

# Projet Carib-Coast

## Tache 3 – Premières modélisations



## Rapport Final

Contrat RED-1693

### Siège social

36, quai de la Douane – 29200 Brest – France  
Tel : +33 298 44 24 51  
Email : [info@actimar.fr](mailto:info@actimar.fr) – Web : [www.actimar.fr](http://www.actimar.fr)

**ACTIMAR**  
Au service de la mer

## Suivi des modifications

Version	Modifications	Rédacteurs	Validation	Date
1.0	Version initiale	Aurélie Rivier Marc Pavéc	Jean-Pierre Mazé	30/07/2020
1.0	Prise en compte des remarques	Aurélie Rivier Marc Pavéc	Jean-Pierre Mazé	24/02/2020

## Liste de diffusion

Destinataire	Organisme
Pascal Lazure	Ifremer
Amélie Séchaud	Ifremer
Jean-Pierre Allenou	Ifremer

## Sommaire

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>CONSTRUCTION DE LA CONFIGURATION MARS 3D .....</b>	<b>7</b>
2.1	EMPRISES ET RESOLUTIONS .....	7
2.2	BATHYMETRIE .....	8
2.3	FORÇAGES.....	9
2.3.1	Forçages hydrodynamiques aux frontières ouvertes du domaine .....	9
2.3.2	Forçages atmosphériques .....	11
2.4	PROBLEMES D'INSTABILITES LIEES A LA PRESSION .....	11
2.4.1	Simulation 3 : 6 mois de simulation en 2D.....	13
2.4.2	Simulation 4 : 2D marée, pression, sans vent.....	13
2.4.3	Simulation 5 : 2D sans la marée.....	14
2.4.4	Simulation 6 : 2D, marée, vent, pression moyenne journalière .....	15
2.4.5	Simulation 7 : 3D, sans la marée, avec vent et pression.....	16
2.4.6	Simulation 8 : 3D, sans la marée, avec vent et "pression homogène spatialement".....	17
2.4.7	Simulation 9 : 2D, marée, forçage atmosphérique CFSv2 (vent + pression).....	17
2.4.8	Simulation 10 : 3D, marée, forçage atmosphérique CFSv2 (vent+pression).....	19
<b>3.</b>	<b>STRATEGIE DE VALIDATION DU MODELE .....</b>	<b>20</b>
3.1	PRINCIPE DE LA VALIDATION PAR PROCESSUS .....	20
3.2	LA METHODE DES CLUSTERS.....	20
3.2.1	Technique .....	20
3.2.2	Paramètres météo-océaniques.....	20
3.3	LES REGIMES DE VENT .....	21
3.3.1	Éléments bibliographiques .....	21
3.3.2	Résultats des clusters .....	21
3.4	HYDROLOGIE.....	23

3.4.1	Surface.....	23
3.4.2	Profondeur .....	24
3.5	COURANTOLOGIE.....	25
3.5.1	Circulation régionale.....	25
3.5.2	Circulation induite par le vent .....	26
3.5.3	Courants de marée.....	26
3.5.4	Analyse en clusters .....	27
3.6	HAUTEURS D'EAU .....	29
3.7	ONDES INTERNES .....	29
3.8	ANALYSE DES PROCESSUS PAR MODELISATION.....	29
3.8.1	Marée barotrope.....	30
3.8.2	Circulation régionale.....	30
3.8.3	Circulation atmosphérique.....	30
3.8.4	Marées internes .....	30
<b>4.</b>	<b>ANALYSE DES PROCESSUS DE MAREE .....</b>	<b>32</b>
4.1	RAPPEL DES MAREGRAPHES DISPONIBLES .....	32
4.2	COMPARAISONS EN HAUTEUR D'EAU.....	32
4.2.1	Guadeloupe.....	33
4.2.2	Martinique .....	36
4.2.3	Autres îles .....	37
4.3	CALCUL DE DEPHASAGE .....	41
4.3.1	Déphasage Modèle/mesure .....	41
4.3.2	Déphasage Nord-Sud.....	41
4.4	CARTES DE COURANT .....	42
4.4.1	Courant maximal .....	42
4.4.2	Courants autour de la Guadeloupe.....	43
4.4.3	Courants autour de la Martinique .....	45
<b>5.</b>	<b>ANALYSE DE LA CIRCULATION GENERALE .....</b>	<b>47</b>
5.1	SIMULATION EN SITUATION HABITUELLE.....	47

---

5.1.1	Guadeloupe : courant de surface .....	47
5.1.2	Guadeloupe : courant dans la colonne d'eau.....	48
5.1.3	Martinique : courant de surface .....	50
5.1.4	Martinique : courant dans la colonne d'eau .....	50
5.2	SIMULATION EN PRESENCE D'UN TOURBILLON.....	52
5.2.1	Guadeloupe.....	52
5.2.2	Martinique .....	54
5.3	CONCLUSION SUR LA CIRCULATION GENERALE .....	57
<b>6.</b>	<b>CIRCULATION INDUITE PAR LE VENT .....</b>	<b>59</b>
6.1	PRESENTATION DE LA SIMULATION .....	59
6.2	CARTES DE COURANT .....	59
6.3	IMPORTANCE DE LA CIRCULATION DUE AU VENT PAR RAPPORT A LA CIRCULATION REGIONALE .....	61
<b>7.</b>	<b>ANALYSE DU PHENOMENE D'ONDES INTERNES .....</b>	<b>63</b>
7.1	INTRODUCTION .....	63
7.2	ANALYSE SUR LE MOIS D'AOUT 2018.....	63
7.3	ANALYSE D'UNE SIMULATION SIMPLIFIEE .....	66
7.3.1	Oscillation de la thermocline.....	66
7.3.2	Force génératrice de la marée interne.....	67
7.4	EFFET SUR LES PROFILS DE VITESSE .....	68
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>71</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>72</b>

# 1. INTRODUCTION

---

Ce rapport présente l'ensemble des résultats de la tâche 3 du projet Carib-Coast.

L'objectif de la tâche 3 est de disposer de la configuration 3D complète du modèle, validée sur les principaux processus météo-océaniques de la région afin de disposer d'une description précise de ces phénomènes. Les quatre processus dominants qui ont été identifiés dans la zone sont :

- La marée
- La circulation régionale
- La circulation due au vent
- La marée interne

Dans un premier chapitre, la configuration mise en place avec le modèle Mars 3D est décrite, avec les choix qui ont conduit à la configuration finale. Dans un deuxième chapitre, une analyse des bases de données et de la bibliographie permet de dresser les grandes lignes de la circulation selon les quatre processus identifiés ci-dessus. Les chapitres suivants sont consacrés à la présentation des résultats du modèle sur les 4 processus identifiés ci-dessus.

## 2. CONSTRUCTION DE LA CONFIGURATION MARS 3D

### 2.1 EMPRISES ET RESOLUTIONS

La Figure 2-1 présente les emprises des différents rangs. Les frontières Ouest des rangs 0 et 1 sont localisés à l'Ouest de l'Aves Ridge pour favoriser la visualisation d'ondes internes. Comme des courants plus forts sont rencontrés aux niveaux des passages entre les îles, ces zones ont été évitées tant que possible lors du positionnement des frontières afin de limiter les problèmes de stabilité du modèle aux niveaux des frontières. C'est par exemple la raison pour laquelle les frontières Sud des rangs 1 et 2 traversent des îles de l'Arc des Antilles. Le Tableau 2-1 récapitule les caractéristiques des rangs.

Une discrétisation sigma généralisé à 30 couches est utilisée sur la verticale ( $\theta=6$ ,  $b=0$ ,  $hc=150$ ).

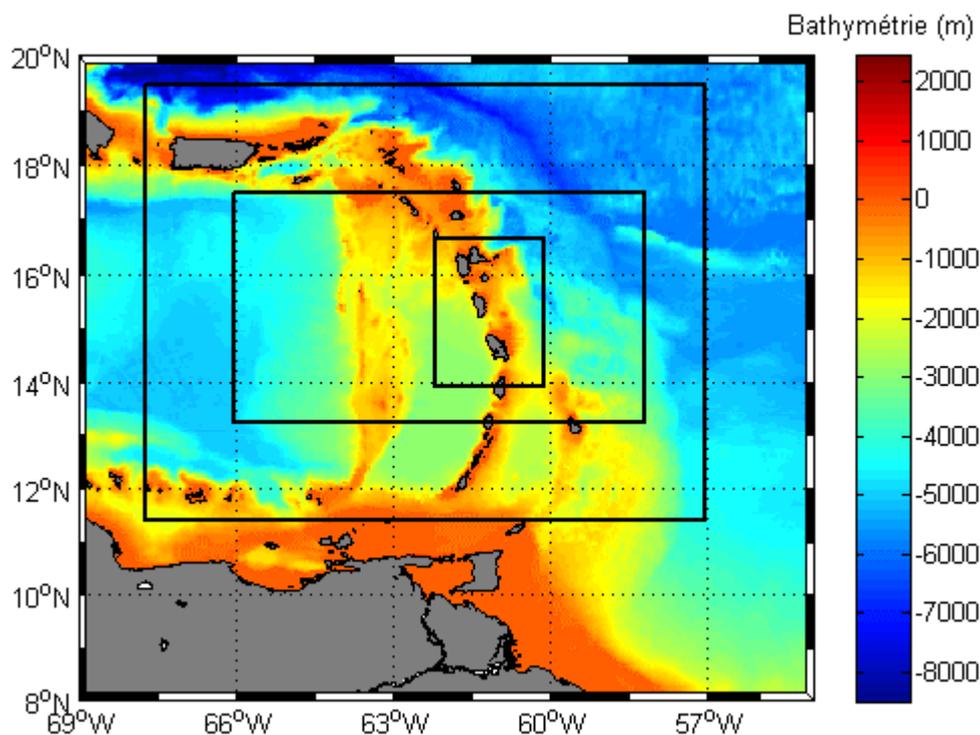


Figure 2-1 Emprises des différents rangs (rang 0, rang 1, rang). Fond de carte : bathymétrie GEBCO 2019.

Tableau 2-1 Caractéristiques des rangs

Rang	Résolution horizontale	2D-3D	Nombre de niveaux	Forçage aux limites	Nombre de cellules
Rang 0	4 km	3D	30	Modèle global (cf paragraphe Choix des forçages)	297x232
Rang 1	2 km	3D	30	Rang précédent	435x245
Rang 2	500 m	3D	30	Rang précédent	457x629

## 2.2 BATHYMETRIE

Les sources de données utilisées pour la bathymétrie sont :

- MNT bathymétrique de façade de la Guadeloupe et de la Martinique à une résolution de 0.001° (~ 100 m) du projet HOMONIM (2018)
- Données GEBCO 2019 (Global, résolution de 15-secondes d'arc)

Les données Litto3D, disponibles sur la zone, ont été prises en compte pour l'élaboration du MNT HOMONIM.

## 2.3 FORÇAGES

### 2.3.1 FORÇAGES HYDRODYNAMIQUES AUX FRONTIÈRES OUVERTES DU DOMAINE

A partir de l'inventaire des modèles hydrodynamiques de la tâche 2, plusieurs modèles sont susceptibles d'être utilisés aux frontières du rang 0.

Tableau 2-2 Caractéristiques des modèles hydrodynamiques présents dans la zone

Modèle	Résolution spatiale	Résolution temporelle	Marée	Nombre de couche
NCOM Amseas du FNMOC	1/30°	3h	Oui	40
HYCOM du FNMOC	1/12°	3h	Oui	40
HYCOM.org NRL	1/12°	3h	Non	40
Mercator GLOBAL ANALYSIS FORECAST PHY_001_024	1/12°	Moyenne journalière	Non	50
		Moyenne horaire	Non	Surface

Le modèle Mercator a été écarté car la résolution temporelle en 3D n'est pas assez précise.

Le modèle ayant la résolution spatiale la plus fine est NCOM Amseas. Cependant, la limite Est de ce modèle est -55°E, longitude relativement proche du rang 0 envisagé. Des effets de bord pourraient perturber les forçages.

A noter qu'il y a une nette différence concernant la distribution spatiale et l'intensité de la salinité de surface entre, d'un côté, le modèle NCOM et de l'autre, les modèles HYCOM, en particulier au mois de septembre, qui correspond à une saison où les panaches créés par de forts débits de l'Amazone et de l'Orénoque atteignent la zone d'étude. Les valeurs pour NCOM sont beaucoup plus faibles dans le sud du domaine. Les structures spatiales de salinité de surface visualisées sur des cartes obtenues par analyse de données satellite sont plus proches de celles obtenues avec les modèles HYCOM.

En comparant avec des mesures de balises ARGO (Figure 3), les modèles HYCOM sont en général meilleurs en surface par rapport à NCOM Amseas, (mais ce n'est pas toujours le cas). Le reste du profil est plus ou moins similaire.

La différence entre les deux modèles HYCOM est la prise en compte ou non de la marée. Le pas de temps de 3 h de ces modèles est trop grand pour prendre en compte correctement la marée.

Il a donc été choisi d'utiliser les résultats du modèle HYCOM.org du NRL (qui ne tient pas compte de la marée) pour imposer aux frontières ouvertes du rang 0 les profils de température, salinité, courant et d'élévation de la surface libre. Les variations du niveau liées à la marée sont ajoutées à partir d'une reconstitution des harmoniques de marée issues de la base FES2014.

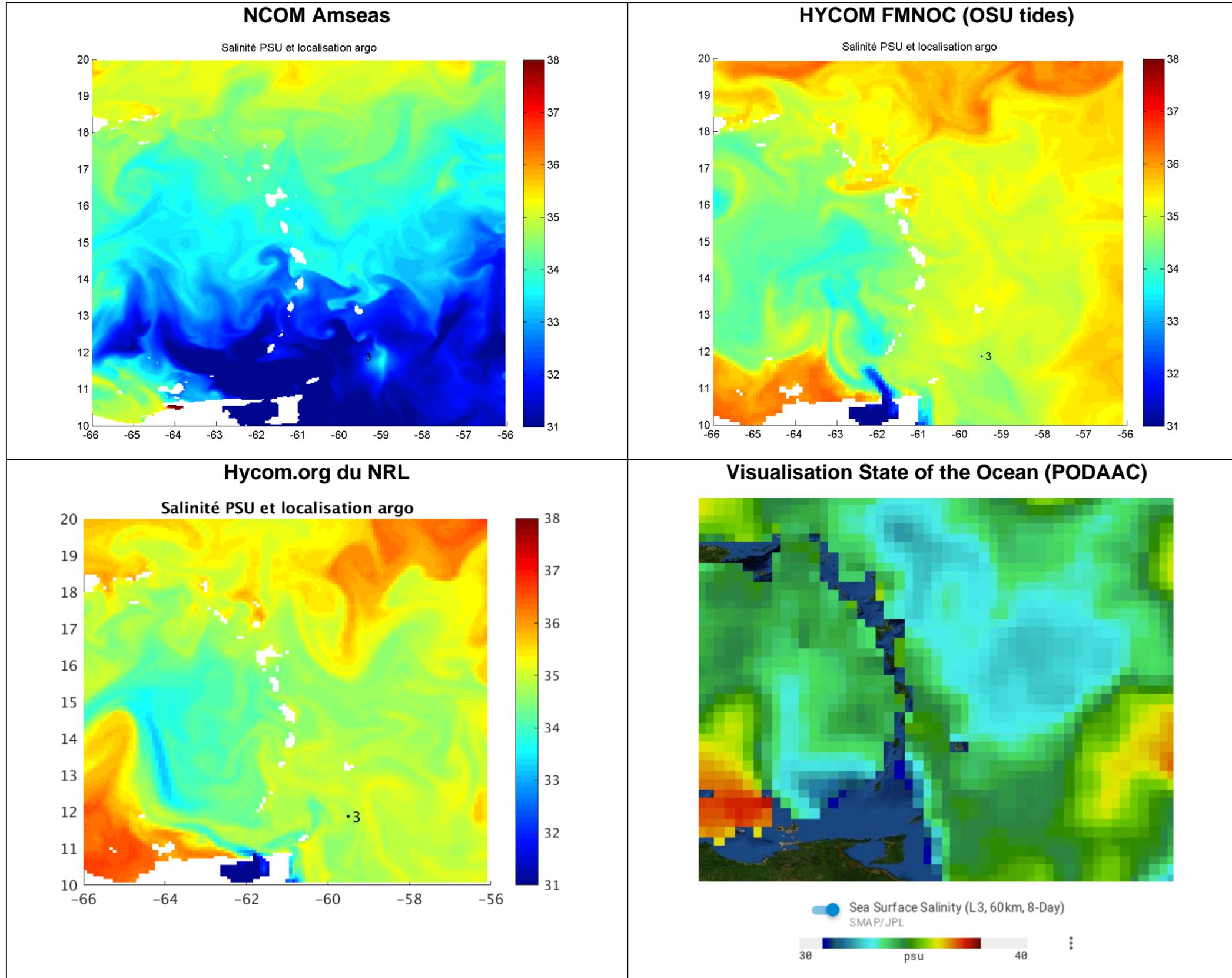


Figure 2-2 Exemples de cartes de salinité de surface dans la zone d'étude

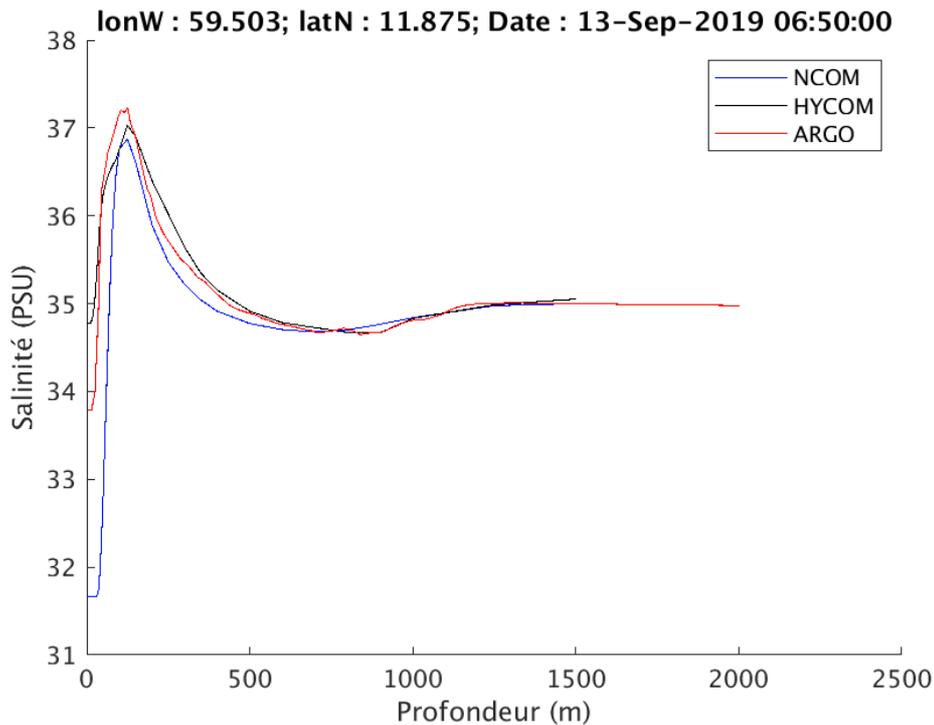


Figure 2-3 Exemple de profils de salinité modélisés par le modèle NCOM, HYCOM.org du NRL, et mesuré par une balise ARGO.

### 2.3.2 FORÇAGES ATMOSPHERIQUES

L'analyse des modèles atmosphériques faites en Tâche 2 fait ressortir deux sources de données intéressantes. Les tests préliminaires ont mis en avant le développement d'instabilités sur les niveaux d'eau lors de l'utilisation des pressions atmosphériques issues de ERA5 (ces problèmes sont décrits dans le chapitre suivant). Les modélisations seront donc menées avec la base de données CFS V2 (vitesse du vent à 10 m, pression atmosphérique au niveau de la mer, température et humidité relative à 2m, couverture nuageuse)

Tableau 2-3 Caractéristiques des modèles atmosphériques disponibles

Modèle	Résolution temporelle	Type	Producteur	Disponibilité
<b>CFS V2</b>	1h	Prévision/Analyse	NCEP	2011-Présent (CFSR avant)
<b>ERA 5</b>	1h	Réanalyse	ECMWF	1979-Présent

## 2.4 PROBLEMES D'INSTABILITES LIEES A LA PRESSION

Lors des premières simulations réalisées en 2D avec la marée et les forçages atmosphériques vent et pression, des oscillations sont apparues dans le signal de niveau d'eau lors de l'ajout de la pression atmosphérique. Ces oscillations sont très nettes sur les séries temporelles de niveau d'eau côté Mer des Caraïbes et sont plus perturbées coté Atlantique. Le calcul d'une transformée de Fourier des niveaux d'eau a précisé la période des oscillations qui est de 2.78h. Cette

oscillation ne paraissant pas physique, différents tests ont été menés. Une transformée de Fourier a été calculée en chaque point du domaine du rang 0 (Figure 2-4). Il ressort que cette oscillation est la plus forte entre l'arc des petites Antilles et le relief bathymétrique Aves Ridge. L'amplitude maximale de l'oscillation est autour de 25 mm dans la simulation Marée (FES2014) + vent + pression (ERA5). Toutefois elle est aussi présente dans la simulation marée seule, avec une oscillation environ 10 fois inférieure.

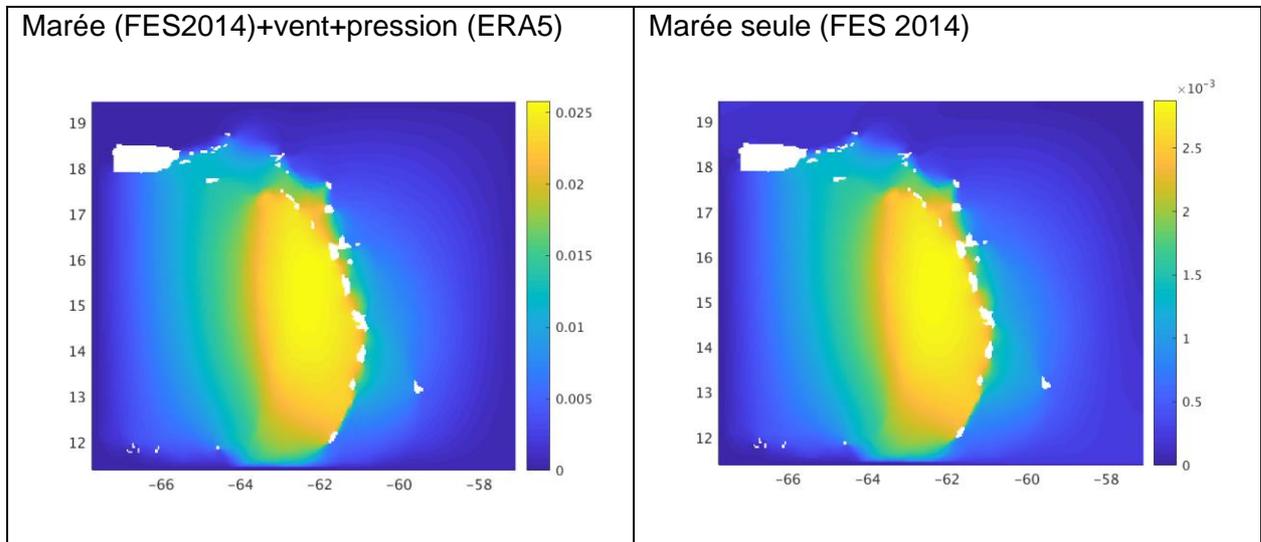


Figure 2-4 Amplitude de la composante de période 2.78 h obtenue à partir de la transformée de Fourier de la simulation marée+conditions atmosphériques ERA 5 (gauche) et marée seule (droite).

Les différentes simulations menées pour comprendre ces oscillations sont récapitulées dans le tableau suivant :

Tableau 2-4 Récapitulatif des simulations test

N°	Marée	Vents	Pression	2D / 3D	Durée simulation	Grille
1	FES 2014	-	-	2D	1 mois	Grille initiale
2	FES 2014	ERA 5	ERA 5	2D	1 mois	Grille initiale
3	FES 2014	ERA 5	ERA 5	2D	6 mois	Grille initiale
4	FES 2014	-	ERA 5	2D	1 mois	Grille initiale
5	-	ERA 5	ERA 5	2D	1 mois	Grille initiale
6	FES 2014	ERA 5	1 valeur / jour : Moyenne journalière ERA 5	2D	1 mois	Grille initiale
7	-	ERA 5	ERA 5	3D	1 mois	Grille initiale
8	-	ERA 5	Pression homogène spatialement ERA 5	3D	1 mois	Grille initiale
9	FES 2014	CFSv2	CFSv2	2D	1 mois	Grille initiale
10	FES 2014	CFSv2	CFSv2	3D	1 mois	Grille initiale

Le détail de ces tests est décrit dans la suite, pour illustrer les problèmes rencontrés.

### 2.4.1 SIMULATION 3 : 6 MOIS DE SIMULATION EN 2D

Cette simulation débute au 1er janvier 2018 au lieu du 30 mai 2018 pour les simulations 1 et 2. Les résultats au mois de juin sont similaires entre les simulations 2 et 3 (Les oscillations sont aussi présentes au cours des autres mois).

**=> Ce n'est pas un problème de stabilisation de modèle, il ne dépend pas de la période simulée**

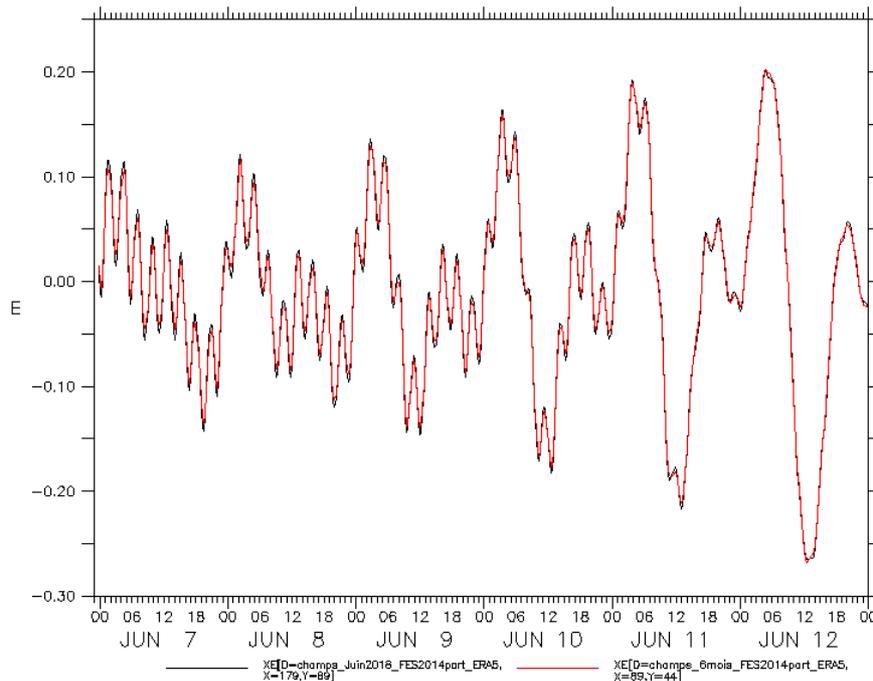


Figure 2-5 - Séries temporelles (extrait) des niveaux d'eau issus de la simulation 2 (noir) et 3 (rouge) au large de Fort-de-France.

### 2.4.2 SIMULATION 4 : 2D MAREE, PRESSION, SANS VENT

Dans cette simulation sans vent, les oscillations sont toujours présentes (Figure 2-6).

**=> C'est l'ajout de la pression qui est problématique.**

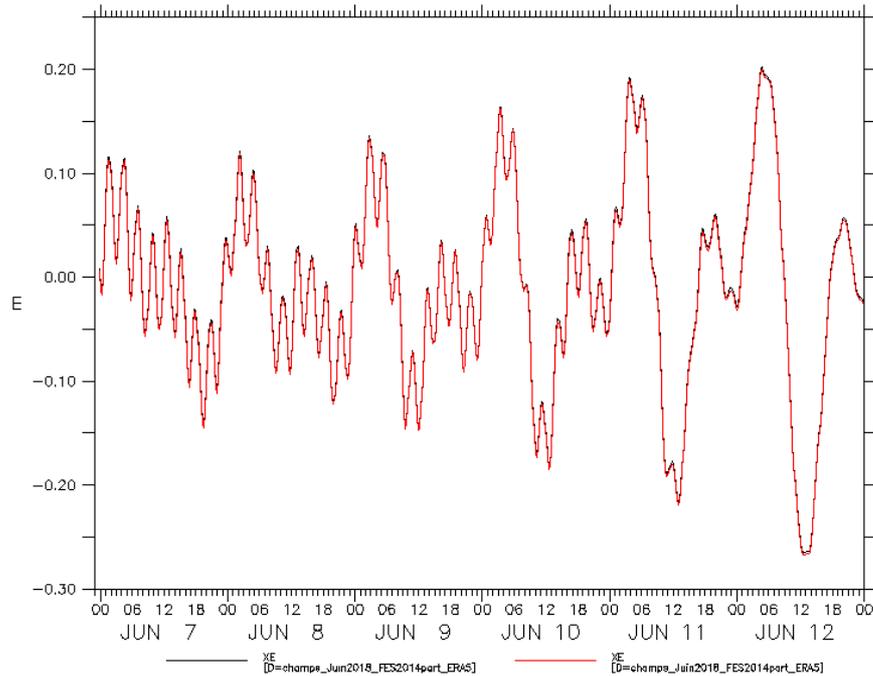


Figure 2-6 Séries temporelles (extrait) des niveaux d'eau issus de la simulation 2 (noir) et 4 (rouge) au large de Fort-de-France.

