

**STATIONS D'OBSERVATION DES CONDITIONS MARITIMES  
2022-2024 DANS L'ESTUAIRE ET LE GOLFE DU SAINT-  
LAURENT ET PROBABILITÉS CONJOINTES VAGUES DE  
TEMPÊTES – NIVEAUX D'EAU**  
**R841.2**

**Urs Neumeier et Sylvain Joly**  
Institut des sciences de la mer de Rimouski - ISMER  
Université du Québec à Rimouski

Réalisé pour le compte du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec

Mai 2025

La présente étude a été réalisée à la demande du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec et elle a été financée par le Ministère.

Les opinions exprimées dans le présent rapport n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs et ne reflètent pas nécessairement les positions du ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec.

---

© Université du Québec à Rimouski, 2025

Référence complète : Neumeier, U., Joly, S., 2025. Stations d'observation des conditions maritimes 2022-2024 dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent et probabilités conjointes des vagues de tempêtes et des niveaux d'eau. Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, xxiii + 215 p.

## Remerciements

Les mouillages ont été préparés et entretenus par Bruno Cayouette. La plupart des opérations de terrain (mouillages et marégraphes) ont été réalisées par Bruno Cayouette, Christian Boutot, Frédéric Bélanger et Sylvain Joly.

Les mouillages ont été récupérés et réinstallés avec des bateaux de pêche des différents ports : *Le Titan* (pêcheur André Pigeon) et *Le Tartigou* (pêcheur André Pigeon) à Rimouski; *L'Anse aux Basques* (pêcheur Sébastien Labonté) et *L'Estuaire* (pêcheur Roger Ouellet) à Matane; *Kaven D. II* (pêcheur Gilles Duguay) et *Miss Amy Lynn* (pêcheur Gilles Duguay) à Sainte-Thérèse-de-Gaspé/Grande-Rivière; Le *Jérôme Isabelle* (pêcheur Sylvain Gauthier) à Rivière-Pentecôte; *L'Omega* (pêcheur Michel Syvrais) à Mont-Louis; le *Costero* (pêcheur Dany Casivi) à Rivière-au-Renard. La mise en place initiale des mouillages du projet a été effectuée lors de la dernière mission du projet précédent 2018-2021 financé par le MTQ (*projet MTQ-ISMER R841-1.1*). Le *Nereis*, petite embarcation portuaire de l'ISMER a été utilisé pour la maintenance des marégraphes.

Le plongeur Mario Déraspe a permis à plusieurs occasions de récupérer un mouillage dont la bouée était bloquée.

Le traitement des données et le contrôle de qualité ont été effectués par Urs Neumeier et Sylvain Joly.

Ce projet a été financé par le ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec, en vertu d'un contrat de recherche entre le ministère et l'Université du Québec (UQAR)/Institut des sciences de la mer de Rimouski (ISMER). Pierre Gaudreau, Michel Michaud et Corina Nicorici ont assuré la coordination du projet au MTMD.

## Sommaire

La nature dynamique du trait de côte est un enjeu important pour l'occupation humaine du littoral. Ces dernières décennies c'est surtout l'érosion côtière qui domine au Québec, mettant à risque le réseau routier, les infrastructures et les habitations dans de nombreux secteurs du Bas-Saint-Laurent, de la Gaspésie (incluant les Îles-de-la-Madeleine), et la Côte-Nord. Ces dernières années ont été marquées par plusieurs événements destructifs majeurs, ainsi que par des tempêtes hivernales de plus en plus fréquentes dans un contexte de couvert de glace de mer de plus en plus réduit. Ce projet est dans la continuité du précédent projet R841.2, intitulé "*Stations d'observation des conditions maritimes 2018-2021 dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent pour les problèmes d'érosion côtière*", qui avait aussi été financé par le ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec (MTMD). Cette prolongation permet ainsi d'améliorer l'information des conditions maritimes, de mieux quantifier la récurrence des événements majeurs et d'augmenter le nombre de sites suivis.

Quatre houlographes ont continué les mesures au large de Saint-Ulric, Cap d'Espoir, Rivière-Pentecôte, Paspébiac du printemps 2021 au printemps 2024. Un nouvel houlographe a été ajouté au large de Mont-Louis de septembre 2022 au printemps 2024. Ces instruments mesurent les vagues, les courants, l'épaisseur des glaces et les niveaux d'eau. Également, le projet a continué les mesures du niveau d'eau initiées à Paspébiac et Mont-Louis à l'aide de marégraphes, mais également avec l'ajout des mesures dans les marinas de Carleton-sur-Mer, Ste-Thérèse-de-Gaspé, Gaspé et Baie-Trinité. Pour chaque site, les données obtenues sur ces trois années de monitorage sont mises en perspective avec les données acquises précédemment.

À St-Ulric, les tempêtes interviennent encore majoritairement au cours de l'automne et peuvent se développer jusqu'au mois de janvier. Lors du dernier hiver 2023-2024, la quasi-disparition des glaces est corrélée avec une plus grande fréquence des tempêtes au printemps. Le record de hauteur de vagues de janvier 2018 a été égalé (4,21 m) lors de la tempête du 24 décembre 2022.

Au Cap d'Espoir, sur ces trois années de suivi, les tempêtes ont été beaucoup plus fréquentes au début de l'hiver et au printemps que lors de l'automne. Les vagues de tempête ont été plus hautes et plus fréquentes dans le golfe du St-Laurent par rapport aux années précédentes. La tempête la plus forte (le même événement qu'à St-Ulric) a généré des vagues de 7,71 m, dépassant le précédent record de décembre 2016 de plus de 1 m.

À Rivière-Pentecôte, les tempêtes ont lieu plus souvent au début de l'hiver et au printemps. Hormis les vagues de tempête, les hauteurs atteintes par les vagues sont très faibles à ce site. La tempête du 24 décembre 2022 a été si violente (vagues de près de 8 m) qu'elle a déplacé l'instrument. Comme pour Cap d'Espoir, il y a eu une augmentation nette de l'intensité et la fréquence des événements de tempête ayant des vagues dépassant 4 m.

À Paspébiac, lors de la même tempête du 24 décembre 2022, les vagues ont atteint 3,75 m, établissant un nouveau record pour la baie des Chaleurs. Malgré ce record, le climat de vagues à Paspébiac demeure proche de ce qui avait été établi lors du précédent rapport.

À Mont-Louis, le régime de vagues ressemble à ce qui est observé à St-Ulric, mais les vagues de tempête y sont plus faibles. La tempête du 24 décembre 2022 qui a établi des nouveaux records sur tous les autres sites, est passée inaperçue à Mont-Louis. Les vagues les plus hautes (3,82 m) ont été mesurées le 4 février 2023.

Les données de glace montrent une tendance à la diminution de la couverture hivernale des glaces, associée à un amincissement des floes de glace. Cela a été particulièrement marqué pour l'hiver 2023-2024, avec moins d'un dixième de la glace d'un hiver froid des années précédentes et des tempêtes majeurs entre janvier et avril. La poursuite du monitorage des conditions océanographiques sur plusieurs années permettrait de confirmer ce signal.

Les surcotes de tempêtes ont été déterminées à partir des données de niveaux d'eau mesurés par les mouillages (AWAC), mais également par six marégraphes installés dans les marinas de Carleton-sur-Mer, Paspébiac, Ste-Thérèse-de-Gaspé, le Havre de Gaspé, Mont-Louis et Baie-Trinité sur la côte Nord. Ces surcotes sont relativement fréquentes et interviennent essentiellement en hiver, mais elles n'ont produit des niveaux d'eau extrêmes seulement lorsqu'elles étaient synchronisées avec des marées hautes de vive-eau. Pendant le présent projet, il y a eu 4 événements majeurs durant lesquels les surcotes ont été de plus d'un mètre dans la plupart des stations équipées de marégraphes et légèrement inférieures lorsque mesurées au large par les AWAC. Dans l'ensemble, les surcotes mesurées par les marégraphes et les AWAC à proximité sont très similaires. Ainsi, la plus forte surcote durant ce projet à Saint-Ulric était de 1,11 m, le 24 décembre 2022, à Cap d'Espoir de 0,92 m le 24 septembre 2022, à Rivière-Pentecôte de 0,92 m le 14 janvier 2024, à Paspébiac de 0,96 m le 24 septembre 2022, et à Mont-Louis la surcote était de 0,87 m le 24 décembre 2022. La tempête exceptionnelle du 24 décembre 2022 a généré les plus fortes surcotes à Carleton (+ 1,17 m), à Paspébiac (+0,99 m), à Ste-Thérèse-de-Gaspé (+1,19 m), à Mont-Louis (+0,87 m) et à Baie-Trinité (+1,29 m). Dans le Havre de Gaspé, le marégraphe n'était pas encore installé à cette date, et la la plus grande surcote est intervenue le 14 janvier 2024 avec un niveau 0,69 m plus élevé que la prédition astronomique.

Le projet a aussi exploré les probabilités conjointes de vagues extrêmes et de niveaux d'eau extrêmes, c'est-à-dire la probabilité que se produisent en même temps une tempête avec de très fortes vagues et un niveau d'eau très haut. En effet, c'est dans cette configuration qu'il y a le plus de risque d'érosion rapide, de dommages aux structures de protection et de dégâts aux bâtiments. Une revue de littérature présente les différentes méthodes utilisées pour ce sujet. Une série de fonctions Matlab (boîte à outils) a été écrite pour le calcul de la probabilité conjointe avec des fonctions copules. Cette boîte à outils couvre tout le traitement à partir des séries temporelles d'observation de hauteurs de vagues ( $H_s$ ) et de niveaux d'eau (SWL), jusqu'aux paires de valeurs  $H_s$ -SWL prédites pour une période de retour donnée. Cette boîte à outils inclus aussi une fonction pour ajuster différentes lois de probabilité aux valeurs extrêmes de  $H_s$  ainsi qu'une fonction implémentant la *revised joint probability method* (RJPM) pour calculer les périodes de retour de SWL en analysant séparément la marée astronomique et la composante résiduelle non-tidale, avant d'obtenir par convolution la probabilité combinée. Toutefois, l'utilisateur peut aussi utiliser un autre logiciel pour ces deux étapes.

Pour le calcul de la probabilité conjointe avec la méthode avec copule, il est recommandé d'utiliser la copule de Gumbel et pour l'ajustement de la fonction copule seulement les événements avec SWL dépassant le centile 97% et  $H_s$  dépassant le centile 99%. Des

nouvelles métriques ont aussi été développées pour comparer les résultats des calculs de probabilité conjointe avec les observations. Ces métriques ont permis une validation réussie de la nouvelle méthode pour cinq sites dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent.

## Synthèse des conclusions et recommandations

Les présents résultats obtenus sur trois années seulement s'inscrivent dans la construction d'une base de données océanographiques à haute résolution de plus de treize années dans l'estuaire et à la pointe de la Gaspésie, de neuf années pour le secteur nord-ouest du golfe et l'intérieur de la baie des Chaleurs; et l'ajout d'un nouveau site à Mont-Louis fournit pour l'instant un peu moins de deux ans de données pour le nord de la Gaspésie. Toutefois, il est recommandé d'avoir 20 ans d'observation pour calculer une période de retour de 50 ans. De plus, les conditions océanographiques peuvent aussi évoluer dans le temps suite aux changements climatiques, avec notamment plus de vagues en hiver suite à la diminution de la glace de mer hivernale. Il est donc recommandé de poursuivre l'effort de collecte des données scientifiques sur l'ensemble des secteurs côtiers à risque, en particulier la mesure des vagues.

Sur ces trois années de suivi des conditions maritimes, l'évolution de l'intensité et la fréquence des événements extrêmes présente des disparités géographiques. À St-Ulric et Paspébiac, malgré des records de hauteur de vagues égalés ou surpassés, le régime de vagues ne diffère que sur quelques événements extrêmes, et demeure semblable aux précédentes périodes de monitorage. Par contre, pour les sites ouverts sur le Golfe – Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte – l'augmentation des hauteurs de vagues de tempête ne se limite pas à quelques événements, et les vagues de tempête sont plus hautes et/ou plus fréquentes dans le golfe du St-Laurent par rapport aux années précédentes. À Mont-Louis, un site a priori plus exposé que St-Ulric, montre un régime de vagues plus faible en termes de hauteur atteinte et de fréquence de tempête.

Les données de glace ont confirmé la tendance à la diminution du couvert de glace dans l'estuaire et le Golfe, avec une plus grande fréquence de périodes libres de glace pendant l'hiver, ce qui a permis une plus grande proportion de tempête en hiver et au printemps.

Les niveaux d'eau mesurés présentent de nombreux événements de surcotes, en particulier deux événements majeurs le 24 décembre 2022 et le 22 septembre 2022, quand la surcote était entre 0,8 à 1,3 m sur tous les sites des marégraphes. La comparaison des surcotes déduites des marégraphes et celles des AWAC placés au large montre une très bonne corrélation dans leur intensité et la synchronicité.

Pour le calcul des probabilités conjointes de vagues extrêmes et de niveaux d'eau extrêmes, c'est-à-dire la probabilité que se produisent en même temps une tempête avec de très fortes vagues et un niveau d'eau très haut, il est recommandé d'utiliser la méthode avec copule. En effet, c'est la méthode dominante dans la littérature scientifique depuis une dizaine d'années et elle permet une grande souplesse pour la période de retour et le nombre de paires SWL-H<sub>s</sub> prédictes. Pour appliquer cette méthode, il est recommandé d'utiliser la copule de Gumbel et d'ajuster la copule avec seulement les événements quand SWL dépassant le centile 97% et H<sub>s</sub> dépassant le centile 99%. Il faut souligner que la qualité du résultat dépend non-seulement de la méthode de probabilité conjointe, mais aussi de la qualité les périodes de retour de SWL et des périodes de retour de H<sub>s</sub>, qui doivent être établies préalablement avec soin.

Le calcul de la probabilité conjointe SWL-H<sub>s</sub> avec les fonctions de la nouvelle boîte à outils Matlab a été validée avec succès pour cinq sites dans l'estuaire et le golfe du Saint-

Laurent. La méthode traditionnelle « Direction de l'hydraulique » du MTMD surévalue légèrement les vagues et les niveaux d'eau pour la période de retour 50 ans.

Des conclusions plus détaillées sont présentées au chapitre 7.

## Table des matières

Remerciements .....	iii
Sommaire.....	iv
Synthèse des conclusions et recommandations .....	vii
Table des matières.....	ix
Liste des tableaux .....	xi
Liste des figures .....	xiv
1   Introduction .....	1
2   Acquisition des données .....	4
2.1   Sites d'étude .....	4
2.2   Description des instruments des mouillages.....	13
2.3   Configuration des mouillages .....	13
2.4   Programmation des mouillages .....	15
2.5   Nomenclature.....	17
2.6   Déroulement des missions et des déploiements.....	18
2.7   Description des marégraphes.....	21
2.7.1   Marégraphe de Carleton .....	24
2.7.2   Marégraphe de Paspébiac .....	24
2.7.3   Marégraphe de Ste-Thérèse-de-Gaspé.....	25
2.7.4   Marégraphe de Gaspé .....	25
2.7.5   Marégraphe de Mont-Louis .....	25
2.7.6   Marégraphe de Baie Trinité.....	25
3   Traitement des données.....	32
3.1   Contrôles généraux pour les données de vagues et de courants .....	32
3.2   Traitement et contrôle de qualité des données de vagues.....	33
3.3   Traitement et contrôle de qualité des données de courants .....	38
3.4   Traitement des données de glace .....	39
3.5   Traitement des données du marégraphe.....	41
4   Résultats des instruments .....	44
4.1   Données de vagues .....	44
4.2   Données de courants .....	68
4.3   Glaces hivernales.....	71
4.4   Niveaux d'eau des mouillages.....	79
4.5   Niveau d'eau des marégraphes.....	86
4.6   Comparaison des niveaux d'eau entre marégraphe et AWAC.....	101
5   Revue de la littérature sur les probabilités conjointes des vagues de tempêtes et des niveaux d'eau .....	107
5.1   Introduction .....	107

5.2	Paramètres analysés .....	107
5.3	Corrélation entre $H_s$ et SWL .....	109
5.3.1	Analyse graphique .....	109
5.3.2	Mesure du degré de dépendance.....	110
5.4	Probabilité conjointe.....	112
1)	Combinaison arbitraire des périodes de retour de $H_s$ et SWL .....	114
2)	Statistiques sur une variable "structure" .....	115
3)	Probabilité conjointe .....	116
6	Calcul des probabilités conjointes des vagues de tempêtes et des niveaux d'eau	120
6.1	Vue d'ensemble de la méthode avec copule .....	120
6.2	Préparation des données .....	120
6.3	Probabilité de SWL .....	129
6.4	Probabilité de $H_s$ .....	130
6.5	Probabilité conjointe avec copule .....	131
6.6	Choix à faire pour le calcul des probabilités conjointes.....	138
6.7	Résumé du traitement dans Matlab.....	146
6.8	Validation de la méthode de calcul de la probabilité conjointe avec copule ...	150
6.8.1	Préparation des données pour la validation.....	150
6.8.2	Résultat de la validation .....	157
6.9	Liste des fonctions Matlab .....	162
7	Conclusions .....	165
8	Description des fichiers de données.....	168
	Références.....	174
	Annexe 1 Liste des paramètres de vagues.....	180
	Annexe 2 Codes du contrôle de qualité sur les données de vagues .....	183
	Annexe 3 Syntaxe d'appel des fonctions Matlab.....	186
	Annexe 4 Influence des paramètres $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ (sélection des événements) pour l'ajustement de la copule de Gumbel .....	199
	Annexe 5 Résultats numériques des calculs de probabilité conjointe SWL- $H_s$ pour les sites A, B, C, E et F .....	211

## Liste des tableaux

Tableau 1 – Positions des cinq mouillages (sites visés, pour les positions exactes de chaque déploiement, voir Tableau 2). ....	5
Tableau 2 – Position exacte ainsi que début et fin de chaque déploiement aux cinq sites (date/heure du premier et dernier enregistrement de vague valide). ....	11
Tableau 3 – Synthèse des paramètres de programmation des instruments.....	17
Tableau 4 – Début et fin approximative de chaque période de déploiement. Pour les dates exactes de chaque mouillage, voir Tableau 2. ....	18
Tableau 5 – Listes des sorties en mer effectuées pour les mouillages du projet. La nomenclature des missions reprend celle utilisée pour l'archivage des données dans le SGDO .....	21
Tableau 6 – Coordonnées et altitudes des marégraphes ainsi que des points de références pour les mesures manuelles. Les différences d'altitude pour convertir des altitudes de CGVD28 à CGVD2013 ou de CGVD28 au zéro des cartes marines (ZC) sont aussi indiquées pour chaque site.....	22
Tableau 7 – Liste des visites de terrain et des marégraphes installés (identification par numéro de série). ....	23
Tableau 8 – Périodes de fonctionnement des marégraphes installés (première et dernière donnée valide UTC). ....	24
Tableau 9 – Signification des différents bits de l'octet du flag de qualité des données de courants. ....	38
Tableau 10 – Les 25 plus fortes tempêtes mesurées entre mai 2010 et mai 2024 aux sites A et B. Les tempêtes de la période avant mai 2021 sont surlignées en grisé. ....	52
Tableau 11 – Les 25 plus fortes tempêtes mesurées entre mai 2014 et mai 2024 aux sites E et F; et les 10 tempêtes les plus fortes au site G entre septembre 2022 et mai 2024. Les tempêtes de la période avant mai 2021 sont surlignées en grisé. ....	53
Tableau 12 – Hauteurs de vagues $H_{m0}$ pour différentes périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel.....	67
Tableau 13 – Statistiques sur les couvertures de glace annuelles à chaque site.....	72
Tableau 14 – Liste des 10 plus fortes surcotes observées aux sites A, B, E, F et des 5 plus fortes surcotes au site G, par rapport aux prédictions de marée, associé au niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) à ce moment-là. Les événements survenus durant le présent projet sont marqués en gras. ....	86
Tableau 15 – Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrées à <b>Carleton</b> entre 12 août 2022 et 16 avril 2024.....	89

Tableau 16 – Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrées à <b>Paspébiac</b> entre le 1er avril 2021 et le 16 avril 2024.....	90
Tableau 17 – Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrées à <b>Ste-Thérèse-de-Gaspé</b> entre le 12 août 2022 et le 15 avril 2024.....	91
Tableau 18 – Listes des 5 plus hauts niveaux d'eau, des 5 plus fortes surcotes et des 5 plus fortes décotes enregistrées à <b>Gaspé</b> entre le 7 juin 2023 et le 26 mai 2024.....	92
Tableau 19 – Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrées à <b>Mont-Louis</b> entre le 31 mars 2022 et le 15 avril 2024.....	93
Tableau 20 – Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrées à <b>Baie-Trinité</b> entre le 23 novembre 2022 et le 9 avril 2024.....	94
Tableau 21 – Différentes combinaisons de période de retour des niveaux d'eau (SWL) et des hauteurs de vagues (Hs) par la Direction de l'hydraulique du MTMD (DHYD) et par Tetratech (Consultants) pour une probabilité conjointe avec une période de retour de 50 ans (Gaudreau, 2019; Tetratech, 2020).....	115
Tableau 22 – Comparaison du choix de la copule utilisée sur la qualité de l'ajustement pour la probabilité conjointe. La métrique $T_{rmse10}$ indique la qualité de l'ajustement (idéalement $T_{rmse10} = 0$ ), alors que $T_{bias10}$ indique si la prédiction surestime (valeur positive) ou surestime (valeur négative) par rapport aux observations. Calculs effectués avec l'option select1, $S_{SWL} = 97\%$ et $S_{Hs} = 99\%$ . de la qualité de l'ajustement selon les différentes fonctions copules utilisées. (A : St-Ulric; B : Cap d'Espoir; C : Sept-Îles; E : Rivière-Pentecôte; F : Paspébiac).....	140
Tableau 23 – Comparaison de l'effet des options select1, select 2, select3 et select4 (forme de la plage des données retenues pour l'ajustement) sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel et de la copule t, toujours avec $S_{SWL} = 97\%$ et $S_{Hs} = 99\%$ . La métrique $T_{rmse10}$ indique la qualité de l'ajustement (idéalement $T_{rmse10} = 0$ ), alors que $T_{bias10}$ indique si la prédiction surestime (valeur positive) ou surestime (valeur négative) par rapport aux observations.	143
Tableau 24 – Période couverte par chaque jeu de données pour le calcul de la probabilité conjointe, proportion de données manquantes (disfonctionnement de l'AWAC, période entre les déploiements et parfois difficultés à mesurer les vagues dans certaines conditions), et mesure du degré de dépendance SWL-H <sub>s</sub> (calculé sur les événements de marée haute) et surcote-H <sub>s</sub> (calculé sur la série temporelle complète) avec le coefficient de corrélation (r) et le Tau de Kendall ( $\tau$ ) .....	151
Tableau 25 – Métriques de la qualité de la probabilité conjointe avec la copule de Gumbel aux cinq sites : nb est le nombre d'événements utilisé pour l'ajustement, RMSE décrit la qualité de l'ajustement de la copule pour combiner les probabilités de SWL et de H <sub>s</sub> (meilleur ajustement si plus petit), $T_{bias10}$ et $T_{rmse10}$ comparent la période de retour prédictive avec la période de	

retour observée (meilleure prédiction si plus proche de 0), F est le facteur de combien la période de retour est sur- ou sous-évaluée. Calculs effectués avec l'option select1 et $S_{SWL} = 97\%$ et $S_{Hs} = 99\%$ .....	157
Tableau 26 – Comparaison entre la méthode DHYD et la méthode avec copule : SWL et $H_s$ pour la période de retour 50 ans selon la méthode DHYD, période de retour selon la méthode avec copule de cette combinaison SWL- $H_s$ , point le plus proche sur la courbe SWL- $H_s$ , telle que prédite par la méthode avec copule pour la période de retour 50 ans, de la paire de valeur DHYD. Calculs effectués avec la copule de Gumbel, l'option select1 et $S_{SWL} = 97\%$ et $S_{Hs} = 99\%$ . .....	158
Tableau 27 – Signification des flags de validité du contrôle de qualité des données de vagues, avec les flags utilisés dans ce projet et les valeurs équivalentes des flags utilisés dans le Système de gestion de données environnementale de l'ISMER (SGDE).....	184
Tableau 28 – Codes explicatifs du contrôle de qualité.....	185
Tableau 29 – Résultats numériques des calculs de probabilité conjointe avec la copule de Gumbel pour les cinq sites. ....	212

## Liste des figures

Figure 1 – Position des sites des mouillages AWAC (mesures des conditions océanographiques) et des marégraphes dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent.....	4
Figure 2 – (Haut) Position du mouillage A (Saint-Ulric). (Bas) Fetch pour le mouillage A par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).....	6
Figure 3 – (Haut) Position du mouillage B (Cap d'Espoir); l agrandissement montre la position exacte (point vert) sur le flanc externe du haut-fond Leander avec la bathymétrie multifaisceau du Service hydrographique du Canada; Profondeur en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage B par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).....	7
Figure 4 – (Haut) Position du mouillage E (Rivière-Pentecôte); profondeurs en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage E par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).....	8
Figure 5 – (Haut) Positions du mouillage F (Paspébiac) et du marégraphe dans le port de Paspébiac; profondeur en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage F par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).....	9
Figure 6 – (Haut) Positions du mouillage G (Mont-Louis) et du marégraphe dans le port de Mont-Louis; profondeurs en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage G par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).....	10
Figure 7 – Vue détaillée de la position de chacun des déploiements aux cinq sites, ainsi que du point visé (cible). En plus des déploiements du présent projet (gros cercles), les déploiements des projets précédents (points noirs).....	12
Figure 8 – Plateforme MTRBM avec AWAC. (A) Lors de la mise à l'eau à bord du bateau de pêche Jérôme Isabelle avec devant l'ADCP et à l'arrière la bouée pour la récupération; le mouillage est suspendu par le déclencheur acoustique CART (jaune) et la bouée parachute, qui seront détachés après l'arrivée sur le fond. (B) Mouillage MTRBM ouvert avec la bouée pour la récupération (la corde de récupération est dans le cylindre noir, le déclencheur acoustique Benthos (gris), les deux caissons batteries (bleu) et des testes de plomb pour assurer la stabilité de la plateforme.....	14
Figure 9 – Plateforme GP-TRBM avec AWAC après la récupération à bord du bateau de pêche Miss Amy Lynn. La bouée utilisée pour la récupération a été relâchée par le largueur acoustique et la corde en Spectra est déroulée.....	15
Figure 10 – Schéma de la programmation avec alternance entre profils de vitesse (aux 20 minutes) et bursts de vagues (aux 60 minutes) .....	16
Figure 11 – Périodes de déploiement des mouillages aux cinq sites avec le nom de chaque déploiement (en bleu foncé déploiements financés par le MSP, en magenta déploiements du projet CC07.1, en vert déploiements du projet CC17.1, en bleu clair déploiements du projet R841.1, en rouge déploiements du présent projet R841.2). L'asymétrie des périodes estivales et hivernales est due aux disponibilités très limitées des bateaux de pêches pour opérer.	20

Figure 12 – Marégraphe de Carleton-sur-mer. Position du marégraphe sur la carte marine et sur une photographie aérienne du port (point rouge). Haut droit : point de référence pour les mesures manuelles (croix rouge) avec le niveau laser et la sonde Heron Little Dipper. Bas droit : les deux tubes ABS au fond desquels sont installés les deux instruments.....	26
Figure 13 – Marégraphe de Paspébiac. Position du marégraphe sur la carte marine et sur une photographie aérienne du port (point rouge). Droit : point de référence pour les mesures manuelles (croix rouge mise en évidence avec un cercle vert). Bas gauche : les deux tubes ABS au fond desquels sont installés les deux instruments.....	27
Figure 14 – Marégraphe de Ste-Thérèse-de-Gaspé. Position du marégraphe sur la carte marine et sur une photographie aérienne du port (point rouge). Haut droit : point de référence pour les mesures manuelles (croix rouge sur socle en béton) avec le niveau laser et la sonde Heron Little Dipper. Bas droit : les deux tubes ABS au fond desquels sont installés les deux instruments.....	28
Figure 15 – Marégraphe de Gaspé. Position du marégraphe sur la carte marine et sur une photographie aérienne du port (point rouge). Haut droit : point de référence pour les mesures manuelles (croix rouge à côté du niveau laser). Bas droit : un des deux tubes ABS au fond desquels sont installés les deux instruments (le second tube ABS est de l'autre côté de la poutre d'acier en "H").....	29
Figure 16 – Marégraphe de Mont-Louis. Position du marégraphe sur la carte marine et sur une photographie aérienne du port (point rouge). Haut droit : point de référence pour les mesures manuelles (croix rouge sur la base de la bitte) avec la sonde Heron Little Dipper. Bas droit : les deux tubes ABS au fond desquels sont installés les deux instruments.....	30
Figure 17 – Marégraphe de Baie-Trinité. Position du marégraphe sur la carte marine et sur une photographie aérienne du port (point rouge); le point vert indique la position du marégraphe temporaire durant l'hiver 2022/2023. Haut droit et bas gauche : point de référence pour les mesures manuelles (croix rouge devant la bitte mis en évidence avec cercle vert). Bas droit : les deux tubes ABS au fond desquels sont installés les deux instruments. ....	31
Figure 18 – Interface graphique « qcwave_gui » utilisée pour le contrôle de qualité des vagues, avec la fenêtre principale (haut) et la fenêtre secondaire présentant la série temporelle d'un burst (bas). .....	36
Figure 19 – Schéma explicatif montrant les conditions nécessaires pour que le maximum (2) soit considéré comme une tempête indépendante, et pas seulement la fin de la tempête (1). ....	37
Figure 20 – Interface « awac_qc » utilisée pour le contrôle de qualité des profils de courants. ....	39
Figure 21 – Seconde fenêtre de l'interface graphique « qcwave_gui » utilisée pour le traitement de données de glace de chaque burst. La correction manuelle de l'interface eau-glace est en magenta en haut et au milieu. L'épaisseur de glace obtenue est en rouge en bas. La période pour ajuster les distances pression-AST est en turquoise entre les deux graphiques inférieurs. ....	41

Figure 22 – Mesures manuelles du niveau d'eau et de la correspondance avec les enregistrements du marégraphe de Carleton le 15 novembre 2023 avant et après le remplacement des marégraphes. ....	43
Figure 23 – Série temporelle des hauteurs de vagues $H_{m0}$ mesurées au site A (Saint-Ulric). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges. ....	46
Figure 24 – Série temporelle des hauteurs de vagues $H_{m0}$ mesurées au site B (Cap d'Espoir). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges. ....	47
Figure 25 – Série temporelle des hauteurs de vagues $H_{m0}$ mesurées au site E (Rivière-Pentecôte). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges. ....	48
Figure 26 – Série temporelle des hauteurs de vagues $H_{m0}$ mesurées au site F (Paspébiac). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges. ....	49
Figure 27 – Série temporelle des hauteurs de vagues $H_{m0}$ mesurées au site G (Mont-Louis). Les 10 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges. ....	50
Figure 28 – Comparaison des probabilités de dépassement des hauteurs de vagues $H_{m0}$ à St-Ulric, Cap d'Espoir et Mont-Louis en fonction des périodes de monitorage. ....	55
Figure 29 – Comparaison des probabilités de dépassement des hauteurs de vagues à Rivière-Pentecôte et Paspébiac en fonction des périodes de monitorage. ....	56
Figure 30 – Hauteur moyenne $H_{m0}$ des vagues lors des 3 plus fortes tempêtes annuelles aux cinq sites d'études. La date de coupure pour discriminer les années est le 1 <sup>er</sup> mai. ....	57
Figure 31 – Roses de vagues pour St-Ulric et Paspébiac pour la durée du projet et comparées avec les données des projets précédents. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,001 / 0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues provenant de cette direction. ....	58
Figure 32 – Roses de vagues pour Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte pour la durée du projet et comparées avec les données des projets précédents. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,001 / 0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues provenant de cette direction. ....	60
Figure 33 – Roses de vagues pour Mont-Louis. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,001 / 0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire	

les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues provenant de cette direction.....	61
Figure 34 – Hauteurs de vagues $H_{m0}$ et directions de provenance des plus fortes tempêtes observées aux sites A, B, E, F et G durant le projet (n = 30;30;20;20;10). Les triangles en bleu correspondent à la période 2010-2021 et les triangles en rouge, mai 2021 - mai 2024.....	62
Figure 35 – Périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel, aux sites A et B. Les tempêtes utilisées pour l'ajustement sont représentées avec des cercles bleus, les tempêtes plus faibles avec des points verts. Pour la loi de Pareto généralisée, le seuil fixé pour le calcul inclut seulement les événements au-dessus du 93 <sup>e</sup> percentile (cercles bleus) de l'ensemble des données. ....	64
Figure 36 – Périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel, aux sites E et F. Les tempêtes utilisées pour l'ajustement sont représentées avec des cercles bleus, les tempêtes plus faibles avec des points verts. Pour la loi de Pareto généralisée, le seuil fixé pour le calcul inclut seulement les événements au-dessus du 93 <sup>e</sup> percentile (cercles bleus) de l'ensemble des données. ....	65
Figure 37 – Périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel, au site G. Les tempêtes utilisées pour l'ajustement sont représentées avec des cercles bleus, les tempêtes plus faibles avec des points verts. Pour la loi de Pareto généralisée, le seuil fixé pour le calcul inclut seulement les événements au-dessus du 93 <sup>e</sup> percentile (cercles bleus) de l'ensemble des données.....	66
Figure 38 – Roses de courants (destination des courants) enregistrées aux sites A et B sur la période mai 2021 à mai 2024. ....	69
Figure 39 – Roses de courants (destination des courants) enregistrées aux sites E et F sur la période mai 2021 à mai 2024. ....	70
Figure 40 – Rose de courants (destination des courants) au site G de Mont-Louis sur la période septembre 2022 à mai 2024.....	71
Figure 41 – Épaisseur de glace au site A (Saint-Ulric) durant les trois hivers du projet. 74	
Figure 42 – Épaisseur de glace au site B (Cap d'Espoir) durant les trois hivers du projet. ....	75
Figure 43 – Épaisseur de glace au site E (Rivière-Pentecôte) durant deux hivers (il n'y a pas de données valides de glace au cours de l'hiver 2022-2023 car l'instrument s'est retourné sur le côté durant une tempête, rendant inutilisable le capteur AST).....	76
Figure 44 – Épaisseur de glace au site F (Paspébiac) durant les trois hivers du projet. 77	
Figure 45 – Épaisseur de glace au site G (Mont-Louis) durant les deux derniers hivers. ....	78
Figure 46 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site A (Saint-Ulric) durant les 3 ans du projet. Des	

symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins ( o ), et les dix plus fortes surcotes ( Δ ) et décotes ( ∇ )......	81
Figure 47 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site B (Cap d'Espoir) durant les 3 ans du projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins ( o ), et les dix plus fortes surcotes ( Δ ) et décotes ( ∇ )......	82
Figure 48 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site E (Rivière-Pentecôte) durant les 3 ans du projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins ( o ), et les dix plus fortes surcotes ( Δ ) et décotes ( ∇ )......	83
Figure 49 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site F (Paspébiac) durant les 3 ans du projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins ( o ), et les dix plus fortes surcotes ( Δ ) et décotes ( ∇ )......	84
Figure 50 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site G (Mont-Louis) au cours des deux dernières années. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins ( o ), et les dix plus fortes surcotes ( Δ ) et décotes ( ∇ )......	85
Figure 51 – Niveau d'eau mesuré à Carleton et surcote/décote d'après l'analyse avec la boite à outils Matlab T_TIDE, pour la période d'août 2022 à avril 2024.....	95
Figure 52 – Niveau d'eau mesuré à Paspébiac et surcote/décote d'après l'analyse avec la boite à outils Matlab T_TIDE, pour la période d'avril 2021 à avril 2024....	96
Figure 53 – Niveau d'eau mesuré à Ste-Thérèse-de-Gaspé et surcote/décote d'après l'analyse avec la boite à outils Matlab T_TIDE, pour la période d'août 2022 à avril 2024. ....	97
Figure 54 – Niveau d'eau mesuré à Gaspé et surcote/décote d'après l'analyse avec la boite à outils Matlab T_TIDE, pour la période de juin 2023 à avril 2024. ....	98
Figure 55 – Niveau d'eau mesuré à Mont-Louis et surcote/décote d'après l'analyse avec la boite à outils Matlab T_TIDE, pour la période d'avril 2021 à avril 2024....	99
Figure 56 – Niveau d'eau mesuré à Baie-Trinité et surcote/décote d'après l'analyse avec la boite à outils Matlab T_TIDE, pour la période de novembre 2022 à avril 2024.....	100
Figure 57 – Comparaison des surcotes du niveau d'eau mesurées par l'AWAC de Cap d'Espoir (B) et les marégraphes de Ste-Thérèse-de-Gaspé et Gaspé lors des tempêtes du 24/09/2022, du 24/12/2022 et du 10/01/2024 (Fuseau HNE).102	
Figure 58 – Comparaison des surcotes du niveau d'eau mesurées par l'AWAC de Paspébiac (F) et les marégraphes de Paspébiac et Carleton lors des tempêtes du 24/09/2022 et du 24/12/2022 (Fuseau HNE).....	103
Figure 59 – Comparaison des surcotes du niveau d'eau mesurées par le marégraphe de Mont-Louis et les AWAC de St-Ulric (A) et de Mont-Louis (G) lors des tempêtes du 24/09/2022, du 24/12/2022, du 10/01/2024 et du 14/01/2024 (Fuseau HNE). .....	104

Figure 60 – Comparaison des surcotes du niveau d'eau mesurées par l'AWAC de Rivière-Pentecôte (E) et le marégraphe de Baie-Trinité lors des tempêtes du 24/12/2022, du 10/01/2024 et du 14/01/2024 (Fuseau HNE). ....	106
Figure 61 – Histogramme dimensionnel (surcote et $H_s$ ) montrant une corrélation négative entre les surcotes et $H_s$ mesurés au large de Hythe en Angleterre (Hawkes, 1998).....	110
Figure 62 – Schéma des probabilité conjointe d'occurrence (trait noir épais, les points noirs sont des combinaisons particulières qui seront analysées) et des probabilités conjointes de faillite/rupture structurale (trait noir fin, submersion côtière dans cet exemple). Pour chaque type de résistance structurale, il y a une combinaison $H_s/SWL$ qui est la plus mauvaise (Hawkes et al., 2002). 114	
Figure 63 – Illustration de la différence du sous-échantillonnage d'un niveau d'eau, qui présente des oscillations de ~15 minutes, soit en prenant le maximum de chaque intervalle (trait vert), soit en appliquant auparavant un filtre passe-bas (trait rouge).....	122
Figure 64 – Illustration du fonctionnement de la fonction cooc_prep.m, qui sélectionne SWL et $H_s$ pour chaque marée haute. En premier (panneau du haut), la fonction trouve le maximum de SWL (point rouge) qui est à $\pm 2$ heures de chaque marée haute prédicta (point bleu clair). Ensuite, la fonction trouve le maximum de $H_s$ (point rouge sur le panneau inférieur) à $\pm 3$ heures du maximum de SWL.....	124
Figure 65 – Exemple de graphique et statistiques (coefficient de corrélation r et Tau de Kendall) produits avec la fonction cooc_stat.m pour illustrer la relation entre $H_s$ et SWL (données de l'AWAC de Saint-Ulric). La couleur des points et les courbes du graphique représente la densité des points. L'exemple utilise un enregistrement pour chaque marée haute.....	126
Figure 66 – Exemple de graphique et statistiques (coefficient de corrélation r et Tau de Kendall) produits avec la fonction cooc_stat.m pour illustrer la relation entre $H_s$ et la surcote (données de l'AWAC de Saint-Ulric). La couleur des points et les courbes du graphique représente la densité des points. L'exemple utilise un enregistrement pour chaque marée haute.....	127
Figure 67 – Exemple de graphique et statistiques (coefficient de corrélation r et Tau de Kendall) produits avec la fonction cooc_stat.m pour illustrer la relation entre $H_s$ et la surcote (données de l'AWAC de Saint-Ulric). La couleur des points et les courbes du graphique représente la densité des points. L'exemple utilise un enregistrement toutes les 20 minutes.....	128
Figure 68 – Exemple de fonction de répartition pour SWL exprimée en période de retour (AWAC de Saint-Ulric), avec la fonction de répartition ajustée aux valeurs extrêmes selon la revised joint probability method (RJPM) calculée avec slev_rjpm.m (CDF RJPM), la fonction de répartition empirique calculée avec empiric_cdf.m (CDF empirique) et la fonction de répartition combinant les deux précédentes (CDF combinée). La figure est produite par la fonction empiric_cdf.m.....	130
Figure 69 – Exemple de fonction de répartition pour $H_s$ exprimée en période de retour (AWAC de Saint-Ulric), avec la fonction de répartition ajustée aux valeurs extrêmes avec la loi de Gumbel calculée avec storm_fit.m (CDF RJPM), la	

fonction de répartition empirique calculée avec <code>empiric_cdf.m</code> (CDF empirique) et la fonction de répartition combinant les deux précédentes (CDF combinée). La figure est produite par la fonction <code>empiric_cdf.m</code> .	131
Figure 70 – Exemple de conversion d'un jeu de données commun SWL-H <sub>s</sub> (AWAC de Saint-Ulric) avec <code>cooc_toproba.m</code> , afin de passer de l'espace d'observation (à gauche) à l'espace probabiliste (à droite). La couleur indique la densité des points.	132
Figure 71 – Illustration avec le jeu de donnée de Saint-Ulric des options <code>select1</code> / <code>select2</code> / <code>select3</code> / <code>select4</code> / toutes les données de <code>cooc_fit.m</code> pour la sélection des données, qui seront utilisées pour l'ajustement de la copule. Le nombre d'événements sélectionnés est respectivement 45, 497, 488, 1955 et 9648.	134
Figure 72 – Exemple des cinq métriques de qualité de la prédiction par les différentes fonctions copules : le critère d'information d'Akaike (AIC), le critère d'information bayésien (BIC) la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), biais de la différence relative de la période de retour ( $T_{bias10}$ ), et la racine de la moyenne du carré de la différence relative de la période de retour ( $T_{rmse10}$ ). Le rang selon chaque métrique est indiqué entre parenthèses (1 = meilleure prédiction). Dans cet exemple, la copule Gaussian produit le meilleur ajustement à partir des probabilités séparées de SWL et H <sub>s</sub> , mais c'est la copule de Gumbel dont les résultats correspondent le mieux aux données. Ce tableau est produit par la fonction <code>cooc_fit.m</code> .	136
Figure 73 – (Haut gauche) Exemple de comparaison entre la probabilité conjointe observée et la probabilité conjointe modélisée avec une copule (ici la copule de Gumbel). (Bas) Magnitude de l'erreur selon la probabilité conjointe observée. Les unités sont la probabilité (valeurs entre 0 et 1). (Haut droit) Comparaison entre la période de retour prédictive pour les événements observés et leurs périodes de retour empiriques. La figure est produite par la fonction <code>cooc_fit.m</code> .	137
Figure 74 – Exemple de courbes SWL-H <sub>s</sub> avec même période de retour (AWAC de Saint-Ulric). (A) Prédiction avec la copule de Gumbel et option <code>select4</code> . (B) Comparaison des prédictions avec différentes fonctions copules. (C) Exemple de sous-échantillonnage de la courbe pour la période de retour de 50 ans avec la copule de Gumbel. (D) Paires SWL-H <sub>s</sub> sous-échantillonées en C. Les panneaux A et B sont produits par la fonction <code>cooc_fit.m</code> , le panneau C par la fonction <code>subsample_return.m</code> .	138
Figure 75 – Illustration de la plage des probabilités conjointes possibles pour une période de retour de 20 ans (zone jaune), qui est borné vers le bas par le cas indépendance (trait vert) et vers le haut par le cas corrélation parfaite (très rouge). Le trait bleu une solution de probabilité ajustée. Les points bleus sont les 14 années d'observations utilisées pour cet exemple.	139
Figure 76 – Comparaison des courbes SWL-H <sub>s</sub> pour la période de retour 50 ans selon les différentes copules. Calculs effectués avec l'option <code>select1</code> et S <sub>SWL</sub> = 97% et S <sub>H<sub>s</sub></sub> = 99%.	141
Figure 77 – Comparaison des courbes SWL-H <sub>s</sub> de la période de retour 50 ans selon la forme de la plage de données (options <code>select1</code> , <code>select2</code> , <code>select3</code> et <code>select4</code> ) pour la sélection des événements utilisés pour l'ajustement de la copule de	

Gumbel. Calculs effectués avec $S_{SWL} = 97\%$ et $S_{Hs} = 99\%$ . Voir Figure 71 pour une illustration des formes de la plage de données.....	144
Figure 78 – Comparaison de l'ajustement selon la forme de la plage de données (options select1, select 2, select3 et select4) avec le graphique présentant la relation entre la période de retour prédictive pour les événements observés et leurs périodes de retour empirique. Calculs effectués avec la copule de Gumbel, $S_{SWL} = 97\%$ et $S_{Hs} = 99\%$ .....	145
Figure 79 – Fenêtre graphique produite par la fonction <code>storm_fit</code> , montrant le menu contextuel permettant de sélectionner la loi de probabilité à ajuster aux données extrêmes des vagues (sont recommandés wbl – Weibull, gum – Gumbel et GPD – distribution Paréto généralisée), le nombre de points utilisés pour la régression, et de copier la fonction de distribution dans une variable ("Copy CDF to variable...").....	148
Figure 80 – Graphiques illustrant la corrélation entre SWL et $H_s$ pour les sites A Saint-Ulric, B Cap d'Espoir, C Sept-Îles, E Rivière-Pentecôte, F Paspébiac et G Mont-Louis. La couleur indique la densité d'événements (marées hautes); les isolignes de densité sont en unités arbitraires. ....	152
Figure 81 – Graphiques illustrant la corrélation entre la surcote et $H_s$ pour les sites A Saint-Ulric, B Cap d'Espoir, C Sept-Îles, E Rivière-Pentecôte, F Paspébiac et G Mont-Louis. La couleur indique la densité d'événements (enregistrement aux 20 minutes); les isolignes de densité sont en unités arbitraires. ....	153
Figure 82 – Courbes de probabilité pour SWL (haut) et $H_s$ (bas) pour chacun des sites A, B, C, E et F, qui ont été utilisées pour le calcul de la probabilité conjointe. ....	155
Figure 83 – Ajustement d'une distribution de Gumbel pour calculer la partie extrême de la courbe de probabilité de $H_s$ pour chacun des sites A, B, C, E et F.....	156
Figure 84 – Comparaison entre la période de retour prédictive pour les événements observés et leurs périodes de retour empiriques pour les cinq sites. Calculs effectués avec la copule de Gumbel, l'option select1, $S_{SWL} = 97\%$ et $S_{Hs} = 99\%$ . ....	160
Figure 85 – Courbes $H_s$ et SWL pour les cinq sites calculées avec la copule de Gumbel, l'option select1, $S_{SWL} = 97\%$ et $S_{Hs} = 99\%$ , ainsi que les événements de récurrence 50 ans selon les méthodes DHYD et « Consultants ». ....	161
Figure 86 – Déphase entre d'une part le maximum de $H_s$ et d'autre part la plus proche marée haute, le maximum de surcote à $\pm 36$ heures et le minimum de surcote à $\pm 36$ heures. Cette figure est produite par la fonction <code>cooc_phase.m</code> . ....	164
Figure 87 – Influence de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ avec l'option <b>select1</b> dans <code>cooc_fit.m</code> sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique $T_{rmse10}$ , qui indique la magnitude de la différence relative entre des périodes de retour prédictives et observées (idéalement $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ sont représentées. Les Figures 95 et 96 illustrent l'effet de ces variations sur les courbes SWL- $H_s$ pour la période de retour 50 ans.....	201
Figure 88 – Influence de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ avec l'option <b>select2</b> dans <code>cooc_fit.m</code> sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique $T_{rmse10}$ , qui indique la magnitude de la différence relative entre des périodes de retour prédictives et observées (idéalement $T_{bias10} = 0$ ). Pour	

..... chaque site, de multiples combinaisons de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ sont représentées.	202
Figure 89 – Influence de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ avec l'option <b>select3</b> dans cooc_fit.m sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique $T_{rmse10}$ , qui indique la magnitude de la différence relative entre des périodes de retour prédictes et observées (idéalement $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ sont représentées.	203
.....	203
Figure 90 – Influence de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ avec l'option <b>select4</b> dans cooc_fit.m sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique $T_{rmse10}$ , qui indique la magnitude de la différence relative entre des périodes de retour prédictes et observées (idéalement $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ sont représentées.	204
.....	204
Figure 91 – Influence de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ avec l'option <b>select1</b> dans cooc_fit.m sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique $T_{bias10}$ , qui indique le biais entre les périodes de retour prédictes et observées (idéalement $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ sont représentées. Les Figures 95 et 96 illustrent l'effet de ces variations sur les courbes SWL-H <sub>s</sub> pour la période de retour 50 ans.....	205
.....	205
Figure 92 – Influence de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ avec l'option <b>select2</b> dans cooc_fit.m sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique $T_{bias10}$ , qui indique le biais entre les périodes de retour prédictes et observées (idéalement $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ sont représentées.....	206
.....	206
Figure 93 – Influence de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ avec l'option <b>select3</b> dans cooc_fit.m sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique $T_{bias10}$ , qui indique le biais entre les périodes de retour prédictes et observées (idéalement $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ sont représentées.....	207
.....	207
Figure 94 – Influence de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ avec l'option <b>select4</b> dans cooc_fit.m sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique $T_{bias10}$ , qui indique le biais entre les périodes de retour prédictes et observées (idéalement $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ sont représentées.....	208
.....	208
Figure 95 – Influence de la variation de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ sur la prédiction de SWL-H <sub>s</sub> pour la période de retour 50 ans avec la copule de Gumbel et l'option select1. La valeur de $S_{SWL}$ et $S_{Hs}$ (valeur identique pour les deux paramètres) est indiquée par la couleur des courbes.....	209
.....	209
Figure 96 – Influence de la variation de $S_{SWL}$ sur la prédiction de SWL-H <sub>s</sub> pour la période de retour 50 ans avec la copule de Gumbel, l'option select1 et $S_{Hs} = 0.99$ . La valeur de $S_{SWL}$ est indiquée par la couleur des courbes. La Figure 91 suggère que certaines de ces courbes SWL-H <sub>s</sub> sont sous-estimées et d'autres surestimées.....	210
.....	210

Figure 97 – Position des paires de valeurs SWL-H<sub>s</sub> sur les courbes de périodes de retour calculées avec la copule de Gumbel, qui sont présentées dans le Tableau 29..... 215

## 1 Introduction

La côte est un environnement dynamique, où le trait de côte s'ajuste continuellement à l'influence de diverse forces (vagues, courants, glaces hivernales) en fonction de la lithologie du littoral et de la disponibilité de sédiments meubles. Le recul du trait de côte, l'érosion côtière, est un processus souvent naturel, qui est aussi nécessaire pour l'apport en sédiments des secteurs adjacents. Toutefois, l'érosion côtière entre en conflit à l'occupation statique du territoire côtier par nos sociétés modernes. En effet, les maisons, les infrastructures et le réseau routier s'adaptent difficilement à l'évolution dynamique de la morphologie littorale. Pour de nombreux secteurs de la Gaspésie, de la Côte-Nord et du Bas-Saint-Laurent, les principaux axes de communication (routes 132 et 138) sont souvent très proches du rivage pour des raisons historiques ou des contraintes géomorphologiques. Ces routes sont vulnérables et en même temps essentielles pour le déplacement des personnes, pour le transport de marchandise et même pour la sécurité de la population (ambulance, pompiers, etc.; Drejza et al., 2014).

L'érosion côtière est principalement causée par les vagues avec aussi des contributions par les courants et les glaces hivernales, et l'action de ces agents est modulée par les niveaux d'eau. En effet, le niveau d'eau lors de tempêtes majeures détermine l'étage de la plage qui est principalement remanié par les vagues. En cas de hauts niveaux dues aux marées de vive-eau combinées avec des surcotes de tempêtes, les vagues affecteront directement le haut de plage ou les ouvrages de protection, et elles pourront aussi attaquer la zone supratidale, ce qui peut mettre en danger les bâtiments et les routes près du rivage (USACE, 2002).

Une bonne connaissance du climat de vague est donc nécessaire pour étudier la morphodynamique littorale et surtout pour planifier les interventions de génie côtier. Pour définir le climat de vague d'un secteur, il est essentiel d'avoir des séries temporelles de hauteur, période et direction des vagues couvrant l'année complète, incluant la fin de l'automne et le début de l'hiver, qui sont la période avec les plus fortes tempêtes. De plus, les séries temporelles doivent être assez longues pour pouvoir estimer les périodes de retour des événements extrêmes. Il est recommandé de calculer la période de retour seulement de 2-3 fois la durée de la série temporelle disponible, par exemple 10 années de données devraient être utilisées seulement pour estimer l'événement extrême se produisant tous les 20 ou 30 ans (USACE, 2002), alors que la durée de vie planifiée de certains ouvrages côtiers est de 50 ans.

En génie côtier, ce n'est pas seulement la hauteur des vagues qui est déterminant, mais aussi le niveau d'eau au pic de tempête. Il faut donc établir la probabilité conjointe pour ces deux facteurs ensemble. Il s'agit d'un sujet complexe, pour lequel différentes méthodes ont été proposées (Hawkes et al., 2008; Garcia et al., 2015; Petroliagkis et al., 2016; Radfar et al., 2023), mais jusqu'à présent aucune méthode pour calculer la probabilité conjointe n'a été acceptée par la majorité des chercheurs et des praticiens.

Le présent projet financé par le ministère des Transports et de la Mobilité durable du Québec a quatre objectifs généraux.

- (A) Améliorer les connaissances du climat de vagues à cinq sites du golfe et de l'estuaire du Saint Laurent, ainsi que de la Baie des Chaleurs. (Saint-Ulric, Cap d'Espoir, Rivière Pentecôte, Paspébiac et Mont-Louis).

- (B) Mesurer sur ces sites les courants, les glaces hivernales et les niveaux d'eau au large.
- (C) Mesurer les niveaux d'eau à la côte pour six sites du golfe et de l'estuaire du St-Laurent, ainsi que de la Baie des Chaleurs (Carleton, Paspébiac, Sainte-Thérèse-de-Gaspé, Mont-Louis, Baie-Trinité, et depuis l'été 2023 aussi Gaspé).
- (D) Améliorer les connaissances sur la probabilité conjointe des vagues et des niveaux d'eau et leur impact sur la côte lors d'événements de tempêtes.

D'une part, il s'agissait donc d'acquérir de nouvelles données (vagues, niveaux d'eau, courants et glaces), faisant suite de plusieurs projets qui avaient déjà mesuré ces paramètres à plusieurs de ces sites.

Un premier projet intitulé "*Mouillages pour l'érosion de berges 2010-2014*", qui avait été financé par le ministère de la Sécurité publique du Québec, Direction générale de la sécurité civile et de la sécurité incendie, et réalisé par l'UQAR/ISMER, a mesuré les vagues au large de Saint-Ulric, du Cap d'Espoir et de Sept-Îles pendant quatre ans. À Sept-Îles les vagues avaient aussi été mesurées près de la côte pendant le semestre estival (Neumeier et Joly, 2014).

Ensuite, le projet CC07.1 intitulé "*Stations d'observation des conditions maritimes 2014-2017 dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent pour les problèmes d'érosion côtière*", qui avait été financé par le MTQ et réalisé par l'UQAR/ISMER, a utilisé les mêmes équipements que le projet précédent, complété par l'achat d'un nouveau mouillage complet. Les vagues ont continué à être mesurées à deux sites du précédent projet (Saint-Ulric et Cap d'Espoir) et deux nouveaux sites ont été ajoutés (Rivière-Pentecôte et Paspébiac). Un marégraphe a aussi été ajoutée dans le port de Paspébiac. Ce projet a enregistré des données jusqu'au printemps 2018 (Neumeier et Joly, 2019).

Le projet CC17.1 intitulé "*Suivi morphosédimentaire et hydrodynamique du champ d'épis situé sur la flèche littorale fermant le barachois de Hope Town*", qui a été financé par le MTQ et réalisé par l'UQAR/ISMER, a pris en charge pendant deux ans (printemps 2018 à printemps 2020) des mesures de vagues au site de Paspébiac et du marégraphe de Paspébiac, en plus d'étudier en détail le secteur de Hope Town (Neumeier et al., 2021).

Le projet R841.1 intitulé "*Stations d'observation des conditions maritimes 2019-2021 dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent pour les problèmes d'érosion côtière*", qui a été financé par le MTQ et réalisé par l'UQAR/ISMER, a ensuite pris en charge du printemps 2018 au printemps 2021 les mesures de vagues au large de Saint-Ulric, Cap d'Espoir, Rivière-Pentecôte. Ce projet a pris en charge les mesures de vagues au large de Paspébiac et le marégraphe seulement de printemps 2020 à printemps 2021, car le projet CC17.1 s'en occupait avant (Neumeier et Joly, 2021).

Un projet spécifique 6301-19-QH01 intitulé "Mesures marégraphiques au quai de Mont-Louis", qui a été financé par le MTQ et réalisé par l'UQAR/ISMER, a mesuré les niveaux d'eau avec un marégraphe à Mont-Louis du printemps 2019 au printemps 2021 (Neumeier, 2021).

Le présent projet R841.2 est la continuité des projet R841.1 et 6301-19-QH01 en poursuivant à partir du printemps 2021 la mesure des vagues, courants et glaces à Saint-Ulric, Cap d'Espoir, Rivière-Pentecôte et Paspébiac, ainsi que des niveaux d'eau à

Paspébiac et Mont-Louis. De plus, ce projet a ajouté un site de mesure des vagues, courants et glaces à Mont-Louis (dès septembre 2022) et quatre sites de marégraphe à Carleton (dès août 2022), Ste-Thérèse-de-Gaspé (dès août 2022), Baie-Trinité (dès novembre 2022) et Gaspé (dès juin 2023).

Ce rapport décrit donc dans les chapitres 2 à 4 les instruments et les méthodes utilisés, puis présente les données récoltées durant les trois années qu'a duré le projet.

D'autre part, le projet développe et valide une méthode pour calculer la probabilité conjointe des vagues et des niveaux d'eau lors d'événements de tempêtes pour estimer les périodes de retour de ces événements. Une revue de littérature sur cette question est présentée au chapitre 5 et le détail de la méthode proposée est décrite au chapitre 6.

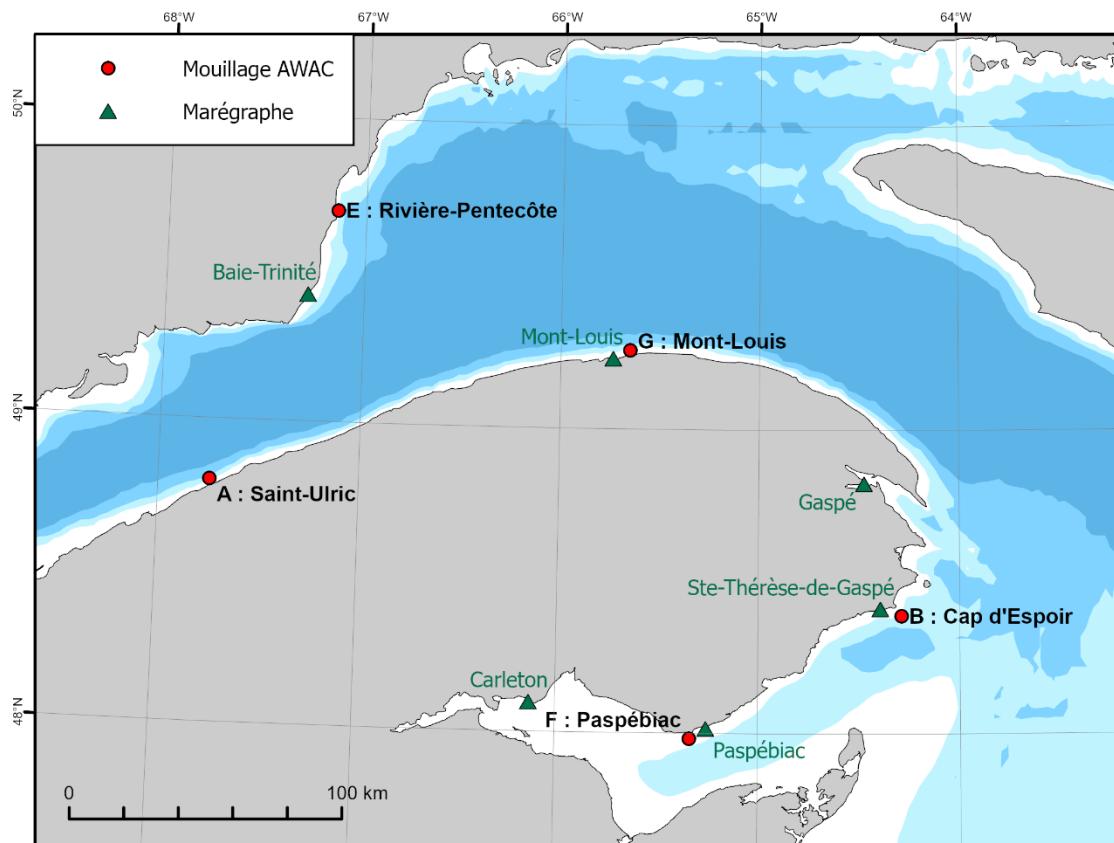
## 2 Acquisition des données

Ce projet a mesuré d'une part les conditions océanographiques (vagues, niveau d'eau, courants, glaces) avec des mouillages AWAC, ce qui est décrit aux sections 2.1 à 2.6. D'autre, part, il a aussi mesuré précisément les niveaux d'eau avec des marégraphes installés dans des ports, ce qui est décrit à la section 2.7.

### 2.1 Sites d'étude

Ce projet a mesuré les conditions océanographiques au large de cinq secteurs menacés par l'érosion côtière (Figure 1). La position exacte de chaque mouillage a été déterminée selon des considérations techniques (profondeur, rugosité et pente du fond marin) pour assurer un bon fonctionnement des instruments, une bonne stabilité des mouillages et une profondeur suffisante pour éviter les dommages par les glaces hivernales. Les coordonnées des sites sont indiquées au Tableau 1.

Les figures 2 à 6 présentent des cartes détaillées pour chaque mouillage ainsi que les fetchs (distance sur laquelle le vent peut souffler dans une direction pour générer les vagues). Les fetchs sont indiqués pour tous les 3 degrés en direction, mais aussi comme fetchs pondérés



*Figure 1 – Position des sites des mouillages AWAC (mesures des conditions océanographiques) et des marégraphes dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent.*

*Tableau 1 – Positions des cinq mouillages (sites visés, pour les positions exactes de chaque déploiement, voir Tableau 2).*

Identifiant et nom	Longitude / Latitude	MTM X / Y (fuseau)	Prof. #
A : Saint-Ulric	48° 48,000' N / 67° 44,600' W	286925 / 5406874 (6)	32 m
B : Cap d'Espoir	48° 23,350' N / 64° 17,350' W	320413 / 5361186 (5)	37 m
E : Rivière-Pentecôte	49° 41,770' N / 67° 08,700' W	330401 / 5506563 (6)	34 m
F : Paspébiac	47° 58,900' N / 65° 20,200' W	242348 / 5316196 (5)	34 m
G : Mont-Louis	49° 15,540' N / 65° 39,150' W	220917 / 5458525 (5)	32 m

# Profondeur sous le zéro des cartes marines.

selon la méthode d'Yvon Ouellet (Neumeier et al., 2016), qui calcule une moyenne pondérée de -42° à +42°.

Le site de Saint-Ulric (A) est à ~32 m de profondeur et à environ 2,3 km au large de Saint-Ulric (Figure 2). La côte sud de l'estuaire est ici presque rectiligne et la bathymétrie présente une pente relativement régulière entre 10 et 60 m de profondeur. Le site A est représentatif pour les vagues au large dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent entre Matane et Sainte-Flavie.

Le site de Cap d'Espoir (B) est à ~37 m de profondeur environ 4 km au large du cap d'Espoir sur la pente externe du haut-fond Leander (Figure 3). Le mouillage est placé dans une zone au relief peu accidenté (replat sans trop de grands blocs). Ce site permet de mesurer les vagues du golfe du Saint-Laurent frappant Percé et Anse-à-Beaufils en provenance du nord-est, de l'est et du sud-est, ainsi que les vagues sortant de la baie des Chaleurs. Il est aussi pertinent pour mesurer les vagues du golfe du Saint-Laurent entrant dans la baie des Chaleurs.

Le site de Rivière-Pentecôte (E) est à 34 m de profondeur entre les villages de Rivière-Pentecôte et de Baie-Trinité, à 3 km au nord de la Pointe-aux-Anglais (Figure 4). La côte est ici rectiligne nord-sud devant une petite plaine côtière formée de cordons littoraux. La bathymétrie forme localement une pente régulière entre 20 et 50 m de profondeur, mais elle est plus irrégulière en plus grande profondeur (Figure 4). Ce site du nord-ouest du golfe du Saint-Laurent est bien exposé aux vagues venant du sud, sud-est, de l'est et du nord-est.

Le site de Paspébiac (F) est à 34 m de profondeur en face de la pointe de New-Carlisle (Figure 5). Il est représentatif pour la partie centrale nord de la baie des Chaleurs. Les plus grands fetchs sont de l'est et d'est-nord-est, mais il y a aussi des fetchs de plus de 50 km vers l'ouest, c'est-à-dire vers l'intérieur de la baie des Chaleurs.

Le site de Mont-Louis (G) est à 32 m de profondeur devant la baie de l'Anse Pleureuse. La côte est relativement rectiligne Est-Ouest avec une pente sous-marine plutôt raide. Le site est dans une zone assez grande de la bonne profondeur et sans relief. Il est bien exposé à toutes les vagues venant du large (est, nord et ouest), avec des fetchs de 100 à 140 km.

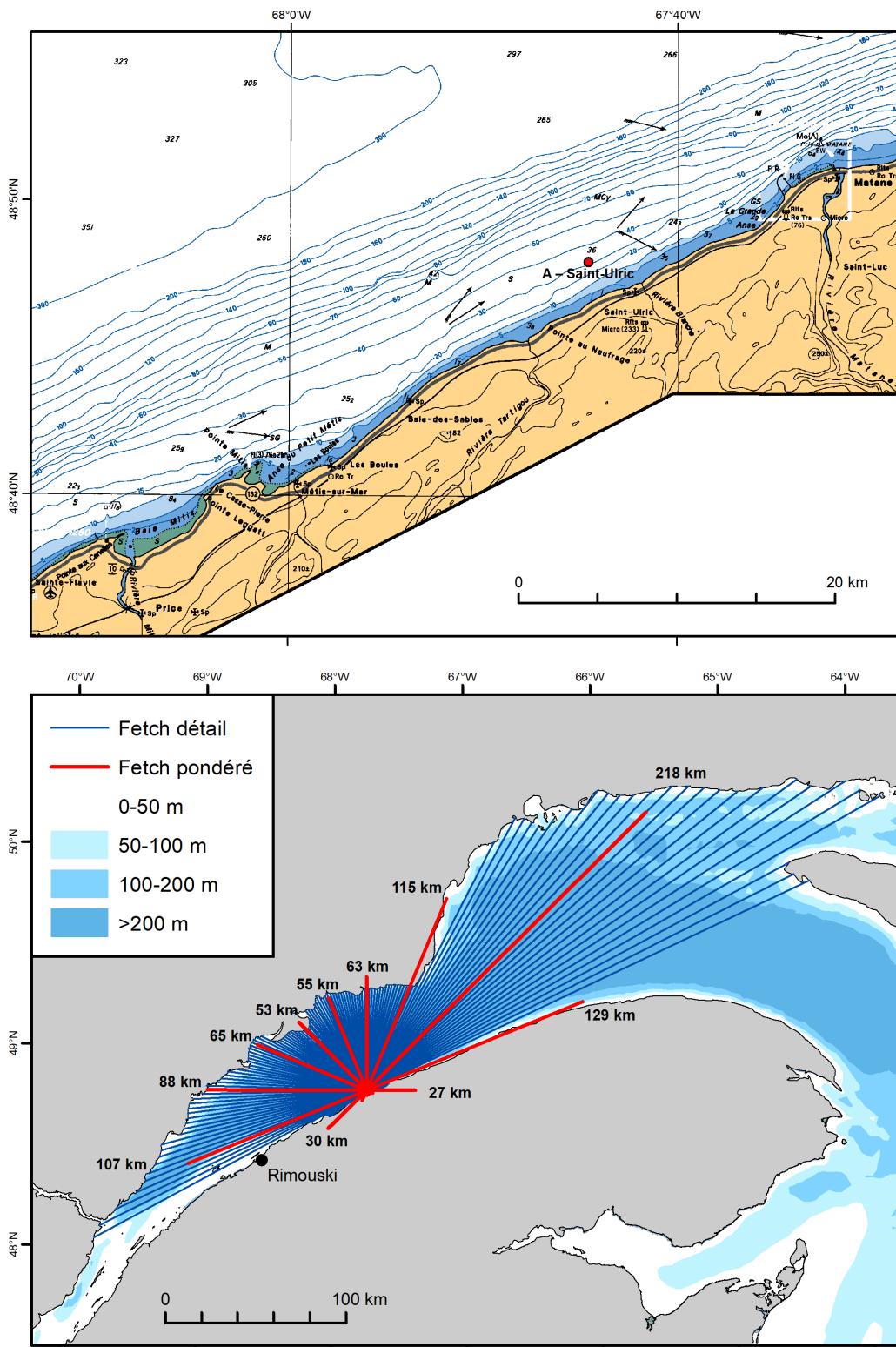


Figure 2 – (Haut) Position du mouillage A (Saint-Ulric). (Bas) Fetch pour le mouillage A par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).

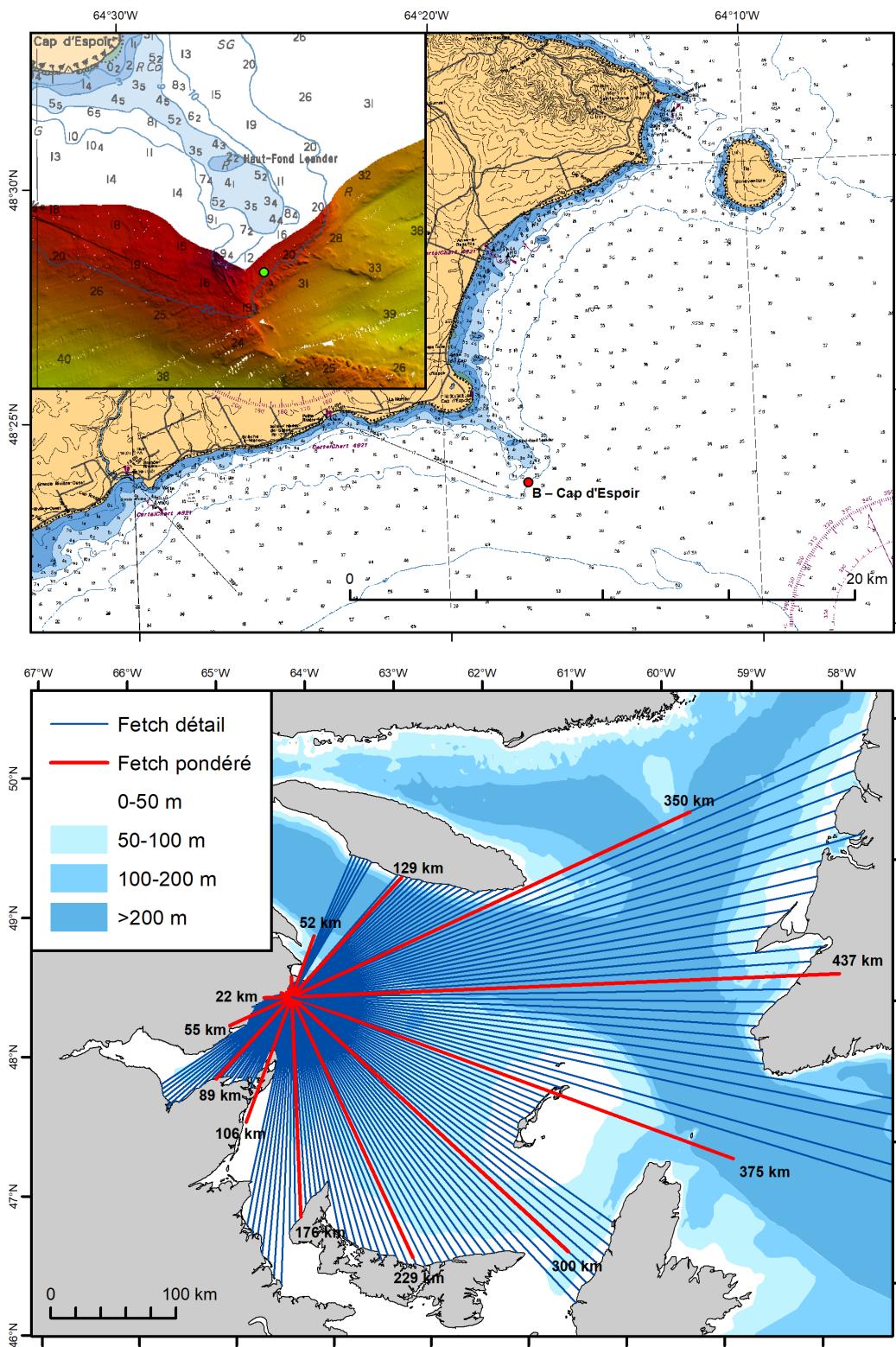
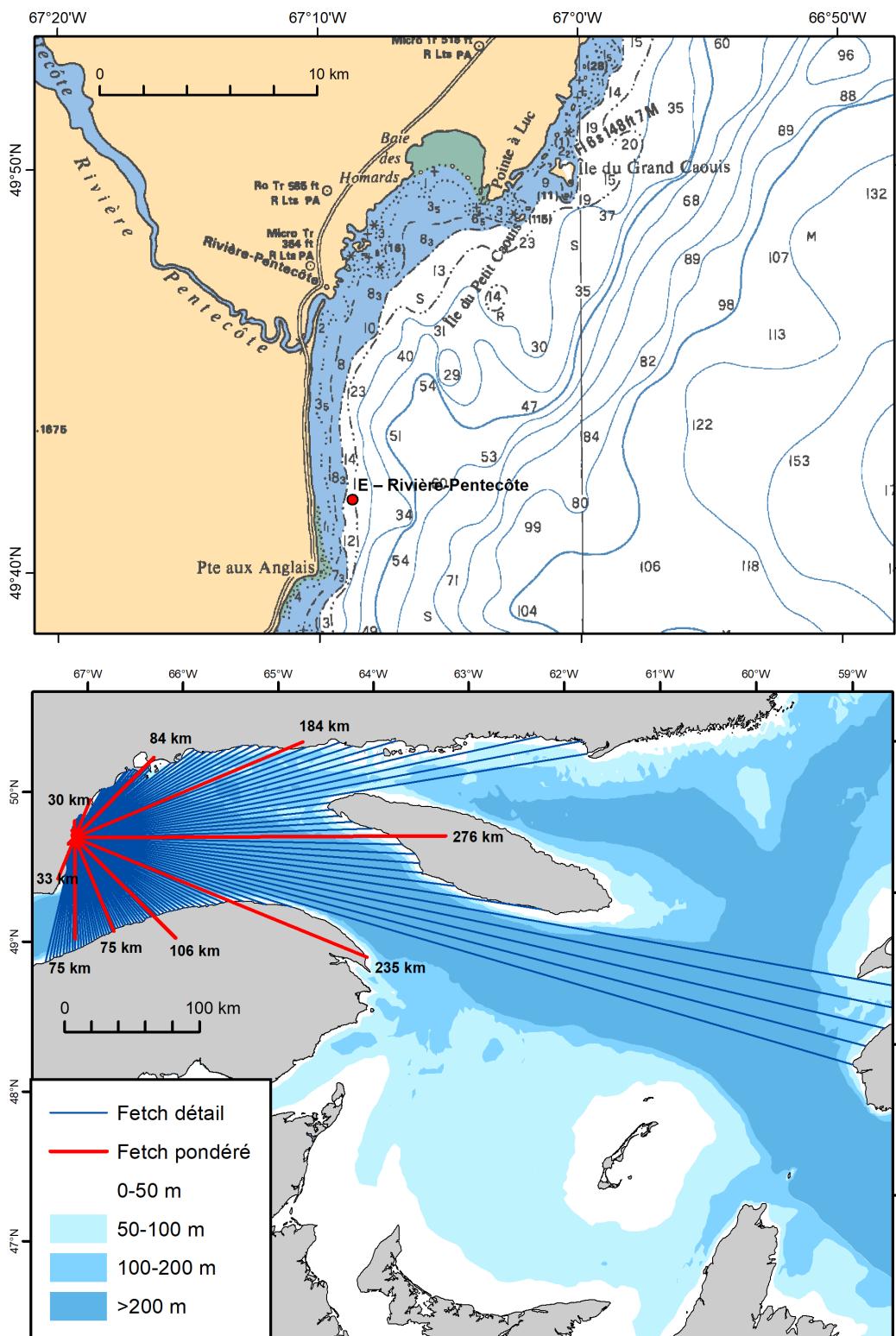
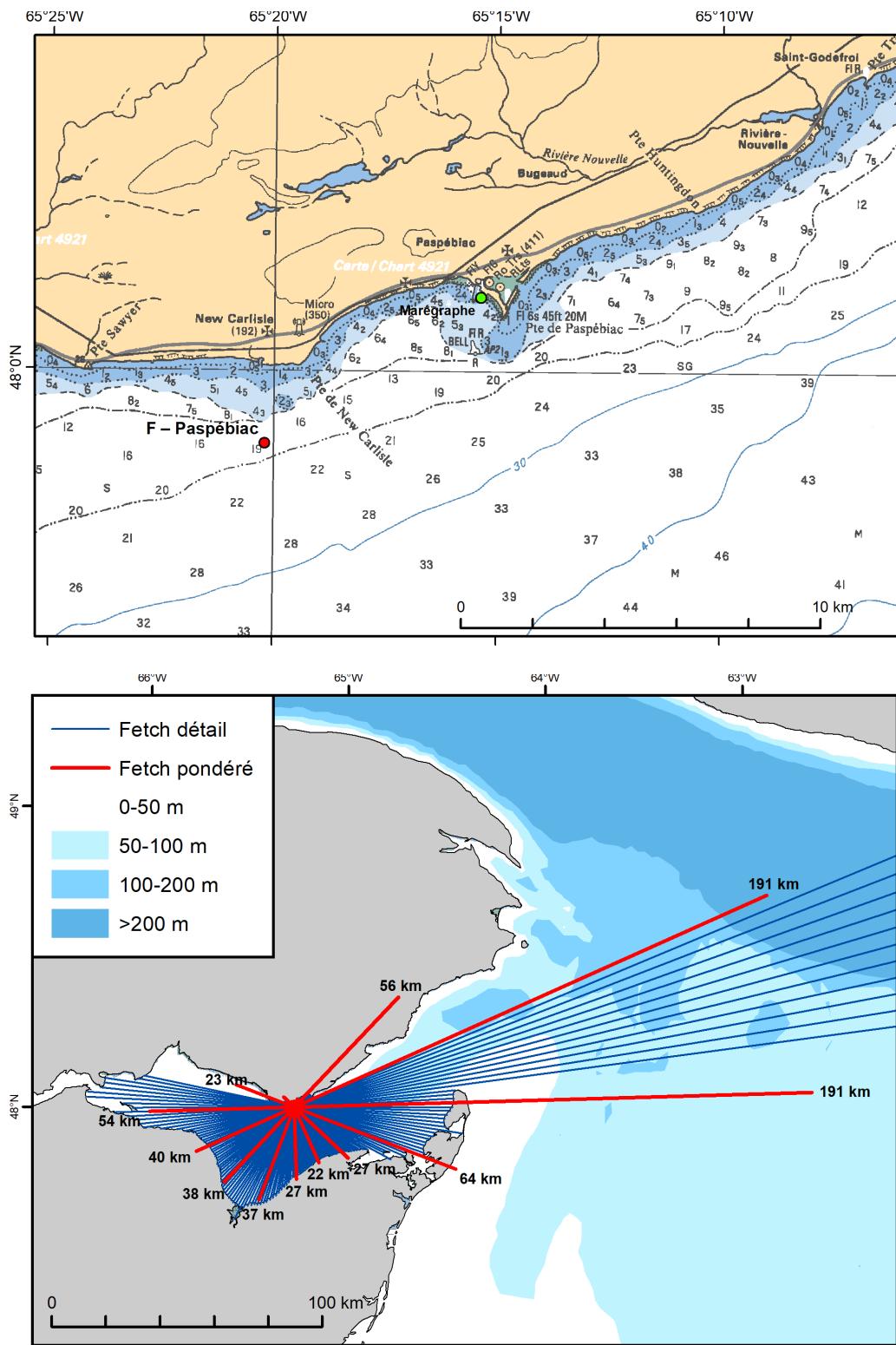


Figure 3 – (Haut) Position du mouillage B (Cap d'Espoir); l agrandissement montre la position exacte (point vert) sur le flanc externe du haut-fond Leander avec la bathymétrie multifaisceau du Service hydrographique du Canada; Profondeur en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage B par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).



*Figure 4 – (Haut) Position du mouillage E (Rivière-Pentecôte); profondeurs en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage E par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).*



*Figure 5 – (Haut) Positions du mouillage F (Paspébiac) et du marégraphe dans le port de Paspébiac; profondeur en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage F par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).*

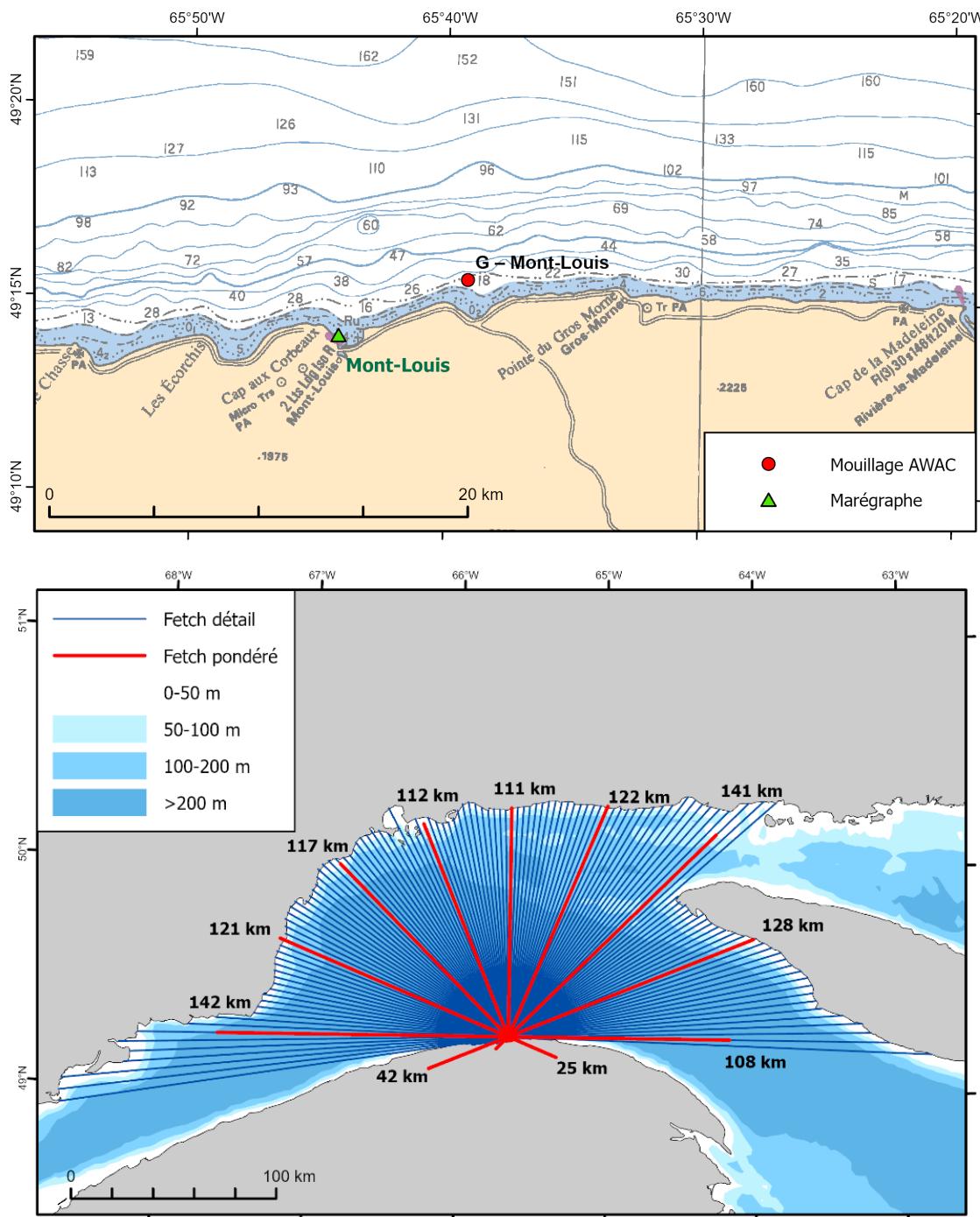


Figure 6 – (Haut) Positions du mouillage G (Mont-Louis) et du marégraphe dans le port de Mont-Louis; profondeurs en brasses. (Bas) Fetch pour le mouillage G par secteur de 3° en noir et fetch pondéré en rouge (cf. texte).

Le Tableau 1 indique la position visée pour les cinq sites. La position réelle des mouillages lors de chaque déploiement était un peu différente à cause de la difficulté de maintenir les bateaux immobiles par rapport au fond, alors qu'ils sont soumis à des courants significatifs. De plus, les mouillages étaient volontairement placés 50-100 m plus loin si le mouillage précédent n'avait pas pu être récupéré normalement pour éviter les

interférences entre les instruments et pour faciliter le travail des plongeurs. Enfin au site E, les mouillages ont parfois été placés un peu plus loin à cause de la présence de lignes de paniers de pêcheurs de crabes. Le Tableau 2 et la Figure 7 indiquent la position exacte de chaque mouillage.

*Tableau 2 – Position exacte ainsi que début et fin de chaque déploiement aux cinq sites (date/heure du premier et dernier enregistrement de vague valide).*

Période	Fichier	Début (HNE)	Fin (HNE)	Latitude	Longitude	Prof. m #
<i>A – Saint-Ulric</i>						
<b>cible A</b>				<b>48° 48,000' N</b>	<b>67° 44,600' W</b>	<b>32</b>
2021A	SPA21A	2021-05-09 14:00	2022-09-27 12:00	48° 47,986' N	67° 44,492' W	34
2022A	SPA22A	2022-06-25 19:00	2022-11-09 13:00	48° 48,006' N	67° 44,295' W	29,8
2022B	SPA22B	2022-11-09 14:00	2023-06-20 00:00	48° 48,015' N	67° 44,570' W	32
2023A	SPA23A	2023-06-20 02:00	2023-10-18 16:00	48° 48,026' N	67° 44,490' W	32
2023B	SPA23B	2023-10-18 17:00	2024-05-22 11:00	48° 48,004' N	67° 44,566' W	32
<i>B – Cap d'Espoir</i>						
<b>cible B</b>				<b>48° 23,350' N</b>	<b>64° 17,350' W</b>	<b>37,1</b>
2021A	SPB21A	2021-05-30 06:00	2022-06-30 04:00	48° 23,340' N	64° 17,344' W	38,5
2022A	SPB22A	2022-06-30 06:00	2022-10-24 12:00	48° 23,338' N	64° 17,357' W	37,2
2022B	SPB22B	2022-10-24 14:00	2023-06-21 04:00	48° 23,334' N	64° 17,368' W	37
2023A	SPB23A	2023-06-21 07:00	2023-10-11 04:00	48° 23,197' N	64° 17,206' W	38
2023B	SPB23B	2023-10-11 06:00	2024-05-26 04:00	48° 23,351' N	64° 17,337' W	37
<i>E – Rivière-Pentecôte</i>						
<b>cible E</b>				<b>49° 41,770' N</b>	<b>67° 08,700' W</b>	<b>34</b>
2021A	SPE21A	2021-05-20 06:00	2022-09-28 12:00	49° 41,848' N	67° 08,689' W	33
2022A	SPE22A	2022-06-25 14:00	2022-11-16 08:00	49° 41,936' N	67° 08,677' W	32,5
2022B	SPE22B	2022-11-16 10:00	2023-06-19 15:00	49° 41,726' N	67° 08,786' W	35
2023A	SPE23A	2023-06-19 16:00	2023-10-17 15:00	49° 41,412' N	67° 08,419' W	35
2023B	SPE23B	2023-10-17 17:00	2024-05-15 12:00	49° 41,776' N	67° 08,679' W	31
<i>F – Paspébiac</i>						
<b>cible F</b>				<b>47° 58,900' N</b>	<b>65° 20,200' W</b>	<b>34</b>
2021A	SPF21A	2021-05-30 14:00	2022-06-30 12:00	47° 58,870' N	65° 20,230' W	34,7
2022A	SPF22A	2022-06-30 13:00	2022-10-24 05:00	47° 58,889' N	65° 20,195' W	33,4
2022B	SPF22B	2022-10-24 06:00	2023-06-21 13:00	47° 58,884' N	65° 20,271' W	33
2023A	SPF23A	2023-06-21 15:00	2023-10-11 12:00	47° 58,530' N	65° 20,159' W	34
2023B	SPF23B	2023-10-11 14:00	2024-05-26 12:00	47° 58,894' N	65° 20,226' W	33
<i>G – Mont-Louis</i>						
<b>cible G</b>				<b>49° 15,540' N</b>	<b>65° 39,150' W</b>	<b>32</b>
2022B	SPG22B	2022-08-31 09:00	2023-07-19 07:00	49° 15,534' N	65° 39,082' W	32,1
2023A	SPG23A	2023-07-19 08:00	2023-10-18 00:00	49° 15,206' N	65° 39,091' W	25
2023B	SPG23B	2023-10-18 01:00	2024-05-21 11:00	49° 15,542' N	65° 39,140' W	32

# Profondeur sous le zéro des cartes marines.

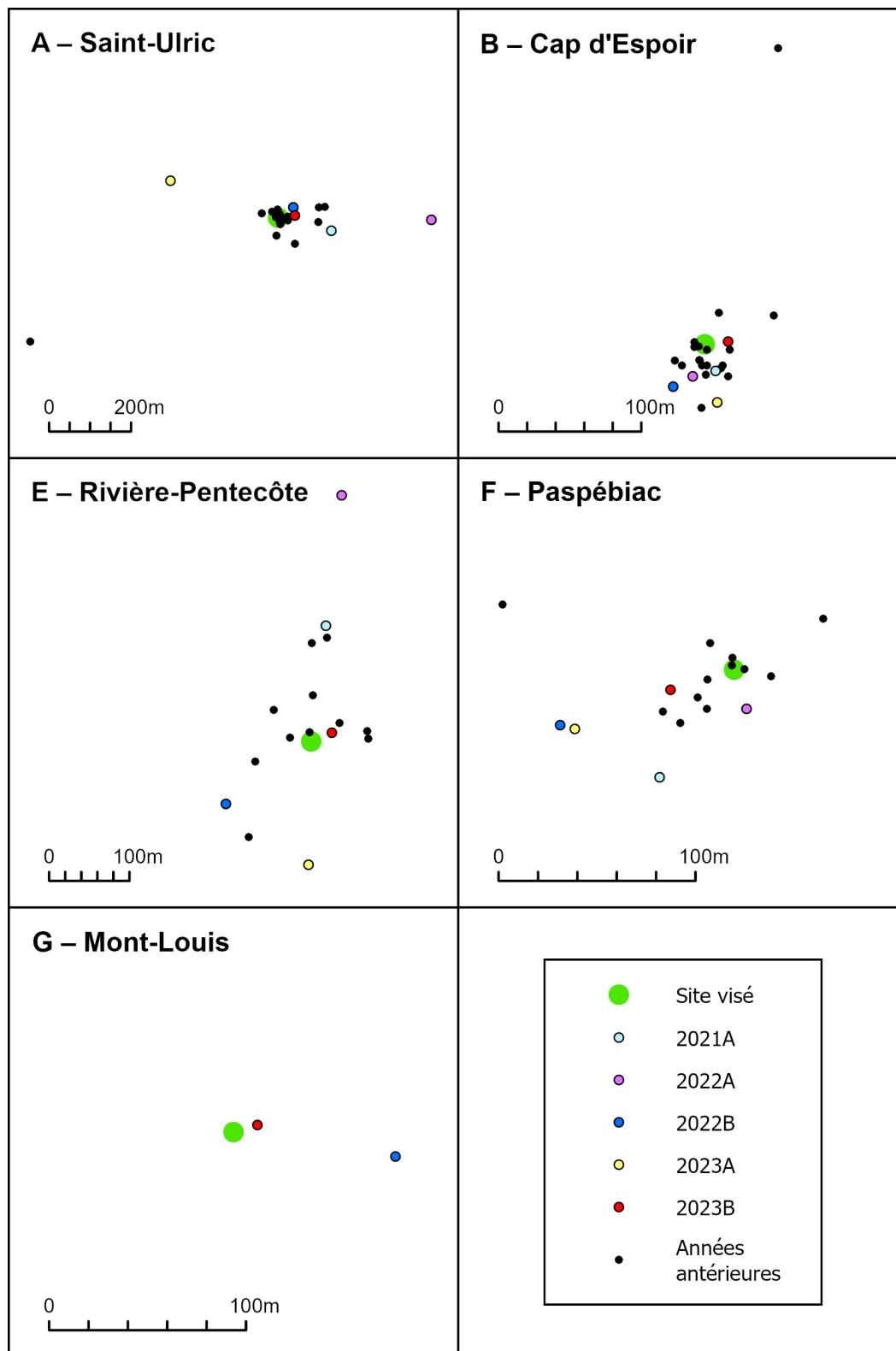


Figure 7 – Vue détaillée de la position de chacun des déploiements aux cinq sites, ainsi que du point visé (cible). En plus des déploiements du présent projet (gros cercles), les déploiements des projets précédents (points noirs).

