National des Données de Houle In Situ (https://candhis.cerema.fr)
CEREMA	Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
CERSAT	Centre d'Exploitation et de Recherche SATellite
D _m	Direction moyenne de provenance des vagues
D _p	Direction de provenance du pic du spectre d'énergie des vagues
EMR	Energies Marines Renouvelables
Fetch	Distance sur laquelle le vent est susceptible de faire croître les vagues
H _s	Hauteur significative des vagues issue de l'analyse spectrale
HOMONIM	Historique, Observation et MOdélisation des NIveaux Marins
HYWAT	Rejet d'états de mer (HYWAT = HYdrodynamics and WAves hindcasT)
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRMSE	Erreur quadratique moyenne normalisée
Prof.	Profondeur
R	Coefficient de corrélation linéaire
RMSE	Erreur quadratique moyenne
SI	Scatter Index (%), ou indice de dispersion
T _{m02}	Période moyenne des vagues issue de l'analyse spectrale
T _p	Période du pic du spectre d'énergie des vagues
\overline{X}_{obs}	Moyenne des valeurs observées
\overline{X}_{mod}	Moyenne des valeurs modélisées

1. Introduction

Ce rapport constitue une étude approfondie des états de mer caractéristiques des zones Golfe de Gascogne Nord et Sud. Ces deux zones, situées au large de l'île de Ré, au voisinage du plateau de Rochebonne, ont été identifiées pour l'implantation de parcs éoliens.

L'étude s'appuie sur un rejet numérique d'états de mer à haute résolution de 44 ans (1979-2022) couvrant toute la façade atlantique française.

1.1 Description de la zone d'étude

La zone d'étude inclut les zones Golfe de Gascogne Nord et Sud. La profondeur au sein de ces deux zones est relativement homogène, de l'ordre de 110 m (par rapport au zéro hydrographique). En raison de leur localisation, ces zones sont soumises à d'importantes houles en provenance de l'Atlantique. Les fetchs sont très longs dans les secteurs s'étendant du sud-ouest au nord-ouest, ce qui permet le développement de mers de vent énergétiques. A l'inverse, la côte française empêche le développement de vagues importantes en provenance des secteurs nord-est à sud-est, même en cas de fort coup de vent.

La Figure 1 illustre les deux zones Golfe de Gascogne Nord et Sud ainsi que la zone englobante considérée plus largement dans ce rapport (voir explications tableau suivi des révisions).

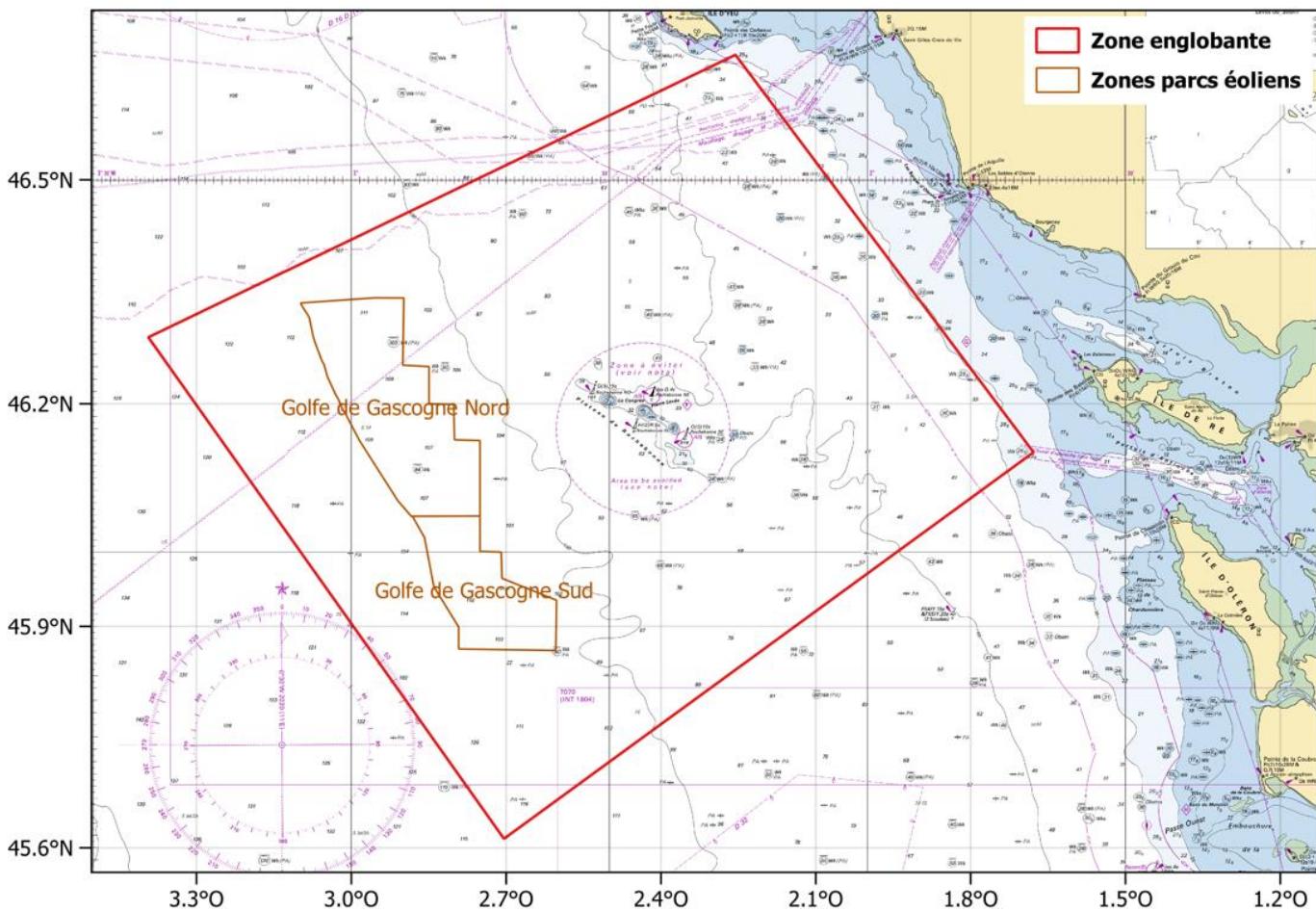


Figure 1: Localisation de la zone d'étude sur la carte marine Shom 6990 (2023). Les coordonnées (latitude et longitude) sont exprimées dans le système géodésique WGS 84.

1.2 Principaux processus affectant les vagues

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. Les courants dus à la marée ont également une influence. Les processus physiques qui entrent en jeu sont majoritairement :

- 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, notamment ceux liés à la marée.

1.2.1 Le levage (*shoaling*)

Les vagues monochromatiques (dites vagues d'Airy) se propageant au-dessus d'un fond à pente faible conservent, en l'absence de courant, leur fréquence f (ou leur pulsation ω). Leur longueur d'onde va quant à elle s'adapter à la profondeur en respectant la relation de dispersion donnée par la théorie linéaire (Airy, 1841) :

$$\omega^2 = gk \tanh(kd) \quad (\text{Eq. 1})$$

avec g l'accélération de la pesanteur, k le nombre d'onde des vagues et d la profondeur. La longueur d'onde des vagues décroît donc avec la profondeur, et leur vitesse de phase C_p (i.e. la vitesse des crêtes) diminue donc elle aussi suivant la formule :

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

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

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

Ces variations de la vitesse de groupe, 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 :

$$a = \sqrt{\frac{2E}{\rho g}} \quad (\text{Eq. 4})$$

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

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

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 (Eq. 4) et (Eq. 5), on obtient le levage d'une onde d'Airy se propageant perpendiculairement aux isobathes sur une plage linéaire telle que :

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

avec a_1 et a_2 les amplitudes, respectivement aux points P1 et P2. Ainsi, la conservation du flux d'énergie implique une diminution de l'énergie locale des vagues et donc de leur amplitude 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 en anglais. Dans le cas d'une plage linéaire, le levage entraînera donc d'abord une légère diminution de l'amplitude avant de l'augmenter fortement. Évidemment, en réalité, de nombreux phénomènes limitent l'effet du levage, comme le déferlement, la friction sur le fond, ou encore la réfraction (voir section 1.2.2) si l'on considère une topographie complexe.

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 d'incidence non nul par rapport à l'axe de la plage change lentement de direction. Les crêtes des vagues s'alignent alors avec les isobathes de la plage.

L'effet de la réfraction ne se limite pas à la direction des vagues, la réfraction affecte aussi leur amplitude. L'énergie contenue entre deux rayons est conservée en l'absence de processus dissipatifs. Par conséquent, la convergence des rayons entraîne une augmentation de l'énergie locale des vagues. A 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 L'effet des courants

Les courants peuvent avoir plusieurs effets :

- le levage ;
- la réfraction ;
- un changement de la fréquence des vagues (effet Doppler) ;
- un transfert d'énergie entre vagues et courants.

Le courant \mathbf{U} introduit un décalage Doppler des vitesses de phase C_p et de groupe C_g :

$$C'_p = C_p + \mathbf{U} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$C'_g = C_g + \mathbf{U} \quad (\text{Eq. 8})$$

Dans un référentiel fixe, la fréquence observée est la fréquence absolue ω' :

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

La relation définissant la vitesse de groupe est toujours valable :

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

Dans le cas où le courant est dans la direction opposée à celle des vagues tout en accélérant, la vitesse de groupe $C'_g = C_g + U$ diminue au fur et à mesure que les vagues se propagent. 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.

Par ailleurs, de la même manière que les variations bathymétriques, les variations locales du courant induisent de la réfraction. Si la vitesse du courant varie le long de la crête d'une vague, la vitesse de phase C'_p de la vague varie aussi, ce qui entraîne une modification de la direction de propagation.

1.2.4 Le déferlement

Le principal puits d'énergie des vagues est le déferlement. L'énergie des vagues 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 u_c des particules d'eau à la crête des vagues atteignent ou dépassent la vitesse de phase, soit lorsque $u_c / C_p \geq 1$. Miche (1944) a montré que la cambrure maximale de vagues régulières (cambrure atteinte lorsque $u_c / C_p = 1$) est donnée par :

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

avec H la hauteur crête à creux de l'onde et λ la longueur d'onde. Les observations de Rapp and Melville (1990) et Stansell and MacFarlane (2002) suggèrent que le 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 hauteur H des vagues et ainsi augmenter leur cambrure, potentiellement 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 leur cambrure, pouvant entraîner le déferlement. Ainsi, en faible profondeur, la hauteur des vagues est contrôlée par la profondeur d :

$$H = \gamma d \quad (\text{Eq. 12})$$

avec γ 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'états de mer

Les modèles spectraux d'états de mer tels que WAVEWATCH III® 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), 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'états 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 θ . L'évolution de la densité spectrale d'énergie F est résolue selon la formulation proposée par Gelci et al. (1957) :

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

où la dérivé lagrangienne de la densité spectrale dF/dt (terme de gauche) est égale à la somme des termes sources et puits (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), respectant la relation de dispersion (Eq. 1), et telles que :

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

avec :

- $\mathbf{x} = (x, y)$ le vecteur position ;
- t le temps ;
- a l'amplitude de l'onde plane progressive ;
- ω la fréquence angulaire (ou pulsation) ;
- $\mathbf{k} = (k_x, k_y)$ le vecteur d'onde ;
- 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 C_g , telle que :

$$C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right) C_p \quad (\text{Eq. 15})$$

où C_p est la vitesse de phase :

$$C_p = \|\mathbf{C}_p\| = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kd)} \quad (\text{Eq. 16})$$

En présence d'un courant \mathbf{U} , la vitesse du courant s'additionne 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 :

$$(C_x, C_y) = \mathbf{C}_g + \mathbf{U} \quad (\text{Eq. 17})$$

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

$$C_\omega = \frac{\partial \omega}{\partial d} \left(\frac{\partial d}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla_x d \right) - C_g \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial s} \quad (\text{Eq. 18})$$

$$C_\theta = -\frac{1}{k} \left(\frac{\partial \omega}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + \mathbf{k} \cdot \frac{\partial \mathbf{U}}{\partial m} \right) \quad (\text{Eq. 19})$$

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

Le terme de gauche de l'équation (Eq. 13) résout, 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/puits qui forment le terme de droite de l'équation.

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_{atm} , S_{nl4} et S_{oc} qui correspondent aux termes de développement de l'état de mer :

- S_{atm} est le terme de transfert d'énergie du vent vers les vagues. Ce terme source est responsable de la croissance des vagues ;
- S_{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 (donc vers les basses fréquences) ;
- S_{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.

Les modèles proposent également divers autres termes sources correspondant aux différents processus en eau peu profonde. De nombreux termes sources sont disponibles dans les modèles et peuvent être activés ou désactivés selon les besoins et la pertinence pour l'étude réalisée.

2. Description du rejeu d'états de mer utilisé

La simulation numérique est utilisée afin de compléter les observations d'états de mer sporadiques et obtenir des informations sur des périodes suffisamment longues pour permettre une étude statistique fiable. Cette partie présente le rejeu d'états de mer utilisé pour cette étude (rejeu HYWAT), ainsi que la stratégie mise en place pour valider ses résultats.

2.1 Le rejeu HYWAT

Le rejeu HYWAT (Michaud et al., 2024) utilisé pour cette étude a été créé à l'occasion du Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) d'intention de l'Agglomération de Saint-Malo. Il est basé sur le modèle numérique d'états de mer WAVEWATCH III® v-5.16.

HYWAT est diffusé librement par le Shom. La description détaillée du rejeu ainsi que les données sont disponibles via les liens suivants :

https://diffusion.shom.fr/oceanographie/rejeux_climatologiques_1979-2022_de_marees_surcotes_et_vagues_sur_la_facade_atlantique.html

Shom, 2023. https://doi.org/10.17183/REJEUX_HYWAT

2.2 Le modèle spectral WAVEWATCH III®

Le modèle spectral WAVEWATCH III® est développé et maintenu principalement par la NOAA/NCEP/NWS (Tolman and the WAVEWATCH III® Development Group, 2017). WAVEWATCH III® est un modèle spectral à phase moyennée de troisième génération qui résout l'évolution de la densité spectrale d'énergie, aussi appelée spectre des vagues. 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 possède l'ensemble des paramétrisations physiques nécessaires à la modélisation des états de mer depuis l'échelle globale, à basse résolution, jusqu'à l'échelle côtière, à haute résolution.

2.3 La grille de calcul

La grille utilisée (Figure 2 et Figure 3) est un maillage non structuré à éléments triangulaires, créée par Michaud et al. (2015) dans le cadre du projet HOMONIM¹, visant à améliorer le dispositif de Vigilance Vagues-Submersion (VVS). Cette grille est utilisée de façon opérationnelle par Météo-France depuis 2014.

Le maillage comporte 92 757 points de calcul pour 175 634 éléments triangulaires. La résolution est de 10 km aux frontières ouvertes du domaine, et s'affine progressivement jusqu'à environ 200 m au voisinage de la côte. La bathymétrie associée repose sur un modèle numérique de terrain (MNT) à 500 m de résolution pour la zone hauturière et 100 m dans la zone côtière (Biscara, 2015).

¹ HOMONIM : Historique, Observation, MOdélisation des Niveaux Marins est un projet commun du Shom et Météo-France, initié en 2012, sous maîtrise d'ouvrage de la Direction Générale pour la Prévention des Risques (DGPR) et de la Direction Générale de la Sécurité Civile et de la Gestion de Crise (DGSCGC), et qui s'inscrit dans le cadre du Plan interministériel Submersions Rapides (PSR). Son objectif principal est d'améliorer la pertinence du dispositif de Vigilance face au risque de Vagues et Submersions marines (VVS).

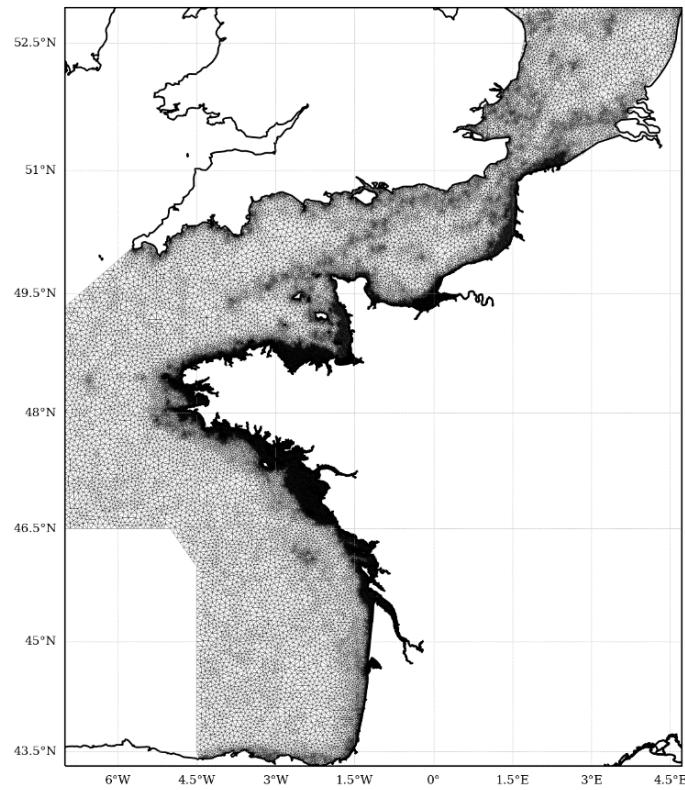


Figure 2 : Maillage du modèle (couverture complète).

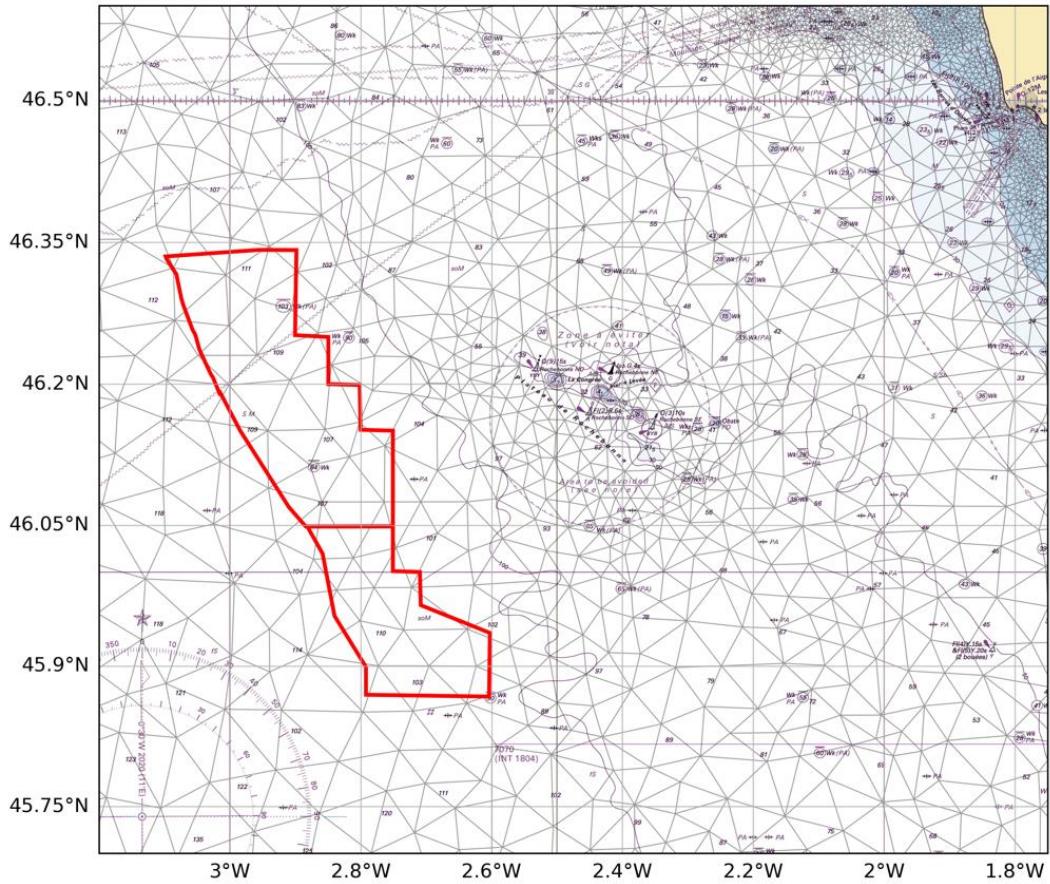


Figure 3 : Maillage du modèle (zoom sur la macro-zone d'étude, polygones rouges).

2.4 Discrétisation spectrale du modèle

Comme précisé au paragraphe 1.3, les modèles spectraux d'état de mer résolvent l'évolution du spectre des vagues F (Eq. 13). Dans le modèle WAVEWATCH III®, le spectre des vagues est discrétisé en fréquences f et directions θ tel que $F = F(f, \theta)$. Pour ce qui est du rejet HYWAT, le spectre a été discrétisé en 24 secteurs directionnels θ_i linéairement répartis tous les 15° , et en 32 fréquences f_i exponentiellement réparties de $f_{\min} = 0.0373$ Hz ($T_{\max} \approx 26.8$ s) à $f_{\max} = 0.7159$ Hz ($T_{\min} \approx 1.4$ s) telles que :

$$\forall i \in [1, 32], f_i = 1.1^{i-1} f_{\min} \quad (\text{Eq. 20})$$

2.5 Paramétrisation physique

La paramétrisation physique correspondant au TEST 471 (Ardhuin et al., 2010; Leckler et al., 2013) a été utilisée. Elle a toutefois été adaptée au forçage atmosphérique utilisé par une calibration à des mesures altimétriques, via une optimisation du coefficient de croissance des vagues de vent β_{max} . Cette adaptation permet de diminuer le biais existant pour la vitesse du vent dans le modèle atmosphérique, avec les mesures (Stopa et al., 2019). Afin de représenter au mieux les paramètres des vagues sur la côte atlantique française, un coefficient β_{max} de 1.52 a ainsi été choisi.

2.6 Les forçages

2.6.1 Conditions aux limites

La grille présentée à la section 2.3 est forcée au large par un rejet global issu de l'implémentation du même modèle de vagues sur une grille de calcul rectangulaire de résolution spatiale 0.5° .

2.6.2 Forçage atmosphérique

Les champs de vent utilisés pour le forçage du modèle HYWAT sont issus de la réanalyse ERA5² (Hersbach and Dee, 2016) produite par le CEPMMT³. ERA5 est une réanalyse de dernière génération. Les données couvrant la période comprise entre 1979 et 2022 ont été utilisées (44 ans). Cette réanalyse a été développée en utilisant l'assimilation 4D-Var du modèle IFS (Integrated Forecast System) cycle 41r2. Le nombre d'observations assimilées varie de 0.75 million par jour en 1979 jusqu'à 24 millions en 2018. Les résolutions spatiales horizontales et temporelles sont respectivement de 31 km et 1 h.

2.6.3 Forçage hydrodynamique

La façade atlantique française étant fortement soumise à la marée, les effets des variations de courant et de hauteur d'eau qu'elle induit doivent être pris en compte pour le calcul des vagues (Michaud et Pasquet, 2016).

Le rejet HYWAT bénéficie de forçages en niveaux d'eau et courants (couplage offline) issus du modèle hydrodynamique HYCOM⁴ (Bleck, 2002), toutes les 12 minutes. Les courants et niveaux

² The ERA5 Global Reanalysis: Hersbach H. et al., May 2020. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society

³ Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme

⁴ HYbrid Coordinate Ocean Model

d'eau résultent d'une simulation de marée tenant compte des effets atmosphériques (vent / pression), ce qui permet de représenter les phénomènes de surcotes et décotes météorologiques. Ces simulations hydrodynamiques ont été réalisées à partir du modèle HYCOM, modèle aux différences finies avec une discréétisation sur une grille C d'Arakawa, dans la version du Shom (Baraille and Filatoff, 1995), en formalisme barotrope (2D, quantités moyennées sur la verticale). Le noyau HYCOM spécifique à cette simulation a fait l'objet de nombreux développements numériques, algorithmiques comme informatiques dans le cadre du projet HOMONIM (Pasquet, 2016), puisque le modèle est actuellement utilisé en opérationnel dans le système VVS de Météo-France.

La dynamique est modélisée sur un domaine compris entre 43°N – 62°N et 9°O – 10°E. La grille utilisée est curvilinéaire et permet une résolution inférieure au kilomètre sur les côtes françaises (Figure 4). Le modèle utilise les MNT à 500 m et 100 m de résolution réalisés par le Shom dans le cadre du projet HOMONIM (Biscara et al., 2014 ; Biscara, 2015), et gère les bancs découvrants sur l'estran. Le modèle est forcé aux frontières en élévation de surface par l'atlas de marée NEA 2011⁵ du LEGOS⁶, comportant 15 composantes harmoniques. Le frottement sur le fond est spatialement adapté à la configuration par un processus d'optimisation stochastique (Boutet, 2015). De plus, comme le modèle WAVEWATCH III®, la configuration hydrodynamique HYCOM est forcée en surface par la réanalyse atmosphérique ERA5.

Les hauteurs d'eau du rejet climatologique HYWAT ont été validées en comparant les résultats des simulations aux mesures des marégraphes.