### 2.4.3 SIMULATION 5 : 2D SANS LA MAREE

On supprime le forçage en marée, les niveaux d'eau s'ajustent donc uniquement en fonction des paramètres météorologiques. Au niveau des frontières ouvertes, le signal semi-diurne des niveaux d'eau due aux variations de pression est bien reproduit mais l'oscillation de 2.75h est retrouvée à l'approche par l'Ouest de l'arc des Antilles (Figure 2-7). Le signal de niveau d'eau obtenu correspond à peu près à la différence entre les niveaux d'eau en "marée + vent + pression" (simulation 2) et les niveaux d'eau "marée seule" (Simulation 1)

**=> C'est bien la pression qui est problématique, ce n'est pas une quelconque interaction marée/pression.**

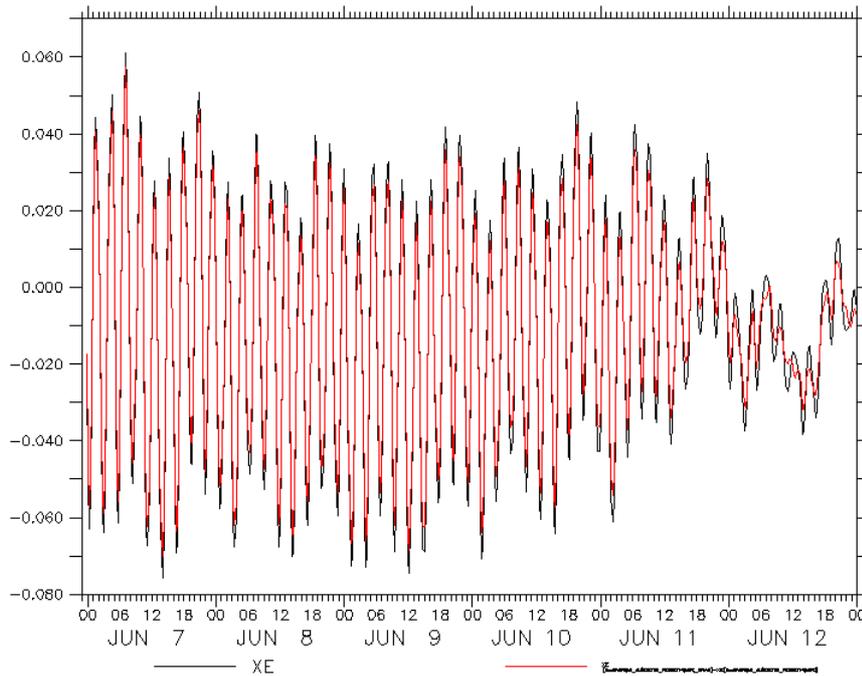


Figure 2-7 Séries temporelles (extrait) des niveaux d'eau issus de la simulation 5 (noir) et de la différence entre les niveaux d'eau des simulation 2 et 1 (rouge) au large de Fort-de-France.

#### 2.4.4 SIMULATION 6 : 2D, MAREE, VENT, PRESSION MOYENNE JOURNALIERE

On retient une seule valeur de pression par jour, appliquée à midi, correspondant à la pression moyenne journalière.

Les oscillations sont fortement diminuées par rapport à la simulation 2 mais restent toujours un peu présentes (Figure 2-8) de manière assez similaire au signal en marée seule (Simulation 1), légèrement plus marqué suivant les périodes.

**=> Les variations de la pression au cours de la journée semblent jouer un rôle**

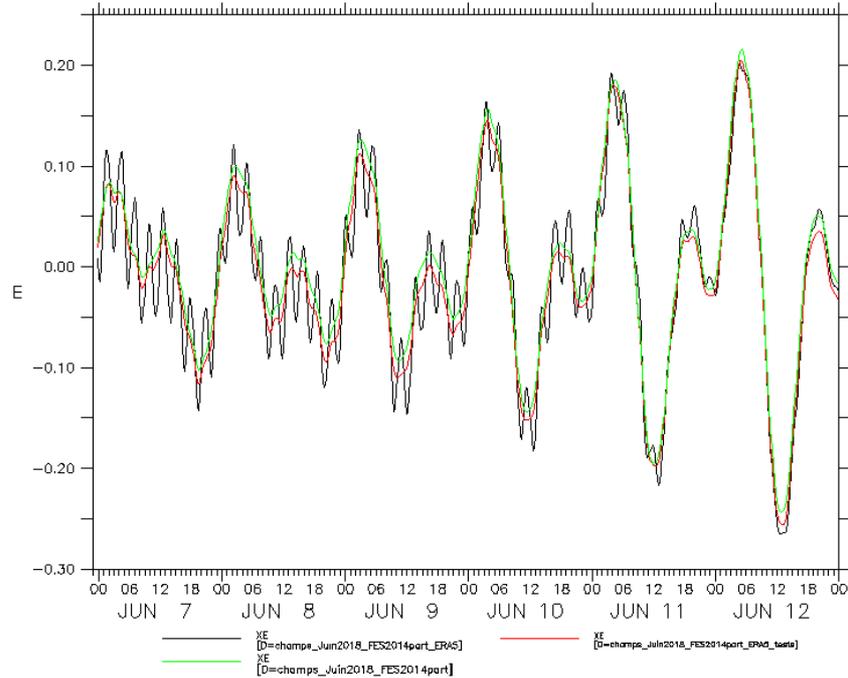


Figure 2-8 Séries temporelles (extrait) des niveaux d'eau issus de la simulation 2 (noir), 6 (rouge) et 1 (vert) au large de Fort-de-France.

### 2.4.5 SIMULATION 7 : 3D, SANS LA MAREE, AVEC VENT ET PRESSION

Les oscillations sont de même période que la simulation 5 mais leurs amplitudes sont plus faibles dans cette simulation en 3D (Figure 2-9) par rapport à la simulation en 2D (simulation 5).

**=> L'utilisation du modèle en 3D semble améliorer les choses**

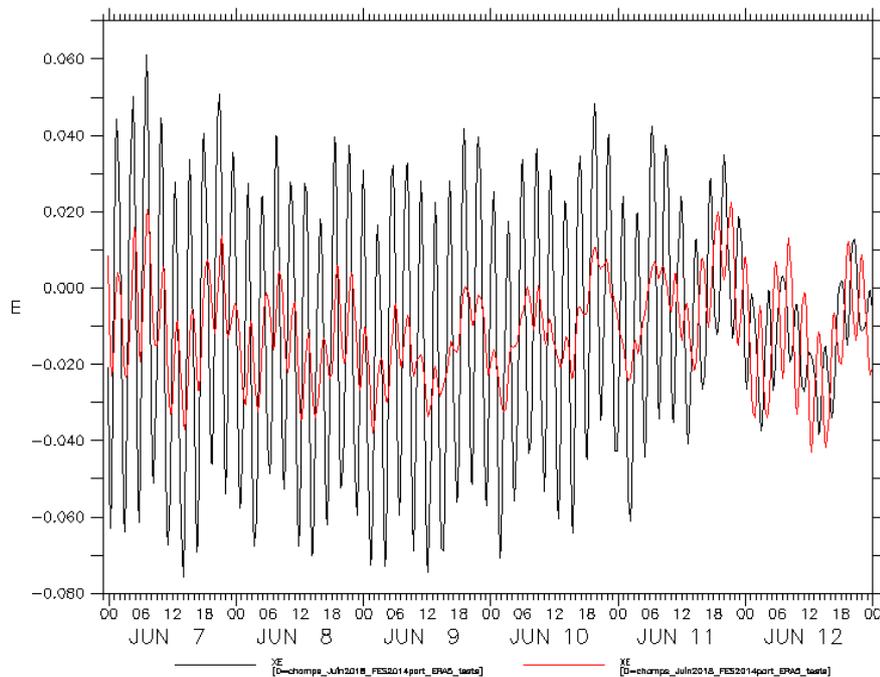


Figure 2-9 Séries temporelles (extrait) des niveaux d'eau issus de la simulation 5 (noir) et 7(rouge) au large de Fort-de-France.

### 2.4.6 SIMULATION 8 : 3D, SANS LA MAREE, AVEC VENT ET "PRESSION HOMOGENE SPATIALEMENT"

On considère la même valeur de pression sur tout le domaine, correspondant à la série temporelle de la pression au milieu du domaine. Les oscillations sont relativement similaires à celles du cas précédent (Figure 2-10)

**=> La variabilité spatiale de la pression ne semble pas agir significativement sur les oscillations.**

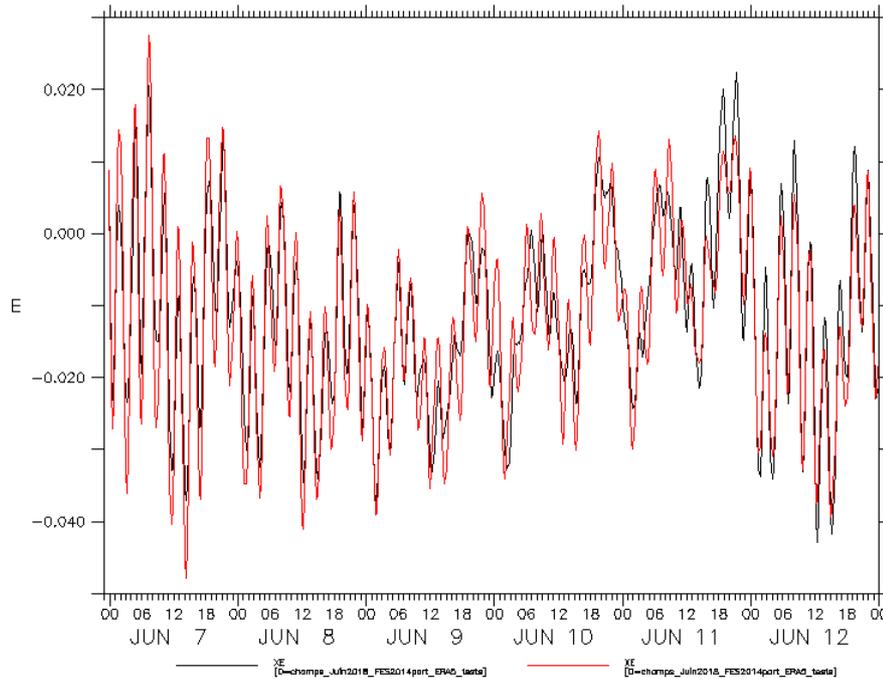


Figure 2-10 Séries temporelles (extrait) des niveaux d'eau issus de la simulation 7 (noir) et 8 (rouge) au large de Fort-de-France.

### 2.4.7 SIMULATION 9 : 2D, MAREE, FORÇAGE ATMOSPHERIQUE CFSv2 (VENT + PRESSION)

La série temporelle de niveau d'eau (Figure 2-11) présente de légères oscillations, un peu plus fortes que celles en marée seule 2D (Simulation 1), mais largement plus faibles qu'avec le forçage atmosphérique ERA5 (Simulation 2). L'analyse des champs de pression CFS et ERA5 sur la zone d'étude ne mettent pas en évidence de différences flagrantes qui permettraient d'expliquer cette différence de comportement (voir par exemple Figure 2-12). La seule différence qui pourrait expliquer cela est que la pression augmente près des îles dans ERA5, mais d'après les tests précédents, *a priori* la variabilité spatiale de la pression ne joue pas.

**=> L'utilisation du modèle atmosphérique CFSv2 semble améliorer les résultats, sans qu'il y ait une explication évidente à ce phénomène.**

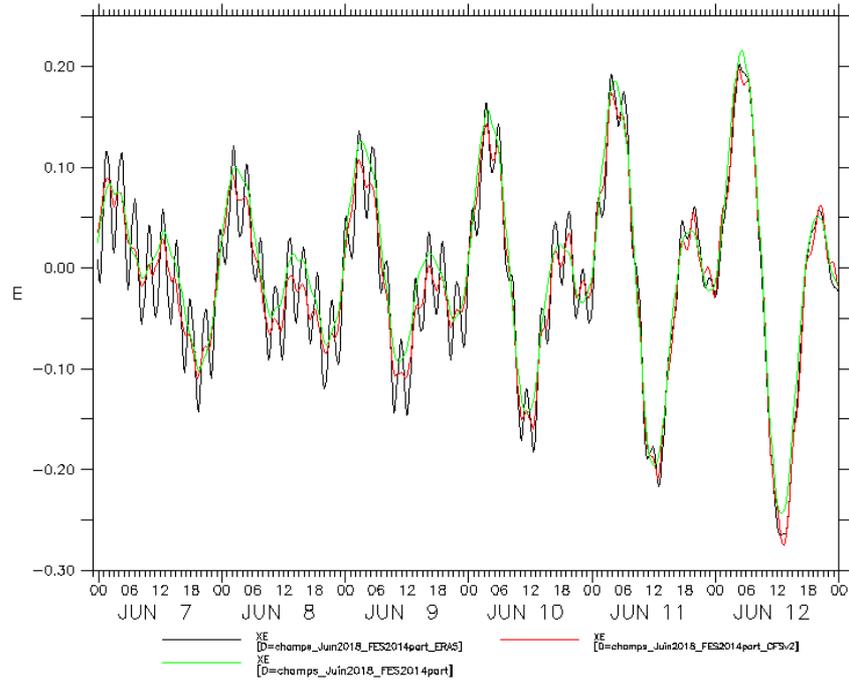


Figure 2-11 Séries temporelles (extrait) des niveaux d'eau issus de la simulation 2 (noir), 9 (rouge) et 1 (vert) au large de Fort-de-France.

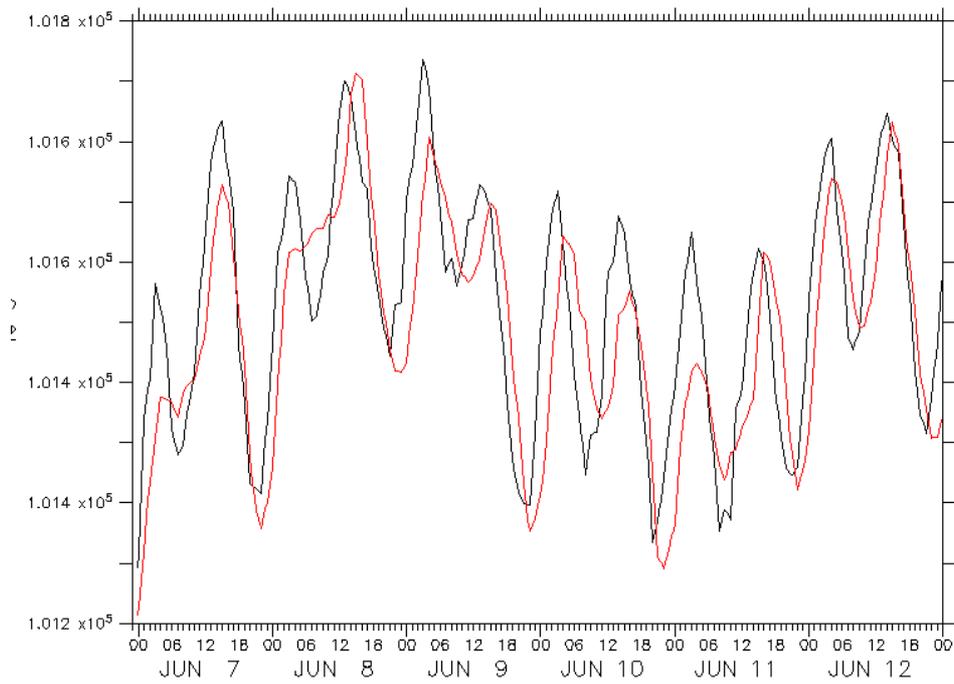


Figure 2-12 Séries temporelles de la pression atmosphérique au niveau de la mer issu de la base CFSv2 (noir) et ERA5 (rouge) au large de Fort-de-France.

### 2.4.8 SIMULATION 10 : 3D, MAREE, FORÇAGE ATMOSPHERIQUE CFSv2 (VENT+PRESSION)

Les résultats sont assez similaires qu'en 2D (Simulation 9) mais avec toutefois des oscillations plus lissées.

=> L'utilisation du modèle en 3D semble également améliorer les résultats aussi avec la base CFSv2.

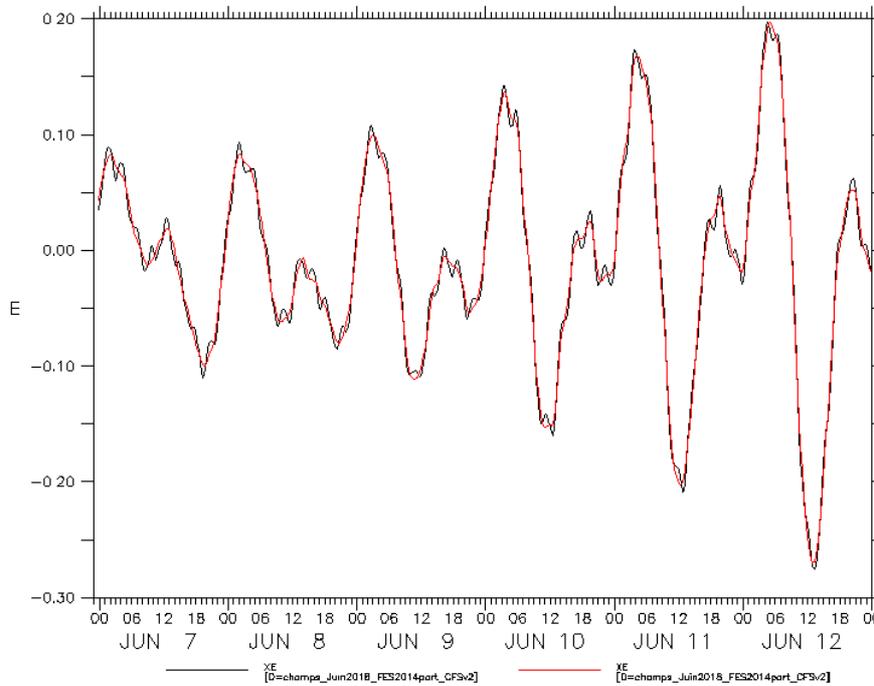


Figure 2-13 Séries temporelles (extrait) des niveaux d'eau issus de la simulation 9 (noir) et 10 (rouge) au large de Fort-de-France.

## 3. STRATEGIE DE VALIDATION DU MODELE

### 3.1 PRINCIPE DE LA VALIDATION PAR PROCESSUS

Quatre processus principaux ont été identifiés comme moteurs de la dynamique dans la région :

- La marée barotrope
- La circulation régionale
- La circulation due au vent
- Les ondes internes

La section suivante décrit chacun de ces processus, et propose une stratégie pour illustrer le comportement du modèle sur chacun d'eux. Cette stratégie sera ensuite mise en œuvre à la fois pour valider le modèle et pour qualifier le mieux possible ces processus.

### 3.2 LA METHODE DES CLUSTERS

#### 3.2.1 TECHNIQUE

L'analyse en clusters K-means vise à identifier un nombre défini (N) de situations les plus typiques d'une série d'observations (MacQueen 1967, Michelangeli et al 1995, Cassou 2008). Ces observations sont ainsi classées en N groupes (clusters), et chacun d'eux possède une signature typique (centroïde ou régime). Le critère de classement est basé sur la dissemblance (distorsion) entre les observations. Cette distorsion est calculée comme un écart quadratique. Par exemple, si une observation est une position géographique, la distorsion est une mesure de distance.

Le nombre de clusters (N) optimal dépend notamment de la variété des observations au cours du temps, et il est donc nécessaire de tester plusieurs valeurs. Au-delà d'un certain nombre, la méthode va distinguer des situations qui sont en réalité assez semblables, et une valeur plus faible devra alors être prise. Au final, la méthode nous fournit les situations typiques (centroïdes) et les dissemblances (distorsions) entre une observation et le centroïde qui lui est associé. Nous parlerons aussi de « régimes » météo-océaniques : un régime est la situation typique à laquelle appartient une observation (exemple : régime d'alizés forts).

#### 3.2.2 PARAMETRES METEO-OCEANIQUES

Dans la suite, les clusters sont calculés sur trois paramètres : le vent à 10m, la température de surface de la mer, et le courant de surface. Les données utilisées pour l'analyse proviennent des sources de données suivantes :

- Vent : rejeu ERA5
- Température de surface : Réanalyse Hycom
- Courant de surface : Réanalyse Hycom

Toutes les données sont analysées sur l'année 2018. L'analyse est faite sur des moyennes journalières, pour étudier des situations persistantes et identifier une ressemblance entre ces situations sur chaque jour de l'année.

Pour chacun des paramètres, une analyse bibliographique est présentée dans un premier temps, puis une analyse en clusters complète cette première analyse si ses résultats sont pertinents.

### 3.3 LES REGIMES DE VENT

#### 3.3.1 ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

La météorologie sur les Petites Antilles distingue deux saisons marquées : le Carême et l'Hivernage, séparés par deux intersaisons.

- Le Carême, de Février à Avril, pendant lequel la région est sous l'influence de l'anticyclone des Açores, est une saison sèche caractérisée par des alizés soutenus.
- L'Hivernage, du Juillet à Octobre, correspond à la remontée de la zone intertropicale de convergence (ZITC). Les alizés faiblissent, c'est une saison plus humide et plus perturbée.

Pour compléter cette description, un travail statistique de classification des régimes météorologiques sur les Petites Antilles a été réalisé par Météo-France (Morvan, 2011). Avec une technique statistique assez proche de la technique des clusters que nous utilisons dans la suite, quatre régimes spécifiques ont été identifiés :

- Alizés moyens (~6 m/s) : 60% des cas
- Alizés faibles (~3 m/s) : 10% des cas
- Alizés soutenus (~12 m/s) : 10% des cas
- Fortes perturbations pluvieuses (les fronts dépressionnaires, les ondes d'est, les cyclones, etc...) : les 20 % restants

Leur technique d'analyse ne se limitait pas aux champs de vent comme nous le faisons dans la suite, mais incluait également d'autres paramètres météorologiques tels que la vitesse du vent en altitude, la vitesse verticale et la divergence du champ de vent.

#### 3.3.2 RESULTATS DES CLUSTERS

Nous réalisons ici une analyse en clusters sur les champs bi-dimensionnels de vent à 10m.

La classification issue de la bibliographie suggère un classement en 3 ou 4 clusters. Les fortes perturbations pluvieuses évoquées dans la section précédente ne seront pas détectées comme un régime unique par notre analyse en clusters, car ce sont des phénomènes passagers transitoires, induisant une grande variabilité spatiale des vents sur la zone d'étude. Les régimes spécifiques issus d'une analyse à 3 clusters sont présentés sur les figures suivantes.

Cette analyse montre des champs de vents relativement uniformes spatialement. On retrouve les régimes suivants :

- un régime d'alizés modérés de 6 à 8 m/s, vents venant de l'Est à Est-Nord-Est, qui représente 62% des occurrences sur l'année 2018
- un régime d'alizés faibles (<5 m/s), avec des vents venant de l'Est, qui représente 27% des occurrences sur l'année 2018
- un régime d'alizés forts (> 10 m/s), avec des vents venant du Nord-Nord-Est, qui représente 10% des occurrences sur l'année 2018.

Comparés à la bibliographie, on retrouve bien l'occurrence de 60% d'alizés moyens et de 10% d'alizés forts. Les 30% restants sont considérés par notre analyse en clusters comme des alizés faibles, ce régime contient probablement les régimes perturbés évoqués précédemment.

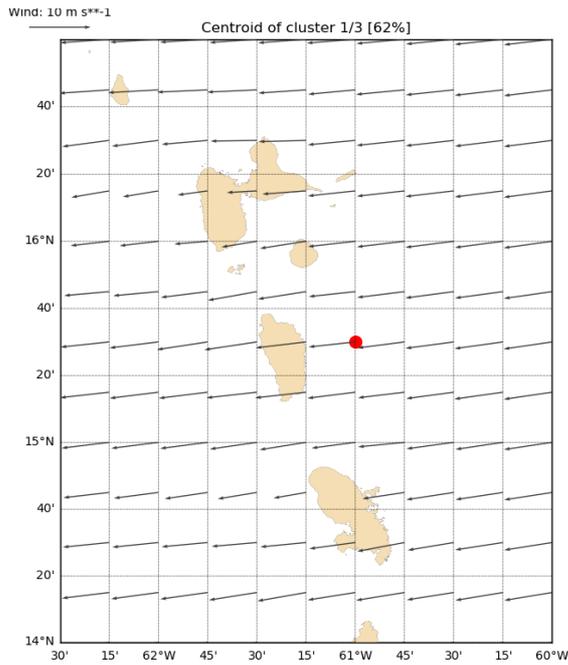


Figure 3-1 - Régime 1 : vent Est ~8 m/s

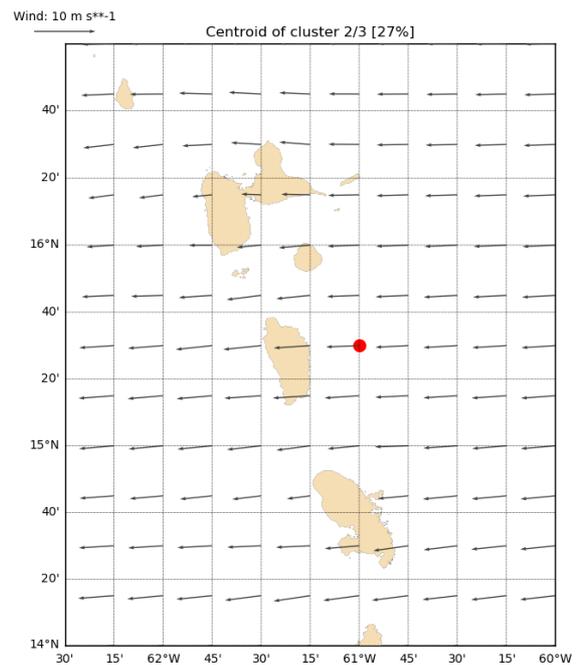


Figure 3-2 - Régime 2 : vent Est ~5 m/s

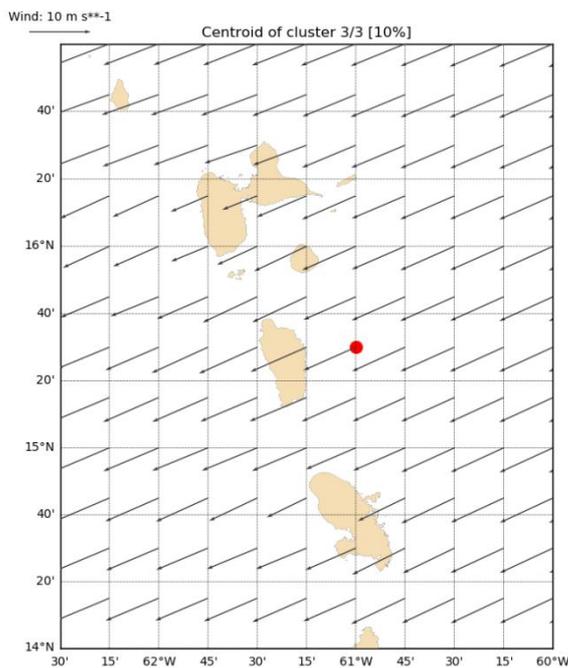


Figure 3-3 - Régime 3 : vent Nord-Nord-Est ~10 m/s

La Figure 3-4 représente la répartition sur l'année de ces 3 régimes de vent.

Le régime d'alizés forts est rencontré essentiellement en début d'année, pendant tout le mois de Février. Il correspond à une situation de Carême avec des alizés soutenus.

Le régime d'alizés moyen est très stable pendant les mois d'Avril à Septembre, qui englobe théoriquement l'intersaison et l'Hivernage. Cette période d'hivernage est bien identifiée comme une période où l'intensité des alizés diminue.

Le régime d'alizés faibles est beaucoup moins stable, et apparaît de manière transitoire entre les deux autres pratiquement toute l'année. Cette instabilité confirme qu'il comporte des situations moins établies que les deux précédentes, et qu'il peut donc possiblement contenir les 20% de perturbations recensées par l'analyse de Météo-France.

