

LEGOS - Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Centre de Nouméa.

# Rapport de Projet de Fin d'Etudes

Contribution au système opérationnel de prévision de  
dérive FVCOM-ALADIN-MOTHY appliqué aux lagons de  
Nouvelle-Calédonie



Par **Caroline VELAY**

*ENSTA Bretagne*

*ENSI2015 Option Hydrographie*

Encadrée par

Jérôme LEFEVRE, *LEGOS, IRD Centre de Nouméa*

Yvan MERCIER, *Météo France*

## Remerciements

Ce stage s'est déroulé au sein de l'équipe d'océanographie physique du centre IRD de Nouméa. Je tiens tout d'abord à remercier mon encadrant Jérôme Lefèvre pour son aide précieuse et sa disponibilité ainsi que pour ses nombreuses heures supplémentaires (et weekends) sacrifiées devant les difficultés rencontrées durant ce projet. Je remercie aussi le reste de l'équipe pour son chaleureux accueil.

Merci aussi à Yvan Mercier et au chef du MRCC de Nouméa pour leur soutien technique, partage d'informations et conseils.

Je remercie mon encadrante école Amandine Nicolle pour sa supervision et les professeurs de l'option Hydrographie de l'ENSTA Bretagne pour leurs enseignements.

Enfin je remercie mes amis et mes parents pour leur soutien, ainsi que toutes les personnes rencontrées en Nouvelle Calédonie pour tous ces bons moments passés ensemble.

## Résumé

Afin de fournir un outil opérationnel de prédiction de la dérive de diverses cibles pour le Centre de Coordination de Sauvetage en Mer (MRCC) de Nouméa, l'IRD et Météo France propose un couplage entre le modèle de circulation fine échelle FVCOM et le modèle de dérive de Météo France MOTHY. Ces prévisions de dérives seront opérées par le Centre National de Prévisions Marines (CNPM) de Météo-France sur la demande du MRCC qui voit son nombre d'intervention augmenter.

Dans ce rapport, nous présentons l'ajustement et la validation du modèle FVCOM sur les lagons de Nouvelle Calédonie. En employant une grille de calcul non-structurée (maillage triangulaire), FVCOM est particulièrement approprié pour représenter la géomorphologie complexe de la région d'étude. Le code est également massivement parallélisé permettant des temps d'exécution compatibles avec une utilisation en mode opérationnel. Le modèle offre également la possibilité de forcer les frontières ouvertes par des modèles océaniques globaux. La relaxation (nudging) est appliquée en utilisant les solutions du système de prévision Australien BLUElink, mais un forçage par le système Français MERCATOR Océan est également réalisable. Afin de déterminer la meilleure configuration possible du modèle, nous avons utilisé des observations de courant de la station ADCP Moise à partir desquelles nous avons étudié les sources de variabilité des courants lagunaires. Les composantes liées à la marée, au vent, à la grande échelle et à la stratification ont été considérées. Nous avons étudié leurs influences sur la qualité des prévisions de dérives MOTHY, et donc sur la capacité du modèle lagonaire à reproduire correctement les courants de surface. Ces expériences ont permis de tester la chaîne opérationnelle proposée dont le principe générale est aussi expliqué dans ce rapport.

## Abstract

Météo France and IRD propose to associate the high resolution coastal ocean circulation model (FVCOM) with the French operational oil spill drift forecast system (MOTHY) in order to create an operational drift forecast system. The forecast will be executed by the National Center for Marine Prevision (CNPM) of Météo France to provide drift forecast to the Marine Rescue Coordination Center (MRCC) of Nouméa which has to handle an increasing number of interventions.

This report presents the sensitivity studies and the validation of FVCOM applied to the lagoons of New Caledonia. FVCOM uses an unstructured grid suitable to represent complex geomorphology as our region of study. The FVCOM code is parallelized to minimize the time of computation. The model offers also the possibility of nudging at boundaries with a global ocean model. During this study, the nudging has been made to the Australian forecast system BLUElink but it is also feasible with the French system MERCATOR Océan. In order to determine the best FVCOM set up, we analyzed the origin of current's variability measured at our reference station Moise. The influence of tide, wind, large scale gradient and stratification on the circulation have been identified and their impacts on the quality of the drift forecasts have been examined. The runs made for these experiments allowed us to try out the operational system detailed in a second part of this report.

## Mots-clés

FVCOM, MOTHY, Nouvelle Calédonie, océanographie opérationnelle, courants lagunaires, déversement accidentel, secours en mer

## Table des matières

Introduction.....	6
1. Généralités .....	7
1.1. Présentation de la zone d'étude : La Nouvelle Calédonie .....	7
1.2. Utilité d'un système opérationnel de prévision de dérive.....	9
1.2.1. Le trafic maritime en Nouvelle Calédonie.....	9
1.2.2. La pollution maritime.....	10
1.3. Modélisation sur la Nouvelle Calédonie .....	10
1.4. Présentation des modèles utilisés.....	12
1.4.1. Le modèle de circulation océanique FVCOM .....	12
1.4.2. Le modèle de dérive MOTHY.....	13
1.5. Présentation des jeux de forçage et des données de validation .....	15
1.5.1. Bathymétrie.....	15
1.5.2. Forçage en marée .....	15
1.5.3. Forçage météorologique.....	15
1.5.4. Forçage océanique aux frontières .....	16
1.5.5. Données de validation : Observations .....	16
2. Calibration et validation du modèle de circulation FVCOM .....	18
2.1. Test de stabilité : Utilisation de grille avec différentes topographies.....	18
2.1.1. Analyse harmonique de la surface libre.....	18
2.1.2. Analyses harmoniques des courants de marée.....	22
2.2. Influence de la longueur de rugosité.....	24
2.2.1. Sensibilité de l'énergie cinétique turbulente au choix de $z_0$ .....	24
2.2.2. Sensibilité des courants de marée au choix de $z_0$ .....	25
2.3. Etude des sources de variabilité du courant : résultats de la station ADCP Moise.....	26
2.4. Amélioration de la prédiction des courants de marée avec FVCOM 3D en mode barocline .....	27
2.5. Etude de FVCOM en mode barocline avec nudging aux frontières.....	28
2.5.1. Principe du nudging .....	29
2.5.2. Sensibilité au coefficient de Smagorinsky et à la distance de nudging.....	29
2.6. Résultats intermédiaires.....	32
2.6.1. Climatologie : Comparaison avec les observations .....	32
2.6.2. Analyse harmonique des élévations et courants de marée .....	35
3. La chaîne opérationnelle FVCOM – MOTHY – ALADIN.....	36
3.1. Principe du système opérationnel FVCOM-MOTHY-ALADIN .....	36
3.1.1. Préparation des données .....	37
3.1.2. Les conditions initiales.....	37

3.1.3.	Les forçages en surface .....	38
3.1.4.	Les conditions aux frontières .....	38
3.2.	Arborescence des répertoires de la chaîne opérationnelle.....	39
3.2.1.	Les fichiers de contrôles : Les namelists et les fichiers log .....	40
3.3.	Tests de validation et de sensibilité du couplage modèle FVCOM-MOTHY .....	42
3.3.1.	Reproduction de situations réelles .....	42
3.3.1.1.	Cas des flotteurs .....	42
3.3.1.2.	Cas de l'annexe et l'enfant disparus, Nord de la Grande Terre.....	46
3.3.1.3.	Cas de la plate dérivante, lagon Sud-Ouest.....	47
3.3.1.4.	Cas de la dérive du voilier l'Eglantine .....	48
3.3.1.5.	Cas des plongeurs dérivants, lagon Sud-Ouest.....	49
3.3.1.6.	Exercice fictif plan POLMAR.....	50
3.3.2.	Tests de sensibilité.....	51
3.3.2.1.	Sensibilité des prévisions à l'utilisation de FVCOM en mode barotrope sans grande échelle, avec la grande échelle et barocline.....	51
3.3.2.2.	Sensibilité à la fréquence temporelle de rafraichissement des courants FVCOM dans MOTHY.....	53
3.3.2.3.	Sensibilité à la résolution spatiale des courants FVCOM intégrés dans FVCOM .....	54
4.	Discussion .....	56
	Conclusion .....	58
	Liste des figures .....	59
	Liste des tableaux .....	63
	Liste des abréviations.....	64
	Bibliographie .....	69

## Introduction

L'objectif de ce stage est de mettre en place un outil opérationnel de prédiction de la dérive de diverses cibles pour le Centre de Coordination de Sauvetage en Mer (MRCC) de Nouméa. Ces prévisions de dérives seront opérées par le Centre National de Prévisions Marines (CNPM) de Météo-France sur la demande du MRCC qui voit son nombre d'intervention augmenter. En effet, la Nouvelle Calédonie est un lieu de trafic maritime assez important et ses lagons, faisant partie du patrimoine mondial de l'UNESCO, sont exposés au risque de pollution industrielle.

Afin d'améliorer la résolution et les prévisions du Modèle Océanique de Transport des HYdrocarbures de Météo France (MOTHY) (Daniel, Varlamov, & Dandin, 2006) dans les lagons de Nouvelle Calédonie, Météo France et l'Institut pour la Recherche et le Développement (IRD) proposent un couplage entre le modèle de circulation océanique côtière aux volumes finis (FVCOM) (Chen, C, Beardsley, R.C, 2011) en grille non structurée et MOTHY. En raison de sa grande flexibilité (usage de maillages triangulaires), le modèle FVCOM a été sélectionné afin d'améliorer les prévisions de courants marins dans les lagons à la géomorphologie et bathymétrie complexes. Le système MOTHY est actuellement forcé par des courants basses fréquences extraits du modèle global MERCATOR Océan à la résolution inadaptée sur les lagons. Avec les nouvelles solutions FVCOM, le système de prévision de dérive MOTHY bénéficiera de courants à hautes résolutions (jusque 50 m de résolution) et à hautes fréquences (intégration de la marée) et de meilleure qualité. De plus, un rappel de FVCOM aux frontières vers les solutions MERCATOR Océan permet de considérer les sources externes de forçage à méso-échelle et à grande échelle.

Mon rôle consiste à la réalisation d'une chaîne opérationnelle automatisée de modélisation des courants avec FVCOM forcé par des champs météorologiques de Météo France. Divers systèmes analogues existent déjà en France à Météo France, l'Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER) (Charria & Repecaud, 2014), l'IRD (Marchesiello et al., 2008) et à l'étranger (Peng, Jr., Zhang, & Iii, 2014)(Zhang Aijun, 2014).

Conçus pour fonctionner sur plateforme Linux, les composants du système doivent reposer sur des scripts perl et Python. Les transferts de produits numériques entre les modèles doivent être efficaces et le plus rapide possible.

Afin de fournir des forçages de courant 3D réalistes au modèle MOTHY, il est important de tester la sensibilité du modèle FVCOM et de déterminer les paramètres du modèle permettant une bonne reconstitution de la circulation hydrodynamique de notre zone d'étude : Les lagons de Nouvelle Calédonie.

La première partie de ce rapport situe notre zone d'étude, présente l'intérêt d'un tel système opérationnel en Nouvelle Calédonie et les travaux de modélisation déjà effectués sur les lagons de Nouvelle Calédonie. Nous présentons aussi le fonctionnement des principaux modèles utilisés dans le cadre de ce stage : FVCOM et MOTHY. La partie suivante est consacrée à la validation et au test de sensibilité de FVCOM à différents paramètres. Après cette partie d'adaptation du modèle océanique à notre zone d'étude, nous expliquons le principe de la chaîne opérationnel MOTHY-FVCOM-ALADIN. Les différentes étapes permettant le couplage entre FVCOM et MOTHY sont détaillées. Enfin, des tests pré-opérationnels du système FVCOM-MOTHY ont été réalisés de manière à identifier les faiblesses de la chaîne et les corriger. Ainsi dans la dernière partie, nous étudions la validité du couplage FVCOM-MOTHY en jouant des situations réelles de dérive. Nous testons aussi la sensibilité du modèle de dérive à différents paramètres tels que la fréquence de rafraichissement des courants, la résolution des courants et les sources de variabilité des courants.

# 1. Généralités

## 1.1. Présentation de la zone d'étude : La Nouvelle Calédonie

La Nouvelle Calédonie se situe entre les latitudes 20 - 23°S et les longitudes 164 et 168° N, au milieu de la mer de Corail, dans le Pacifique Sud-Ouest subtropical. Elle est constituée d'une île principale dite « la Grande Terre » orientée du Sud Est vers le Nord-Ouest, des trois îles Loyauté Ouvéa, Lifou et Maré situées à l'Est de l'île principale, de l'île des Pins au Sud Est et des îles Belep au Nord. La Grande Terre est entourée d'un lagon de près de 24 000 km<sup>2</sup>, 3ème plus grand lagon du monde, délimité par une barrière de corail d'environ 1600 km.

Les lagons de Nouvelle Calédonie ont une bathymétrie complexe et mal connue. La profondeur varie entre 1 et 50 m à l'intérieur du lagon et augmente rapidement jusqu'à 600 m à l'extérieur de la barrière de corail comme le montre les coupes bathymétriques présentées sur la figure 1.

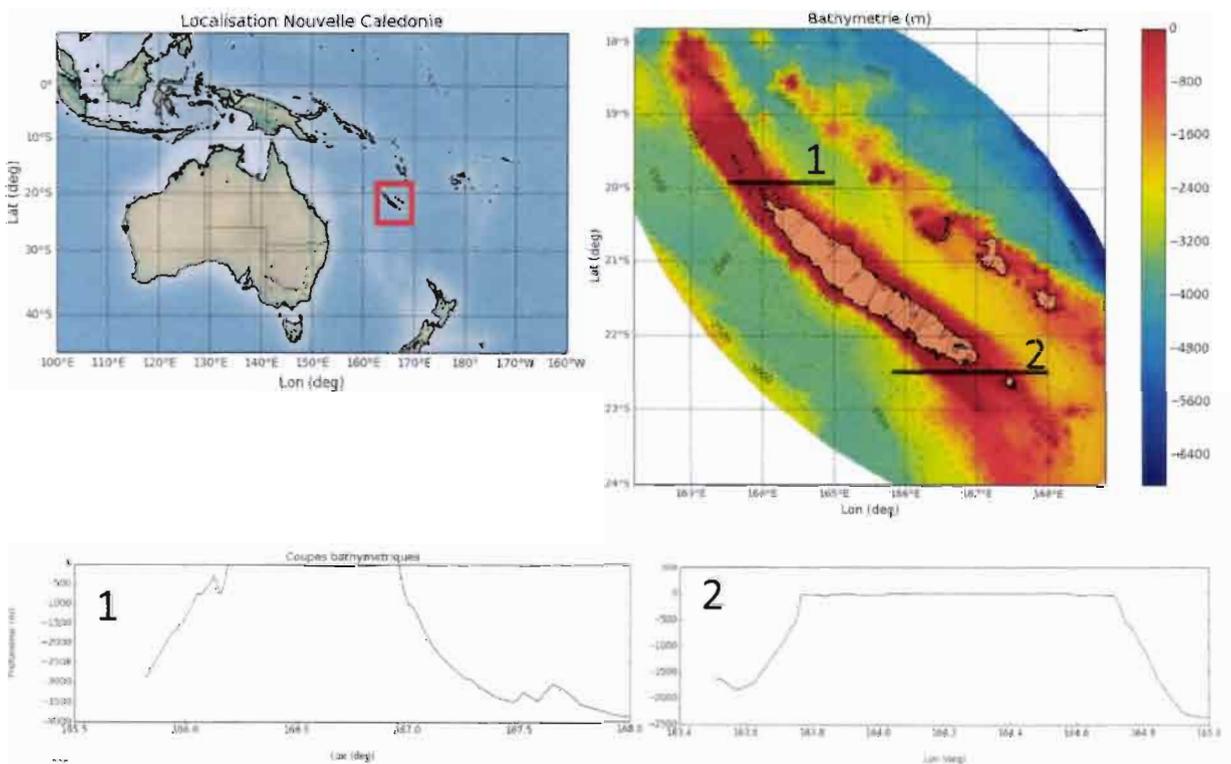


Figure 1. Situation de la Nouvelle Calédonie et sa bathymétrie avec une coupe bathymétrique au Nord [1] et au Sud [2].

L'orientation de la Nouvelle Calédonie fait d'elle un endroit propice aux évènements de circulation particuliers liés aux vents comme les upwellings. En effet, les alizés, régime de vent le plus fréquent (Lefèvre et al. 2010), soufflent parallèlement au récif induisant un transport d'Ekman vers le Sud-Ouest et des upwelling le long de la barrière de la côte Ouest. Les eaux du lagon Sud-Ouest sont régulièrement évacuées et remplacées par les eaux océaniques de la Mer de Corail en provenance du Sud. Un flux océanique entrant dans le lagon Sud-Ouest d'environ 80 000 m<sup>3</sup> a été estimé, sans prendre en compte le flux passant par-dessus la barrière de corail Ouest (Jouan et al 2006).

Le courant Alis, réminiscence du courant de Leeuwin, courant chaud de bordure ouest australien, s'écoule vers le Sud le long de la côte Ouest de la barrière de corail de la Nouvelle Calédonie. Le long du récif de la côte Est, le courant de Vauban longe aussi le récif vers le Sud (Marchesiello et al. 2010). La figure 2 résume la circulation connue autour de la Nouvelle Calédonie.

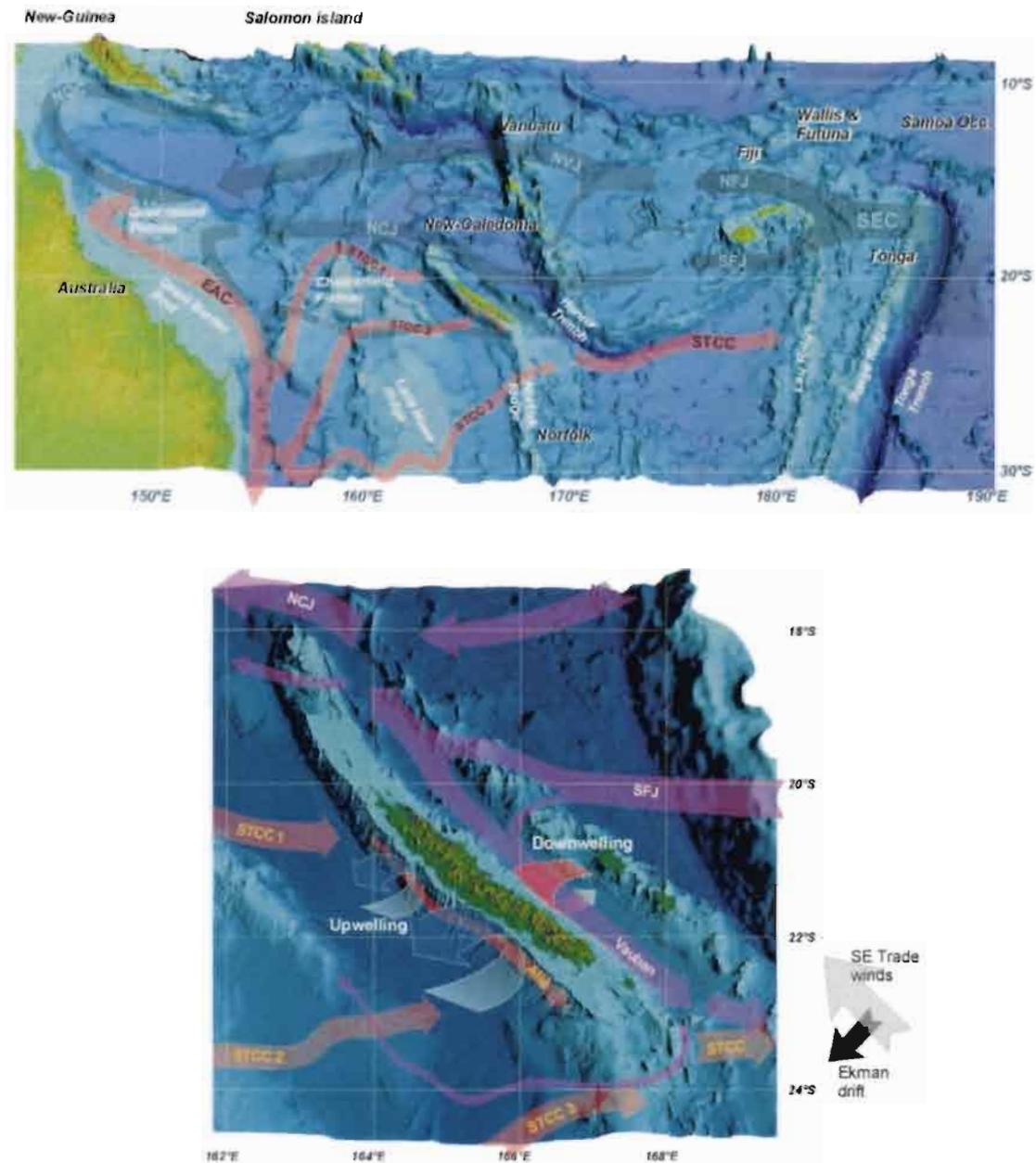


Figure 2. En haut : Présentation schématique de la circulation océanique dans le Pacifique Sud-Ouest. Les flèches bleues représentent les branches du Courant Equatorial Sud (SEC). Son intensité est maximale autour de 200 m de profondeur. Les flèches rouges représentent les branches du courant Est Australien (EAC) et du courant Est Australien subtropical antihoraire. Ils ont une intensité maximale à environ 50 m de profondeur. En bas : Zoom de la circulation autour de la Nouvelle Calédonie. Les courants côtiers notables le long de la barrière sont le courant d'Alis sur la côte Ouest et le courant de Vauban sur la côte Est. Le transport d'Ekman est représenté à droite par une flèche sur la gauche du régime moyen des alizés soufflant parallèlement à la Grande Terre. Les upwellings et les downwellings sont aussi représentés. (Marchesiello, Lefèvre, Vega, Couvelard, & Menkes, 2010)

Alors que la circulation à l'extérieur du récif a fait l'objet de recherche (Cravatte et al., 2015), la circulation hydrodynamique à l'intérieur même des lagons est encore mal connue. Les eaux extérieures entrent dans les lagons par des passes, des ouvertures à travers la barrière de corail et supposément par-dessus lorsque la houle est forte. Ensuite, une circulation s'établit dans les lagons, largement influencée par la topographie, les vents et la marée. Le peu d'information sur cette circulation lagonaire nous parvient de résultats de modélisation hydrodynamique appliquée dans la partie sud de notre zone d'étude.

## 1.2. Utilité d'un système opérationnel de prévision de dérive

Le MRCC de Nouméa a pour rôle de gérer les opérations de recherches et sauvetages en mer, d'élaborer et de diffuser les renseignements liés à la sécurité maritime, de surveiller la navigation maritime. Il est également un acteur principal pour la prévention et la lutte contre les pollutions maritimes. En cas de déclenchement du plan ORSEC maritime, le MRCC sollicite les prévisionnistes du département PREVI/MAR de Météo-France pour l'élaboration de prévisions de dérive des polluants, mais également l'IRD, qui dispose d'une expertise sur la circulation haute résolution dans les lagons.

### 1.2.1. Le trafic maritime en Nouvelle Calédonie

Le port de Nouméa est le premier port d'outre-mer et le 8ème port de France en tonnage manipulé avec 5 142 855 tonnes en 2014, dont 1 808 368 t en trafic extérieur et 3 334 486 t en trafic intérieur dont 3 218 296 t de nickel vers la Société Le Nickel (SLN). L'activité maritime de Nouvelle-Calédonie, visible sur la figure 3, représente près de 3000 mouvements de navires par an soit une moyenne de 8 par jour. Cette activité portuaire s'inscrit dans un environnement naturel de grande diversité écologique, inscrit au patrimoine mondial de l'Unesco.

En 2014, le MRCC est intervenu sur 247 opérations dans les eaux territoriales. Les interventions sur des activités de plaisance représentent plus de la moitié des opérations. Une partie est liée à des pannes de moteur, des problèmes avec les embarcations parfois inadaptées aux conditions maritimes, mais aussi des surfeurs ou bien des plongeurs dérivants vers le large emportés par les courants. Un outil de prévision de dérive serait un outil utile au MRCC pour aider à mieux cibler les zones de recherches.

