



Liberte Égalité Fraternité

Document à accès immédiat

#### 2113.21.6766.13 0

# Modélisation de la dispersion de particules dans la baie de Fort-de-France (Martinique)

h3a-b

hac

haa-b

# Rapport final

# BRGM/RP-71638-FR

Version 1 du 28 février 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

C. Bouvier

		1	btb-2	
Vé	érificateur :		d7-hta A	pprobateur : de-hie
Nom :	Lecacheux		Nom :	Vittecoq
Fonction :	Cheffe de projet risques littoraux		Fonction :	Directeur régional du BRGM Martinique
Date :89	3740,46 -02 28/02/2022		Date :	06/03/2022
Signature :	J. Leacherso		Signature :	Benat Viteog

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001. Contact : <u>qualite@brgm.fr</u>





# **Avertissement**

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la règlementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

# Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire mis à votre disposition.

Mots clés : Modélisation, hydrodynamique côtière, littoral, courantologie, approche lagrangienne, pollution

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

**C. Bouvier** (2022) – Modélisation de la dispersion de particules dans la baie de Fort-de-France (Martinique). Rapport final V1. BRGM/RP-71638-FR, 36 p.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM. IM003-MT008-P2-21/09/2021

# Synthèse

Afin d'établir l'état global de la qualité des masses d'eau côtières, la Directive Cadre sur l'Eau s'appuie sur différents types de suivi. Dans la baie de Fort-de-France (Martinique) la localisation de certaines stations de mesure fait l'objet de réflexion. En partenariat avec l'Office de l'eau, le BRGM a réalisé une étude visant à mieux caractériser la dispersion de polluants en provenance de différents émissaires (stations d'épuration, rivières) dans la baie de Fort-de-France en s'appuyant sur les travaux récents de modélisation de la courantologie 3D réalisés par le BRGM dans le cadre du projet HydroSedMar (BRGM/RP-69025-FR, 2019).

L'exercice de modélisation proposé ici consiste à suivre, pour certaines situations météorologiques et hydrodynamiques caractéristiques, la propagation des particules provenant de différents émissaires en les considérant comme des dériveurs virtuels, c'est-à-dire comme des particules inertes dont la concentration ou les spécificités géochimiques ne sont pas prises en compte (durée de vie, vitesse de sédimentation, interactions avec l'environnement). L'objectif est donc d'estimer les zones de propagation et d'accumulation préférentielles de ces polluants « schématiques » en fonction des courants.

Quatre scénarios climatiques caractéristiques ont pu être identifiées par une analyse statistique réalisée sur l'année 2017 (saison sèche avec vent fort ou vent faible, saison humide avec vent fort ou vent faible). Les simulations réalisées montrent que les particules transitent depuis les masses d'eau côtières (MEC) du nord et de l'est de la baie vers le large, portées par les courants dont l'intensité ou la direction varie en fonction des conditions météorologiques.

Pour les scénarios présentés, les résultats montrent que l'évacuation des particules depuis les émissaires vers la sortie de la baie de Fort-de-France est réalisée en quelques jours (en moyenne, environ un tiers des particules sont évacuées en deux jours). On remarque que les deux caps que constituent la Pointe des Nègres ou la Pointe du bout limitent la dispersion des particules sur d'autres secteurs géographiques situés en dehors de la baie comme Schœlcher ou bien certaines plages des Trois îlets (Anse Mitan, Anse à l'âne, Anse Dufour).

De par leurs morphologies particulières, certains secteurs géographiques situés au nord de la baie favorisent le blocage du transit des particules vers le large (Pointe des Sables, zone d'activité d'Etang Z'abricots, baie du Carénage, Pointe des Nègres). Plus au sud, dans la baie de Génipa, les secteurs de Gros îlets, la Pointe de la Rose, la pointe des trois-îlets constituent également des points de blocage pour l'évacuation des particules vers le large.

Les résultats des simulations sont disponibles sous la forme de cartes au format SIG et images (.png). Pour chacune des simulations réalisées, des cartes à plusieurs instants illustrant la dispersion des particules ainsi que les zones préférentielles d'accumulation ont été produites. Les différents résultats sont également présentés sous la forme d'animations qui seront mises en ligne sur le site de l'Observatoire du littoral martiniquais <u>www.observatoire-Olimar.fr</u>.

#### Limites sur l'utilisation des données produites :

Les résultats communiqués ne peuvent pas être interprétés directement comme la propagation des panaches de pollution issus des rivières (ou des STEU) mais comme un premier diagnostic permettant de mettre en évidence des secteurs sur lesquels le courant est susceptible d'entrainer les particules issues des différents émissaires pour les scénarios considérés.

En effet, l'objectif de cette étude étant de mettre en évidence les trajectoires des particules issues des différents émissaires, la concentration en particule n'a pas été différenciée par source de rejet et a été fixée schématiquement. D'après les tests réalisés, ce choix assure une bonne représentativité des trajectoires possibles de l'ensemble des particules mais ne permet pas de discerner directement les impacts d'un émissaire sur la qualité de l'eau.

La compréhension de l'impact des rivières sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de la baie de Fort-de-France reste un sujet complexe. La prise en compte du transport sédimentaire dans notre approche de modélisation reste un verrou essentiel et nécessite des efforts plus conséquents pour permettre une meilleure évaluation de la contribution relative de chaque rivière en matériel sédimentaire et en sources de pollution.

# Sommaire

1. Introduction	8
1.1. Contexte	8
1.2. Objectifs	9
2 Description du site d'étude et des données	10
2.1 Description des conditions météorologiques	10
2 1 1 Régime de vent	10
2.1.2. Classification des régimes de vent	
2.2. La base de données HvdroSedMar, courantologie dans la baie de Fort-de-France.	12
2.2.1. La base de données (BDD HydroSedMar)	12
2.2.2. Circulation générale dans la baie	15
2.3. Les différentes sources de rejets	16
2.3.1. Définitions des principales sources de rejet	16
2.3.2. Caractérisation des panaches aux différents aux émissaires	16
3. Méthode pour caractériser la dispersion	17
3.1. Approche générale	17
3.2. Identification et description des scénarios	17
3.2.1. Scénarios en période de Carême (saison sèche)	18
3.2.2. Scénarios en période d'hivernage (saison humide)	18
3.3. Modélisation de la dispersion	19
3.4. Méthode d'analyse des résultats	20
3.4.1. Répartition des particules au cours du temps	20
3.4.2. Répartition des particules au sein de chaque masse d'eau (MEC)	21
3.4.3. Secteurs préférentiels d'accumulation des particules	21
4. Résultats	22
4.1. Dispersion des particules au cours du temps	22
4.2. Secteurs préférentiels d'accumulation des particules	28
5. Discussion et conclusion	30
6. Références	32

## Liste des figures

Figure 6 : carte de l'intensité des courants de surface U (m/s) simulés par le modèle (BRGM/RP-69025-FR) le 26 mars 2017 par vent de SE (à gauche) et le 1 janvier 2017 par vent d'ENE (à droite). La direction des courants est représentée par les vecteurs et l'iso-contour marque une vitesse de 20 cm/s. La direction et la vitesse du vent est illustrée par la flèche en haut à droite.

Figure 12 : cartographie de la densité relative Di, j, t de particules au cours du temps pour le scénario S3 (hivernage, vent faible) à t = t0, t = t0 + 12h, t = t0 + 24h et t = t0 + 36h (panneaux supérieurs). Les conditions de vent et de courant sont représentées à chaque instant

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE

La Directive Cadre sur l'Eau (<u>https://wwz.ifremer.fr/dce/La-DCE</u>) s'applique à l'ensemble des Etats membres de l'Union Européenne et établit un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau en vue d'une meilleure gestion des milieux aquatiques. Elle fixe comme objectif général l'atteinte d'un bon état écologique et chimique des masses d'eau souterraines et de surface, ces dernières incluant les eaux côtières et de transition (estuaires, et lagunes). Afin d'établir l'état global de ces masses d'eau, la DCE s'appuie sur différents types de suivi qui permettent l'évaluation d'un certain nombre d'indicateurs de qualité et contribuent à l'amélioration de la connaissance des eaux littorales.

Depuis 2014, l'Office De l'Eau (ODE) assure la maîtrise d'ouvrage du suivi réglementaire du milieu marin en Martinique. Ce suivi concerne 31 stations de mesure déployées sur l'ensemble du territoire. La répartition spatiale de certaines de ces stations fait aujourd'hui l'objet de réflexion, notamment dans la baie de Fort-de-France. Sur ce secteur, alors que l'ensemble de la baie est découpé en trois masses d'eau côtières (MEC, Figure 1), seulement une station permettant de mesurer les paramètres physico-chimiques est en fonctionnement au titre de la DCE (station de Banc Gamelle, Figure 1).