## 2.2 Description des instruments des mouillages

Les vagues et les courants ont été mesurés avec un seul modèle de profileurs de courants à effet Doppler acoustique (ADCP), soit des AWAC-AST 600 kHz (AWAC) de la firme Nortek. Les ADCPs, dont les faisceaux sont orientés vers le haut, sont montés sur un support de mouillage qui repose sur le fond marin.

La mesure des profils de courants est effectuée par les ADCPs de manière classique avec les trois faisceaux acoustiques inclinés de 25° par rapport à la verticale : la vitesse des particules en suspension est déterminée dans l'axe de chaque faisceau par effet Doppler acoustique (déphasage de l'écho renvoyé par les particules); les vitesses sont converties en vitesses *est*, *nord*, et *haut* grâce aux mesures de la boussole électronique et des inclinomètres intégrés. La colonne d'eau est découpée en couches appelées *cellules* (d'une épaisseur de 2 m), sur lesquelles les profils de vitesse sont mesurés. L'instrument n'enregistre pas des vitesses instantanées, mais moyenne les mesures sur une durée entre 60 et 150 s, selon la programmation choisie (Tableau 3).

Les vagues sont mesurées pendant des périodes de 1024 s (17 minutes) qui sont appelées *bursts*. Le spectre non directionnel des vagues et les paramètres, tels que les hauteurs et les périodes des vagues, sont calculées à partir des enregistrements du niveau d'eau. Les AWACs enregistrent le niveau d'eau avec un faisceau acoustique vertical (AST, Acoustic Surface Tracking) fonctionnant comme un échosondeur. (La première méthode est plus précise, surtout pour les profondeurs supérieures à 10 m.) Les directions des vagues sont déterminées à partir des vitesses orbitales des vagues qui sont mesurées près de la surface de l'eau pour les AWACs. L'instrument enregistre ces paramètres à une fréquence de 1 ou 2 Hz (Tableau 3).

L'épaisseur de la glace est calculée à partir de la différence entre (1) la distance jusqu'à la surface de l'eau mesurée par le capteur de pression et (2) la distance jusqu'à la base de la glace mesurée avec le faisceau acoustique AST.

## 2.3 Configuration des mouillages

Chacun des mouillages, installé entre 32 et 38 m de profondeur, est constitué des éléments suivants (masse totale ~ 180 kg) :

- un support de mouillage antichalutage en fibre de verre (modèle MTRBM de la firme Mooring Systems Inc., 178×123×47 cm, Figure 8) ou en uréthane (modèle GP-TRBM de la firme Mooring Systems Inc., 178×127×56 cm, Figure 9), incluant une bouée pour la récupération (diamètre de 28 à 30 cm, couleur brun-rouille ou jaune avec autocollants réflecteurs) attachée à une corde en Spectra de 90 m, et des lestes de plomb;
- un déclencheur acoustique, modèle 867-A de la firme Benthos;

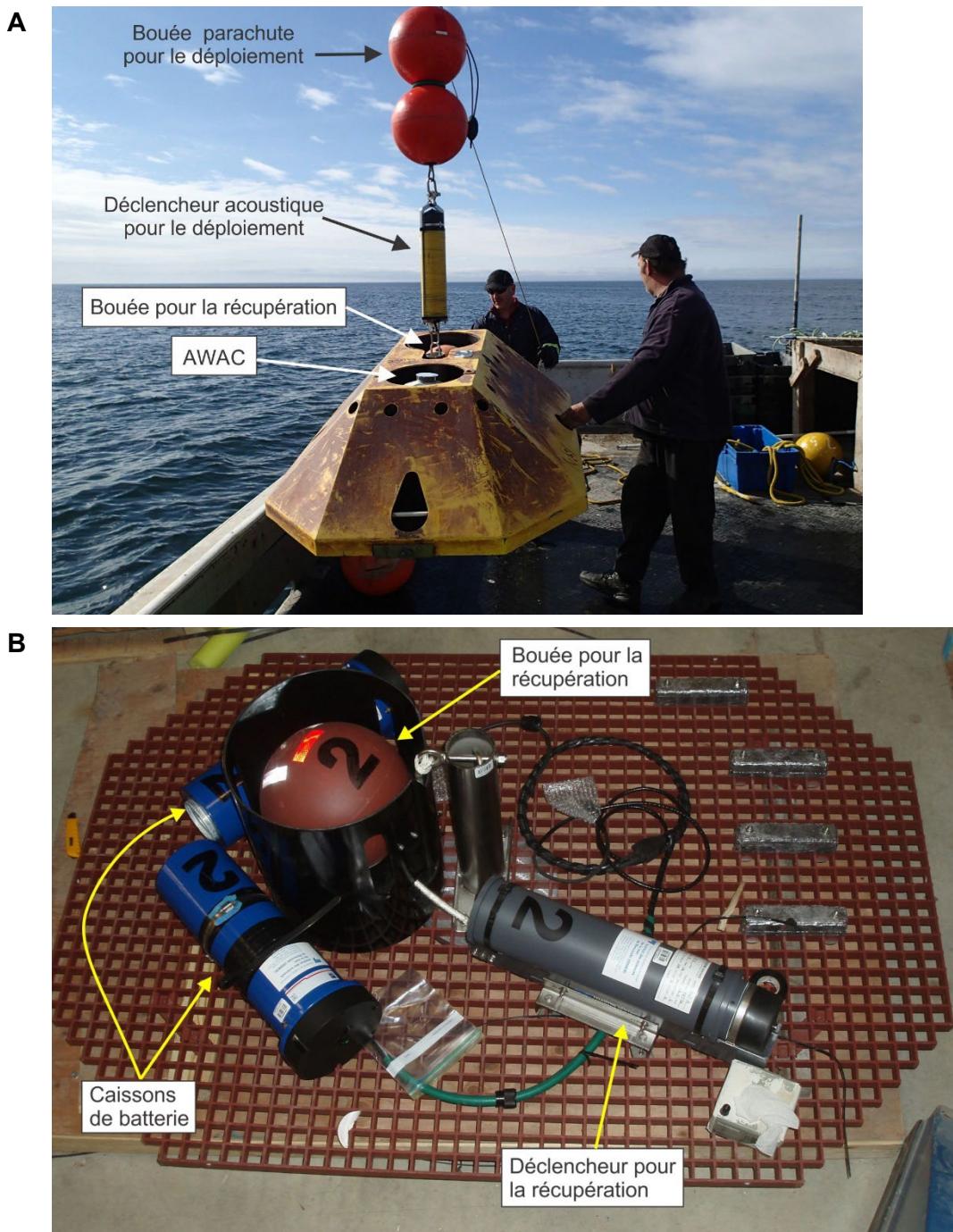
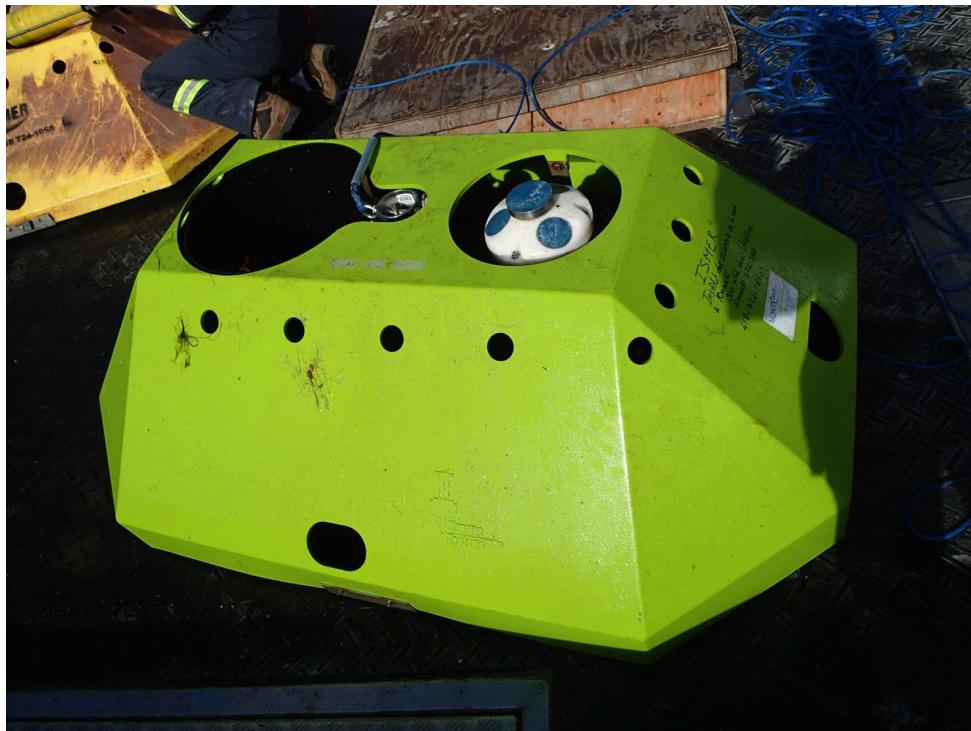


Figure 8 – Plateforme MTRBM avec AWAC. (A) Lors de la mise à l'eau à bord du bateau de pêche Jérôme Isabelle avec devant l'ADCP et à l'arrière la bouée pour la récupération; le mouillage est suspendu par le déclencheur acoustique CART (jaune) et la bouée parachute, qui seront détachés après l'arrivée sur le fond. (B) Mouillage MTRBM ouvert avec la bouée pour la récupération (la corde de récupération est dans le cylindre noir), le déclencheur acoustique Benthos (gris), les deux caissons batteries (bleu) et des lestes de plomb pour assurer la stabilité de la plateforme.

- un profileur de courants avec options vagues et glace, modèle AWAC-AST 600 kHz de la firme Nortek, monté sur un cardan avec un contrepoids en plomb; le sommet de la tête est situé 52 cm au-dessus de la base du support;
- deux caissons de batteries contenant au total quatre batteries de 540 Wh (13,5 V) pour alimenter l'AWAC.

Les deux modèles de supports de mouillages utilisés sont très similaires, GP-TRBM ayant remplacé MTRBM. Tous les mouillages sont avec le modèle MTRBM, sauf un acheté plus tard qui est avec le modèle GP-TRBM.



*Figure 9 – Plateforme GP-TRBM avec AWAC après la récupération à bord du bateau de pêche Miss Amy Lynn. La bouée utilisée pour la récupération a été relâchée par le largueur acoustique et la corde en Spectra est déroulée.*

## 2.4 Programmation des mouillages

Toutes les données ont été enregistrées dans le fuseau horaire Heure Normale de l'Est (HNE, soit UTC-5). Ci-dessous et dans le Tableau 3 sont résumés les paramètres de programmation des AWAC-AST 600 kHz. Les fichiers journaux, qui présentent le détail de la programmation de chaque instrument pour chaque déploiement, sont reproduits dans les rapports de mission (ou les rapports de déploiements) semestriels.

Tous les instruments ont été programmés pour mesurer un profil de vitesse toutes les 20 minutes et un burst de vague de 17 minutes toutes les heures selon le schéma suivant (Figure 10) :

- 1) au début de chaque heure entière, un profil de vitesse est mesuré durant 90 à 150 secondes (selon la capacité des batteries disponibles pour les profils de vitesses, la priorité étant accordée aux mesures de vagues);
- 2) immédiatement après, un burst de vague de 17 minutes est enregistré;
- 3) ensuite un profil de vitesse est mesuré à 20 minutes après l'heure;
- 4) et un autre profil est mesuré à 40 minutes après l'heure.

Les AWAC-AST 600 kHz sont alimentés par deux caissons de batteries, avec au total quatre batteries de 540 Wh à 13,5 V, soit 2160 Wh. Ils ont mesuré des profils de vitesses avec des cellules de 2 m, le centre de la première cellule étant situé à 2,5 m au-dessus de l'instrument.

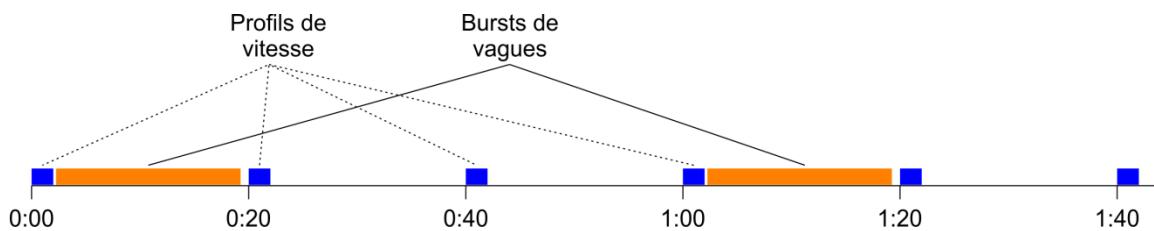


Figure 10 – Schéma de la programmation avec alternance entre profils de vitesse (aux 20 minutes) et bursts de vagues (aux 60 minutes).

Tableau 3 – Synthèse des paramètres de programmation des instruments.

	<b>Site A</b> Saint-Ulric	<b>Site B</b> Cap d'Espoir	<b>Site E</b> Rivière-Pentecôte	<b>Site F</b> Paspébiac	<b>Site G</b> Mont-Louis
<b>Profils de vitesses</b>					
Intervalle entre profils	20 min.	20 min	20 min	20 min	20 min
Hauteur cellules	2 m	2 m	2 m	2 m	2 m
Nombre de cellules	20	22	20	20	20
Blanking distance	0,5 m	0,5 m	0,5 m	0,5 m	0,5 m
Période moyennée <sup>a</sup>	60 – 120 s	60 – 120 s	60 – 120 s	60 – 150 s	60 – 120 s
Measurement load <sup>a</sup>	50 %	25 - 50 %	25 - 50 %	50 %	25 - 50 %
Power level	high	idem	idem	idem	idem
Coordinate system	ENU	idem	idem	idem	idem
Compass update rate	20 min.	idem	idem	idem	idem
Salinité	29	30	31	32	29,5
Vitesse du son	calculé <sup>b</sup>	idem	idem	idem	idem
Précision vitesse horiz.	1,6 – 2,2 cm/s	1,6 – 3,2 cm/s	1,6 – 2,2 cm/s	1,4 – 2,2 cm/s	1,6 – 3,2 cm/s
Précision vitesse vert.	0,5 – 0,7 cm/s	0,5 – 1 cm/s	0,5 – 0,7 cm/s	0,5 – 0,7 cm/s	0,5 – 1 cm/s
<b>Vagues</b>					
Intervalle entre mesures	1 heure	idem	idem	idem	idem
Fréquence	1 Hz / 2 Hz <sup>c</sup>	idem	idem	idem	idem
Durée	1024 s	idem	idem	idem	idem
Wave sampling cell size	dynamique	idem	idem	idem	idem

<sup>a</sup> La période moyennée et le *Measurement load* (pourcentage de temps utilisé pour effectuer des mesures durant la période moyennée) des profils de vitesse ont été ajustés selon la capacité de batterie disponible.

<sup>b</sup> La vitesse du son est calculée en fonction de la salinité entrée lors de la programmation (cf. ci-dessus) et de la température mesurée près du fond par l'instrument.

<sup>c</sup> Fréquence 1 Hz pour la pression et les vitesses orbitales, 2 Hz pour distance par faisceau AST.

## 2.5 Nomenclature

Les identifiants suivants sont utilisés pour les cinq sites d'étude : A (Saint-Ulric), B (Cap d'Espoir), E (Rivière-Pentecôte), F (Paspébiac) et G (Mont-Louis), cf. aussi Tableau 1.

Chaque déploiement semestriel est identifié par l'année de la mise à l'eau suivi par « A » pour la mise à l'eau au printemps et par « B » pour la mise à l'eau à l'automne (Tableau 4). Selon le contexte, l'année est exprimée avec quatre chiffres (principalement pour décrire les périodes) ou avec deux chiffres (dans les noms de fichiers).

Les noms des fichiers pour chaque déploiement sont construits sous la forme **SPxyyy** avec **x** représentant l'identifiant de station (cf. Tableau 1) et **yyy** l'identifiant court de la période de déploiement (cf. Tableau 4).

*Tableau 4 – Début et fin approximative de chaque période de déploiement. Pour les dates exactes de chaque mouillage, voir Tableau 2.*

Identifiant long	Identifiant court	Début	Fin
2021A	21A	mai 2021	juin / septembre 2022
2022A	22A	juin 2022	octobre / novembre 2022
2022B	22B	août 2022 (G) octobre / novembre 2022	juin / juillet 2023
2023A	23A	juin / juillet 2023	octobre 2023
2023B	23B	octobre 2023	mai 2024

## 2.6 Déroulement des missions et des déploiements

Les déploiements ont été réalisés avec l'aide de bateaux de pêcheurs locaux à partir de Matane ou Rimouski pour le site A, de Saint-Thérèse-de-Gaspé pour le site B, de Matane ou Rimouski pour le site E, de Paspébiac pour le site F, et de Mont-Louis ou Rimouski pour le site G. Chaque printemps, à parti du mois d'avril (libération des glaces), et chaque automne, à partir de septembre, et jusqu'en novembre, les pêcheurs étaient contactés pour mobiliser leur bateau en fonction de leur disponibilité et des conditions météorologiques pour récupérer les mouillages précédemment installé et mettre à l'eau les nouveau. Pour les mouillages de Paspébiac et Cap d'Espoir, il s'agissait la plupart du temps, d'une même mission de terrain étalée sur 2 jours où l'équipe de scientifiques revenait à terre entre les 2 déploiements pour laisser au pêcheur le temps du transit entre Saint-Thérèse-de-Gaspé et Paspébiac. Les détails des sorties en mer sont listés dans le Tableau 5.

Les mouillages sont posés sur le fond marin. Ils sont constitués d'un support antichalutage, d'un AWAC et d'un déclencheur acoustique qui peut relâcher vers la surface une bouée reliée au mouillage par une corde. Sur chaque site de mouillage l'ordre des opérations est le suivant : (1) Déclenchement du largueur acoustique du mouillage pour relâcher la bouée du mouillage. (2) Récupération de la bouée et hissage du mouillage à bord. (3) Mise à l'eau du nouveau mouillage, dont la chute dans l'eau sera freinée par une bouée parachute. (4) Déclenchement de la bouée parachute, qui était reliée au mouillage avec le largueur acoustique ORE CART. (5) Récupération de la bouée parachute.

Au cours des trois années du projet, les sorties en mer se sont bien déroulées chaque printemps et automne dans l'ensemble, et les périodes de déploiements sont résumées pour les cinq sites dans le Tableau 2 et sur la Figure 11. Néanmoins lorsque les instruments ont été laissés une année complète sous l'eau au début du projet, il y a eu deux problèmes de récupération des mouillages qui ont nécessité des efforts logistiques supplémentaires, des ressources additionnelles (plongeurs), ainsi que du temps et conséquemment des dépenses supplémentaires (sans toutefois que le budget total prévu soit dépassé) :

- Rivière-Pentecôte en juin 2022 : Échec de la récupération du mouillage, la bouée était bloquée et n'a pu être libérée en surface. Le plongeur Mario Deraspe a permis la libération de la bouée et l'instrument est récupéré sans souci au mois de

septembre 2022. Selon le témoignage du plongeur, la corde reliée à la bouée était emmêlée.

- St-Ulric en juin 2022: Échec de la récupération du mouillage, la bouée était bloquée et n'a pu être libérée en surface comme pour Rivière-Pentecôte. La récupération a nécessité l'intervention du plongeur Mario Deraspe pour libérer la bouée. L'instrument est récupéré au mois de septembre 2022. Selon le témoignage du plongeur, le mouillage était très ensablé. Beaucoup de sédiments (mélange sable et vase) est retrouvé dans le mouillage, suggérant que l'accumulation de sédiments dans le mouillage autour du déclencheur acoustique a empêché le bras du déclencheur acoustique de pivoter, ce qui a empêché la libération de la bouée et la récupération du mouillage selon la procédure normale.

Il s'agit de la seconde fois que ce genre de problèmes de récupération intervient lorsque les instruments sont laissés une année complète sous l'eau. Lors du précédent projet (R841.1), les deux problèmes de récupération étaient intervenus à St-Ulric et Cap d'Espoir au printemps 2019. L'ensemble de ces incidents suggère que laisser sous l'eau un mouillage un an ou plus augmente significativement le risque d'ensablement, d'intrusion de matériaux biologiques pouvant bloquer le mécanisme de relargage de la bouée, ou encore d'avoir des soucis avec la corde reliée à la bouée de récupération, et par conséquent, provoquant ainsi l'échec de la récupération du mouillage. Il faut alors recourir à des plongeurs pour la récupération, ce qui entraîne des coûts et des délais supplémentaires.

Comme dans cette situation le nouveau mouillage est généralement installé avant que des plongeurs viennent aider pour la récupération de l'ancien mouillage, il est important de bien identifier le nouveau mouillage (par exemple avec un morceau de corde). Cela facilite le travail des plongeurs afin que ceux-ci puissent récupérer le bon mouillage (c'est-à-dire l'ancien). L'équipe de l'ISMER a utilisé les capacités de télémétrie des largueurs acoustiques pour localiser précisément ( $\pm 5$  m) les mouillages à récupérer avec des plongeurs afin de faciliter le travail de ceux-ci. Des améliorations de la méthode de télémétrie sont actuellement développées pour les futures récupérations.

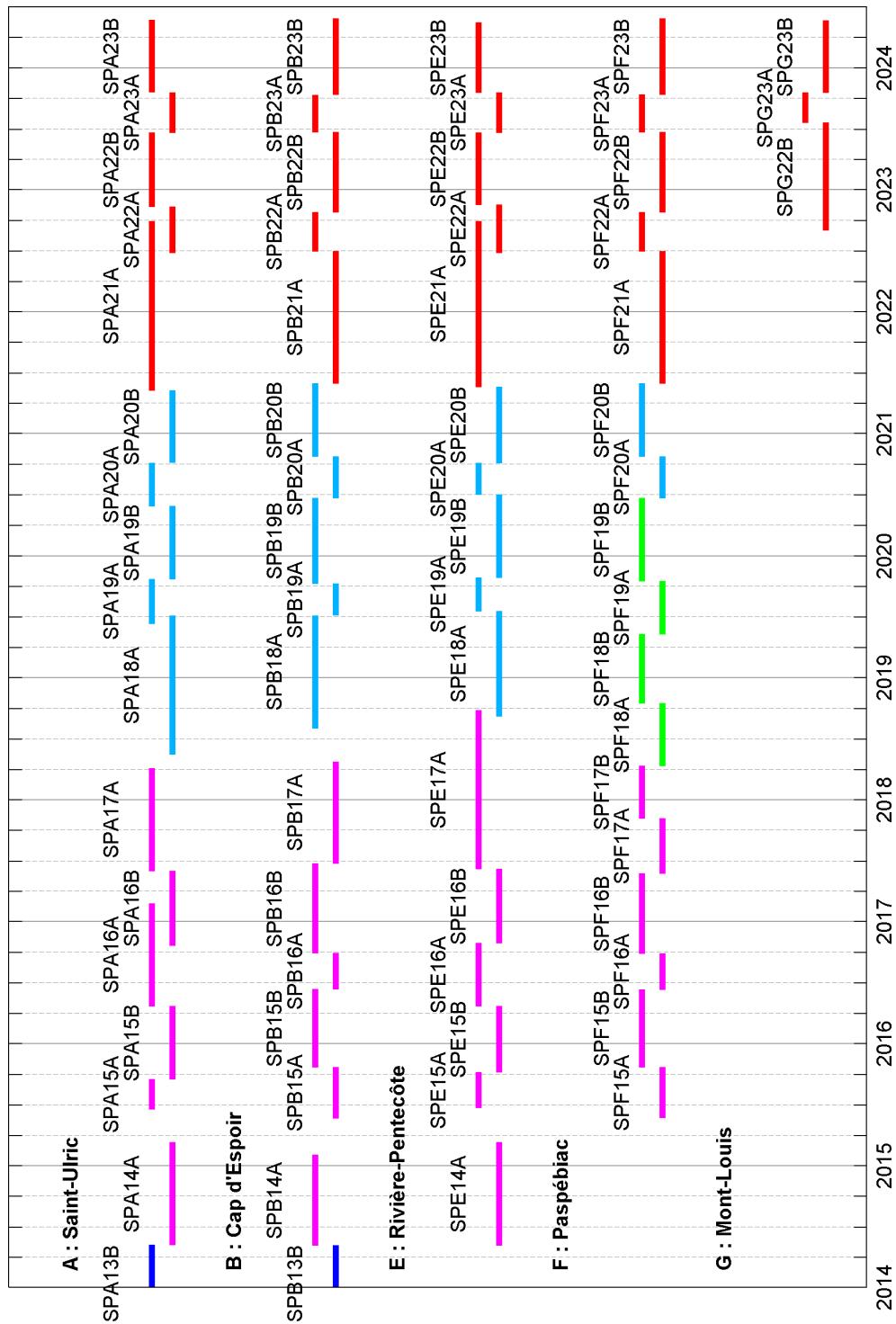


Figure 11 – Périodes de déploiement des mouillages aux cinq sites avec le nom de chaque déploiement (en bleu foncé déploiements financés par le MSP, en magenta déploiements du projet CC07.1, en vert déploiements du projet CC17.1, en bleu clair déploiements du projet R841.1, en rouge déploiements du présent projet R841.2). L'asymétrie des périodes estivales et hivernales est due aux disponibilités très limitées des bateaux de pêches pour opérer.

*Tableau 5 – Listes des sorties en mer effectuées pour les mouillages du projet. La nomenclature des missions reprend celle utilisée pour l'archivage des données dans le SGDO*

Date	Fichier	Site	Mission	Saison	Navire
2021-05-09	SPA21A	St-Ulric	2107_MTQ	été-hiver	L'Anse aux Basques
2021-05-20	SPE21A	Rivière-Pentecôte	2109_MTQ	été-hiver	Jérôme Isabelle
2021-05-30	SPB21A	Cap d'Espoir	2110_MTQ	été-hiver	Kaven D. II
2021-05-30	SPF21A	Paspébiac	2110_MTQ	été-hiver	Kaven D. II
2022-06-25	SPE22A	Rivière-Pentecôte	2022_03_MTQ	été	L'Estuaire
2022-06-25	SPA22A	St-Ulric	2022_03_MTQ	été	L'Estuaire
2022-06-30	SPB22A	Cap d'Espoir	2022_04_MTQ	été	Miss Amy Lynn
2022-06-30	SPF22A	Paspébiac	2022_04_MTQ	été	Miss Amy Lynn
2022-08-31	SPG22B	Mont-Louis	2022_08_MTQ	hiver	L'Omega
2022-10-24	SPF22B	Paspébiac	2022_14_MTQ	hiver	Miss Amy Lynn
2022-10-24	SPB22B	Cap d'Espoir	2022_14_MTQ	hiver	Miss Amy Lynn
2022-11-09	SPA22B	St-Ulric	2022_16_MTQ	hiver	Titan
2022-11-16	SPE22B	Rivière-Pentecôte	2022_17_MTQ	hiver	Titan
2023-06-18	SPE23A	Rivière-Pentecôte	2023_05_MTQ	été	Tartigou
2023-06-18	SPA23A	St-Ulric	2023_05_MTQ	été	Tartigou
2023-06-21	SPB23A	Cap d'Espoir	2023_06_MTQ	été	Miss Amy Lynn
2023-06-21	SPF23A	Paspébiac	2023_06_MTQ	été	Miss Amy Lynn
2023-07-19	SPG23A	Mont-Louis	2023_07_MTQ	été	Costero
2023-10-11	SPB23B	Cap d'Espoir	2023_10_MTQ	hiver	Miss Amy Lynn
2023-10-11	SPF23B	Paspébiac	2023_10_MTQ	hiver	Miss Amy Lynn
2023-10-17	SPE23B	Rivière-Pentecôte	2023_11_MTQ	hiver	Tartigou
2023-10-17	SPG23B	Mont-Louis	2023_11_MTQ	hiver	Tartigou
2023-10-17	SPA23B	St-Ulric	2023_11_MTQ	hiver	Tartigou

## 2.7 Description des marégraphes

Aux marégraphes déjà présents dans les marinas de Paspébiac et de Mont-Louis, quatre autres sites ont été ajoutés, à savoir Carleton-sur-mer, Ste-Thérèse de Gaspé, Gaspé et Baie-Trinité (Côte-Nord).

Les anciens RBR TGR-2050 du MTQ ont été utilisés jusqu'au printemps 2023. Ceux-ci ont une pleine échelle de pression de 50 m et leurs spécifications indiquent une marge d'exactitude de 0,05 % de la pleine échelle, soit  $\pm 2,5$  cm. De plus, ces instruments achetés il y a une dizaine d'année par le MTQ ont un capteur de pression qui n'est pas réellement compensé pour les variations de température. Les nouveaux marégraphes RBRduet T.D|tide16 ont été utilisés à partir du printemps 2023. Ceux-ci ont une pleine échelle de pression de 20 dbar (soit jusqu'à une profondeur de 10 m) et leurs spécifications indiquent une marge d'exactitude de 0,05 % de la pleine échelle, soit  $\pm 1$  cm. Le marégraphe est programmé en heure UTC pour enregistrer toutes les 5 minutes une mesure moyennée sur 45 secondes.

Une nouvelle configuration est utilisée pour l'installation des marégraphes par rapport aux projets précédents. Dans la nouvelle configuration, le tube ABS ( $\varnothing$  7,5 cm) est fixé au quai pour plusieurs années. L'instrument est fixé à un lest en bronze. Cet ensemble est descendu dans le tube avec un câble attaché à l'instrument, jusqu'à ce que le lest repose sur le fond fermé du tube. Lors des maintenances semestrielles, l'instrument et le lest sont sortis du tube avec le câble. Ensuite, le tube, toujours fixé au quai, est nettoyé avec un jet d'eau sous pression. Enfin, un nouvel instrument est fixé au lest de plomb et descendu au fond du tube avec le câble.

La détermination précise de l'altitude du capteur de pression, des mesures manuelles du niveau d'eau sont effectuées avec une sonde *Heron Little Dipper* dans un tuyau ABS ( $\varnothing$  10 cm) installé temporairement et servant de puits de tranquillisation. Plusieurs mesures sont prises au début et à la fin de chaque déploiement. Ces mesures sont prises par rapport à un point de référence dont l'altitude précise a été déterminée lors d'un levé topographique avec un GPD différentiel. La précision des mesures manuelles est estimée de 5 à 10 mm, selon les conditions environnementales (vagues et vent).

*Tableau 6 – Coordonnées et altitudes des marégraphes ainsi que des points de références pour les mesures manuelles. Les différences d'altitude pour convertir des altitudes de CGVD28 à CGVD2013 ou de CGVD28 au zéro des cartes marines (ZC) sont aussi indiquées pour chaque site.*

	Carleton	Paspébiac	Ste-Thérèse	Mont-Louis	Gaspé	Baie-Trinité
Coordonnées Marégraphes	406809 / 5330011 MTM-6  48.10080° N 66.13022°W	248436 / 5320269 MTM-5  48.01886° N 65.25564° W	312522 / 5364074 MTM-5  48.41529° N 64.39568° W	214722 / 5455932 MTM-5  49.23480° N 65.73701° W	306644 / 5409890 MTM-5  48.82738° N 64.47488° W	320452 / 5475887 MTM-6  49.42066° N -67.28426° W
Coordonnées Point de référence	406809.49 / 5330010.65 MTM-6  48.10080° N 66.13023° W	248435.41 / 5320269.07 MTM-5  48.01886° N 65.25565° W	312521.85 / 5364069.13 MTM-5  48.41524° N 64.39567° W	214723.96 / 5455932.55 MTM-5  49.23481° N 65.73698° W	306644.36 / 540890.24 MTM-5  48.82738° N 64.47487° W	320451.25 / 5475885.94 MTM-6  49.42066° N -67.28425° W
Altitude point de référence #	2,732 m	2,295 m	2,843 m	2,683 m	3,427 m	3,202 m
Conversion CGVD28→2013	-0,434 m	-0,485 m	-0,426 m	-0,351 m	-0,434 m	-0,434 m
Conversion CGVD28→ZC	+1,120 m	+0,892 m	+0,785	+1,403 m	+0,849 m	+1,668 m

# Altitude CGVD28

Le Tableau 7 indique les visites de terrain pour les mises en place des marégraphes avec la spécification du numéro de série de chaque marégraphe utilisé. Les remplacements ont été effectués à l'aide d'une petite embarcation amenée depuis Rimouski.

*Tableau 7 – Liste des visites de terrain et des marégraphes installés (identification par numéro de série).*

Dates	Période	Carleton	Paspébiac	Ste-Thérèse-de-Gaspé	Gaspé	Mont-Louis	Baie-Trinité
2021-03-31			16492			16684	
2021-04-01	2021A		16495			16500	
2021-11-01			16491			16487	
2021-11-02	2021B		16502			16486	
2022-05-02			16495			16684	
2022-05-03	2022A		16500			16492	
2022-08-12		16499		16497			
2022-08-13	2022A	16683		21543			
2022-08-12			16488			21544	
2022-08-13	2022B		21549			21545	
2022-11-10		16486		16495			
2022-11-11	2022B	16487		16500			
2022-11-10			16502			16684	
2022-11-11	2022C		16491			16492	
2022-11-23	2022B						16497
2023-04-24		213081	213083	213085		213087	
2023-04-25	2023A	213082	213084	213086		213088	
2023-05-31	2023A						213090
2023-06-07	2023A				213091 213092		
2023-11-15		230551	230554	213093	213083	213081	
2023-11-16	2023B	230552	230553	213094	213084	213082	
2023-11-28	2023B						213085 213086

Le Tableau 8 présente pour chaque site et chaque période les dates précises d'enregistrement du niveau d'eau (UTC).

*Tableau 8 – Périodes de fonctionnement des marégraphes installés (première et dernière donnée valide UTC).*

Période	Site	Carleton	Paspébiac	Ste-Thérèse-de-Gaspé	Gaspé	Mont-Louis	Baie-Trinité
2021A	début		2021-04-01 14:40			2021-03-31 13:35	
	fin		2021-11-01 21:55			2021-11-02 22:40	
2021B	début		2021-11-01 22:15			2021-11-02 22:35	
	fin		2022-05-02 13:45			2022-05-03 14:05	
2022A	début	2022-08-12 01:25	2022-05-02 14:00	2022-08-12 23:50		2022-05-03 14:10	
	fin	2022-11-10 19:25	2022-08-12 14:40	2022-11-11 15:10		2022-08-13 16:15	
2022B	début	2022-11-10 19:30	2022-08-12 14:20	2022-11-11 15:15		2022-08-13 15:45	2022-11-23 19:35
	fin	2023-04-24 17:20	2022-11-10 23:25	2023-04-25 12:10		2022-11-11 23:40	2023-05-31 14:20
2022C	début		2022-11-10 23:30			2022-11-11 23:45	
	fin		2023-04-24 20:40			2023-04-25 16:30	
2023A	début	2023-04-24 17:25	2023-04-24 20:45	2023-04-25 12:15	2023-06-07 16:55	2023-04-25 16:35	2023-05-31 14:00
	fin	2023-11-15 17:40	2023-11-15 20:05	2023-11-16 12:50	2023-11-16 15:25	2023-11-16 22:55	2023-11-28 00:10
2023B	début	2023-11-15 17:45	2023-11-15 20:10	2023-11-16 12:55	2023-11-16 15:30	2023-11-16 23:00	2023-11-28 00:20
	fin	2024-04-16 15:40	2024-04-16 13:10	2024-04-15 19:20	2024-05-26 13:30	2024-04-15 15:10	2024-04-09 15:50

### 2.7.1 Marégraphe de Carleton

À Carleton-sur-mer le nouveau marégraphe a été mis en place le 11 août 2022. Le relevé topographique a utilisé la borne géodésique M17L030 située en bordure de la rampe de mise à l'eau. Les altitudes CGVD2013 sont 0,434 m plus basses que celles CGVD28, et les altitudes des cartes marines sont 1,12 m plus hautes que celles CGVD28 et 1,554 m plus hautes que celles CGVD2013.

### 2.7.2 Marégraphe de Paspébiac

À Paspébiac, le 2 mai 2022 un nouveau tube ABS ( $\varnothing$  7,5 cm) a été installé environ 0,7 m à l'ouest de l'ancien tube. Dans le nouveau tube l'instrument a été placé selon la nouvelle configuration (voir ci-dessus), alors que dans l'ancien tube l'instrument était encore attaché à la base du tube. Le matin du 12 août 2022, la maintenance a été effectuée pour le marégraphe de Paspébiac et l'ancien tube (situé plus à l'est) remplacé par un nouveau tube ( $\varnothing$  7,5 cm) avec la nouvelle configuration. Le relevé topographique a utilisé la borne géodésique 91L9025 située sur le quai à proximité du marégraphe. À Paspébiac, les

altitudes CGVD2013 sont 0,485 m plus basses que celles CGVD28, et les altitudes des cartes marines sont 0,892 m plus hautes que celles CGVD28 et 1,372 m plus hautes que celles CGVD2013.

### **2.7.3 Marégraphe de Ste-Thérèse-de-Gaspé**

À Sainte-Thérèse-de-Gaspé le nouveau marégraphe a été mis en place le 12 août 2022. Le relevé topographique a utilisé la borne géodésique 68K2922 située dans un champ à 850 m à l'ouest du port. À Ste-Thérèse, les altitudes CGVD2013 sont 0,426 m plus basses que celles CGVD28, et les altitudes des cartes marines sont 0,785 m plus hautes que celles CGVD28 et 1,211 m plus hautes que celles CGVD2013.

### **2.7.4 Marégraphe de Gaspé**

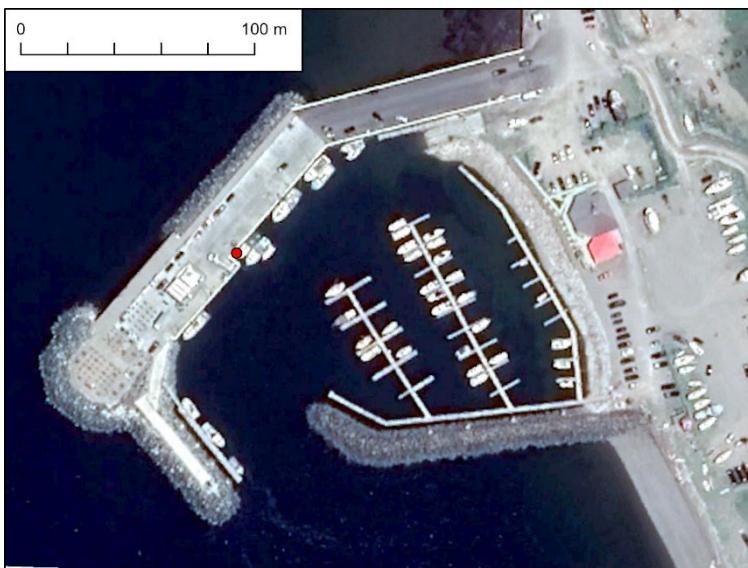
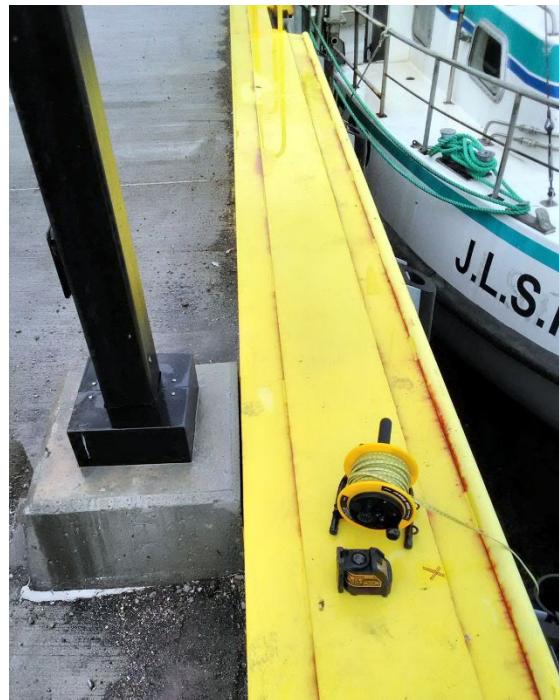
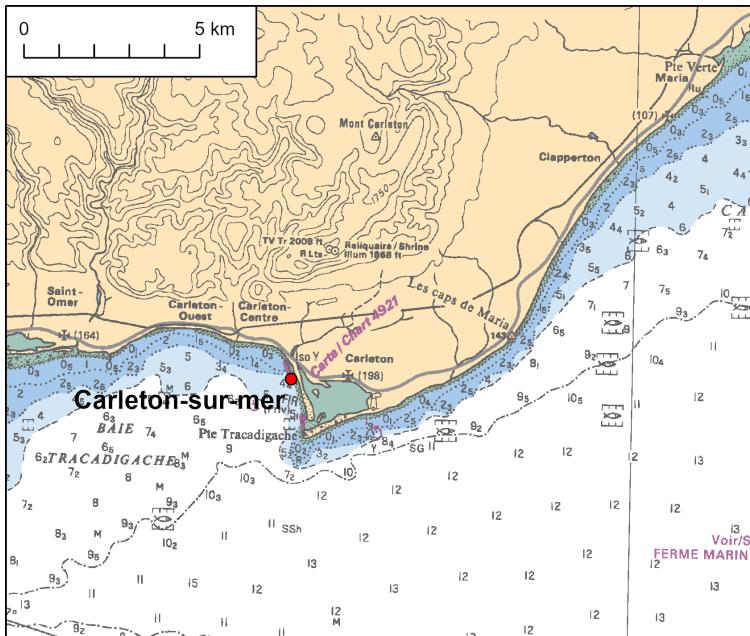
À Gaspé, la mise en place de deux nouveaux marégraphes pour cette station s'est faite le 7 juin 2023. Deux nouveaux marégraphes ont été installés sur site avec le même dispositif qu'aux autres sites. Le relevé topographique a utilisé les bornes géodésiques 80L9503. À Gaspé, les altitudes CGVD2013 sont 0,434 m plus basses que celles CGVD28, et les altitudes des cartes marines sont 0,849 m plus hautes que celles CGVD28.

### **2.7.5 Marégraphe de Mont-Louis**

À Mont-Louis, un marégraphe avait été déjà installé en mai 2019 et maintenu pour des projets du MTQ. Les instruments étaient installés dans deux tubes de diamètre intérieur de 5 cm, avec un RBR TGR-2050 dans chaque tube. Le matin du 13 août 2022, cette installation a été remplacée par deux tubes selon la nouvelle configuration (voir ci-dessus). Le relevé a utilisé la borne géodésique 87KSA21 située près de la route 132 à la sortie est de Mont-Louis, à 1,4 km des marégraphes. À Mont-Louis, les altitudes CGVD2013 sont 0,351 m plus basses que celles CGVD28, et les altitudes des cartes marines sont 1,403 m plus hautes que celles CGVD28.

### **2.7.6 Marégraphe de Baie Trinité**

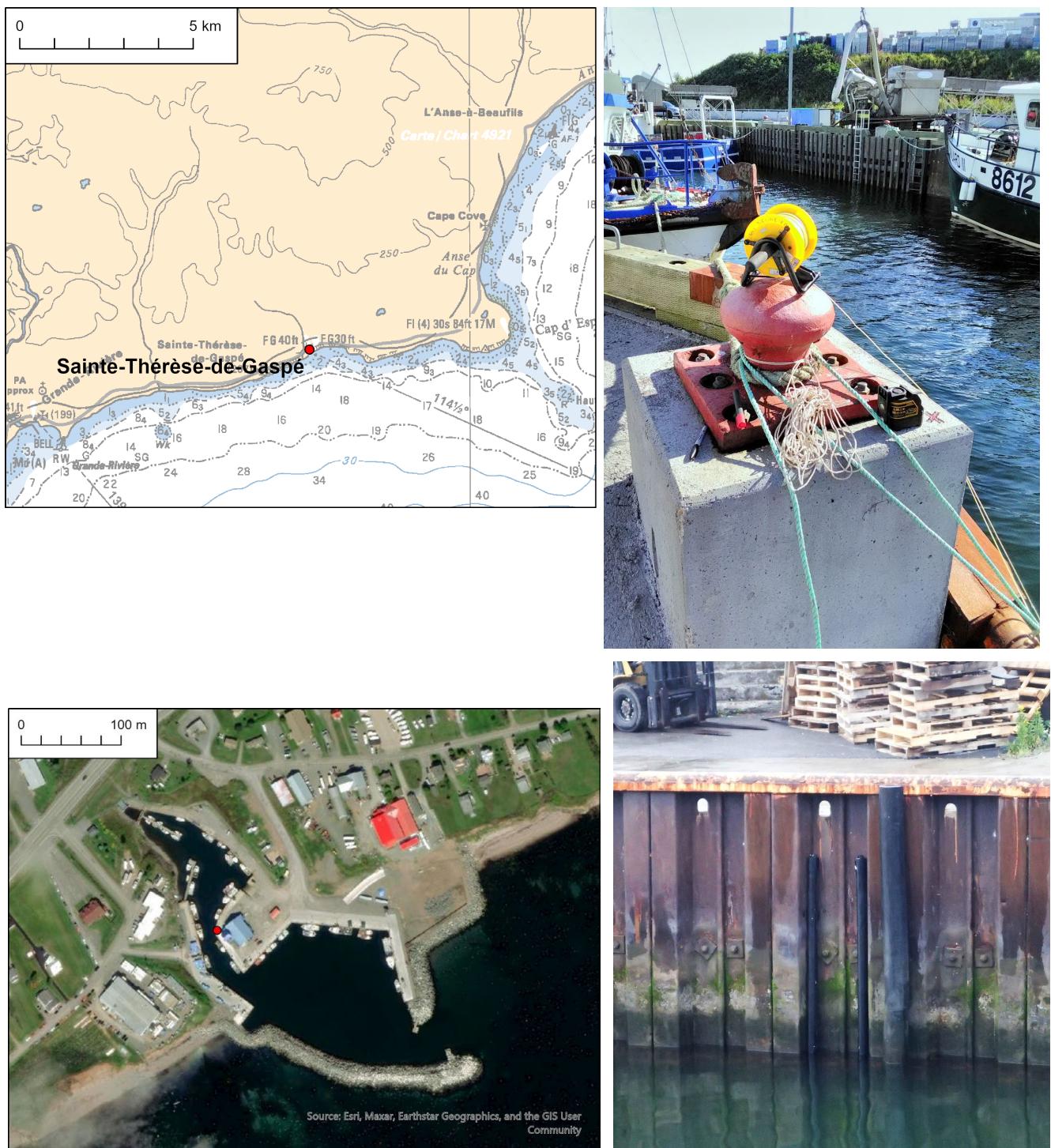
À Baie-Trinité, une tentative pour l'installation des deux marégraphes a été effectuée le 22 novembre 2022, mais les fortes vagues du sud-sud-ouest ont empêché la mise à l'eau du bateau. Pour cette raison les tubes en ABS pour les instruments n'ont pas pu être installés sur la paroi verticale en acier du quai. Cependant, un instrument a été fixé derrière les barreaux d'une des échelles du quai. Les coordonnées de ce marégraphe temporaire sont 49°25,25' N / 67°17,05' W. Un montage standard a été réalisé au printemps 2023. Le relevé topographique a utilisé la borne géodésique M11L9002. À Baie-Trinité, les altitudes CGVD2013 sont 0,434 m plus basses que celles CGVD28, et les altitudes des cartes marines sont 1,668 m plus hautes que celles CGVD28 et 2,102 m plus hautes que celles CGVD2013.



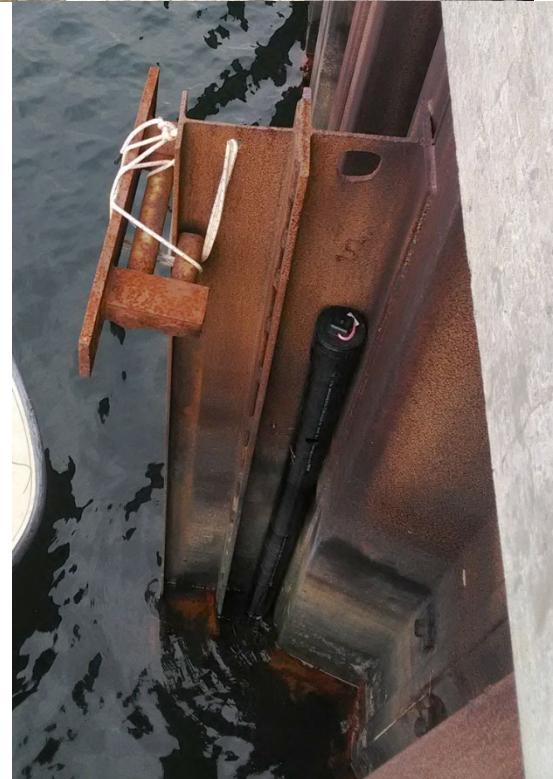
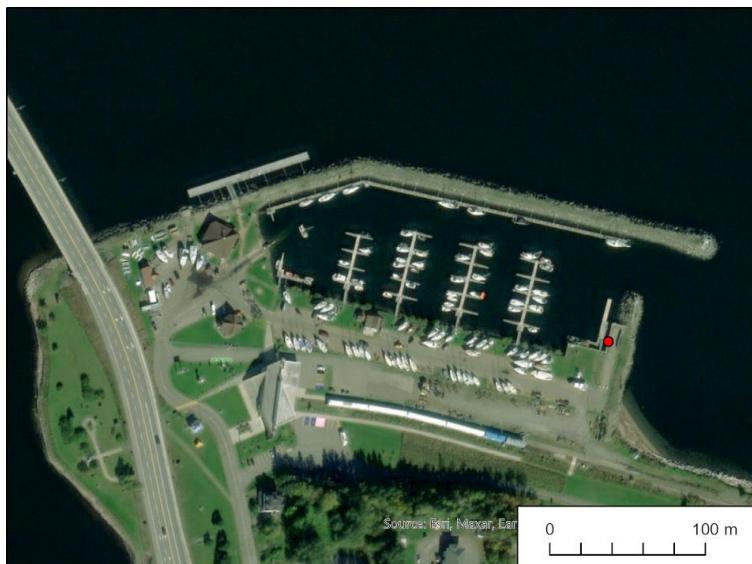
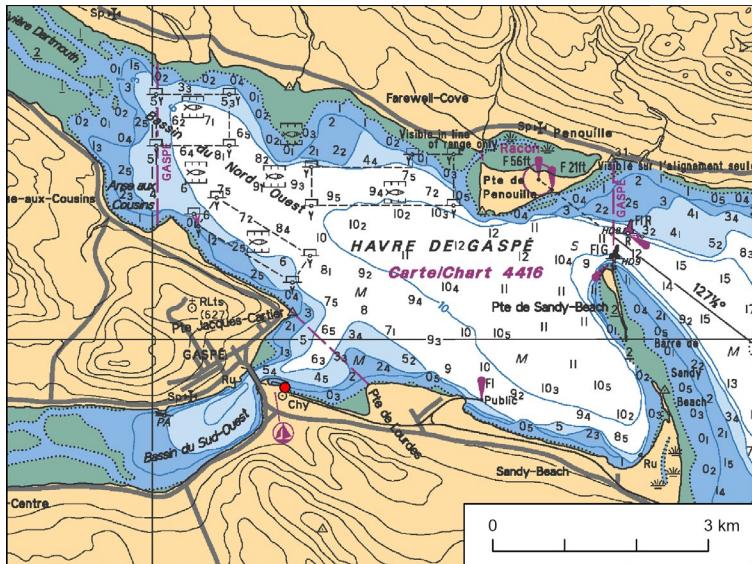
*Figure 12 – Marégraphe de Carleton-sur-mer. Position du marégraphe sur la carte marine et sur une photographie aérienne du port (point rouge). Haut droit : point de référence pour les mesures manuelles (croix rouge) avec le niveau laser et la sonde Heron Little Dipper. Bas droit : les deux tubes ABS au fond desquels sont installés les deux instruments.*



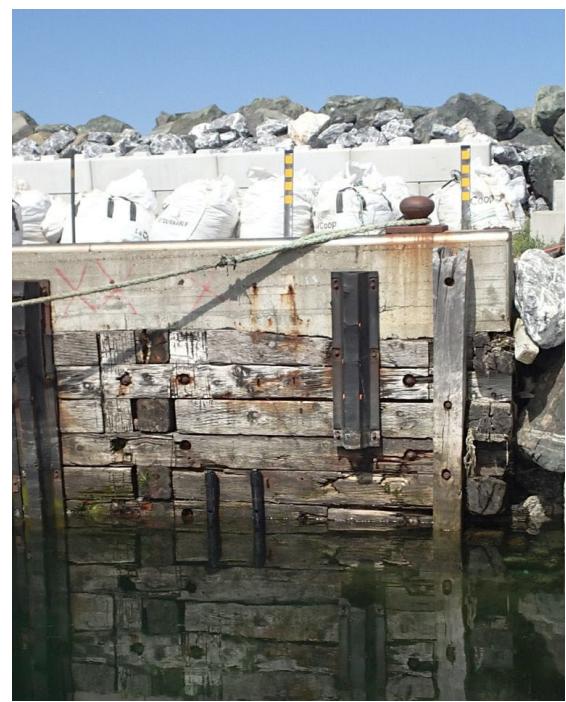
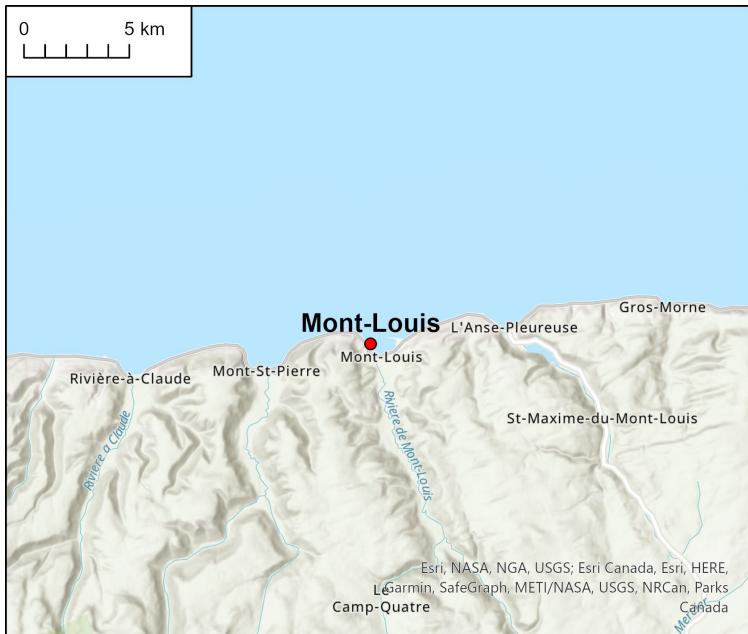
*Figure 13 – Marégraphe de Paspébiac. Position du marégraphe sur la carte marine et sur une photographie aérienne du port (point rouge). Droit : point de référence pour les mesures manuelles (croix rouge mise en évidence avec un cercle vert). Bas gauche : les deux tubes ABS au fond desquels sont installés les deux instruments.*



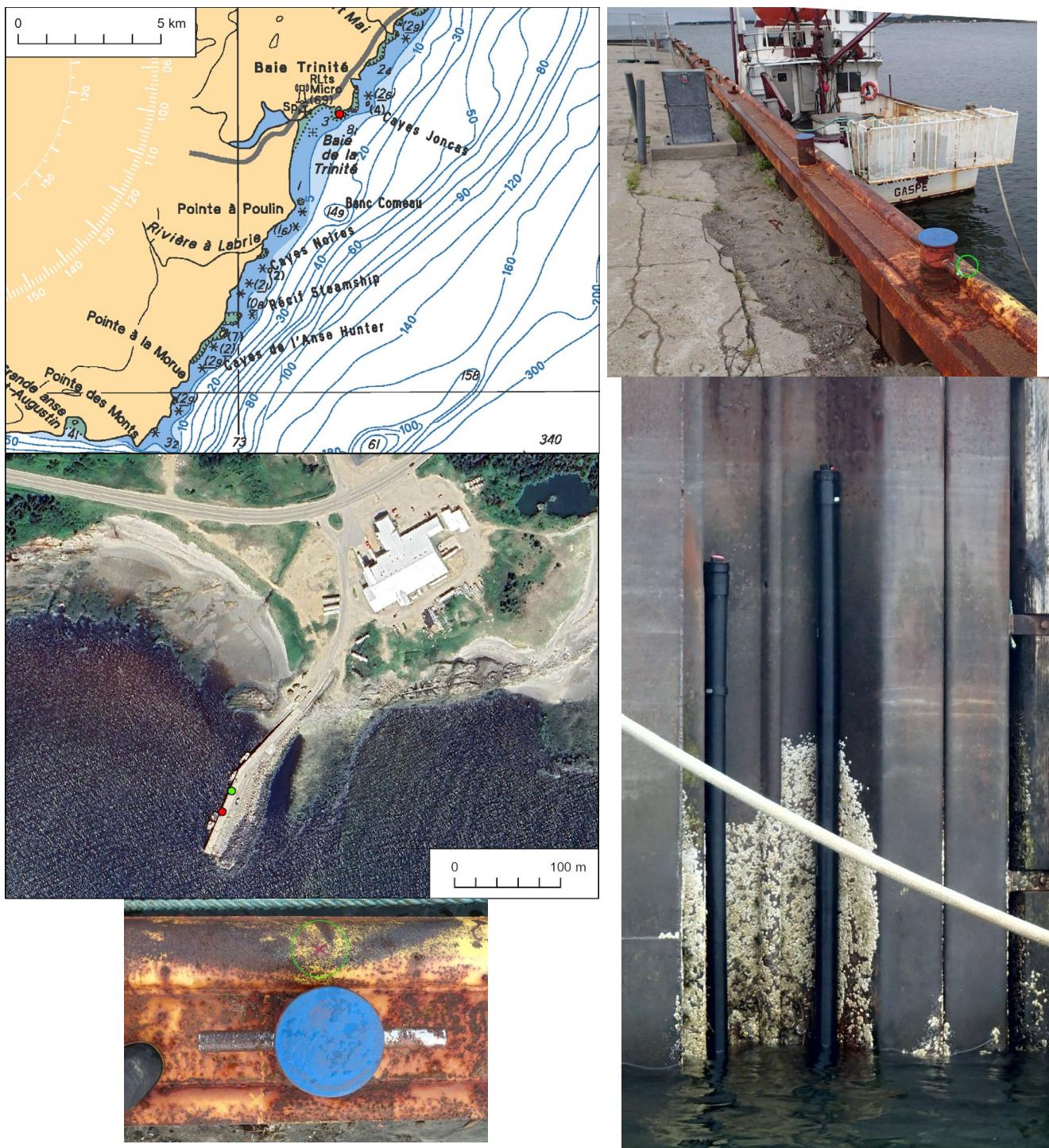
*Figure 14 – Marégraphe de Ste-Thérèse-de-Gaspé. Position du marégraphe sur la carte marine et sur une photographie aérienne du port (point rouge). Haut droit : point de référence pour les mesures manuelles (croix rouge sur socle en béton) avec le niveau laser et la sonde Heron Little Dipper. Bas droit : les deux tubes ABS au fond desquels sont installés les deux instruments.*



*Figure 15 – Marégraphe de Gaspé. Position du marégraphe sur la carte marine et sur une photographie aérienne du port (point rouge). Haut droit : point de référence pour les mesures manuelles (croix rouge à côté du niveau laser). Bas droit : un des deux tubes ABS au fond desquels sont installés les deux instruments (le second tube ABS est de l'autre côté de la poutre d'acier en "H").*



*Figure 16 – Marégraphe de Mont-Louis. Position du marégraphe sur la carte marine et sur une photographie aérienne du port (point rouge). Haut droit : point de référence pour les mesures manuelles (croix rouge sur la base de la bitte) avec la sonde Heron Little Dipper. Bas droit : les deux tubes ABS au fond desquels sont installés les deux instruments.*



*Figure 17 – Marégraphe de Baie-Trinité. Position du marégraphe sur la carte marine et sur une photographie aérienne du port (point rouge); le point vert indique la position du marégraphe temporaire durant l'hiver 2022/2023. Haut droit et bas gauche : point de référence pour les mesures manuelles (croix rouge devant la bitte mis en évidence avec cercle vert). Bas droit : les deux tubes ABS au fond desquels sont installés les deux instruments.*

### 3 Traitement des données

Certaines parties du traitement des données ont été réalisées avec les logiciels de la firme Nortek (fabricant des instruments AWAC) : *QuickWave* (version 2.10) pour le calcul automatique des vagues, *Storm* (version 1.17.06) pour une visualisation rapide des données de courants et de vagues et des paramètres généraux, *AWAC AST* (version 1.47.05) pour l'exportation en fichiers texte des données des AWACs.

La suite du traitement des données, le contrôle de qualité, la visualisation et l'analyse plus approfondie des données ont été effectués dans *Matlab* (versions 7.1 ou 7.14), soit directement à la ligne de commande, soit avec une série de fonctions écrites par Urs Neumeier.

#### 3.1 Contrôles généraux pour les données de vagues et de courants

Les contrôles généraux comprennent la vérification générale du fonctionnement des instruments ainsi que l'orientation et les mouvements de la tête de l'instrument. Ils ont été effectués soit dans *Storm*, soit dans *Matlab*.

En premier, nous avons vérifié les codes d'état et les codes d'erreur des instruments, l'évolution du voltage des batteries, et la plausibilité des mesures de température (qui est utilisée par les instruments pour calculer la vitesse du son de l'eau). La température mesurée par les instruments près du fond variait parfois selon le cycle semi-diurne de la marée, ces oscillations étaient généralement de 2°C à 5°C, mais pouvaient atteindre exceptionnellement jusqu'à 10°C.

Ensuite nous avons vérifié la position des instruments (verticalité de la tête), leur stabilité (mouvements enregistrés par la boussole électronique et les inclinomètres) et l'enregistrement de la pression (pour repérer des changements de profondeur). La plupart du temps, les instruments étaient généralement orientés correctement, la tête regardant vers le haut à  $\pm 5^\circ$  de la verticale, à l'exception du cas décrit ci-dessous au prochain paragraphe. Des rotations latérales significatives des supports de mouillages sur le fond ont pu être observées lors d'événements de tempête majeurs sans que cela ne vienne affecter la qualité des données.

Néanmoins, à Rivière-Pentecôte, deux tempêtes majeures – le 14 décembre 2022 et les 23-24 décembre 2022 – ont provoqué des mouvements violents de la plateforme ainsi que de la tête de l'AWAC. Après la tempête du 14 décembre 2022, la tête de l'AWAC est demeurée inclinée par un angle de 10°, puis après la tempête des 23-24 décembre 2022 avec un angle de 17.5° jusqu'à la fin du déploiement en juin 2023. Au cours de cette seconde tempête, la plateforme s'est également enfoncée vers le bas d'environ 2 m par rapport à sa position initiale et a subi une rotation dans l'axe vertical de 130° (changement de direction, *heading*). Ainsi à partir du 14 décembre 2022 les données de vagues pour Rivière-Pentecôte ont été estimées par l'intermédiaire du capteur de pression. Les hauteurs  $H_{m0}$  calculées par l'intermédiaire du capteur de pression sont probablement un peu surévaluées par rapport à ce qu'aurait pu fournir les données acoustiques (mode standard de calcul, voir aussi Neumeier et al., 2019). La différence entre les deux méthodes calculs varie selon la hauteur et la période des vagues. Le contrôle de qualité des données effectué manuellement a limité les erreurs possibles dues à ces inclinaisons

trop prononcées de la tête de l'AWAC, en recalculant au besoin des paramètres de vagues à partir des données de pression avec l'interface *qcwave\_gui* (cf. section 3.2).

Finalement, les premières et dernières données valides (pour les profils de vitesse et pour les vagues) de chaque déploiement ont été déterminées selon les données enregistrées, mais aussi en vérifiant la concordance des heures de mise à l'eau et de récupération notées lors des missions. L'heure et la date du premier et dernier enregistrement de vagues valides sont indiquées au Tableau 2.

Les données de vagues présentées dans ce rapport et fournies en fichiers numériques ne comprennent pas les premiers et derniers enregistrements hors de l'eau. Pour les courants, uniquement les données valides sont présentées dans ce rapport, mais les fichiers numériques contiennent aussi les premiers et derniers enregistrements hors de l'eau.

Le capteur de pression des instruments mesure la pression totale (poids de la colonne d'eau plus la pression atmosphérique). Ces données ont été corrigées avec la pression atmosphérique enregistrée à une station météorologique proche pour obtenir une hauteur de colonne d'eau correcte. Les données de Saint-Ulric ont été corrigées avec la station météorologique de l'aéroport de Mont-Joli, les données de Cap d'Espoir avec la station météorologique Cap d'Espoir, les données de Rivière-Pentecôte avec la station météorologique de Pointe-des-Monts, les données de Paspébiac avec la station météorologique de New Carlisle, et les données de Mont-Louis avec la station météorologique de Cap Madeleine.

Les directions de courants et de vagues calculées en référence avec le Nord magnétique ont été corrigées pour la déclinaison magnétique : pour Saint-Ulric 17° ouest; pour Cap d'Espoir 18° ouest jusqu'au déploiement 2022B, puis 17° à partir de 2023A; pour Rivière-Pentecôte 18° ouest jusqu'au déploiement 2022A, puis 17° à partir de 2022B; pour Paspébiac 17° ouest; pour Mont-Louis 18° jusqu'au déploiement 2023A, puis 17° à partir de 2023B.

### **3.2 Traitement et contrôle de qualité des données de vagues**

Tous les paramètres de vagues (cf. Annexe 1) ont été obtenus initialement avec le logiciel *QuickWave*. Le spectre d'énergie et moments du spectre ont été calculés sur l'intervalle 0,02-0,48 Hz. Il est possible d'utiliser deux méthodes alternatives pour calculer les hauteurs et périodes de vagues ainsi que le spectre non directionnel : la première (optimale) est réalisée par les mesures acoustiques de la distance instrument-surface (Acoustic Surface Tracking, AST), alors que la seconde est réalisée avec les données de pression si les données AST présentent trop d'erreurs. Les directions de vagues et le spectre directionnel sont calculés avec les vitesses orbitales mesurées près de la surface en utilisant la méthode *Maximum Likelihood Method with Surface Tracking* (MLMST). *QuickWave* a aussi corrigé la déclinaison magnétique (cf. ci-dessus) et un décalage (offset) constant de pression pour chaque déploiement.

Les fichiers texte produits par *QuickWave* ont été importés dans Matlab pour la suite du traitement, notamment la correction de la hauteur d'eau pour les variations de la pression atmosphérique, et pour le contrôle de qualité.

Lors du contrôle de qualité, un sémaphore ou flag de qualité a été ajouté aux données pour décrire la validité des valeurs. Une donnée peut être qualifiée de bonne (aucune indication de problème), de douteuse (il y a des indices de problème, mais la donnée est probablement bonne) ou d'erronée (très probablement la donnée est mauvaise). De plus, une donnée peut être non testée (pour les paramètres ne subissant pas de test de qualité ou avant que le contrôle de qualité n'ait été effectué) ou manquante (quand aucun instrument n'a enregistré à ce moment-là, par exemple les quelques heures entre deux déploiements). L'annexe 2 et en particulier son Tableau 27 décrit ces flags de qualité.

La plupart des paramètres de vagues (hauteurs, périodes, directions, niveaux d'eau) ont subi en premier un contrôle de qualité automatique. Trois catégories de test automatique sont utilisées :

- 1) Tests de limite : pour chaque paramètre, des valeurs limites minimales et maximales ont été définies (*limit checks*);
- 2) Tests de continuité temporelle : les variations temporelles d'un paramètre ne doivent pas être trop rapides (*time-continuity checks*);
- 3) La cohérence des paramètres entre eux est aussi vérifiée : comparaison de  $H_{m0}$  avec  $H_{\max}$ ,  $H_{1/10}$  ou  $H_{1/3}$ , comparaison entre  $T_{01}$ ,  $T_{02}$ ,  $T_z$ ,  $T_{1/10}$ ,  $T_{1/3}$  et la médiane des périodes, comparaison entre  $T_p$  et  $T_{02}$ , comparaison de  $\text{Dir}_m$  et  $\text{Dir}_p$ , comparaison de  $h_{PT}$  et  $h_{AST}$ , comparaison de  $h_{PT}$  et  $h_{AST}$  avec les prédictions de marées, la pente des vagues selon  $T_{02}$  et  $H_{m0}$ , et selon  $T_{1/10}$  et  $H_{1/10}$  (*consistency checks*).

Pour tous ces tests, deux niveaux de limite sont utilisés pour produire des alertes faibles ou fortes (*soft flag / hard flag*). Enfin, *Quickwave* produit dans certains cas un code d'erreur s'il ne peut pas calculer certains paramètres, notamment les directions des vagues si la période est trop courte (inférieure à environ 3 s).

Pour les niveaux d'eau, les données mesurées ont été comparées aux prédictions de marée calculées avec le logiciel *XTide* 2.10 (Flater, 2008), qui est couramment utilisé en océanographie physique. Les harmoniques de marées de Matane sont utilisées pour le site de Saint-Ulric, celles de Grande-Rivière pour Cap d'Espoir et celles de Port-Cartier pour Rivière-Pentecôte, celles de Paspébiac pour Paspébiac, celles de Mont-Louis pour Mont-Louis.

Dans un deuxième temps, le résultat des tests automatiques a été revu et validé manuellement avec l'interface graphique *qcwave\_gui*. Celle-ci présente de manière synthétique les éléments suivants (Figure 18) :

- des graphiques des séries temporelles (niveaux d'eau, hauteurs, périodes et directions) en mettant en évidence les données marquées par une alerte ou marquées comme douteux/mauvais;
- les valeurs numériques de chaque paramètre du burst courant ainsi que du précédent et du suivant;
- les alertes des tests automatiques et les flags du contrôle de qualité;
- le spectre non directionnel et le spectre directionnel du burst courant;
- les 1024 s d'enregistrement du niveau d'eau (AST et pression) du burst courant dans une deuxième fenêtre, qui sert aussi pour le traitement de la glace (l'interface est prévue pour être utilisée avec deux écrans simultanément).

L'interface *qcwave\_gui* permet de définir le flag de qualité de chaque paramètre et d'indiquer une raison pour un flag douteux ou mauvais. Elle permet aussi de modifier les données et de recalculer les paramètres non directionnels des vagues soit sur la totalité du burst, soit sur une ou plusieurs portions d'un burst à partir des données de pression ou des données d'AST. Toute modification des données est consignée dans le fichier et peut être annulée.

Les données le plus souvent marquées comme erronées sont les directions des vagues. Il s'agit de vagues avec une courte période (inférieure à environ 3 s). En effet, leur direction ne peut être déterminée par les vitesses orbitales mesurées près de la surface par les trois faisceaux obliques seulement si les trois mesures sont faites dans la même vague. Les vagues de courte période ont une courte longueur d'onde, parfois plus petite que la distance entre les trois faisceaux à la surface.

L'ensemble des paramètres de vagues est marqué comme erroné en présence de glace, sauf si la couverture de glace n'était pas continue et que les paramètres de vagues ont pu être recalculés sur une partie du burst.

Sinon, les autres paramètres sont rarement marqués comme erronés, mais parfois comme douteux. Pour un certain nombre de bursts, *QuickWave* n'a pas calculé correctement les vagues (trop d'erreurs dans la série temporelle AST, dernier burst du déploiement, présence d'un bateau au-dessus de l'instrument, etc.), mais il a généralement été possible de recalculer les vagues sur la partie non problématique du burst.

La raison pour laquelle une donnée est douteuse/erronée est indiquée avec huit bits (un octet), spécifiant quel(s) test(s) a (ont) échoué (cf. Tableau 28 de l'annexe 2). Le flag de qualité est exprimé en chiffre hexadécimal de trois caractères, le premier (poids fort) représentant la qualité, les deux caractères suivants l'octet des tests (cf. annexe 2).

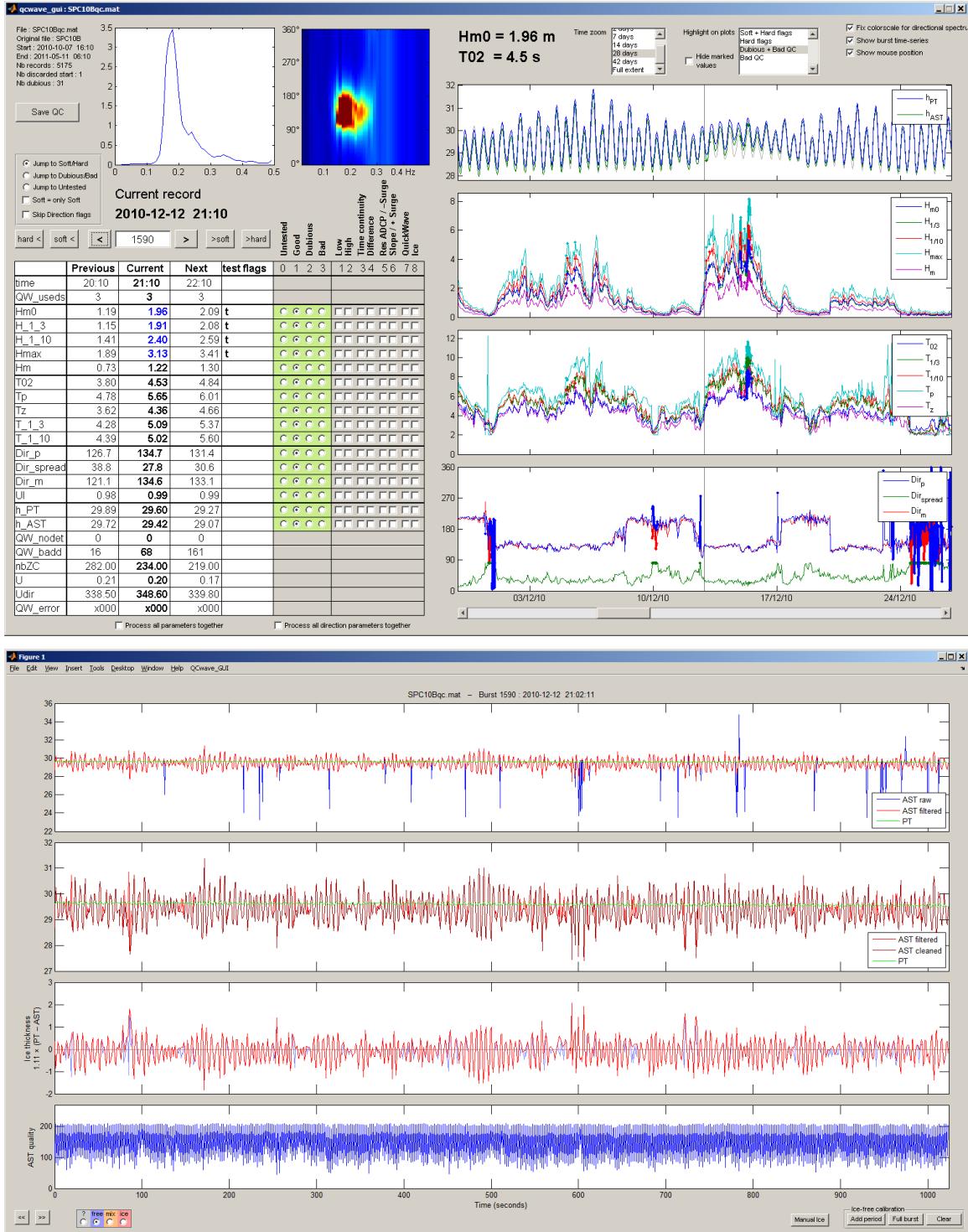


Figure 18 – Interface graphique « qcwave\_gui » utilisée pour le contrôle de qualité des vagues, avec la fenêtre principale (haut) et la fenêtre secondaire présentant la série temporelle d'un burst (bas).

Afin de faire la liste des plus fortes tempêtes et de pouvoir calculer les périodes de retour, les plus fortes tempêtes furent déterminées avec un algorithme écrit par Urs Neumeier, qui

- 1) interpole jusqu'à trois heures de données manquantes dans les séries temporelles;
- 2) trouve en premier tous les maxima dans la série temporelle de  $H_{m0}$ ;
- 3) élimine ensuite les maxima suivants, car ils sont considérés faisant partie d'une tempête plus importante (Figure 19) :
  - a) les maxima qui ne sont pas séparés d'au moins 6 heures d'une valeur plus grande de  $H_{m0}$  dans la série temporelle;
  - b) les maxima qui sont à moins de 12 heures d'un maxima plus grand;
  - c) les maxima qui sont à moins de 24 heures d'un maxima plus grand dont la direction moyenne des vagues diffère de moins de  $60^\circ$ ;
  - d) les maxima qui ne sont pas séparés d'un maxima plus grand par une diminution de  $H_{m0}$  d'au moins la moitié du plus petit maxima.

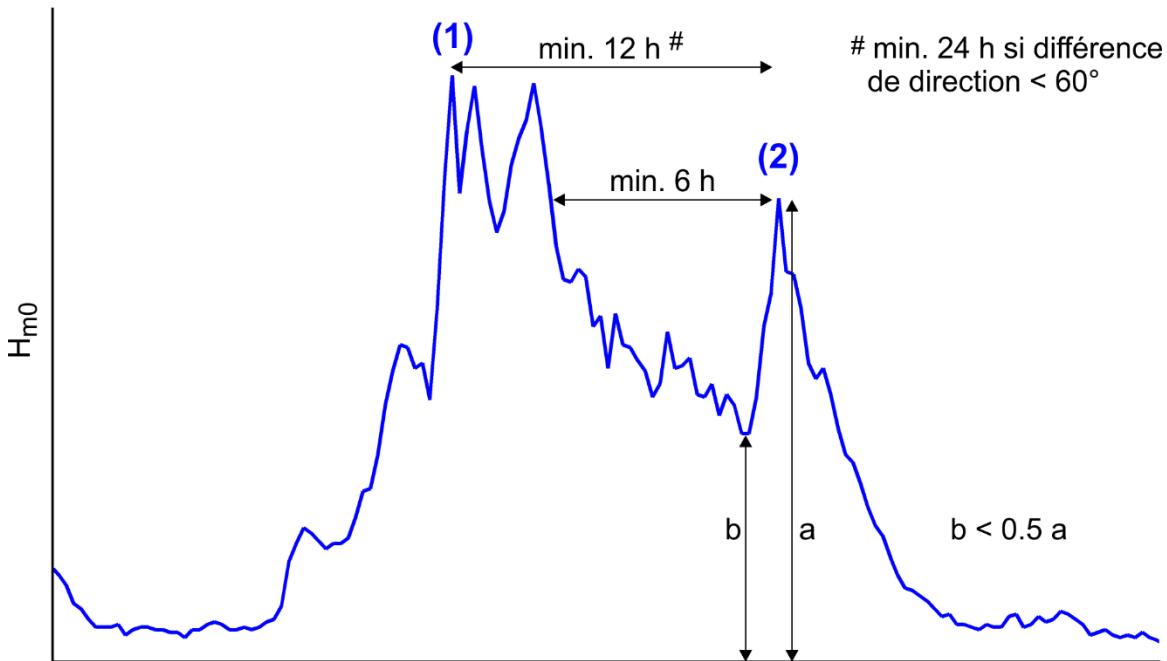


Figure 19 – Schéma explicatif montrant les conditions nécessaires pour que le maximum (2) soit considéré comme une tempête indépendante, et pas seulement la fin de la tempête (1).

### 3.3 Traitement et contrôle de qualité des données de courants

Toutes les données des profils de vitesses (vitesses, amplitudes de l'écho et senseurs auxiliaires) ont été exportées en fichiers texte avec le logiciel AWAC AST. Les données ont ensuite été importées dans Matlab pour le traitement et le contrôle de qualité.

La déclinaison magnétique a été corrigée et la hauteur d'eau est corrigée pour les variations de la pression atmosphérique. Ensuite toutes les cellules commençant à plus de 90 % de la hauteur de la colonne d'eau au-dessus de l'instrument ont été marquées comme mauvais, car hors de l'eau et potentiellement affectées par la surface de l'eau. Pour les déploiements hivernaux, les cellules influencées par les glaces flottantes ont aussi été rejetés en se basant sur l'épaisseur de glace mesurée durant les bursts de vagues (cf. section 3.4) : l'épaisseur de la glace (épaisseur instantanée maximale observée à  $\pm 1$  heure du profil) est soustraite à la hauteur de la colonne d'eau avant d'appliquer le test de 90 % de la colonne d'eau. Enfin un contrôle de qualité automatique a été effectué sur le rapport signal sur bruit (SNR) de chaque faisceau qui doit être supérieur à 3 dB.

Le contrôle de qualité est terminé manuellement avec l'interface graphique awac\_qc, qui permet d'une part de visualiser et de zoomer dans les données et d'autre part d'attribuer les flags de qualité (Figure 20). L'interface montre simultanément les séries temporelles des profils de vitesse ou d'amplitude en teintes de couleurs, les graphiques de profils des vitesses et les flags de qualité. La sélection des paramètres examinés peut être modifiée à tout moment et il est aussi possible d'afficher la série temporelle d'une cellule. Les flags du contrôle de qualité peuvent être attribués ou corrigés avec la souris.

La validité des données de courants est définie avec un flag de qualité pour chaque cellule (ou point de profil) de chaque profil. Ce flag est une valeur entre 0 et 255, 0 indiquant une donnée valide, et une valeur supérieure à 0 une donnée erronée. La raison de l'erreur est codée en binaire sur un octet selon le Tableau 9.

*Tableau 9 – Signification des différents bits de l'octet du flag de qualité des données de courants.*

Bit	Valeur décimale	Raison de l'erreur
1	1	Hors de l'eau ou influence de la surface (test automatique)
2	2	Rapport signal sur bruit (SNR) trop faible (test automatique)
3	4	Rapport signal sur bruit trop élevé (objet flottant dans l'eau)
4	8	Hors de l'eau (défini manuellement)
5	16	Influence de la glace
6	32	Non utilisé
7	64	Autre problème de qualité (parfois sans explication)
8	128	Dysfonctionnement de l'instrument

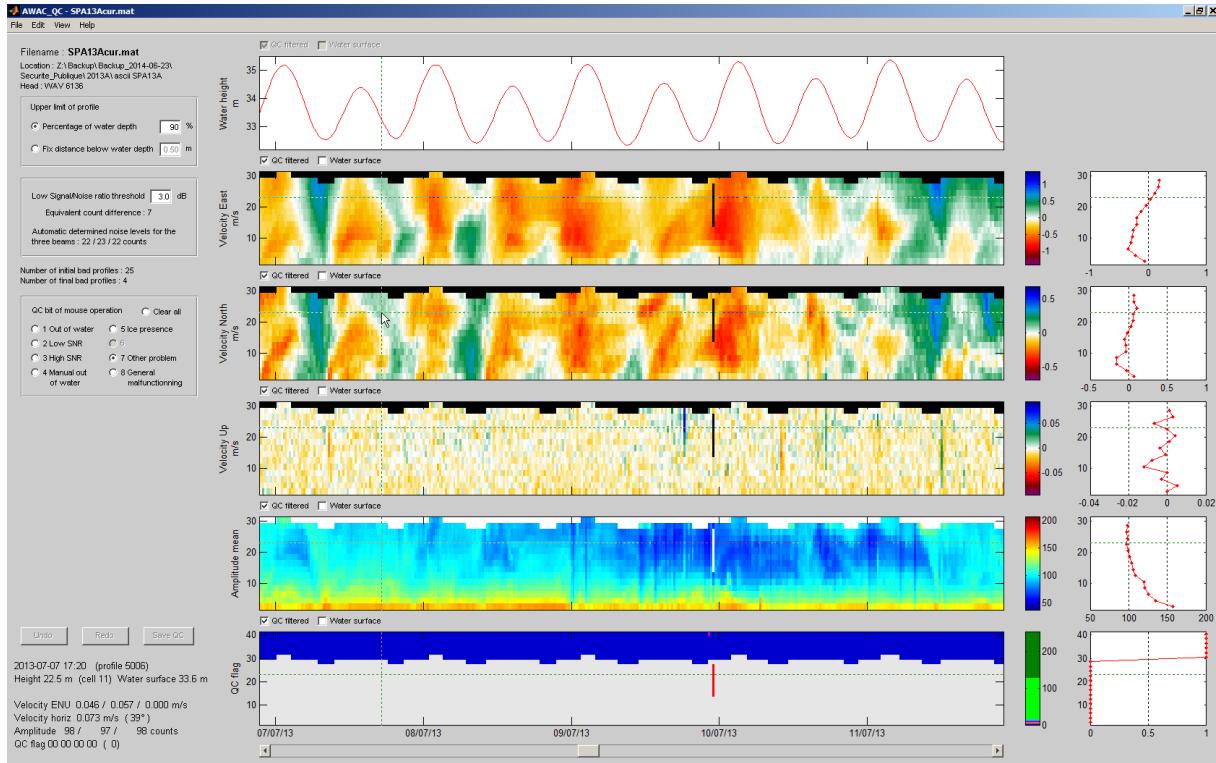


Figure 20 – Interface « awac\_qc » utilisée pour le contrôle de qualité des profils de courants.

### 3.4 Traitement des données de glace

Pendant les déploiements hivernaux les AWACs étaient configurés pour que le faisceau acoustique vertical (Acoustic Surface Tracking, AST) ne détecte pas seulement l'interface eau-air (la surface de l'eau), mais aussi l'interface eau-glace (la base de la banquise). L'instrument enregistre pour chaque ping la distance entre la tête de l'instrument et la première de ces deux interfaces ( $d_{AST}$ ).

D'autre part, le capteur de pression de l'AWAC mesure le poids de la colonne d'eau au-dessus de l'instrument. Cela permet de calculer la distance entre la tête de l'instrument et la surface de l'eau ( $d_{pressure}$ ). En cas de présence de banquise, celle-ci n'affecte pas le résultat.

L'épaisseur de glace ( $H_{glace}$ ) est ensuite calculée comme la différence entre les deux distances, ajustée avec la densité de la glace par rapport à l'eau, c'est-à-dire multipliée par un facteur de  $\times 1,11$  (Eicken et al., 2009), selon la formule suivante :

$$H_{glace} = 1,11 \times (d_{pressure} - d_{AST}) \quad (1)$$

La présence et l'épaisseur de glace sont déterminées avec les bursts de vagues mesurés chaque heure pendant 17 minutes (signal de pression enregistré à 1 Hz, signal AST à 2 Hz). Les données brutes de pression et de distance AST sont exportées en format texte

avec le logiciel AWAC AST. Comme la mesure de distance AST est parfois perturbée par des bulles ou d'autres objets dans l'eau, les données de distance AST filtrées par le logiciel Quickwave pour éliminer les données aberrantes sont aussi utilisées. Ces trois jeux de données sont importés dans Matlab. Les données de pressions sont corrigées pour les variations de la pression atmosphérique. Le signal AST est lissé pour conserver le niveau inférieur en cas d'oscillations de haute fréquence 0,5-1 Hz entre deux niveaux, qui sont interprétés comme la base de la glace et un niveau de faible densité (bulles d'air ou neige) dans la glace.

La suite du traitement est effectuée avec l'interface graphique *qcwave\_gui*, qui est aussi utilisée pour le contrôle de qualité des vagues (cf. section 3.2). Pour l'analyse de la glace, la deuxième fenêtre de l'interface présente toute l'information pertinente et permet de faire les opérations et corrections nécessaires (Figure 21).

Après une observation visuelle, chaque burst est classé manuellement dans une des trois catégories suivantes :

- 1) libre de glace,
- 2) mixte (couverture de glace partielle),
- 3) couverture de glace continue.

En cas de couverture de glace partielle, la fraction de temps couverte de glace est estimée et les vagues recalculées dans l'intervalle de temps libre de glace si cela est possible.

Ensuite, le signal AST est parfois corrigé manuellement pour rétablir la position de l'interface eau-glace si le filtre automatique de Quickwave a appliqué une mauvaise correction (en magenta sur la Figure 21).

Cette méthode de mesure de glace nécessite de connaître précisément la vitesse du son dans l'eau (pour la mesure par AST) et la masse volumique de l'eau (pour la mesure par le capteur de pression). Ces deux paramètres dépendent de la salinité et de la température qui varient verticalement et dans le temps. Ils dépendent aussi de la pression, mais de manière négligeable dans les profondeurs des mouillages. La vitesse du son dans l'eau dépend surtout de la température, alors que la masse volumique de l'eau dépend surtout de la salinité. La salinité est seulement estimée selon les données pluriannuelles de Pêches et Océans Canada. La température du fond de l'eau, mesurée au niveau de la tête de l'instrument, est utilisée pour le calcul de la distance AST. Toutefois, des stratifications verticales de température et de salinité existent aux sites d'étude.

Pour compenser les variations verticales de température et la salinité réelle, un coefficient de correction est calculé sur des périodes libres de glace, de manière à ce que les deux distances calculées (AST et pression) soient identiques en absence de glace. Les périodes hivernales libres de glaces (soit des bursts sans aucune glace, soit des intervalles sans glace dans des bursts mixtes) sont sélectionnées manuellement dans *qcwave\_gui*. Le coefficient de calibration est ensuite interpolé temporellement pour tous les bursts, et appliqué avant de faire la différence entre le signal AST et le signal de pression.

Pour chaque burst avec une présence continue ou partielle de glace, l'épaisseur moyenne de la glace est calculée sur la période avec de la glace. L'épaisseur de glace maximale durant le burst est aussi déterminée.

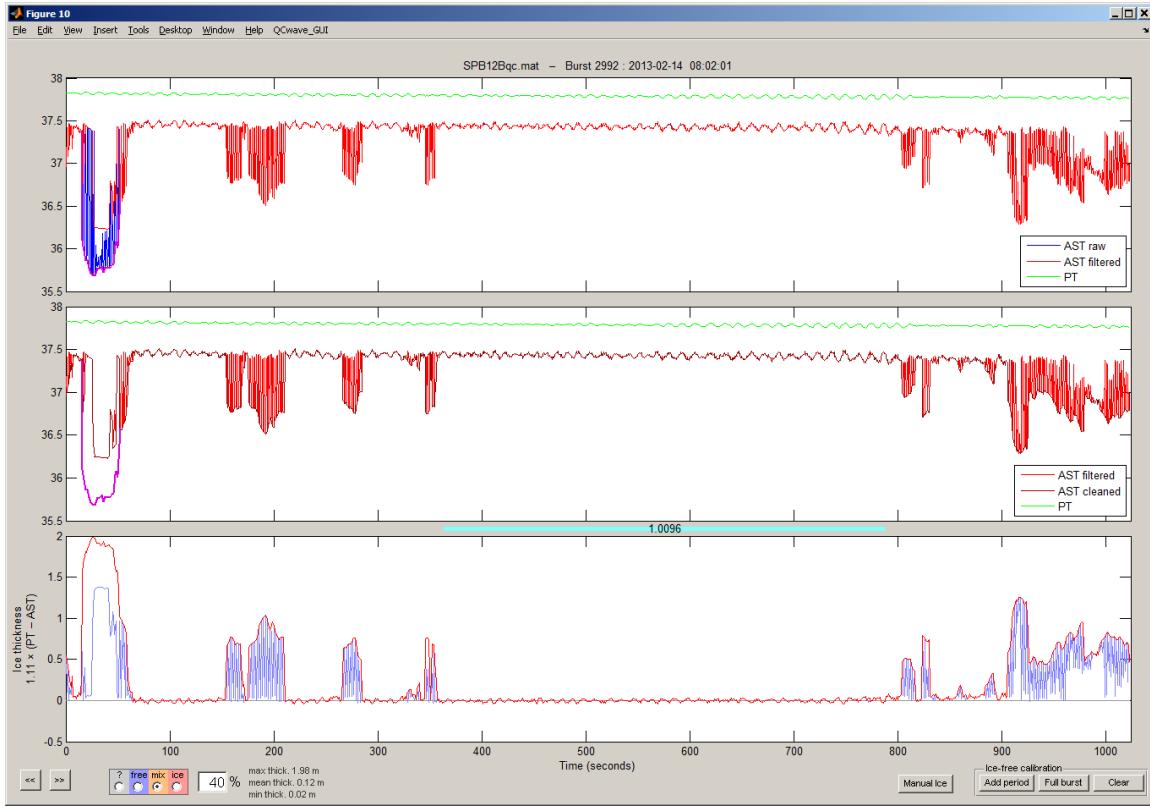


Figure 21 – Seconde fenêtre de l'interface graphique « qcwave\_gui » utilisée pour le traitement de données de glace de chaque burst. La correction manuelle de l'interface eau-glace est en magenta en haut et au milieu. L'épaisseur de glace obtenue est en rouge en bas. La période pour ajuster les distances pression-AST est en turquoise entre les deux graphiques inférieurs.