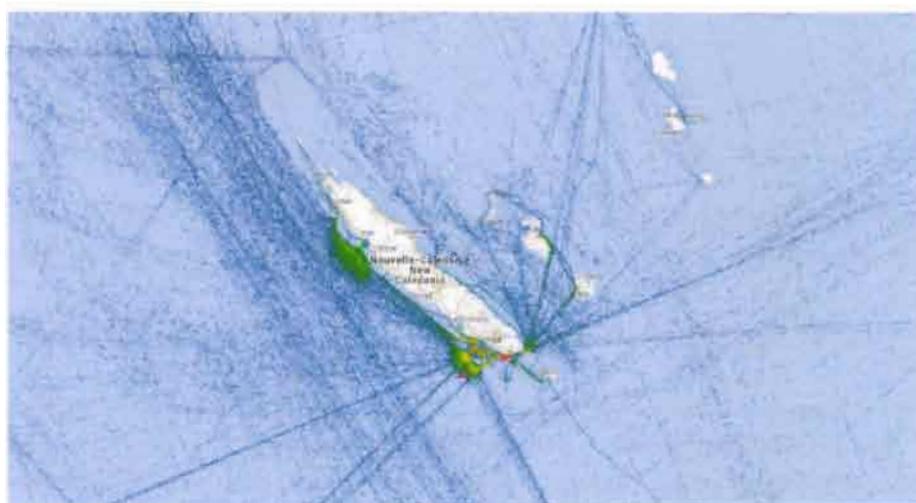


Figure 3. Trafic maritime autour de la Nouvelle Calédonie. Source : MRCC de Nouméa

### 1.2.2. La pollution maritime

La Nouvelle-Calédonie importe 90% de ses marchandises par voie maritime dont 658 523 t de produits pétroliers. En effet, en 2014, 98 navires transportant des hydrocarbures pour 884 000 T ont transités dans les eaux calédoniennes afin d'alimenter les différents terminaux pétroliers situés sur la figure 4.

En outre, les risques industriels et chimiques sont en forte croissance avec les trois grandes usines exploitant le nickel sur la côte Ouest et Est. Ainsi, 11 pollutions ont été signalées au MRCC en 2014 dont 4 hydrocarbures légers et 2 d'origine industrielle (poussières).

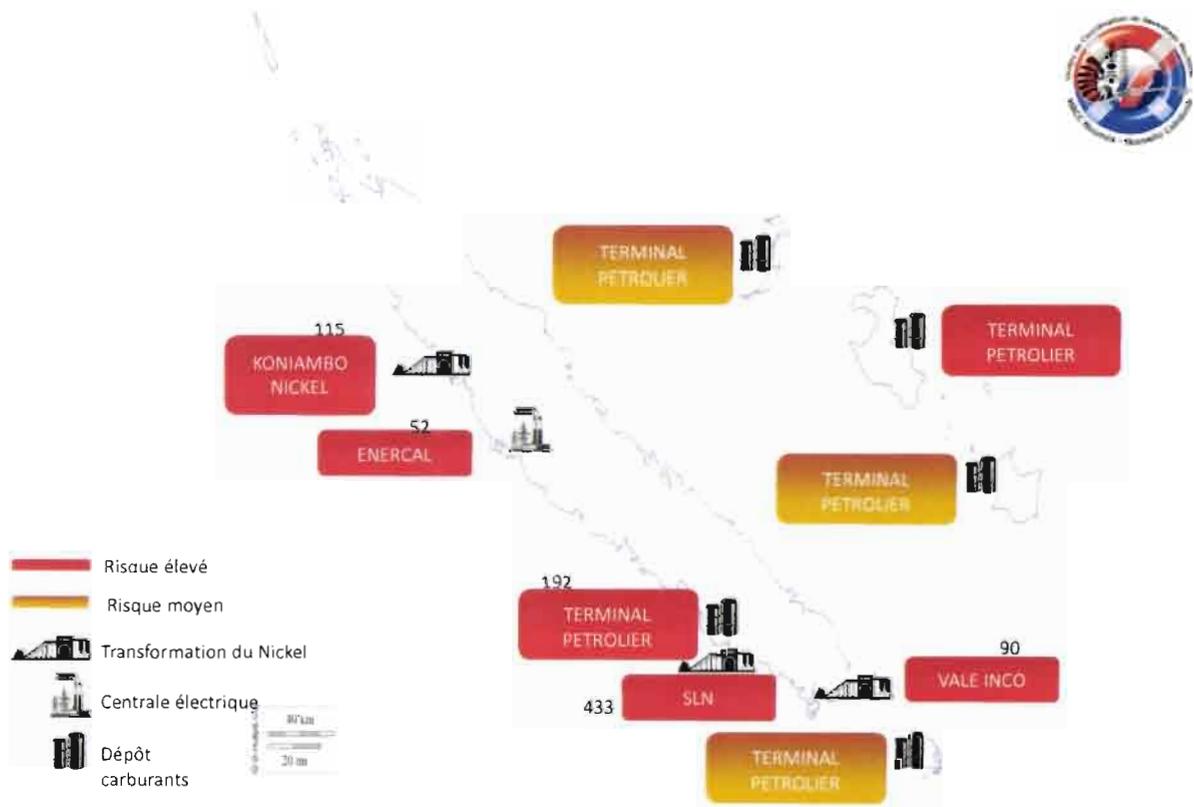


Figure 4. Risques de pollution maritime en Nouvelle Calédonie. Source : MRCC de Nouméa

Dans le cas d'une fuite d'hydrocarbure venant d'une usine ou d'un navire, un système opérationnel de dérive permettrait au MRCC de coordonner les opérations maritimes afin de limiter la pollution.

### 1.3. Modélisation sur la Nouvelle Calédonie

Depuis plusieurs années, les chercheurs recourent à la modélisation pour comprendre la circulation des courants afin d'acquérir une meilleure connaissance de l'hydrodynamique du lagon Sud-Ouest de Nouvelle Calédonie. La modélisation hydrodynamique en Nouvelle Calédonie se limitait à ce lagon qui est sujet à d'importants apports sédimentaires dus à l'érosion et aux activités humaines. Il est aussi le lieu d'upwellings côtiers, qui ont été le sujet d'étude de modélisation (Fuchs et al., 2013).

Une équipe de l'IRD a donc développé un modèle hydrodynamique et de transport en trois dimensions qui calcule les courants dus à la marée et au vent sur une grille horizontale de 500 m de pas et 10 niveaux de la colonne d'eau. C'est une version adaptée à la Nouvelle Calédonie du modèle MARS3D, développé par l'IFREMER. Afin de limiter le coût de calcul, le modèle doit être appliqué par région. Les études hydrodynamiques précédentes ont identifié le vent et la marée comme les principaux forçages de la circulation du lagon (Ouillon, Douillet, Fichez, & Panché, 2005, Douillet et al 2001, Douillet, 1998). La force et la direction des courants varient en effet considérablement dans le temps et dans l'espace, d'un endroit à l'autre du lagon, ainsi qu'entre la surface et le fond.

Une version modifiée de ROMS est aussi utilisée dans les cas opérationnels. Cependant, ces modèles utilisent des grilles régulières avec une résolution limitée afin de réduire le coût de calcul. En effet, d'après les tests de convergence des chercheurs de l'IRD, une résolution de 100 m est nécessaire pour représenter correctement la propagation de l'onde de marée dans le lagon. Considérant la superficie des lagons de Nouvelle Calédonie, cela correspondrait à près de  $5 \cdot 10^6$  points de calculs.

C'est pourquoi, les chercheurs de l'IRD proposent aussi le développement de modèles en maille non structurée à très haute résolution. Le modèle de circulation ADCIRC 2D est par exemple employé pour les prévisions de dérive, sur sollicitation du MRCC et à montrer au cours des exercices du plan POLMAR des résultats plus réalistes que ceux provenant des prévisions de dérive MOTHY dans MERCATOR. La grille non structurée présentée sur la figure 5 est un héritage de l'application du modèle ADCIRC en Nouvelle-Calédonie (Marchesiello et al., 2008). Les éléments non structurés permettent de raffiner la résolution près des côtes et dans les zones de hauts fonds et ainsi d'atteindre 50 m de résolution à certains endroits. En outre, elle contient  $6 \cdot 10^4$  points de calculs soit près de 100 fois moins que le nombre nécessaire estimé avec une grille régulière de 100m de résolution.

Cette grille est utilisée dans ADCIRC pour le calcul de la marée et a permis de construire la base de données marée de Nouvelle-Calédonie, venant compléter les observations du SHOM le long de la côte (J.Lefèvre IRD). Cette même grille est actuellement utilisée pour le calcul des champs de vague avec WW3 (J. Aucan, IRD) et nous réutiliserons cette grille pour le portage de FVCOM pour son couplage avec MOTHY.

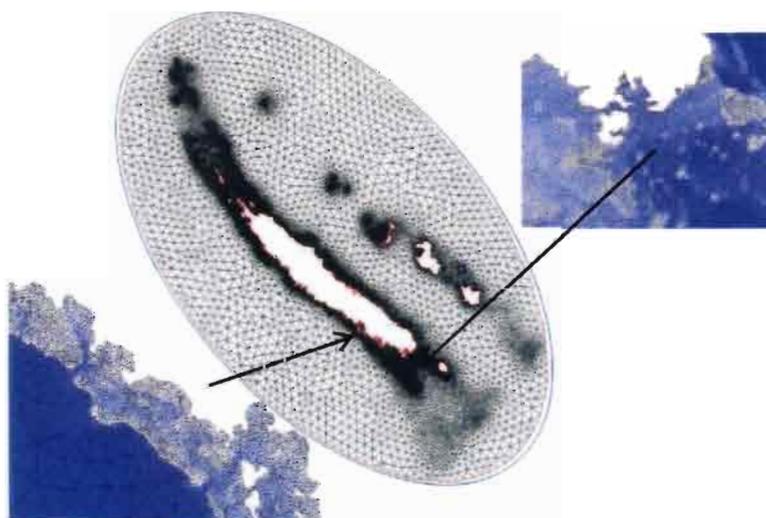


Figure 5. Grille non structurée de 65 206 points (nœuds de calculs) construite par J.Lefèvre. La résolution peut atteindre 50 m près des côtes. Cette grille est utilisée dans plusieurs applications utilisant ADCIRC, FVCOM et WW3 en Nouvelle-Calédonie.

## 1.4. Présentation des modèles utilisés

### 1.4.1. Le modèle de circulation océanique FVCOM

Le modèle de circulation côtière à volume finis FVCOM est un modèle récemment développé par des chercheurs de l'Université du Massachusetts –Dartmouth et de l'institution océanographique Woods Hole Institution. Ce modèle résout les équations hydrostatiques ou non hydrostatiques de quantité de mouvement et de continuité en 3 dimensions pour un fluide de densité variable. Ces équations sont résolues par la méthode de calculs en volumes finis, schéma de discrétisation du second ordre. La distribution des variables se fait sur une grille B (selon la classification d'Arakawa).

FVCOM utilise une grille non structurée composée d'éléments triangulaires. Une grille non structurée a l'avantage de bien représenter les traits de côte dont la géométrie peut être souvent complexe. Une meilleure simulation de la géométrie spatiale permet de mieux modéliser les processus physiques et les écoulements côtiers (C. Chen, Beardsley, & Cowles, 2006). Sur la verticale, une coordonnée de type sigma est employée permettant de mieux restituer les détails topographiques. Les équations de transport de l'énergie cinétique turbulente, de salinité et de température sont aussi calculées. Toutes les équations utilisées par FVCOM sont détaillées dans le manuel d'utilisateur (Chen, C, Beardsley, R.C, 2011).

Concernant les forçages externes, le modèle permet l'intégration de forçage comme la marée, le vent et les flux de chaleur. Aux frontières ouvertes, plusieurs conditions de radiation sont proposées pour faire évoluer les conditions de quantité de mouvement et d'élévation, de température et de salinité. En outre, il permet la simulation du découverture/ recouvrement de points en zone très peu profondes, permettant une meilleure représentation des écoulements au droit des hauts fonds et le long du récif barrière. Les débits des rivières peuvent être imposés, mais ce forçage n'est pas utilisé faute d'observation directement disponible pour le système opérationnel. Son couplage avec le modèle de vague SWAN est effectif : Il est envisagé dans le système opérationnel dans une étape ultérieure.

FVCOM a aussi été sélectionné pour son code parallélisé qui permet de réduire considérablement les temps de calculs. En effet, le code est écrit de façon à ce que le domaine de calcul soit décomposé. Pour cela, le modèle utilise les bibliothèques de partition METIS. Le parallélisme consiste en une décomposition du domaine en N sous-domaines contenant le même nombre d'éléments et utilisant chacun un nombre égal de processeurs. Chaque processeur configure ses calculs dans son sous-domaine. Durant les calculs, les informations sont échangées entre les processeurs à travers les frontières des sous-domaines. A la fin des calculs, les sorties de chaque processeur sont ré-assemblées avant d'être enregistrées sur le disque. Les détails sont disponibles dans le manuel d'utilisateur de FVCOM (Chen, Beardsley et al. 2011).

C'est un outil accessible, bien documenté et codé de façon compréhensible, s'invitant de plus en plus dans les laboratoires côtiers, y compris en Europe. Sa pluridisciplinarité permet de nombreuses applications pour modéliser les phénomènes océaniques côtiers. Les différents modules intégrés dans FVCOM sont présentés sur la figure 6. Il a ainsi été appliqué avec succès dans de nombreux cas d'étude en régions estuariennes et côtières. Il est aussi déjà utilisé par plusieurs systèmes opérationnels de prévision américains produits par la NOAA, comme par exemple le système SFBOFS pour la baie de San Francisco (Peng et al., 2014, [http://tidesandcurrents.noaa.gov/ofs/sfbofs/sfbofs\\_info.html](http://tidesandcurrents.noaa.gov/ofs/sfbofs/sfbofs_info.html)) ou le système NGOFS pour le Golfe du Mexique ( ). Le système opérationnel que nous voulons mettre au point fonctionnera de manière similaire. Les courants 3D à haute fréquence de

FVCOM seront ensuite intégrés dans le système de prévision de dérive MOTHY présenté dans la partie suivante.

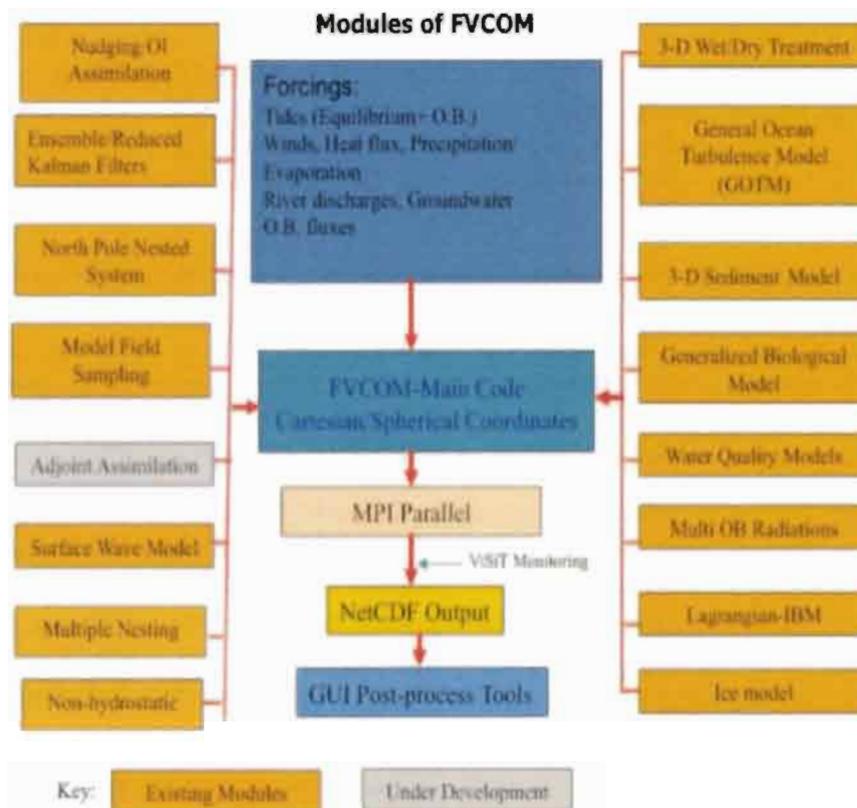


Figure 6. Les différents modules du modèle FVCOM (C Chen, 2010)

#### 1.4.2. Le modèle de dérive MOTHY

Le modèle MOTHY a été développé par Météo France (Pierre Daniel) afin de prédire, de façon opérationnelle, la dérive de nappe de polluants ou d'objets. Le forçage météo employé (vent à 10m essentiellement) provient de Météo-France après sélection par les prévisionnistes. Son principe de fonctionnement est résumé dans la figure 7 ci-après.

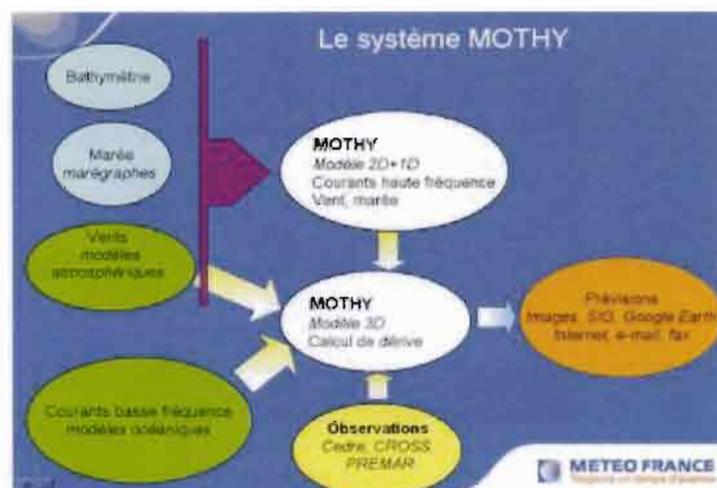


Figure 7. Principe de fonctionnement du modèle de dérive MOTHY de Météo France

MOTHY peut aussi calculer les courants hautes fréquences en eau peu profonde induits par les vents et la marée par une résolution des équations de Barré Saint-Venant, mais cette étape nécessiterait des efforts d'ajustement trop coûteux pour chaque zone d'opération. MOTHY offre alors la possibilité d'utiliser directement les courants simulés par les modèles océaniques, suite aux développements réalisés par S. Law Chune. Sur les façades Françaises, l'interfaçage pour les courants basses et hautes fréquences est effectué avec les sorties du modèle HYCOM dans MERCATOR Océan (<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/modele-de-previsions-oceanographiques-hycom/>). Pour l'Outre-Mer, l'interfaçage se fait directement avec les sorties MERCATOR Océan (courant basse fréquence uniquement).

Utilisé dans le cadre de plan Pollution Maritime (POLMAR), plan d'intervention en cas de pollution permettant la mobilisation et la coordination des moyens de luttés, il a prouvé son efficacité, notamment dans le cas de l'Erika en 1999 et du Prestige en 2002. Dans le cas du Prestige, MOTHY a été couplé avec le modèle global MERCATOR OCEAN afin d'intégrer des courants basses fréquences (Daniel, 1996). Il a été démontré que le couplage de MOTHY avec des modèles contenant les courants grande échelle permet d'améliorer la prédiction de dérives sur le long terme (Daniel et al., 2006).

MOTHY a aussi été utilisé dans le cas des exercices POLMAR dans les lagons de Nouvelle Calédonie mais n'as pas donné de résultats probants. La version MOTHY actuellement interfacée avec les sortie MERCATOR est inadaptée pour la Nouvelle Calédonie, elle ne permet pas de résoudre la circulation fine échelle des lagons de Nouvelle Calédonie. Ainsi, de meilleurs résultats étaient obtenus avec ADCIRC 2D utilisé en parallèle par l'IRD pour prédire la dérive de nappe de pollution dans les lagons comme dans le cas de l'exercice en baie de Gatope en 2009 présenté sur la figure 8.

Le couplage de ce modèle avec les sorties de FVCOM 3D à haute résolution permettra d'améliorer les prévisions de dérives dans les lagons. MOTHY n'est pas prévu pour utiliser directement les résultats de FVCOM, mais la version MOTH-HYCOM développée par S. Law Chune permet d'ingérer les courants 3D sur grille régulière au format HYCOM. Notre but est de reprendre l'outil MOTHY-HYCOM, en réadaptant les sorties FVCOM de manière à les rendre compatibles à l'interface MOTHY-HYCOM, moyennant une conversion de format.

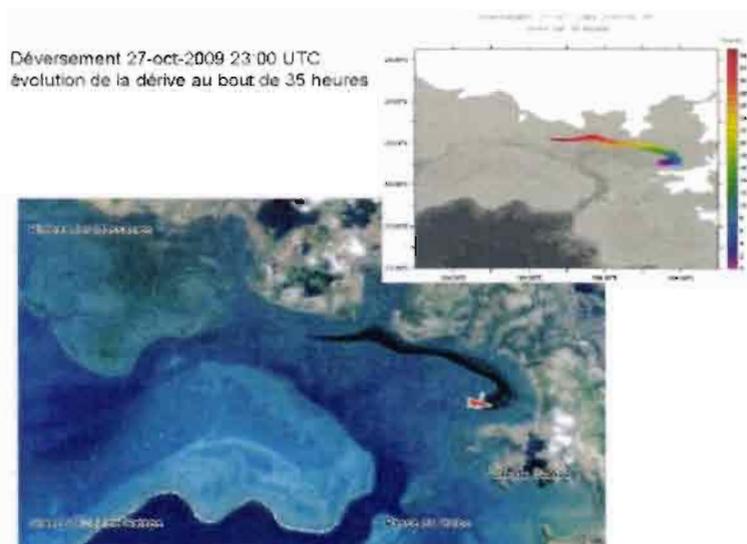


Figure 3 Exemple de prévision de dérive de nappe en baie de Gatope (Commune de Voh) réalisée dans le cadre de l'exercice POLMAR 2009. Prévision employant ADCIRC 2D sur la grille 65206 nœuds (J. Lefèvre)

## 1.5 Présentation des jeux de forçage et des données de validation

Dans le cadre de la réalisation des tests de sensibilité, nous avons utilisés différents jeux de forçage à notre disposition permettant d'effectuer des simulations aux dates des données d'observations. .

### 1.5.1 Bathymétrie

La bathymétrie haute résolution que nous utilisons dans FVCOM est issue de l'Atlas bathymétrique de la Nouvelle-Calédonie distribué par la DTSl. C'est une compilation des sondes hydrographiques du SHOM et distribuée sous la forme d'un modèle numérique de terrain (MNT). Les zones non hydrographiées ont été remplies par extrapolation/croisement avec les images aériennes et satellites (source Lefèvre IRD).

### 1.5.2. Forçage en marée

Pour le forçage en marée, nous avons utilisés la solution du modèle global TPXO7.0 et TPXO7.2. TPXO est un modèle global de marée qui résout les équations de marée de Laplace à partir des élévations observées par les satellites TOPEX/Poséidon et Jason. La méthode des moindres carrés est utilisée pour résoudre ces équations dont les détails sont décrites par (Egbert, Bennett, and Foreman, 1994) et (Egbert and Erofeeva, 2002).

Les amplitudes et phases en élévation des 8 composantes principales de la marée (M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1), ainsi que celles de 2 composantes longue période (Mf, Mm) et de 3 composantes non linéaires (M4, MS4, MN4) sont disponibles sur une grille de résolution d'environ 25 km.

### 1.5.3. Forçage météorologique

Le modèle atmosphérique pour la recherche et la prévision (WRF) (Skamarock et al., 2008) est le modèle atmosphérique que nous utilisons pour créer les champs de vents et les radiations forçant FVCOM pour les tests de sensibilité et les simulations longues. En effet, afin de comparer nos résultats avec des observations, les simulations ont été faites sur des années antérieures à celle pour lesquelles nous disposons des données de vent et de radiation d'ALADIN de Météo France. Les données ALADIN que nous avons sont des données contemporaines commençant en juin 2015 et qui seront utilisées pour le système opérationnel en forecast.

WRF intègre les équations d'Euler non hydrostatiques et compressibles qui sont résolues avec des niveaux verticaux s'adaptant à la topographie. L'interpolation et le lissage de la topographie par le modèle avec un algorithme conservatif du volume, permet de représenter les mouvements d'air verticaux perpendiculaires à l'écoulement. WRF est développée à l'IRD sur 2 domaines imbriqués avec un nesting : la région correspondant à la zone économique exclusive de la Nouvelle Calédonie avec une résolution de 20 km et une centrée sur la Grande Terre et les îles Loyautés avec une résolution de 4 km. Le modèle est configuré avec 30 niveaux verticaux. La topographie utilisée a été fournies par le bureau géologique des Etats Unis (US Geological Survey) et par la direction des technologies et service de l'information (DTSl) de Nouvelle Calédonie. Les données météorologiques utilisées pour initialiser le modèle et les conditions aux frontières proviennent du NCEP (National Centers for Operational Prediction). Les détails sur la configuration sont décrits dans Lefèvre et al., 2010.

Lors des tests de sensibilité et les simulations longues, pour cause de disponibilité, nous avons utilisés les solutions WRF du premier domaine avec la résolution de 20 km à fréquence horaire couvrant la période Novembre 2008 à juin 2014.

Pour les simulations courtes effectuées afin de reproduire des opérations MRCC et des lâchers de flotteurs, nous avons utilisés les solutions WRF avec la résolution de 4 km pour les périodes 2007, 2011, 2012 et 2014 et celles du modèle ALADIN couvrant juin 2015 jusqu'à aujourd'hui. Les forçages ALADIN et CEP à notre disposition ont une fréquence horaire et une résolution respective d'environ 10km et 25 km.