Dans le cadre du Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin (RNO), indépendant du suivi DCE, un second suivi hydrologique est effectué dans la baie de Fort-de-France. Ce suivi est réalisé de façon mensuelle et concerne 7 stations formant 2 radiales dans la baie (triangles oranges, Figure 1). La possibilité d'intégrer certaines de ces stations dans le suivi DCE pour obtenir une évaluation de la qualité de chacune des masses d'eau côtières de la baie de Fort-de-France fait partie des réflexions que mènent l'ODE et ses partenaires.



Figure 1: carte situant la baie de Fort-de-France avec les principales masses d'eau côtières (MEC), stations de mesure (DCE en jaune et RNO en orange) et les différentes sources de rejets (étoiles vertes pour les stations de traitement des eaux usées [STEU] ou bleues pour les rivières). Source des données : <u>https://cartes.observatoire-eau-martinique.fr</u>.

Modélisation de la dispersion de particules dans la baie de Fort-de-France (Martinique)



Figure 2 : photographie du panache provenant de la rivière Madame. Source : ODE, novembre 2020.

Afin de valider l'emplacement de nouvelles stations pour les prochains suivis des masses d'eau côtières dans la baie de Fort-de-France (suivi DCE 2022-2024), une meilleure connaissance du fonctionnement hydrodynamique de la baie est nécessaire, notamment pour mieux mettre en évidence les secteurs les plus exposés aux pollutions en provenance des rivières (Figure 2) ou des stations de traitement des eaux usées (STEU).

Au cours de ces dernières années, l'amélioration des connaissances du fonctionnement hydrosédimentaire de la baie de Fort-de-France a déjà fait partie des actions menées par le BRGM dans le cadre du contrat de baie de Fort-de-France porté par la Communauté Agglomération Centre Martinique (CACEM). Sur la base des besoins identifiés, un programme général de modélisation hydro-sédimentaire, intitulé « projet HydroSedMar » (https://hydrosedmar.brgm.fr/) avait été défini dans le but d'apporter des éléments de compréhension sur le fonctionnement de la baie (BRGM/RP-69025-FR, 2019).

La présente étude s'appuie alors en grande partie sur les données hydrodynamiques de courantologie produites au cours du projet HydroSedMar (BRGM/RP-69025-FR, 2019) et repose sur la modélisation de la dispersion de particules en provenance de différentes sources de rejets (STEU, rivières). Les résultats de cette étude pourront ensuite servir d'appui à l'ODE pour optimiser la performance du réseau de suivi DCE.

## 1.2. OBJECTIFS

L'objectif du projet est d'étudier la dispersion de polluants « schématiques<sup>1</sup> » en provenance de différents rejets (STEU et rivières) dans la baie de Fort-de-France en s'appuyant sur les travaux récents de modélisation réalisés dans le cadre du projet HydroSedMar comprenant notamment la base de données (BDD) de courantologie (BRGM/RP-69025-FR, 2019).

Les objectifs spécifiques de ce projet sont les suivants:

- identifier des situations hydrodynamiques caractéristiques (scénarios) de la baie de Fort-de-France sur la période couverte par la BDD HydroSedMar (année 2017) ;
- réaliser un suivi de particules en provenance de différentes sources de rejets (STEU et rivières) pour les scénarios identifiés.
- estimer le temps de sortie des particules suivies de la baie et les secteurs susceptibles d'être des zones d'accumulation.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Schématiques : au cours de l'exercice de modélisation, les particules suivies sont considérées comme des dériveurs virtuels, c'est-à-dire comme des particules inertes dont la concentration ou les spécificités géochimiques ne sont pas considérées.

# 2. Description du site d'étude et des données

La baie de Fort-de-France est située sur la côte caraïbe au sud-ouest de la Martinique et s'étend sur une dizaine de kilomètre dans sa plus grande longueur (de la Pointe des Nègres et le fond de la baie de Génipa) et 8 km dans sa plus grande largeur (de la Cohé au Lamentin jusqu'à la baie de Génipa). Elle forme une importante échancrure dans la moitié sud de l'île, ouverte sur la mer des Caraïbes à l'ouest.

Ce chapitre s'attache à présenter le site d'étude de la baie de Fort-de-France, notamment en terme de fonctionnement météorologique et hydrodynamique et permet d'introduire les différentes sources de données disponibles. Après une classification statistique des conditions de vent qui servira de base pour la définition des scénarios (section 2.1), la section 2.2 apporte une description de la base de données utilisée pour la courantologie dont les champs de vitesses seront utilisés pour le transport des particules. Enfin, la section 2.3 précise les différentes sources de rejets (émissaires) sélectionnées pour l'étude.

## 2.1. DESCRIPTION DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES

La circulation générale de la baie est contrôlée principalement par le vent qui pousse les masses d'eau de surface vers la sortie de la baie. Afin d'identifier des situations hydrodynamiques (scénarios) susceptibles de se reproduire fréquemment au cours des prochaines années, il est donc essentiel de s'intéresser aux conditions de vent sur la zone d'étude (station Météo-France<sup>2</sup> du Lamentin, située dans le fond de la baie de Fort-de-France, au niveau du secteur est).

#### 2.1.1. Régime de vent

La Martinique connait un climat tropical, chaud et humide, présentant une saison sèche, le carême (de février à mai) et une saison humide, l'hivernage (de juillet à novembre). Ces conditions climatiques sont directement liées aux positions respectives de l'anticyclone des Açores et de la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT). La Martinique est soumise aux alizés qui soufflent d'est (E) en ouest (O) en moyenne à une vitesse de 5 m/s (soit ~18 km/h).

✓ Pendant le carême, l'anticyclone des Açores et la ZCIT migrent vers le sud. Les alizés sont soutenus et réguliers (5.54 m/s en moyenne), susceptibles de se renforcer de février à mai, où ils soufflent avec une vitesse souvent supérieure à 7 m/s (25 % du temps).

✓ Pendant l'Hivernage, l'anticyclone des Açores remonte vers l'Atlantique nord, les alizés diminuent (4.43 m/s en moyenne). La ZCIT remonte vers 10° de latitude Nord et la Martinique est exposée à des précipitations plus fréquentes.

 $\checkmark$  En parallèle, l'arc caribéen est régulièrement parcouru par des tempêtes tropicales s'intensifiant parfois pour devenir des ouragans pendant la saison cyclonique entre juillet et novembre. Les vents peuvent alors dépasser les 100 km/h, avec de fortes précipitations.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Source de données Météo-France (<u>https://donneespubliques.meteofrance.fr/metadonnees\_publiques/fiches/fiche\_97213004.pdf</u>)

### 2.1.2. Classification des régimes de vent

Afin d'identifier l'occurrence de certaines situations météorologiques, une analyse statistique sur les conditions de vent a été réalisée. La classification des régimes de vent a été effectuée à partir des données collectées (vitesse et direction du vent à une altitude de 10 m) depuis la station du Lamentin sur une période de 5 ans depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2017. Une classification statistique des données de vent sur une plus longue période n'a pas été réalisée par manque d'homogénéité dans les mesures enregistrées sur les années passées (évolution des capteurs, localisation). L'algorithme de classification utilisé est l'algorithme k-means (e.g. Le Cozannet et al., 2011). Les valeurs associées à chaque classe sont des valeurs moyennes (C1, C2, C3, C4 et C5, Figure 3 à gauche).

Cette classification a conduit à déterminer cinq grandes classes statistiquement représentatives des vents observables dans la baie de Fort-de-France (Tableau 1). Les résultats de cette classification montrent une dispersion intra-classe modérée, comprise entre 8 et 48 % pour le paramètre de direction du vent D. La dispersion intra-classe est plus importante pour le paramètre de vitesse de vent qui varie entre 41 et 72 %, traduisant le fait que la classification privilégie une répartition des classes en direction plutôt qu'en vitesse. Au sein de la même classe, le vent peut alors varier de faible à fort (e.g. C1, Figure 3 à gauche). On observe que les vents dominants proviennent d'un secteur E à ESE (C1 et C4) et sont représentées tout au long de l'année (83 % des vents observables, Tableau 1 et Figure 3 à droite).

Tableau	1	: caractéristic	jues n	noye	ennes	et re	épartitions	des	différentes	classes	de	vent ic	lentifiées	s.