### 3.5 Traitement des données du marégraphe

Le traitement des données du marégraphe a été effectué dans Matlab. L'ensemble des calculs pour obtenir le niveau d'eau est résumé dans la formule suivante

$$z_{eau} = \frac{p_{rbr} - p_{atmo} + p_{offset}}{g \rho} - z_{rbr} \quad (2)$$

avec  $z_{eau}$  l'altitude du niveau d'eau par rapport à CGVD28 (m),  $p_{rbr}$  la pression enregistrée par le marégraphe (Pa),  $p_{atmo}$  la pression atmosphérique au niveau de la mer (Pa),  $p_{offset}$  une constante propre à chaque instrument pour corriger les différences de calibration entre le marégraphe et le baromètre (Pa),  $g$  l'accélération gravitationnelle ( $m s^{-2}$ ),  $\rho$  la masse volumique de l'eau ( $kg m^{-3}$ ) et  $z_{rbr}$  l'altitude du marégraphe par rapport à CGVD28 (m). Le traitement des données a été effectué avec comme référence altitudinale le CGVD28.

À Carleton la correction de la pression atmosphérique a été effectuée pour le déploiement 2022A avec les données de la station météo de New Richmond (48,16° N, 65,84° W, altitude 2 m, identifiant OMM 71659), puis par la suite les données d'un baromètre enregistreur RBRsolo<sup>3</sup> placé à proximité des marégraphes ont été utilisées (altitude 4 m).

À Paspébiac la correction de la pression atmosphérique a été effectuée, jusqu'à l'automne 2022, avec les données de la station météo de New-Carlisle (48,01° N, 65,33° W, altitude 46,4 m, identifiant OMM 71619), puis les données d'un baromètre enregistreur RBRsolo<sup>3</sup> placé à proximité des marégraphes ont été utilisées (altitude 2 m).

À Ste-Thérèse-de-Gaspé la correction de la pression atmosphérique a été effectuée pour le déploiement 2022A avec les données de la station météo de Cap d'espoir (48,42° N, 64,32° W, altitude 15,4 m, identifiant OMM 71429), puis par la suite les données d'un baromètre enregistreur RBRsolo<sup>3</sup> placé à proximité des marégraphes ont été utilisées (altitude 4 m).

À Gaspé la correction de la pression atmosphérique a été effectuée avec les données d'un baromètre enregistreur RBRsolo<sup>3</sup> placé à proximité des marégraphes (altitude 2 m).

À Mont-Louis la correction de la pression atmosphérique a été effectuée avec les données d'un baromètre enregistreur RBRsolo<sup>3</sup> (ou RBR DR-1050) placé à proximité des marégraphes (altitude 5,4 m).

À Baie-Trinité la correction de la pression atmosphérique a été effectuée pour le déploiement 2022B avec les données de la station météo de Pointe-des-Monts (49,32° N, 67,38° W, altitude 5,9 m, identifiant OMM 71427), puis par la suite les données d'un baromètre enregistreur RBRsolo<sup>3</sup> placé à proximité des marégraphes ont été utilisées (altitude 6 m).

La pression atmosphérique – issu d'un baromètre ou d'une station météorologique – a été convertie à la pression au niveau de la mer pour obtenir  $p_{atm0}$ . Les données de pression des marégraphes avant et après déploiement ont été comparées avec  $p_{atm0}$  pour déterminer la constante  $p_{offset}$  de chaque instrument. La pression de la colonne d'eau ( $p_{rbr} - p_{atm0} + p_{offset}$ ) est convertie en hauteur d'eau en divisant par la gravité ( $g$ , 9,8087 m·s<sup>-2</sup> à Paspébiac; 9,8088 m·s<sup>-2</sup> à Carleton; 9,8092 m·s<sup>-2</sup> à Ste-Thérèse-de-Gaspé; 9,8098 m·s<sup>-2</sup> à Gaspé; 9,8099 m·s<sup>-2</sup> à Mont-Louis et 9,8098 m·s<sup>-2</sup> à Baie-Trinité, selon la base de données de Ressources Naturelles Canada) et par la masse volumique de l'eau ( $\rho$ ). Cette dernière est calculée avec la température mesurée par les marégraphes et avec une salinité estimée à 26 pour Carleton; 28 pour Paspébiac; 28,5 pour Ste-Thérèse; 25 pour Gaspé; 28,25 pour Mont-Louis et 29 pour Baie-Trinité, en appliquant la formule de Fofonoff (1985). Une erreur dans l'estimation de salinité de +1 unité sous-estimerait la densité de 0,08%, et le niveau d'eau serait surestimé de ~3 mm à marée haute.

L'altitude du capteur de pression de chaque marégraphe ( $z_{rbr}$ ) a ensuite été établie en comparant les mesures manuelles de niveaux d'eau effectuées au début et à la fin de chaque déploiement (Exemple Figure 22). Il y a une bonne concordance entre les mesures manuelles et les enregistrements des marégraphes. L'altitude de chaque marégraphe a été déterminée pour le début et pour la fin de son déploiement, puis la moyenne des deux valeurs a été calculé. La différence entre les deux valeurs (généralement de 2-10 mm) est causée par la marge d'exactitude des marégraphes (10

mm selon le fabricant) et la marge d'exactitude des mesures manuelles (environ 4 mm entre différentes journées).

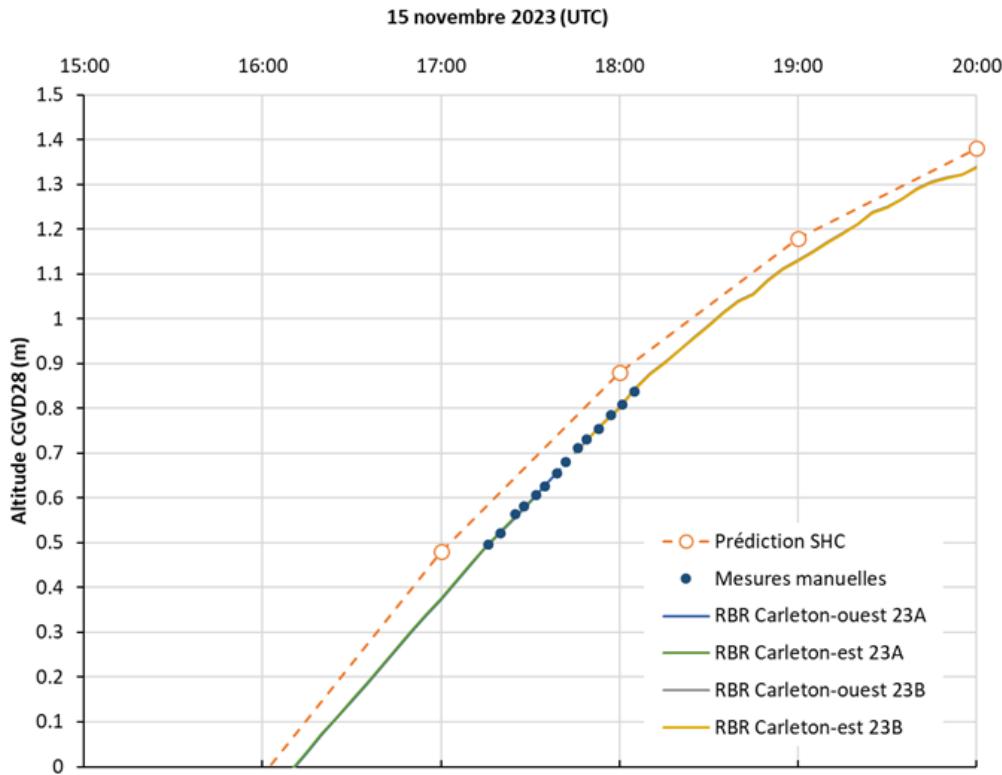


Figure 22 – Mesures manuelles du niveau d'eau et de la correspondance avec les enregistrements du marégraphe de Carleton le 15 novembre 2023 avant et après le remplacement des marégraphes.

Les enregistrements des marégraphes montrent des petites oscillations avec une période de 15-25 minutes et généralement une amplitude de 2-4 cm (pendant des tempêtes entre 10 et 25 cm). Pour lisser ces oscillations, un filtre passe-bas avec une fréquence de coupure de 1/1800 Hz (30 minutes) a été appliqué. Selon l'utilisation prévue, les données lissées ou non lissées peuvent être utilisées.

Les surcote et les décotes de tempête ont été déterminées en calculant en premier les harmoniques de marée à partir des niveaux d'eau mesurés. La série temporelle des niveaux d'eau a été analysée avec la boîte à outils *T\_TIDE* dans Matlab (Pawlowicz et al., 2002) pour déterminer ces harmoniques de marées, puis celles-ci sont utilisée pour calculer les prédictions de marées. Les surcotes et les décotes sont finalement calculées comme la différence entre les niveaux observés et les niveaux d'eau prédits par *T\_TIDE*.

## 4 Résultats des instruments

### 4.1 Données de vagues

Les données de vagues des projets antérieurs (depuis mai 2010) couvrant les différentes stations ci-présentes ont été incorporées aux données nouvellement acquises pour tenter d'observer des tendances à moyen terme (~ 14 ans) et sont présentées sur certaines figures. Au total, nous avons enregistré des séries temporelles de 123 190 heures au site de St-Ulric, 119 535 heures au site de Cap d'Espoir, 87 884 heures au site de Rivière-Pentecôte, 79 004 heures au site de Paspébiac, et 15 099 heures au site de Mont-Louis. Seules les données de la période 2021-2024 sont présentées en détail dans ce rapport.

Les hauteurs significatives des vagues  $H_{m0}$  mesurées de mai 2021 à mai 2024 sont présentées sous forme de séries temporelles pour chaque site avec les 15 plus fortes tempêtes mises en évidence (Figures 23 à 26). Outre l'information sur le régime saisonnier des vagues à un site donné, ces graphiques nous renseignent également sur l'intensité de la présence de glace de mer au cours de la période hivernale.

À St-Ulric (Figure 23), la première année de données (2021-2022) témoigne d'une saison des tempêtes concentrée en décembre-janvier avant l'arrivée des glaces sur site. Sur les trois années de suivi, c'est d'ailleurs la seule année où il est possible de discerner clairement l'effet des glaces sur le développement des vagues. Une tempête en mars 2022 a généré ensuite des vagues proches de 3 m. Les tempêtes ayant produit les vagues les plus élevées au cours du projet ont eu lieu la deuxième année (2022-2023), notamment celle du 23-24 décembre 2022 où les vagues ont atteint 4,21 m égalant le précédent record du 5 janvier 2018. Les autres tempêtes ayant eu lieu plus tôt à l'automne ou à la fin janvier. Il n'y a pas eu par la suite d'événements de tempête au printemps 2023, malgré la quasi absence de glace sur le site d'étude. Au cours de la dernière année du suivi (2023-2024), il n'y a eu qu'une seule tempête majeure en début d'automne 2023, puis les suivantes ont pris place au printemps en mars et avril 2024, avec des vagues de 3 m.

Au Cap d'Espoir (Figure 24), il y a eu de nombreuses tempêtes la première année (2021-2022), dont cinq où les vagues ont dépassé les 4 m, la plupart se concentrant au cours de l'automne. Les deux tempêtes qui ont généré des vagues supérieures à 5 m sont intervenues au début de l'hiver et au printemps. Il n'est pas rare d'avoir de grosses tempêtes au printemps dans le Golfe. La deuxième année (2022-2023), la fréquence des vagues de tempête est plus faible que l'année précédente, mais ce qui marque le plus est la hauteur des vagues atteintes lors de la tempête exceptionnelle du 24 décembre 2022, où le record a été battu avec des vagues de 7,71 m ( $H_{m0}$ ). L'absence de glace sur le site a permis le développement de vagues de près de 6 m à la fin janvier 2022. La dernière année (2023-2024) a connu le plus grand nombre de tempêtes, avec notamment huit événements où les vagues ont dépassé les 4 m, les plus importantes ayant eu lieu en janvier 2024.

À Rivière-Pentecôte (Figure 25), les plus grosses tempêtes de la première année 2021-2022 ont eu lieu au printemps 2022. Seules deux tempêtes ont généré des vagues supérieures à 4 m lors de cette saison. Lors de la seconde saison (2022-2023), la tempête du 23-24 décembre 2022 a généré des vagues de 8,1 m (voir aussi la note au Tableau 11). Toutefois, les données issues de cette saison ont été obtenues à partir du capteur de

pression de l'instrument, qui a tendance à surestimer légèrement les hauteurs (en bleu clair sur la Figure 25). La majorité des autres tempêtes en 2022-2023 ont été répertoriées au printemps avec des vagues proches de 4 m. La dernière année, il y a eu cinq grosses tempêtes avec des vagues supérieures à 4 m, dont deux tempêtes très rapprochées les 10 et 13 janvier 2024 où les vagues ont atteint 5,60 m. Dans l'ensemble, sur ces trois années de suivi, les tempêtes ont été beaucoup plus fréquentes au printemps que lors de l'automne.

Dans la baie des Chaleurs à Paspébiac (Figure 26), il y a eu une très grosse tempête le 24 décembre 2021 où les vagues ont atteint 3,12 m lors de la première année du suivi. Au printemps 2022, les vagues dépassaient rarement les 2 m. Lors de la seconde saison, la tempête d'exception de la fin décembre 2022, répertoriée aussi aux trois autres sites, a généré ici aussi les vagues les plus élevées jamais enregistrée avec 3,75 m de hauteur. L'absence de glace a permis le développement d'une autre tempête au début du mois de février 2023 avec des vagues proches de 3 m. La dernière année (2023-2024) a témoigné d'un grand nombre de tempête étalées sur le début de l'hiver et au printemps avec des vagues proches de 2,5 m.

À Mont-Louis (Figure 27), le suivi des conditions océanographiques au large n'a commencé qu'à partir de septembre 2022. Il y a eu deux grosses tempêtes à la mi-décembre 2022 et en février 2023 où les vagues étaient supérieurs à 3,5 m. À noter que la tempête exceptionnelle des 23-24 décembre 2022 ayant été impactante sur tous les autres sites, n'a laissé aucune trace sur le site de Mont-Louis. La dernière année (2023-2024), les tempêtes ont été plus fréquentes mais de moins grande amplitude en termes de hauteur. La seule tempête de l'automne a généré des vagues de plus de 3 m.

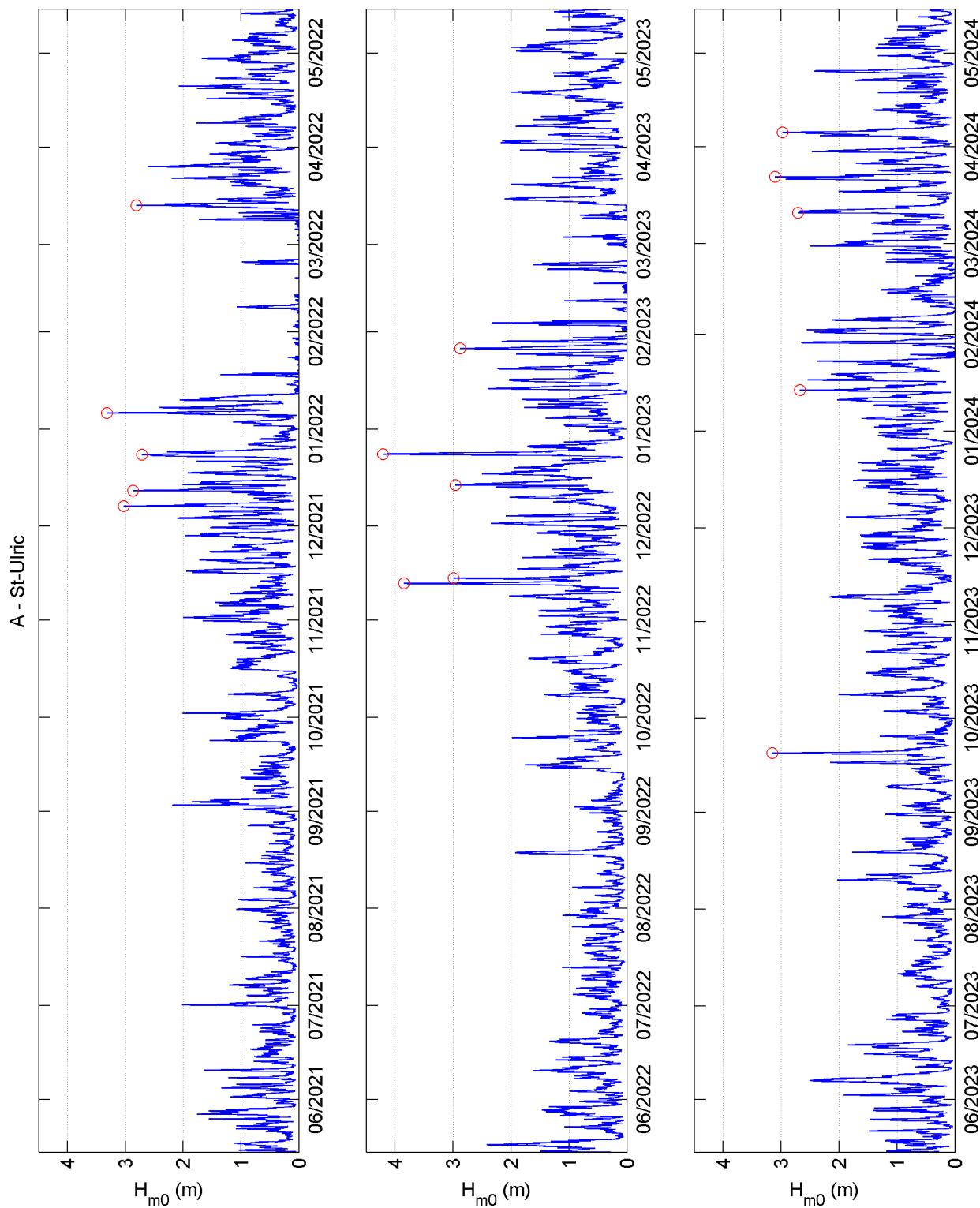


Figure 23 – Série temporelle des hauteurs de vagues  $H_{m0}$  mesurées au site A (Saint-Ulric). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.

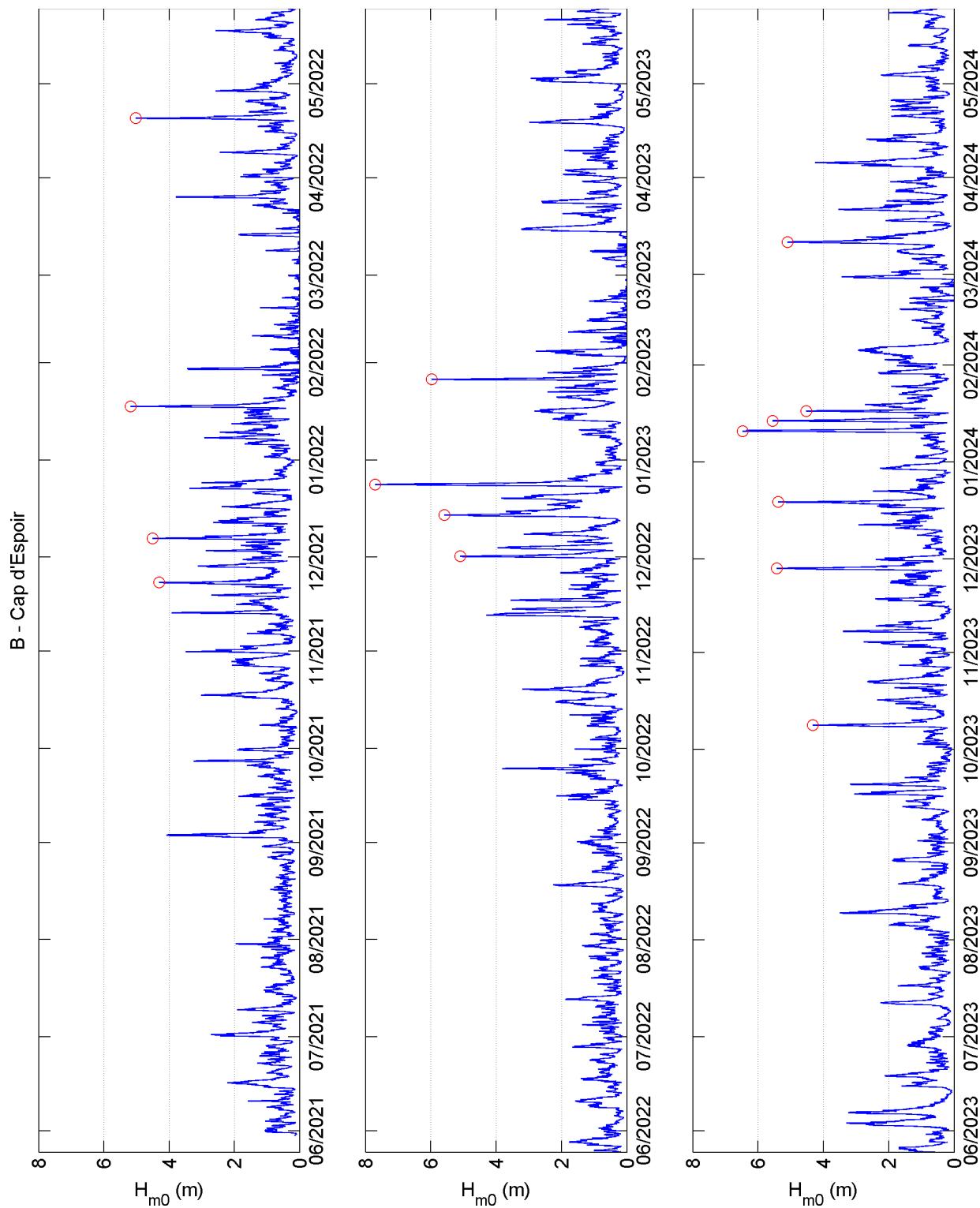


Figure 24 – Série temporelle des hauteurs de vagues  $H_{m0}$  mesurées au site B (Cap d'Espoir). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.

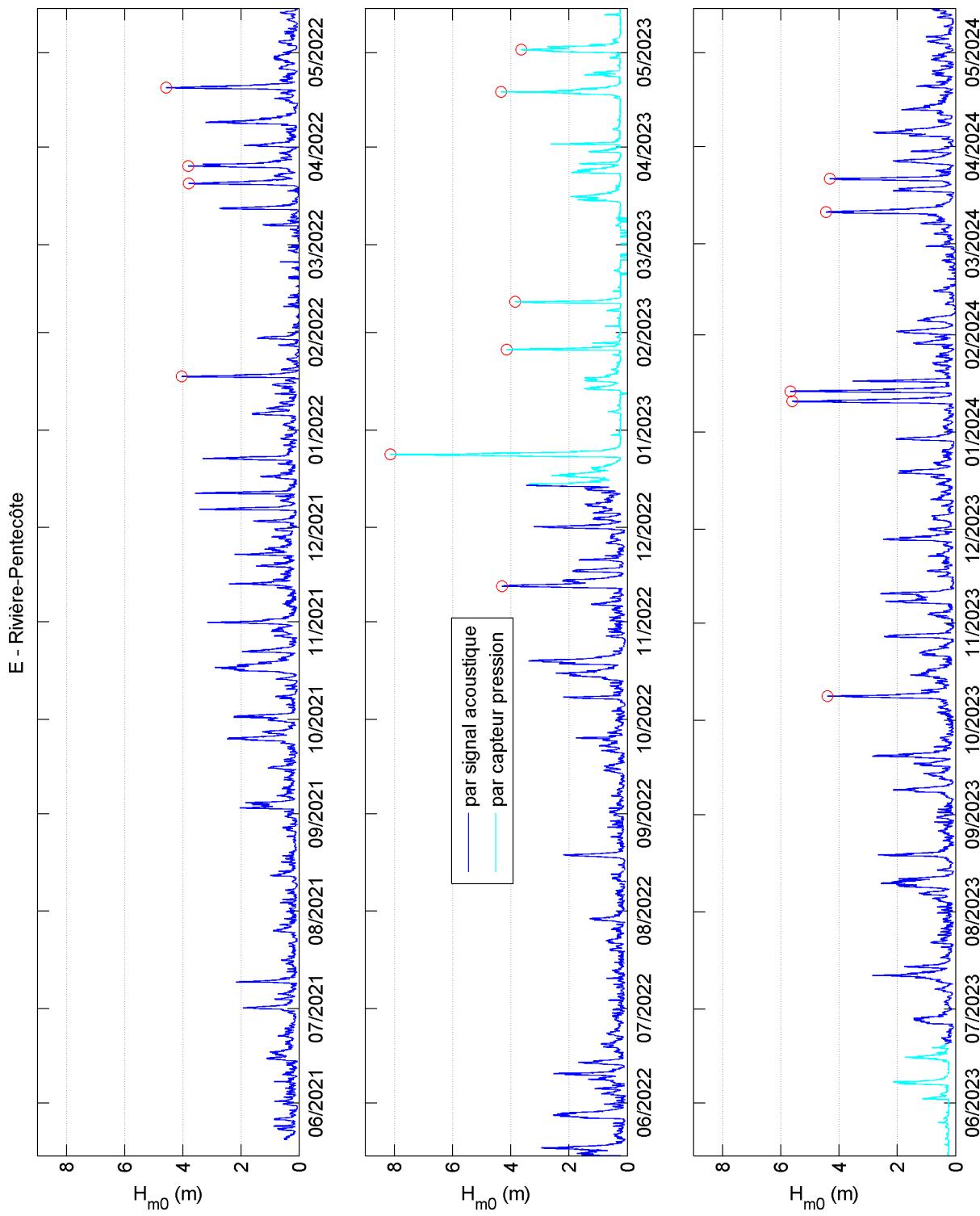


Figure 25 – Série temporelle des hauteurs de vagues  $H_{m0}$  mesurées au site E (Rivière-Pentecôte). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges.

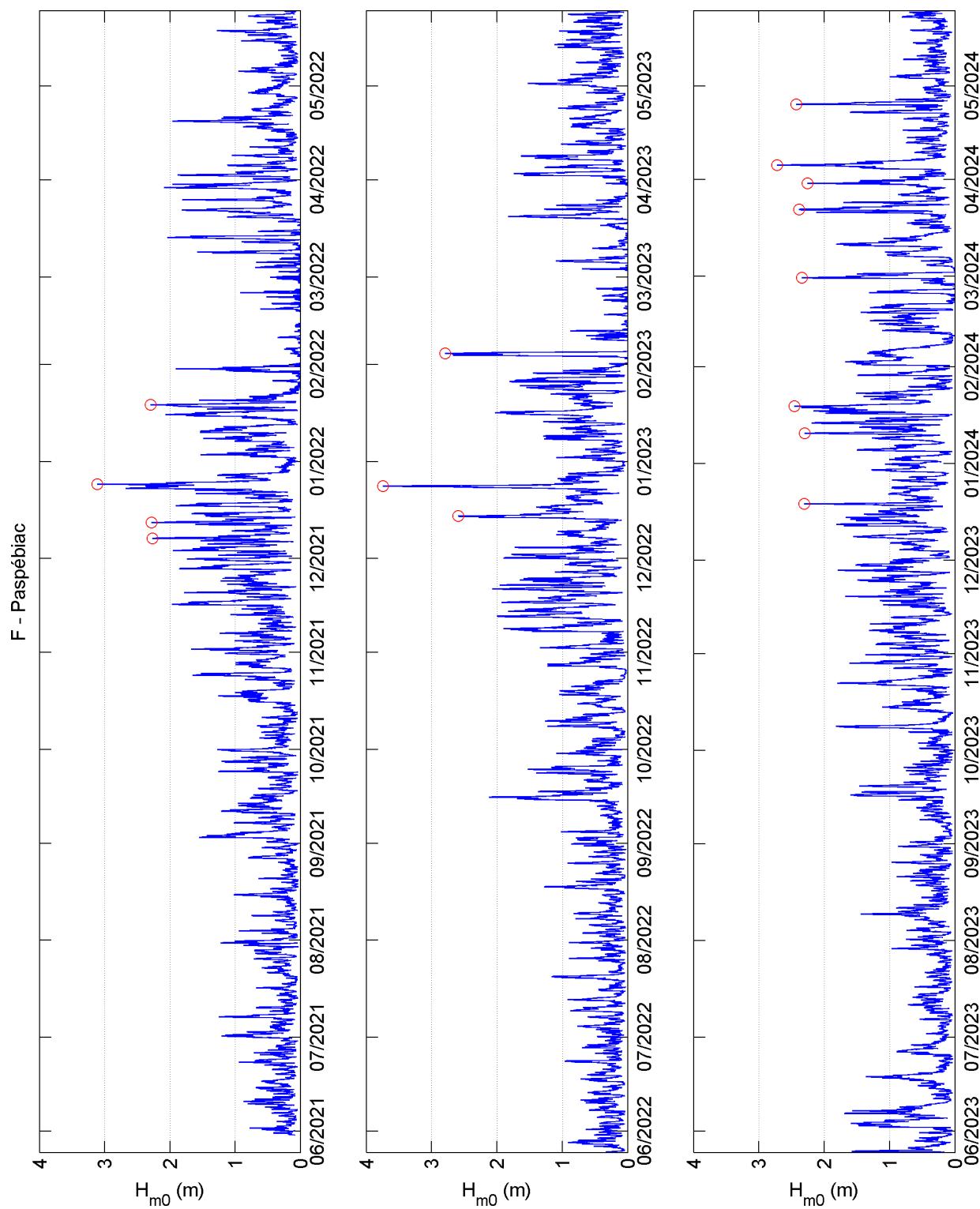


Figure 26 – Série temporelle des hauteurs de vagues  $H_{m0}$  mesurées au site F (Paspébiac). Les 15 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges

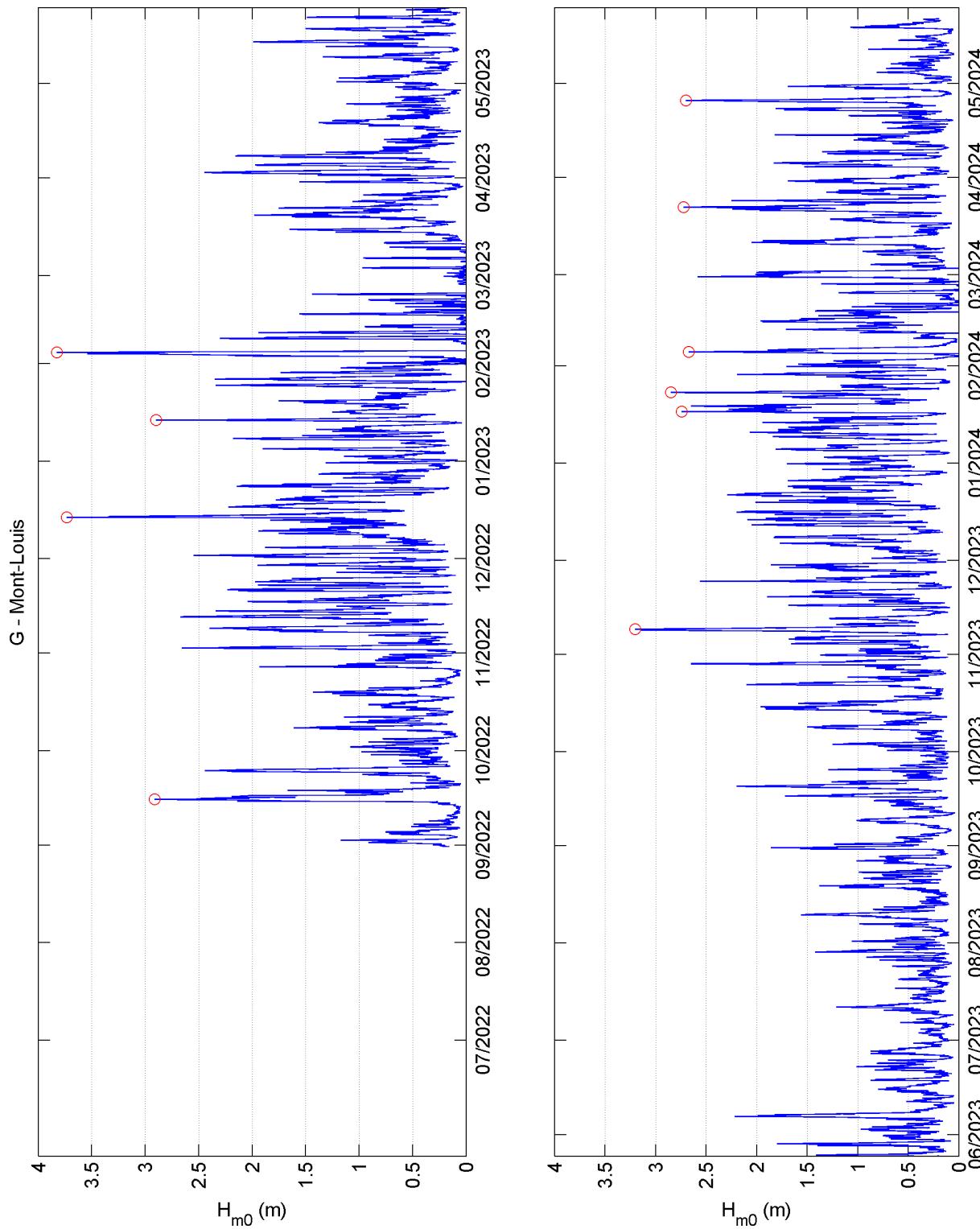


Figure 27 – Série temporelle des hauteurs de vagues  $H_{m0}$  mesurées au site G (Mont-Louis). Les 10 plus fortes tempêtes sont indiquées avec des cercles rouges

Nous avons répertorié dans les tableaux 10 et 11 la date, la hauteur  $H_{m0}$  et la période des vagues, ainsi que la direction de provenance des vingt-cinq plus fortes tempêtes mesurées au site de St-Ulric (A), Cap d'Espoir (B), Rivière-Pentecôte (E), Paspébiac (F); alors qu'au site de Mont-Louis (G), seulement les dix plus fortes tempêtes ont été listées considérant la courte période de données disponibles. Les tempêtes survenues lors de la période 2010-2021 sont ombragées en gris dans les tableaux.

Pour St-Ulric (Tableau 10), la tempête qui a généré les vagues les plus élevées ( $H_{m0} \rightarrow 4,21$  m) entre mai 2021 et mai 2024, arrive au deuxième rang sur les quatorze années de monitorage et s'est produite le 23 décembre 2022 avec des vagues du nord-nord-est (30°). Le record du 5 janvier 2018 a presque été égalé. La deuxième tempête d'importance ces trois dernières années, a généré des vagues de 3,85 m le 12 novembre 2022. Les vagues provenaient du nord-est (35°). Il n'y a eu que trois événements lors de la période 2021-2024 qui se sont classés parmi les vingt-cinq plus fortes tempêtes.

Pour Cap d'Espoir (Tableau 10), la tempête exceptionnelle du 24 décembre 2022 a surclassé le précédent record de décembre 2016 de plus d'un mètre avec des vagues de 7,71 m en provenance de l'est-sud-est. La deuxième tempête la plus forte de la période couverte par ce rapport, date du 10 janvier 2024 avec des vagues de 6,47 m. Cette tempête se classe au 4<sup>e</sup> rang sur l'ensemble des données disponibles à ce site. Au total, au cours des trois dernières années il y a eu onze tempêtes qui se classent parmi les vingt-cinq plus fortes sur les quatorze dernières années.

À Rivière-Pentecôte (Tableau 11), il s'agit encore de la tempête du 24 décembre 2022 qui a produit les vagues les plus élevées au cours des dix dernières années de suivi des conditions océanographiques. Les vagues ont atteint une hauteur  $H_{m0}$  de 8,15 m et provenaient de l'est-nord-est (74°). Lors de cet événement les hauteurs de vagues ont été calculées par l'intermédiaire du capteur de pression, qui sont probablement un peu surévaluées par rapport à ce qu'aurait pu fournir les données acoustiques (mode standard de calcul, voir aussi Neumeier et al., 2019). Voir aussi la note au Tableau 11. La deuxième tempête d'importance sur la période 2021-2024 est celle du 13 janvier 2024 avec des vagues de 5,67 m. Cette tempête se classe au 3<sup>e</sup> rang au total. Trois jours plus tôt, le 10 janvier 2024, une autre tempête générât des vagues équivalentes ( $H_{m0} \rightarrow 5,61$  m). La même tendance observée à Cap d'Espoir se dessine aussi ici, sur les vingt-cinq tempêtes les plus fortes observées à Rivière-Pentecôte au cours des dix dernières années, dix sont issues de la période 2021-2024.

À Paspébiac (Tableau 11), la tempête du 24 décembre 2022 a généré des vagues 3,75 m en provenance de l'est (98°), surpassant le précédent record du 2 février 2021 où les vagues avaient atteint 3,17 m. La deuxième tempête la plus forte au cours des trois dernières années a eu lieu le 24 décembre 2021 avec des vagues de 3,12 m. Cette tempête se classe au 4<sup>e</sup> rang au total. Sur les vingt-cinq tempêtes les plus fortes des neuf dernières années à Paspébiac, huit sont issues de la période 2021-2024. Sur ces huit tempêtes, les vagues provenaient de l'est pour trois d'entre elles, et de l'ouest pour les cinq autres.

À Mont-Louis, considérant la période plus courte de suivi des conditions océanographiques (vingt et un mois), seulement dix événements de tempête ont été listés dans le Tableau 11. À l'inverse de tous les autres sites, la tempête du 23-24 décembre 2022 n'a généré aucune vague d'importance. Les vagues les plus hautes ont été mesurées le 4 février 2023 avec une hauteur de 3,82 m provenant du nord-ouest (311°).

Le deuxième événement a généré des vagues de 3,73 m provenant du nord-est (52°) et a eu lieu le 14 décembre 2022.

*Tableau 10 – Les 25 plus fortes tempêtes mesurées entre mai 2010 et mai 2024 aux sites A et B. Les tempêtes de la période avant mai 2021 sont soulignées en grisé.*

Site A (St-Ulric)					Site B (Cap d'Espoir)				
Rang	Date/Heure	H <sub>m0</sub>	T <sub>02</sub>	Dir	Rang	Date/Heure	H <sub>m0</sub>	T <sub>02</sub>	Dir
	(HNE)	(m)	(s)	(°)		(HNE)	(m)	(s)	(°)
1	05/01/2018 03:20	4.22	6.84	44	1	24/12/2022 01:00	7.71	7.76	110
2	23/12/2022 23:00	4.21	7.78	30	2	30/12/2016 09:20	6.61	7.66	117
3	10/01/2019 01:00	4.05	7.07	25	3	15/12/2010 05:20	6.50	7.79	97
4	11/12/2014 04:20	3.90	6.48	39	4	10/01/2024 18:00	6.47	7.61	126
5	15/03/2017 09:20	3.88	6.87	29	5	26/01/2023 14:00	5.98	7.06	128
6	12/11/2022 15:00	3.85	6.83	35	6	09/01/2019 22:00	5.81	7.20	94
7	15/12/2010 15:20	3.75	7.57	31	7	04/01/2017 14:20	5.59	7.90	114
8	01/11/2019 19:20	3.75	5.85	266	8	14/12/2022 08:00	5.58	8.30	80
9	03/02/2021 02:00	3.72	6.62	41	9	13/01/2024 23:00	5.56	7.46	128
10	08/03/2018 22:20	3.58	6.55	50	10	11/12/2014 09:20	5.45	7.80	83
11	23/04/2012 14:20	3.48	6.20	33	11	27/11/2023 21:00	5.44	7.81	125
12	25/01/2017 12:20	3.40	6.49	34	12	11/01/2016 06:20	5.40	7.15	116
13	20/01/2019 22:00	3.39	6.06	24	13	19/12/2023 01:00	5.39	7.51	137
14	28/11/2018 06:00	3.34	6.35	28	14	17/01/2022 23:00	5.18	7.12	139
15	14/03/2018 06:20	3.34	6.10	45	15	01/12/2022 03:00	5.10	7.14	131
16	06/01/2022 02:00	3.32	5.99	31	16	11/03/2024 06:00	5.10	7.61	101
17	14/02/2014 10:20	3.29	5.49	42	17	17/10/2019 21:00	5.10	7.83	67
18	27/02/2020 20:20	3.25	6.15	36	18	14/03/2018 15:20	5.09	7.74	68
19	03/11/2014 09:20	3.23	5.76	20	19	02/12/2016 00:20	5.07	7.19	104
20	28/12/2010 04:20	3.22	5.76	21	20	07/09/2019 23:20	5.06	6.40	84
21	28/08/2014 09:20	3.22	6.39	40	21	19/04/2022 23:00	5.03	6.73	122
22	17/10/2019 19:20	3.19	6.19	46	22	05/01/2018 14:20	5.01	7.33	202
23	20/01/2013 23:20	3.16	5.67	253	23	08/04/2012 11:20	4.81	7.56	80
24	21/02/2013 04:20	3.16	6.06	37	24	03/02/2021 05:00	4.80	7.92	85
25	16/05/2016 07:20	3.16	6.07	42	25	17/01/2021 09:00	4.75	7.06	95

*Tableau 11 – Les 25 plus fortes tempêtes mesurées entre mai 2014 et mai 2024 aux sites E et F; et les 10 tempêtes les plus fortes au site G entre septembre 2022 et mai 2024. Les tempêtes de la période avant mai 2021 sont surlignées en grisé.*

<b>Site E (Rivière-Pentecôte)</b>					<b>Site F (Paspébiac)</b>				
Rang	Date/Heure (HNE)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>02</sub> (s)	Dir (°)	Rang	Date/Heure (HNE)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>02</sub> (s)	Dir (°)
1	24/12/2022 03:20	8.15*	9.17	74	1	24/12/2022 00:00	3.75	6.01	98
2	30/12/2016 11:20	6.08	7.41	85	2	02/02/2021 22:00	3.17	5.53	84
3	13/01/2024 22:00	5.67	7.59	81	3	04/11/2018 00:20	3.16	5.23	240
4	10/01/2024 16:00	5.61	7.38	90	4	24/12/2021 15:00	3.12	5.81	265
5	11/12/2014 04:20	5.23	7.27	85	5	14/11/2018 10:20	3.07	5.34	274
6	13/12/2017 10:20	4.92	7.48	78	6	04/01/2018 21:20	2.81	6.60	85
7	30/10/2017 17:20	4.73	7.24	84	7	16/12/2019 03:20	2.81	5.28	270
8	04/01/2017 13:20	4.61	6.98	82	8	05/01/2018 12:20	2.80	5.04	261
9	19/04/2022 21:00	4.57	7.45	79	9	04/02/2023 09:00	2.80	6.12	251
10	01/12/2016 20:20	4.46	6.68	87	10	30/12/2016 07:20	2.74	5.29	89
11	11/03/2024 00:00	4.45	6.83	94	11	05/04/2024 12:00	2.72	5.63	86
12	08/10/2023 16:20	4.41	6.96	82	12	11/11/2018 00:20	2.67	5.30	254
13	25/01/2017 15:20	4.4	7.04	76	13	02/11/2020 18:00	2.65	5.05	261
14	18/04/2023 10:20	4.35	7.57	78	14	14/12/2022 10:00	2.60	6.59	96
15	07/04/2017 10:20	4.33	6.71	83	15	04/04/2019 11:20	2.56	5.21	268
16	21/03/2024 18:00	4.32	7.08	86	16	16/12/2016 05:20	2.52	5.04	250
17	12/11/2022 05:20	4.30	6.58	79	17	20/12/2015 06:20	2.52	5.45	256
18	10/01/2019 01:00	4.29	6.84	92	18	15/03/2017 03:20	2.49	4.84	79
19	17/04/2018 20:20	4.25	6.80	87	19	11/11/2017 04:20	2.47	5.12	259
20	26/01/2023 13:20	4.15	7.33	74	20	19/01/2024 06:00	2.45	5.18	271
21	05/04/2018 00:20	4.14	7.15	88	21	25/04/2024 01:00	2.43	5.17	269
22	11/01/2016 04:20	4.08	6.72	78	22	16/11/2019 05:20	2.41	4.95	270
23	17/01/2022 23:00	4.05	7.00	85	23	16/12/2020 02:00	2.40	5.18	258
24	18/10/2019 01:20	4.04	6.89	76	24	22/03/2024 07:00	2.39	5.09	272
25	13/12/2020 18:20	4.02	6.71	85	25	14/03/2018 10:20	2.38	4.93	86

<b>Site G (Mont-Louis)</b>				
Rang	Date/Heure (HNE)	H <sub>m0</sub> (m)	T <sub>02</sub> (s)	Dir (°)
1	04/02/2023 11:00	3.82	7.18	311
2	14/12/2022 01:00	3.73	6.48	52
3	08/11/2023 22:00	3.20	6.04	7
4	15/09/2022 09:00	2.91	5.43	307
5	13/01/2023 22:00	2.90	5.93	51
6	23/01/2024 09:00	2.85	5.73	319
7	17/01/2024 07:00	2.74	5.95	38
8	22/03/2024 09:00	2.72	5.33	287
9	25/04/2024 10:00	2.70	5.49	317
10	05/02/2024 08:00	2.67	5.66	52

\* Cette hauteur de 8,15 m a été obtenue à partir du capteur de pression de l'AWAC, qui a tendance à surestimer légèrement H<sub>m0</sub> par rapport à ce qu'aurait pu fournir les données acoustiques (mode standard de calcul, voir aussi Neumeier et al., 2019). La différence entre les deux méthodes de calcul varie selon la hauteur et la période des vagues. Il est donc possible que la tempête du 23-24 décembre 2022 mesurée par AST aurait donné des vagues un peu plus faible, entre 7 et 8 m. À Rivière-Pentecôte les vagues sont généralement similaires ou un peu plus faible qu'au Cap d'Espoir. Au Cap d'Espoir cette tempête avait produit des vagues de 7,71 m.

Les données de hauteur de vagues ont été compilées pour calculer les probabilités de dépassement des hauteurs de vagues (Figure 28 et Figure 29). Présentées sous une échelle logarithmique, ces courbes de probabilité de dépassement correspondent à une représentation graphique de la fréquence d'occurrence des hauteurs de vagues atteintes, avec l'emphase mise sur les tempêtes. Il est important de rappeler que ces résultats sont basés sur la hauteur significative des vagues  $H_{m0}$ , non sur les hauteurs maximales. Sur ces graphiques de probabilité de dépassement, les données issues de ce projet sont comparées avec celles obtenues depuis le début du suivi des conditions océaniques à chacun des sites. Pour Mont-Louis (site G) le présent projet initie le suivi des conditions de vagues, il n'y a donc pas encore de comparaison possible avant l'année 2022.

Sur la première figure, sont présentés les sites de St-Ulric, Cap d'Espoir et Mont-Louis (Figure 28). À St-Ulric les vagues de tempête pour la période 20121-2024 n'ont pas excédé le précédent record, avec des hauteurs légèrement au-dessus de 4 m. Seule la tempête hors-norme du 23-24 décembre 2022 a été impactante dans le régime de vagues.

Au Cap d'Espoir, les vagues de tempêtes pour la période 2021-2024 montrent une nette augmentation des hauteurs atteintes avec des vagues de plus de 7 m, dépassant le précédent record de plus de 1 m. Cette tendance à l'augmentation des hauteurs des vagues lors des tempêtes dans le Golfe s'explique notamment par les deux derniers hivers (automne 2022 → printemps 2023 et automne 2023 → printemps 2024).

À Mont-Louis, il s'agit du premier jeu de données de vagues, et la courbe montre un régime de vagues similaire à ce qui est observé à St-Ulric. Toutefois, les vagues de tempête à Mont-Louis sont légèrement inférieures par rapport à celles observées à St-Ulric. À Mont-Louis, les vagues de tempête peuvent atteindre des hauteurs proches de 4 m.

La Figure 29 présentent les sites de Rivière-Pentecôte et Paspébiac. La nette augmentation des hauteurs de vagues de tempête observée à Cap d'Espoir est également visible à Rivière-Pentecôte. Les tempêtes ayant eu lieu lors de l'hiver 2022-2023 ont sévèrement impacté l'allure de la courbe. Les vagues de tempête étaient plus élevées que lors des précédentes années. À noter que les données pour générer cette courbe (site E) sont issues en partie du capteur de pression lors de l'hiver 2022-2023 et sont donc à prendre avec précaution (voir aussi la note au Tableau 11). Le record de hauteur aurait été battu de plus de 2 m, avec des vagues dépassant les 8 m.

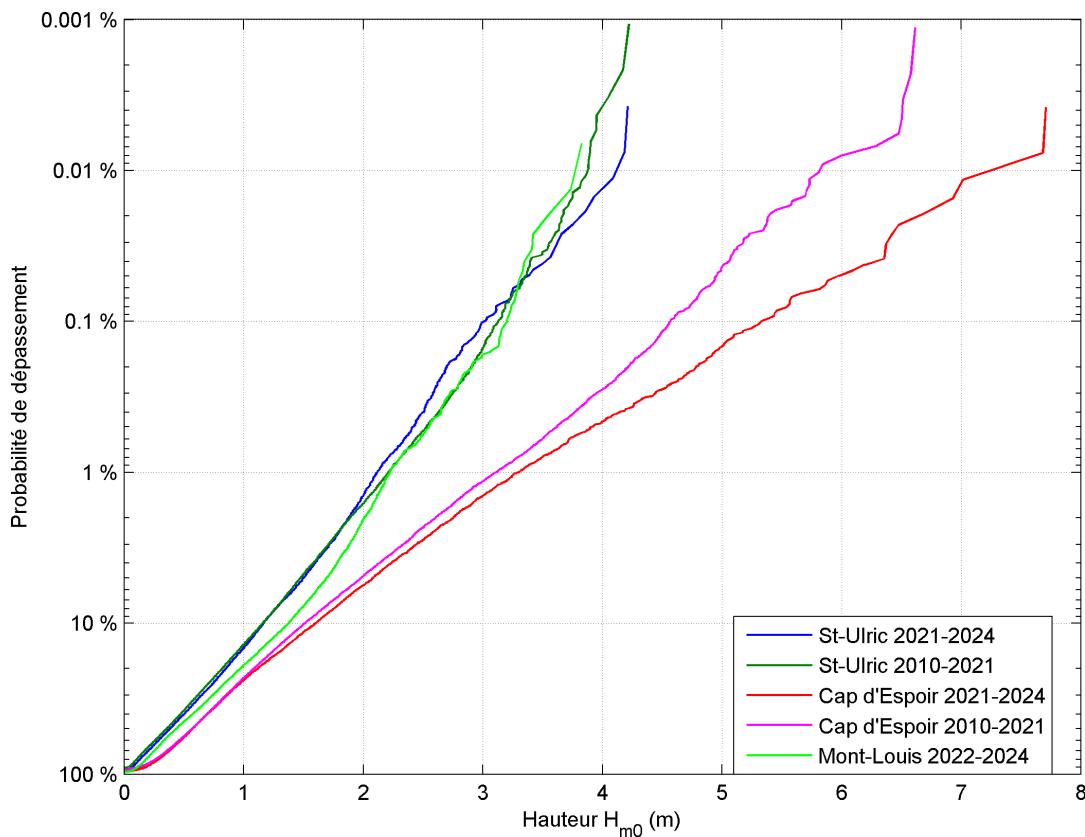
Au site de Paspébiac, les données montrent également une augmentation de la hauteur des vagues de tempête pour la période 2021-2024, avec ici aussi un record de hauteur battu lors de la tempête du 24 décembre 2022. Cependant cette augmentation est limitée à quelques événements.

À l'exception du site Mont-Louis pour lequel c'était le début du suivi, tous les sites d'études précédemment monitorés ont vu leur régime de vagues se modifier avec une nette augmentation des hauteurs de vagues de tempête. Néanmoins il y a deux patrons spécifiques : ainsi on peut regrouper les sites de St-Ulric et Paspébiac, où les courbes de la période précédente et la période actuelle sont très similaires et ne diffèrent que sur les deux-trois événements extrêmes; alors que pour les sites ouverts sur le Golfe, Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte, l'augmentation des hauteurs de vagues de tempête ne se limite pas à quelques événements, mais au contraire semble se généraliser à partir d'un

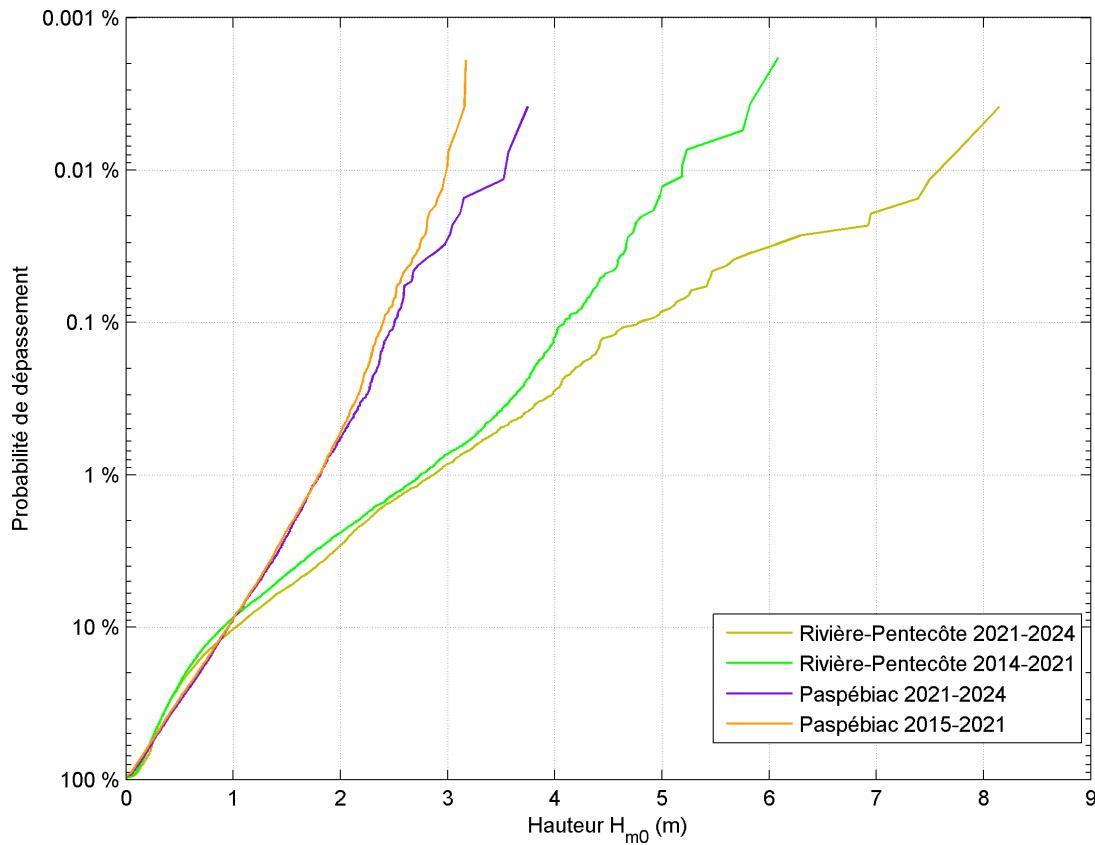
certain seuil. Sur cette période de 3 ans, les vagues sont plus hautes et/ou plus fréquentes lors des tempêtes dans le golfe du St-Laurent par rapport aux années précédentes.

Nous avons représenté l'évolution des événements de tempête les plus élevés pour chacun des sites (Figure 30). Sur la figure, chaque point représente la moyenne des hauteurs  $H_{m0}$  des trois plus hautes vagues de tempêtes enregistrées chaque année. Au lieu du 1<sup>er</sup> janvier, nous avons fixé la date de coupure le 1<sup>er</sup> mai, ce qui correspond au début du suivi et évite de diviser en deux la saison des tempêtes hivernales. Cette représentation met l'accent sur la variabilité interannuelle des très fortes tempêtes.

Pour la totalité des sites d'études, l'année 2022-2023 témoigne d'une nette augmentation des hauteurs des vagues atteintes lors des plus grosses tempêtes, suivi d'une diminution. Pour les deux sites ouverts sur le Golfe – Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte – malgré la diminution de la hauteur des vagues en 2023-2024, les valeurs atteintes sont supérieures aux autres années (avant 2021). Pour St-Ulric et Paspébiac, il n'y a pas de tendance à l'augmentation des hauteurs de vagues lors des plus grosses tempêtes à partir de cette représentation graphique. Le signal le plus visible sur les quatorze années de suivi des conditions océanographiques aux différents sites, est le caractère hors norme des deux périodes 2016-2017 et 2022-2023.



*Figure 28 – Comparaison des probabilités de dépassement des hauteurs de vagues  $H_{m0}$  à St-Ulric, Cap d'Espoir et Mont-Louis en fonction des périodes de monitoring.*



*Figure 29 – Comparaison des probabilités de dépassement des hauteurs de vagues à Rivière-Pentecôte et Paspébiac en fonction des périodes de monitorage.*

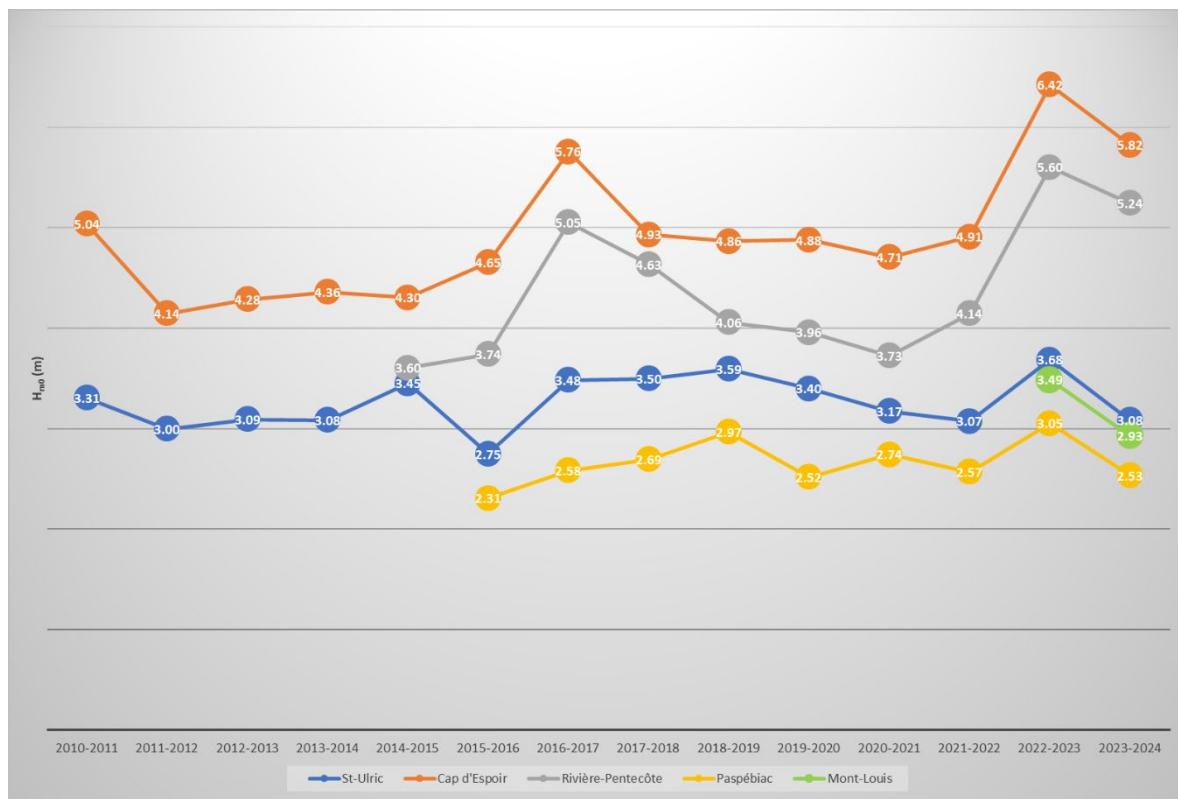


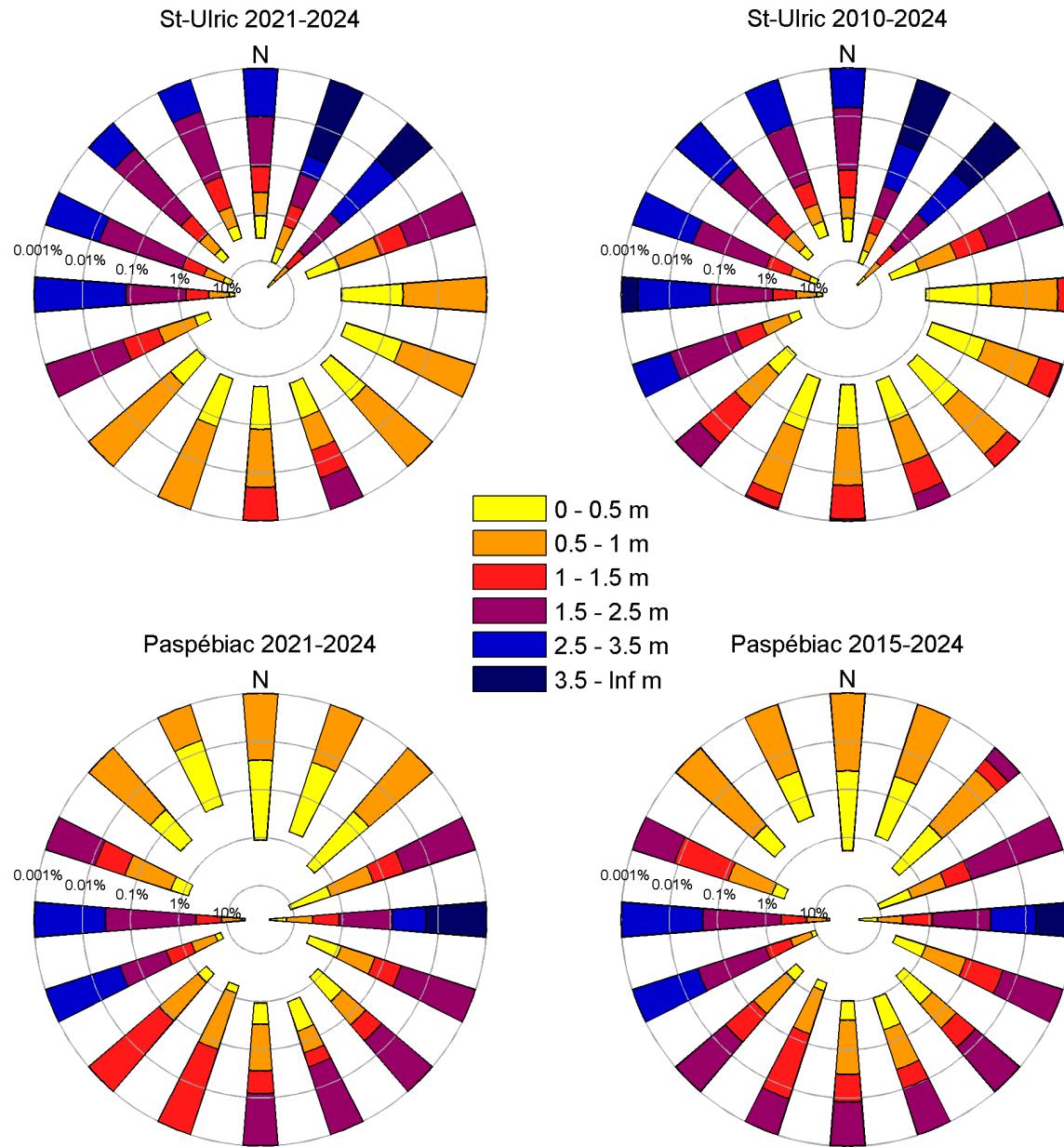
Figure 30 – Hauteur moyenne  $H_{m0}$  des vagues lors des 3 plus fortes tempêtes annuelles aux cinq sites d'études. La date de coupure pour discriminer les années est le 1<sup>er</sup> mai.

Les roses des vagues pour chaque site sont présentées afin de visualiser les secteurs de provenance des fortes vagues (Figure 31, 32 et 33). Les données de la période 2021-2024 ont été comparées avec l'ensemble des données précédentes pour chaque site. À St-Ulric, les vagues les plus hautes proviennent du secteur nord-est (Figure 31). Au cours des trois années de suivi il n'y a pas eu de vagues de tempête de plus de 3,5 m en provenance de l'ouest. La tempête qui a généré, au cours de la période 2021-2024, les vagues les plus élevées ( $H_{m0} \rightarrow 4,21$  m) était originaire du nord-nord-est (30°). La rose des vagues calculée sur la période 2021-2024 est très similaire à celle de la période 2010-2021, suggérant un climat de vagues de tempête relativement constant dans ce secteur de l'estuaire du St-Laurent.

À Paspébiac (Figure 31), les vagues de tempêtes conservent le même patron directionnel que lors des précédentes périodes, à savoir des vagues de l'ouest de l'intérieur de la baie et des vagues de l'est en provenance du Golfe. Pour la première fois des vagues de plus de 3,5 m ont été enregistrées dans la baie des Chaleurs ( $H_{m0} \rightarrow 3,75$  m) et celles-ci étaient originaires de l'est.

À Cap d'Espoir (Figure 32), les vagues les plus hautes ( $H_{m0} > 5$  m) proviennent en général du secteur de l'est-nord-est jusqu'au sud-est. Pendant ces trois dernières années il n'y a pas eu de vagues de tempête supérieures à 3,2 m en provenance du sud et du sud-ouest. La tempête qui a produit les vagues les plus hautes ( $H_{m0} \rightarrow 7,71$  m) entre 2021 et 2024 provenaient de l'est-sud-est (110°). Le patron géographique de la provenance des vagues

de tempête demeure très similaire sur cette période 2021-2024 à ce qui avait été observé les années précédentes.



*Figure 31 – Roses de vagues pour St-Ulric et Paspébiac pour la durée du projet et comparées avec les données des projets précédents. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,001 / 0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues provenant de cette direction.*

À Rivière-Pentecôte (Figure 32), les vagues les plus élevées sont originaires de l'est en général. Lors de la tempête la plus forte, les vagues provenaient de l'est-nord-est ( $H_{m0} \rightarrow 8,15 \text{ m}; 74^\circ$ ). Comme pour les deux sites précédents, il n'y a pas de changement majeur dans le patron spatial des vagues de tempête.

À Mont-Louis (Figure 33), les vagues de tempête peuvent atteindre des hauteurs proches de 4 m. Les deux secteurs préférentiels pour les vagues de plus de 3,5 m sont le nord-ouest et le nord-est, soit les directions où le fetch est le plus important. Les plus grosses vagues de tempête pour la période 2022-2024 provenaient du nord-ouest ( $H_{m0} \rightarrow 3,82 \text{ m}; 311^\circ$ ). Dans l'ensemble les sites de Mont-Louis et St-Ulric, tous deux situés dans l'estuaire du St-Laurent, présentent des patrons de vagues en termes d'intensité relativement similaires, avec deux secteurs de provenance distincts pour les vagues les plus fortes, toutefois celles enregistrées à Mont-Louis, site bien plus exposé mais avec des fetchs plus courts (max. 142 km, Figure 6), sont moins élevées qu'à St-Ulric (fetch max. 218 km, Figure 2).

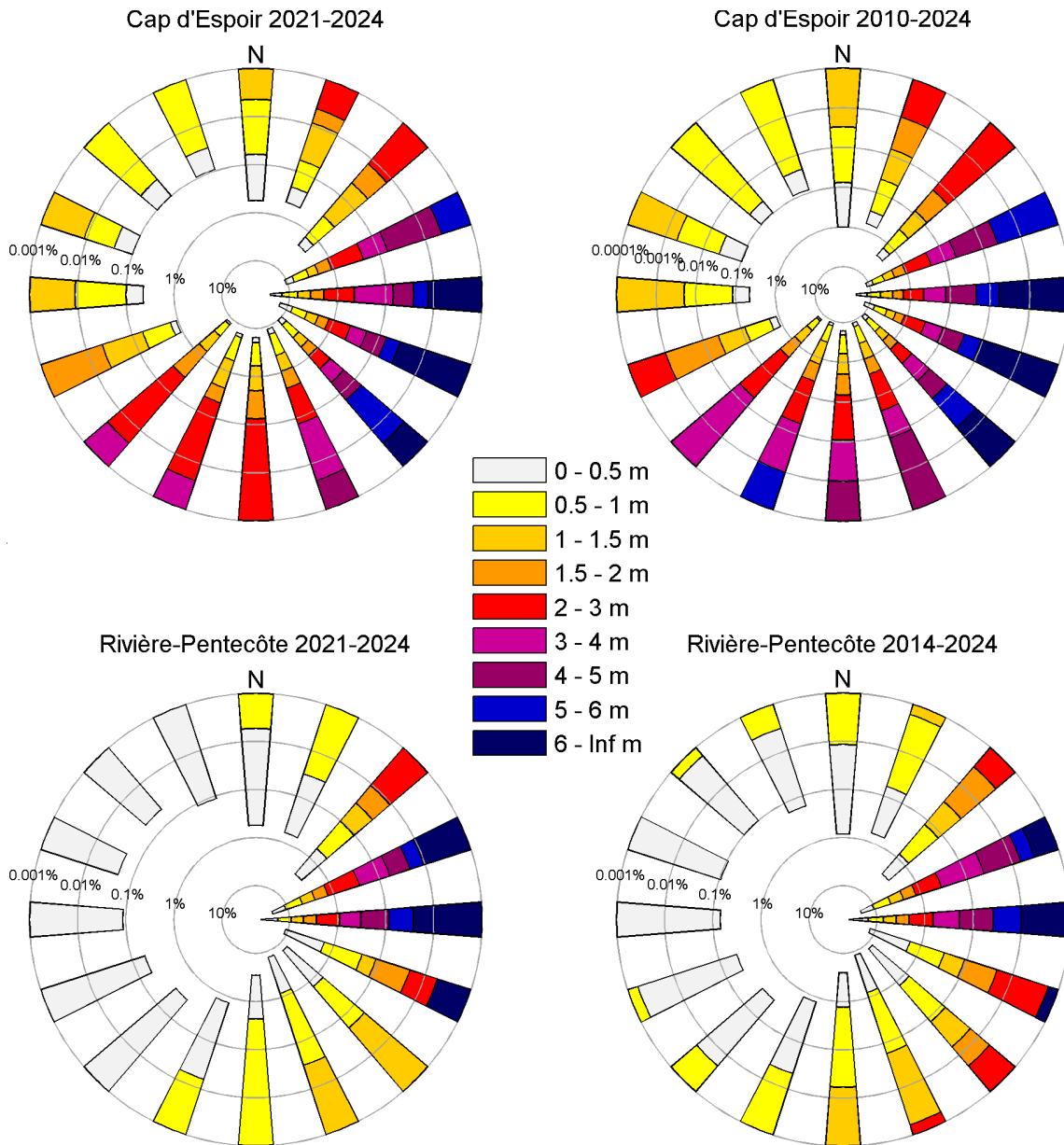
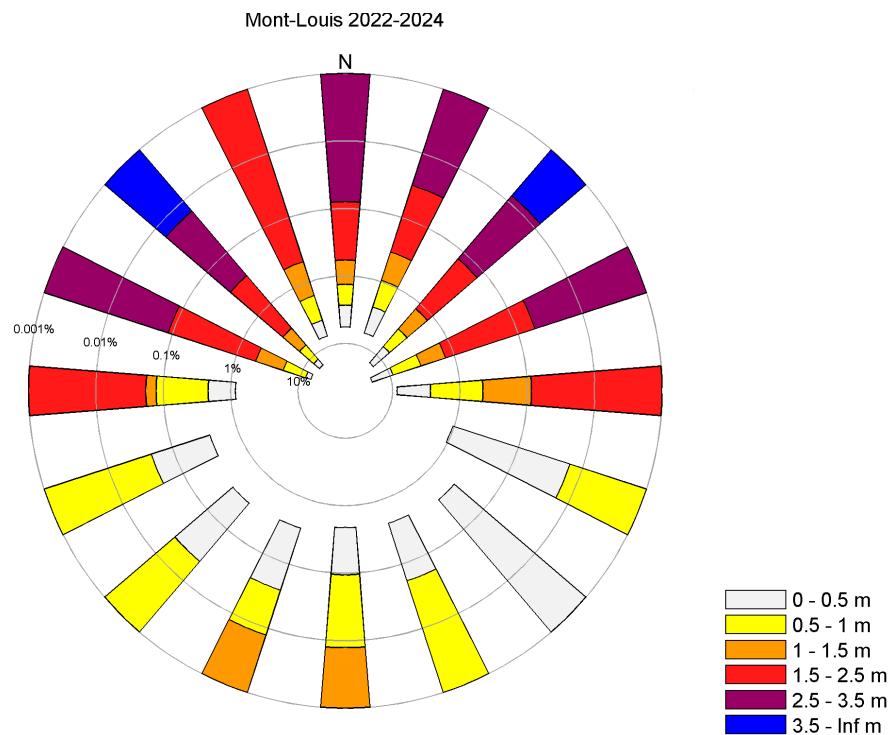


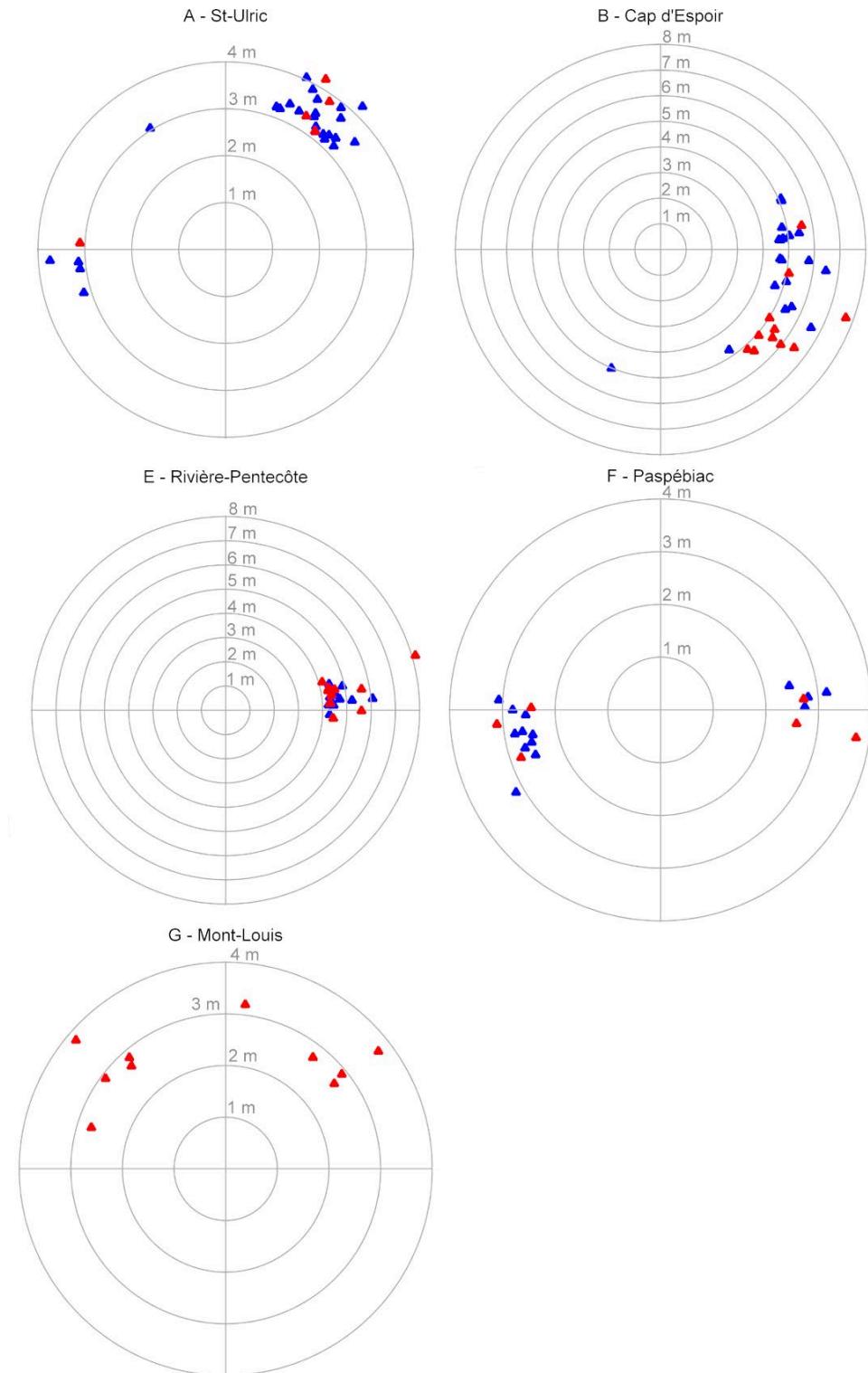
Figure 32 – Roses de vagues pour Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte pour la durée du projet et comparées avec les données des projets précédents. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,001 / 0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues provenant de cette direction.



*Figure 33 – Roses de vagues pour Mont-Louis. Pour chacun des 16 secteurs de direction sont indiquées les probabilités d'occurrence des différentes classes de hauteur de vagues. L'échelle radiale exponentielle (0,001 / 0,01 / 0,1 / 1 / 10 %), met plus d'emphase sur les événements peu fréquents, c'est-à-dire les vagues les plus grandes du secteur. La longueur vers le centre de chaque secteur indique le pourcentage de temps avec des vagues provenant de cette direction.*

La répartition spatiale des plus fortes tempêtes survenues à chaque site est représentée à la Figure 34. Les tempêtes de la période 2021-2024 sont identifiées en rouge sur cette figure, alors que les tempêtes avant mai 2021 sont représentées en bleu. À noter que sur cette figure, le nombre de tempêtes est légèrement différent de celui utilisé dans les tableaux. Ainsi, pour St-Ulric et Cap d'Espoir, trente (30) tempêtes sont illustrées, vingt (20) pour Rivière-Pentecôte et Paspébiac, et seulement dix (dix) pour Mont-Louis. À St-Ulric, cette illustration des vagues de tempête n'indique rien de marquant dans la comparaison des deux périodes. À Cap d'Espoir, la proportion des tempêtes des trois dernières années est notable, et la provenance des vagues opère un décalage vers le sud-est (dispersion directionnelle plus limitée). À Rivière-Pentecôte, la représentation montre le caractère hors-norme de la tempête qui a généré des vagues de plus de 8 m. Néanmoins, avec une méthode de mesure standard, cette tempête aurait été un peu plus proche du groupe de points (voir aussi la note au Tableau 11). À Paspébiac, la proportion entre les tempêtes de l'ouest et de l'est s'équilibre lors de ces trois dernières années, alors qu'auparavant il y avait beaucoup plus de tempêtes en provenance de l'ouest. Les vagues les plus élevées provenaient de l'est, en provenance du Golfe, ce qui concorde avec les fortes tempêtes mesurées à Cap d'Espoir (entrée de la baie des Chaleurs).

Les périodes de retour des fortes vagues ont été calculées pour chaque site et selon différentes méthodologies (Figures 35 à 37, Tableau 12). La première distribution probabiliste utilisée est la loi de Pareto généralisée (Coles, 2001), où l'ajustement est



*Figure 34 – Hauteurs de vagues  $H_{m0}$  et directions de provenance des plus fortes tempêtes observées aux sites A, B, E, F et G durant le projet ( $n = 30; 30; 20; 20; 10$ ). Les triangles en bleu correspondent à la période 2010-2021 et les triangles en rouge, mai 2021 - mai 2024.*

réalisé au seuil des 93%. Les deux autres distributions sont celles de Weibull et de Gumbel, pour lesquelles la limite des plus fortes tempêtes utilisées pour l'analyse a été déterminée visuellement sur les graphiques (Figures 35 à 37). Plus de 13 années de données aux sites de St-Ulric et de Cap d'Espoir ont servi à construire ces courbes, environ 9 années de données pour les sites de Rivière-Pentecôte et Paspébiac, alors que seulement 1,7 années de données sont disponibles à Mont-Louis. C'est pour cette raison que les périodes de retour de 30 ans ont seulement été calculées pour les deux premiers sites, que les prédictions s'arrêtent aux périodes de retour de 20 ans pour Rivière-Pentecôte et Paspébiac, et finalement pour Mont-Louis, la limite est fixée à 10 ans.

Selon la distribution utilisée, les résultats peuvent montrer des différences importantes pour un même site, avec la loi de Pareto généralisée prédisant les plus faibles vagues pour une période de retour donnée (Tableau 12). Plus la période de retour est grande plus les différences entre les hauteurs significatives selon la distribution s'intensifient. À St-Ulric les écarts atteignent 40 cm selon la distribution; à Cap d'Espoir les écarts atteignent 20 cm; à Rivière-Pentecôte les écarts atteignent 54 cm pour une période de retour de 20 ans; à Paspébiac les écarts atteignent 37 cm sur 20 ans; enfin à Mont-Louis, la différence est de 71 cm entre la loi de Pareto généralisée et la distribution de Gumbel pour une période de retour de 10 ans. Cet écart plus important peut s'expliquer par la taille plus faible du jeu de données à Mont-Louis.

À St-Ulric, les valeurs calculées par les différents modèles statistiques dans ce rapport sont très similaires à ce qui avait été présenté dans le précédent rapport où le jeu de données s'arrêtait en mai 2021. Le régime de vagues à St-Ulric au cours des trois dernières années n'a pas évolué par rapport aux dix premières années de données. Dans l'estuaire, les vagues de plus de 4,20 m ont une récurrence entre 5 et 10 ans selon la distribution probabiliste utilisée. Sachant qu'à St-Ulric, le jeu de données est le plus long de tous les sites monitorés, les valeurs de récurrence aux 20 et 30 ans, qui sont largement supérieures au record de 4,22 m, ont un bon niveau de confiance.

À Paspébiac, les valeurs issues des différents modèles statistiques sont également très proches de celles calculées alors qu'il n'y avait que 6 années de données lors du précédent rapport. Les valeurs à 20 ans ont augmenté d'environ 15 cm et peuvent s'expliquer par l'établissement d'un nouveau record de hauteur. Les vagues de plus de 3,75 m (record) ont une récurrence aux 20 ans.

À Cap d'Espoir, pour les périodes de retour de 30 ans, les valeurs calculées sur 2010-2024 ont augmenté entre 70 et 85 cm par rapport au précédent jeu de données (2010-2021), révélant ainsi l'impact d'une fréquence plus élevée des fortes vagues lors des 3 dernières années dans cette partie du golfe du St-Laurent. Selon les modèles statistiques, les vagues supérieures à 8 m ont une récurrence aux 30 ans.

À Rivière-Pentecôte, les valeurs des vagues les plus hautes ont varié entre -4 et +85 cm pour une récurrence aux 20 ans par rapport au jeu de données du précédent rapport. La distribution de Weibull est celle qui présente le moins de variation entre les deux jeux de données (6,2 vs. 9,2 années). Les vagues de plus de 7,50 m ont une récurrence entre 15 et 20 ans environ selon le modèle statistique choisi.

Pour Mont-Louis, les vagues de plus de 4 m ont une récurrence aux 5 ans pour deux lois probabilistes. Un monitorage plus conséquent sur ce site est nécessaire pour affiner la robustesse des différents modèles statistiques.

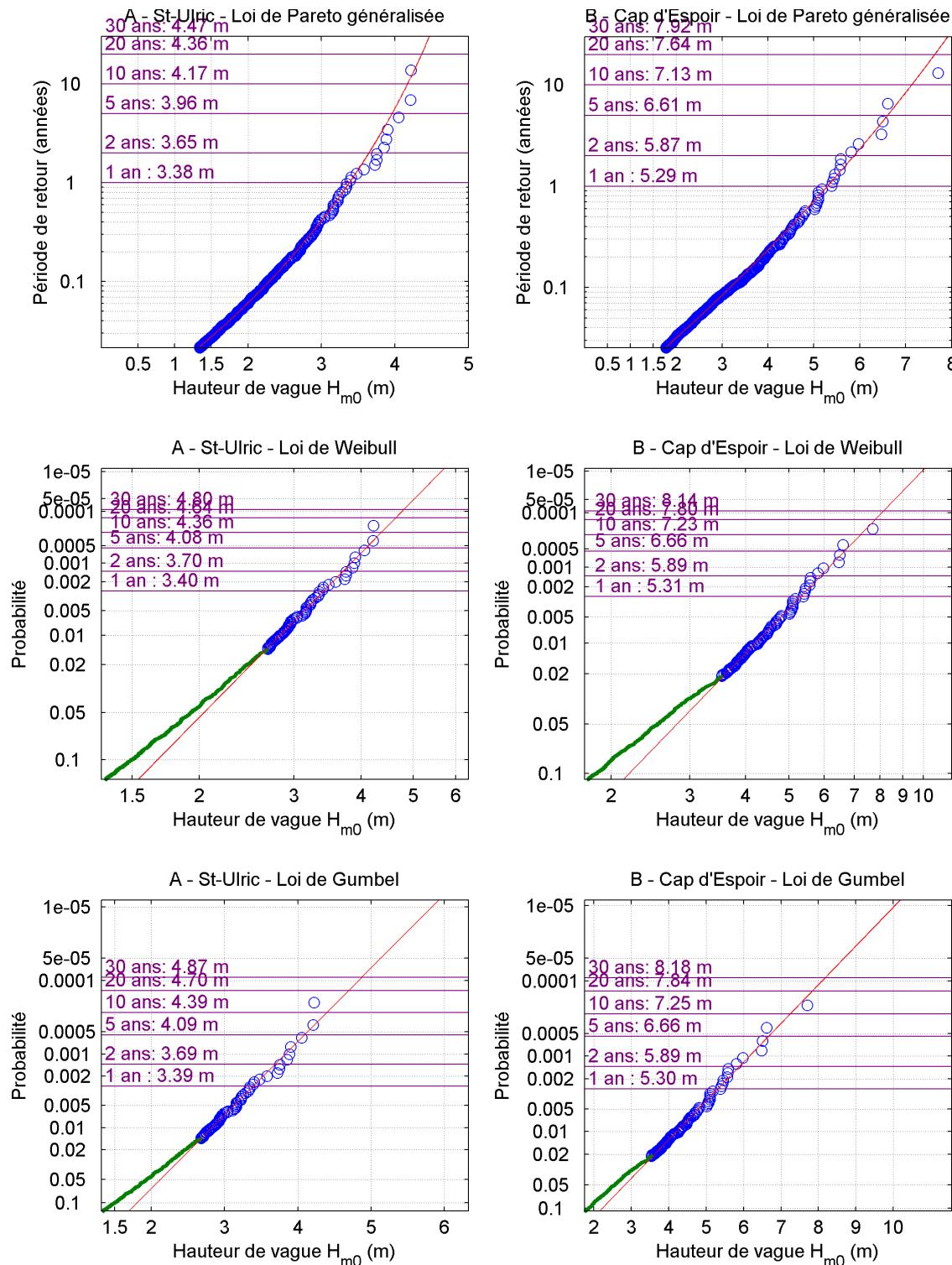


Figure 35 – Périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel, aux sites A et B. Les tempêtes utilisées pour l'ajustement sont représentées avec des cercles bleus, les tempêtes plus faibles avec des points verts. Pour la loi de Pareto généralisée, le seuil fixé pour le calcul inclut seulement les évènements au-dessus du 93<sup>e</sup> percentile (cercles bleus) de l'ensemble des données.

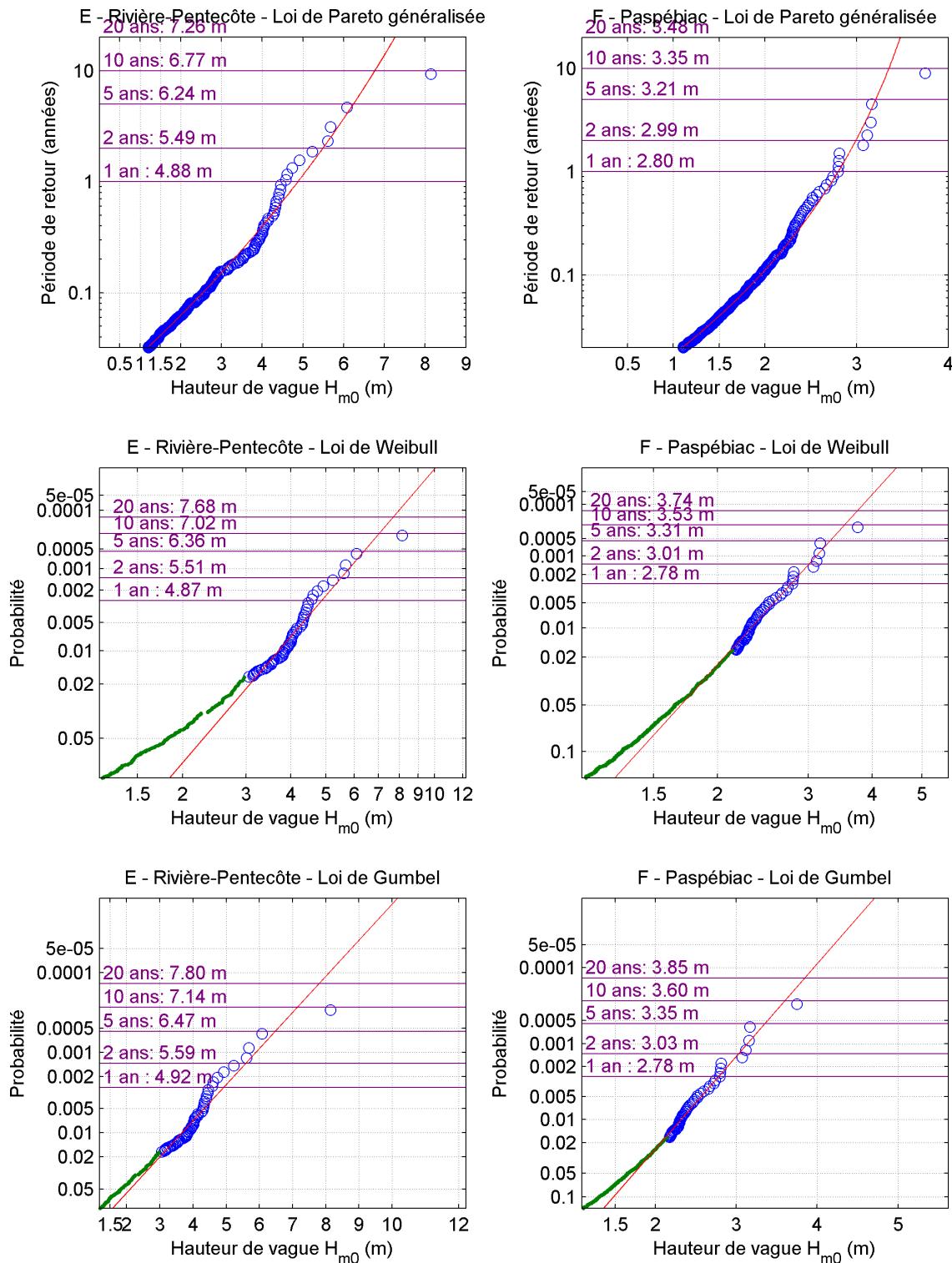
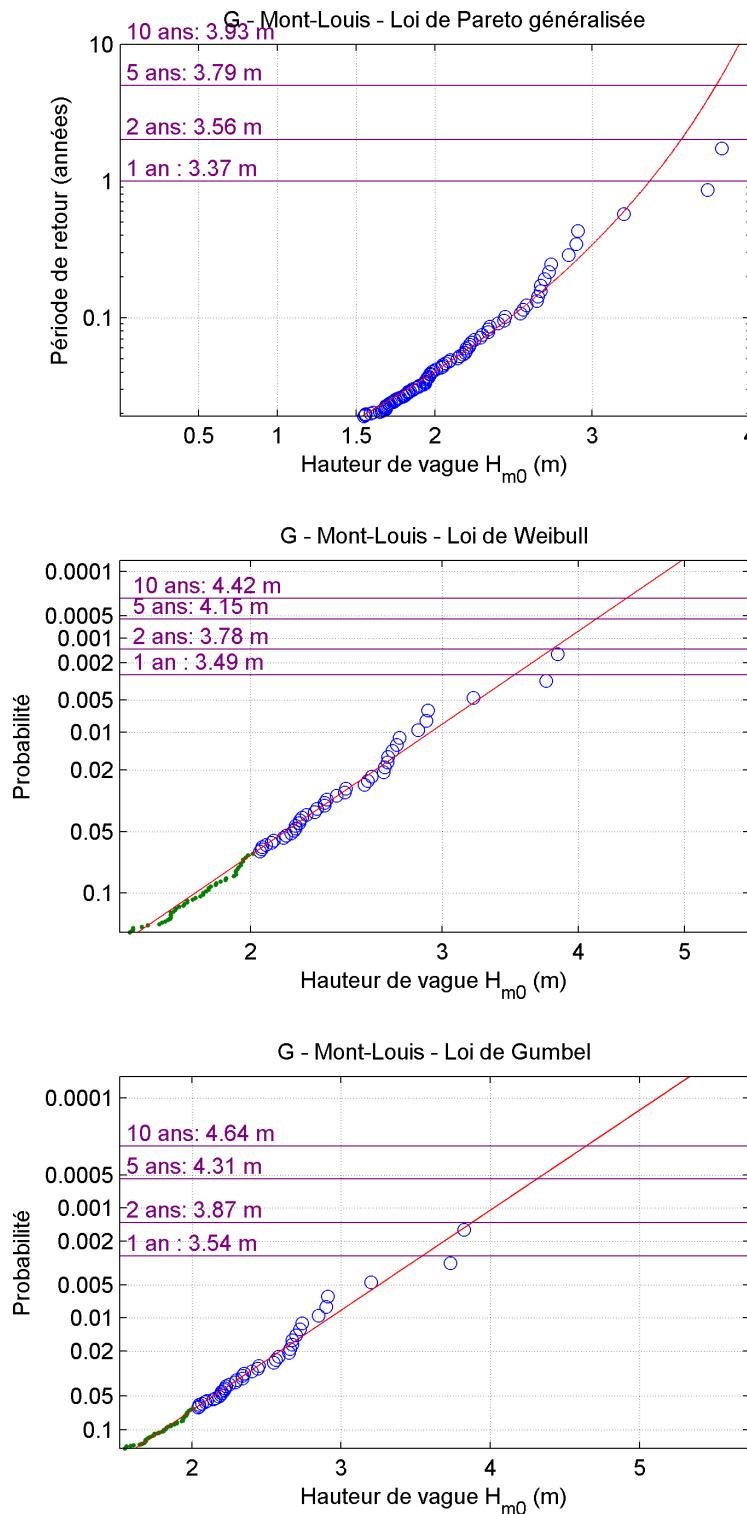


Figure 36 – Périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel, aux sites E et F. Les tempêtes utilisées pour l'ajustement sont représentées avec des cercles bleus, les tempêtes plus faibles avec des points verts. Pour la loi de Pareto généralisée, le seuil fixé pour le calcul inclut seulement les événements au-dessus du 93<sup>e</sup> percentile (cercles bleus) de l'ensemble des données.