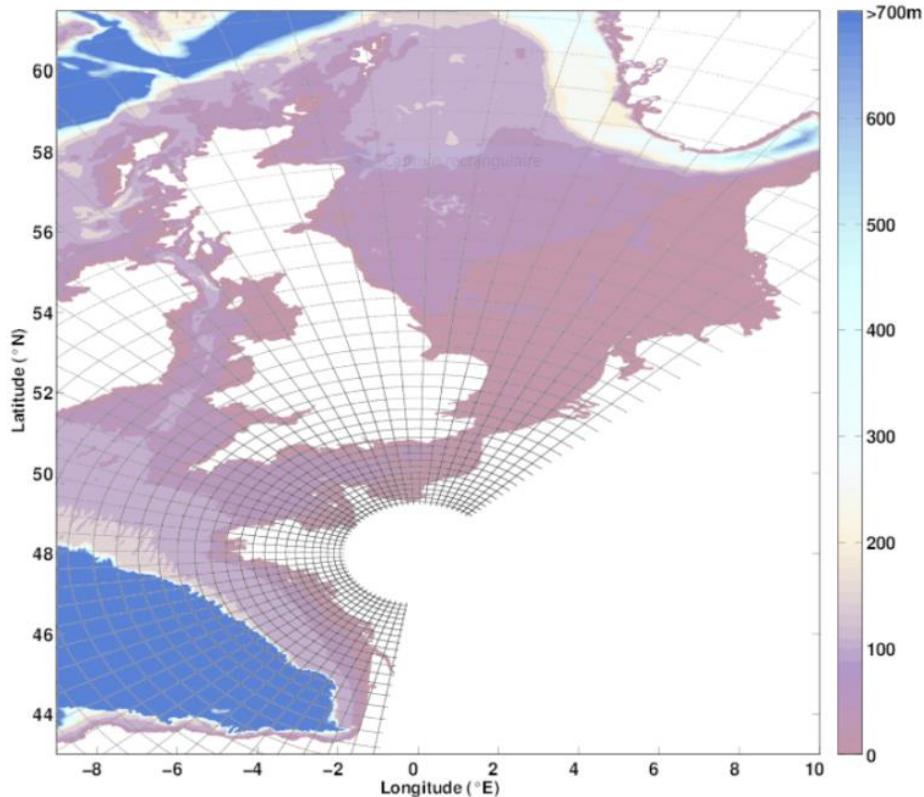


Figure 4 : Grille du modèle HYCOM développée dans le cadre du projet HOMONIM (pour plus de clarté, seulement un point sur 30 est tracé).

⁵ North East Atlantic tidal atlas

⁶ Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales

2.7 Les dates rejouées

Le rejeu couvre une période allant de 1979 à 2022, soit 44 années. Les sorties du modèle sont faites à une fréquence horaire pour chacun des points de la grille de calcul, et à une fréquence de 30 minutes pour certains points d'intérêt tels que les positions des bouées du réseau CANDHIS.

Le supercalculateur DATARMOR⁷ a été utilisé pour les simulations numériques. Celui-ci permet de résoudre le modèle sur plusieurs coeurs de calcul simultanément, la parallélisation étant assurée par la norme MPI (Message Passing Interface). Environ un mois de calcul parallélisé sur 16 nœuds (448 coeurs) a été nécessaire pour rejouer la période 1979-2022.

2.8 Les paramètres intégrés

Dans cette étude, divers paramètres intégrés de vagues sont utilisés pour qualifier et caractériser les états de mer. Leurs calculs à partir du spectre de vagues $E(f, \theta)$ en $\text{m}^2/\text{Hz}/\text{rad}$ sont rappelés ici.

La hauteur significative des vagues H_s est calculée selon la formule suivante :

$$H_s = H_{m0} = 4\sqrt{E} \quad (\text{Eq. 21})$$

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

$$E = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \int_0^{2\pi} E(f, \theta) df d\theta \quad (\text{Eq. 22})$$

La période moyenne des vagues T_{m02} est calculée selon la formule :

$$T_{m(0,2)} = \left(\frac{\int_{f_{min}}^{f_{max}} f^2 E(f, \theta) df d\theta}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} E(f) df} \right)^{-0.5} \quad (\text{Eq. 23})$$

avec

$$E(f) = \int_0^{2\pi} E(f, \theta) d\theta \quad (\text{Eq. 24})$$

La direction moyenne de provenance des vagues D_m est calculée selon la formule suivante :

$$D_m = \arctan \left(\frac{b}{a} \right) \quad (\text{Eq. 25})$$

avec

$$a = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \int_0^{2\pi} \cos(\theta) E(f, \theta) df d\theta \quad (\text{Eq. 26})$$

⁷ <https://wwz.ifremer.fr/Recherche/Infrastructures-de-recherche/Infrastructures-numeriques/Pole-de-Calcul-et-de-Donnees-pour-la-Mer>

$$b = \int_{f_{min}}^{f_{max}} \int_0^{2\pi} \sin(\theta) E(f, \theta) df d\theta \quad (\text{Eq. 27})$$

L'angle θ indique la direction de provenance des vagues. Les directions sont comptées positivement dans le sens horaire, et exprimées par rapport au nord géographique (convention nautique).

3. Validation du rejet d'états de mer

Cette partie présente les résultats de la validation du rejet HYWAT par comparaison aux observations satellitaires issues des altimètres d'une part, et par rapport aux observations *in situ* des bouées houlographes du réseau CANDHIS maintenu par le CEREMA d'autre part. Comme indiqué à la section 2.5, les données altimétriques ont également été utilisées pour optimiser la paramétrisation du modèle. Les observations des bouées du réseau CANDHIS constituent en revanche des données de validation indépendantes.

La période considérée pour cette étape de validation s'étend des années 1990 à 2021, l'année 2022 n'ayant pas encore été simulée au moment du travail de validation, qui couvre donc 43 des 44 années du rejet HYWAT.

La validation proposée s'appuie sur différents indicateurs statistiques dont les formules mathématiques sont rappelées ici. Pour un paramètre X , les résultats du modèle sont notés X_{mod} et les observations sont notées X_{obs} . N représente le nombre de valeurs colocalisées disponibles, c'est-à-dire le nombre de correspondance, en un même lieu (x, y) et pour un même instant t , de valeurs modélisées $X_{mod}(x, y, t)$ et de valeurs observées $X_{obs}(x, y, t)$. Les valeurs statistiques ne sont calculées que lorsque le nombre de valeurs à comparer est suffisant pour être représentatif.

Les valeurs moyennes, MEAN, sont calculées selon la formule suivante :

$$\text{MEAN}(X) = \frac{1}{N} \sum_{1}^{N} X \quad (\text{Eq. 28})$$

et les valeurs moyennes quadratiques, RMS (Root Mean Square), sont définies par :

$$\text{RMS}(X) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{1}^{N} X^2} \quad (\text{Eq. 29})$$

Les biais, BIAS, entre les résultats du modèle X_{mod} et les observations X_{obs} sont calculés selon la formule :

$$\text{BIAS}(X) = \frac{1}{N} \sum_{1}^{N} (X_{mod} - X_{obs}) \quad (\text{Eq. 30})$$

et les biais normalisés, NBIAS (Normalized Bias), sont définis par :

$$\text{NBIAS}(X) = \frac{\text{BIAS}(X)}{\text{MEAN}(X_{obs})} \quad (\text{Eq. 31})$$

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

$$\text{RMSE}(X) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{1}^{N} (X_{mod} - X_{obs})^2} \quad (\text{Eq. 32})$$

et les erreurs quadratiques moyennes normalisées, NRMSE (Normalized Root Mean Square Error), sont définies par :

$$\text{NRMSE}(X) = \frac{\text{RMSE}(X)}{\text{RMS}(X_{obs})} \quad (\text{Eq. 33})$$

Les indices de dispersion, SI (Scatter Index), sont calculés selon la formule suivante :

$$SI(X) = 100 \left(\frac{RMSE}{MEAN(X_{obs})} \right) \quad (\text{Eq. 34})$$

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

$$a = \frac{\hat{\sigma}X_{obs}X_{mod}}{(\hat{\sigma}X_{obs})^2} \quad (\text{Eq. 35})$$

$$b = \widehat{X_{mod}} - a \widehat{X_{obs}} \quad (\text{Eq. 36})$$

et les coefficients de corrélation R sont définis par :

$$R = \left(\frac{\hat{\sigma}X_{mod}X_{obs}}{\hat{\sigma}X_{mod} \hat{\sigma}X_{obs}} \right) \quad (\text{Eq. 37})$$

avec

$$\hat{\sigma}X_{obs}X_{mod} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{obs}(i) - \overline{X_{obs}}) \times (X_{mod}(i) - \overline{X_{mod}}) \quad (\text{Eq. 38})$$

$$\hat{\sigma}X_{obs} = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{obs}(i) - \overline{X_{obs}})^2 \right)} \quad (\text{Eq. 39})$$

$$\hat{\sigma}X_{mod} = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{mod}(i) - \overline{X_{mod}})^2 \right)} \quad (\text{Eq. 40})$$

qui sont respectivement les estimateurs de la covariance (Eq. 38) et les écarts-types des observations (Eq. 39) et des résultats du modèle (Eq. 40).

Pour la direction des vagues, l'expression $X(i) - \bar{X}$ des équations (Eq. 39) et (Eq. 40) est remplacée par $\sin(X(i) - \bar{X})$, avec :

$$\bar{X} = atan2 \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sin X, \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \cos X \right) \quad (\text{Eq. 41})$$

3.1 Validation à l'aide des satellites

Les mesures altimétriques par satellite fournissent des informations sur les hauteurs significatives de vagues, et permettent des observations denses sur l'ensemble des océans. Elles offrent ainsi un outil de validation à grande échelle des modèles de propagation des vagues. 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. Les mesures altimétriques sont de ce fait 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 d'un modèle de propagation des vagues doivent donc être interprétées avec précaution à proximité des côtes. Les limitations des altimètres en zone côtière étant encore plus importantes dans des baies semi-fermées ou en présence d'îles (Gomez-Enri et al., 2010 ; Quartly et Kurekin, 2020), ces zones n'ont pas été utilisées ici pour la comparaison avec les résultats du modèle.

La base de données altimétriques du CERSAT⁸ a été utilisée pour la validation du rejet HYWAT. Cette base de données contient les observations de hauteurs significatives de vagues issues des altimètres ENVISAT, ERS1, ERS2, TOPEX, POSEIDON, CRYOSAT, JASON1, JASON2, SARAL et GFO. Pour la comparaison au modèle, les données ayant fait l'objet d'une inter-calibration et d'une correction⁹ sur la période s'étendant de janvier 1991 à avril 2017 ont été utilisées. Pour chaque valeur de $H_{s,obs}$ donnée par chacun des altimètres, la valeur de $H_{s,mod}$ colocalisée sous la trace du satellite au même instant a été extraite des résultats du modèle. Afin de minimiser le bruit présent dans les valeurs observées, une moyenne en latitude et longitude, tous les 0.5°, a ensuite été effectuée. Ces valeurs moyennes ont finalement été utilisées pour le calcul des scores.

Les Figure 5 et Figure 6 illustrent les hauteurs significatives moyennes $MEAN(H_{s,obs})$ et quadratiques moyennes $RMS(H_{s,obs})$ observées par altimètre sur l'ensemble de la grille, à une résolution de 0.5°, sur la période 1991-2017.

Les Figure 7 et Figure 8 représentent la couverture spatiale des biais normalisés $NBIAS(H_s)$ ainsi que celle des erreurs quadratiques moyennes normalisées $NRMSE(H_s)$ calculés sur la même période.

La Figure 9 illustre les erreurs observées en fonction des valeurs de hauteurs significatives, et montre que les erreurs normalisées présentent des valeurs relativement élevées pour les états de mer peu énergétiques, du fait de la normalisation par de faibles valeurs de H_s , mais que les erreurs absolues sont faibles. Le biais est inférieur à 0.5 m pour les hauteurs significatives inférieures à 7 m (inférieur à 1 m pour des valeurs plus élevées), ce qui représente un biais normalisé inférieur à 10% pour toutes les gammes de hauteurs significatives. L'erreur RMS est inférieure à 0.5 m pour les hauteurs significatives inférieures à 5 m (inférieure à 1.2 m pour des valeurs plus élevées), ce qui représente une erreur RMS normalisée inférieure à 15% pour les gammes de hauteurs significatives supérieures à 1.5 m. L'indice de dispersion est proche de 10% pour les hauteurs significatives supérieures à 2 m. Ces scores montrent le bon comportement du modèle pour la plupart des gammes de hauteurs significatives, avec une légère tendance à la sous-estimation pour les valeurs les plus fortes.

Enfin, la Figure 10 présente le diagramme de dispersion des valeurs observées et modélisées. Le coefficient de corrélation R est de 0.95, et la pente de la droite de régression linéaire est proche de 1 (1.010), pour une ordonnée à l'origine proche de 0 (0.008 m), ce qui confirme la

⁸ <ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/swath/altimeters/waves/data>

⁹ ftp://ftp.ifremer.fr/ifremer/cersat/products/swath/altimeters/waves/documentation/altimeter_wave_merge_11.4.pdf

très bonne capacité du modèle à reproduire les hauteurs significatives observées par les altimètres.

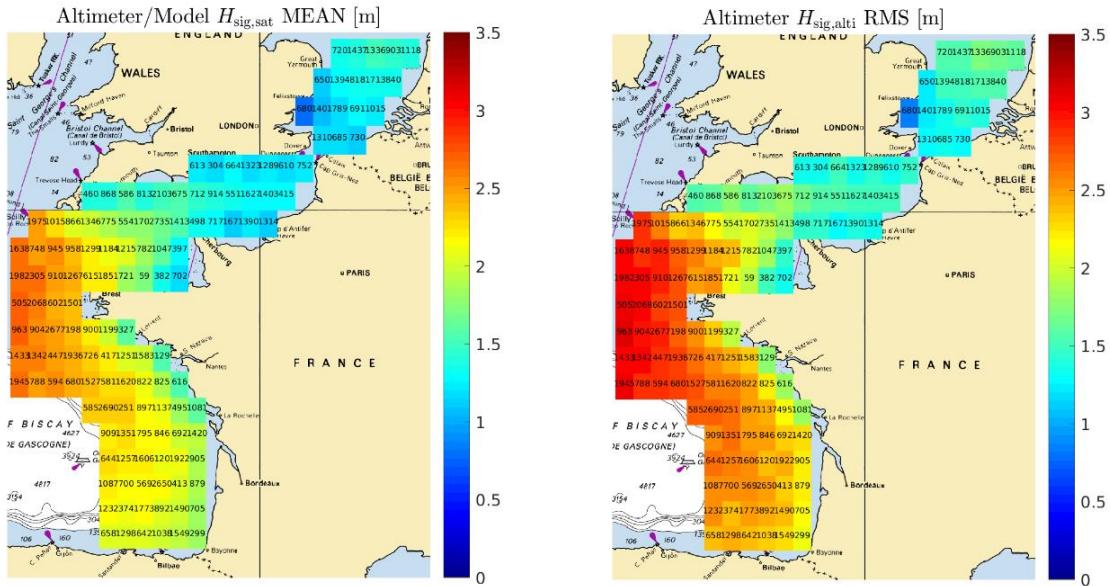


Figure 5 : Carte des H_s moyennes observées par altimètre sur la période 1991-2017, à une résolution de 0.5°. Les chiffres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul.

Figure 6 : Carte des moyennes quadratiques des H_s observées par altimètre sur la période 1991-2017, à une résolution de 0.5°. Les chiffres indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul.

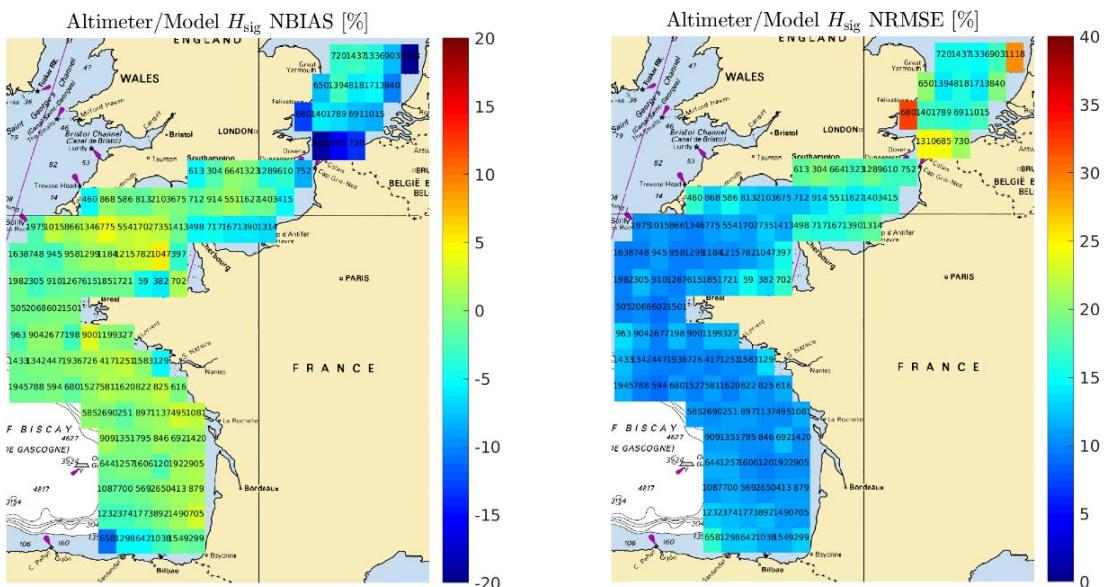


Figure 7 : Carte des biais normalisés NBIAS(H_s) sur la période 1991-2017, à une résolution de 0.5°. Les numéros indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul.

Figure 8 : Carte des erreurs quadratiques moyennes normalisées NRMSE(H_s) sur la période 1991-2017, à une résolution de 0.5°. Les numéros indiqués représentent le nombre de valeurs utilisées pour le calcul.

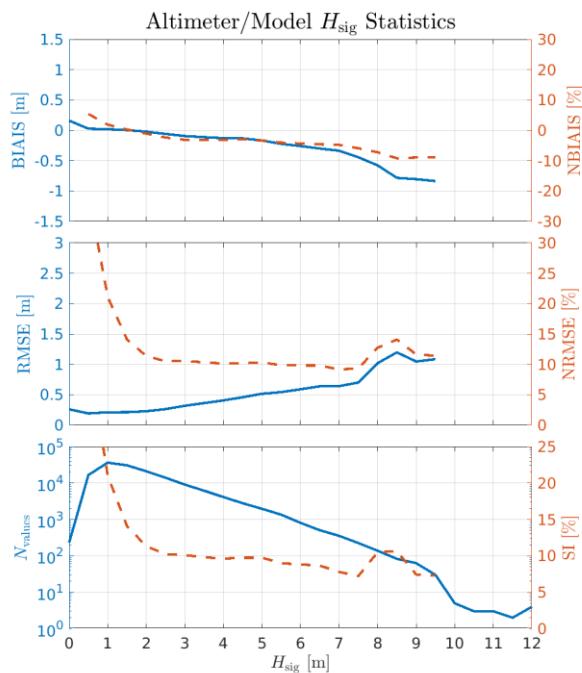


Figure 9 : Qualification des erreurs (BIAS, RMSE, SI) de H_s en fonction des échelles de H_s sur la période 1991-2017.

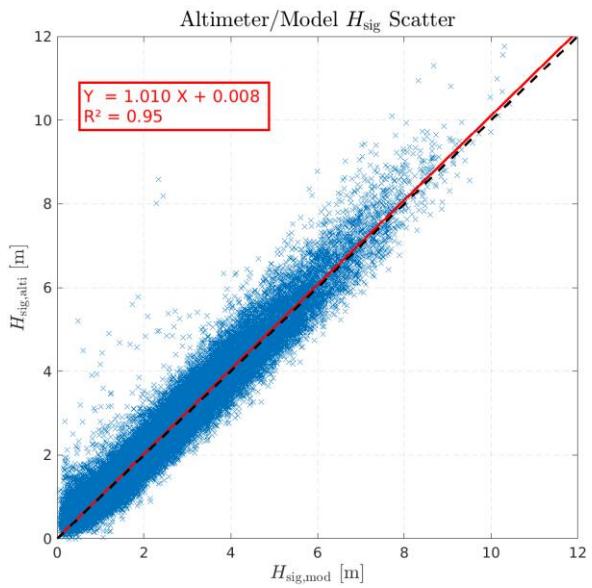


Figure 10 : Corrélation des valeurs de H_s observées et modélisées sur la période 1991-2017.

Afin de valider plus précisément les résultats du modèle HYWAT dans la zone d'étude, les cellules altimétriques contenues dans le rectangle $45.5^{\circ}\text{N} - 46.5^{\circ}\text{N}$, $3.5^{\circ}\text{O} - 1.5^{\circ}\text{O}$ ont par ailleurs été analysées (Figure 11 et Figure 12). Les résultats montrent une très bonne corrélation (0.96) entre les hauteurs significatives mesurées par les altimètres et celles simulées par le modèle. Le biais entre les mesures altimétriques et les résultats du modèle est négatif, d'environ 5 cm, soit un biais normalisé inférieur à 4%. L'erreur quadratique moyenne s'élève à approximativement 40 cm, pour une erreur quadratique normalisée d'environ 10%.

En conclusion, les excellents scores du jeu HYWAT en ce qui concerne la hauteur significative des vagues permettent d'avoir une grande confiance dans les statistiques d'états de mer produites dans le cadre de cette étude.

Le lecteur intéressé pourra se référer à l'annexe indépendante (section A) afin de consulter les erreurs spatialisées pour chaque année de la période de comparaison 1991-2017.

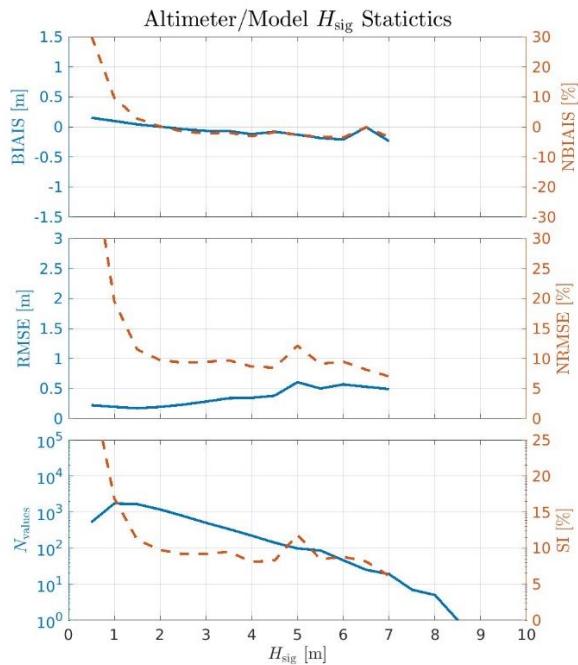


Figure 11 : Qualification des erreurs (BIAS, RMSE, SI) de H_s en fonction des échelles de H_s observées dans une cellule au voisinage de la zone d'étude sur la période 1991-2017.

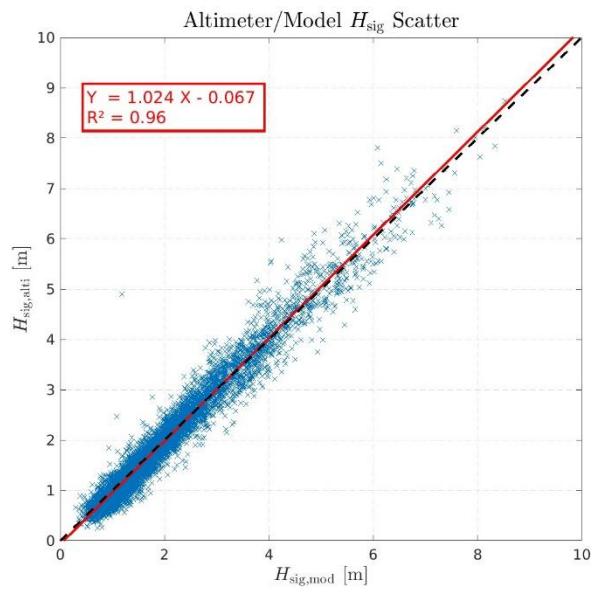


Figure 12 : Corrélation des valeurs de H_s modélisées et observées au voisinage de la zone d'étude sur la période 1991-2017.

3.2 Validation grâce aux bouées houlographes du réseau CANDHIS

L'observation *in situ* par les bouées houlographes permet une validation du modèle plus précise que par l'altimétrie satellitaire, notamment près de la côte. Il s'agit cependant de validations ponctuelles susceptibles d'être soumises à des erreurs de représentativité.

Pour cette validation, les observations des bouées houlographes du réseau CANDHIS disponibles durant la période 1979-2022 ont été considérées (Figure 13 et Figure 14).

Les informations relatives aux différentes campagnes de mesure sont synthétisées dans le Tableau 1.

Le point de sortie du modèle le plus proche de chaque bouée a été utilisé afin de comparer les valeurs observées à celles modélisées.