		Baryce	ntre	
Classe	Caractéristiques globales	V (m/s)	D (°)	Occurrence (%)
C1	Vent modéré de secteur E	5.04	93	53
C2	Vent faible de secteur ENE	2.19	65	10
C3	Vent faible de secteur NNE	1.16	31	2
C4	Vent modéré de secteur ESE	5.01	118	33
C5	Vent faible de secteur SO	2.92	231	2



Figure 3 : à gauche : caractéristiques et classification des conditions de vent à proximité de la zone d'étude. Données recueillies à la station météorologique du Lamentin et analysées sur une durée de 5 ans (janvier 2017 à janvier 2022). A droite : saisonnalité des 5 grandes classes de vent.

			carême					hivernage				
Classe	jan	feb	mar	apr	may	june	jul	aug	sep	oct	nov	dec
C1	57	66	53	49	50	66	63	58	38	39	44	53
C2	15	8	11	9	5	4	8	10	15	16	16	12
C3	2	1	1	1	1	1	1	2	3	2	3	2
C4	25	24	34	40	43	29	27	28	36	39	35	31
C5	1	2	1	1	0	0	1	2	9	4	2	2

Tableau 2 : répartition mensuelle (pourcentage) des différentes classes de vent. Les valeurs supérieures à 30 % sont marquées en gras.

✓ Les vents de secteur E (C1, Figure 3) sont les plus fréquents (53 %, Tableau 1) et soufflent avec une vitesse et une direction moyenne de 5 m/s et 93 ° respectivement (C1, Figure 3 et Tableau 2). Ces vents oscillent autour du secteur E (± 10 °) avec des vitesses comprises entre 2.3 et 7.5 m/s (percentiles 10 et 90). Ils sont plus forts pendant la période de carême avec des vitesses moyennes de 5.38 m/s contre 4.44 m/s pendant la période d'hivernage.

✓ Les vents de secteur ESE (C4, Figure 3) représentent également une partie importante des caractéristiques des vents mesurés à la station du Lamentin (33 %, Tableau 1). Avec une vitesse et une direction moyenne de 5 m/s et 118 ° respectivement. Ces vents sont de même intensité que ceux décrits précédemment et se différencient principalement par une composante sud. Les vents d'ESE sont observés toute l'année (C4, Figure 3 et Tableau 2) mais sont plus fréquents en fin de carême (mars à mai) et pendant la saison cyclonique (septembre à décembre).

✓ Les vents de secteur ENE (C2, Figure 3) sont moins fréquents et représentent 10 % de la répartition des champs de vent (Tableau 1). Ces vents de composante nord sont caractérisés par une vitesse faible (2 m/s) et une direction moyenne de 65 °. Ils sont plus fréquents pendant la période d'hivernage et plus particulièrement entre septembre et novembre (C2, Figure 3 et Tableau 2).

 $\checkmark$  Les vents de secteur SO et de secteur NNE (C3 et C5, Figure 3) restent rares (2 % chacun, Tableau 1) et correspondent à des situations où le vent est faible et oscillant en direction.

# 2.2. LA BASE DE DONNEES HYDROSEDMAR, COURANTOLOGIE DANS LA BAIE DE FORT-DE-FRANCE

Entre 2016 et 2019, le programme HydroSedMar a permis de faire progresser significativement la connaissance des courants et de l'agitation de la baie de Fort de France en mettant en œuvre un modèle hydrodynamique sur une année complète, 2017, et pour quelques scénarios cycloniques (BRGM/RP-69025-FR, 2019).

## 2.2.1. La base de données (BDD HydroSedMar)

## a) Modèle et domaine de calcul

La modélisation de la circulation océanique fut réalisée avec le modèle 3D à surface libre CROCO (<u>https://www.croco-ocean.org</u>). Les équations primitives sont résolues avec l'hypothèse de Boussinesq et l'approximation hydrostatique. Les variables calculées sont le courant, la température, la salinité et le niveau d'eau. Le modèle hydrodynamique a été calibré et validé à partir de deux campagnes de mesures de plus d'un mois chacune en période de carême et d'hivernage.



Figure 4 : Carte bathymétrique de la baie de Fort-de-France. Les iso-contours sont illustrés en blanc tous les 100 m de profondeur.

Le domaine de calcul est composé d'une grille mère à une résolution de 200 m et d'une grille fille emboîtée sur la baie de Fort-de-France d'une résolution de 50 m. Pour la discrétisation verticale, CROCO utilise la coordonnée sigma généralisée (Shchepetkin, A. F., and McWilliams, 2005) discrétisée en 40 niveaux répartis entre la surface et fond. Cette configuration assure une bonne stabilité numérique.

b) Topo-bathymétrie

En compilant les données disponibles (Litto3D ©IGN-SHOM, HISTOLITT), un modèle topobathymétrique autour de la Martinique a été conçu. Les données les plus fines (LiDAR Litto3D) ont été extraites à 10 m de résolution puis assemblées (Figure 4). Les lacunes bathymétriques dans ces données ont ensuite été comblées grâce aux données HISTOLITT. Le centre de la baie est occupé par une zone d'eaux profondes (> 30 m) du banc Mitan à la baie de Génipa. Plus à l'est, les fonds restent compris entre 20 et 30 m dans la passe des Trois-îlets et ne remontent vraiment que dans la baie de Génipa.

c) Vent et pressions

Les données de vent et de pression utilisées pour forcer le modèle sont issues de la ré-analyse CFS-V2 (*Climate Forecast System*, NOAA, Saha et al., 2010). Les données sont disponibles toutes les heures à une résolution de 0.2 °. Afin de représenter au mieux les vents et notamment les cycles jour/nuit à l'intérieur de la baie, les données CFS-V2 sont ré-interpolées à 0.05° puis sont remplacées localement par les observations à la station du Lamentin.

d) Forçage hydrodynamique

Pour forcer les paramètres de température, salinité et de courant aux bords de la grille de calcul (permettant ainsi de prendre en compte les effets de circulations à plus grand échelle), le modèle global GOFS a été utilisé (basé sur le code de calcul HYCOM ; Bleck, 2002) avec assimilation de données basée sur NCODA, pour plus de détails, voir <u>https://www.hycom.org/dataserver/gofs-3pt1/analysis</u>). Ce modèle a une résolution temporelle journalière et une résolution spatiale d'environ 1/12°.

#### e) Marée et niveaux d'eau

La marée n'étant pas prise en compte dans les niveaux d'eau issus de GOFS, le signal de la marée issue du modèle global TPXO7.2 (Egbert, G. D. and Erofeeva, 2002) est rajouté au niveau d'eau fournit par GOFS. Le signal de marée est recomposé avec une série de Fourier classique à l'aide de la boite à outil CROCOTOOLS (cf. équation 3, Penven et al., 2008).

f) Débits des rivières

Afin de prendre en compte les apports hydriques des principales rivières débouchant dans la baie de Fort-de-France, des données issues d'une modélisation de type réservoirs (BRGM/RP-68883-FR, 2019) ont été utilisées. Cette approche permet d'estimer les volumes d'eau disponibles dans les cours d'eau et les aquifères de Martinique. Dans le cadre de cette étude, 5 bassins versants ont été utilisés pour calculer les débits journaliers des principales rivières se jetant dans la baie.

g) Validation du modèle

Les simulations des courants ainsi que de la température et de la salinité ont été comparées aux séries temporelles mesurées à différentes stations de mesure sur plusieurs semaines à différents moments de l'année. Le modèle mis en place montre un bon accord avec les mesures réalisées en carême ou en hivernage (BRGM/RP-69025-FR, 2019). Les ordres de grandeur et les variations spatio-temporelles de l'intensité et de la direction des courants sont correctement reproduits à l'entrée (Figure 5) comme en fond de baie. On note toutefois une sous-estimation des vitesses au fond en période d'hivernage, lorsque la colonne d'eau est fortement stratifiée (BRGM/RP-69025-FR, 2019).



Figure 5 : profils 3D de la vitesse et de la direction du courant au point de mesure situé dans le chenal Nord (point rouge) pendant la période de carême (mars 2017). A gauche, vitesse et direction du courant simulées avec CROCO. A droite, vitesse et direction du courant mesurées (Vincent, 2017a).

#### 2.2.2. Circulation générale dans la baie

Les différentes simulations réalisées au cours du projet HydroSedMar ont permis de mettre en évidence que les courants dans la baie de Fort-de-France dépendaient principalement des effets induits par le vent, la marée ou la stratification de la colonne d'eau (BRGM/RP-69025-FR, 2019).