*Figure 37 – Périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel, au site G. Les tempêtes utilisées pour l'ajustement sont représentées avec des cercles bleus, les tempêtes plus faibles avec des points verts. Pour la loi de Pareto généralisée, le seuil fixé pour le calcul inclut seulement les évènements au-dessus du 93e percentile (cercles bleus) de l'ensemble des données.*

*Tableau 12 – Hauteurs de vagues  $H_{m0}$  pour différentes périodes de retour calculées selon la distribution de Pareto généralisée et distributions probabilistes Weibull et Gumbel.*

	Loi de Pareto généralisée	Distribution Weibull	Distribution Gumbel
<b>A – Saint-Ulric : 2010-05-03 à 2024-05-22 (13,6 ans<sup>#</sup>)</b>			
Plus forte tempête : 4,22 m			
1 an	3,38 m	3,40 m	3,39 m
5 ans	3,96 m	4,08 m	4,09 m
10 ans	4,17 m	4,36 m	4,39 m
20 ans	4,36 m	4,64 m	4,70 m
30 ans	4,47 m	4,80 m	4,87 m
<b>B – Cap d'Espoir : 2010-10-06 à 2024-05-26 (13,1 ans<sup>#</sup>)</b>			
Plus forte tempête : 7,71 m			
1 an	5,29 m	5,31 m	5,30 m
5 ans	6,61 m	6,66 m	6,66 m
10 ans	7,13 m	7,23 m	7,25 m
20 ans	7,64 m	7,80 m	7,84 m
30 ans	7,92 m	8,14 m	8,18 m
<b>E – Rivière-Pentecôte : 2014-05-06 à 2024-05-15 (9,2 ans<sup>#</sup>)</b>			
Plus forte tempête : 8,14 m			
1 an	4,88 m	4,87 m	4,92 m
5 ans	6,24 m	6,36 m	6,47 m
10 ans	6,77 m	7,02 m	7,14 m
20 ans	7,26 m	7,68 m	7,80 m
<b>F – Paspébiac : 2015-05-22 à 2024-05-26 (9,0 ans<sup>#</sup>)</b>			
Plus forte tempête : 3,75 m			
1 an	2,80 m	2,78 m	2,78 m
5 ans	3,21 m	3,31 m	3,35 m
10 ans	3,35 m	3,53 m	3,60 m
20 ans	3,48 m	3,74 m	3,85 m
<b>G – Mont-Louis : 2022-08-31 à 2024-05-21 (1,7 ans<sup>#</sup>)</b>			
Plus forte tempête : 3,82 m			
1 an	3,37 m	3,49 m	3,54 m
2 ans	3,56 m	3,78 m	3,87 m
5 ans	3,79 m	4,15 m	4,31 m
10 ans	3,93 m	4,42 m	4,64 m

<sup>#</sup> La durée en années des données utilisées pour l'analyse tient compte des périodes sans enregistrement et des périodes pour lesquelles données de hauteur de vagues  $H_{m0}$  ont été rejetées lors du contrôle de qualité.

## 4.2 Données de courants

Outre les vagues en surface, les instruments utilisés échantillonnent la totalité de la colonne d'eau et permettent ainsi d'obtenir des profils verticaux de courants à haute résolution temporelle, soit un profil toutes les 20 minutes.

Les courants de surface et dans le fond de la colonne d'eau sont illustrés par les roses de courants pour chacun des 5 sites aux Figures 38, 39 et 40. Ces roses de courants représentent les directions de propagation des courants, contrairement aux roses de vagues qui présentent l'origine. Sans surprise, à Saint-Ulric (A), les courants sont parallèles à la côte aussi bien en surface qu'au fond avec une prédominance dans l'intensité et la fréquence des courants vers le nord-est. Les courants de fond observés à Saint-Ulric sont relativement plus élevés par rapport aux autres sites à l'exception de Mont-Louis, ce qui s'explique par le marnage plus important et la présence du courant de Gaspé qui longe la côte entre Rimouski et Rivière-au-Renard.

Au Cap d'Espoir, la distribution est bidirectionnelle et presque symétrique avec une partie des courants entrant dans la baie des Chaleurs au sud-ouest, et une autre en direction de l'est avec une légère rotation entre la surface et le fond. Au fond, le courant est parallèle aux isobathes. À marée montante, un flux d'eau entre dans la baie des Chaleurs et à marée descendante, le flux sortant est dirigé vers le golfe du Saint-Laurent.

Au site de Rivière-Pentecôte (Figure 39), sur la côte Nord, les courants sont également orientés selon le trait de côte aussi bien en surface qu'en profondeur, et le transport net est dirigé vers le sud. L'orientation des courants à ce site est déphasée d'environ 90° avec le sens de propagation des fortes vagues. À Paspébiac, le relèvement de la bathymétrie proche de la côte produit de forts courants à marée montante. À cet endroit, les courants et les vagues sont orientés dans les mêmes directions.

À Mont-Louis, le courant de Gaspé imprime un fort signal vers l'est, tant en surface qu'en profondeur. En profondeur, on observe un très faible courant de flot dirigé vers le nord-ouest. C'est à ce site qu'on observe les courants les plus élevés, atteignant jusqu'à 1,5 m/s vers l'est en surface et 1,0 m/s vers l'est en profondeur.

Le patron directionnel des courants est très conservateur, car lié à la marée et au débit du fleuve St-Laurent pour St-Ulric et Mont-Louis, ainsi aucun changement par rapport aux données des années précédentes, n'est observable quelle que soit la station considérée.

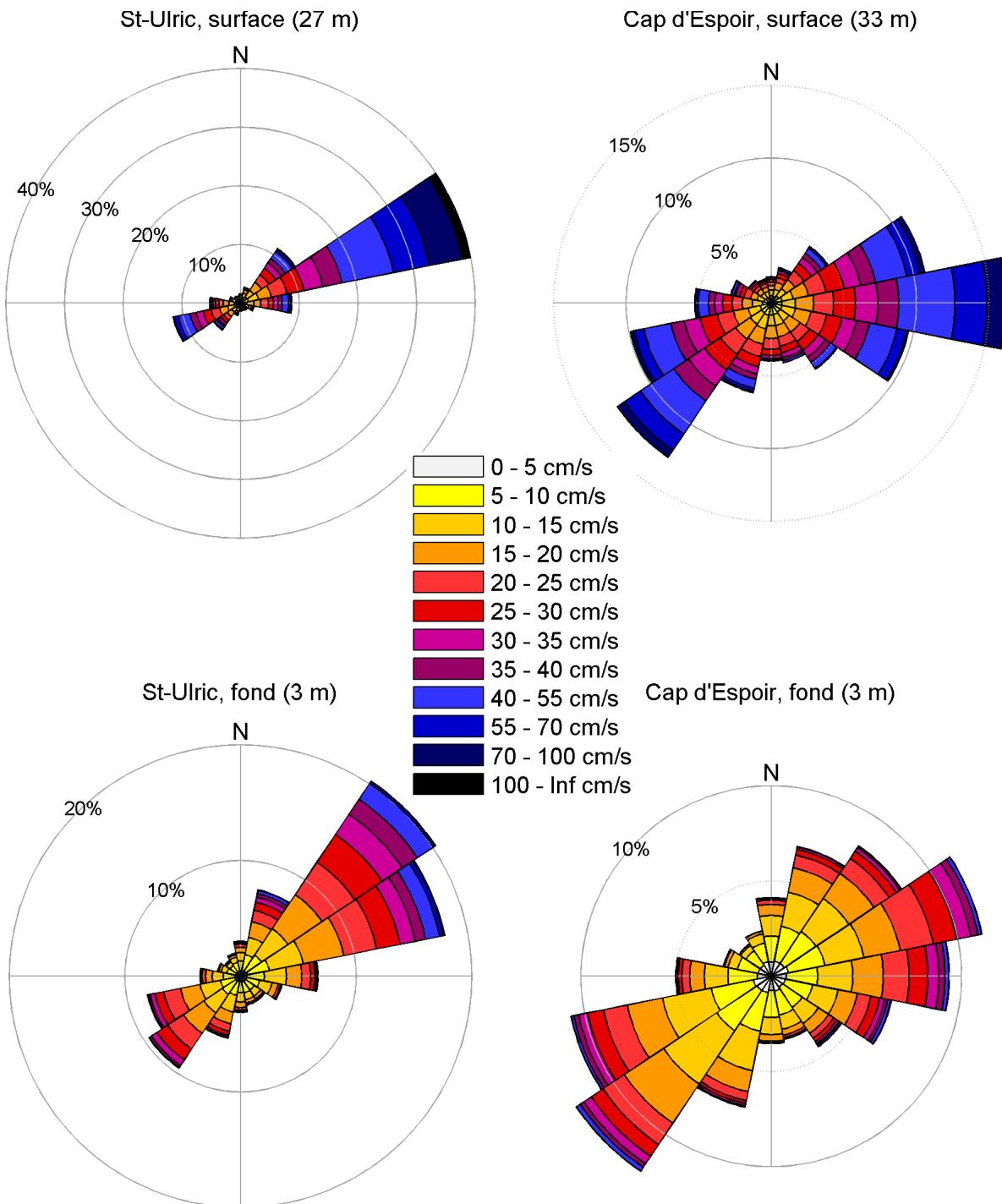
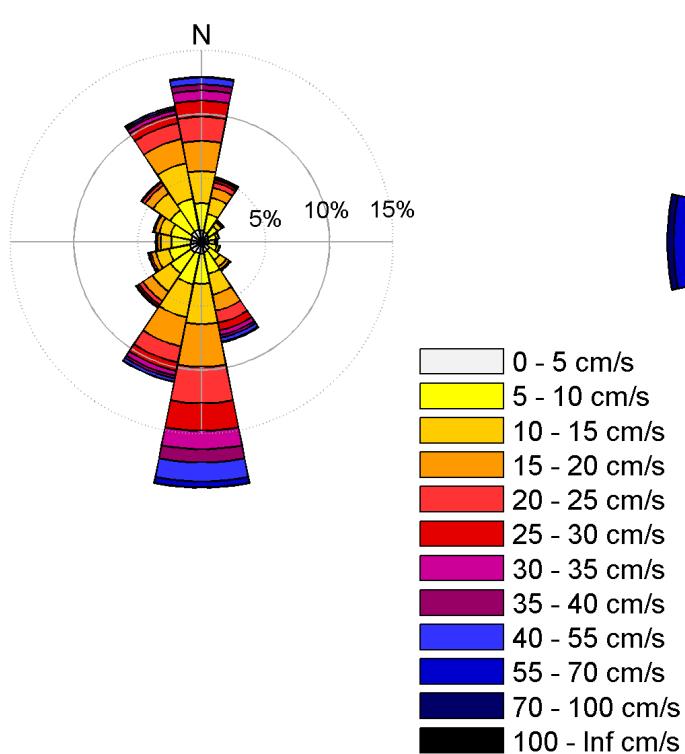
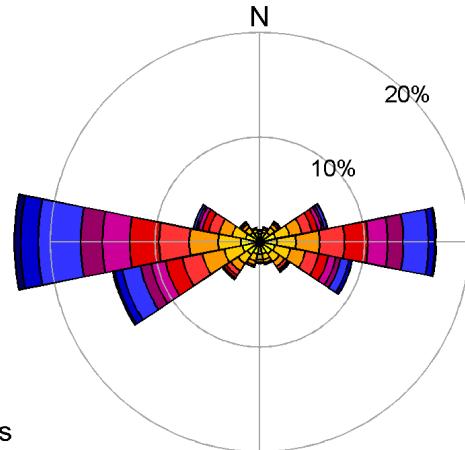


Figure 38 – Roses de courants (destination des courants) enregistrées aux sites A et B sur la période mai 2021 à mai 2024.

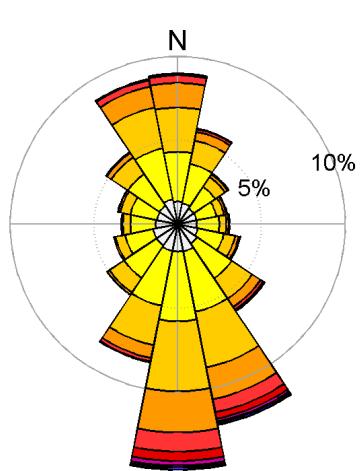
Rivière-Pentecôte, surface (29 m)



Paspébiac, surface (29 m)



Rivière-Pentecôte, fond (3 m)



Paspébiac, fond (3 m)

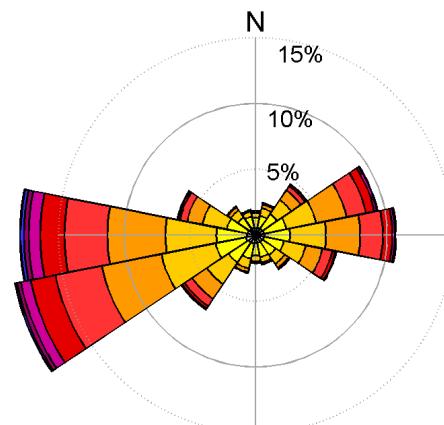


Figure 39 – Roses de courants (destination des courants) enregistrées aux sites E et F sur la période mai 2021 à mai 2024.

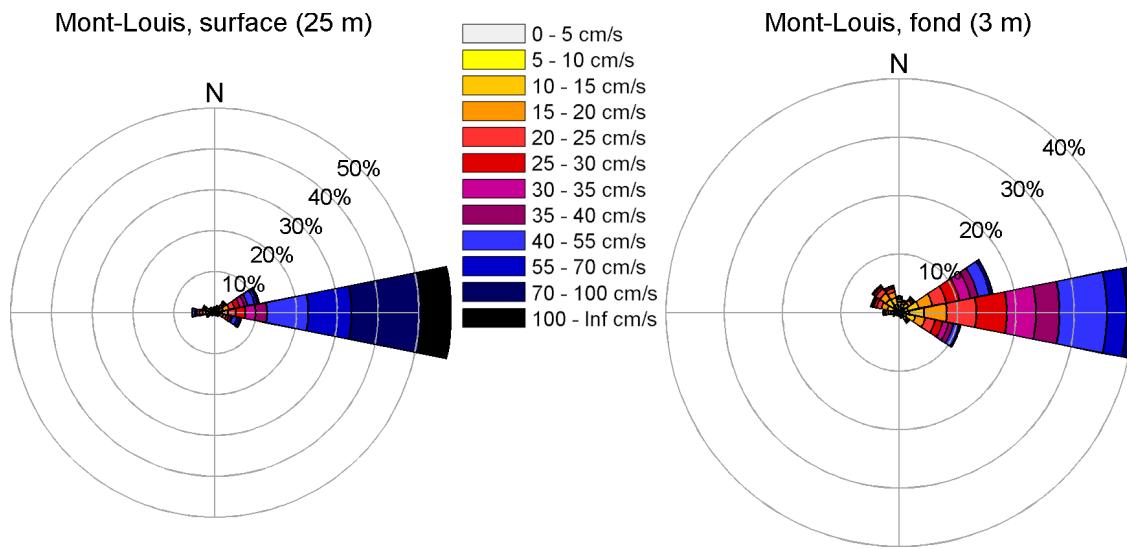


Figure 40 – Rose de courants (destination des courants) au site G de Mont-Louis sur la période septembre 2022 à mai 2024.

### 4.3 Glaces hivernales

L'épaisseur des floes de glace est calculée à partir des deux mesures de distance : (1) la distance entre l'AWAC et la surface de l'eau déterminée par le capteur de pression, (2) la distance entre l'AWAC et la base de la glace mesurée par le signal AST. Deux types d'erreurs sont susceptibles d'affecter le résultat. D'une part, la difficulté d'estimer correctement la densité et la vitesse du son dans la colonne d'eau (cf. section 3.4) peut induire une erreur positive ou négative de 2-5 cm. Cette erreur est négligeable pour les grandes épaisseurs de glace, mais elle est significative lorsque l'épaisseur est seulement de 5-20 cm. D'autre part, le faisceau AST peut être induit en erreur par des objets flottant sous la glace et indiquer à cause de cela une trop grande épaisseur de glace. Le traitement de la glace a été effectué manuellement avec soin pour éviter ce genre de problèmes, mais l'instrument utilise une méthode indirecte de mesure de l'épaisseur de glace et les erreurs ne peuvent pas être totalement exclues. À la vue des résultats obtenus, il semblerait que les épaisseurs de glace estimées par les instruments de l'AWAC pourraient être fortement surévaluées. À ce jour, aucune mesure manuelle d'épaisseur de glace sur le fleuve n'est venue corrélérer les mesures obtenues par l'AWAC. Ces données d'épaisseurs présentées dans ce rapport devraient plus être vues comme un indice de la présence de glace à cet endroit.

Le Tableau 13 résume les conditions de glaces aux cinq sites durant les trois années du projet. Les données calculées, tant par l'équivalence de couverture que par l'épaisseur moyenne, viennent renforcer la tendance observée pour ces trois années d'enregistrement par les Figures 41 à 45.

*Tableau 13 – Statistiques sur les couvertures de glace annuelles à chaque site.*

	Durée de la saison de glace (jours) <sup>a</sup>	Équivalent de couverture continue (jours) <sup>b</sup>	Épaisseur moyenne (m) <sup>c</sup>
<b>A – Saint-Ulric</b>			
2021-2022	59	46,8	1,24
2022-2023	60	28,7	0,60
2023-2024	38	6,2	0,25
<b>B – Cap d'Espoir</b>			
2021-2022	58	31,1	0,34
2022-2023	42	20,1	0,39
2023-2024	7	1,4	0,23
<b>E – Rivière-Pentecôte</b>			
2021-2022	69	27,7	0,18
2022-2023	n.d.	n.d.	n.d.
2023-2024	24	7,9	0,06
<b>F – Paspébiac</b>			
2021-2022	54	32,0	0,23
2022-2023	59	35,0	0,30
2023-2024	23	4,4	0,23
<b>G – Mont-Louis</b>			
2022-2023	48	22,4	0,73
2023-2024	30	4,2	0,29

<sup>a</sup> Nombre de jours entre la première et la dernière glace de l'hiver<sup>b</sup> Somme de la couverture de glace moyenne journalière<sup>c</sup> Épaisseur moyenne de la glace (en considérant seulement les périodes d'observation de la glace)

L'ensemble des données de glace récoltées au cours des trois années du projet sont illustrées par des séries temporelles des épaisseurs maximales et moyennes (Figures 41 à 45). Les séries temporelles recouvrant la période du 1<sup>er</sup> janvier au 1<sup>er</sup> avril sont fractionnées par année afin d'illustrer la variabilité interannuelle de la saison de glace. Chacune des figures illustrent une réduction très nette des conditions de glace en hiver sur les trois années de données présentées, tant par le raccourcissement de la saison que par les épaisseurs moyennes des floes de glace.

À St-Ulric (Figure 41), lors du premier hiver de la période de suivi (2021-2022), les glaces ont été détectées sur site de la mi-janvier à la mi-mars, presque sans interruption. Les deux hivers suivants ont montré des conditions de glace très réduites, tant sur la durée que sur la taille des floes (Tableau 13). Les glaces faisant leur apparition sur site à partir du mois de février 2023 lors du second hiver, avec des périodes libres de glace à la fin février et au début mars. Lors du dernier hiver monitoré, il n'y a quasiment pas eu de glace de manière prolongée.

Au Cap d'Espoir (Figure 42) la saison de glace est très discontinue et la présence de floes de glace semble liée aux conditions de vent. À l'entrée de la baie des Chaleurs, les conditions de glace sont généralement moins importantes que celles observées dans l'estuaire. Le premier hiver, la glace de mer n'apparaît que tardivement sur site vers la fin janvier 2022. Les dernières glaces sont détectées un peu après la mi-mars. Il y a eu moins de glace en février qu'au mois de mars. Lors du second hiver la présence de glace est

plus réduite (Tableau 13), mais semble plus compacte. La saison s'étend du début février 2023 à la mi-mars 2023, sans grande interruption de glace sur site. Comme observé dans l'estuaire à St-Ulric, le dernier hiver 2024 est quasi vierge de toute glace sur site, si ce n'est quelques jours à la fin février 2024 (moins de 2 jours d'équivalence de couverture continue de glace). Malgré ces conditions libres de glace lors de cette dernière saison, il n'y a pas eu de vagues de tempête enregistrées pendant cette période. Seule la tempête du 11 mars 2024 a généré des vagues de plus de 5 m.

À Rivière-Pentecôte (Figure 43), il n'y a pas de données de glace lors de l'hiver 2023 à cause de la tempête du 24 décembre 2022 qui a entraîné l'inclinaison trop prononcée de la tête de l'instrument et son blocage dans cette position jusqu'à la fin du déploiement. Le premier hiver 2022, les glaces sont présentes dès la mi-janvier mais les épaisseurs estimées des floes de glace sont très faibles (Tableau 13). La saison prend fin dès la mi-mars 2022. On observe deux périodes distinctes pendant lesquelles la taille des floes de glace est beaucoup plus conséquente. La dernière saison de glace en 2024 est encore plus réduite telle qu'observé à Cap d'Espoir et St-Ulric. La côte Nord semble moins propice à l'accumulation de floes de glace épais, ce qui peut s'expliquer avec les vents dominants qui déplacent les floes.

Dans la baie des Chaleurs à Paspébiac (Figure 44), le premier hiver 2022, la glace commence à apparaître à la fin janvier et les derniers floes sont détectés jusqu'à la mi-mars. Lors de cette saison il n'y a eu que très peu de période libre de glace. Le deuxième hiver 2023, la saison de glace ne commence qu'au mois de février et ne se termine qu'au début avril. Lors de cette saison il y a eu une longue période libre de glace à la mi-mars. La dernière saison de glace est également très limitée. Des floes de glace ne sont détectés qu'à la fin février et au début du mois de mars 2024. Cette quasi absence de glace dans la baie des Chaleurs est cohérente avec un nombre de tempête plus important au printemps 2024.

À Mont-Louis (Figure 45), il n'y a pour l'instant que des données pour l'hiver 2023 et 2024. Lors du premier hiver monitoré les glaces sont détectées vers le début février 2023, alors que les derniers floes de glace sont observés avant la mi-mars. Comme observé aux autres sites, il n'y a quasiment pas eu de glace lors de l'hiver 2024 (Tableau 13).

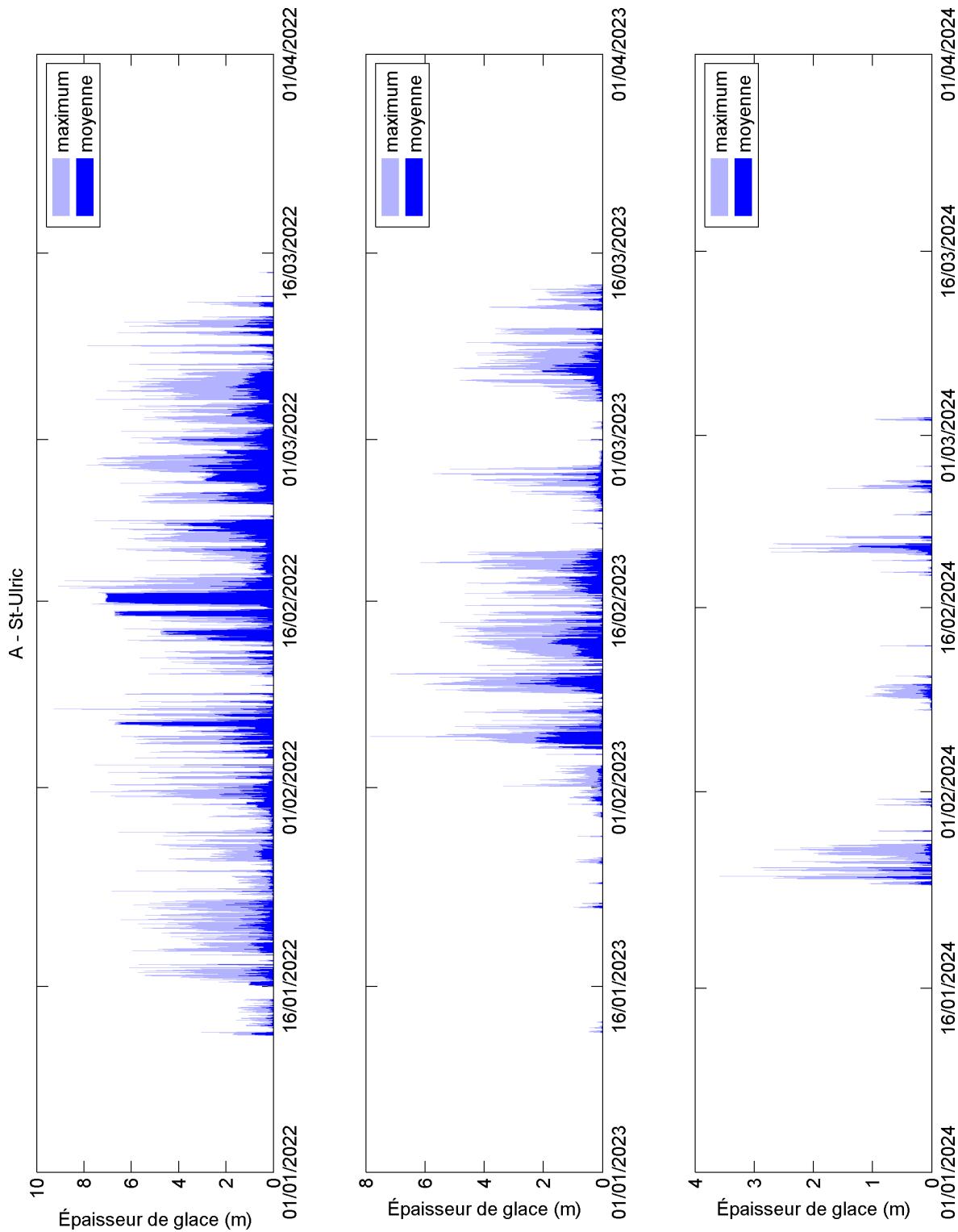


Figure 41 – Épaisseur de glace au site A (Saint-Ulric) durant les trois hivers du projet.

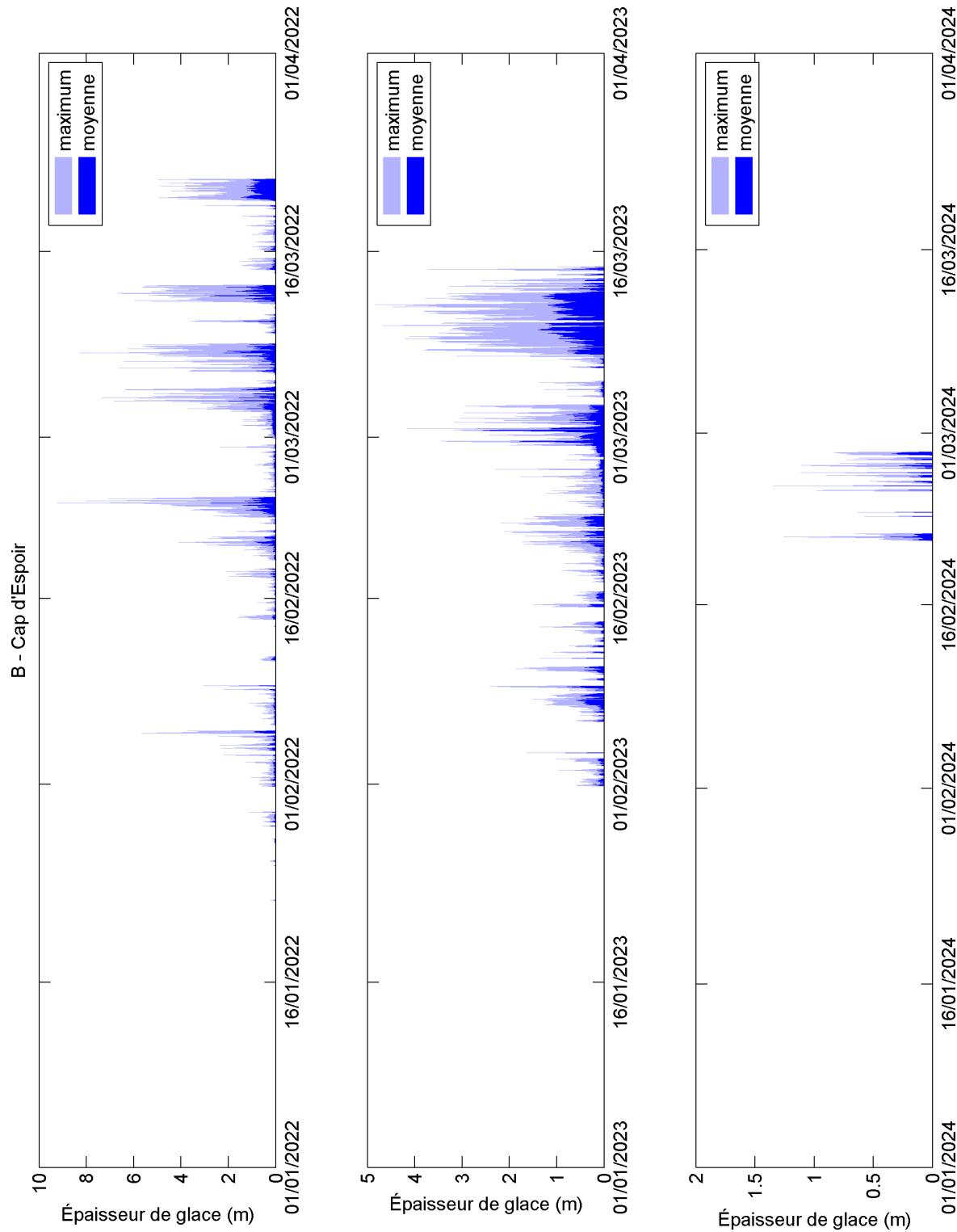


Figure 42 – Épaisseur de glace au site B (Cap d'Espoir) durant les trois hivers du projet.

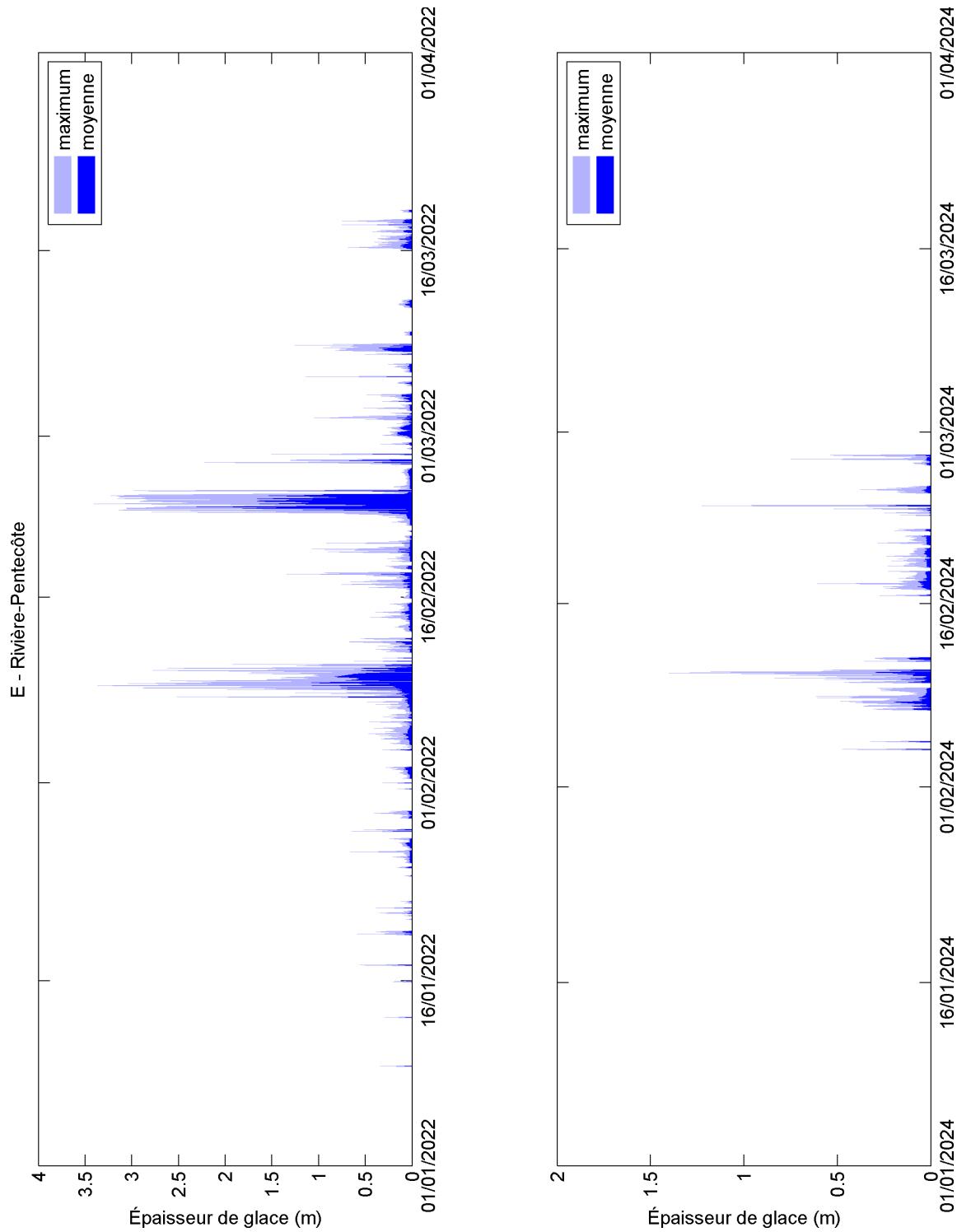


Figure 43 – Épaisseur de glace au site E (Rivière-Pentecôte) durant deux hivers (il n'y a pas de données valides de glace au cours de l'hiver 2022-2023 car l'instrument s'est retourné sur le côté durant une tempête, rendant inutilisable le capteur AST).

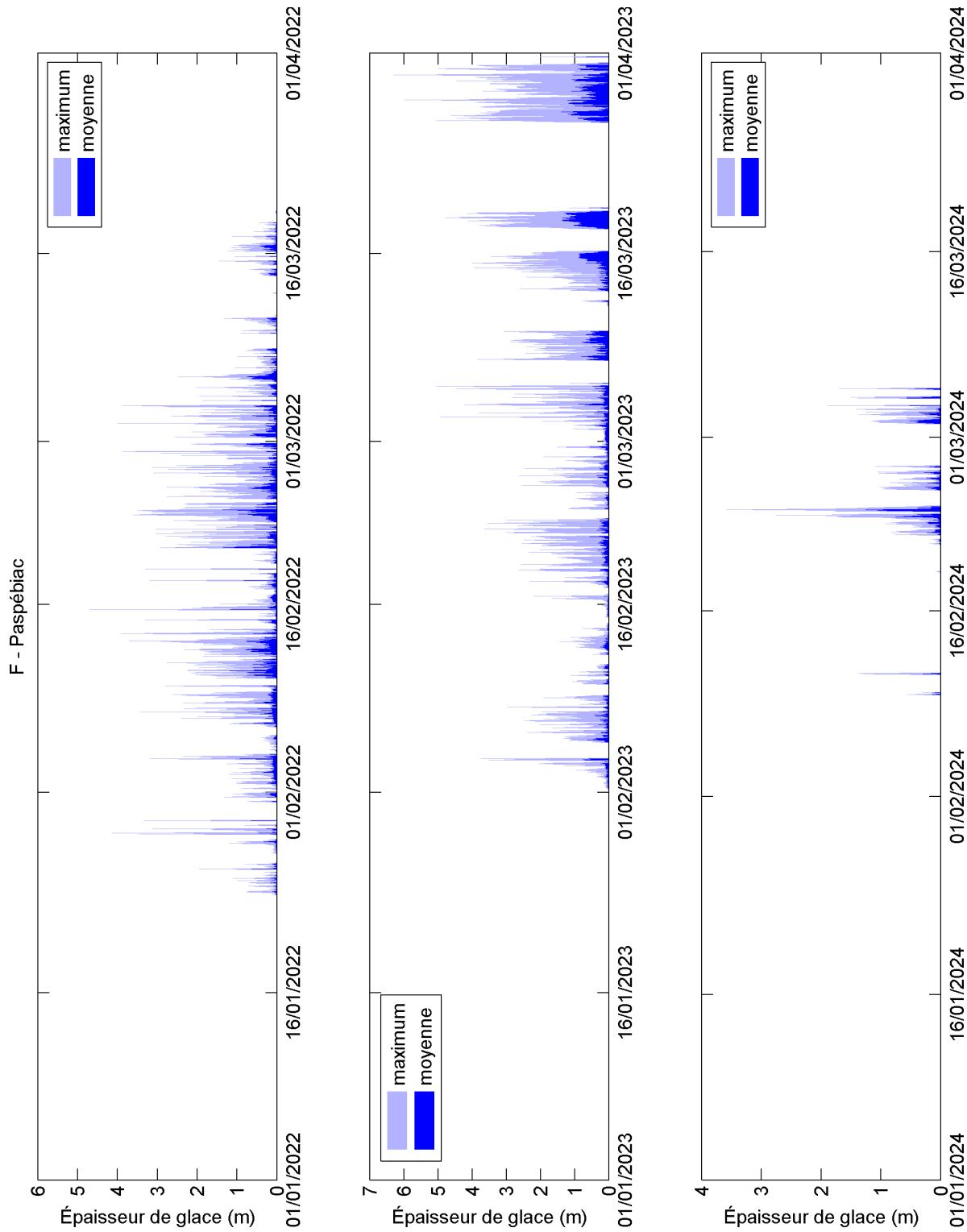


Figure 44 – Épaisseur de glace au site F (Paspébiac) durant les trois hivers du projet.

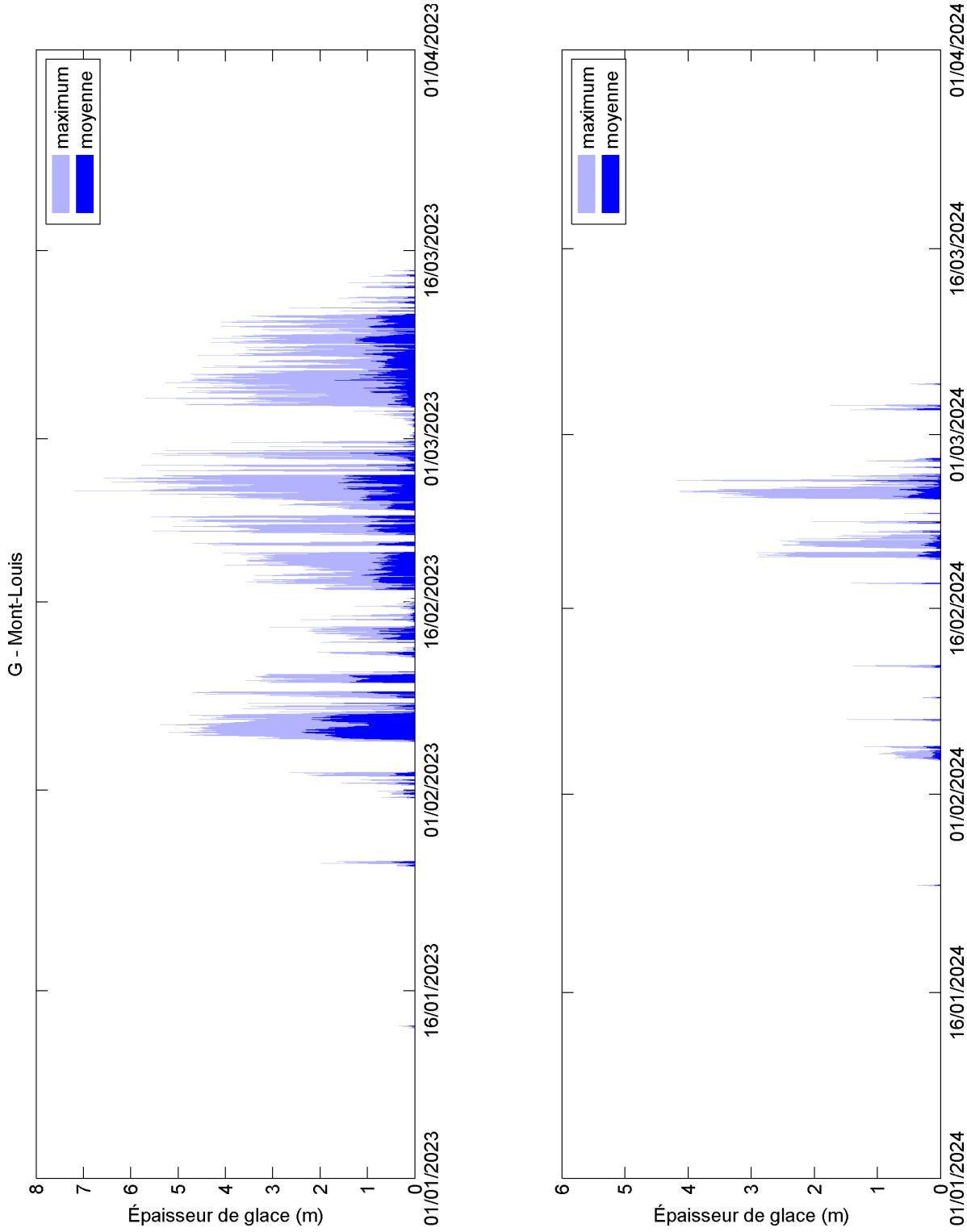


Figure 45 – Épaisseur de glace au site G (Mont-Louis) durant les deux derniers hivers.

## 4.4 Niveaux d'eau des mouillages

Les AWACs mesurent la hauteur de la colonne d'eau de deux manières, avec le capteur de pression et avec le faisceau acoustique AST. La première mesure est utilisée ici pour les niveaux d'eau, car non perturbée par la glace hivernale, les objets flottants et les bulles d'air durant les tempêtes.

Les données ont été traitées de la même manière que pour les marégraphes (cf. section 3.5). Toutefois, le niveau de référence n'était pas CGVD28, car l'altitude exacte des instruments n'est pas connue et elle pouvait varier légèrement d'un déploiement à l'autre au même site, mais le niveau de référence était le niveau marin moyen. À cet effet le niveau d'eau moyen observé durant chaque déploiement (calculé sur les cycles tidaux complets à partir du premier niveau de mi-marée du déploiement) a été soustrait aux données de ce déploiement.

La gravité aux sites A, B, E, F et G est respectivement  $9,8092 \text{ m.s}^{-2}$ ,  $9,8108 \text{ m.s}^{-2}$ ,  $9,8101 \text{ m.s}^{-2}$ ,  $9,8087 \text{ m.s}^{-2}$  et  $9,8099 \text{ m.s}^{-2}$  selon la base de données de la Commission géologique du Canada. La salinité a été mesurée ponctuellement avec des profils CTD lors de certaines missions, mais elle est variable dans le temps, et elle n'a pas été mesurée en continu. C'est pourquoi une salinité constante est supposée à chaque site, choisie comme la moyenne des salinités mesurée par les profils CTD, soit 28,5 à Saint-Ulric, 30,5 au Cap d'Espoir, 30,9 à Rivière-Pentecôte, 33 à Paspébiac et 29,5 à Mont-Louis. La masse volumique a été calculée avec la température mesurée par l'AWAC près du fond. Pour chaque site, une pression constante correspondant à la moitié de la profondeur moyenne a été utilisée.

Les prédictions de marées ont été calculées comme pour le marégraphe avec la boîte à outils T\_TIDE (cf. section 3.5). Les surcotes et les décotes sont finalement calculées comme la différence entre les niveaux observés et les niveaux d'eau prédits par T\_TIDE.

Il faut être conscient que ces mesures de niveau d'eau avec les AWACs ne sont pas aussi précises que celles d'un marégraphe installé dans un port pour les raisons suivantes.

- 1) La position verticale absolue par rapport à un datum vertical n'est pas connue avec précision. Il est seulement possible d'estimer le niveau marin moyen à partir de la moyenne des observations. Toutefois, il existe des variations saisonnières et interannuelles du niveau marin moyen qui peuvent atteindre plusieurs centimètres.
- 2) Le niveau d'eau est calculé à partir des pressions mesurées. Pour la conversion la masse volumique de la colonne d'eau est nécessaire, or cette masse volumique varie selon la température qui a seulement été mesurée près du fond, et surtout selon la salinité qui n'a pas été mesurée en continu. À une température de 5 °C et une salinité de 30, une variation de salinité d'une unité psu produit une variation de masse volumique de ~0,08 %, et une variation de température de 1 °C produit une variation de masse volumique de ~0,01 %. À une profondeur de 37 m, cela correspond à une variation de respectivement 0,028 et 0,004 m. C'est pourquoi il faut considérer un intervalle de confiance d'environ ±5 cm pour les niveaux d'eau mesurés et les surcotes calculées.

Les Figures 46 à 50 présentent les variations du niveau d'eau au site de St-Ulric, Cap d'Espoir, Rivière-Pentecôte, Paspébiac durant 3 ans, et 21 mois à Mont-Louis, associé

avec leur écart (surcote et décote) par rapport aux prédictions astronomiques. Les niveaux d'eau varient essentiellement selon le signal de la marée semi-diurne à chaque site, mais à cause de la résolution des figures, seule l'alternance des périodes de morte-eau et de vive-eau est visible. Les écarts observés (surcote et décote) surviennent la plupart du temps en automne et en hiver. La plupart du temps, les surcotes sont dues aux événements météorologiques mais les écarts par rapport aux prédictions astronomiques peuvent également s'expliquer par une cyclicité saisonnière liée au débit du fleuve Saint-Laurent et au niveau marin du nord-ouest de l'Atlantique, ou encore par un déphasage temporaire de l'onde de marée. Les fortes surcotes ne produisent des niveaux marins exceptionnels seulement si elles sont combinées avec des marées hautes, de préférence des marées hautes de vive-eau. Par ailleurs, des variations dans l'amplitude de l'onde marée peuvent s'expliquer, lorsqu'elles interviennent durant l'hiver, par la friction avec la banquise (St-Laurent et al., 2008), créant ainsi des surcotes et décotes.

Le Tableau 14 répertorie la date et l'heure des plus fortes surcotes observées à chaque site, quel que soit le moment de la marée. Ce tableau couvre toutes les données disponibles aux quatre sites, à savoir 14 ans au site A et B; 9 ans aux sites E et F; et seulement 21 mois au site G. Les événements survenus durant le présent projet sont marqués en gras dans ces tableaux.

Pendant le présent projet, il y a eu des surcotes importantes et des niveaux marins plus hauts que la normale, mais il n'y a pas eu d'événements exceptionnels. Aucun record de surcote n'a été battu lors de cette période malgré la tempête exceptionnelle du 23-24 décembre 2022. Cette tempête a généré une surcote de plus d'un mètre (1,11 m) mais se classe au 2<sup>e</sup> rang à St-Ulric. À Cap d'Espoir, il s'agit de la tempête du 24 septembre 2024 qui a généré la plus forte surcote de près d'un mètre (0,97 m). À Rivière-Pentecôte ce sont les deux tempêtes de la mi-janvier 2024 qui ont généré les surcotes les plus élevées du projet (0,92 et 0,91 m). Mais ces surcotes d'un peu moins d'un mètre n'ont pas surpassé les précédents niveaux. À Paspébiac, les tempêtes du 24 septembre 2024 et 24 décembre 2024 ont généré les surcotes les plus élevées du projet (0,96 et 0,91 m), mais ici également, ces niveaux ne surpassent pas le record enregistré au début janvier 2018. À Mont-Louis la surcote la plus élevée (0,87 m) a été obtenue lors de la tempête du 24 décembre 2022 malgré des vagues peu élevées à la même date.

Les mesures de niveau d'eau des AWACs peuvent compléter les mesures des marégraphes installés dans des ports en étendant la couverture géographique. Toutefois, à cause l'intervalle de confiance nettement plus grand (cf. ci-dessus), les AWACs ne peuvent remplacer de tels marégraphes pour des mesures de grande précision.

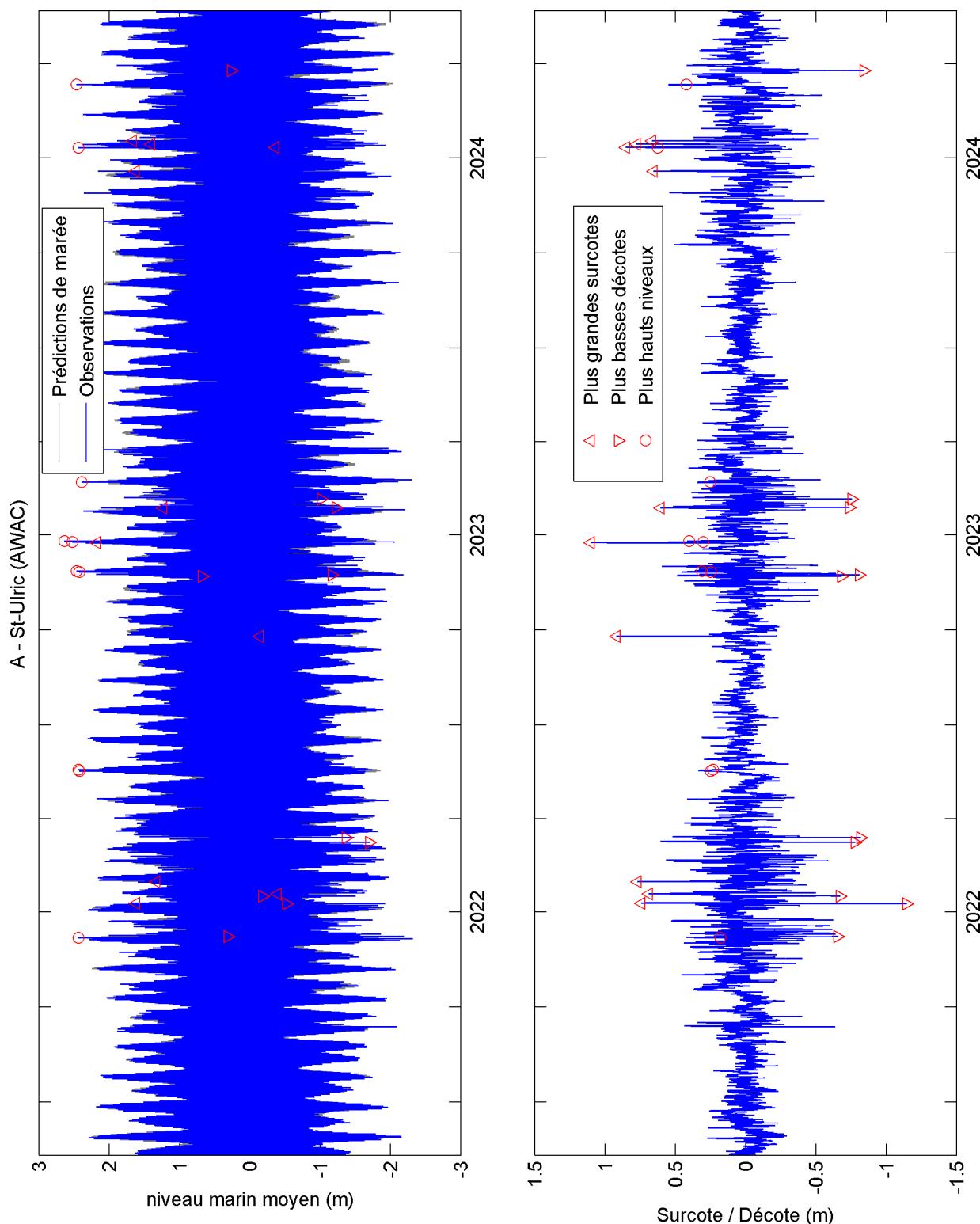


Figure 46 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site A (Saint-Ulric) durant les 3 ans du projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins ( $\circ$ ), et les dix plus fortes surcotes ( $\Delta$ ) et décotes ( $\nabla$ ).

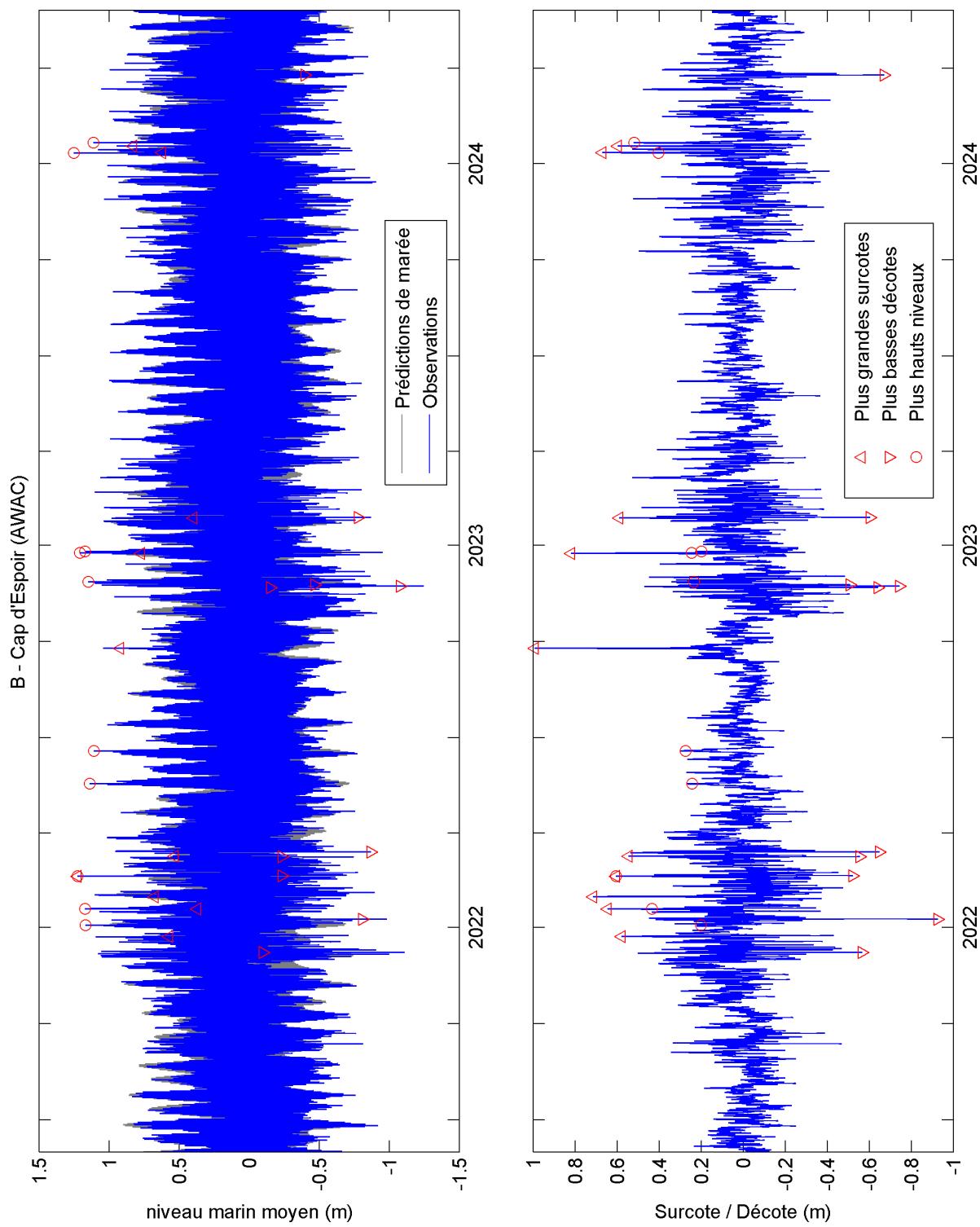


Figure 47 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site B (Cap d'Espoir) durant les 3 ans du projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (○), et les dix plus fortes surcotes (△) et décotes (▽).

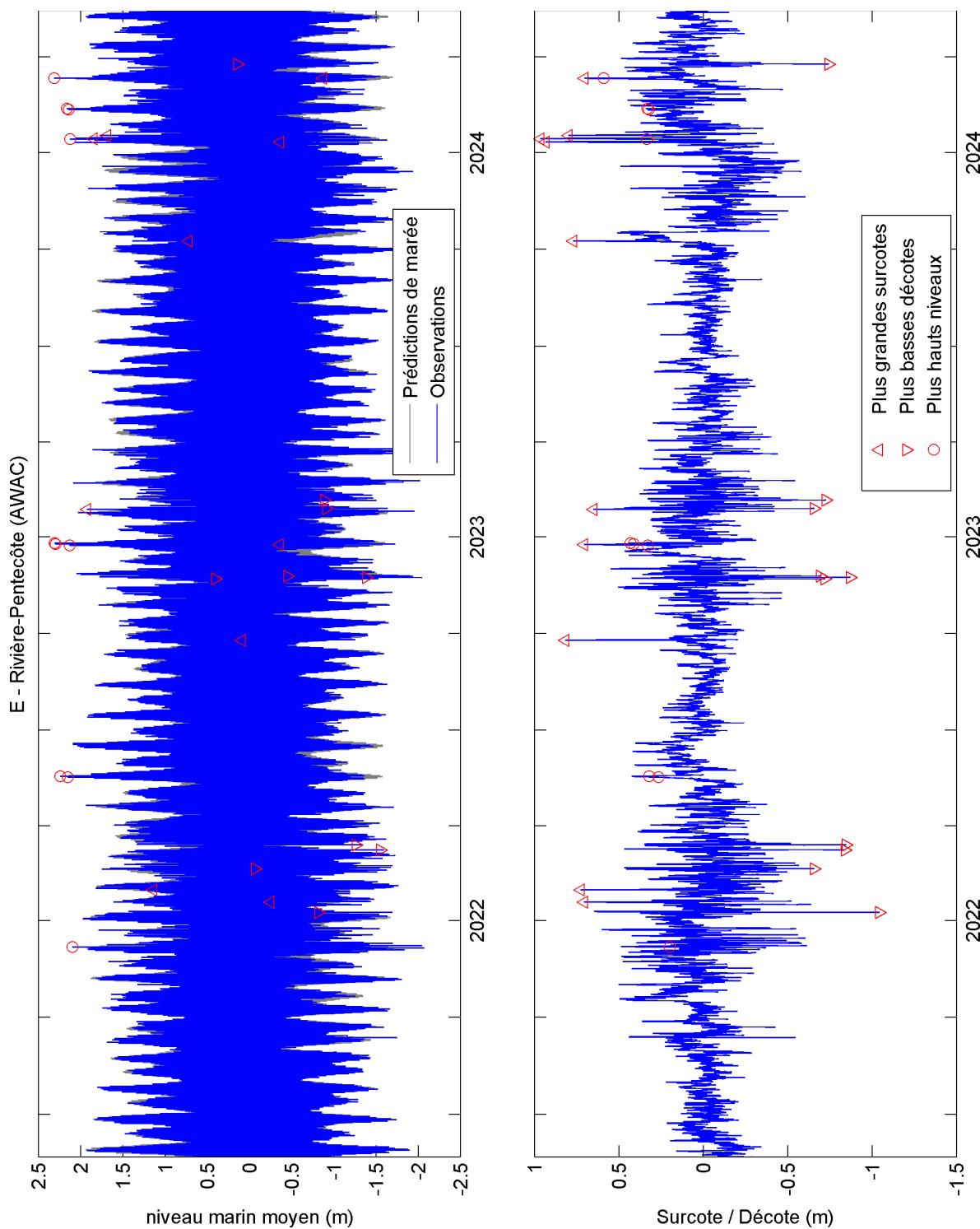


Figure 48 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site E (Rivière-Pentecôte) durant les 3 ans du projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (○), et les dix plus fortes surcotes (△) et décotes (▽).

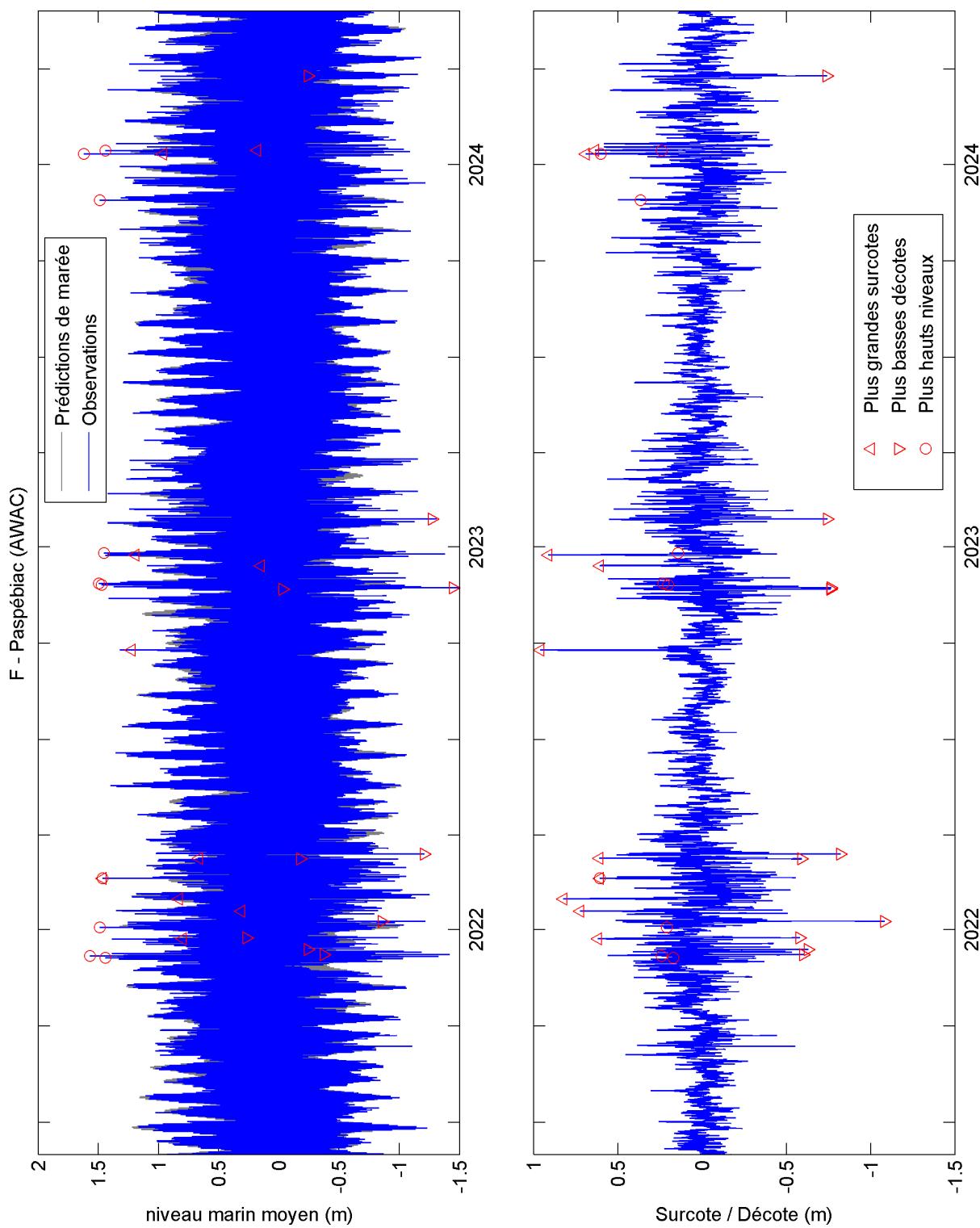


Figure 49 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site F (Paspébiac) durant les 3 ans du projet. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins (○), et les dix plus fortes surcotes (△) et décotes (▽).

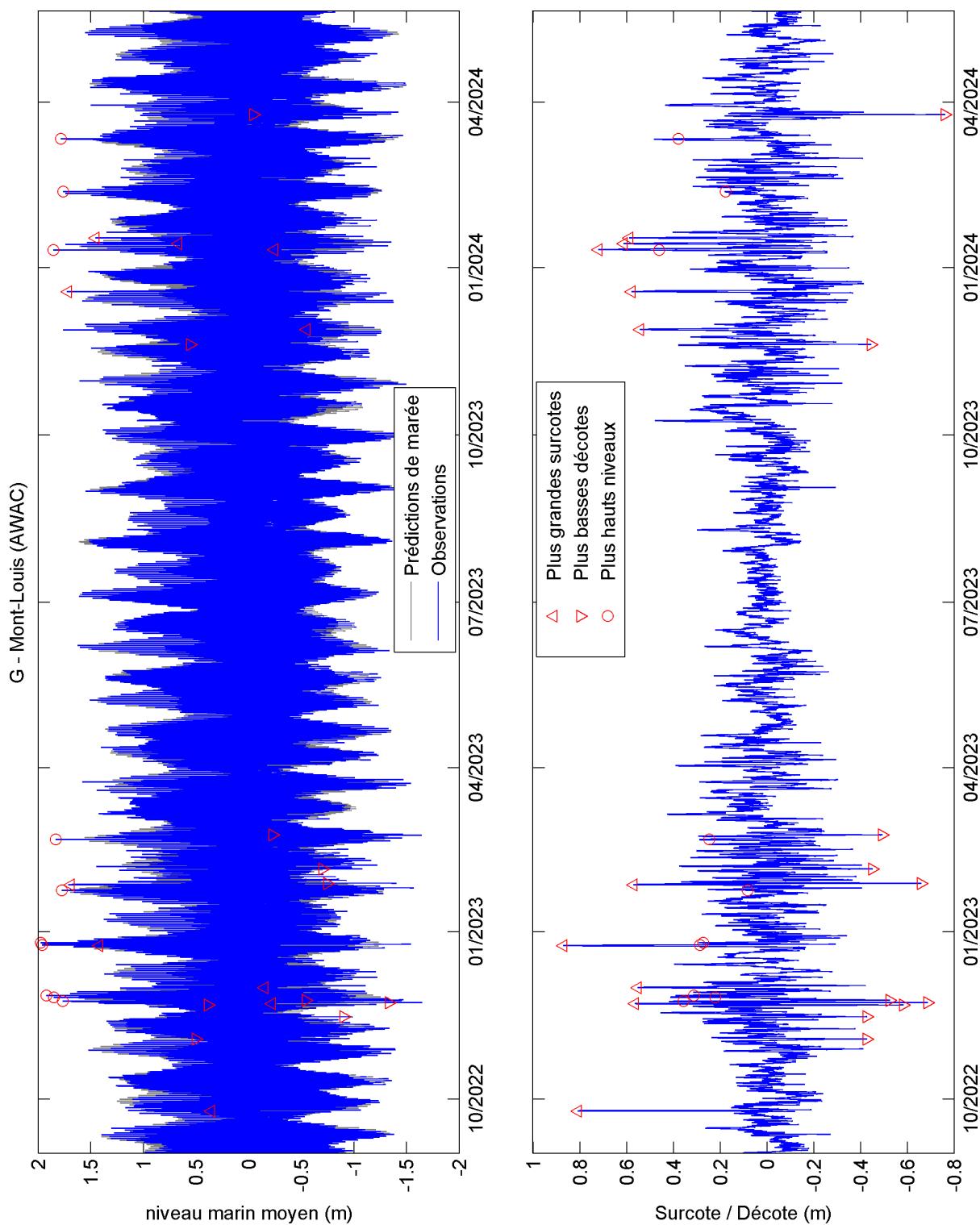


Figure 50 – Niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) et surcote/décote au site G (Mont-Louis) au cours des deux dernières années. Des symboles indiquent les dix plus hauts niveaux marins ( $\circ$ ), et les dix plus fortes surcotes ( $\triangle$ ) et décotes ( $\nabla$ ).

*Tableau 14 – Liste des 10 plus fortes surcotes observées aux sites A, B, E, F et des 5 plus fortes surcotes au site G, par rapport aux prédictions de marée, associé au niveau d'eau (par rapport au niveau d'eau moyen observé) à ce moment-là. Les événements survenus durant le présent projet sont marqués en gras.*

<b>Saint-Ulric - Surcotes</b>			<b>Cap d'Espoir - Surcotes</b>		
<b>Date-heure (HNE)</b>	<b>Niveau marin (m)</b>	<b>Surcote (m)</b>	<b>Date-heure (HNE)</b>	<b>Niveau marin (m)</b>	<b>Surcote (m)</b>
2016-12-30 12:00	1.82	1.29	2018-01-05 05:40	1.21	1.03
<b>2022-12-24 02:20</b>	<b>2.18</b>	<b>1.11</b>	<b>2022-09-24 10:20</b>	<b>0.92</b>	<b>0.97</b>
2018-01-05 02:00	1.36	1.02	2014-02-14 15:20	1.37	0.85
<b>2022-09-24 08:00</b>	<b>-0.15</b>	<b>0.94</b>	<b>2022-12-24 01:40</b>	<b>0.77</b>	<b>0.83</b>
2010-12-06 13:20	2.75	0.91	2016-12-30 13:20	1.51	0.82
2015-02-15 23:00	1.53	0.89	2014-03-27 00:00	0.79	0.78
2019-02-25 11:00	-0.01	0.86	2019-02-25 13:20	0.42	0.76
2014-02-14 14:00	2.40	0.86	2012-02-25 12:00	0.53	0.76
2024-01-10 18:40	-0.37	0.83	2016-12-16 03:20	0.87	0.73
2014-01-27 17:40	-0.29	0.81	2010-12-27 18:20	1.13	0.72

<b>Rivière-Pentecôte - Surcotes</b>			<b>Paspébiac - Surcotes</b>		
<b>Date-heure (HNE)</b>	<b>Niveau marin (m)</b>	<b>Surcote (m)</b>	<b>Date-heure (HNE)</b>	<b>Niveau marin (m)</b>	<b>Surcote (m)</b>
2016-12-30 11:00	1.46	1.28	2018-01-05 06:40	1.30	1.09
2018-01-05 02:00	1.64	1.22	2016-12-30 08:00	0.47	0.96
2015-02-15 23:00	1.66	1.11	<b>2022-09-24 12:00</b>	<b>1.23</b>	<b>0.96</b>
<b>2024-01-14 03:20</b>	<b>1.85</b>	<b>0.92</b>	<b>2022-12-24 02:40</b>	<b>1.19</b>	<b>0.91</b>
<b>2024-01-10 19:40</b>	<b>-0.37</b>	<b>0.91</b>	2019-09-07 23:20	1.29	0.84
<b>2022-09-24 08:20</b>	<b>0.09</b>	<b>0.87</b>	2021-02-03 07:00	1.44	0.82
2019-10-17 22:20	-0.41	0.86	<b>2022-01-29 23:00</b>	<b>0.83</b>	<b>0.82</b>
2015-03-04 07:40	-0.04	0.86	2020-02-28 04:00	1.28	0.79
2019-02-25 10:00	0.53	0.86	2016-01-13 14:00	1.21	0.78
2019-01-10 01:00	0.54	0.84	2016-12-16 03:00	1.16	0.77

<b>Mont-Louis - Surcotes</b>		
<b>Date-heure (HNE)</b>	<b>Niveau marin (m)</b>	<b>Surcote (m)</b>
2022-12-24 03:00	1.42	0.87
2022-09-24 09:00	0.36	0.81
2024-01-10 20:20	-0.24	0.72
2024-01-14 01:20	0.67	0.61
2024-01-17 06:00	1.45	0.59

#### 4.5 Niveau d'eau des marégraphes

Les niveaux d'eau ont été mesurés au quai de Paspébiac et de Mont-Louis du 31 mars 2021 au 16 avril 2024; au quai de Carleton et de Ste-Thérèse-de-Gaspé du 12 août 2022 au 16 avril 2024; au quai de Baie-Trinité du 23 novembre 2022 au 9 avril 2024; et au quai

de Gaspé du 7 juin 2023 au 26 mai 2024. Les Figures 51 à 56 présentent les données mesurées pour le présent projet, à savoir le niveau d'eau et ainsi que les surcotes et décotes pour chaque station.

Les séries temporelles de niveau d'eau correspondent bien aux marées semi-diurnes pour chaque station, avec un cycle morte-eau à vive-eau bien marqué (Figures 51 à 56).

### **Surcotes et niveaux maximaux**

Les prédictions de marée peuvent montrer de légères variations de l'ordre quelques centimètres selon la durée du signal du niveau d'eau utilisé pour le calcul des harmoniques de marées. Par conséquent l'intensité des surcotes peut varier si les analyses harmoniques sont réalisées sur un déploiement de six mois ou trois années au complet par exemple.

Les plus fortes surcotes, les plus fortes décotes et les plus hauts niveaux absolu sont listés dans les Tableau 15 à 20 et illustrés également sur les Figures 51 à 56.

À Carleton-sur-Mer, sur la période de données disponibles, le plus haut niveau absolu (2,11 m CGVD28) a été mesuré lors de la tempête du 10 janvier 2024 à 18:10 (UTC), alors que la plus forte surcote est survenue le 24 décembre 2022 à 05:15 (UTC) avec un niveau **1,17 m** plus haut que la prédition astronomique. La deuxième surcote la plus élevée est intervenue lors de la tempête du 24 septembre 2022 à 17:20 (UTC) avec un niveau d'eau **0,94 m** plus haut que la prédition.

À Paspébiac, le plus haut niveau absolu (1,88 m CGVD28) a été mesuré lors de la même tempête du 10 janvier 2024 à 19:20 (UTC), alors que la plus forte surcote est survenue également au cours de la tempête du 24 décembre 2022 à 07:15 (UTC) avec un niveau **0,99 m** plus élevé que la prédition astronomique. Cette plus haute surcote est survenue à marée haute. La deuxième surcote la plus importante est survenue, tout comme à Carleton, lors de la tempête du 24 septembre 2022 à 18:10 (UTC) avec un niveau d'eau **0,96 m** plus haut que la prédition.

À Ste-Thérèse-de-Gaspé, le plus haut niveau absolu (1,50 m CGVD28) a été mesuré le 10 janvier 2024 à 20:10 (UTC), alors que la plus forte surcote (**+1,19 m**) est également survenue lors de la même tempête du 24 décembre 2022 à 08:45 (UTC). La deuxième surcote la plus élevée est intervenue, comme les deux précédents sites de la baie des Chaleurs, lors de la tempête du 24 septembre 2022 à 14:50 (UTC) avec un niveau d'eau **0,91 m** plus haut que la prédition.

À Gaspé, le plus haut niveau absolu (1,54 m CGVD28) a été aussi mesuré lors de la tempête du 10 janvier 2024 à 17:50 (UTC), alors que la plus forte surcote est survenue quelques jours plus tard lors de la seconde tempête successive le 14 janvier 2024 à 07:45 (UTC) avec un niveau **0,69 m** plus élevé que la prédition astronomique. La deuxième surcote la plus élevée est survenue le 11 janvier 2024 à 05:40 (UTC) avec un niveau d'eau **0,66 m** plus haut que la prédition. Pour ce site, le marégraphe n'était pas encore en place lors des tempêtes de septembre et décembre 2022, il est fort probable que les surcotes, si elles avaient pu être mesurées, auraient été plus élevées encore lors de ces deux événements que celles mesurées en janvier 2024.

À Mont-Louis, le plus haut niveau absolu mesuré (2,01 m CGVD28) est intervenu lors de trois événements, le 26 novembre, le 24 décembre ainsi que le 25 décembre 2022. La plus forte surcote (**+0,87 m**) est survenue lors de la tempête du 24 décembre 2022 (08:35 UTC) à marée descendante. À noter que lors du plus haut niveau de 2,01 m mesuré le 24 décembre, la surcote n'était que de +24 cm par rapport à la prédition astronomique. La deuxième surcote la plus haute (**+0,82 m**) est survenue lors de la tempête du 24 septembre 2022 à 13:55 (UTC).

À Baie-Trinité, les plus hauts niveaux absous (2,43 m et 2,42 m CGVD28) ont été mesurés le 25 et 24 décembre 2022 lors de la tempête exceptionnelle, date à laquelle la surcote mesurée avec un niveau **1,29 m** plus élevé que la prédition astronomique, était la plus importante de la série temporelle. La deuxième surcote la plus importante est survenue lors de la tempête du 10 janvier 2024 à 23:50 (UTC) avec un niveau **0,98 m** plus haut que la prédition. À note que le marégraphe n'était pas encore en place lors de la tempête du 24 septembre 2022. Il est également fort probable que la surcote pendant cet événement, si elle avait pu être mesurée, aurait été très élevée.

De ces résultats obtenus à différents points géographiques de l'estuaire, du golfe du St-Laurent et de la baie des Chaleurs, ressortent quatre événements de tempête exceptionnels du fait de leur concomitance spatiale : La tempête du 24 septembre 2022, celle du 23-24-25 décembre 2022, puis en 2024, les deux tempêtes successives du 10 et du 14 janvier. Ces événements sont illustrés en détails dans la section suivante par la comparaison entre les mesures de niveau d'eau par les mouillages au large et celles obtenues dans les ports et les marinas par les marégraphes.

*Tableau 15 – Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrées à Carleton entre 12 août 2022 et 16 avril 2024.*

	Rang	Date (UTC)	Niveau d'eau CGVD28 (m)	Surcote/Décote (m)
<b>Les plus hauts niveaux</b>	1	2024-01-10 18:10	2.11	0.72
	2	2024-01-13 21:00	2.04	0.48
	3	2023-11-27 18:55	1.97	0.50
	4	2022-12-23 19:05	1.96	0.35
	5	2022-12-25 21:05	1.89	0.22
	6	2022-11-25 20:15	1.87	0.26
	7	2024-03-11 20:05	1.86	0.51
	8	2023-01-23 20:40	1.84	0.18
	9	2022-11-26 20:45	1.84	0.24
	10	2023-02-20 19:45	1.77	0.22
<b>Les plus fortes surcotes</b>	1	2022-12-24 05:15	1.06	1.17
	2	2022-09-24 17:20	1.48	0.94
	3	2024-01-10 21:00	1.59	0.83
	4	2023-10-08 18:05	0.68	0.78
	5	2024-01-14 05:00	0.00	0.74
	6	2022-12-14 06:35	0.34	0.69
	7	2024-01-17 07:45	0.28	0.69
	8	2023-10-22 18:20	0.39	0.66
	9	2024-03-11 08:00	1.73	0.64
	10	2022-12-01 07:20	0.08	0.63
<b>Les plus fortes décotes</b>	1	2023-01-27 17:40	-1.55	-0.95
	2	2023-02-04 14:20	-1.07	-0.95
	3	2022-11-21 17:05	0.14	-0.87
	4	2024-03-25 07:10	0.01	-0.81
	5	2022-11-23 00:45	-1.60	-0.76
	6	2024-01-19 08:10	-1.08	-0.68
	7	2022-12-02 07:30	-1.06	-0.67
	8	2022-11-08 15:15	-0.67	-0.64
	9	2022-11-24 07:45	0.01	-0.63
	10	2024-03-01 09:40	0.15	-0.63

*Tableau 16 – Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrées à Paspébiac entre le 1er avril 2021 et le 16 avril 2024.*

	Rang	Date (UTC)	Niveau d'eau CGVD28 (m)	Surcote/Décote (m)
<b>Les plus hauts niveaux</b>	1	2024-01-10 19:20	1.88	0.66
	2	2023-11-27 18:30	1.76	0.45
	3	2022-11-26 21:00	1.74	0.27
	4	2022-11-25 19:50	1.71	0.24
	5	2021-12-06 20:45	1.70	0.17
	6	2022-11-12 21:45	1.69	0.57
	7	2022-12-25 20:35	1.67	0.17
	8	2024-03-11 20:15	1.65	0.50
	9	2022-01-02 18:40	1.65	0.17
	10	2024-01-13 21:10	1.64	0.26
<b>Les plus fortes surcotes</b>	1	2022-12-24 07:15	1.45	0.99
	2	2022-09-24 18:10	1.57	0.96
	3	2022-01-30 05:15	1.12	0.81
	4	2024-01-10 21:20	1.35	0.73
	5	2022-01-18 11:35	0.51	0.70
	6	2024-01-14 06:00	0.45	0.68
	7	2022-12-14 05:05	0.40	0.63
	8	2024-01-17 08:50	0.74	0.63
	9	2023-10-22 17:50	0.49	0.61
	10	2024-03-11 17:05	0.80	0.60
<b>Les plus fortes décotes</b>	1	2022-01-08 20:50	-0.71	-1.10
	2	2022-03-13 23:35	-1.02	-0.84
	3	2022-11-23 01:45	-1.19	-0.77
	4	2022-11-21 16:30	0.17	-0.75
	5	2023-01-27 16:40	-1.03	-0.73
	6	2024-03-25 07:00	-0.01	-0.72
	7	2021-12-08 00:50	-0.16	-0.69
	8	2021-12-13 02:05	-0.09	-0.69
	9	2022-03-09 09:20	-0.02	-0.62
	10	2021-12-23 22:20	0.42	-0.62

*Tableau 17 – Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrées à Ste-Thérèse-de-Gaspé entre le 12 août 2022 et le 15 avril 2024.*

	Rang	Date (UTC)	Niveau d'eau CGVD28 (m)	Surcote/Décote (m)
<b>Les plus hauts niveaux</b>	1	2024-01-10 20:10	1.50	0.77
	2	2022-11-26 21:05	1.36	0.26
	3	2022-12-24 18:20	1.33	0.29
	4	2022-11-25 20:20	1.31	0.23
	5	2023-11-27 20:00	1.31	0.43
	6	2022-12-24 08:45	1.29	1.19
	7	2024-01-20 14:00	1.26	0.56
	8	2022-11-23 17:50	1.26	0.31
	9	2022-12-25 20:15	1.25	0.12
	10	2024-01-13 20:25	1.25	0.20
<b>Les plus fortes surcotes</b>	1	2022-12-24 08:45	1.29	1.19
	2	2022-09-24 14:50	0.91	0.91
	3	2024-01-10 22:20	0.95	0.83
	4	2024-01-14 05:35	0.51	0.76
	5	2023-11-28 02:05	0.12	0.66
	6	2022-12-01 09:10	0.48	0.65
	7	2024-01-17 09:50	0.96	0.63
	8	2023-01-26 19:15	0.75	0.62
	9	2024-03-11 17:10	0.82	0.57
	10	2024-01-20 13:50	1.26	0.56
<b>Les plus fortes décotes</b>	1	2022-11-23 02:40	-0.93	-0.73
	2	2024-03-25 06:30	-0.24	-0.66
	3	2022-11-21 15:15	-0.11	-0.65
	4	2023-01-27 15:30	-0.71	-0.64
	5	2022-11-24 07:00	-0.29	-0.50
	6	2022-12-02 08:45	-0.72	-0.50
	7	2023-02-04 12:00	-0.69	-0.47
	8	2022-11-15 05:35	-0.61	-0.46
	9	2023-02-23 07:50	-0.03	-0.44
	10	2024-03-26 16:00	-0.58	-0.43

*Tableau 18 – Listes des 5 plus hauts niveaux d'eau, des 5 plus fortes surcotes et des 5 plus fortes décotes enregistrées à Gaspé entre le 7 juin 2023 et le 26 mai 2024.*

	Rang	Date (UTC)	Niveau d'eau CGVD28 (m)	Surcote/Décote (m)
<b>Les plus hauts niveaux</b>	1	2024-01-10 17:50	1.54	0.45
	2	2023-11-27 19:40	1.43	0.42
	3	2024-01-13 20:45	1.40	0.25
	4	2023-10-30 19:10	1.36	0.28
	5	2023-12-18 23:10	1.35	0.44
<b>Les plus fortes surcotes</b>	1	2024-01-14 07:45	1.04	0.69
	2	2024-01-11 05:40	0.86	0.66
	3	2024-01-17 10:45	1.24	0.64
	4	2023-11-28 00:55	0.19	0.58
	5	2023-12-19 04:45	0.31	0.50
<b>Les plus fortes décotes</b>	1	2024-03-25 06:10	-0.13	-0.68
	2	2024-03-01 06:05	-0.36	-0.47
	3	2024-03-26 15:00	-0.66	-0.46
	4	2023-12-24 09:30	-0.55	-0.37
	5	2023-12-13 00:40	-0.66	-0.36

*Tableau 19 – Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrées à Mont-Louis entre le 31 mars 2022 et le 15 avril 2024.*

	Rang	Date (UTC)	Niveau d'eau CGVD28 (m)	Surcote/Décote (m)
<b>Les plus hauts niveaux</b>	1	2022-11-26 20:40	2.01	0.29
	2	2022-12-24 19:05	2.01	0.24
	3	2022-12-25 20:15	2.01	0.23
	4	2023-02-20 19:05	1.96	0.33
	5	2024-01-10 18:00	1.95	0.49
	6	2022-11-25 19:50	1.94	0.21
	7	2023-11-27 18:45	1.94	0.40
	8	2021-12-06 20:10	1.94	0.13
	9	2021-05-27 06:55	1.89	0.13
	10	2023-01-23 20:15	1.88	0.15
<b>Les plus fortes surcotes</b>	1	2022-12-24 08:35	1.37	0.87
	2	2022-09-24 13:55	0.40	0.82
	3	2024-01-11 01:15	-0.24	0.72
	4	2022-01-18 12:25	-0.03	0.70
	5	2023-01-26 22:05	1.82	0.68
	6	2022-01-30 05:40	1.04	0.66
	7	2024-01-14 08:45	1.46	0.66
	8	2024-01-17 10:50	1.50	0.63
	9	2022-03-10 01:05	0.73	0.61
	10	2023-12-18 22:20	1.76	0.59
<b>Les plus fortes décotes</b>	1	2022-01-08 20:25	-0.87	-1.13
	2	2022-11-23 02:10	-1.22	-0.76
	3	2024-03-25 06:00	0.04	-0.71
	4	2022-03-13 23:55	-1.09	-0.67
	5	2022-11-21 16:35	0.43	-0.64
	6	2022-02-19 10:50	-0.27	-0.64
	7	2022-03-09 05:20	-1.22	-0.64
	8	2023-01-27 14:25	-0.70	-0.61
	9	2022-01-16 05:35	-0.31	-0.61
	10	2021-12-11 09:30	-0.67	-0.56

*Tableau 20 – Listes des 10 plus hauts niveaux d'eau, des 10 plus fortes surcotes et des 10 plus fortes décotes enregistrées à Baie-Trinité entre le 23 novembre 2022 et le 9 avril 2024.*

	Rang	Date (UTC)	Niveau d'eau CGVD28 (m)	Surcote/Décote (m)
<b>Les plus hauts niveaux</b>	1	2022-12-25 20:10	2.43	0.36
	2	2022-12-24 19:40	2.42	0.38
	3	2024-01-10 17:55	2.36	0.68
	4	2022-11-26 20:25	2.32	0.29
	5	2024-03-11 19:40	2.30	0.46
	6	2022-11-25 19:40	2.26	0.20
	7	2024-01-13 20:35	2.25	0.31
	8	2023-11-27 18:40	2.25	0.42
	9	2023-02-20 18:55	2.24	0.28
	10	2022-12-24 06:55	2.21	1.28
<b>Les plus fortes surcotes</b>	1	2022-12-24 08:25	1.98	1.29
	2	2024-01-10 23:50	-0.23	0.98
	3	2024-01-14 06:35	1.17	0.88
	4	2024-01-17 11:25	1.81	0.67
	5	2023-01-26 21:05	1.82	0.67
	6	2024-03-11 14:55	-0.65	0.66
	7	2023-10-08 21:55	0.53	0.61
	8	2022-12-01 07:10	-0.35	0.59
	9	2023-11-28 00:00	-0.73	0.59
	10	2023-12-19 05:45	-0.57	0.55
<b>Les plus fortes décotes</b>	1	2024-03-25 05:35	0.03	-0.82
	2	2023-02-04 14:20	-0.94	-0.71
	3	2022-11-24 10:30	-1.30	-0.67
	4	2023-01-27 14:15	-0.82	-0.64
	5	2024-03-01 06:20	-0.80	-0.59
	6	2023-11-19 22:25	0.81	-0.54
	7	2023-02-23 04:55	-1.28	-0.52
	8	2024-01-24 01:55	-1.30	-0.51
	9	2023-12-14 03:45	-1.20	-0.51
	10	2022-12-02 07:05	-1.28	-0.49

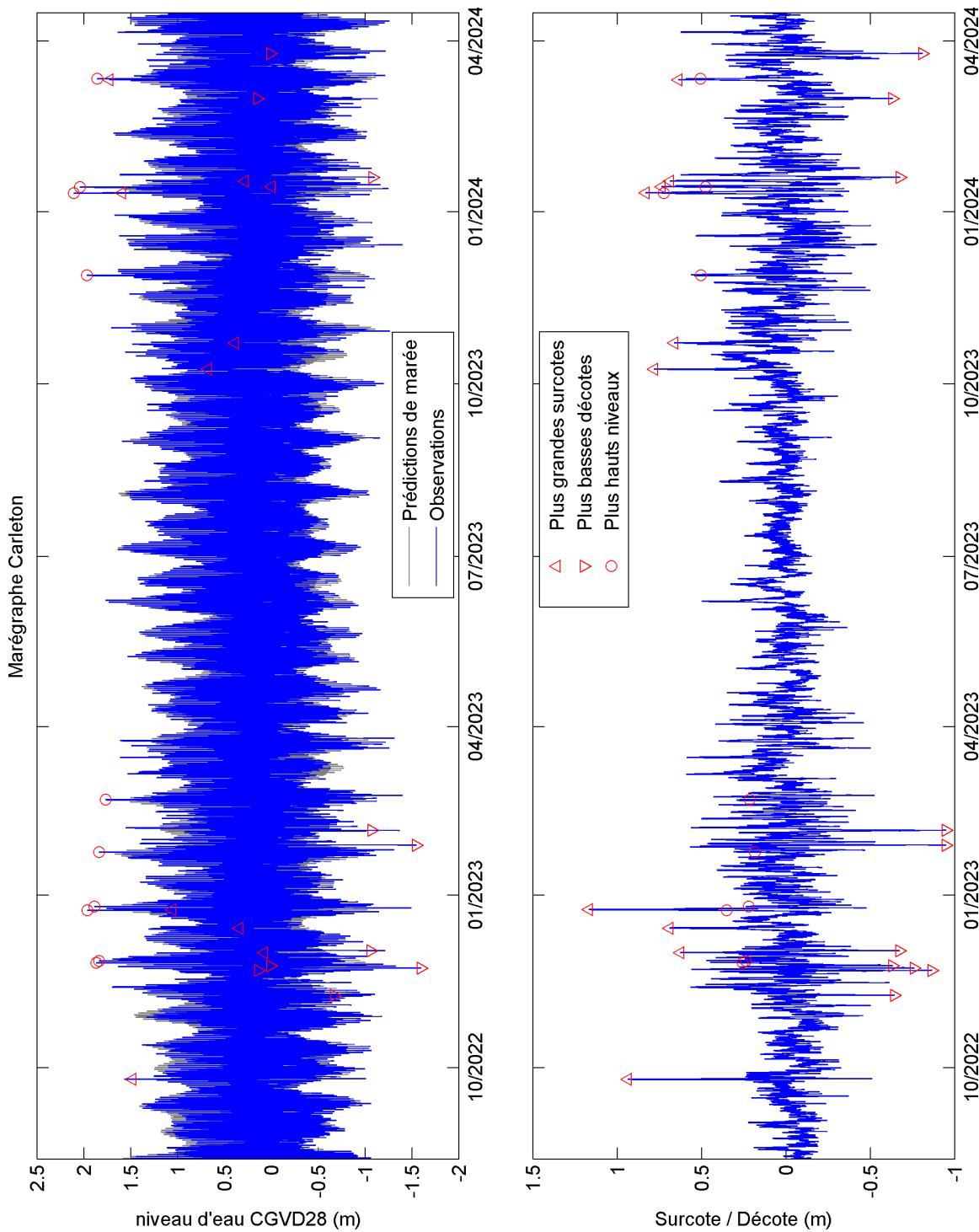


Figure 51 – Niveau d'eau mesuré à Carleton et surcote/décote d'après l'analyse avec la boîte à outils Matlab T\_TIDE, pour la période d'août 2022 à avril 2024.