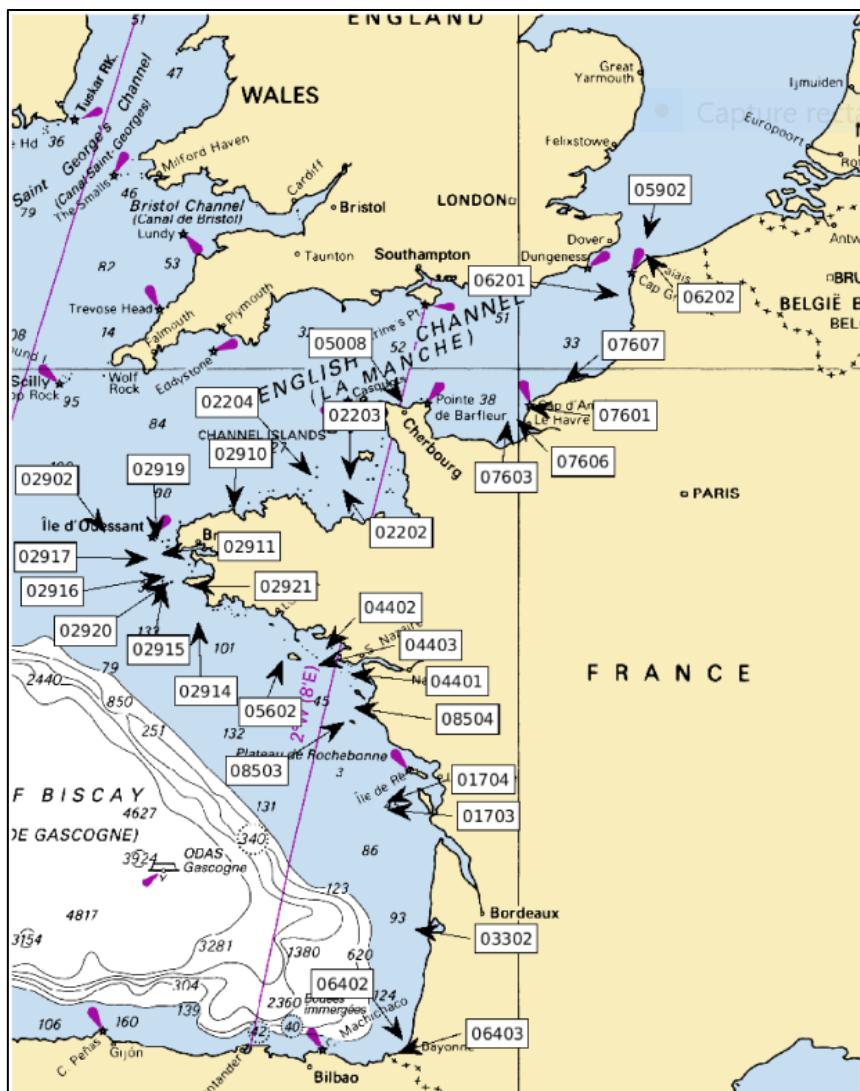


Figure 13 : Carte illustrant les positions des bouées du réseau CANDHIS utilisées pour la validation du rejet HYWAT.

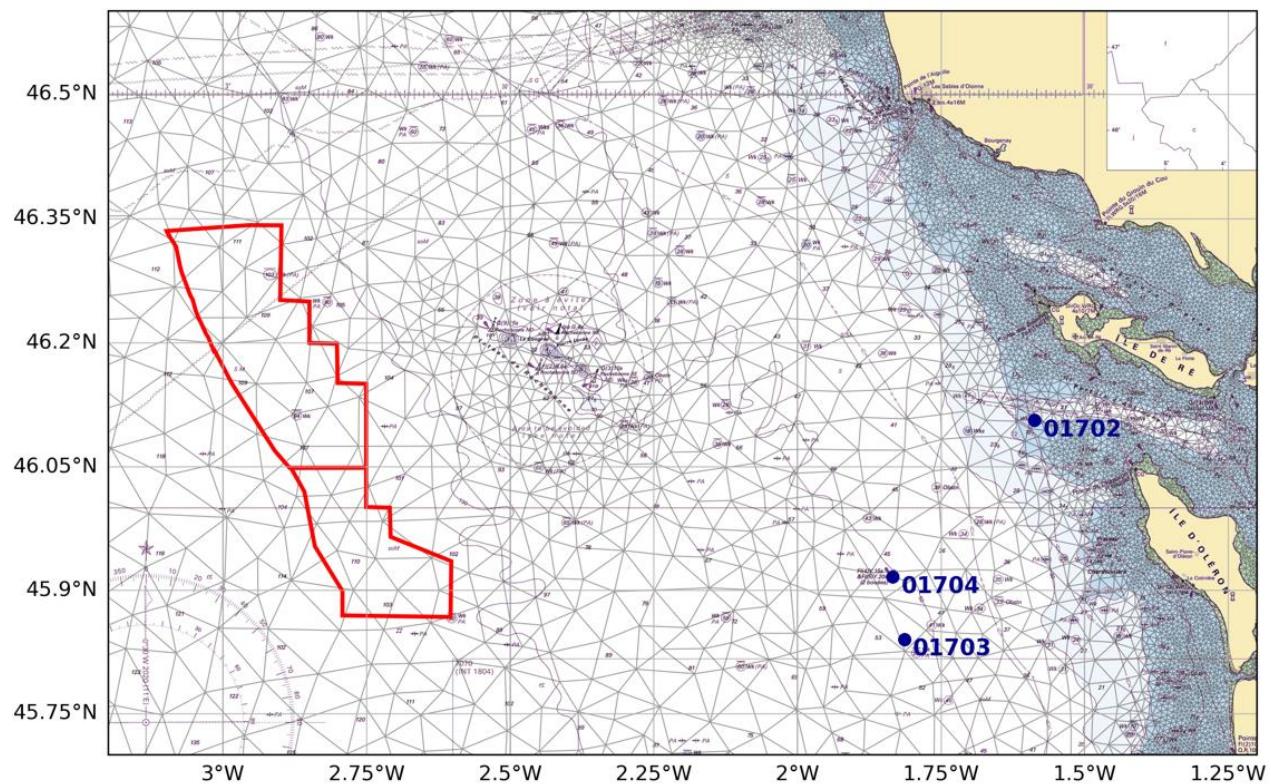


Figure 14 : Carte illustrant les zones Golfe de Gascogne Nord et Sud ainsi que les bouées du réseau CANDHIS les plus proches.

Code campagne	Nom campagne	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Prof. (m)	Date de début (jj/mm/aaaa)	Date de fin (jj/mm/aaaa)
05901	Dunkerque	1.76833	51.16167	25	26/12/1987	04/09/1996
05902	Ruytingen	1.76700	51.16083	25	16/12/2009	15/02/2010
06202	Calais	1.75833	51.02167	30	23/05/2012	11/10/2012
06201	Vergoyer	1.37000	50.65917	30	21/01/2010	27/05/2013
08001	Cayeux	1.17250	50.29750	25	21/08/1999	06/02/2001
07608	Penly	1.20100	49.98933	11	07/11/2017	11/07/2022
07607	Paluel	0.63112	49.87167	12	22/06/2016	12/07/2022
07601	Antifer	0.12645	49.64873	17	02/07/1996	07/09/2010
07606	Le Havre - Metzinger	-0.03400	49.54400	17	24/02/2011	17/06/2013
07602	Le Havre	-0.15900	49.52033	17	21/08/1996	18/12/1997
07603	Le Havre LHA	-0.15900	49.52033	17	01/01/1997	20/09/2008
05008	Cherbourg (extérieur)	-1.62000	49.69500	25	30/09/2003	18/04/2022
05009	Flamanville	-1.89845	49.54290	17	03/10/2018	20/12/2020
03501	Saint-Malo	-2.01667	48.70000	10	09/08/1993	23/09/1995
02204	Bréhat	-2.88947	49.02642	50	21/06/2016	04/02/2021
02203	Les Minquiers Nord	-2.34300	48.98842	35	30/03/2011	24/10/2013
02202	Les Minquiers 2	-2.44300	48.89250	38	20/08/1997	16/05/2009
02910	Roscoff (Port de Bloscon)	-3.96067	48.71667	5	21/10/2005	01/03/2015
02902	Ouessant large	-5.75000	48.50000	110	30/08/1985	27/11/2008
02919	Kereon	-5.02767	48.42833	25	02/10/2012	17/04/2014
02911	Les Pierres Noires	-4.96833	48.29033	60	15/10/2005	31/12/2022
02903	Toulinguet	-4.64183	48.30650	25	21/12/1994	10/07/1997
02917	Ouessant sud	-5.15233	48.24700	94	30/01/2014	29/04/2014
02916	Ile de Sein Nord	-4.92050	48.08133	70	02/10/2012	22/04/2013
02920	Ile de Sein	-4.86367	48.02133	25	14/10/2013	10/04/2014
02915	Ile de Sein Sud	-4.92050	48.00600	45	02/10/2012	22/04/2013
02921	Esquibien	-4.54617	47.99137	16	03/12/2013	30/09/2014
02914	Penmarc'h	-4.45000	47.65000	105	09/11/2009	27/02/2010
05602	Belle-Île	-3.28500	47.28500	45	18/10/2010	31/12/2022
04402	Le Croisic	-2.67667	47.39667	17	03/04/2003	02/07/2003
04403	Plateau du Four	-2.78700	47.23900	30	01/04/2008	31/12/2022
04401	Saint-Nazaire	-2.33833	47.15333	17	02/06/1999	30/12/2006
08504	Ile d'Yeu Nord	-2.29500	46.83322	14	21/06/2005	31/12/2022
08501	Ile d'Yeu	-2.41667	46.66667	47	15/09/1992	10/06/1998
08502	Ile d'Yeu	-2.42750	46.69083	32	06/06/1998	03/02/2000
08503	Ile d'Yeu	-2.42750	46.69083	32	31/07/2000	21/01/2005
01702	Oléron	-1.58700	46.10650	20	20/09/2001	01/12/2003
01704	Oléron Large	-1.83362	45.91633	52	03/07/2014	31/12/2022
01703	Oléron Shom	-1.81367	45.84033	57	02/01/2010	08/04/2011
03302	Cap Ferret	-1.44667	44.65250	54	28/08/2001	31/12/2022
06401	Bayonne	-1.54333	43.54667	20	09/11/1989	25/07/1994
06402	Anglet	-1.61500	43.53217	50	24/11/2009	31/12/2022
06403	Saint-Jean-de-Luz	-1.67433	43.40300	20	24/04/2013	31/12/2022

Tableau 1 : Informations relatives aux différentes bouées du réseau CANDHIS considérées pour la validation du rejet HYWAT.

Les résultats des comparaisons aux observations des bouées du réseau CANDHIS pour les paramètres de hauteur significative H_s , période moyenne T_{m02} et direction moyenne D_m sont synthétisés dans les Tableau 2, Tableau 3 et Tableau 4.

Pour davantage d'éléments de comparaison, les diagrammes de dispersion relatifs à chaque bouée sont présentés dans le rapport annexe indépendant (section B).

Les scores obtenus montrent une très bonne capacité du modèle à reproduire les caractéristiques des états de mer dans la zone côtière. En effet, en ce qui concerne la hauteur significative, les comparaisons sont très bonnes : les biais sont inférieurs à 10 cm, les erreurs RMS normalisées sont en-dessous de 20%, les corrélations sont supérieures à 0.95, les indices de dispersion varient de 10% à 30% et les coefficients de régression linéaire sont proches de l'unité, pour la plupart des bouées. Une tendance à la sous-estimation est toutefois observée en frontière du domaine de calcul : sur les côtes du Pas-de-Calais et des Pyrénées Atlantiques. Pour ce qui est des périodes moyennes, les scores obtenus pour la majorité des bouées sont également satisfaisants. Les biais sont faibles et ne dépassent pas 1 s, et les erreurs RMS normalisées sont comprises entre 10% et 30%. Selon les sites et leur exposition à différents systèmes d'états de mer auxquels la période moyenne peut être sensible, les indices de dispersion peuvent être plus élevés et les coefficients de corrélation plus faibles. Enfin, en ce qui concerne la direction moyenne, les scores obtenus sont aussi très bons : les biais sont inférieurs à 10°, les indices de dispersion sont en-dessous de 10%, les corrélations sont supérieures à 0.9 et les coefficients de régression linéaire sont proches de l'unité, pour la plupart des bouées directionnelles. Seules les bouées mouillées très près de la côte présentent des erreurs un peu plus importantes. Cela est le cas par exemple des bouées de Roscoff (02910) et Antifer (07610), mouillées dans des endroits partiellement abrités par les digues des ports de Roscoff et d'Antifer, respectivement. Or, avec une résolution spatiale de 200 m à la côte, le maillage ne résout pas ces éléments, ce qui provoque des erreurs pouvant être significatives, notamment sur les paramètres de phase (T_{m02} et D_m). Néanmoins, les scores pour la hauteur significative des vagues restent très satisfaisants.

Les deux bouées Oléron Large 01704 et Oléron Shom 01703, au voisinage (sud-est) de la macro-zone d'étude, présentent des résultats similaires.

La comparaison entre les paramètres de vagues modélisés et mesurés par la bouée Oléron Large (01704) montre dans l'ensemble une très bonne concordance entre les deux sources de données pour la hauteur significative H_s , la période moyenne T_{m02} et pour la direction moyenne D_m avec des corrélations respectives de 0.96, 0.89 et 0.96 et des biais très faibles (6 cm, 0.3 s et -1.4°). Les hauteurs significatives les plus fortes sont cependant légèrement sous-estimées par le modèle. L'indice de dispersion est de 16% pour H_s , 14% pour T_{m02} et 7% pour D_m .

Pour ce qui est de la bouée Oléron Shom (01703), qui dispose d'une période de mesures beaucoup plus courte, le modèle présente de très bons scores également pour les trois paramètres H_s , T_{m02} et D_m , avec des corrélations respectives de 0.98, 0.92 et 0.97, pour des biais très faibles (5 cm, 0.3 s et -3.6°). L'indice de dispersion est proche de 10% pour ces trois paramètres.

Ces scores sont conformes à l'état de l'art actuel en modélisation spectrale des états de mer et démontrent une très bonne capacité du modèle à reproduire les hauteurs significatives observées, avec toutefois une légère tendance à la sous-estimation des valeurs les plus fortes, principalement due une sous-estimation des vents forts par les modèles météorologiques. Les résultats obtenus sont également très bons en termes de directions moyennes des vagues et satisfaisants en ce qui concerne les périodes moyennes.

Code campagne	\bar{X}_{obs} (m)	\bar{X}_{mod} (m)	Bias (m)	RMSE (m)	NRMSE	SI (%)	a	b (m)	R
05901	0.99	0.85	-0.14	0.26	0.22	25.79	0.78	0.08	0.94
05902	1.16	1.07	-0.10	0.28	0.21	23.81	0.75	0.20	0.93
06202	0.82	0.77	-0.05	0.17	0.18	21.18	0.82	0.10	0.95
06201	1.00	0.97	-0.03	0.20	0.17	20.36	0.84	0.13	0.96
08001	1.87	1.72	-0.15	0.32	0.15	17.25	0.86	0.10	0.97
07608	0.78	0.73	-0.04	0.21	0.21	26.63	0.80	0.11	0.94
07607	0.82	0.83	0.01	0.22	0.22	27.36	0.84	0.15	0.93
07601	0.67	0.64	-0.04	0.21	0.23	30.56	0.87	0.05	0.94
07606	0.75	0.72	-0.03	0.17	0.19	22.87	0.90	0.05	0.95
07602	0.72	0.69	-0.03	0.21	0.22	28.92	0.81	0.11	0.94
07603	0.74	0.76	0.02	0.17	0.18	22.82	0.88	0.11	0.95
05008	0.67	0.70	0.02	0.16	0.19	23.93	0.91	0.09	0.94
05009	1.37	1.31	-0.06	0.24	0.15	17.34	0.95	0.01	0.96
03501	0.97	0.99	0.02	0.22	0.19	22.28	0.99	0.03	0.94
02204	1.74	1.77	0.03	0.28	0.14	15.86	0.92	0.18	0.97
02203	0.98	1.18	0.20	0.26	0.23	26.33	1.04	0.16	0.96
02202	1.11	1.20	0.09	0.20	0.16	18.23	0.96	0.13	0.96
02910	0.42	0.45	0.02	0.13	0.24	29.84	0.85	0.09	0.92
02902	1.98	2.30	0.32	0.47	0.21	23.56	1.11	0.10	0.97
02919	1.74	2.14	0.40	0.74	0.36	42.39	0.94	0.51	0.85
02911	2.03	2.16	0.13	0.33	0.14	16.40	0.95	0.22	0.97
02903	0.68	0.88	0.20	0.26	0.32	38.23	1.15	0.10	0.96
02917	3.51	3.48	-0.04	0.45	0.11	12.88	0.88	0.38	0.98
02916	2.45	2.58	0.13	0.37	0.13	15.13	0.88	0.41	0.96
02920	2.25	2.60	0.35	0.47	0.18	20.95	1.01	0.31	0.97
02915	2.50	2.73	0.23	0.39	0.14	15.69	0.99	0.25	0.97
02921	0.98	1.02	0.04	0.17	0.14	17.13	0.91	0.13	0.98
02914	2.93	3.02	0.09	0.34	0.10	11.64	0.95	0.24	0.98
05602	1.85	1.89	0.04	0.29	0.13	15.60	0.93	0.18	0.97
04402	0.61	0.56	-0.05	0.12	0.17	20.27	0.89	0.01	0.96
04403	1.27	1.32	0.04	0.22	0.14	17.25	1.05	-0.01	0.97
04401	0.92	0.98	0.06	0.18	0.16	19.07	1.01	0.05	0.97
08504	1.21	1.30	0.09	0.19	0.14	15.68	0.98	0.10	0.97
08501	2.68	2.62	-0.06	0.35	0.11	12.92	0.94	0.09	0.97
08502	1.33	1.43	0.10	0.20	0.14	15.09	0.94	0.18	0.96
08503	2.39	2.49	0.10	0.32	0.12	13.17	1.00	0.09	0.97
01702	2.81	1.88	-0.93	1.10	0.36	39.02	0.58	0.24	0.93
01704	1.74	1.80	0.06	0.28	0.14	16.29	0.93	0.18	0.96
01703	1.67	1.72	0.05	0.23	0.12	13.54	0.92	0.18	0.98
03302	1.78	1.84	0.06	0.29	0.14	16.45	0.88	0.27	0.97
06401	1.90	1.71	-0.18	0.56	0.24	29.28	0.69	0.40	0.94
06402	1.72	1.69	-0.03	0.32	0.16	18.81	0.82	0.28	0.96
06403	1.54	1.57	0.03	0.32	0.18	21.07	0.85	0.26	0.95

Tableau 2 : Scores (voir Glossaire) du rejet HYWAT pour la hauteur significative H_s sur la période de mesure de chaque bouée du réseau CANDHIS considérée pour la validation.

Code campagne	\bar{X}_{obs} (s)	\bar{X}_{mod} (s)	Bias (s)	RMSE (s)	NRMSE	SI (%)	a	b (s)	R
05901	4.10	4.06	-0.04	0.59	0.14	14.41	0.63	1.47	0.65
05902	4.47	4.28	-0.19	0.56	0.12	12.55	0.63	1.47	0.78
06202	4.10	4.16	0.06	0.67	0.16	16.36	0.47	2.23	0.46
06201	4.38	4.60	0.22	0.88	0.20	20.19	0.65	1.75	0.58
08001	4.96	4.87	-0.09	0.68	0.13	13.62	0.73	1.25	0.77
07608	4.22	4.74	0.52	1.21	0.28	28.77	0.80	1.34	0.59
07607	4.39	4.76	0.37	1.03	0.23	23.45	0.71	1.63	0.58
07601	4.12	4.74	0.62	1.66	0.39	40.25	0.63	2.14	0.33
07606	4.05	4.04	-0.01	1.16	0.28	28.59	0.35	2.64	0.32
07602	5.08	3.93	-1.15	1.40	0.27	27.48	0.72	0.26	0.56
07603	5.05	3.89	-1.16	1.36	0.27	26.91	0.74	0.18	0.60
05008	4.08	4.31	0.23	1.08	0.26	26.50	0.86	0.82	0.49
05009	5.76	5.87	0.11	1.18	0.20	20.51	1.04	-0.11	0.77
03501	5.22	5.27	0.05	1.07	0.20	20.49	0.94	0.38	0.78
02204	6.22	6.17	-0.05	0.87	0.14	13.98	0.86	0.83	0.85
02203	5.05	5.39	0.34	0.82	0.16	16.20	0.95	0.59	0.86
02202	5.35	5.50	0.15	0.83	0.15	15.56	0.92	0.58	0.86
02910	4.62	5.34	0.72	2.00	0.42	43.20	1.40	-1.15	0.67
02902	7.08	6.41	-0.67	0.91	0.13	12.93	1.01	-0.73	0.90
02919	6.48	6.13	-0.35	1.11	0.17	17.08	0.74	1.36	0.69
02911	6.73	6.79	0.06	0.76	0.11	11.25	0.93	0.57	0.89
02903	4.79	5.63	0.83	1.53	0.31	31.84	1.16	0.07	0.69
02917	7.85	7.76	-0.09	0.69	0.09	8.81	0.83	1.27	0.91
02916	6.83	6.91	0.08	0.66	0.09	9.72	0.85	1.07	0.91
02920	6.42	7.19	0.77	1.07	0.16	16.58	0.97	0.97	0.82
02915	6.75	6.99	0.25	0.68	0.10	10.03	0.94	0.63	0.90
02921	5.97	6.50	0.52	1.13	0.18	18.92	0.98	0.64	0.84
02914	6.97	7.14	0.17	0.84	0.12	12.00	0.83	1.37	0.87
05602	6.24	6.50	0.26	0.79	0.12	12.74	0.93	0.69	0.89
04402	4.40	4.56	0.16	1.24	0.26	28.10	0.88	0.67	0.75
04403	5.30	5.63	0.33	0.95	0.17	17.90	0.96	0.53	0.84
04401	4.78	5.41	0.63	1.31	0.27	27.40	0.96	0.83	0.71
08504	5.57	6.10	0.53	1.06	0.18	18.96	0.90	1.09	0.84
08501	7.05	7.00	-0.05	0.66	0.09	9.38	0.84	1.11	0.91
08502	5.62	5.98	0.36	0.72	0.13	12.86	0.95	0.62	0.89
08503	6.92	7.03	0.11	0.63	0.09	9.11	0.90	0.79	0.92
01702	6.67	6.85	0.18	0.77	0.11	11.55	0.95	0.52	0.90
01704	6.20	6.48	0.28	0.84	0.13	13.57	0.90	0.90	0.89
01703	6.04	6.31	0.26	0.75	0.12	12.44	0.90	0.88	0.92
03302	6.58	7.04	0.46	1.03	0.15	15.61	0.84	1.52	0.86
06401	7.19	7.84	0.65	1.53	0.20	21.36	0.77	2.28	0.81
06402	6.96	7.55	0.58	1.13	0.16	16.17	0.89	1.38	0.88
06403	7.13	7.97	0.84	1.37	0.18	19.17	0.99	0.90	0.89

Tableau 3 : Scores (voir Glossaire) du rejet HYWAT pour la période moyenne T_{m02} sur la période de mesure de chaque bouée du réseau CANDHIS considérée pour la validation.

Code campagne	\bar{X}_{obs} (deg)	\bar{X}_{mod} (deg)	Bias (deg)	RMSE (deg)	NRMSE	SI	a	b (deg)	R
05902	348.95	356.44	1.70	27.30	0.08	7.82	0.99	3.29	0.98
06202	287.12	283.74	-0.90	31.15	0.11	10.85	1.03	-7.78	0.96
06201	274.80	274.42	0.84	23.58	0.09	8.58	0.99	2.50	0.97
07608	308.08	298.08	-9.83	19.84	0.06	6.44	1.01	-13.06	0.99
07607	319.07	301.19	-16.38	25.89	0.08	8.11	1.00	-16.27	0.99
07606	309.83	311.73	3.23	30.64	0.10	9.89	1.01	1.77	0.96
05008	337.47	326.57	-7.36	25.39	0.08	7.52	0.95	3.82	0.98
05009	269.85	273.58	4.30	12.64	0.05	4.68	0.96	14.06	0.93
02204	284.92	285.19	-0.24	19.87	0.07	6.97	1.02	-6.71	0.96
02203	288.44	288.36	-1.58	23.51	0.08	8.15	1.07	-20.63	0.96
02202	300.66	297.88	-2.02	22.57	0.08	7.51	1.02	-8.09	0.97
02910	30.66	30.56	1.23	23.58	0.77	76.92	0.97	2.31	0.61
02919	253.90	258.58	5.90	23.41	0.09	9.22	0.97	12.78	0.84
02911	269.15	273.18	3.57	15.55	0.06	5.78	1.03	-5.30	0.92
02903	233.91	246.99	10.88	37.60	0.16	16.07	1.06	-3.00	0.85
02917	273.17	272.56	-0.69	13.46	0.05	4.93	0.98	5.39	0.92
02916	284.13	274.76	-7.96	20.46	0.07	7.20	1.02	-13.77	0.95
02920	236.94	246.89	10.24	15.75	0.07	6.65	0.75	70.43	0.78
02915	260.13	267.16	7.27	16.38	0.06	6.30	0.94	22.67	0.92
02921	232.46	234.53	1.98	8.34	0.04	3.59	0.86	35.36	0.83
02914	260.95	263.80	3.83	26.56	0.10	10.18	0.87	35.62	0.85
05602	269.40	269.41	0.71	17.44	0.06	6.47	0.92	22.44	0.91
04403	260.28	261.04	-0.81	28.58	0.11	10.98	1.05	-13.88	0.93
08502	274.40	278.40	4.59	19.47	0.07	7.09	0.94	21.71	0.92
01704	284.81	284.16	-1.41	18.89	0.07	6.63	1.07	-21.45	0.96
01703	289.44	286.61	-3.64	22.56	0.08	7.80	1.07	-23.03	0.97
03302	295.26	293.17	-1.91	13.26	0.04	4.49	0.91	25.76	0.91
06402	305.81	304.14	-1.69	9.08	0.03	2.97	0.88	34.29	0.90
06403	314.11	308.77	-5.32	10.27	0.03	3.27	0.68	95.69	0.79

Tableau 4 : Scores (voir Glossaire) du rejet HYWAT pour la direction moyenne D_m sur la période de mesure de chaque bouée du réseau CANDHIS considérée pour la validation.

