



Elaboration du dossier d'autorisation environnementale unique et réalisation de modélisations océanographiques relatifs aux projets de dragage et d'extension du port de commerce de Galisbay

Marché n°2020-09

Analyse des climats de turbidité



Rapport d'étude



PROJET FINANCÉ
par le fonds européen
de développement régional
Dans le cadre de REACT-EU :
dispositif de relance de l'Union en
réponse à la pandémie de COVID-19

23 mars 2021 Version 2

i-Sea SAS, 25 rue Marcel Issartier, 33700 Mérignac
Tel : 06 88 65 42 35 - Email : manon.beset@i-sea.fr
SIRET : 804 000 602 00016, R.C.S. Bordeaux

FICHE DOCUMENTAIRE

Réalisation de l'étude : Manon Besset, Olivier Regniers, Virginie Lafon

Rédaction du rapport : Manon Besset, Olivier Regniers

Avertissement : Ce rapport est exclusivement dédié à la lecture du comité de pilotage de l'étude. Il ne peut être ni révisé, ni modifié. Il peut être diffusé à discrétion du maître d'ouvrage.

Historique des modifications :

Date	Rédacteur	Approbateur	Version	
17/02/2021	M. Besset, O. Regniers	V. Lafon, A. Dehouck	V1	
Version				
	Nature	Auteurs	Correcteurs	Version
23/03/2021	Ajout de précisions et d'analyses complémentaires sur de nouveaux points de localisation avec nouvelles données	M. Besset	C. Tessier, D. Grosdeman ge	V2

Sommaire

1	Contexte, objectifs et stratégie d'analyse	6
2	Données et méthodes	7
2.1	Caractéristiques de la base de données image analysée et des forçages	7
2.2	Caractérisation des climats de turbidité et discrétisation	14
2.2.1	Estimation des MES et des NTU	14
2.2.2	Comparaison visuelle	15
2.2.3	Extraction des valeurs NTU, MES et forçages sur 3 points pour vérification des climats identifiés.....	16
2.3	Fiabilité des résultats	17
3	Résultats.....	18
3.1	Six états de turbidité observés dans le jeu de données spatiales	18
3.2	Une variabilité saisonnière aussi observée sur des forçages météo-marins.....	22
3.3	Relations entre turbidité et état de mer pour expliquer les climats observés	25
3.3.1	Corrélations sur la base du jeu de données spatiales sur 4 années.....	25
3.3.2	Relations entre les niveaux de turbidité et les forçages météo-marins	27
3.3.3	Les vagues, principaux agents de contrôle de la turbidité naturelle de la zone.....	29
3.3.4	Conditions de turbidité en fonction de l'état de mer (hauteur des vagues et vitesse du courant).....	34
3.3.5	Synthèse statistique des conditions météo-marines et de turbidité en fonction du climat de turbidité défini sur chaque point de localisation.....	36
3.4	L'anse de Galisbay lors d'un épisode hautement turbide : ce que l'observation large échelle signifie en très proche-côtier.....	40
4	Synthèse des résultats et Conclusions.....	44
5	Bibliographie	45
6	Annexe 1 - Caractéristiques des données satellitaires	46
7	Annexe 2 – Variations mensuelles des paramètres de forçages physiques au point Centre ..	48
8	Annexe 3 – Comparaison entre les climats de turbidité et les forçages au point Est	50

Liste des illustrations

Figure 1. Localisation du site d'étude	6
Figure 2. Distribution mensuelle du jeu de données satellite Sentinel-3 utilisées pour l'étude. Les histogrammes représentent chaque année la période (du bleu foncé, 2017 au bleu clair, 2020) et la courbe rouge représente le nombre cumulé d'images exploitables, par mois, sur l'ensemble de la période.....	7
Figure 3. Localisation des points d'extraction des valeurs de turbidité, de MES et des conditions de forçage.	8
Figure 4. Localisation des points supplémentaires d'extraction des valeurs de turbidité et des conditions de forçage.	9
Figure 5. Représentativité des valeurs journalières de forçage observées sur 4 années (2017-2020) dans le jeu de données utilisé pour l'étude, correspondant aux dates et heure d'acquisition des images satellites utilisées (15h UTC). Les graphiques (a), (b), (c) montrent la représentativité des données relatives aux vagues (hauteurs significatives, directions et périodes), le graphique (d) celle de la marée et les graphiques (e) et (f) les grandeurs définissant les vents.....	13
Figure 6. Exemples représentatifs des six cas de figures emblématiques de la distribution de surface des NTU dans le secteur de Saint-Martin (images de la base de données S3). Les trois points jaunes localisent les 3 points de mesure déjà localisés en Figure 3, d'où nous avons extraits les valeurs NTU et MES dérivées des images satellites.	19
Figure 7. Distribution des dates observées par mois et par niveau de turbidité	20
Figure 8. Turbidité moyenne mensuelle dérivée des images satellites Sentinel-3 aux points de référence Est, Centre et Ouest.	21
Figure 9. Valeurs maximales et minimales de turbidité enregistrée aux points de référence Est, Centre et Ouest pour chaque mois.	21
Figure 10. Correspondance 1:1 des valeurs NTU (abscisse) avec les valeurs de MES (ordonnée) pour les trois points de référence.....	22
Figure 11. Variation moyenne mensuelle sur la période d'étude (2017-2020), au point Est des (a) concentrations de particules en suspension en surface, (b) de la hauteur significative, (c) de la direction, (d) de la période et (e) du flux d'énergie des vagues, (f) de la vitesse et (g) de la direction des vents, de (h) l'amplitude, (i) la direction et (j) la vitesse de déplacement des particules sur le fond induit par les vagues, de (k) la vitesse et (l) la direction du courant, et (m) de la hauteur de marée.	24
Figure 12. Tables de corrélation entre la turbidité relevée aux points 1 (Centre), 2 (Ouest) et 3 (Est), et les valeurs des variables des forçages retenus pour l'étude (Tableau 1).	26
Figure 13. Point Centre - Relations linéaires entre le niveau de turbidité en abscisse (du niveau 0 au niveau 5 (cf. Figure 6)) et (a) la vitesse du vent en [m], (b) la direction du vent en [°], (c) la période des vagues en [s], (d) la hauteur significative des vagues en [m], (e) la direction de provenance des vagues en [°], (f) le flux d'énergie des vagues en [kW/m], et (g) l'amplitude en [m], (h) la direction en [°] et (i) la vitesse en [m/s] de déplacement induit par les vagues sur le fond.	28

Figure 14. Point Centre - Relations linéaires entre la valeur moyenne de turbidité pour chaque niveau de turbidité (du niveau 0 au niveau 5 (cf. Figure 6)) en abscisse et (a) la vitesse du vent en [m], (b) la direction du vent en [°], (c) la période des vagues en [s], (d) la hauteur significative des vagues en [m], (e) la direction de provenance des vagues en [°], (f) le flux d'énergie des vagues en [kW/m], et (g) l'amplitude en [m], (h) la direction en [°] et (i) la vitesse en [m/s] de déplacement induit par les vagues sur le fond.	29
Figure 15. Distribution des hauteurs significatives discrétisées des vagues mesurées sur les 3 points de référence sur les 4 années d'étude, pour chaque niveau de turbidité observé.....	31
Figure 16. (Page précédente) Roses des vagues présentant les directions de provenance des vagues par niveau de turbidité (de 0 à 5), sur chaque point de référence (Centre, Ouest, Est).	33
Figure 17. Circulation des courants le 05 mars 2018 estimée à partir du modèle Mike 3D par l'équipe DHI.	33
Figure 18. Circulation des courants le 06 mars 2018 (climat 5) estimée à partir du modèle Mike 3D par l'équipe DHI.	34
Figure 19. Valeur moyenne, maximale et minimale de turbidité par classe de hauteur significative des vagues et par point de localisation.	35
Figure 20. Valeur moyenne, maximale et minimale de turbidité par classe de vitesse de courant mesurée au point Déroit (modélisation DHI) et par point de localisation de turbidité.	36
Figure 21. Variation spatiale de la turbidité dérivée de l'image satellite Sentinel-3 du 07/03/2018, dans le secteur Nord de Saint-Martin : zoom sur les environs de Galisbay sur fond cartographique de l'image Sentinel-2 du 06/03/2018 dont les extractions de la turbidité sont présentées en Figure 22.	42
Figure 22. Variation spatiale de la turbidité dérivée de l'image satellite Sentinel-2 du 06/03/2018, dans le secteur Nord de Saint-Martin : couverture complète de la zone d'intérêt. Le graphique sur la carte représente la variation de la turbidité le long d'un profil (ligne tiretée blanche) sur environ 5 km du Port de Galisbay au large.....	43
Tableau 1. Caractéristiques générales des paramètres de forçages pris en compte dans l'analyse	10
Tableau 2. Coordonnées géographiques des points de référence.	16
Tableau 3. Détail des mesures in-situ disponibles pour la période (source : ODE971).	17
Tableau 4. Caractéristiques des variables (valeurs moyenne, maximum et minimum) par point et par climat de turbidité, points supplémentaires inclus.	37

1 CONTEXTE, OBJECTIFS ET STRATEGIE D'ANALYSE

En vue d'une extension du port de commerce de Galisbay sur la partie Française de l'île de Saint-Martin, de la création d'un quai Croisière, et des projets de dragage associés, un dossier d'Autorisation Environnementale Unique doit être élaboré pour évaluer la faisabilité de ces projets en accord avec les mesures de protection et de préservation environnementales en vigueur. Le présent document est une des pièces de l'expertise consultative requise, qui traite des conditions naturelles de turbidité à proximité et autour de l'île de Saint-Martin (Figure 1). Notre étude des climats de turbidité s'inscrit donc dans un groupement de 13 partenaires (4 co-traitants et 9 sous-traitants et experts) choisi pour élaborer le dossier et réaliser des modélisations océanographiques pour une étude d'impact des projets de dragage et d'extension du port de commerce de Galisbay.

L'entreprise i-Sea met à profit son savoir-faire en exploitation de données satellitaires et son expertise thématique littorale pour réaliser une étude régionale et locale des différents climats de turbidité observables au cours des quatre dernières années (2017 – 2020) pour poser les bases de la connaissance de la dynamique naturelle des matières en suspension en fonction des forçages météo-marins. Cette analyse doit servir à identifier les conditions naturelles et ordinaires mais aussi événementielles de la mise en suspension et de la variabilité naturelle des masses turbides.

L'analyse est basée sur un important volume de données spatiales exploitables (limites liées à la nébulosité et à la réflexion de la lumière solaire par l'eau) pour définir plusieurs niveaux de turbidité et les confronter aux conditions météo-marines. Ces observations ont été quantitativement étayées à l'aide de réanalyses de modèles climatiques régionaux.

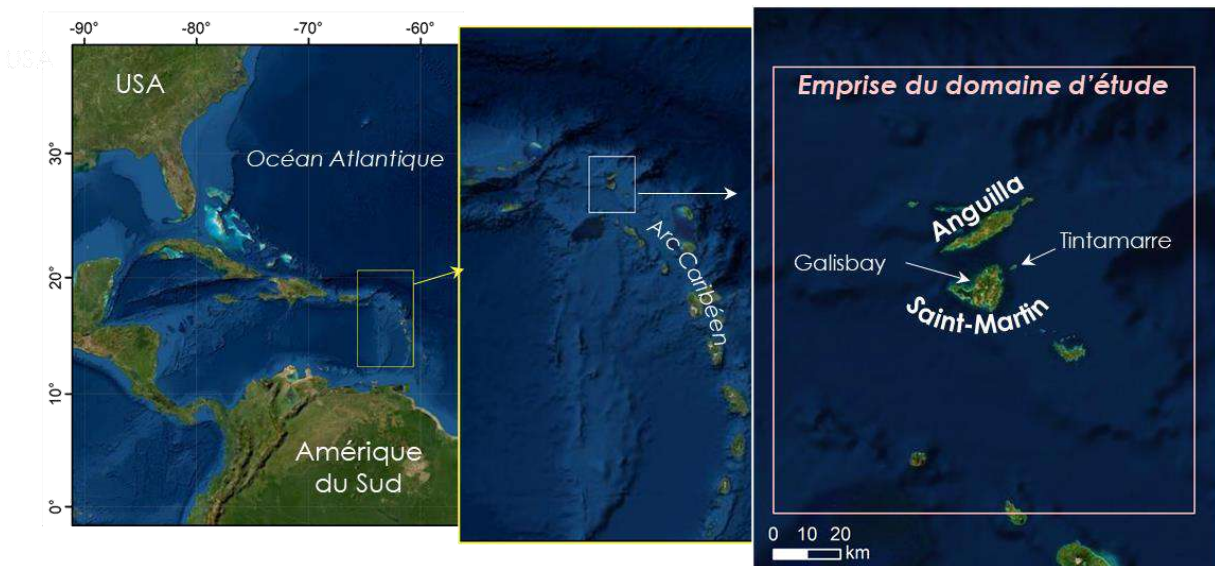


Figure 1. Localisation du site d'étude

2 DONNEES ET METHODES

2.1 Caractéristiques de la base de données image analysée et des forçages

A l'instar des études précédentes (Lafon et Regniers, 2018 ; 2019a ; 2019b), une base de données d'images Sentinel-3 a été exploitée pour établir les différents climats de turbidité autour des îles de Saint-Martin et Anguilla. Les caractéristiques de ces images sont reportées en annexe (Annexe 1 - Caractéristiques des données satellitaires).

Nous avons sélectionné, parmi les 726 images satellite théoriquement exploitables pour la période 2017-2020 considérée, 374 dates jugées pertinentes pour ces nouvelles analyses. Les images rejetées sont celles pour lesquelles la nébulosité cache une trop grande zone (en particulier à proximité immédiate de l'île de Saint-Martin), ce qui empêche toute estimation fiable de la turbidité. Globalement, une variabilité saisonnière est observée dans la disponibilité des images satellite exploitables, avec des conditions plus propices à l'utilisation de cette donnée spatiale optique pour les mois d'octobre à mars pendant la saison sèche

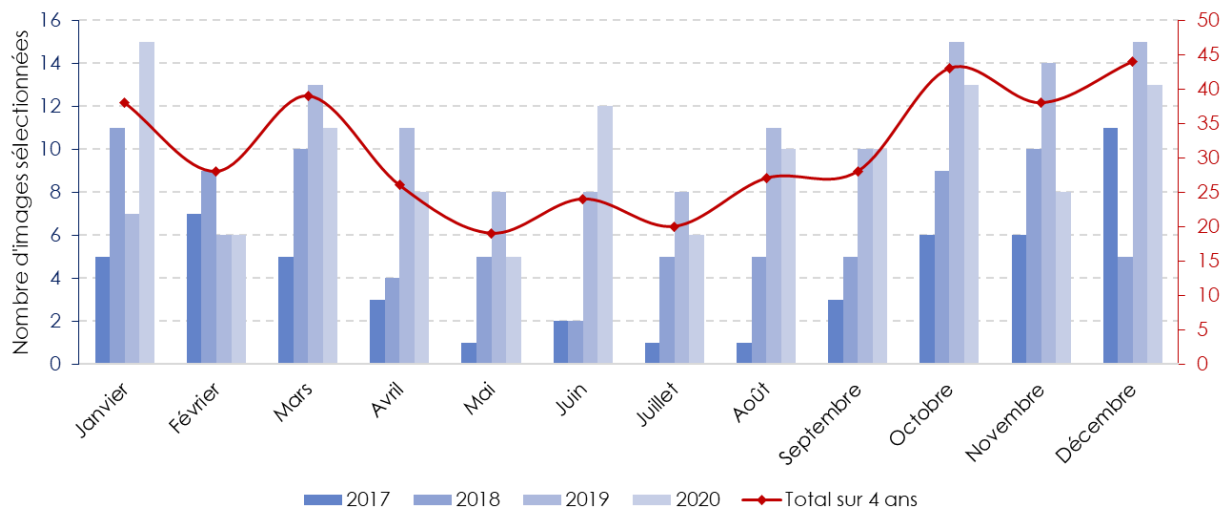


Figure 2. Distribution mensuelle du jeu de données satellite Sentinel-3 utilisées pour l'étude. Les histogrammes représentent chaque année la période (du bleu foncé, 2017 au bleu clair, 2020) et la courbe rouge représente le nombre cumulé d'images exploitables, par mois, sur l'ensemble de la période.

L'analyse de la représentativité de ces 374 cas de figure individuels, par rapport aux conditions de forçage prévalentes lors des acquisitions, est réalisée de la manière suivante :

- Trois points de localisation ont en premier lieu été retenus pour extraire les valeurs de matière en suspension et de turbidité de surface de chaque image satellite Sentinel-3, ainsi que les valeurs des forçages aux dates et heures correspondantes à l'heure

d'acquisition satellitaire (Figure 3). Ces trois points de localisation ont été choisis pour couvrir au mieux le contexte environnemental autour de l'île. Ces points seront utilisés tout au long de l'étude pour réaliser les comparaisons et autres analyses statistiques permettant d'établir les climats de turbidité de la région de Saint-Martin. Le point 1, nommé « Centre », est donc situé au large de la baie de Galisbay, entre l'île de Saint-Martin et celle d'Anguilla. Le point 2, « Ouest », est situé à environ 10 km à l'ouest de l'extrémité occidentale de Saint-Martin. Le point 3, « Est » est situé au Nord-Est de Saint-Martin. Trois points supplémentaires complètent l'analyse dans un second volet d'étude approfondie des interactions entre vagues, courants et turbidités entre les deux îles principales et à proximité de la baie de Galisbay (voir sections 3.3.4, 3.3.5, et 3.4). Les trois points supplémentaires sont nommés Détroit, Galisbay-Est et Galisbay-Ouest (Figure 4).