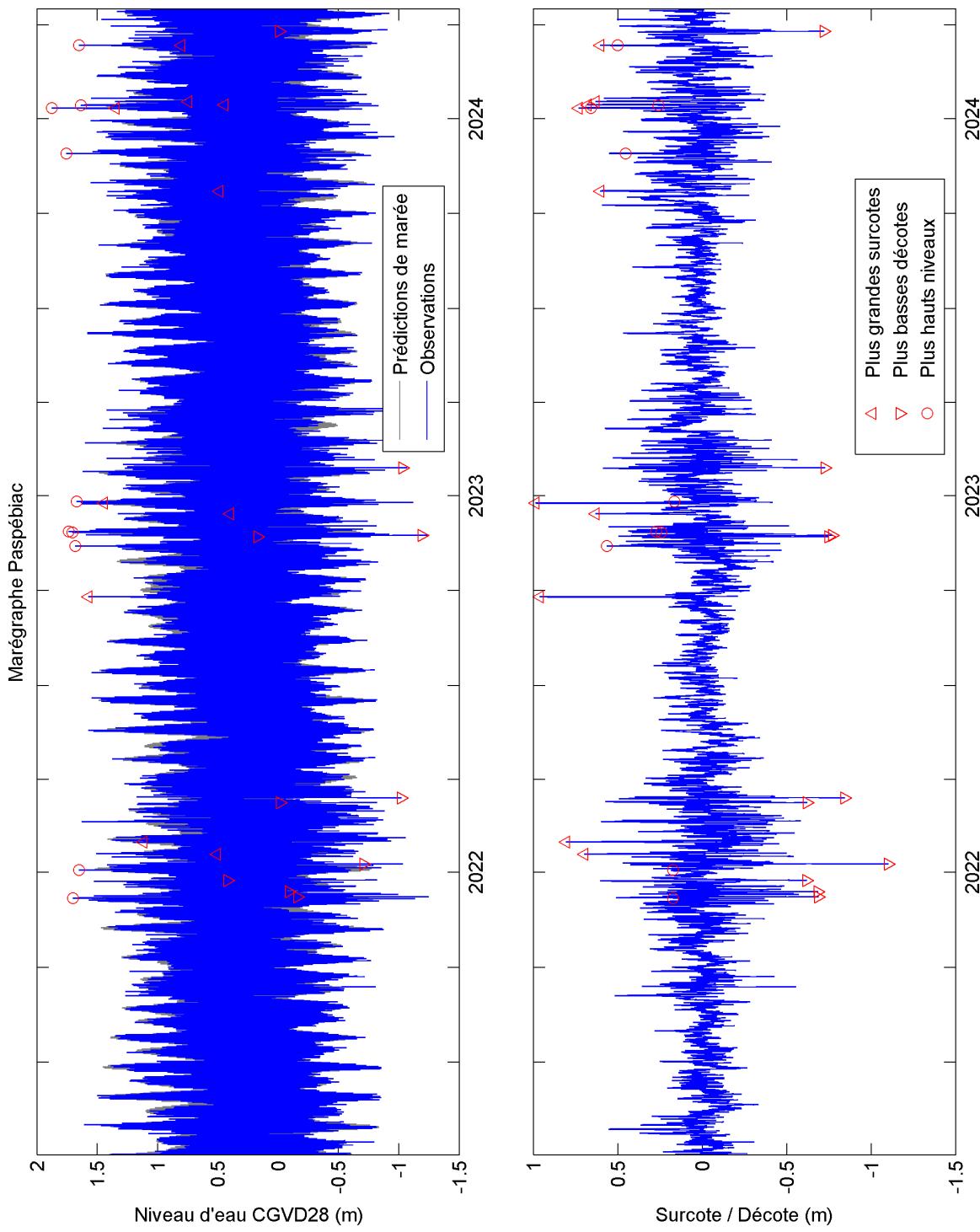


Figure 52 – Niveau d'eau mesuré à Paspébiac et surcote/décote d'après l'analyse avec la boîte à outils Matlab T\_TIDE, pour la période d'avril 2021 à avril 2024.

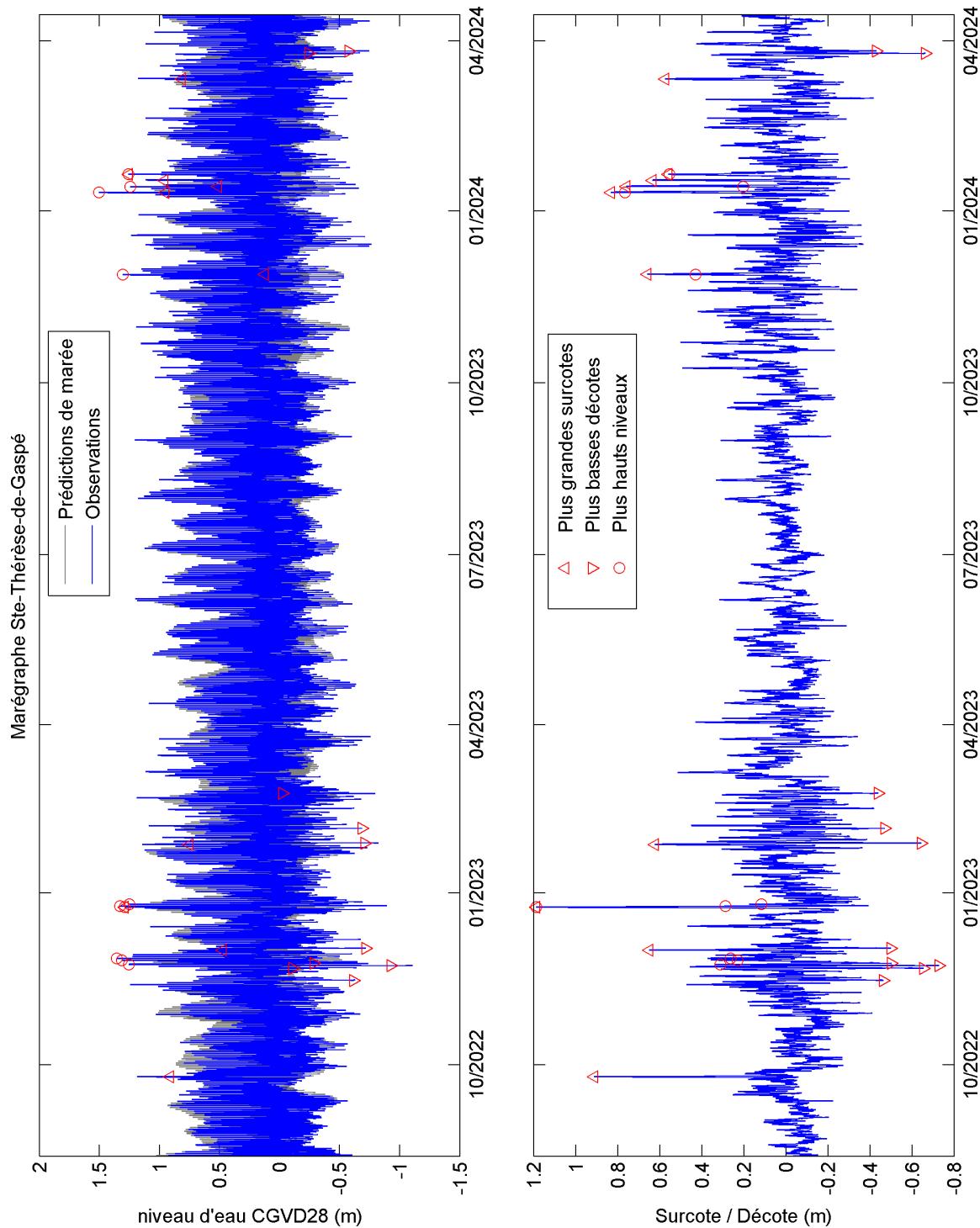


Figure 53 – Niveau d'eau mesuré à Ste-Thérèse-de-Gaspé et surcote/décote d'après l'analyse avec la boîte à outils Matlab T\_TIDE, pour la période d'août 2022 à avril 2024.

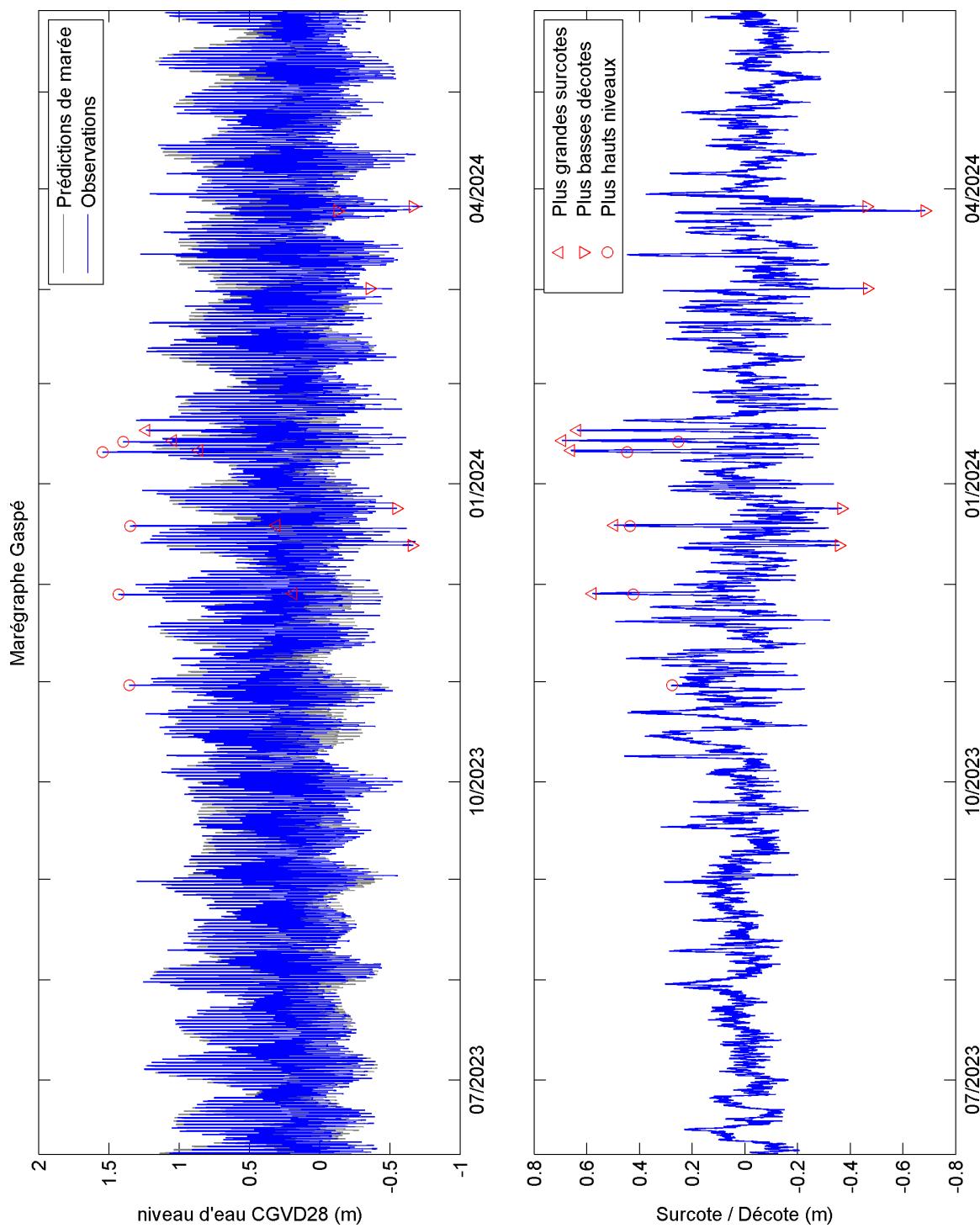


Figure 54 – Niveau d'eau mesuré à Gaspé et surcote/décote d'après l'analyse avec la boîte à outils Matlab T\_TIDE, pour la période de juin 2023 à avril 2024.

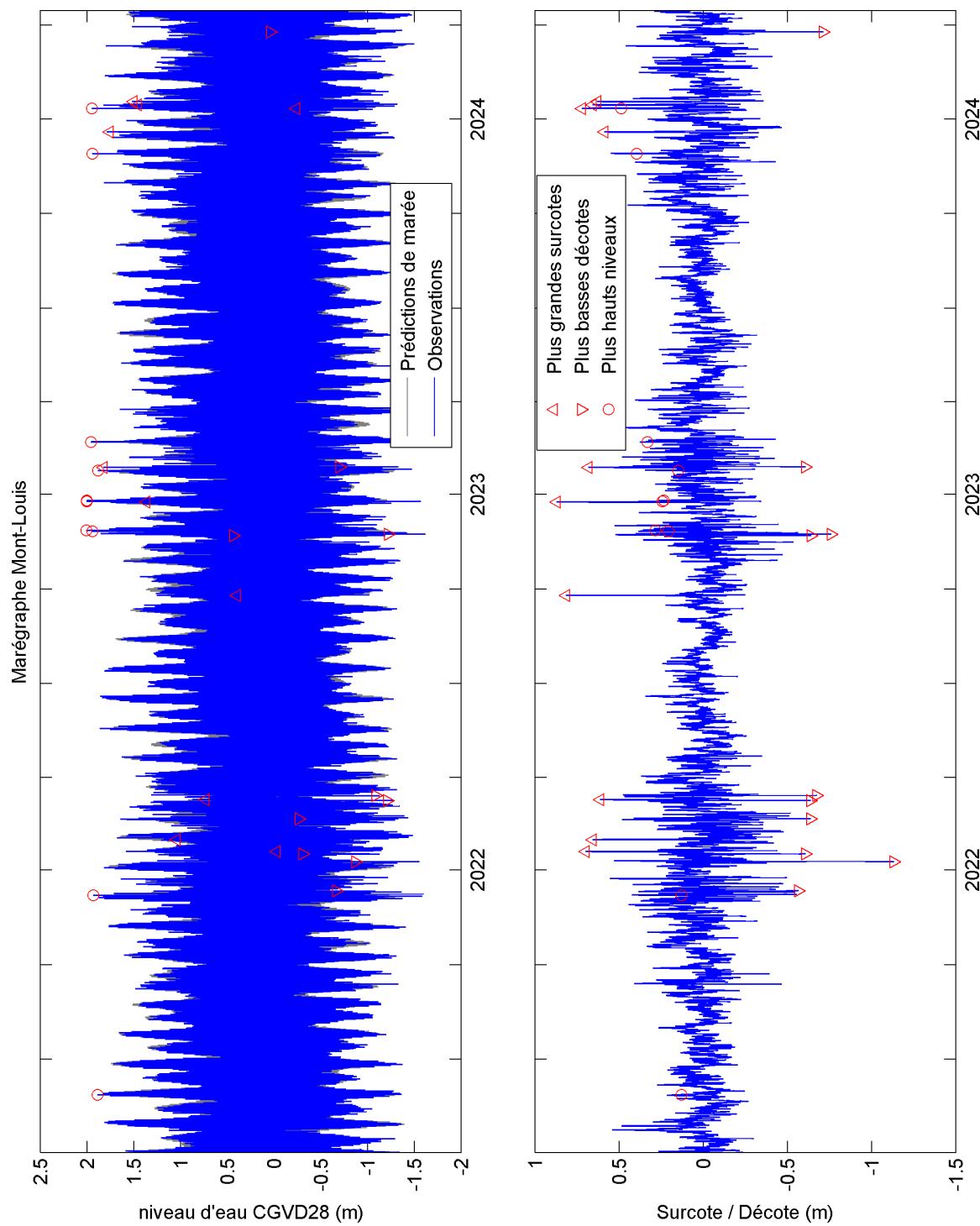


Figure 55 – Niveau d'eau mesuré à Mont-Louis et surcote/décote d'après l'analyse avec la boîte à outils Matlab T\_TIDE, pour la période d'avril 2021 à avril 2024.

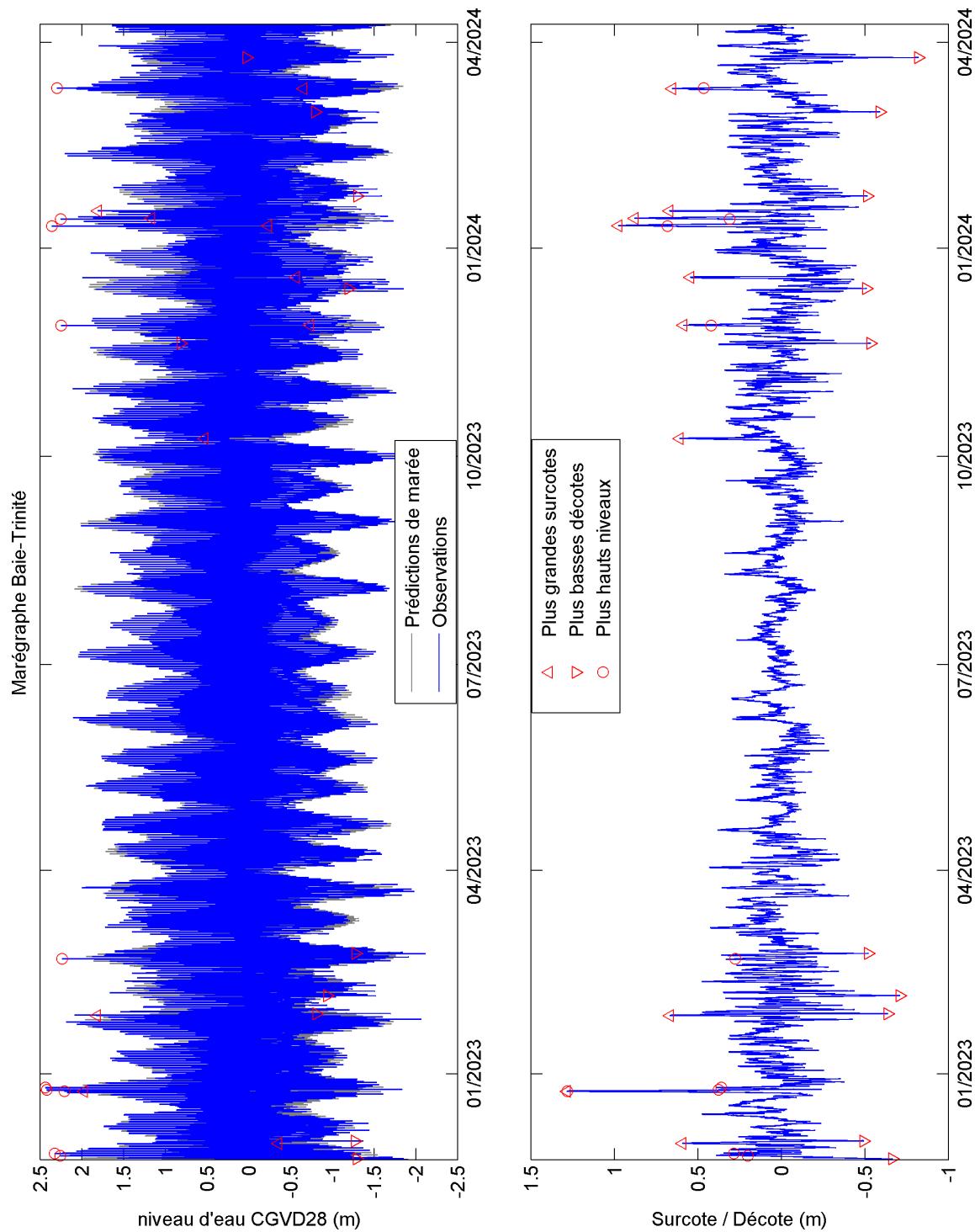


Figure 56 – Niveau d'eau mesuré à Baie-Trinité et surcote/décote d'après l'analyse avec la boîte à outils Matlab T\_TIDE, pour la période de novembre 2022 à avril 2024.

## 4.6 Comparaison des niveaux d'eau entre marégraphe et AWAC

Aussi bien les marégraphes installés dans les marinas que les AWAC immergés au large peuvent mesurer des surcotes par rapport aux niveaux d'eau prédits par les harmoniques de marée. Nous avons donc comparé les surcotes calculées par les marégraphes et celles par les AWAC pour 4 événements majeurs : La tempête du 24 septembre 2022, celle du 24 décembre 2022, celle du 10 janvier 2024 et enfin celle du 14 janvier 2024. Pour nos analyses nous avons aussi utilisé les données provenant du marégraphe de Belledune (Nouveau-Brunswick) entretenu par le Service Hydrographique du Canada (SHC), mais comme les résultats sont extrêmement similaires à ceux du marégraphe de Carleton lors de ces événements, ils ne sont pas illustrés dans les figures ci-dessous. À noter, dans la majorité des phénomènes répertoriés ici, à la suite des surcotes s'ensuivent des décotes, probablement liées à une oscillation du bassin d'eau. La distance entre les différents instruments peut être observée sur la carte présentée à la Figure 1.

La Figure 57 présente trois événements majeurs à l'entrée de la Baie des Chaleurs, avec les données du marégraphe de Ste-Thérèse-de-Gaspé, celui de Gaspé (seulement le dernier événement) et celles de l'AWAC à Cap d'Espoir (B). Lors de la première tempête du 22 septembre 2022, les deux instruments mesurent des surcotes très similaires (0,93 m et 0,98 m). Lors de la tempête du 24 décembre 2022, la surcote mesurée à la côte (marégraphe) est plus élevée (1,21 m) que celle mesurée par l'AWAC au large (0,82 m). Lors de la dernière tempête majeure en janvier 2024, les surcotes calculées par les deux marégraphes et l'AWAC sont très similaires (0,84 m, 0,67 m et 0,68 m), malgré un maximum plus élevé à Ste-Thérèse-de-Gaspé. Dans l'ensemble, l'intensité des surcotes est similaire entre les instruments relativement proches géographiquement, ainsi que leur synchronicité.

La Figure 58 présente deux événements majeurs dans la Baie des Chaleurs, avec les données du marégraphe de Paspébiac, du marégraphe de Carleton et de l'AWAC à Paspébiac (F). Lors de deux tempêtes, les surcotes du marégraphe de Paspébiac (0,94 et 1,00 m) et celles de l'AWAC (F; 0,96 m et 0,92 m) sont extrêmement similaires. Outre la proximité géographique entre ces deux types d'instrument, la fiabilité des mesures et leur analyse est à souligner. Les données de Carleton sont également proches (0,93 m et 1,18 m), mais montrent au cœur de la surcote du 24 septembre 2022, ce qui semble être un effet de résonance plus prononcé que ce qui est observé à Paspébiac. Pour la tempête du 24 décembre 2022, la surcote mesurée à Carleton plus au fond de la baie est supérieure à celles mesurées plus à l'est au centre de la baie. Dans l'ensemble, l'intensité des surcotes est similaire entre les instruments relativement proches géographiquement, ainsi que leur synchronicité. Les données des AWAC peuvent remplacer au besoin celles obtenues par un marégraphe, lorsque non disponibles, dans les analyses de surcotes.

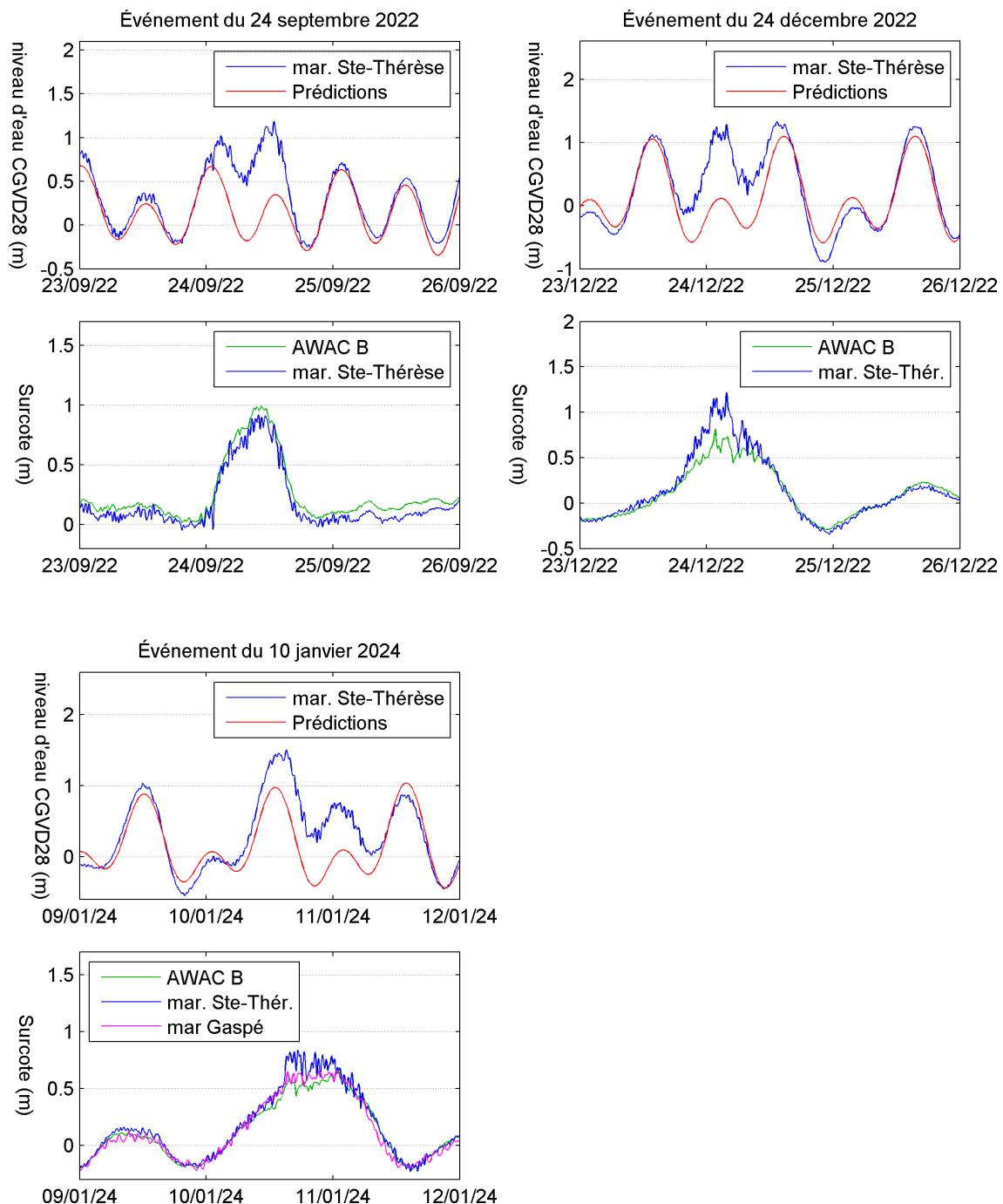
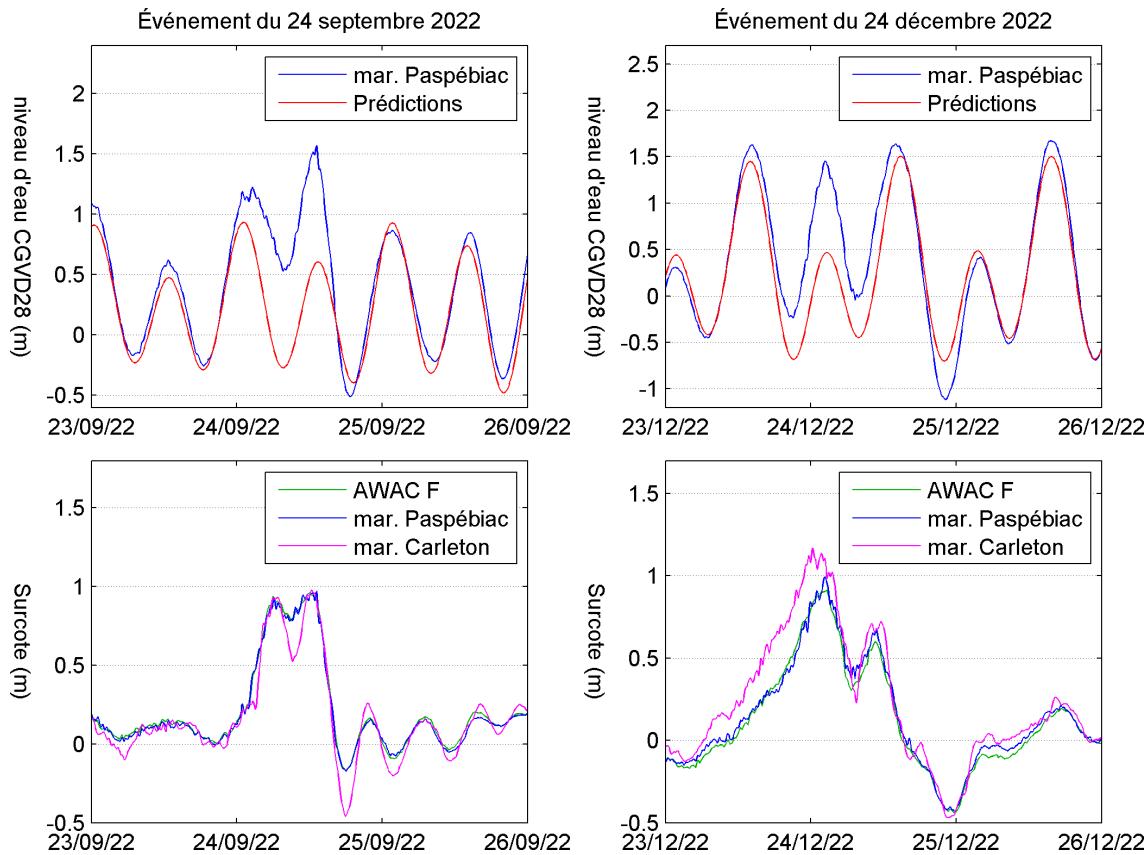


Figure 57 – Comparaison des surcotes du niveau d'eau mesurées par l'AWAC de Cap d'Espoir (B) et les marégraphes de Ste-Thérèse-de-Gaspé et Gaspé lors des tempêtes du 24/09/2022, du 24/12/2022 et du 10/01/2024 (Fuseau HNE).



*Figure 58 – Comparaison des surcotes du niveau d'eau mesurées par l'AWAC de Paspébiac (F) et les marégraphes de Paspébiac et Carleton lors des tempêtes du 24/09/2022 et du 24/12/2022 (Fuseau HNE).*

La Figure 59 présente quatre événements majeurs dans l'Estuaire du St-Laurent, avec les données du marégraphe de Mont-Louis, celles de l'AWAC de St-Ulric (A) et de l'AWAC de Mont-Louis (G). Lors des 4 événements, les surcotes calculées par le marégraphe de Mont-Louis (0,90 m, 0,82 m, 0,73 m, 0,69 m) et celles issues de l'AWAC de Mont-Louis (G; 0,92 m, 0,81 m, 0,73 m, 0,64 m) sont extrêmement similaires. Les surcotes calculées par l'AWAC de St-Ulric sont légèrement supérieures lors des 4 événements (1,12 m, 0,95 m, 0,86 m, 0,79 m). Lors des deux tempêtes de septembre et décembre 2022, la surcote à St-Ulric est atteinte quelques heures plus tôt qu'au site de Mont-Louis (marégraphe et AWAC). Ce décalage est probablement dû à la distance géographique entre les deux sites, mais pourrait aussi s'expliquer par des conditions de vent différentes qui favoriseraient une surcote plus importante en amont de l'estuaire. Lors des deux derniers événements de janvier 2024, toutes les surcotes calculées sont synchrones.

Nous nous sommes limités ici aux comparaisons entre instrument du projet, mais les données du marégraphe de Rimouski (SHC) pourraient aussi être utilisées pour évaluer les phénomènes de surcote à St-Ulric, car St-Ulric est beaucoup plus proche de Rimouski que de Mont-Louis.

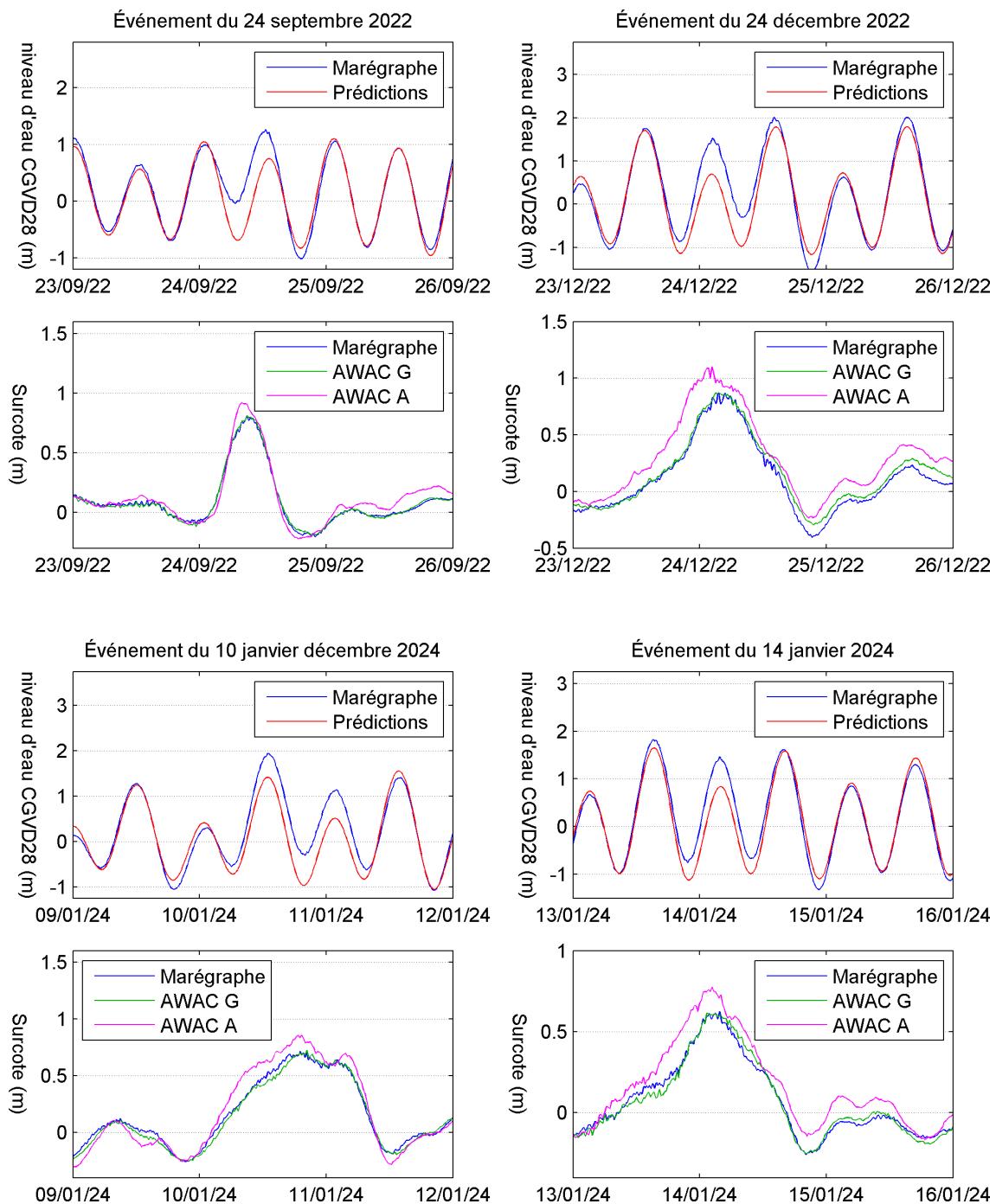


Figure 59 – Comparaison des surcotes du niveau d'eau mesurées par le marégraphe de Mont-Louis et les AWAC de St-Ulric (A) et de Mont-Louis (G) lors des tempêtes du 24/09/2022, du 24/12/2022, du 10/01/2024 et du 14/01/2024 (Fuseau HNE).

Enfin, la Figure 60 présente trois événements majeurs dans le nord-est du golfe du St-Laurent, avec les données du marégraphe de Baie-Trinité et celles de l'AWAC de Rivière-Pentecôte (E). À noter que lors de la tempête du 24 décembre 2022, l'AWAC de Rivière-Pentecôte a été déplacé violement et entraîné environ 2 m plus profond expliquant ainsi l'interruption sur quelques heures d'un signal pression valide et donc de la fiabilité de la mesure du niveau d'eau. Le pic de surcote mesurée par l'AWAC n'est donc malheureusement pas disponible. Lors des deux tempêtes de janvier 2024, les surcotes calculées sont similaires et synchrones. Le 10 janvier la surcote calculée par le marégraphe de Baie-Trinité (0,97 m) est légèrement supérieure à celle issue de l'AWAC (E; 0,94 m), alors que 4 jours plus tard, il s'agit de l'inverse (0,87 m et 0,98 m). Ces différences pourraient s'expliquer par la distance entre les sites de Baie-Trinité et de Rivière-Pentecôte, liée avec un patron de dépression atmosphérique différent entre les deux tempêtes. Malgré cela, les mesures de l'AWAC demeurent un bon proxy par rapport au marégraphe lors de l'analyse des surcotes.

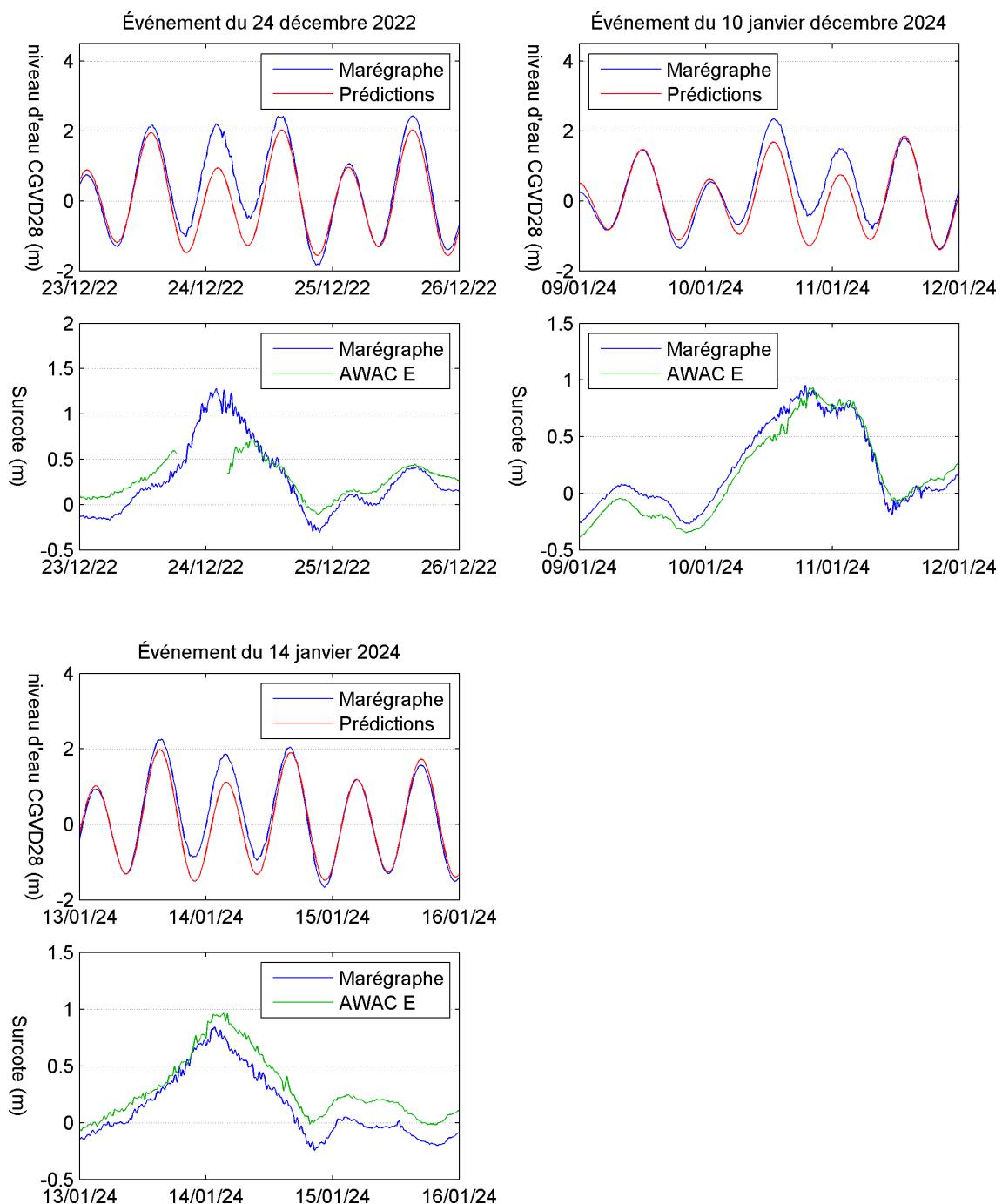


Figure 60 – Comparaison des surcotes du niveau d'eau mesurées par l'AWAC de Rivière-Pentecôte (E) et le marégraphe de Baie-Trinité lors des tempêtes du 24/12/2022, du 10/01/2024 et du 14/01/2024 (Fuseau HNE).

## 5 Revue de la littérature sur les probabilités conjointes des vagues de tempêtes et des niveaux d'eau

Le présent chapitre présente la revue de la littérature et des pratiques sur le calcul les probabilités conjointes des vagues de tempêtes et des niveaux d'eau. Les outils informatiques, qui ont été développés dans le cadre du présent projet, et les résultats obtenus sont ensuite présentés dans le chapitre 6. Toutefois, pour certaines tâches présentées dans la revue de littérature, les fonctions Matlab pouvant accomplir cette tâche sont déjà indiquées [entre crochets].

### 5.1 Introduction

L'impact des tempêtes et d'événements extrêmes en milieu côtiers (érosion côtière, notamment du haut de plage, dommages aux ouvrages de protections, dommages aux structures proches du littoral, submersion, etc.) dépend à la fois des caractéristiques des vagues (surtout hauteur, mais aussi période et direction) et du niveau d'eau. En effet, la propagation et la transformation des vagues en milieu côtier sont contrôlées par la profondeur, alors que le niveau d'eau déterminera jusqu'à quelle altitude s'entendra l'énergie destructives des vagues. De plus en cas de surcote, les vagues contribuent par le wave run-up (jet de rive) aussi à la submersion.

Il ne suffit donc pas de connaître séparément la probabilité des événements de fortes vagues et la probabilité des événements de hauts niveaux d'eau. Il est nécessaire de déterminer la probabilité conjointe d'événements ayant des fortes vagues et des hauts niveaux d'eau. Cette probabilité conjointe dépendra de la corrélation existante entre les différents paramètres.

Il s'agit d'un sujet complexe, mais très important pour la conception des ouvrages en génie côtier, qui a fait l'objet de nombreuses publications et plusieurs synthèses (par exemple, CIRAI, CUR et CETMEF, 2007; Hawkes et al., 2008; Garcia et al., 2015; Petroliagkis et al., 2016; Radfar et al., 2023). Par contre, plusieurs publications "classiques" en génie côtier ignorent complètement le sujet, par exemple le *Shore Protection Manual* (CERC, 1984); le *Coastal Engineering Manual* (USACE, 2002), le *Highways in the coastal environment* (Douglas et Webb, 2020). Différentes méthodes ont été proposées pour la probabilité conjointe et jusqu'à présent aucune méthode acceptée par la majorité des chercheurs et praticiens ne s'est imposée.

### 5.2 Paramètres analysés

Quatre principaux paramètres sont déterminants en génie côtier (niveau d'eau ainsi qu'hauteur, période et direction des vagues), mais généralement seulement les deux premiers sont analysés :

- 1) Le *niveau d'eau*, plus exactement le niveau d'eau calme sans les oscillations de courte période des vagues (SWL, pour *Still Water Level*), qui intègre la marée astronomique, la surcote météorologique et, si SWL est mesuré à la côte, le wave set-up (la surcote liée à l'action des vagues). Toute tendance à long terme, comme la hausse du niveau marin global actuel, devrait être retirée des données (Hawkes et al., 2008).

- 2) La *hauteur significative des vagues* ( $H_s$ , qui est équivalent à  $H_{m0}$  utilisé dans d'autres chapitres de ce rapport).
- 3) Parfois la *période des vagues* est également incluse dans l'analyse statistique multivariée, notamment quand le wave run-up (jet de rive) est un facteur déterminant. Toutefois, la probabilité conjointe est généralement calculée seulement avec SWL et  $H_s$ . Dans ce cas, la période des vagues est estimée à partir de  $H_s$  en supposant une certaine pente des vagues, par exemple la pente moyenne de 1% des vagues les plus grandes (Hawkes et al., 1998).
- 4) La *direction des vagues* n'est normalement pas directement incluse dans l'analyse statistique. Toutefois, l'analyse statistique peut être répétée pour différentes directions de provenance des vagues.

SWL est généralement obtenu à partir des enregistrements d'un marégraphe, et plus rarement d'un modèle océanographique, reproduisant par exemple les conditions lors d'une tempête tropicale (par exemple, Haixia et al., 2023).  $H_s$  ainsi que la période et la direction des vagues peuvent être obtenues à partir d'enregistrement d'houlographe. Mais comme les longues séries de données d'houlographes sont assez rares, les paramètres de vagues sont assez souvent obtenus de simulations avec des logiciels comme WaveWatch III ou SWAN en utilisant les données météorologiques (par exemple, Gouldby et al., 2014; Didier et al., 2019; Dohner et DuVal, 2022; Haixia et al., 2023). Il faut souligner que l'utilisation d'observations est préférable quand celles-ci sont disponibles. En cas d'utilisation de données modélisées, le modèle devrait avoir été bien validé avec des observations.

Souvent, c'est suffisant de considérer les conditions à marée haute. Pour cette raison, certains auteurs recommandent d'utiliser uniquement  $H_s$  et SWL à chaque marée haute (environ 706 par année avec des marées semi-diurnes) pour le calcul de la probabilité conjointe (Hawkes et al., 2002; CIRAI, CUR et CETMEF, 2007). [cooc\_prep.m]

Comme il y parfois déphasage entre le pic de SWL et le pic de  $H_s$ , certains auteurs combinent le SWL de chaque marée haute avec le maximum de  $H_s$  dans une fenêtre de  $\pm n$  heures avant/après chaque marée haute (par exemple, Mazas et Hamm, 2017; Didier et al., 2018). [cooc\_prep.m]

Parfois, au lieu d'utiliser le niveau d'eau calme (SWL), le calcul des probabilités est effectué avec le niveau de la surcote, calculé comme la différence entre le niveau d'eau calme et les prédictions de la marée astronomique (par exemple, Oo et al., 2022; Dohner et DuVal, 2022; voir aussi FEMA, 2016a). Cela a l'avantage que les événements de surcote lors des marées de morte-eau ou à marée basse pourront aussi être considérés parmi les événements extrêmes, ce qui est très utile pour les courtes séries de données. Par contre, avant d'utiliser les probabilités conjointes, il faudra tenir compte de la probabilité qu'un événement se produise à marée haute de vive-eau. De plus, cette méthode n'est pas adaptée dans un bassin de faible profondeur où le niveau d'eau influence la propagation de l'onde de marée et de l'onde de surcote, ou lorsque les données de vagues utilisées sont influencées par le niveau d'eau (site en eau peu profonde).

Des imprécisions dans les données de  $H_s$  et SWL utilisées pour l'analyse peuvent avoir autant d'effet qu'une analyse imparfaite de la probabilité conjointe (Hawkes et al., 1998).

Il est donc essentiel qu'un contrôle de qualité soit effectué sur les données initiales et que celles-ci soient préparées soigneusement pour l'analyse (Hawkes et al., 2008).

### 5.3 Corrélation entre $H_s$ et SWL

Il y a deux cas de figure extrêmes :

- Les événements avec des fortes vagues sont complètement indépendants des événements de haut niveau d'eau. Dans ce cas il est possible de simplement multiplier les probabilités des deux types d'événements. Par exemple, si la période de retour des vagues avec une hauteur significative ( $H_s$ ) dépassant 6 m est de 50 ans, et la période de retour de niveau d'eau calme (SWL) dépassant 2.4 m est de 25 ans, la période de retour d'un événement avec  $H_s > 6$  m et SWL > 2.4 m serait de  $50 \times 25 = 1250$  ans.
- Les événements avec des fortes vagues sont parfaitement corrélés avec les événements de haut niveau d'eau. Dans ce cas, un événement de vagues de probabilité  $P_x$  se produit en même temps qu'un événement de haut niveau d'eau de la même probabilité  $P_x$ . Par exemple si la période de retour pour  $H_s > 6$  m est de 50 ans et la période de retour pour SWL > 2.6 m est de 50 ans, la période de retour d'un événement avec  $H_s > 6$  m et SWL > 2.6 m serait aussi de 50 ans.

Presque toujours, la probabilité conjointe se situera entre ces deux cas de figure extrêmes. Au début d'un projet, il peut être utile de calculer les probabilités pour les deux cas de figure extrêmes (complète indépendance, et parfaite corrélation) pour avoir une idée des limites dans laquelle se situera la probabilité conjointe (Hawkes et al., 1998).

À noter, qu'il existe des rares configurations géographiques (par exemple Douvres sur la côte de la Manche) pour lesquelles les plus fortes vagues sont associées à une certaine direction de vent (sud et sud-est à Douvres) et les surcotes à une autre direction de vent (sud-ouest à Douvres), ce qui produit une corrélation négative entre les deux types d'événement (Hawkes et al., 2002).

Il n'existe pas de méthode simple et bien acceptée pour calculer la probabilité conjointe. Avec des très longs enregistrements simultanés de  $H_s$  et de SWL, il est en principe possible de simplement calculer les statistiques des valeurs extrêmes de ces données (Doong et al., 2008; Hawkes et al., 2008). Toutefois, une des difficultés est le manque de données suffisantes pour calculer les probabilités correspondantes à des longues périodes de retour (il faudrait une série de données trois à quatre fois plus longue que la période de retour considérée).

#### 5.3.1 Analyse graphique

Pour examiner la corrélation entre les deux types de données, il est utile d'établir un histogramme bidimensionnel (Hawkes, 1998; CIRAI, CUR et CETMEF, 2007; Dohner et DuVal, 2022). Il s'agit de diviser les hauteurs de vagues en  $N$  intervalles réguliers (par exemple 0.0 à 0.5 m, 0.5 à 1.0 m, 1.0 à 1.5 m, etc.) et niveaux d'eau (ou surcotes) en  $M$  intervalles réguliers (par exemple -1.2 à -0.9 m, -0.9 à -0.6 m, -0.6 à -0.3 m, etc.), puis de calculer pour la matrice  $N \times M$  le nombre d'événements correspondants aux critères conjoints. Le résultat est traditionnellement représenté sous forme de tableau sur lequel sont tracés des contours de même fréquence d'événement (Figure 61). Cela pourrait aussi

être un graphique XY des données avec code de couleur pour indiquer la densité des points et contours de même densité (Doong et al., 2008). [cooc\_stat.m]

Des contours peuvent être dessinés sur ce tableau ou cette figure pour des probabilités d'occurrence (ou période de retour) particulières. CIRAI, CUR et CETMEF (2007) indiquent que des contours d'événements plus rares pourraient ensuite être extrapolés en gardant le même espacement entre les contours de 1 et 10 ans et de 10 et 100 ans.

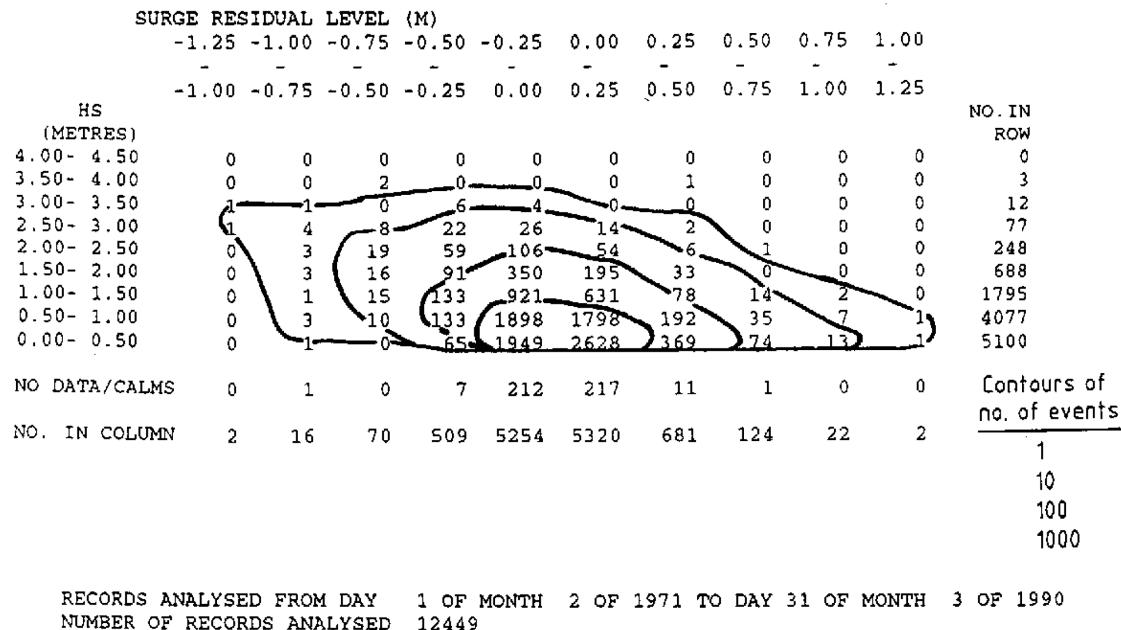


Figure 61 – Histogramme dimensionnel (surcote et  $H_s$ ) montrant une corrélation négative entre les surcotes et  $H_s$  mesurés au large de Hythe en Angleterre (Hawkes, 1998).

### 5.3.2 Mesure du degré de dépendance

En plus d'une analyse graphique, plusieurs auteurs ont proposé des formules pour une évaluation quantitative du degré de dépendance. À noter, que ces formules ne sont pas toujours utilisées dans les études publiées dans la littérature.

#### Coefficient de corrélation $r$

Hawkes et al. (2008) calcule le coefficient de corrélation  $r$  (Équation (3)). Ce calcul peut être fait sur l'ensemble des données, ou seulement sur les données qui dépassent certains seuils (toutes les paires de  $H_s$ /SWL, pour lesquelles  $H_s >$  seuil\_ $H_s$  et  $SWL >$  seuil\_SWL).  $r$  peut avoir des valeurs entre -1 et 1.  $H_s$  et SWL sont parfaitement corrélés si  $|r| = 1$ , alors que  $H_s$  et SWL sont complètement indépendants si  $r = 0$ . Lorsque  $r < 0$ , la corrélation est négative, c'est-à-dire que les plus grandes vagues sont associées avec des bas niveaux d'eau.

$$r = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var(X)Var(Y)}} \quad (3)$$

$$= \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

**[cooc\_stat.m]**

### Tau de Kendall

Wahl et al. (2015) utilise le Tau ( $\tau$ ) de Kendall comme mesure de la corrélation basée sur le rang (Kendall, 1938). C'est une méthode plus robuste, car elle ne suppose pas une relation linéaire entre les deux variables. Comme pour  $r$ , le signe de  $\tau$  indique si la corrélation est positive ou négative. Les deux variables sont parfaitement corrélées si  $|\tau| = 1$ , elles sont complètement indépendantes si  $\tau = 0$ .

Pour  $n$  paires de valeurs  $(x, y)$ , le calcul de  $\tau$  est basé sur la comparaison de toutes les combinaisons possibles  $x_i - x_k$  et  $y_i - y_k$ , en assignant une valeur +1 si les différences  $x_i - x_k$  et  $y_i - y_k$  ont le même signe, et une valeur -1 s'ils ont des signes opposés, puis additionnant toutes ces valeurs (Gibbons, 1997).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \left( \sum_{k=i+1}^n sgn(x_i - x_k) sgn(y_i - y_k) \right) \quad (4)$$

$$\tau = \frac{2S}{n(n-1)} \quad (5)$$

S'il y a des égalités lors des comparaison  $x_i - x_k$  ou  $y_i - y_k$ , l'ajustement suivant peut être effectué (Gibbons, 1997; Nelsen, 2002) :

$$\tau = \frac{2S}{\sqrt{n(n-1)/2 - T} \sqrt{n(n-1)/2 - U}} \quad (6)$$

avec  $T = t(t-1)$ ,  $t$  le nombre de comparaison  $x_i - x_k$  avec égalité,  $U = u(u-1)$ , et  $u$  le nombre de comparaison  $y_i - y_k$  avec égalité. **[cooc\_stat.m]**

### Coefficient $\chi$

Coles et al. (1999) a proposé le coefficient  $\chi$  qui est le basé sur le rapport entre le logarithme de la probabilité conjointe et le logarithme de la probabilité de  $H_s$ . C'est un calcul plus compliqué car il nécessite de définir la probabilité conjointe ( $H_s, SWL$ ). Comme pour  $r$ , le signe de  $\chi$  indique si la corrélation est positive ou négative. Les deux variables sont parfaitement corrélées si  $|\chi| = 1$ , elles sont complètement indépendantes si  $\chi = 0$ .

$$\chi = \lim_{u \rightarrow 1} \chi(u) \quad (7)$$

$$\chi(u) = 2 - \frac{\log \Pr(U < u, V < u)}{\log \Pr(U < u)} \quad \text{pour } 0 \leq u \leq 1 \quad (8)$$

## 5.4 Probabilité conjointe

La plupart des méthodes nécessitent de calculer en premier séparément la probabilité des valeurs extrêmes pour  $H_s$  et la probabilité des valeurs extrêmes pour SWL. Pour cela, il s'agit d'ajuster aux données observées (ou si celles-ci ne sont pas disponibles aux données modélisées à partir des conditions météorologiques avec des logiciels comme WaveWatch III) une loi de distribution adaptée aux valeurs extrêmes. Des logiciels comme HYFRAN-Plus, qui permet l'ajustement de diverses lois de distribution, peuvent être utile pour cela.

### *Probabilité des vagues extrêmes ( $H_s$ )*

Pour  $H_s$ , il s'agit en premier d'identifier les principales tempêtes, c'est-à-dire de repérer les maxima dans la série temporelle  $H_s$ , qui sont suffisamment séparés d'un autre maxima (voir section 3.2 et Figure 19). [**storm\_find.m**] Ensuite il faut ajuster aux données une loi de distribution, de préférence la distribution de Paréto généralisée (generalized Pareto distribution, GPD), mais la loi de Gumbel, la loi de Weibull sont aussi souvent utilisées. [**storm\_fit.m**]

### *Probabilité des niveaux d'eau extrêmes (SWL)*

**Pour la probabilité de SWL**, différentes approches existent (pour une revue complète, voir Haigh et al., 2010 ou IOC, 2006). La méthode classique utilise le maximum de SWL de chaque année (*annual maxima method*, AMM). Mais cette méthode est peu efficace dans l'utilisation des données (Haigh et al., 2010). C'est pourquoi une méthode utilisant pas un mais plusieurs ( $r$ ) maxima par année a été développée (*r-largest method*, RLM). Généralement, cinq maxima par année sont utilisés ( $r = 5$ ) (Smith, 1986; Haigh et al., 2010). Pour avoir  $r$  événements indépendants, les maxima doivent être séparés d'au moins 30 heures (Tawn, 1988). [**surge\_find.m**] Une loi d'extremum généralisée (*generalized extreme value*, GEV) est typiquement ajustée aux données obtenues par la méthode AMM ou la méthode RLM, bien que d'autres types de distribution peuvent être testées.

Toutefois, ces deux méthodes ne tiennent pas compte que SWL est la combinaison des marées (processus bien prévisible) et des surcotes de tempête (processus aléatoire). Une amélioration importante a été la *joint probability method* (JPM), qui analyse séparément la marée astronomique et la composante résiduelle non-tidale, avant d'obtenir par convolution la probabilité combinée (Pugh et Vassie, 1979; Pugh et Vassie, 1980). La densité de probabilité est estimée séparément pour la marée astronomique et pour la composante non-tidal. L'avantage de la méthode JPM est de pouvoir estimer des périodes de retour à partir d'enregistrement relativement court (< 5 ans ou < 10 ans), car toutes les surcotes sont utilisées, pas seulement celles durant les marées hautes de vive-eau (Haigh et al., 2010). Cette méthode JPM a toutefois certains problèmes, notamment (a) supposition que les données horaires soient indépendantes, alors qu'il y a une dépendance temporelle, (b) pas d'utilisation de loi de probabilité pour la distribution d'extrême des surcotes (Haigh et al., 2010).

La *revised joint probability method* (RJPM) a résolu ces problèmes (Tawn et Vassie, 1989; Tawn, 1992). Comme pour la méthode JPM, des prédictions de marée sont calculées pour une période de 18.6 ans à partir des données observées de SWL, puis la fonction de répartition empirique des niveaux de marée est calculée directement à partir de ce jeu de données prédites. Les deux méthodes JMP et RJMP divisent l'échelle verticale de SWL en tranche, 10 cm dans Pugh et Vassie (1980) et 5 cm dans Tawn et Vassie (1989), mais les capacités informatiques modernes permettent aussi d'utiliser 1 cm. Pour obtenir la fonction de répartition des niveaux de surcote, un nombre représentatif d'événements de surcote indépendants (5 fois le nombre d'années d'observation) est sélectionné, puis une fonction de distribution (GEV ou Gumbel) est ajustée. La fonction de répartition finale des surcotes est la fonction empirique complétée par la fonction de distribution ajustée pour les extrêmes supérieurs. Un facteur d'ajustement est aussi calculé pour tenir compte de la durée des événements de surcote. La méthode RJPM donne des bons résultats (IOC, 2006; Haigh et al., 2010), mais son utilisation est relativement complexe.

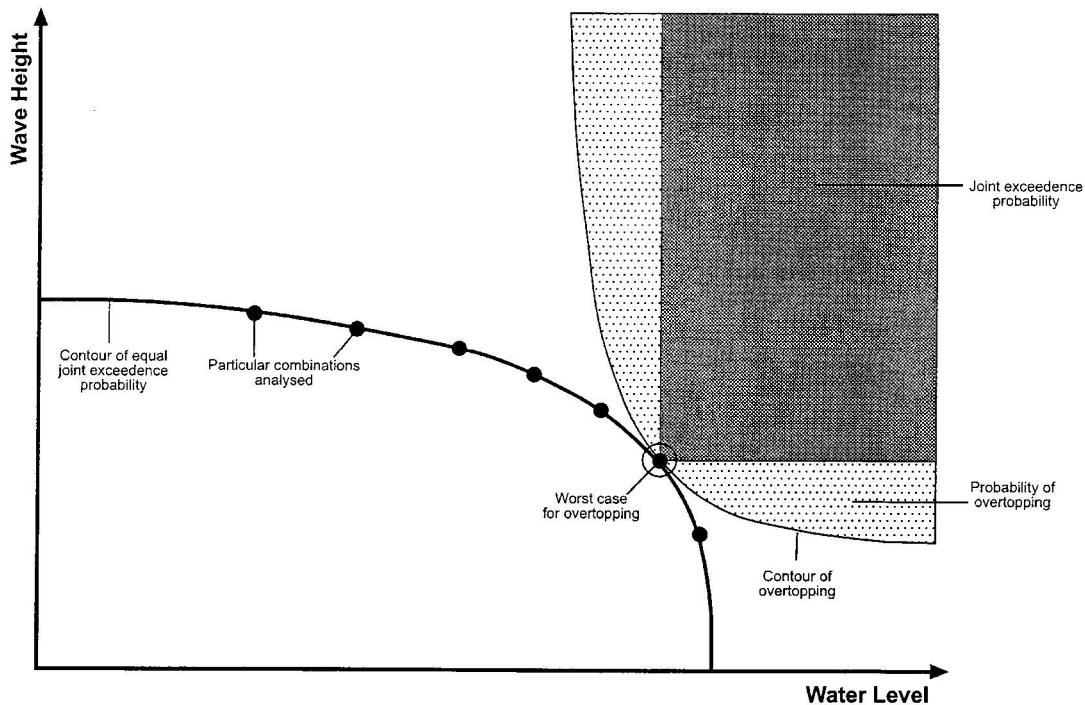
### *Considérations générales*

Dans certaines études (par exemple, Liu et al., 2022; Haixia et al, 2023), différentes lois de distribution sont testées, et le choix final est fait en tenant compte d'un ou plusieurs des tests suivants : test de Kolmogorov-Smirnov (test K-S) (Zar, 2010), critère d'information d'Akaike (*Akaike information criterion*, AIC) (Cavanaugh et Neath, 2019), critère d'information bayésien (*Bayesian information criterion*, BIC) (Neath et Cavanaugh, 2011), test Anserson-Darling (test A-D) (Razali et Wah, 2011), ou racine de l'erreur quadratique moyenne (root mean square error, RMSE) (Doong et al., 2008).

Hawkes et al. (2008) recommande d'évaluer l'incertitude de la distribution ajustée en calculant les intervalles de confiance avec une méthode de bootstrap, c'est-à-dire de (1) générer de nombreux ( $\geq 1000$ ) jeux de données par tirage aléatoire avec remise dans le jeu de donnée initial, (2) d'ajuster sur chacun la loi de distribution l'échantillon initial, (3) de déterminer la limite de confiance contenant 95% de ces distributions ajustées.  
[**storm\_fit.m** pour  $H_s$ ]

Ensuite il faut déterminer pour une période de retour (par exemple 50 ans) les différentes combinaisons de  $H_s$  et SWL ayant cette probabilité (trait noir épais sur la Figure 62). En effet, il n'y a pas de solution unique au problème, mais une multitude de combinaison  $H_s$ /SWL possibles (Hawkes et al., 2002). En pratique, seulement quelques combinaisons sont généralement calculées (points noirs sur la Figure 62). Ensuite, les ingénieurs devront déterminer laquelle est parmi ces combinaisons le pire scénario pour la stabilité de la structure considérée.

À noter, que la stabilité de la structure n'est généralement pas seulement compromise lors du dépassement d'une combinaison unique  $H_s$ /SWL (rectangle gris foncé sur la Figure 62), mais également aussi pour d'autres situations quand seulement un paramètre a une valeur extrême (surface pointillée sur la Figure 62). La probabilité de rupture est donc plus grande que la probabilité du dépassement de la combinaison unique  $H_s$ /SWL. Il faudrait donc corriger la durée de la période de retour d'un facteur de 2-3 (Hawkes et al., 1998). Une marge de sécurité est habituellement ajoutée à d'autres étapes de l'analyse pour tenir compte de cela (Hawkes et al., 1998).



*Figure 62 – Schéma des probabilités conjointes d'occurrence (trait noir épais, les points noirs sont des combinaisons particulières qui seront analysées) et des probabilités conjointes de faillite/rupture structurale (trait noir fin, submersion côtière dans cet exemple). Pour chaque type de résistance structurale, il y a une combinaison  $H_s/SWL$  qui est la plus mauvaise (Hawkes et al., 2002).*

Différentes méthodes pour obtenir les périodes de retour combinées  $H_s$ -SWL ont été proposées dans la littérature ou sont utilisées au Québec.

### 1) Combinaison arbitraire des périodes de retour de $H_s$ et SWL

Pour certaines applications en génie côtier, une combinaison arbitraire des périodes de retour de  $H_s$  et SWL est parfois utilisée. Ces méthodes, qui supposent une dépendance intermédiaire entre  $H_s$  et SWL, ont l'avantage d'être très simples à appliquer une fois que la probabilité de  $H_s$  et la probabilité de SWL ont été établies. Toutefois, elles ne tiennent pas compte du degré de dépendance entre  $H_s$  et SWL pour un site donné. Pour certains sites, les résultats peuvent être acceptables, alors que pour d'autres sites les résultats seront erronés.

Ces méthodes ne sont pas utilisées dans la littérature récente. Doong et al. (2008) mentionne une méthode traditionnelle pour Taiwan combinant pour une période de retour conjointe de 100 ans,  $H_s$  100 ans avec SWL 10 ans. Li et Song (2006) comparent une méthode dite traditionnelle pour Honk Kong (pour une période de retour conjointe de 100 ans, utilisation des trois combinaisons  $H_s$  100 ans avec SWL 10 ans,  $H_s$  50 ans avec SWL 50 ans, et  $H_s$  10 ans avec SWL 100 ans) avec un calcul de la probabilité conjointe, notant que la méthode de probabilité conjointe donne des plus grandes valeurs que la méthode traditionnelle.

### **1a) Variante « Direction de l'hydraulique » (DHYD)**

Ces dernières années, la Direction de l'hydraulique du ministère des Transport et de la Mobilité durable du Québec utilise deux combinaisons de  $H_s$ /SWL pour estimer un événement avec une période de retour de 50 ans (Tableau 21, Gaudreau, 2019). Par contre, une dépendance parfaite (pire scénario) est supposée pour un événement avec une période de retour de deux ans, c'est-à-dire  $H_s$  avec période de retour de deux ans combinée avec SWL avec période de retour de deux ans (Gaudreau, 2019).

### **1b) Variante « Consultants »**

Une méthode observée par le MTMD dans plusieurs rapports de conceptions de firmes de génie conseils consiste à employer plusieurs combinaisons de  $H_s$ /SWL pour estimer un événement avec une période de retour de 50 ans. Le tableau suivant présente, en exemple, la méthodologie employée par la firme Tetracheck dans une étude de 2019 avec six combinaisons de  $H_s$ /SWL pour estimer un événement avec une période de retour de 50 ans (Tableau 1; Tetracheck, 2019). Cette variante suppose une dépendance moindre entre  $H_s$  et SWL que la variante Direction de l'Hydraulique.

*Tableau 21 – Différentes combinaisons de période de retour des niveaux d'eau (SWL) et des hauteurs de vagues ( $H_s$ ) par la Direction de l'hydraulique du MTMD (DHYD) et par Tetracheck (Consultants) pour une probabilité conjointe avec une période de retour de 50 ans (Gaudreau, 2019; Tetracheck, 2020).*

Combinaisons DHYD	Combinaisons Consultants
$H_s$ 10 ans / $H_s$ SWL 50 ans	$H_s$ 1 ans / SWL 50 ans
$H_s$ 50 ans / $H_s$ SWL 10 ans	$H_s$ 2 ans / SWL 25 ans
	$H_s$ 5 ans / SWL 10 ans
	$H_s$ 10 ans / SWL 5 ans
	$H_s$ 25 ans / SWL 2 ans
	$H_s$ 50 ans / SWL 1 ans

## **2) Statistiques sur une variable "structure"**

Dans le cas d'applications concrètes, il est souvent possible de calculer à partir de  $H_s$ , SWL et la période des vagues une variable "structure" (par exemple, force des vagues à la côte, ou hauteur du run-up des vagues), qui peut être directement reliée à la résistance ou le bris d'une structure côtière (Hawkes et al., 1998).

Il s'agit de calculer cette variable structure pour l'ensemble des événements, puis d'ajuster une distribution statistique aux résultats obtenus. Finalement, des périodes de retour peuvent être obtenues à partir de cette distribution ajustée.

### **Avantages**

- Cette méthode évite la complexité des probabilités conjointes, elle est donc beaucoup plus simple à appliquer.

- Les résultats sont aussi plus simples à utiliser.
- Il y a donc moins d'incertitude statistique associée aux résultats que pour une probabilité conjointe, car le modèle statistique est plus simple.

### Désavantages

- Les résultats sont très spécifiques pour le site et le type d'ouvrage prévu. Il n'est pas possible de les utiliser pour d'autre tronçons de la côte ou pour un autre type d'ouvrage au même site.
- Il peut être problématique d'extrapoler la variable structure pour des événements extrêmes, lorsque les processus hydrodynamiques changent pour des très grandes valeurs de  $H_s$  ou SWL (Hawkes, 1998; Bruun et Tawn, 1998).
- Le calcul de cette variable structure pour de très nombreux événements peut parfois demander beaucoup de ressources de calcul.

Consultant Ropars inc. (CRI) utilise actuellement au Québec une variante de cette méthode (Pierre Gaudreau, communication personnelle). À partir d'une série de donnée, il calcule le run-up à la côte pour chaque pas de temps, puis il effectue l'analyse statistique pour obtenir les périodes de retour (début identique à la méthode décrite ci-dessus). Finalement, il détermine les différentes conditions de vagues et de marée qui permettent d'atteindre le run-up correspondant à chaque période de retour. Cette variante évite aussi la complexité des probabilités conjointes.

## 3) Probabilité conjointe

### 3a) Méthode avec copule

La méthode avec copule introduit une fonction auxiliaire, appelée copule (en anglais *copula*), pour décrire et étudier la distribution conjointe de deux ou plusieurs variables (Nelsen, 2006; Coles et al., 1999). En statistique, le principe a été décrit à partir du milieu du XX<sup>e</sup> siècle (Sklar, 1959), mais il a été plus largement étudié en statistique à partir des années 1990 (Nelsen, 2006). La méthode avec copule a commencé à être appliquée à la probabilité conjointe  $H_s$  / SWL vers 2010, et elle est utilisée actuellement dans une grande partie des articles publiés.

Nous présentons ici la méthode avec copule pour le cas avec deux variables. Toutefois, le principe pourrait aussi être employé pour trois variables ou plus. Pour une série de données ( $X, Y$ ) composée de paires de valeurs  $x$  et  $y$  (par exemple,  $X$  pour  $H_s$  et  $Y$  pour SWL), il existe les trois fonctions de distribution suivantes :

$$F_X(x) = \Pr(X \geq x) \quad \text{la probabilité que } X \text{ est égal ou au-dessus de } x; \quad (9)$$

$$F_Y(y) = \Pr(Y \geq y) \quad \text{la probabilité que } Y \text{ est au-dessus de } y; \quad (10)$$

$$F(x,y) = \Pr(X \geq x, Y \geq y) \quad \begin{aligned} \text{la probabilité que } X \text{ est égal ou au-dessus de } x \\ \text{et que } Y \text{ est égal ou au-dessus de } y. \end{aligned} \quad (11)$$

Pour chaque paire  $(x,y)$  nous pouvons donc associer trois nombres,  $F_x(x)$ ,  $F_y(y)$ , et  $F(x,y)$  qui sont dans l'intervalle  $[0,1]$  (Nelsen, 2006).

Il existe aussi une fonction unique  $C(\cdot,\cdot)$  sur le domaine  $[0,1] \times [0,1]$  tel que

$$F(x,y) = C\{F_x(x), F_y(y)\} \quad (12)$$

La fonction  $C$  est une *copule* qui décrit la distribution conjointe  $F(x,y)$  à partir des deux distributions univariées  $F_x(x)$  et  $F_y(y)$ . De nombreuses fonctions ont été proposées et utilisées comme copule, souvent regroupées en famille de fonctions comme archimédien, gaussien, elliptique, Fréchet, etc., qui prennent un, deux ou rarement trois paramètres ou coefficients (Nelsen, 2006).

Voici trois exemples de fonction copule. Pour deux paramètres complètement indépendants, la copule *Indépendance* est

$$F(x,y) = u \vee v \quad (13)$$

avec  $u = F_x(x)$ , et  $v = F_y(y)$

Pour deux paramètres parfaitement corrélés, la copule est

$$F(x,y) = \min\{u,v\} \quad (14)$$

Et finalement, la copule de Gumbel comme exemple de copule plus compliquée :

$$F(x,y) = \exp \left[ - \left( (-\ln(u))^\theta + (-\ln(v))^\theta \right)^{\frac{1}{\theta}} \right] \quad (15)$$

avec  $\theta \geq 1$ .

La difficulté de la méthode est toutefois de trouver une copule bien adaptée pour chaque probabilité conjointe et d'ajuster les paramètres de la copule. Sadegh et al. (2017) proposent une boîte à outils Matlab pour cette tâche. La qualité de l'ajustement des différentes copules peut être évaluée avec différents indicateurs, comme le test de Kolmogorov-Smirnov (Zar, 2010; Haixia et al, 2023), la statistique de Carmé-Von Mises (Genest et al., 2006; Mazas et Hamm, 2017), critère d'information d'Akaike (Cavanaugh et Neath, 2019; Massima et al., 2015; Sadegh et al., 2017), critère d'information bayésien (Neath et Cavanaugh, 2011; Massima et al., 2015; Sadegh et al., 2017) ou la racine de l'erreur quadratique moyenne (Sadegh et al., 2017).

La méthode avec copule a été utilisée pour la probabilité conjointe de  $H_s$  et SWL dans de nombreuses publications, par exemple :

- Li et al. (2014) pour calculer les conditions au large de la côte des Pays-Bas;
- Masina et al. (2015) pour la submersion marine de la région de Ravenne en Italie;
- Rueda et al. (2016) pour les conditions au large de Santander en Espagne;
- Mazas et Hamm (2017) pour les conditions au large de Brest en France;

- Marcos et al. (2019) pour les conditions à ~6000 sites au large des cinq continents (en modélisant  $H_s$  et SWL à partir de la réanalyse météorologique ERA-Interim);
- Oo et al. (2022) pour modéliser l'érosion de la plage de Gold Coast en Australie;
- Haixia et al. (2023) pour les cyclones tropicaux atteignant l'île de Hainan en Chine.

Les calculs de probabilités conjointes utilisant des copules ont déjà été utilisés au Québec, par exemple Favre et al. (2004) pour le débit de pointe de rivières, et Didier et al. (2018) pour la submersion côtière dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent.

### **3b) Méthode JOIN-SEA**

Une méthode particulière a été développée avec le logiciel JOIN-SEA en Angleterre par HR Wallingford et l'Université de Lancaster (Hawkes et al., 1998, Hawkes et al., 2002). La méthode est basée sur l'estimation de la corrélation des événements extrêmes  $H_s$  et SWL et des distributions de  $H_s$  et SWL, puis une simulation Monte-Carlo de centaines d'années sur lequel les statistiques sont calculées. La période des vagues est intégrée dans l'analyse en calculant en premier la pente des vagues, puis établissant la distribution des pentes des vagues et la corrélation des pentes des vagues et de  $H_s$ .

La corrélation entre  $H_s$  et SWL est calculée en transformant en premier  $H_s$  et SWL de manière à ce que les valeurs suivent une distribution normale, puis en calculant un coefficient de corrélation ajusté pour chaque niveau de probabilité (par pas de 0.025).

Ce logiciel JOIN-SEA effectue les étapes suivantes :

- À partir d'enregistrements conjoints de  $H_s$ , SWL, et période des vagues (seulement les conditions à chaque marée haute), ajuster les distributions de chaque paramètre (GDP pour partie extrême, par défaut au-dessus de 95%, en-dessous une distribution empirique) et calculer les corrélations pour les différents niveaux de probabilité.
- Simuler les événements sur une durée 10 fois plus longue que la période de retour recherchée (par exemple, pour une période de retour de 100 ans, simulation de 1000 ans, c'est-à-dire 706 000 événements de marée haute), en supposant une corrélation constante au-dessus d'un niveau de probabilité sélectionné.
- Calculer les statistiques de période de retour conjointe à partir des données simulées.
- Optionnellement, le logiciel calcule aussi les statistiques d'extrême pour quatre variables "structure" (taux de franchissement, run-up, taille pour enrochement, force des vagues sur murs verticaux) selon les méthodes standards utilisées en Angleterre à l'époque.

Le logiciel peut adapter les calculs à la présence de deux populations d'événements avec des corrélations  $H_s/SWL$  significativement différentes pour différents niveaux de probabilité. Le guide d'utilisation indique qu'au moins quatre années d'enregistrements simultanés  $H_s$  et SWL sont nécessaires (HR Wallingford, 1998). JOIN-SEA est composé de plusieurs programmes écrits en Fortran 77. Nous n'avons pas trouvé sur internet le code source ou les programmes compilés.

### **3c) Autres méthodes**

D'autres méthodes statistiques ont été développées pour le calcul de statistiques conjointes dans différents contextes. Mais comme elles n'ont jusqu'à présent pas été utilisées pour les calculs de probabilités de vagues et de niveaux d'eau, elles ne sont que brièvement mentionnées dans cette revue de littérature.

Les *modèles de dépendance des extrêmes* estiment un coefficient de dépendance  $\eta$  pour la queue des distributions (quand  $\eta = 1$  les distributions sont asymptotiquement dépendantes), puis l'appliquent pour calculer une probabilité conjointe (Schlather, 2001; Jonathan et Ewans, 2013). Le principal désavantage de cette méthode est que les résultats doivent être examinés attentivement, car toute mauvaise compréhension de l'hypothèse de dépendance asymptotiquement peut changer dramatiquement les périodes de retour conjointes (Garcia et al., 2015).

Les *modèles conditionnels d'extrême* examinent la distribution d'une variable après l'autre en posant des conditions aux autres variables. Pour un cas avec deux variables, il s'agit de modéliser successivement la distribution de Y pour les cas où  $X = x_1, X = x_2$ , etc., puis de modéliser successivement la distribution de X pour les cas où  $Y = y_1, Y = y_2$ , etc. (Garcia et al., 2015). Souvent les données sont transformées en premier pour suivre une distribution de Gumbel, l'analyse statistique effectuée, puis les valeurs obtenues pour les différentes périodes de retour sont reconvertis dans l'échelle d'origine (Heffernan et Tawn, 2004). Cette méthode a été appliquée par exemple aux précipitations menant à des inondations (Wyncoll et al., 2013). Comme c'est une méthode multivariée qui est adaptée pour traiter plus que deux variables, Gouldby et al. (2014) l'a utilisée pour la probabilité conjointe avec sept variables ( $H_s$ , période et direction vagues, vitesse et direction du vent, SWL, surcote).

Les *modèles paramétriques* essaient de décrire la dépendance des queues de distribution avec plusieurs paramètres empiriques, généralement après avoir modifié les données pour qu'elles suivent une distribution particulière, telle qu'une distribution normale, une distribution de Fréchet, etc. (Garcia et al., 2015). Ces modèles paramétriques ont surtout été utilisés pour relier les hauteurs des vagues aux périodes des vagues (Ferreira et Guedes Soares, 2002; Montbet et al., 2007).

La FEMA et l'USACE ont développé une *Joint Probability Method* pour les risques d'inondation liés aux tempêtes tropicales atteignant les États-Unis (FEMA, 2016b). Toutefois, cette méthode ne s'intéresse pas directement à la probabilité conjointe de  $H_s$  et SWL, mais prédit la probabilité qu'une tempête tropicale avec certaines caractéristiques (vitesse de déplacement de la tempête, direction de mouvement de la tempête par rapport à la côte, diamètre de la tempête, déficit de pression au centre de la tempête, etc.) atteigne un certain secteur de la côte. Les conséquences de cette tempête sont ensuite simulées avec un modèle numérique qui tient compte des particularités locales de la côte (FEMA, 2016b).

## 6 Calcul des probabilités conjointes des vagues de tempêtes et des niveaux d'eau

### 6.1 Vue d'ensemble de la méthode avec copule

Comme indiqué par la revue de littérature (cf. chapitre 5), c'est principalement la méthode avec copule qui est utilisée depuis une dizaine d'année dans les publications scientifiques pour les calculs de probabilité conjointe. C'est pourquoi, cette méthode est traitée ici, avec le développement d'outils pour effectuer l'analyse statistique dans Matlab et des exemples d'utilisation.

Le calcul des probabilités conjointes selon la méthode avec copule s'effectue avec les six étapes suivantes :

- 1) Création d'un jeu de données avec des observations communes SWL (niveaux d'eau) et  $H_s$  (hauteurs de vagues), généralement en se limitant aux marées hautes;
- 2) Détermination de la fonction de répartition (ou les périodes de retour) de SWL;
- 3) Détermination de la fonction de répartition (ou les périodes de retour) de  $H_s$ ;
- 4) Conversion du jeu de données commun SWL- $H_s$  de l'espace d'observation (données en mètres) à l'espace probabiliste (probabilité d'occurrence entre 0 et 1) en utilisant les deux fonctions de répartition;
- 5) Ajustement de plusieurs fonctions copules et sélection de la copule reproduisant le mieux les données;
- 6) Calcul de la probabilité conjointe avec cette copule pour de nombreuses combinaisons de SWL et  $H_s$ , puis détermination de la courbe (isoligne) SWL- $H_s$  ayant la probabilité conjointe correspondant à la période de retour (nombre d'années) souhaitée.

Les trois premières étapes sont décrites en détail dans respectivement les sections 6.2, 6.3 et 6.4. Les étapes 4 à 6 sont décrites en détail dans la section 6.5. La section 6.7 présente des exemples d'utilisation avec l'ensemble des données SWL et  $H_s$  enregistrées par les AWACs aux sites A, B, E et F.

Enfin, la section 6.7 résume pas à pas les opérations du traitement dans Matlab. Les formules (routines) utilisées pour le traitement sont brièvement décrites à la section 6.9 et leur syntaxe d'appel est expliquée à l'annexe 3.

Dans le texte ci-dessous, les fonctions Matlab qui accomplissent les différentes tâches sont indiquées [entre crochets].

### 6.2 Préparation des données

Il est nécessaire d'avoir des données couvrant des années entières, incluant la période hivernale. En effet, le climat de vagues varie significativement selon les saisons. Les surcotes sont aussi influencées par les événements météorologiques extrêmes, qui sont plus fréquents en hiver. Même le niveau marin peut varier de quelques centimètres selon les saisons.

### **Contrôle de qualité des données**

Il est essentiel d'effectuer un contrôle de qualité sur toutes les données utilisées pour calculer la probabilité conjointe, que les données proviennent de son propre projet de recherche, de projets de recherche précédents, ou de bases de données publiques comme les niveaux d'eau fournis par le Service hydrographique du Canada. Il est notamment recommandé d'effectuer un examen visuel des données.

Pour les niveaux d'eau (SWL), le plus efficace est regarder la série temporelle des surcotes (différence entre les observations et les prédictions de marée), car cela permet de déceler facilement des variations d'altitude du marégraphe ou des changements de fuseau horaire de l'horloge (ces problèmes peuvent se produire si les données proviennent de plusieurs déploiements).

Pour les hauteurs de vagues ( $H_s$ ), il peut être utile d'examiner le rapport entre hauteur et période des vagues, ainsi que la hauteur des vagues en fonction des différentes directions de provenance (et les fetchs dans ces directions).

Il faut aussi examiner visuellement les séries temporelles autour des événements majeurs, c'est-à-dire les plus fortes vagues, les plus hauts niveaux d'eau, et les plus fortes surcotes.

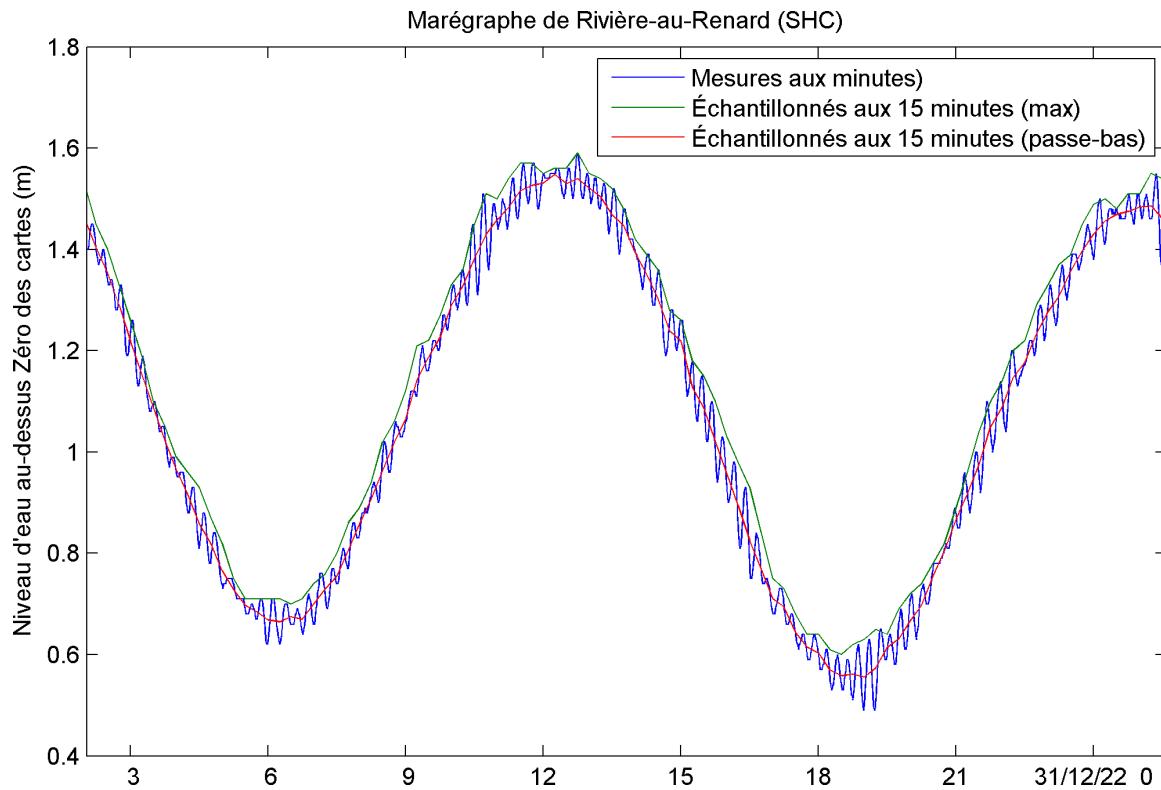
### **Données de SWL**

Les données de niveaux d'eau (SWL) proviennent idéalement du même site que les données de vagues. Toutefois, il est aussi possible d'utiliser les données d'un marégraphe installé à proximité, si la précision de SWL est meilleure pour le marégraphe ou si la série de donnée de celui-ci est nettement plus longue.

Les données de SWL couvrant une période de plusieurs années ont souvent été enregistrées à différents pas de temps selon les années (par exemple les données de marégraphe du Service hydrographique du Canada). La fonction `[slev_time.m]` permet de rééchantillonner avec un pas de temps constant et d'ajouter des valeurs NaN (indiquant une valeur erronée ou absente dans Matlab) durant les intervalles de temps sans enregistrement.

Les données de SWL devraient être possibles à un pas de temps de 15 ou 20 minutes, mais un pas de temps jusqu'à une heure est aussi acceptable. Des intervalles jusqu'à 1 heure sans données peuvent être comblés par interpolation linéaire. `[slev_time.m]` Plusieurs options existent pour des intervalles plus longs sans données :

- a) L'intervalle est laissé vide, c'est-à-dire la période est retirée des analyses;
- b) Pour des intervalles jusqu'à 4 heures, SWL est calculé comme l'addition des prédictions de marées pour le site et de l'interpolation de la surcote calculée pour le même site. `[slev_fill.m]` Dans ce cas, l'interpolation simple de la série SWL devrait être effectuée seulement pour des intervalles jusqu'à 30 minutes. `[slev_time.m]`
- c) SWL est calculé comme l'addition des prédictions de marées pour le site et de la surcote calculée à partir des données d'un autre marégraphe à proximité. `[slev_fill.m]` et `[phase_adjust.m]`



*Figure 63 – Illustration de la différence du sous-échantillonnage d'un niveau d'eau, qui présente des oscillations de ~15 minutes, soit en prenant le maximum de chaque intervalle (trait vert), soit en appliquant auparavant un filtre passe-bas (trait rouge).*

Il y a souvent des oscillations de 10-20 minutes dans les enregistrements de niveaux d'eau. De plus, certains enregistrements de marégraphes sont affectés par les vagues, c'est-à-dire le puit de tranquillisation et la période de moyennage ne suffisent pas pour enlever toute l'influence des vagues et mesurer seulement SWL. C'est pourquoi lorsque les données de marégraphes sont disponibles à des pas de temps de 5 minutes ou plus courts, il est recommandé d'appliquer un filtre passe-bas avec une période de coupure de 30 minutes avant de sous-échantillonner à 15 minutes. Une méthode plus conservatrice serait de sous-échantillonner à 15 minutes en prenant la valeur maximale de l'intervalle de -7,5 à +7,5 minutes. [`slev_time.m`, qui propose les deux options] La Figure 63 illustre la différence entre les deux options.