4. Analyse des états de mer dans la zone d'étude

Cette partie vise à caractériser le climat moyen des états de mer dans la zone d'étude incluant les zones Golfe de Gascogne Nord et Golfe de Gascogne Sud (Figure 1).

Le rejet d'états de mer décrit à la section 2, et validé à la section 3, a été utilisé pour cette analyse statistique. Il couvre, pour rappel, la période s'étendant de 1979 à 2022, soit 44 ans. La résolution approximative de la grille de calcul dans la zone étudiée est comprise entre 3 km (plateau de Rochebonne) et 8 km.

4.1 Analyse de l'état de mer total

Cette partie présente dans un premier temps la répartition spatiale des hauteurs significatives des vagues dans la zone d'étude. La Figure 15 et la Figure 16 illustrent respectivement les hauteurs significatives moyennes et maximales des vagues sur la période rejouée (1979-2022). Les quatre points P1 à P4 étudiés de manière plus approfondie dans la suite de ce rapport y sont également représentés (leurs coordonnées sont disponibles en Annexe 1), ainsi que les isobathes (tous les 10 m, par rapport au niveau moyen de la mer) et le maillage triangulaire du modèle.

Au voisinage des points P3 et P4, les hauteurs significatives moyennes des vagues sont comprises entre 1.8 m et 2 m d'est en ouest. Les hauteurs significatives maximales se situent quant à elles entre 9 m et 10 m.

Au voisinage des points P1 et P2, plus éloignés de la côte, les hauteurs significatives moyennes des vagues se situent entre 2 m et 2.2 m. Les hauteurs significatives maximales sont comprises entre 10.5 m et 11 m de manière générale, et dépassent légèrement 11 m dans la partie sud-ouest de la zone (point P1 par exemple).

Dans l'ensemble, les hauteurs significatives de vagues H_s sont relativement homogènes, avec un faible gradient nord-est/sud-ouest résultant des variations bathymétriques à l'approche de la côte.

En complément de la répartition spatiale des hauteurs significatives de vagues, les Figure 17, Figure 18 et Figure 19 donnent respectivement la distribution de la hauteur significative H_s , de la période moyenne T_{m02} et de la direction moyenne D_m de provenance des vagues aux quatre points P1 à P4.

Le Tableau 5 synthétise, en chacun de ces quatre points, les principales statistiques relatives à la hauteur significative H_s et la période moyenne des vagues T_{m02} .

Prof. (m)	H_s (m)					T_{m02} (s)					
	Moy.	Max.	Médiane	q90	q99	Moy.	Max.	Médiane	q90	q99	
P1	106	2.15	11.07	1.82	3.81	6.34	6.15	14.25	5.96	8.50	10.56
P2	112	2.19	10.79	1.85	3.9	6.44	6.12	14.09	5.94	8.44	10.43
P3	56	1.96	9.76	1.65	3.53	5.82	5.92	14.27	5.76	8.18	10.33
P4	60	1.96	9.92	1.66	3.50	5.77	5.97	14.44	5.81	8.24	10.42

Tableau 5 : Statistiques (valeurs moyenne, maximale, médiane, 90^e et 99^e centiles) des paramètres H_s et T_{m02} aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude.

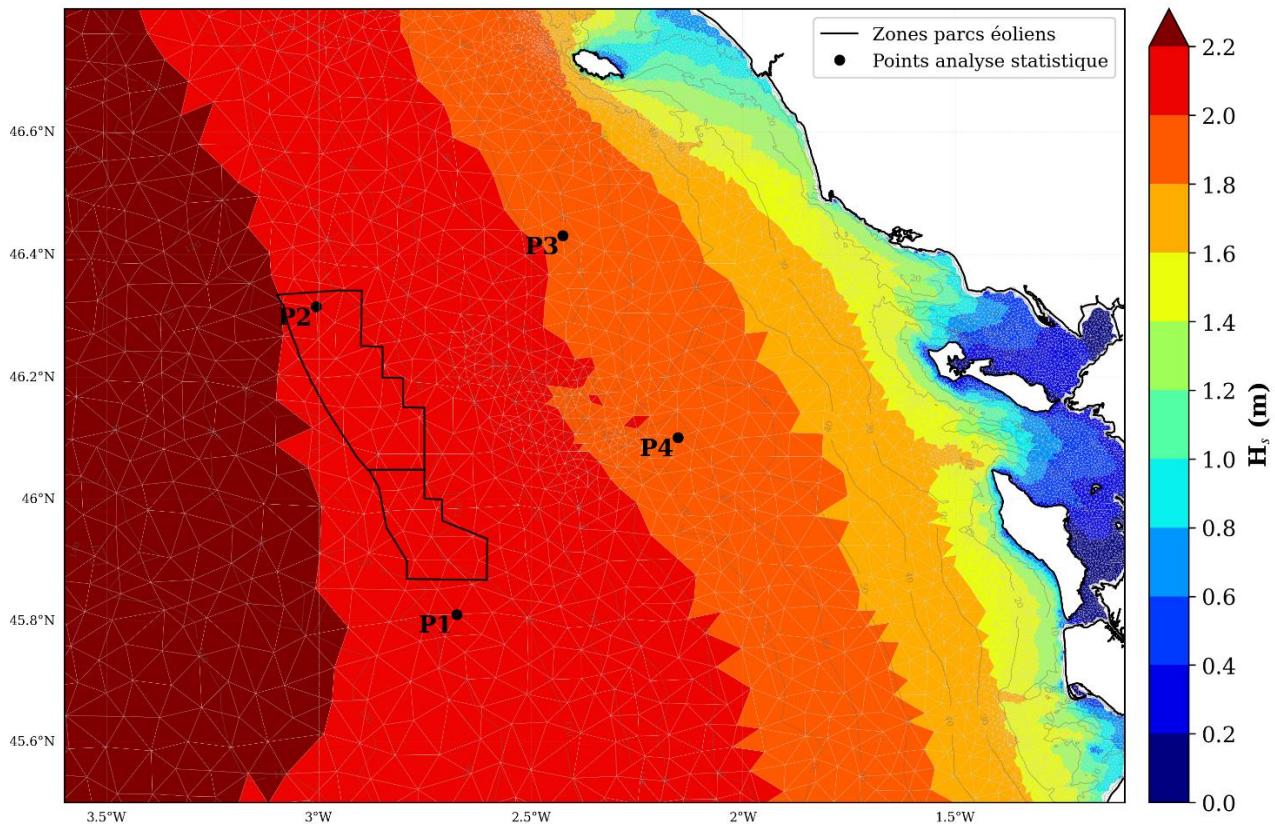


Figure 15 : Carte des H_s moyennes modélisées sur la période 1979-2022.

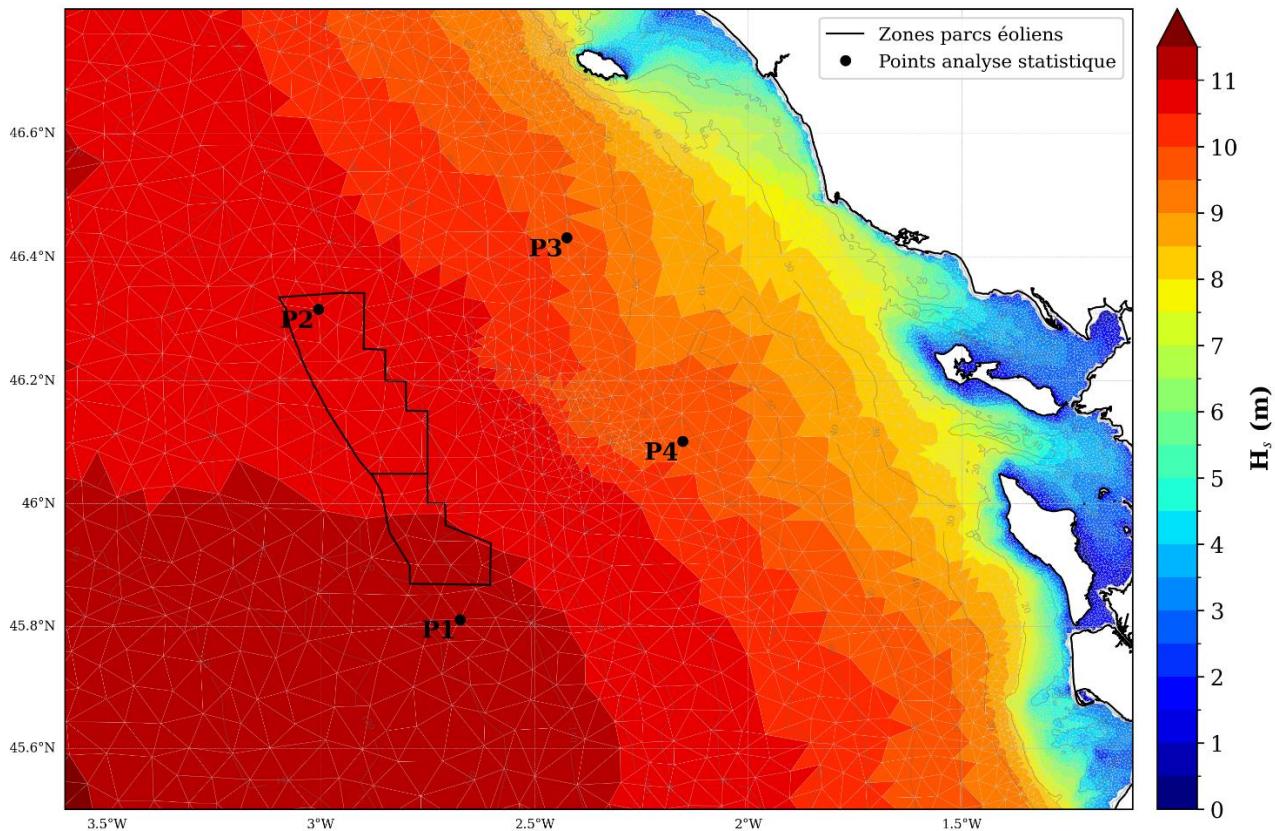


Figure 16 : Carte des H_s maximales modélisées sur la période 1979-2022.

Sur la Figure 17, on observe une similitude entre les quatre points analysés, ce qui montre une certaine homogénéité spatiale des H_s dans la zone d'étude. La plupart des états de mer sont caractérisés par des hauteurs significatives comprises entre 0.5 m et 4 m (environ 90%). L'histogramme des H_s aux points P1 et P2 montrent des distributions légèrement plus fortes qu'aux points P3 et P4.

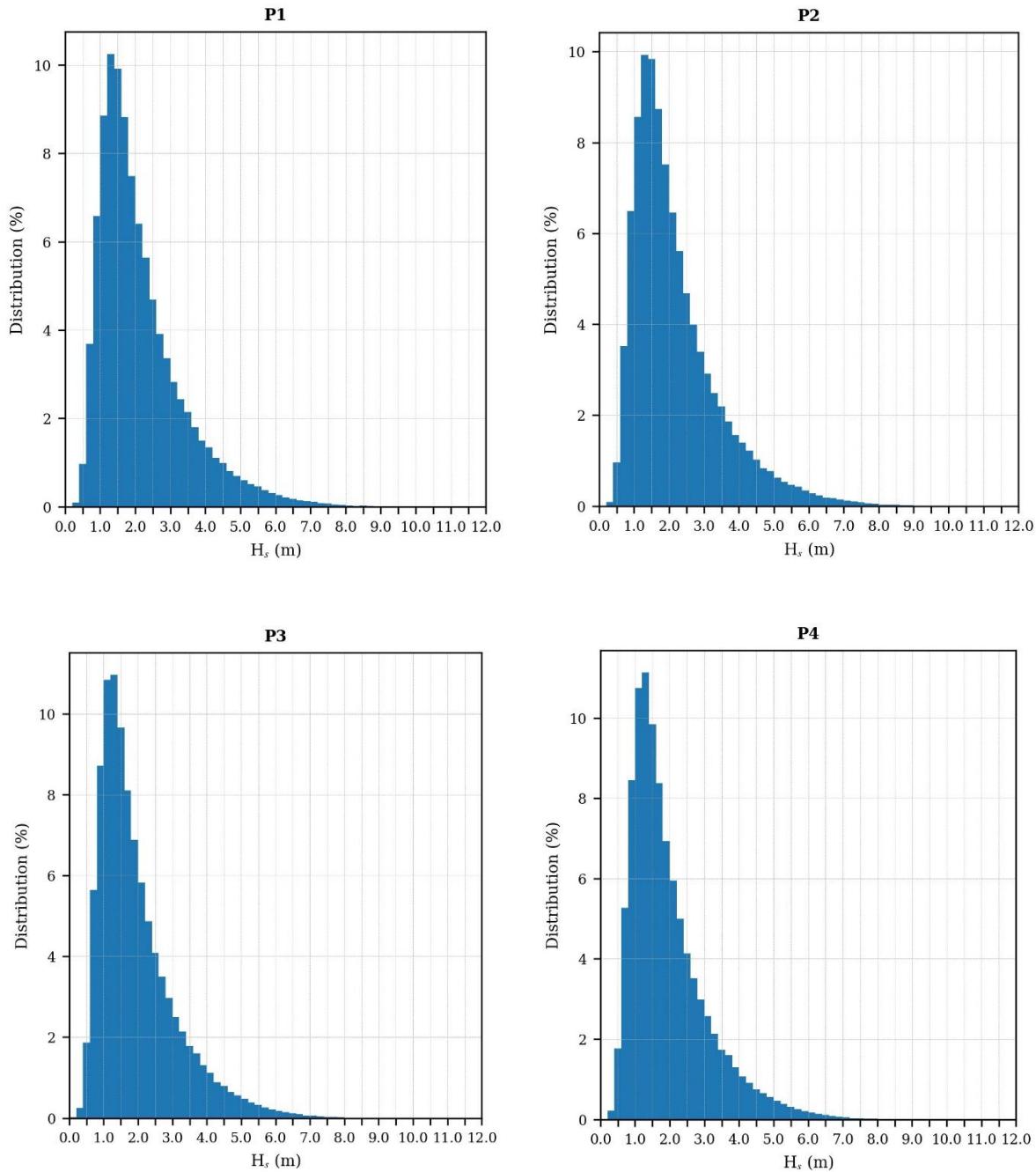


Figure 17 : Répartition des H_s aux points P1, P2, P3 et P4. Les intervalles utilisés pour le calcul de la distribution sont de 0.2 m (ex : [0, 0.2[).

Les périodes moyennes des vagues (Figure 18) sont également homogènes dans la zone d'étude, généralement comprises entre 3 s et 10 s (98% du temps). Comme pour les H_s , les distributions des périodes sont légèrement plus fortes aux points P1 et P2.

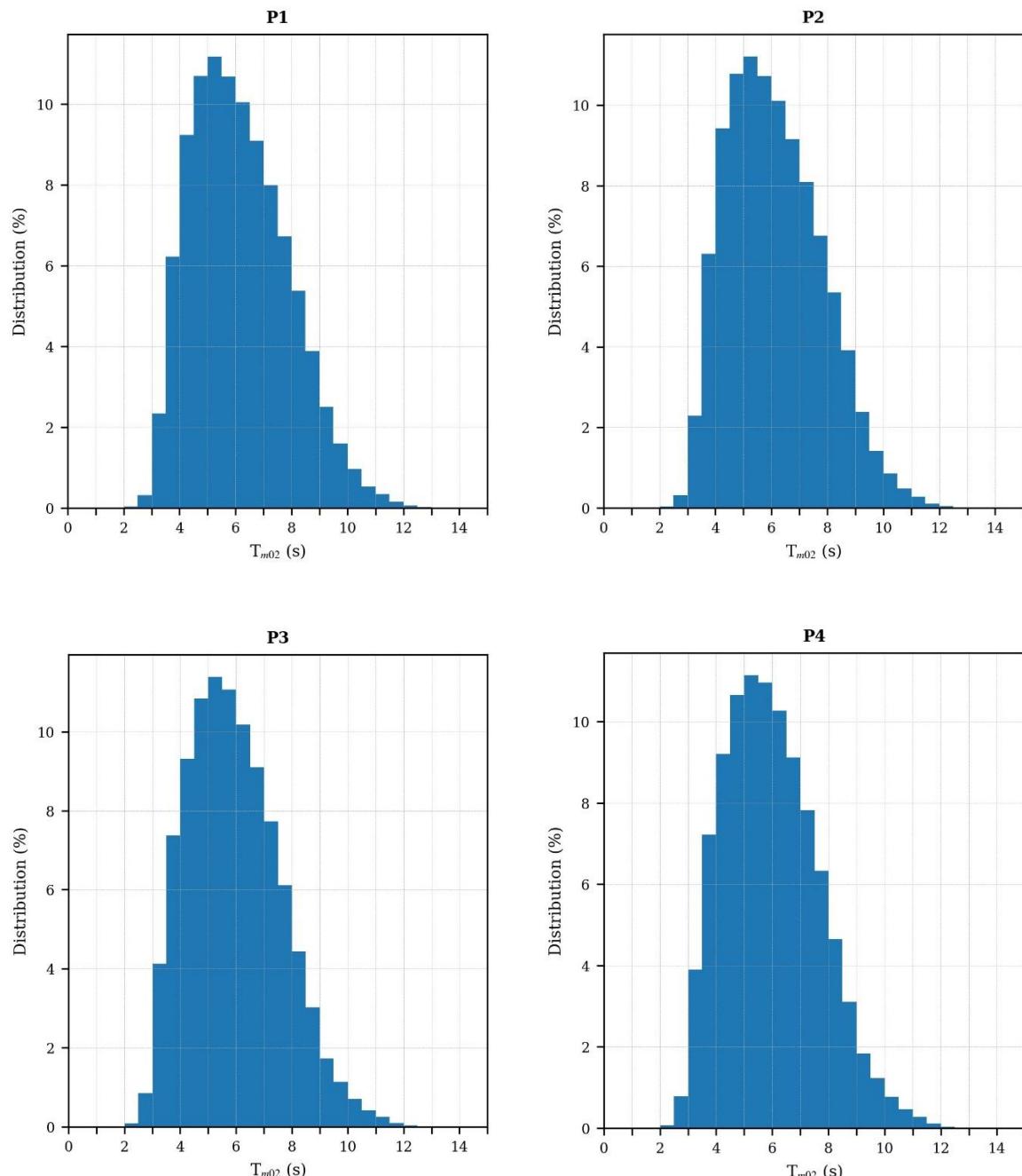


Figure 18 : Répartition des T_{m02} aux points P1, P2, P3 et P4. Les intervalles utilisés pour le calcul de la distribution sont de 0.5 s (ex : [5, 5.5]).

Pour les quatre points analysés, la Figure 19 montre enfin que les vagues proviennent majoritairement des secteurs ouest-sud-ouest à nord-ouest, et plus particulièrement des directions ouest et ouest-nord-ouest (70% à 80% du temps). Les roses de vagues de la section 4.2 fournissent de plus amples informations.

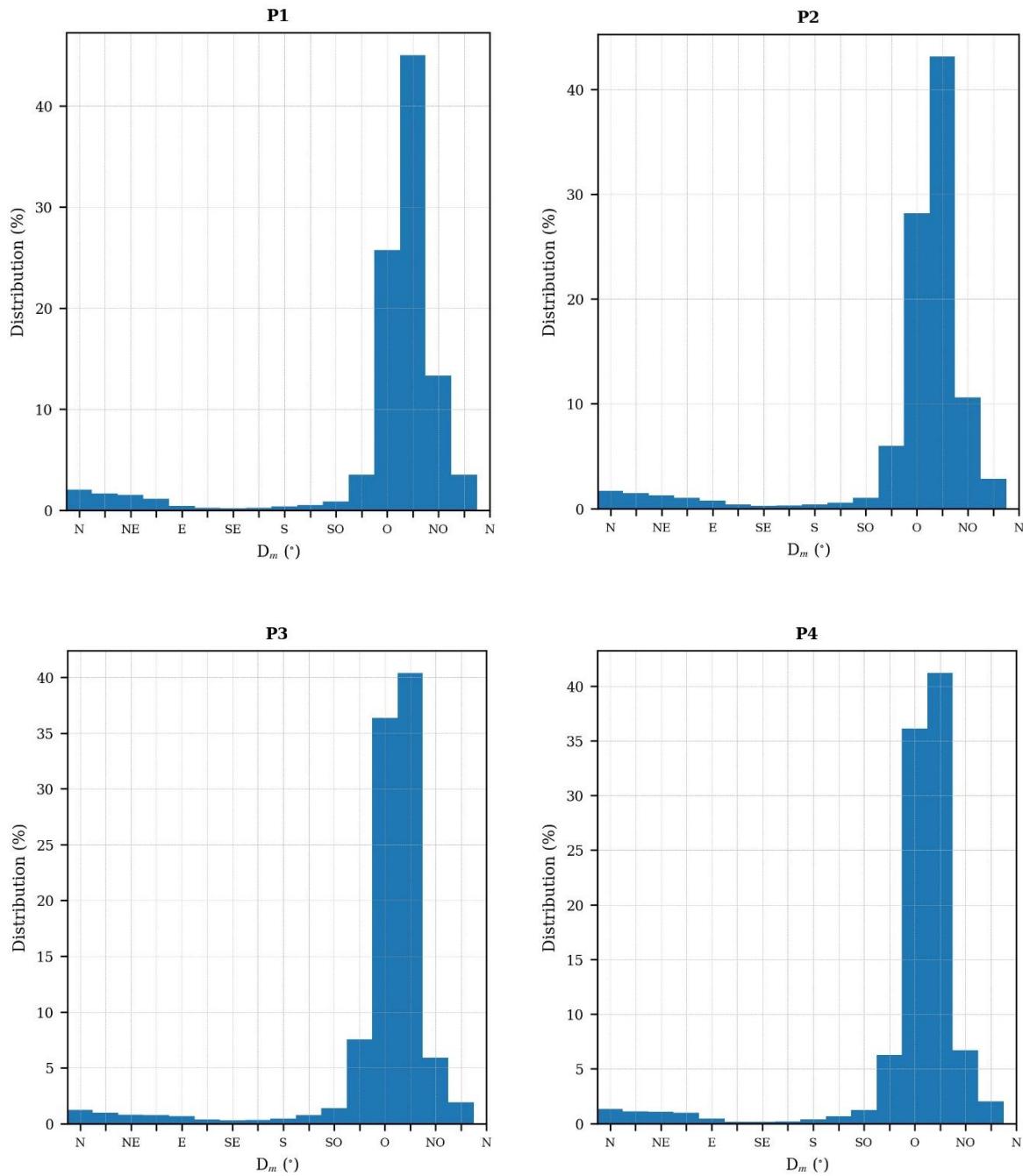


Figure 19 : Répartition des D_m aux points P1, P2, P3 et P4. Les intervalles utilisés pour le calcul de la distribution sont de 22.5° (ex : [11.25, 33.75[).

La Figure 20 présente les corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ pour les quatre points analysés. Dans l'ensemble, ils confirment que les états de mer sont relativement homogènes dans la zone d'étude. Ceux-ci sont principalement composés de vagues de périodes moyennes comprises entre 3 s et 7 s, associées à des hauteurs significatives inférieures à environ 4 m.

Les états de mer les plus énergétiques sont caractérisés par des H_s pouvant dépasser 9 m au voisinage des points P3 et P4, et atteindre 11 m dans la zone définie par les points P1 et P2, plus éloignés de la côte, pour des périodes moyennes d'environ 9 s à 11 s. Ces événements restent cependant statistiquement rares.

Des vagues plus longues peuvent également atteindre la zone d'étude (houles en provenance de l'Atlantique). Elles sont caractérisées par des T_{m02} comprises entre 11 s et 15 s (avec des périodes de pic plus importantes), et des H_s inférieures à environ 3 m. Leur probabilité d'occurrence est aussi très faible.

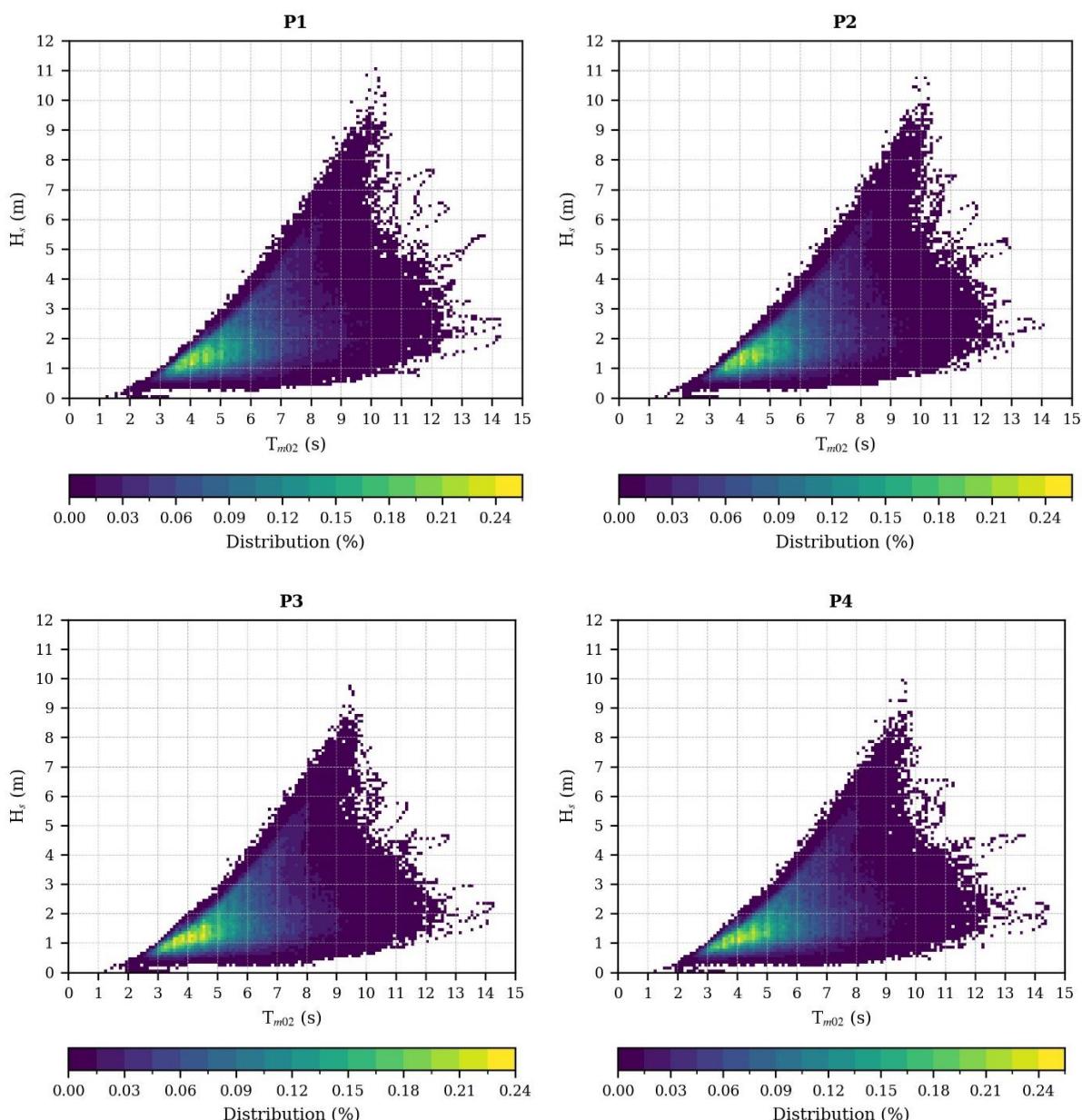


Figure 20 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ pour les points P1, P2, P3 et P4.