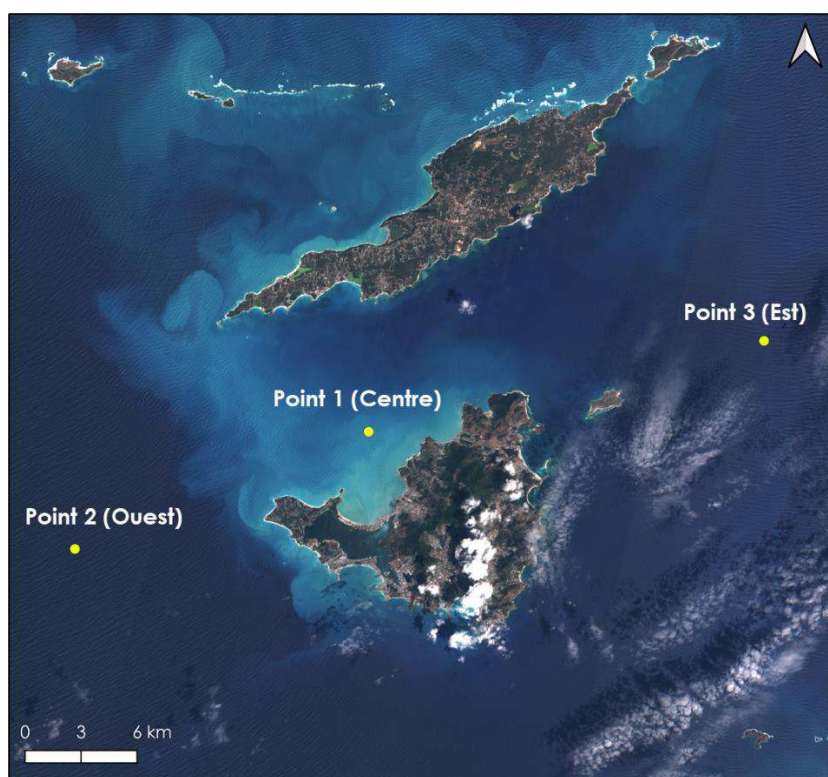


Figure 3. Localisation des points d'extraction des valeurs de turbidité, de MES et des conditions de forçage.

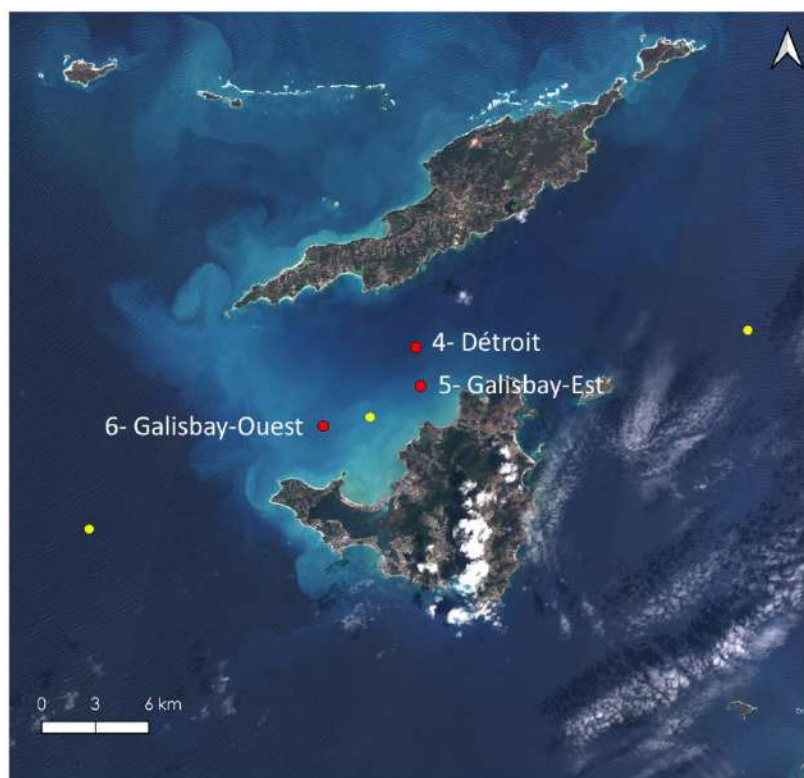


Figure 4. Localisation des points supplémentaires d'extraction des valeurs de turbidité et des conditions de forçage.

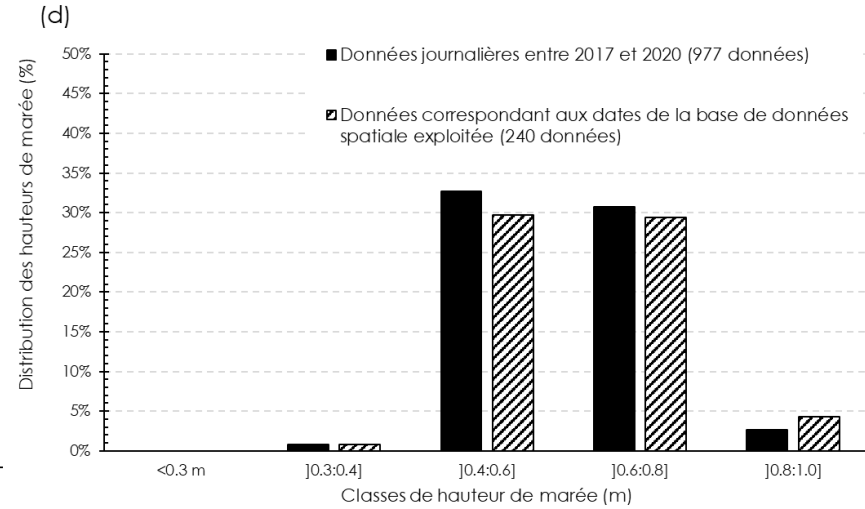
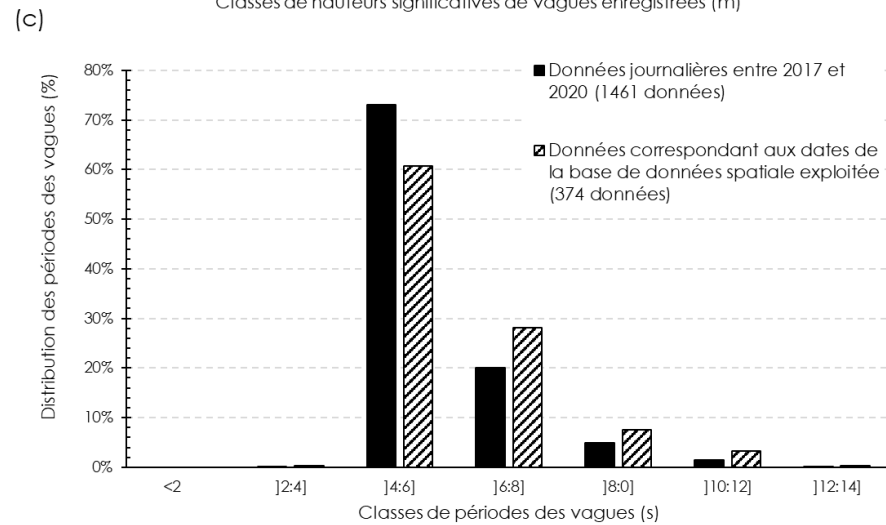
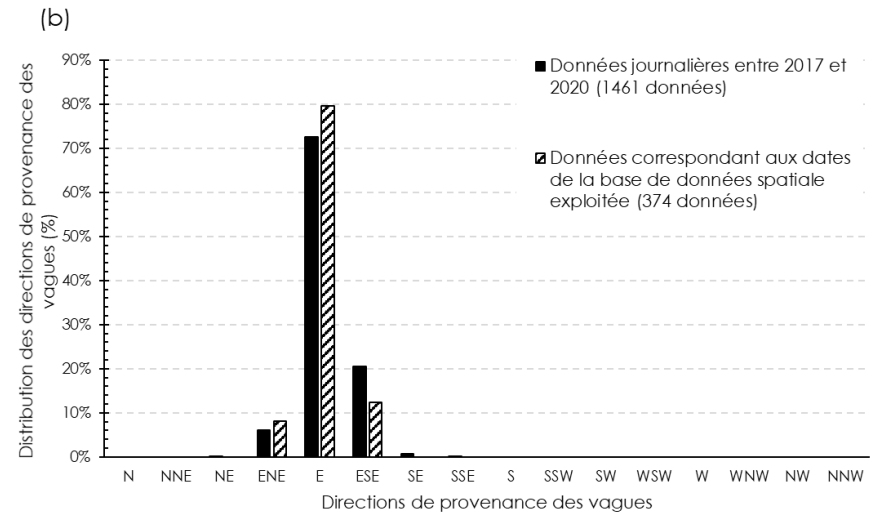
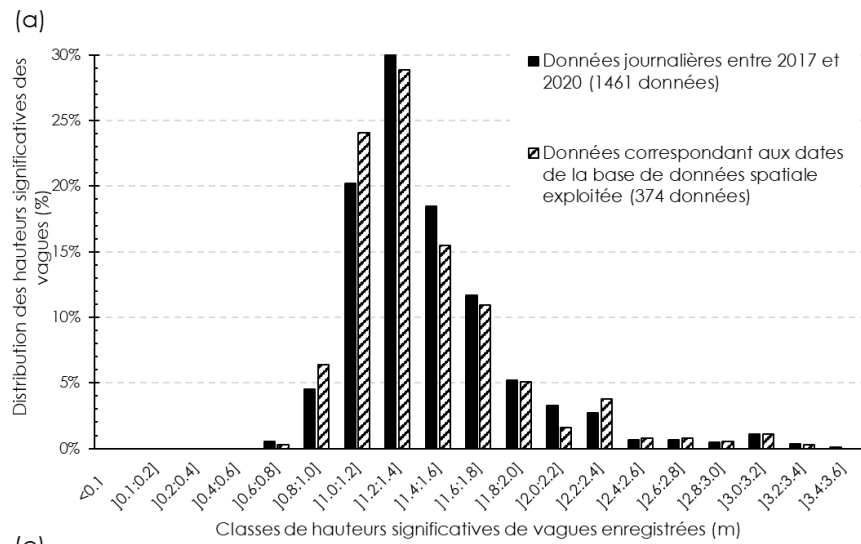
- Les valeurs des forçages météo-marins (vagues et vents) sont extraites de réanalyses de modèles climatiques globaux WAVEWATCH III (NOAA/NCEP) appliquées au modèle régional MARS3D de l'Ifremer (Projet MARC, [Site internet des résultats du modèle ultramarin](#)). Les valeurs journalières des forçages physiques ont été collectées du 01/01/2017 au 31/12/2020, à heure fixe, 15h UTC, correspondant à l'heure d'acquisition des images satellite Sentinel-3. Les grandeurs principales de caractérisation des vagues sont utilisées, soit leur hauteur, leur direction, et leur période. D'autres variables dérivées de ces dimensions, également sorties du modèle Ifremer, ont été intégrées dans notre analyse. Il s'agit des caractéristiques géométriques et cinétiques de l'excursion des particules au fond induite par les vagues, qui permet notamment de quantifier la friction sur le fond, et donc la mise en suspension des sédiments (vitesse, amplitude et direction des déplacements sur le fond). La direction et la vitesse du vent à 10 m sont aussi des variables considérées depuis le même modèle. Les données de marée sont quant à elles extraites à la même heure depuis l'archive du SHOM. Le
- Tableau 1 présente les différentes caractéristiques physiques exploitées pour cette étude.

Tableau 1. Caractéristiques générales des paramètres de forçages pris en compte dans l'analyse

Grandeur physique	Nom raccourci	Dimension	Source	Période	Fréquence
Hauteur significative des vagues	Hsig Vagues	m	NOAA/NCEP – IFREMER	01/01/2017 – 31/12/2020	Journalière, à 15h UTC
Période des vagues	Per. Vagues	s			
Direction de provenance des vagues	Dir. Vagues	°			
Flux d'énergie des vagues	Ener. Vagues	kW/m			
Amplitude de déplacement sur le fond	Amp. Dépl. Fond	m			
Direction de déplacement sur le fond	Dir. Dépl. Fond	°			
Vitesse de déplacement sur le fond	Vit. Dépl. Fond	m/s			
Vitesse du vent	Vit. Vent				
Direction du vent	Dir. Vent	°			
Marnage	Mar.	m	SHOM	01/01/2017 – 29/02/2020	

- Les mesures de vitesse et de direction des courants ont également été extraites au point Est sur la base des résultats du modèle global HYCOM GOF 3.1 (0.08°) Ce modèle global permet de caractériser la circulation générale autour de l'île de Saint-Martin.
- Les variables principales définissant les vagues, le vent et la marée ont servi au test de représentativité des conditions météo-marines de la période de quatre ans. Les valeurs de chaque grandeur physique ont été discrétisées en classes fines, selon les intervalles suivants :
 - 0.2 m de hauteur significative des vagues,
 - 22.5° de direction pour les vagues et les vents correspondant aux 16 sous-directions cardinales,
 - 2 s de période des vagues,
 - 0.2 m de hauteur de marée,
 - 2 m/s de vitesse des vents.
- La distribution des données journalières des conditions de forçage entre 2017 et 2020 est donc représentée en pourcentage pour ces variables primaires (histogrammes pleins dans les graphiques de la Figure 5), ainsi que la même distribution incluant seulement les données associées aux dates des images satellite retenues pour l'étude (histogrammes

hachurés dans les graphiques de la Figure 5). A noter que la base de données des niveaux de marée est incomplète du fait d'arrêts répétés de la station de mesure (977 données sur quatre ans contre 1461 pour l'ensemble des autres variables).



Suite figure page suivante

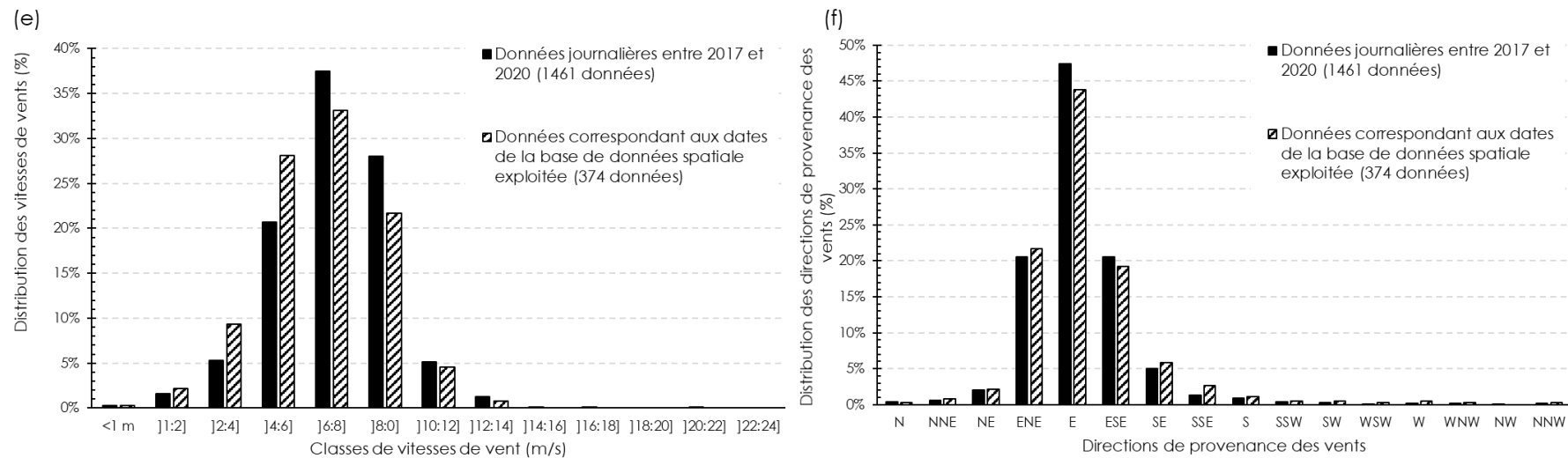


Figure 5. Représentativité des valeurs journalières de forçage observées sur 4 années (2017-2020) dans le jeu de données utilisé pour l'étude, correspondant aux dates et heure d'acquisition des images satellites utilisées (15h UTC). Les graphiques (a), (b), (c) montrent la représentativité des données relatives aux vagues (hauteurs significatives, directions et périodes), le graphique (d) celle de la marée et les graphiques (e) et (f) les grandeurs définissant les vents.

- Notre base de données couvre un peu plus de 25 % des quatre années d'étude.
- Nous notons une disparité dans le nombre d'images retenues par mois sur l'ensemble des années analysées.
- Malgré ce nombre d'images réduit et cette hétérogénéité dans la quantité de dates disponibles par mois, les tests de représentativité démontrent que nous brossons l'ensemble des cas de figure de conditions météo-marines, y compris dans les extrêmes hauts et bas, dans des proportions très proches de celles observées dans le cas où la totalité des jours des quatre années est considérée.

Ainsi, à défaut d'être exhaustive, la base de données Sentinel-3 semble suffisamment représentative de la variabilité des patrons de MES connus pour le secteur de Saint-Martin.

2.2 Caractérisation des climats de turbidité et discrétisation

2.2.1 Estimation des MES et des NTU

Les produits Sentinel-3 en réflectance marine (OL_2_WFR) sont convertis en MES et en turbidité NTU au moyen d'un algorithme générique calibré et validé grâce à une large base de données de mesures *in-situ* (Nechad *et al.*, 2009 ; Dogliotti *et al.*, 2015). La mise en œuvre de ces algorithmes se fait selon une approche multi-conditionnelle (Novoa *et al.*, 2017) dans laquelle un modèle d'estimation de la turbidité est calibré pour la bande spectrale verte et un autre pour la bande spectrale rouge. L'application de l'un ou l'autre des modèles est déterminée par pixel selon des bornes inférieure et supérieure fixées empiriquement sur la réflectance rouge. Une zone de transition est également établie entre les deux bornes en utilisant une pondération entre les deux modèles.