✓ En surface, dans la couche de mélange, le courant se dirige globalement vers la sortie de la baie (Figure 6). Les eaux en provenance du fond de la baie (Baie de Génipa et Cohé du Lamentin) se dirigent préférentiellement vers le nord-ouest en suivant le sens du vent et la succession des hauts fonds. Les moyennes mensuelles les plus importantes (~20 cm.s<sup>-1</sup>) sont observées au nord de la baie (Grande Seiche, Banc Mitan et Baie des Flamands).

✓ Au milieu de la colonne d'eau, dans les secteurs peu profonds où toute la tranche d'eau est mélangée (principalement sur les bancs), le courant moyen se dirige également préférentiellement vers la sortie de la baie, entraîné par le vent (BRGM/RP-69025-FR, 2019). En revanche, dans les secteurs plus profonds, les simulations montrent un courant globalement rentrant avec une vitesse moyenne d'environ 10 cm.s<sup>-1</sup> dans le chenal principal.

 $\checkmark$  En bas de la colonne d'eau (près du fond), le courant moyen est plus chaotique et globalement plus faible que dans le reste de la colonne d'eau (BRGM/RP-69025-FR, 2019).

A noter que cette description correspond au mode de circulation dominant dans la baie qui peut subir des variations à l'échelle de la journée ou de quelques heures pour des conditions particulières (BRGM/RP-69025-FR, 2019).



Figure 6 : carte de l'intensité des courants de surface U (m/s) simulés par le modèle (BRGM/RP-69025-FR) le 26 mars 2017 par vent de SE (à gauche) et le 1 janvier 2017 par vent d'ENE (à droite). La direction des courants est représentée par les vecteurs et l'iso-contour marque une vitesse de 20 cm/s. La direction et la vitesse du vent est illustrée par la flèche en haut à droite.

## 2.3. LES DIFFERENTES SOURCES DE REJETS

#### 2.3.1. Définitions des principales sources de rejet

Les sources de rejets (ou émissaires) sélectionnées pour l'étude (STEU et rivières) sont celles présentant les flux organiques les plus importants. La localisation de chacun des rejets identifiés est représentée sur la Figure 1 tandis que leurs caractéristiques sont exposées dans le Tableau 3. En concertation avec l'ODE, la surface (S) et la profondeur (P) du panache à modéliser pour chacune des stations sont basées sur des observations réalisées sur site (e.g. Impact Mer, 2017).

#### 2.3.2. Caractérisation des panaches aux différents aux émissaires

Les caractéristiques des panaches à prendre en compte par le modèle peuvent varier selon la période de l'année et le scénario choisi. La surface des panaches à considérer est plus importante en période d'hivernage pour les rejets situés en sortie de rivière alors qu'elle reste identique pour les émissaires de type STEU (Tableau 3).

Afin de conserver une bonne représentativité des trajectoires des particules avec des temps de calcul raisonnables, le nombre initial de particules ( $N_{initial}$ ) qui compose le panache a été fixé à  $N_m = 5$  particules par maille du modèle. Plusieurs tests de sensibilité ont été réalisés afin de vérifier la bonne représentativité de la trajectoire des particules. D'après les tests réalisés ( $N_m$  variant entre 1 et 100), le choix de  $N_m = 5$  assure une bonne représentativité des trajectoires possibles de l'ensemble des particules au sein d'une maille (annexe 1). Lorsque la taille du panache est définie par une surface inférieure à celle d'une maille, le nombre de particules est fixé est  $N_{initial} = N_m$ . Ainsi, le nombre de particules composant le rejet a été estimé selon l'équation ci-dessous :

$$N_{initial} = \max\left\{\frac{S_{initial}}{dx \times dy} \times N_m, N_m\right\}.$$
(1)

L'approche proposée revient alors à considérer l'ensemble des rejets de la baie de Fort-de-France comme ayant une concentration en particules identiques. Seule la surface des panaches peut varier selon le rejet ou la période de l'année.

Type de rejet	Nom et commune	Caractéristiques	Saison sèche	Saison humide
		Surface (m <sup>2</sup> )	4	4
	Pointe des Nègres (Fort de France)	Profondeur (m)	80	80
STELL		Nombre de particules (N <sub>initial</sub> )	5	5
STEU		Surface (m²)	2	2
	Anse Marette (Les Trois llets)	Profondeur (m)	18	18
		Nombre de particules (N <sub>initial</sub> )	5	5
		Surface (m²)	50 000	2 000 000
	Rivière Lézarde (Le Lamentin)	Profondeur (m)	0-3	0-3
		Nombre de particules (N <sub>initial</sub> )	100	4 000
		Surface (m²)	30 000	1 000 000
	Rivière Salée (Rivière Salée)	Profondeur (m)	0-3	0-3
Rivière		Nombre de particules (N <sub>initial</sub> )	60	2 000
Riviere		Surface (m²)	10 000	500 000
	Rivière Madame (Fort-de-France)	Profondeur (m)	0-3	0-3
		Nombre de particules (N <sub>initial</sub> )	20	1 000
		Surface (m <sup>2</sup> )	10 000	500 000
	Rivière Monsieur (Fort-de-France)	Profondeur (m)	0-3	0-3
		Nombre de particules (N <sub>initial</sub> )	20	1 000

Tableau 3 : caractéristiques des panaches (état initial) selon la station et le scénario choisi.

# 3. Méthode pour caractériser la dispersion

## 3.1. APPROCHE GENERALE

Dans le cadre de cette étude, la caractérisation de la dispersion des particules en provenance de différentes sources de rejets dans la baie de Fort-de-France s'appuie sur la modélisation des courants et plus particulièrement du déplacement horizontal d'eau de mer dû aux effets combinés du vent, de la marée et des différences de température ou de salinité de l'eau. Les courants sont caractérisés par une direction et une vitesse sur une période donnée et ont la capacité de transporter certaines particules comme des nutriments ou bactéries issues des émissaires et de former des zones d'accumulations préférentielles à fort indice de pollution. Le suivi de particules a été effectué hors conditions cycloniques à partir de du jeu de données hydrodynamiques provenant du projet HydroSedMar (BRGM/RP-69025-FR, 2019, section 2.2).

Le paragraphe suivant (section 3.1) s'attache à définir les différents scénarios choisis pour la modélisation de la dispersion des particules. La section 3.2 présente le logiciel utilisé pour simuler le transport lagrangien des particules en se basant sur les forçages océanographiques issus de la BDD HydroSedMar. Enfin, la section 3.3 expose deux méthodes différentes pour une meilleure interprétation des résultats.

## 3.2. IDENTIFICATION ET DESCRIPTION DES SCENARIOS

En concertation avec l'ODE et l'Ifremer, quatre situations climatiques météorologiques (scénarios) ont été identifiées sur l'année 2017 :

- (S1) saison sèche avec vent fort (scénario 1) ;
- (S2) saison sèche avec vent faible (scénario 2) ;
- (S3) saison humide avec vent fort (scénario 3);
- (S4) saison humide avec vent faible (scénario 4).

La direction du vent va également jouer un rôle très important dans la direction des courants (Figure 6) et donc dans la propagation des particules issues des différentes sources de rejets. Le scénario choisi doit donc être également représentatif d'une situation habituelle en terme de direction des vents. Pour la période de carême et la période d'hivernage, les vents les plus représentatifs restent ceux provenant d'un secteur est (C1, Tableau 1).

Tableau 4 : les différents scénarios (7 jours) identifiés comme situations caractéristiques du climat de vent à proximité de la baie de Fort-de-France.

n°	Scénarios	Période (début)	Vent moyen	Classification (%)
S1	Carême (vent faible)	11-02-2017	4.1 m/s	C1 (66 %)
S2	Carême (vent fort)	02-03-2017	6.9 m/s	C1 (87 %)
S3	Hivernage (vent faible)	27-08-2017	3.2 m/s	C1 (59 %)
S4	Hivernage (vent fort)	16-10-2017	5.7 m/s	C1 (51 %)



Figure 7 : au-dessus - évolution temporelle de la vitesse du vent ( $W_v$ ) mesurée à la station du Lamentin pour la période de carême et d'hivernage en 2017. La courbe bleue représente la moyenne hebdomadaire ( $\overline{M}_{7j}$ ) tandis que les barres grisées illustrent l'appartenance des caractéristiques du vent à la classe C1 (Tableau 3).