Les Figure 21 et Figure 22 illustrent les statistiques mensuelles relatives à la hauteur significative des vagues aux points P1 à P4. Elles confirment une faible variabilité spatiale dans la zone d'étude, avec toutefois des statistiques légèrement supérieures dans la zone définie par les points P1 et P2.

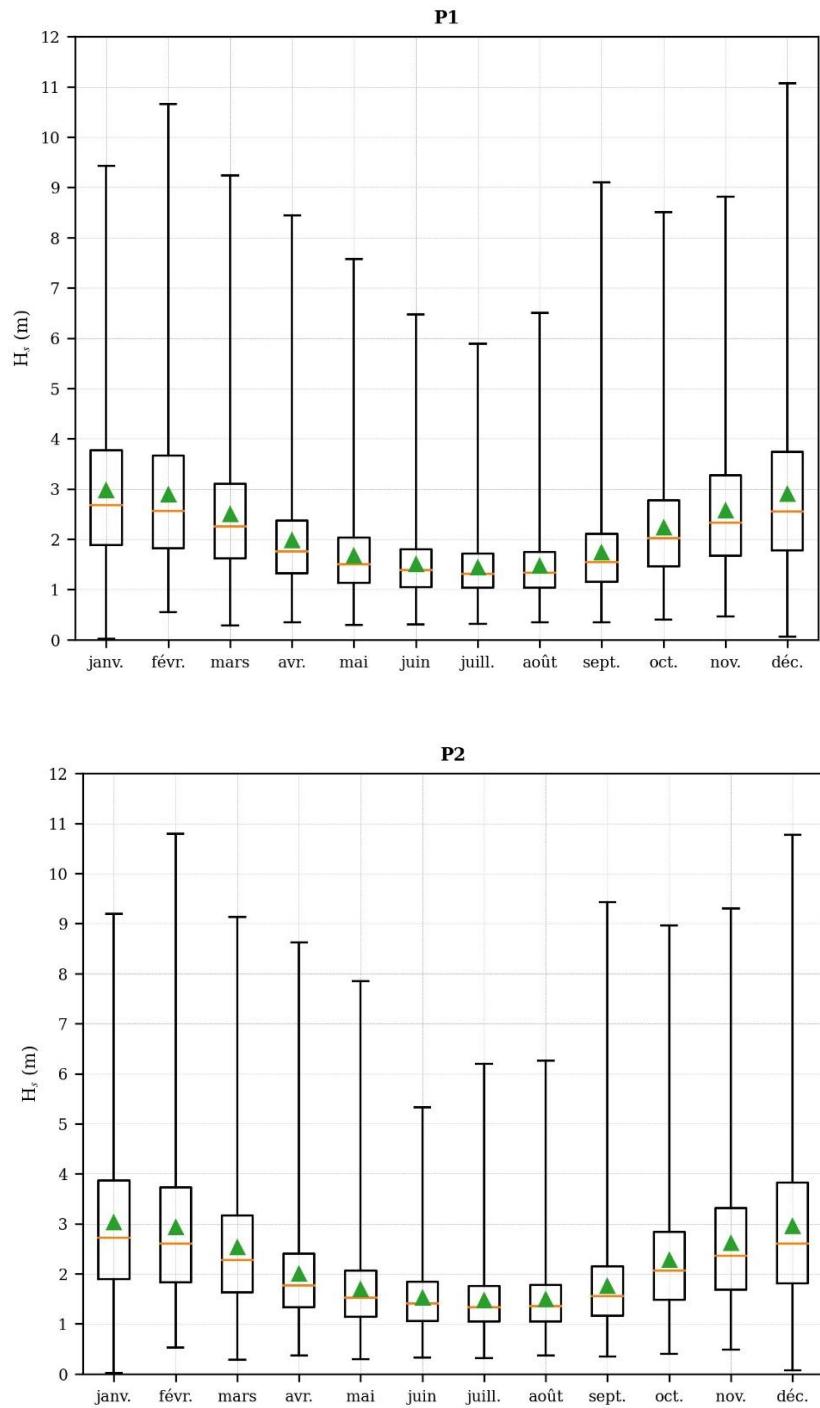


Figure 21 : Distributions mensuelles des H_s aux points P1 et P2. Les extrémités des boîtes correspondent au 1^{er} et 3^{ème} quartile de la distribution mensuelle, les segments inférieurs et supérieurs aux valeurs minimales et maximales du mois. Les traits orange sont les valeurs médianes mensuelles et les triangles verts les moyennes mensuelles.

Ces deux figures mettent en évidence la variabilité saisonnière qui module la distribution des H_s au cours de l'année. Les moyennes et médianes mensuelles sont voisines de 1.5 m de mai à septembre au sein de la zone d'étude, et comprises entre 2 m et 3 m environ d'octobre à mars. Par ailleurs, les valeurs maximales ne dépassent pas 7 m de mai à août à l'est de la zone étudiée, et 8 m dans sa partie ouest. Elles sont supérieures à 7.5 m de septembre à avril au voisinage des points P3 et P4, et 8.5 m dans la zone définie par les points P1 et P2.

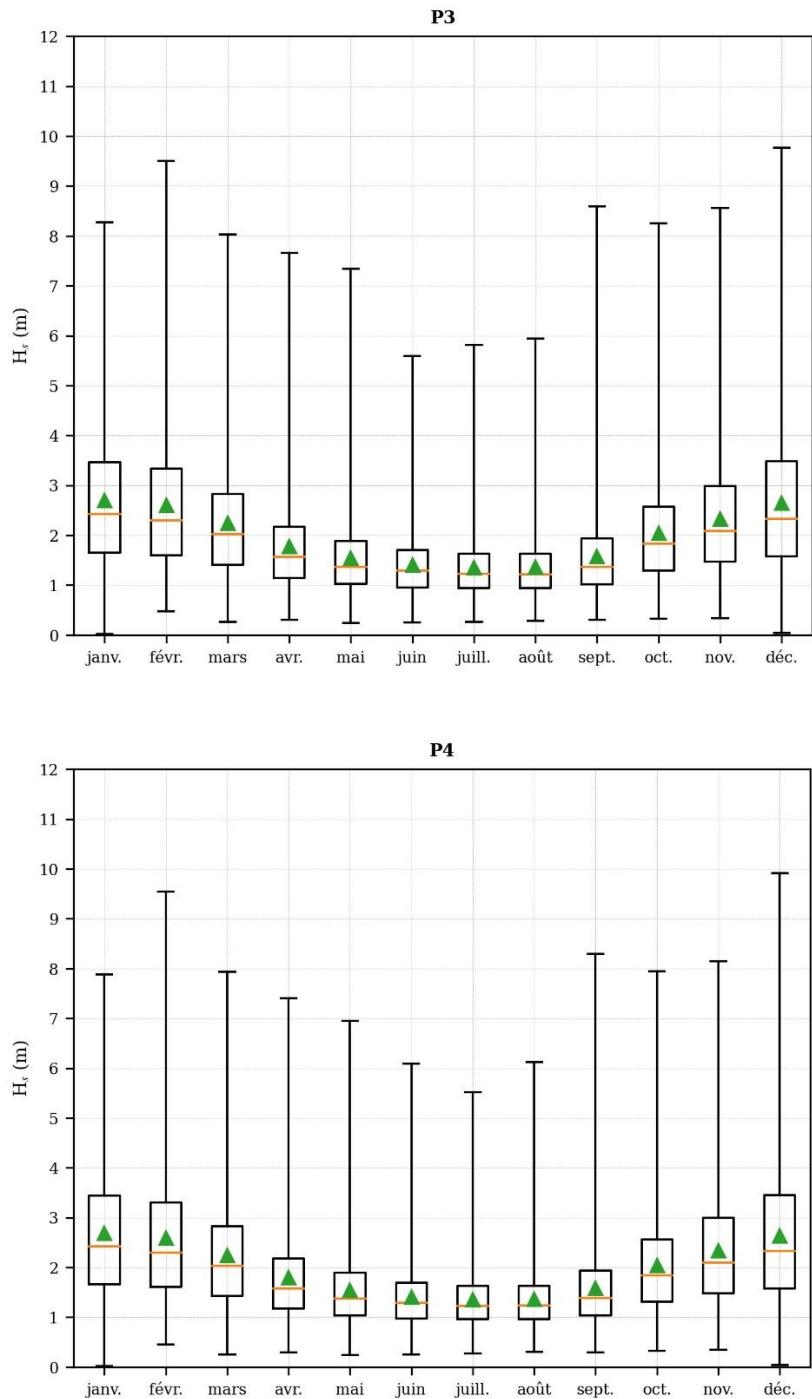


Figure 22 : Distributions mensuelles des H_s aux points P3 et P4. Les extrémités des boîtes correspondent au 1^{er} et 3^{ème} quartile de la distribution mensuelle, les segments inférieurs et supérieurs aux valeurs minimales et maximales du mois. Les traits orange sont les valeurs médianes mensuelles et les triangles verts les moyennes mensuelles.

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

Pour les quatre points étudiés dans la zone d'étude, les Figure 23 et Figure 24 illustrent la distribution des hauteurs significatives de vagues H_s en fonction de leur direction moyenne de provenance D_m . La colonne de gauche considère les états de mer sur la totalité de la période rejouée (1979-2022), tandis que la colonne de droite prend uniquement en compte ceux dont la hauteur significative dépasse 7 m. Ces événements énergétiques représentent, aux points P1 et P2, environ 0.5% des états de mer de la période 1979-2022, contre approximativement 0.2% aux points P3 et P4.

En complément de ces roses de vagues, le Tableau 6 regroupe, par secteur directionnel de 45°, les statistiques relatives à la hauteur significative H_s et la période moyenne T_{m02} aux quatre points analysés.

Les roses de vagues de la colonne de gauche des Figure 23 et Figure 24 confirment ce qui a déjà été mentionné à la section 4.1 : les vagues atteignant la zone d'étude proviennent majoritairement des secteurs ouest et ouest-nord-ouest.

Comme illustré dans la colonne de droite de la Figure 23 ainsi que dans le Tableau 6, les vagues les plus énergétiques atteignant les points P1 et P2 proviennent principalement du secteur ouest, et dans une moindre mesure du secteur ouest-nord-ouest.

Les roses de vagues de la colonne de droite de la Figure 24 ainsi que le Tableau 6 montrent, qu'au voisinage des points P3 et P4, les états de mer les plus énergétiques sont caractérisés par des vagues en provenance du secteur ouest également, et dans une moindre mesure du secteur ouest-sud-ouest.

Ces états de mer énergétiques en provenance des secteurs ouest sont induits par un fetch bien plus grand dans ces directions, qui permet un développement plus important des vagues, associé à la prédominance des vents les plus forts en provenance de ces secteurs directionnels, ainsi que des houles générées au large dans l'Atlantique nord. On note toutefois une légère réfraction des états de mer, avec une incidence passant davantage au sud-ouest en se rapprochant de la côte.

En revanche, la côte empêche le développement d'états de mer intenses en provenance des autres secteurs, notamment du nord-est au sud-est.

Finalement, le Tableau 6 indique que l'état de mer le plus extrême sur la période 1979-2022 est caractérisé par une hauteur significative d'un peu plus de 11 m au point P1, et presque 10 m au point P4, pour des vagues en provenance de l'ouest. Cet état de mer extrême dans la zone d'étude a résulté d'une intense dépression, la tempête Martin, qui a frappé la côte Atlantique française le 27 décembre 1999 (rafales de vent jusqu'à 198 km/h mesurées sur l'île d'Oléron, source <http://tempetes.meteofrance.fr/Martin-27-et-28-decembre-1999.html>).

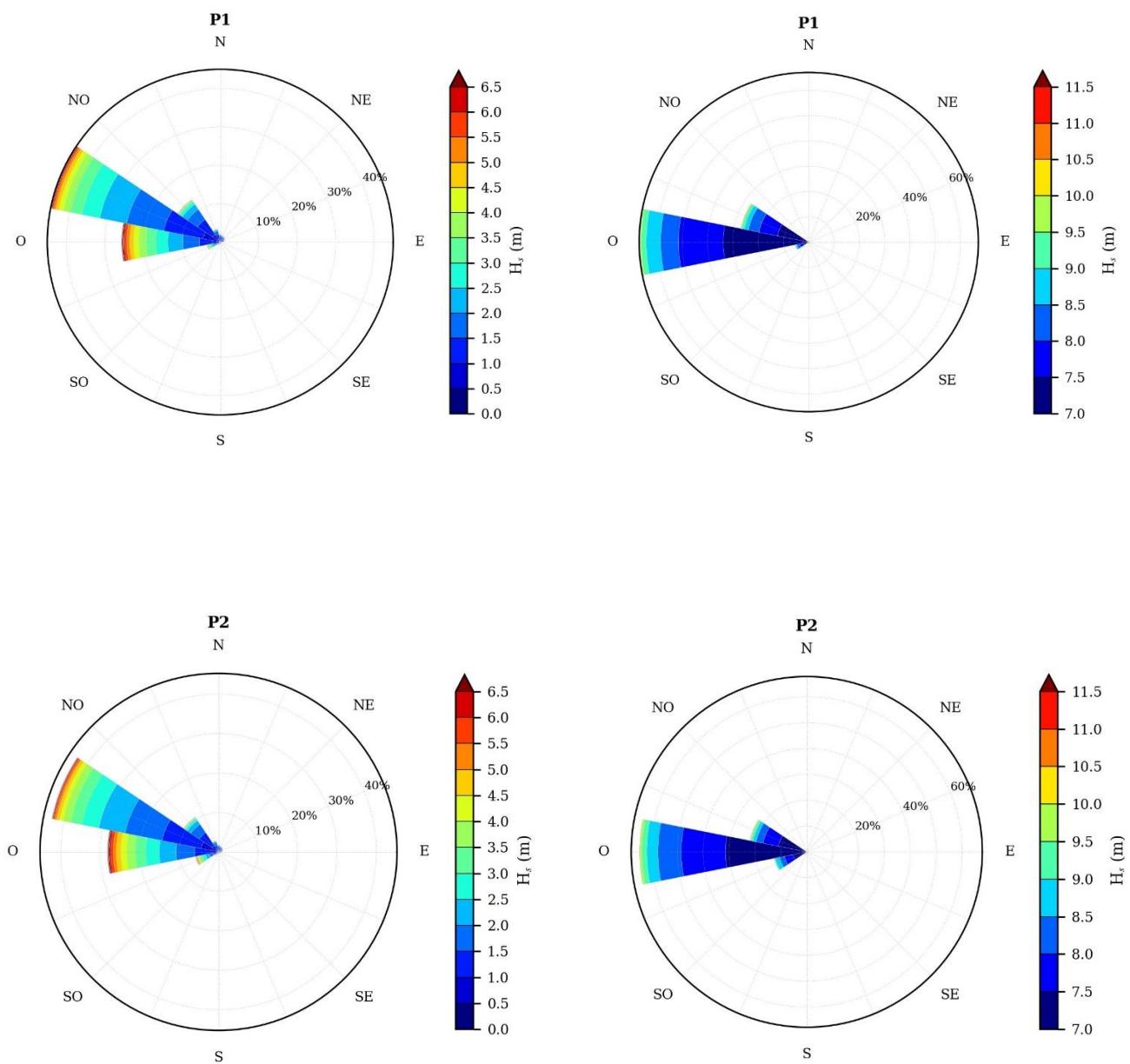


Figure 23 : Distribution des H_s en fonction de D_m aux points P1 et P2. Les secteurs directionnels couvrent chacun un intervalle de 22.5°. La colonne de gauche considère l'ensemble des états de mer sur la période 1979-2022, la colonne de droite uniquement ceux dont la hauteur significative dépasse 7 m.

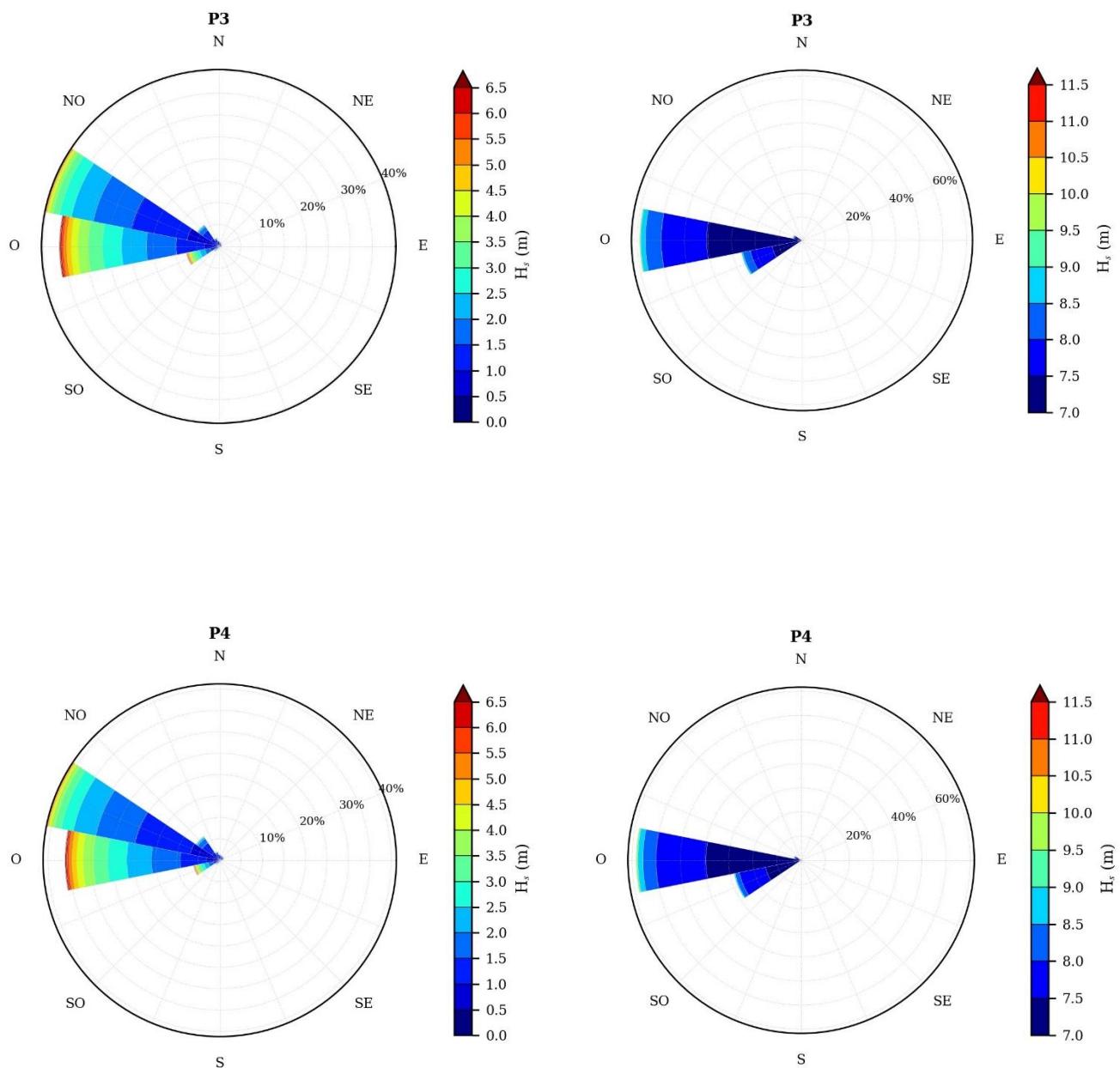


Figure 24 : Distribution des H_s en fonction de D_m aux points P3 et P4. Les secteurs directionnels couvrent chacun un intervalle de 22.5°. La colonne de gauche considère l'ensemble des états de mer sur la période 1979-2022, la colonne de droite uniquement ceux dont la hauteur significative dépasse 7 m.

Secteur	Point	H_s (m)					T_{m02} (s)				
		Moy.	Max.	Médiane	q90	q99	Moy.	Max.	Médiane	q90	q99
N	P1	1.44	4.39	1.35	2.18	3.01	4.10	6.57	4.05	4.95	5.72
	P2	1.42	4.13	1.34	2.13	2.89	4.06	6.46	4.01	4.89	5.59
	P3	1.13	2.96	1.07	1.67	2.20	3.59	5.41	3.55	4.26	4.84
	P4	1.18	2.99	1.12	1.75	2.29	3.68	5.60	3.63	4.39	4.93
NE	P1	1.45	3.32	1.40	2.05	2.67	3.92	5.60	3.91	4.58	5.21
	P2	1.43	3.22	1.39	2.02	2.57	3.91	5.65	3.91	4.57	5.14
	P3	1.13	2.56	1.11	1.57	1.99	3.44	5.00	3.45	3.95	4.47
	P4	1.19	2.68	1.16	1.64	2.14	3.52	5.09	3.52	4.05	4.63
E	P1	1.41	2.99	1.39	2.05	2.56	3.83	5.36	3.84	4.53	5.03
	P2	1.47	3.06	1.44	2.07	2.70	3.93	5.53	3.93	4.60	5.18
	P3	1.19	2.45	1.16	1.67	2.17	3.50	5.12	3.50	4.06	4.66
	P4	1.18	2.40	1.17	1.69	2.13	3.47	4.92	3.47	4.05	4.60
SE	P1	1.39	3.12	1.37	2.02	2.40	3.92	5.97	3.92	4.62	5.05
	P2	1.47	3.87	1.44	2.22	2.72	4.05	5.85	4.06	4.82	5.26
	P3	1.19	3.76	1.18	1.78	2.22	3.65	6.19	3.67	4.31	4.75
	P4	1.18	2.37	1.15	1.75	2.08	3.59	5.23	3.60	4.26	4.70
S	P1	1.80	4.76	1.69	2.77	4.05	4.48	6.73	4.44	5.44	6.28
	P2	1.82	5.58	1.71	2.83	4.23	4.59	7.57	4.53	5.56	6.54
	P3	1.66	4.84	1.56	2.58	3.88	4.32	6.74	4.28	5.28	6.23
	P4	1.60	4.36	1.52	2.53	3.72	4.21	6.84	4.17	5.19	6.04
SO	P1	2.05	7.74	1.89	3.31	5.08	5.09	8.93	5.03	6.33	7.51
	P2	2.20	8.76	1.98	3.63	5.77	5.27	9.54	5.19	6.61	7.88
	P3	2.06	8.59	1.84	3.50	5.44	5.12	9.26	5.03	6.49	7.75
	P4	2.04	8.29	1.80	3.41	5.36	5.07	11.92	4.96	6.45	7.89
O	P1	2.51	11.07	2.19	4.41	6.89	6.77	14.25	6.64	8.90	10.91
	P2	2.51	10.79	2.19	4.43	6.91	6.71	14.09	6.60	8.79	10.69
	P3	2.20	9.76	1.91	3.86	6.12	6.51	14.27	6.39	8.54	10.58
	P4	2.21	9.92	1.93	3.86	6.06	6.60	14.44	6.47	8.62	10.72
NO	P1	1.82	10.66	1.59	3.05	5.12	5.86	12.29	5.58	8.05	10.13
	P2	1.80	10.52	1.57	2.99	5.08	5.74	12.39	5.44	7.90	10.03
	P3	1.39	5.95	1.24	2.21	3.82	4.85	11.22	4.66	6.35	8.37
	P4	1.41	6.11	1.27	2.23	3.86	4.88	10.37	4.72	6.33	8.02

Tableau 6: Statistiques (valeurs moyenne, maximale, médiane, 90^e et 99^e centiles) des paramètres H_s et T_{m02} en fonction de D_m pour les points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude.

Les Figure 25 et Figure 26 donnent la distribution des H_s et T_{m02} aux points P1 à P4 par secteur directionnel de 45°.