Cette approche multi-conditionnelle est résumée dans les équations suivantes :

$$\begin{aligned} & Si \rho_R < b_{inf} \\ TURB &= \frac{A_G \rho_G}{1 - (\rho_G / C_G)} \end{aligned} \quad Eq. 1$$

$$\begin{aligned} & Si \rho_R > b_{sup} \\ TURB &= \frac{A_R \rho_R}{1 - (\rho_R / C_R)} \end{aligned} \quad Eq. 2$$

$$\begin{aligned} & Si b_{inf} > \rho_R > b_{sup} \\ TURB &= W \frac{A_G \rho_G}{1 - (\rho_G / C_G)} + (1 - W) \frac{A_R \rho_R}{1 - (\rho_R / C_R)} \\ & où W = (b_{sup} - \rho_R) / (b_{sup} - b_{inf}) \end{aligned} \quad Eq. 3$$

où:

ρ_G, ρ_R sont les réflectances de la bande verte et de la bande rouge

b_{inf}, b_{sup} sont les bornes d'application des modèles

A_G, C_G sont les paramètres des modèles Nechad /Dogliotti calibrés pour la bande verte

A_R, C_R sont les paramètres des modèles Nechad/Dogliotti calibrés pour la bande rouge

W est le poids associé à la turbidité mesurée sur la bande verte

Les cartes de turbidité ainsi produites sont masquées des nuages, de la terre et de tout autre défaut lié à la correction atmosphérique grâce aux masques de qualité associés à chaque image Sentinel-3.

Si plusieurs images Sentinel-3 sont disponibles le même jour dans la zone d'intérêt, les résultats issus de chaque image sont moyennés pour obtenir un composite journalier.

La précision associée à cette approche multi-conditionnelle a été estimée par Novoa et al. (2017) à partir de données *in-situ* acquises sur la côte atlantique (estuaires Gironde et Loire) en France métropolitaine. Cette précision (*NRMSE – Normalized Relative root Mean Square Error*) est inférieure à 20 % pour des valeurs de turbidité variant entre 1 et 2000 NTU. **Dans notre cas, où les valeurs de turbidité relevées dans la zone d'intérêt n'excèdent pas 100 NTU, nous considérons que l'erreur de ± 20 % est une estimation acceptable.**

2.2.2 Comparaison visuelle

Une fois les cartographies des MES et de la turbidité produites, chaque date est passée en revue par le même opérateur, une à une sans interruption dans la série temporelle pour éviter toute variation d'interprétation dans le jeu de données.

Sur un premier passage chronologique des images, un tri est réalisé pour distinguer 3 niveaux de turbidité dans le domaine d'étude, soit (i) pas ou peu de turbidité observée, (ii) turbidité modérée remarquée entre les îles, et (iii) forte turbidité étendue dans la zone d'étude. Un second passage antichronologique permet de vérifier l'attribution des 3 niveaux sur chaque image.

Sur une seconde phase d'observation, ce classement des images est affiné, chaque classe devenant 2 niveaux distincts, sur la base de critères morphologiques (forme/organisation des panaches turbides) et gradient d'intensité des masses turbides observées. Ainsi, les images de la première classe identifiées précédemment (pas ou peu de turbidité observée) ont été redistribuées dans 2 niveaux, l'un comprenant les images où la turbidité est significativement négligeable (<1 NTU globalement), notamment lorsque les fonds sont facilement discernables (Niveau 0), l'autre contenant les images où la turbidité observée est faible (environ 1 NTU) et très localisée aux plus petits fonds autour de l'île de Saint-Martin (Niveau 1). Pour la deuxième classe au préalable définie (turbidité modérée), un premier groupe rassemble les images où la turbidité apparaît sous forme de voile (pas d'intensité forte, 1-2 NTU) mais étendue entre les îles de l'archipel de la zone d'intérêt (Niveau 2) et un second groupe accueille les images où la turbidité est plus marquée (autour de 3 NTU à proximité de Saint-Martin). Pour la troisième classe (forte turbidité étendue), deux groupes ne se départagent pas seulement sur la base d'une distinction

d'intensité de la turbidité mais aussi sur l'organisation spatiale des masses turbides. Le lot d'images identifiées est donc différencié entre celles qui comportent une forte turbidité de manière homogène étalée autour de l'ensemble des îles du domaine d'étude (Niveau 4), et celles qui présentent une très forte turbidité et/ou une organisation particulière des panaches turbides, avec des formes tourbillonnaires (Niveau 5). Un nouveau passage antichronologique de la série d'images est réalisé pour vérifier la photo-interprétation.

Pour renforcer notre évaluation visuelle du jeu de données et du classement de la turbidité, les valeurs NTU et des concentrations de MES de surface sont extraites de chaque image au niveau de 3 points de référence autour de l'île de Saint-Martin, afin de confronter le gradient des valeurs obtenues avec le classement établi des niveaux 0 à 5 des climats de turbidité.

2.2.3 Extraction des valeurs NTU, MES et forçages sur 3 points pour vérification des climats identifiés

Les 3 points de référence utilisés pour l'analyse de comparaison entre turbidité satellite et données de forçage sont localisés aux coordonnées figurant dans le Tableau 2 et correspondent au centre de mailles du modèle WW3 :

Tableau 2. Coordonnées géographiques des points de référence.

Point	Longitude	Latitude
Centre	-63,1°	18,1°
Ouest	-63,25°	18,05°
Est	-62.9°	18,15°

Les valeurs de NTU/MES sont extraites de chaque image Sentinel-3 disponible dans la base de données pour ces trois coordonnées en convertissant au préalable les coordonnées en degrés décimaux dans le système de coordonnées des images (UTM Zone 20 Nord).

Les fichiers de données du modèle WAVEWATCH III (MARC_WW3 ANTILLES-3MIN) ont été téléchargés depuis le serveur FTP de l'IFREMER accessible depuis ce lien : marc.ifremer.fr/resultats/vagues. Les données de marée ont été récupérées depuis le site du SHOM pour le marégraphe de Saint-Martin (data.shom.fr/donnees/refmar/159/download).

Dans le cas des données WW3, seuls les fichiers correspondant à la donnée horaire de 15h UTC ont été récupérés pour l'ensemble de la base de données. Cette heure coïncide avec l'heure d'acquisition des images Sentinel-3. Les paramètres de modèle WW3 dont les valeurs ont été extraites sont : vitesse et direction du vent à 10 m (noté 'wnd' sur le fichier de sortie), hauteur significative des vagues ('hs'), direction moyenne des vagues ('dir'), période moyenne ('t01'), flux d'énergie des vagues ('cge'), amplitude de déplacement induit par les vagues sur le fond ('abr'), la vitesse, et la direction associées ('ubr').

Les données de marée sont également extraites à 15h UTC en moyennant les valeurs disponibles chaque minute entre 14:55 et 15:05, des données ponctuelles pouvant manquer notamment à 15:00.

Les données HYCOM ont été utilisées pour extraire la circulation générale aux points d'intérêt, afin d'identifier l'influence des courants dans le détroit et autour de l'île, et ainsi expliquer l'extension des panaches.

2.3 Fiabilité des résultats

L'Office de l'eau de Guadeloupe (ODE971) a mis à disposition au groupement GAIA/Impact Mer/DHI/Bird&Bird des données de suivi DCE (Directive Cadre sur l'Eau) des eaux côtières acquises à la station Chicot, située à la pointe nord-ouest de l'île Tintamarre (Figure 1), aux coordonnées 18°06,5120 N, 62°58.98 O. Les mesures sont réalisées environ tous les deux mois, avec notamment les paramètres de turbidité, salinité et chlorophylle. Cette station constitue notre seule source potentielle de données *in-situ* pour une calibration de nos mesures dérivées des images satellite. Sur la période d'étude (2017 – 2020), 7 mesures de turbidité ont été enregistrées par la station en 2017 et 2018. Malheureusement, aucune date de mesure ne correspond avec la date des images exploitables et exploitées dans cette étude (Tableau 3, Annexe 1 - Caractéristiques des données satellitaires).

A ce stade, aucune validation quantitative n'a pu être réalisée à partir de données de terrain mais les ordres de grandeur sont cohérents, au regard des récentes études menées sur des secteurs sableux et vaseux, notamment à la Rochelle et autour de l'île de Ré (Lafon et Regniers, 2018, 2019). L'erreur estimée de $\pm 20\%$ présentée en section 2.2.1 sera notre référence pour cette étude.

Tableau 3. Détail des mesures *in-situ* disponibles pour la période (source : ODE971).

Station de surveillance	Date	Valeur de la mesure	Format UT de l'heure	Paramètre	Méthode	Unité de mesure	Service analyste
Chicot	02/28/2018	0.76	-4	Turbidité FNU	Capteur turbidimètre norme ISO 7027 in-situ - FNU	Formazine Nephelometric Unit (FNU)	CREOCEAN Agence Antilles-Guyane (Programme REPHY)
	03/25/2018	0.34					
	12/04/2017	0.33					
	05/30/2018	0.47					
	03/28/2017	0.37					
	05/17/2017	0.35					
	07/06/2017	0.40					
01/25/2017	0.54						

3 RESULTATS

3.1 Six états de turbidité observés dans le jeu de données spatiales

La revue de chaque image satellite a permis de distinguer six états de turbidité, présentés en Figure 6 à travers des exemples d'images représentatives. Les niveaux varient en fonction de la forme du panache turbide, son extension et son intensité.

Les niveaux 0 et 1 correspondent à des états de turbidité très faibles, les niveaux 2 et 3 des états modérés et localisés, et les niveaux 4 et 5 des états de turbidité forte et généralisée.

Le niveau 0 correspond à une absence quasi-totale à totale de turbidité, permettant notamment de percevoir les hauts-fonds à l'œil nu.

Sur les images assignées au niveau 1 de turbidité, les valeurs sont faibles (< 1 NTU) et se limitent au pourtour proche-côtier de Saint-Martin.

Concernant le niveau 2, un voile de turbidité de 1 NTU est observé entre les îles proches de l'archipel, de l'île de Saint-Barthélemy, au sud-est de celle de Saint-Martin, à l'île Chien au nord-ouest.

Le niveau 3 identifié regroupe les dates de la période durant lesquelles la turbidité atteint 3 NTU autour de Saint-Martin et Anguilla.

Le niveau 4 est relativement proche sur niveau 3 mais la turbidité s'étend plus largement, jusqu'à l'île de Saint-Barthélemy.

Le niveau 5 combine quant à lui forte turbidité (jusqu'à 10 NTU), extension spatiale (jusqu'à environ 30 km au large des îles) et une forme giratoire des panaches.

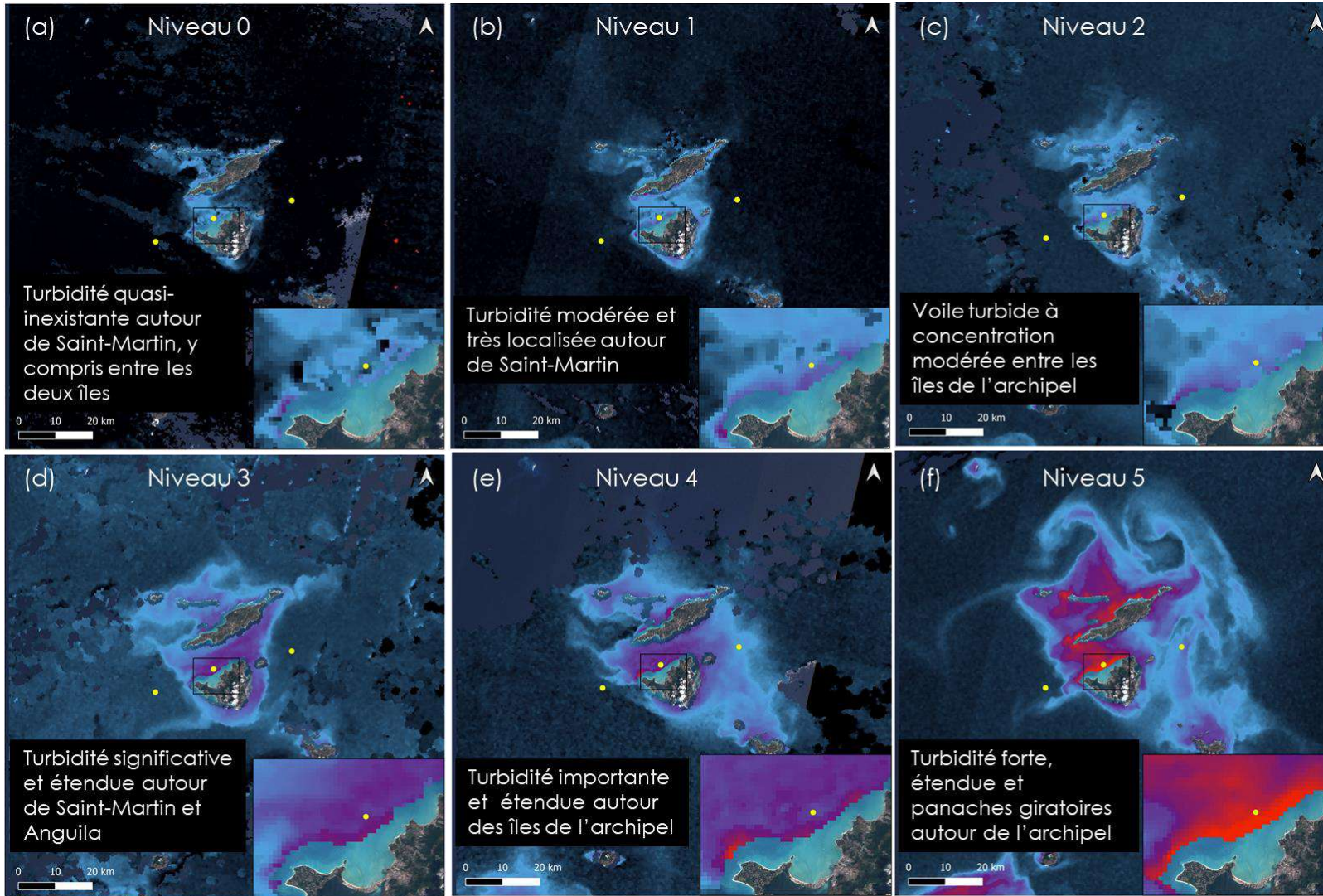
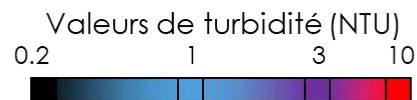


Figure 6. Exemples représentatifs des six cas de figures emblématiques de la distribution de surface des NTU dans le secteur de Saint-Martin (images de la base de données S3). Les trois points jaunes localisent les 3 points de mesure déjà localisés en Figure 3, d'où nous avons extraits les valeurs NTU et MES dérivées des images satellites.



L'ensemble des dates retenues a été trié et classé dans cette hiérarchie à 6 classes, mensuellement, d'abord pour identifier une éventuelle saisonnalité (Figure 7). Les mois de mai à juillet sont globalement moins représentés dans le jeu de données que les mois restants du fait d'une nébulosité, très présente sur cette période, masquant la totalité de l'île de Saint-Martin et ses environs. Ce sont aussi les mois où les plus faibles niveaux de turbidité dominent le jeu de données (niveaux 0 et 1), tandis que le nombre d'images des niveaux 0 et 1 est relativement faible pour les mois de décembre à février, toutes années confondues. Les niveaux les plus élevés, 3 et 5, ont été identifiés sur des images des mois de septembre à avril, en plus grande proportion entre décembre et mars. Nous en déduisons une saisonnalité relativement marquée, sur la base de 4 années de données spatiales, qui reflète très probablement une variabilité saisonnière des conditions naturelles météo-marines environnantes.

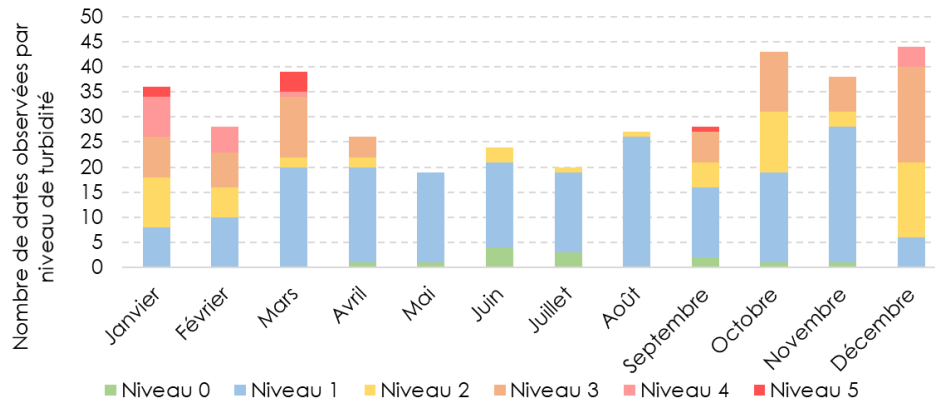


Figure 7. Distribution des dates observées par mois et par niveau de turbidité

Les valeurs NTU extraites des trois points localisés sur la Figure 3 permettent de vérifier si cette saisonnalité est effective et homogène autour de l'île de Saint-Martin (Figure 8). Les valeurs moyennes de MES étant presque exactement les mêmes que les valeurs NTU (limite du modèle global) (Figure 10), **nous avons choisi de focaliser la présentation de ces résultats sur l'analyse des valeurs NTU. Notre discours portera donc sur les variations de turbidité, mais ces variations sont identiques en utilisant les valeurs des MES calculées sur la base des images Sentinel-3.** Le point Ouest ne montre aucune saisonnalité dans la variabilité observée des NTU moyennes mensuelles, valeurs elles-mêmes très faibles (<0.5 NTU). C'est clairement au point central, entre les îles de Saint-Martin et Anguilla, que les moyennes de turbidité calculées sont les plus élevées (> 1.5 NTU quel que soit le mois analysé, jusqu'à 3.3 NTU en mars en moyenne). Aux points Est et Centre, nous retrouvons la saisonnalité observée en Figure 7, avec un pic de turbidité en mars pour le point Centre. Les mois les plus turbides au niveau de ces deux points de référence sont compris entre décembre et mars.