#### 3.2.1. Scénarios en période de Carême (saison sèche)

La direction du vent pour les scénarios de carême (vent faible et vent fort) doit être représentative d'une situation habituelle, c'est-à-dire en provenance de l'est, proche de 93  $^{\circ} \pm 10^{\circ}$  (C1, Tableau 2). La définition de la vitesse du vent peut s'appuyer sur les valeurs des percentiles obtenus sur la classe C1. Pendant le carême, les percentiles 75 et 25 correspondent à des vents supérieurs à 6.80 m/s (vent fort) et inférieurs à 4.05 m/s (vent faible). Sur l'année 2017, en période de carême, deux scénarios ont donc pu être identifiés comme des situations habituelles et caractéristiques de la baie de Fort-de-France pour une situation en vent fort et en vent faible (Figure 7 et Tableau 4).

Pour le scénario S1, la période située entre le 11 et le 17 février (Figure 7) est caractérisée par un vent d'est faible (4.1 m/s en moyenne, Tableau 4), avec des vitesses et directions représentatives de la classe C1 (66 %, Tableau 4). Au cours de cette période, les débits des rivières restent modérés. Par exemple, quelques kilomètres en amont sur la rivière de la Lézarde, le débit journalier atteint moins de 25 % du débit moyen annuel (station n°40 Pont RN1, <u>http://hydro.eaufrance.fr/</u>).

Pour le scénario S2, la période située entre le 2 et le 8 mars (Figure 7) est dominée par un vent d'est fort (6.9 m/s en moyenne, Tableau 4), avec des vitesses et directions représentatives de la classe C1 (87 %, Tableau 4). Au cours de cette période, les débits des rivières sont légèrement supérieures à ceux décrits précédemment (e.g. 35 % du débit moyen annuel mesuré à station n°40 Pont RN1, <u>http://hydro.eaufrance.fr/</u>).

#### 3.2.2. Scénarios en période d'hivernage (saison humide)

Les conditions identifiées pour la période d'hivernage correspondent à des scénarii où les débits des rivières sont importants et où le vent provient d'un secteur E (C1, Figure 3 et Tableau 2) entre juillet et novembre. Les percentiles 75 et 25 correspondent respectivement à des vents supérieurs à 5.85 m/s (vent fort) et inférieurs à 2.90 m/s (vent faible) respectivement.

Pour le scénario S3, la période située entre le 27 aout et le 2 septembre (Figure 7) est caractérisée par un vent d'est faible (3.2 m/s en moyenne, Tableau 4), avec des vitesses et directions représentatives de la classe C1 (59 %, Tableau 4). Au cours de cette période, les débits

des rivières sont plus importants que pendant le carême (e.g. 100 % du débit moyen annuel mesuré à station n°40 Pont RN1, <u>http://hydro.eaufrance.fr/</u>).

Pour le scénario S4, la période située entre le 16 et le 22 octobre (Figure 7) est dominée par un vent d'est fort (5.7 m/s en moyenne, Tableau 4), avec des vitesses et directions représentatives de la classe C1 (51 %, Tableau 4). Au cours de cette période, les débits des rivières sont encore plus soutenus que ceux décrits précédemment (e.g. 200 % du débit moyen annuel mesuré à station n°40 Pont RN1, <u>http://hydro.eaufrance.fr/</u>).

### 3.3. MODELISATION DE LA DISPERSION

Cette étape consiste à réaliser le suivi de la propagation des particules en provenance de différents rejets (STEU et rivières) à partir des scénarios identifiés précédemment.

En physique, il existe deux façons de décrire les mouvements d'un fluide et celui des objets qu'il est susceptible de transporter. La différence entre ces deux méthodes réside principalement dans le point de vue adopté par l'observateur. L'approche Eulérienne permet la caractérisation du champ de vitesses qui associe à chaque point un vecteur vitesse. L'approche Lagrangienne consiste à suivre dans le temps les particules fluides le long de leurs trajectoires.

La méthodologie employée dans cette étude se décompose en deux étapes distinctes. Les champs de vitesse sont tout d'abord déterminés à partir des sorties numériques décrites en section 2.3. Par la suite, un ensemencement des champs de vitesse en particules virtuelles est réalisé suivant la localisation du panache initial (longitude, latitude, profondeur), sa surface (m<sup>2</sup>), sa concentration (nombre de particules) et constitue le point de départ au modèle de transport qui advecte les positions successives des particules virtuelles à partir de la description des courants marins fournie par les champs de vitesse.

Le logiciel utilisé pour effectuer ces simulations s'appelle Ichthyop (Lett et al., 2008) et consiste en un programme open source, développé avec le langage Java. Le programme permet de simuler le transport lagrangien de certaines particules en utilisant les forçages océanographiques produits par des modèles (e.g. courantologie) tels que celui mis en place dans le cadre du projet HydroSedMar (<u>https://hydrosedmar.brgm.fr/</u>). Le logiciel Ichthyop permet de suivre des dériveurs virtuels, entrainés par les courants, en enregistrant leurs positions au cours du temps.

L'exercice de modélisation proposé consiste à suivre la propagation des particules caractérisant les panaches schématiques définis par le Tableau 3. Il est important de rappeler que ces particules seront considérées par le logiciel lchthyop comme des dériveurs virtuels, c'est-à-dire comme des particules inertes dont la concentration ou les spécificités géochimiques ne sont pas considérées (durée de vie, vitesse de sédimentation, interactions avec l'environnement). Ainsi, les particules dont on simule le transport sont vues comme des particules d'eau. Le transport de particules est aussi réalisé dans ICHTHYOP par la résolution d'une équation d'advection, et tient également compte des processus de dispersion horizontale et verticale (Lett et al., 2008).

Afin de limiter les erreurs pouvant être provoqués par des instabilités numériques (notamment par petits fonds sur la vertical), nous fixons la densité des particules en sortie de rivière avec une haute capacité de flottaison afin de forcer le déplacement horizontal des particules en surface. En sortie de STEU, par plus grande profondeur, la densité des particules est fixée à 1 g.cm<sup>-3</sup> en supposant la dilution des particules dans l'eau douce en sortie de rejet.

A l'interface terre-mer, le mécanisme d'échouage n'est pas pris en compte. En effet, ne disposant pas d'une résolution suffisante pour permettre la différenciation de la typologie du littoral de la baie de Fort-de-France (secteur avec enrochement, falaises, plages, mangroves, côte rocheuses), les particules se déplacent avec les courants le long de la côte sur les mailles qui longent la frange littorale sans considérer les mécanismes d'échouages pouvant être associés. Enfin, l'action du vent sur la partie émergée des débris n'est pas prise en compte.

La durée des simulations a été fixée par l'ODE en concertation avec lfremer et s'appuie sur les caractéristiques de différentes sources de pollution. Basée sur l'hypothèse que les bactéries de type E. Coli (indicatrices de contamination fécale humaine ou animale) ont une durée de vie de quelques jours dans l'eau de mer et que la majorité des nutriments (dont les concentrations excessives peuvent avoir pour origine les rejets urbains) sont consommés peu après leur arrivée dans le milieu marin, la simulation de la propagation des particules issues du panache sera réalisée sur une durée maximale de 7 jours.

## 3.4. METHODE D'ANALYSE DES RESULTATS

#### 3.4.1. Répartition des particules au cours du temps

La caractérisation de la dispersion des particules à un instant *t* impose d'adopter une méthode permettant de visualiser de manière cohérente leur propagation au cours du temps (Figure 8). Pour cela, nous avons fait le choix de raisonner en termes de densités relatives (rapport entre le nombre de particule sur un secteur et le nombre de particule totale sur l'ensemble de la baie). La superficie des secteurs où est calculé ce rapport est fixée à 62 500 m<sup>2</sup> soit des cellules de 250 m de côté et représente un bon compromis entre une bonne représentativité de l'occupation des particules sur un secteur à un instant donné (Figure 8, à gauche) et les temps de calcul.

Soit  $n_{i,j}(t)$  le nombre de particules présentes au sein d'une cellule (i,j) à un instant (t) et  $N(t_0)$  le nombre total de particules présentes initialement sur l'ensemble du domaine. La densité D(i,j,t) relative de particules (%) dans une cellule (i,j) donnée à un instant (t) peut alors s'écrire comme le rapport suivant :

$$D(i, j, t) = \frac{n_{i,j}(t)}{N(t_0)} \times 100$$
(1)

D(i, j, t) vaut 0 % dans le cas où aucune particule n'occupe la cellule *i*, *j* (Figure 8, à gauche). Au contraire D(i, j, t) vaut 100 % si la totalité des particules sont concentrées sur cette cellule.