Des tests avec un forçage créée à partir des solutions ERA-Interim sur la période janvier 2011 à juin 2015 avec une résolution de 80 km et une fréquence de 3h ont aussi été effectués afin d'étudier l'influence du modèle météorologique utilisé.

#### 1.5.4. Forçage océanique aux frontières

Lors des simulations intégrant la grande échelle pour les tests de sensibilités et les simulations longues, nous avons utilisés le modèle de circulation australien OFAM/BLUElink (source BOM) qui englobe notre zone d'étude. Le modèle OFAM est performant dans les eaux entourant l'Australie (Ryan et al., 2015). Les solutions du modèle sont en libre-service et disponible sur un serveur thredds. La résolution spatiale de la grille utilisée par OFAM est d'environ 11km avec 51 niveaux vertical.

Des tests avec le modèle MERCATOR (source MyOcean, récupération des données depuis serveur MOTU) ont également été initiés, mais ne sont pas présentés dans cette étude. Les systèmes opérationnels de prévision développés à Mercator Océan sont basés sur des modèles d'océan décrits par les équations primitives et assimilant en temps réel des mesures de l'océan issues des systèmes d'observation satellitaires et in situ (<http://www.mercator-ocean.fr>).

Finalement, le scénario le plus envisageable pour le système opérationnel est un forçage en marée de TPXO7.2 raffiné dans ADCIRC, un forçage en vent ALADIN de Météo France et un forçage en élévation grande échelle, courants, température et salinité MERCATOR ou OFAM en cas d'indisponibilité des données MERCATOR.

#### 1.5.5. Données de validation : Observations

Afin de valider nos résultats, nous avons pu les confronter à différentes observations présentées dans cette partie.

Tout d'abord, nous disposons d'une base de données regroupant les résultats d'analyse harmonique faites par le SHOM sur l'élévation d'une cinquantaine de stations réparties autour de la Nouvelle Calédonie. Ces analyses ont été faites sur des données de marégraphes posés de manière temporaire sur quelques semaines durant des missions hydrographiques ou bien des marégraphes fixes posés par le SHOM. Nous avons choisis d'étudier précisément 6 stations qui correspondent à des marégraphes fixes du SHOM, permettant ainsi d'avoir des observations sur des plus longues périodes et donc une plus grande confiance sur les résultats des analyses harmoniques. Nous avons sélectionnés les stations Nouméa (Chaleix), Hienghène, Lifou, Ouinné, Thio et Poingam dont les coordonnées géographiques sont présentées dans le tableau 1.

<b>Stations</b>	<b>Longitude (deg décimal WGS84)</b>	<b>Latitude (deg décimal WGS84)</b>
<b>Nouméa (Chaleix)</b>	166,43 E	22,29 S
<b>Hienghène</b>	164,94 E	20,68 S
<b>Lifou</b>	167,27 E	20,91 S
<b>Ouiné</b>	166,69 E	21,97 S
<b>Thio</b>	166,25 E	21,61 S
<b>Poingam</b>	164,02 E	20,07 S

*Tableau 1. Tableau des coordonnées des stations choisies pour l'analyse de la marée.*

Concernant les observations sur les courants et notamment sur les courants de marée, nous avons pu utiliser les données de courantomètres recueillies par P. Douillet et R. Le Gendre (IRD) dans le lagon Sud-Ouest. Ces données acquises entre les années 1982 et 1990 couvrant des périodes de plusieurs semaines (Pascal Douillet, 1998). Elles permettent de confronter nos résultats sur la marée modélisée dans le Lagon Sud-Ouest. Nous avons utilisé les mesures faites sur les stations M11 placée dans le canal de Woodin, M13 placée dans la passe de Dumbéa, M15 en face de Nouméa, toutes situées en surface, et M02 située au fond à l'ouest de l'île Ouen. Ces observations sont complétées par des analyses harmoniques pour 5 composantes (M2, S2, N2, K1, O1) faites sur des données ADCP de 2007 acquises par R. Le Gendre. Nous avons plus précisément étudiés les stations situées dans les chenaux du Canal de la Havannah (T3, T4M1, T4M2, T4M3 et T5B) et Passe de la Sarcelle (T16B).

Enfin, un ADCP fixé à la station Moise de l'IRD, nous permet de disposer d'une série temporelle longue d'observation des courants. La station est située à la latitude 22°14.798 E et à la longitude 166°18.954 S à environ 8 mètres de profondeur. Ces données sont intéressantes à étudier car Moise est situé à un emplacement où la circulation n'est pas influencée par des effets de chenalisation avec une bathymétrie régulière. Elle serait soumise à une circulation caractéristique du lagon, fortement liée à la marée, au vent et aux autres phénomènes encore non identifiés propres au lagon. Des données de courants enregistrées sont disponibles depuis mars 2011 jusqu'à novembre 2013. Ces données nous ont permis d'étudier la variabilité du courant afin de mieux la comprendre et donc la reproduire.

Nous avons aussi utilisés des données de température enregistrées par le réseau ReefTemps du Grand Observatoire de l'environnement et de la biodiversité terrestre et marine du Pacifique Sud (GOPS, Ajouter Adresse [http ReefTemp](http://ReefTemp)). Ces données sont mesurées depuis une cinquantaine d'année par une vingtaine de stations dans les eaux côtières de Nouvelle-Calédonie.

Pour les validations de dérives effectuées avec MOTHY, nous avons utilisés des trajectoires de flotteurs ARGO faites dans le lagon Sud-Ouest par R Le Gendre et P. Douillet en 2007. Nous avons notamment observé les trajectoires des bouées lâchées à Goro en février 2007 pendant 72h, ainsi qu'à Boulari en avril 2007 et à Porc Epic Tareti en avril 2007.

Finalement, nous avons aussi pu confronter nos résultats de prévision de dérives avec des situations d'interventions réelles effectuées par le MRCC de Nouméa. Nous avons ainsi pu reproduire plusieurs cas de dérives concernant des dérives d'embarcation, ou de personnes pour les années 2012 et 2015. En outre, P. Daniel et Y. Mercier nous ont transmis des archives de simulations effectuées par MOTHY couplé avec MERCATOR dans les lagons de Nouvelle Calédonie. Nous avons ainsi comparés ces dernières avec nos prévisions de dérives par MOTHY couplé avec FVCOM.

## 2. Calibration et validation du modèle de circulation FVCOM

L'utilisation de FVCOM 3D en Nouvelle-Calédonie est récente, mais l'IRD bénéficie d'un retour d'expérience sur l'usage du modèle aux éléments finis ADCIRC. Un gros effort d'ajustement et de raffinement des modèles à maille non-structurée concerne le développement de la grille de calcul et de la bathymétrie. En utilisant la même grille qu'ADCIRC 2D, on s'affranchit de cette étape fastidieuse de développement. L'usage des modèles océaniques ROMS 3D et MARS 3D par l'IRD en Nouvelle-Calédonie permet également de faciliter les étapes de préparation des champs de forçage pour FVCOM 3D. Cet environnement favorable permet de se concentrer sur l'ajustement des paramètres du modèle pour notre région d'étude et d'effectuer des tests de sensibilité afin de vérifier sa robustesse.

La première étape a été de caler la marée avec FVCOM en mode barotrope 3D (fluide de densité homogène) en ajustant la bathymétrie et la longueur de rugosité. Selon P. Douillet, Ouillon, & Cordier, 2001, 80 % du signal des courants est introduit par le vent et la marée. Nous avons pu comparer les résultats de la circulation simulée en mode barotrope 3D avec les observations de courant d'une station ADCP (station MOISE). En autorisant la variation de la densité dans FVCOM en mode barocline 3D, l'influence de la variation du gradient de densité sur le courant total observé est également étudiée.

### 2.1. Test de stabilité : Utilisation de grille avec différentes topographies.

Nous avons utilisé trois grilles non structurées avec des bathymétries différentes pour tester la sensibilité du modèle au paramètre topographique. Une première grille présente un récif très lissé, une seconde représente des pentes légèrement lissées mais capable de représenter un récif barrière avec des parties découvrantes cohérentes avec la réalité, et la troisième grille intégrant un récif très exagéré, pouvant être assimilé à un mur.

Cependant, la topographie très abrupte autour de la Nouvelle Calédonie présente une très forte contrainte pour les codes en coordonnées sigma. Au droit des forts gradients de pente, des erreurs de troncature intervenant dans le calcul du gradient de pression peuvent entraîner une instabilité du code. Pour éviter cela, il faut donc lisser la bathymétrie de façon générale afin de diminuer les gradients de pente. Pour conserver une représentation réaliste de la barrière récifale, le récif est préalablement masqué et sa valeur topographique en crête exagérément exondée puis elle est réintégrée après l'étape de lissage. Afin de reproduire au mieux la dynamique côtière, il est important d'utiliser une bathymétrie fidèle à la réalité.

L'influence de la bathymétrie sur la stabilité du modèle a été regardée mais aussi son impact sur la marée.

#### 2.1.1. Analyse harmonique de la surface libre

Cette partie présente les résultats des analyses harmoniques de la surface libre. Nous avons choisi de comparer nos résultats avec les analyses harmoniques faites sur les 6 stations du SHOM présentées dans la partie 1.5.5 *Données de validation : Observations*.

Pour cette première étape d'étude de la marée, FVCOM a été utilisé en mode barotrope 3D sans forçage externe par le vent. Les processus hydrodynamiques simulés sont dans ce cas principalement imposés par la marée.

Dans le modèle, nous avons simulé une marée semi-diurne avec les 8 composantes suivantes : M2, S2, N2, K2, K1, P1, O1, Q1. Les forçages en marée sont créés à partir des solutions TPXO 7.2.

Les résultats présentés sur les analyses de marée concernent les composantes M2, K1 et S2, qui sont les composantes principales qui vont influencer le signal.

La figure 9, ci-dessous, présente les valeurs de la différence des moyennes quadratiques (RMSE) en centimètres du signal de marée observé et prédit selon la méthode courante pour comparer la précision d'un signal de marée (Wang, Chao, Shum, Yi, & Fok, 2012) calculées avec l'équation ci-dessous.

$$RMSE_k(j) = \left( \frac{1}{2N} \left( (h_1^o(j, k) - h_1^m(j, k))^2 + (h_2^o(j, k) - h_2^m(j, k))^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)$$

Avec  $h_1(j, k) = C_k(j) * \cos(\theta_k(j))$  et  $h_2(j, k) = C_k(j) * \sin(\theta_k(j))$

J désigne le lieu et k est la composante de marée étudiée.  $C_k$  et  $\theta_k$  sont respectivement l'amplitude en centimètres et la phase en degrés Greenwich de l'espèce k.  $h_1^o$  et  $h_2^o$  sont les notations pour les observations et  $h_1^m$  et  $h_2^m$  pour le modèle. Le RSS, représentant l'erreur totale sur toutes les stations considérées est calculé à partir de l'équation ci-dessous. Il s'exprime dans la même unité que le RMSE.

$$RSS = \left( \frac{1}{2N} RMSE(j)_k \right)^{1/2}$$

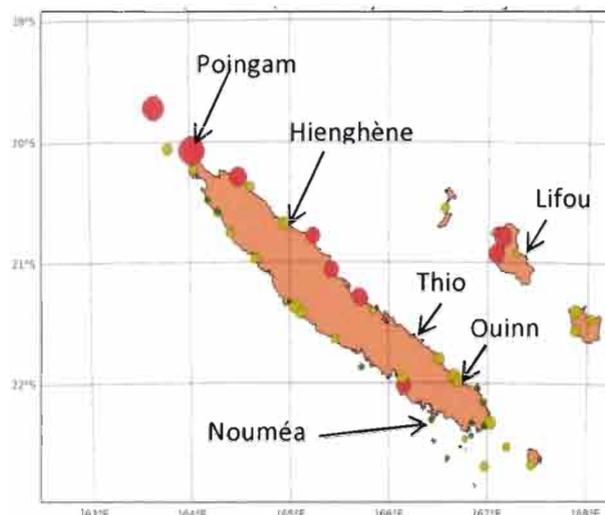


Figure 9. Carte des RMSE (en cm) sur le signal de marée en élévation de la composante M2 et situation des stations sélectionnées pour l'étude. En rouge, RMSE supérieur à 4 cm, en jaune supérieur à 2cm, en vert inférieur à 2 cm.

Les plus forts RMSE sont au Nord et sur la côte Est. Les cartes de co-amplitudes et phases nous ont permis de voir que le lagon Nord est sujet à des réflexions et distorsions de l'onde de marée dues à la bathymétrie. La bathymétrie est mal connue dans cette zone, elle a ici été estimée à partir de photos aériennes. Il est donc plus compliqué de bien représenter la marée à cet endroit.

Le tableau 2 ci-dessous présente les valeurs de RMSE sur les composantes M2, K1 et S2 pour les six stations considérées selon les trois grilles utilisées. Le meilleur RMSE total est obtenu avec la grille « récif » avec un RMSE d'environ 1.5 cm pour les deux composantes. Reproduire le récif de façon

réaliste permet de mieux simuler l'onde de marée dans les lagons. Lorsque le récif est représenté par un mur, nous pouvons voir que le modèle ne reproduit pas bien ce signal en élévation. Nous avons pu observer de fort déphasage dans ce cas-là. La bathymétrie influe bien la propagation de l'onde dans les lagons. Le signal à Hienghène, Poingam et Lifou montre la plus grande variabilité quand on modifie la bathymétrie. A Hienghène, le RMSE diminue d'un facteur 5 quand le récif est bien représenté. De même, à Poingam il est divisé de moitié. Ce sont des zones où le récif et donc la bathymétrie a un fort impact sur la propagation de la marée jusqu'à la côte. Au contraire, à Nouméa ou à Thio, la différence est moindre. Les résultats des analyses harmoniques sont disponibles en annexe A.

Stations	RMSE ONDE M2 (cm)			RMSE ONDE K1 (cm)			RMSE ONDE S2 (cm)		
	Grille « lisse »	Grille « récif »	Grille « mur »	Grille « lisse »	Grille « récif »	Grille « mur »	Grille « lisse »	Grille « récif »	Grille « mur »
Nouméa	2.78	2.59	12.8	0.78	0.83	28.20	3,34	0,15	0,29
Hienghène	5.28	1.03	33.9	2.73	0.89	33.80	7,67	1,10	12,43
Lifou	3.52	0.63	72.8	2.73	2.02	2.02	3,31	1,01	15,45
Ouinne	2.02	1.08	31.8	0.96	0.97	30.15	1,79	1,10	7,83
Thio	2.41	1.84	72,5	1.72	0.12	0.19	0,73	1,05	15,19
Poingam	6,03	3.64	56,5	3.40	1.78	18.74	1,67	4,47	17,81
TOTAL(RSS)	2.80	1.47	33.9	1.61	0.90	15.12	2,70	1.43	8,46

Tableau 2. Tableau des valeurs de RMSE (cm) pour les composantes M2, K1 et S2 sur les 6 stations pour chaque bathymétrie utilisée.

Sur les cartes de co-amplitudes et phases des composantes M2 et K1 ci-dessous, nous pouvons voir une zone de distorsion de l'onde de marée dans au Sud de la Grande Terre, zone où nous pouvons nous attendre à des différences plus importantes entre les observations et le modèle. Au Nord aussi, les lignes de co-phases sont très proches. Cette propagation du signal de marée est due à la bathymétrie irrégulière. Les forts RMSE dans ces zones peuvent être en partie causés par une bathymétrie mal ajustée, faute de données.

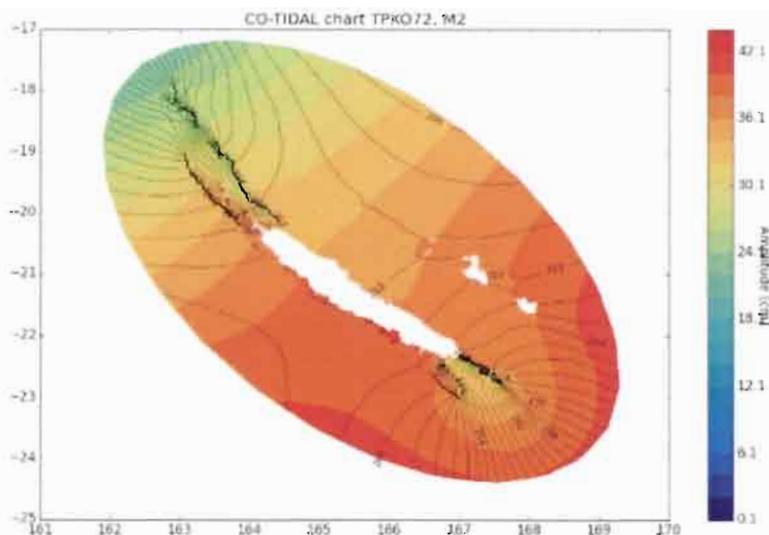


Figure 10. Carte de co-amplitudes et phases pour la composante M2 obtenue avec la grille « récif ». (forçage de marée créé à partir de TPXO7.2). L'amplitude est en cm et la phase en degrés Greenwich.

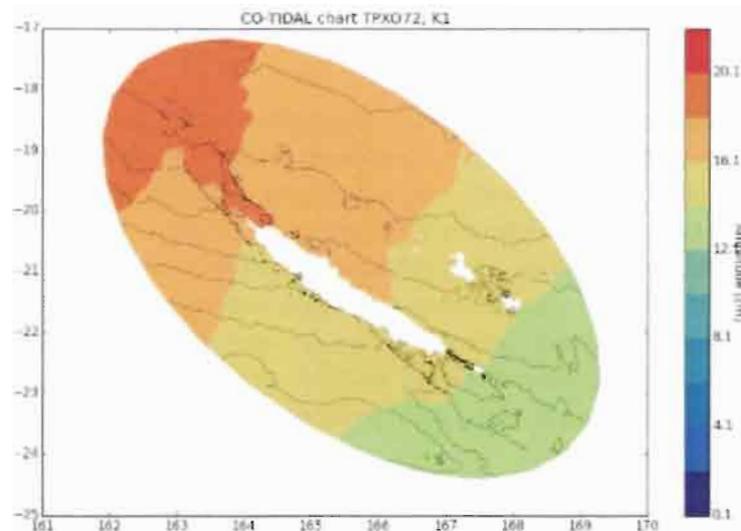


Figure 11. Carte de co-amplitudes et phases pour la composante K1 obtenue avec la grille « récif ». (forçage de marée créé à partir de TPX07.2). L'amplitude est en cm et la phase en degrés Greenwich.

Le tableau 3 compare les meilleurs résultats précédents obtenus avec ADCIRC utilisant TPX06 et nos meilleurs résultats avec FVCOM utilisant directement TPX07.2. La solution en marée du modèle ADCIRC 2D était très satisfaisante. Il est intéressant de comparer cette solution avec la solution de FVCOM en 3D permettant de reproduire le cisaillement vertical, induit par les effets de frottement sur le fond et en surface sous l'action du vent. FVCOM 3D reproduit la marée presque aussi bien que ADCIRC 2D pour l'onde M2 et K1 mais à de plus mauvais résultats sur l'onde S2. Cela peut être dû à la qualité du forçage en marée ou lié à de petites différences dans la bathymétrie modélisée, qui n'est pas du tout lissée dans ADCIRC 2D et permet donc une meilleure représentation des détails topographiques. Une option envisagée pour améliorer la marée dans FVCOM est d'utiliser la solution ADCIRC dans TPX07.2 en forçage de FVCOM.

Stations	RMSE ONDE M2 (cm)		RMSE ONDE K1 (cm)		RMSE ONDE S2 (cm)	
	Grille « récif » TPX07.2	ADCIRC 2D TPX06	Grille « récif » TPX07.2	ADCIRC 2D TPX06	Grille « récif » TPX07.2	ADCIRC 2D TPX06
Nouméa	2.59	1.98	0.83	0.50	0,15	0.41
Hienghène	1.03	2.99	0.89	1.15	1,10	0.57
Lifou	0.63	2.60	2.02	0.92	1,01	0.61
Ouïne	1.08	3.64	0.97	1.01	1,10	0.82
Thio	1.84	0.71	0.12	1.63	1,05	0.30
Poingam	3.64	4.30	1.78	1.76	4,47	1.55
<b>RSS TOTAL</b>	<b>1.47</b>	<b>1.16</b>	<b>0.90</b>	<b>0.76</b>	<b>1.43</b>	<b>0.60</b>

Tableau 3. Comparaison des amplitudes et phases des composantes M2, K1 et S2 obtenues par FVCOM (grille "récif") forcé avec TPX07.2 et les meilleurs résultats obtenus avec ADCIRC 2D forcé par TPX06.0.

## 2.1.2. Analyses harmoniques des courants de marée

Nous avons effectués des analyses harmoniques sur les courants de marée générés par les marées astronomiques. Ces courants sont directement proportionnels aux variations du niveau de l'eau causées par la lune et le soleil mais sont aussi sujets à des interactions non linéaires entre les différentes ondes, la bathymétrie ou encore à des effets de résonance dépendant de la morphologie de la côte. Ils peuvent être modélisés avec une bonne précision. Sur le plan spatial, les courants de marée sont représentés par une ellipse centrée à l'origine. Le périmètre de l'ellipse réunit l'extrémité des vecteurs de courant dont l'orientation change progressivement au cours d'un cycle de marée. Le courant varie entre une vitesse maximale vers l'amont et une vitesse maximale vers l'aval en passant par des vitesses moins grandes orientées obliquement par rapport à l'axe principal de l'ellipse.

Les ellipses des courants de marée pour la composante M2 ont été tracées sur les cartes de la figure 12 et comparées avec des observations d'un courantomètre recueillies dans le lagon Sud (station MOISE, T4M1, T4M2 et T4M3 en passe de la Havannah et T16B en passe de la Sarcelle). Nous présenterons directement les résultats de MOISE, notre station de référence fournissant une série temporelle longue, présentée dans la *section 1.1.5. Données de validations : Observations*. Nous pouvons observer l'influence du changement de bathymétrie sur le courant de marée, notamment sur l'orientation de l'axe principale de l'ellipse. L'axe principal du courant modélisé est dans tous les cas plus proche de celui observé dans le cas de la grille « récif ». Nous pouvons aussi voir l'influence de la présence ou non du récif sur la longueur de l'axe principal, donc sur la valeur du courant maximal de marée. Celui-ci augmente avec l'imposition d'un récif ou d'un mur, qui permettent une meilleure représentation des passes à travers la barrière de récif où le courant est canalisé pour entrer dans le lagon. La grille « récif » permet de reproduire un courant maximal de la composante M2 plus proche de l'observation.

La carte du courant maximal de marée de la composante M2 présentée sur la figure 12 b montre des zones où les courants de marée sont les plus puissants, notamment dans le lagon Sud, au niveau du canal de la Havannah et de la passe de la Sarcelle et dans le lagon Nord. Ce sont des zones d'étranglement où l'énergie du courant de marée pourrait être mise en valeur dans le cadre de l'exploitation des énergies maritimes renouvelables.

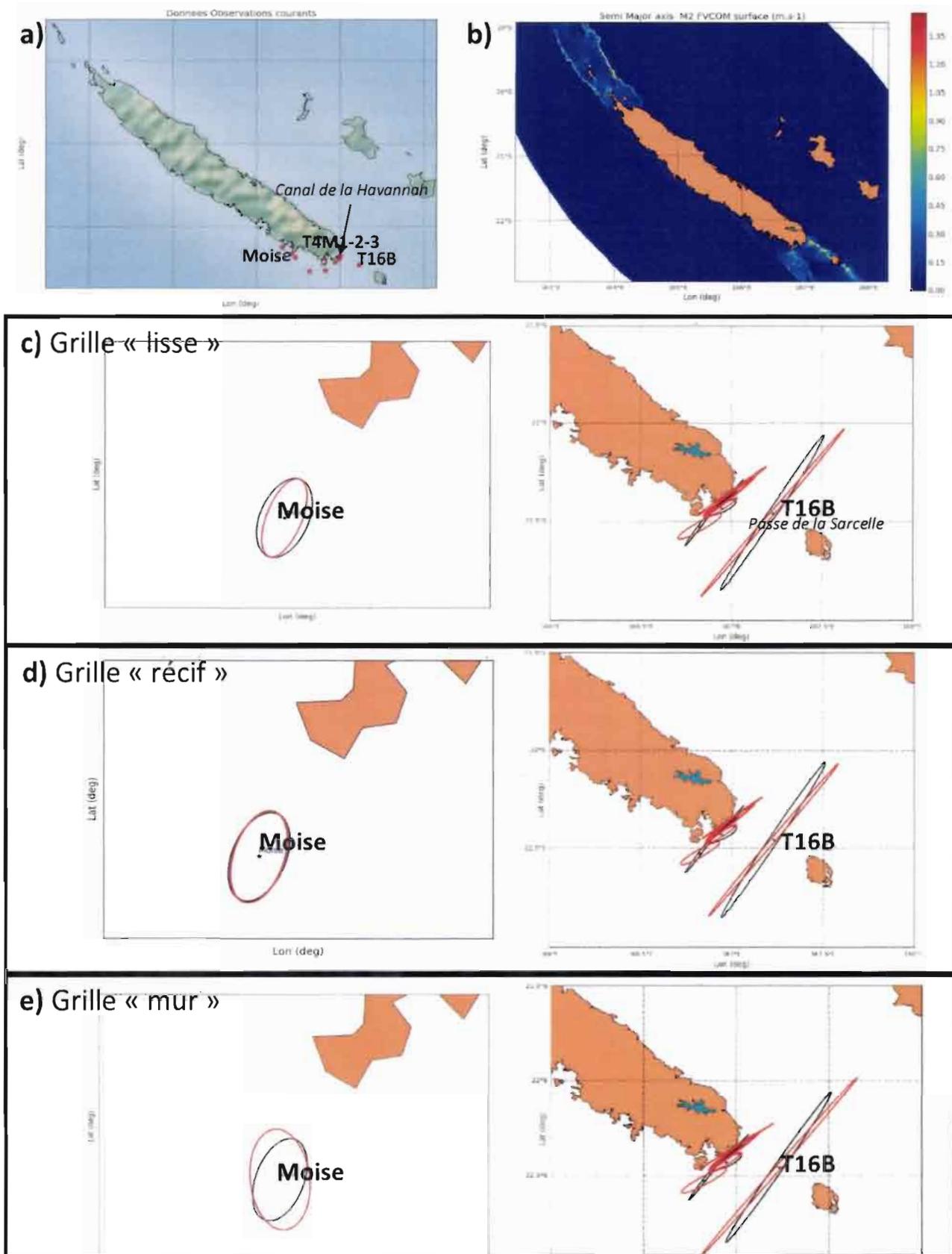


Figure 12. a) Carte des observations de courants étudiées. b) Carte du SEMA (Semi Major Axis) de l'ellipse de marée de la composante M2, obtenue avec la grille récif. Cela correspond au courant maximal de marée en cm.s<sup>-1</sup>. c) Ellipses de marée de la composante M2 obtenues avec la grille « lisse » à la station Moise à gauche et au niveau de la passe de la Sorcelle à droite. Les observations sont tracées en noir et le résultat de FVCOM en rouge. d) Les mêmes ellipses obtenues avec la grille « récif » e) Les mêmes ellipses obtenues avec la grille « mur ».