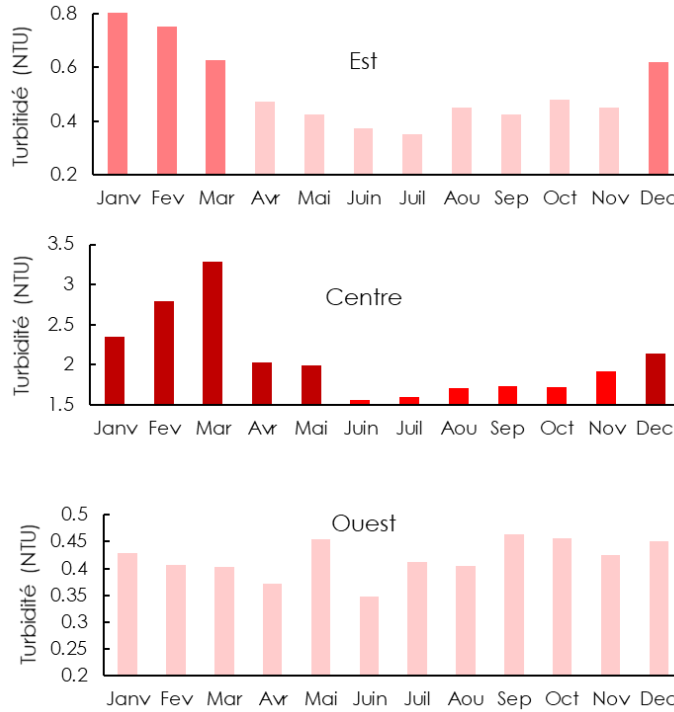


Figure 8. Turbidité moyenne mensuelle dérivée des images satellites Sentinel-3 aux points de référence Est, Centre et Ouest.

Les valeurs maximales de turbidité, par mois, semblent suivre la tendance observée sur les valeurs moyennes de ces dernières (Figure 9).

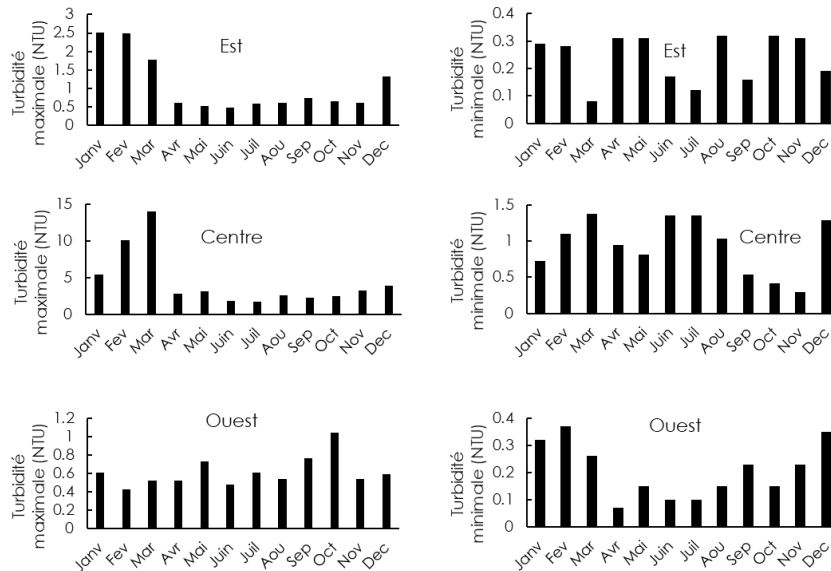


Figure 9. Valeurs maximales et minimales de turbidité enregistrée aux points de référence Est, Centre et Ouest pour chaque mois.

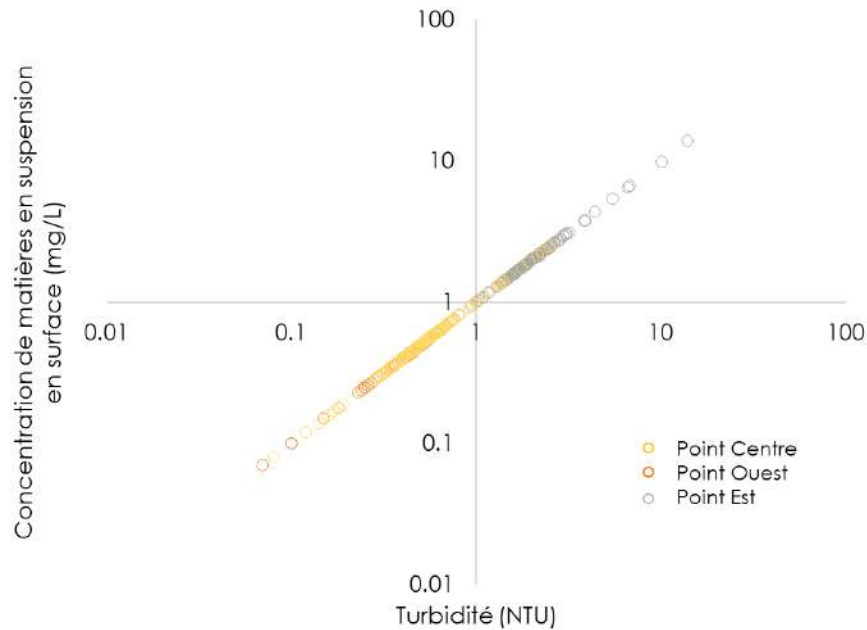


Figure 10. Correspondance 1:1 des valeurs NTU (abscisse) avec les valeurs de MES (ordonnée) pour les trois points de référence.

3.2 Une variabilité saisonnière aussi observée sur des forçages météo-marins

Les conditions d'état de mer et météorologiques ont été analysées pour comprendre leur rôle dans les variations naturelles de la turbidité autour de l'île de Saint-Martin, et, à terme, identifier les périodes les plus sujettes à une remise en suspension des sédiments, donc à la hausse des concentrations, et à la dynamique des panaches et gyres turbides.

La saisonnalité observée dans la variation moyenne mensuelle des niveaux de turbidité (Figure 7) et dans les moyennes mensuelles mesurées pour les points Est et Centre (Figure 8) se confirme pour la plupart des variations mensuelles des principaux forçages de l'étude. L'exemple de la Figure 11 concerne le point Est. L'équivalent des comportements des forçages a été réalisé pour le point Centre et figure en annexe (Annexe 2 – Variations mensuelles des paramètres de forçages physiques au point Centre).

Globalement, les conditions de vagues sont plus énergétiques de décembre à mars et minimales entre mai et septembre (Figure 11 b, c, d, e). La variation de la direction des vagues suit la même logique de variabilité saisonnière même si le spectre directionnel global est de moins de 20° de fluctuation (Figure 11 c). Les métriques du déplacement des particules sur le fond, induites par les vagues, suivent relativement fidèlement la saisonnalité des composantes principales définissant les conditions des vagues présentées précédemment (Figure 11 h, i, j).

Après cette première analyse des forçages (Figure 11 m), nous avons soustrait la marée du lot de variables dans la suite de l'étude pour plusieurs raisons :

- Un nombre relativement réduit de dates renseignées (60% contre 100% pour les autres variables),
- Un marnage microtidal (0.56 m d'amplitude maximale de marée sur 4 ans),
- Une valeur unique de hauteur extraite à l'heure exacte de la prise de vue du satellite pour chaque date analysée, ne fournissant pas d'indication sur l'état du courant de marée (montant / descendant / entre deux phases),
- Aucune relation entre la variabilité saisonnière (Figure 11 m) et les valeurs de concentration de particules en suspension de surface n'a été observée (Figure 11 a).

De la même manière, la variabilité saisonnière de la vitesse et de la direction des vents (Figure 11 f, g) et du courant général (sorties du modèle HYCOM) (Figure 11 k, l) semble se démarquer, et ne montre pas de contraste entre les mois de décembre-janvier et ceux autour de juillet, comme observé pour l'ensemble des autres variables de forçage, et ne présente pas de cohérence avec la variation mensuelle des concentrations de MES en surface (Figure 11 a). Nous pensons néanmoins que le courant joue un rôle significatif dans la propagation des panaches turbides et dans la variation de leur intensité à proximité de la baie de Galisbay. Une étude approfondie, sur la base de points de localisation supplémentaire (plus proches de la baie) ainsi que sur la base d'un modèle plus local développé par DHI, a été menée et sera développée en sections 3.3.4 et 3.3.5.

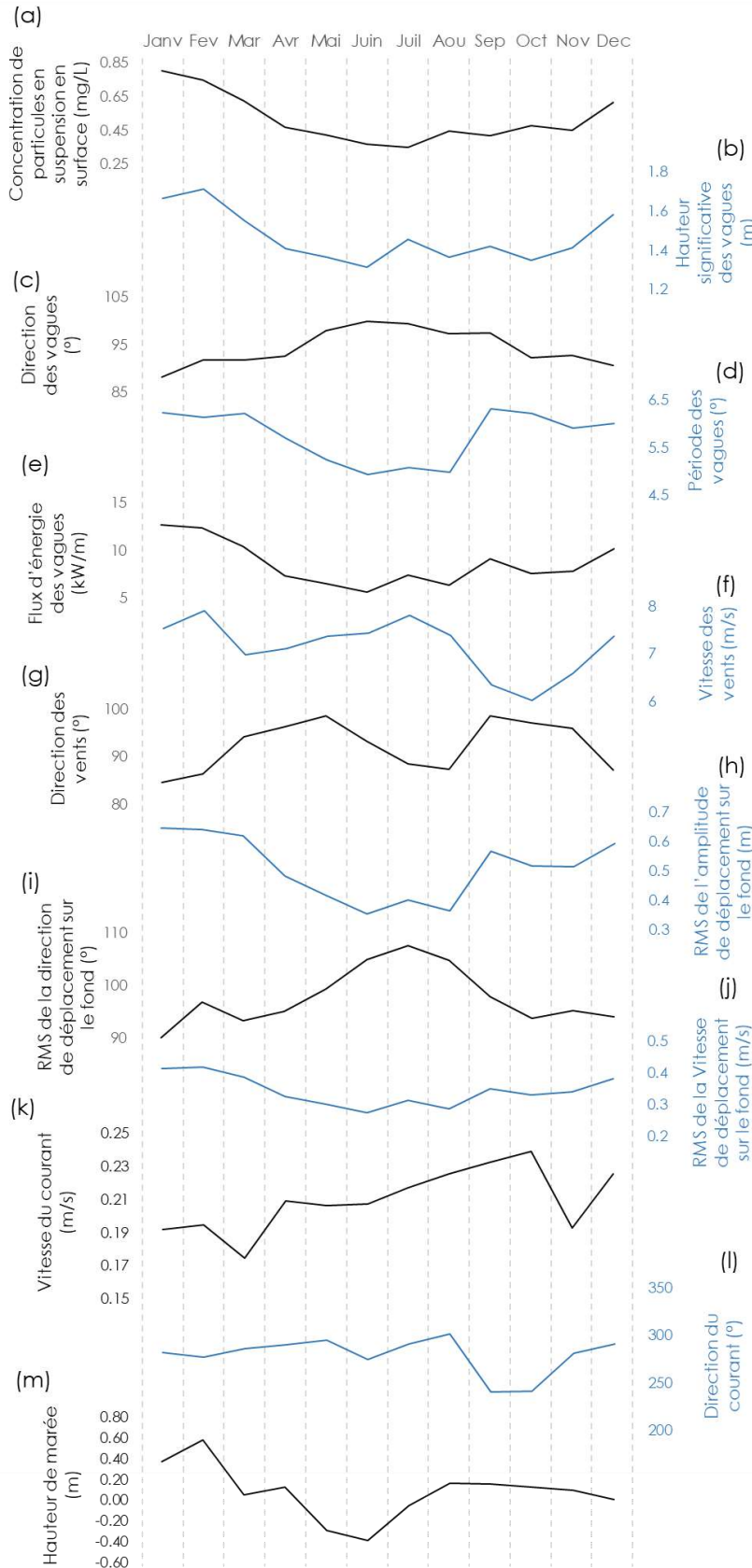


Figure 11. Variation moyenne mensuelle sur la période d'étude (2017-2020), au point Est des (a) concentrations de particules en suspension en surface, (b) de la hauteur significative, (c) de la direction, (d) de la période et (e) du flux d'énergie des vagues, (f) de la vitesse et (g) de la direction des vents, de (h) l'amplitude, (i) la direction et (j) la vitesse de déplacement des particules sur le fond induit par les vagues, de (k) la vitesse et (l) la direction du courant, et (m) de la hauteur de marée.

3.3 Relations entre turbidité et état de mer pour expliquer les climats observés

3.3.1 Corrélations sur la base du jeu de données spatiales sur 4 années

Le test de corrélation réalisé au point 2 (Figure 12) confirme l'indépendance totale des conditions de turbidité par rapport aux conditions de vent, de vagues, et de courant pour la façade occidentale de Saint-Martin (coefficient de corrélation < 0.1 pour toute variable avec NTU). Concernant les points Centre et Est, les résultats sont comparables pour ces deux localisations (d'un point à l'autre) et des relations significatives se dégagent entre les valeurs de turbidité et celles des vagues, en particulier avec les variables de hauteur significative, de flux d'énergie, et d'amplitude et déplacement des particules sur le fond. Ces corrélations sont sensiblement plus élevées pour le point Est que pour le point Centre.

Point 1 (Centre)

	NTU									
Hsig Vagues	0.46	Hsig Vagues								
Dir. Vagues	-0.02	-0.13	Dir. Vagues							
Per. Vagues	0.10	0.01	0.71	Per. Vagues						
Ener. Vagues	0.55	0.81	0.25	0.39	Ener. Vagues					
Vit. Vent	0.24	0.67	-0.59	-0.57	0.22	Vit. Vent				
Dir. Vent	-0.15	-0.28	0.43	0.26	-0.14	-0.39	Dir. Vent			
Amp. Déplac. Fond	0.45	0.55	0.48	0.62	0.87	-0.10	0.01	Amp. Déplac. Fond		
Dir. Dépl. Fond	-0.13	-0.19	-0.31	-0.36	-0.37	0.21	-0.04	-0.57	Dir. Dépl. Fond	
Vit. Dépl. Fond	0.43	0.66	0.45	0.58	0.92	-0.02	-0.01	0.97	-0.57	

Point 2 (Ouest)

	NTU						
Hsig Vagues	0.07	Hsig Vagues					
Dir. Vagues	-0.06	0.24	Dir. Vagues				
Per. Vagues	0.00	0.39	0.37	Per. Vagues			
Ener. Vagues	0.05	0.87	0.33	0.61	Ener. Vagues		
Vit. Vent	0.07	0.49	-0.19	-0.54	0.14	Vit. Vent	
Dir. Vent	-0.02	-0.22	0.08	0.18	-0.14	-0.38	

Point 3 (Est)

	NTU											
Hsig Vagues	0.61	Hsig Vagues										
Dir. Vagues	-0.17	0.04	Dir. Vagues									
Per. Vagues	0.33	0.16	-0.24	Per. Vagues								
Ener. Vagues	0.71	0.94	-0.06	0.38	Ener. Vagues							
Vit. Vent	0.25	0.70	0.21	-0.49	0.48	Vit. Vent						
Dir. Vent	-0.01	-0.27	0.18	0.36	-0.18	-0.38	Dir. Vent					
Amp. Déplac. Fond	0.65	0.76	-0.18	0.70	0.88	0.18	0.05	Amp. Déplac. Fond				
Dir. Dépl. Fond	-0.17	0.08	0.89	-0.40	-0.07	0.34	-0.05	-0.27	Dir. Dépl. Fond			
Vit. Dépl. Fond	0.67	0.92	-0.07	0.50	0.97	0.41	-0.10	0.94	-0.11	Vit. Dépl. Fond		
Dir. Courant	0.02	0.20	0.01	-0.27	0.11	0.36	-0.18	0.00	0.10	0.08	Dir. Courant	
Vit. Courant	-0.08	0.20	0.07	-0.24	0.07	0.34	-0.07	-0.06	0.09	0.06	0.24	

Figure 12. Tables de corrélation entre la turbidité relevée aux points 1 (Centre), 2 (Ouest) et 3 (Est), et les valeurs des variables des forçages retenus pour l'étude (Tableau 1).

3.3.2 Relations entre les niveaux de turbidité et les forçages météo-marins

Individuellement, l'analyse des relations entre les climats de turbidité et les forçages apportent de nouvelles informations sur la sensibilité de la dynamique des particules en suspension à certaines variables météo-marines.

Nous prenons l'exemple des résultats sur le point Centre, au large de Galisbay, pour notre démonstration (Figure 13, Figure 14). Les observations sur le point Est sont reportées en Annexe (Annexe 3 – Comparaison entre les climats de turbidité et les forçages au point Est).

Sur la Figure 13, la moyenne de chaque variable de forçage physique (en ordonnée) est calculée sur la base des dates des images de même niveau de turbidité (du niveau 0 au niveau 5, définis dans l'étude (Figure 6)). Une graduation claire positive est observée entre les niveaux de turbidité et la valeur moyenne des hauteurs significatives et, des flux d'énergie des vagues, mais aussi celles de l'amplitude et de vitesse de déplacement sur le fond, comme observé précédemment en Figure 12. Le niveau 5 de turbidité se démarque des autres avec une augmentation plus forte des valeurs de ces variables que celle observée entre les autres niveaux. La progression exponentielle relevée ici s'exprime également dans la relation entre le niveau de turbidité et la vitesse moyenne du vent (Figure 13 a), dans une moindre mesure avec la période des vagues mais plus significativement avec la direction des vagues (Figure 13 e) où une direction de secteur Ouest domine tandis que les secteurs Est/Nord-Est dominent pour les situations correspondant aux autres niveaux de turbidité.

Dans la Figure 14, les relations sont basées sur la moyenne des NTU mesurées au point Centre via les images Sentinel-3, par niveau de turbidité (du niveau 0 au niveau 5, définis dans l'étude (Figure 6)). Sans surprise, des relations linéaires proportionnelles sont à nouveau vérifiées entre les valeurs moyennes de turbidité par niveau, et la plupart des variables caractérisant les vagues.

A ce stade, nous pouvons conclure que la turbidité naturelle au large de Galisbay est largement influencée par les conditions de vagues.