Figure 8 : simulation de la répartition des particules 9h30 après un rejet situé au niveau de la sortie de la rivière Lézarde. A gauche, densité relative en particules D(t) calculée en un instant t sur des cellules de 250 m de côté. A droite, densité continue  $\hat{D}(t)$  obtenue par méthode KDE (kernel density estimation).

De manière à faciliter l'interprétation visuelle, une méthode non-paramétrique d'estimation de la densité de probabilité a été également utilisée (Figure 8, à droite). L'estimation par noyau, ou encore méthode KDE (*kernel density estimation*) se base sur un échantillon d'une population statistique et permet d'estimer la densité  $\hat{D}(i, j, t)$  en tout point du support. En ce sens, cette méthode généralise astucieusement la méthode d'estimation par un histogramme et consiste à retrouver de la continuité (Figure 8, à droite).

#### 3.4.2. Répartition des particules au sein de chaque masse d'eau (MEC)

Le calcul de la densité relative de particules au sein de chacune des masses d'eau côtières (MEC, Figure 1) a été réalisé au cours du temps afin de discrétiser la sensibilité de chacune d'entre elle aux différents rejets. Ces calculs permettent notamment de mettre en évidence le temps d'évacuation des particules au sein d'une même MEC.

#### 3.4.3. Secteurs préférentiels d'accumulation des particules

Afin de déterminer les secteurs préférentiels d'accumulation des particules, la durée d'occupation relative  $D_{dt}(i,j)$  a été évaluée et correspond à la période relative sur laquelle un secteur est concerné par le transit ou la présence de particules au cours d'une période définie (dt). Soit  $D_{dt}(i,j)$  cette densité (%) au sein d'une cellule (i,j) et  $t_{i,j}(t)$  la durée sur laquelle une ou plusieurs particules sont présentes au sein de cette cellule pendant la période dt.  $D_{dt}(i,j)$  peut alors s'écrire comme le rapport suivant :

$$D_{dt}(i,j) = \frac{t_{i,j}(t)}{dt} \times 100 \tag{2}$$

Comme décrit précédemment, les calculs de densité ont été également réalisés sur une grille de 250 m de résolution. A titre d'exemple, la Figure 9 présente les secteurs préférentiels de dispersion des particules sur 24h suite à un rejet situé à l'embouchure de la rivière Lézarde. Les secteurs *i*, *j* où  $D_{24h}(i, j)$  excède 50 % correspondent à des zones ou les particules ont occupés l'espace plus de 12h. Au contraire, les secteurs où la proportion reste inférieure à 20 % correspondent à des zones où les particules ont occupé l'espace moins de 4h.



Figure 9 : secteur préférentiel de dispersion et d'accumulation des particules  $D_{24h}$  calculé sur 24h. Simulation de la répartition des particules depuis un rejet situé au niveau de la sortie de la rivière Lézarde.

# 4. Résultats

L'exercice de modélisation proposé consiste à suivre la propagation des particules provenant de différentes sources de rejet définies section 2.1.2. Il est important de rappeler que ces particules seront considérées par le logiciel lchthyop comme des dériveurs virtuels, c'est-à-dire comme des particules inertes dont la concentration ou les spécificités géochimiques ne sont pas considérées (durée de vie, vitesse de sédimentation, interactions avec l'environnement).

Les résultats ne devront pas être interprétés directement comme la propagation des panaches de pollution issus des rivières (ou des STEU) mais comme un premier diagnostic permettant la mise en évidence les secteurs sur lesquels le courant est susceptible d'entrainer les particules issues des différentes sources de rejets pour les scénarios considérés.

## 4.1. DISPERSION DES PARTICULES AU COURS DU TEMPS

La répartition des particules capturée à différents moments de la simulation (e.g. Figure 10) permet de suivre la trajectoire des dériveurs virtuels et de mieux caractériser leurs dispersions depuis chacune des sources de rejet. Les Figure 10, Figure 11, Figure 12 et Figure 13 illustrent la densité relative de particules  $\hat{D}(i, j, t)$  pour chaque scénario à  $t = t_0$ ,  $t = t_0 + 12h$ ,  $t = t_0 + 24h$  et  $t = t_0 + 36h$  où  $t_0$  correspond à une situation initiale avec un panache de particules circulaire présent en sortie de chaque source de rejet (e.g. Figure 10 en haut à gauche). La densité relative de particules au sein de chaque masse d'eau (MEC) est également illustrée au cours du temps.

Pour des situations météorologiques et hydrodynamiques habituelles (section 2.1.3), sur l'ensemble des simulations proposées (Figure 10, Figure 11, Figure 12 et Figure 13), on note l'évacuation des particules relâchées (32 % en moyenne, Tableau 5) depuis les zones de rejet (sorties de rivière, STEU) vers le large (secteur ouest de la baie) en quelques jours seulement (2.2 jours en moyenne, Tableau 5). On remarque que les deux caps que constituent la Pointe des Nègres ou la Pointe du bout limitent la dispersion des particules sur d'autres secteurs géographiques comme Schœlcher ou bien sur certaines plages du bourg des Trois îlets (Anse Mitan, Anse à l'âne, Anse Dufour) pour chacun des scénarios proposés.

Portées par les courants, les particules transitent depuis les MEC Baie Nord (MBN) et Baie de Génipa (MBG) jusqu'à la MEC Baie Ouest (MBO) en passant parfois par la MEC Nord-Caraïbes (MNC). Certains secteurs géographiques caractérisés par des morphologies particulières empêchent l'évacuation des particules vers le large comme la Pointe des Sables, la zone d'activité d'Etang Z'abricots au nord de la baie ou encore la Pointe de la Rose au niveau de l'extrémité Ouest de la Baie de Génipa.

Selon le scénario modélisé, la dispersion des particules à travers la baie de Fort-de-France est plus ou moins rapide (entre 1 et 4 jours) et exhaustive (entre 10 et 90 % des particules parviennent à être évacuées vers la sortie de la Baie). Les durées nécessaires pour atteindre une situation d'équilibre ( $\Delta t_f$ ) ainsi que les densités de particules restantes au sein de chaque masse d'eau sont décrits plus en détail sur le Tableau 5, mettant en évidence certaines disparités.

Scénario	$\Delta t_f$ baie de fort-de France	<i>D<sub>f</sub></i> baie de fort-de France	D <sub>f</sub> MEC baie Nord	<i>D<sub>f</sub></i> MEC baie de Génipa	D <sub>f</sub> MEC (baie Ouest)	D <sub>f</sub> MEC Anse d'Arlets	<i>D<sub>f</sub></i> MEC Nord Caraïbe		
S1 carême/vent faible	1.5 j	30 %	0 %	30 %	0 %	0 %	0 %		
S2 carême/vent fort	2.5 j	80 %	50 %	30 %	0 %	0 %	0 %		
S3 hivernage/vent faible	3 ј	13 %	12 %	1 %	0 %	0 %	0 %		
S4 hivernage/vent fort	1.8 j	32 %	22 %	10 %	0 %	0 %	0 %		
Moyenne	2.2j	38 %	21 %	17 %	0%	0 %	0 %		

Tableau 5 : caractéristiques de la dispersion des particules par scénario.  $\Delta t_f$  correspond à la durée nécessaire pour atteindre une situation d'équilibre.  $D_f$  est la densité de particules restante au sein d'une masse d'eau en fin simulation.

Le scénario le plus défavorable à l'évacuation des particules vers le large reste le scénario S2 (carême vent fort) avec 80 % des particules présentent initialement qui n'ont pas pu être expulsées en dehors de la baie de Fort-de-France (Tableau 5 et Figure 11). Le secteur le plus « impacté » sur ce scénario reste la MBN avec plus de 50 % des particules bloquées le long de la Pointe des Sables ou sur les secteurs de la zone d'activité d'Etang Z'abricots et de la baie du Carénage (Figure 11 à  $t = t_0 + 36h$ ). Pour ce même scénario, sur la MBG, la totalité des particules en provenance de rivière Salée n'ont pu être évacuées vers une autre MEC en raison d'un blocage au niveau de la Pointe de la Rose ou du Gros îlet.

De la même façon, au sein de la MBG, on remarque que l'évacuation des particules vers le large n'a pas été réalisée avec succès au cours de la simulation présentée pour situation de carême, vent faible (S1, Tableau 5 et Figure 10). La totalité des particules reste une fois encore bloquée par la pointe de la Rose et la Pointe Etienne (Figure 10 à  $t = t_0 + 36h$ ). Au contraire les particules présentes initialement dans la MEC baie Nord ont pu être évacuées vers le large en moins de 36 h en passant par la MEC baie Ouest (Figure 10).