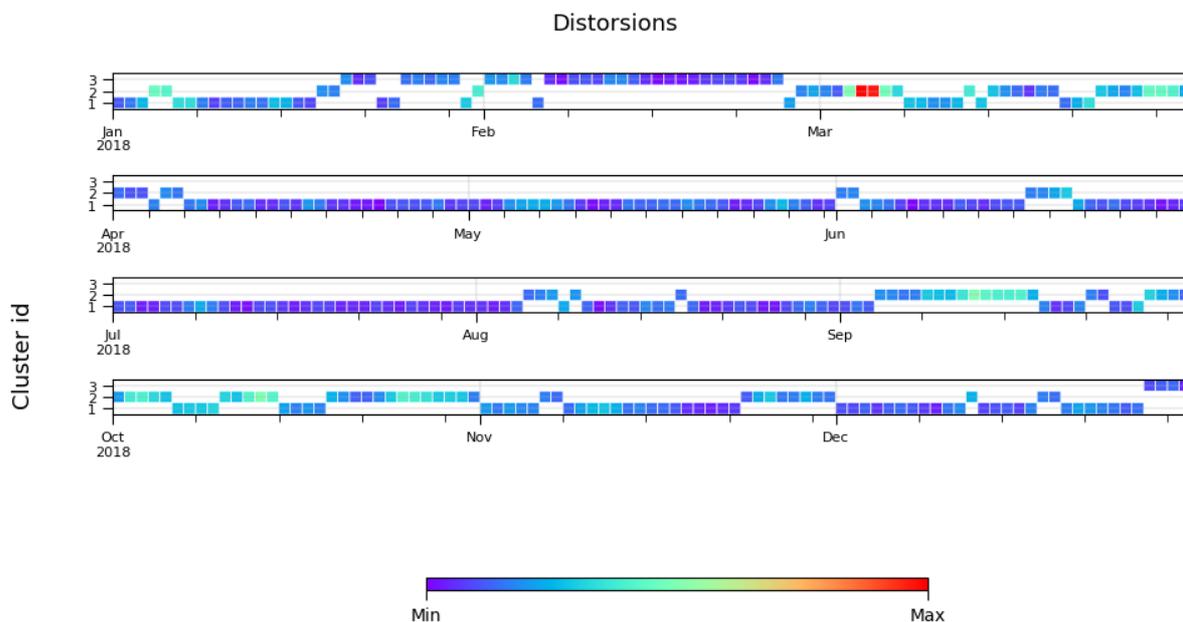


Figure 3-4 - Calendrier des 3 régimes de vent

### 3.4 HYDROLOGIE

#### 3.4.1 SURFACE

La température et la salinité de surface en zone Caraïbes suivent une variation saisonnière assez marquée, comme indiqué sur la Figure 3-5. Le comportement saisonnier est relativement homogène sur la zone d'étude, mais la figure révèle une variabilité temporelle importante, avec des échelles de temps de l'ordre de la semaine.

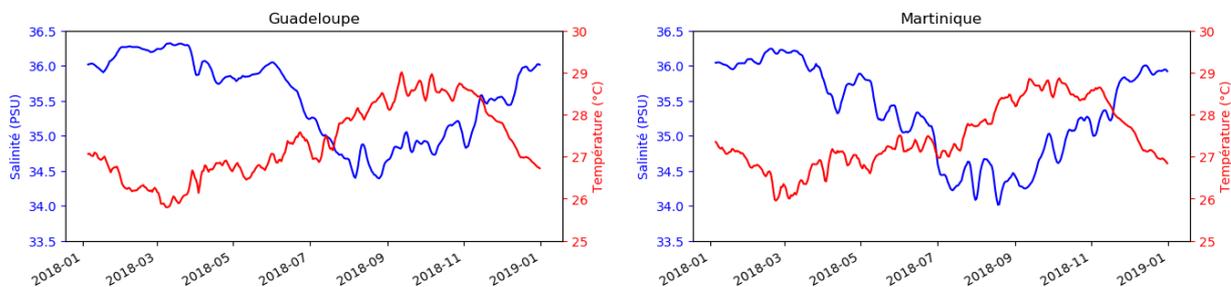


Figure 3-5 – Salinité (courbe bleue) et température (courbe rouge) au large de la Guadeloupe et de la Martinique (côté Atlantique) sur l'année 2018 d'après la ré-analyse HYCOM.

La salinité dans la zone est essentiellement déterminée par l'influence des fleuves Amazone et Orénoque. Ces panaches sont caractérisés par une dessalure significative et une température légèrement plus élevée (Chérubin et Richardson, 2007). Le débit de l'Orénoque est en moyenne 6 fois moins important que celui de l'Amazone, mais son embouchure est beaucoup plus proche de l'Arc Caraïbes, il a donc une influence prépondérante. La saisonnalité de l'hydrologie dans la zone est très directement liée à la saisonnalité des débits. Le maximum de débit de l'Orénoque se produit en moyenne au mois d'Août, et le maximum de l'Amazone en Juin. Leurs panaches sont donc plus étendus après les mois d'été, ce qui explique leur détection maximale aux mois de Septembre et d'Octobre au niveau des Antilles.

Le minimum de salinité est plus faible en Martinique qu'en Guadeloupe, probablement du fait de la position de l'île plus proche de l'embouchure de l'Orénoque.

Ces panaches sont accompagnés de structures méso-échelles (tourbillons, filaments...) qui provoquent les irrégularités observées sur les courbes de la Figure 3-5.

Le régime hydrologique en surface est donc très saisonnier, et est caractérisé par une activité turbulente de méso-échelle qui provoque des variations transitoires et localisées de la température et de la salinité.

L'analyse en clusters n'est pas pertinente pour faire ressortir de genre de fluctuations, elle n'est donc pas utilisée sur les paramètres de température et de salinité.

### 3.4.2 PROFONDEUR

La base GDEM est utilisée pour caractériser la température et la salinité sur la colonne d'eau. Les profils sont représentés sur la Figure 3-6.

On retrouve l'étalement important des salinités en surface selon la saison, et on note une très grande homogénéité des profils au-dessous de 50m.

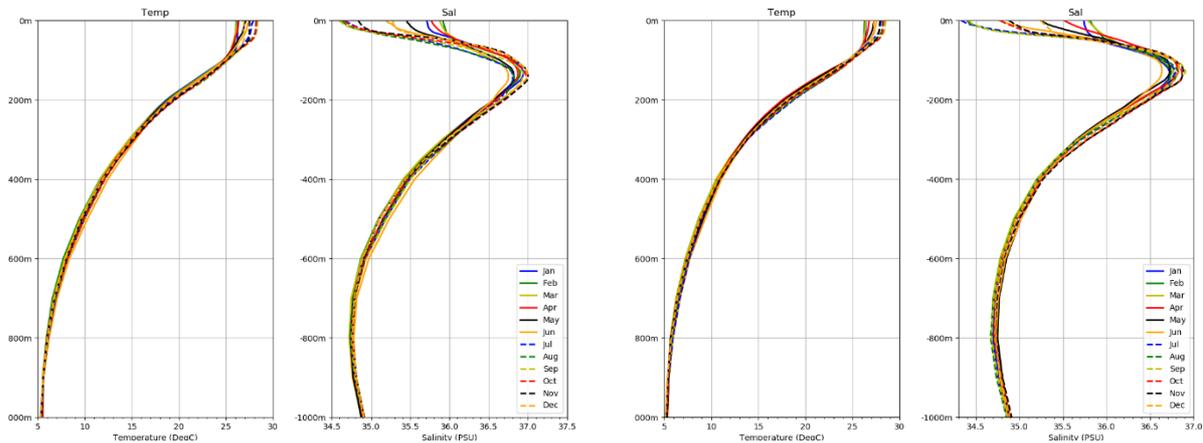


Figure 3-6 - Profils de température et de salinité issus de la base GDEM en Guadeloupe (à gauche) et en Martinique (à droite)

La température et la salinité de la zone d'étude ne varient donc qu'en surface, sous l'influence directe des panaches des fleuves.

### 3.5 COURANTOLOGIE

#### 3.5.1 CIRCULATION REGIONALE

L'Arc Caraïbes est à la frontière entre la mer des Caraïbes et l'Océan Atlantique, et est soumis essentiellement à la circulation Atlantique qui tend à le traverser.

Les Petites Antilles sont sous l'influence du courant Nord-Equatorial et du courant Nord-Brésilien (ou courant des Guyanes), représentés schématiquement sur la Figure 3-7. Le courant Nord-Equatorial induit un flux de provenance Est à Sud-Est qui se retrouve au large de la Martinique et de la Guadeloupe. Le courant Nord-Brésilien, après avoir longé la côte, entame une rétroflexion vers l'Ouest entre 6 et 8°N (Frantantoni and Richardson, 2006). Dans cette zone, se forment de grands tourbillons anti-cycloniques qui atteignent épisodiquement le Sud des Petites Antilles. Ces tourbillons ont un diamètre qui peut excéder 450km, avec des vitesses associées de l'ordre de 1 m/s.

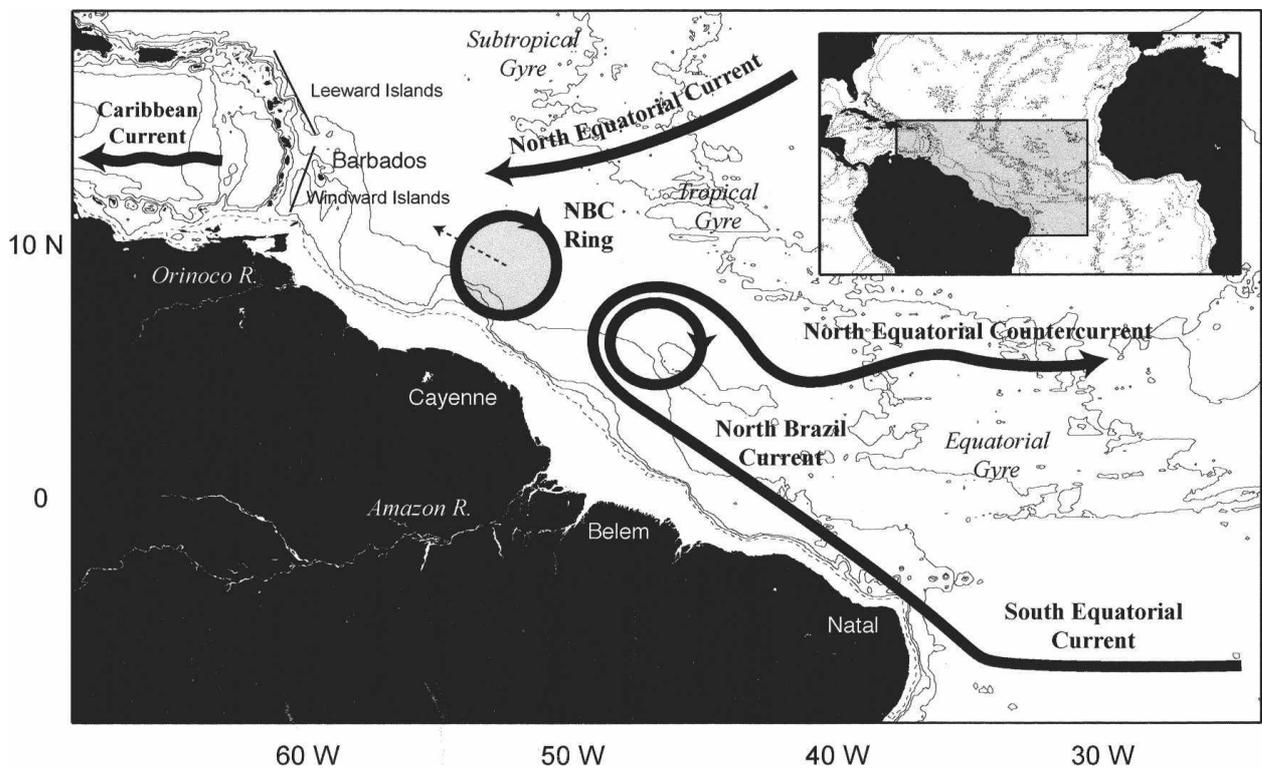


Figure 3-7 Description schématique de la courantologie dans l'ouest de l'océan tropical Atlantique (Frantantoni and Richardson, 2006).

Johns et al (2001) se sont intéressés au flot traversant les îles Caraïbes depuis l'Atlantique. Ils établissent que ce flot est maximum au Printemps et en Été, minimal en Automne. On peut donc s'attendre à un courant entrant dans le domaine par l'Est avec une variation annuelle de son intensité.

Le Sud de la zone d'étude peut être influencé par les tourbillons issus du courant Nord-Brésilien. Ces situations transitoires devraient toucher en priorité la Martinique située plus au Sud, mais les effets de ces tourbillons peuvent se faire sentir jusqu'en Guadeloupe. La Figure 3-8 présente l'évolution d'un tel tourbillon pendant l'hiver 2018. Ce tourbillon se déforme à l'approche de l'arc antillais et induit des vitesses de courant relativement élevées en direction du Nord le long de la côte au vent des petites Antilles.

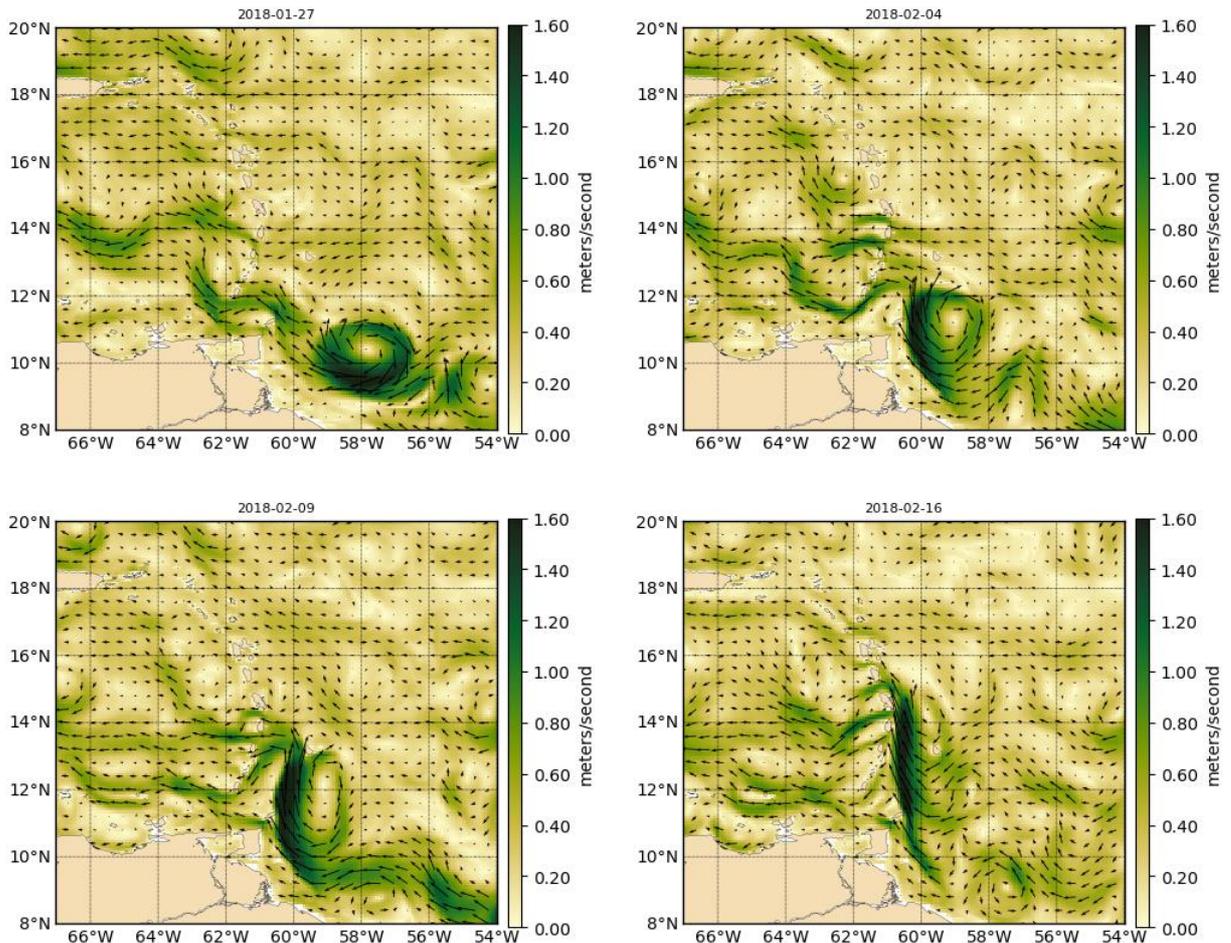


Figure 3-8 - Evolution d'un tourbillon issu du courant Nord-Bésilien entre Janvier et Février 2018 dans HYCOM.

### 3.5.2 CIRCULATION INDUITE PAR LE VENT

Le régime de vent est très stable comme démontré par l'analyse présentée plus haut. Les alizés agissent dans le même sens que les courants Atlantiques, la circulation induite par le vent au large sera donc indissociable de cette circulation à grande échelle.

### 3.5.3 COURANTS DE MAREE

La circulation régionale décrite précédemment est modulée localement autour de chacune des îles, en fonction de la marée et de la forme de la côte. Pujos et al (1992) décrivent ainsi les courants induits par la marée :

#### En Guadeloupe

A marée montante, un courant de secteur Est à Sud-Est longe la côte au Nord de l'île. Au large de Grand-Cul-de-Sac Marin, il s'oriente localement au Nord-Ouest. Au Sud de l'île, entre les Saintes et Marie Galante, il est orienté au Sud-Est. Sur les côtes atlantique et Caraïbe, la direction est inverse : Nord-Nord-Ouest au vent, Sud à Sud-Sud-Est sous le vent.

A marée descendante, le courant est Nord-Ouest puis Est au large du Grand-Cul-De-Sac-Marin. Entre les Saintes et Marie-Galante, il s'oriente au Sud-Ouest. Sur les côtes Atlantique et Caraïbes, les directions sont opposées : Sud-Est sous le vent, Nord-est au vent.

#### En Martinique

On ne distingue pratiquement pas le flot du jusant. Dans les deux cas on observe une circulation dans le sens inverse des aiguilles d'une montre autour de l'île.

Pour les deux îles, les courants de marée sont du même ordre, et sont très faibles. Les courants moyens sont de l'ordre de 0.1 m/s, avec des maxima dépassant légèrement 0.3 m/s localement.

### 3.5.4 ANALYSE EN CLUSTERS

L'analyse en clusters peut déterminer des conditions classiques récurrentes. Comme l'analyse est faite sur des moyennes journalières, elle ne détectera pas les courants dus à la marée. Les situations « inhabituelles » induites par des tourbillons issus du courant Nord-Brésilien seront probablement mal détectées, car elles sont transitoires et variables spatialement. Le résultat principal attendu de l'analyse en clusters est donc une analyse de la variabilité du flot Atlantique qui traverse le chapelet d'îles de l'arc Antillais.

Les résultats de l'analyse en 3 clusters sont présentés dans la suite.

La Figure 3-9 présente le calendrier de répartition des clusters sur l'année 2018. Ce calendrier indique que seul le cluster n°1 est réellement stable avec des situations journalières s'éloignant peu de la situation nominale. Quand les 2 autres situations sont rencontrées, les distorsions à la situation nominales sont toujours importantes, ce qui signifie que cette situation nominale est assez peu représentative. Cette situation est quasi-systématique et se retrouve dans tous les calculs, quel que soit le nombre de clusters.

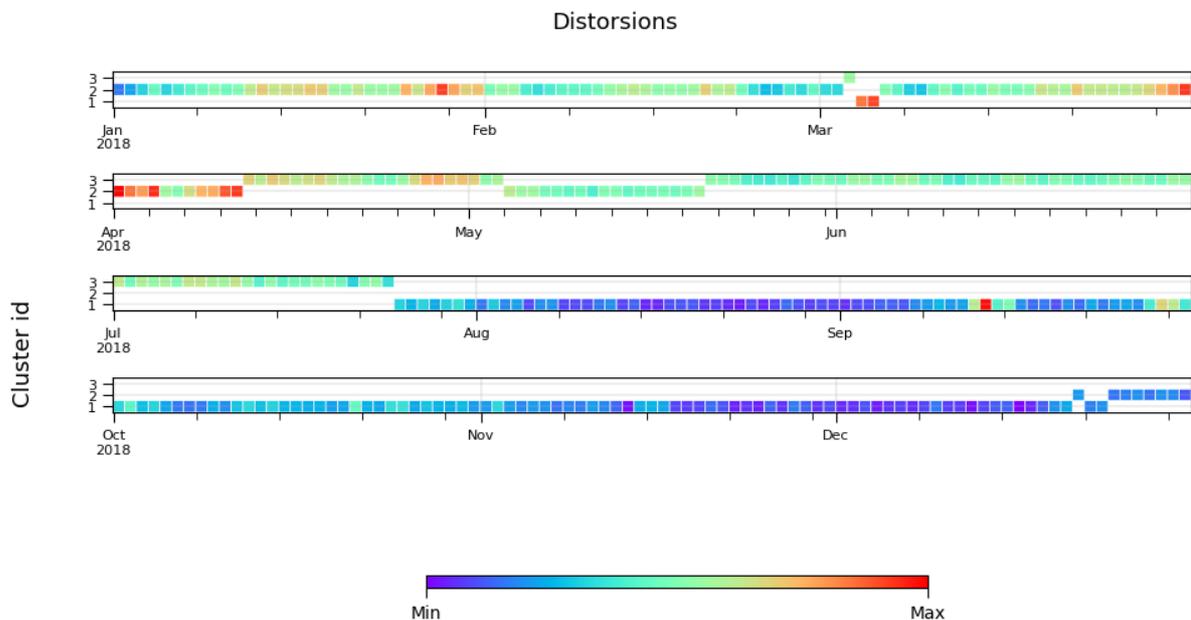


Figure 3-9 - Répartition des clusters de courant sur l'année 2018 (analyse à 3 clusters)

Les figures des situations nominales de chacun des 3 clusters sont présentés sur la Figure 3-10.

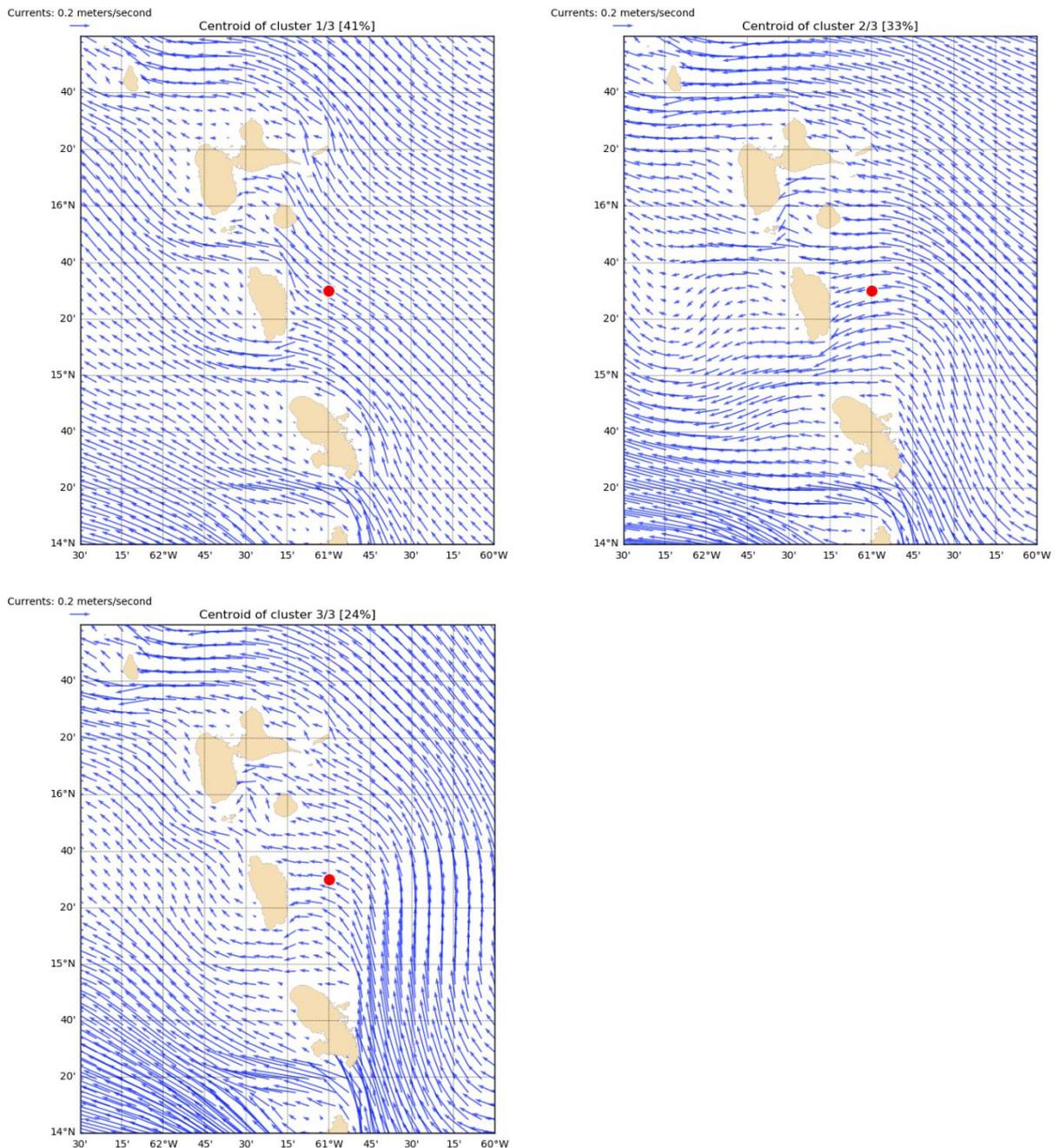


Figure 3-10 - Résultats de l'analyse à 3 clusters pour le courant

La situation est assez uniforme autour de la Guadeloupe dans les 3 clusters, avec un courant incident d'Est à Sud-Est légèrement plus faible dans les clusters n°1 et 3. Les principales différences dans le courant sont rencontrées dans le Sud de la zone, et sont probablement liées à la variabilité induite par la réflexion du courant Nord-Bésilien. Ces champs de courant dépeignent une situation où le courant autour de la Martinique a une incidence assez marquée du Sud, avant de s'infléchir pour franchir les passes de part et d'autre de l'île. Cette circulation Nord-Sud sur la côte au vent vient renforcer la circulation de la marée.

### 3.6 HAUTEURS D'EAU

Les conditions de marée autour des 2 îles ont été largement étudiées grâce aux données des marégraphes, elles sont décrites par exemple dans Pujos et al (1992). Le marnage est relativement faible, la marée ne dépasse pas 1m autour des 2 îles.

En Guadeloupe, la marée est à inégalités diurnes avec 2 pleines mers et 2 basses mers par jour, de hauteur inégale.

En Martinique, la marée est mixte, avec tantôt deux pleines mers et deux basses mers par jour, tantôt une pleine mer et une basse mer.

Toujours d'après Pujos et al, l'onde de marée aborde les Petites Antilles par le Sud, les heures de pleine et mer et de basse mer sont ainsi décalées entre les 2 îles, un déphasage Nord-Sud se fait également sentir sur chacune des îles.

D'après Pujos et al (1992), on observe une différence de hauteur du niveau moyen de l'ordre de 30 à 40 cm entre la côte au vent (Atlantique) et la côte sous le vent (mer des Caraïbes). Cette différence n'est pas confirmée par l'analyse des niveaux moyens issus des Références Altimétriques Maritimes du SHOM.

### 3.7 ONDES INTERNES

Les ondes de marée internes sont générées principalement lorsque la marée barotrope interagit avec la topographie des fonds.

D'après notre analyse bibliographique, les conditions propices au développement de la marée interne sont :

- Une forte stratification de la colonne d'eau
- Une amplitude forte de la marée
- Un haut relief sous-marin abrupt, comme un talus ou une crête, dans un endroit où les eaux environnantes sont profondes
- Un courant de marée perpendiculaire à la crête ou talus
- Une pente topographique coïncidant avec les lignes caractéristiques des équations des ondes internes

Dans la zone d'étude, les changements de stratification sont essentiellement influencés par les panaches de l'amazone et de l'Orénoque.

Les mesures du BRGM dans le cadre du projet Hydrosedmar ont mis en évidence des courants périodiques non expliqués par la marée dans la baie de Fort De France. Ces événements ont été détectés pendant la période d'hivernage, pendant laquelle la stratification est la plus importante. Ce phénomène peut donc être attribué à des ondes internes.

### 3.8 ANALYSE DES PROCESSUS PAR MODELISATION

Dans cette section, nous allons définir les configurations du modèle qui vont être utilisées pour caractériser les différents processus évoqués ci-dessus, ainsi que les diagnostics qui seront réalisés sur les sorties du modèle.

### 3.8.1 MAREE BAROTROPE

L'objectif de ces simulations sera d'une part de s'assurer de la capacité du modèle à représenter correctement l'amplitude et la phase de la marée autour des îles de Guadeloupe et de Martinique d'après les marégraphes existants. Dans un second temps, des cartes de courant de surface seront établies pour les 2 îles au flot et au jusant. Ces simulations serviront également à caractériser les courants maximaux dus à la marée, pour les différencier des éventuelles ondes internes qui pourraient être modélisées dans la suite.

Une simulation sera conduite sur une durée d'un mois, pour couvrir un large spectre de conditions de marée. Le modèle sera forcé en marée seule, sans stratification et sans météo.

Les analyses suivantes seront faites :

- Amplitude et phase sur les marégraphes disponibles
- Vérification du déphasage Sud-Nord
- Cartographie des courants en flot et jusant pour les deux îles

### 3.8.2 CIRCULATION REGIONALE

L'objectif de cette analyse sera de caractériser les courants issus de la circulation régionale dans plusieurs situations typiques, d'identifier les zones de variabilité autour des deux îles, de caractériser les changements induits par l'arrivée d'un tourbillon.

La circulation régionale sera étudiée sur une simulation 3D complète, incluant le forçage atmosphérique, et le branchement en stratification et courant dans le modèle régional. Deux simulations distinctes seront réalisées :

- Situation normale de courant Nord-équatorial d'incidence Sud-Est à Est
- Situation où un tourbillon issu du courant Nord-Brésilien aborde la zone

La situation normale pourra être étudiée sur la période Août-Septembre, ou Novembre-Décembre, qui sont des situations très stables d'après l'analyse en clusters. La situation de tourbillon sera analysée sur la période mi-Janvier à mi-Février 2018.