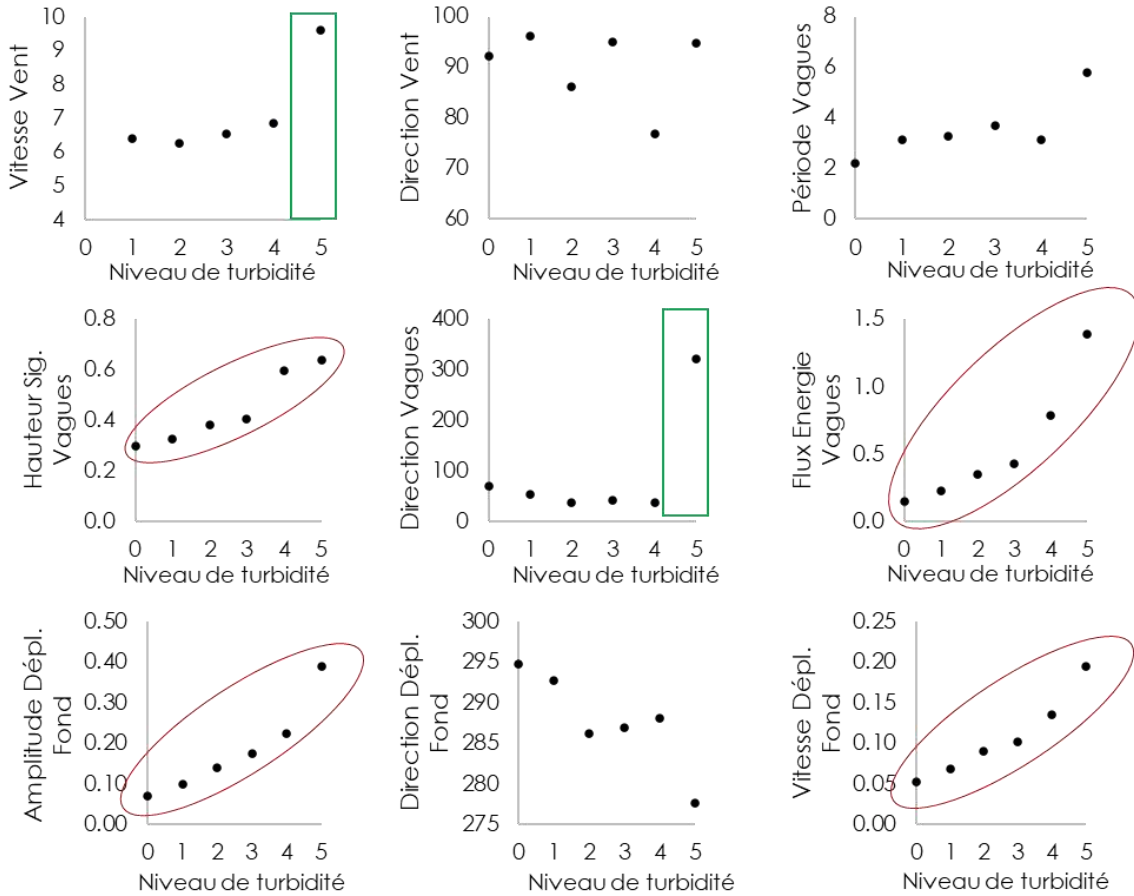


Figure 13. Point Centre - Relations linéaires entre le niveau de turbidité en abscisse (du niveau 0 au niveau 5 (cf. Figure 6)) et (a) la vitesse du vent en [m], (b) la direction du vent en [°], (c) la période des vagues en [s], (d) la hauteur significative des vagues en [m], (e) la direction de provenance des vagues en [°], (f) le flux d'énergie des vagues en [kW/m], et (g) l'amplitude en [m], (h) la direction en [°] et (i) la vitesse en [m/s] de déplacement induit par les vagues sur le fond.

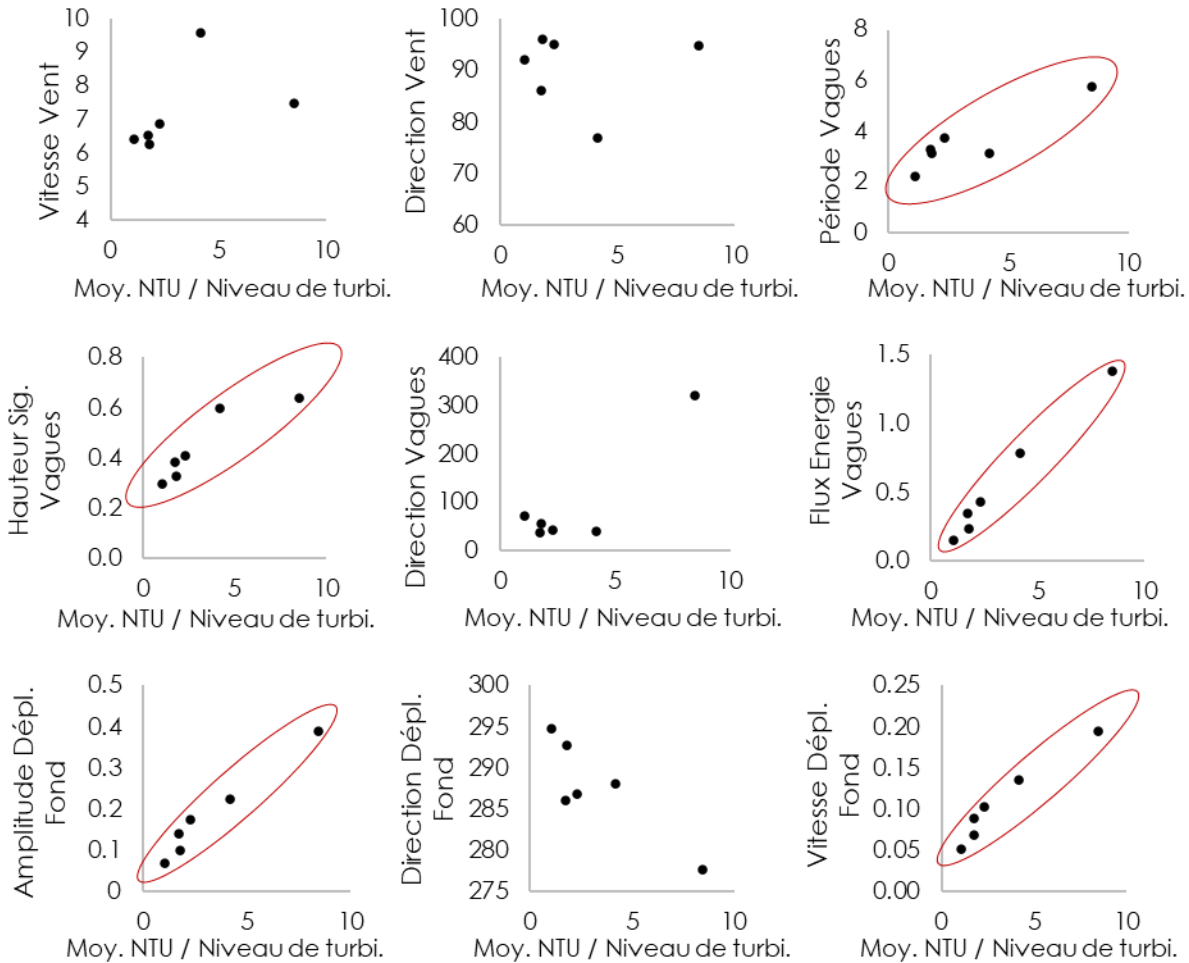


Figure 14. Point Centre - Relations linéaires entre la valeur moyenne de turbidité pour chaque niveau de turbidité (du niveau 0 au niveau 5 (cf. Figure 6)) en abscisse et (a) la vitesse du vent en [m], (b) la direction du vent en [°], (c) la période des vagues en [s], (d) la hauteur significative des vagues en [m], (e) la direction de provenance des vagues en [°], (f) le flux d'énergie des vagues en [kW/m], et (g) l'amplitude en [m], (h) la direction en [°] et (i) la vitesse en [m/s] de déplacement induit par les vagues sur le fond.

3.3.3 Les vagues, principaux agents de contrôle de la turbidité naturelle de la zone

Sur la base d'une comparaison des 6 niveaux de turbidité observés dans la région de l'Île de Saint-Martin, la distribution des hauteurs significatives des vagues montre une progression claire vers une hausse de la part des plus hautes vagues d'un niveau de turbidité au suivant, quel que soit

le point de localisation analysé, à l'exception du niveau 5, pour le point Est, où la part des hauteurs de vague les plus extrêmes (>2.11 m) est plus faible que pour le niveau 4.

Une relation vérifiée et robuste existe entre la hauteur significative des vagues au large de Galisbay (Figure 15), mais aussi à l'Est de Saint-Martin, et le niveau de turbidité identifié autour de l'île.

Même si la turbidité relevée aux trois points de référence est significativement plus élevée au niveau 5 qu'aux autres niveaux de discrétisation, ce niveau, défini en Figure 6, présente davantage un contraste d'organisation des panaches turbides avec le niveau 4 qu'un contraste d'intensité de la matière en suspension qui était le critère dominant de différenciation entre les autres niveaux de turbidité. Ce niveau est particulier car au point Centre, la part des hauteurs de vagues de plus de 0.91 m augmente (0% au niveau 4 contre 14% au niveau 5), et la part des vagues extrêmes (>2.11 m) quintuple au point Ouest (29% contre 5.6%), ce qui n'est pas le cas au point Est. **Nous en déduisons que les conditions énergétiques des vagues de la partie orientale de la région de Saint-Martin ne sont plus les moteurs dominants de la turbidité de la zone au niveau 5. Sur ce même niveau 5, au point Ouest, les plus hautes vagues prennent significativement une part dominante dans le jeu de données de vagues.**

Pourtant, les résultats des analyses statistiques sur les intensités de turbidité (NTU) ayant montré une moyenne plus importante au niveau 5, et nos analyses de corrélation ayant montré une forte dépendance des conditions de vague avec la turbidité, un autre paramètre caractéristique des vagues prend certainement le relais et explique ces différences notées.

En détaillant les conditions des directions de provenance des vagues, par niveau de turbidité, un éventail directionnel d'Est est prédominant. Cependant, nous remarquons une particularité propre au niveau 5 de turbidité, où au point Centre (le plus proche de Galisbay), la direction des vagues est totalement opposée, c'est-à-dire provenant d'Ouest. Au point Ouest également, la direction dominante est différente, soit de dominance Nord.

A partir de ces informations croisées de hauteurs et de directions des vagues suivant les différents scénarios évalués, nous en concluons que pour les niveaux de turbidité de 0 à 4, les conditions des vagues propagées depuis l'Est de l'île sont le moteur de la turbidité, tandis que pour le niveau 5, l'état de mer de l'Ouest de l'île est celui qui conditionne la turbidité de la zone. Dans ce cas précis, nous proposons l'hypothèse suivante : les vagues énergétiques propagées depuis le Nord réfractent au niveau du cap formé par la pointe ouest de l'île d'Anguilla, pour devenir des vagues strictement d'ouest dans le secteur entre Saint-Martin et Anguilla, où se situe le point Centre. Le point Est conserve quant à lui une dominance directionnelle des vagues de haute intensité d'Est-Nord-Est. Le type 5 est donc associé à de fortes conditions d'agitation, provenant du secteur Nord à Est/Nord-Est, induisant de forts niveaux de turbidité autour des îles et des panaches turbides transportés par les courants et pouvant s'étendre loin en mer (cf. exemple Figure 6).

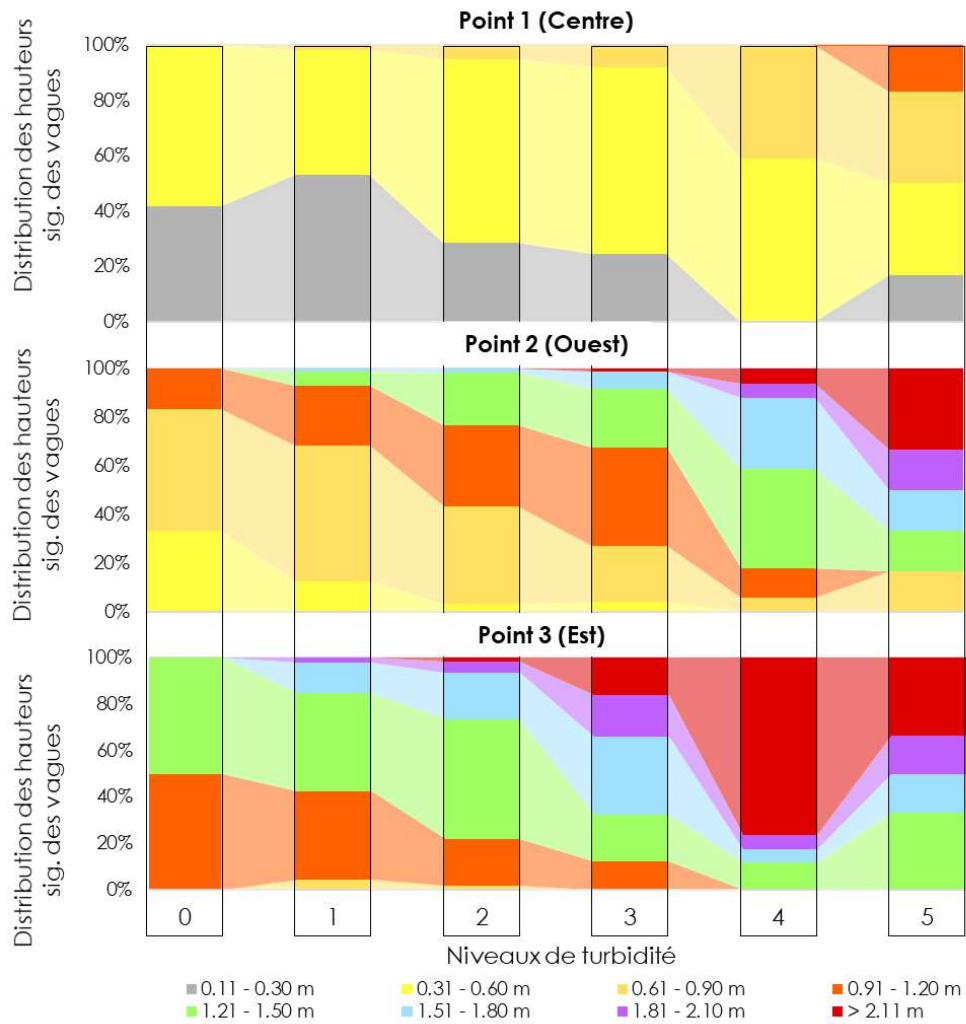


Figure 15. Distribution des hauteurs significatives discrétisées des vagues mesurées sur les 3 points de référence sur les 4 années d'étude, pour chaque niveau de turbidité observé.

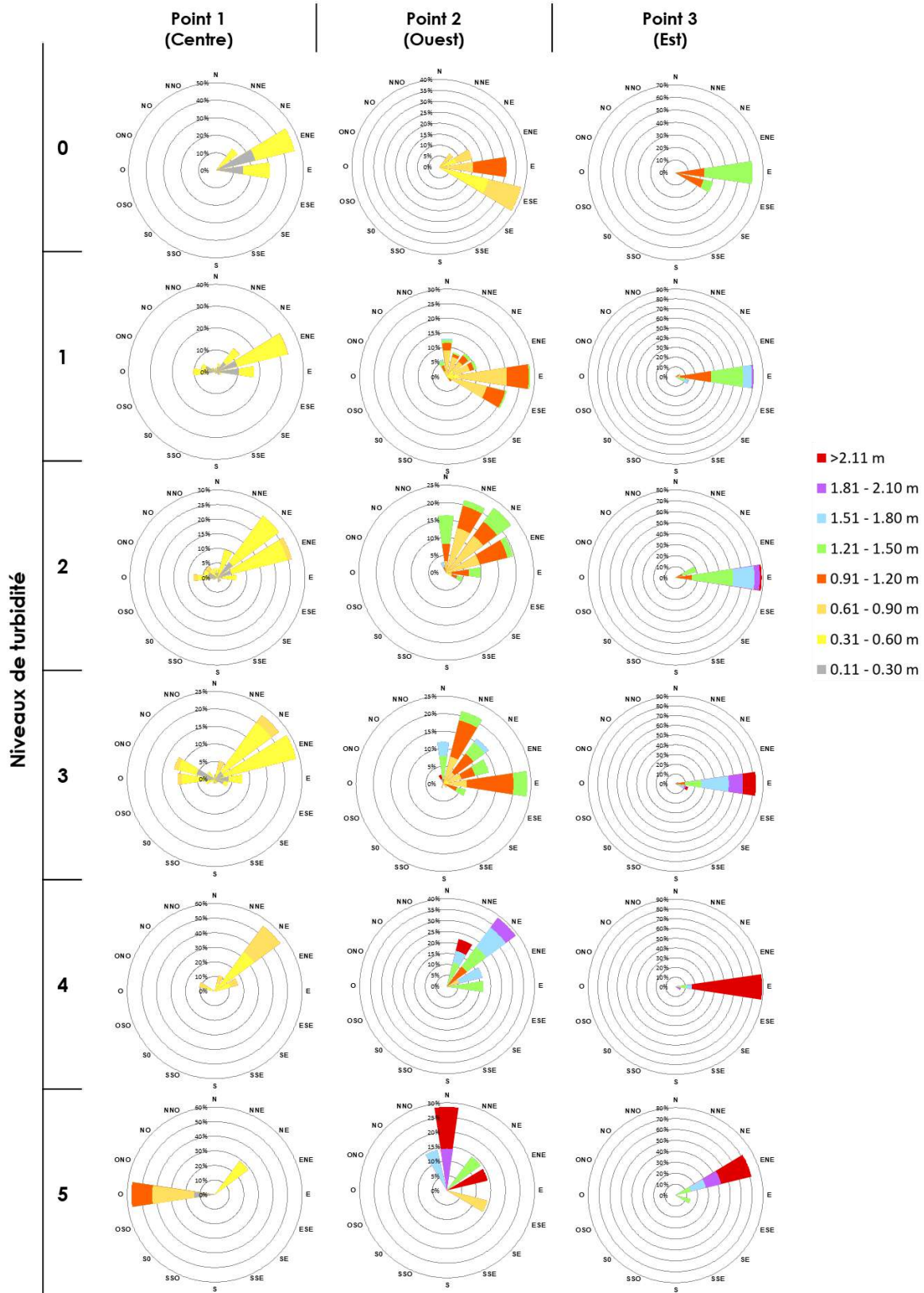


Figure 16. (Page précédente) Roses des vagues présentant les directions de provenance des vagues par niveau de turbidité (de 0 à 5), sur chaque point de référence (Centre, Ouest, Est).