Pour les longues séries de donnée SWL, il est recommandé de retirer la tendance linéaire de SWL avant l'analyse statistique. L'effet d'une future hausse du niveau marin relatif devra être considéré après le calcul de la probabilité conjointe. [`cooc_prep.m`] retire par défaut la tendance linéaire de SWL si la longueur de la série est d'au moins 3 ans. Dans ce cas les données SWL sont ajustées au niveau du 1<sup>er</sup> juillet de la dernière année de la série de données.

### **Données de vagues**

Les données de vagues proviennent idéalement d'observations. Comme les longues séries d'observations des vagues sont rares, il est aussi possible d'utiliser des données de vagues provenant de modélisations numériques. Mais dans ce cas, il est essentiel que

le modèle de vagues ait été validé avec des observations. De plus, l'utilisation de données modélisées augmente l'incertitude des périodes de retour obtenues par l'analyse statistique.

Enfin, certaines études (par exemple, Oo et al., 2022) ont utilisé principalement des observations, mais en comblant les longs intervalles sans données par de la modélisation (les courts intervalles sans données sont simplement interpolés). Le modèle utilisé doit naturellement être validé avec les observations pour éviter les différences entre les périodes avec données et les périodes utilisant la modélisation.

Le paramètre de vagues principal est la hauteur significative des vagues ( $H_s$ ), calculée soit par la méthode spectrale ( $H_{m0}$ ) soit par la méthode zero-crossing ( $H_{1/3}$ ). Les deux méthodes donnent des résultats similaires. De nos jours  $H_{m0}$  est souvent préféré, mais ce n'est pas une obligation.

Il est recommandé d'inclure aussi la direction des vagues, si ce paramètre est disponible. Le calcul de probabilité conjointe avec la méthode avec copule n'utilise pas la direction des vagues. Toutefois, il est possible de créer des sous-ensembles (filtrés selon la direction) du jeu de données complet, puis de répéter l'analyse statistique pour chaque sous-ensemble. À noter que dans ce cas il faudra aussi une fonction de répartition de  $H_s$  pour chaque direction.

La période des vagues peut être incluse dans le jeu de donnée, mais elle ne sera pas utilisée dans l'analyse statistique. Si la période des vagues de tempête pour une période de retour donnée est nécessaire, elle doit être estimée à partir de  $H_s$  et de la pente typique des vagues de tempêtes (rapport entre hauteur et longueur des vagues), par exemple la pente moyenne de 1% des vagues les plus grandes (Hawkes et al., 1998).  
[wave\_slope.m, cooc\_prep.m, subsample\_return.m]

Les données de vagues sont normalement au pas de temps d'une heure, mais un pas de temps jusqu'à trois heures peut être acceptable. Des intervalles jusqu'à trois heures sans données peuvent être comblés par interpolation linéaire. Des intervalles plus longs sont laissés vides, c'est-à-dire que la période est retirée des analyses. Cette interpolation est effectuée par la fonction [cooc\_prep.m].

### ***Préparation d'un jeu de données commun SWL- $H_s$***

Pour l'analyse des probabilités conjointes, il faut préparer une série temporelle conjointe de SWL et  $H_s$ . Il est possible de composer une série temporelle continue, soit au pas d'échantillonnage de SWL ou au pas d'échantillonnage de  $H_s$  (15, 20 ou 60 minutes) en interpolant au besoin  $H_s$ . [cooc\_prep.m avec l'option "ts"]. Cela est utile pour visualiser l'ensemble des données ou pour visualiser la relation les vagues de tempête et les surcotes. [cooc\_phase.m]

Toutefois, seulement les données à marée haute sont généralement pertinentes pour la probabilité conjointe de SWL et  $H_s$ . De plus, cela permet de considérer chaque événement de marée haute comme statistiquement indépendant, alors que des enregistrements à toutes les heures auraient une forte corrélation temporelle. Les étapes pour obtenir ce jeu de données sont (1) effectuer une analyse harmonique de SWL puis de calculer les prédictions de marée pour déterminer les positions des marées hautes, (2) pour chaque marée haute, trouver le maximum de SWL à  $\pm 2$  heures de la marée haute; (3) trouver le

maximum de  $H_s$  à  $\pm 3$  heures de ce maximum de SWL. La Figure 64 illustre ces opérations. [cooc\_prep.m].

Que ce soit une série temporelle continue ou seulement les événements de marée haute, la direction et la période des vagues (si disponibles) ainsi que la surcote sont incluses dans le jeu de données.

Après la préparation du jeu de données commun SWL- $H_s$ , il est recommandé d'examiner la corrélation entre SWL et  $H_s$  avant l'analyse statistique proprement dite. Une analyse graphique peut être réalisée en établissant soit sous forme de tableau un d'histogramme bidimensionnel, où le nombre d'événements correspondent à différentes classes de SWL et de  $H_s$ , soit un graphique XY des données avec code de couleur pour indiquer la densité des points et contours de même densité (Figure 65). [cooc\_stat.m] Le degré de dépendance peut également être évalué quantitativement avec le coefficient de corrélation  $r$  et avec le Tau de Kendall (cf. section 5.3.2). [cooc\_stat.m]

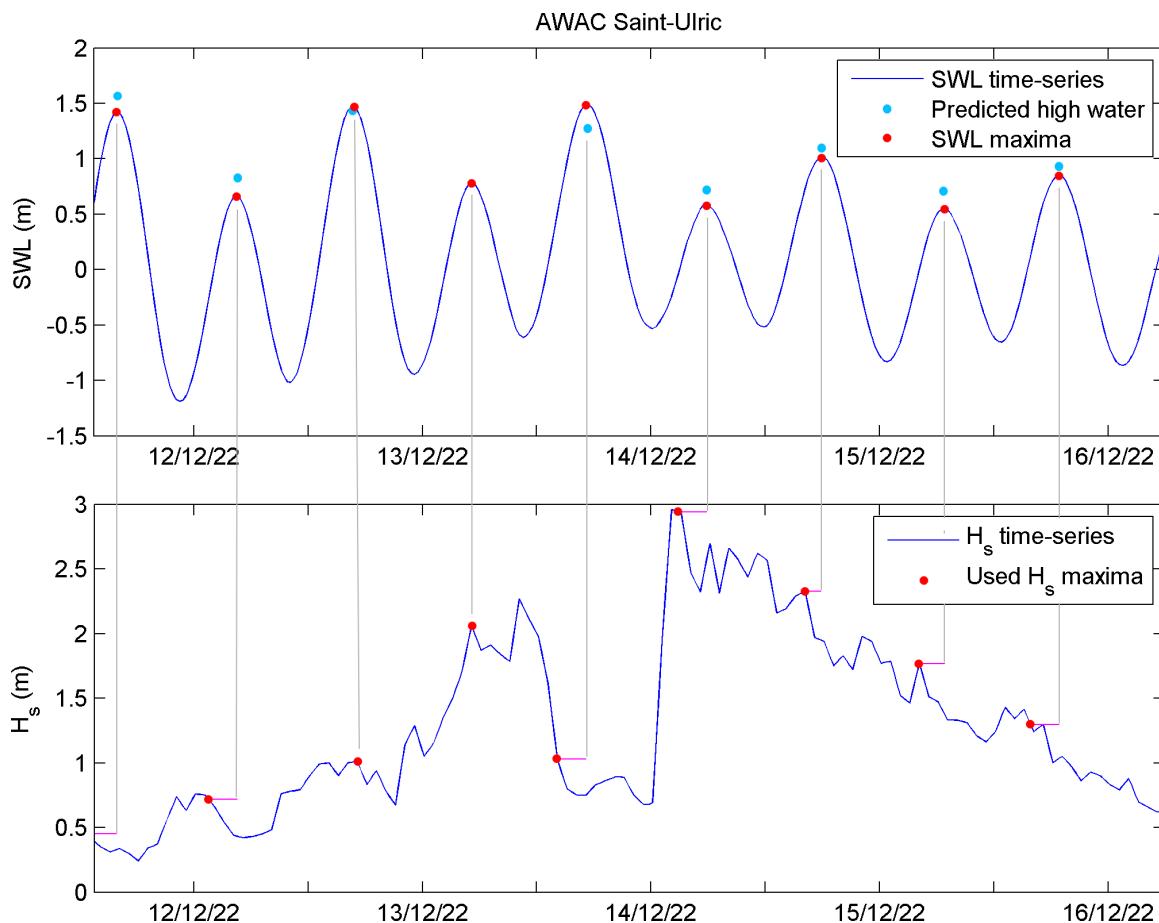
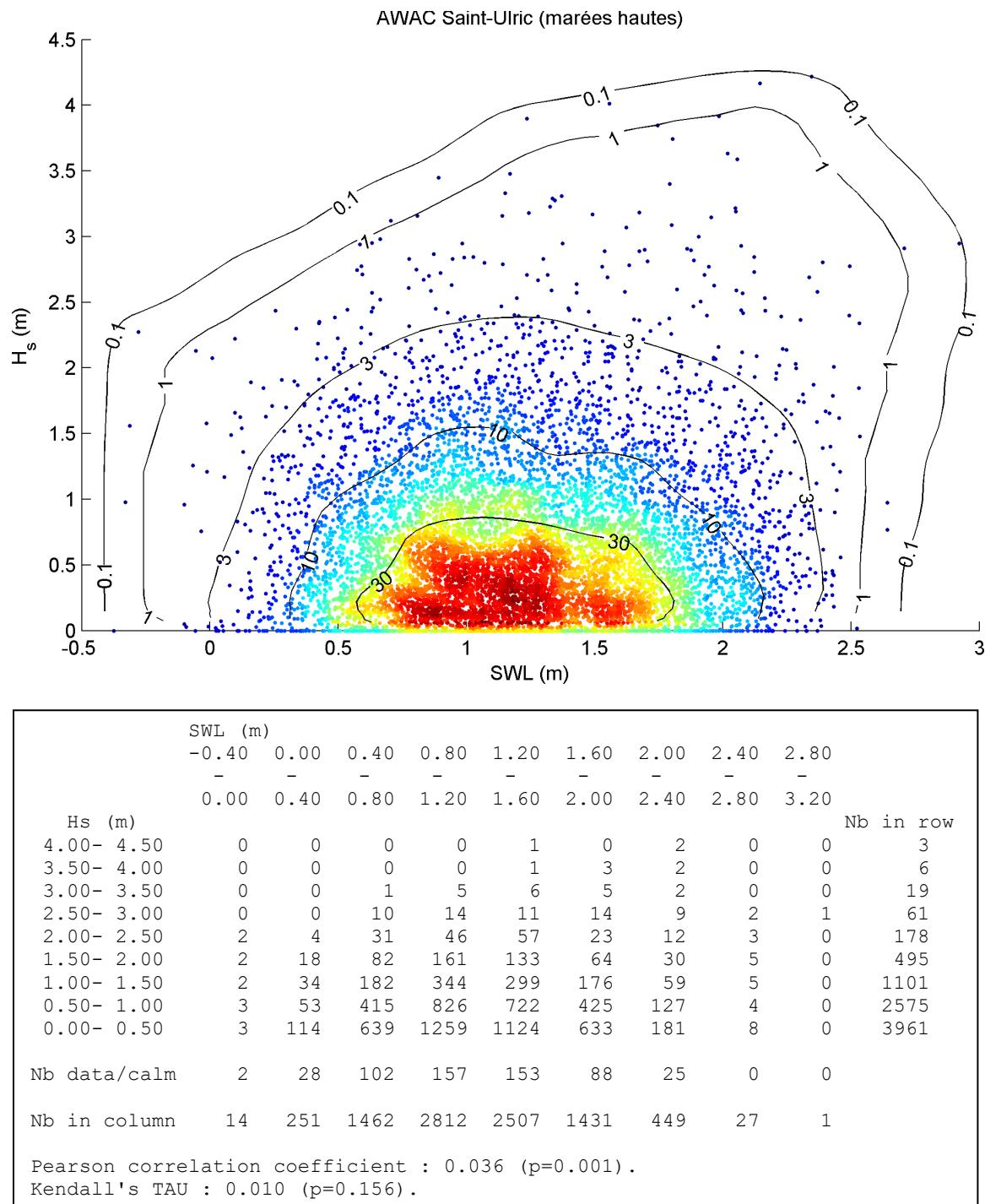


Figure 64 – Illustration du fonctionnement de la fonction cooc\_prep.m, qui sélectionne SWL et  $H_s$  pour chaque marée haute. En premier (panneau du haut), la fonction trouve le maximum de SWL (point rouge) qui est à  $\pm 2$  heures de chaque marée haute prédite (point bleu clair). Ensuite, la fonction trouve le maximum de  $H_s$  (point rouge sur le panneau inférieur) à  $\pm 3$  heures du maximum de SWL.

Cet examen préliminaire peut être réalisé soit pour les événements de marée haute, soit pour une série temporelle continue aux 20 ou 60 minutes; ainsi qu'en utilisant soit SWL, soit la surcote (exemples aux Figures 65 à 67).



*Figure 65 – Exemple de graphique et statistiques (coefficient de corrélation  $r$  et Tau de Kendall) produits avec la fonction cooc\_stat.m pour illustrer la relation entre  $H_s$  et SWL (données de l'AWAC de Saint-Ulric). La couleur des points et les courbes du graphique représente la densité des points. L'exemple utilise un enregistrement pour chaque marée haute.*

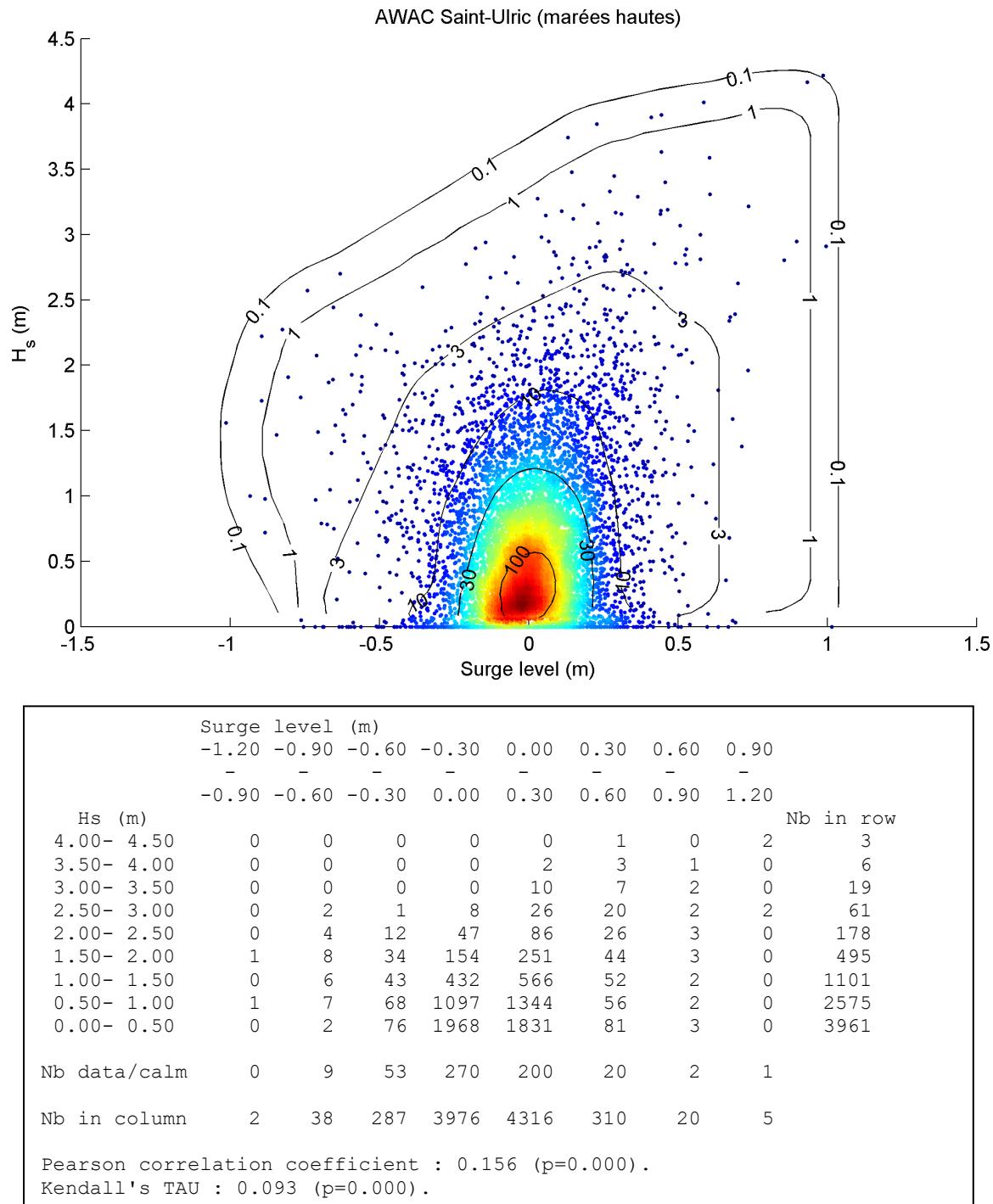


Figure 66 – Exemple de graphique et statistiques (coefficient de corrélation  $r$  et Tau de Kendall) produits avec la fonction cooc\_stat.m pour illustrer la relation entre  $H_s$  et la surcote (données de l'AWAC de Saint-Ulric). La couleur des points et les courbes du graphique représente la densité des points. L'exemple utilise un enregistrement pour chaque marée haute.

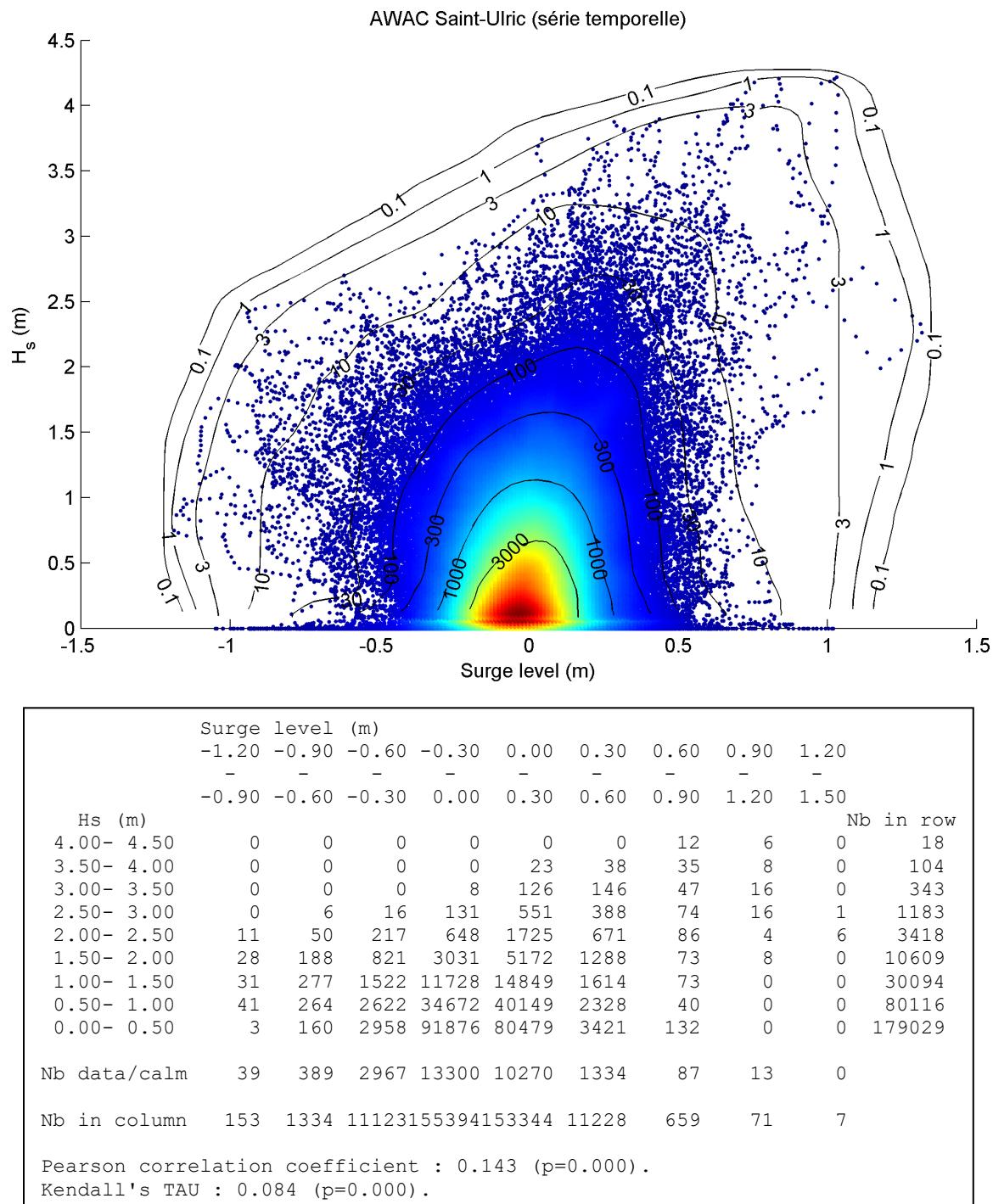


Figure 67 – Exemple de graphique et statistiques (coefficient de corrélation  $r$  et Tau de Kendall) produits avec la fonction cooc\_stat.m pour illustrer la relation entre  $H_s$  et la surcote (données de l'AWAC de Saint-Ulric). La couleur des points et les courbes du graphique représente la densité des points. L'exemple utilise un enregistrement toutes les 20 minutes.

### 6.3 Probabilité de SWL

La méthode avec copule a besoin de la fonction de répartition de SWL. Toutes les données de SWL disponibles peuvent être utilisées pour cela, pas seulement les données de SWL quand  $H_s$  était aussi enregistré.

La fonction de répartition de SWL peut être obtenue (1) en ajustant une loi de distribution aux maxima annuels, (2) en ajustant une loi de distribution aux 5 plus hautes valeurs de chaque année, ou (3) avec la *revised joint probability method* (RJPM, cf. section 5.4). Pour les options (1) et (2), la fonction [`surge_find.m`] peut extraire les événements d'une série temporelle, mais nous n'avons pas écrit de fonction Matlab pour l'ajustement d'une distribution. Si l'utilisateur a déterminé les paramètres d'ajustement pour une des lois de distribution disponible dans la boîte à outils *Statistics Toolbox* de Matlab, la fonction [`cooc_cdf.m`] permet ensuite d'obtenir la fonction de répartition. Un logiciel comme HYFRAN-Plus peut également être utilisé pour cela. La fonction [`slev_rjpm.m`] effectue l'option (3). Laquelle des options est utilisée et quelle loi de distribution est choisie est un choix personnel de l'utilisateur. Nous recommandons l'option (3), c'est-à-dire la *revised joint probability method* (RJPM).

La fonction de répartition doit être fournie pour la suite du traitement dans une matrice à deux colonnes, avec la valeur de SWL (m) et la période de retour correspondante (ans). La fonction [`slev_rjpm.m`] produit une telle matrice avec un pas de 1 mm pour SWL. Cette matrice peut aussi se limiter à quelques lignes, par exemple les valeurs de SWL pour les périodes de retour 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 ans; les valeurs intermédiaires seront interpolées avec une fonction spline. [`cooc_cdf.m`]

La fonction de répartition doit couvrir non seulement les valeurs extrêmes, mais toutes les valeurs de SWL existants dans le jeu de données commun SWL- $H_s$ ., car la fonction de répartition servira à convertir l'ensemble du jeu de données de l'espace d'observation (données en mètres) à l'espace probabiliste (probabilité d'occurrence entre 0 et 1). Toutefois, la loi de distribution ajustée aux valeurs extrêmes de SWL diverge souvent de la fréquence des observations pour les plus faibles niveaux de SWL. Par conséquent, il est recommandé de calculer une fonction de répartition empirique à partir des données de SWL aux marées hautes, puis de combiner celle-ci avec la fonction de répartition des valeurs extrêmes (Figure 68). Comme une fonction de répartition empirique basée sur seulement quelques années d'observation présente souvent des petites irrégularités, il est recommandé d'appliquer une moyenne mobile ou un filtre passe-bas pour lisser la fonction. [`empirc_cdf.m`]

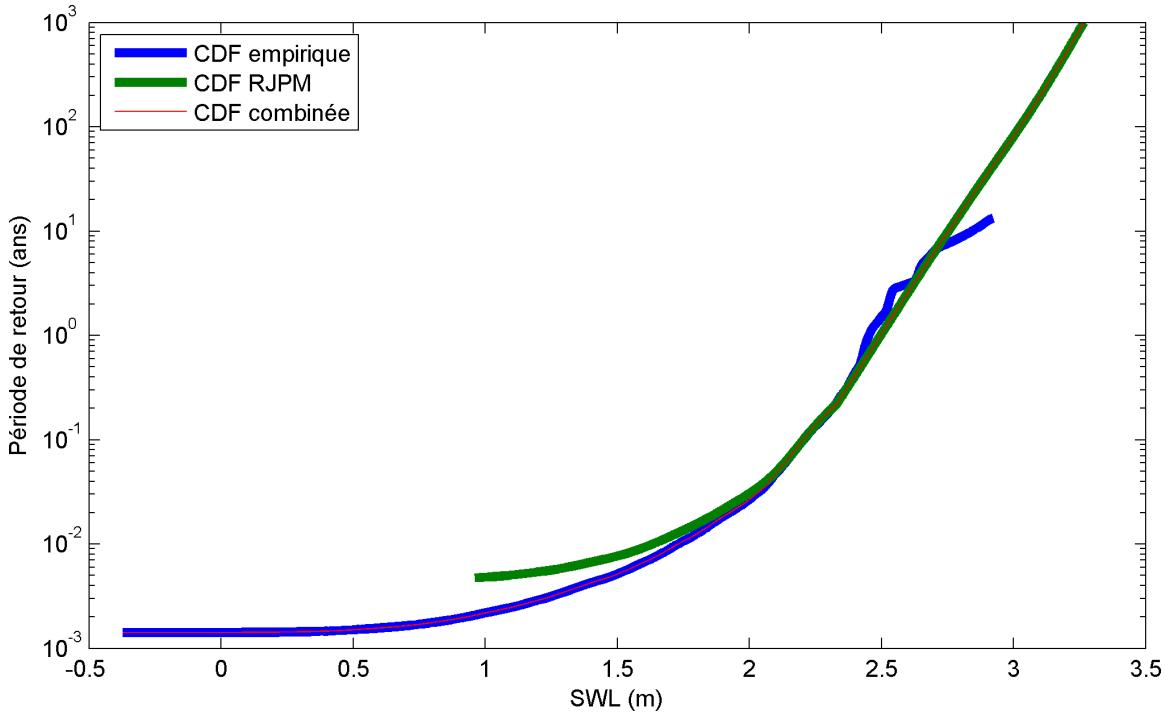


Figure 68 – Exemple de fonction de répartition pour SWL exprimée en période de retour (AWAC de Saint-Ulric), avec la fonction de répartition ajustée aux valeurs extrêmes selon la revised joint probability method (RJPM) calculée avec `slev_rjpm.m` (CDF RJPM), la fonction de répartition empirique calculée avec `empiric_cdf.m` (CDF empirique) et la fonction de répartition combinant les deux précédentes (CDF combinée). La figure est produite par la fonction `empiric_cdf.m`.

## 6.4 Probabilité de $H_s$

La méthode avec copule a besoin de la fonction de répartition de  $H_s$ . La plupart des points indiqués à la section 6.3 pour la fonction de répartition de SWL s'appliquent aussi pour la fonction de répartition de  $H_s$ , et ces points ne seront pas répétés ici. Seule la méthode pour obtenir la fonction de répartition diffère.

Il s'agit en premier de trouver les plus fortes tempêtes en utilisant les règles décrites à la section 3.2 (Figure 19). [storm\_find.m] Ensuite il faut ajuster une loi de distribution, soit avec la fonction [storm\_fit.m], qui permet de tester les lois de Weibull, Gumbel, Extremum généralisée et Paréto généralisée, soit avec un logiciel comme HYFRAN-Plus.

Il faut aussi prolonger la fonction de répartition pour les faibles valeurs de hauteurs de vagues, en calculant une fonction de répartition empirique à partir des données de  $H_s$  aux marées hautes (ne pas utiliser la série temporelle complète de  $H_s$ ), puis de combiner celle-ci avec la fonction de répartition des valeurs d'extrême (Figure 69). [empiric\_cdf.m]

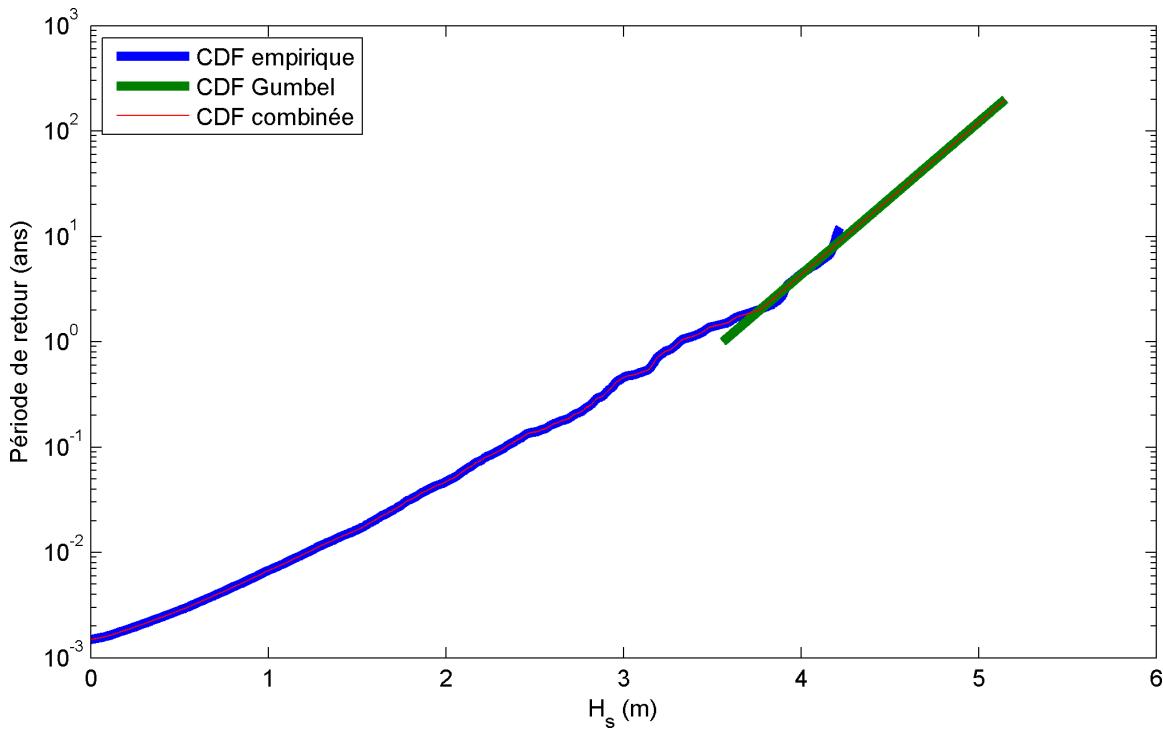


Figure 69 – Exemple de fonction de répartition pour  $H_s$  exprimée en période de retour (AWAC de Saint-Ulric), avec la fonction de répartition ajustée aux valeurs extrêmes avec la loi de Gumbel calculée avec `storm_fit.m` (CDF RJPm), la fonction de répartition empirique calculée avec `empiric_cdf.m` (CDF empirique) et la fonction de répartition combinant les deux précédentes (CDF combinée). La figure est produite par la fonction `empiric_cdf.m`.

## 6.5 Probabilité conjointe avec copule

En premier il s'agit de convertir le jeu de données commun SWL- $H_s$  pour chaque marée haute de l'espace d'observation (SWL et  $H_s$  exprimés en mètres) à l'espace probabiliste (SWL et  $H_s$  exprimés en probabilité que SWL ou  $H_s$  sont inférieurs ou égales à l'observation, avec des valeurs entre 0 et 1). Comme la fonction de répartition était exprimée en période de retour, celle-ci est tout d'abord convertie en probabilité avec la formule suivante

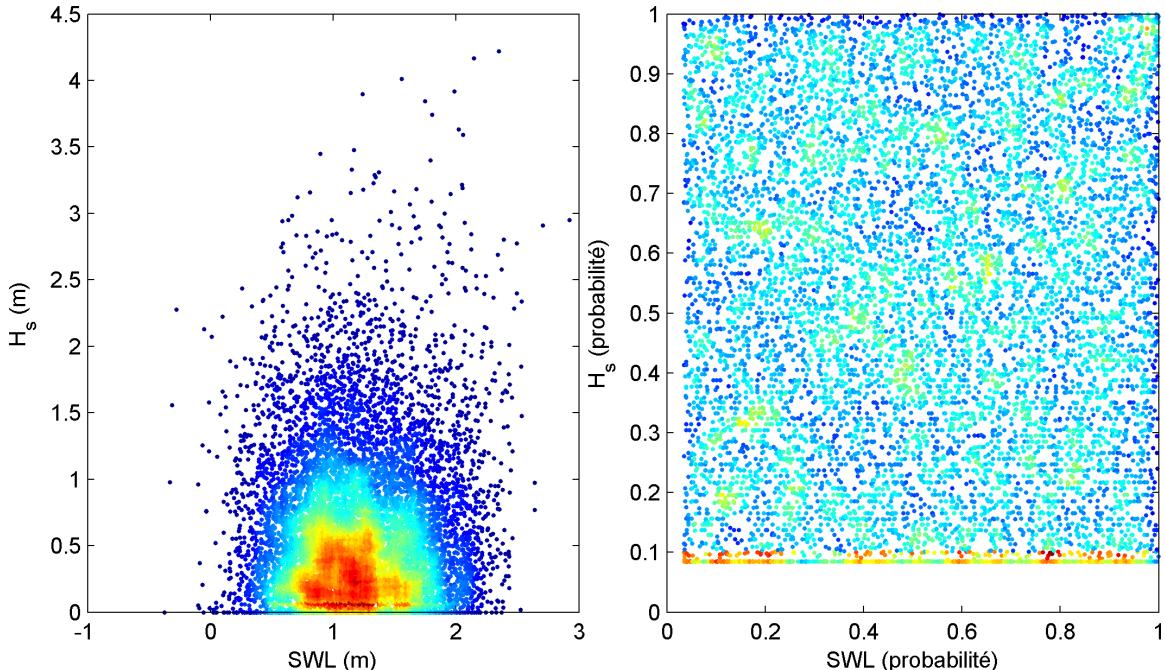
$$p = 1 - \frac{t}{365.25 r} \quad (16)$$

avec  $p$  la probabilité pour une durée  $t$  (en jours, c'est-à-dire si un événement se produit une fois par durée  $t$ ,  $p=0$ , si c'est 10 fois par durée  $t$ ,  $p=0.9$ ), et  $r$  la période de retour (en ans).

Il est important que la durée  $t$  soit plus courte que l'intervalle entre deux observations, sinon la formule ci-dessus génère pour certaines observations des valeurs  $p$  inférieures à zéro, c'est-à-dire à l'extérieur de la plage acceptable pour une valeur de probabilité. Pour un site avec des marées semi-diurnes et une observation marée haute, il est recommandé d'utiliser  $t = 0,5$  jour.

Il est également essentiel que les deux fonctions de répartition couvrent toute la plage des valeurs observées de SWL et de  $H_s$ , sinon certaines observations ne pourront pas être représentées dans l'espace probabiliste.

La fonction [cooc\_toproba.m] effectue ces opérations. Elle prend comme argument le jeu de données commun SWL- $H_s$  (dans l'espace d'observation), la fonction de répartition de SWL, la fonction de répartition de  $H_s$  et la durée  $t$ . Elle retourne le jeu de données commun SWL- $H_s$  dans l'espace probabiliste (Figure 70). L'argument de sortie inclut aussi les arguments d'entrée qui seront encore utilisés plus tard dans le traitement.



*Figure 70 – Exemple de conversion d'un jeu de données commun SWL- $H_s$  (AWAC de Saint-Ulric) avec cooc\_toproba.m, afin de passer de l'espace d'observation (à gauche) à l'espace probabiliste (à droite). La couleur indique la densité des points.*

Ensuite il faut essayer d'ajuster plusieurs fonctions copules à ce jeu de données. Les cinq fonctions copules suivantes (disponibles dans la boîte à outils "Statistics Toolbox") sont utilisées : Gumbel, Clayton, Frank, Gaussian et t. La copule Indépendance est aussi proposée à titre de comparaison (attention de ne pas utiliser ses résultats pour un cas réel). [cooc\_fit.m]

À noter, que la vitesse d'exécution est très rapide pour les copules de Gumbel, de Clayton et de Frank, et nettement plus lente pour les copules Gaussian et t. Afin de réduire le temps d'attente pour le calcul des courbes SLW- $H_s$  de même période de retour, la résolution est réduite par défaut pour ces copules Gaussian et t. [cooc\_fit.m]

Comme le but est d'obtenir les probabilités conjointes des événements extrêmes, il peut être intéressant de ne pas utiliser tous les événements (c'est-à-dire toutes les marées hautes) pour l'ajustement de la copule, mais seulement les événements ayant soit une

valeur extrême de SWL ou une valeur extrême de  $H_s$ . Les seuils pour la sélection des événements sont définis comme centiles de SWL ( $S_{SWL}$ ) et centiles de  $H_s$  ( $S_{Hs}$ ), qui sont calculés lors de la préparation des données avec [cooc\_prep.m]. Il s'agit de la valeur qui n'est pas dépassée un certain pourcentage du temps, par exemple 97 % pour SWL et 99 % pour  $H_s$ . Quatre manières de faire cette sélection sont implémentées dans [cooc\_fit.m] (Figure 71). L'option **select1** (la plus stricte utilisant le moins d'événements) sélectionne les événements pour lesquels  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  sont dépassés. L'option **select2** sélectionne les événements pour lesquels soit  $S_{SWL}$  et  $Lim_{Hs2}$  sont dépassés, soit  $Lim_{SWL2}$  et  $S_{Hs}$  sont dépassés.  $Lim_{Hs2}$  (et  $Lim_{SWL2}$ ) est à mi-distance entre  $S_{SWL}$  ( $S_{Hs}$ ) et la valeur minimale de SWL ( $H_s$ ). L'option **select3** sélectionne les événements pour lesquels soit  $S_{SWL}$  et  $Lim_{Hs2}$  sont dépassés, soit simplement  $S_{Hs}$  est dépassé. L'option **select4** sélectionne les événements pour lesquels  $S_{SWL}$  ou  $S_{Hs}$  sont dépassés.

La section 6.6 présente une comparaison des résultats selon les différentes options et les différents seuils  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$ . Par défaut, l'option **select1** avec  $S_{SWL} = 97\%$  et  $S_{Hs} = 99\%$  est utilisée.

La qualité de la prédiction avec chaque copule est évaluée avec trois métriques, le critère d'information d'Akaike (AIC), le critère d'information bayésien (BIC) et la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), qui sont calculées avec les formules suivantes. [cooc\_fit.m]

$$b = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i - o_i \quad (17)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (m_i - o_i - b)^2 \quad (18)$$

$$L = -0.5 \left( n \log(\Pi) + n \log(\sigma^2) + \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - o_i)^2}{\sigma^2} \right) \quad (19)$$

$$AIC = -2 L + 2 n \quad (20)$$

$$BIC = -2 L + \log(n) n \quad (21)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - o_i)^2}{n}} \quad (22)$$

avec  $o_i$  les valeurs observées,  $m_i$  les valeurs modélisées (ou prédictes),  $n$  le nombre d'observations,  $b$  le biais moyen (la moyenne des erreurs),  $\sigma^2$  la variance de l'erreur,  $L$  le logarithme de la fonction de vraisemblance.

Ces trois métriques AIC, BIC et RMSE évaluent seulement comment la copule prédit correctement la probabilité conjointe à partir des probabilités séparées de SWL et  $H_s$ . Ces métriques n'évaluent pas la qualité des probabilités de SWL et des probabilités  $H_s$ . Elles n'évaluent pas non plus si la probabilité conjointe correspond bien aux données !

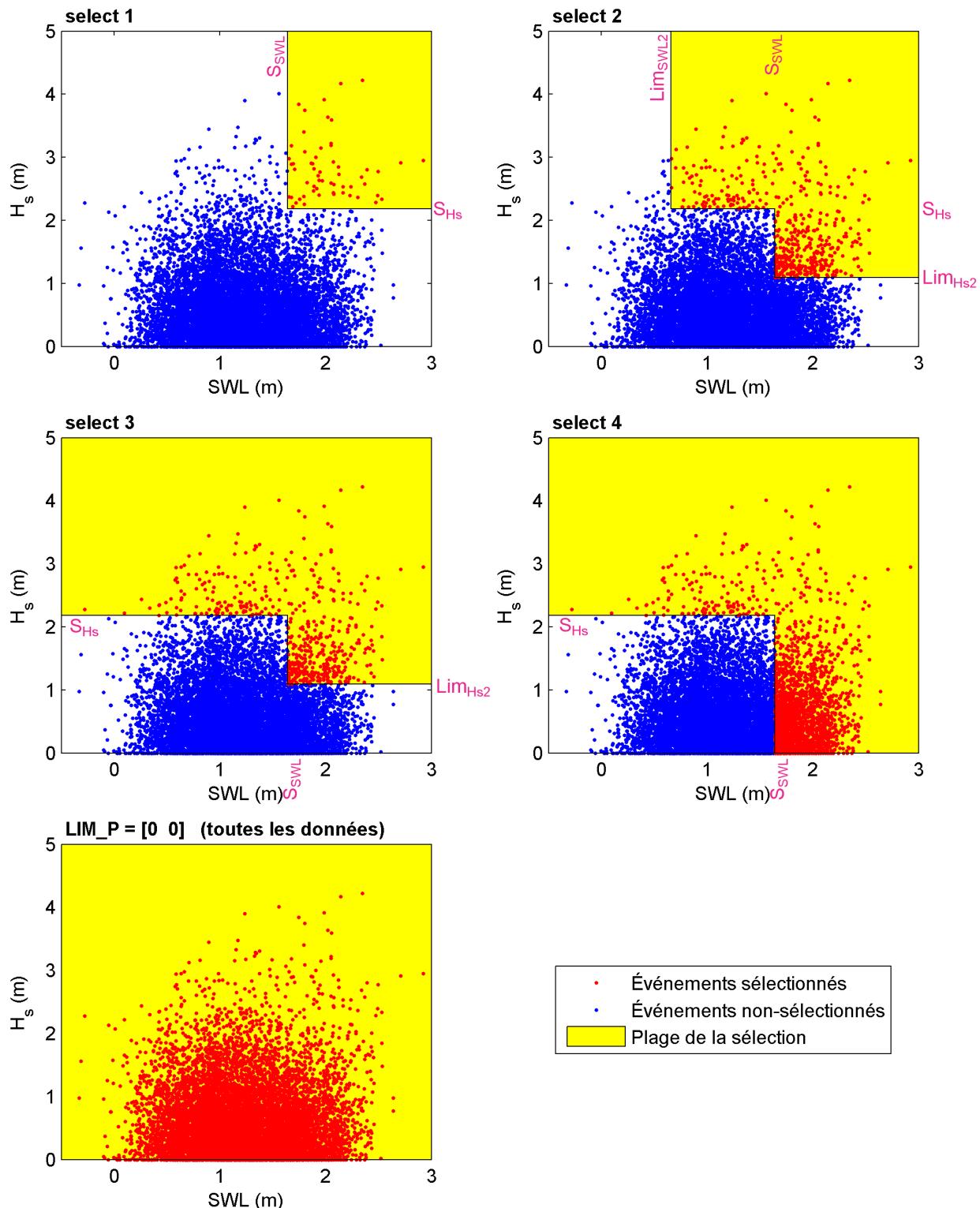


Figure 71 – Illustration avec le jeu de donnée de Saint-Ulric des options select1 / select2 / select3 / select4 / toutes les données de cooc\_fit.m pour la sélection des données, qui seront utilisées pour l'ajustement de la copule. Le nombre d'événements sélectionnés est respectivement 45, 497, 488, 1955 et 9648.

C'est pourquoi nous proposons des nouvelles métriques basées sur la comparaison des périodes de retour des événements observés, d'une part la période de retour prédicta selon le calcul de la probabilité conjointe avec copule ( $T_{cop}$ ), d'autre part la période de retour empirique selon les observations ( $T_{obs}$ ). Cette dernière est calculée de la manière suivante à partir de la durée totale des observations (D) :  $T_{obs} = D$  pour le plus fort événement,  $T_{obs} = D/2$  pour le deuxième plus fort événement, et  $T_{obs} = D/n$  pour le n-ième plus fort événement; le rang des événements est basé sur  $T_{cop}$  prédicta.

Comme la magnitude de  $T_{cop}$  et de  $T_{obs}$  (tous deux exprimées en années) varie fortement selon le rang de l'événement et selon la durée des observations, il est avantageux de ne pas considérer la différence absolue entre  $T_{cop}$  et  $T_{obs}$ , mais plutôt la différence relative ( $\Delta$ ) en calculant le logarithme en base 10 du ratio selon l'équation

$$\Delta_i = \log_{10}(T_{cop,i}/T_{obs,i}) \quad (23)$$

avec  $\Delta_i$  la différence relative pour l'événement de rang i,  $T_{cop,i}$  la période de retour prédicta de l'événement de rang i, et  $T_{obs,i}$  la période de retour empirique pour cet événement (c'est-à-dire  $D/i$ ).

Une valeur positive de  $\Delta_i$  signifie que la probabilité conjointe surestime la période de retour d'un facteur  $10^\Delta$ , une valeur négative de  $\Delta_i$  que la probabilité conjointe sous-estime la période de retour.

Une valeur positive de  $\Delta_i$  signifie également que la probabilité conjointe sous-estime SWL et  $H_s$  pour une période de retour donnée, une valeur négative de  $\Delta_i$  que la probabilité conjointe surestime SWL et  $H_s$  pour une période de retour donnée.

Il est ensuite possible de calculer le biais de la différence relative ( $T_{bias10}$ ), et la racine de la moyenne du carré de la différence relative ( $T_{rmse10}$ ). Ces deux métriques sont calculées seulement sur les 10 plus forts événements, puisque c'est la prédiction des valeurs extrêmes qui est d'intérêt ici.

$$T_{bias10} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \Delta_i \quad (24)$$

$$T_{rmse10} = \sqrt{\frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \Delta_i^2} \quad (25)$$

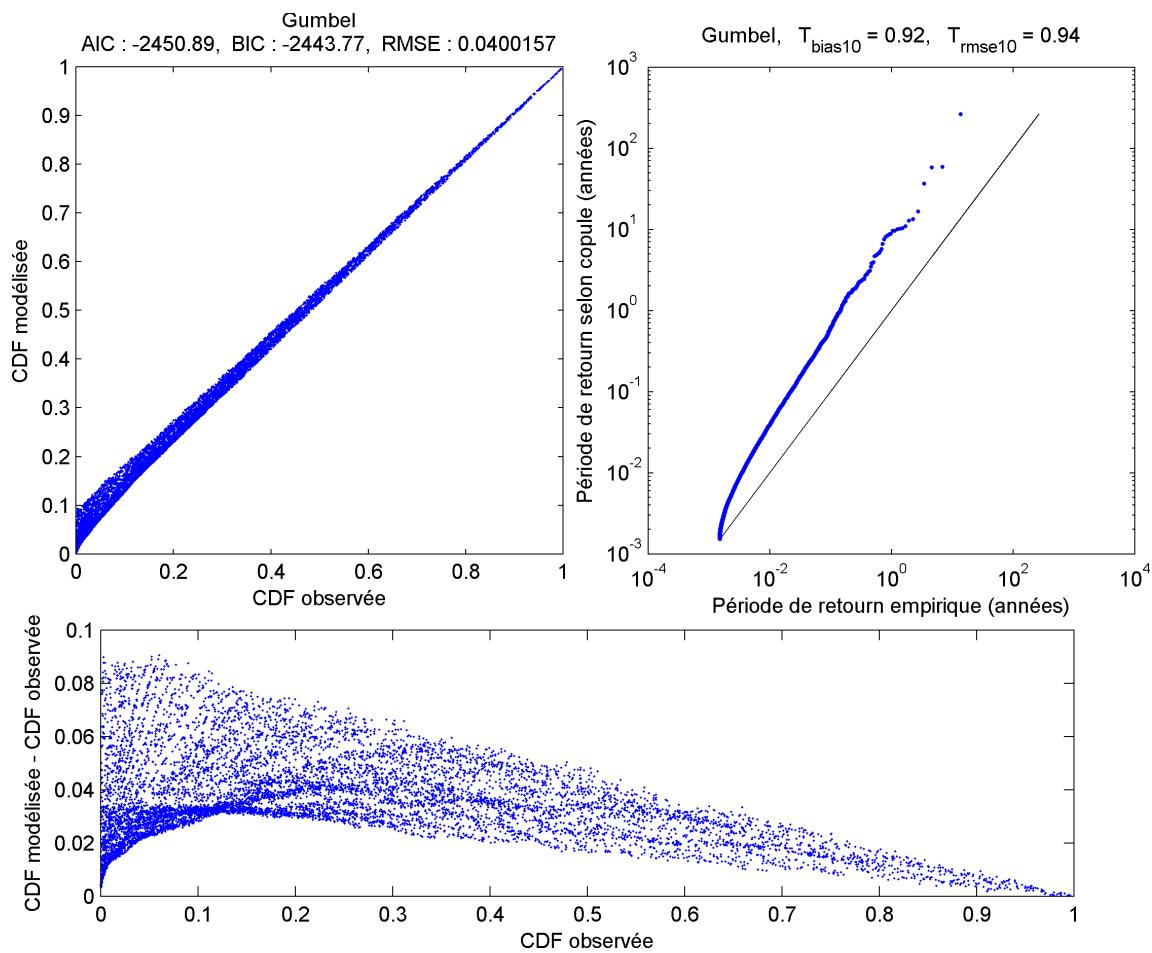
La copule reproduisant le mieux les données doit être sélectionnée par l'utilisateur grâce aux rangs des différentes fonctions copules selon AIC, BIC, RMSE,  $T_{bias10}$  et  $T_{rmse10}$ , la représentation graphique des erreurs (Figure 73) et l'allure des courbes SWL- $H_s$  pour les différents périodes de retour en fonction des observations (voir ci-dessous, Figure 74B). [\[cooc\\_fit.m\]](#)

Finalement, il faut calculer la probabilité conjointe avec cette copule pour de très nombreuses combinaisons de SWL et  $H_s$ , typiquement avec 1000 valeurs de SWL et 1000 valeurs de  $H_s$  distribuées linéairement sur tout l'intervalle des fonctions de probabilité, soit un million de combinaisons au total. Cette matrice de probabilité est convertie en matrice de période de retour, puis des courbes (isolignes) de combinaison SWL- $H_s$  avec la même période de retour sont tracés à partir de cette matrice (Figure 74A). Typiquement les courbes sont tracées pour les périodes de retour 2, 10, 20, 50, 75 et 100 ans. [cooc\_fit.m]

Il est ensuite possible de sous-échantillonner plusieurs points sur une des courbes de combinaison SWL- $H_s$  ayant la même période de retour afin d'avoir des valeurs précises pour les calculs de génie côtier (Figure 74C et 74D). [subsample\_return.m] Si la profondeur avait été indiquée lors de la préparation du jeu de données commun SWL- $H_s$  et que la pente moyenne des plus fortes vagues avait été calculée, la période des vagues de tempête est aussi estimée pour chaque combinaison SWL- $H_s$ . Toutefois, cette estimation n'est pas faite pour les vagues moyennes, car ces vagues peuvent avoir des pentes plus faibles, par exemple lorsqu'il s'agit de houle. [subsample\_return.m]

	AIC	BIC	RMSE	T_bias10	T_rmse10
Gumbel	3399.9 (3)	3405.4 (3)	0.3158 (3)	<b>0.87 (1)</b>	<b>0.88 (1)</b>
Clayton	3518.8 (6)	3524.3 (6)	0.3182 (6)	1.85 (4)	1.90 (4)
Frank	3447.4 (4)	3453.0 (4)	0.3170 (4)	1.84 (3)	1.89 (3)
Gaussian	<b>2943.9 (1)</b>	<b>2949.4 (1)</b>	<b>0.3023 (1)</b>	3.45 (6)	3.52 (6)
t	3490.0 (5)	3501.1 (5)	0.3182 (5)	1.49 (2)	1.53 (2)
Independence	3321.1 (2)	3321.1 (2)	0.3127 (2)	1.97 (5)	2.02 (5)

Figure 72 – Exemple des cinq métriques de qualité de la prédiction par les différentes fonctions copules : le critère d'information d'Akaike (AIC), le critère d'information bayésien (BIC) la racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), biais de la différence relative de la période de retour ( $T_{bias10}$ ), et la racine de la moyenne du carré de la différence relative de la période de retour ( $T_{rmse10}$ ). Le rang selon chaque métrique est indiqué entre parenthèses (1 = meilleure prédiction). Dans cet exemple, la copule Gaussian produit le meilleur ajustement à partir des probabilités séparées de SWL et  $H_s$ , mais c'est la copule de Gumbel dont les résultats correspondent le mieux aux données. Ce tableau est produit par la fonction cooc\_fit.m.



*Figure 73 – (Haut gauche) Exemple de comparaison entre la probabilité conjointe observée et la probabilité conjointe modélisée avec une copule (ici la copule de Gumbel). (Bas) Magnitude de l'erreur selon la probabilité conjointe observée. Les unités sont la probabilité (valeurs entre 0 et 1). (Haut droit) Comparaison entre la période de retour prédictive pour les événements observés et leurs périodes de retour empiriques. La figure est produite par la fonction cooc\_fit.m.*

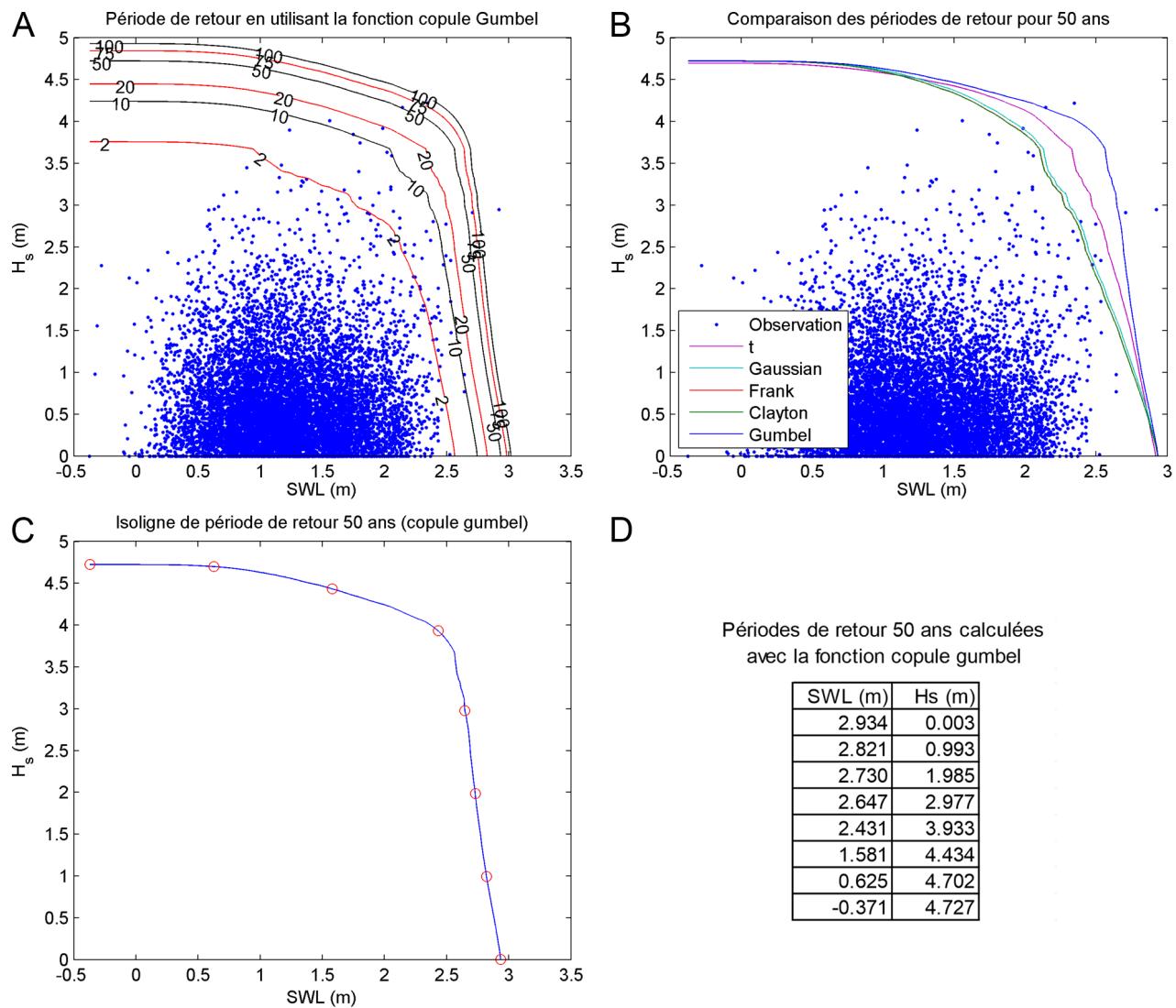


Figure 74 – Exemple de courbes SWL-H<sub>s</sub> avec même période de retour (AWAC de Saint-Ulric). (A) Prédictions avec la copule de Gumbel et option select4. (B) Comparaison des prédictions avec différentes fonctions copules. (C) Exemple de sous-échantillonnage de la courbe pour la période de retour de 50 ans avec la copule de Gumbel. (D) Paires SWL-H<sub>s</sub> sous-échantillonnées en C. Les panneaux A et B sont produits par la fonction cooc\_fit.m, le panneau C par la fonction subsample\_return.m.

## 6.6 Choix à faire pour le calcul des probabilités conjointes

Différents choix doivent être faits lors de l'utilisation de la méthode, qui affectent significativement les résultats obtenus. Il s'agit (1) du choix de la fonction de répartition de SWL, (2) du choix de la fonction de répartition de H<sub>s</sub>, (3) du choix de la copule utilisée et (4) du choix des événements retenus pour l'ajustement de la copule.

La qualité des résultats obtenus selon les différents choix est évaluée ici principalement avec les métriques T<sub>bias10</sub> et T<sub>rmse10</sub> (Équations (24) et (25)), ainsi que l'allure du graphique comparant les périodes de retour prédites aux périodes de retour observée (panneau

supérieur droite de la Figure 73) et du graphique de la courbe SWL- $H_s$  pour la période de retour 50 ans (Figure 74).  $T_{mse10}$  doit être le plus petit.  $T_{bias10}$  indique si, pour une période de retour donnée, la prédition surévalue SWL- $H_s$  ( $T_{bias10}>0$ ) ou sous-évalue SWL- $H_s$  ( $T_{bias10}<0$ ).

### **Choix des fonctions de répartition**

Le choix le plus important et le plus difficile concerne les fonctions de répartition de SWL et de  $H_s$ , plus particulièrement pour la partie extrême de ces fonctions. Il faut bien choisir la distribution probabiliste à laquelle les données sont ajustées et lesquelles des données sont utilisées dans l'ajustement. Par exemple à Saint-Ulric, selon la distribution probabiliste utilisée,  $H_{m0}$  pour une période de retour de 30 ans varie entre 4,47 m et 4,87 m (Tableau 12). Pour la plupart des fonctions probabilistes, l'utilisateur doit faire aussi un choix subjectif des événements à utiliser dans l'ajustement (voir par exemple Figure 36).

Ces choix fixent les bornes supérieures des résultats possibles. En effet, le résultat sera toujours compris entre le cas *indépendance complète* et le cas *corrélation parfaite*. Ce dernier est directement déterminé par les fonctions de répartition de SWL et de  $H_s$ . La Figure 75 illustre ce concept pour une période de retour 20 ans. Dans cet exemple, un événement survenu durant la période d'observation de 14 ans est au-dessus du cas corrélation parfaite. Soit cet événement est la surcote du siècle, soit la fonction de distribution de SWL est inadéquate.

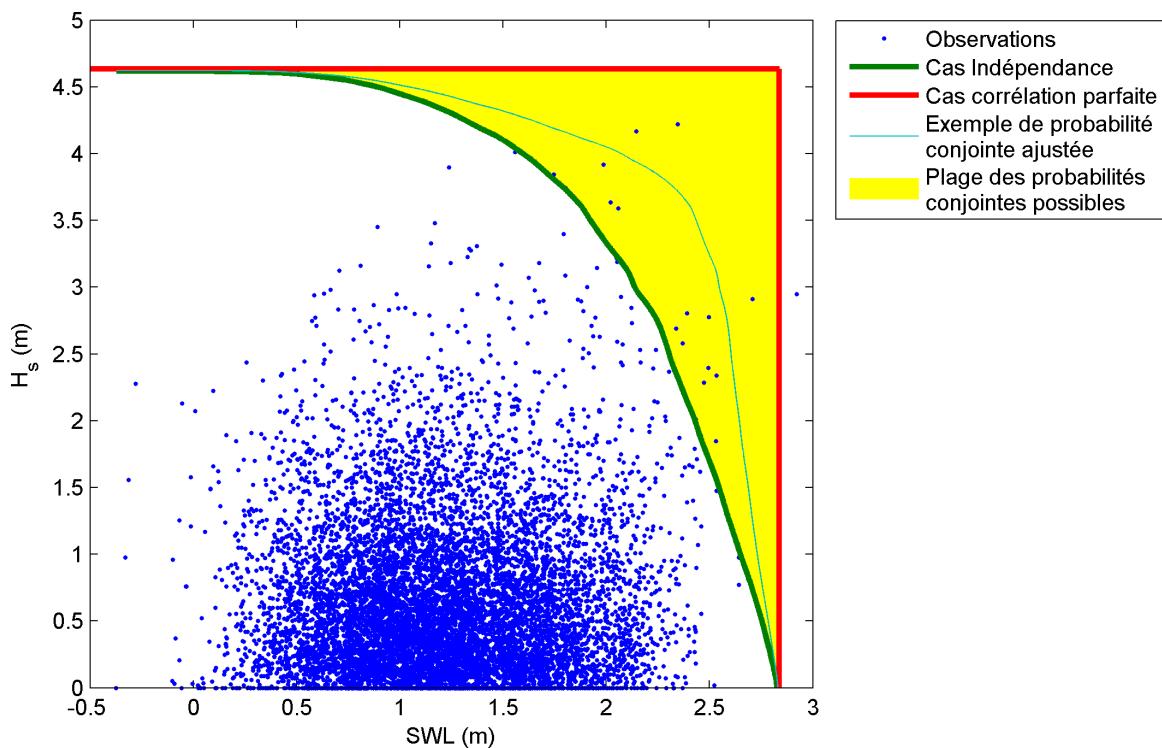


Figure 75 – Illustration de la plage des probabilités conjointes possibles pour une période de retour de 20 ans (zone jaune), qui est borné vers le bas par le cas indépendance (trait vert) et vers le haut par le cas corrélation parfaite (très rouge). Le trait bleu une solution de probabilité ajustée. Les points bleus sont les 14 années d'observations utilisées pour cet exemple.

### **Choix de la copule**

Le choix de la copule est plus simple. En effet, pour nos jeux de données seulement la copule de Gumbel et la copule  $t$  ont produit des résultats intéressants (Tableau 22, Figure 76). La copule de Gumbel a donné les meilleurs résultats pour les cinq sites, raison pour laquelle **la copule de Gumbel est recommandée** et qu'elle est la copule par défaut dans cooc\_fit.m. Cette copule a souvent été utilisée en génie côtier (par exemple, Haixia et al., 2023; Oo et al., 2022; Zhong et al., 2013) La copule  $t$  a produit des résultats incohérents dans certaines conditions (Sites A et C avec l'option `select1`, voir Figure 76). Les prédictions de SWL et de  $H_s$  avec la copule  $t$  sont toujours un peu plus faibles que ceux avec la copule de Gumbel. Néanmoins, l'utilisateur aurait avantage à aussi regarder les résultats et les métriques  $T_{bias10}$  et  $T_{rmse10}$  de la copule  $t$ , ainsi que l'allure de la courbe des prédictions SWL- $H_s$ .

Les copules de Clayton et de Frank ont produit des résultats presque identiques, sous-estimant toujours nettement les valeurs SWL- $H_s$ , et parfois très proches de ceux de la copule Indépendance (Tableau 22, Figure 76). Enfin, les résultats avec la copule Gaussian s'écartent encore plus des observations, suggérant même une corrélation négative entre SWL et  $H_s$  lorsque les options `select2`, `select3` ou `select4` sont utilisées.

Il serait intéressant d'ajouter aux choix offerts d'autres fonctions copules adaptées pour les valeurs extrêmes, mais cela exigerait le codage de l'ajustement des paramètres de la copule par la méthode du maximum de vraisemblance et le codage de la fonction de répartition.

*Tableau 22 – Comparaison du choix de la copule utilisée sur la qualité de l'ajustement pour la probabilité conjointe. La métrique  $T_{rmse10}$  indique la qualité de l'ajustement (idéalement  $T_{rmse10} = 0$ ), alors que  $T_{bias10}$  indique si la prédiction surestime (valeur positive) ou surestime (valeur négative) par rapport aux observations. Calculs effectués avec l'option `select1`,  $S_{SWL} = 97\%$  et  $S_{H_s} = 99\%$ . de la qualité de l'ajustement selon les différentes fonctions copules utilisées. (A : St-Ulric; B : Cap d'Espoir; C : Sept-Îles; E : Rivière-Pentecôte; F : Paspébiac)*

Copule	A	A	B	B	C	C	E	E	F	F
	$T_{bias10}$	$T_{rmse10}$	$T_{bias10}$	$T_{rmse10}$	$T_{bias10}$	$T_{rmse10}$	$T_{bias10}$	$T_{rmse10}$	$T_{rmse10}$	$T_{rmse10}$
Gumbel	0.206	0.246	-0.095	0.232	-0.018	0.312	0.116	0.246	0.058	0.117
Clayton	0.837	0.937	0.685	0.882	0.419	0.729	1.037	1.183	0.487	0.495
Frank	0.815	0.916	0.670	0.869	0.403	0.716	1.017	1.165	0.473	0.481
Gaussian	2.151	2.202	1.174	1.245	0.738	0.869	1.364	1.427	2.178	2.184
$t$	-0.120	0.246	0.004	0.233	-0.161	0.332	0.283	0.382	0.136	0.166
Independence	1.967	2.016	2.108	2.185	1.513	1.644	2.308	2.380	1.864	1.869

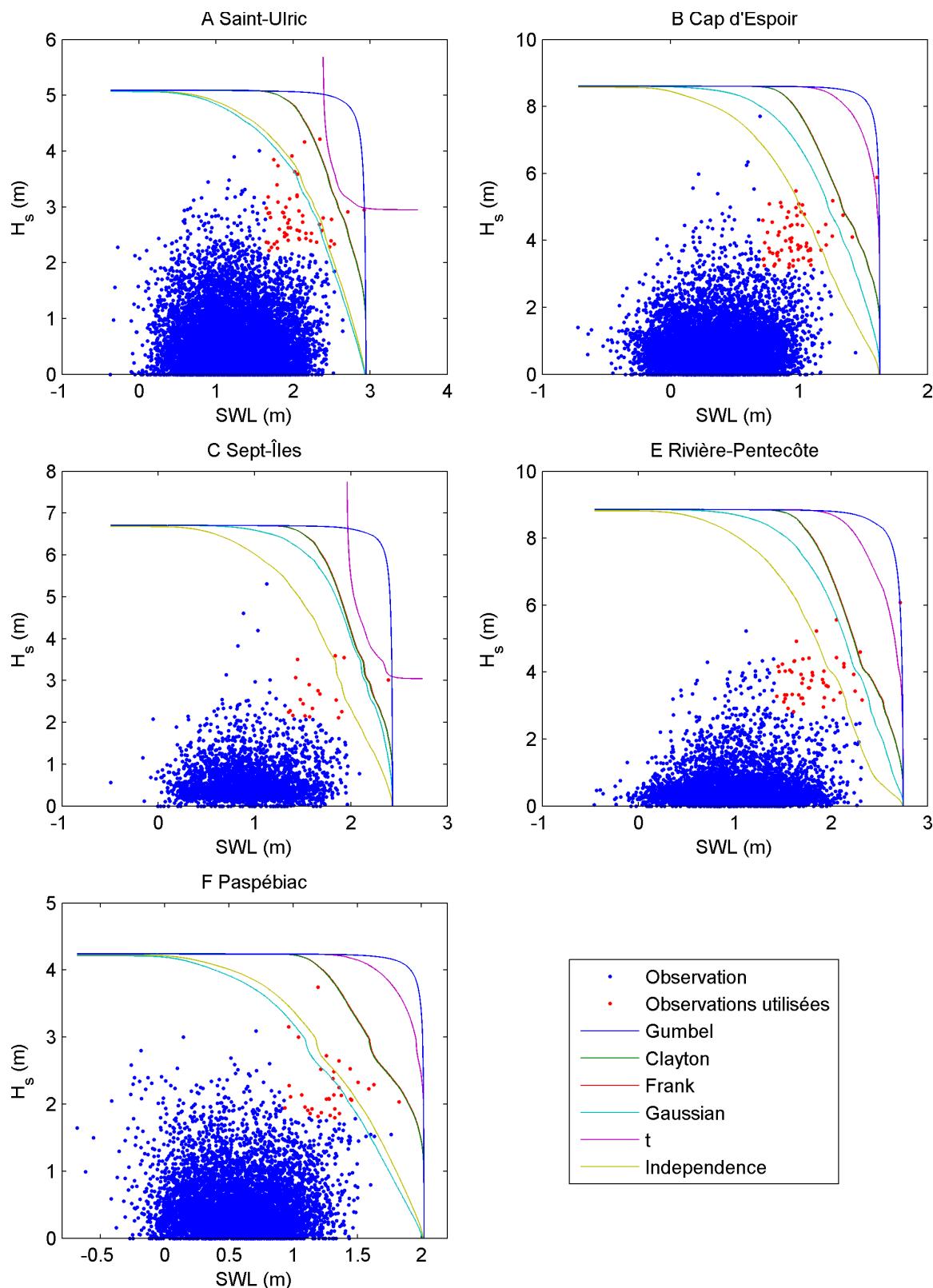


Figure 76 – Comparaison des courbes SWL- $H_s$  pour la période de retour 50 ans selon les différentes copules. Calculs effectués avec l'option `select1` et  $S_{SWL} = 97\%$  et  $S_{H_s} = 99\%$ .

### **Choix des événements retenus pour l'ajustement**

Tous les événements (c'est-à-dire toutes les marées hautes) peuvent être utilisées pour l'ajustement de la copule. Mais comme le but est d'obtenir les probabilités conjointes des événements extrêmes, il peut être intéressant d'utiliser seulement un sous-ensemble des événements extrêmes. Pour sélectionner ce sous-ensemble, il faut d'une part choisir la forme de la plage des données retenues. Quatre choix sont disponibles dans [cooc\_fit.m] (options *select1*, *select2*, *select3* et *select4*, Figure 75). D'autre part, il faut choisir les limites de cette plage des données, qui sont définies avec le centile  $S_{SWL}$  pour SWL et le centile  $S_{Hs}$  pour  $H_s$ , c'est-à-dire la valeur de SWL (ou  $H_s$ ) qui n'est pas dépassée un certain pourcentage du temps.

L'option ***testsel*** de [cooc\_fit.m] permet de tester les différentes valeurs de  $S_{SWL}$  et de  $S_{Hs}$  (0%, 90%, 91%, ..., 98% et 99%) pour un jeu de données en calculant  $T_{bias10}$  et  $T_{rmse10}$  pour les 121 combinaisons de  $S_{SWL}$  et de  $S_{Hs}$ . Les résultats pour les 5 sites et pour les quatre options de sélection (options *select1*, *select2*, *select3* et *select4*) sont présentés à l'annexe 4 (Figures 87 à 94) pour la copule de Gumbel. L'option ***testsel2*** calcule en plus pour les 121 combinaisons de  $H_s$  lorsque  $SWL=0,8\times SWL_{50ans}$  et  $SWL$  lorsque  $H_s=0,8\times H_{s,50ans}$ .

Pour  $S_{Hs}$ , le choix est facile. Avec les options *select2*, *select3* et *select4*,  $T_{rmse10}$  est toujours le meilleur (valeurs plus faibles) avec  $S_{Hs} = 99\%$  (Figures 88 à 90). Cela est un peu moins clair avec l'option *select1*, mais  $S_{Hs} = 99\%$  est toujours un très bon choix, avec des valeurs seulement légèrement meilleures lorsque  $S_{Hs}$  a des valeurs un peu plus basses (Figure 87). **La valeur de 99% est donc recommandée pour  $S_{Hs}$ .**

Pour  $S_{SWL}$ , le choix est moins évident. Selon le site et selon l'option, les meilleures valeurs de  $T_{rmse10}$  sont avec  $S_{SWL}$  entre 94% et 97%, parfois même 92% ou 99 % (Figures 87 à 90).  $T_{rmse10}$  s'améliore parfois avec  $S_{SWL}$  croissant, parfois avec  $S_{SWL}$  décroissant. **Nous estimons que  $S_{SWL} = 97\%$  est un bon compromis pour une valeur par défaut à recommander.** Toutefois, pour un cas particulier il peut être intéressant de valider ce choix en utilisant l'option *testsel* de [cooc\_fit.m]. En effet, une variation de  $S_{SWL}$  entre 90% et 99% peut se traduire par une variation de  $H_s$  de 0.2 à 0.4 m pour la période de retour 50 (Figure 96). Néanmoins, il est conseillé de rester pour  $S_{SWL}$  dans la plage de 94% à 98%.

Pour le choix de la forme de la plage des données retenues, les métriques  $T_{rmse10}$  et  $T_{bias10}$  s'améliore lorsque seulement les données les plus extrêmes sont utilisés. C'est-à-dire l'ajustement s'améliore de plus en plus en passant des options *select4*, à *select3*, puis à *select2* et finalement à *select1* (Tableau 23). Parallèlement les prédictions de SWL- $H_s$  pour une période de retour donnée augmentent (Figure 77) et les périodes de retour prédites pour les événements observés s'approchent des périodes de retour empiriques de ces événements (Figure 78). Pour cette raison, **il est recommandé d'utiliser l'option *select1***, c'est-à-dire sélectionner seulement les événements pour lesquels  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  sont dépassés. À noter que les prédictions avec les options *select2* et *select3* sont relativement proche des prédictions avec l'option *select1*.

Il faut noter qu'une sélection très restreinte d'événements extrêmes (par exemple, option *select1* avec des valeurs élevées pour les paramètres  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$ ) améliorera l'ajustement de la copule pour les événements avec une bonne corrélation de SWL et  $H_s$ . Toutefois, lorsque le nombre d'événements utilisés pour l'ajustement devient trop petit, il existe le

risque de surestimer SWL-H<sub>s</sub>. De plus, si tous ces événements utilisés pour l'ajustement sont du même type avec une bonne corrélation entre SWL et H<sub>s</sub>, alors la prédition ne sera plus représentative pour des événements atypiques, par exemple des fortes vagues avec un niveau marin relativement bas.

Il est donc recommandé d'utiliser de préférence [cooc\_fit.m] avec les réglages par défaut (correspondant à 'select1', [0.97 0.99]). Oo et al. (2022) ont utilisé le même critère. Ce choix correspond Mais l'utilisateur averti appellera aussi [cooc\_fit.m] avec l'option 'testsel2', 'gumbel', pour possiblement pouvoir sélectionner une meilleure combinaison S<sub>SWL</sub> et S<sub>Hs</sub> pour le jeu de données étudié, ou considérera l'utilisation de l'option select2.

*Tableau 23 – Comparaison de l'effet des options select1, select 2, select3 et select4 (forme de la plage des données retenues pour l'ajustement) sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel et de la copule t, toujours avec S<sub>SWL</sub> = 97% et S<sub>Hs</sub> = 99%. La métrique T<sub>rmse10</sub> indique la qualité de l'ajustement (idéalement T<sub>rmse10</sub> = 0), alors que T<sub>bias10</sub> indique si la prédition surestime (valeur positive) ou surestime (valeur négative) par rapport aux observations.*

		T <sub>bias10</sub>				T <sub>rmse10</sub>			
		select1	select2	select3	select4	select1	select2	select3	select4
Copule de Gumbel	Site A	0.206	0.274	0.305	0.865	0.246	0.295	0.324	0.878
	Site B	-0.095	0.220	0.229	0.567	0.232	0.267	0.275	0.583
	Site C	-0.018	0.348	0.355	0.783	0.312	0.426	0.431	0.816
	Site E	0.116	0.249	0.258	0.695	0.246	0.327	0.334	0.726
	Site F	0.058	0.245	0.314	0.739	0.117	0.254	0.322	0.743
Copule t	Site A	-0.120	0.423	0.404	1.485	0.246	0.451	0.427	1.530
	Site B	0.004	0.332	0.324	1.114	0.233	0.370	0.361	1.159
	Site C	-0.161	0.460	0.460	1.186	0.332	0.522	0.520	1.282
	Site E	0.283	0.474	0.448	1.218	0.382	0.535	0.506	1.256
	Site F	0.136	0.349	0.339	1.184	0.166	0.356	0.346	1.186

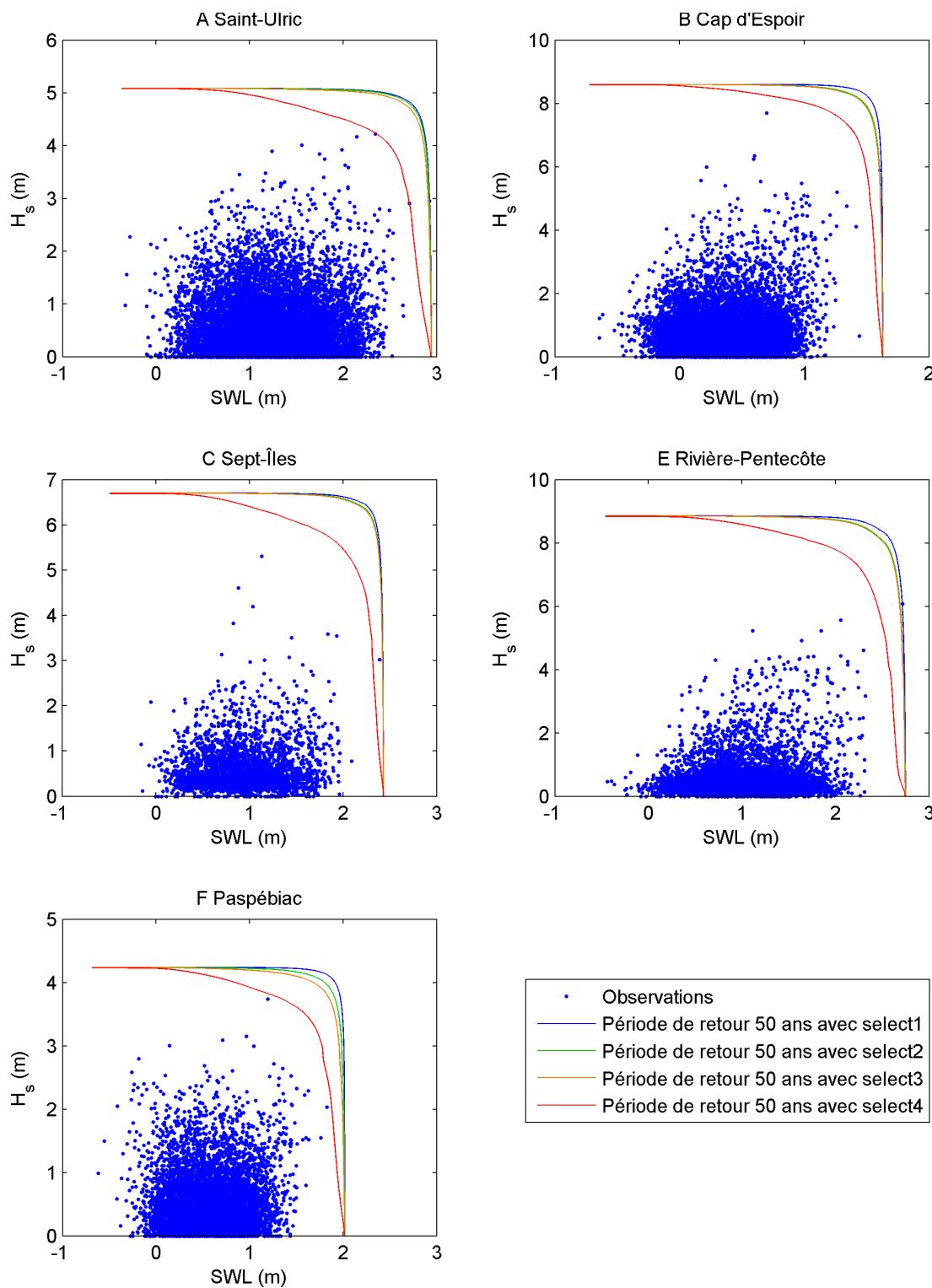


Figure 77 – Comparaison des courbes SWL- $H_s$  de la période de retour 50 ans selon la forme de la plage de données (options select1, select 2, select3 et select4) pour la sélection des événements utilisés pour l'ajustement de la copule de Gumbel. Calculs effectués avec  $S_{SWL} = 97\%$  et  $S_{Hs} = 99\%$ . Voir Figure 71 pour une illustration des formes de la plage de données.

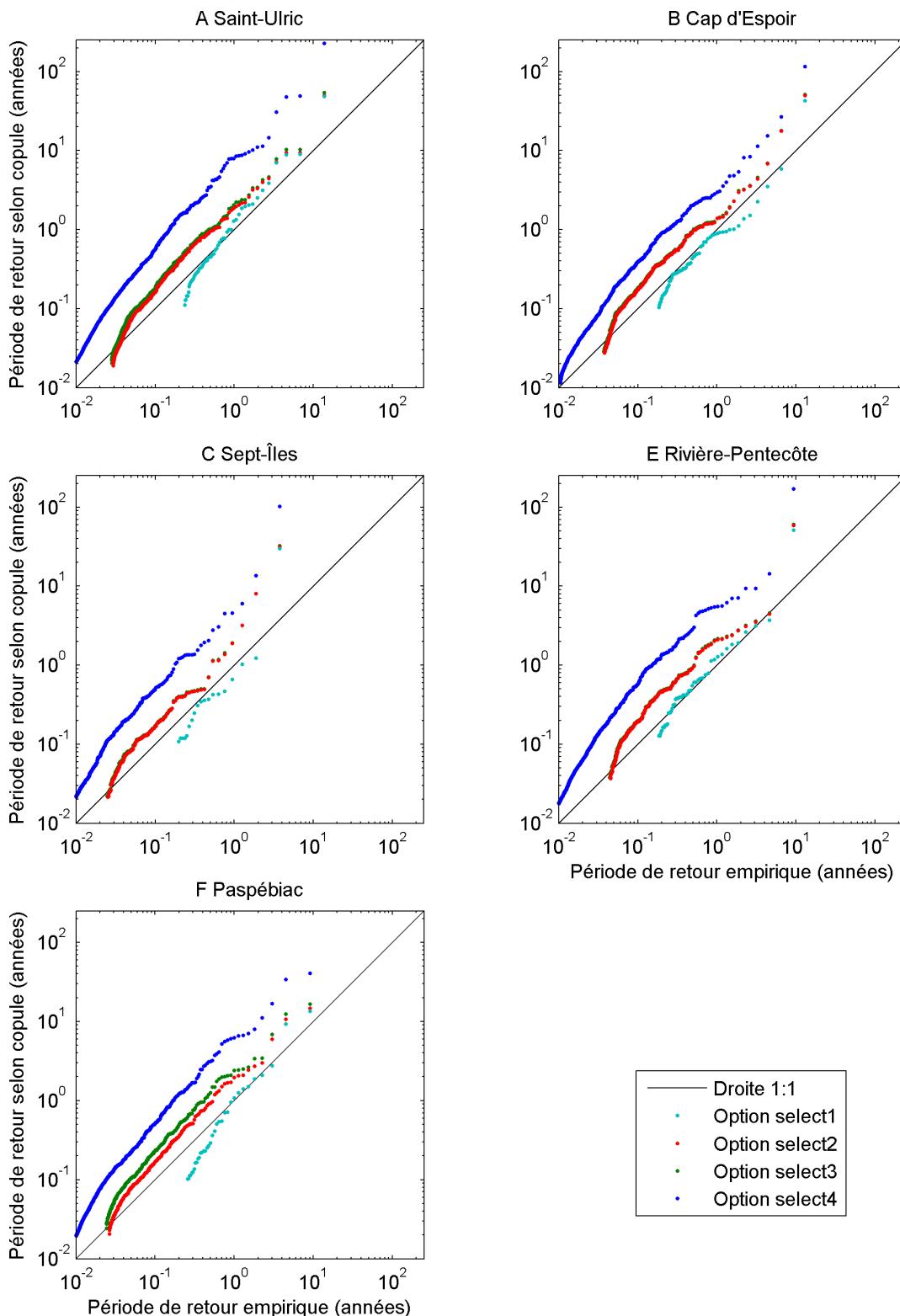


Figure 78 – Comparaison de l'ajustement selon la forme de la plage de données (options select1, select 2, select3 et select4) avec le graphique présentant la relation entre la période de retour prédictive pour les événements observés et leurs périodes de retour empirique. Calculs effectués avec la copule de Gumbel,  $S_{SWL} = 97\%$  et  $S_{Hs} = 99\%$ .

## 6.7 Résumé du traitement dans Matlab

### ***Considérations générales***

La présente section donne un exemple, pas à pas, pour effectuer le traitement pour la probabilité conjointe SWL-H<sub>s</sub>. À noter que le prétraitement optionnel des données de niveaux d'eau n'est pas décrit.

Les instructions à entrer à la ligne de commande de Matlab sont en police Courrier. Les commentaires sont en police Times.

L'utilisateur doit maîtriser la syntaxe basique de Matlab, notamment l'utilisation de variables et l'appel à des fonctions. À noter que Matlab différencie entre minuscule et majuscule pour le nom des variables et le nom des fonctions. Les noms des fonctions Matlab sont généralement tous en minuscule, même si dans la description de la syntaxe d'appel (par exemple l'Annexe 3) les noms des fonctions sont écrits en majuscule pour les mettre en évidence.

La syntaxe d'appel de chaque fonction est obtenue en tapant à la ligne de commande de Matlab "help NOM\_FONCTION".

Les noms des variables utilisées dans l'exemple (swl\_ts, sh\_ts, bd, swl\_cdfe, swl\_cdf, hs\_cdfe, hs\_cdf, bd, bp, r, r2) peuvent naturellement être changés. À tout moment, il est possible de sauver les variables avec les résultats intermédiaires ou les résultats finaux avec la commande Matlab "save" pour pouvoir reprendre le travail plus tard. Il est possible d'avoir simultanément en mémoire les données de plusieurs sites, si des noms distincts sont choisis pour chaque variable.

Dans les exemples ci-dessous, certaines fonctions ont aussi l'argument 'fr', qui change le texte sur les graphiques au français. Sans cet argument 'fr', les graphiques seront par défaut en anglais. Pour la plupart des fonctions, qui créent de nouvelles figures graphiques, la création de ces nouvelles figures peut être bloquée avec l'option 'noplot'.

### ***Préparation du jeu de données commun SWL-H<sub>s</sub>***

Les deux variables suivantes sont nécessaires et elles doivent être importées dans Matlab au préalable.

- swl\_ts      Variable avec la série temporelle de SWL : matrice numérique à deux colonnes, avec date/heure (temps Matlab) et SWL (m)
- hs\_ts      Variable avec la série temporelle de H<sub>s</sub> : matrice numérique à deux colonnes, avec date/heure (temps Matlab) et H<sub>s</sub> (m)

Construction du jeu de donnée avec la fonction cooc\_prep.m.

Dans cet exemple, la valeur 34 représente la profondeur sous le niveau de référence de SWL. Elle devra être remplacée avec profondeur réelle du site.

```
bd = cooc_prep (swl_ts, hs_ts, 'depth', 34, 'Un commentaire qui
décrit le site ou la source');
```

Production des graphiques et statistiques préliminaires (les résultats sont affichés à l'écran),

En premier pour la relation SWL -  $H_s$  (Figures 65 et Figure 67).

```
cooc_stat(bd, 'fr')
```

En deuxième pour la relation Surcote -  $H_s$  (Figure 66).

```
cooc_stat(bd, 'surge', 'fr')
```

### **Fonctions de distribution de SWL**

*Option avec calcul des probabilités des valeurs extrêmes dans Matlab*

Calcul en premier de la période de retour des niveaux d'eau extrêmes selon la *revised joint probability method* (RJPM) avec la fonction slev\_rjpm.m. Celle-ci retourne une structure, la matrice « SWL – période de retour » est incluse dans le champ swl\_cdfe.T.

```
swl_cdfe = slev_rjpm (swl_ts);
```

*Option avec calcul des probabilités avec un autre logiciel*

Préparation d'une variable avec les valeurs de SWL et les périodes de retour correspondantes, qui ont été obtenues avec un programme externe. Le plus simple est d'entrer à la ligne de commande, entre crochets [ ], des paires « SWL et périodes de retour » séparées par des espaces ou une virgule, et de séparer les paires de valeurs par des points-virgules.

```
swl_cdfe = [2.57 2; 2.67 5; 2.75 10; 2.83 20; 2.94 50; 3.02 100]
```

### *Suite de la partie commune*

Calcul ensuite de la fonction de distribution empirique et combinaison de celle-ci (pour les valeurs faibles de SWL) avec le résultat de slev\_rjpm.m (pour les valeurs élevées de SWL) (Figure 68). La distribution empirique est aussi lissée (argument 'smooth39').

```
swl_cdf = empiric_cdf (bd, 'swl', 'smooth39', 'ext', swl_cdfe.T, 'fr')
```

Si message d'erreur "*There is an overlap, but the 2 curves do not touch...*", ajouter l'option 'gap' en faisant varier le nombre qui suit de 1.05, 1.1, ..., 1.5

```
swl_cdf = empiric_cdf (bd, 'swl', 'smooth39', 'ext', swl_cdfe.T, 'fr', 'gap', 1.05)
```

### Fonctions de distribution de $H_s$

Option avec calcul des probabilités des valeurs extrêmes dans Matlab

Calcul en premier de la période de retour des vagues extrêmes avec la fonction `storm_fit.m`, qui permet d'ajuster différentes lois de probabilité. Après un premier appel à la fonction, il est possible, dans la fenêtre graphique produite, de changer de loi de probabilité et de changer le nombre d'événements utilisés pour l'ajustement (souvent seulement les 10-20 données les plus extrêmes doivent être utilisées) avec le menu contextuel s'ouvrant avec un clic de droite sur les données (Figure 79).

```
storm_fit (hs_ts, '93%', 'gum')
```

Lorsqu'on a trouvé un ajustement satisfaisant, choisir dans le menu contextuel "Copy CDF to variable...", puis indiquer comme nom de variable "hs\_cdf".