Des cartes de courant seront produites, des cartes de variabilité. Le profil 3D du courant sera également représenté.

### 3.8.3 CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

L'objectif de ces simulations sera d'identifier la part du vent dans la circulation régionale. Comme les vents dominants agissent dans le même sens que la circulation régionale, leur contributions respectives ne peuvent pas être différenciées sur une simulation 3D complète. Les simulations effectuées ici seront donc réalisées sans branchement de notre modèle sur la circulation régionale. Le seul forçage utilisé sera le forçage en vent.

La période simulée pour étudier la courantologie régionale en situation « normale » sera utilisée. Les vitesses de courant obtenues dans cette configuration seront comparées aux vitesses du courant « total ». Il sera ainsi possible de déterminer la contribution de la circulation due au vent.

### 3.8.4 MAREES INTERNES

L'objectif des simulations sera de déterminer la capacité du modèle à faire apparaître des ondes internes dans la zone d'étude, puis de caractériser ces ondes internes, notamment les zones les plus favorables à leur apparition.

Le moteur des ondes internes est la marée barotrope, associée à une stratification. Des simulations seront faites avec une stratification en température et salinité homogène sur le domaine d'étude, issue de l'analyse GDEM. La saison la plus stratifiée (hivernage) sera étudiée dans un premier temps, puis une étude de sensibilité pourra être faite pour déterminer les conditions propices à l'apparition d'ondes internes.

Une simulation d'un mois sera réalisée, sur la même période que la simulation réalisée en marée seule, afin de comparer les courants et de quantifier la part due à la marée interne.

Si des ondes internes sont identifiées, une cartographie de leur zone d'apparition et de leur intensité sera réalisée autour des 2 îles.

## 4. ANALYSE DES PROCESSUS DE MAREE

### 4.1 RAPPEL DES MAREGRAPHES DISPONIBLES

Sur les différents marégraphes identifiés lors de tâches 1 et 2, tous ne sont pas disponibles simultanément. Sur le mois de Juin 2018, qui a été choisi pour la validation, les valeurs de mesures sont disponibles sur 7 points de mesure répartis le long l'arc antillais :

- Deshaies, Pointe à Pitre et la Désirade (Guadeloupe)
- Portsmouth (Dominique)
- Fort de France (Martinique)
- Castries (Ste Lucie)
- True Blue (Grenade)

Ces 7 marégraphes sont représentés sur la Figure 4-1.

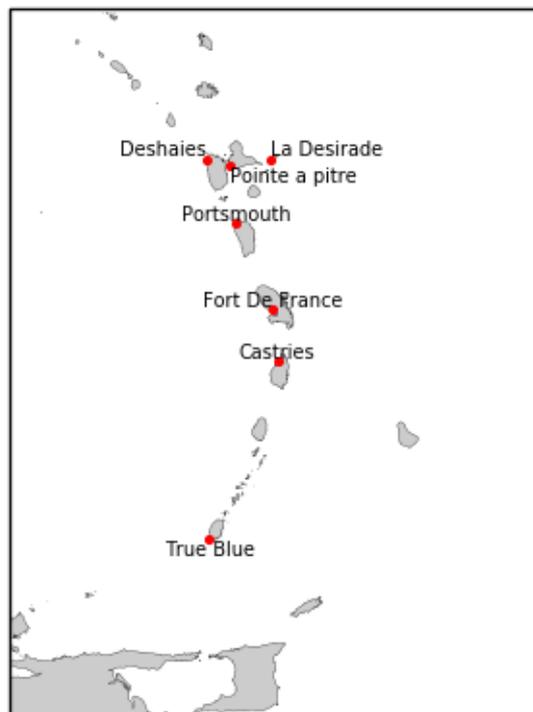


Figure 4-1 - Position des marégraphes utilisés pour la validation du modèle

### 4.2 COMPARAISONS EN HAUTEUR D'EAU

Pour ces comparaisons, le modèle est utilisé avec pour seul forçage les composantes de marée aux frontières du rang 0. Les comparaisons en hauteur d'eau sont effectuées sur les 7

marégraphes pour le mois de Juin 2018. Pour chacun des points étudiés, un scatter plot, un qq-plot et la comparaison des séries temporelles sont présentés. L'ensemble des tracés est fait sur l'anomalie de hauteur d'eau par rapport au niveau moyen. Le Tableau 4-1 résume les erreurs calculées sur ces séries temporelles. L'erreur moyenne est de l'ordre de 4 à 5 cm sur tous les points de la zone d'intérêt. L'erreur la plus élevée (7 cm) est relevée sur True Blue qui est le point le plus éloigné de notre zone d'étude. L'erreur la plus faible est mesurée sur Deshaies.

Tableau 4-1 - Erreurs RMS entre le modèle et les mesures de marégraphe

Marégraphe	Erreur RMS (m)
Deshaies	0.029
Pointe à Pitre	0.04
La Désirade	0.049
Fort de France	0.043
Portsmouth	0.04
Castries	0.049
True Blue	0.07

#### 4.2.1 GUADELOUPE

Les performances du modèle sont globalement équivalentes entre Deshaies et Pointe-à-Pitre, avec une représentation correcte de l'alternance entre les différents types de marée. Sur Pointe-à-pitre, certaines marées hautes sont sous-estimées par le modèle, ce qui induit une erreur légèrement supérieure.

Sur La Désirade, les performances sont légèrement moins bonnes, notamment avec une sous-estimation de l'amplitude des marées basses les plus fortes. Cela peut s'expliquer par une sous-représentation de la bathymétrie par un modèle de résolution 500m.

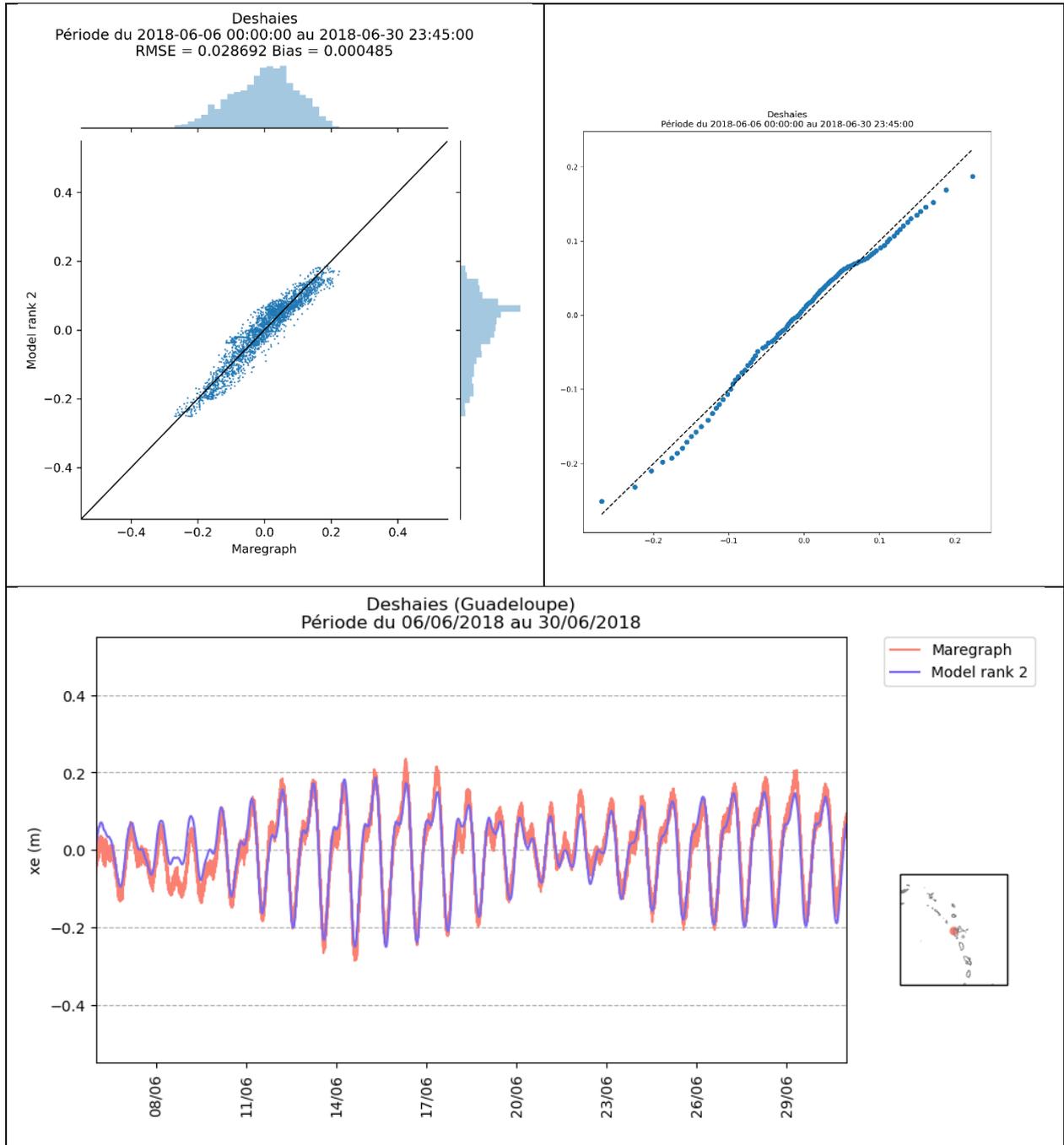


Figure 4-2 - Performances du modèle de rang 2 sur Deshaies. En haut à gauche : scatter plot modèle/mesure. En haut à droite : Quantile-Quantile comparaison entre modèle et mesure. En bas : comparaison directe des signaux

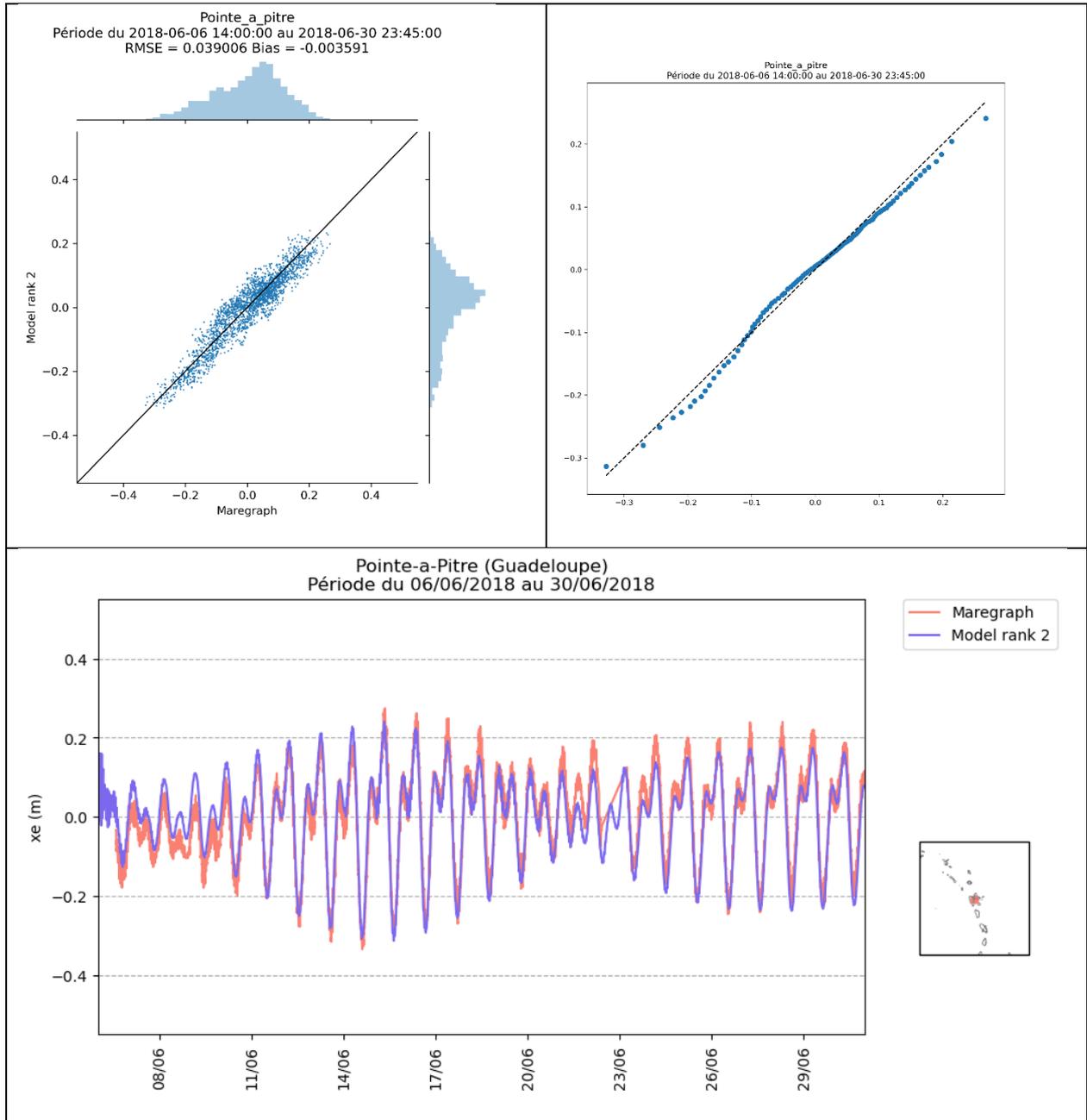


Figure 4-3 Performances du modèle de rang 2 sur Pointe-à-Pitre. En haut à gauche : scatter plot modèle/mesure. En haut à droite : Quantile-Quantile comparaison entre modèle et mesure. En bas : comparaison directe des signaux

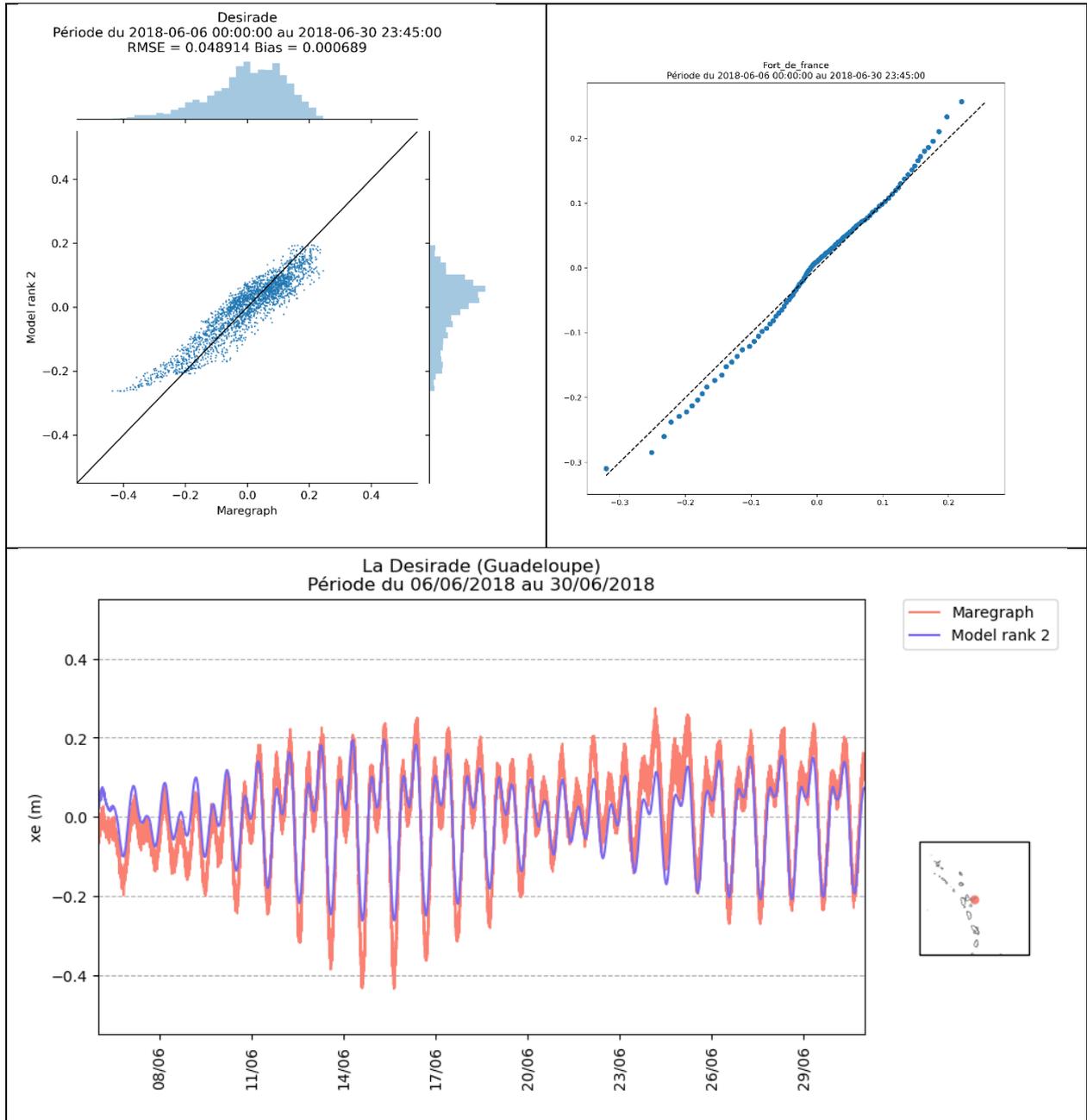


Figure 4-4 - Performances du modèle de rang 2 sur La Désirade. En haut à gauche : scatter plot modèle/mesure. En haut à droite : Quantile-Quantile comparaison entre modèle et mesure. En bas : comparaison directe des signaux

#### 4.2.2 MARTINIQUE

Sur Fort-de-France, les performances du modèle sont plutôt correctes. Une surestimation de la hauteur d'eau sur la première partie de la période étudiée conduit à une erreur légèrement plus élevée que sur la Guadeloupe.

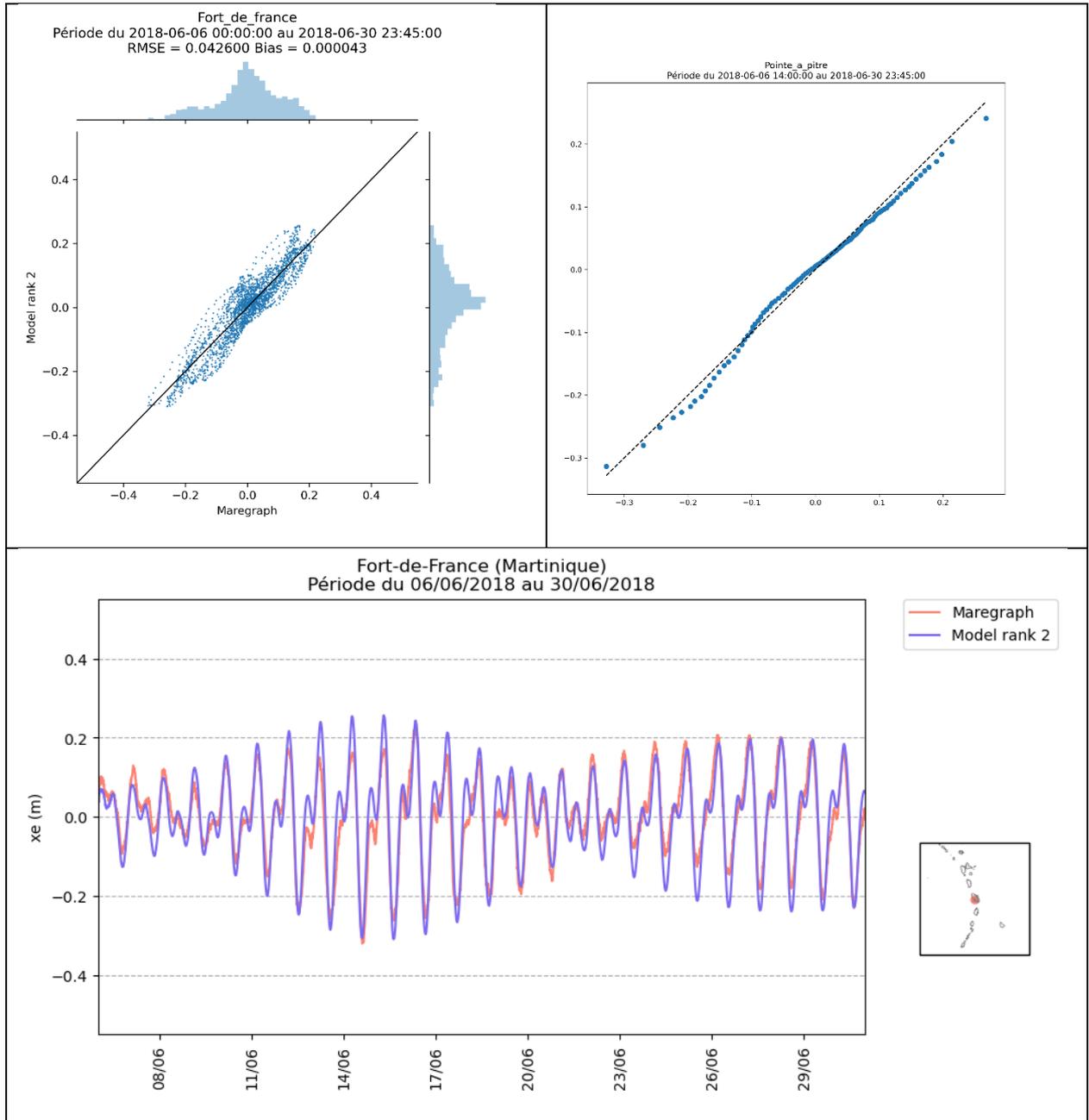


Figure 4-5 - Performances du modèle de rang 2 sur Fort-De-France. En haut à gauche : scatter plot modèle/mesure. En haut à droite : Quantile-Quantile comparaison entre modèle et mesure. En bas : comparaison directe des signaux

### 4.2.3 AUTRES ILES

Les performances du modèle sur Porstmouth sont relativement comparables à celles de la Martinique et de la Guadeloupe. En revanche, les performances se dégradent en allant vers le Sud, sur Castries qui est en limite du rang 2, et sur True Blue, à l'extrême sud du rang 0. La résolution spatiale de la bathymétrie est clairement en cause sur le point True Blue.

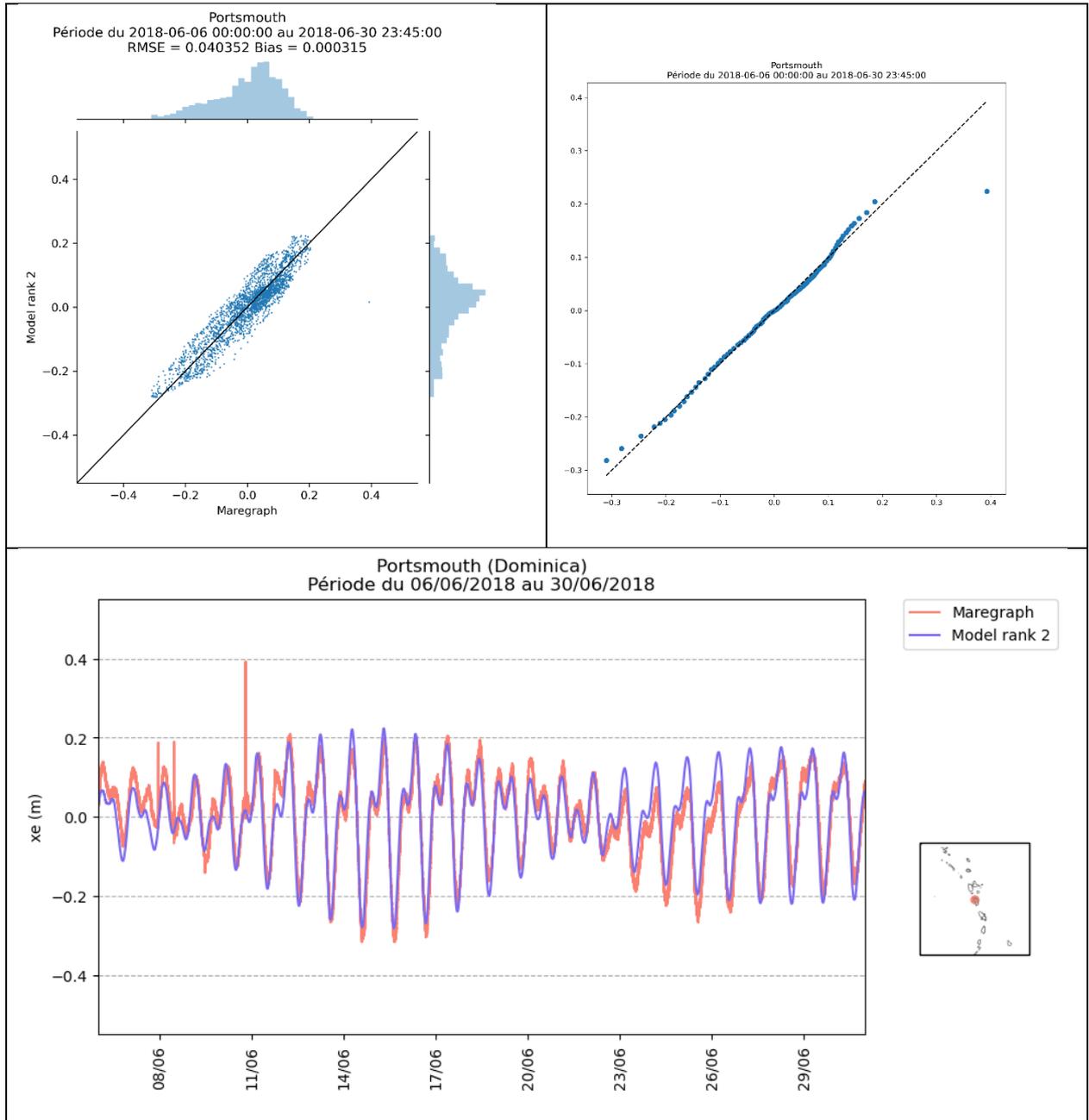


Figure 4-6 - Performances du modèle de rang 2 sur Portsmouth. En haut à gauche : scatter plot modèle/mesure. En haut à droite : Quantile-Quantile comparaison entre modèle et mesure. En bas : comparaison directe des signaux

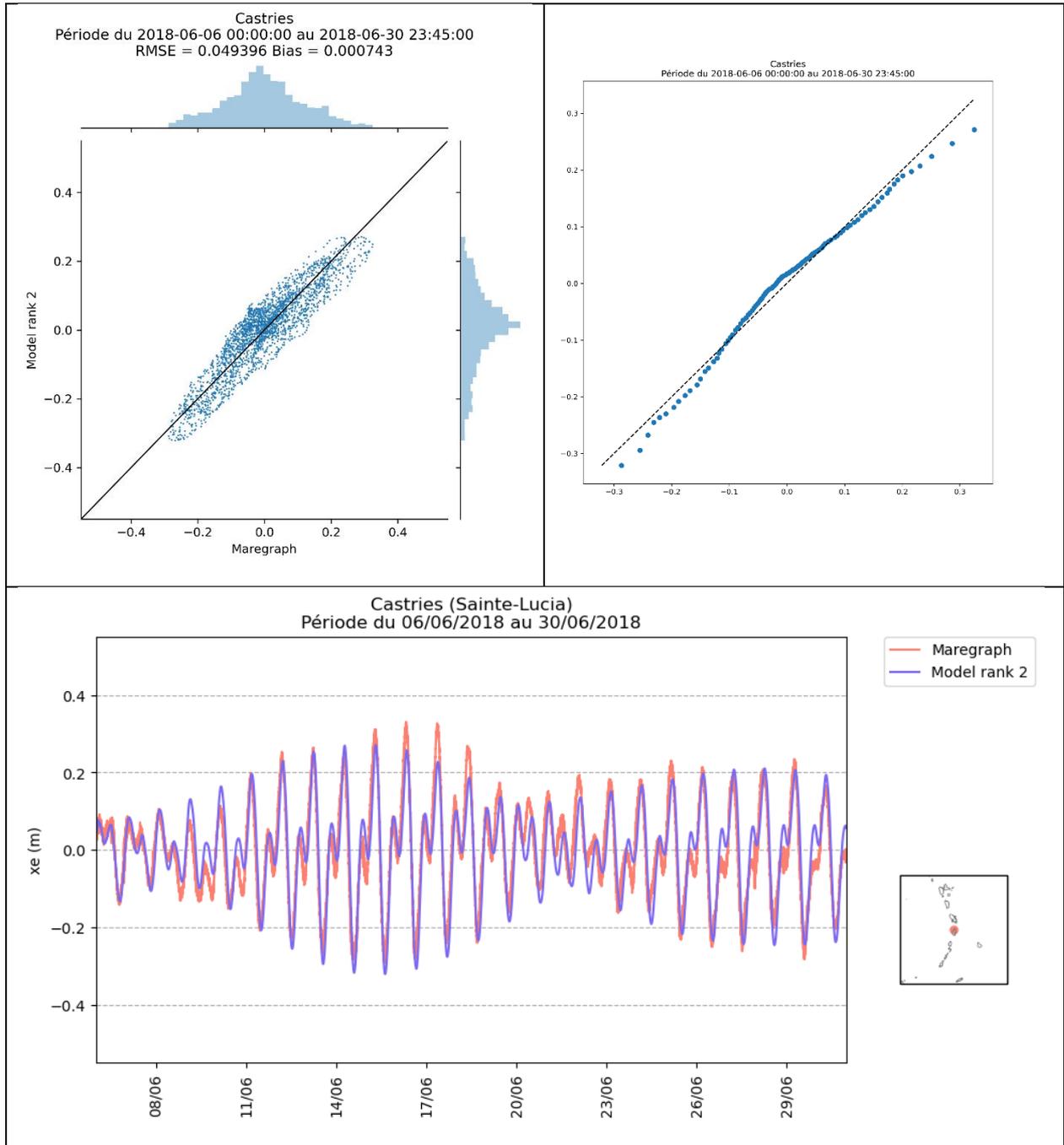


Figure 4-7 - Performances du modèle de rang 2 sur Castries. En haut à gauche : scatter plot modèle/mesure. En haut à droite : Quantile-Quantile comparaison entre modèle et mesure. En bas : comparaison directe des signaux