Les résultats de la modélisation de la circulation des courants dans le secteur de l'île de Saint Martin appuie notre théorie d'un effet significatif de la variation de la vitesse et la direction des courants sur la progression spatiale des panaches hautement turbides dans le cas de figure du climat 5 de turbidité (Figure 17 et Figure 18). Cette modélisation a été réalisée par l'équipe partenaire de DHI à partir du modèle Mike 3D HD, qui est un modèle régional autour de Saint-Martin, forcé par le modèle global HYCOM GOFS 3.1.

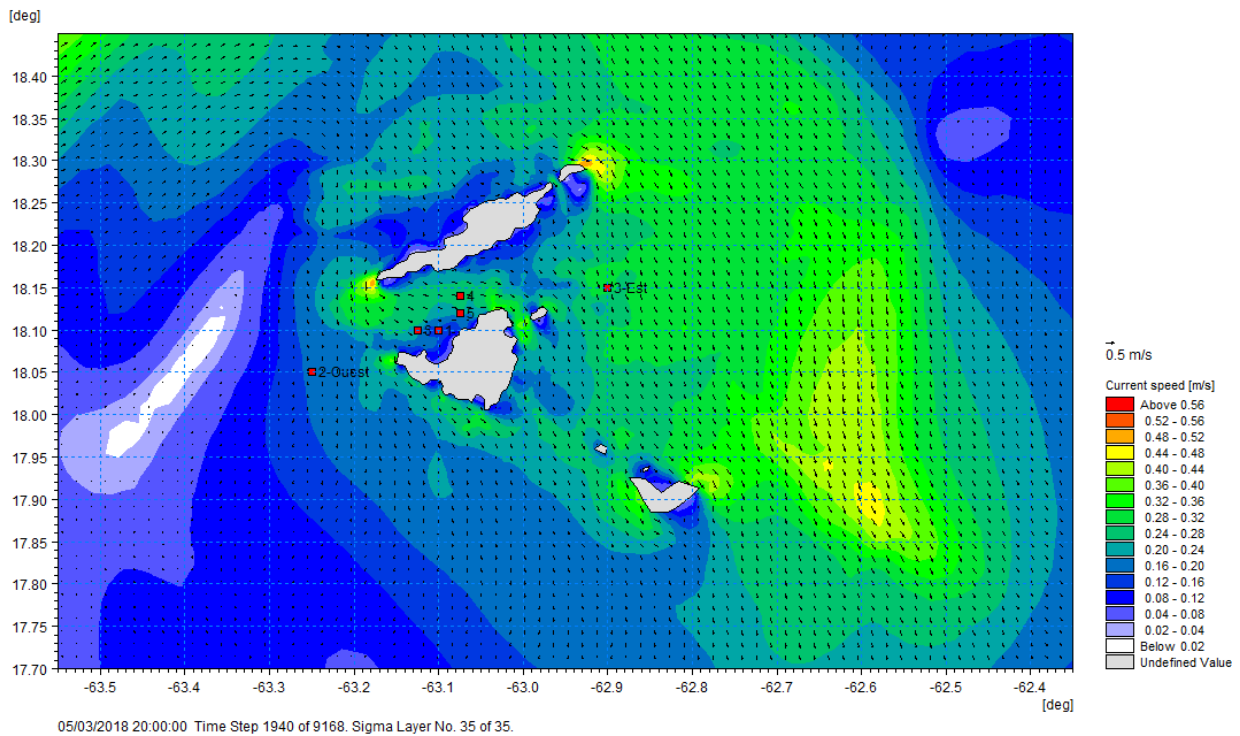


Figure 17. Circulation des courants le 05 mars 2018 estimée à partir du modèle Mike 3D par l'équipe DHI.

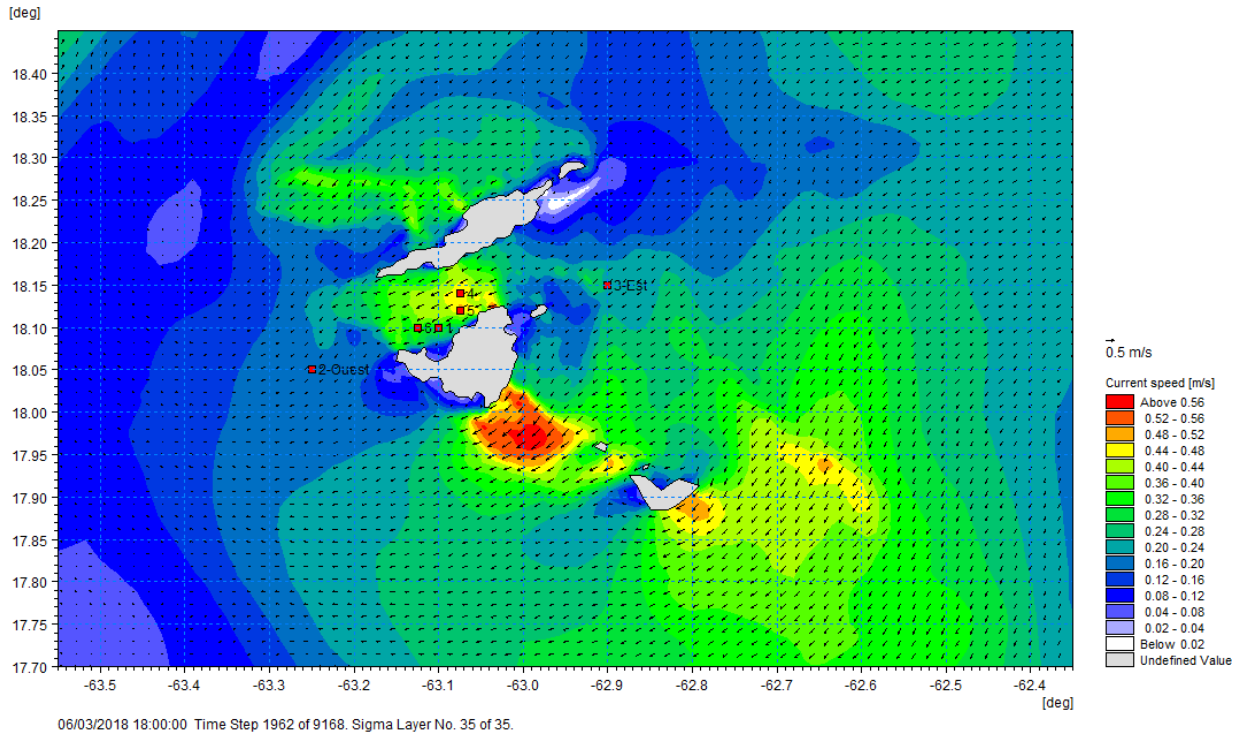


Figure 18. Circulation des courants le 06 mars 2018 (climat 5) estimée à partir du modèle Mike 3D par l'équipe DHI.

3.3.4 Conditions de turbidité en fonction de l'état de mer (hauteur des vagues et vitesse du courant)

Afin d'estimer le niveau de turbidité autour de l'île de Saint Martin et à proximité de la baie de Galisbay à partir des conditions de forçages météo-marins, nous avons d'abord estimé les valeurs moyennes, maximales et minimales de la turbidité en fonction de classes d'intervalle régulier sur chaque point de localisation sélectionné dans l'étude, en incluant 3 points supplémentaires localisés en Figure 4, pour un affinage sur le secteur de Galisbay (Figure 19). Les hauteurs significatives des vagues sont extraites de la même manière pour les 6 points de localisation, soit au niveau de chaque point de localisation depuis la base de données issues des réanalyses de modèle Ifremer sur la base du modèle global Wave Watch III. Nous pouvons observer qu'au niveau des 3 points proches de la baie de Galisbay (Déroit, Galisbay-Est et Galisbay-Ouest), la variation de la turbidité est très sensible à la variation de la hauteur significative des vagues. Cette observation est notable pour les valeurs moyennes mais aussi maximales de turbidité.

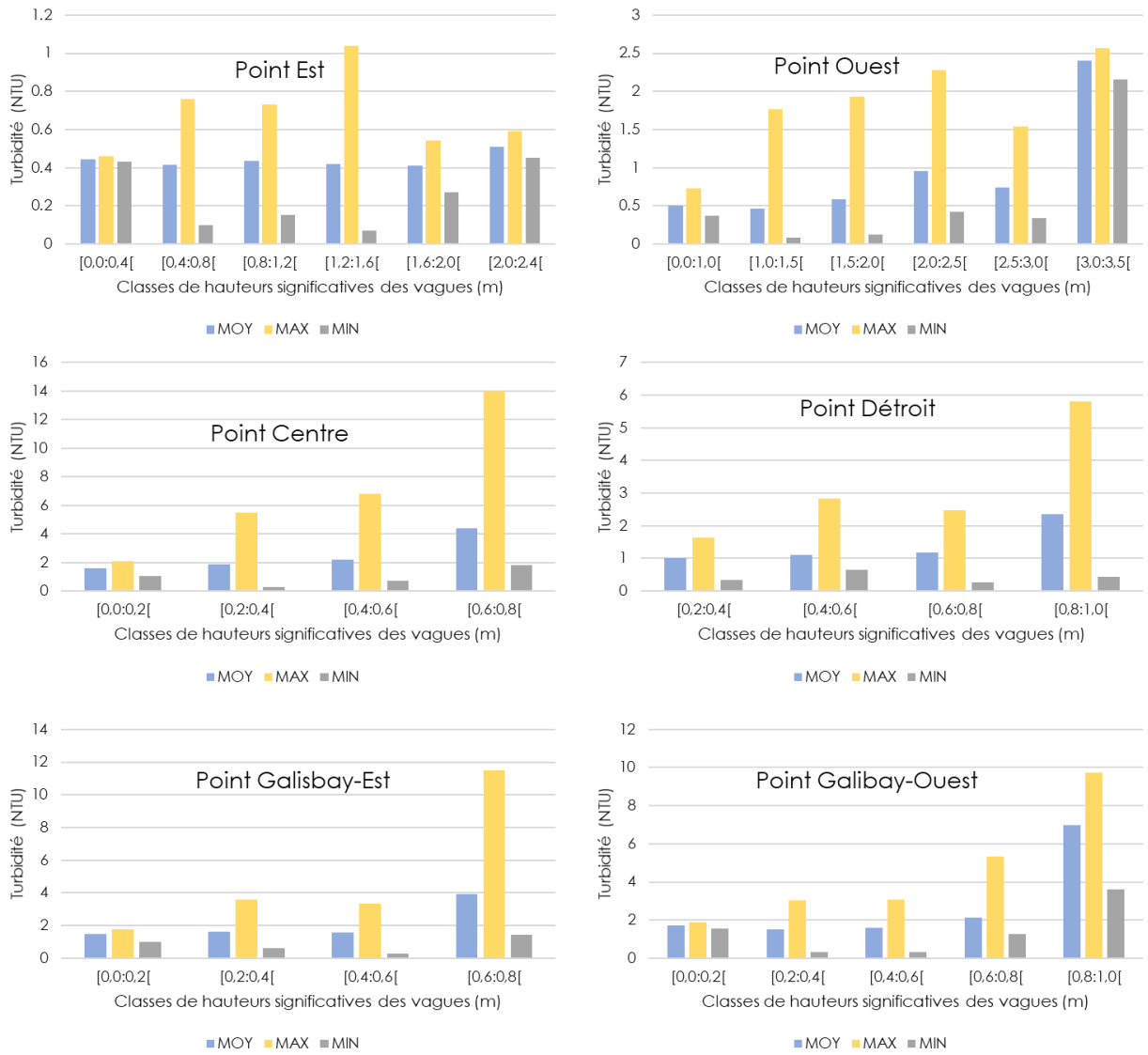


Figure 19. Valeur moyenne, maximale et minimale de turbidité par classe de hauteur significative des vagues et par point de localisation.

Un travail similaire a été réalisé en se basant cette fois sur la variation de la vitesse des courants estimée par le modèle Mike 3D HD de DHI (Figure 20). Les résultats ne nous permettent pas de définir une relation claire entre la vitesse des courants et la turbidité enregistrée. Nous estimons que la relation entre circulation marine et turbidité pourrait être claire et significative en couplant les informations présentées en Figure 20 avec une comparaison entre la turbidité et la direction de propagation des courants. En d'autres termes, la combinaison de la vitesse avec la direction des courants pourrait expliquer une partie de la variation de la turbidité, notamment aux points Détroit, Galisbay-Est et Galisbay-Ouest.

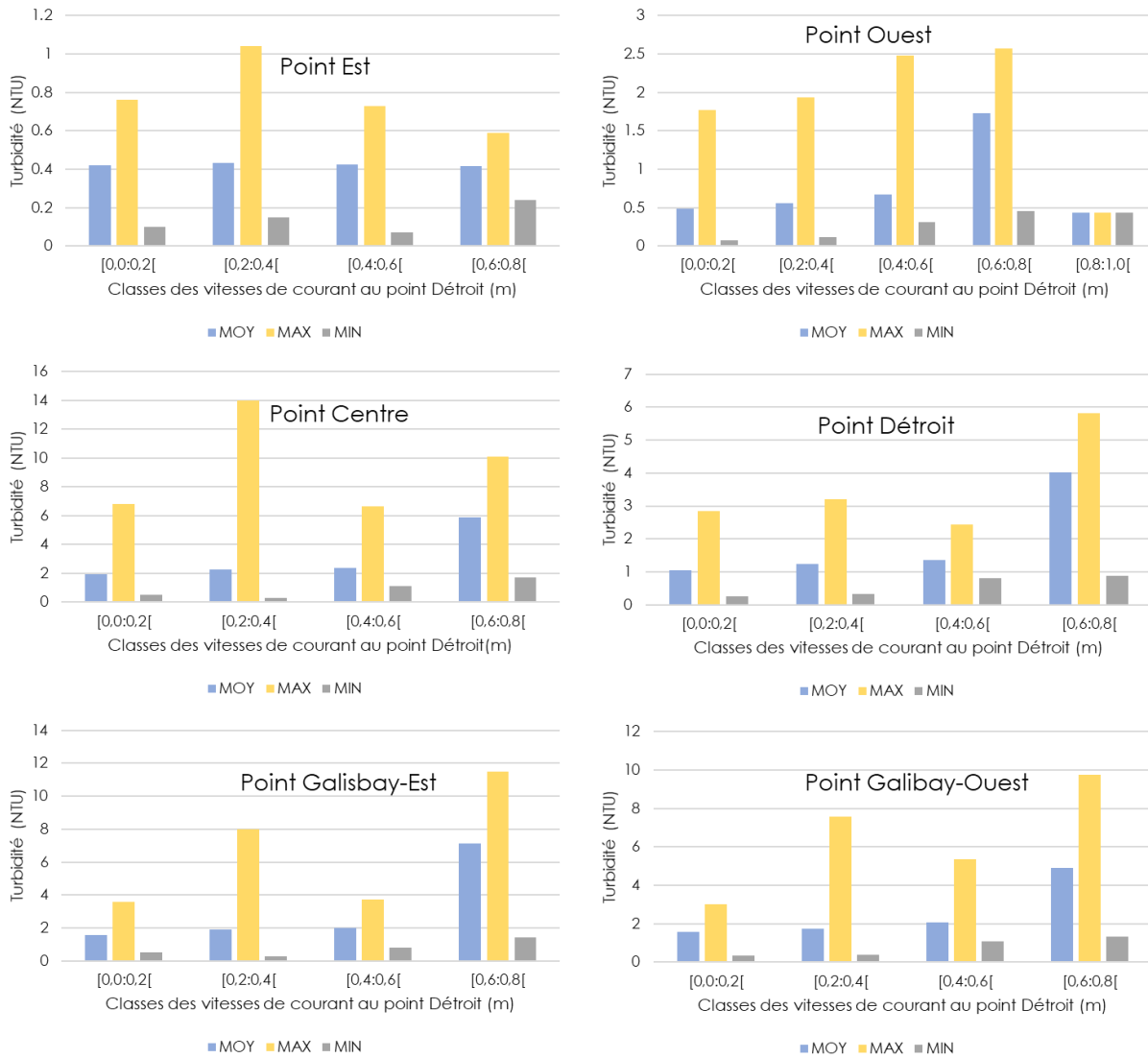


Figure 20. Valeur moyenne, maximale et minimale de turbidité par classe de vitesse de courant mesurée au point Déroit (modélisation DHI) et par point de localisation de turbidité.

3.3.5 Synthèse statistique des conditions météo-marines et de turbidité en fonction du climat de turbidité défini sur chaque point de localisation

Tableau 4. Caractéristiques des variables (valeurs moyenne, maximum et minimum) par point et par climat de turbidité, points supplémentaires inclus.