Pour la majorité des secteurs directionnels, les états de mer de hauteur significative entre 1 m et 2 m prédominent, et ceux de H_s supérieure à 5 m sont statistiquement rares, avec toutefois des occurrences plus prononcées pour le secteur ouest. De la même manière, les distributions sont un peu plus élevées pour les secteurs sud-ouest à ouest au voisinage des points P3 et P4, et sud-ouest à nord-ouest dans la zone définie par les points P1 et P2. La période moyenne des vagues, quant à elle, est généralement comprise entre environ 3 s et 7 s. Seuls les secteurs sud-ouest, ouest et nord-ouest présentent une proportion plus importante d'états de mer de période moyenne supérieure à 7 s associés aux houles en provenance de l'Atlantique nord.

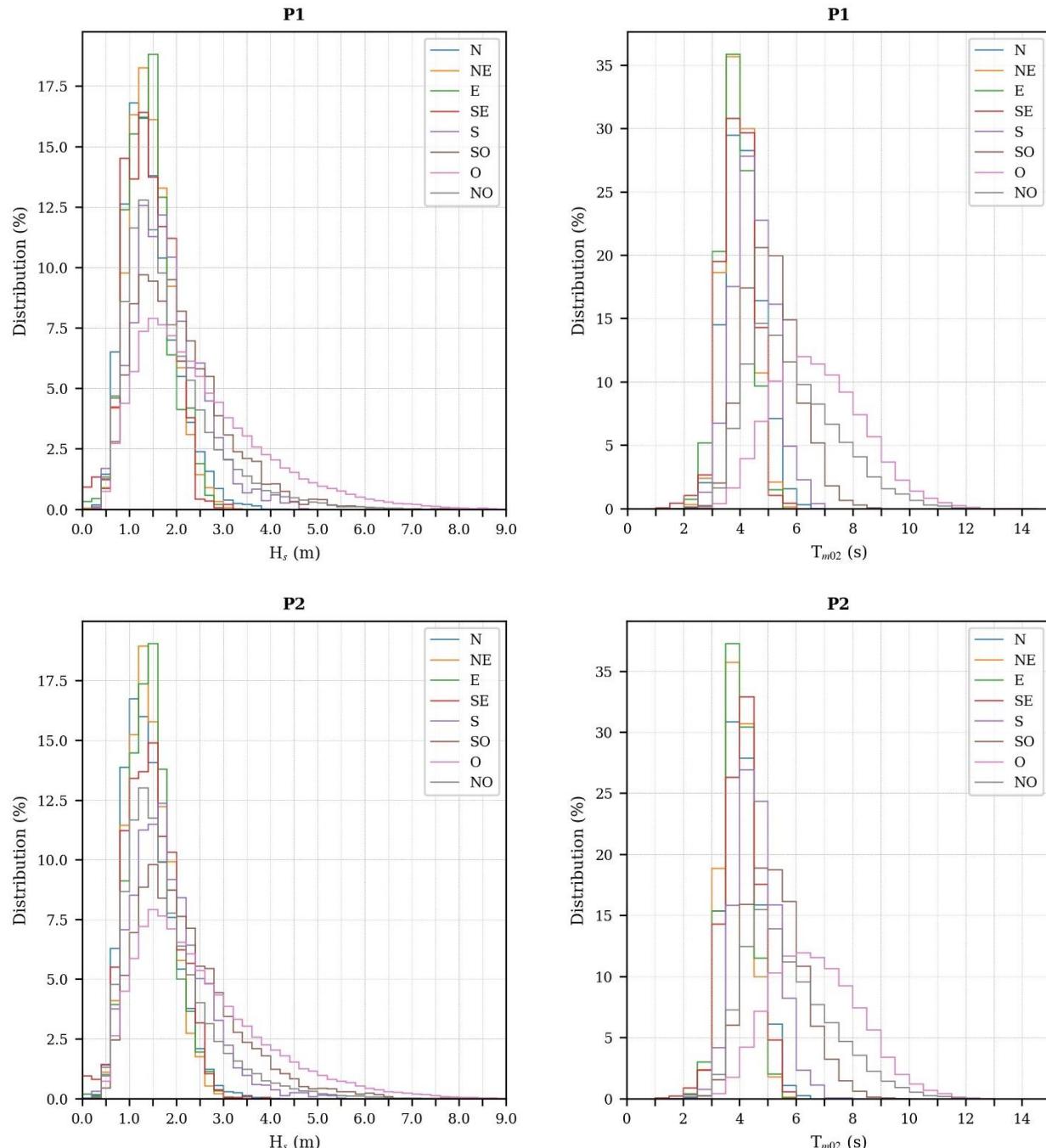


Figure 25 : Répartition des H_s et T_{m02} par secteur directionnel aux points P1 et P2. Les intervalles utilisés pour le calcul des distributions sont de 0.2 m pour H_s et de 0.5 s pour T_{m02} .

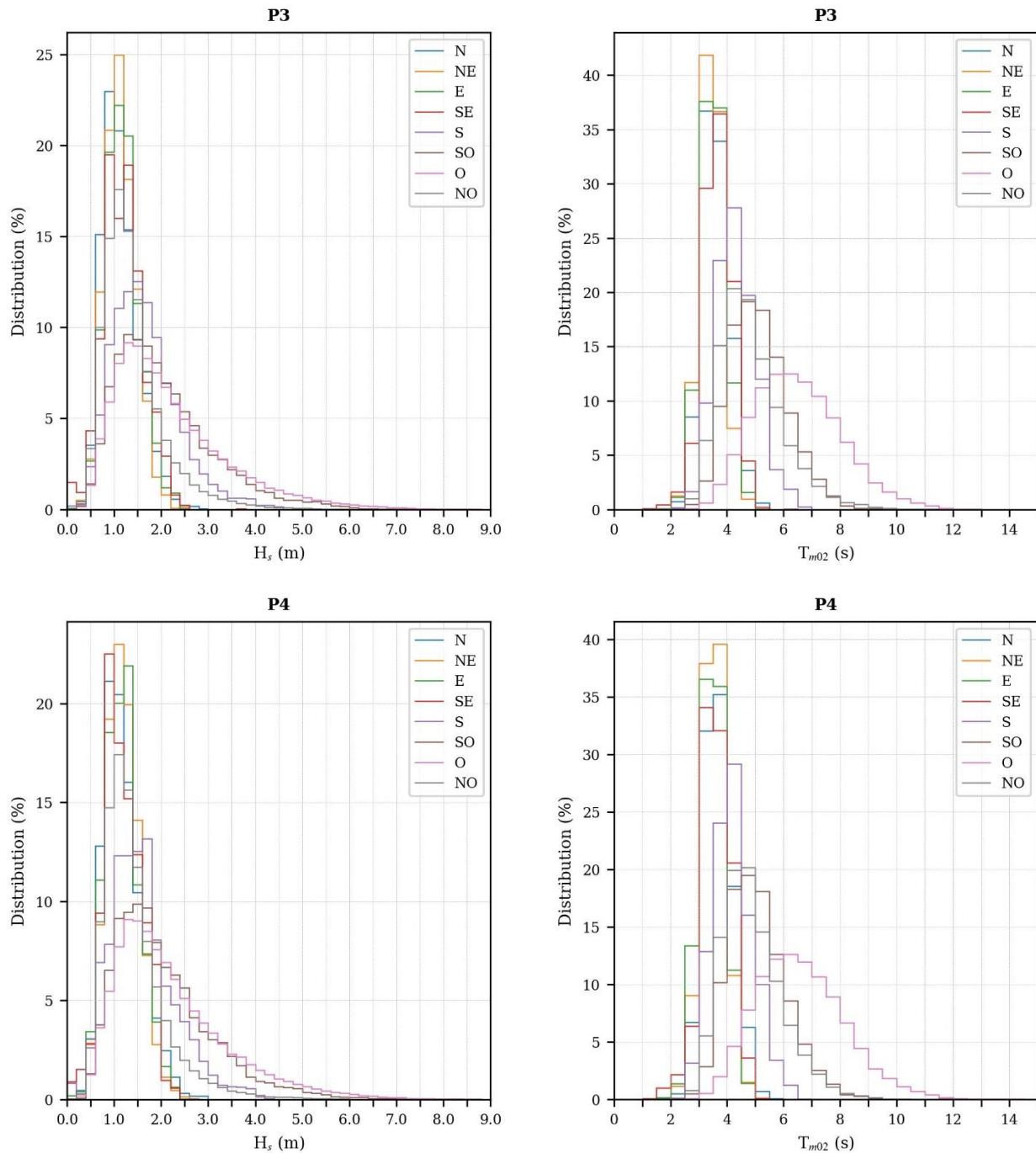


Figure 26 : Répartition des H_s et T_{m02} par secteur directionnel aux points P3 et P4. Les intervalles utilisés pour le calcul des distributions sont de 0.2 m pour H_s et de 0.5 s pour T_{m02} .

La Figure 27 illustre les corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1 à P4 pour les vagues provenant de l'ouest. Les corrélogrammes relatifs aux autres secteurs directionnels se trouvent en Annexe 2.

Les états de mer en provenance du secteur ouest sont principalement constitués de vagues caractérisées par des périodes moyennes comprises entre 4 s et 7 s, pour des H_s généralement inférieures à 4-5 m. On retrouve cependant en provenance de ce secteur ouest les états de mer les plus énergétiques associés à des hauteurs significatives pouvant dépasser 10-11 m selon la zone considérée, pour des périodes moyennes entre 9 s et 11 s. Des vagues plus longues peuvent également atteindre la zone d'étude (houles en provenance de l'Atlantique). Elles sont caractérisées par des T_{m02} comprises entre 11 s et 15 s, pour des H_s inférieures à environ 3 m. Leur probabilité d'occurrence est néanmoins très faible.

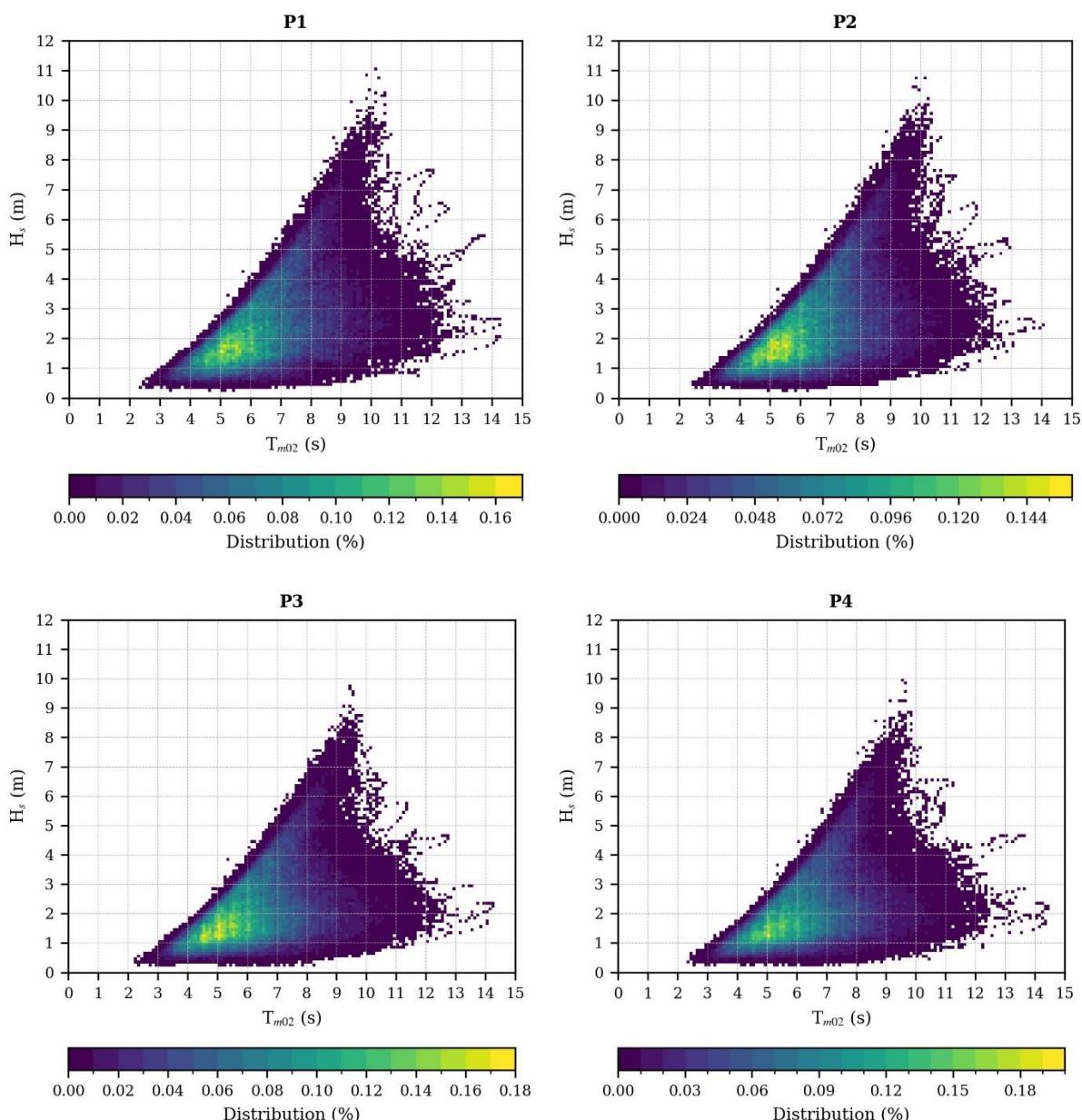


Figure 27 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant de l'ouest ($247.5^\circ < D_m \leq 292.5^\circ$).

4.3 Analyse de l'état de mer par systèmes de vagues

Un état de mer peut être potentiellement séparé en différents systèmes de vagues, ou partitions. Le modèle WAVEWATCH III® permet une séparation automatique de ces systèmes. Celle-ci est généralement très satisfaisante, mais imparfaite dans certains cas. Dans la suite de cette partie, une analyse de ces partitions d'états de mer est proposée.

Parmi les différents systèmes de vagues pouvant constituer un état de mer, on distingue la mer de vent et des systèmes de houle. La mer de vent est composée de vagues en cours de développement sous l'effet du vent local, tandis qu'un système de houle correspond à la propagation de vagues formées à des distances plus ou moins éloignées de la zone d'intérêt, et qui se sont propagées. La mer de vent est associée à des périodes / longueurs d'onde faibles, et présente des étalements fréquentiels et directionnels importants. Du fait de la dispersion des vagues au cours de leur propagation et des interactions non-linéaires qui se produisent, les systèmes de houle sont associés à des périodes / longueurs d'onde plus importantes, et présentent des spectres d'énergie plus étroits en fréquence et direction.

Trois systèmes ont été considérés pour cette étude : mer de vent, houle primaire et houle secondaire. Pour chacun de ces trois systèmes de vagues et chacun des quatre points P1 à P4 analysés :

- Les Figure 28 et Figure 29 illustrent les distributions des hauteurs significatives des vagues H_s , des périodes de pic T_p et des directions au pic du spectre d'énergie D_p .
- Les Figure 30 et Figure 31 fournissent les corrélogrammes $H_s - T_p$.
- Les Figure 32 et Figure 33 donnent les distributions des hauteurs significatives H_s en fonction de la direction de pic D_p , sous forme de roses de vagues.

En accord avec la rose des vents caractéristique de la zone d'étude, il ressort de ces graphiques que la mer de vent est principalement associée à des états de mer en provenance des secteurs ouest-sud-ouest à nord-ouest, dans une moindre mesure des secteurs nord-nord-est à est, associés aux vents de terre, et de façon plus marginale des secteurs sud-sud-est à sud. La mer de vent est définie par des hauteurs significatives généralement inférieures à 5 m, et des périodes de pic, par nature faibles, comprises entre 2 s et 6 s, plus rarement entre 8 s et 14 s. Ce système est aussi associé aux états de mer les plus énergétiques, caractérisés par des vagues de hauteur significative pouvant dépasser 10 m au voisinage des points P3 et P4, et 11 m dans la zone définie par les points P1 et P2, pour des périodes de pic aux alentours de 14 s, en provenance du secteur ouest.

Au voisinage des points P1 et P2, la houle primaire se caractérise par des états de mer provenant majoritairement du secteur ouest à nord-ouest, et dans une moindre mesure du secteur sud-sud-est à sud. Dans la zone définie par les points P3 et P4, la houle primaire se caractérise par des états de mer en provenance principalement du secteur ouest à ouest-nord-ouest, et moins fréquemment du secteur sud. Dans l'ensemble, dans ces deux zones, la houle primaire est associée à des H_s inférieures à 4 m, pour des T_p comprises entre 7 s et 15 s, pouvant exceptionnellement dépasser 16 s.

La houle secondaire se distingue par des niveaux d'énergie plus faible, matérialisés par des hauteurs significatives de vagues inférieures à 1.5 m dans l'ensemble de la zone d'étude (points P1 à P4), pour des périodes de pic entre 9 s et 15 s, pouvant exceptionnellement dépasser 16 s. Elle se singularise également par la direction de provenance des vagues qui la constituent : les secteurs sud-sud-est et sud dominent dans la zone définie par les points P1 et P2, et le secteur sud est prépondérant au voisinage des points P3 et P4.

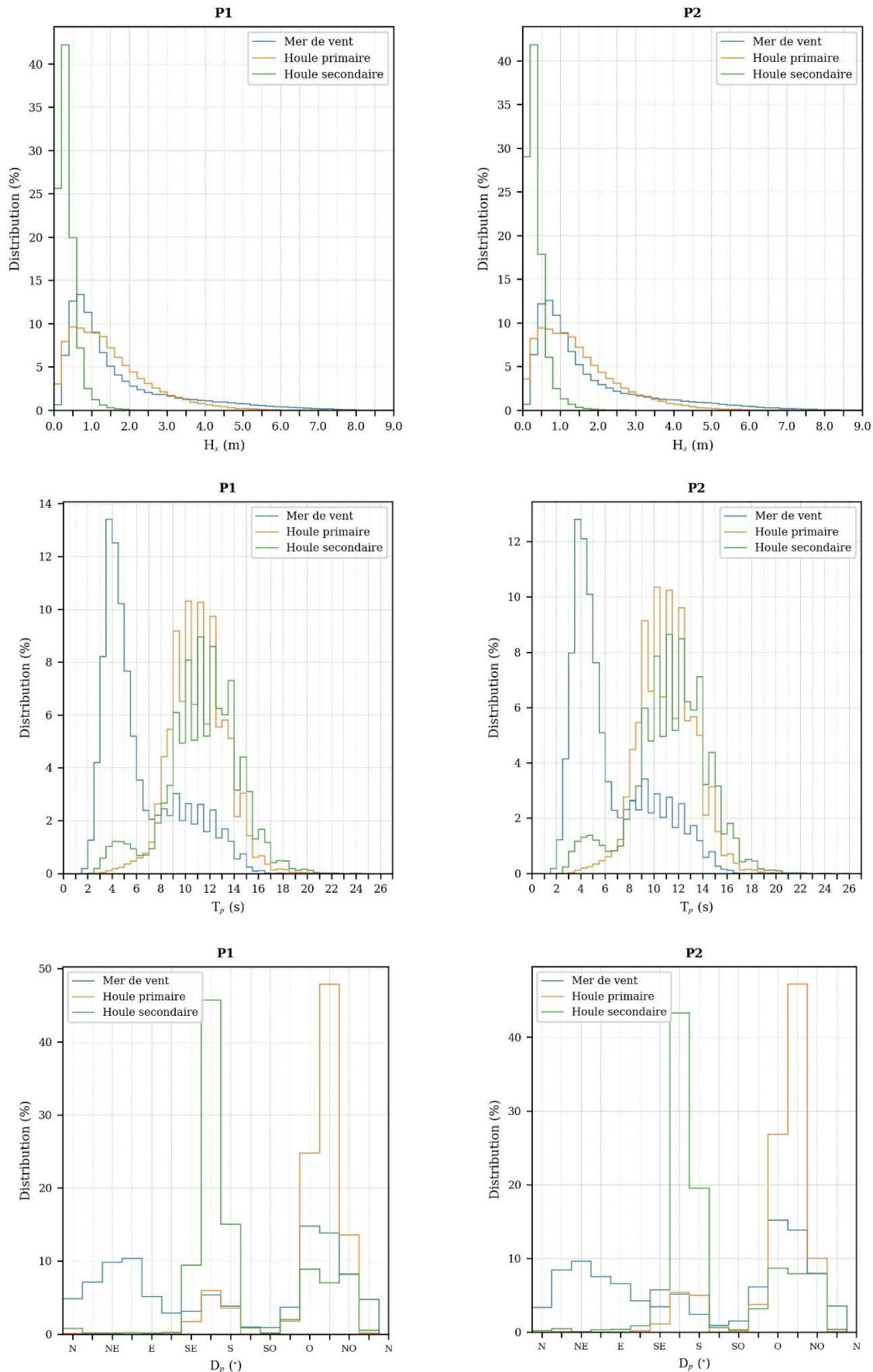


Figure 28 : Répartition des H_s , T_p et D_p pour les trois systèmes de vagues aux points P1 et P2.

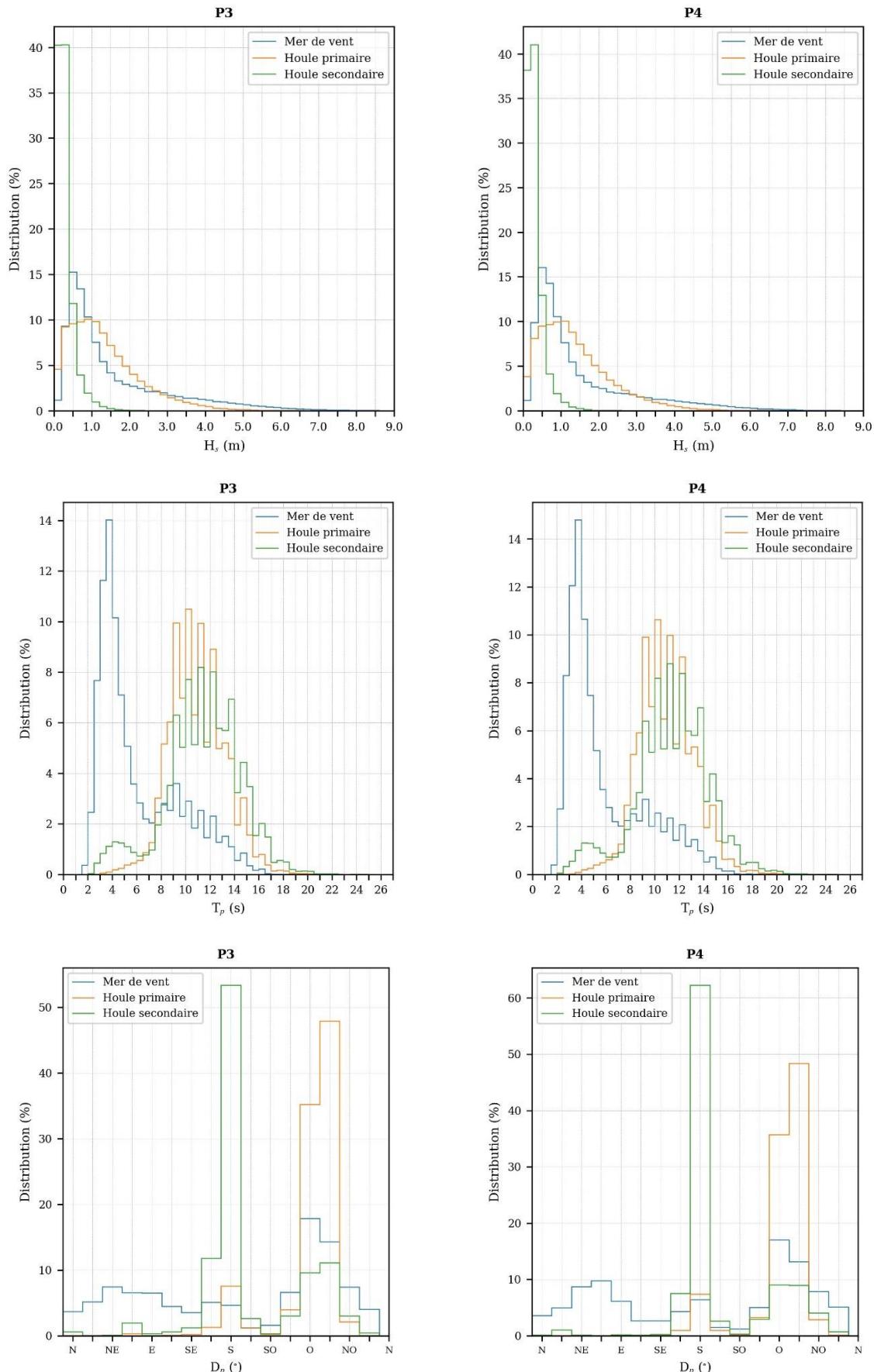


Figure 29 : Répartition des H_s , T_p et D_p pour les trois systèmes de vagues aux points P3 et P4.