## 2.2. Influence de la longueur de rugosité

FVCOM donne la possibilité de choisir la valeur de la longueur de rugosité  $z_0$ , permettant ainsi de représenter l'effet du type de fonds sur le coefficient de trainée et donc sur les courants. Jusqu'à présent nous utilisons une longueur de rugosité  $z_0$  de 3mm assez commune mais plus adaptée à des fonds sableux voir vaseux (Peng et al., 2014). Cependant, les lagons de la Nouvelle Calédonie sont le lieu d'une grande diversité récifal or la longueur de rugosité de ces récifs coralliens varie entre 1 cm et 4 cm selon leur espèce et le type de récif (frangeant ou platier) (Rosman & Hench, 2011). Il est donc légitime de remettre en question le choix de ce paramètre  $z_0$  pour l'ensemble du lagon, en testant l'influence de  $z_0$  dans la gamme [0.3 -1] cm sur les résultats de simulation de FVCOM (McDonald, Koseff, & Monismith, 2006).

### 2.2.1. Sensibilité de l'énergie cinétique turbulente au choix de $z_0$

Le frottement sur le fond est à l'origine de la formation d'une couche turbulente que l'on peut illustrer à l'aide du profil vertical de l'énergie cinétique turbulente  $q_2$ . Celle-ci caractérisant les tourbillons dans les écoulements turbulents, nous supposons que plus la longueur de rugosité est grande, plus l'écoulement sera turbulent et l'advection modifiée. Par défaut, FVCOM utilise le schéma de turbulence Mellor-Yamada 2.5.

La figure 13 (gauche) montre une augmentation limitée de l'énergie turbulente sur le fond entre la valeur par défaut (3 mm) et 1 cm. La zone influencée se situe dans les 10 mètres au-dessus du fond. Il n'y a aucune influence sur la turbulence en surface. Pour cette simulation, nous n'avons pas intégré le forçage en vent or celui-ci est aussi une source principale d'injection de turbulence.

Cette autre source d'injection d'énergie turbulente est testée en imposant un vent en surface (figure 13, droite). Nous pouvons voir cette fois-ci une forte augmentation de l'énergie turbulente dans la couche limite de surface due au cisaillement créé par le vent. Cette énergie turbulente se propage dans la colonne d'eau et augmente le niveau d'énergie turbulente sur le fond, ici situé à 50 m.

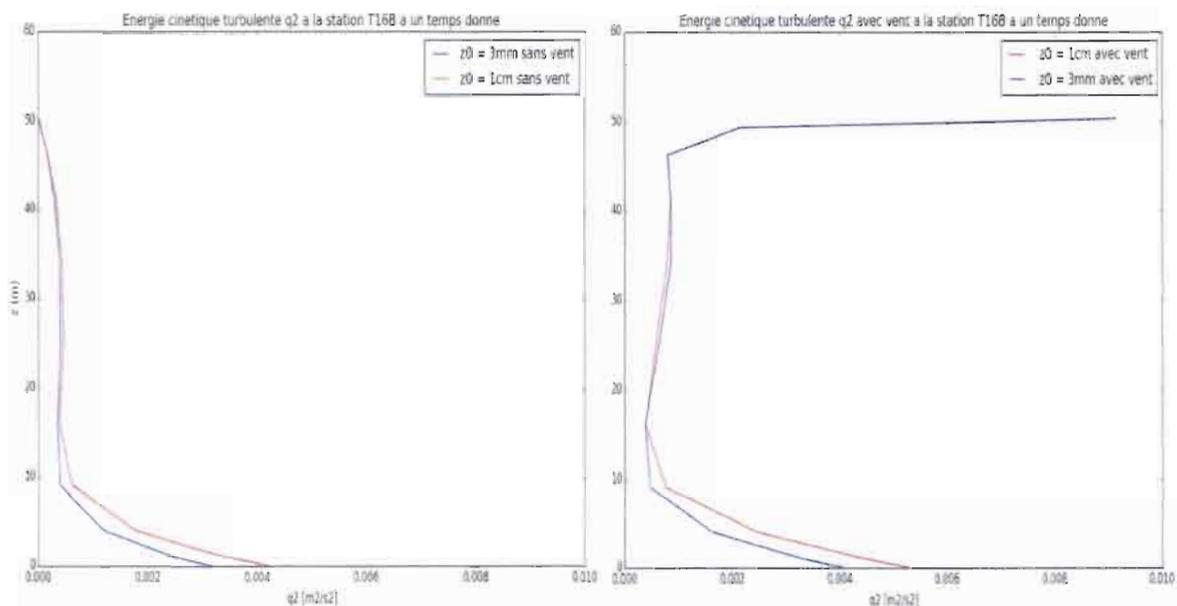


Figure 13. A gauche, énergie cinétique turbulente ( $q_2$ , en  $m^2/s^2$ ) en fonction de la profondeur ( $z$  en  $m$ ) à la station T168 à un temps donné durant la marée montante. La courbe bleu est le résultat obtenu avec une longueur de rugosité  $z_0$  de 3 mm et la courbe rouge avec  $z_0$  égal à 1 cm. A droite, le vent a été rajouté en surface durant la simulation.

Finalement, nous pouvons voir que l'impact de la rugosité de fond sur la turbulence est, dans notre cas, minime. En comparaison, le vent est une source de turbulence bien plus importante.

### 2.2.2. Sensibilité des courants de marée au choix de $z_0$

La figure 14 présente le profil vertical de l'axe semi major (SEMA) de la composante M2 à la station T16B située dans la passe de la Sarcelle. En mode barotrope, l'impact du choix de  $z_0$  a très peu d'incidence sur le profil du courant maximale pour l'onde M2 (courbe bleu et magenta proches). En outre, le vent qui accompagne le développement d'une couche turbulente en surface n'induit pas d'effet remarquable sur le profil de vitesse de l'onde M2 mise à part une faible diminution de la vitesse en surface (courbes magenta et rouge se chevauchent parfaitement).

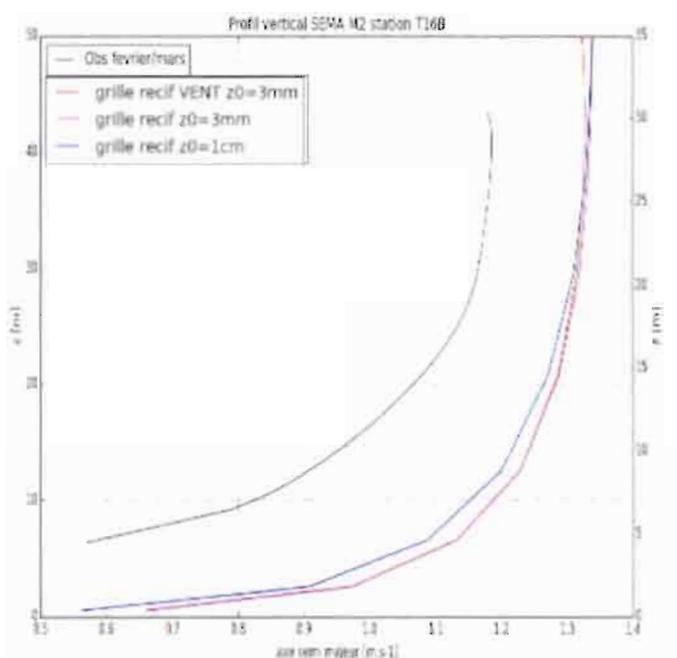


Figure 14: Profil vertical de l'axe semi majeur de l'ellipse de marée de la composante M2 en fonction de la profondeur à la station T16B située dans le Sud, au niveau de la passe de la Sarcelle. Les observations sont en noir. Les profondeurs de l'observation et du modèle sont différentes, à gauche l'axe des profondeurs est celui du modèle, à droite celui des observations. Les données de courants observées en surface ont été supprimées car elles étaient biaisées.

Dans le cadre de la mise en place du système opérationnel SFBOFS sur San-Francisco, Peng et al. (2014) utilisent  $z_0$  afin de régler l'amplitude de la surface libre simulée. En augmentant  $z_0$ , ils parviennent à réduire l'amplitude de la surface libre.

Dans notre cas, les analyses harmoniques sur les élévations n'ont pas révélées de différences notables entre les différentes valeurs de  $z_0$  utilisées (cf. tableau 4). De plus, l'analyse sur le profil vertical de  $q_2$  et SEMA tend à montrer un effet marginal du choix de  $z_0$  sur les écoulements dans le lagon. Finalement, nous avons gardé la valeur  $z_0$  à 3mm pour le reste des simulations.

Stations	RMSE ONDE M2 (cm)			
	$Z_0 = 3mm$		$Z_0 = 1cm$	
	Amplitude (cm)	Phase ( $^{\circ}G$ )	Amplitude (cm)	Phase ( $^{\circ}G$ )
Nouméa	39.50	273.30	39.51	273.34
Hienghène	34.22	215.56	34.23	215.56
Lifou	37.56	215.14	37.56	215.14
Ouiné	36.52	218.95	36.53	218.95
Thio	36.32	217.42	37.79	217.42
Poingam	33.16	235.20	33.25	235.07

Tableau 4. Résultats des analyses harmoniques faites sur l'élévation à la station indiquée obtenue par une simulation FVCOM avec une longueur de rugosité de 3mm et 1 cm.

### 2.3. Etude des sources de variabilité du courant : résultats de la station ADCP Moise

L'ADCP fixé à la station Moise nous permet de disposer d'une série temporelle longue d'observation des courants. Nous rappelons que, la station précédemment présentée dans la *partie 1.5.5* est située à un emplacement où la circulation n'est pas influencée par des effets de chenalisation avec une bathymétrie régulière. Elle serait soumise à une circulation caractéristique du lagon, fortement liée à la marée, au vent et aux autres phénomènes encore non identifiés propres au lagon. Ces données de courants enregistrées sont disponibles depuis mars 2011 jusqu'à novembre 2013 et nous ont permis d'étudier la source de variabilité du courant afin de mieux la comprendre.

La figure 15 présente le courant total observé et modélisé à la station Moise dans plusieurs cas de simulation. Le courant total est composé du courant dû à la marée, au transport d'Ekman, à la géostrophie et du courant résiduel.

Le cas barotrope sans vent modélise le transport lié à la marée. Nous pouvons observer les variations du courant avec une marée haute et une marée basse sur une période de 12h, période de la marée semi diurne. L'ajout du vent à cette simulation, nous permet d'ajouter la composante de transport liée au transport d'Ekman. Enfin, la simulation en mode barocline avec un ajout des flux de chaleur (flux WRF) et un rappel aux frontières ouvertes vers les solutions du modèle océanique OFAM/BlueLink permet à la fois de capturer la composante liée au gradient de surface libre entre les régions Est et Ouest de la Nouvelle Calédonie modulé par la variabilité de grande échelle et le rôle du gradient de densité sur la circulation lagonaire.

En comparant les résultats de ces 3 simulations avec les observations, nous pouvons voir que le courant total observé est en grande partie représenté par la marée et le vent. Cependant, il y a des périodes où le vent est faible, et pourtant le courant observé est important. Dans ces cas-là, la prise en compte de la variation du gradient de densité induit une variabilité du courant total simulé plus en accord avec les observations que dans le cas avec la marée et le transport d'Ekman seul (figure 15 carré 2). Toutefois, à d'autres périodes, cette source de variabilité (figure 15 carré 1) est à l'origine d'une décorrélation marquée du courant simulé avec le courant observé.

La simulation barotrope avec le forçage en vent, reproduit donc assez bien la variabilité. Comme les études précédentes l'avaient démontré, la marée et le vent expliquent en bonne partie la circulation dans le lagon. Dans ces conditions, la qualité du forçage en vent et sa variabilité joue un rôle

déterminant sur la qualité des simulations. Cependant, d'autres processus interviennent et sont représentés avec la simulation barocline (carrés 1 et 2). Ces variations peuvent être liées à des ondes internes comme des ondes inertielles ou quasi-inertielles, des ondes de gravité internes se propageant à l'intérieur même des lagons en présence d'un gradient de densité. Ainsi des études sur les courants le long des côtes Californiennes par Lerczak (2003) ou par Ursella, Kovačević, & Gačić (2014) révèlent bien la présence d'une source de variabilité du signal de courant lié à la stratification thermohaline.

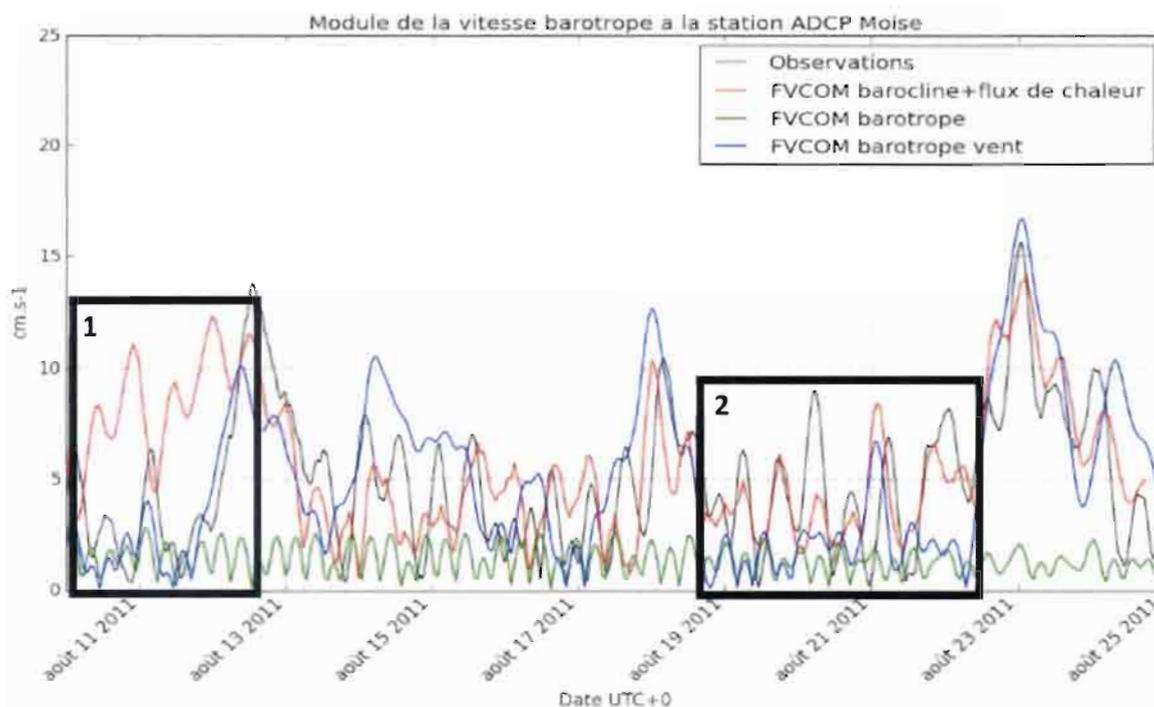


Figure 15. Module de la vitesse moyenne dans la colonne d'eau en  $\text{cm.s}^{-1}$  à la station ADCP MOISE. En noir, les observations du courant total moyenné entre 0 et 6m. En vert, courant total prédit par la simulation barotrope sans forçage par le vent et sans grande échelle. En bleu, courant total prédit par le modèle barotrope avec l'ajout du forçage par le vent en surface. En rouge, courant total prédit par le modèle en mode barocline avec rappel aux frontières, prise en compte de la grande échelle et stratification. Dans le carré 1, le modèle barocline ne reproduit pas correctement les observations. Dans le carré 2, le modèle barocline est le seul à reproduire la variabilité du courant observé.

#### 2.4. Amélioration de la prédiction des courants de marée avec FVCOM 3D en mode barocline

En autorisant la variation du gradient de densité, la structure verticale du courant de marée peut être sensiblement affectée, par exemple à l'interface entre deux couches de densité variable. Cet effet est de nouveau regardé à la Station T16B, en ajoutant (Figure 16) les résultats du profil vertical de SEMA pour le constituant M2 simulé avec FVCOM en mode barocline. Bien qu'il n'existe pas de découplage remarquable du courant de marée sur la verticale en lien avec la stratification (les eaux dans la passe de la Sarcelle sont bien mélangées), il est toutefois remarquable d'obtenir un profil de vitesses beaucoup plus en accord avec les observations.

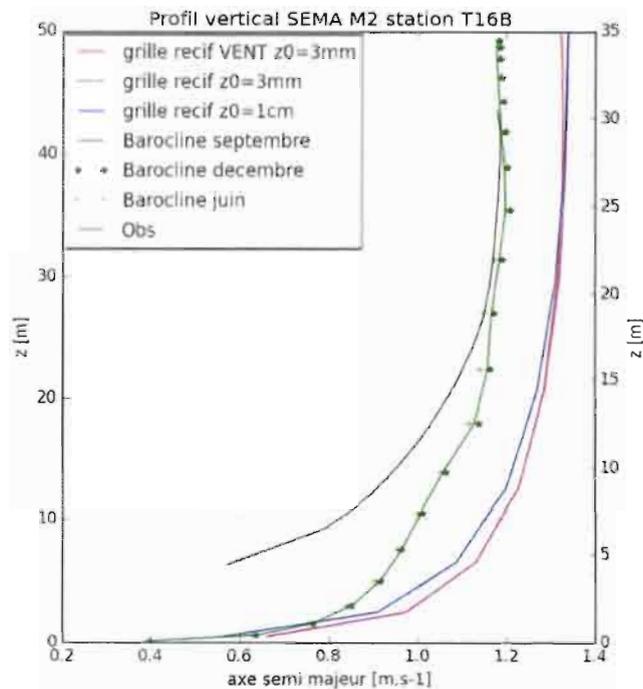


Figure 16. Profil vertical du SEMA à la station T16B, les résultats obtenus avec la simulation barocline sont en vert.

Les simulations FVCOM conduites en mode barocline (gradient de densité variable, avec évolution du flux de chaleur en surface et des conditions de température et salinité aux frontières) et intégrant le forçage de grande échelle (introduit moyennant la condition d'élévation aux frontières) permettent d'introduire des modes supplémentaires de variabilité. Il semble que cette configuration de FVCOM permet également d'améliorer la qualité des courants de marée. En section 3.3, d'autres tests sont menés pour vérifier l'apport du modèle FVCOM en mode barocline sur la qualité des simulations de dérive.

Mais en représentant la structure thermo-haline dans les simulations, les variables température et salinité vont également être exploitées dans le processus d'ajustement/validation du modèle, en les utilisant comme révélateur de biais dans la circulation hydrodynamique, moyennant des simulations longues. Les résultats des simulations FVCOM longues en mode barocline sont détaillés dans la partie suivante.

## 2.5. Etude de FVCOM en mode barocline avec nudging aux frontières

Pour utiliser FVCOM en mode barocline, il est nécessaire de lui fournir des données de température, salinité et de flux de chaleur aux frontières. Pour la température et la salinité, nous avons utilisés un nudging avec le modèle de circulation australien OFAM qui englobe notre zone d'étude. Les données du modèle OFAM sont en accès libre et disponible sur un serveur thredds. Le forçage en flux de chaleur a été créé à partir des données WRF pour commencer puis avec ERA Interim pour vérifier l'influence des jeux de forçage pour les flux de chaleur. Dans ce processus, plusieurs scripts de rapatriement et de préparations des données ont été développés, qui seront utilisés dans le système opérationnel.

### 2.5.1 Principe du nudging

Dans le cas des modèles régionaux, le nudging est une méthode souvent utilisée pour les conditions aux frontières, afin d'éviter que la solution prédite par le modèle aux frontières ne s'éloignent trop de la réalité, surtout lorsque les simulations sont longues (X. Chen et al., 2013). Les conditions de température, de salinité, de vitesse et d'élévation aux frontières sont imposées par la solution d'un système global. Cette solution est introduite dans le domaine régional, jusqu'à une certaine distance préalablement choisie. La solution imposée est combinée à la solution prédite par le modèle à l'aide de fonction de poids. Plus nous rentrons à l'intérieur du domaine, plus le poids mis sur la solution imposée aux frontières est faible (C Chen, 2010). De même, il est possible d'imposer une zone tampon, zone dans laquelle il est possible de fixer un coefficient de viscosité qui va permettre d'amortir la solution prédite pour éviter les contradictions entre la solution imposée aux frontières et celle prédite proche de ces dernières et donc la génération d'instabilités.

### 2.5.2. Sensibilité au coefficient de Smagorinsky et à la distance de nudging

Les équations sont fermées par les schémas de diffusion verticale et horizontale pour la quantité de mouvement, la température et la salinité. Dans FVCOM, les utilisateurs peuvent choisir entre une valeur de coefficient de diffusion horizontal constante ou une valeur déterminée par la méthode de Smagorinsky. Dans notre cas, nous avons choisis d'utiliser le coefficient de Smagorinsky. La diffusion horizontale de la quantité de mouvement de Smagorinsky est donnée par l'équation ci-dessous (Chen, C, Beardsley, R.C, 2011).

$$A_m = 0.5 * C * \Omega * \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + 0.5\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2}$$

La constante C est le coefficient choisis par l'utilisateur. Nous pouvons voir que la diffusion horizontale varie avec la résolution du modèle et le gradient horizontal de vitesse.

Pour les tests en mode barocline, nous avons utilisés une grille réduite à 16 000 points permettant de faire des simulations sur plusieurs dizaines de mois et plus rapidement. Nous avons alors constaté que le coefficient de diffusion horizontal choisis ainsi que la distance sur laquelle est faite le nudging et la position des frontières influent beaucoup sur la circulation prédite par le modèle.

Un nudging sur 50 km à d'abord été utilisé avec une zone tampon de 50 km et un coefficient de Smagorinsky variant linéairement de 5 à 0.05 des frontières vers l'intérieur du domaine. Après une phase de spin up de 2 jours en barotrope, puis 1 mois en barocline, nous avons pu comparer la température de surface issue de la simulation avec des images satellite MODIS. Cela nous a permis de rapidement confirmer les biais de température assez importants qui se sont mis en place lors de la simulation et donc d'identifier les biais de circulation. Ceux-ci sont visibles sur la figure 17 présentant la température de surface le 8 juillet 2011 calculée par FVCOM et celle issue des observations satellite MODIS. Nous pouvons voir la présence d'un biais froid dans le lagon Sud-Ouest d'environ 1.5°C. Au contraire, sur la côte Est, le lagon présente un biais chaud assez important d'environ 2°C. Dans cette simulation, le courant est très faible le long de la côte Est, ce qui semble entrainer un blocage des eaux chaudes à cet endroit. Cela ne semble pas être le cas dans la réalité. La température du lagon Nord est aussi surestimée par le modèle, et la circulation semble influencée par la position des frontières. Celle-ci est limitée par le nudging trop fort le long des côtes Ouest et Est. Les frontières étant trop proches des limites du lagon, FVCOM est fortement influencé par le nudging et rencontre des difficultés pour développer sa propre solution.