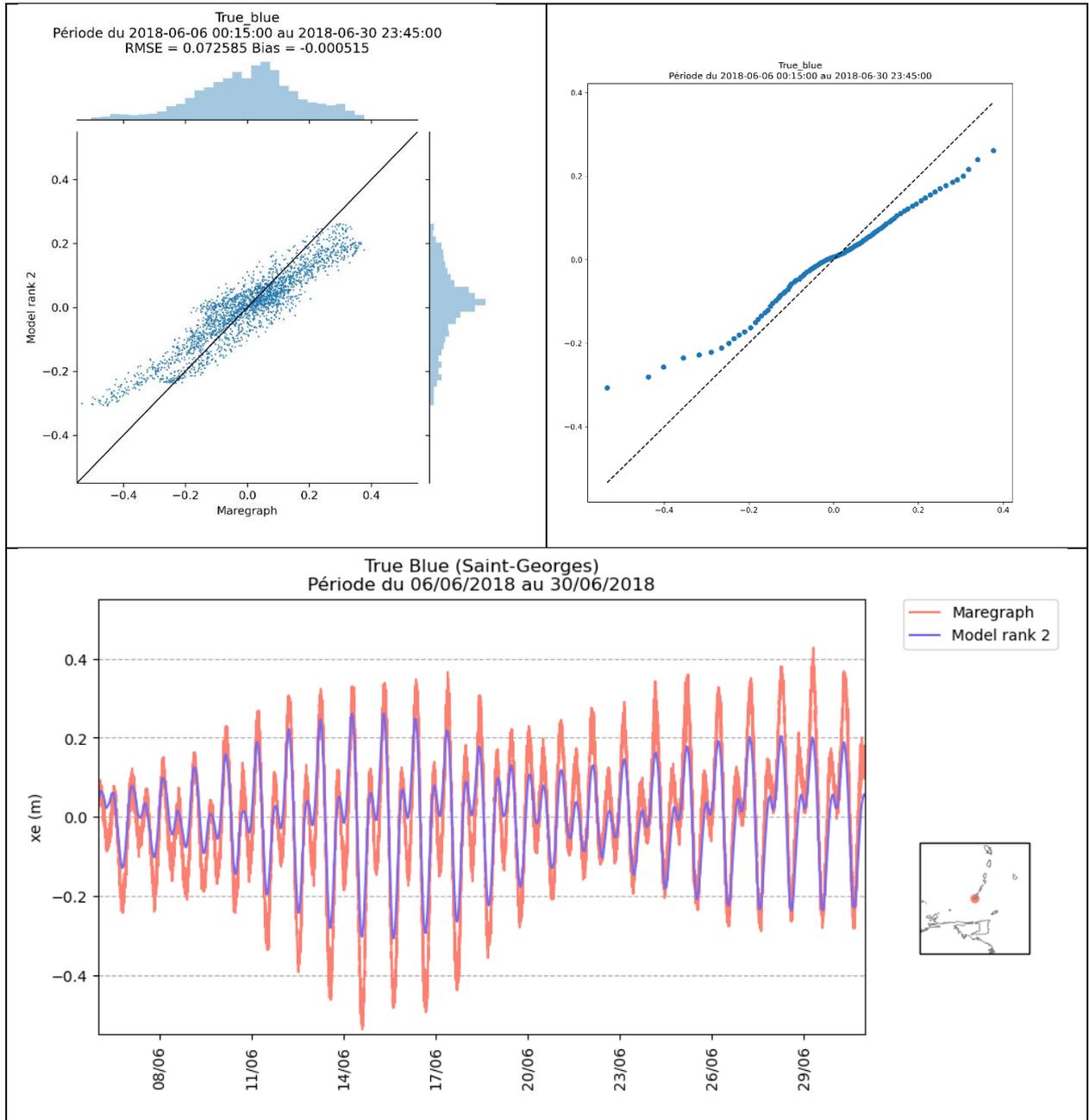


Figure 4-8 - Performances du modèle de rang 0 sur True Blue. En haut à gauche : scatter plot modèle/mesure. En haut à droite : Quantile-Quantile comparaison entre modèle et mesure. En bas : comparaison directe des signaux

### 4.3 CALCUL DE DEPHASAGE

#### 4.3.1 DEPHASAGE MODELE/MESURE

Les valeurs de déphasage entre modèle et mesure sont indiquées dans le Tableau 4-2 pour les marégraphes disponibles. Les déphasages sont globalement très faibles, sauf sur Castries où le modèle est nettement en retard sur l'observation. Cela est probablement dû à un détail de bathymétrie mal représenté, et au positionnement de ce point en limite du modèle de rang 2.

Sur True Blue, où l'amplitude était assez mal reproduite par le modèle, la phase est en revanche très bien représentée.

Tableau 4-2 - Déphasage moyen entre modèle et mesure (une valeur négative indique un retard du modèle)

Marégraphe	Déphasage modèle/mesure (minutes)
Deshaies	11
Pointe à Pitre	5
La Desirade	1
Castries	-41
Portsmouth	25
True Blue	5

#### 4.3.2 DEPHASAGE NORD-SUD

La bibliographie indique que l'onde de marée se propage du Sud vers le Nord (Pujos, 1992), un déphasage est donc à attendre avec une marée en retard de phase vers le Nord de la zone. Aucune valeur numérique n'est donnée pour ce déphasage dans l'article cité. L'analyse des données de marégraphe indique une situation plus complexe comme l'indiquent les Figure 4-9 et Figure 4-10. En analysant les signaux de marées des deux marégraphes les plus éloignés (Deshaies au Nord et True Blue au sud), on observe :

- Un retard du pic de marée haute vers le nord, qui correspond bien au déphasage attendu. Mais ce déphasage ne semble pas régulier dans le temps
- Une variabilité importante sur la phase de la marée basse, qui peut se produire nettement en avance à Deshaies par rapport à True Blue, donc à l'inverse du déphasage attendu.

L'analyse des cartes de hauteur d'eau issues du modèle sur la zone révèle en fait que la circulation de marée n'est pas due à un simple déplacement de l'onde du Sud au Nord. Si ce mouvement est assez visible sur la côte au vent, la rotation de la marée dans la mer des Caraïbes provoque des mouvements bien plus complexes sur la côte Ouest des îles.

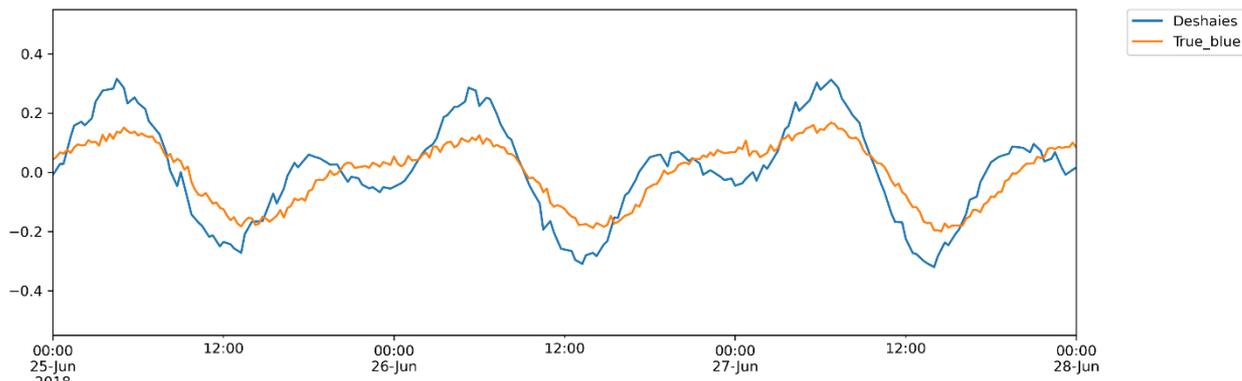


Figure 4-9 - Comparaison des marégraphes entre Deshaies et True blue du 25 au 28 juin 2018. LA marée basse est nettement en avance à Deshaies.

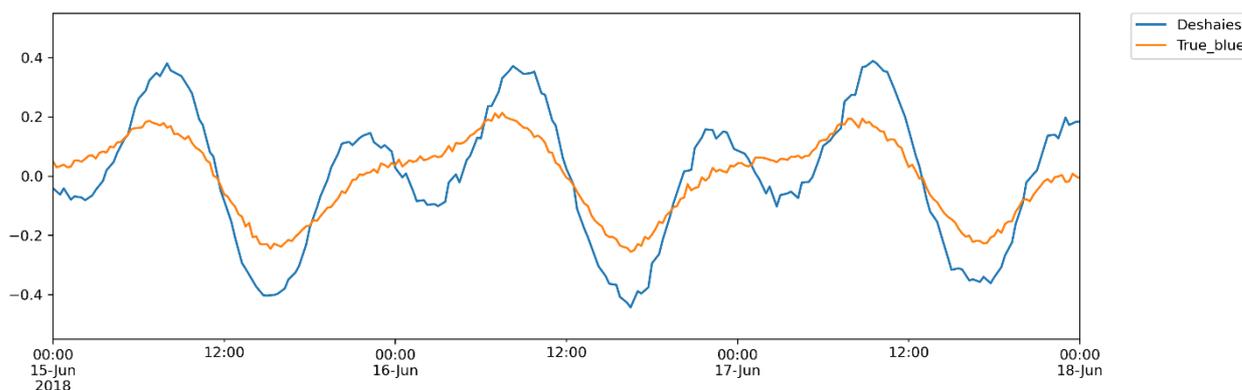


Figure 4-10 - Comparaison des marégraphes entre Deshaies et True blue du 15 au 18 juin 2018. On observe un retard du pic de marée haute à Deshaies.

Le déphasage Sud-Nord sur le pic de marée haute reste tout de même caractéristique, et peut être mesuré à la fois dans le modèle et les mesures. Il est alors possible de comparer les déphasages moyens entre les différents sites du Nord et Sud. Ces valeurs sont indiquées dans le Tableau 4-3.

Tableau 4-3 - Comparaison des déphasages moyens de marée haute avec Deshaies

Marégraphe	Déphasage / Deshaies Mesure	Déphasage / Deshaies Modèle
Pointe à Pitre	12 minutes	10 minutes
Fort de France	25 minutes	17 minutes
True Blue	28 minutes	23 minutes

On en conclue que le modèle représente correctement cette progression de l'onde de marée du Sud vers le Nord.

## 4.4 CARTES DE COURANT

### 4.4.1 COURANT MAXIMAL

D'après les éléments présentés dans l'analyse bibliographique, les courants moyens sont de l'ordre de 0.1 m/s, avec des maxima dépassant légèrement 0.3 m/s localement. La Figure 4-11

représente le maximum de courant de marée modélisé sur une période de 3 semaines en juin 2018. On retrouve bien des intensités de l'ordre de 0.1 à 0.2 m/s, avec des maxima qui atteignent ou dépassent les 0.3 m/s localement au niveau des caps. La représentation quantitative est donc globalement correcte sur les deux îles. Le modèle fait apparaître des vitesses significativement plus élevées eu Guadeloupe autour de La Désirade, avec des maxima de l'ordre de 0.7 m/s. Nous ne disposons pas de mesure pour corroborer ces valeurs.

Vitesse\_courant\_max\_du\_2018-06-10 00:00:00\_au\_2018-06-30 23:50:00

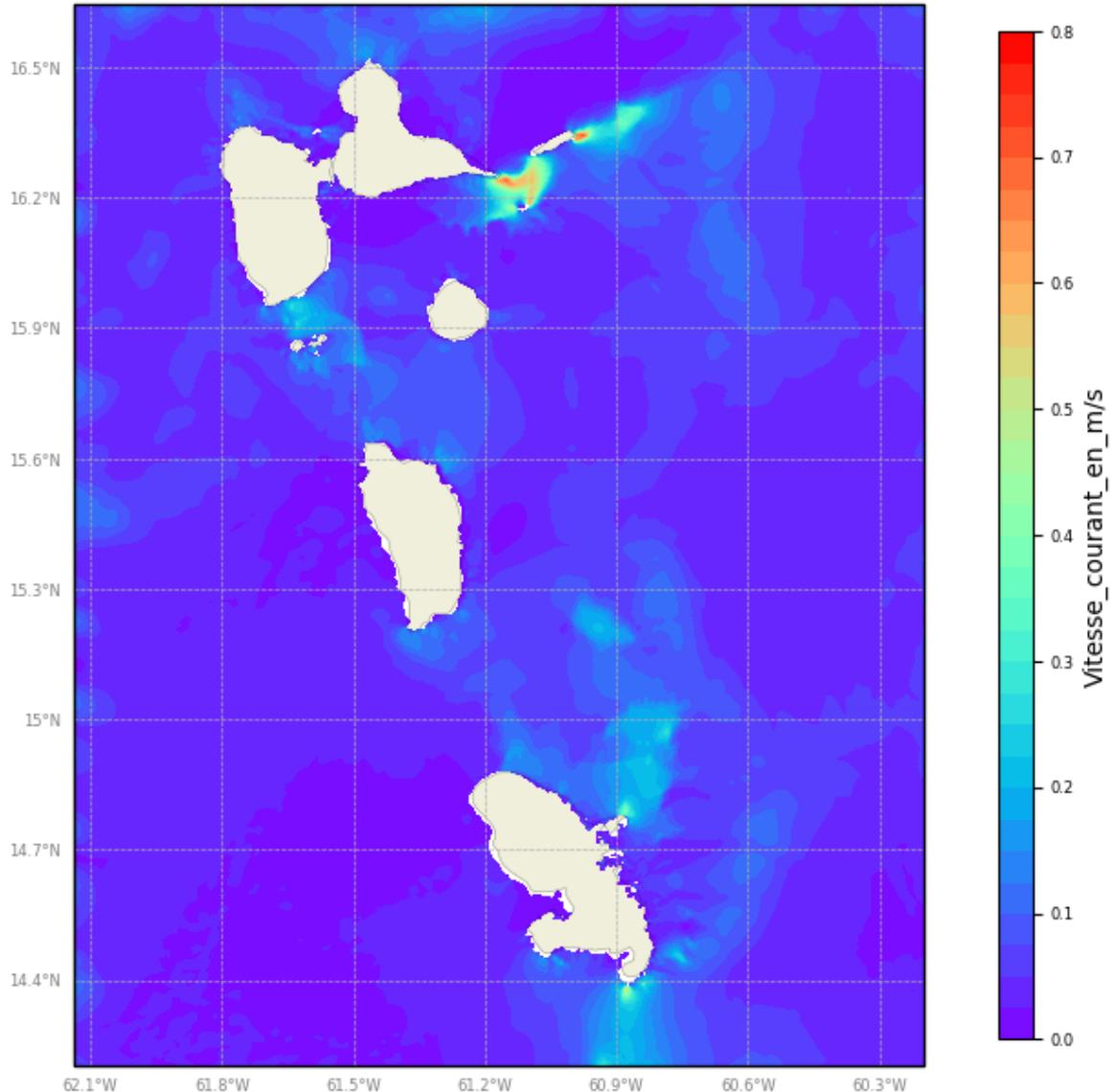


Figure 4-11 - Maximum de courant de marée sur l'emprise du modèle entre le 10 et le 30 juin 2018.

#### 4.4.2 COURANTS AUTOUR DE LA GUADELOUPE

L'analyse des cartes de courant autour de la Guadeloupe révèle le fonctionnement de l'onde de marée :

- A marée montante, l'onde de marée aborde l'île par le Sud-Est (côté Atlantique) et le courant s'accélère dans les passes de la Désirade et des Saintes pour « contourner » l'île. Le courant est pratiquement nul ailleurs.

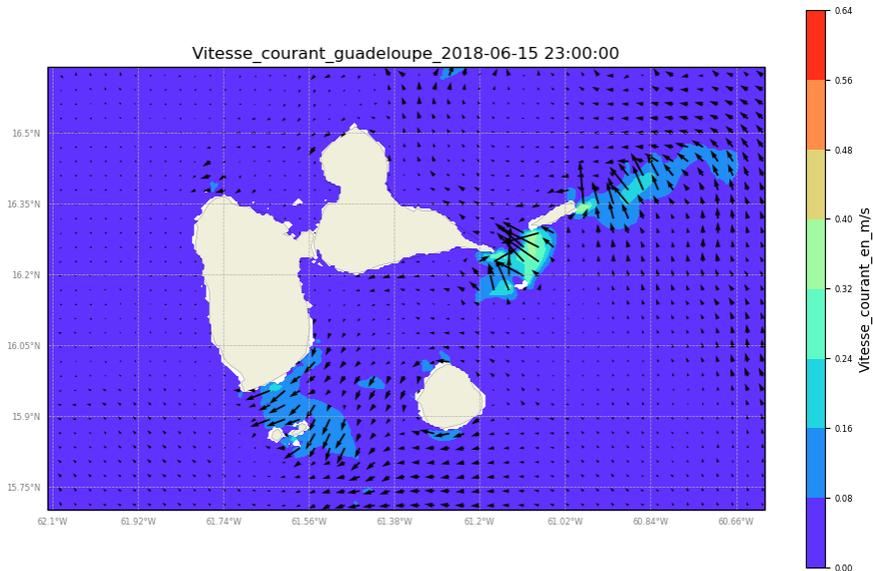


Figure 4-12 - Marée montante autour de la Guadeloupe

- En fin de marée montante, l'onde a contourné l'île et le courant devient significatif sur la partie Nord de l'île avec un flot orienté vers l'Ouest.

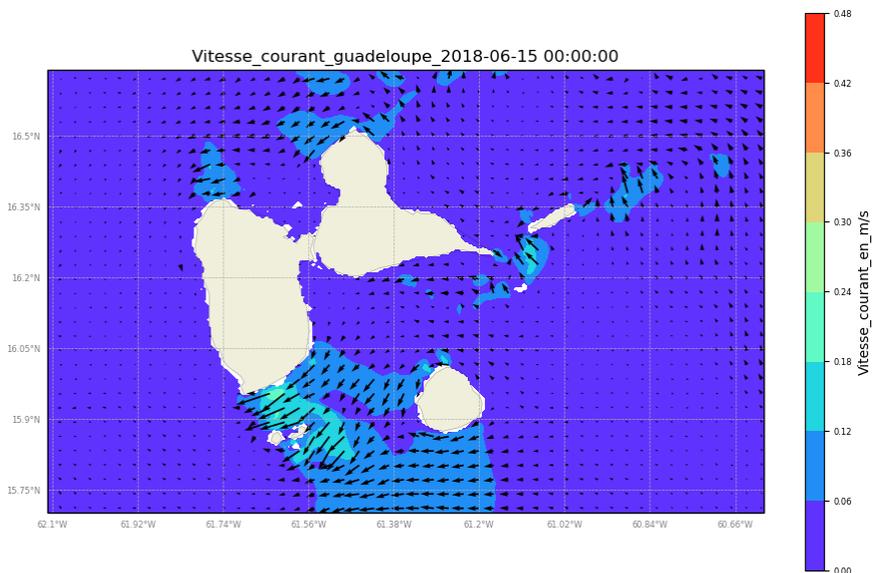


Figure 4-13 - fin de marée montante autour de la Guadeloupe

- A marée descendante, le courant est totalement inversé : circulation vers l'Atlantique à la Désirade et aux Saintes, circulation vers l'Est également sur tout la côte Nord de l'île

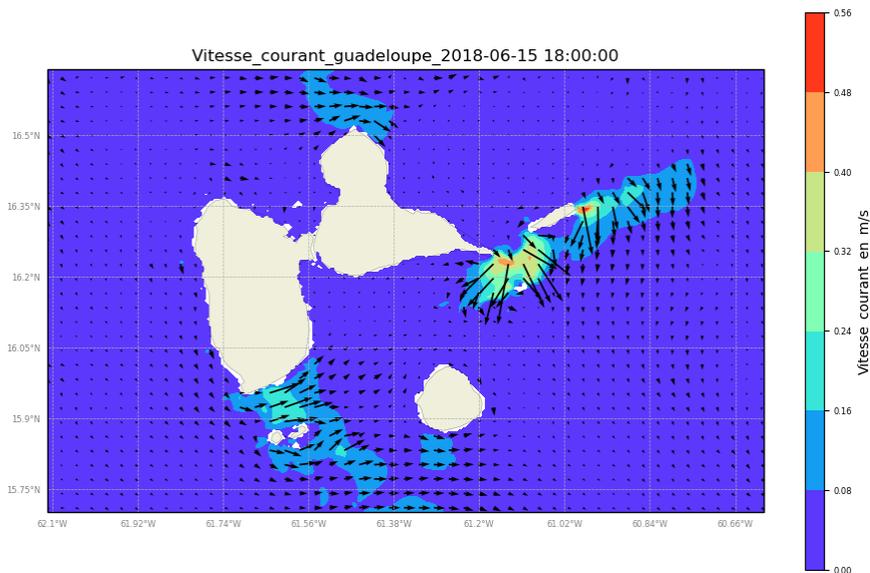


Figure 4-14 - Marée descendante autour de la Guadeloupe

#### 4.4.3 COURANTS AUTOUR DE LA MARTINIQUE

Sur les côtes de la Martinique, le courant de marée est pratiquement nul sur la côte sous le vent. Le fonctionnement de la circulation est comparable à celui de la Guadeloupe :

- A marée montante, l'onde de marée contourne l'île après l'avoir abordée par le Sud-Est : le courant s'intensifie alors autour des pointes Nord et Sud de l'île, ainsi qu'au large de la presqu'île de la Caravelle.

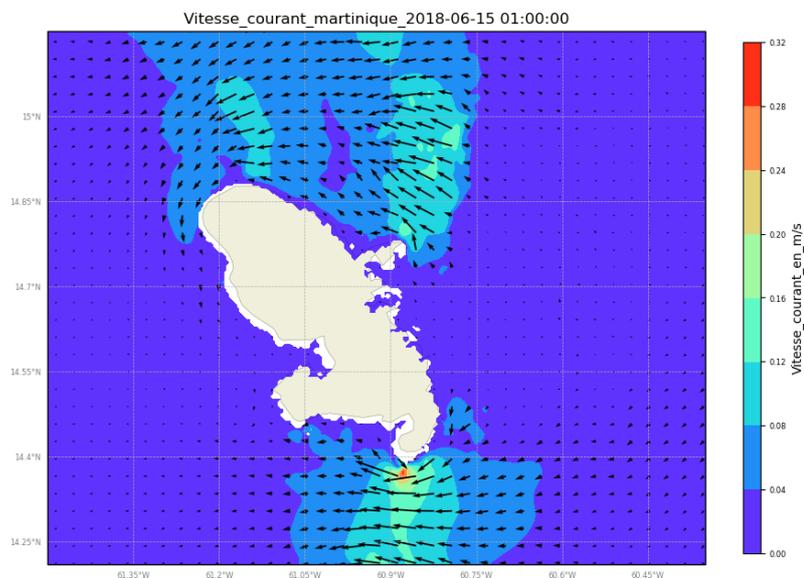


Figure 4-15 - Marée montante autour de la Martinique

- A marée descendante, cette circulation s'inverse totalement, les zones de fort courant restent les mêmes avec une direction du courant opposée.

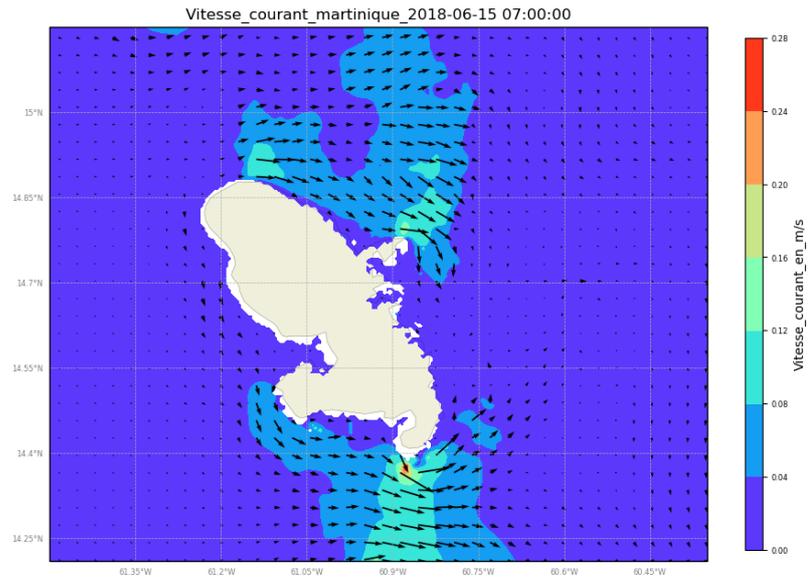


Figure 4-16 - Marée descendante autour de la Martinique

---

# 5. ANALYSE DE LA CIRCULATION GÉNÉRALE

---

## 5.1 SIMULATION EN SITUATION HABITUELLE

D'après les analyses présentées dans la première partie de ce rapport, la situation habituelle est une situation où la circulation générale n'est pas perturbée par le passage d'un tourbillon ou d'une autre structure de méso-échelle. La situation du mois d'Août 2018 a été retenue pour cette simulation.

Le but est ici de caractériser les grands traits de la circulation régionale autour des îles de Guadeloupe et de Martinique. La simulation est réalisée avec le modèle en version 3D, dans sa version complète, c'est-à-dire incluant :

- Le forçage de marée aux frontières du rang 0
- Le forçage par la circulation régionale 3D sur les frontières du rang 0. Les variables « courant », « température » et « salinité » sont utilisées
- Le forçage météorologique complet (vent, pression, flux solaire)

Les résultats sont présentés sous la forme de moyennes de courant sur la période, ce qui permet de masquer (du moins en partie) les effets périodiques de la marée, et de se concentrer sur des phénomènes stables typiques de la circulation régionale.

### 5.1.1 GUADELOUPE : COURANT DE SURFACE

La Figure 5-1 présente le courant de surface moyen sur l'ensemble du mois d'Août 2018. La circulation apparaît plus intense sur la partie au vent de l'île et pratiquement nulle dans la partie sous le vent. Le courant est essentiellement orienté Sud-Nord au large, et s'infléchit vers l'Ouest pour contourner l'île par le Sud. L'intrusion du courant Atlantique est très visible entre les Saintes et Marie Galante. Le courant est accéléré sur les hauts fonds autour de La Désirade, en restant toujours orienté vers le Nord.

Les vitesses moyennes du courant sont de l'ordre de 0.5 m/s au large, et peuvent dépasser 0.8 m/s près de la Désirade.

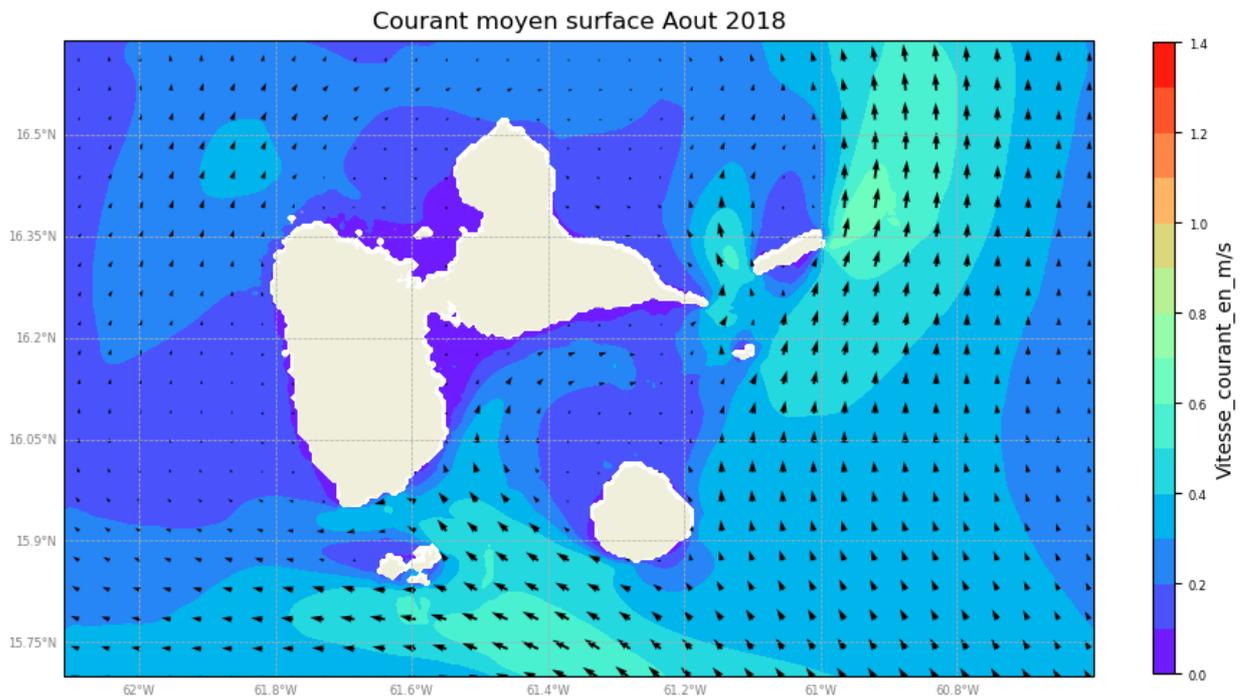


Figure 5-1 - Moyenne du courant de surface sur la période du 1er au 31 Août 2018

### 5.1.2 GUADELOUPE : COURANT DANS LA COLONNE D'EAU

Autour de la Guadeloupe, la circulation est similaire à la circulation de surface jusqu'à environ 20m de fond. Plus en profondeur, seule l'intrusion d'eau Atlantique au Sud des Saintes reste visible, cette branche du courant est présente jusqu'à environ 500m de fond.