Au cours des scénarios S3 (hivernage vent faible, Figure 12) et S4 (hivernage vent fort, Figure 13), la trajectoire des particules est similaire avec initialement une densité importante sur les MBN et MBG puis une dérive marquée vers l'ouest. En 24 h ( $t = t_0 + 24h$ ) une grosse partie des particules sont présentes sur la MNC pour être ensuite entrainées vers le large en passant plus au sud sur la MBO. Si l'évacuation des particules est réalisée plus rapidement pour le scénario S4 que pour le scénario S3 (1.3j et 3j respectivement) en raison de courants plus intenses, la dispersion des particules n'est pas totale au cours de chacune des périodes simulées. Pour le scénario S3, la quasi-totalité des particules a pu être évacuée depuis la MBG. Au contraire, environ 12 % des particules sont restées bloquées par le système de cap au sein de la MBN. De la même manière, pour le scénario S4, seulement 68 % des particules ont pu être évacuées vers le large. Une proportion conséquente du rejet initial à l'embouchure de la Lézarde a été stoppé par le système de caps au nord de la MBN.



Figure 10 : cartographie de la densité relative  $\hat{D}(i, j, t)$  de particules au cours du temps pour le scénario S1 (carême, vent faible) à  $t = t_0$ ,  $t = t_0 + 12h$ ,  $t = t_0 + 24h$  et  $t = t_0 + 36h$  (panneaux supérieurs). Les conditions de vent et de courant sont représentées à chaque instant par les vecteurs sur chacune des cartes. La proportion de particules au sein de chaque masse d'eau est illustrée au cours du temps (panneaux inférieurs).



Figure 11 : cartographie de la densité relative  $\hat{D}(i, j, t)$  de particules au cours du temps pour le scénario S2 (carême, vent fort) à  $t = t_0$ ,  $t = t_0 + 12h$ ,  $t = t_0 + 24h$  et  $t = t_0 + 36h$  (panneaux supérieurs). Les conditions de vent et de courant sont représentées à chaque instant par les vecteurs sur chacune des cartes. La proportion de particules au sein de chaque masse d'eau est illustrée au cours du temps (panneaux inférieurs).



Figure 12 : cartographie de la densité relative  $\hat{D}(i, j, t)$  de particules au cours du temps pour le scénario S3 (hivernage, vent faible) à  $t = t_0$ ,  $t = t_0 + 12h$ ,  $t = t_0 + 24h$  et  $t = t_0 + 36h$  (panneaux supérieurs). Les conditions de vent et de courant sont représentées à chaque instant par les vecteurs sur chacune des cartes. La proportion de particules au sein de chaque masse d'eau est illustrée au cours du temps (panneaux inférieurs).



Figure 13 : cartographie de la densité relative  $\hat{D}(i, j, t)$  de particules au cours du temps pour le scénario S4 (hivernage, vent fort) à  $t = t_0$ ,  $t = t_0 + 12h$ ,  $t = t_0 + 24h$  et  $t = t_0 + 36h$  (panneaux supérieurs). Les conditions de vent et de courant sont représentées à chaque instant par les vecteurs sur chacune des cartes. La proportion de particules au sein de chaque masse d'eau est illustrée au cours du temps (panneaux inférieurs).

#### 4.2. SECTEURS PREFERENTIELS D'ACCUMULATION DES PARTICULES

La répartition spatiale de la durée d'occupation relative des particules  $D_{72h}(i, j)$  permet de visualiser les trajectoires préférentielles de ces dériveurs virtuels et de mettre en évidence la sensibilité de certains secteurs susceptibles d'entrainer le blocage de leurs transit (Figure 14). La durée d'occupation relative correspond ici à la période relative (% au cours d'une période de 72h) sur laquelle un secteur est concerné par le transit ou la présence des particules (section 2.2.4c). Cette cartographie apporte une information quantitative de la sensibilité d'un secteur par rapport à une vision plus simple de la trajectoire des particules.

Pour l'ensemble des simulations présentées, avec une durée d'occupation relative supérieure à 20 % sur 72 h (soit supérieure à 14 h), le secteur le plus sensible à la présence de particules se situe le long de la frontière Nord de la Baie de Fort-de-France et plus généralement sur l'ensemble de la MBN. Au sein de cette masse d'eau, quatre sources de rejets potentiels ont été identifiées. Par conséquent, la majeure partie des particules (entre 70 et 80 %) provient initialement de cette masse d'eau et entraine une occupation plus importante de ce secteur de la baie de Fort-de-France. Au sein de la MBG, la passe des trois îlets représente également un secteur préférentiel de dispersion des particules qui proviennent de la rivière Salée.

La Figure 14 montre que certains secteurs géographiques situés au nord de la MBN favorise le blocage du transit des particules vers le large par leurs morphologies atypiques en forme de pointe ou de fond de baie (Pointe des Sables, zone d'activité d'Etang Z'abricots, baie du Carénage, Pointe des Nègres). De la même façon, au sein de la MBG, les secteurs de Gros îlets, la Pointe de la Rose, la pointe des trois-îlets, ou encore la Pointe Merle sur une zone de Mangrove constituent des points de blocage pour l'évacuation des particules vers le large.

Plus au large à la frontière entre la MBN et la MBG, pour une répartition initiale identique en situation d'hivernage, la durée d'occupation peut varier entre 20 et 40 % selon les scénarios vent fort ou vent faible (S3 et S4, Figure 14). Ces résultats mettent en évidence que la période sur laquelle des particules transit vers le large au sein du même secteur peut doubler selon la vitesse du vent et donc des courants de surface.

Là encore, la Figure 14 met en évidence le rôle majeur joué par la Pointe des Nègres ou la Pointe du bout sur la dispersion des particules qui restreint leur propagation au sein de la baie de Fortde-France et limite leurs progression sur les communes de Schœlcher ou des Trois îlets et notamment vers les secteurs de Anse Mitan, Anse à l'âne ou Anse Dufour qui ne sont pas touchés pour les scénarios considérés.



Figure 14 : secteur préférentiel d'accumulation des particules  $D_{dt}$  calculé sur 72h pour les scénario S1 (carême, vent faible), S2 (carême, vent fort), S3 (hivernage, vent faible) et S4 (hivernage, vent fort). La proportion (%) de particules indique la durée d'occupation des particules sur un même secteur (section 2.2.4c).

# 5. Discussion et conclusion

Entre 2016 et 2019, le programme HydroSedMar (<u>https://hydrosedmar.brgm.fr/</u>) a permis de faire progresser significativement la connaissance des courants et de l'agitation de la baie de Fort-de-France en mettant en œuvre un modèle hydrodynamique sur une année complète (BRGM/RP-69025-FR, 2019). Le modèle hydrodynamique a été calibré et validé à partir de deux campagnes de mesures de plus d'un mois chacune en période de Carême et d'Hivernage. Cet outil constitue un élément primordial pour l'étude de la dynamique sédimentaire de la baie de Fort-de-France. A partir de cet outil, l'exercice de modélisation proposé ici consiste à suivre grâce à une approche lagrangienne la propagation de particules issues de différentes sources de rejet. Ces particules sont considérées comme étant des dériveurs virtuels, c'est-à-dire des particules inertes dont la concentration ou les spécificités géochimiques ne sont pas prises en compte (durée de vie, vitesse de sédimentation, interactions avec l'environnement).

Portées par les courant, les particules transitent depuis les MEC Baie Nord (MBN) et Baie de Génipa (MBG) jusqu'à la MEC Baie Ouest (MBO) en passant parfois par la MEC Nord-Caraïbes (MNC). Pour les scénarios présentés, les résultats montrent que l'évacuation des particules depuis les émissaires vers la sortie de la baie de Fort-de-France est réalisée en quelques jours (en moyenne, environ un tiers des particules sont évacuées en 2 jours). On remarque que les deux caps que constituent la Pointe des Nègres ou la Pointe du bout limitent la dispersion des particules sur d'autres secteurs géographiques comme sur les communes de Schœlcher ou certaines plages des Trois îlets (Anse Mitan, Anse à l'âne, Anse Dufour).

Certains secteurs géographiques situés au nord de la MBN favorisent le blocage du transit des particules vers le large par leurs morphologies atypiques en forme de pointe ou de fond de baie (Pointe des Sables, zone d'activité d'Etang Z'abricots, baie du Carénage, Pointe des Nègres). De la même façon, au sein de la MBG, les secteurs de Gros îlets, la Pointe de la Rose, la pointe des trois-îlets, ou encore la Pointe Merle sur une zone de Mangrove constituent des points de blocage pour l'évacuation des particules vers le large.