Avec un nudging plus léger sur une rangée d'éléments de la grille et une zone tampon de 35 km, nous pouvons observer un résultat totalement différent. Les vitesses prédites par FVCOM sont plus importantes et la circulation ne semble pas très cohérente. Des biais froids apparaissent encore dans le Nord et le Sud-Ouest, associés à des courants violents le long de la pente externe et à des remontées d'eau froides en surface trop importantes. FVCOM semble avoir du mal à gérer les très forts gradients de pente présent à l'extérieur de la barrière de corail.

Les résultats dépendent donc fortement aux paramètres de nudging, à la taille de la zone de nudging et de la zone tampon. Il faut trouver le bon compromis entre rappeler le modèle vers une solution globale aux frontières et laisser assez de liberté au modèle pour qu'il puisse développer sa propre circulation. Finalement, nous sommes arrivés à une solution correcte en modifiant l'emplacement des frontières de la grille, notamment la bordure Est qui était trop proche du récif. Concernant la distance de nudging et la zone tampon comme le montre la figure 17 e, un compromis a été choisi avec une valeur de 35 km. Le coefficient de viscosité varie entre 3 et 0.2. Cette solution stable nous a permis d'effectuer une simulation longue sur 3 ans, en utilisant une grille de 56000 points de calculs. Les résultats sont présentés dans la partie suivante.

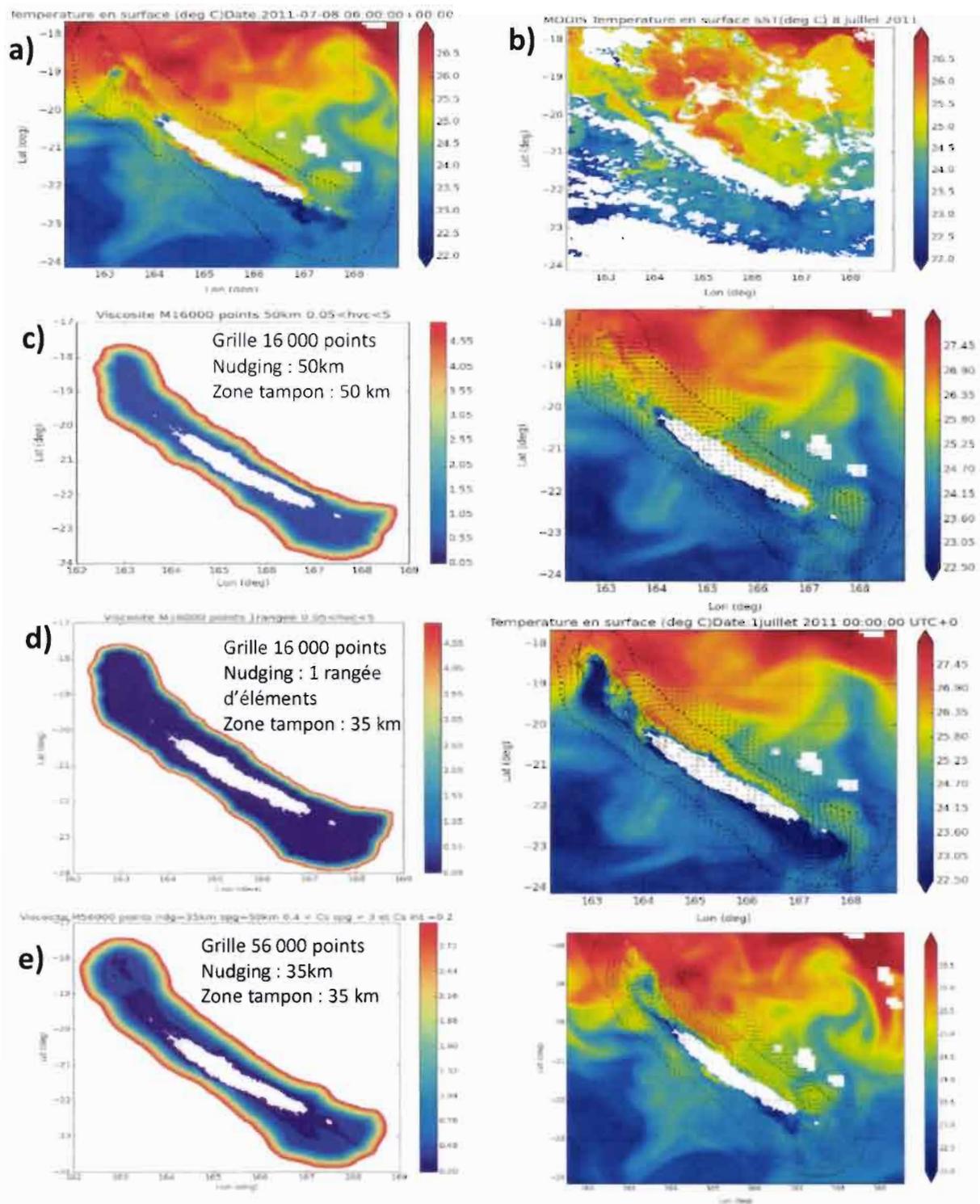


Figure 17. a) Température de surface prédite par le modèle en mode baroclinique pour le 8 juillet 2011 avec une distance de nudging avec le modèle OFAM de 5. Km et une zone de tampon de 50 km. Le coefficient de viscosité varie linéairement dans le domaine de 5 à 0.05 vers l'intérieur. b) Image de température de surface observée par satellite avec MODIS le 8 juillet 2011. c) A gauche, coefficient de viscosité et grille utilisés pour le cas nudging sur 50 km avec une zone tampon de 50 km. A droite, température de surface prédite avec la configuration de gauche. d) A gauche, coefficient de viscosité et grille utilisés pour le cas de nudging sur 1 rangée d'élément et une zone tampon de 35 km. A droite, température de surface prédite avec la configuration de gauche. Les courants sont importants, des biais froids apparaissent. e) A gauche, configuration stable retenue avec une grille modifiée, un nudging et une zone tampon de 35km. A droite, le résultat prédit pour le 8 juillet 2011.

## 2.6. Résultats intermédiaires

A partir de tous les tests effectués, la configuration de FVCOM suivante a été retenue pour sa stabilité et sa solution satisfaisante.

- Grille modifiée de 56 000 points
- Bathymétrie avec présence du récif, mais limitée à 800 m de profondeur au-delà de la pente externe
- 11 niveaux sigma pour réduire le temps de calcul sans trop sacrifier la qualité des simulations lagunaires
- Barocline 3D
- Longueur de rugosité  $z_0$  de 3 mm
- Forçage en vent issu du modèle WRF avec une résolution de 20km
- Nudging en élévation, température, salinité et vitesse avec la solution OFAM sur 35 km à partir des frontières
- Zone tampon de 35km avec coefficient de viscosité variant de 3 à 0.2
- Flux de chaleur imposés directement (FVCOM ne le calcule pas) créés avec des données WRF

Cette maquette préfigure le modèle FVCOM utilisé en mode opérationnel. Les scripts développés pour le rapatriement des forçages océaniques (ici OFAM) ont également été adaptés pour les solutions MERCATOR Océan. De même, les scripts servant à la préparation du forçage météo ont été adaptés aux données Météo-France pour les sorties de modèles ALADIN et CEP.

Afin d'identifier les biais restants, une simulation longue a été réalisée sur 3 ans. Elle a été faite sur la période de mai 2011 à avril 2014. Cette période a été choisie dans le but de permettre une comparaison des résultats de la simulation avec les observations en notre possession.

Les résultats de cette simulation longue permettront de créer une climatologie utilisée pour démarrer les simulations du système opérationnel, en cas de rupture dans la chaîne de récupération des données issues des modèles océaniques.

### 2.6.1. Climatologie : Comparaison avec les observations

Nous avons comparé les solutions prédites de température de surface avec les observations satellites MODIS et des séries temporelles de température enregistrées par le réseau de capteur REEF TEMP du GOPS.

Il est important de savoir que les données de température de surface issues d'observations satellites sont à considérer avec précautions. En effet, la qualité des données peut être impactée par la présence de nuages et par l'effet de peau, artefact dû à la micro pellicule d'eau chaude surchauffée située en surface biaisant la mesure faite par le capteur. C'est pourquoi les conclusions tirées de la comparaison avec les images MODIS ont été confirmées par les séries temporelles de température enregistrées in situ. Ces dernières ont été enregistrées toutes les 15 minutes de 2011 à 2014.

Les cartes de la figure 18 présentent les résultats de température de surface simulée et observée par MODIS. En les comparant, nous pouvons constater que FVCOM dans OFAM parvient assez bien à reproduire les détails de la circulation côtière et lagunaire observées sur les images de la SST mesurée par MODIS. Un upwelling observé par satellite en novembre 2011 le long de la barrière Sud-Ouest a ainsi été reproduit par FVCOM. Cependant, nous pouvons noter un biais froid au niveau de la pointe Nord en juillet 2011 et mai 2012. Un second biais froid apparaît dans le lagon Sud-Ouest en mai 2012. Enfin un biais chaud est visible en octobre 2013 dans le lagon Sud au niveau du canal de la Havannah. Ces biais sont confirmés par les séries temporelles de température des capteurs in situ présentées en figure 19.

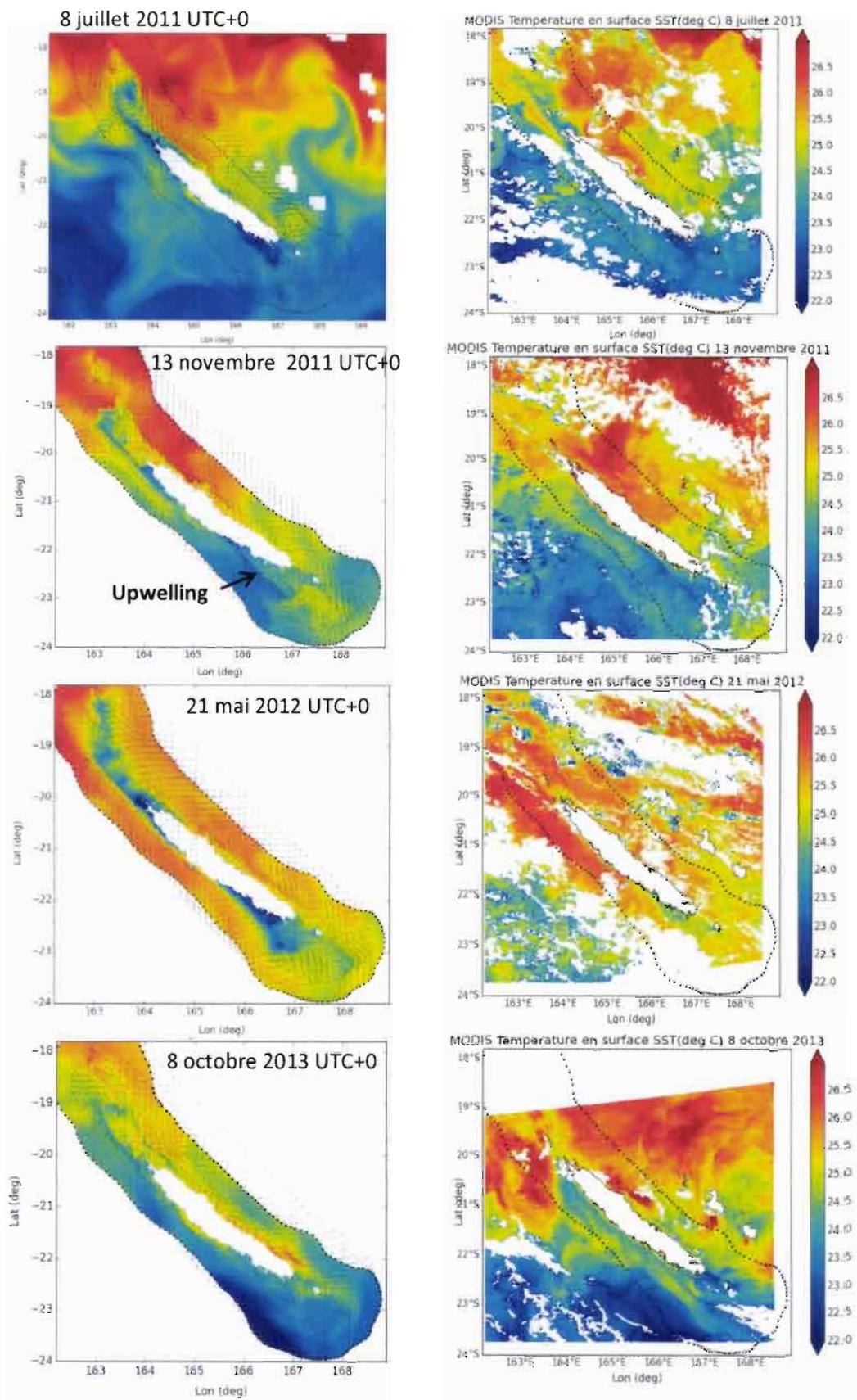


Figure 18. A gauche, résultats de température de surface obtenus avec la simulation baroclinic longue de FVCOM. Les points noirs représentent les nœuds frontières. Les flèches représentent le courant de surface. A droite, les images MODIS de température de surface (SST) aux dates correspondantes.



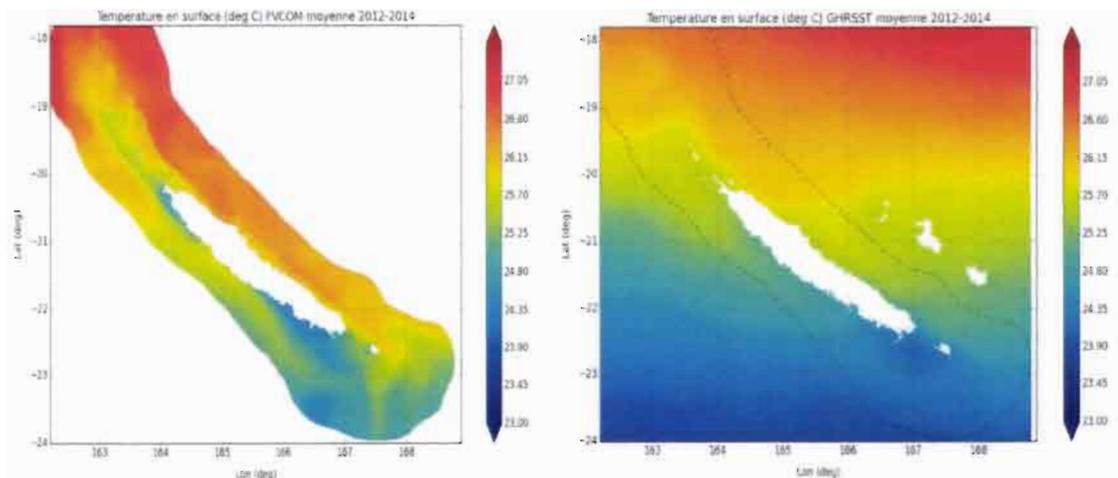


Figure 20. A gauche, température de surface (°C) moyenne de 2012 à 2014 calculée à partir du résultat de la simulation longue FVCOM sur la grille de 56 000 points. A droite, température moyenne sur la même période issue des données de SST de qualité du GHRSSST. Les nœuds frontières de notre grille sont représentés par des points noirs.

Les cartes de la figure 20, ci-dessus, montrent la température de surface moyennée de 2012 à 2014 de notre solution et celle des données du GHRSSST (Group for High Resolution SST). Les données du GHRSSST sont plus fiables que celle de MODIS, car elles sont traitées, analysées et validées par des mesures in situ internationales. En comparant les deux cartes, les biais de notre modèle sont visibles mais nous voyons aussi des structures bien reproduites comme le refroidissement du lagon Nord. Le biais chaud d'un degré Celsius de la côte Est est bien présent mais il semble aussi qu'un biais chaud est introduit au niveau des frontières par OFAM, le modèle global utilisé en forçage. Le biais détecté est acceptable sachant que la marge d'erreur en température pour des systèmes opérationnels similaires est de 7°C (Zhang, Hess, & Aikman, 2010). Dans le futur, il est envisagé de remplacer OFAM par le produit MERCATOR Océan et de réitérer une simulation longue pour confirmer l'origine des biais introduits aux frontières.

### 2.6.2. Analyse harmonique des élévations et courants de marée

Le RMSE total calculé sur l'élévation sur les 6 stations pour la composante M2 est de 1.91 cm, soit plus grand que la valeur de 1.41 cm obtenue lors de la première analyse (partie 2.1). De même, les ellipses de courant tracées sur les cartes en annexe B sont pour certaines moins proches des observations que dans le cas de la partie 2.1. Les orientations et amplitudes des ellipses situées dans le canal de la Havannah sont meilleures, cependant nous remarquons que les ellipses plus proches des frontières et donc plus influencées par le forçage aux frontières sont moins bonnes comme par exemple à la station Moise. Ceci peut s'expliquer par le changement des positions des frontières et donc de la validité de la solution en élévation imposée. En effet dans la partie 2.1, nous utilisons la grille ovale de 65 206 points avec des frontières au large. La solution de forçage en élévation issue de TPXO est une solution globale valable au large. Ainsi, en appliquant cette solution aux frontières de la grille 56 000 dernièrement utilisée, qui sont plus proches de la côte, nous introduisons une erreur. La solution TPXO n'est pas forcément valable proche des côtes.

Finalement, la configuration de la simulation longue a été retenue pour être utilisée par la chaîne opérationnelle. Durant les différentes simulations effectuées, des scripts de lancement et les exécutables de fabrication de forçage ont pu être testés et validés. Le principe de la chaîne est expliqué dans la partie suivante.

### 3. La chaîne opérationnelle FVCOM – MOTHY – ALADIN

Le chaîne opérationnelle proposée est inspirée des systèmes opérationnels de prévisions du service océanique national (NOS) de la NOAA aux Etats Unis (Zhang Aijun, 2014). Cette partie est consacrée à l'explication du principe et du fonctionnement détaillé du système FVCOM-MOTHY-ALADIN.

La validation du modèle FVCOM, nous a permis d'établir un paramétrage de FVCOM efficace pour la chaîne opérationnelle. Dans cette partie, nous nous intéressons aussi à la validation du couplage FVCOM-MOTHY en revisitant des situations de dérive de bouées et de bateaux, tout en testant les scripts de la chaîne opérationnelle. Cependant, il nous reste encore à déterminer si nous utilisons le mode barocline pour le système opérationnel ou si le mode barotrope avec vent et forçage grande échelle suffit à prévoir des courants de surface fidèles à la réalité. Afin de comparer et de choisir la meilleure option, nous ferons des études de sensibilité de la prévision à l'utilisation de ces différents modes. Nous étudierons aussi la sensibilité à la fréquence de rappel des courants et à leur résolution spatiale.

La chaîne opérationnelle détaillée dans cette partie est décrite dans le cas de l'utilisation du mode barocline 3D avec 11 niveaux sigmas et un nudging en élévation, température, salinité et vitesse avec MERCATOR aux frontières sur 35 km (ou OFAM en secours). Elle peut cependant être facilement réadaptée et simplifiée pour le cas d'un usage de FVCOM en mode barotrope.

#### 3.1. Principe du système opérationnel FVCOM-MOTHY-ALADIN

Le modèle de circulation FVCOM fonctionnera en opérationnel 24h sur 24 sur un ordinateur hébergé à la DTSI de Nouméa. Les prévisions de dérives seront faites avec MOTHY sur demande du MRCC (Marine Rescue Coordination Center). Les prévisions de courants 3D haute fréquence et haute résolution calculés par FVCOM seront alors envoyées au centre Météo France de Toulouse pour être intégrées à MOTHY dont la prévision de dérive sera envoyée au MRCC de Nouméa. Le principe de la chaîne FVCOM est d'effectuer 2 simulations par jour avec un intervalle de 12h. Au temps  $T_0$ , premier temps de début de simulation de la journée, FVCOM est lancé en forecast sur une période de simulation de 48h. La simulation est démarrée à partir du fichier Restart  $T_0$ . Un fichier Restart est un fichier au format netcdf créé par FVCOM regroupant les variables calculées à un temps donné. Ces variables permettent au modèle de reprendre ces calculs à partir de ce temps exact en cas d'arrêt du modèle. Le fichier Restart au moment  $T_0$  est créé à l'issue de la simulation nowcast commençant au temps de la dernière simulation effectuée, soit 12h avant  $T_0$ , jusqu'au temps actuel  $T_0$ . Au temps  $T_0'$ , deuxième temps de début de simulation de la journée, le modèle effectue une simulation en nowcast sur 12h à partir du fichier Restart précédent à  $T_0$  pour obtenir le fichier Restart à  $T_0'$ . A partir de ce dernier, le modèle effectue alors le forecast sur 48h et la boucle recommence.

Le schéma en figure 21 résume le principe de la chaîne.

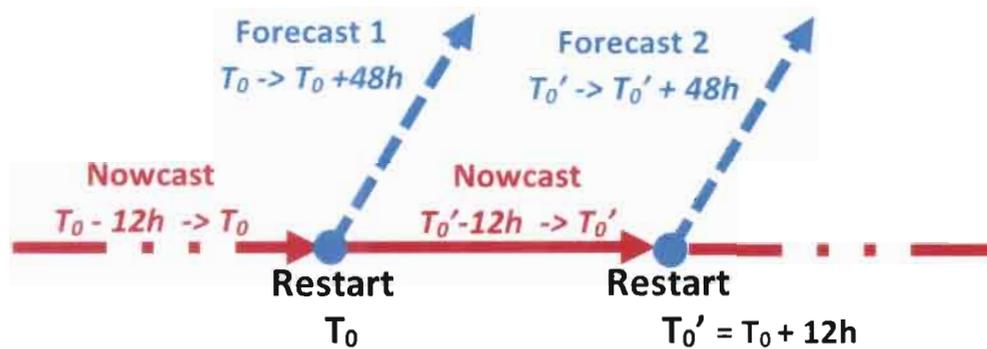


Figure 21. Déroulement temporel du système opérationnel FVCOM

### 3.1.1. Préparation des données

Comme cela a été vu dans la première partie de ce rapport, FVCOM a besoin des données suivantes pour fonctionner :

- La bathymétrie
- Le forçage météorologique réalisé pour l'instant par le modèle ALADIN ou CEP de Météo France puis plus tard par Arôme. Ces modèles fournissent des prédictions des vitesses Nord et Est du vent à 10 m au-dessus du sol, les flux de chaleur sensible et latente et les radiations grande longueur d'onde et courte longueur d'onde.
- Le forçage grande échelle réalisé avec MERCATOR océan ou OFAM fournit des solutions de température, de salinité, d'élévation et des vitesses Nord et Est du courant océanique imposées aux frontières et dans la zone de nudging du modèle.
- Le forçage en marée est recréé au moyen des données TPXO7.2 et est ajouté à l'élévation de grande échelle imposé par le modèle océanique. Le forçage en courant de marée n'est pas introduit aux frontières ouvertes.

Les scripts perl conçus pour fonctionner sur plateforme Linux effectuent les étapes suivantes :

- Récupérer et préparer les forçages météorologiques fournis par Météo France Toulouse en forecast sur un serveur ftp. Ceux sont des forecast sur 48h. Les fichiers récupérés sous format grib sont ensuite automatiquement réadapter et convertis en format netcdf.
- Récupérer les solutions du modèle océanique global (OFAM ou MERCATOR) utilisé en forçage aux frontières. Les solutions récupérées sont interpolées pour correspondre aux nœuds frontières de notre domaine.
- Lancer une simulation FVCOM en forecast sur 48h. Le démarrage se fait en hotstart à partir du fichier Restart de la simulation précédente.
- Archiver les sorties prédites par le modèle.

### 3.1.2. Les conditions initiales

Selon le mode de démarrage du modèle, Coldstart (départ à froid) ou Hotstart (départ à chaud), les sources des conditions initiales sont différentes.

Le redémarrage en coldstart est utilisé en cas de rupture de la chaîne. Dans ce cas, la chaîne est réinitialisée, le modèle est lancé en mode barotrope avec vent sur 2 jours de simulation puis en

barocline sur 7 jours afin que le modèle ré atteigne un équilibre. Le passage entre barotrope et barocline se fait avec le fichier Restart de la simulation barotrope. Cependant, pour utiliser le fichier Restart du mode barotrope pour le redémarrage en hotstart en mode barocline, il est nécessaire de modifier les valeurs des variables salinité et température qui sont constantes en barotrope. Celles-ci sont remplacées sur tous les nœuds de la grille par la température et la salinité issues du modèle océanique (MERCATOR ou OFAM). Si aucun des 2 modèles globaux n'est disponible, nous utilisons la climatologie calculée précédemment avec la simulation longue.

Dans le cas du Hotstart, cas standard utilisé pour chaque redémarrage de simulation, le fichier Restart de la simulation opérationnelle précédente est utilisé pour démarrer la nouvelle.

### 3.1.3. Les forçages en surface

Un forçage météorologique est appliqué en surface. Il comprend un forçage en vent et en flux de chaleur prédits en forecast par le modèle ALADIN de Météo France. Ces prévisions sont disposées sur un serveur ftp à partir duquel elles sont automatiquement récupérées. Cette opération est faite par un script perl. Les fichiers météorologiques fournis sont en format grib. Le champ de pression prédit à la surface de l'eau est aussi appliqué. Ces champs de forçage sont arrangés et convertis en format netcdf pour être lus par FVCOM.