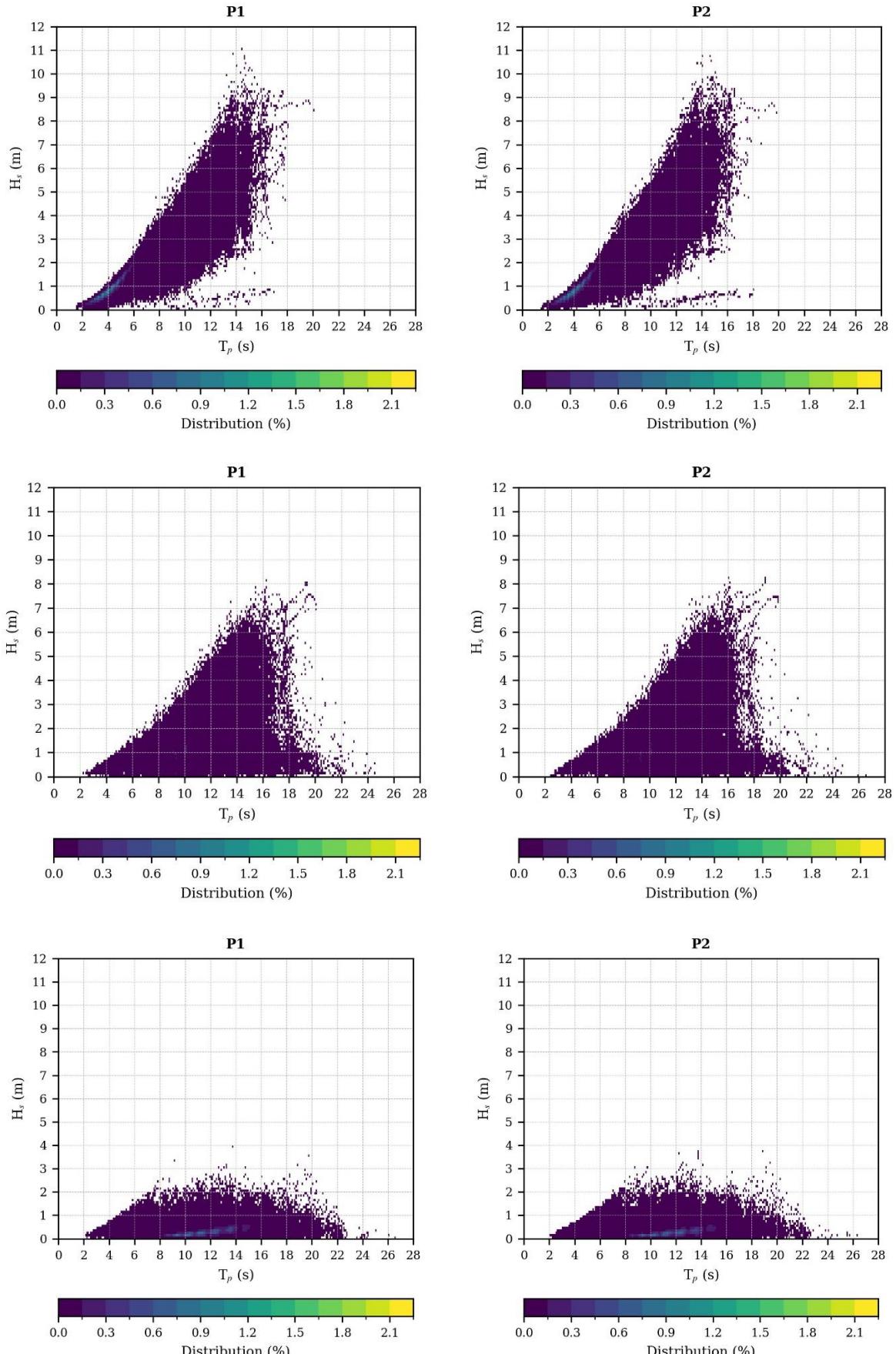


Figure 30 : Corrélogrammes H_s – T_p aux points P1 et P2 pour les trois systèmes de vagues: mer de vent (en haut), houle primaire (au milieu) et houle secondaire (en bas).

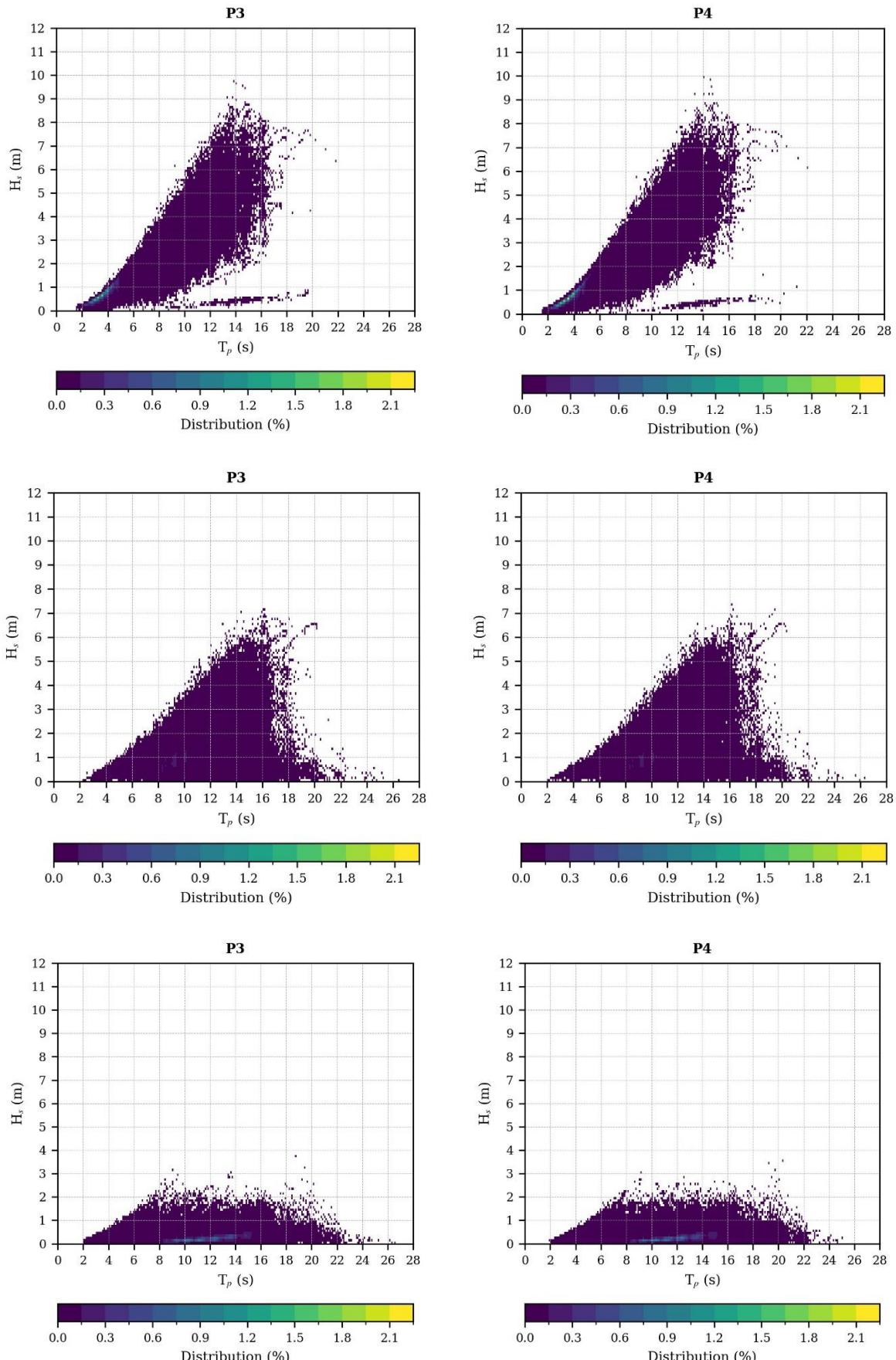


Figure 31: Corrélogrammes $H_s - T_p$ aux points P3 et P4 pour les trois systèmes de vagues: mer de vent (en haut), houle primaire (au milieu) et houle secondaire (en bas).

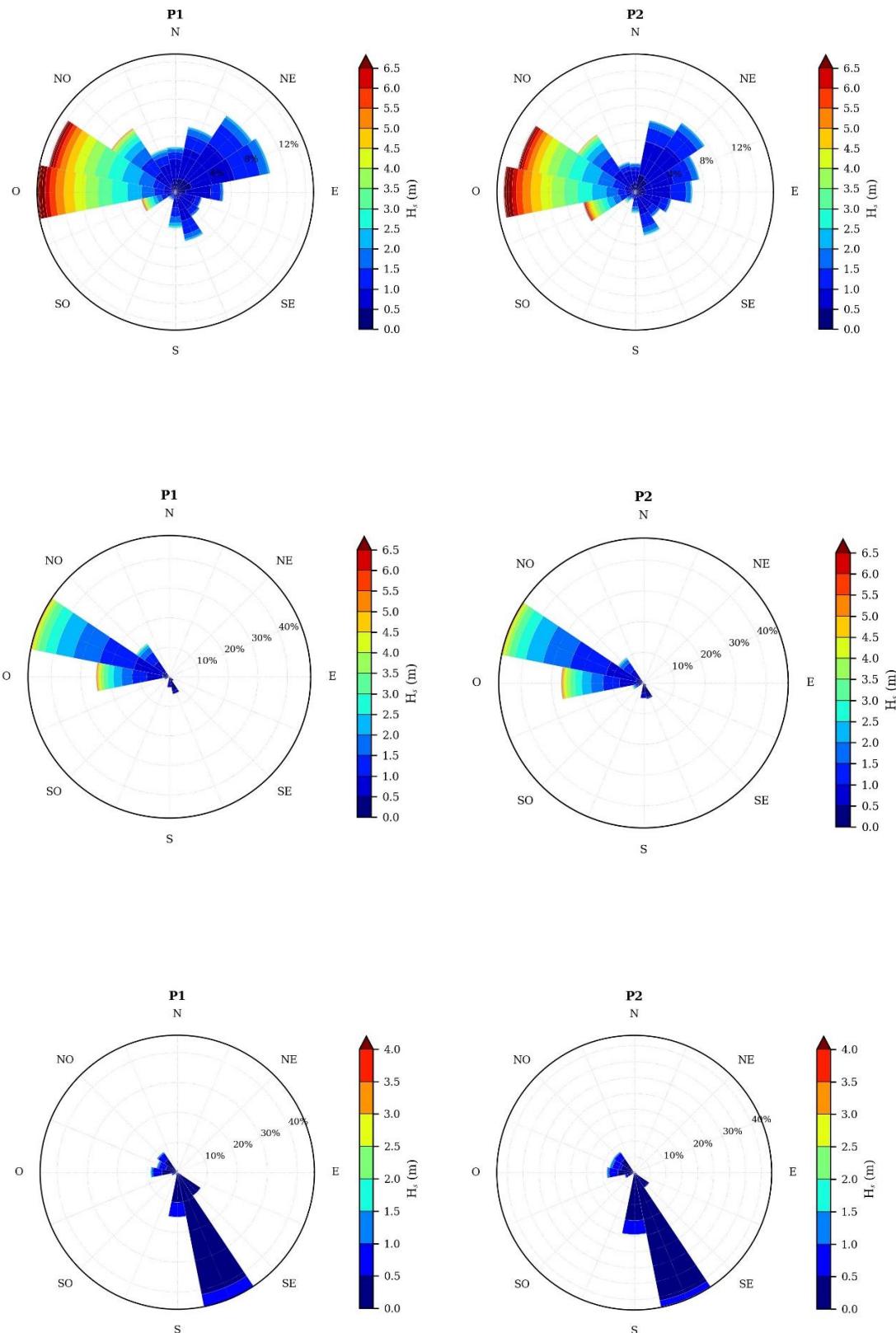


Figure 32 : Distribution des H_s en fonction de D_p aux points P1 et P2 pour les trois systèmes de vagues : mer de vent (en haut), houle primaire (au milieu) et houle secondaire (en bas).

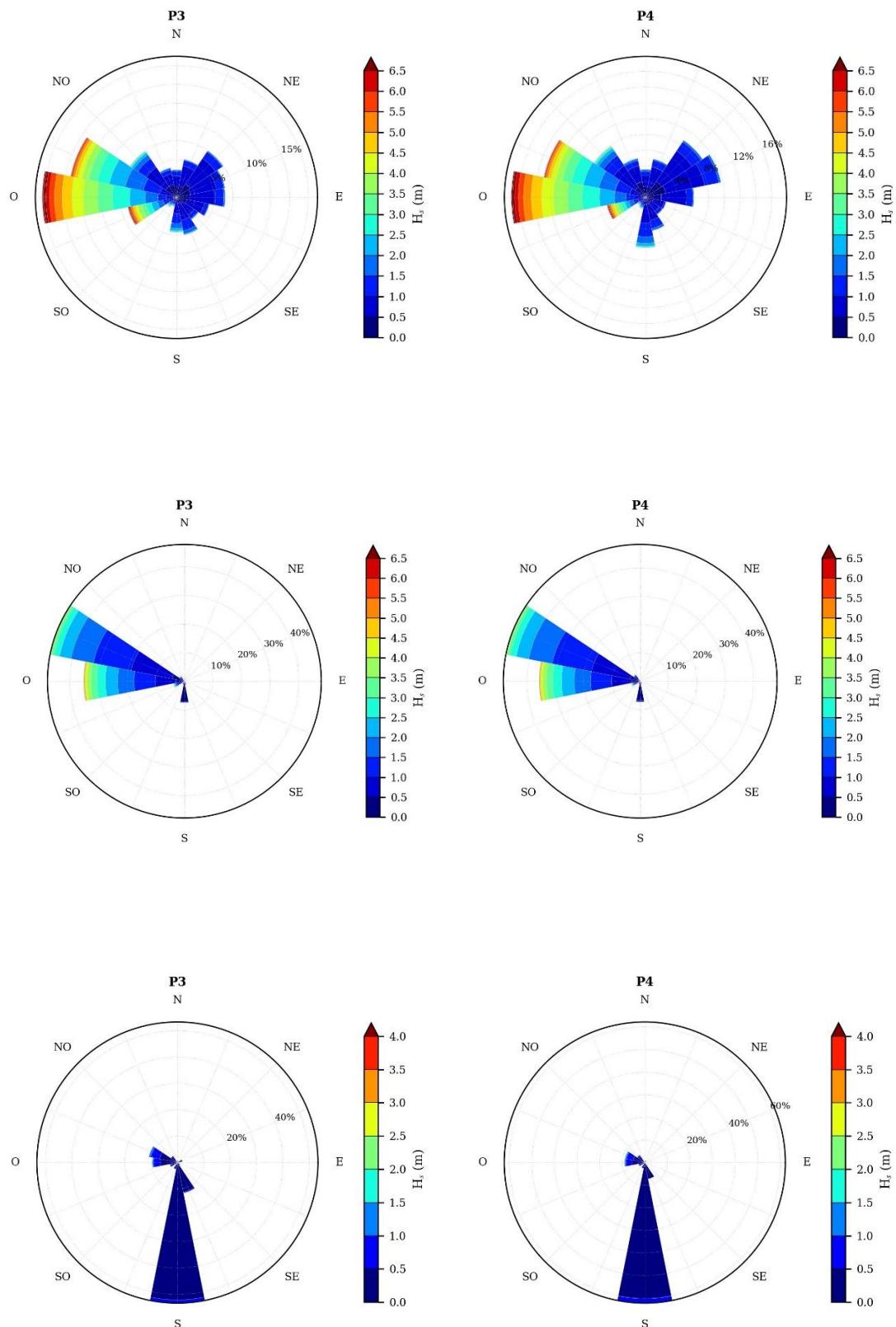


Figure 33 : Distribution des H_s en fonction de D_p aux points P3 et P4 pour les trois systèmes de vagues : mer de vent (en haut), houle primaire (au milieu) et houle secondaire (en bas).

5. Conclusion

En s'appuyant sur le rejet d'états de mer de 44 ans (1979-2022) HYWAT présenté à la section 2, cette étude permet de caractériser les états de mer dans la zone EMR Golfe de Gascogne, composée des zones Golfe de Gascogne Nord et Golfe de Gascogne Sud.

Une validation approfondie du rejet HYWAT a été réalisée à la section 3 au moyen de différentes sources d'observation des vagues : satellites altimétriques et bouées houlographes côtières. Les résultats de la validation démontrent la bonne capacité du rejet à reproduire les propriétés statistiques des états de mer dans la zone d'étude, avec d'excellents résultats en ce qui concerne les hauteurs significatives, et des résultats satisfaisants pour les périodes et directions. On constate cependant une tendance du rejet HYWAT à la sous-estimation des hauteurs significatives les plus élevées face aux observations. Cette tendance générale des modèles d'états de mer est en grande partie associée à la sous-estimation des champs de vent utilisés en tant que forçage (Alday et al., 2021 ; Pineau-Guillou et al., 2018 ; Sterl et al., 1998).

Une analyse statistique des états de mer dans une zone d'étude élargie, incluant la zone EMR Golfe de Gascogne, a été effectuée à la section 4, où quatre points P1 à P4 ont été analysés plus finement. Il résulte de cette analyse que la zone EMR Golfe de Gascogne, définie par les points P1 et P2, est caractérisée par des états de mer de H_s comprises entre 2 m et 2.2 m en moyenne. Dans l'ensemble, les hauteurs significatives de vagues sont relativement homogènes, avec un faible gradient résultant des variations bathymétriques à l'approche de la côte. Les vagues proviennent par ailleurs majoritairement des secteurs ouest-sud-ouest à nord-ouest, et plus particulièrement des directions ouest et ouest-nord-ouest. C'est notamment le cas des états de mer les plus énergétiques, au cours desquels les hauteurs significatives maximales peuvent dépasser 11 m (au sud de la zone, lors de la tempête Martin du 27 décembre 1999).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'agglomération de Saint-Malo, le Conseil Départemental d'Ille-et-Vilaine et l'Etat pour son engagement dans le Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) d'intention de l'agglomération de Saint-Malo. Cette étude a utilisé de nombreuses données d'observation. Les auteurs tiennent à remercier les différents organismes qui les ont collectées et mises à disposition : le CEREMA pour les données du réseau d'observation de la houle CANDHIS, le CERSAT pour les données altimétriques et le CEPMMT pour les données atmosphériques.

6. Bibliographie

Airy, G. B., 1841: Tides and waves. *Encyclopædia metropolitana (1817–1845)*, H. J. R. et al., ed., London.

Alday M., Accensi M., Arduin F., Dodet G., 2021. A global wave parameter database for geophysical applications. Part 3: Improved forcing and spectral resolution, *Ocean Modelling*, Volume 166

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. *Journal of Physical Oceanography*, 33, 1921–1939.

Ardhuin, F., E. Rogers, A. Babanin, J.-F. Filipot, R. Magne, A. Roland, A. van der Westhuyzen, P. Queffeulou, J.-M. Lefevre, L. Aouf, and F. Collard, 2010: Semi-empirical dissipation source functions for wind-wave models: part I, definition, calibration and validation. *Journal of Physical Oceanography*, 40, 1917–1941.

Baraille, R. and N. Filatoff, 1995 : Modele shallow-water multicouches isopycnal de miami.

Barnston, A. G. and R. E. Livezey, 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, 115, 1083–1126.

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.

Biscara, L., 2015: MNT bathymétrique de façade atlantique (projet homonim). SHOM.

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

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.

Gomez-Enri, J., Vignudelli, S., Quartly, G.D., Gommenginger, C.P., Cipollini, P., Challenor, P.G., Benveniste, J., 2010 : Modeling Envisat RA-2 Waveforms in the Coastal Zone: Case Study of Calm Water Contamination. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 7, no. 3, pp. 474-478. doi: 10.1109/LGRS.2009.2039193.

Leckler, F., F. Arduin, J.-F. Filipot, and A. Mironov, 2013: Dissipation source terms and whitecap statistics. *Ocean Modelling*, 70, 62–74.

Leckler, F., Lathuilière, C., Michaud, H., Pasquet, A., Le Bec, N., Duporte, E., 2017 : Modélisation et étude des états de mer sur la zone EMR de Dunkerque. Convention SHOM/MEEM [DGEC], SHOM n°51/2016. Rapport interne Shom.

Leckler, F., Osinski, R., Michaud, H., Lathuilière, C., Pasquet, A., Le Bec, N., Tychensky, A., 2018 : Modélisation et étude des états de mer sur la zone EMR d'Oléron. Convention SHOM/DGEC n°2201103478, SHOM n°52/2017. Rapport interne Shom.

Letortu P., Costa S., Cantat O., 2012: Les submersions marines en manche orientale: approche inductive et naturaliste pour la caractérisation des facteurs responsables des inondations par la mer. *Climatologie*, vol 9, 30-57.

Le Cam H., Baraer F., 2012: Climatologie marine. Sous-région marine Manche – Mer du Nord. Évaluation initiale DCSMM. MEDDE, AAMP, Ifremer, Réf. DCSMM/EI/EE/MMN/01/2012, 11p.

Maisondieu C., 2017: Caractérisation statistique des conditions d'états de mer multimodales dans le golfe de Gascogne pour le dimensionnement des structures en mer. *La Houille Blanche*, 2017:6, 40-48.

Magne, R., K. Belibassakis, T. H. C. Herbers, F. Arduin, W. C. O'Reilly, and V. Rey, 2007: Evolution of surface gravity waves over a submarine canyon. *Journal of Geophysical Research*, 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. Arduin, 2012: Three-dimensional modelling of wave-induced current from the surf zone to the inner shelf. *Ocean Science*, 8, 657.

Michaud, H., A. Pasquet, R. Baraille, F. Leckler, L. Aouf, A. Dalphinet, M. Huchet, A. Roland, M. DutourSikiric, F. Arduin, 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*.

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.

Michaud H., Seyfried L., Pasquet A., Leckler F., Lopez G., Leballeur L., Brosse F., Krien Y., Pezerat M., Faidherbe T., HYWAT : 45 ans de rejeux de marée, surcote et états de mer à haute résolution sur les côtes françaises atlantiques. Application aux risques de submersion côtière à Saint Malo. XVIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Anglet, 25 juin 2024.

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.

Pasquet, A., 2016: Homonim – Phase II. Version v4 du système de prévision des surcotes. Configuration ATL. Rapport interne Shom.

Pineau-Guillou, L., Arduin, F., Bouin, M.-N., Redelsperger, J.-L., Chapron, 914 B., Bidlot, J., Quilfen, Y., 2018. Strong winds in a coupled wave915 atmosphere model during a north Atlantic storm event: evaluation against 916 observations. *Quart. Journ. Roy. Meteorol. Soc.* 144, 317–332.

Quarly, G. D.; Kurekin, A. A., 2020. "Sensitivity of Altimeter Wave Height Assessment to Data Selection" *Remote Sens.* 12, no. 16: 2608. <https://doi.org/10.3390/rs12162608>

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.

Seyfried, L., Michaud, H., Pasquet, A., Leckler, F., Leballeur, L., Lopez, G. (en préparation): 40-years of regional Storm Surge and Wave Hindcast using ERA5 reanalysis: Application to coastal flood risks along Atlantic French coast.

Sterl, A., Kommen, G. J., et Cotton, P. D., 1998. Fifteen years of global wave hindcasts using winds from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts reanalysis: Validating the reanalyzed winds and assessing the wave climate. *Journal of Geophysical Research*, 103:5477–5492.

Stopa, J. E., Arduin, F., Stutzmann, E., & Lecocq, T., 2019: Sea state trends and variability: Consistency between models, altimeters, buoys, and seismic data (1979–2016). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 3923–3940. <https://doi.org/10.1029/2018JC014607>

Tolman, H. L., 1994: Wind waves and moveable-bed bottom friction. *Journal of Physical Oceanography*, 24, 994–1,009.

Tolman, H. L. and the WAVEWATCH III® Development Group, 2017: User manual and system documentation of wavewatch iii® version 5.16. Technical report.

Whitham, G. B., 1974: Linear and nonlinear waves. Wiley, New York, 636 p.

Annexe 1. Coordonnées WGS 84 des points P1 à P4

Point	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Profondeur (m / niveau moyen)
P1	-2.675070	45.810833	106
P2	-3.006283	46.315544	112
P3	-2.424479	46.431564	56
P4	-2.153468	46.101471	60

Annexe 2. Corrélogrammes pour les autres secteurs directionnels

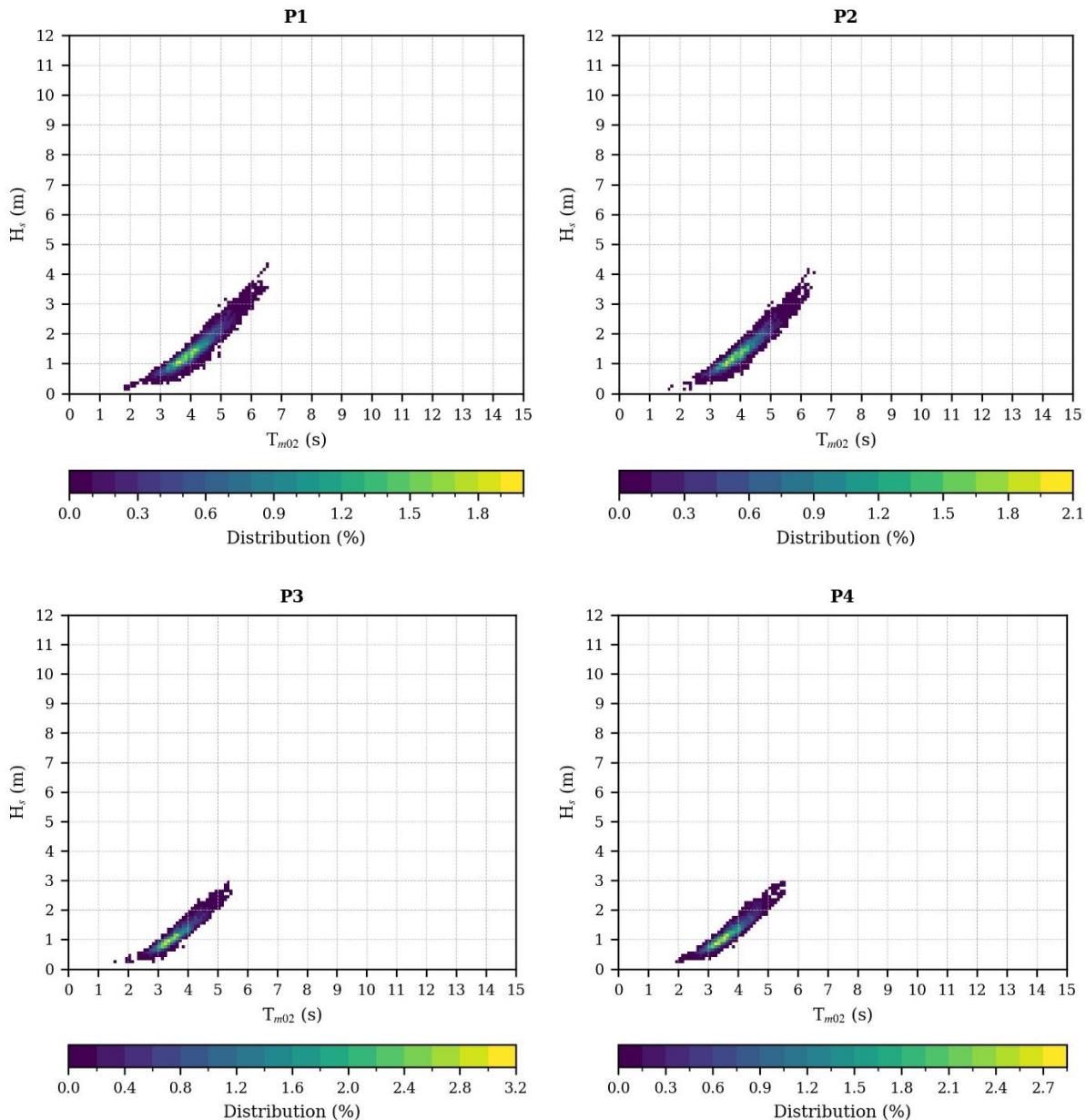


Figure 34 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant du nord ($337.5^\circ < D_m \leq 22.5^\circ$).