Au Nord de l'île, la circulation apparaît beaucoup plus complexe. A partir de 400m de fond, un courant orienté vers l'Est apparaît au Nord-Est de l'île, approximativement le long de l'isobathe 1500m. Ce courant s'intensifie avec la profondeur, avec des vitesses moyennes sur le mois d'Août qui dépassent 0.5 m/s à 1400m de fond. Ce courant profond atteint donc des vitesses du même ordre que le courant de surface dans une direction pratiquement opposée. Ce courant correspond au « Atlantic Deep Western Boundary Current » étudié notamment dans Köhler et al (2014).

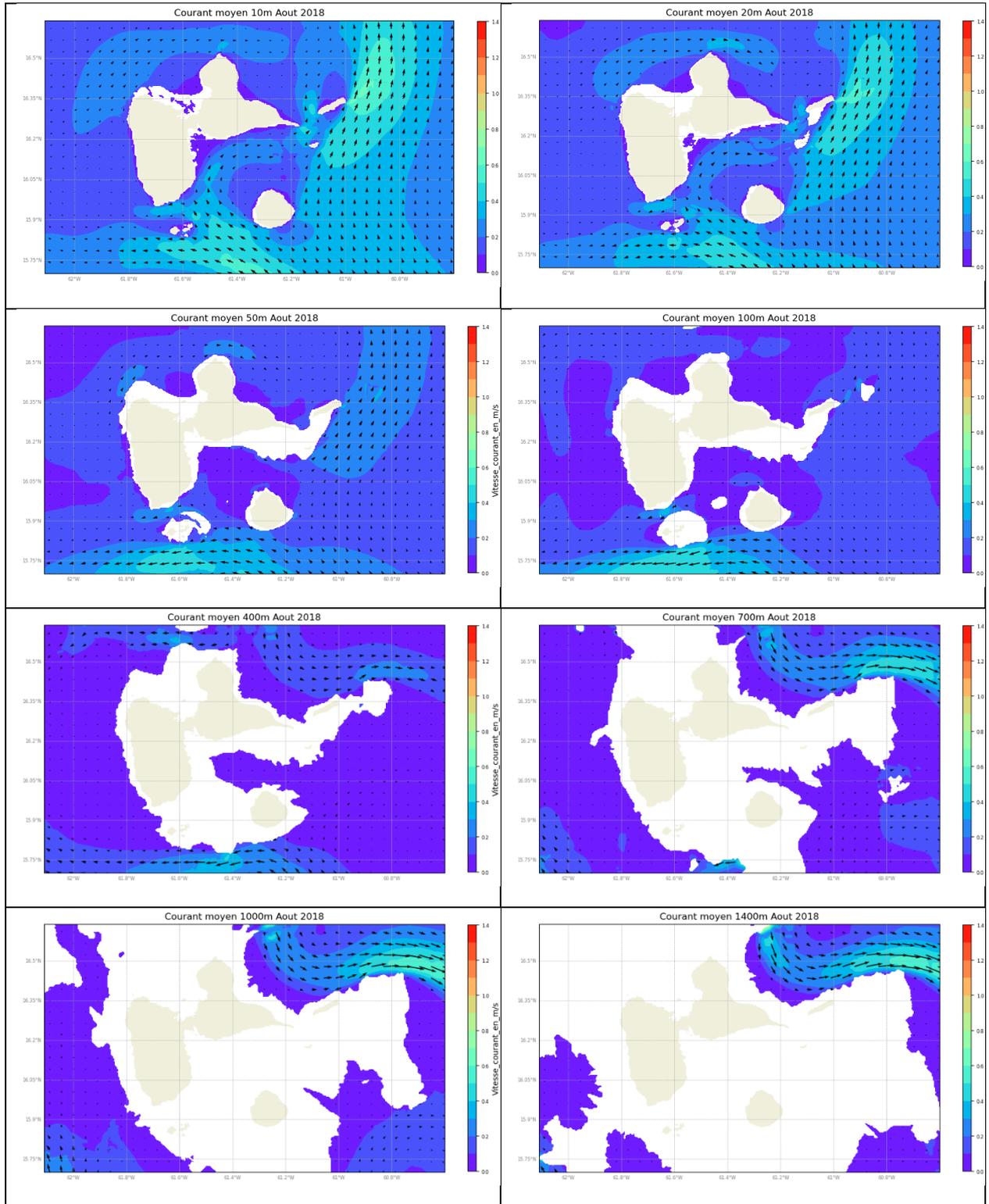


Figure 5-2 - Courant moyen du 1er au 31 Août 2018 autour de la Guadeloupe à différentes profondeurs

### 5.1.3 MARTINIQUE : COURANT DE SURFACE

En Martinique, côté Atlantique, le courant de surface est orienté principalement du Sud vers le Nord. Il se divise au Sud de l'île, où une branche orientée vers le Nord-Ouest atteint des vitesses comparables à celles de la branche principale. Au Nord de l'île le courant est très faible, l'intrusion d'eau Atlantique vers la mer des Caraïbes se fait plus au large de l'île, plus proche des côtes de la Dominique. Les courants moyens en surface sont du même ordre qu'en Guadeloupe, avec des vitesses moyennes entre 0.5 et 0.6 m/s en général.

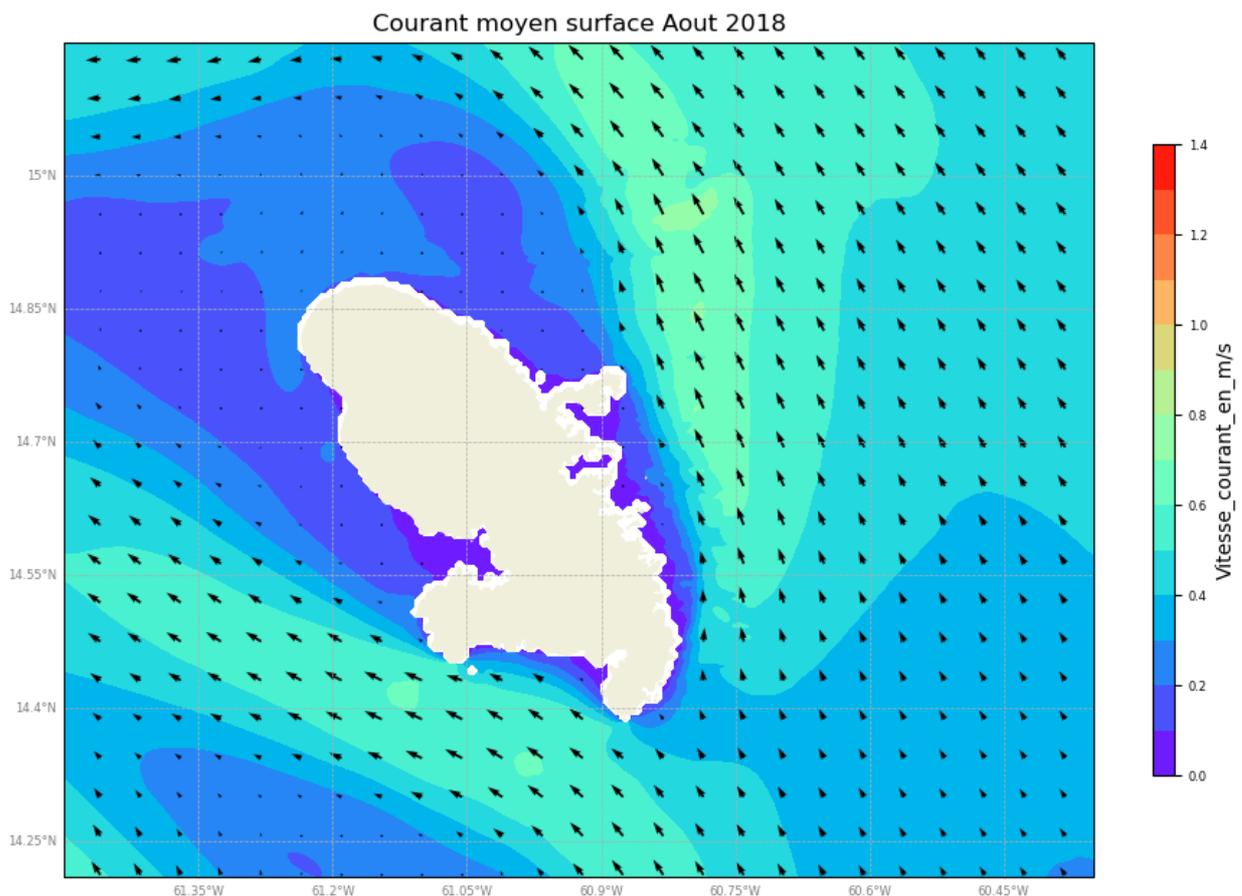
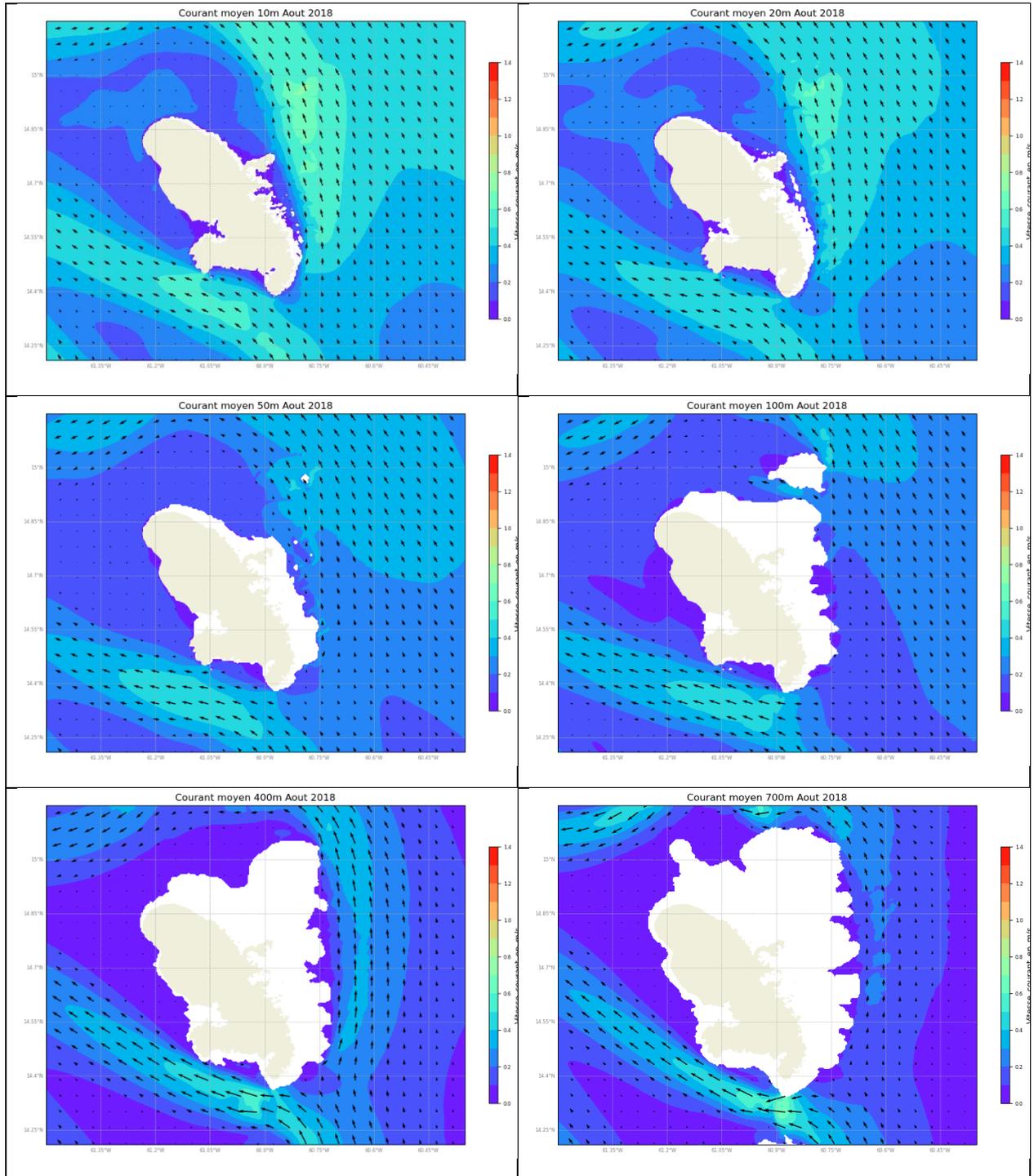


Figure 5-3 - Moyenne du courant de surface sur la période du 1er au 31 Août 2018

### 5.1.4 MARTINIQUE : COURANT DANS LA COLONNE D'EAU

Le courant en profondeur autour de la Martinique est relativement semblable au courant de surface, avec une atténuation régulière de la vitesse. Le courant Sud-Nord côté Atlantique s'atténue autour de 100m de fond, avant de réapparaître avec des vitesses relativement élevées autour de 400 à 500m de fond. En dessous de 1000m de profondeur, les vitesses du courant s'inversent pour prendre une direction Sud, mais avec des vitesses moyennes très faibles.



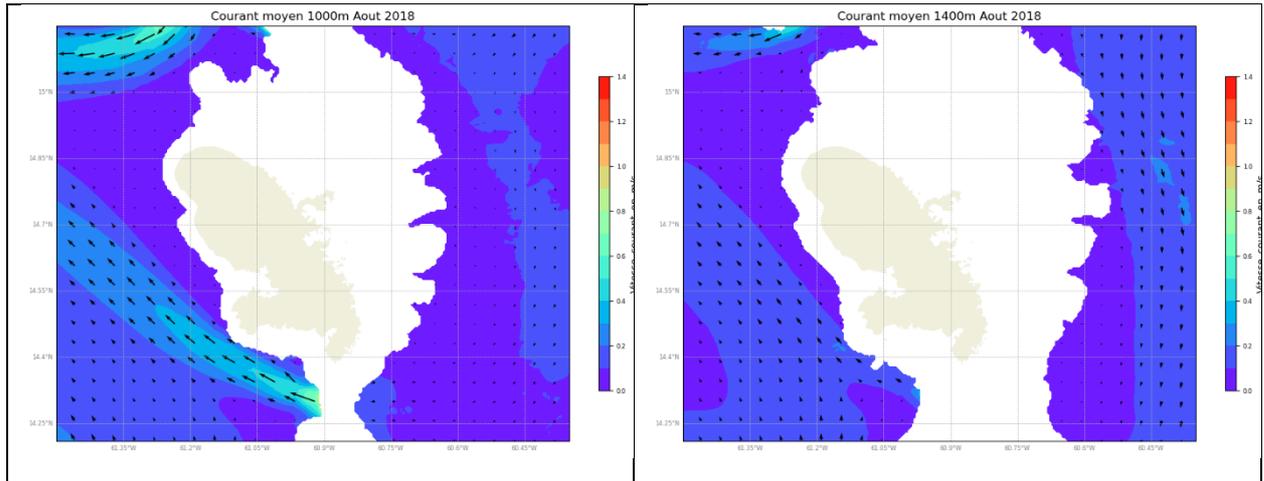


Figure 5-4 - Courant moyen du 1er au 31 Août 2018 autour de la Martinique à différentes profondeurs

## 5.2 SIMULATION EN PRESENCE D'UN TOURBILLON

Pour cette analyse, une simulation complète a été réalisée entre le 15 janvier et le 23 Février 2018, date du passage d'un tourbillon dans la zone d'étude (voir §3.5.1). Les cartes montrées dans la suite sont une moyenne sur le mois de Février, pour se concentrer sur les cartes correspondant à l'arrivée du tourbillon par le sud dans notre zone d'étude.

### 5.2.1 GUADELOUPE

La Guadeloupe est relativement éloignée du tourbillon, qui se disloque sur le sud de la zone modélisée. Il est donc possible que les éléments mis en évidence ici soient plus liés à une variation saisonnière qu'à la présence d'un tourbillon.

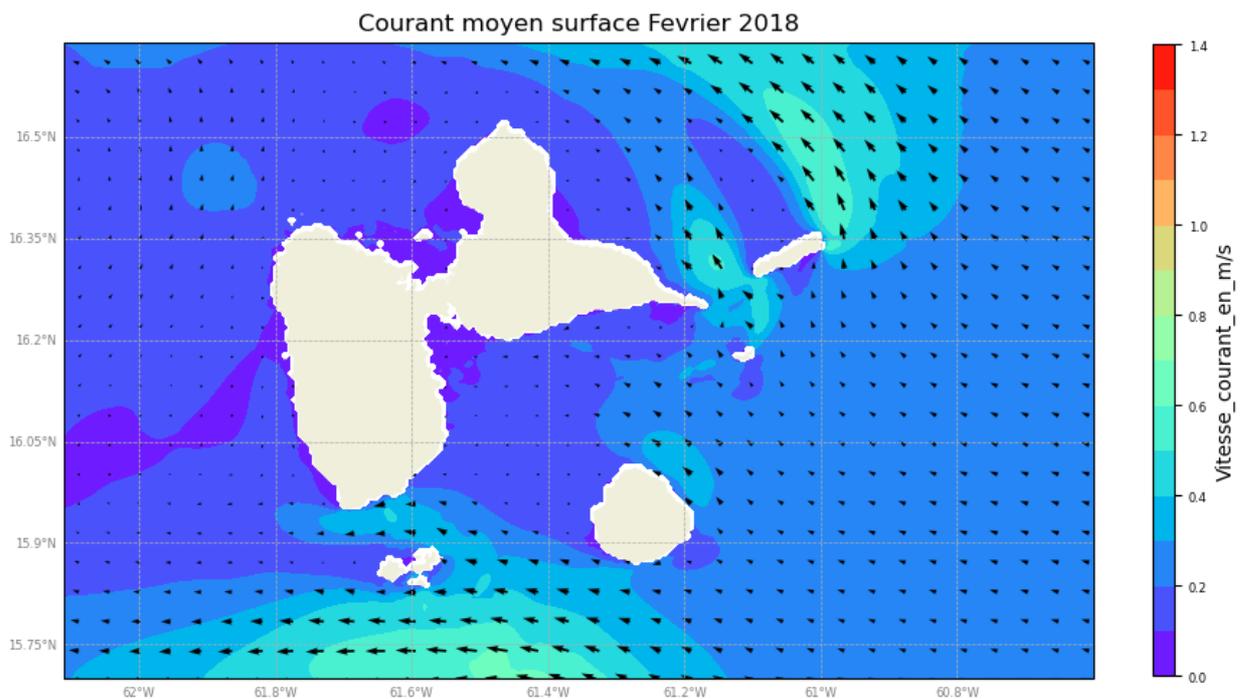


Figure 5-5 - Courant de surface moyen autour de la Guadeloupe - Février 2018

En Guadeloupe, la principale différence sur le courant de surface est une orientation vers le Nord-Ouest voire l'Ouest du courant côté Atlantique. Le courant est ainsi orienté légèrement différemment dans les passes autour des Saintes et de la Désirade.

En profondeur, il n'y a pas de différence significative avec ce qui a été modélisé pour le mois d'Août. On note toujours un courant relativement intense au sud des Saintes jusqu'à 500m de profondeur, et le contre-courant profond sur le Nord-Est de l'île à partir de 400m de profondeur.

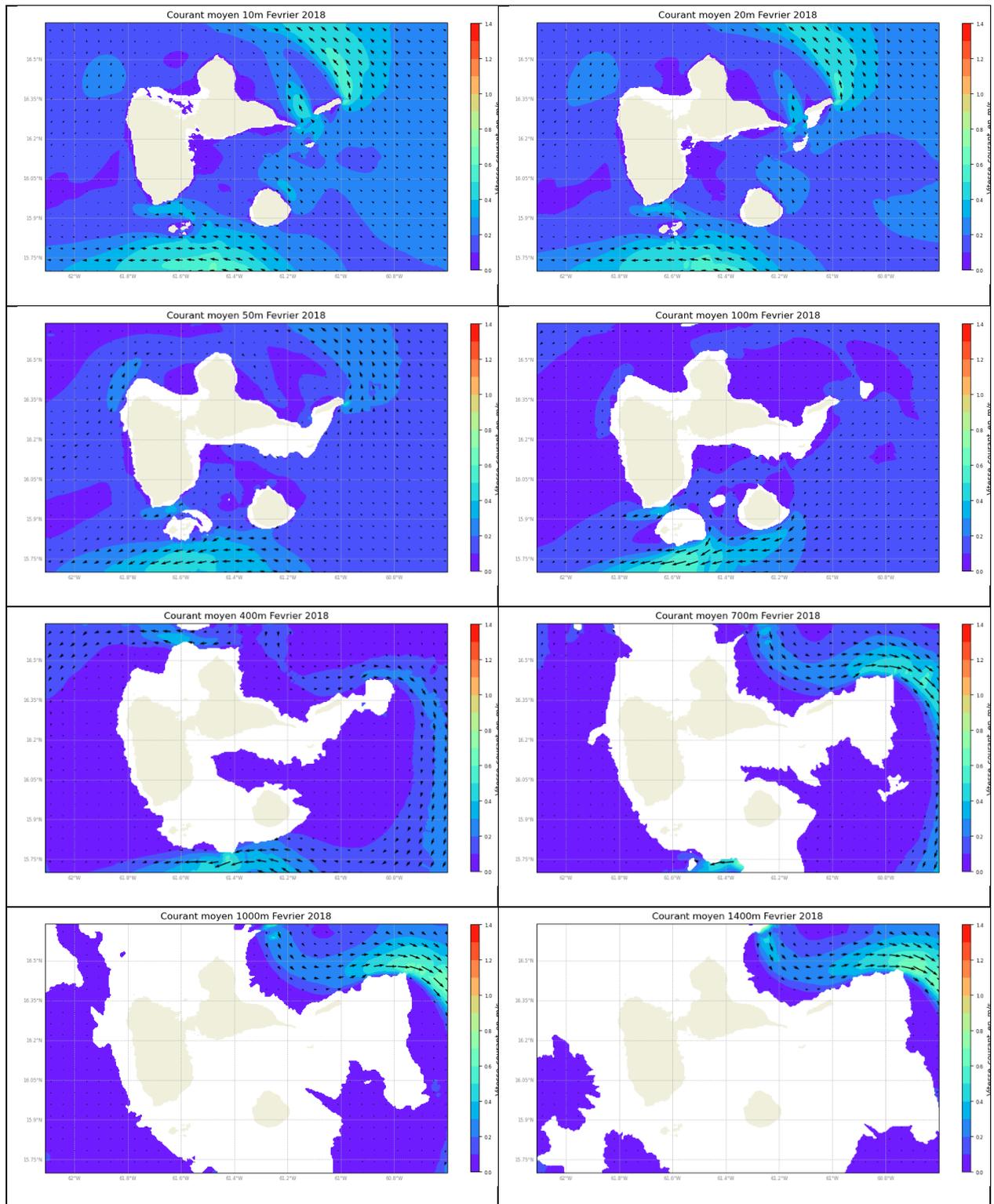


Figure 5-6 - Courant moyen du 1er au 23 Février 2018 autour de la Guadeloupe à différentes profondeurs

### 5.2.2 MARTINIQUE

Autour de la Martinique, la différence la plus significative en surface est le rapprochement de la veine de courant du Nord de l'île, la zone de calme présente au mois d'Août a disparu et le courant « enveloppe » l'île de beaucoup plus près. Le courant est légèrement plus intense également, avec un courant moyen qui dépasse 0.8 m/s en moyenne en plusieurs points à l'Ouest de l'île.

La veine de courant semble également plus « concentrée » près de l'île, le courant est beaucoup plus faible au large côté Atlantique que dans la simulation du mois d'Août.

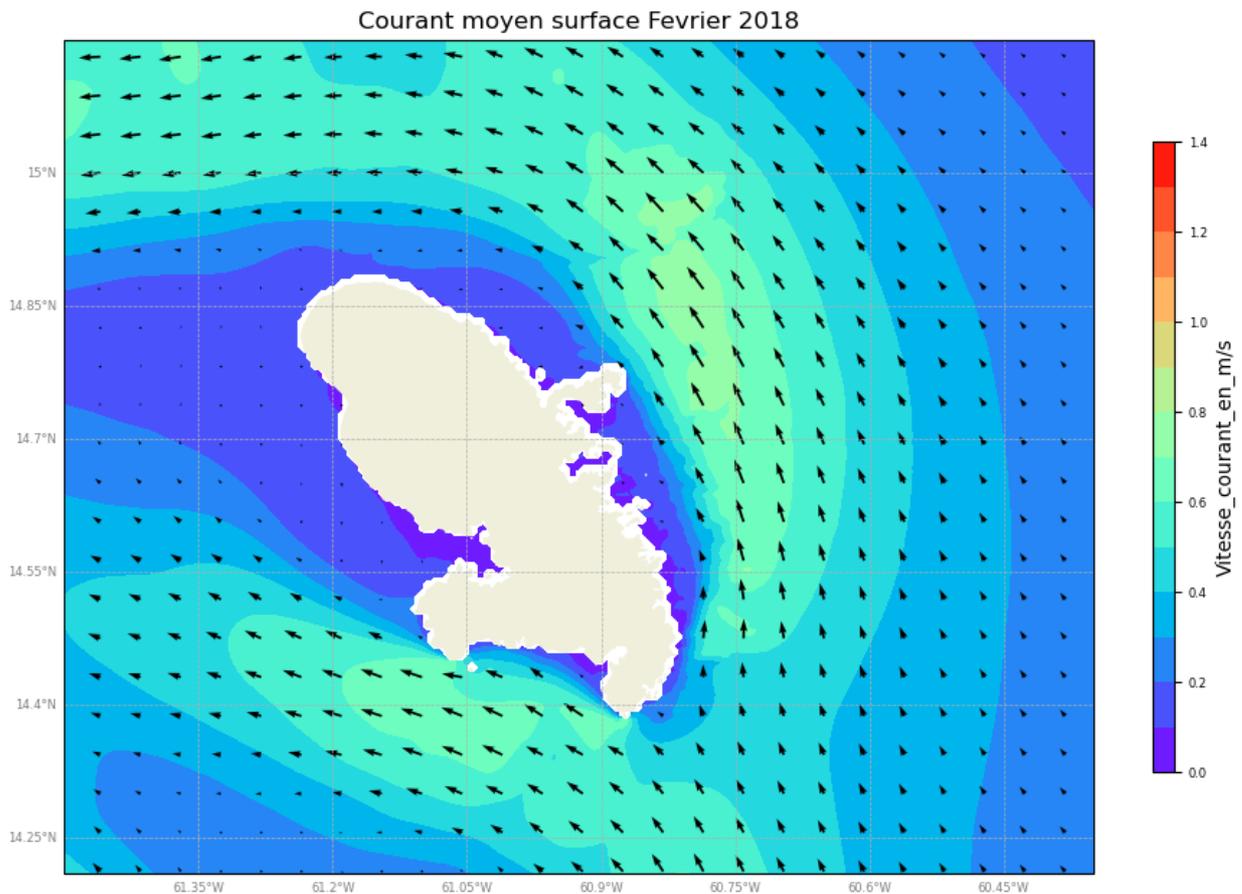
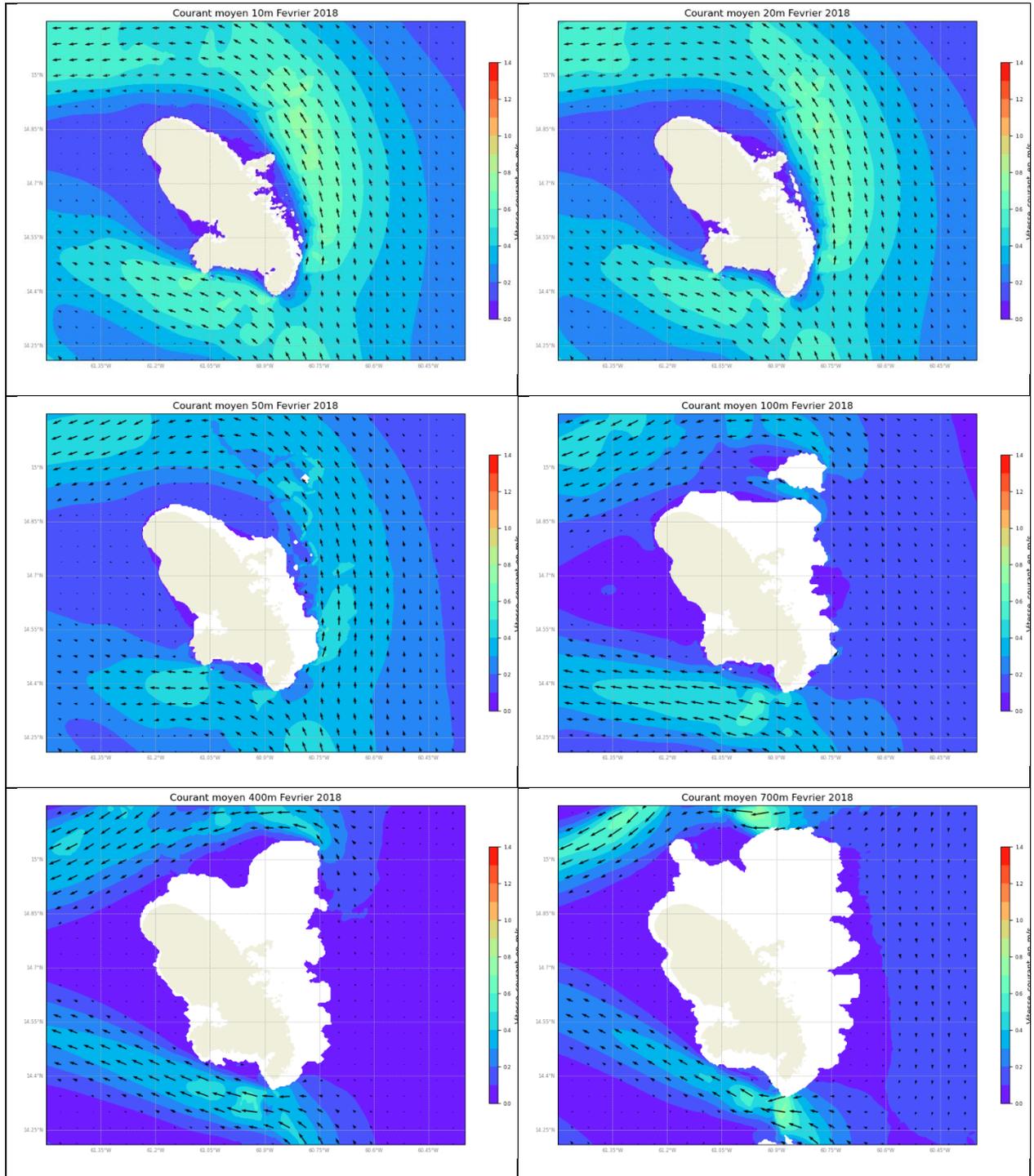


Figure 5-7 Courant moyen en surface autour de la Martinique entre le 1er et le 23 Février 2018

En profondeur, la principale différence se situe côté Atlantique, où le courant intense en surface disparaît plus rapidement, il n'est pratiquement plus détecté en dessous de 100m de profondeur. Et un contre-courant Nord-Sud apparaît à partir d'environ 1000m de profondeur, avec des vitesses très significatives. Pour mieux caractériser ce phénomène, l'intensité du courant a été tracée sur une radiale côté Atlantique pour les deux simulations (Février et Août 2018). Les résultats sont représentés sur la Figure 5-9. Pour le mois de Février, cette figure met bien en évidence la concentration du courant en surface, l'apparition d'une zone de courant pratiquement nulle entre 400 et 600m de profondeur, puis l'apparition d'un courant beaucoup plus élevé, correspondant au contre-courant. Au contraire du mois d'Août où la diminution de l'intensité du courant est pratiquement régulière entre la surface et le fond.