Ils sont créés par l'exécutable *nos\_ofs\_create\_forcing\_met\_fvcom* créé par le script fortran *nos\_ofs\_create\_forcing\_met\_fvcom.f*, réadaptation du script utilisé par le NOS de la NOAA.

### 3.1.4. Les conditions aux frontières

En mode barotrope, un forçage en élévation et courant de marée est appliqué aux frontières. Ces données sont fournies aux modèles sous format netcdf contenant les amplitudes et phases des constantes harmoniques ainsi que les facteurs nodaux pour le courant et pour l'élévation. Lorsque nous utilisons le mode barocline et le nudging avec un modèle océanique global, nous rajoutons d'autres variables de forçage aux frontières notamment les courants et l'élévation grande échelle, la température et la salinité.

Elles sont créées par le exécutable *nos\_ofs\_create\_forcing\_obc\_fvcom* et créés par le script fortran *nos\_ofs\_create\_forcing\_obc\_fvcom.f*, réadaptation des scripts utilisés par le NOS de la NOAA. Le fonctionnement du système opérationnel est résumé par le schéma de la figure 22.

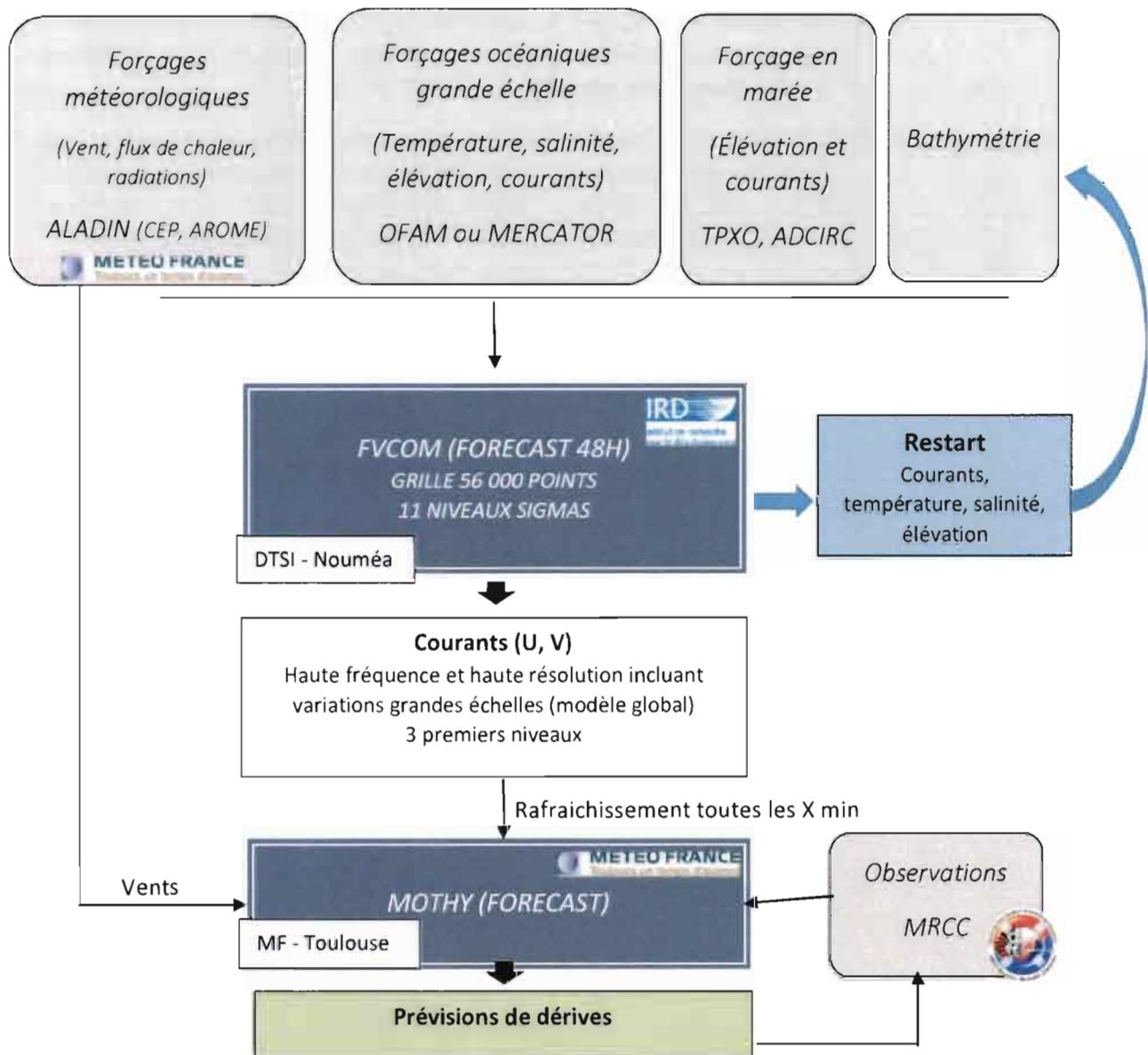


Figure 22. Fonctionnement du système opérationnel FVCOM-MOTHY-ALADIN

### 3.2. Arborescence des répertoires de la chaîne opérationnelle

Dans cette partie, nous présentons la structure des répertoires de la chaîne opérationnelle et définissons la fonction de chacun des dossiers schématisés sur la figure 23.

- Le répertoire RUN : contient le dossier d'exécution WORKDIR dans lequel se déroule la simulation, et le dossier INPUT contenant les fichiers de forçages climatiques mis en entrée dans la simulation. Les fichiers de forçages sont organisés dans des dossiers imbriqués : ANNEE/MOIS/JOUR/.
- Le répertoire DATA : contient tous les fichiers nécessaires au lancement de la simulation.
  - Le dossier CLIM\_OCEAN : regroupe les fichiers et exécutables permettant de créer les forçages sauvegardés dans le répertoire RUN/INPUT/.

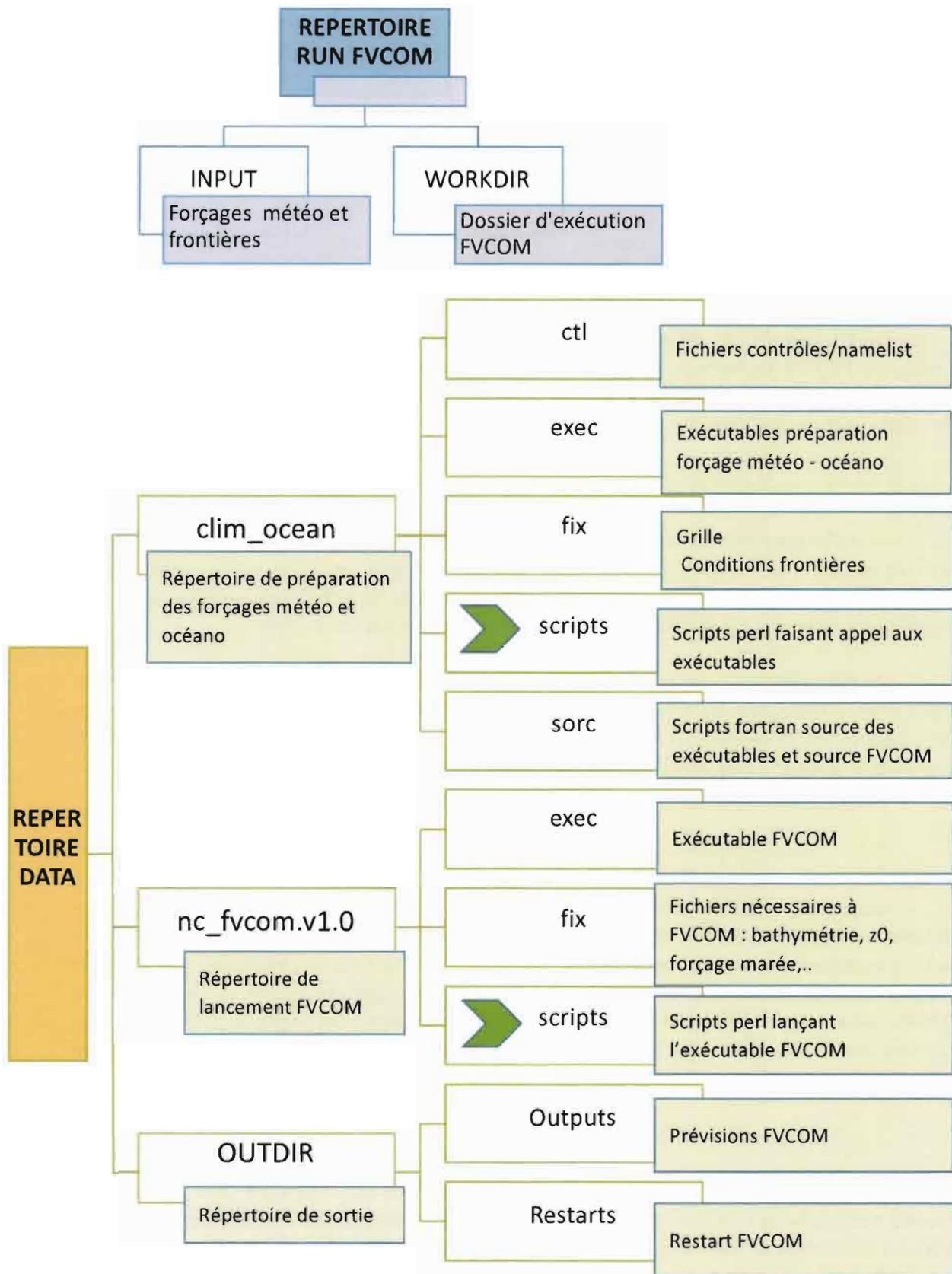
- Le dossier CTL : contient les namelists permettant de choisir les paramètres de créations des fichiers météo et des conditions aux frontières. (MET.namelist, OBC.namelist)
  - Le dossier EXEC : contient les exécutables préparant les fichiers de forçages. Ils prennent en compte les paramètres des namelists contenus dans le dossier CTL. (MF\_available.pl, OFAM\_available.pl, MERCATOR\_available.pl, nos\_ofs\_create\_forcing\_met\_fvcom, nos\_ofs\_create\_forcing\_obc\_fvcom)
  - Le dossier FIX : contient les fichiers .dat (texte) avec les positions des points de la grille et des nœuds frontières. (nos.EXPERIENCE.grid.dat, nos.EXPERIENCE.obc.ctl, nos.EXPERIENCE.vgrid.dat).
  - Le dossier SCRIPTS : contient le script .pl (perl) dit « maître » préparant les fichiers de forçage en imposant les dates et chemins vers les répertoires. Il fait appel aux exécutables contenus dans le dossier EXEC. (prep\_fvcom.pl)
  - Le dossier SORC : contient tous les fichiers sources. Soit les fichiers sources des exécutables nos pour la préparation des forçages météo mais aussi les fichiers source du modèle FVCOM3.2.2.
- Le dossier NC\_FVCOM.V1.0 : regroupe les fichiers et exécutables nécessaires au lancement de la simulation FVCOM.
    - Le dossier EXEC : contient l'exécutable FVCOM.
    - Le dossier FIX : contient les fichiers permanents permettant de paramétrer FVCOM. Il comprend les fichiers de grille, de conditions aux frontières, de contrôle, de viscosité, de longueur de rugosité.
    - Le dossier SCRIPTS : contient le script perl dit « maître » permettant de lancer automatiquement FVCOM. (run\_fvcom.pl)

### 3.2.1. Les fichiers de contrôles : Les namelists et les fichiers log

Les fichiers namelist avec l'extension .nml sont les fichiers permettant de lancer la simulation FVCOM. Il configure le modèle avec les paramètres choisis comme les dates de début et fin de la simulation, l'activation ou la désactivation du forçage en vent, l'activation du mode barotrope ou barocline et indique aussi les noms des fichiers de grille, de frontières et de forçages.

A différentes étapes des fichiers de contrôle sont créés par les scripts. Ils résument les informations essentielles comme les dates des simulations déjà effectuées, les modèles utilisés et les coordonnées géographiques.

Le fichier *NOM\_EXP.db* situé dans *nc\_fvcom.v1.0/scripts* contient les dates des simulations déjà effectuées et est lu en cas de crash ou de redémarrage. Il permet de repartir de la dernière date de simulation effectuée.



➤ Lieu où l'utilisateur lance les programmes « maîtres » utilisant les exécutables. En premier, création des forçages océaniques et météorologiques depuis `clim_ocean/scripts/`. Ensuite, lancement de FVCOM depuis `nc_fvcom.v1.0/scripts/`.

Figure 23. Architecture des dossiers de la chaîne opérationnelle

Selon le nombre de processeurs utilisés, les temps de calculs pour un forecast de 48h sur la grille de 56 000 points varie. Le tableau 5 résume les temps de calculs observés pour des processeurs Intel Xéon E5 2680.

Temps simulé	Fréquence de sortie	Nombre de processeurs	Temps de la simulation
48 h	20 min	60	5 min
48 h	20 min	40	10 min
48 h	20 min	16	25 min

Tableau 5. Tableau du temps de calculs pour une simulation sur 48h en fonction du nombre de processeurs utilisés

Le bon fonctionnement des différentes étapes de la chaîne présentée a été testé pour effectuer les simulations FVCOM sur les périodes dont nous avons besoin pour reproduire les cas de dérives dans le but de valider le couplage MOTHY-FVCOM. A l'issue de ces simulations, nous pouvons conclure que les scripts existants fonctionnent.

### 3.3. Tests de validation et de sensibilité du couplage modèle FVCOM-MOTHY

Afin d'intégrer les courants calculés par FVCOM dans MOTHY nous avons utilisé la version de MOTHY couplé avec HYCOM (MOTHY-HYCOM) déjà existante et un nouveau script fortran « fvcom2hycom » permettant de convertir les sorties de courants haute fréquence et haute résolution prédits par FVCOM en format HYCOM, sur une grille régulière lisible par MOTHY.

Tout d'abord, nous présenterons les résultats qualitatifs des prévisions de dérives reproduites à partir de situations réelles. Ensuite, nous verrons la sensibilité des prévisions de dérives à l'utilisation des courants FVCOM calculés en mode barotrope sans prise en compte de la grande échelle, avec la grande échelle ou en mode barocline. La sensibilité à la fréquence de rafraichissement des courants dans MOTHY et leur résolution spatiale seront aussi étudiées.

#### 3.3.1. Reproduction de situations réelles

Nous avons reproduit au total 9 situations de dérives dont 8 cas réels et 1 correspondant à un exercice fictif du plan POLMAR. Nous avons utilisé les courants FVCOM calculés en mode barocline avec la configuration retenue rappelée dans la section 2.5 *Résultats intermédiaires*. Les courants FVCOM haute résolution de FVCOM sont ré interpolés sur une grille structurée de pas de grille de 0.0045° soit environ 500 m et sur 3 niveaux verticaux correspondant aux profondeurs de 0, 2 et 4 m. Les courants sont injectés dans MOTHY toutes les 20min. Les résultats des prévisions de dérives obtenus sont présentés dans cette partie.

##### 3.3.1.1. Cas des flotteurs

Nous avons commencé par des trajectoires de flotteurs ARGO lâchés à Goro au Sud de la Grande Terre, près de l'îlot Porc Epic dans le lagon Sud-Ouest et à Boulari durant l'année 2007. Ces flotteurs ont dérivés pendant une période d'environ 72 h en émettant leur position toutes les heures avant d'être récupérés. Pour reproduire ces simulations, les courants ont été calculés par FVCOM avec la configuration barocline retenue précédemment. Cependant, nous n'avons pas les données météorologiques Météo France pour cette période. Nous avons donc utilisé les vents WRF de 4 km de résolution.

➤ **Bouée 66574 en surface, Goro :**

La bouée 66574 a été lâchée en surface à Goro à la position 166.991°E et 22.37°S le 16 février 2007 à 22h 38 UTC +0. Cette bouée a cessé d'émettre, pour cause de dysfonctionnement, le 18 février à 22h37 à la position connue 166.81° E et 22.49° S. Elle a de nouveau émis sa position environ 6h plus tard, échouée sur le banc des 5 miles. Le flotteur a une taille estimée de 2 m et ne dépasse pas assez de la surface de l'eau pour être notablement influencé par le vent directement. Nous avons donc utilisé le mode POLLUANT de MOTHY en paramétrant un lâcher simultané de 20 particules d'une densité de 1030 kg.m-3 à la profondeur de 1.50 m. Le résultat obtenu est présenté sur la figure 24 ci-dessous.

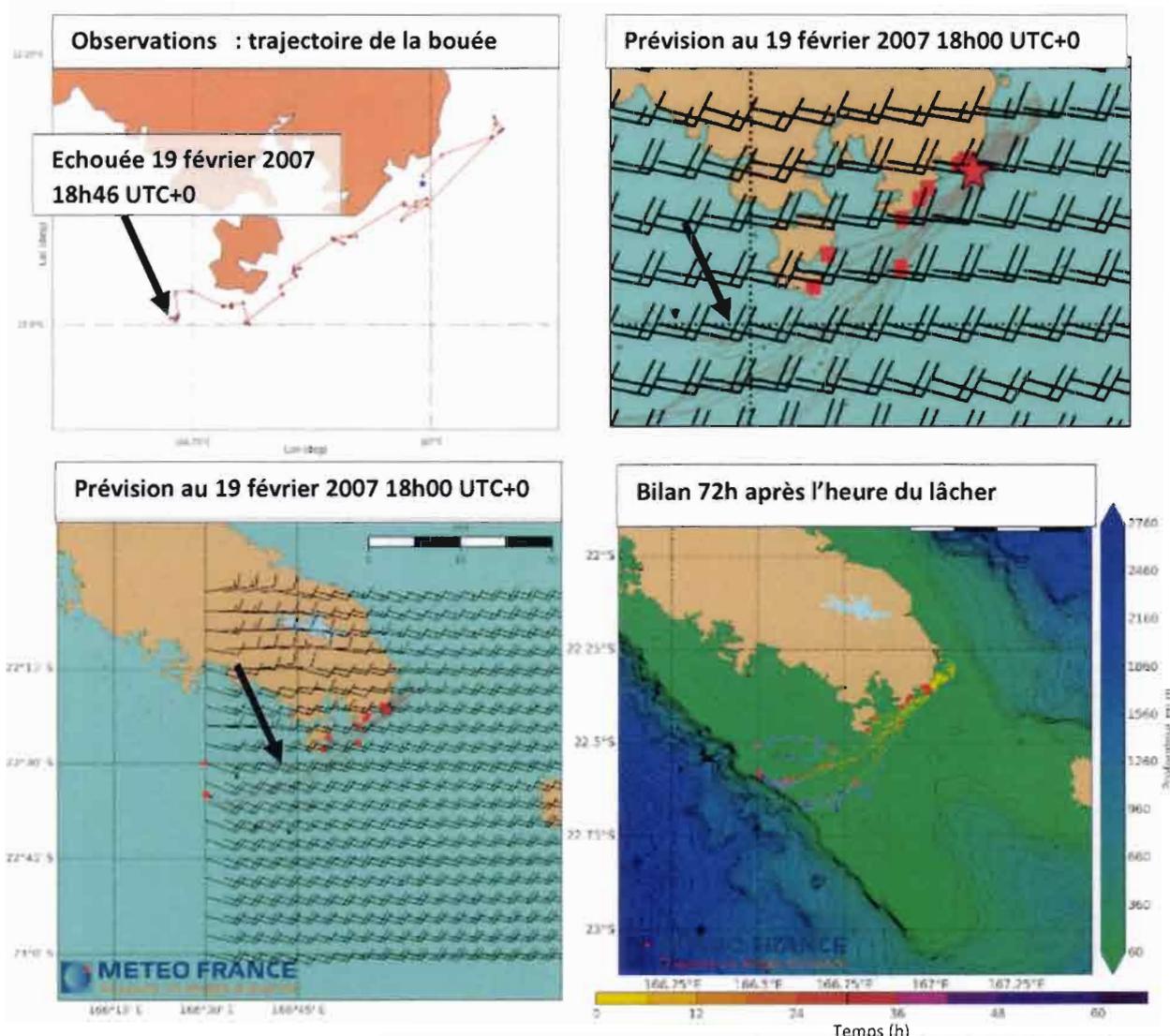


Figure 24. Simulation du cas de la bouée 66574 lâchée en surface dans le canal de la Havannah en février 2007. En haut, à gauche, trajectoire de la bouée observée entre le 16 février 2007 22h38 et le 19 février 2007 18h46 UTC+0. A droite, résultat de la prévision MOTHY couplé avec les courants FVCOM au 19 février 2007 18h00 UTC+0 pour 20 particules lâchées le 16 février 2007 à 22h38. En bas, à gauche, même résultat avec un plan plus large. Les vents sont tracés, ils ont une intensité d'environ 20 nœuds et viennent du Sud Est. Les carrés rouges représentent les particules échouées. A droite, bilan de la simulation MOTHY sur 72h après l'heure du lâcher. La position des particules est colorée en fonction du temps en heures depuis lequel elles dérivent. La flèche noire indique la dernière position observée de la bouée.

Le résultat obtenu est satisfaisant. Les trajectoires des particules simulées sont proches de celle observée avec une remontée de la particule vers le Nord Est pendant les premières heures puis un

entrainement assez rapide vers le Sud-Ouest jusqu'à passer à proximité du banc des 5 miles. Aucune bouée ne s'est échouée à cet endroit avec MOTHY car la bathymétrie intégrée est de moins bonne résolution que celle que nous utilisons dans FVCOM. La dérive simulée est un peu plus rapide que dans le cas observé, témoignant ainsi d'un courant simulé dans la passe un peu plus puissant qu'en réalité. En effet, au bout de 48h, alors que la position connue est située juste un peu au Sud de l'île Ouen, la plupart des particules simulées sont sur le point d'atteindre la barrière de corail. Cependant, la trajectoire est bien représentée et certaines particules se situent dans les temps de la bouée observée.

➤ **Bouée 13685 à 10m, Goro :**

La bouée 66574 a été lâchée et lestée pour rester à la profondeur de 10m à Goro. La position du lâcher est 166.991°E et 22.37°S le 16 février 2007 à 22h 00 UTC +0. La prévision de dérive obtenue avec MOTHY ainsi que la trajectoire observée sont présentées sur la figure 25.

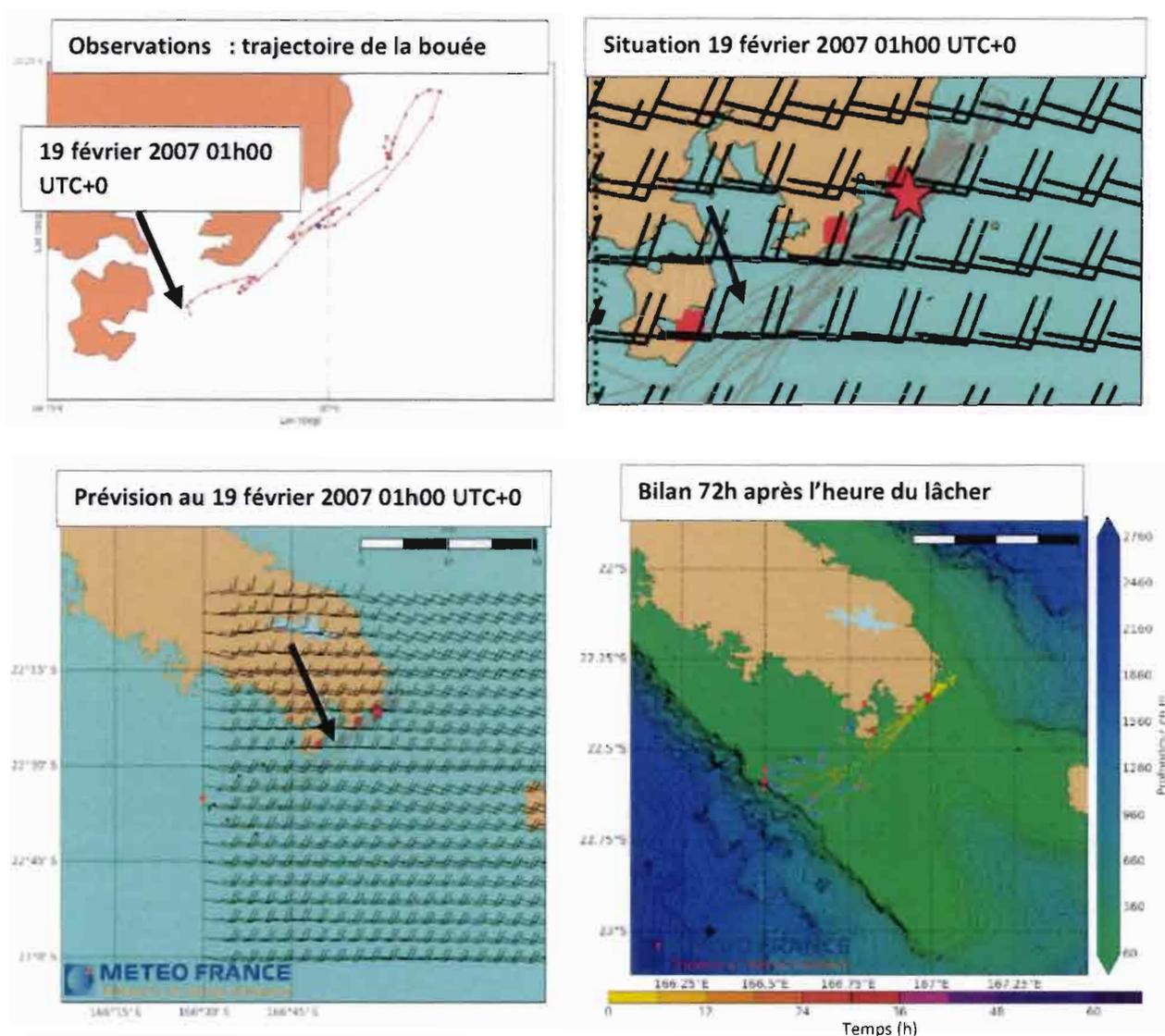


Figure 25. Simulation du cas de la bouée 13685 lâchée à 10m dans le canal de la Havannah en février 2007. En haut, à gauche, trajectoire de la bouée observée entre le 16 février 2007 22h00 et le 19 février 2007 18h46 UTC+0. A droite, résultat de la prévision MOTHY couplé avec les courants FVCOM au 19 février 2007 18h00 UTC+0 pour 20 particules lâchées le 16 février 2007 à 22h38. En bas, à gauche, même résultat avec un plan plus large. A droite, bilan de la simulation MOTHY sur 72h après l'heure du lâcher. La position des particules est colorée en fonction du temps en heures depuis lequel elles dérivent. La flèche noire indique la dernière position observée de la bouée.