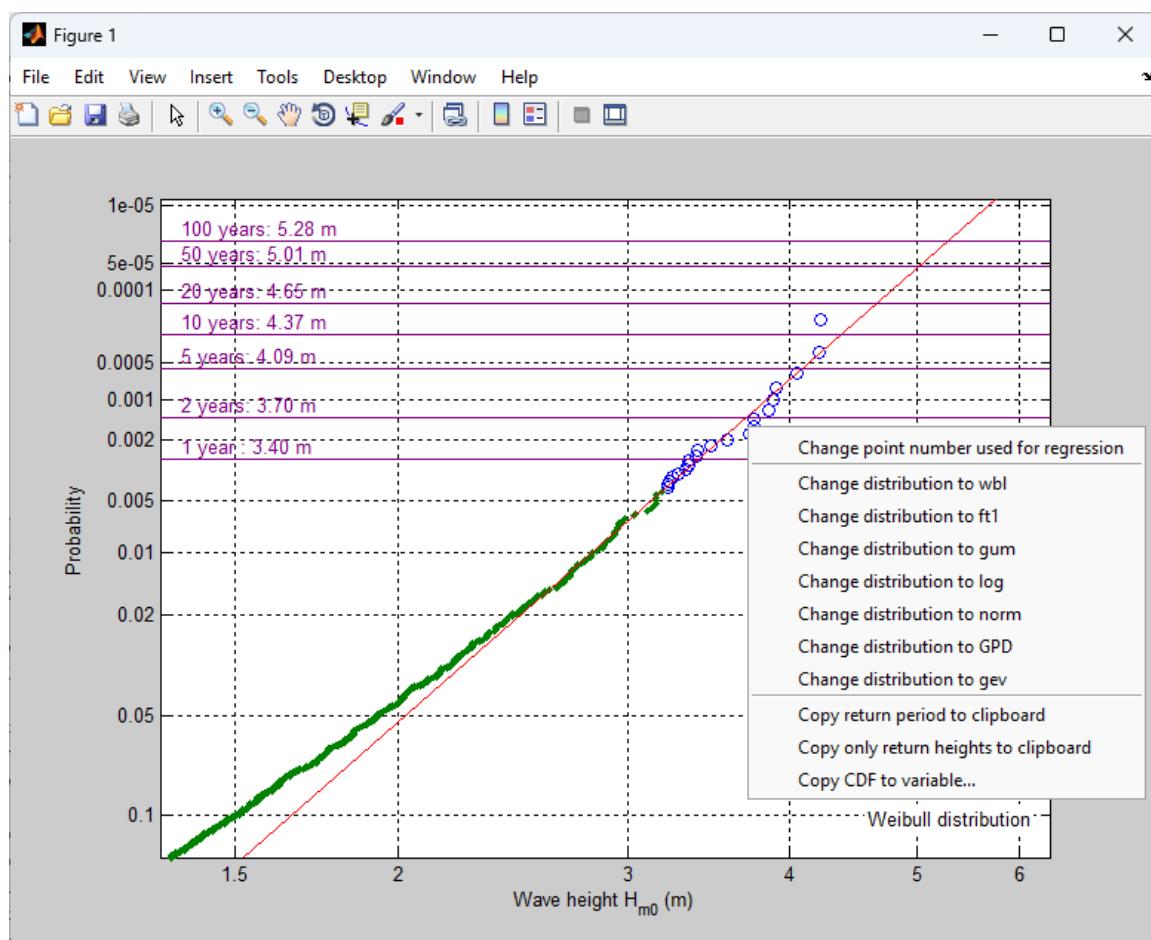


Figure 79 – Fenêtre graphique produite par la fonction `storm_fit`, montrant le menu contextuel permettant de sélectionner la loi de probabilité à ajuster aux données extrêmes des vagues (sont recommandés wbl – Weibull, gum – Gumbel et GPD – distribution Paréto généralisée), le nombre de points utilisés pour la régression, et de copier la fonction de distribution dans une variable ("Copy CDF to variable...").

### *Option avec calcul des probabilités avec un autre logiciel*

Préparation d'une variable avec les valeurs  $H_s$  et les périodes de retour correspondantes, qui ont été obtenues avec un programme externe. Le plus simple est d'entrer à la ligne de commande, entre crochets [ ], des paires de « SWL et périodes de retour » séparées par des espaces ou une virgule, et de séparer les paires de valeurs par des points-virgules.

```
hs_cdf = [3.77 2; 4.04 5; 4.25 10; 4.46 20; 4.74 50; 4.94 100]
```

### *Suite de la partie commune*

Calcul ensuite de la fonction de distribution empirique et combinaison de celle-ci (pour les faibles  $H_s$ ) avec le résultat de slev\_rjpm.m (pour les grandes  $H_s$ ) (Figure 69). La distribution empirique est aussi lissée (argument 'smooth39').

```
hs_cdf = empiric_cdf (bd, 'hs', 'smooth39', 'ext', hs_cdf, 'fr')
```

Si message d'erreur "*There is an overlap, but the 2 curves do not touch...*", ajouter l'option 'gap' en faisant varier le nombre qui suit de 1.05, 1.1, ..., 1.5

```
hs_cdf = empiric_cdf (bd, 'hs', 'smooth39', 'ext', hs_cdf, 'fr', 'gap', 1.05)
```

### *Calcul de la probabilité conjointe*

Conversion du jeu de donnée commun de l'espace d'observation à l'espace probabiliste.

```
bp = cooc_toproba (bd, swl_cdf, hs_cdf, 'plot');
```

Ajustement des fonctions copules et calcul des métriques de qualité de prédiction (appel simple et rapide à la fonction cooc\_fit.m) (Figures 72 et 73).

```
r = cooc_fit (bp, 'fr');
```

Ajustement des fonctions copules et calcul des métriques de qualité de prédiction, suivi du calcul des périodes de retour modélisées pour une matrice  $1000 \times 1000$  afin de déterminer les courbes SWL- $H_s$  pour différentes périodes de retour. (Figures 74A et 74B). Le calcul est assez lent (plusieurs minutes selon les ordinateurs) pour les copules *Gaussian* et *t*. Par défaut, la précision est dégradée pour ces deux copules; cela peut être évité avec l'option 'fine'.

L'option 'return' calcule seulement les périodes de retour pour la copule de Gumbel. L'option 'returnXXX' (XXX pour les numéros des copules désirées, avec 1 : Gumbel, 2 : Clayton, 3 : Frank, 4 : Gaussian, 5 : t, 6 : Independence) permet de calculer également les périodes de retour pour d'autre copule (par exemple, 'return5' pour la copule t, 'return123456' pour toutes les copules).

Les périodes de retour peuvent être personnalisées avec l'option 'years' (par défaut, 2, 10, 20, 50, 75 et 100 ans).

Le nombre de fenêtres graphiques générées peut être réduit avec l'option 'noplot'.

```
r2 = cooc_fit (bp, 'fr', 'return');
```

À ce stade, il faut (i) vérifier la forme des courbes SWL-H<sub>s</sub> des périodes de retour (Figure 74A), (ii) la bonne correspondance entre la période de retour prédite pour les événements observés et leurs périodes de retour empirique (panneau supérieur droit de la Figure 73), (iii) la valeur des métriques T<sub>bias10</sub> et T<sub>rmse10</sub>.

Il est aussi utile d'évaluer si la copule  $t$  donnerait des résultats significativement meilleurs que la copule de Gumbel (qui est la valeur par défaut) en regardant les métriques T<sub>bias10</sub> et T<sub>rmse10</sub> affichées par cooc\_fit.m (Figure 72).

Il est également possible de vérifier si des modifications de S<sub>SWL</sub> et de S<sub>H<sub>s</sub></sub> amélioreraient significativement les résultats avec l'option testsel2.

```
r_test = cooc_fit (bp, 'fr', 'return', 'testsel2','gumbel');
```

Après que cooc\_fit.m ait été appelé avec l'option 'return' ou l'option 'returnXXX', il est possible de sous-échantillonner les courbes SWL-H<sub>s</sub> des périodes de retour (Figures 74C et 74D).

Il faut indiquer comme deuxième argument le nom de la copule pour laquelle les résultats sont souhaités ('gumbel' dans l'exemple).

Le troisième argument peut indiquer soit (si  $>2$ ) le nombre de points équidistants demandé sur la courbe SWL-H<sub>s</sub> (8 dans l'exemple), soit (si  $\leq 2$ ) l'intervalle en m de H<sub>s</sub> pour lequel des valeurs de SWL sont requises.

Les résultats peuvent être écrits dans un fichier Excel (option 'excel' comme dans l'exemple) ou dans un fichier texte (option 'ascii').

```
subsample_return (r2, 'gumbel', 8, 'excel', 'Nom_fichier.xlsx',
'fr')
```

## 6.8 Validation de la méthode de calcul de la probabilité conjointe avec copule

### 6.8.1 Préparation des données pour la validation

Cette section présente les résultats des calculs de probabilité conjointe pour cinq jeux de données provenant de déploiements successifs d'AWACs. Quatre jeux de données correspondent à des sites du présent projet : A (Saint-Ulric), B (Cap d'Espoir), E (Rivière-Pentecôte) et F (Paspébiac). Le cinquième jeu de données est le site C à Sept-Îles (50° 10.3' N, 66° 13.5' W), qui a été instrumenté de 2010 à 2014 (Neumeier et Joly, 2014).

À chacun de ces sites, les vagues ont été mesurées toutes les heures et les niveaux d'eau ont été mesurés toutes les 20 minutes (également par les AWACs). La période des données disponibles à chaque site est indiquée dans le Tableau 24 . La durée des données valides est entre 9.0 et 13.7 ans, sauf pour le site de Sept-Îles (3.8 ans). La durée

des données de ce dernier site est en principe trop court pour une projection fiable des vagues de tempêtes, mais il est traité ici pour augmenter la diversité des sites étudiés. Les données du site de Mont-Louis ne sont pas utilisées, car la durée disponible (1,7 ans) est clairement trop courte pour une analyse fiable, néanmoins ces données sont présentées graphiquement aux Figures 80 et 81.

L'analyse préliminaire de la corrélation entre SWL et  $H_s$  (coefficient de corrélation  $r$  et Tau de Kendall  $\tau$ ) indique une corrélation positive à tous les sites (Tableau 24). La corrélation entre SWL à marée haute et  $H_s$  est relativement faible pour Saint-Ulric et pour Paspébiac (mais  $\tau$  n'est statistiquement pas significatif), elle est moyenne pour Sept-Îles et excellent pour Cap d'Espoir et pour Rivière-Pentecôte (Tableau 24). Ces différentes corrélations s'observent aussi sur la représentation graphique (Figure 80). La même tendance existe pour la corrélation entre la surcote et  $H_s$ , elle est même plus prononcée et  $\tau$  est toujours statistiquement significatif (Tableau 24, Figure 81). À noter que le classement entre les sites est identique pour les deux méthodes de mesure de la corrélation ( $r$  et  $\tau$ ), bien que les formules de calcul soient différentes.

Les différences du degré de corrélation entre les sites sont probablement dues à la configuration géographique et à la capacité des vents de tempêtes d'élever le niveau d'eau dans la région côtière. Les vents de tempêtes feront simplement transiter les masses d'eau parallèle à la côte à Saint-Ulric (tempêtes maximales du nord-est) et à Paspébiac (tempêtes maximales de l'est ou de l'ouest). Par contre, les vents de tempêtes pourront accumuler de l'eau près de la côte à Cap d'Espoir (tempêtes maximales du est-sud-est) et particulièrement à Rivière-Pentecôte (tempêtes maximales de l'est).

*Tableau 24 – Période couverte par chaque jeu de données pour le calcul de la probabilité conjointe, proportion de données manquantes (disfonctionnement de l'AWAC, période entre les déploiements et parfois difficultés à mesurer les vagues dans certaines conditions), et mesure du degré de dépendance SWL- $H_s$  (calculé sur les événements de marée haute) et surcote- $H_s$  (calculé sur la série temporelle complète) avec le coefficient de corrélation ( $r$ ) et le Tau de Kendall ( $\tau$ ).*

	A Saint-Ulric	B Cap d'Espoir	C Sept-Îles	E Rivière- Pentecôte	F Paspébiac
Début	2010-05-03	2010-10-06	2010-05-05	2014-05-06	2015-05-22
Fin	2024-05-22	2024-05-26	2014-05-06	2024-05-15	2024-05-26
Durée totale	14.05	13.64	4.00	10.03	9.01
Durée données valides (ans)	13.67	13.06	3.76	9.23	9.01
Proportion données manquantes	2.73%	4.22%	6.13%	7.90%	0.03%
$r$ pour SWL- $H_s$	0.032**	0.126***	0.098***	0.167***	0.040**
$\tau$ pour SWL- $H_s$	0.006	0.038***	0.029*	0.050***	0.012
$r$ pour surcote- $H_s$	0.134***	0.260***	0.294***	0.384***	0.045***
$\tau$ pour surcote- $H_s$	0.076**	0.122***	0.168***	0.191***	0.044***

\* :  $p<0.05$ , \*\* :  $p<0.01$ , \*\*\* :  $p<0.001$

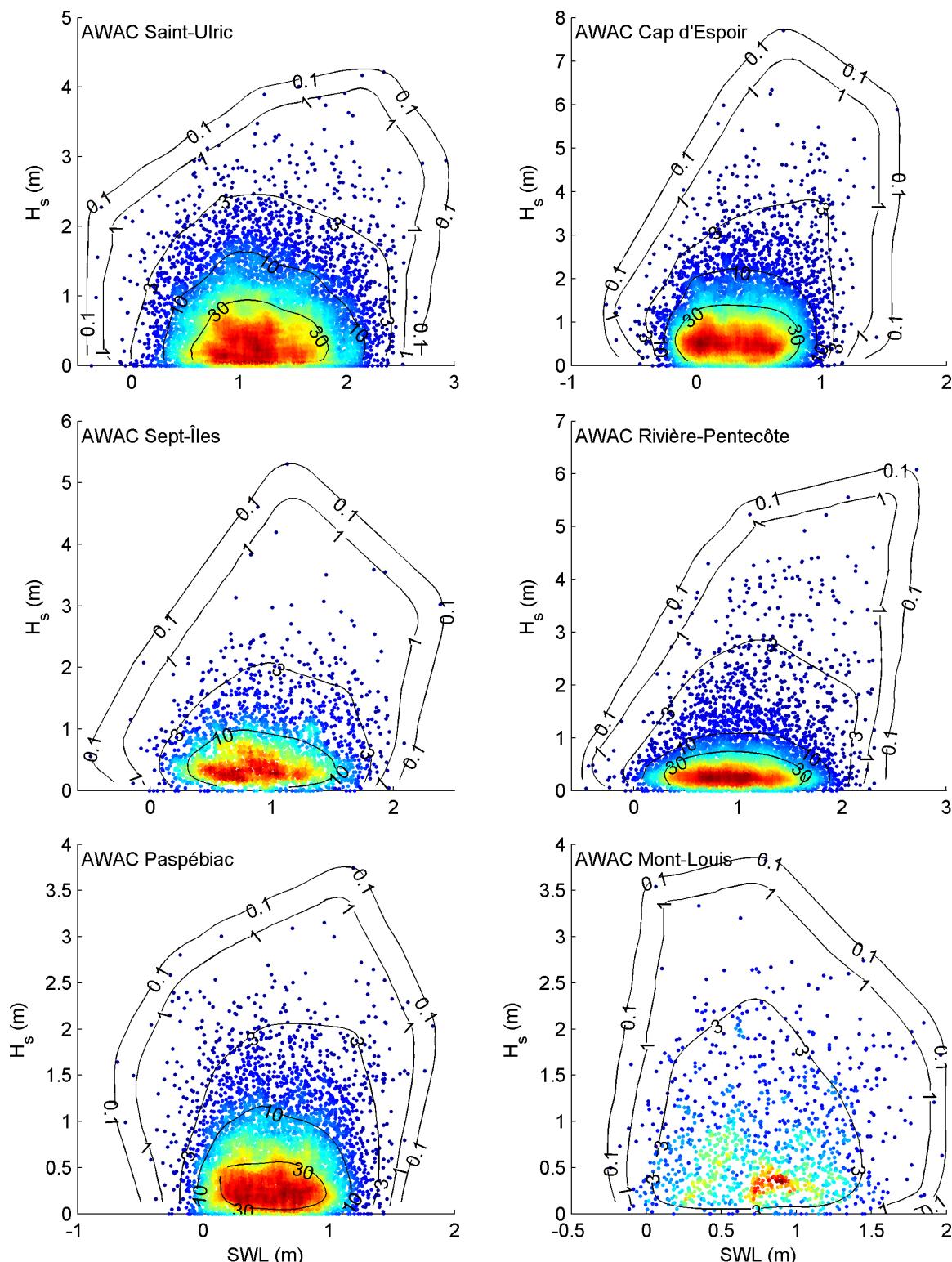


Figure 80 – Graphiques illustrant la corrélation entre SWL et  $H_s$  pour les sites A Saint-Ulric, B Cap d'Espoir, C Sept-Îles, E Rivière-Pentecôte, F Paspébiac et G Mont-Louis. La couleur indique la densité d'événements (marées hautes); les isolignes de densité sont en unités arbitraires.

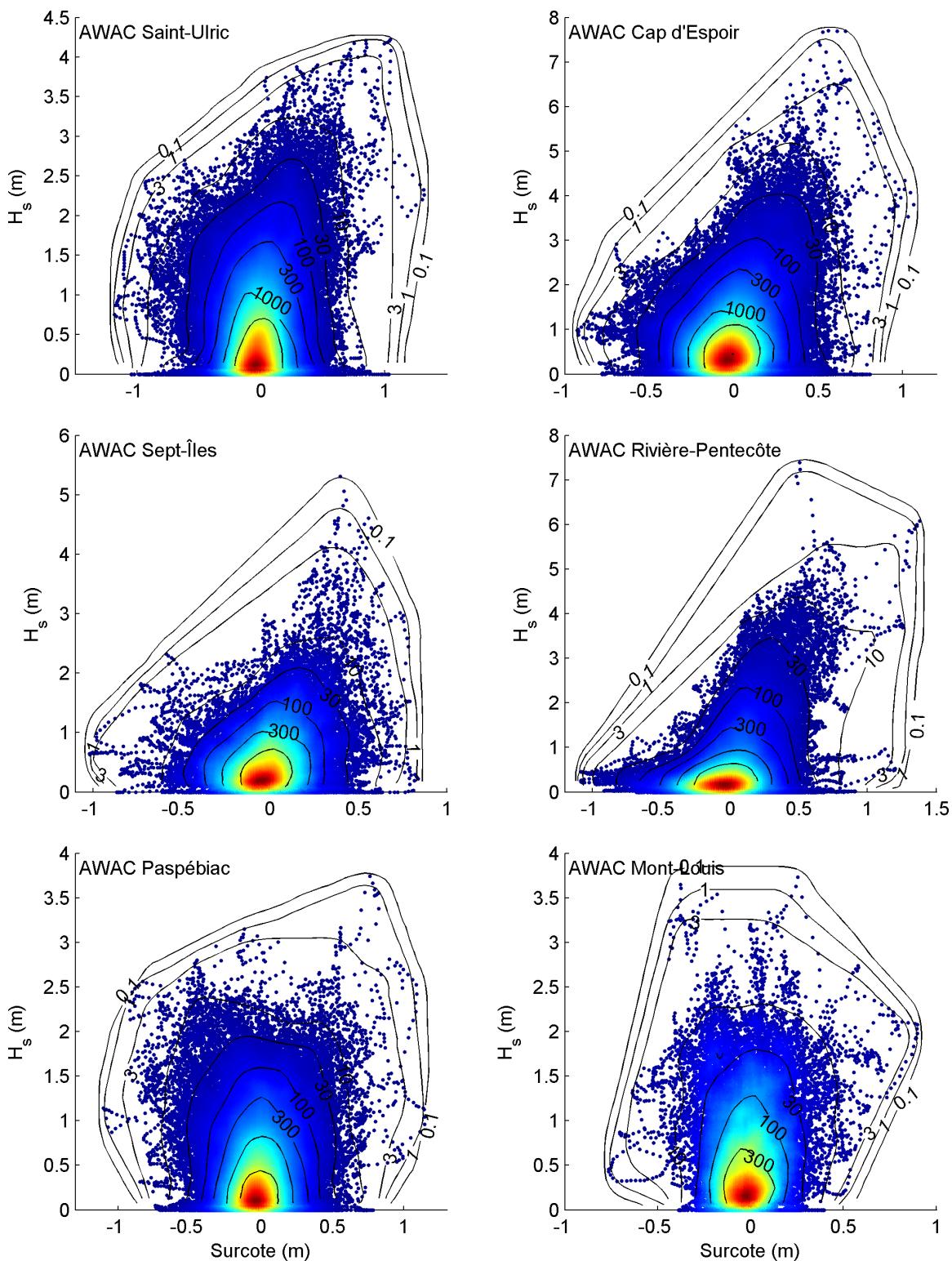


Figure 81 – Graphiques illustrant la corrélation entre la surcote et  $H_s$  pour les sites A Saint-Ulric, B Cap d'Espoir, C Sept-Îles, E Rivière-Pentecôte, F Paspébiac et G Mont-Louis. La couleur indique la densité d'événements (enregistrement aux 20 minutes); les isolignes de densité sont en unités arbitraires.

Pour définir la courbe de probabilité de SWL, en premier la partie extrême de la courbe a été calculée selon la *revised joint probability method* (RJPM) avec la fonction [**slev\_rjpm.m**], puis le résultat a été combinée avec la courbe empirique lissée basée sur les données avec la fonction [**slev\_rjpm.m**] (voir exemple à la Figure 68). Les courbes de probabilité de SWL obtenues pour les cinq sites sont présentées à la Figure 82.

Pour définir la courbe de probabilité de  $H_s$ , la partie extrême de la courbe a été calculée en ajustant une distribution de Gumbel aux données avec la fonction [**storm\_fit.m**] à partir des N plus fortes de tempêtes extraites la série temporelle complètes des vagues de chaque site. Le nombre N a été sélectionné manuellement à partir des graphiques (respectivement 75, 100, 30, 37, et 40 pour les sites A, B, C E et F, Figure 83). D'autres distributions ont également été évaluées : la distribution Paréto généralisée (GPD) produit des valeurs nettement plus faibles et sous-évalue les données les plus extrêmes, alors que la distribution de Weibull produit des résultats légèrement inférieurs de ceux obtenus avec la distribution de Gumbel. Ensuite, cette partie extrême de la courbe a été combinée avec la courbe empirique lissée basée sur les données avec la fonction [**slev\_rjpm.m**] (voir exemple à la Figure 69). Les courbes de probabilité de  $H_s$  obtenues pour les cinq sites sont présentées à la Figure 76.

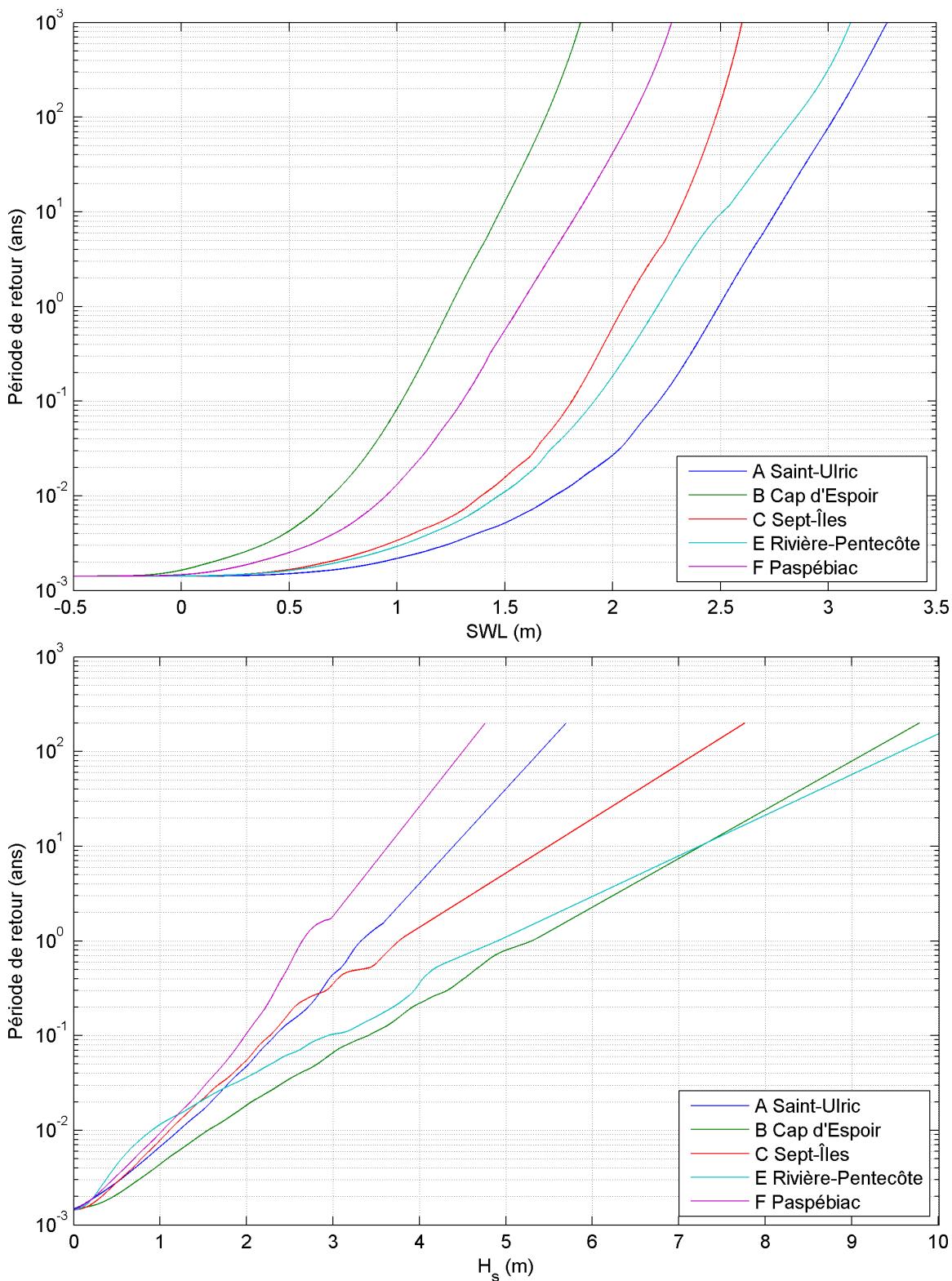


Figure 82 – Courbes de probabilité pour SWL (haut) et  $H_s$  (bas) pour chacun des sites A, B, C, E et F, qui ont été utilisées pour le calcul de la probabilité conjointe.

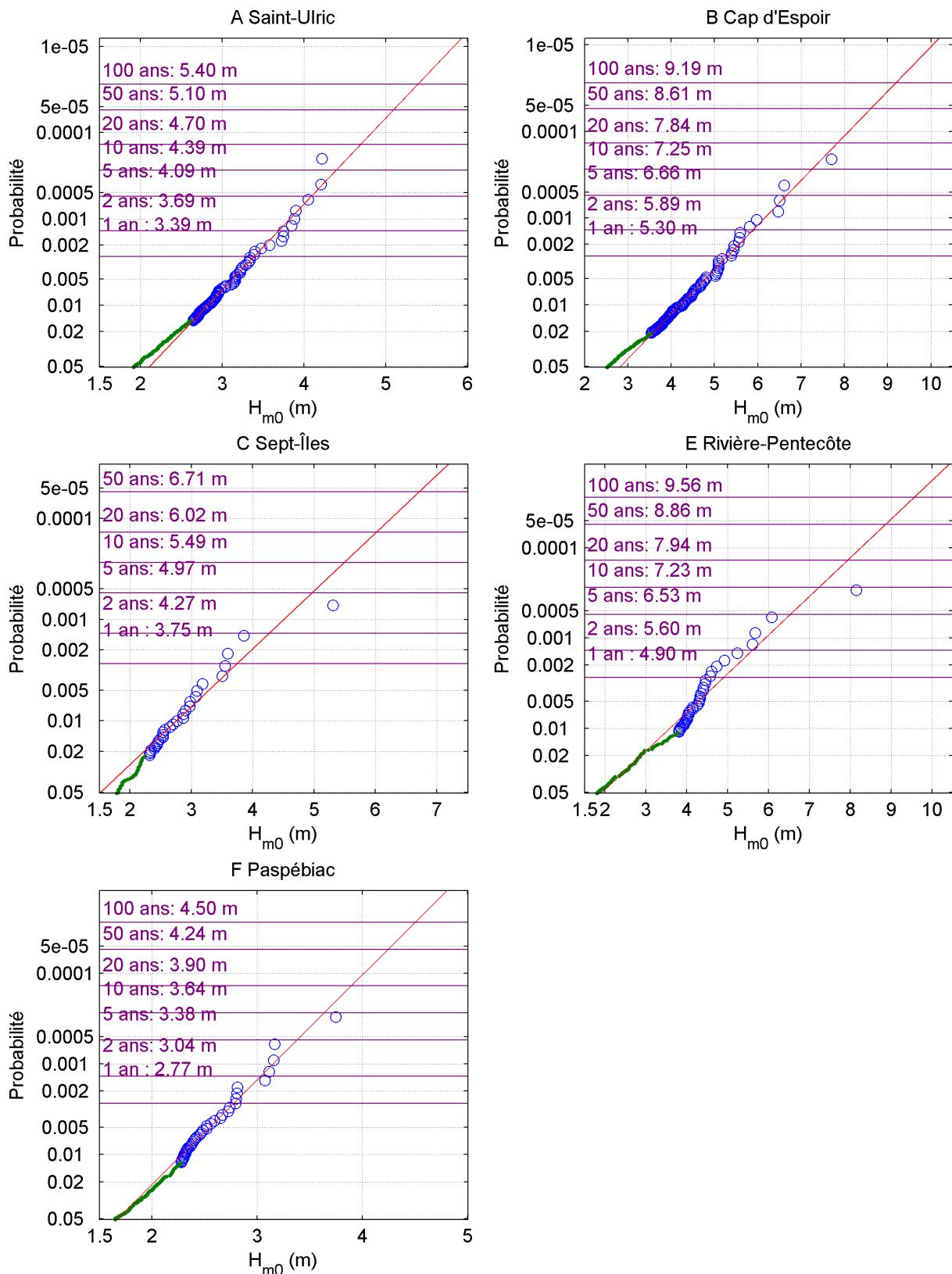


Figure 83 – Ajustement d'une distribution de Gumbel pour calculer la partie extrême de la courbe de probabilité de  $H_s$  pour chacun des sites A, B, C, E et F.

### 6.8.2 Résultat de la validation

Les calculs de probabilité conjointe pour la validation ont été effectués avec les valeurs par défaut de cooc\_fit.m, c'est-à-dire avec la copule de Gumbel et, pour la sélection des événements utilisés pour l'ajustement, l'option `select1`,  $S_{SWL} = 97\%$  et  $S_{Hs} = 99\%$ , incluant les résultats présentés au Tableau 25 et aux Figures 84 et 85.

Les métriques  $T_{bias10}$  et  $T_{rmse10}$  indiquent que la prédiction de la probabilité conjointe est la meilleure à Paspébiac, suivi par Cap d'Espoir, Saint-Ulric et Rivière-Pentecôte, et la moins bonne à Sept-Îles (Tableau 25).  $T_{bias10}$  indique que la période de retour est surestimée pour Saint-Ulric et Rivière-Pentecôte (donc SWL et  $H_s$  sous-estimés) et que la période de retour est sous-estimée pour Cap d'Espoir (donc SWL et  $H_s$  surestimés).

La métrique  $T_{bias10}$  varie selon les sites seulement entre -0,09 et 0,21 (Tableau 25). Cela signifie que les périodes de retour des dix événements observés les plus extrêmes de chaque site sont, en moyenne, mal évaluées par un facteur compris entre 0,80 (sous-évalué) et 1,61 (surévalué, Tableau 25).

De plus, les périodes de retour prédites pour les événements observés sont assez similaires avec les périodes de retour empiriques de ces événements, c'est-à-dire les événements sont généralement proches de la droite 1:1 sur la Figure 84. La période de retour prédite de l'événement le plus extrême de chaque site est nettement plus grande de la période de retour empirique (Figure 84). Il s'agit de la tempête du 6 décembre 2010 aux sites A et C et de la tempête du 30 décembre 2016 aux sites B et E. Au site F deux événements sortent du lot (Figure 84), correspondant aux tempêtes du 23 décembre 2022 et du 30 décembre 2016. Ces tempêtes avaient été jugées vraiment exceptionnelles et possiblement séculaires.

**Il est donc possible de conclure que les probabilités conjointes calculées avec la méthode avec copule comme décrite dans ce chapitre correspondent raisonnablement bien avec les observations.**

Cette validation est toutefois basée sur les séries de données observées, dont la durée est seulement entre 9 et 14 ans, sauf pour le site C qui a seulement 3,8 ans de données

*Tableau 25 – Métriques de la qualité de la probabilité conjointe avec la copule de Gumbel aux cinq sites : nb est le nombre d'événements utilisé pour l'ajustement, RMSE décrit la qualité de l'ajustement de la copule pour combiner les probabilités de SWL et de  $H_s$  (meilleur ajustement si plus petit),  $T_{bias10}$  et  $T_{rmse10}$  comparent la période de retour prédite avec la période de retour observée (meilleure prédiction si plus proche de 0), F est le facteur de combien la période de retour est sur- ou sous-évaluée. Calculs effectués avec l'option `select1` et  $S_{SWL} = 97\%$  et  $S_{Hs} = 99\%$ .*

	nb	RMSE	$T_{bias10}$	$T_{rmse10}$	F
A Saint-Ulric	58	0,698	0,206	0,246	×1.61
B Cap d'Espoir	71	0,704	-0,095	0,232	×0.80
C Sept-Îles	19	0,662	-0,018	0,312	×0.95
E Rivière-Pentecôte	50	0,692	0,116	0,246	×1.31
F Paspébiac	35	0,726	0,058	0,117	×1.14

(Tableau 24). Il est donc difficile d'évaluer si les tendances de sur- ou sous-estimer à certains sites (métrique  $T_{bias10}$ ) s'applique aussi pour des événements de récurrence 50 ans. Il se pourrait que les événements avec une récurrence de 50 ans présentent une plus forte corrélation entre SWL et  $H_s$  que les événements utilisés pour l'ajustement de la copule, bien que l'utilisation de l'option *select1* et de valeurs élevées pour  $S_{SWL}$  et  $S_{H_s}$  devrait limiter ce risque.

De manière plus générale, il faut rappeler que la bonne pratique de ne pas extrapoler les périodes de récurrence pour les vagues de tempête plus que 2,5 à 3 fois la durée de la période d'observation, c'est-à-dire pas plus que 40 ans pour les sites A et B, 27 ans pour les sites E et F, et 11 ans pour le site C.

Ces résultats peuvent être comparés à la méthode traditionnelle de la Direction de l'hydraulique du MTMD (DHYD) pour les périodes de retour de 50 ans (voir section 5.4.1a). Les paires SWL- $H_s$  de la méthode DHYD 50 ans correspondent à des périodes de retour entre 65 et 88 ans selon la méthode avec copule (Figure 85, Tableau 26). En supposant que le résultat de la méthode avec copule est juste, la méthode DHYD surévalue toujours légèrement SWL et  $H_s$  pour la période de retour de 50 ans, d'environ 0,2-0,3 cm et 0,05 à 0,10 m, soit 3% à 5% (Tableau 26). En conclusion, la méthode DHYD peut être utilisée sans problème, bien qu'elle surévalue légèrement SWL et  $H_s$ .

Ces résultats peuvent aussi être comparés à la méthode « Consultants » pour la période de retour de 50 ans (voir section 5.4.1b). Des six paires SWL- $H_s$  de cette méthode pour 50 ans (Tableau 21), les extrêmes correspondent à des périodes de retour d'un peu plus que 50 ans selon la méthode avec copule, mais les paires centrales seulement à des périodes de retour de 16 à 23 ans, selon les sites (Figure 85). En supposant que le

*Tableau 26 – Comparaison entre la méthode DHYD et la méthode avec copule : SWL et  $H_s$  pour la période de retour 50 ans selon la méthode DHYD, période de retour selon la méthode avec copule de cette combinaison SWL- $H_s$ , point le plus proche sur la courbe SWL- $H_s$ , telle que prédite par la méthode avec copule pour la période de retour 50 ans, de la paire de valeur DHYD. Calculs effectués avec la copule de Gumbel, l'option *select1* et  $S_{SWL} = 97\%$  et  $S_{H_s} = 99\%$ .*

Site	Méthode DHYD 50 ans		Période de retour selon copule	Point sur courbe copule 50 ans	
	SWL (m)	$H_s$ (m)		SWL (m)	$H_s$ (m)
A	2.76	5.10	88 ans	2.65	4.89
	2.95	4.39	88 ans	2.86	4.37
B	1.48	8.61	65 ans	1.44	8.40
	1.63	7.25	65 ans	1.60	7.24
C	2.31	6.71	76 ans	2.23	6.47
	2.43	5.49	76 ans	2.39	5.48
E	2.51	8.86	73 ans	2.39	8.56
	2.75	7.23	73 ans	2.68	7.22
F	1.84	4.24	65 ans	1.81	4.14
	2.02	3.64	65 ans	1.98	3.63

résultat de la méthode avec copule est juste, certains points de la méthode « Consultants » sous-évaluent significativement SWL et  $H_s$  (Figure 85). Le problème est le plus marqué aux sites B et F. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser cette méthode

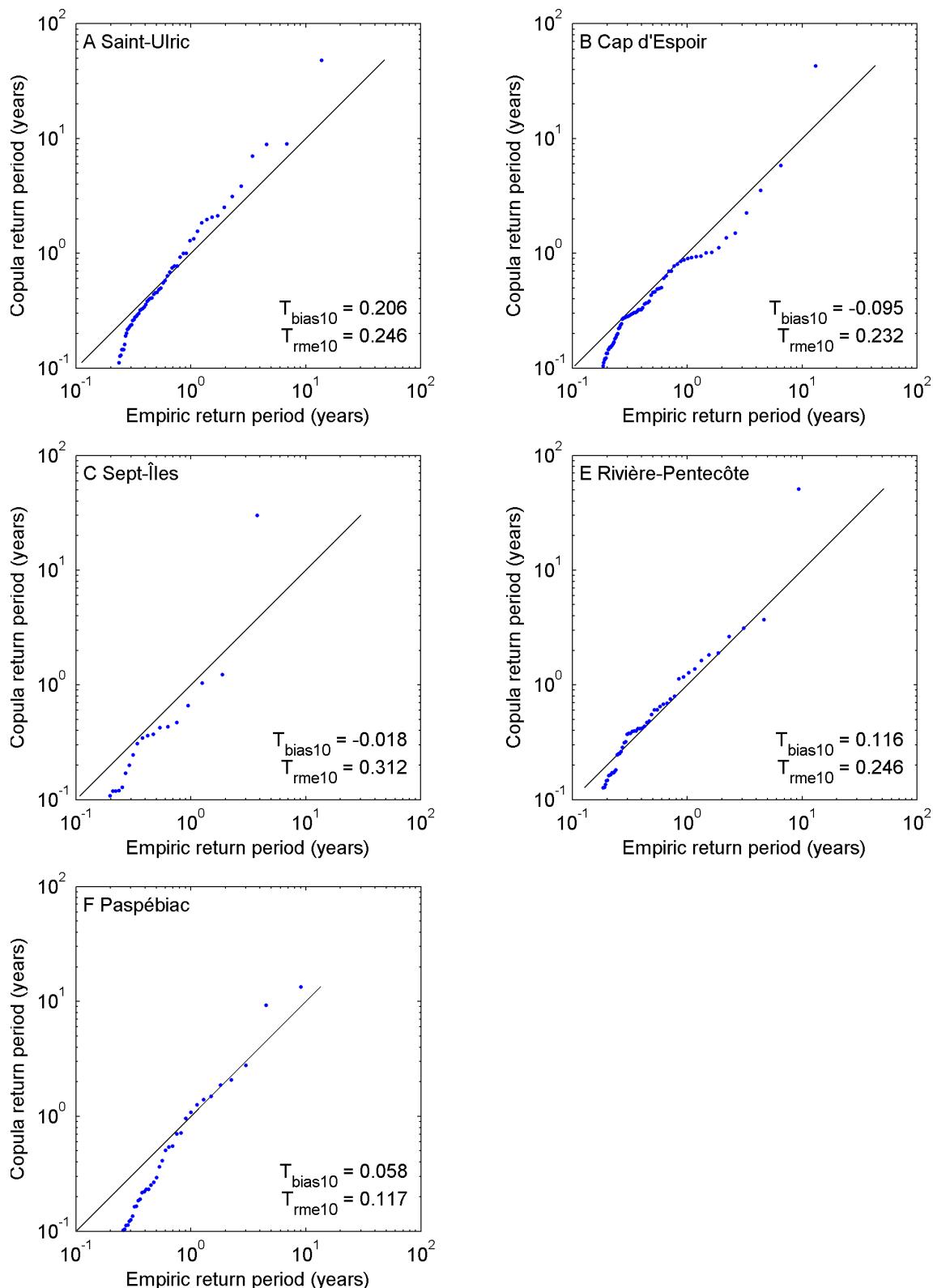


Figure 84 – Comparaison entre la période de retour prédictive pour les événements observés et leurs périodes de retour empiriques pour les cinq sites. Calculs effectués avec la copule de Gumbel, l'option select1,  $S_{SWL} = 97\%$  et  $S_{Hs} = 99\%$ .

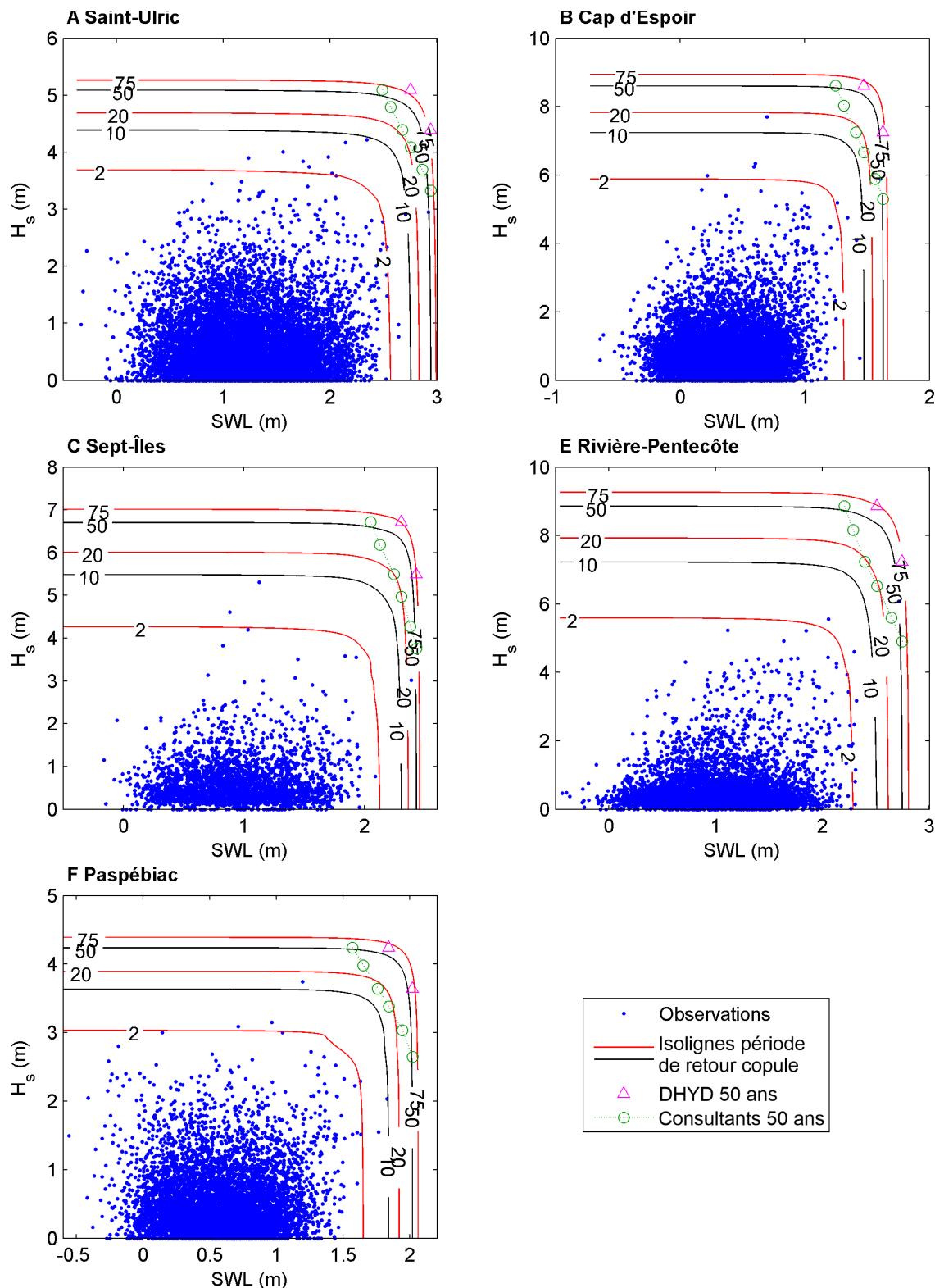


Figure 85 – Courbes  $H_s$  et SWL pour les cinq sites calculées avec la copule de Gumbel, l'option select1,  $S_{SWL} = 97\%$  et  $S_{Hs} = 99\%$ , ainsi que les événements de récurrence 50 ans selon les méthodes DHYD et « Consultants ».

## 6.9 Liste des fonctions Matlab

Les fonctions Matlab suivantes ont été écrites pour les différentes étapes (préparation et la visualisation des données de vagues et de niveau d'eau, calcul de la probabilité conjointe). La syntaxe pour utiliser chacune des fonctions est indiquée à l'Annexe 3. La boîte à outils contient dans le sous-répertoire "private" d'autres fonctions non décrites ici, qui sont appelées par les fonctions principales et que l'utilisateur n'a pas besoin d'utiliser directement.

Les fonctions Matlab devraient fonctionner sans problème avec une version 2012A ou plus récente de Matlab. Les fonctions nécessitent aussi les boîtes à outils "*Statistics Toolbox*" et "*Signal processing Toolbox*", qui doivent être achetées de Mathworks en même temps que Matlab, et la boîte à outils "*T\_TIDE*" de Rich Pawlowicsz (disponible gratuitement à <https://www-old.eoas.ubc.ca/~rich/>).

### **Prétraitement des données de niveau d'eau**

- slev\_time.m      Convertit des données de niveau d'eau avec pas de temps variables en une série temporelle régulière (incluant filtre passe-bas et interpolation d'intervalles jusqu'à une heure sans données).
- slev\_fill.m      Pour une série de données de niveau d'eau, remplit les intervalles de quatre heures sans données en additionnant les prédictions de marées (produites avec t\_tide.m pour le site) et de l'interpolation de la surcote calculée pour le même site. La fonction peut aussi utiliser la surcote mesurée avec un marégraphe à proximité pour des plus longs intervalles.
- phase\_adjust.m    Détermine des paramètres pour ajuster l'amplitude et le déphasage entre deux séries temporelles (par exemple les niveaux d'eau mesurés par deux marégraphes différents). Ces paramètres sont utilisés par la fonction slev\_fill.m.

### **Calcul des distributions de SWL et des distributions de $H_s$**

- surge\_find.m     Trouve les plus fortes surcotes ou les plus hauts niveaux d'eau dans une série temporelle de niveaux d'eau. La fonction peut retourner une valeur par année,  $r$  valeurs par années ou  $n$  valeurs au total.
- slev\_rjpm.m     Applique la *revised joint probability method* (RJPM) pour calculer la période de retour des niveaux d'eau extrêmes. La fonction retourne la fonction de répartition (exprimée en période de retour) qui est utilisée par empiric\_cdf.m et cooc\_toproba.m.
- cooc\_cdf.m      Produit une fonction de répartition exprimée en période de retour, soit (1) en interpolant avec une fonction spline des périodes de retour calculées avec un programme externe, soit (2) en appelant une fonction "*inverse CDF*" de Matlab (le handle de celle-ci et les paramètres d'ajustement de celle-ci doivent être des arguments de la fonction cooc\_cdf.m).
- empiric\_cdf.m    Calcule une fonction de répartition empirique (exprimée en période de retour ou en probabilité) à partir d'une série d'observation. Le résultat peut

être lissé. Le résultat peut aussi être combiné avec une fonction de répartition pour les valeurs extrêmes (produit par slev\_rjpm.m, storm\_fit, cooc\_cdf.m ou un programme externe) pour étendre l'étendue couverte par la fonction de répartition.

- storm\_find.m Trouve les plus fortes tempêtes dans une série temporelle de vagues (hauteur, période et direction).
- storm\_fit.m Ajuste différentes lois de probabilités (notamment lois de Weibull, Gumbel, Extremum généralisée et Paréto généralisée) à des données de vagues pour calculer les périodes de retour des vagues extrêmes. L'ajustement peut être évalué graphiquement et le nombre d'observations utilisées peut être facilement modifié. La fonction peut retourner la fonction de répartition (exprimée en période de retour) qui est utilisée par empiric\_cdf.m et cooc\_toproba.m.

### ***Préparation et visualisation des données conjointe SWL et $H_s$***

- cooc\_prep.m Prépare un jeu de données commun  $H_s$  et SWL, soit une série temporelle à un pas de temps de 15-60 minutes (en interpolant au besoin  $H_s$ ), soit avec seulement un événement pour chaque marée haute (Figure 64). La tendance linéaire de SWL est retirée aux longues séries données. La fonction ajoute à la série temporelle conjointe aussi la direction et la période des vagues (si disponibles), ainsi que les surcotes. Si la profondeur est fournie, la fonction calcule aussi la pente moyenne du 1% des vagues les plus grandes. Ce jeu de donnée peut ensuite être utilisé par cooc\_stat.m, cooc\_toproba.m et cooc\_phase.m.
- cooc\_stat Prépare des figures et des statistiques descriptives de la relation entre  $H_s$  et SWL (Figure 65), ou entre  $H_s$  et surcote (Figures 66 et 67). La fonction utilise un jeu de données commun  $H_s$  et SWL préparé par cooc\_prep.m, soit la version avec les données sous-échantillonées aux marées hautes, soit la version avec la série temporelle complète.

### ***Calcul des probabilités conjointes***

- cooc\_toproba.m Convertit le jeu de donnée commun SWL- $H_s$  produit par cooc\_prep.m à un jeu de donnée dans l'espace probabiliste en utilisant une fonction de répartition pour SWL et une fonction de répartition de  $H_s$ .
- cooc\_fit.m Ajuste cinq fonctions copules (Gumbel, Clayton, Frank, Gaussian et t) au jeu de donnée commun SWL- $H_s$  dans l'espace probabiliste, qui a été produit par cooc\_toproba.m. Calcule pour chaque copule les indicateurs de qualité de prédiction AIC, BIC et RMSE. Peut calculer la probabilité conjointe pour de très nombreuses combinaisons de SWL et  $H_s$  afin de tracer des courbes de combinaison SWL- $H_s$  avec la même période de retour.
- subsample\_return.m À partir des résultats de cooc\_fit.m, sous-échantillonne et renvoie plusieurs points sur une des courbe de combinaison SWL- $H_s$  ayant la même période de retour. Estime aussi la période des vagues si la

profondeur avait été indiquée dans cooc\_prep.m. Exporte les résultats dans un fichier texte ASCII ou dans un fichier Excel.

cooc\_fromcopula.m Cette fonction calcule la période de retour pour des valeurs spécifiques de SWL et  $H_s$  en utilisant les résultats de cooc\_fit.m.

### Autres fonctions

- cooc\_phase Pour les plus fortes tempêtes, détermine le déphasage entre d'une part le maximum de  $H_s$  et d'autre part la plus proche marée haute, le maximum de surcote à  $\pm 36$  heures et le minimum de surcote à  $\pm 36$  heures (Figure 86). Cette fonction utilise un jeu de données commun  $H_s$  et SWL à un pas de temps de 15-60 minutes produit par cooc\_prep.m.
- wave\_slope.m Calcul la pente des vagues (rapport hauteur sur longueur des vagues) à partir de la hauteur des vagues, de la période des vagues et de la profondeur. La fonction peut aussi calculer la période des vagues à partir de la hauteur des vagues, de la pente des vagues et de la profondeur.

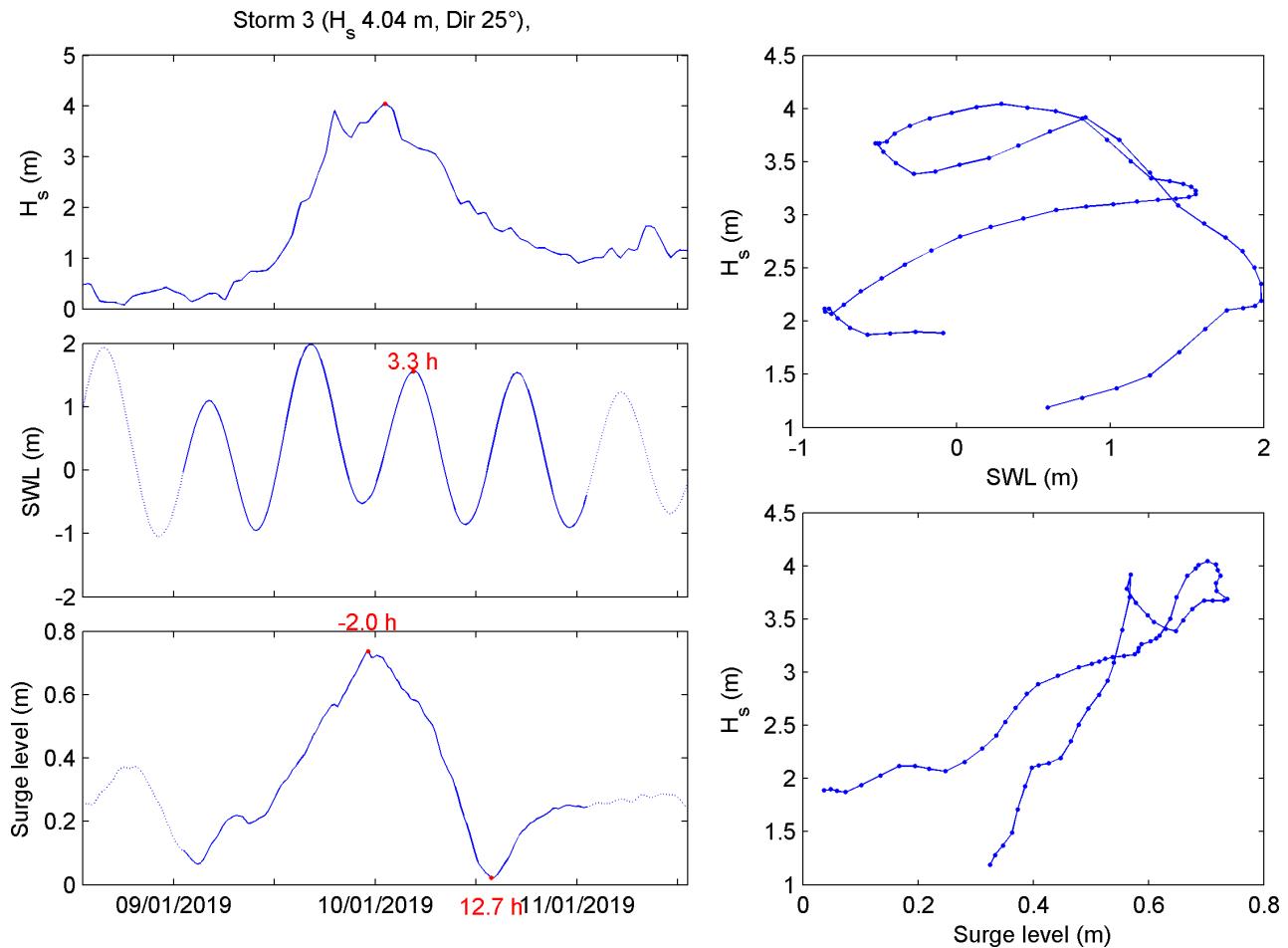


Figure 86 – Déphasage entre d'une part le maximum de  $H_s$  et d'autre part la plus proche marée haute, le maximum de surcote à  $\pm 36$  heures et le minimum de surcote à  $\pm 36$  heures. Cette figure est produite par la fonction cooc\_phase.m.

## 7 Conclusions

La mise en œuvre de ce projet – dans la continuité des précédents – pour l'acquisition de données océanographiques inédites recouvrant différents secteurs à risque de l'estuaire et du golfe du St-Laurent, ainsi que dans la baie des Chaleurs constitue une démarche essentielle dans l'amélioration des connaissances maritimes et donc de la gestion des risques liée à l'occupation du territoire côtier. Les présents résultats obtenus sur trois années seulement s'inscrivent dans la construction d'une base de données océanographiques à haute résolution de plus de treize années dans l'estuaire et à la pointe de la Gaspésie, de neuf années pour le secteur nord-ouest du golfe et l'intérieur de la baie des Chaleurs; et l'ajout d'un nouveau site à Mont-Louis fournit pour l'instant un peu moins de deux ans de données pour le nord de la Gaspésie.

Sur ces trois années de suivi des conditions maritimes, l'intensité et la fréquence des événements extrêmes ont évolué dans le temps et présentent des disparités géographiques : À St-Ulric et Paspébiac, malgré des records de hauteur de vagues égalés ou surpassés, le régime de vagues ne diffère que sur quelques événements extrêmes, et demeure semblable aux précédentes périodes de monitorage. Plusieurs représentations graphiques vont dans ce sens. Ces résultats suggèrent l'idée d'un seuil limite atteint pour l'estuaire maritime du St-Laurent et de la baie des Chaleurs. Pour les sites ouverts sur le Golfe – Cap d'Espoir et Rivière-Pentecôte – l'augmentation des hauteurs de vagues de tempête ne se limite pas à quelques événements, mais au contraire semble se généraliser à partir d'un certain seuil. Les records de hauteur de vagues ont été pulvérisés de plus de 1 m, voire 2 m pour Rivière-Pentecôte. Lors de ces trois années de suivi, les vagues de tempête sont plus hautes et/ou plus fréquentes dans le golfe du St-Laurent par rapport aux années précédentes. À Mont-Louis, un site a priori plus exposé que St-Ulric, montre un régime de vagues plus faible en termes de hauteur atteinte et de fréquence de tempête. Un plus long monitorage de ce site sera nécessaire pour confirmer cette hypothèse.

Les outils mathématiques utilisées pour tenter de projeter la récurrence des événements extrêmes démontrent leur pertinence mais présentent des limites temporelles certaines, d'une part liée à la durée de l'échantillonnage sur laquelle se base ces lois probabilistes, et d'autre part sur la variabilité interannuelle et la non-linéarité de l'intensité des phénomènes environnementaux. À St-Ulric, les valeurs calculées par les différents modèles statistiques dans ce rapport sont très similaires à ce qui avait été présenté dans le précédent rapport. À Cap d'Espoir, les vagues supérieures à 8 m ont une récurrence aux 30 ans, alors qu'à Rivière-Pentecôte, les vagues de plus de 7,50 m ont une récurrence entre 15 et 20 ans selon le modèle statistique choisi. À Paspébiac, les valeurs issues des différents modèles statistiques sont également très proches de celles calculées alors qu'il n'y avait que 6 années de données disponibles. Les vagues de plus de 3,75 m (record) ont une récurrence aux 20 ans. À Mont-Louis le jeu de données est encore trop faible pour avoir des résultats pertinents. Il est recommandé de poursuivre les mesures des vagues pendant plusieurs années notamment dans la baie des Chaleurs et le nord du golfe afin d'affiner les estimations de période de retour au-delà de 20 ans; également de continuer les efforts de mesure dans l'estuaire et au Cap d'Espoir.

Les données de glace ont confirmé la tendance à la diminution du couvert de glace dans l'estuaire et le Golfe, avec une plus grande fréquence de périodes libres de glace pendant l'hiver. Il y a eu particulièrement peu de glace lors du dernier hiver 2023-2024, ce qui a permis une plus grande proportion de tempête au printemps dans l'estuaire et le nord du

Golfe. Dans la baie des Chaleurs, une faible présence de glace est également corrélée avec un nombre de tempête plus important.

Les données de courants enregistrées pour ce projet sont très similaires à celles déjà acquises précédemment, démontrant le caractère conservateur de ce paramètre océanographique, car très lié aux marées astronomiques et au débit du fleuve St-Laurent. À Mont-Louis, le courant de Gaspé imprime en surface un fort signal vers l'est, tant en surface qu'en profondeur. C'est à ce site qu'on observe les courants les plus élevés, atteignant jusqu'à 1,5 m/s.

Les données de niveau d'eau mesurées présentent de nombreux événements de surcotes mais qui ne sont pas forcément simultanés avec les plus hauts niveaux, c'est-à-dire lors des marées hautes de vive-eau, ce qui réduit le risque de submersion du littoral. Le déploiement des marégraphes sur 6 stations a permis d'obtenir une bonne couverture de l'ensemble de la zone géographique. Les données ont révélé 4 événements majeurs de surcote, soit le 22 septembre 2022, le 24 décembre 2022, le 10 janvier 2024 et le 14 janvier 2024. Lors de ces événements, il est arrivé que le niveau d'eau prédit soit surpassé de plus de 1 m dans les différentes ports et marinas, où sont situés les marégraphes (à l'exception de Gaspé et Mont-Louis, avec une surcote inférieure à 1 m). La comparaison des surcotes déduites des marégraphes et celles des AWAC placés au large montre une très bonne corrélation dans leur intensité et la synchronicité. Ce résultat confirme la fiabilité des données fournies par les AWAC et la rigueur de leur analyse.

La prolongation du suivi des conditions océanographiques sur ces stations a permis de développer une expertise scientifique élevée par l'intermédiaire d'une instrumentation performante et un affinage dans la qualité des données transmises au ministère. Il est donc recommandé de poursuivre l'effort de collecte des données scientifiques sur l'ensemble des secteurs côtiers à risque.

Pour le calcul des probabilités conjointes de vagues extrêmes et de niveaux d'eau extrêmes, c'est-à-dire la probabilité que se produisent en même temps une tempête avec de très fortes vagues et un niveau d'eau très haut, il est recommandé d'utiliser la méthode avec copule. En effet, c'est la méthode dominante dans la littérature scientifique depuis une dizaine d'années et elle permet une grande souplesse pour la période de retour et le nombre de paires SWL-H<sub>s</sub> prédites.

Une série de fonctions Matlab (boîte à outils) a été écrite pour ces calculs de probabilité conjointe avec copule, couvrant tout le traitement à partir des séries temporelles d'observation de hauteurs de vagues (H<sub>s</sub>) et de niveaux d'eau (SWL), jusqu'aux paires de valeurs H<sub>s</sub>-SWL prédites pour une période de retour donnée. Pour calculer les périodes de retour de SWL, il est recommandé d'utiliser la fonction inclue dans cette boîte à outils, qui implémente la *revised joint probability method* (RJPM) de Tawn et Vassie (1989) en analysant séparément la marée astronomique et la composante résiduelle non-tidale, avant d'obtenir par convolution la probabilité combinée.

Pour le calcul de la probabilité conjointe avec la méthode avec copule il est recommandé d'utiliser la copule de Gumbel et pour l'ajustement de la copule seulement les événements avec SWL dépassant le centile 97% et H<sub>s</sub> dépassant le centile 99%.

Le calcul de la probabilité conjointe SWL-H<sub>s</sub> avec la nouvelle boîte à outils Matlab a été validée avec succès pour cinq sites dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent. Cette

validation est toutefois basée sur les séries de données observées, dont la durée est seulement entre 14 ans pour le site de Saint-Ulric, de 13 ans pour le site de Cap d'Espoir, de 9 ans pour les sites de Rivière-Pentecôte et Paspébiac et de 4 ans pour le site de Sept-Îles.

La qualité des résultats de probabilité conjointe dépend directement de la qualité de la fonction de répartition (ou les périodes de retour) des niveaux d'eau (SWL) et de la fonction de répartition (ou les périodes de retour) des hauteurs de vagues ( $H_s$ ). Il est donc essentiel de procéder avec soin au contrôle de qualité des données de niveau d'eau et de vagues, puis de choisir une distribution probabiliste bien adaptée pour le calcul des périodes de retour des niveaux d'eau extrême, et de même pour les hauteurs de vagues extrêmes.

La méthode traditionnelle de la Direction de l'hydraulique du MTMD surévalue légèrement les vagues et les niveaux d'eau pour la période de retour 50 ans. Nous ne déconseillons pas formellement cette méthode traditionnelle, mais il faut savoir qu'elle ajoutera marge de sécurité supplémentaire dont la magnitude variera de site en site.

## 8 Description des fichiers de données

Avec ce rapport sont transmis d'une part toutes les données enregistrées durant la durée du présent projet R841.2, mais aussi des fichiers récapitulatifs de toutes des paramètres de vagues et des niveaux d'eau couvrant tous les projets du MTQ (CC07.1, CC17.1, R841.1 et R841.2) et le projet du MSP (Mouillages pour l'érosion de berges 2010-2014) aux sites. Les noms des fichiers récapitulatifs sont mis en évidence **en gras** ci-dessous.

- Fuseau horaire : – **Heure normale de l'Est** (HNE, UTC-5) pour les données des d'AWACs (vagues, courants, glaces, niveaux d'eaux aux sites A, B, E, F et G);
- **UTC** pour les marégraphes (niveaux d'eaux à Carleton, Paspébiac, Ste-Thérèse-de-Gaspé, Gaspé, Mont-Louis et Baie-Trinité).

Pour les bursts de vagues et les données de glace, le temps indiqué est le milieu de la période échantillonnée qui durait 1024 s. Par contre, pour les profils de courants, le temps indiqué est le début de la période de mesures qui durait entre 90 et 150 s (cf. Tableau 3).

Liste des sites des AWACs : A – Saint-Ulric (48° 48,00' N / 67° 44,60' W)  
 B – Cap d'Espoir (48° 23,35' N / 64° 17,35' W)  
 E – Rivière-Pentecôte (49° 41,77' N / 67° 08,70' W)  
 F – Paspébiac (47° 58,90' N / 65° 20,20' W)  
 G – Mont-Louis (49° 15,54' N / 65° 39,15' W)

### *Données de vagues*

<b>SPA_21A-23B_vagues.xlsx</b>	Paramètres de vagues du mouillage A pour l'ensemble du projet (mai 2021 à mai 2024).
<b>SPB_21A-23B_vagues.xlsx</b>	Paramètres de vagues du mouillage B pour l'ensemble du projet (juin 2021 à mai 2024).
<b>SPE_21A-23B_vagues.xlsx</b>	Paramètres de vagues du mouillage E pour l'ensemble du projet (mai 2021 à mai 2024).
<b>SPF_21A-23B_vagues.xlsx</b>	Paramètres de vagues du mouillage F pour l'ensemble du projet (juin 2021 à mai 2024).
<b>SPG_22B-23B_vagues.xlsx</b>	Paramètres de vagues du mouillage G pour l'ensemble du projet (septembre 2022 à mai 2024).
<b>SPA_10A-20B_vagues.xlsx</b>	Paramètres de vagues du mouillage A couvrant tous les projets MTQ (mai 2010 à mai 2024).
<b>SPB_14A-20B_vagues.xlsx</b>	Paramètres de vagues du mouillage A couvrant tous les projets MTQ (octobre 2010 à mai 2024).
<b>SPE_14A-20B_vagues.xlsx</b>	Paramètres de vagues du mouillage A couvrant tous les projets MTQ (mai 2014 à mai 2024).
<b>SPF_15A-20B_vagues.xlsx</b>	Paramètres de vagues du mouillage A couvrant tous les projets MTQ (mai 2015 à mai 2024).

Ces fichiers Excel contiennent chacun trois feuilles de calcul avec :

- 1) tous les résultats des calculs incluant les valeurs mauvaises ainsi qu'un code de qualité pour chaque donnée (cf. section 3.2);

- 2) seulement les résultats bons ou douteux, les résultats mauvais ayant été remplacés par -999;
- 3) seulement les résultats bons, les résultats douteux ou mauvais ayant été remplacés par -999.

**SP\_ABEFGspectre.zip** Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres non directionnels des vagues :

SPA21A.spectre	mouillage A, été 2021 + hiver 2021/2022
SPA22A.spectre	mouillage A, été 2022
SPA22B.spectre	mouillage A, hiver 2022/2023
SPA23A.spectre	mouillage A, été 2023
SPA23B.spectre	mouillage A, hiver 2023/2024
SPB21A.spectre	mouillage B, été 2021 + hiver 2021/2022
SPB22A.spectre	mouillage B, été 2022
SPB22B.spectre	mouillage B, hiver 2022/2023
SPB23A.spectre	mouillage B, été 2023
SPB23B.spectre	mouillage B, hiver 2023/2024
SPE21A.spectre	mouillage E, été 2021 + hiver 2021/2022
SPE22A.spectre	mouillage E, été 2022
SPE22B.spectre	mouillage E, hiver 2022/2023
SPE23A.spectre	mouillage E, été 2023
SPE23B.spectre	mouillage E, hiver 2023/2024
SPF21A.spectre	mouillage F, été 2021 + hiver 2021/2022
SPF22A.spectre	mouillage F, été 2022
SPF22B.spectre	mouillage F, hiver 2022/2023
SPF23A.spectre	mouillage F, été 2023
SPF23B.spectre	mouillage F, hiver 2023/2024
SPG21A.spectre	mouillage G, été 2021 + hiver 2021/2022
SPG22A.spectre	mouillage G, été 2022
SPG22B.spectre	mouillage G, hiver 2022/2023
SPG23A.spectre	mouillage G, été 2023
SPG23B.spectre	mouillage G, hiver 2023/2024

Ces fichiers de texte ASCII séparé par des tabulations contiennent les spectres non directionnels en  $\text{m}^2 \text{Hz}^{-1}$  avec les fréquences en première ligne et les date/heures en première colonne.

**SPA\_spectredir.zip** Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site A :

SPA21A.spectredir	mouillage A, été 2021 + hiver 2021/2022
SPA22A.spectredir	mouillage A, été 2022
SPA22B.spectredir	mouillage A, hiver 2022/2023
SPA23A.spectredir	mouillage A, été 2023
SPA23B.spectredir	mouillage A, hiver 2023/2024

**SPB\_spectredir.zip** Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site B :

SPB21A.spectredir	mouillage B, été 2021 + hiver 2021/2022
SPB22A.spectredir	mouillage B, été 2022

	SPB22B.spectredir	mouillage B, hiver 2022/2023
	SPB23A.spectredir	mouillage B, été 2023
	SPB23B.spectredir	mouillage B, hiver 2023/2024
SPE_spectredir.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site E :	
	SPE21A.spectredir	mouillage E, été 2021 + hiver 2021/2022
	SPE22A.spectredir	mouillage E, été 2022
	SPE22B.spectredir	mouillage E, hiver 2022/2023
	SPE23A.spectredir	mouillage E, été 2023
	SPE23B.spectredir	mouillage E, hiver 2023/2024
SPF_spectredir.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site F :	
	SPF21A.spectredir	mouillage F, été 2021 + hiver 2021/2022
	SPF22A.spectredir	mouillage F, été 2022
	SPF22B.spectredir	mouillage F, hiver 2022/2023
	SPF23A.spectredir	mouillage F, été 2023
	SPF23B.spectredir	mouillage F, hiver 2023/2024
SPG_spectredir.zip	Fichier compressé contenant les fichiers suivants avec les spectres directionnels des vagues au site G :	
	SPG22B.spectredir	mouillage G, hiver 2022/2023
	SPG23A.spectredir	mouillage G, été 2023
	SPG23B.spectredir	mouillage G, hiver 2023/2024
	Ces fichiers de texte ASCII séparé par des tabulations contiennent les spectres directionnels en $\text{m}^2 \text{Hz}^{-1}$ degrés $^{-1}$ avec les directions en degrés en première ligne, les dates/heures (format Excel) en première colonne et les fréquences en deuxième colonne. Chaque burst occupe 45 à 48 lignes (la présence de la date en première indique le début du prochain burst). Pour les fréquences auxquelles le spectre directionnel n'a pas pu être déterminé, les valeurs sont remplacées par -999.	

### *Données de courants*

SPA21Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage A, été 2021 + hiver 2021/2022
SPA22Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage A, été 2022
SPA22Bprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage A, hiver 2022/2023
SPA23Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage A, été 2023
SPA23Bprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage A, hiver 2023/2024
SPB21Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage B, été 2021 + hiver 2021/2022
SPB22Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage B, été 2022
SPB22Bprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage B, hiver 2022/2023
SPB23Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage B, été 2023
SPB23Bprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage B, hiver 2023/2024
SPE21Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage E, été 2021 + hiver 2021/2022
SPE22Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage E, été 2022

SPE22Bprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage E, hiver 2022/2023
SPE23Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage E, été 2023
SPE23Bprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage E, hiver 2023/2024
SPF21Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage F, été 2021 + hiver 2021/2022
SPF22Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage F, été 2022
SPF22Bprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage F, hiver 2022/2023
SPF23Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage F, été 2023
SPF23Bprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage F, hiver 2023/2024
SPG21Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage G, été 2021 + hiver 2021/2022
SPG22Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage G, été 2022
SPG22Bprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage G, hiver 2022/2023
SPG23Aprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage G, été 2023
SPG23Bprofil.xlsx	Profils de vitesses du mouillage G, hiver 2023/2024

Ces fichiers Excel contiennent chacun neuf feuilles de calcul avec les vitesses Est, Nord, verticale et la magnitude de vitesse horizontale (U) en m/s, la direction en degrés depuis le Nord, l'amplitude du signal pour chaque faisceau acoustique en *count*, et les données des capteurs auxiliaires (hauteur d'eau au-dessus du fond en m, température en °C, voltage de la batterie en V, orientation en degré depuis le nord magnétique, inclinaison de l'instrument en degré).

La hauteur du centre des cellules au-dessus de la tête de l'instrument est dans les feuilles de calcul. La hauteur de la tête de l'instrument au-dessus du fond est de 0,5 m.

### *Données de glaces*

ABEF_21A_glace.xlsx	Statistiques de glace aux sites A, B, E et F pour l'hiver 2021/2022.
ABEFG_22A_glace.xlsx	Statistiques de glace aux sites A, B, E, F, et G pour l'hiver 2022/2023.
ABEFG_23A_glace.xlsx	Statistiques de glace aux sites A, B, E, F et G pour l'hiver 2023/2024.

Ces fichiers Excel contiennent une feuille de calcul pour chaque site avec les statistiques suivantes pour chaque burst : pourcentage de couverture de glace, épaisseur maximale, moyenne et minimale des flots de glace (m), écart-type de l'épaisseur des flots de glace (m).

### *Niveaux d'eau*

#### Maregraphe\_Baie-Trinité\_22b-23b.xlsx

Données du marégraphe installé au quai de Baie-Trinité pour la durée du projet (novembre 2022 à avril 2024).

**Maregraphe\_Carleton\_22a-24b**

Données du marégraphe installé dans le port de Carleton-sur-mer pour la durée du projet (août 2022 à avril 2024).

**Maregraphe\_Gaspé\_23a-23b.xlsx**

Données du marégraphe installé dans la marina de Gaspé pour la durée du projet (juin 2023 à juin 2024).

**Maregraphe\_Mont-Louis\_21a-23b.xlsx**

Données du marégraphe installé au quai de Mont-Louis pour la durée du projet (mars 2021 à avril 2024).

**Maregraphe\_Paspébiac\_21a-23b.xlsx**

Données du marégraphe installé dans le port de Paspébiac pour la durée du projet (avril 2021 à avril 2024).

**Maregraphe\_Ste-Thérèse-de-Gaspé\_22a-23b.xlsx**

Données du marégraphe installé dans le port de Ste-Thérèse-de-Gaspé pour la durée du projet (août 2022 à avril 2024).

**Maregraphe\_Mont-Louis\_19a-23b.xlsx**

Données du marégraphe installé au quai de Baie-Trinité pour tous les projets du MTQ à ce site (mai 2019 à avril 2024).

**Maregraphe\_Paspébiac\_21a-23b.xlsx**

Données du marégraphe installé dans le port de Paspébiac pour tous les projets du MTQ à ce site (juillet 2015 à avril 2024).

Ces fichiers Excel contiennent la température et le niveau d'eau mesuré par le marégraphe (moyenne des deux instruments si deux séries de données valides sont disponibles), le niveau d'eau lissé avec un filtre passe-bas de 20 minutes, les prédictions avec T\_TIDE et les surcotes/décotes (par rapport aux prédictions avec T\_TIDE).

**Maregraphes\_min-max\_projet.xlsx**

Analyse des surcotes des marégraphes pour la durée du projet.

**Maregraphes\_min-max\_tout.xlsx**

Analyse des surcotes des marégraphes pour tous les projets du MTQ à ces sites.

Ces fichiers Excel contiennent une feuille Excel par site avec les 10 ou 20 événements extrêmes.

Le niveau d'eau est indiqué **par rapport à CGVD28**. Le fuseau horaire est **UTC**.

**ABEFG\_niveaux\_eau\_projet.xlsx**

Fichier Excel avec le niveau d'eau mesuré par les AWACs aux sites A, B, E, F et G pour la durée du projet.

**ABEFG\_niveaux\_eau\_tout.xlsx**

Fichier Excel avec le niveau d'eau mesuré par les AWACs aux sites A, B, E, F et G couvrant tous les projets MTQ/MSP à ces sites.

Ces fichiers contiennent une feuille Excel par site avec le niveau d'eau mesuré par les AWACs et les surcotes/décotes (par rapport aux prédictions avec T\_TIDE), ainsi qu'une feuille Excel par site avec les 10 ou 20 événements extrêmes.

Le niveau d'eau est indiqué **par rapport au niveau marin moyen**. Le fuseau horaire est **Heure normale de l'Est** (HNE, UTC-5).

## Références

- Bruun, J.T., Tawn, J.A., 1998. Comparison of approaches for estimating the probability of coastal flooding. *Applied Statistics*, 47, 405-423.
- Cavanaugh, J.E., Neath, A.A., 2019. The Bayesian information criterion: background, derivation, and applications. *WIREs Computational Statistics*, 11, e1460. doi:10.1002/wics.1460
- CERC, 1984. Shore protection manual. Coastal Engineering Research Center, US Army Corps of Engineers, U.S. Government Printing Office, Washington, 2 volumes, pagination multiple.
- CIRIA, CUR et CETMEF, 2007. The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition). C683, CIRIA, London, 1267 p.
- Coles, S., 2001. An introduction to statistical modeling of extreme values. Springer, 208 p.
- Coles, S., Heffernan, J., Tawn, J., 1999. Dependence measures for extreme value analyses. *Extremes*, 2, 339-365. doi:10.1023/A:1009963131610
- Didier, D., Baudry, J., Bernatchez, P., Dumont, D., Sadegh, M., Bismuth, E., Bandet, M., Dugas, S., Sévigny, C., 2019. Multihazard simulation for coastal flood mapping: Bathtub versus numerical modelling in an open estuary, Eastern Canada. *Journal of Flood Risk Management*, 12, e12505. doi:10.1111/jfr3.12505
- Dohner, S., DuVal, C., 2022. Quantifying Estuarine Hydrometeorological Coastal Hazards Using a Combined Field Observation and Modeling Approach. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10, 335. doi:10.3390/jmse10030335
- Doong, D.J., Ou, S.H., Kao, C.C., 2008. A study on the joint probability of waves and water levels during typhoons. In: Proceedings of Seventh International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC VII), Dubai, Paper No D-15/128, 9 p.
- Douglass, S.L., Webb, B.M., 2020. Highways in the coastal environment, 3rd edition. Publication No. FHWA-HIF-19-059, Hydraulic Engineering Circular No. 25, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, 385 p.
- Drejza, S., Friesinger, S., Bernatchez, P., 2014. Vulnérabilité des infrastructures routières de l'Est du Québec à l'érosion et à la submersion côtière dans un contexte de changements climatiques : Caractérisation des côtes, dynamique hydrosédimentaire et exposition des infrastructures routières à l'érosion et à la submersion, Est du Québec Projet X008.1. Rapport remis au ministère des Transport du Québec. Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski, 226 p. + annexes. doi:10.13140/RG.2.1.3626.5122
- Eicken, H., Gradinger, R., Salganek, M., Shirasawa K., Perovich, D., Leppäranta, M., 2009. *Field techniques for sea ice research*. University of Alaska Press, Fairbanks, 566 p.
- Favre, A.C., El Adlouni, S., Perreault, C., Thiémonge, N., Bobée, B., 2004. Multivariate hydrological frequency analysis using copulas. *Water Resources Research*, 40, W01101. doi:10.1029/2003WR00245

- FEMA, 2016a. Guidance for flood risk analysis and mapping, Coastal Water Levels. Guidance Document 67, Federal Emergency Management Agency, USA, 27 p.
- FEMA, 2016b. Guidance for flood risk analysis and mapping, statistical simulation methods. Guidance Document 77, Federal Emergency Management Agency, USA, 32 p.
- Ferreira, J. A., Guedes Soares, C., 2002. Modelling bivariate distributions of significant wave height and mean wave period. *Applied Ocean Research*, 24, 31-45. doi:10.1016/S0141-1187(02)00006-8
- Flater, D., 2008. XTide version 2.10. <http://www.flaterco.com/xtide/>. 2008-02-09.
- Fofonoff, N.P., 1985. Physical properties of seawater: a new salinity scale and equation of state for seawater. *Journal of Geophysical Research*, 90, 3332-3342.
- Garcia, Y., Prevosto, M., Maisondieu, C., Bulteau, T., Paris, F., 2015. MASTENV, Méthodes d'Analyse des Séries Temporelles Environnementales – Valeurs extrêmes. Rapport conjoint Ifremer et BRGM. doi:10.13155/48967
- Gaudreau, P., 2019. Étude hydraulique – Protection contre la mer, empierrements existants du chemin de fer de la Gaspésie au PM 41.25 (Structure n° P-81803). Direction générale des structures, Ministère des Transport du Québec, 45 p.
- Genest, C., Quessy, J.-F., Rémillard, B., 2006. Goodness-of-fit Procedures for Copula Models Based on the Probability Integral Transformation. *Scandinavian Journal of Statistics*, 33, 337-366. doi:10.1111/j.1467-9469.2006.00470.x
- Gibbons, J.D., 1997. Nonparametric methods for quantitative analysis (third edition). American Sciences Press, Columbus (Ohio), 537 p.
- Gouldby, B., Méndez, F.J., Guanche, Y., Rueda, A., Minguez, R., 2014. A methodology for deriving extreme nearshore sea conditions for structural design and flood risk analysis. *Coastal Engineering*, 88, 15-26. doi:0.1016/j.coastaleng.2014.01.012
- Haigh, I.D., Nicholls, R., Wells, N., 2010. A comparison of the main methods for estimating probabilities of extreme still water levels. *Coastal Engineering*, 57, 838-849. doi:10.1016/j.coastaleng.2010.04.002
- Haixia, Z., Meng, C., Weihua, F., 2023. Joint probability analysis of storm surges and waves caused by tropical cyclones for the estimation of protection standard: a case study on the eastern coast of the Leizhou Peninsula and the island of Hainan in China. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23, 2697-2717. doi:10.5194/nhess-23-2697-2023
- Hawkes P.J., Gouldby, B., Yarde, A., Tawn, J., Borto, P., 1998. The joint probability of waves and water levels: JOIN-SEA, a rigorous but practical new approach. Report SR 537 (reissued 2000 with minor amendments), HR Wallingford.
- Hawkes P.J., Gouldby, B., Tawn, J., Owen, M.W., 2002. The joint probability of waves and water levels in coastal engineering design. *Journal of Hydraulic Research*, 40, 241-251.
- Hawkes, P.J., Gonzalez-Marco, D., Sánchez-Arcilla, A., Prinos, P., 2008. Best practice for the estimation of extremes: a review. *Journal of Hydraulic Research*, 48, extra issue 2, 324-332. doi:10.1080/00221686.2008.9521965

- Heffernan, J. E., Tawn, J. A., 2004. A conditional approach for multivariate extreme values. *Journal of the Royal Statistical Society, 66*, 497-546. doi:10.1111/j.1467-9868.2004.02050.x
- HR Wallingford, 1998. The joint probability of waves and water levels: JOIN-SEA – version 1.0, User manual. Report TR 71 (reissued 2000 with minor amendments), HR Wallingford, 18 p.
- IOC, 2006. Manual on Sea-level Measurements and Interpretation, Volume IV : An update to 2006. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. Manuals and Guides No.14, 78 p..
- Jonathan, P., Ewans, K., 2013. Statistical modelling of extreme oceans environments for marine design: a review. *Ocean Engineering, 62*, 91-109. doi:10.1016/j.oceaneng.2013.01.004
- Kendall, M.G., 1938. A new measure of rank correlation. *Biometrika, 30*, 81-93.
- Li, C.W., Song, Y., 2006. Correlation of extreme waves and water levels using a third-generation wave model and a 3D flow model. *Ocean Engineering, 33*, 635-653. doi:10.1016/j.oceaneng.2005.06.003
- Li, F., van Gelder, P., Ranasinghe, R., Callaghan, D., Jongejan, R., 2014. Probabilistic modelling of extreme storms along the Dutch coast. *Coastal Engineering, 86*, 1-13. doi:10.1016/j.coastaleng.2013.12.009
- Liu, G.L., Zhou, X.S., Kou, Y., Wu, F., Zhao, D., Yu, Z.B., 2022. Analysis of extreme sea states under the impact of typhoon in different periods: A nested stochastic compound distribution applied in the South China Sea. *Applied Ocean Research, 127*, 103298. doi:10.1016/j.apor.2022.103298
- Marcos, M., Rohmer, J., Voudoukas, M.I., Mentaschi, L., Le Cozannet, G., Amores, A., 2019. Increased extreme coastal water levels due to the combined action of storm surges and wind waves. *Geophysical Research Letters, 43*, 4356-4364. doi:10.1029/2019GL082599
- Masina, M., Lamberti, A., Archetti, R., 2015. Coastal flooding: A copula based approach for estimating the joint probability of water levels and waves. *Coastal Engineering, 97*, 37-52. doi:10.1016/j.coastaleng.2014.12.010
- Mazas, F., Hamm, L., 2017. An event-based approach for extreme joint probabilities of waves and sea levels. *Coastal Engineering, 122*, 44-59. doi:10.1016/j.coastaleng.2017.02.003
- Monbet, V., Ailliot, P., Prevosto, M., 2007. Survey of stochastic models for wind and sea state time series. *Probabilistic Engineering Mechanics, 22*, 113-126. doi:10.1016/j.probengmech.2006.08.003
- Neath, A.A., Cavanaugh, J.E., 2011. The Bayesian information criterion: background, derivation, and applications. *WIREs Computational Statistics, 4*, 199-203. doi:10.1002/wics.199
- Nelsen, R.B., 2002. Kendall tau metric. In: *Encyclopedia of Mathematics*. Springer-Verlag, Berlin.
- Nelsen, R.B., 2006. An introduction du copulas, 2nd edition. Springer Series in Statistics, Springer Science+Business Media, 269 p.

- Neumeier, U., 2021. Mesures marégraphiques au quai de Mont-Louis de mai 2019 à mars 2021. Rapport produit pour le compte du ministère des Transports du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, 20 p.
- Neumeier, U., Joly, S., 2014. Mesures des vagues, des courants et des glaces de 2010 à 2014 dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent pour les problèmes d'érosion côtière. Rapport final présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, 98 p.
- Neumeier, U., Joly, S., 2019. Stations d'observation des conditions maritimes 2014-2017 dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent pour les problèmes d'érosion côtière. Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, xiv + 112 p.
- Neumeier, U., Joly, S., 2021. Stations d'observation des conditions maritimes 2018-2021 dans l'estuaire et le golfe du Saint-Laurent pour les problèmes d'érosion côtière. Rapport final présenté au ministère des Transports du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski
- Neumeier, U., Ruest, B., Lambert, A., Bismuth, E., Dumont, D., Jacob, D., Savard, J.P., Joly, S., 2016. Modélisation du régime des vagues du golfe et de l'estuaire du Saint-Laurent pour l'adaptation des infrastructures côtières aux changements climatiques. Collection Études et recherches en transport, Ministère des Transports du Québec, 297 p.
- Neumeier, U., Schuhmacher, Z., Joly, S., 2021. Suivi morphosédimentaire et hydrodynamique du champ d'épis situé sur la flèche littorale fermant le barachois de Hope Town. Rapport préparé pour le ministère des Transports du Québec. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, xvi + 161 p.
- Neumeier, U., Joly, S., Collin, S., 2019. Suivi, analyse et modélisation des conditions de vagues en milieu côtier au Nunavik en fonction des conditions de glace dans un contexte de changements climatiques – Rapport d'étape 1. Rapport produit pour le compte du Bureau de la coordination du Nord-du-Québec du ministère des Transports du Québec (projet CC16.1). Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, 47 p.
- Oo, Y., Da Silva, G., Zhang, H., Strauss, D., Tomlinson, R., 2022. Estimation of beach erosion using Joint Probability analysis with a morphological model. Ocean Engineering, 264, 112560. doi:10.1016/j.oceaneng.2022.112560
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE. Computers & Geosciences, 28, 929-937. doi:10.1016/S0098-3004(02)00013-4
- Petroliagkis, T.I., Voukouvalas, E., Disperati, J., Bildot, J., 2016. Joint Probabilities of Storm Surge, Significant Wave Height and River Discharge Components of Coastal Flooding Events. Technical report EUR 27824 EN, Joint Research Centre, European Commission, 78 p. doi:10.2788/677778
- Pugh, D.T., Vassie, J.M., 1979. Extreme sea levels from tide and surge probability. In: Proceedings 16th Coastal Engineering Conference 1978, vol. 1, pp. 911-930. doi:10.9753/icce.v16.52

- Pugh, D.J., Vassie, J.M., 1980. Applications of the joint probability method for extreme sea-level computations. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part 2*, 69, 959–975. doi:10.1680/iicep.1980.2179
- Radfar, S., Galiatsatou, P., Wahl, T., 2023. Application of nonstationary extreme value analysis in the coastal environment-A systematic literature review. *Weather and Climate Extremes*, 41, 100575. doi:10.1016/j.wace.2023.100575
- Razali, N.M., Wah, Y.B., 2011. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anserson-Darling tests. *J. Stat. Model. Anal.*, 22, 21-33.
- Rueda, A., Camus, P., Tomás, A., Vitousek, S., Méndez, F., 2016. A multivariate extreme wave and storm surge climate emulator based on weather patterns. *Ocean Modelling*, 104, 242-251. doi:10.1016/j.ocemod.2016.06.008
- Sadegh, M., Ragno, E., AghaKouchak, A., 2017. Multivariate Copula Analysis Toolbox (MvCAT): Describing dependence and underlying uncertainty using a Bayesian framework. *Water Resources Research*, 53, 5166-5183. doi:10.1002/2016WR020242
- Schlather, M., 2001. Examples for the coefficient of tail dependence and the domain of attraction of a bivariate extreme value distribution. *Statistics and Probability Letters*, 53, 325-329. doi:10.1016/S0167-7152(01)00090-6
- Sklar, A., 1959. Fonctions de répartition à  $n$  dimensions et leurs marges. *Publications de l'Institut Statistique de l'Université de Paris*, 8, 229-231.
- Smith, R.L., 1986. Extreme value theory based on the r largest annual events. *Journal of Hydrology*, 86, 27-43. doi:10.1016/0022-1694(86)90004-1
- Tawn, J.A., 1988. An extreme value theory model for dependent observations. *Journal of Hydrology*, 101, 227-250.
- Tawn, J.A., 1992. Estimating probabilities of extreme sea-levels. *Applied Statistics*, 41, 77-93.
- Tawn, J.A., Vassie, J.M., 1989. Extreme sea-levels: the joint probabilities method revisited and revised. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Part 2*, 87, 429-442. doi:10.1680/iicep.1989.2975
- Tetratech, 2020. Étude d'avant-projet préliminaire (PC-2) pour la réhabilitation de la route 138 et enrochement des berges dans la municipalité de Baie-Trinité (Projet MTQ 154-10-0067). Rapport Tetratech 39963TT.
- USACE, 2002. Coastal Engineering Manual. US Army Corps of Engineers, Engineer Manual EM 1110-2-1100, Washington, D.C. (6 volumes).
- Wahl, T., Jain, S., Bender, J., Meyers, S.D., Luther, M.E., 2015. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities. *Nature Climate Change*, 5, 1093-1097. doi:10.1038/nclimate2736
- Wyncoll, D., Gouldby, B., 2013. Integrating a multivariate extreme value method within a flood risk analysis model. *Journal of Flood Risk Management*, 8, 145-160. doi:10.1111/jfr3.12069
- Zar, J.H., 2010. Biostatistical analysis, 5th edition. Prentice Hall, Upper Saddle River (New Jersey), 944 p.

Zhong, H., van Overloop, P.J., van Gelder, P.H.A.J.M., 2013. A joint probability approach using a 1-D hydrodynamic model for estimating high water level frequencies in the Lower Rhine Delta. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 1841-1852. doi:10.5194/nhess-13-1841-2013

***Annexe 1***  
***Liste des paramètres de vagues***

---

Les vagues naturelles sont complexes, avec une grande variabilité temporelle des hauteurs, des périodes et des directions. Pour néanmoins les caractériser avec quelques valeurs, des paramètres statistiques des vagues sont calculés à partir de chaque enregistrement de vagues (série temporelle de 17 minutes). Deux méthodes différentes existent pour ces calculs : l'analyse spectrale et l'analyse temporelle (basée sur les passages à zéro, appelée *zero downcrossing*, abrégé ici en *zero-crossing*).

Il existe de nombreux paramètres statistiques de vagues. Leur disponibilité dépend du type d'houlographe et du logiciel utilisé pour le traitement. Voici un résumé des plus importants :

- La hauteur des vagues est généralement décrite par la hauteur significative  $H_{m0}$  (par méthode spectrale, paramètre préféré actuellement) ou la hauteur significative  $H_{1/3}$  (par méthode zero-crossing). Autres hauteurs souvent utilisées sont la hauteur de la plus grande vague  $H_{max}$  et la hauteur moyenne du dixième des vagues les plus grandes  $H_{1/10}$ .
- La période des vagues est souvent décrite par les périodes moyennes par méthode spectrale  $T_{02}$  et  $T_{01}$  (cette-dernière est moins sensible aux erreurs instrumentales), la période du pic d'énergie du spectre des vagues  $T_p$  ou la période moyenne calculée par méthode zéro-crossing  $T_z$ .