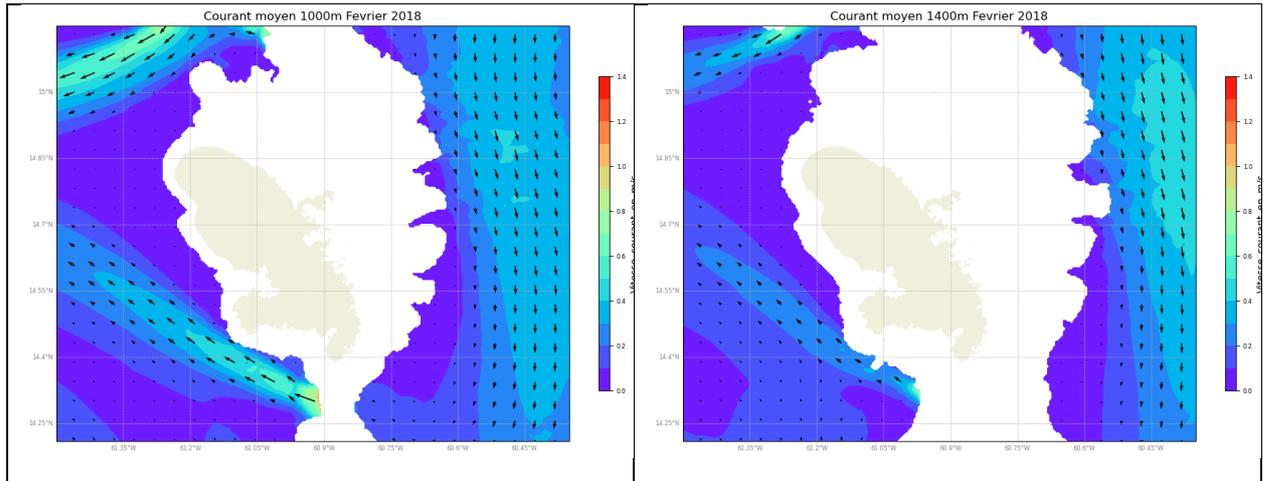


Figure 5-8 - Courant moyen du 1er au 23 Février 2018 autour de la Martinique à différentes profondeurs

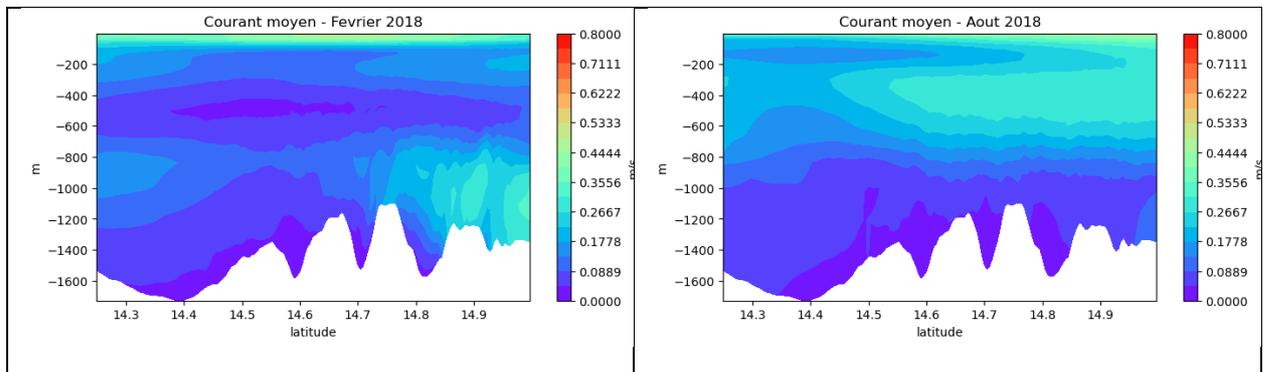


Figure 5-9 - Vitesse moyenne de courant le long d'une radiale côté Atlantique de la Martinique (longitude=60.6°)

### 5.3 CONCLUSION SUR LA CIRCULATION GENERALE

Les cartes de courant ont mis en évidence des traits communs de la circulation générale pendant les deux saisons étudiées :

- Une circulation globalement orientée du Sud vers le Nord côté Atlantique des 2 îles, qui s'infléchit pour franchir les passes entre les îles
- Un contre-courant profond très stable au Nord-Est de la Guadeloupe, avec des vitesses les plus intenses au-delà de 1000m de fond.
- Une zone de calme le long de la côte sous le vent des 2 îles

Lors de la simulation réalisée sur le mois de Février, les principales différences observées sont :

- Une orientation du courant vers le Nord-Ouest plutôt que vers le Nord au large de la Guadeloupe
- Un courant qui contourne la Martinique par le Nord en étant beaucoup plus proche de la côte
- Une structure verticale très différente du courant côté Atlantique en Martinique, avec une veine de courant plus concentrée en surface, et l'apparition d'un contre-courant intense en dessous de 1000m de profondeur.

Il est difficile de déterminer à ce stade si ces différences sont dues principalement au passage du tourbillon ou à la saisonnalité des courants. Cela pourra être confirmé par les simulations de longue durée qui seront menées dans la suite du projet pour la création du hindcast de courant.

## 6. CIRCULATION INDUITE PAR LE VENT

### 6.1 PRESENTATION DE LA SIMULATION

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats d'une simulation sur le mois d'Août 2018 dont les seuls forçages sont :

- Un forçage météo par le vent et la pression
- Les composantes de marée aux frontières du rang 0

Il s'agit donc d'une simulation ne prenant pas en compte la circulation régionale ni la stratification. Le but de cette simulation est de déterminer quelle est la part du vent par rapport à la circulation régionale dans la zone d'étude.

### 6.2 CARTES DE COURANT

Les Figure 6-1 et Figure 6-2 présentent le courant moyen en surface autour des 2 îles pour cette simulation sans la circulation générale.

Par rapport à la simulation en marée seule, les différences sont visibles essentiellement au large côté Atlantique. Un courant relativement faible ( $<0.1$  m/s généralement) apparaît dans une direction Ouest à Nord-Ouest correspondant à la direction des alizés. Cette direction est cohérente avec ce qui est attendu de l'entraînement des couches de surface par les vents dominants. Autour des îles, la situation est plus complexe :

- En Guadeloupe, la zone de forts courants autour de la Désirade correspond à des courants de marée relativement intenses, l'influence du vent n'y est probablement pas prépondérante.
- En Martinique, les zones où le courant est plus élevé sur l'Est de l'île sont des zones où le courant de marée seule était relativement faible, l'influence du vent semble donc plus importante sur cette zone où les fonds sont relativement faibles.

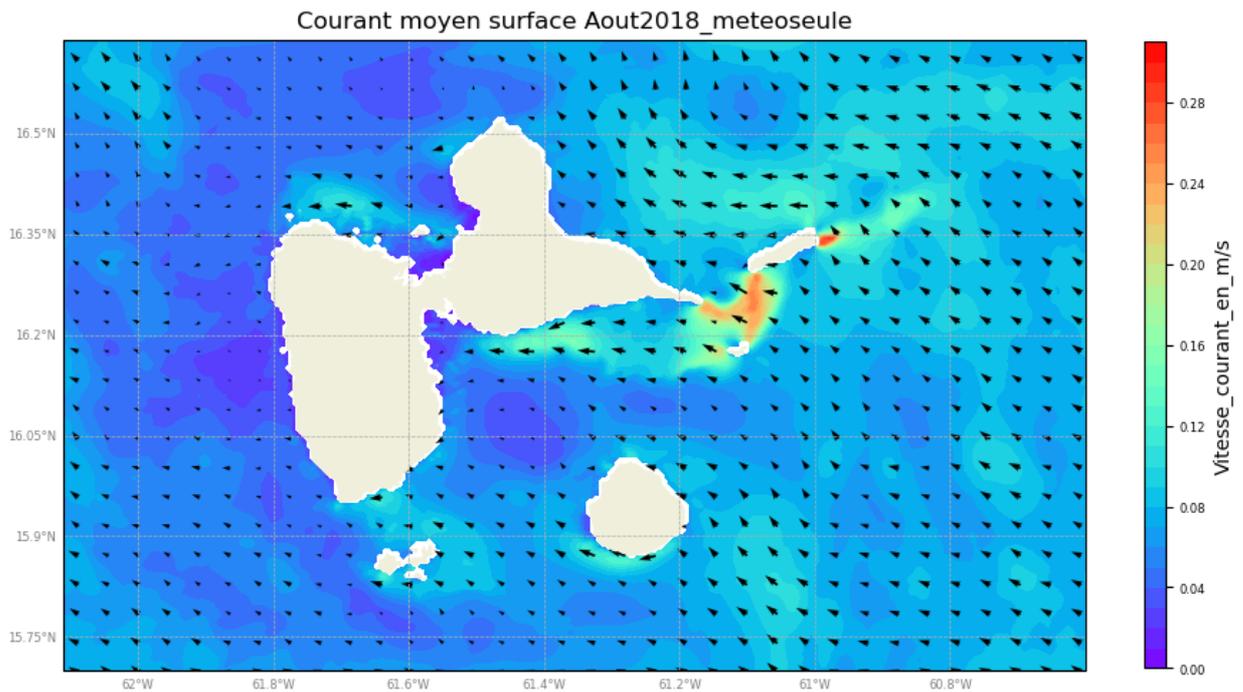


Figure 6-1 - Vitesse moyenne du courant dans une simulation marée + vent du 1er au 31 Août 2018 autour de la Guadeloupe

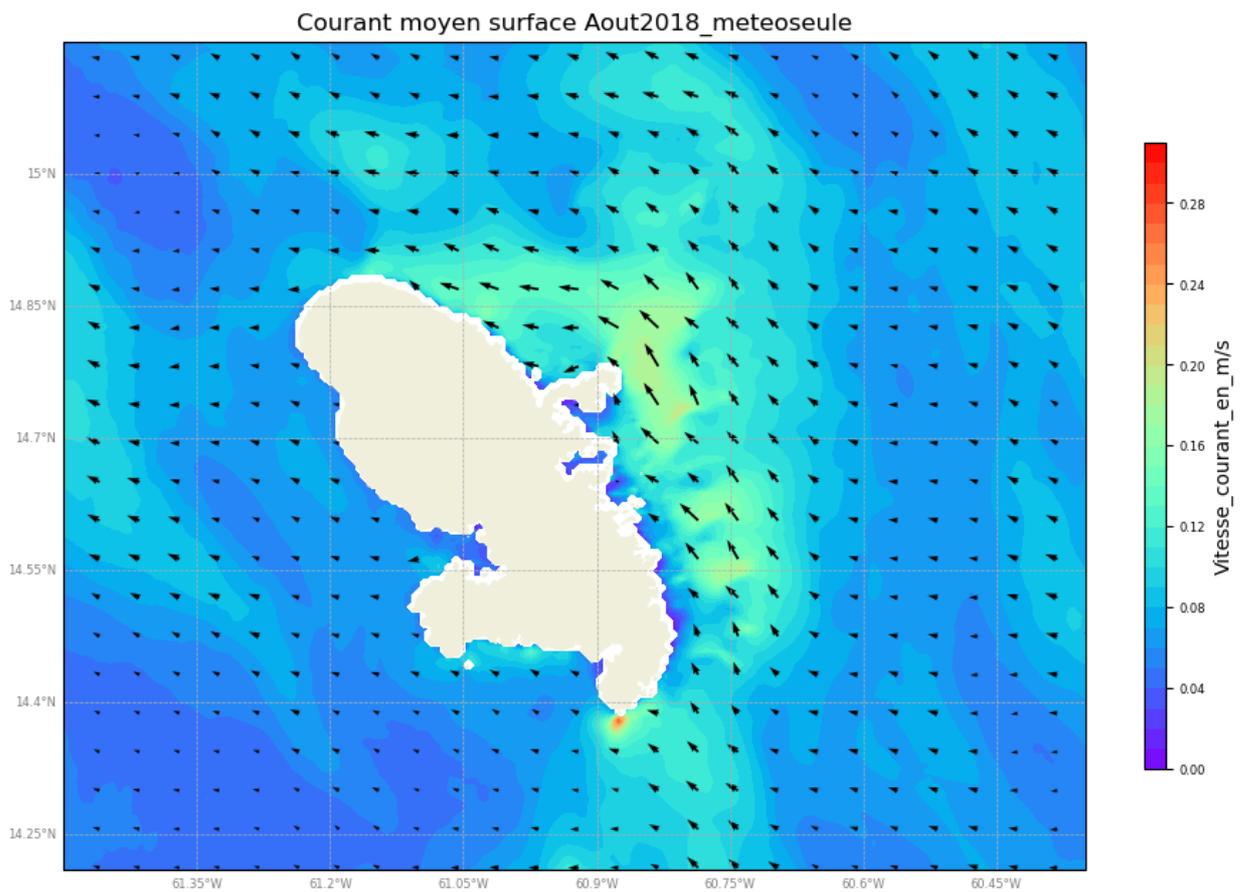


Figure 6-2 - Vitesse moyenne du courant dans une simulation marée + vent du 1er au 31 Août 2018 autour de la Martinique.

### 6.3 IMPORTANCE DE LA CIRCULATION DUE AU VENT PAR RAPPORT A LA CIRCULATION REGIONALE

Les 2 cartes suivantes présentent l'importance relative de la circulation induite par le vent et la marée par rapport à la circulation totale. Ces cartes ont été obtenues en comparant les résultats de la simulation complète (section 5.1) aux résultats de la simulation marée + vent.

Ces cartes, exprimées en pourcentages, permettent de voir quelle est l'importance de la circulation de surface induite par le vent et la marée par rapport à la circulation totale dans la zone d'étude.

Les 2 cartes confirment qu'à proximité immédiate de la côte, la circulation régionale est supplantée par les effets locaux de vent et de marée, mais cet effet peut s'estomper très rapidement sur la côte sous le vent. Au large, là où la circulation régionale est importante et l'effet de la marée inexistante, la circulation due au vent représente de l'ordre de 15 à 20% de la circulation totale.

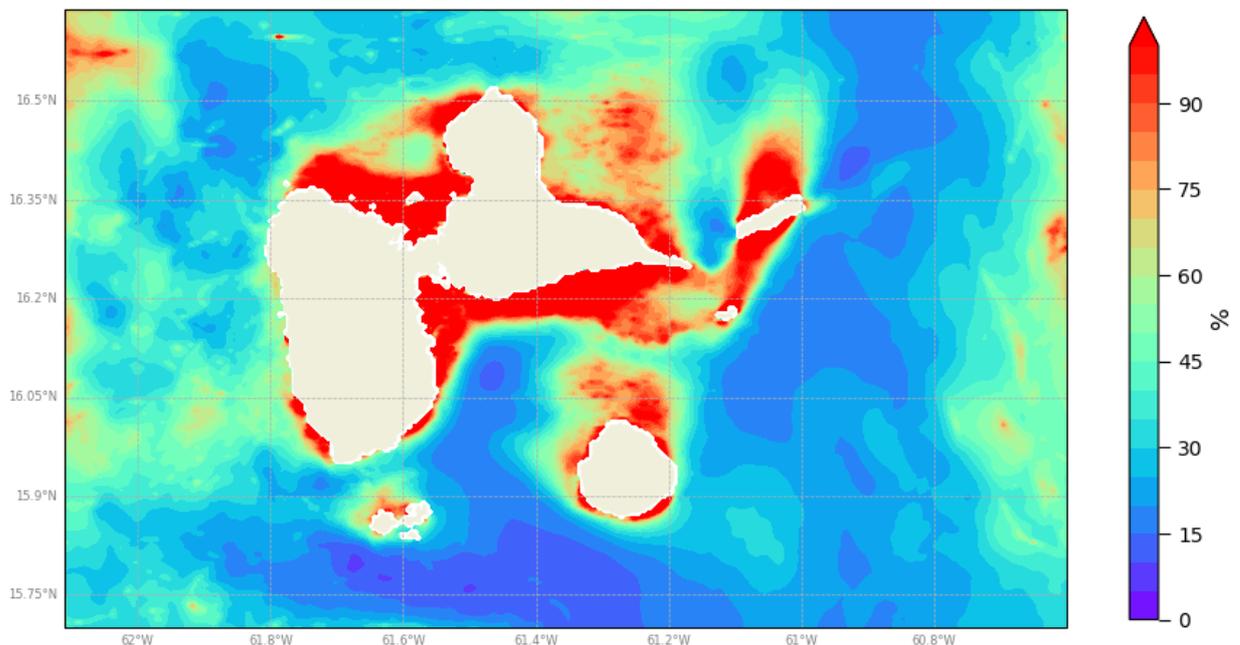


Figure 6-3 - Importance (en %) de la circulation de surface induite par la marée et le vent dans la circulation totale au mois d'Août 2018 autour de la Guadeloupe.

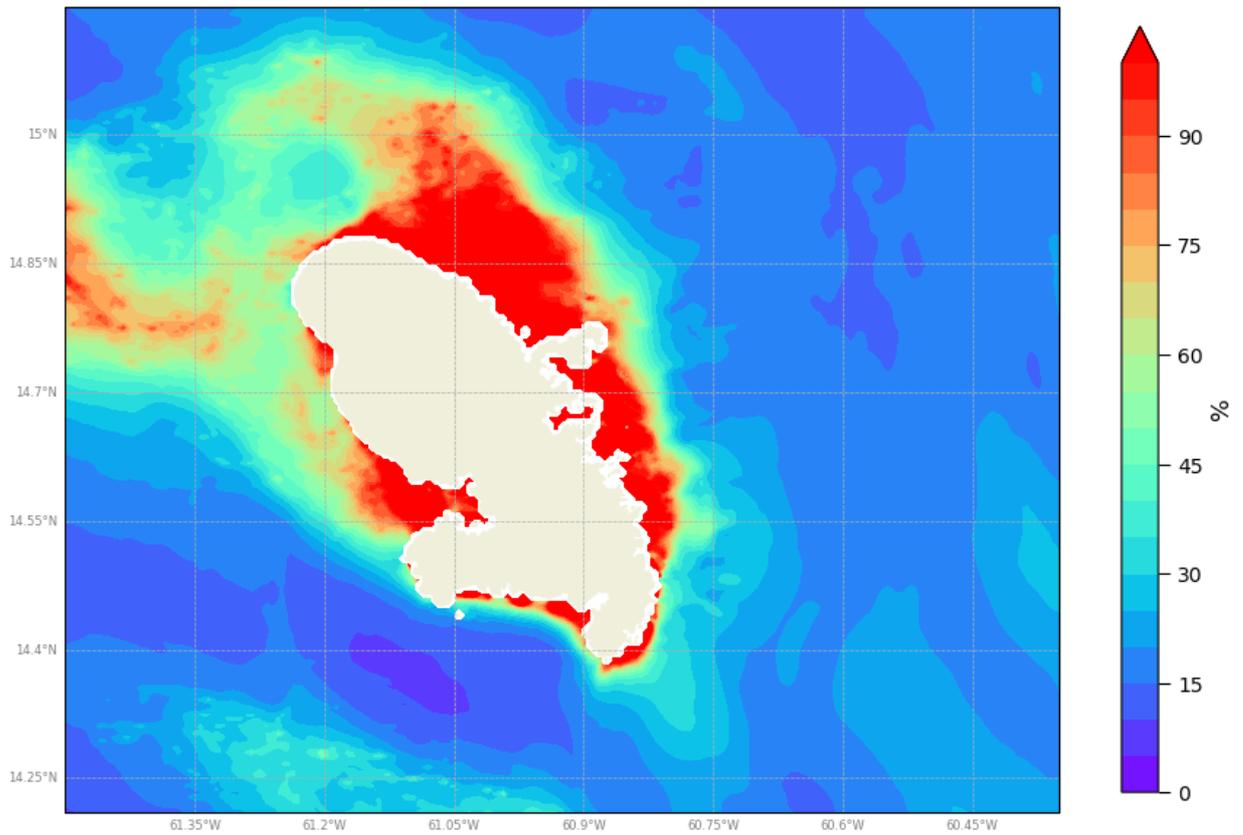


Figure 6-4 - Importance (en %) de la circulation de surface induite par la marée et le vent dans la circulation totale au mois d'Août 2018 autour de la Martinique.

---

# 7. ANALYSE DU PHENOMENE D'ONDES INTERNES

---

## 7.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous tentons d'illustrer la présence d'ondes internes dans la zone d'étude, à partir d'une simulation complète dans un premier temps, puis à partir d'une simulation incluant seulement la marée et une stratification.

Les ondes internes sont des ondes qui apparaissent dans un fluide stratifié, elles sont plus significatives sur des sauts de densité marqué, par exemple au niveau de la thermocline dans l'océan. Ces oscillations doivent être déclenchées par un forçage extérieur, qui dans le cas des ondes internes océaniques est la marée barotrope, en interaction avec un accident bathymétrique qui perturbe l'écoulement de la colonne d'eau. Ce forçage par la marée peut provoquer une oscillation de la thermocline à une fréquence égale à celle de la marée. Cette oscillation ne représente qu'un mode de la marée interne. En réalité, dans un milieu continument stratifié, la marée interne se déplace dans les trois dimensions d'espace sous la forme de rayons d'énergie, à partir du lieu de génération de l'onde. L'onde se réfléchit sur le fond et sur la surface de l'océan, ce qui lui permet de se propager sur de grandes distances.

Dans les résultats de modélisation, il est possible de diagnostiquer des zones propices à la génération d'ondes internes, par exemple en identifiant des lieux où l'oscillation de la thermocline est significative, ou en calculant un potentiel générateur de la marée interne basé sur l'interaction entre le courant barotrope et la bathymétrie. Ce sont ces diagnostics qui sont présentés dans la suite.

## 7.2 ANALYSE SUR LE MOIS D'AOUT 2018

Pour cette première approche, l'analyse est faite sur les résultats du rang 1 du modèle, dans la simulation incluant tous les forçages, sur la période du 1<sup>er</sup> au 31 Août 2018. Les résultats sont étudiés en différents points qui couvrent approximativement la frontière du rang 2 (voir Figure 7-1).

D'après l'analyse bibliographique, les ondes internes sont attendues plutôt du côté ouest, avec des ondes provenant de la mer des Caraïbes. Nous recherchons des oscillations des profils verticaux de température ou de salinité, à une fréquence correspondante à celle de la marée barotrope. L'analyse de la marée barotrope a montré que c'est l'onde M2 (de période 12,5 heures) qui domine le signal sur toute la zone. Pour tenter d'identifier ces oscillations, nous avons réalisé une analyse harmonique des valeurs de température sur l'ensemble de la colonne d'eau, et calculé en chaque profondeur l'amplitude associée à l'onde M2. Cette analyse a été réalisée en chacun des points indiqués sur la Figure 7-1.

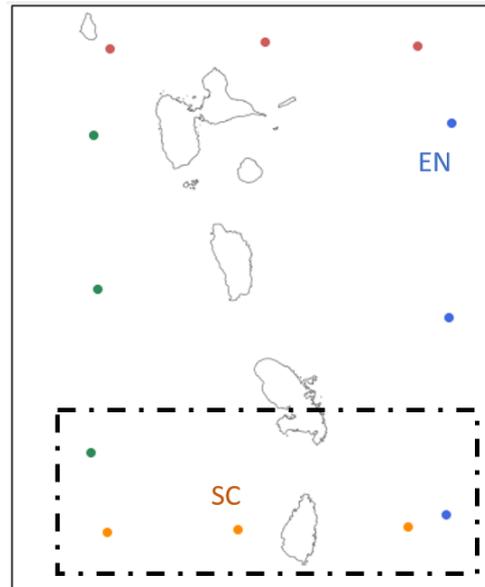


Figure 7-1 - Localisation des points d'analyse dans les résultats du rang 1

Les résultats indiquent que ce sont les points du sud de la zone (ceux dans le cadre pointillé) qui présentent les amplitudes d'oscillation les plus fortes. Deux points sont choisis pour illustrer cette différence : EN (pour frontière Est - Nord) et SC (pour frontière Sud – Centre).

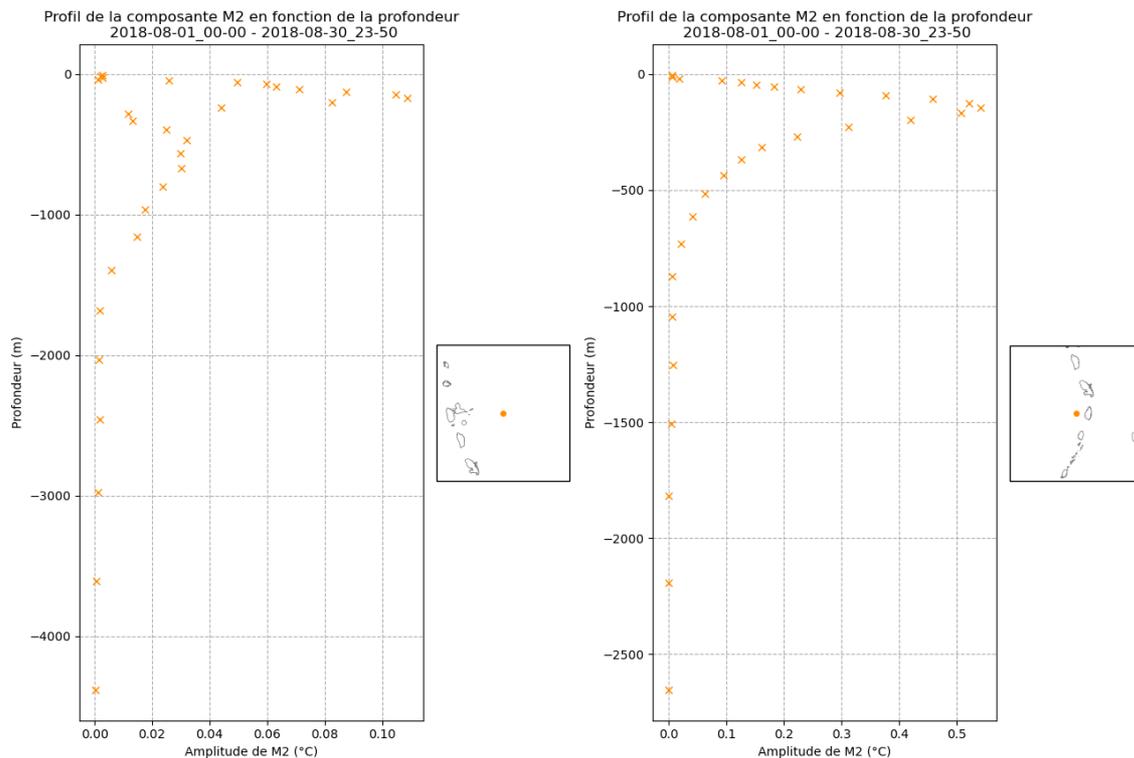


Figure 7-2 - Profil de la composante M2 issu de l'analyse harmonique de la température au point EN (à gauche) et au point SC (à droite)

Il apparaît que le pic d'amplitude se retrouve dans les deux cas aux alentours de la profondeur 200m, mais avec une intensité très différente. Sur le point EN, le profil d'amplitude est assez désordonné et atteint un maximum de 0.1°C, alors que sur le point SC, un profil très régulier apparaît avec une intensité maximale de 0.55°C. Le comportement oscillatoire du profil de

température est donc très différent entre les différents points de la zone. Et d'après cette première analyse, il semblerait que le sud de la zone soit plus propice au développement d'ondes internes.