Pour ce cas-ci aussi, le résultat est concluant. Nous retrouvons bien la trajectoire observée en comparant avec celles des particules dérivantes simulées par MOTHY. La dérive simulée est légèrement plus rapide que celle observée pour la majorité des particules mais est correcte pour d'autres. La trajectoire avec deux boucles vers le Nord en début de dérive est encore bien recréée.

➤ **Bouées 13685 et 25020, vers ilot Porc Epic, Tareti :**

Les bouées 13685 et 25020 ont été lâchées vers Porc Epic à la position 166.619°E et 22.353°S le 23 avril 2007 à 05h 00 UTC +0. Elles ont été récupérées le 26 avril 2007 à 20h00. Le résultat de la prévision de dérive est présenté ci-dessous.

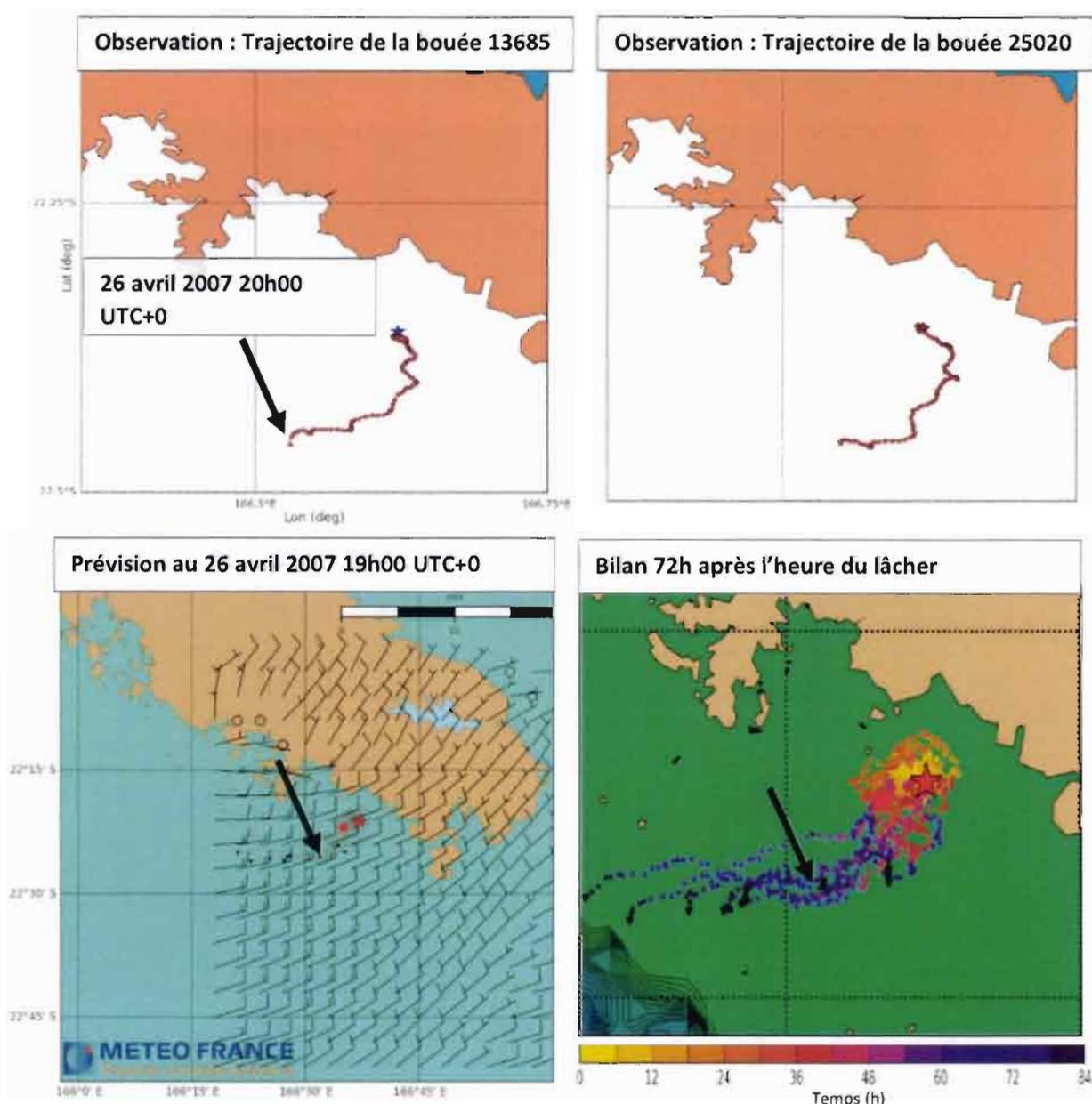


Figure 26. Simulation du cas de la bouée 13685 lâchée à Tareti en avril 2007. En haut, à gauche et à droite, trajectoires des bouées 13685 et 25020 observées entre le 23 avril 2007 05h00 et le 26 avril 2007 20h00 UTC+0. En bas à gauche, résultat de la prévision MOTHY couplé avec les courants FVCOM au 26 avril 2007 19h00 UTC+0 pour 20 particules lâchées le 23 avril 2007 à 5h00. En bas, à droite, bilan de la simulation MOTHY sur 72h après l'heure du lâcher.

La trajectoire des bouées est bien reproduite. De même, le temps de dérive est fidèle aux observations.

### 3.3.1.2. Cas de l'annexe et l'enfant disparus, Nord de la Grande Terre

Le soir du 11 avril 2012 UTC+11, une femme est retrouvée sans vie sur la plage de l'île Mouac, au large de Poum au Nord de la Grande Terre. Son neveu de 4 ans qu'elle gardait et l'annexe du bateau sur lequel elle vivait ont disparu. Le MRCC a été contacté afin de coordonner l'opération de recherche en mer. L'enfant et l'annexe ont été retrouvés le lendemain matin, 12 avril 2012 à 8h00 UTC+11, sur l'îlot Yava. Une prévision de dérive a été faite à l'époque par le centre de Météo France de Toulouse dont l'archive nous a été fournie par Y. Mercier (Météo France). Cette dernière a été faite avec MOTHY couplé à Mercator et en utilisant les vents ALADIN. Nous avons rejoué la simulation avec les mêmes positions et heure de lâcher afin d'observer l'apport du couplage des courants FVCOM à MOTHY. Cependant, les courants calculés par FVCOM ont été forcés par les vents WRF à notre disposition. Sur les figures ci-dessous présentant le résultat, nous pouvons noter que les vents WRF sont légèrement plus forts que les vents ALADIN utilisés en 2012. L'orientation est cependant similaire.

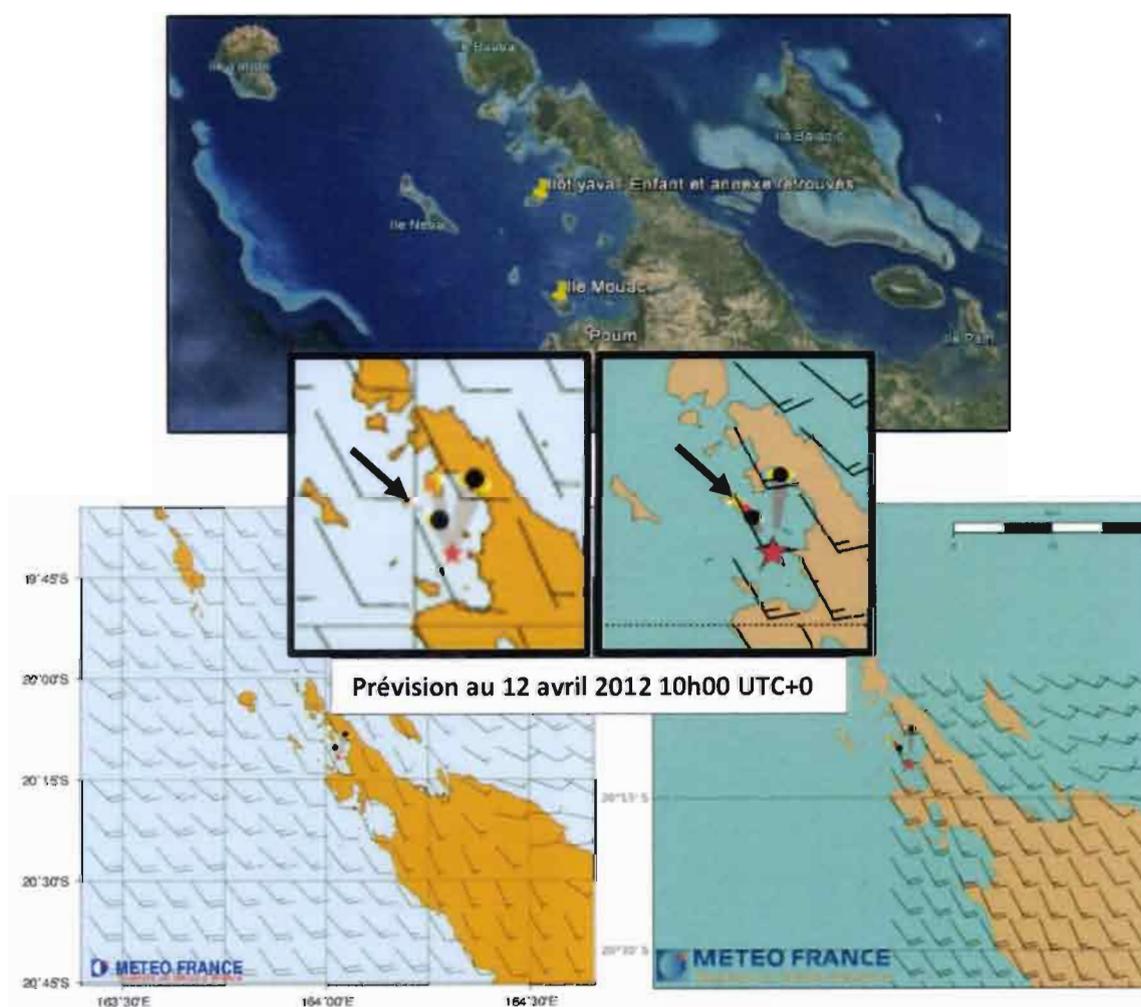


Figure 27. En haut, capture Google Earth situant les événements. En bas à gauche, résultat de la simulation MOTHY-Mercator-ALADIN (24 h après le lâcher) faite par Météo France à l'époque des faits. En bas à droite, résultat de la simulation MOTHY-FVCOM-WRF 24h après le lâcher au même endroit et à la même heure. Dans les 2 cas, le mode LEEWAY de MOTHY a été utilisé, permettant de simuler la probabilité initiale du bateau à dériver à droite ou à gauche.

Le résultat obtenu avec MOTHY-FVCOM-WRF est meilleur que celui obtenu avec MOTHY de l'époque qui est toujours la version utilisée actuellement par Météo France dans les lagons de Nouvelle Calédonie. Plus de cible arrive sur l'îlot où l'enfant a été retrouvé. Cependant, le doute est permis entre savoir si l'amélioration est due aux courants injectés ou aux différents jeux de vents utilisés.

### 3.3.1.3. Cas de la plate dérivante, lagon Sud-Ouest

Le 15 juin 2015 à 21h47 UTC+11, heure locale (10h47 UTC+0) le MRCC reçoit un appel pour un bateau plat en aluminium de 3.80m dont le câble d'accélérateur ne fonctionne plus. Le bateau dérive depuis la position 166.719° E et 22.395 ° S, vers le canal de Woodin. Informée par le MRCC que l'intervention de sauvetage est payante, la personne refuse d'être récupérée et décide de se laisser dériver jusqu'à atteindre la terre. La personne reste en contact avec le MRCC de Nouméa indiquant régulièrement sa position. Finalement le lendemain matin le 16 juin 2015 vers 11h45 UTC+11 (15 juin 2015 00h45 UTC +0), après environ 14h de dérive, le bateau est arrivé près du wharf du Mont Dore.

Pour ce cas, nous avons utilisé les vents ALADIN, disponibles pour juin 2015. Les résultats de prévision sont présentés ci-dessous.

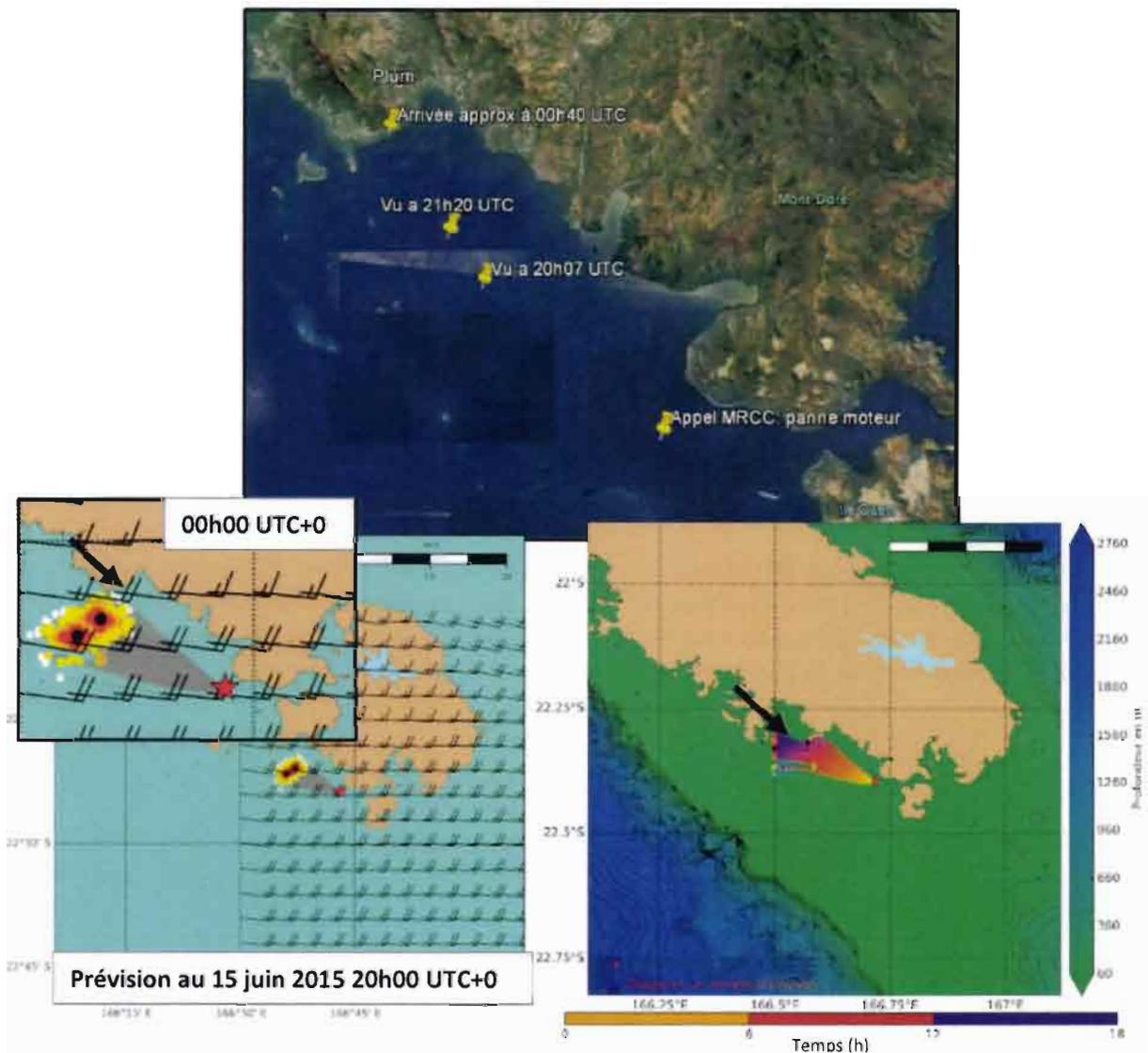


Figure 28. En haut, capture Google Earth situant les évènements et leurs chronologies. En bas à gauche, résultats de la prévision de dérive FVCOM-MOTHY-ALADIN au 15 juin 2015 20h00 UTC+0 et en zoom à 00h00 UTC+0. A droite, bilan au bout de 18 h de dérive. Les points sont colorés en fonction du temps depuis lequel elles ont été lâchées. La méthode LEEWAY de MOTHY a été utilisée afin de simuler la dérive d'un petit bateau.

Le résultat est cohérent avec les informations reportées par le MRCC. La trajectoire prédite est correcte et le bateau a bien atteint la côte environ 13h après le premier appel.

### 3.3.1.4. Cas de la dérive du voilier l'Eglantine

Dans la nuit du 8 juin 2015 (UTC+11, heure locale), il y a rupture de mouillage du voilier l'Eglantine situé dans le port Moselle près de Nouméa. Le voilier est retrouvé intact le matin du 9 juin 2015 (UTC+11) au large de la passe de Dumbéa à 11h. Cette nuit a été sujet à un fort régime d'alizés atteignant une intensité de 30 nœuds comme nous pouvons le voir sur les résultats obtenus en figure 28.

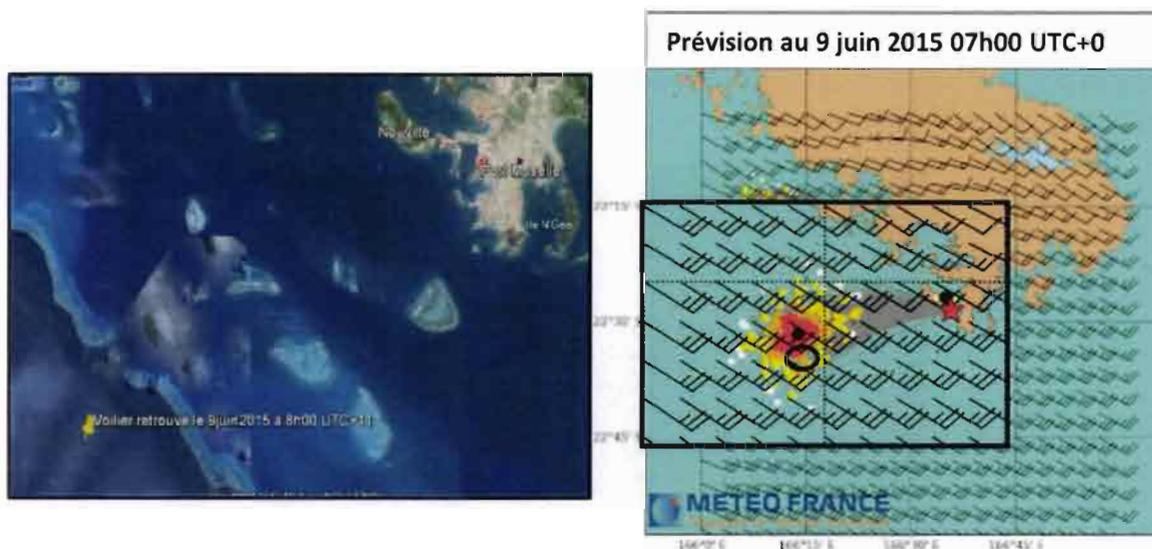


Figure 29. A gauche, capture Google Earth localisant la situation. Le voilier était amarré à Port Moselle et s'est détaché durant la nuit du 8 juin. Il a été retrouvé au large de la passe de Dumbéa. A droite, résultat de la prévision de dérive MOTHY-FVCOM avec un forçage en vent et radiations ALADIN. Le cercle noir représente la zone où le voilier a été retrouvé.

Les vents forts présents lors de cet événement ont été le principal moteur influençant la trajectoire suivie par le voilier dérivant. La fonction LEEWAY simulant un voilier a été utilisée pour la prévision. Nous pouvons voir qu'un grand nombre des 480 cibles lâchées dans MOTHY se dirigent vers la position été retrouvé (cercle noir). La prévision correspond bien à ce qui a été observé.

### 3.3.1.5. Cas des plongeurs dérivants, lagon Sud-Ouest

Le 26 décembre 2012 à 13h04 UTC +11 (2h04 UTC +0), des plongeurs ne sont pas revenus de leur plongée à la passe de Dumbéa. Ils sont signalés disparus au MRCC qui lance les recherches en mer. La position de départ donnée est à 166.255°E et 22.358°S. Ils sont retrouvés environ 5 heures plus tard au large de la passe à la position 166.177°E et 22.359°S.

Pour ce cas, nous avons utilisé les vents WRF. La prévision de dérive obtenue est présentée sur la figure 30.

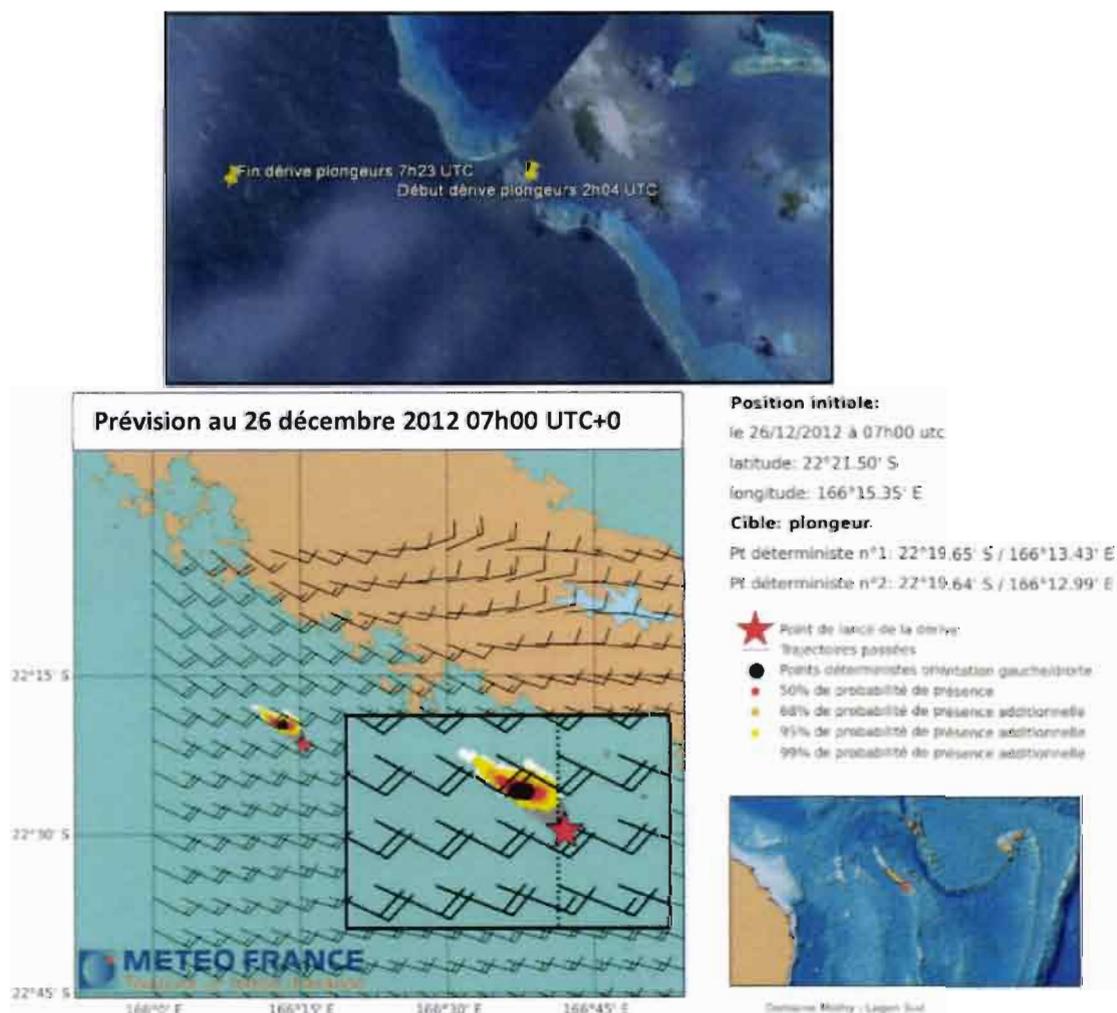


Figure 30. En haut, capture Google Earth situant la situation. En bas, résultat de la prévision au 26 décembre 2012 à 07h00 UTC+0 soit 5 heures après le lâcher. Le mode LEEWAY simulant une personne à la mer portant une combinaison de plongée a été utilisé.