POINT 1 - CENTRE	Moyenne						Maximum						Minimum					
	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5
Turbidité (NTU)	1.07	1.79	1.75	2.30	4.17	8.48	1.67	3.09	2.76	6.79	10.08	13.98	0.54	0.30	1.10	1.34	2.15	2.97
Vit. courant au point Déroit (m/s)	0.16	0.21	0.23	0.25	0.33	0.35	0.30	0.77	1.04	0.55	0.66	0.74	0.04	0.01	0.02	0.01	0.06	0.02
Haut. sig. des vagues (m)	0.30	0.33	0.38	0.41	0.60	0.64	0.40	0.67	0.75	0.77	0.80	0.93	0.20	0.14	0.15	0.16	0.33	0.24
Pér. vagues (s)	2.22	3.14	3.27	3.72	3.12	5.77	2.44	11.08	11.48	10.39	5.23	9.78	1.93	1.88	2.01	1.97	2.40	2.48
Dir. vagues (°)	70	54	37	42	39	322												
Dir. courant au point Déroit (°)	281	276	271	271	256	244												
Vit. vent (m/s)	6.41	6.24	6.54	6.86	9.60	7.48	8.12	10.98	11.47	10.69	12.33	12.94	4.59	1.36	0.50	1.53	6.61	1.72
Dir. vent (°)	92	96	86	95	77	95												

POINT 2 - OUEST	Moyenne						Maximum						Minimum					
	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5
Turbidité (NTU)	0.37	0.42	0.43	0.42	0.51	0.48	0.48	0.73	0.76	0.68	1.04	0.59	0.15	0.07	0.28	0.15	0.27	0.40
Vit. courant au point Déroit (m/s)	0.16	0.21	0.23	0.25	0.33	0.35	0.30	0.77	1.04	0.55	0.66	0.74	0.04	0.01	0.02	0.01	0.06	0.02
Haut. sig. des vagues (m)	0.74	0.83	0.98	1.10	1.51	1.62	1.01	1.56	1.53	2.24	2.33	2.41	0.45	0.38	0.35	0.54	0.89	0.86
Pér. vagues (s)	3.85	4.57	5.08	5.43	5.20	7.12	4.77	10.31	10.80	10.82	7.93	10.12	3.30	3.07	3.42	3.65	3.68	3.63
Dir. vagues (°)	87	67	42	53	48	25												
Dir. courant au point Déroit (°)	281	276	271	271	256	244												
Vit. vent (m/s)	6.35	6.21	6.55	6.86	9.60	7.35	8.12	11.42	11.33	10.77	12.82	12.65	4.40	1.36	0.61	1.48	6.41	1.58
Dir. vent (°)	93	96	86	96	77	95												

POINT 3 - EST	Moyenne						Maximum						Minimum					
	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5
Turbidité (NTU)	0.44	0.44	0.53	0.59	1.37	1.82	0.65	0.73	0.75	1.93	2.48	2.57	0.17	0.08	0.30	0.19	0.44	1.40
Vit. courant au point Déroit (m/s)	0.16	0.21	0.23	0.25	0.33	0.35	0.30	0.77	1.04	0.55	0.66	0.74	0.04	0.01	0.02	0.01	0.06	0.02
Haut. sig. des vagues (m)	1.20	1.27	1.38	1.69	2.43	2.11	1.49	1.96	2.33	2.83	3.21	3.20	0.94	0.74	0.83	0.91	1.38	1.42
Pér. vagues (s)	5.17	5.72	5.99	6.76	7.00	8.89	5.94	12.07	9.29	11.37	8.18	11.71	4.63	3.77	4.45	5.05	5.11	4.96
Dir. vagues (°)	96	93	88	92	91	89												
Dir. courant au point Déroit (°)	281	276	271	271	256	244												
Vit. vent (m/s)	6.42	6.23	6.51	6.87	9.66	7.51	8.30	10.57	11.67	10.63	12.32	12.90	4.70	1.12	0.41	1.20	6.59	1.70
Dir. vent (°)	92	96	87	95	76	98												

POINT 4 - DETROIT	Moyenne						Maximum						Minimum					
	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5
Turbidité (NTU)	0.67	0.96	1.01	1.47	2.72	3.24	0.91	1.43	1.60	2.60	5.38	5.81	0.26	0.33	0.43	0.86	1.29	1.63
Vit. courant au point Déroit (m/s)	0.16	0.21	0.23	0.25	0.33	0.35	0.30	0.77	1.04	0.55	0.66	0.74	0.04	0.01	0.02	0.01	0.06	0.02
Haut. sig. des vagues (m)	0.47	0.48	0.53	0.57	0.79	0.77	0.62	0.89	0.98	0.88	1.04	1.14	0.29	0.22	0.23	0.25	0.51	0.32
Pér. vagues (s)	2.80	3.32	3.42	3.85	3.43	5.36	2.90	9.83	9.78	10.14	4.51	9.16	2.56	2.47	2.66	2.74	2.92	2.91
Dir. vagues (°)	87	77	69	68	66	356												
Dir. courant au point Déroit (°)	281	276	271	271	256	244												
Vit. vent (m/s)	6.43	6.24	6.53	6.86	9.63	7.48	8.12	10.94	11.25	10.67	12.42	12.94	4.60	1.39	0.40	1.50	6.59	1.84
Dir. vent (°)	92	96	86	95	77	96												

POINT 5 - GALIBAY EST	Moyenne						Maximum						Minimum					
	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5
Turbidité (NTU)	1.05	1.45	1.43	1.94	3.29	6.07	1.16	2.10	2.34	3.47	8.44	11.49	0.91	0.26	0.72	0.60	0.97	2.10
Vit. courant au point Déroit (m/s)	0.16	0.21	0.23	0.25	0.33	0.35	0.30	0.77	1.04	0.55	0.66	0.74	0.04	0.01	0.02	0.01	0.06	0.02
Haut. sig. des vagues (m)	0.30	0.33	0.38	0.41	0.60	0.64	0.40	0.67	0.75	0.77	0.80	0.93	0.20	0.14	0.15	0.16	0.33	0.24
Pér. vagues (s)	2.22	3.14	3.27	3.72	3.12	5.77	2.44	11.08	11.48	10.39	5.23	9.78	1.93	1.88	2.01	1.97	2.40	2.48
Dir. vagues (°)	70	54	37	42	39	322												
Dir. courant au point Déroit (°)	281	276	271	271	256	244												
Vit. vent (m/s)	6.41	6.24	6.54	6.86	9.60	7.48	8.12	10.98	11.47	10.69	12.33	12.94	4.59	1.36	0.50	1.53	6.61	1.72
Dir. vent (°)	92	96	86	95	77	95												

POINT 6 - GALIBAY OUEST	Moyenne						Maximum						Minimum					
	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5	Climat 0	Climat 1	Climat 2	Climat 3	Climat 4	Climat 5
Turbidité (NTU)	1.21	1.48	1.50	1.78	2.90	6.78	1.53	2.13	2.23	2.60	5.35	9.75	0.80	0.33	0.57	0.87	2.18	3.02
Vit. courant au point Déroit (m/s)	0.16	0.21	0.23	0.25	0.33	0.35	0.30	0.77	1.04	0.55	0.66	0.74	0.04	0.01	0.02	0.01	0.06	0.02
Haut. sig. des vagues (m)	0.37	0.40	0.44	0.48	0.68	0.68	0.48	0.75	0.86	0.98	0.94	1.06	0.23	0.11	0.14	0.18	0.37	0.23
Pér. vagues (s)	2.41	2.96	3.04	3.33	2.97	4.70	2.81	8.85	9.80	8.48	4.12	7.41	2.12	2.10	2.23	2.19	2.49	2.65
Dir. vagues (°)	91	81	62	79	60	346												
Dir. courant au point Déroit (°)	281	276	271	271	256	244												
Vit. vent (m/s)	6.40	6.23	6.54	6.86	9.59	7.43	8.12	11.16	11.35	10.67	12.39	12.84	4.59	1.46	0.50	1.53	6.51	1.72
Dir. vent (°)	92	96	86	95	77	94												

3.4 L'anse de Galisbay lors d'un épisode hautement turbide : ce que l'observation large échelle signifie en très proche-côtier

Parmi la série temporelle d'images Sentinel-3 analysées, les valeurs de turbidité relevées sont maximales aux trois points de référence à la date du 07/03/2018, par ailleurs classée niveau 5 dans notre échelle de turbidité. Au point Centre, à 3.5 km au large de Galisbay, la valeur enregistrée est de 13.98 NTU. La Figure 21 présente la distribution des masses turbides dans la zone environnante de Galisbay. La résolution de l'image (300 m), la nébulosité et autres artéfacts liés aux spécificités du capteur et du fond en domaine littoral ont contraint nos traitements à masquer systématiquement les résultats à proximité immédiate de la côte. **Les premières valeurs de turbidité fiables et retenues pour cette date, sont à environ 3 km du port de Galisbay.** Une propagation du gradient spatial de turbidité par extrapolation des valeurs les plus proches aurait pu être envisagée mais nous suspectons une progression non-linéaire de ce gradient dans la réalité.

Pour mieux appréhender la magnitude de la turbidité dans la zone localisée de Galisbay, nous avons choisi de contourner les limites relatives aux images Sentinel-3, citées précédemment, en analysant une donnée spatiale plus résolue, très proche dans le temps avec possiblement une nébulosité moins marquée. Une image satellite haute-résolution Sentinel-2 (10 m de taille de pixel), datée du 06/03/2018 (soit 1 jour d'écart avec l'image Sentinel-3 du même événement turbide) a pu être exploitée dans des conditions optimales (pas de nébulosité sur l'île de Saint-Martin). Ainsi, nous avons pu extraire, analyser et cartographier la variation spatiale de la turbidité dans l'anse de Galisbay le jour le plus hautement turbide de notre base de données, avec une résolution beaucoup plus fine (Figure 22). Les observations confirment notre hypothèse d'une variation non linéaire des valeurs de turbidité et, par extension, de concentration de matières en suspension, à l'approche de la côte. Dans la zone analysée, les valeurs de turbidité atteignent localement 80 NTU, avec une dominance de valeurs supérieures à 60 NTU sur la bande des premiers 500 mètres depuis la côte.

Cet exemple démontre qu'un état de turbidité au large de l'anse de l'ordre de la dizaine de NTU correspondrait à un état de turbidité (et donc de concentrations en particules en suspension en surface, cf. Figure 10) 5 à 8 fois plus important à l'intérieur de la baie. Cette observation n'a pas pu être réalisée pour chaque niveau de turbidité par manque d'images Sentinel-2 disponibles et/ou exploitables aux dates correspondantes à celles de la base de données Sentinel-3 retenues. Toutefois, nous estimons que la remarque d'un gradient positif de turbidité du large à la côte dans le secteur peut être observée à tout niveau de turbidité, dans des proportions variables. **Les niveaux 4 et 5 de turbidité restent occasionnels voire événementiels puisqu'ils n'occurrent que sur 7% du jeu de données, soit sur 25 dates, au total, sur les 4 années analysées. Néanmoins, ils apparaissent chaque année et l'ampleur et la complexité de la turbidité observée méritent une attention particulière et une considération dans les réflexions portant sur l'impact environnemental des travaux et des transformations majeures du fond proche-côtier et du littoral, la mise en suspension étant extrêmement sensible dans les petits fonds. Une étude de la courantologie locale peut être un élément clé pour mieux comprendre la dynamique des phénomènes turbides et tenter de confirmer nos hypothèses.** De manière épisodique, en particulier pour les cas de figure

de turbidités denses et généralisées (niveaux 4 et 5), les précipitations peuvent jouer un rôle amplificateur à prendre en compte, en contribuant au transport depuis la terre vers le domaine littoral d'un volume de charge fine depuis les vallées de Saint-Martin, qui peut ainsi s'ajouter à la fraction littorale sableuse mise en suspension. Cette hypothèse est soutenue par l'observation, sur l'image Sentinel-2 dans la baie de Galisbay (Figure 21), de panaches turbides localement plus sombres, possiblement vaseux, par rapport au reste de la zone, plus claire, apparentée à une fraction sableuse. **Les épisodes météorologiques mêlant état de mer agité et précipitations sont un scénario à envisager pour approfondir cette analyse des conditions contrôlant la turbidité naturelle locale, avec un degré d'importance comparable à celui d'un croisement des simulations de circulation des courants, menées par DHI, avec les climats de turbidité que nous avons définis.**

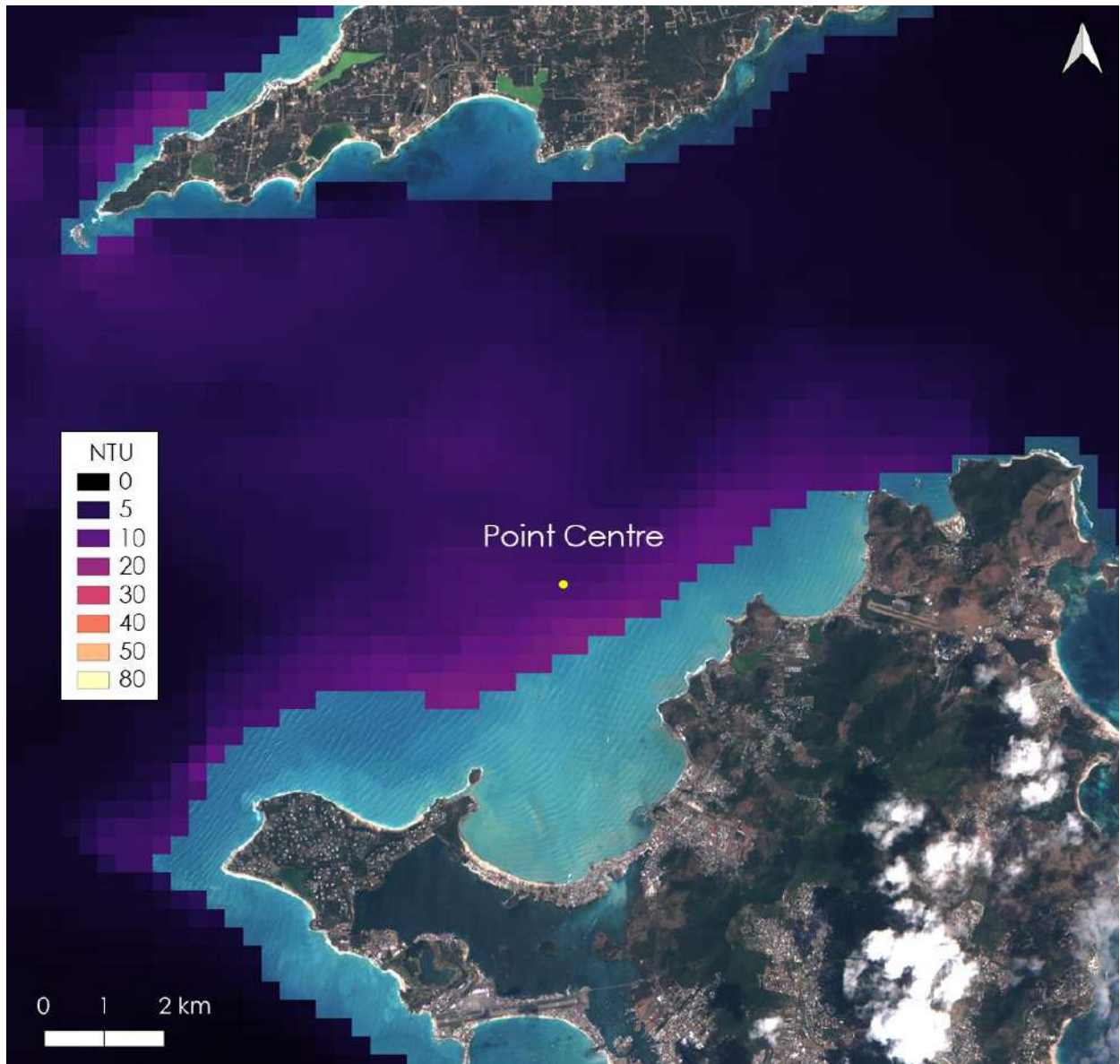


Figure 21. Variation spatiale de la turbidité dérivée de l'image satellite Sentinel-3 du 07/03/2018, dans le secteur Nord de Saint-Martin : zoom sur les environs de Galisbay sur fond cartographique de l'image Sentinel-2 du 06/03/2018 dont les extractions de la turbidité sont présentées en Figure 22.

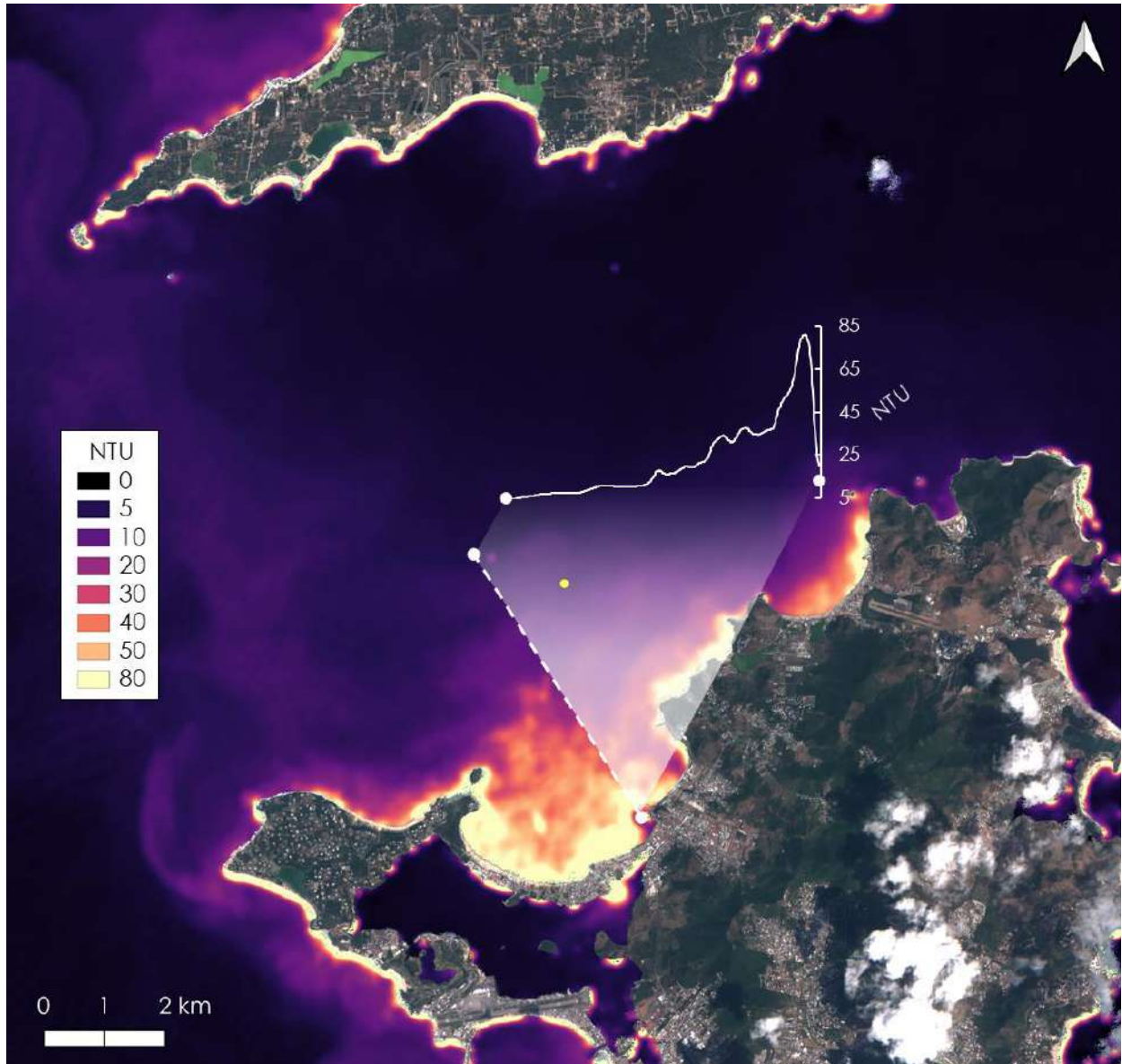


Figure 22. Variation spatiale de la turbidité dérivée de l'image satellite Sentinel-2 du 06/03/2018, dans le secteur Nord de Saint-Martin : couverture complète de la zone d'intérêt. Le graphique sur la carte représente la variation de la turbidité le long d'un profil (ligne tiretée blanche) sur environ 5 km du Port de Galisbay au large.