Ces oscillations du profil de température sur le profil sont tracées sur la Figure 7-3. Les oscillations très régulières apparaissent nettement, surtout aux alentours de la profondeur 200m sur l'isobathe 20°C.

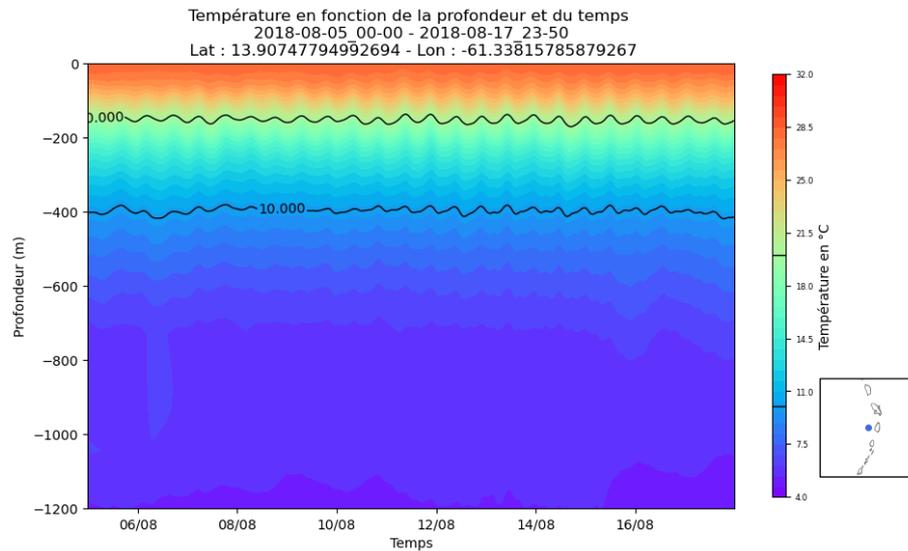


Figure 7-3 - Profil de température au point SC. Les isothermes 10°C et 20°C sont matérialisées.

Cette impression sur le profil complet est renforcée par le calcul de la profondeur des isothermes 20°C et 10°C. Les résultats sont présentés sur la Figure 7-4. L'amplitude des oscillations peut dépasser 20m sur les deux isothermes, les oscillations de l'isotherme 20°C sont plus régulières.

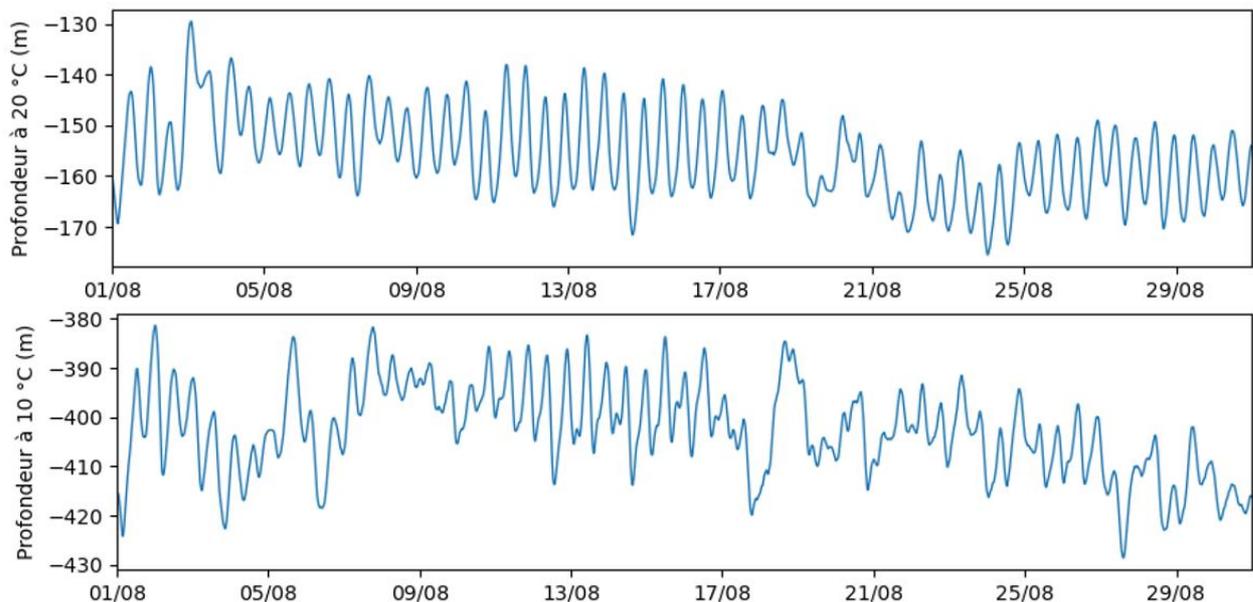


Figure 7-4 - Profondeur des isothermes 20°C (en haut) et 10°C (en bas) au point SC

## 7.3 ANALYSE D'UNE SIMULATION SIMPLIFIEE

### 7.3.1 OSCILLATION DE LA THERMOCLINE

Les ondes internes sont la résultante du forçage de la marée sur une stratification. Nous avons donc réalisé une simulation prenant en compte seulement ces deux paramètres, afin d'isoler leur interaction. Une simulation a été réalisée sur le mois d'Août avec les caractéristiques suivantes :

- Forçage de marée aux frontières du rang 0
- Stratification uniforme sur tout le domaine, représentative d'une situation de mois d'Août
- Pas de forçage météorologique

Les résultats sur l'amplitude des oscillations de la thermocline sont exactement les mêmes que dans la simulation précédente : les amplitudes les plus significatives se situent dans le sud de notre zone d'étude. Comme cette zone sud englobe la Martinique et que la bibliographie indique la possibilité d'observations d'ondes internes dans la Baie de Fort de France, nous nous focalisons également sur cette zone.

La Figure 7-1 montre les oscillations observées sur le profil de température en un point de la Baie de Fort de France, dans la simulation de rang 2. Les oscillations de l'isotherme 27°C sont très significative, et peuvent atteindre près de 10m, dans une zone dépassant à peine les 40m de fond.

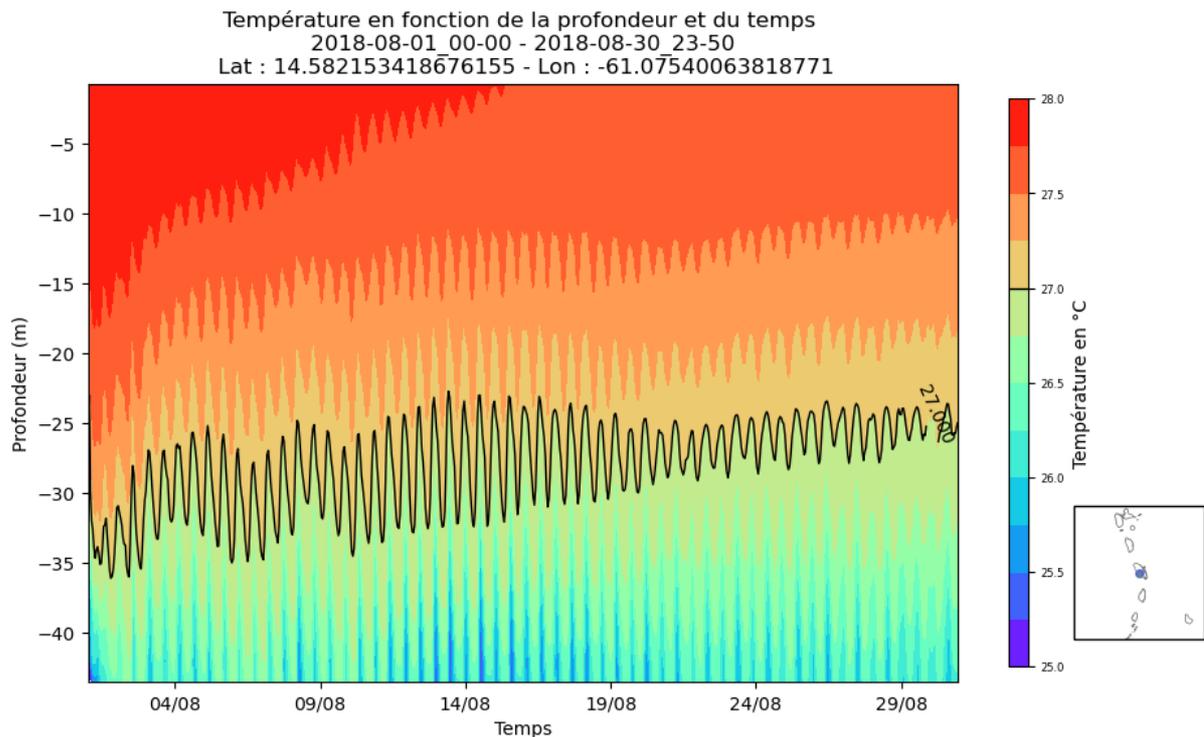


Figure 7-5 - Profil de température dans la Baie de Fort de France – simulation marée + stratification

A l'inverse, en un point situé au large de Fort de France par 1700m de fond, les oscillations de la thermocline ne sont pas aussi significatives (voir Figure 7-6). Cela semble indiquer que le passage de l'onde de marée sur la forte pente topographique qui longe l'Ouest de la Martinique provoque l'apparition d'ondes internes qui se propagent de manière significative dans la Baie de Fort de France.

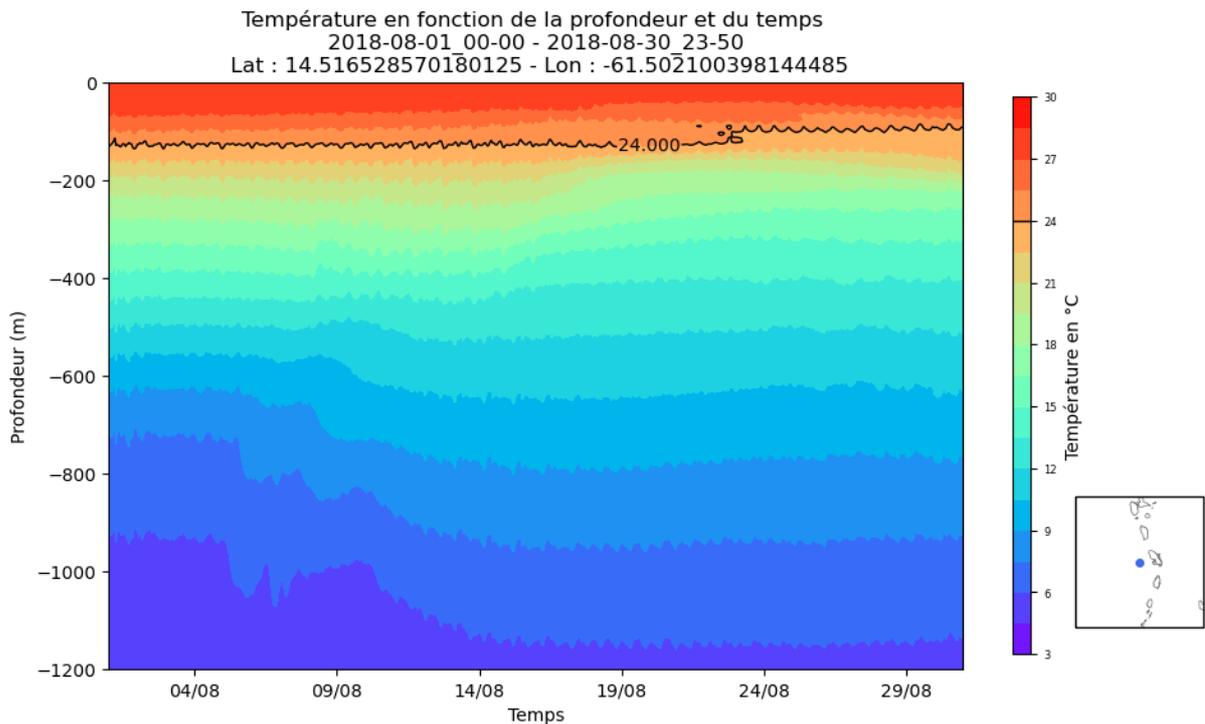


Figure 7-6 - Profil de température au large de Fort de France – simulation marée + stratification

### 7.3.2 FORCE GENERATRICE DE LA MAREE INTERNE

Les résultats présentés ici se basent sur les travaux de Baines (1982), qui établissent une équation pour la force génératrice de la marée interne. Cette équation est notamment reprise par Pichon et al (2012) pour le Golfe de Gascogne, dont nous reprenons le formalisme ici. La formule complète est exprimée ainsi :

$$F(z) = -\frac{2\pi z N^2(z)}{\sigma H^2} \left[ Q_x \frac{\partial H}{\partial x} + Q_y \frac{\partial H}{\partial y} \right]$$

Où  $z$  est l'axe vertical orienté positivement vers le haut et dont l'origine est à la surface.  $N(z)$  est la fréquence de Brünt-Väisälä,  $\sigma$  est la fréquence de la marée barotrope,  $H$  est la profondeur et  $Q$  est le flux barotrope. Dans le cas de notre modélisation simplifiée, nous négligeons les variations de  $N(z)$ , et nous assimilons  $Q$  à la vitesse du courant barotrope intégré sur un cycle de marée. Nous exploiterons le résultat de manière qualitative et adimensionnel. Notre équation se résume alors à :

$$F(z) = -\frac{z}{H^2} \left[ U \frac{\partial H}{\partial x} + V \frac{\partial H}{\partial y} \right]$$

La carte suivante présente l'intégrale de cette force  $F$  entre les profondeurs 100m et 5000m, le résultat est normé entre 0 et 1. La Figure 7-7 indique qu'une zone importante de génération d'ondes internes existe au niveau de l'Aves Ridges à l'Ouest de l'arc Antillais. La remontée du plateau continental à proximité des îles est aussi une zone potentielle de génération.

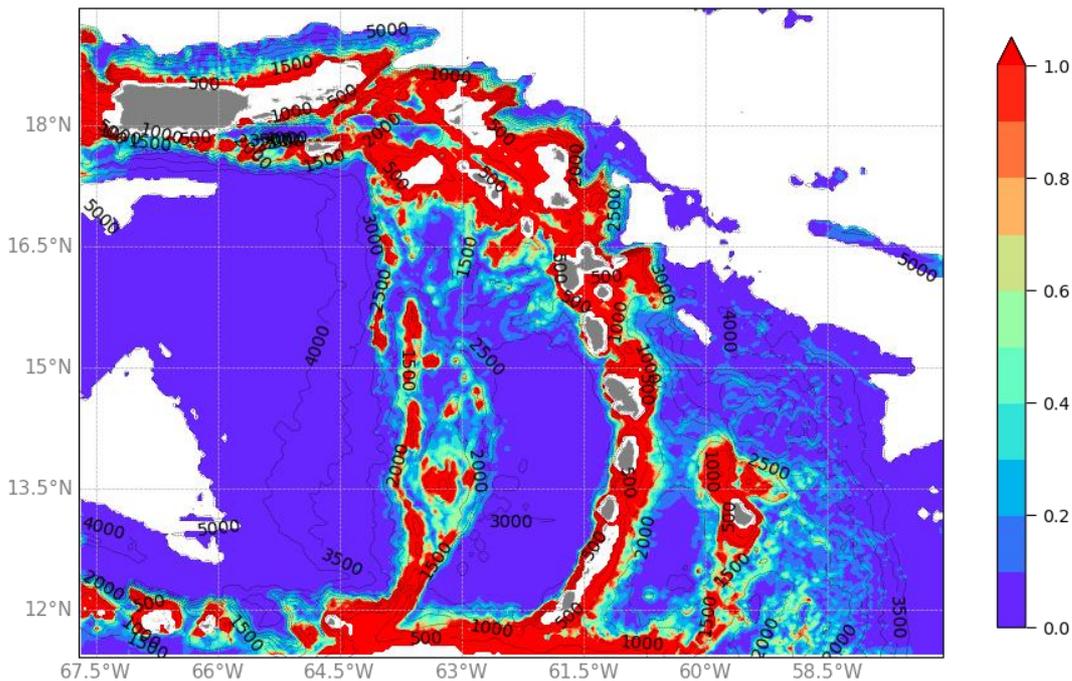


Figure 7-7 Force génératrice de la marée interne (rang 0)

## 7.4 EFFET SUR LES PROFILS DE VITESSE

Pour démontrer un possible impact des ondes internes dans la Baie de Fort de France, les figures suivantes comparent les profils de vitesse obtenus avec la simulation « marée + stratification », et la simulation en marée seule.

Dans la Baie de fort de France (Figure 7-8), la vitesse du courant est multipliée par 4 environ en présence de stratification, avec une intensification très marquée sur le fond.

Au large (Figure 7-9), l'oscillation de la thermocline est faible, mais une intensification très nette du courant est tout de même observée en surface, ainsi que dans une zone comprise entre 400 et 1000m de fond environ, et périodiquement au fond.

L'intensification des courants en surface et au fond pourrait être liée à la réflexion des rayons d'ondes internes. Ces rayons sont amplifiés dans la Baie par petits fonds, et apparaissent moins par grand fond à l'Est de leur zone de génération. L'augmentation des vitesses au centre de la colonne d'eau sur le point au large est plus difficile à relier à cette théorie.

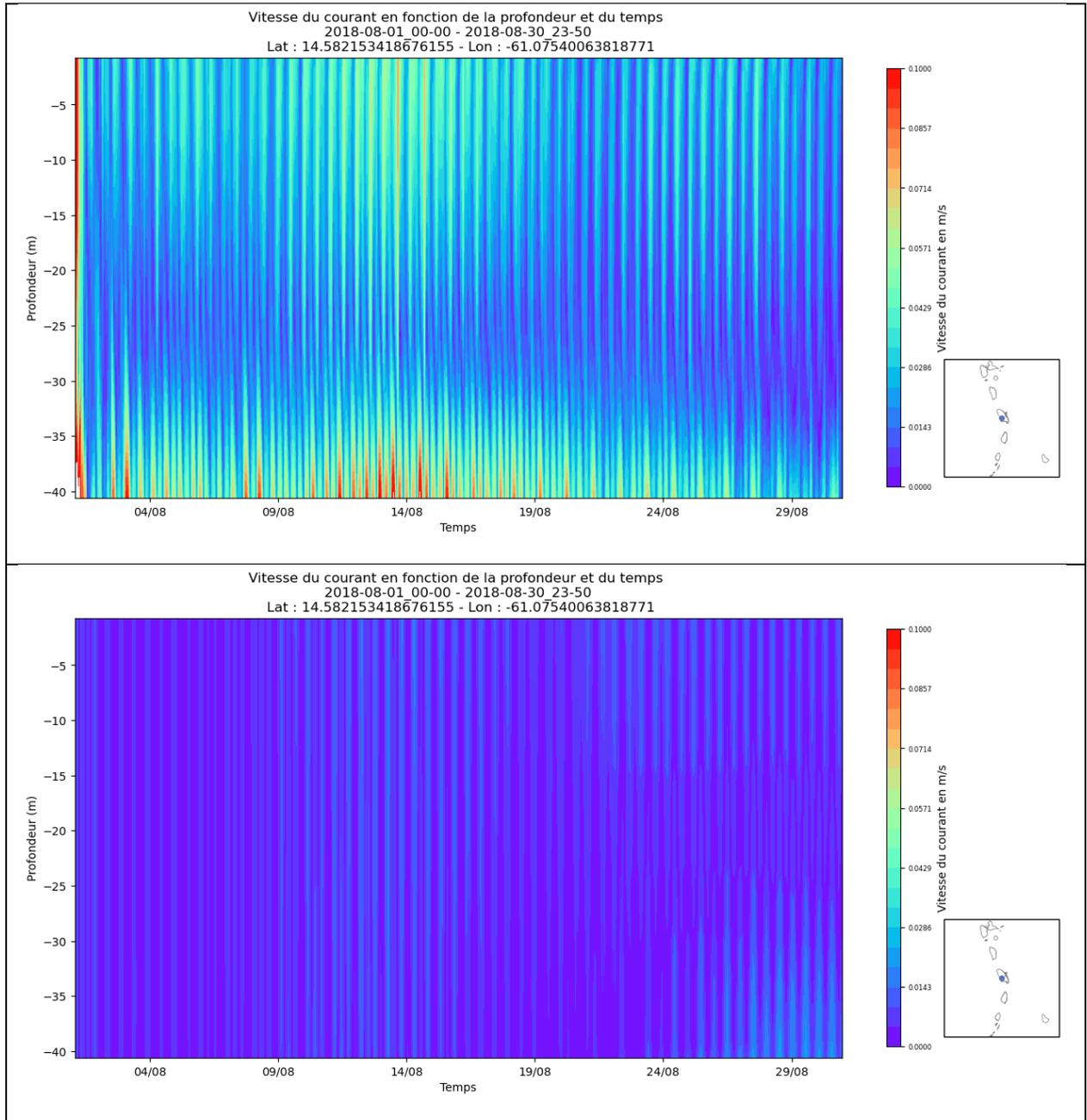


Figure 7-8 - Profil de vitesse dans la Baie de Fort de France : en présence d'une stratification (en haut) et sans stratification (en bas)

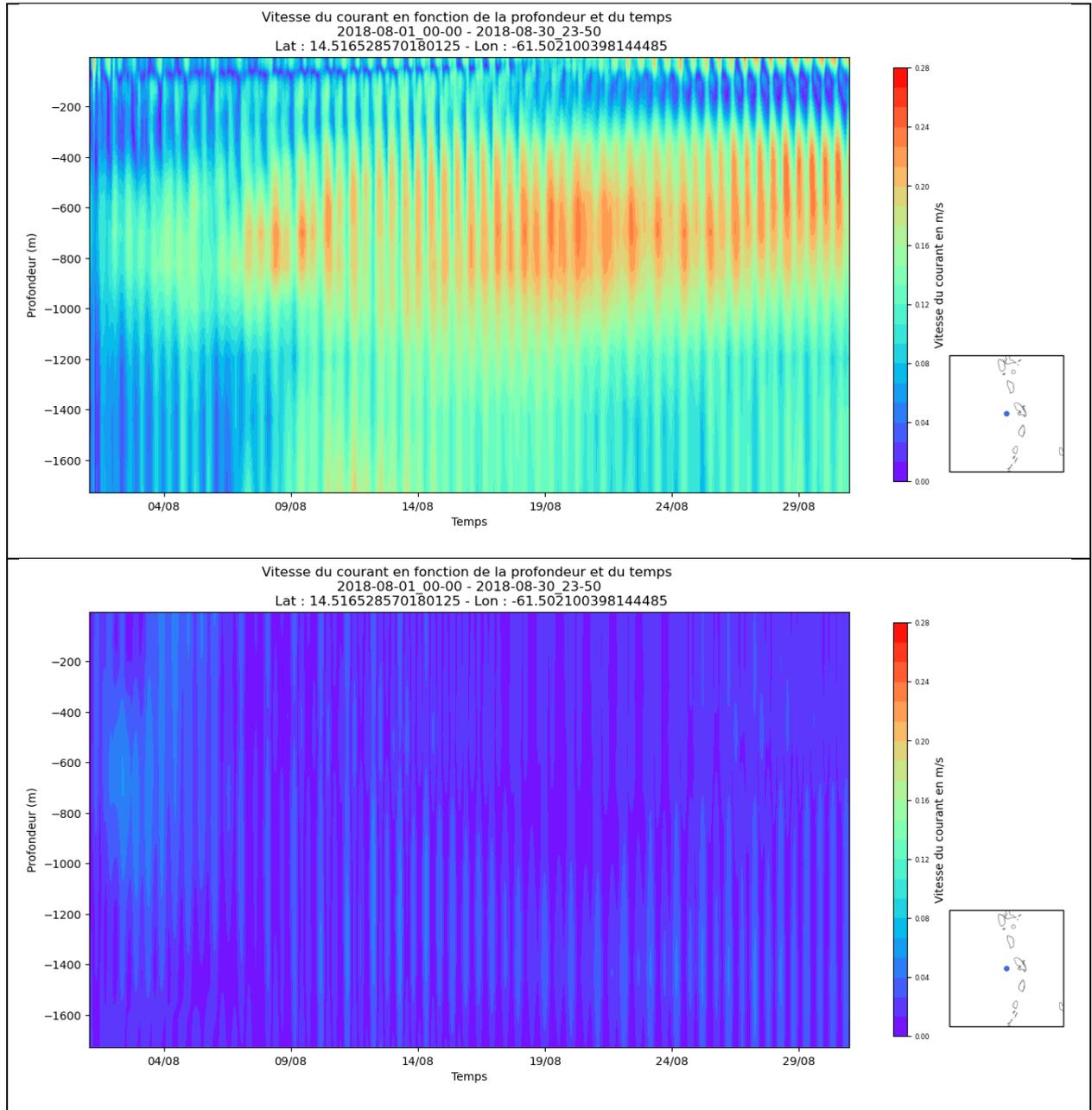


Figure 7-9 - Profil de vitesse au large de Fort de France : en présence d'une stratification (en haut) et sans stratification (en bas)

## 8. CONCLUSIONS

---

Le modèle MARS 3D a été utilisé pour construire une configuration réaliste autour des îles de Guadeloupe et de Martinique. Différentes configurations ont été testées, aussi bien en termes de paramétrages du modèle que de choix des conditions aux limites. Après différents tests, une configuration combinant un forçage météorologique issu de CFSv2 et un forçage océanographique issu de Hycom a été retenue. Des ajustements ont également été réalisés sur les couches éponges aux frontières et sur le paramètre de la viscosité du modèle.

Cette configuration a ensuite été utilisée pour étudier quatre grands phénomènes océanographiques de la zone :

- La marée barotrope : les vitesses de courant modélisées correspondent avec les éléments connus dans la littérature, des cartes de direction de courant pour les différentes phases de la marée ont été tracées.
- La circulation régionale : les simulations ont confirmé les éléments connus sur la circulation de surface, avec un flux provenant du Sud à Sud-Ouest et s'engouffrant dans les passes entre les îles. Des variations sur le chemin exact de ces flux ont été mises en évidence. Une circulation profonde très significative dans le sens Nord-Sud le long de la côte Atlantique a également été mise en évidence
- La circulation due au vent : les simulations ont démontré que la circulation induite par le vent est significative sur l'ensemble du domaine. Elle représente environ 20% de la vitesse totale du courant au large, là où le courant régional est significatif.
- Les ondes internes : les simulations ont montré de larges oscillations de la thermocline pouvant témoigner de la génération d'ondes internes, essentiellement dans la partie Sud du domaine. La Martinique serait donc plus concernée que la Guadeloupe par ce phénomène. Une analyse plus précise devant Fort-de-France a montré que ces oscillations sont beaucoup plus marquées par petits fonds à l'intérieur de la Baie, qu'au large. Cela confirme la formation d'ondes internes au passage de la marée sur les fortes pentes à l'Ouest de la Martinique. Les courants associés sont significatifs au fond et en surface, et devront être confirmés par les observations.

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

- Cassou (2008). *Intraseasonal interaction between the Madden-Julian Oscillation and the North Atlantic Oscillation*. *Nature* 455:523-527
- Chérubin, L. M., & Richardson, P. L. (2007). Caribbean current variability and the influence of the Amazon and Orinoco freshwater plumes. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 54(9), 1451-1473.
- Baines P.G. (1982). On internal tide generation models. *Deep Sea Research*, Vol.29, N°3.
- Fratantoni, D. M., & Richardson, P. L. (2006). The evolution and demise of North Brazil Current rings. *Journal of Physical Oceanography*, 36(7), 1241-1264.
- Johns, W. E., Townsend, T. L., Fratantoni, D. M., & Wilson, W. D. (2002). On the Atlantic inflow to the Caribbean Sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 49(2), 211-243.
- MacQueen J.B. (1967) "Some Methods for classification and Analysis of Multivariate Observations", *Proceedings of 5-th Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, Berkeley, University of California Press, 1:281-297
- Michelangeli, R.A., Vautard, R., and Legras, B. (1995). *Weather regimes: recurrence and quasi stationarity*. *J. Atmos. Sci.* 52, 1237–1256.
- Pujos M., Gonzalez J.L., Pons J.C. (1992). Circulation des eaux sur les plateaux insulaires de Martinique et Guadeloupe. ORSTOM, 1992, p. 415-435. (Colloques et Séminaires). ISBN 2-7099-1109-4
- Köhler J., Mertens C., Walter M., Stöber U, Rhein M., Kanzow T. (2014). Variability in the Internal Wave Field Induced by the Atlantic Deep Western Boundary Current at 16°N. *Journal of Physical Oceanography*. 44. 10.1175/JPO-D-13-010.1.