Le scénario le plus défavorable à l'évacuation des particules vers le large reste le scénario S2 (carême vent fort) avec 80 % des particules présentent initialement qui n'ont pas pu être expulsées en dehors de la baie de Fort-de-France. Le secteur le plus « impacté » sur ce scénario reste le secteur nord de la baie.

Les résultats des simulations sont disponibles sous la forme de cartes au format SIG et images (png). Pour chacune des simulations réalisées, des cartes à plusieurs instants représentant la dispersion des particules ainsi que les zones préférentielles d'accumulation ont été produites. Les résultats de cette étude sont également présentés sous la forme d'animations qui seront mise en ligne sur le site de l'observatoire du littoral Martiniquais (<u>www.observatoire-olimar.fr</u>).

#### Limites sur l'utilisation des données produites :

Si les résultats communiqués dans ce rapport apportent de nouvelles perspectives, notamment concernant l'optimisation du réseau de suivi de la qualité de l'eau dans la baie de Fort-de-France, de nombreuses limites peuvent être mentionnées.

L'objectif de cette étude étant de mettre en évidence les trajectoires des particules issues des différents émissaires, la concentration (c'est à dire le nombre de particules présentes en surface sur la superficie du panache initial) n'a pas été différenciée par source de rejet et a été fixée schématiquement par  $N_m = 5$  particules par surface de 225 m<sup>2</sup> (cf. section 2.3). D'après les tests

réalisés, ce choix assure une bonne représentativité des trajectoires possibles de l'ensemble des particules mais ne permet pas de discerner directement les impacts d'un émissaire sur la qualité de l'eau. En effet, le nombre de particules rejetées par un émissaire dépend alors uniquement de la taille du panache initial. Ainsi, chaque source de rejet est considérée de manière schématique comme étant source de pollution potentielle avec des concentrations en particules équivalentes.

Afin de limiter les erreurs pouvant être provoquées par des instabilités numériques (notamment par petits fonds sur la vertical), la masse volumique des particules en sortie de rivière a été fixée de manière à forcer le déplacement horizontal des particules en surface. Ainsi les particules considérées pour l'exercice de modélisation n'ont pas la possibilité de couler ou d'être entrainées vers les couches plus profondes de la colonne d'eau. En réalité, les bactéries (e.g. E. Coli, indicatrices de contamination fécale humaine ou animale) ou les nutriments (dont les concentrations excessives peuvent avoir pour origine les rejets urbains) peuvent se retrouver en quantité parfois importante fixée au sein de particules sédimentaires dont les vitesses de chutes peuvent favoriser leurs présences pendant une durée limitée dans la colonne d'eau ou sur le fond.

A l'interface terre-mer, la complexité des mécanismes d'échouage n'est pas prise en compte par le modèle. En effet, ne disposant pas d'une résolution suffisante pour permettre la différenciation de la typologie du littoral de la baie de Fort-de-France (secteur avec enrochement, falaises, plages, mangroves, côte rocheuses), les particules se déplacent avec les courants le long de la côte sur les mailles qui longent la frange littorale sans considérer les mécanismes d'échouages pouvant être associés.

Comme présenté tout au long de ce rapport, la direction des courants joue un rôle majeur sur la dispersion des particules en dehors de la baie de Fort-de-France. Les simulations ont été réalisées pour des situations climatiques et hydrodynamiques habituelles et représentatives du fonctionnement de la baie de Fort-de-France. Néanmoins, les scénarios présentés ne couvrent pas toutes les possibilités de trajectoire des particules depuis les différentes sources de rejet. Des simulations complémentaires pour des conditions plus exceptionnelles (e.g. vent de secteur NNE ou SSE) permettraient certainement d'identifier de nouveaux secteurs pouvant être touchés par la présence de particules.

Les résultats ne peuvent donc pas être interprétés directement comme la propagation des panaches de pollution issus des rivières (ou des STEU) mais comme un premier diagnostic permettant la mise en évidence les secteurs sur lesquels le courant est susceptible d'entrainer les particules issues des différentes sources de rejets pour les scénarios considérés.

La compréhension de l'impact des rivières sur le fonctionnement hydro-sédimentaire de la baie de Fort-de-France reste un sujet complexe. La prise en compte du transport sédimentaire dans notre approche de modélisation reste un verrou essentiel et nécessite des efforts plus conséquents pour permettre une meilleure évaluation de la contribution relative de chaque rivière en matériel sédimentaire et en sources de pollution.

# 6. Références

- Bleck, R. (2002). An oceanic general circulation model framed in hybrid isopycnic-Cartesian coordinates. *Ocean Modelling*, *4*(1), 55–88. https://doi.org/10.1016/S1463-5003(01)00012-9
- BRGM/RP-68883-FR. (2019). Taïlamé, A.L. et Lanini, S. Définition des volumes prélevables en Martinique. Rapport final. BRGM/RP-68883-FR.
- BRGM/RP-69025-FR. (2019). S. Lecacheux, L. Arpaia, R. Pedreros, D. Idier, J. Louisor. Avec la collaboration de Franck Dumas (SHOM). Projet HYDROSEDMAR : Modélisation des états de mer et de la courantologie 3D dans la baie de Fort-de-France.
- Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, *19*(2), 183-204. https://journals.ametsoc.org/view/journals/atot/19/2/1520-0426\_2002\_019\_0183\_eimobo\_2\_0\_co\_2.xml
- Le Cozannet, G., Lecacheux, S., Delvallee, E., Desramaut, N., Oliveros, C., & Pedreros, R. (2011). Teleconnection Pattern Influence on Sea-Wave Climate in the Bay of Biscay. *Journal of Climate*, *24*(3), 641–652. https://doi.org/10.1175/2010JCLI3589.1
- Lett, C., Verley, P., Mullon, C., Parada, C., Brochier, T., Penven, P., & Blanke, B. (2008). A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. *Environmental Modelling & Software*, *23*(9), 1210–1214. https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2008.02.005
- Impact Mer (2017). Résultats du suivi hydrologique de la baie de Fort-de-France et du réseau de suivi des ports maritimes de Fort-de-France et du Marin (REPOM) au titre de l'année 2016. Rapport de synthèse. Rapport pour : ODE Martinique.
- Penven, P., Marchesiello, P., Debreu, L., & Lefèvre, J. (2008). Software tools for pre- and postprocessing of oceanic regional simulations. *Environmental Modelling & Software*, 23(5), 660–662. https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2007.07.004
- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Kistler, R., Woollen, J., Behringer, D., Liu, H., Stokes, D., Grumbine, R., Gayno, G., Wang, J., Hou, Y. T., Chuang, H. Y., Juang, H. M. H., Sela, J., ... Goldberg, M. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *91*(8), 1015–1058. https://doi.org/10.1175/2010BAMS3001.1
- Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (2005). The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. *Ocean Modelling*, 9(4), 347–404. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1463500304000484
- Vincent, L. (2017). Mesures hydro-sédimentaires dans le baie de Fort-de-France en Martinique, période de carême du 22/02/2017 au 04/04/2017. EON1496 Rapport HydroSed Careme\_2017.
- Vincent L. (2017). Mesures hydro-sédimentaires dans le baie de Fort-de-France en Martinique, période hivernale du 13/09/2017 au 18/10/2017. Rapport HydroSed Hivernage\_2017.



Annexe 1

Figure 15 : cartographie de la densité relative  $\hat{D}(i, j, t)$  de particules au cours du temps pour une simulation depuis un rejet situé au niveau de la sortie de la rivière Lézarde avec un panache initial de surface S = 50 000 m<sup>2</sup>. De haut en bas, simulations réalisées pour un nombre initial de particules  $N_{initial} = 20$ ,  $N_{initial} = 100$  et  $N_{initial} = 10 000$  (soit un nombre de particules par maille fixé par  $N_m = 1$ ,  $N_m = 5$  et  $N_m = 500$  respectivement). De gauche à droite, répartition des particules à  $t = t_0$ ,  $t = t_0 + 6h$ ,  $t = t_0 + 9h$ . La densité relative est strictement identique pour les simulations réalisées à  $N_{initial} = 100$  et  $N_{initial} = 10000$ 





Liberté Égalité Fraternité Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 Direction régionale de Martinique 4 lot. Miramar – Route Pointe des Nègres 97200 Fort-de-France Tél : 0596 71 17 70 www.brgm.fr