4 SYNTHÈSE DES RESULTATS ET CONCLUSIONS

Pour synthétiser nos résultats, nous retiendrons plusieurs faits :

- La turbidité de la zone d'intérêt varie saisonnièrement, des pics de turbidité sont observés préférentiellement entre septembre et mars pendant la saison sèche.
- Cette turbidité dérivée des images satellite varie spatialement et temporellement de 0-1 NTU à 60-80 NTU avec des maxima généralement relevés à la côte.
- D'après nos observations statistiques sur la série temporelle de 2017 à 2020, la magnitude et la dynamique spatiale de la turbidité journalière est étroitement liée aux conditions d'état de mer, plus particulièrement aux caractéristiques des vagues (hauteur significative, et aussi leur direction).
- La turbidité dans la zone localisée de la baie de Galisbay est principalement conditionnée par les conditions marines de l'Est de l'île de Saint Martin, secteur océanique plus énergétique, et dans certains cas de figure, par les forçages provenant de la région ouest de l'île (directions de vagues opposées).
- Six niveaux de turbidité ont été distingués et détaillés. Les niveaux 4 et 5, aux turbidités les plus élevées, restent ponctuels au cours d'une même année, associés à des conditions de vagues fortes, mais présentent tout de même une forme de répétitivité à l'échelle interannuelle. Au cours de ces épisodes, les valeurs mesurées sont 3 à 5 fois supérieures aux autres niveaux identifiés.
- L'étude d'un exemple de cas hautement turbide basé sur de la donnée plus haute résolution (Sentinel-2) a montré qu'à l'intérieur de la baie de Galisbay, la turbidité peut être jusqu'à 8 fois plus importante que celle mesurée à 5 km au large du Port de Galisbay.
- Nous préconisons un croisement approfondi de nos observations avec les sorties de modèles de courantologie à échelle locale (baie de Galisbay) produites par notre partenaire DHI, notamment avec les directions de propagation des courants.

5 Bibliographie

CREOCEAN, 2017. Rapport – Suivi de la turbidité ambiante dans le cadre des projets d'aménagement de l'anse Saint-Marc 3, Chef de Baie 4 et La Repentie. Rapport, Edition 1, Ref. 160656 C, 35 p.

CREOCEAN, 2018. Assistance technique pour l'optimisation des impacts des rejets en mer liés au déroctage - Tests de sensibilité du rejet en mer, Accord Cadre n°AC1601, Ref. 160656I_MS11_RA1_IndD, 37 p.

Dogliotti, A. I., Ruddick, K. G., Nechad, B., Doxaran, D., & Knaeps, E., 2015. A single algorithm to retrieve turbidity from remotely sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, 156, 157-168.

Lafon, V., Curti, C., Regniers, O., 2018. Contribution à la connaissance de la dynamique turbide naturelle et au suivi environnemental des travaux de déroctage par l'analyse de données satellite. Rapport pour le marché public d'études n°MP17MP095 du Port Atlantique La Rochelle, V. 4, 58 p.

Lafon, V., Regniers, O., 2018. Analyse de positionnement de zones homogènes pour le suivi de la turbidité. Rapport pour le marché public d'études n°MP18MP016 du Port Atlantique La Rochelle, V. 3, 31 p.

Lafon, V., Regniers, O., 2019. Analyse de positionnement d'une sonde de suivi au sud du pont de l'île de Ré et d'une sonde de référence pour le suivi de la turbidité, BC n°2019001396, Version n°V0, 37p.

Nechad, B., Ruddick, K. G., & Neukermans, G., 2009. Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of turbidity in coastal waters. In *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, and Large Water Regions* (Vol. 7473, p. 74730H).

Novoa, S., Doxaran, D., Ody, A., Vanhellemont, Q., Lafon, V., Lubac, B., & Gernez, P., 2017. Atmospheric corrections and multi-conditional algorithm for multi-sensor remote sensing of suspended particulate matter in low-to-high turbidity levels coastal waters. *Remote Sensing*, 9(1), 61.

6 ANNEXE 1 - CARACTERISTIQUES DES DONNEES SATELLITAIRES

Le premier satellite Sentinel-3 (S3A) a été lancé en 2016 dans le cadre du programme COPERNICUS de l'Agence Spatiale Européenne (ESA), le second (S3B) en 2018. La configuration opérationnelle comprend deux satellites, qui assurent une revisite du site d'intérêt tous les 1 à 2 jours. Ce satellite fournit la hauteur des vagues et la vitesse du vent, des données optiques et altimétrique sur les océans et continents, avec une résolution de 300 m. Les images Sentinel-3 sont téléchargeables gratuitement depuis le site miroir de l'ESA mis à disposition pour la France par le CNES.

Le premier satellite Sentinel-2 (S2A) a été lancé début 2015 dans le cadre du programme COPERNICUS de l'Agence Spatiale Européenne (ESA). Un deuxième satellite Sentinel-2 (S2B) a été lancé en mars 2017 et est venu doubler la capacité actuelle d'acquisition de cette constellation en juillet 2017. Les satellites S2 portent un capteur multispectral (MSI) à haute résolution spatiale, soit 10 m dans les bandes visibles et proche infrarouge exploitées ici. Sa capacité de revisite d'un même site est de 10 jours (5 jours avec S2B). A l'instar du programme Landsat de la NASA, les acquisitions S2 sont systématiques, archivées et téléchargeables gratuitement depuis le site miroir de l'ESA mis à disposition pour la France par le CNES.

La liste des images satellites Sentinel-3 exploitées dans cette étude sont répertoriées dans le tableau ci-dessous :

Années	Mois	Jours																		
2017	1	23	19	15	11	3														
	2	27	26	19	15	11	7	3												
	3	21	18	14	10	2														
	4	22	14	2																
	5	26																		
	6	22	18																	
	7	27																		
	8	11																		
	9	11	4	3																
	10	31	24	12	8	5	1													
	11	27	19	15	8	4	1													
	12	28	27	24	20	16	13	12	9	8	5	1								
2018	1	28	27	24	20	17	16	12	9	8	4									
	2	27	24	23	17	16	13	9	8	4										
	3	30	27	26	19	15	12	8	7	4	3									
	4	27	15	4	3															

5	28	16	12	8	4														
6	16	8																	
7	28	25	24	16	5														
8	24	20	16	13	9														
9	28	24	9	5	1														
10	29	28	25	24	21	17	10	2	1										
11	29	28	25	24	21	20	17	9	2	1									
12	30	25	17	7	6														

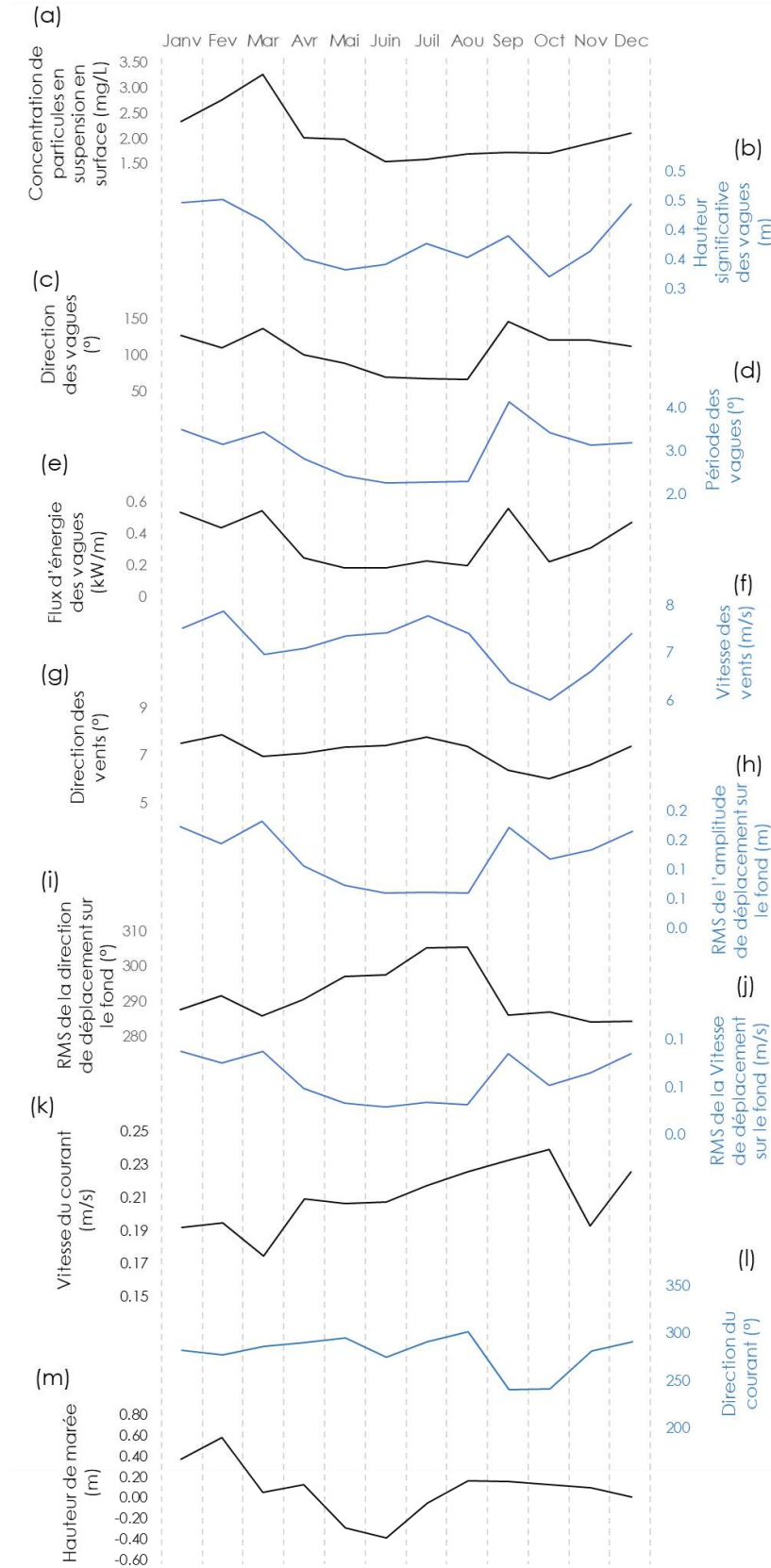
2019

1	29	26	25	18	14	13	3												
2	21	17	13	9	6	2													
3	30	28	27	26	24	23	19	16	13	12	9	5	1						
4	30	27	24	23	21	19	16	15	13	7	1								
5	21	20	18	17	16	14	8	2											
6	27	19	17	16	13	12	5	4											
7	28	24	22	18	16	14	2	1											
8	22	20	18	14	13	12	10	7	6	5	1								
9	30	29	26	21	20	12	10	4	2	1									
10	30	29	26	25	22	21	17	14	13	11	9	5	3	2	1				
11	29	28	24	22	21	20	18	17	15	14	10	6	5	3					
12	29	25	22	21	19	18	15	14	13	11	8	7	4	3	2				

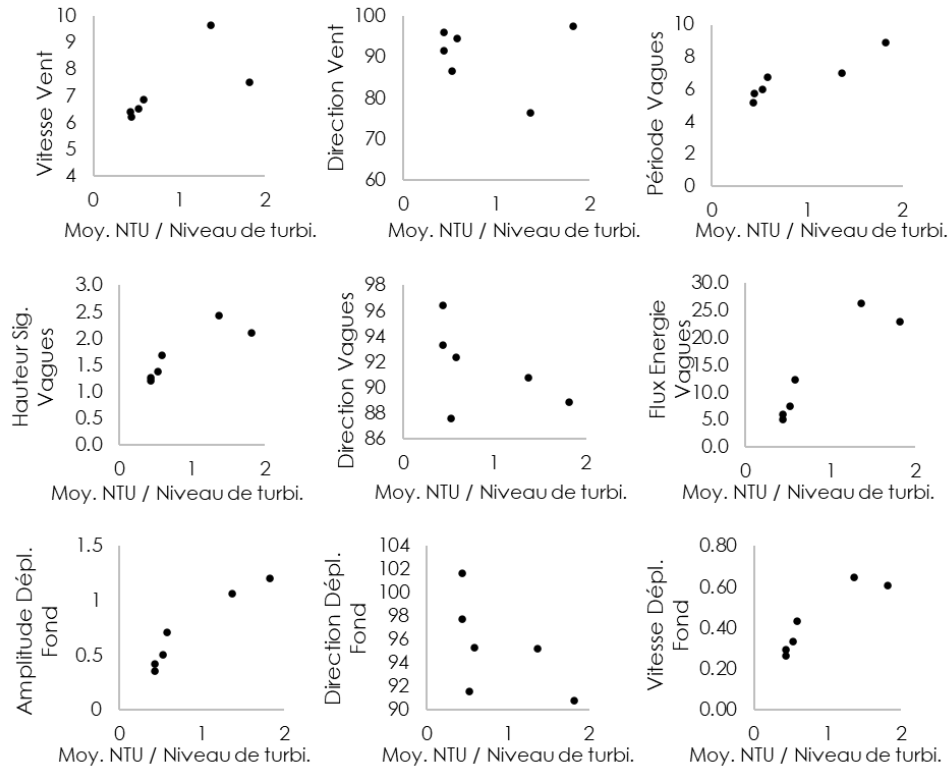
2020

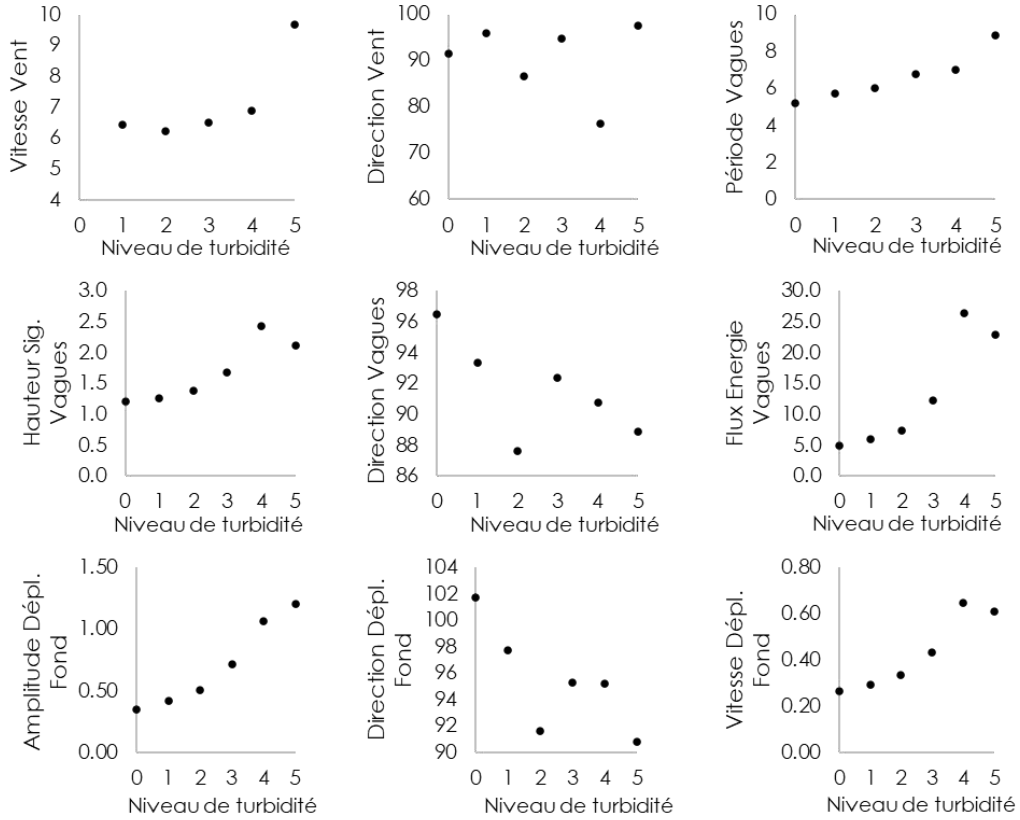
1	31	30	27	21	18	17	16	15	13	12	9	8	7	6	3				
2	23	18	10	8	3	2													
3	31	27	25	17	16	13	12	10	8	4	2								
4	25	20	19	17	9	5	4	2											
5	22	20	14	13	10														
6	29	20	18	16	14	13	10	9	6	5	2	1							
7	26	22	21	19	17	15													
8	26	25	15	13	11	9	6	5	3	2									
9	26	25	24	21	19	18	14	13	11	5									
10	27	25	23	22	21	19	18	15	14	12	11	8	6						
11	29	27	25	22	18	15	6	4											
12	30	27	26	19	16	15	14	12	8	7	5	3	1						

7 ANNEXE 2 – VARIATIONS MENSUELLES DES PARAMETRES DE FORÇAGES PHYSIQUES AU POINT CENTRE



8 ANNEXE 3 – COMPARAISON ENTRE LES CLIMATS DE TURBIDITE ET LES FORÇAGES AU POINT EST





– Fin du document –