### **Symbol unité description**

$h$	m	hauteur de l'eau au-dessus du fond à la position de l'instrument
$h_{PT}$	m	hauteur de l'eau mesurée avec le capteur de pression
$h_{AST}$	m	hauteur de l'eau mesurée avec le faisceau acoustique de l'AWAC (Acoustic Surface Tracking)
$H_{m0}$	m	hauteur significative des vagues calculée par méthode spectrale
$H_{1/3}$	m	hauteur significative des vagues calculée par méthode zero-crossing (hauteur moyenne du tiers supérieur des vagues)
$H_{1/10}$	m	hauteur moyenne du dixième des vagues les plus grandes (méthode zero-crossing)
$H_{max}$	m	hauteur de la plus grande vague (méthode zero-crossing)
$H_m$	m	hauteur moyenne (méthode zero-crossing)
$H_{rms}$	s	hauteur <i>root-mean-square</i> (racine de la moyenne des carrés des hauteurs, méthode zero-crossing)
$T_p$	s	période du pic d'énergie du spectre des vagues
$T_{02}$	s	période moyenne par méthode spectrale définie comme $(m_0/m_2)^{0.5}$
$T_{01}$	s	période moyenne par méthode spectrale définie comme $m_0/m_1$
$T_z$	s	période moyenne des vagues (calcul par zero-crossing)
$T_{1/3}$	s	période moyenne du tiers des vagues les plus grandes (méthode zero-crossing)
$T_{1/10}$	s	période moyenne du dixième des vagues les plus grandes (méthode zero-crossing)
$T_{max}$	s	période de la vague la plus grande ( $H_{max}$ ) du burst (méthode zero-crossing)
$T_p$	s	période calculée du pic d'énergie, définie comme $m_2 m_1 m_0^{-2}$
$Dir_m$	°	direction moyenne (direction de provenance, angle avec le nord géographique, sens horaire)

Dir <sub>p</sub>	°	direction du pic d'énergie (direction moyenne de la bande de fréquence de T <sub>p</sub> , direction de provenance, angle avec le nord géographique, sens horaire)
Dir <sub>Spread</sub>	°	Dispersion directionnelle des vagues ( $\pm$ variance) calculée pour le pic de fréquence
UI		Index d'unidirectionnalité ( <i>Unidirectivity index</i> )
U	m/s	vitesse moyenne dans la cellule de mesure des vagues de l'ADCP (près de la surface pour AWAC-AST, près du fond pour Aquadopp Profiler)
Udir	°	direction du courant moyen dans la cellule de mesure des vagues de l'ADCP
QW <sub>usedspectrum</sub>		Méthode utilisée pour calculer les vagues non-directionnelles : 0 = pression, 1 = vitesses orbitales, 3 = AST (faisceau acoustique de l'AWAC, Acoustic Surface Track). Si c'est un chiffre à virgule, le chiffre après la virgule indique pour l'AST la fraction du burst utilisé (par exemple, 3,78 pour un calcul à partir des données AST sur 78 % du burst), et pour la pression le facteur maximal utiliser pour corriger l'atténuation des variations de pression avec la profondeur (par exemple, 0,15 pour un calcul à partir des données de pression avec un facteur maximal de correction de 15).

ice-coverage\_% Pourcentage du burst avec présence de glace

Les fichiers d'AWAC traités par Quickwave contiennent plusieurs autres paramètres (IceDistance, QW\_nodetects, QW\_baddetects, nbZC, QW\_error) qui correspondent à des résultats intermédiaires ou des informations pour le contrôle de qualité.

**Annexe 2**

**Codes du contrôle de qualité sur les données de vagues**

Les principaux paramètres de vagues peuvent avoir subis un contrôle de qualité, dont le résultat est indiqué dans un flag hexadécimal à 3 chiffres. Le contrôle de qualité ne modifie pas les données elles-mêmes. L'utilisateur doit vérifier le flag de qualité avant d'utiliser une donnée. Les données marquées comme erronées ne doivent jamais être utilisées, sauf si une réévaluation du contrôle de qualité est effectuée en vérifiant la série temporelle du burst. Les données marquées comme douteuses peuvent être utilisées avec précaution, mais la qualité de la donnée devrait être réévaluée avant de baser une conclusion importante uniquement sur cette valeur.

Le chiffre de gauche (poids fort) indique la validité des données selon le Tableau 27.

Les deux chiffres hexadécimaux de droite indiquent pourquoi une valeur est marquée comme erronée ou douteuse, c'est-à-dire quel test elle a échoué. Huit erreurs possibles sont codées sur 8 bits selon le Tableau 28. Le résultat est représenté en hexadécimal comme deux chiffres. (Plusieurs codes d'erreur hexadécimaux peuvent s'additionner, par exemple 04 + 08 + 20 = 2C)

### **Exemples du flag de qualité**

- 0 pas testé
- 100 donnée bonne
- 202 donnée douteuse, car valeur trop grande
- 310 donnée mauvaise, car période trop courte pour déterminer la direction
- 328 donnée mauvaise, car échoue la comparaison des hauteurs de vague et car la pente des vagues est trop raide
- 380 donnée mauvaise, car burst déficient
- 110 donnée bonne, obtenue en modifiant le résultat de Quickwave

*Tableau 27 – Signification des flags de validité du contrôle de qualité des données de vagues, avec les flags utilisés dans ce projet et les valeurs équivalentes des flags utilisés dans le Système de gestion de données environnementale de l'ISMER (SGDE).*

Flag projet	Description de la validité	Flag SGDE
0	Non vérifié	0
1	Bon	1
2	Douteux (probablement bon)	3
3	Erroné	4
9	Manquant (données n'ont jamais été enregistrées)	9

*Tableau 28 – Codes explicatifs du contrôle de qualité.*

<b>bit</b>	<b>Valeur hexadécimale</b>	<b>Pour paramètres</b>	<b>tests manqués</b>
<b>1</b>	01	tous	valeur trop basse
		$\text{Dir}_m$ , $\text{Dir}_{Tp}$	direction venant de la côte
<b>2</b>	02	tous	valeur trop grande
<b>3</b>	04	tous	test de continuité temporelle
<b>4</b>	08	$H_{\max}$ , $H_{1/10}$ , $H_{1/3}$	comparaison de $H_{m0}$ avec $H_{\max}$ , $H_{1/10}$ ou $H_{1/3}$ (flag de ces derniers)
		$T_{01}$ , $T_{02}$ , $T_z$ , $T_{1/10}$ , $T_{1/3}$	comparaison de $T_{01}$ , $T_{02}$ , $T_z$ , $T_{1/10}$ , $T_{1/3}$ (flag si différence à la médiane des T trop grandes)
		$T_p$ , $T_{pc}$	comparaison de $T_p$ et $T_{pc}$ avec $T_{02}$
		$\text{Dir}_m$ , $\text{Dir}_{Tp}$	comparaison de $\text{Dir}_m$ et $\text{Dir}_{Tp}$
		$h_{PT}$ , $h_{AST}$	comparaison de $h_{PT}$ et $h_{AST}$ (flag de $h_{AST}$ )
<b>5*</b>	10	$h$	valeur trop basse par rapport aux prédictions de marée
		$\text{Dir}_m$ , $\text{Dir}_{Tp}$ , $\text{Spr}_{\text{Dir}}$ , UDI	période trop courte pour déterminer la direction (dans QuickWave)
<b>6</b>	20	$T_{02}$ , $T_{0/10}$	pente des vagues, $T_{02}$ avec $H_{m0}$ , et $T_{1/10}$ avec $H_{1/10}$
		$T_p$	position de $T_p$ trop proche de la plus basse fréquence du spectre d'énergie
		$h$	valeur trop grande par rapport aux prédictions de marée
<b>7</b>	40	tous	marqué erroné dans QuickWave
<b>8</b>	80	tous	burst déficient, problématique ou présence de glace de mer

- \* Dans les fichiers exportés, le bit 5 indique aussi que la valeur calculée par Quickwave a été modifiée soit manuellement, soit en recalculant avec wavesp.m sur tout ou sur une partie du burst.

***Annexe 3***  
***Syntaxe d'appel des fonctions Matlab***

---

Pour les fonctions Matlab écrites par Urs Neumeier et utilisées pour le calcul de la probabilité conjointe, l'aide à la syntaxe d'appel, les commentaires et les messages générés par ces fonctions sont en anglais, comme c'est aussi le cas pour l'ensemble des fonctions de base Matlab et des boîtes à outils de Mathworks. La section 6.9 présente une courte description en français de chaque fonction. Pour plusieurs fonctions, il est possible avec une option ('fr') de changer le texte des figures produites en français.

Listes des fonctions présentées dans cette annexe :

cooc_cdf	Subsample return period data to obtain a cumulative distribution function
cooc_fit	Try to adjust different copula function to some data
cooc_phase	Examine the phase difference between wave maxima and surge maxima
cooc_prep	Prepare data for joint probability analysis (Still water level (SWL), Wave height (Hs))
cooc_fromcopula	Compute return period for given SWL and Hs using a specified copula function
cooc_stat	Compute and plot descriptive statistics on a dataset prepared for joint probability analysis
cooc_toproba	Convert a database with SWL and Hs value to probability (CDF) values
empiric_cdf	Empirical cumulative distribution function (CDF) or return periods
phase_adjust	Parameters for adjusting amplitude and phase shift between two time-series (surge, tide/water-level, etc.)
slev_fill	Fill the gaps in a water level time-series
slev_rjpm	Probability of extreme water level with the revised joint probability method (RJPM)
slev_time	Correct sampling time problems in tide data (or other time-series)
storm_find	Find the strongest storms in wave time-series
storm_fit	Produce a probability plot for storms
subsample_return	Subsample the SWL/Hs return period curve produced by COOC_FIT
surge_find	Find storm surges (or highest water levels) from a water level time-series
wave_slope	Compute the wave slope from Hs, period and depth

```
COOC_CDF Subsample return period data to obtain a cumulative distribution
           function (CDF)
```

```
RESULT = COOC_CDF (RPDATA)
RESULT = COOC_CDF (RPDATA, Options)
RESULT = COOC_CDF (ICDF, XLIM, Options)

RP_DATA 2-column matrix with (1) levels for that duration and
           (2) return period durations (year).
```

ICDF Cell array if a function handle of an inverse CDF that take levels as first argument. The additional element in the cell array must be the additional argument of that function.

XLIM 2-element vector with lowest and highest value of the returned levels.

RESULT 2-column matrix with (1) level (same units than in RPDATA),  
(2) return period (years).

Option 'resolution' Specify the resolution in the first column of RESULT.  
Must be followed by RES, a positive scalar (default 0.001).

'factor' Specify the factor to adjust duration if CDF parameter not were calculated with 1 observation per year. Must be followed by FAC, which is the number of observations per year.

See also, `empiric_cdf`

(version 1.01)

```
%COOC_FIT Try to adjust different copula function to some data
%
%   RESULT = COOC_FIT (PROB)
%   RESULT = COOC_FIT (DATASTR)
%   RESULT = COOC_FIT (..., Options)
%
% PROB    2-column matrix with data in probability space.
% DATASTR Data structure produced by COOC_TOPROBA.
% Options 'allplot' : Figures showing fitting of all copulas (default is only
%                     Gumbel).
% 'noplot'  : No figures showing fitting of each copula.
% 'notext'   : No text output of goodness of fit criteria.
% 'return'   : Calculation and display of return periods for the Gumbel
%               copula).
% 'returnXXX' : Like 'return', but only the copula functions specified
%               by XXX,
%               e.g., return2, return123456 (all copulas) or return123
%               (the 3 fast ones).
%               1:Gumbel, 2:Clayton, 3:Frank, 4:Gaussian, 5:t, 6:
%               Independence
% 'fine'     : Do not coarsen matrice for calculating return periods
%               with copulas
%               Gaussian and t (by default, matrice is coaresen by
%               factor of 2).
% 'years'    : Must be followed by RETURN_YEARS, to override the
%               default
%               selection of return periods (in years).
% 'select1'/'select2'/'select3'/'select4' : Define which events are
%               selected.
%               'select1' is the most strict, 'select4' the less strict
%               (default 'select1').
%               Can be followed by LIM_P ([P1 P2]), which define the
%               percentile
%               limit for SLEV (P1) and Hs (P2) (default [0.97 0.99].
%               Specify LIM_P = [0 0] to use all events.
% 'testsel'/'testsel2' Must be followed by FAMILYNAME. To test the
%               effect of
%               different values of LIM_P. 'testsel2' is slower.
% 'dhyd'      : Also traditional return period computations of
%               "Direction de
%               l'hydraulique"/MTMD and of some consultants.
% 'fr'        : Label the plots in French.
```

```

%
% RESULT Structure with function output :
%
%     .family    Name of the different copula functions.
%
%     .param     Cell array with the parameter of each copula function.
%
%     .ic        Table with the goodness of fit criteria AIC, BIC, RMSE
%               and RP_rab
%
%               (relative absolute bias of return period for the 10
%               biggest events)
%
%               for each copula function [nb family, AIC/BIC/RMSE].
%
%     .ic_names  Cell string array with the name of the 3 goodness of fit
%               criteria.
%
%     .select    Cell array with (1) the used select option, (2) the SWL
%               percentile
%
%               threshold, (3) the Hs percentile threshold.
%
%     .years     Years of the return periods (only with option 'return').
%
%     .return_curve Cell array (family x years) with curves [SWL, Hs] of
%               the return
%
%               periods (only with option 'return').
%
%     .dhyd     Traditional combined return period of "Direction de
%               l'hydraulique"/MTMD,
%
%               3 column matrice [return period (years), SWL (m), Hs(m),
%               return
%
%               period according to copula prediction] (only with option
%               'dhyd').
%
%     .consultants Traditional combined return period of Tetratech (only
%               with option 'dhyd').
%
%     .ext_storms For each copula the 10 strongest events
%
%               [Time,SWL,Hs,Return period].
%
%               (If input is DATASTR, these fields are also present)
%
% See also COOC_TOPROBA, SUBSAMPLE_RETURN, COOC_FROMCOPULA

```

(version 1.12)

**COOC\_FROMCOPULA Compute return period for given SWL and Hs using a specified copula function**

```

RESULT = COOC_FROMCOPULA (SWL_HS, DATASTR, FAMILY)
RESULT = COOC_FROMCOPULA (SWL, HS, DATASTR, FAMILY)

SWL_HS 2-column matrix with SWL and Hs.
SWL    Still water level (SWL) values.
HS     Wave height (Hs) values. If both SWL and HS are vector, MESHGRID is used
       for all
       possible cominaison of SWL and HS, otherwise SWL and HS must have the
       same size.
DATASTR Output structure from COOC_FIT, which includes CDF data for SWL and Hs
       and
       the fitting arguments for the differents copula functions.
FAMILY Name of the copula function to be used. Must be one of following choices
       Gumbel, Clayton, Frank, Gaussian, t, Independence. Optional, default is
       Gumbel.
RES    Results as structure with followings fields
       .T      Return period in years.
       .swl   Still wave levels for each value of field .T.
       .hs    Wave heights for each value of field .T.

```

See also : COOC\_TOPROBA, COPULAFIT

```

function res = cooc_fromcopula (swl,hs,swl_cdf,hs_cdf,param)
COOC_FROMCOPULA Compute CDF and PDF for given SWL and Hs using a specified
                   copula function

```

```

RESULT = COOC_FROMCOPULA (SWL, HS, SWL_CDF, HS_CDF, PARAM)

SWL      Still water level values.
HS       Wave height values. If both SWL and HS are vector, MESHGRID is used for
           all
           possible cominaison of SWL and HS, otherwise SWL and HS must have the
           same size.
SWL_CDF CDF data for SWL [SWL_level Return_period_years].
HS_CDF  CDF data for Hs [Hs_height Return_period_years].
PARAM    Cell array with parameters to call COPULAPDF and COPULACDF. First
           element is
           the name of the copula function (e.g., 'Gaussian'), the other elements
           are the
           third and following parameters for COPULAPDF and COPULACDF.
RES     Results as structure with followings fields
        .pdf   Probability density function (result from COPULACDF).
        .cdf   Cumulative distribution function (result from COPULAPDF).
        .swl   Still wave levels for each value of fields .cdf and .pdf.
        .hs    Wave heights for each value of fields .cdf and .pdf.

```

See also : COOC\_TOPROBA, COPULAFIT, COPULAPDF, COPULACPF

(version 1.02)

#### **COOC\_PHASE Examine the phase difference between wave maxima and surge maxima**

```

COOC_PHASE (DATASET)
COOC_PHASE (... , WINDOW)
COOC_PHASE (... , NB)
PHASE = cooc_phase...

DATASET A dataset produce with COOC_STAT using the option 'ts'.
WINDOW A 2-element matrix with the half window sizes around each storm maxima
       for the graphical display and for search of surge maxima/minima
       (units are days, default is [1.5, 1]).
NB      A scalar indicating the number of storms to process (optional, default
       10).
OPTIONS  'plots' For each storm, plot only 3 time-series.
          'noplots' Do not produce one figure for each storm.
PHASE    A matrix with 8 column :
        1. Date of storm
        2. Hs (m)
        3. T02 (s)
        4. Dir (°)
        5. SWL (m)
        6. Surge level (m)
        7. Phase difference to surge maximum (hours, positive is after
           Hs)
        8. Surge maxima (m)
        9. Phase difference to surge minimum (hours, positive is after
           Hs)
       10. Surge minima (m)
       11. Phase difference to SWL maximum (hours, positive is after Hs)
       12. Surge minima (m)

```

See also cooc\_prep, cooc\_stat

(version 1.02)

```

COOC_PREP Prepare data for joint probability analysis (Still water level (SWL),
           Wave height (Hs))

```

```

DATASET = COOC_PREP (DATA)
DATASET = COOC_PREP (DATA, WINDOW_SIZE)
DATASET = COOC_PREP (DATA, ..., COMMENTS)
DATASET = COOC_PREP (DATA, ..., COMMENTS, OPTIONS)
DATASET = COOC_PREP (SWL_DATA, WAVE_DATA, ...)

DATA      3-5 column matrix with (1) Time, (2) Still water level (SWL, m), (3)
          Hs (m)
          (4) Wave period T02 (s, optional), (5) Wave direction (°, optional).
SWL_DATA 2-column matrix with (1) Time and (2) Still water level (SWL).
WAVE_DATA 2-4 column matrix with (1) Time, (2) Hs, (3) Wave period T02
          (optional), (4) Wave direction (optional). If empty, DATASET will
          contain
          only the water level data.
WINDOW_SIZE 2 elements, half-size in hours of the window for finding SWL maxima
          around high-waters and for finding Hs maxima around SWL maxima
          (default
          [2 3]).
COMMENTS String that will be added to the metadata.
OPTIONS  'quiet'      Reduce the text output to the command window.
         'noplott'     Do not plot the result with the original time-series.
         'detrend'     Detrend the SWL time series (default if data-series length
                     is 3 years or more).
         'nodetrend'   Do not detrend the SWL time series (default if data-series
                     length is less than 3 years).
         'diurnal'    Tides follow a diurnal pattern (default is semidiurnal or
                     mixed semidiurnal).
         'ts'          The result contains the complete time-series (by default,
                     one event for each high tide is returned).
         'depth'       Must be followed by DEPTH_VALUE, the depth below the
                     reference
                     level of SWL. If present, wave slope of 1% largest wave is
                     added to DATASET.
         'fr'          Label the plots in French.

DATASET  Structure to be used with COOC_JOINT or COOC_STAT. The field DATA has
          one record at each high tide (or the complete time-series with
          option 'ts') and they are several fields with metainformation.

```

See also COOC\_STAT, COOC\_PHASE, COOC\_TOPROBA

(version 1.07)

```

COOC_STAT Compute and plot descriptive statistics on a dataset prepared for
          joint probability analysis

COOC_STAT (DATASET)
COOC_STAT (DATASET, OPTIONS)
RESULT = COOC_STAT(...)

DATASET A dataset produce with COOC_STAT.

OPTIONS  'surge'      Compute / plot not with still water level (SWL), but with
          storm surge level.
         'noplott'     Do not produce a figure with the scatterplot.
         'notable'     Do not print the 2D histogram table in the command window.
         'axis'        Must be followed by AXIS_HANDLE, that will be used for
                     plotting.
         'nb'          The isolines on the scatterplot are labelled with number of
                     points outside per year instead with a arbitrary density unit.
         'tau'         Force the calculation of Kendall's TAU for long time-series

```

```

        (calculation is skipped for >40000 samples by default).


```

See also COOC\_PREP, COOC\_PHASE

(version 1.09)

#### **COOC\_TOPROBA Convert a database with SWL and Hs value to probability (CDF) values**

```

RESULT = COOC_TOPROBA (DATA, SWL_CDF, HS_CDF)
RESULT = COOC_TOPROBA (DATA, SWL_CDF, HS_CDF ,REFP)
PROB = COOC_TOPROBA (..., 'nostruct')
PROB = COOC_TOPROBA (..., 'plot')

DATA Either the structure returned by COOC_PREP, or a matrix with 2 columns
[SWL Hs] or at least 3 columns [Time SWL, Hs, ...].
SWL_CDF CDF data for SWL [SWL_level Return_period_years].
HS_CDF CDF data for Hs [Hs_height Return_period_years].
PROB 2-column matrix with cummulative probabilities of SWL and Hs for each
record in DATA. (probability of occurence per HALF DAY!)
REFP Reference period for converting return periods (years) to probability
(unit is day). Default is 0.5, i.e. probability per half day.

```

Note, SWL = Still Water Level. Values outside the CDF are discarded.

See also COOC\_PREP, STORM\_FIT, SLEV\_RJPM, COOC\_CDF, COOC\_FROMCOPULA, COOC\_FIT

(version 1.03)

#### **EMPIRIC\_CDF Empirical cumulative distribution function (CDF) or return periods**

```

RET_PERIOD = EMPIRIC_CDF (DATA, DURATION)
RET_PERIOD = EMPIRIC_CDF (DATASTR, PARAM)
CDF      = EMPIRIC_CDF (DATA, DURATION, 'cdf')
...      = EMPIRIC_CDF (DATA, DURATION, Options)
...      = EMPIRIC_CDF (DATASTR, TYPE, ...., DURATION, Options)

DATA     Vector with observations.
DURATION Number of days of the observation period.
DATASTR Structure produced by COOC_PREP (without the option 'ts').
PARAM    Either string 'swl', or string 'hs' to select which parameter is
used.
RET_PERIOD 2-column matrix with (1) level (same units than observations,
(2) return period (years).
CDF      2-column matrix with (1) level (same units than observations,
(2) probability of occurrence in one DAY ! ! !
Options 'ret_period' The function output are return periods (default
behaviour).
'cdf'       The function output is the empirical cumulative
distribution function.
'resolution' Specify the resolution in the first column of output.

```

Must be followed by RES, a positive scalar (default 0.001).

'ext' Must be followed by EXT\_CDF [level, return period (year)] a CDF for the extreme tail produced by fitting a distribution function.  
EXT\_CDF will be subsampled if needed.

'extm' Like 'ext', but the switching between the two curves is defined manually on a plot.

'noplot' Do not plot the return period curve.

'smoothXX' Apply a smoothing with XX window size (same units than DATA).

'gap' Must be followed by GAP\_RATIO, the ratio between empiric and tail curve that allows switching between the two curves (by default, the two curves must cross).

'fr' Label the plot in French.

See also, STORM\_FIT, SLEV\_RJPM, COOC\_TOPROBA

(version 1.04)

**PHASE\_ADJUST Parameters for adjusting amplitude and phase shift between two time-series (surge, tide/water-level, etc.)**

```
ADJUST = PHASE_ADJUST (DATA1, DATA2)
ADJUST = PHASE_ADJUST (DATA1, DATA2, MAXSHIFT)
ADJUST = PHASE_ADJUST (... , Options)

DATA1 First time-series (2 columns with Matlab time in first column).
DATA2 Second time-series (2 columns with Matlab time in first column).
MAXSHIFT Maximum phase shift (units : day, default 0.25, i.e. 6 hours).
ADJUST Parameters [A, B, SHIFT] for transferring signal 2 into signal 1
using following formula
    SIGNAL_1(t) = A * SIGNAL_2(t + SHIFT) + B
Options
    'interp' Must be followed by MAX_INTERPOL, which define the maximum
              duration of data gaps (NaN) that will be linearly interpolated
              (unit : day, default MAX_INTERPOL=1)
    'slev_fill' Time gaps (NaN) will be interpolated with
                SLEV_FILL(DATA, 'surge', 0.9)
    'surge' Adjust on storm surge (time-series - tidal-predictions).
    'quiet' Suppress output to the command window.
    'noplot' Do not produce a scatter plot in a new window.
```

See also : SLEV\_FILL, XCORR

(version 1.03)

**SLEV\_FILL Fill the gaps in a water level time-series**

```
RESULT = SLEV_FILL (DATA)
RESULT = SLEV_FILL (DATA, 'other', SWL2)
RESULT = SLEV_FILL (DATA, 'other', SWL2, AJUST2)
RESULT = SLEV_FILL (... , 'interp', MAX_INTERPOL)
RESULT = SLEV_FILL (... , 'surge', MAX_SURGE)
```

By default, the function will fill gaps up to 30 minutes with linear interpolation

and fill gaps up to 6 hours by combining tide predictions (computed by `t_tide`) linear interpolation of the surge. This behaviour can be modified with options. The function can also fill longer gaps by combining tide predictions and surge time-series obtained from a nearby tide gauge.

```

DATA    2-column matrix with time and water level of tide gage 1. Time step must
       be constant, with missing values indicated by NaN in the second column.
SWL2   2-column matrix with time and water level from another tide gage 2. These
       data will be used to fill long gaps.
AJUST2 Parameters [A, B, SHIFT] for transferring surge from tide gage 2 to tide
       gage 1 using following formula (default value is [1 0 0])
           SURGE_1(t) = A * SURGE_2(t + SHIFT) + B
       Usually AJUST2 is obtained with PHASE_ADJUST(..., 'slev_fill','surge')
MAX_INTERPOL Maximum length of the gaps that will be filled by linear
               interpolation (default 0.020833). Must come after option 'interpol'.
MAX_SURGE   Maximum length of the gaps that will be filled by linear
               interpolation of the surge (default 0.166). Must come after option
               'surge'.
RESULT  2-column matrix with time and water level.

```

With option 'compare', the range of error produced on SWL by the different options to fill gaps and different gap lengths are compared. 'compares' the same for surge.

(version 1.05)

#### **SLEV\_RJPM Probability of extreme water level with the revised joint probability method (RJPM)**

```

RET_PERIOD    = SLEV_RJPM (SWL)
PROBA_STRUCT = SLEV_RJPM (SWL,'struct')
...           = SLEV_RJPM (... , Options)

SWL          Still water level in a 2-column matrix (time, SWL)
RET_PERIOD   Return periods as 2 column matrix: SWL (m) return period (years),
               with return
               periods >1000 years discarded.
PROBA        A structure with following fields
             .psurge  Cummulative probability of surge
             .ptide   Cummulative probability of tides
             .pswl    Combined probability of surge and tides following Puch &
                     Vassie (1978).
             .theta_1 Mean duration of water level above z for each storm (unit
                     day).
             1. Vertical level, 2. Duration in days, 3. Cleaned duration,
                4. St.dev. of duration, 5. Number of events .
             .T       Return periods as 2 column matrix: SWL (m) return period
                     (years).

Options
'restruct'  Return structure PROBA instead of matrice RET_PERIOD
'noplot'    Do not produce graphic plots.
'quiet'     Reduce to a minimum text output to command window.
'fast'      Faster but more noisy tide probability (prediction at 15 instead of
            3 minutes).
'fine'      Slower but more smoother tide probability (prediction at 1 instead
            of 3 minutes).

```

See also : `SLEV_TIME`, `SLEV_FILL`, `SLEV_READ`, `SLEV_GET`

(version 1.05)

**SLEV\_TIME Correct sampling time problems in tide data (or other time-series)**

```
RESULT = SLEV_TIME (DATA)
RESULT = SLEV_TIME (DATA, 'resample', Timestep)
RESULT = SLEV_TIME (DATA, Options)
```

DATA Matrix with sampling time in first column.

RESULT Corrected data with same number of columns than DATA. It can be one matrix or a cell array of matrices (with option 'seg').

By default, the function first divides the dataset in segments with same time-step,

then fill the missing time-gap within each segment with NaN, then interpolated gaps

of less than one hour within each segment, and finally combine the segment into one matrix. Following options can change that behaviour.

'resample' Followed by Timestep (1 or 2 element matrix), resample the time-series  
     with the constant time-step Timestep(1) [units minutes !], beginning at time Timestep(2) (default value DATA(1,1), after having applied a low-pass filter for anti-aliasing if downsampled.  
 'nolowpass' This option deactivates the low-pass filter, which is applied by default if data are downsampled with option 'resample'.  
 'maxvalue' This option replaces the low-pass filter, which is applied by default  
     if data are downsampled with option 'resample', by a more conservative maximum value of each subsampled interval.  
 'win' Followed by WINDOWSIZE, specify the half-window size used to find time-step changes (default 10).  
 'general' By default, time-step are assumed to be multiple of minutes.  
     Use this option if it is not the case.  
 'nodiv' Do not try to divide dataset into segments with different time-step.  
     This option is recommended if all data are with one time-step, but with some gaps.  
 'seg' Do no combine different segments into one large matrix, but return a cell array with segments with different time-step.  
 'nofill' Do not fill gaps with NaN values (deactivate also option 'interp').  
 'interp' Followed by MAX\_INTERPOL, define the maximal length of gaps within each segment that will be interpolated. Units are days. Default value is 1/24 (1 hour), use MAX\_INTERPOL=0 for no interpolation.

See also: slev\_read, slev\_get, slev\_fill

(version 1.05)

**STORM\_FIND Find the strongest storms in wave time-series**

```
RESULT = STORM_FIND (FILENAME)
RESULT = STORM_FIND (DATA)
RESULT = STORM_FIND (..., NB)
RESULT = STORM_FIND (..., Options)
[RESULT, NB_DAYS] = ...
STORM_FIND (...)
```

FILENAME : name of file produced with quickwave\_read or qcwave\_gui.  
     By default, good and dubious data are processed.

With option 'good', only good data are processed.

DATA : n-column matrix (n>2) with 1: time, 2: Hm0, 3: T02(optional), 4:  
     Dir(optional)

NB : number of returned storms. The number of returned storms can also be defined with a string 'XX%', where XX is the percentile of all wave height values.

RESULT : 4-column matrix with time, Hm0, T02 and DirMean.  
Without output argument the result is displayed on screen. It can be suppressed using the option 'quiet'.

#### Options

```
'show'      The storms are shown with AWAC_WAVEPLOT.
'show',RANK The storm with the specified RANK is shown either in the
             QCWAVE_GUI
             window (if already open) or with AWAC_WAVEPLOT.
'showa'     Like 'show' but uses always AWAC_WAVEPLOT.
'showaXX'   The displayed time-window XX in days can be specified.
'rose'      Direction and wave height are plotted in a rose diagram.
'rose',AXIS_HANDLE Like 'rose', but in axis AXIS_HANDLE instead of in a new
                     figure.
'distfit'   STORM_FIT is called with the found storms. All argument after
             'distfit'
             are transmitted to STORM_FIT (but NB_DAYS is computed
             automatically),
             and it is possible to include there also an axis handle.
'duration' THRESHOLD   Return as fifth column in RESULT the number of hours
                     that the
                     storm level was higher than THRESHOLD.
'index'     Return as sixth column in RESULT the row index in DATA of each
                     storm.
'list'      List the storms in the command window (default if no output and
                     not 'show').
'quiet'    No output in the command window, even if no output and not 'show'.
'copy'     The output is copied as tab-separated text in the clipboard.
```

See also `storm_fit`

(version 1.14)

#### **STORM\_FIT Produce a probability plot for storms**

```
STORM_FIT (DATA, NB_DAYS)
STORM_FIT (DATA, NB_DAYS, NB_USED)
STORM_FIT (DATA2)
STORM_FIT (DATA2, NB_USED)
STORM_FIT (..., OPTIONS)
STORM_FIT (HANDLE, DATA,...)
RET = STORM_FIT (...)
[RET,DISTNAME] = STORM_FIT (DATA, NB_DAYS, 'alldist' [, NB_USED] )
```

DATA : Vector of Hm0 wave heights in m (this will be used for axis label, but the function can be used for other purposes). NaN values are ignored  
Can also be a cell array with several data sets or a 2D matrix with one data set per column.

DATA2 : FILENAME or DATA matrix for input into STORM\_FIND.

NB\_DAYS : number of days that are covered by DATA.

NB\_USED : optional, number of highest data point used for regression. When called

with DATA2, it can also be as 'xx%' (see STORM\_FIND).

HANDLE : handle of axis to be used (by default a new figure is created).

RET : 2-column matrix with 1: return period in years, 2: expected Hm0.

CI : Bootstrap confidence interval.

OPTIONS 'wbl' : Weibull distribution (default).

'ft1' : Fisher-Tippett type 1 distribution (Gumbell 1).

```

'gum' : Same as 'ft1', but labelled Gumbel distribution.
'ft3' : Fisher-Tippett type 3 distribution.
'log' : logarithmic distribution.
'norm': normal (gaussian) distribution.
'gpd' : generalized Pareto distribution.
'gpd2' : like 'gpd', but X/Y axes transposed.
'gev' : generalized extreme value distribution
'alldist' : produce a plot for wbl/gum/log/norm, and compute
            return periods for all distributions (RET) and output
            also the short name of each distribution (DISTNAME).
'alldist2' : like 'alldist', but for wbl/gum/gpd/gev.
'years' : followed by YEARS, a vector with duration in years of
          the computed return periods.
'fr' : label in French instead of English.
'nopred' : do not plot predicted Hm0 on the graph.
'xlim' : followed by XLIM indicating limits of X axis (m).
'ylim' : followed by YLIM indicating limits of Y axis,
          either as 2-element vector with probabilities,
          or as scalar with max return period in years.
'name' : followed by cell string NAMES indicating name of each
          data set to be used for adding a legend.
'nofig' : Do not create a plot but return only RET.
'noyears': Output argument RET has only one column with expected Hm0.
'boot' : Calculate the 95% bootstrap confidence intervals (3rd output
          CI).
'bootXX' : Calculate the XX% bootstrap confidence interval (e.g.
            'boot95').

```

See also `storm_find`

(version 1.13)

#### **SUBSAMPLE\_RETURN Subsample the SWL/Hs return period curve produced by COOC\_FIT**

```

RESULT = SUBSAMPLE_RETURN (DATA, INT)
[RESULT2, PERIODS] = SUBSAMPLE_RETURN (DATASTRUCT, FAMILY, INT)
... = SUBSAMPLE_RETURN (... , OPTIONS)

DATA      One element of the field .return_curve produced by COOC_FIT
          (2-column matrix with SWL and Hs combination for a give return
          period).
DATASTRUCT Structure produced by COOC_FIT when called with a data structure.
FAMILY    Name of the copula function, for which return period curve should
          be subsampled.
INT       Either integer greater or equal than 3 (number of subsamples points
          on the curve, or step in metres of Hs, when the curve is subsampled
          for high waves (for lower wave heights a multiple is used)).
RESULT    2-column matrix with SWL and Hs combination for a give return period.
          If COOC_PREP was called with option 'depth', 3rd column is estimated
          wave period (T).
RESULT2   Cell array containing RESULT matrices.
PERIODS   Vector with duration in years for each return period result in
          RESULT2.
OPTIONS   'plot' Produce new figures for each return period showing the curve
          and subsampling.
          'plot2' Produce one new figures showing the curves and subsampling
          for all return periods.
          'excel' Must be followed by argument EXCEL_FILE. Write the result to
          the specified Excel file. Activate also option 'plot' and
          save the plot in the subdirectory 'fig'.
          'excel2' Like 'excel', but the result are transposed.
          'ascii' Must be followed by argument ASCII_FILE. Like 'excel', but

```

write to a text file.  
 'fr' Label the plots in French.

See also COOC\_FIT

(version 1.05)

**SURGE\_FIND** Find storm surges (or highest water levels) from a water level time-series

```

SURGES = SURGE_FIND (DATA)
SURGES = SURGE_FIND (DATA, Options)
SURGE_FIND (DATA, ...)
YEARLY = SURGE_FIND (DATA, 'amm' / 'rlmX')

DATA    2-column matrix with time and water-level.
SURGE   3- or 4-column matrix with
        1. Time
        2. Surge level
        3. Water level
        4. Surge duration (only with option 'duration')

Options
  'level'   Look for highest water levels instead of storm surges.
  'surge'   Look for storm surge (default, except with options ''mma' and
            'rlmX').
  'amm'     Annual Maxima Method (return 1 highest water levels for each year).
  'rlmX'    R-Largest Method (return X highest water levels for each year,
            default X=5).
  'nbXX'    Return the XX highest storm surges (or highest water levels).
            Default is all storm surges above 25% the highest storm surge,
            but at least 10 per year (or all water level maxima above
            median water level).
  'duration' THRESHOLD   Return as 4th column in RESULT the number of hours
                        that the
                        surge (or water) level was higher than THRESHOLD.
  'list'    List the storms in the command window (default if no output).
  'detrend' Detrend the time-series before analysis.
  'copy'    The output is copied as tab-separated text in the clipboard.
  'plot'    Produce a plot of exceeding probabilities.
  'synXX'   Use the value XX for the synthesis argument of T_TIDE (default 1).
  'notide'  Do not calculate tide prediction and surge level, add option
            'level'.
  'missingXX' Exclude years with less than XX% data missing (default
            'missing95').

```

See also: awac\_sealevel

(version 1.08)

**WAVE\_SLOPE** Compute the wave slope from Hs, period and depth

```

SLOPE = WAVESLOPE (HS, T, DEPTH)
T = WAVESLOPE (HS, SLOPE, DEPTH, 'inverse')

HS      Wave height (m).
T      Wave period (s).
DEPTH  Water depth (positive number, m).
SLOPE  Ratio of HS / wave-length

```

HS, T and DEPTH must all have the same size or be scalar.

(version 1.01)

**Annexe 4**

***Influence des paramètres  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  (sélection des événements) pour l'ajustement de la copule de Gumbel***

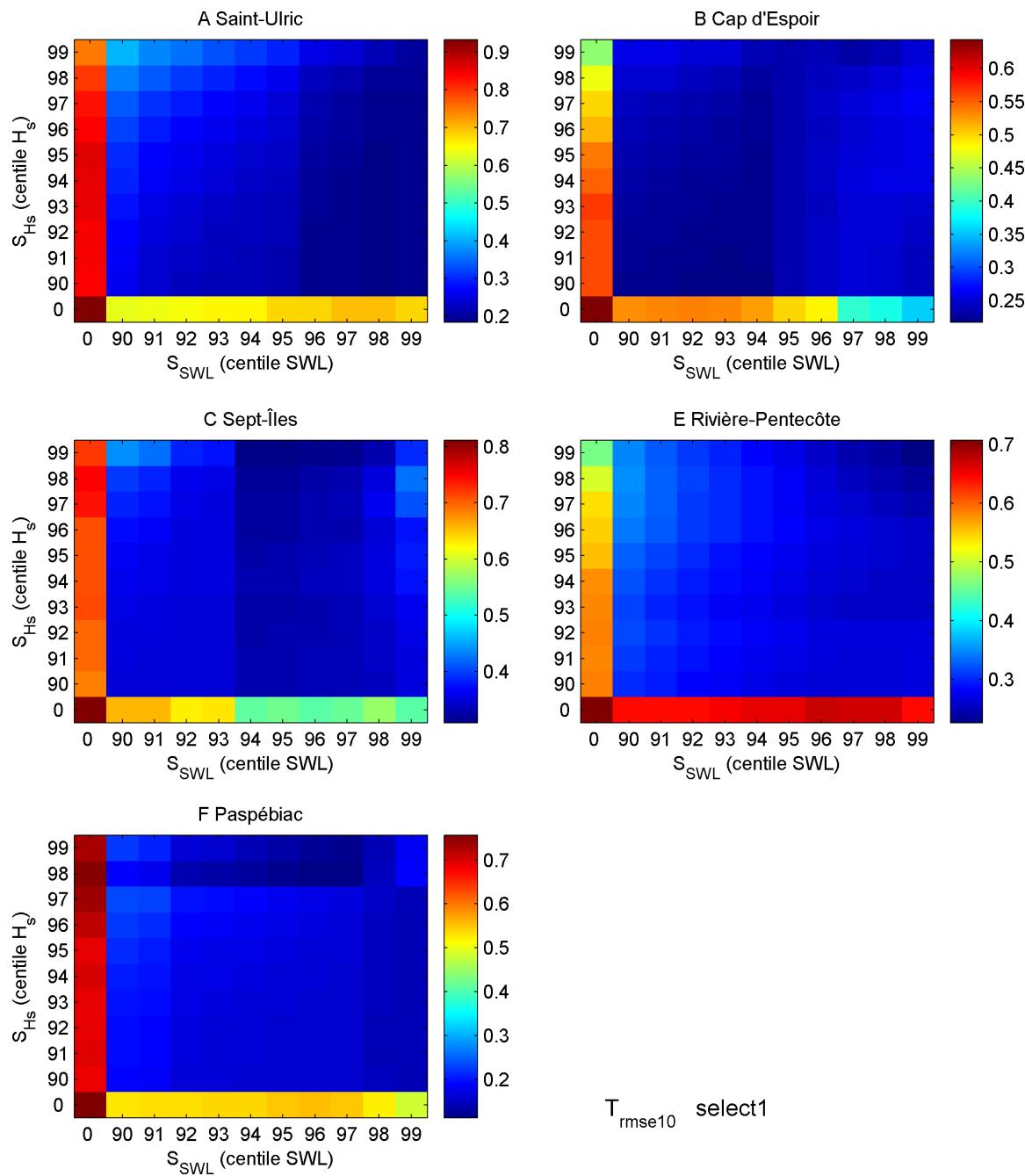
---

Les figures de cette annexe présentent l'influence de la sélection des événements utilisés pour l'ajustement de la copule de Gumbel (valeurs des paramètres  $S_{SWL}$  et  $S_{H_s}$  et type de sélection, cf. Figure 71) sur la qualité de la prédiction de la probabilité conjointe SWL- $H_s$ .

Les Figures 87 à 90 présentent l'influence des paramètres de sélection sur la métrique  $T_{rmse10}$ , avec une figure pour chaque type de sélection (options `select1`, `select2`, `select3` et `select4`).

Les Figures 91 à 94 présentent l'influence des paramètres de sélection sur la métrique  $T_{bias10}$ , avec une figure pour chaque type de sélection (options `select1`, `select2`, `select3` et `select4`).

Les Figures 95 et 96 illustrent l'effet sur la courbe SWL- $H_s$  pour la période de retour de 50 ans des variations de  $S_{SWL}$  et  $S_{H_s}$  avec l'option `select1`.



*Figure 87 – Influence de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  avec l'option **select1** dans `cooc_fit.m` sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique  $T_{rmse10}$ , qui indique la magnitude de la différence relative entre des périodes de retour prédictes et observées (idéalement  $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  sont représentées. Les Figures 95 et 96 illustrent l'effet de ces variations sur les courbes SWL- $H_s$  pour la période de retour 50 ans.*

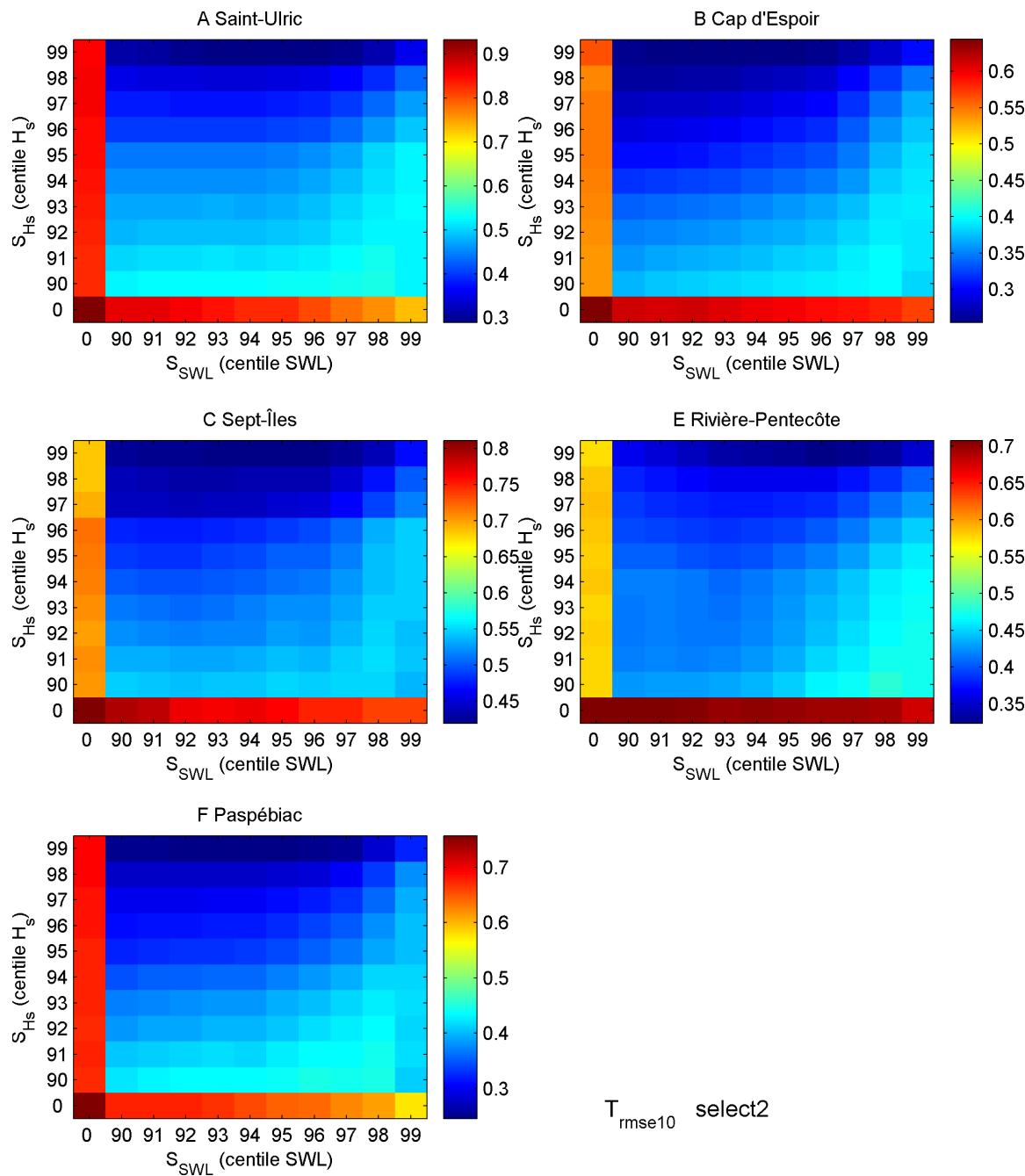


Figure 88 – Influence de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  avec l'option **select2** dans `cooc_fit.m` sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique  $T_{rmse10}$ , qui indique la magnitude de la différence relative entre des périodes de retour prédictes et observées (idéalement  $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  sont représentées.

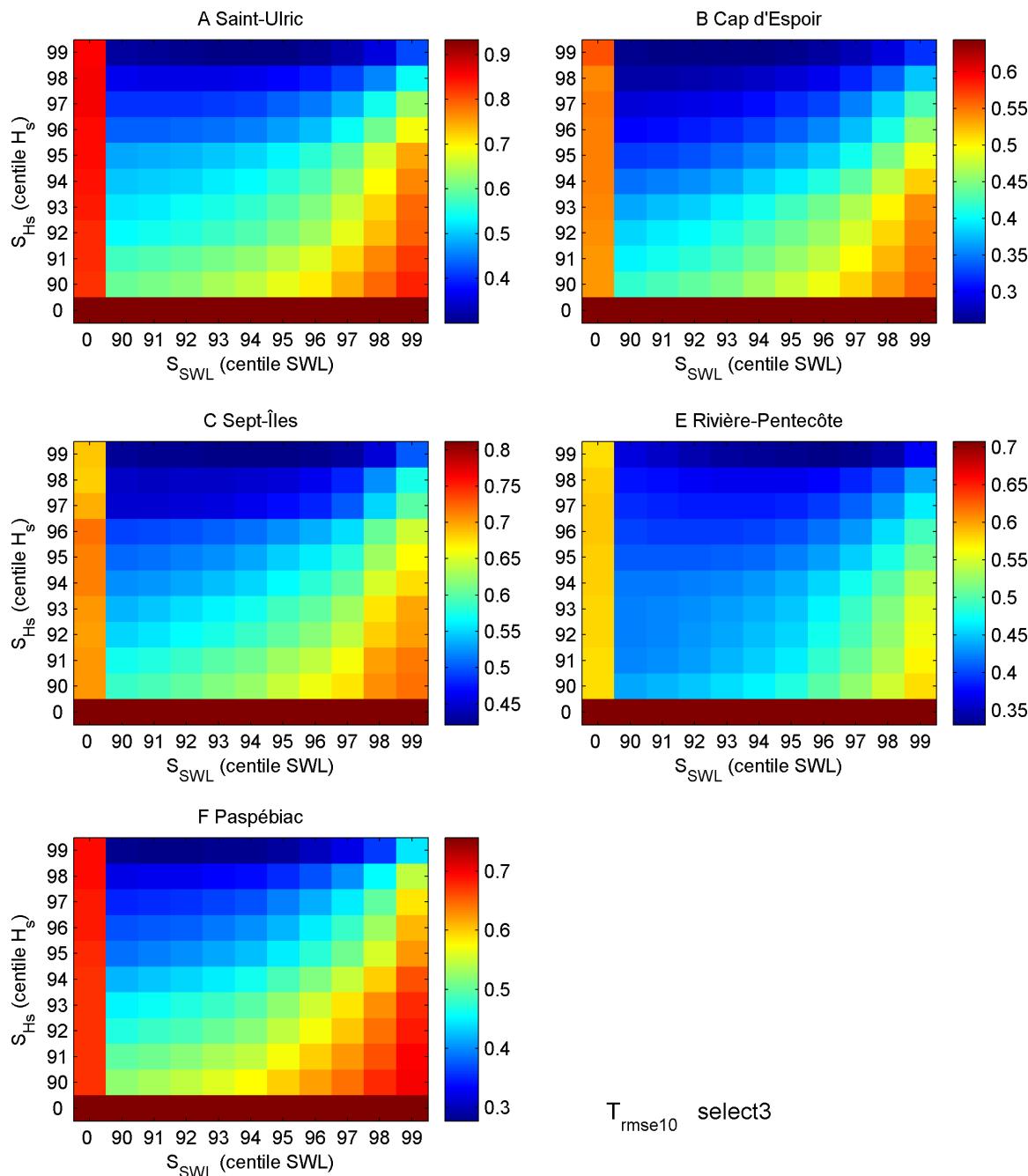
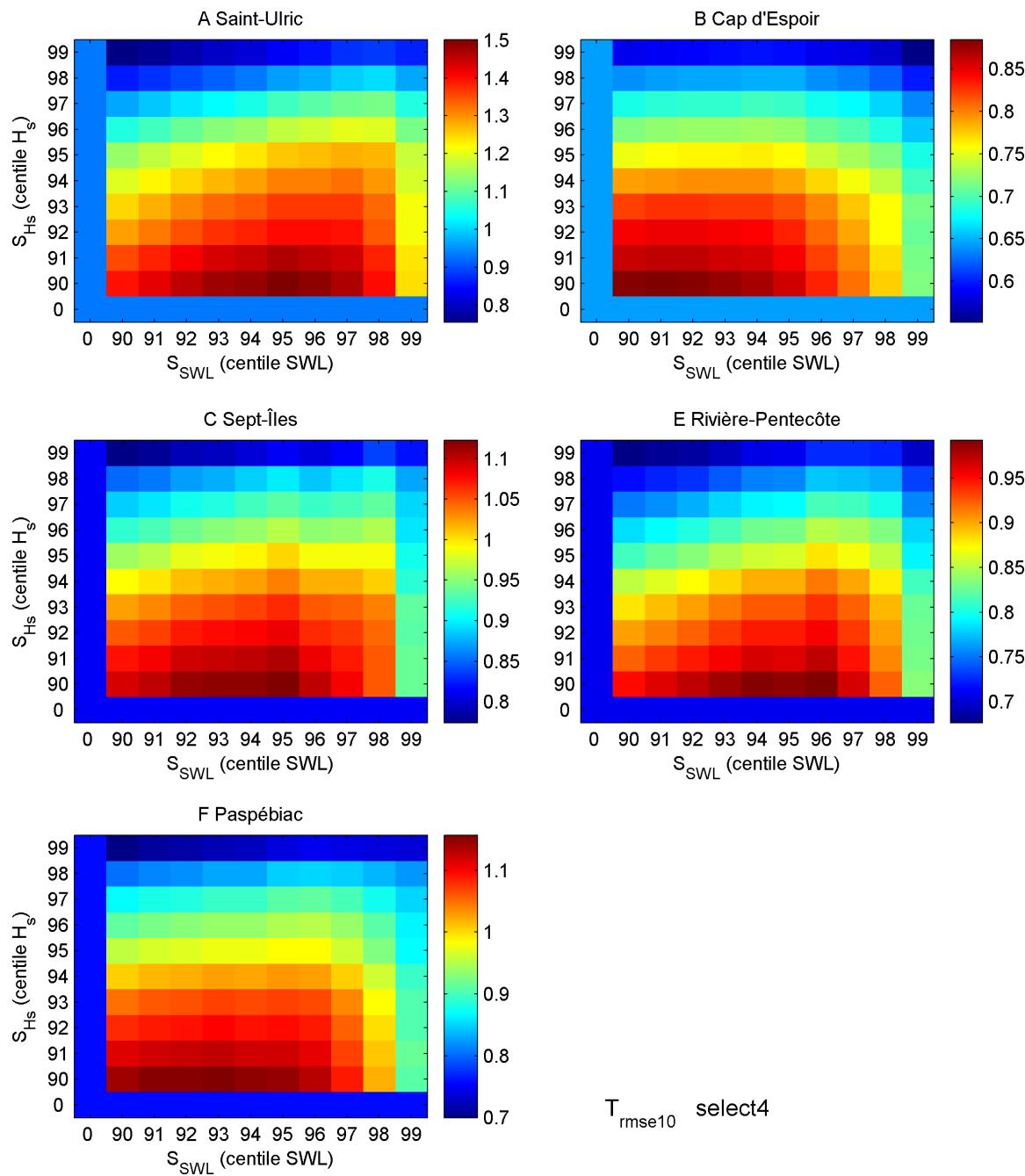


Figure 89 – Influence de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  avec l'option **select3** dans `cooc_fit.m` sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique  $T_{rmse10}$ , qui indique la magnitude de la différence relative entre des périodes de retour prédictes et observées (idéalement  $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  sont représentées.



*Figure 90 – Influence de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  avec l'option **select4** dans `cooc_fit.m` sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique  $T_{rmse10}$ , qui indique la magnitude de la différence relative entre des périodes de retour prédictes et observées (idéalement  $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  sont représentées.*

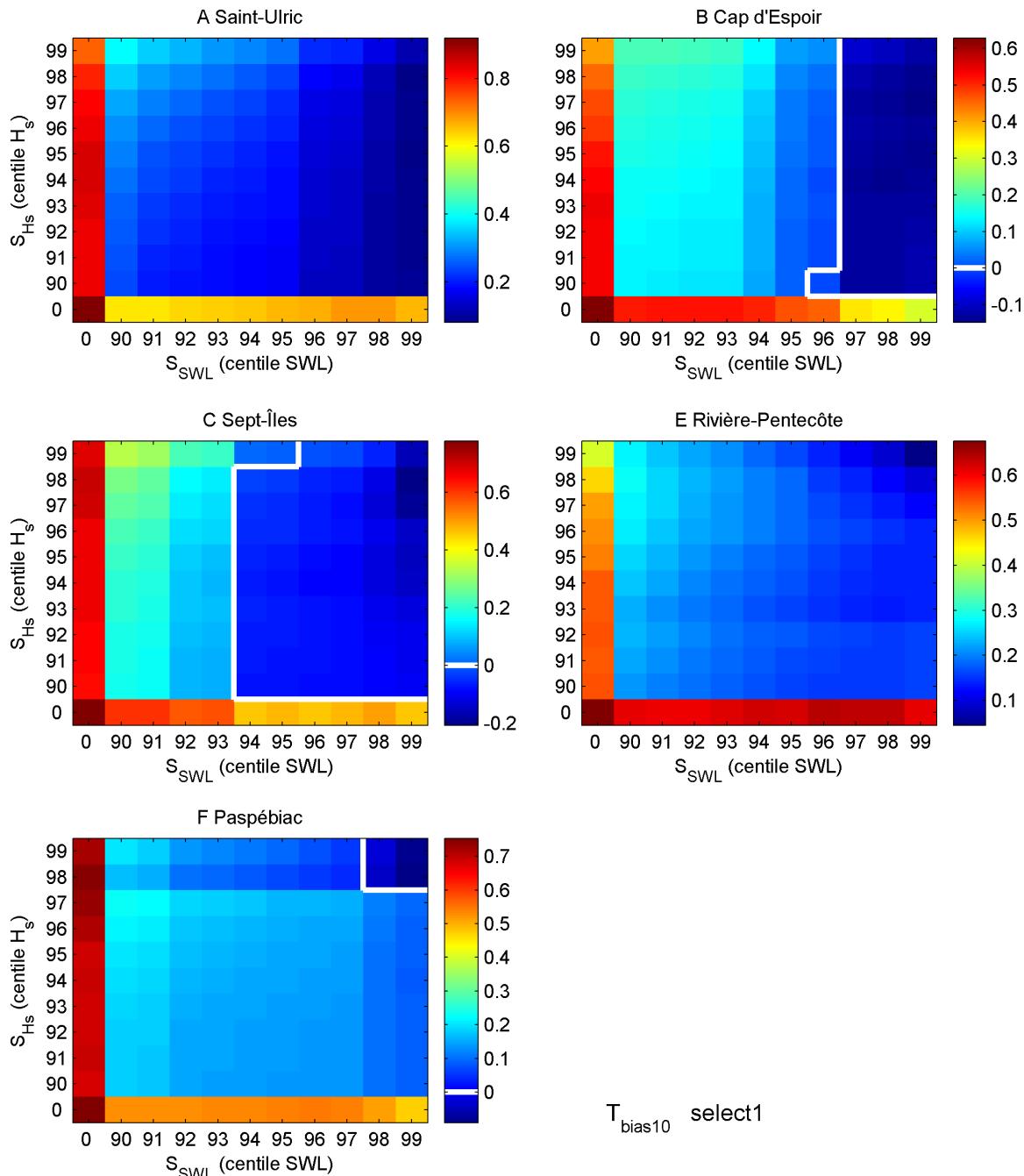


Figure 91 – Influence de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  avec l'option **select1** dans *cooc\_fit.m* sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique  $T_{bias10}$ , qui indique le biais entre les périodes de retour prédictes et observées (idéalement  $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  sont représentées. Les Figures 95 et 96 illustrent l'effet de ces variations sur les courbes SWL- $H_s$  pour la période de retour 50 ans

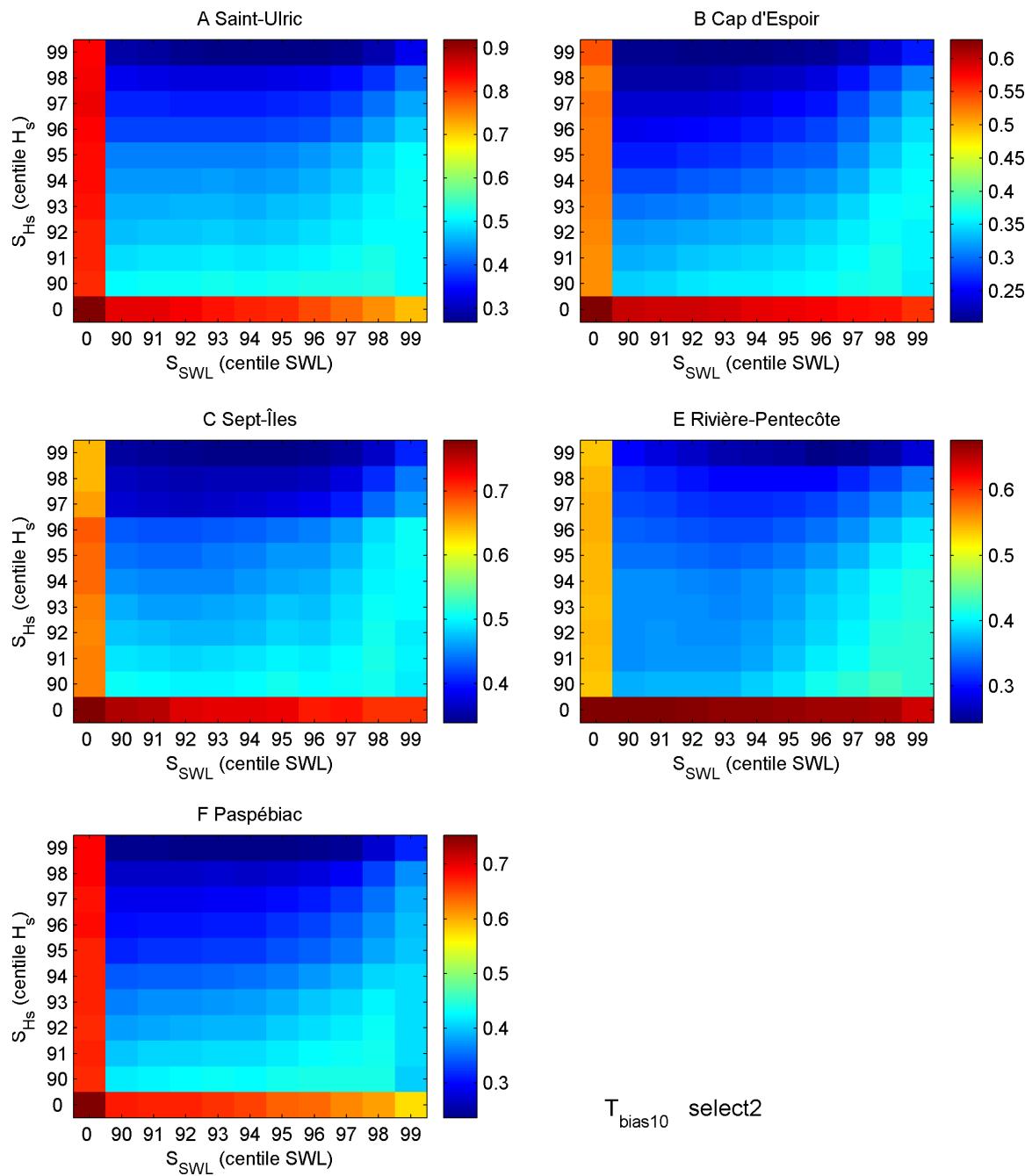


Figure 92 – Influence de  $S_{SWL}$  et  $S_{HS}$  avec l'option **select2** dans `cooc_fit.m` sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique  $T_{bias10}$ , qui indique le biais entre les périodes de retour prédites et observées (idéalement  $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de  $S_{SWL}$  et  $S_{HS}$  sont représentées.

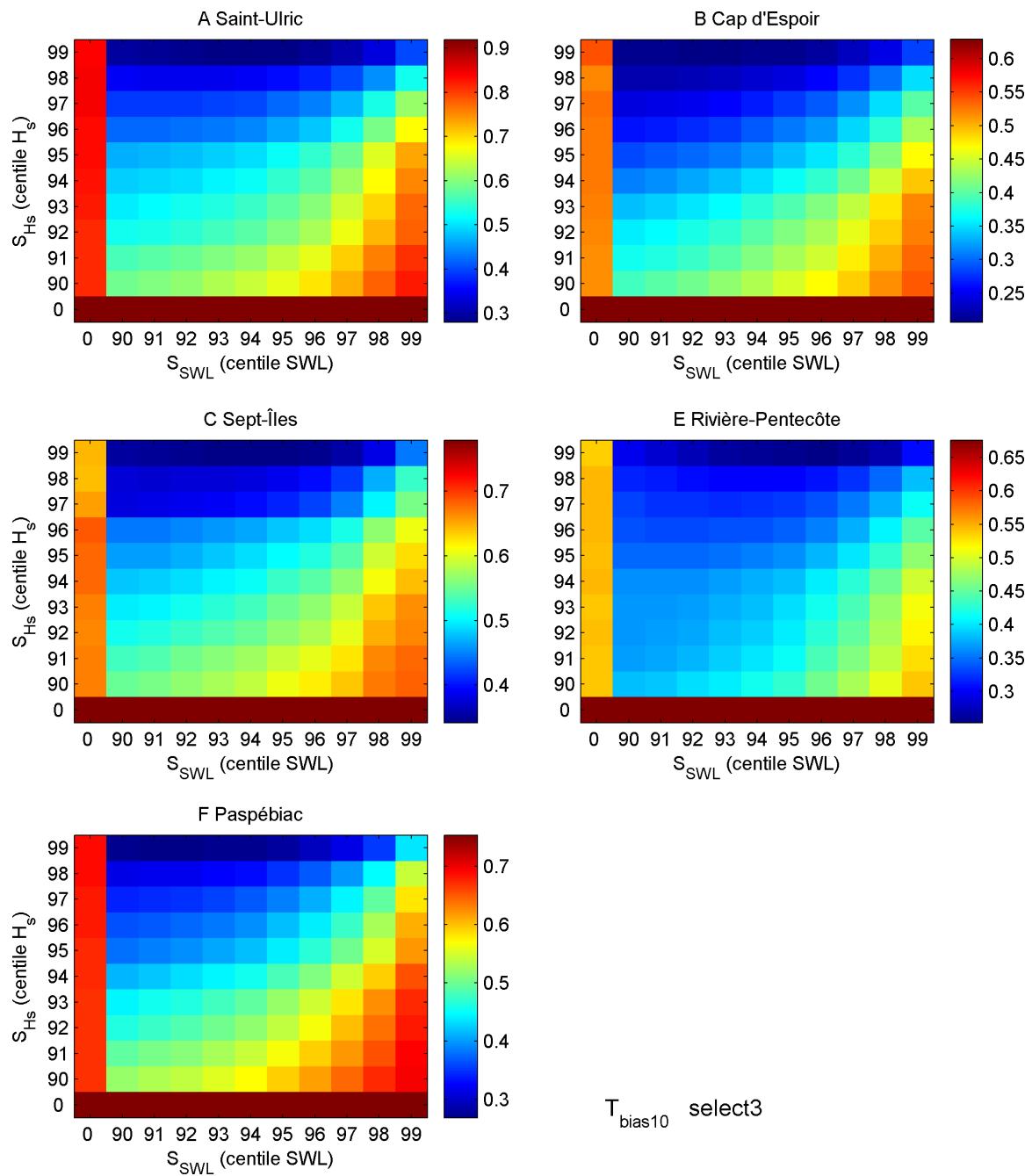


Figure 93 – Influence de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  avec l'option **select3** dans `cooc_fit.m` sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique  $T_{bias10}$ , qui indique le biais entre les périodes de retour prédites et observées (idéalement  $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  sont représentées.

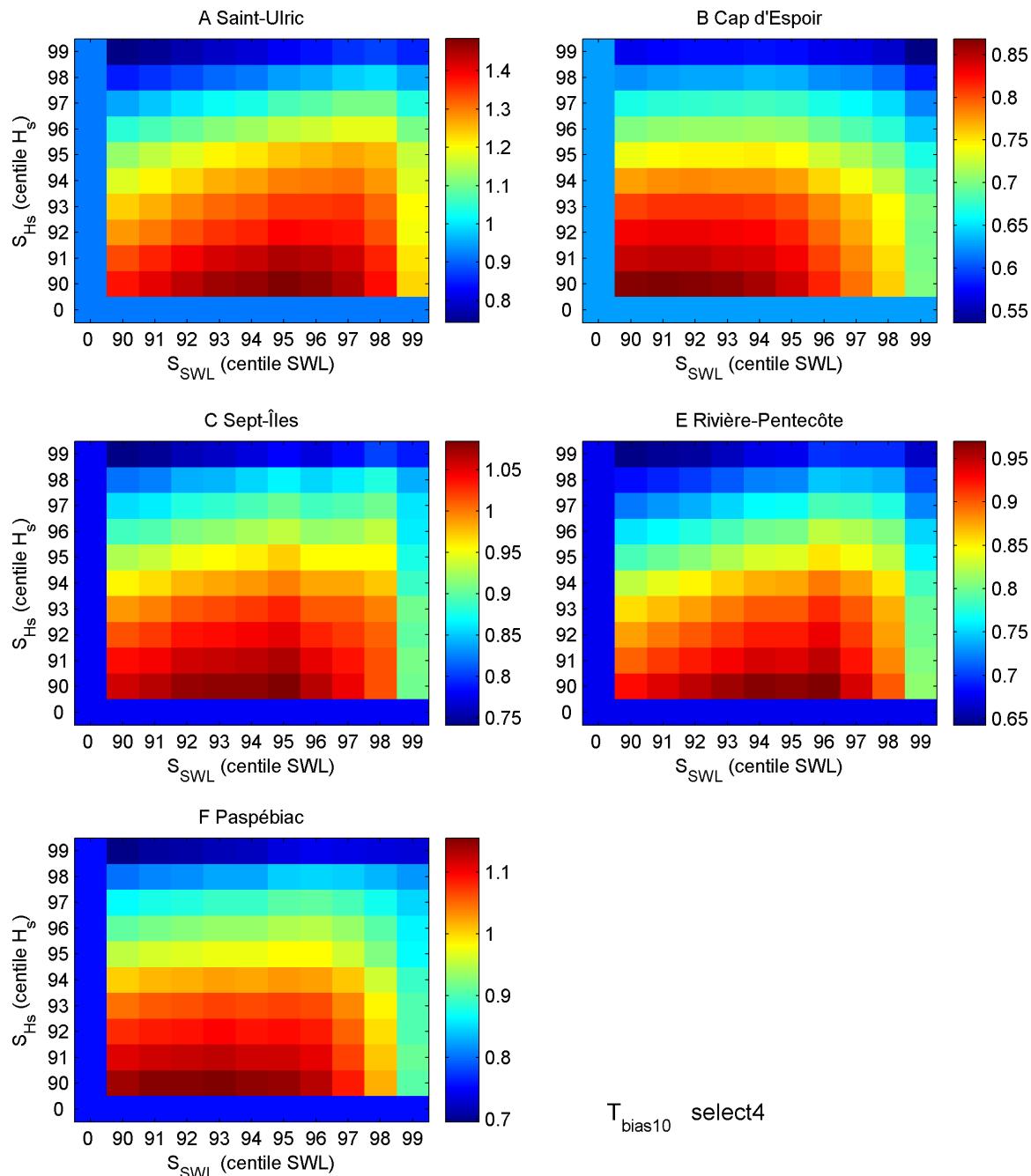


Figure 94 – Influence de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  avec l'option **select4** dans `cooc_fit.m` sur la qualité de l'ajustement de la copule de Gumbel. La couleur indique la valeur de la métrique  $T_{bias10}$ , qui indique le biais entre les périodes de retour prédites et observées (idéalement  $T_{bias10} = 0$ ). Pour chaque site, de multiples combinaisons de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  sont représentées.

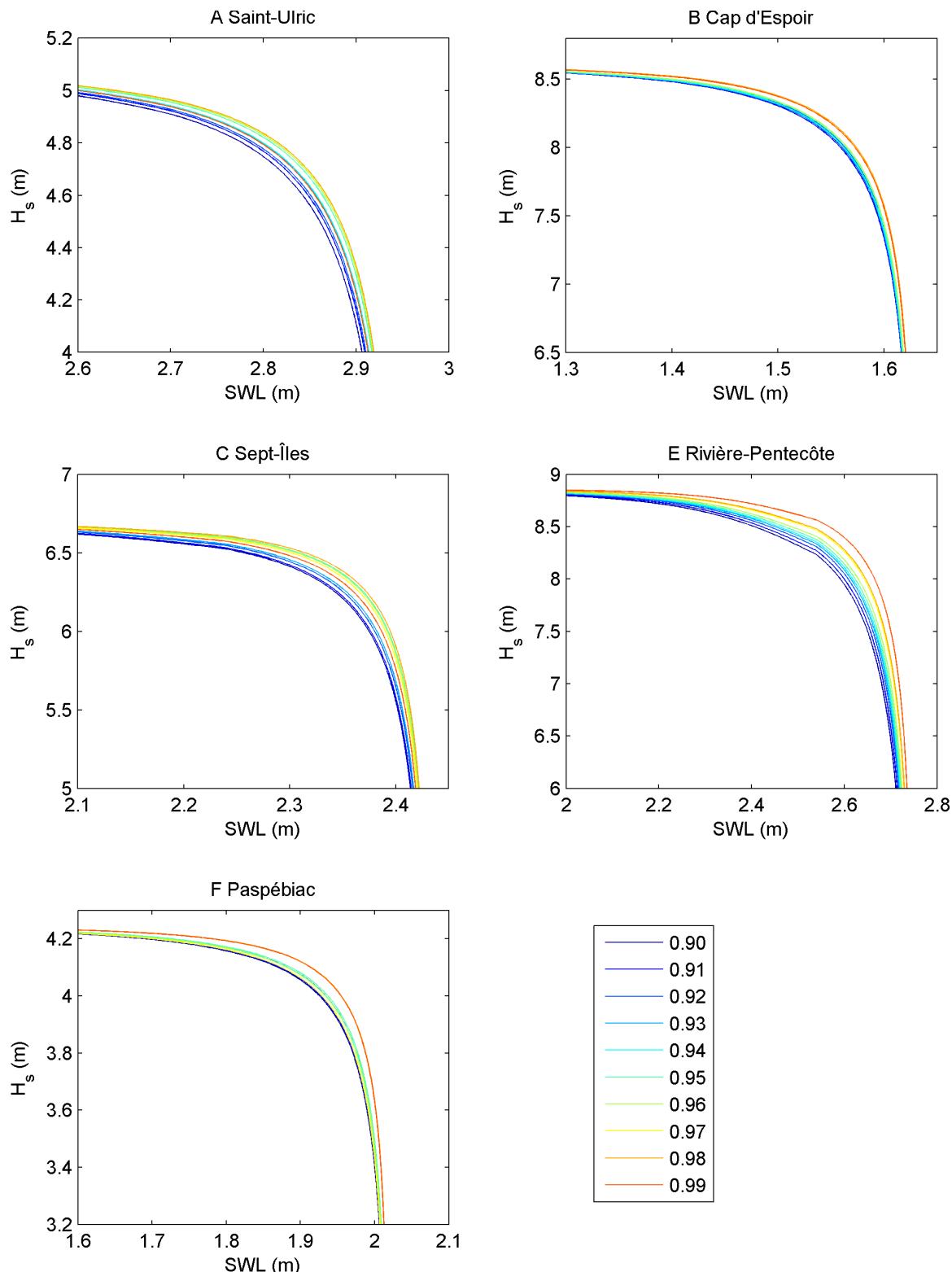


Figure 95 – Influence de la variation de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  sur la prédiction de  $SWL-H_s$  pour la période de retour 50 ans avec la copule de Gumbel et l'option select1. La valeur de  $S_{SWL}$  et  $S_{Hs}$  (valeur identique pour les deux paramètres) est indiquée par la couleur des courbes.

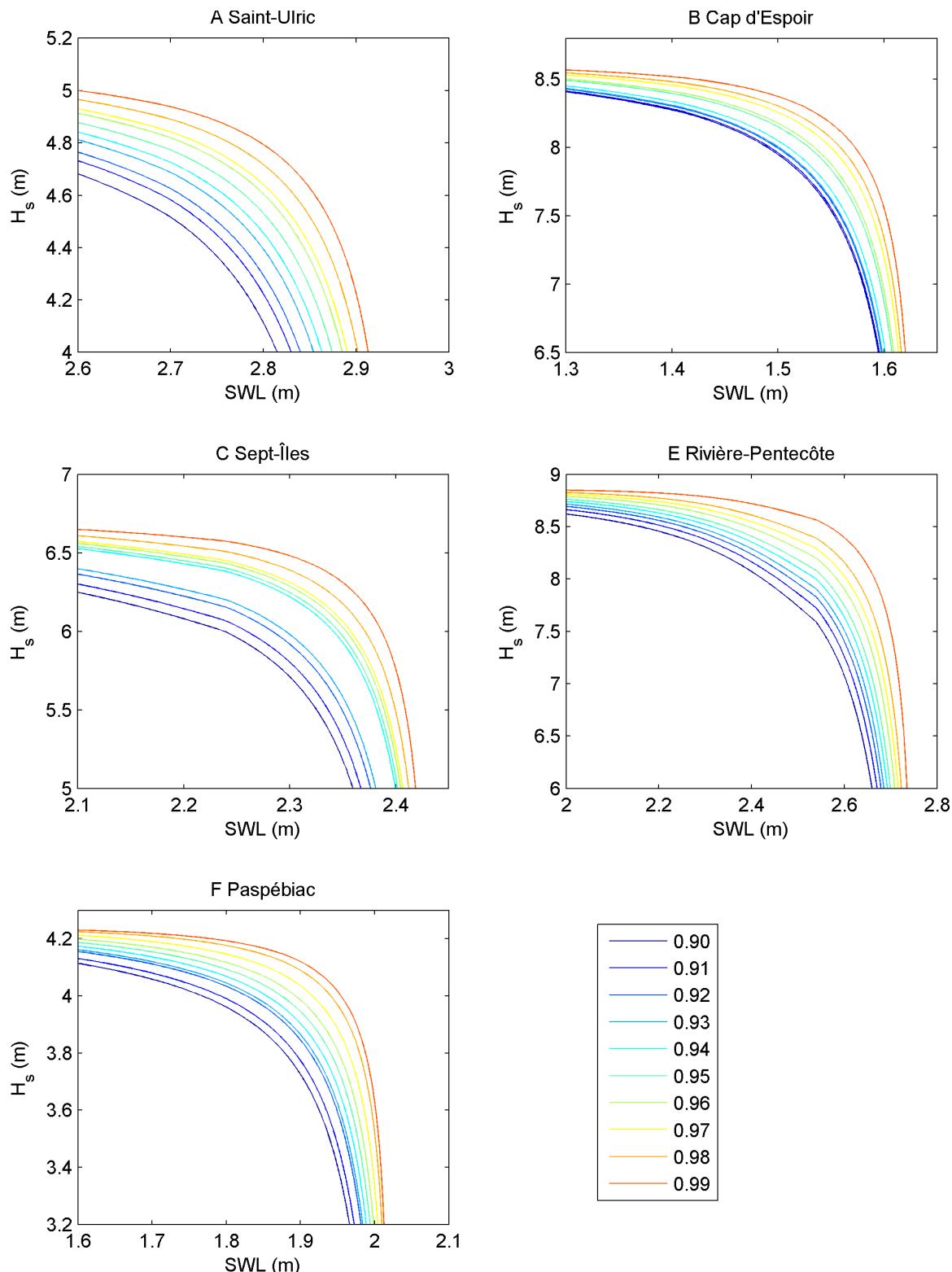


Figure 96 – Influence de la variation de  $S_{SWL}$  sur la prédition de  $SWL-H_s$  pour la période de retour 50 ans avec la copule de Gumbel, l'option select1 et  $S_{Hs} = 0.99$ . La valeur de  $S_{SWL}$  est indiquée par la couleur des courbes. La Figure 91 suggère que certaines de ces courbes  $SWL-H_s$  sont sous-estimées et d'autres surestimées.

**Annexe 5**

***Résultats numériques des calculs de probabilité conjointe  
SWL-H<sub>s</sub> pour les sites A, B, C, E et F***

---

Le Tableau 29 ci-dessous présente les résultats numériques des calculs de probabilité avec la copule de Gumbel et les options par défaut de cooc\_fit.m (option *select1*, de  $S_{SWL} = 97\%$  et  $S_{Hs} = 99\%$ , pour les cinq sites A Saint-Ulric, B Cap d'Espoir, C Sept-Îles, E Rivière-Pentecôte, et F Paspébiac. Neuf pairs de valeurs SWL- $H_s$  sur la courbe de chaque période de retour sélectionnée (2, 10, 20, 50 et 75 ans) et pour chaque site. La position des pairs de valeurs sur les courbes est illustrée à la Figure 97. Les périodes des vagues sont aussi estimées si  $H_s$  est plus grand que 98 % des vagues du site.

**Avertissement :** Les données présentées dans cette annexe le sont principalement à titre d'illustration des capacités de la méthode avec copule et des fonctions Matlab. En effet, elles sont basées sur des séries temporelles de durée limitée (site A 14 ans, site B 13 ans, site C 4 ans, site E 9 ans, site F 9 ans, Tableau 24), qui sont en principe insuffisantes pour des périodes de retour de 50 ans et de 75 ans. Pour le site C, même les prédictions des périodes de retour de 20 et 30 ans sont risquées.

*Tableau 29 – Résultats numériques des calculs de probabilité conjointe avec la copule de Gumbel pour les cinq sites.*

<b>A Saint-Ulric</b>									
Période de retour (ans) : 2									
SWL (m)	2,568	2,561	2,55	2,528	2,461	1,952	1,18	0,404	-0,371
Hs (m)	0,003	0,778	1,553	2,329	3,1	3,617	3,677	3,692	3,693
T (s)	–	–	–	5,3	6,1	6,6	6,7	6,7	6,7
Période de retour (ans) : 10									
SWL (m)	2,757	2,753	2,745	2,731	2,681	2,29	1,407	0,518	-0,371
Hs (m)	0,003	0,892	1,781	2,67	3,558	4,295	4,379	4,393	4,394
T (s)	–	–	–	5,7	6,5	7,2	7,3	7,3	7,3
Période de retour (ans) : 20									
SWL (m)	2,837	2,833	2,827	2,814	2,773	2,428	1,503	0,566	-0,371
Hs (m)	0,003	0,94	1,877	2,814	3,75	4,573	4,682	4,695	4,696
T (s)	–	–	–	5,8	6,7	7,4	7,5	7,6	7,6
Période de retour (ans) : 50									
SWL (m)	2,946	2,943	2,937	2,925	2,891	2,605	1,629	0,629	-0,371
Hs (m)	0,003	1,003	2,003	3,003	4,003	4,928	5,082	5,094	5,095
T (s)	–	–	4,9	6	6,9	7,7	7,9	7,9	7,9
Période de retour (ans) : 75									
SWL (m)	2,995	2,992	2,987	2,976	2,943	2,682	1,685	0,657	-0,371
Hs (m)	0,003	1,031	2,059	3,087	4,115	5,083	5,259	5,271	5,271
T (s)	–	–	5	6,1	7	7,9	8	8,1	8,1

**B Cap d'Espoir**

Période de retour (ans) : 2

SWL (m)	1,314	1,313	1,311	1,307	1,298	1,268	1,123	0,23	-0,721
Hs (m)	0,005	0,956	1,906	2,857	3,808	4,758	5,69	5,888	5,89
T (s)	–	–	–	5,9	6,6	7,4	8,2	8,3	8,4

Période de retour (ans) : 10

SWL (m)	1,476	1,476	1,474	1,472	1,466	1,45	1,355	0,42	-0,721
Hs (m)	0,005	1,145	2,286	3,426	4,567	5,707	6,841	7,248	7,25
T (s)	–	–	–	6,3	7,3	8,2	9,1	9,4	9,4

Période de retour (ans) : 20

SWL (m)	1,543	1,543	1,542	1,54	1,534	1,52	1,446	0,502	-0,721
Hs (m)	0,005	1,227	2,449	3,671	4,894	6,116	7,335	7,834	7,836
T (s)	–	–	–	6,5	7,6	8,5	9,4	9,8	9,9

Période de retour (ans) : 50

SWL (m)	1,629	1,629	1,628	1,627	1,623	1,612	1,552	0,61	-0,721
Hs (m)	0,005	1,335	2,665	3,995	5,326	6,656	7,984	8,608	8,61
T (s)	–	–	5,7	6,8	7,9	8,9	9,9	10,4	10,5

Période de retour (ans) : 75

SWL (m)	1,664	1,664	1,664	1,663	1,66	1,649	1,597	0,657	-0,721
Hs (m)	0,005	1,383	2,761	4,139	5,517	6,894	8,271	8,95	8,952
T (s)	–	–	5,8	6,9	8	9,1	10,1	10,7	10,8

**C Sept-Îles**

Période de retour (ans) : 2

SWL (m)	1,314	1,313	1,311	1,307	1,298	1,268	1,123	0,23	-0,721
Hs (m)	0,005	0,956	1,906	2,857	3,808	4,758	5,69	5,888	5,89
T (s)	–	–	–	5,9	6,6	7,4	8,2	8,3	8,4

Période de retour (ans) : 10

SWL (m)	1,476	1,476	1,474	1,472	1,466	1,45	1,355	0,42	-0,721
Hs (m)	0,005	1,145	2,286	3,426	4,567	5,707	6,841	7,248	7,25
T (s)	–	–	–	6,3	7,3	8,2	9,1	9,4	9,4

Période de retour (ans) : 20

SWL (m)	1,543	1,543	1,542	1,54	1,534	1,52	1,446	0,502	-0,721
Hs (m)	0,005	1,227	2,449	3,671	4,894	6,116	7,335	7,834	7,836
T (s)	–	–	–	6,5	7,6	8,5	9,4	9,8	9,9

Période de retour (ans) : 50

SWL (m)	1,629	1,629	1,628	1,627	1,623	1,612	1,552	0,61	-0,721
Hs (m)	0,005	1,335	2,665	3,995	5,326	6,656	7,984	8,608	8,61
T (s)	–	–	5,7	6,8	7,9	8,9	9,9	10,4	10,5

Période de retour (ans) : 75

SWL (m)	1,664	1,664	1,664	1,663	1,66	1,649	1,597	0,657	-0,721
Hs (m)	0,005	1,383	2,761	4,139	5,517	6,894	8,271	8,95	8,952
T (s)	–	–	5,8	6,9	8	9,1	10,1	10,7	10,8

**E Rivière-Pentecôte**

Période de retour (ans) : 2

SWL (m)	2,288	2,281	2,275	2,264	2,241	2,142	1,507	0,526	-0,458
Hs (m)	0,005	0,989	1,972	2,956	3,939	4,918	5,549	5,601	5,604
T (s)	–	–	–	6	7	7,8	8,4	8,4	8,5

Période de retour (ans) : 10

SWL (m)	2,51	2,504	2,498	2,488	2,457	2,394	1,959	0,755	-0,458
Hs (m)	0,005	1,218	2,431	3,643	4,856	6,067	7,132	7,23	7,234
T (s)	–	–	5,7	6,7	7,8	8,8	9,7	9,8	9,9

Période de retour (ans) : 20

SWL (m)	2,618	2,615	2,611	2,603	2,582	2,526	2,143	0,853	-0,458
Hs (m)	0,005	1,317	2,628	3,94	5,251	6,561	7,783	7,932	7,935
T (s)	–	–	5,9	7	8,1	9,2	10,3	10,4	10,5

Période de retour (ans) : 50

SWL (m)	2,749	2,746	2,743	2,735	2,72	2,677	2,36	0,985	-0,458
Hs (m)	0,005	1,448	2,891	4,334	5,777	7,22	8,603	8,86	8,863
T (s)	–	–	6	7,3	8,6	9,8	11	11,3	11,4

Période de retour (ans) : 75

SWL (m)	2,809	2,806	2,804	2,796	2,782	2,741	2,456	1,043	-0,458
Hs (m)	0,005	1,507	3,008	4,51	6,011	7,512	8,963	9,27	9,273
T (s)	–	–	6,1	7,5	8,8	10	11,3	11,6	11,7

**F Paspébiac**

Période de retour (ans) : 2

SWL (m)	1,65	1,649	1,646	1,638	1,587	1,22	0,587	-0,047	-0,681
Hs (m)	0,002	0,636	1,27	1,904	2,535	3,007	3,033	3,035	3,035
T (s)	–	–	–	4,7	5,4	5,9	5,9	5,9	5,9

Période de retour (ans) : 10

SWL (m)	1,84	1,84	1,838	1,833	1,806	1,527	0,794	0,056	-0,681
Hs (m)	0,002	0,74	1,477	2,215	2,952	3,583	3,637	3,639	3,639
T (s)	–	–	–	5,1	5,9	6,5	6,5	6,5	6,5

Période de retour (ans) : 20

SWL (m)	1,919	1,919	1,918	1,913	1,893	1,652	0,879	0,099	-0,681
Hs (m)	0,002	0,783	1,563	2,343	3,123	3,825	3,897	3,898	3,899
T (s)	–	–	4,4	5,2	6	6,7	6,7	6,8	6,8

Période de retour (ans) : 50

SWL (m)	2,019	2,019	2,018	2,014	2	1,812	0,991	0,155	-0,681
Hs (m)	0,002	0,839	1,675	2,512	3,348	4,139	4,241	4,242	4,242
T (s)	–	–	4,5	5,4	6,2	7	7	7,1	7,1

Période de retour (ans) : 75

SWL (m)	2,061	2,061	2,06	2,057	2,044	1,88	1,041	0,18	-0,681
Hs (m)	0,002	0,863	1,725	2,586	3,447	4,274	4,393	4,394	4,394
T (s)	–	–	4,6	5,5	6,3	7,1	7,2	7,2	7,2

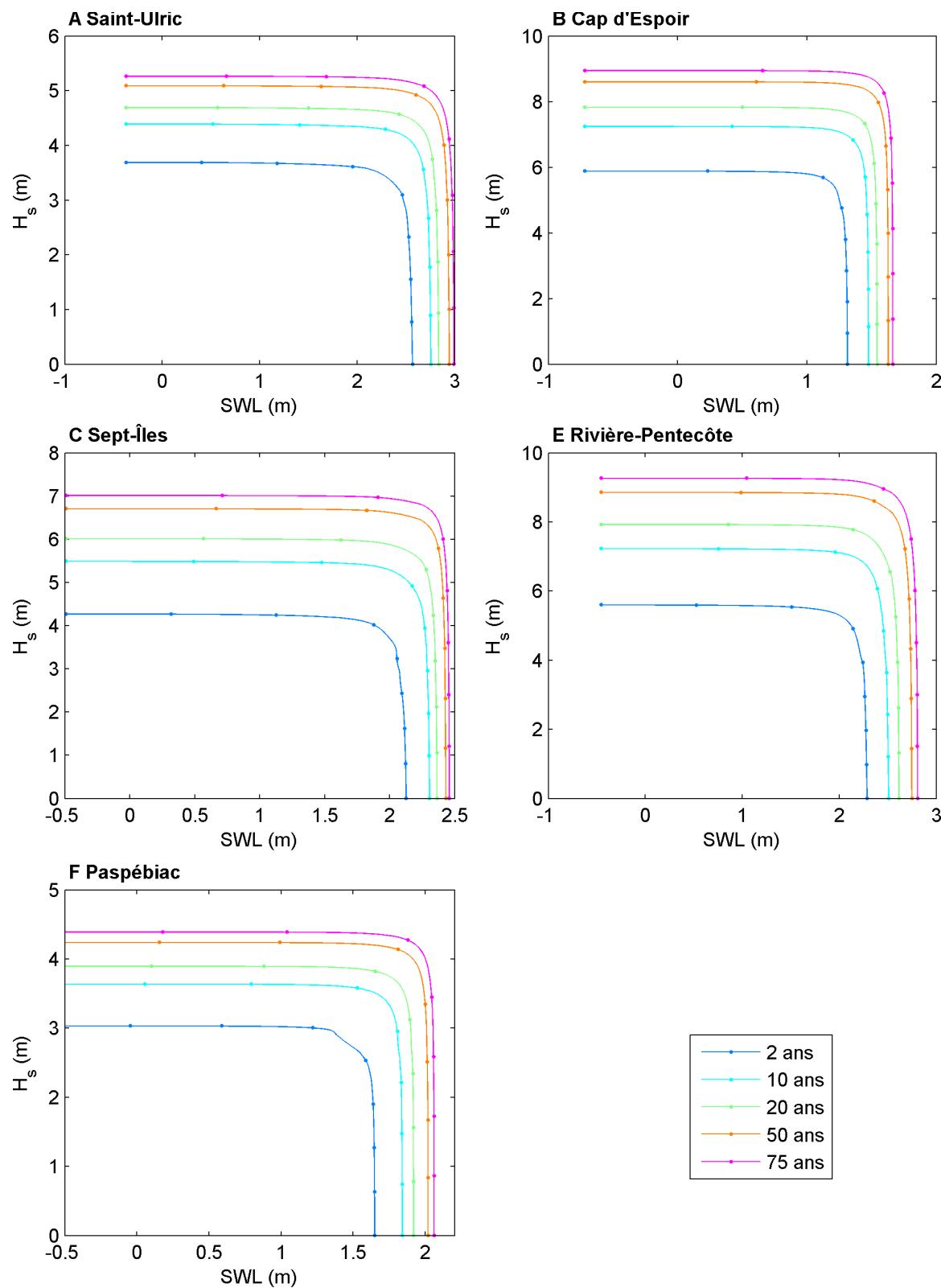


Figure 97 – Position des paires de valeurs SWL- $H_s$  sur les courbes de périodes de retour calculées avec la copule de Gumbel, qui sont présentées dans le Tableau 29.