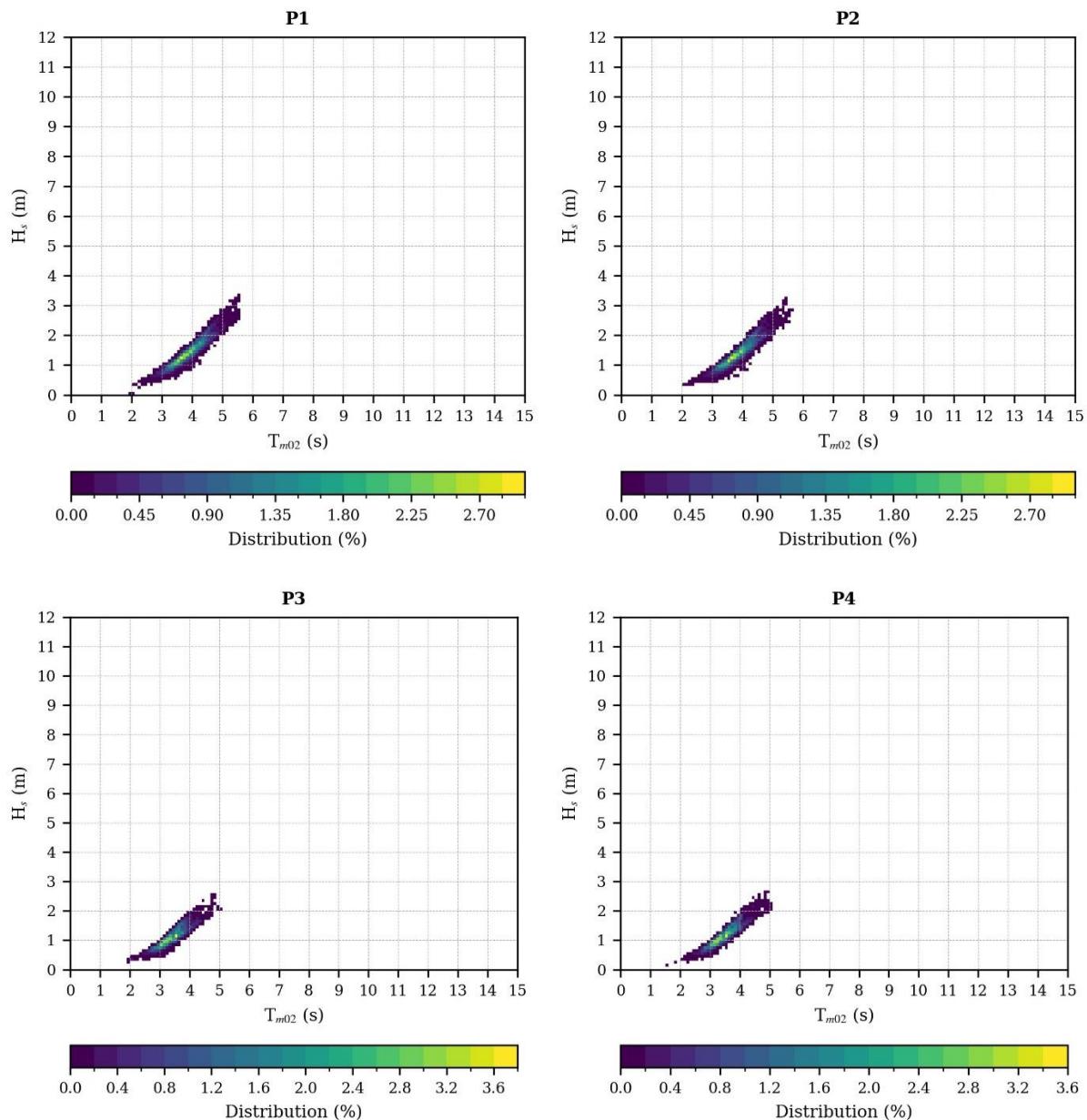


Figure 35 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant du nord-est ($22.5^\circ < D_m \leq 67.5^\circ$).

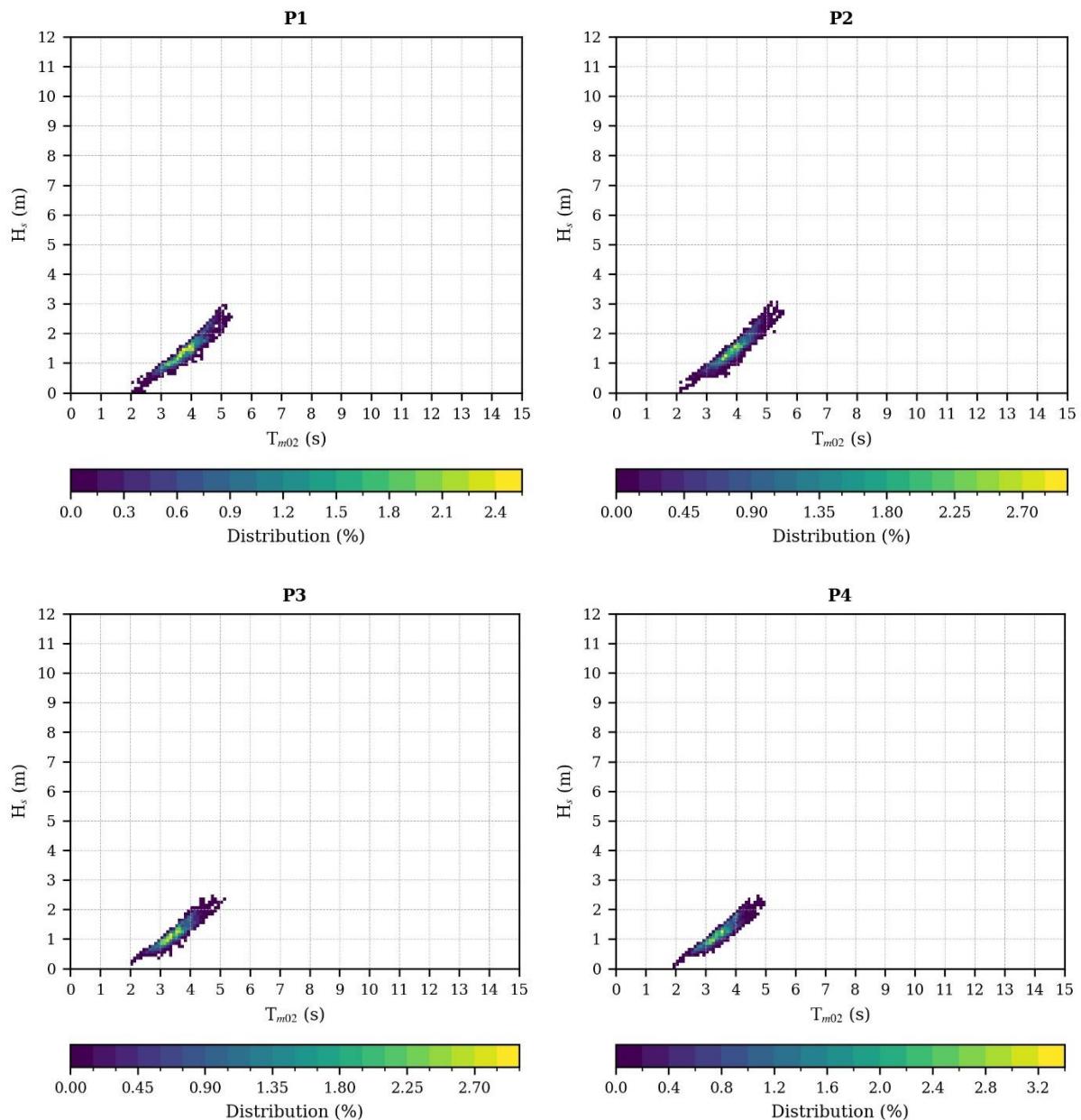


Figure 36 : Corrélogrammes H_s – T_{m02} aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant de l'est ($67.5^\circ < D_m \leq 112.5^\circ$).

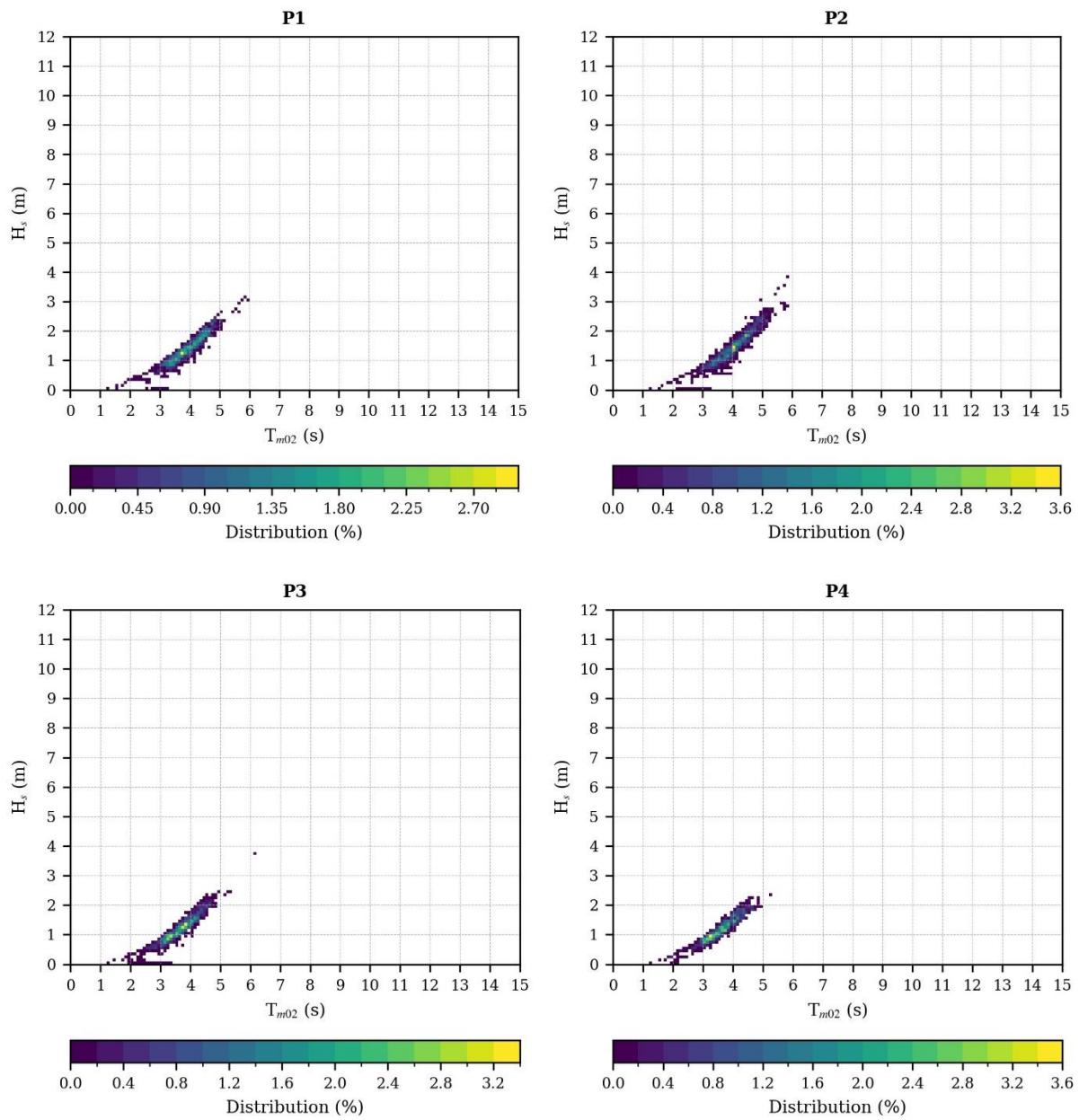


Figure 37 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant du sud-est ($112.5^\circ < D_m \leq 157.5^\circ$).

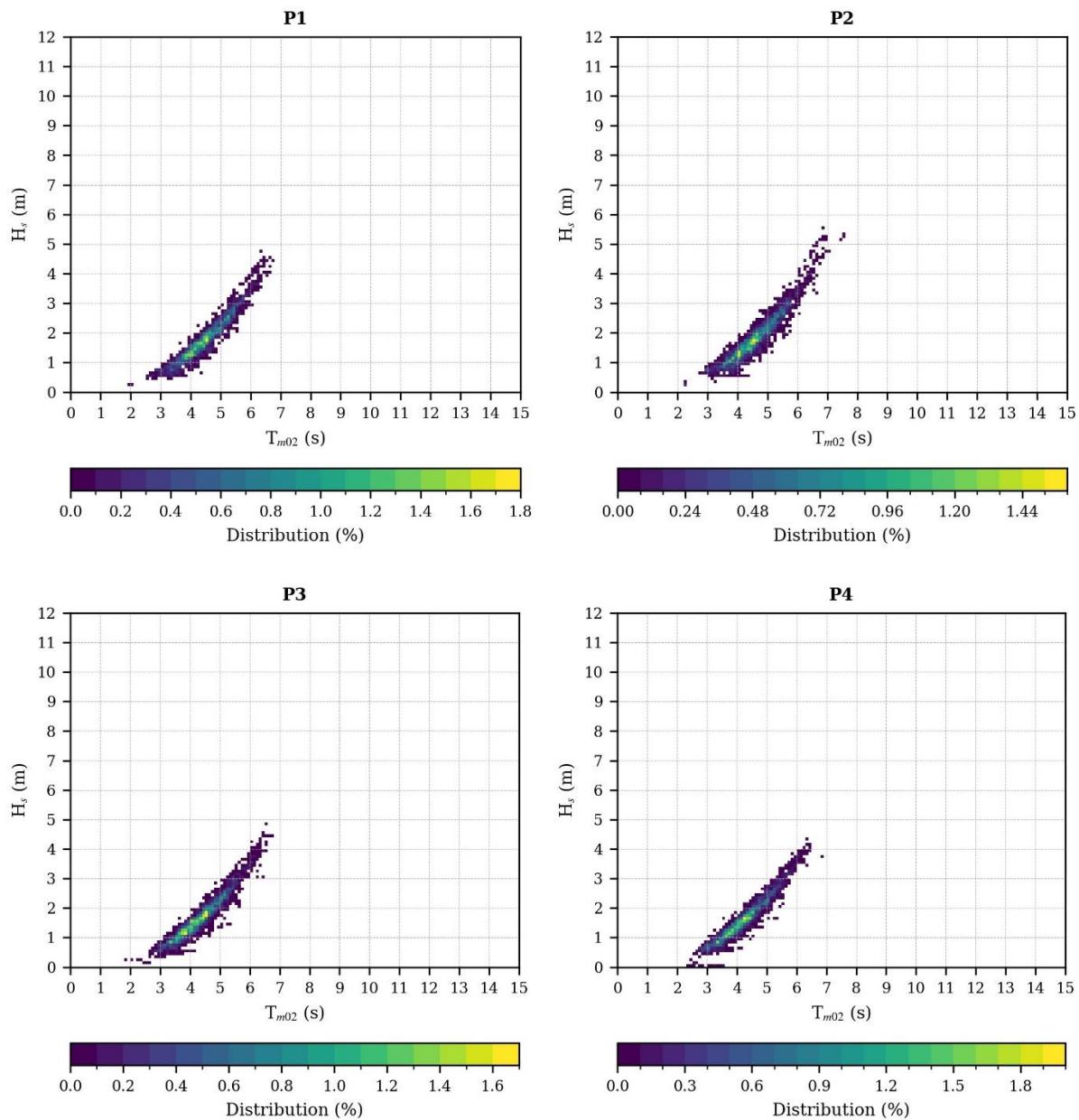


Figure 38 : Corrélogrammes H_s – T_{m02} aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant du sud ($157.5^\circ < D_m \leq 202.5^\circ$).

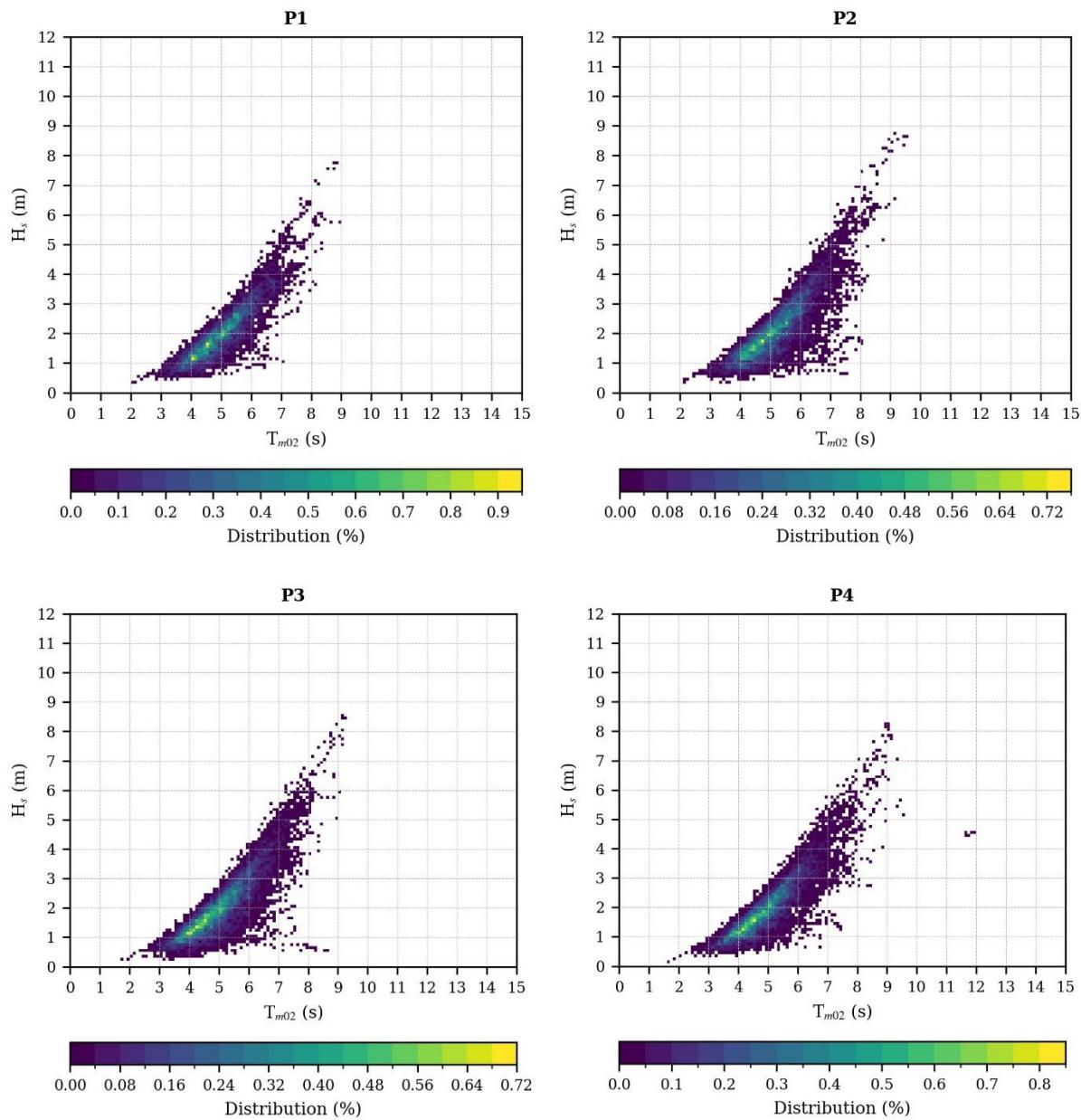


Figure 39 : Corrélogrammes H_s – T_{m02} aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant du sud-ouest ($202.5^\circ < D_m \leq 247.5^\circ$).

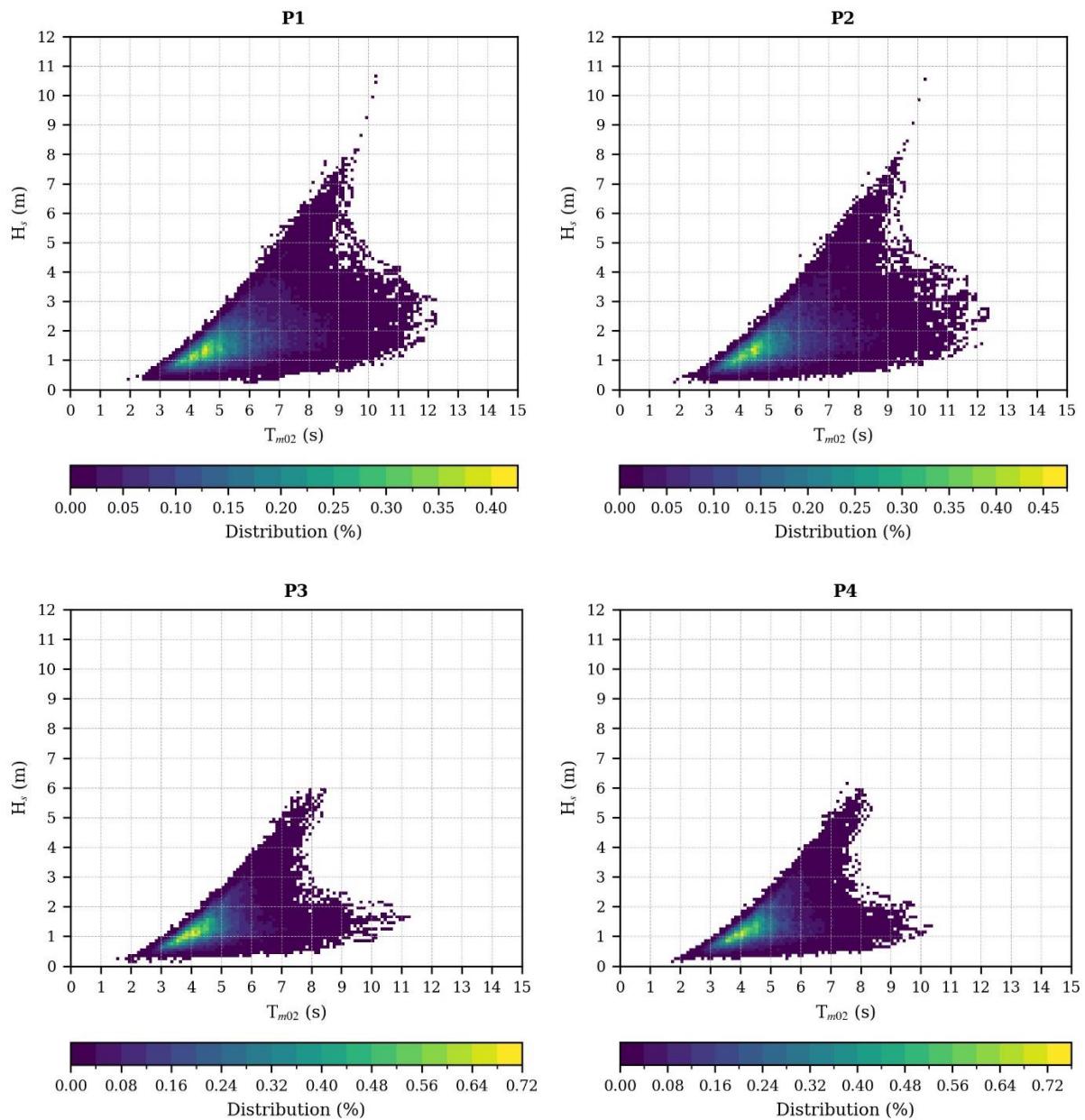


Figure 40 : Corrélogrammes $H_s - T_{m02}$ aux points P1, P2, P3 et P4 de la zone d'étude pour les vagues provenant du nord-ouest ($292.5^\circ < D_m \leq 337.5^\circ$).