Dans ce cas, les cibles dérivantes sont situées au niveau d'une passe et sont emportées à l'extérieur du lagon. Nous pouvons voir que les cibles dérivantes simulées sont emportées assez rapidement vers le Nord le long de la barrière. Cela témoigne du courant de bordure assez puissant se développant le long de l'extérieur de la barrière Ouest. C'est un des biais de notre modèle qui biaise la simulation de dérive de MOTHY. Les courants à l'extérieur du lagon et au niveau des passes sont moins bien reproduits par FVCOM que la circulation lagonaire intérieure petit fond.

### 3.3.1.6. Exercice fictif plan POLMAR

Dans le cadre d'un exercice de pollution maritime, Météo France a effectué une simulation de déversement de polluant le 30 novembre 2011 à 13h00 UTC+0. Un déversement de pétrole brut lourd de 930 kg/m<sup>3</sup> est simulé à la position de 164.601°E et 20.989°S. Nous avons récupéré l'archive et comparé le résultat obtenu avec MOTHY-MERCATOR-CEP et MOTHY-FVCOM-WRF. Le modèle météorologique est différent mais la figure 30 montre que les vents obtenus sont équivalents en intensité et direction, dans ce cas-ci.

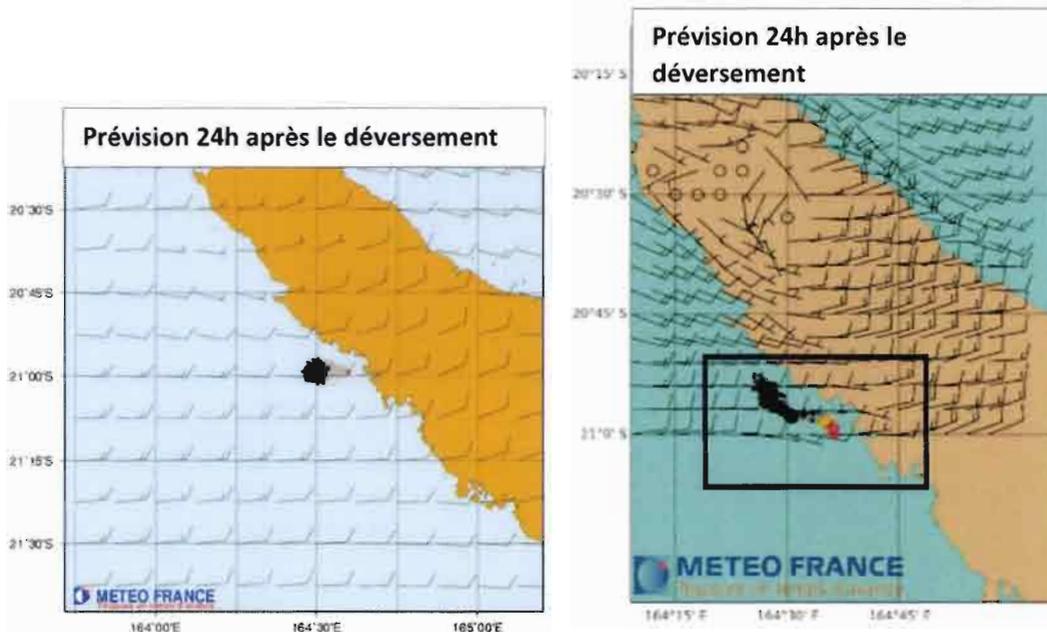


Figure 31. A gauche, prévision de dérive d'une nappe de pétrole brut lourd lâchée le 30 novembre depuis 24h dans le lagon Nord, résultat obtenu avec les courants de Mercator intégrés dans MOTHY. A droite, prévision de la même situation obtenue avec les courants haute résolution FVCOM intégrés dans MOTHY.



Figure 32. Résultat de la prévision MOTHY-FVCOM associé à Google Earth pour positionner le récif.

La dispersion de la nappe de pétrole simulée par MOTHY-FVCOM est différente de celle obtenue avec MOTHY-MERCATOR. En effet, sa forme a tendance à suivre la topographie comme le montre la figure 32. La nappe reste à l'intérieur du lagon et suit le récif. Au contraire, dans le cas MOTHY-MERCATOR la nappe s'étend vers le large. Le récif et la circulation lagonaire n'est pas correctement représentée.

### 3.3.2. Tests de sensibilité

#### 3.3.2.1 Sensibilité des prévisions à l'utilisation de FVCOM en mode barotrope sans grande échelle, avec la grande échelle et barocline

Dans la première partie de ce rapport portant sur la validation des courants FVCOM, nous avons étudié le courant total à la station ADCP Moise et tenté d'identifier les sources de variabilité du courant. Nous avons remarqué un ajout de variabilité lorsque nous rajoutions la grande échelle et un gradient de densité variable au modèle. Cependant, nous observons parfois une meilleure corrélation avec les observations que dans le cas barotrope marée+vent sans grande échelle mais pas systématiquement. Afin de mesurer l'influence de ces modes sur les courants et les prévisions de dérives, nous avons revisité le cas de la bouée 66574 lâchée dans la passe de la Sarcelle (*section 3.3.3.1. Cas des flotteurs*). En rejouant cette prévision en imposant des vents nuls dans MOTHY, nous avons pu vérifier que la prise au vent en surface n'a pas influencé la trajectoire de la bouée. Celle-ci a seulement été emportée par les courants (prenant en compte le forçage par le vent dans la simulation FVCOM) ce qui nous permet de bien observer l'influence des différents modes sur la variabilité du courant et donc la trajectoire de la cible dérivante.

Dans la section 3.3.3.1, nous avons utilisé FVCOM en mode barocline donc avec le vent, la stratification et la grande échelle. Le résultat obtenu est présenté sur la figure 16.

Nous avons relancé une seconde prévision avec les mêmes paramètres en utilisant les courants de la simulation FVCOM barotrope vent+marée et intégrant un forçage de grande échelle introduit par la condition d'élévation aux frontières ouvertes. Enfin une troisième utilise les résultats de FVCOM vent+marée sans forçage de grande échelle. Les résultats sont présentés sur la figure 33(a-b-c).

La prévision obtenue avec les courants FVCOM 3D barocline est très différente de celle obtenue avec les résultats de FVCOM 3D barotrope en négligeant ou en considérant le rôle du transport de grande échelle. En effet, les cibles parcourent deux fois moins de distance sur la même période dans le cas barotrope que dans le cas barocline, signe d'une intensification de la circulation lagonaire en présence d'un gradient de densité variable. Ce résultat confirme nos premières observations faites dans l'analyse des données ADCP de la station Moise (*section 2.3*).

En comparant le cas barotrope avec et sans grande échelle, nous pouvons isoler le rôle clé de l'influence du gradient d'élévation de grande échelle entre la côte Est et Ouest. En l'absence de ce forçage, les cibles décrivent certes un mouvement alternatif imposé par la marée mais avec pour effet une dispersion des cibles de part et d'autre de la passe de la Havannah (Fig. 33.c). En recréant un transport de la côte Est vers la côte Ouest introduit ici en jouant sur la condition d'élévation de grande échelle, l'ensemble des cibles se retrouvent advectées vers le centre du Lagon Sud-Ouest Est, en meilleur accord avec l'observation (Fig. 33.b).

Néanmoins, malgré l'intensification des courants signalés avec FVCOM en mode barocline, les trajectoires des cibles simulées sont dans l'ensemble plus en accord avec la trajectoire observée. En effet, les cibles se dispersent moins vers l'est de l'île Ouen.

Les mêmes tests ont été faits sur le cas de la bouée 13685 lâchée en avril 2007 à Taréti (*section 3.3.1.1*) dans une zone du lagon il n'y a pas d'effet de chenalisation comme dans la passe de la Sarcelle. Les résultats sont présentés sur la figure 33(d-e-f). Cette fois encore, nous notons une différence importante entre la prévision utilisant les courants barotrope sans grande échelle et barocline avec grande échelle. La prévision barocline avec la grande échelle correspond bien mieux aux observations en représentant bien la courbure de la trajectoire, de même que la vitesse de la dérive.

L'ajout de la grande échelle semble nécessaire pour représenter correctement la circulation lagonaire. La stratification ajoute aussi une part de variabilité qui permet d'obtenir une circulation proche de celle observable avec nos données.

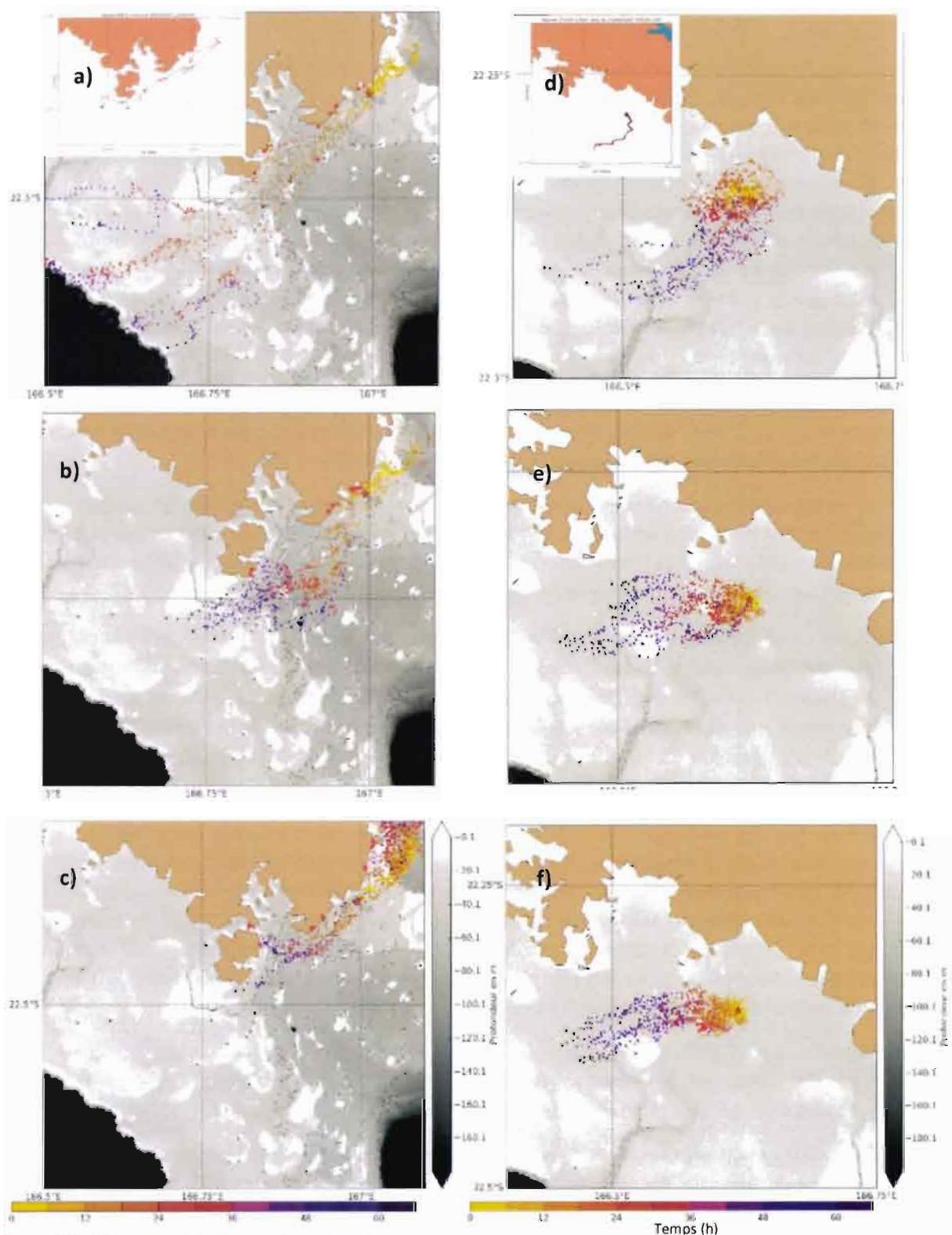


Figure 33. a) Prédiction obtenue avec le mode barocline dans le cas de la bouée 66574 Goro. En petit : observation. b) Prédiction obtenue avec le mode barotrope avec forçage grande échelle. c) Prédiction obtenue avec le mode barotrope sans grande échelle dans le cas bouée 13685 Porc Epic. d) Prédiction obtenue avec le mode barocline. En petit : observation. e) Prédiction obtenue avec le mode barotrope avec forçage grande échelle. f) Prédiction obtenue avec le mode barotrope sans grande échelle.

### 3.3.2.2. Sensibilité à la fréquence temporelle de rafraîchissement des courants FVCOM dans MOTHY

Cette partie présente les tests de sensibilité de MOTHY à la fréquence temporelle des courants injectés. Pour les tests de validation, nous avons utilisé une fréquence de rappel des courants de FVCOM de 20 minutes. Nous avons obtenues des résultats satisfaisants, cependant nous devons considérer que la taille du fichier des courants envoyé à Météo France Toulouse doit être limitée. Or si nous diminuons la fréquence de rappel des courants à 1h, nous divisons par trois la taille du fichier de base. Il ne faut toutefois pas que cela soit en dépit de la qualité des prévisions. Nous avons donc effectué les tests et comparer les résultats qui sont présentés sur la figure 34.

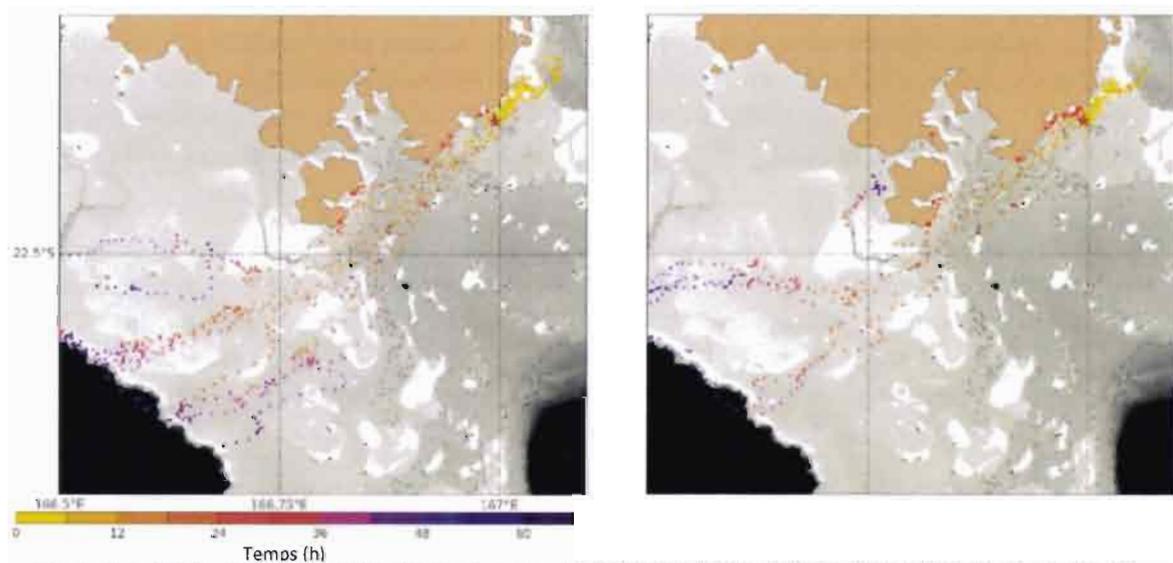


Figure 34. A gauche, bilan de la prévision obtenue avec une fréquence de rappel des courants FVCOM de 20 minutes. En échelle de gris en fond est représentée la bathymétrie haute résolution. A droite, bilan de la prévision avec les mêmes paramètres mais avec une fréquence de rappel d' 1 heure. Les particules sont colorées en fonction du temps depuis lequel elles ont été lâchées.

Nous pouvons voir une dispersion assez similaire cependant dans le cas d'un rappel horaire le nombre de particules s'échouant à la côte est plus important et certaines suivent des trajectoires plus chaotiques correspondant moins bien aux observations.

La fréquence de rafraîchissement de 20 minutes semble être un bon compromis entre qualité et taille du fichier. Un autre moyen de diminuer la taille du fichier est de diminuer la résolution de la grille spatiale des courants.

### 3.3 2.3. Sensibilité à la résolution spatiale des courants FVCOM intégrés dans FVCOM

Afin d'utiliser les courants FCOM dans MOTHY, nous les avons convertis sur une grille régulière au format de sortie HYCOM dont les outils de couplage avec MOTHY existent déjà. Les courants haute fréquence et haute résolution calculés en grille non structurée avec FVCOM sont interpolés sur une grille régulière dont nous définissons la résolution spatiale. La résolution choisie va influencer les prévisions de dérives et la taille du fichier de courant créé. Pour les tests de validation nous avons utilisé une grille d'environ 500 mètres de résolution. Nous avons testé l'influence d'une résolution de 100m, 1 km et 2 km pour le cas de la bouée 66574 lâchée à la passe de la Sarcelle. Les prévisions obtenues sont résumées sur la figure 35.

Entre la résolution de 100 m et 500 m, peu de différences sont remarquables. En effet, avec la résolution de 500 m, un peu plus de particules s'échouent dès les premières heures suivant le lâcher, cependant les trajectoires des autres particules continuant vers la barrière sont semblables à celles obtenues en utilisant la résolution de 100 m. La dispersion géographique des particules est quasi similaire dans les deux cas.

Par ailleurs, en relâchant encore la résolution de la grille, nous observons une dégradation des prévisions de dérive. En utilisant la résolution de 1 km, nous réduisons la dispersion géographique des particules aux abords de la barrière et donc éliminons une zone de dérive possible que des particules ont atteinte avec la résolution de 100 m. Enfin avec la résolution de 2 km, les trajectoires sont plus chaotiques et le courant inversé remontant vers le Nord près de la côte dès les premières heures de lâcher est moins bien reproduit.

Concernant la taille des fichiers, plus le pas de grille est grand, moins la résolution est bonne mais plus la taille du fichier est petite. Les tailles des fichiers de courants pour 72 heures interpolés sur une grille régulière avec les différentes résolutions testées sont résumées dans le tableau 6.

Résolution spatiale	Résolution temporelle	Taille du fichier
100 m	20 min	7 Go
500 m	20 min	349 Mo
500 m	1 h	117 Mo
1 km	20 min	88 Mo
2.2 km	20 min	18 Mo

Tableau 6. Taille des fichiers de courant FVCOM entre 22 et 23° S de latitude et 166.3 et 167.5 °E de longitudes interpolés sur grille régulière au format HYCOM.

La résolution de 500 m est la plus envisageable et à le meilleur rapport qualité de prévision et taille de fichier. Le fichier de résolution 100 m serait trop volumineux et ne répondrait pas au critère de taille de fichier à respecter. La taille du fichier de courant pour 48h sur 3 niveaux sur tout le domaine avec les paramètres sélectionnés est de 3.4 Go. Convertis et compressé en format grib, la taille peut être diminuée à 460 Mo.

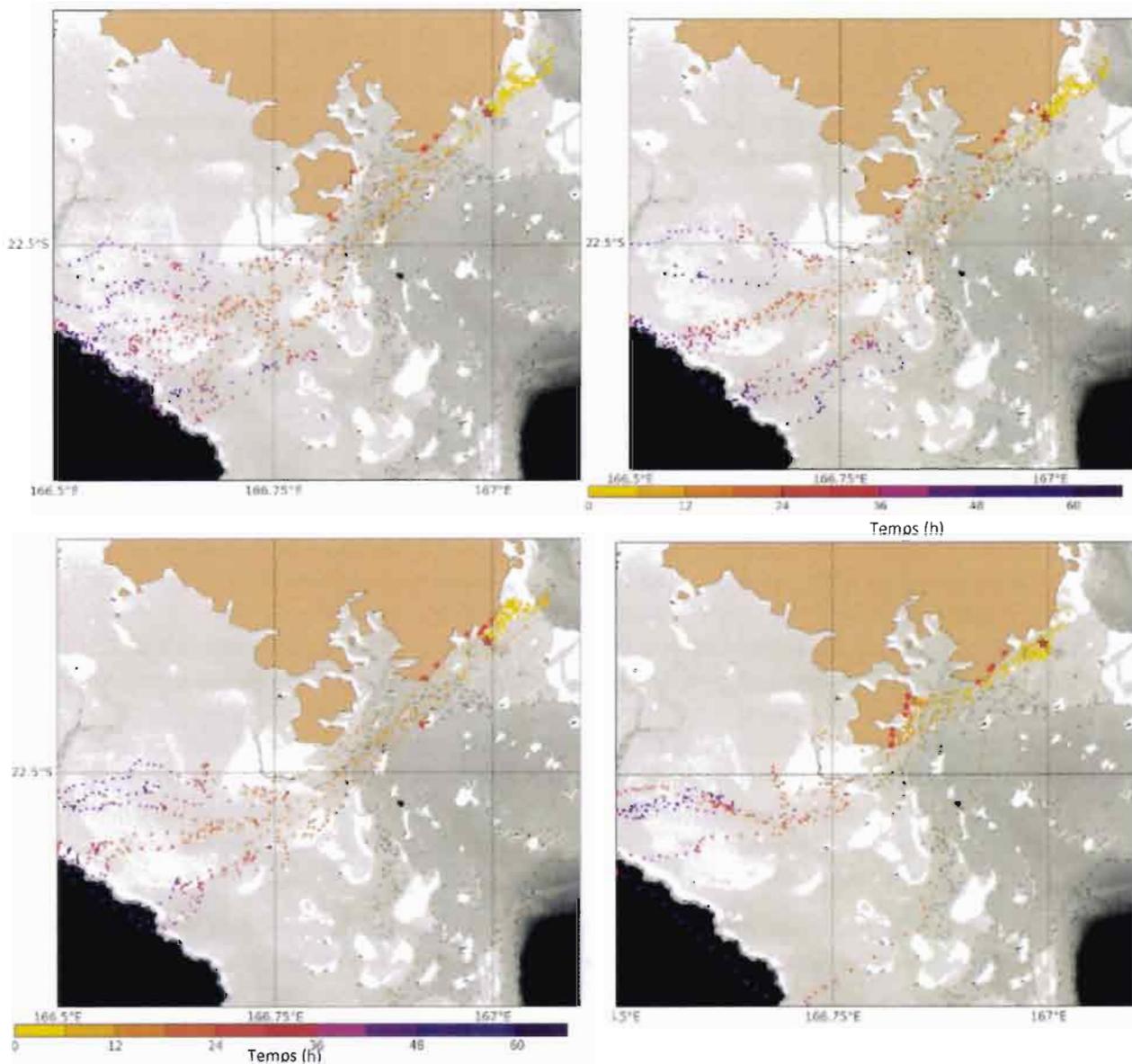


Figure 35. En haut à gauche, bilan de prévision obtenu avec des courants FVCOM ré interpolés sur une grille de 100m. En haut à droite, bilan de prévision obtenu avec une grille de résolution d'environ 500m. En bas, à gauche, une résolution de 1km a été utilisée. En bas, à droite, une résolution d'environ 2 km a été utilisée. Les particules sont colorées en fonction du temps (en heures) depuis lequel elles ont été lâchées.

## 4. Discussion

Nous avons réussi à représenter correctement la circulation hydrodynamique générale du lagon avec le modèle FVCOM. La distribution de la température de surface est proche de celle observée par satellite et les séries temporelles nous permettent de confirmer que nous reproduisons assez bien les variations saisonnières. Nous avons toutefois identifié des biais notamment le biais chaud au niveau de la passe de la Sarcelle et du canal de la Havannah et le biais froid en été et chaud en hiver sur les côtes Ouest et Est. Ces biais ont un ordre de grandeur raisonnable d'environ 1 degré Celsius. La comparaison avec les données GHRSSST moyennée nous laisse penser que la source de ces biais peut être le nudging avec le modèle OFAM. En effet, les frontières, où le rappel vers le système global est effectué, présentent les plus grands écarts de température de surface avec les observations GHRSSST. Il est donc envisagé de remplacer le modèle océanique global utilisé (OFAM) par les produits de MERCATOR océan. Par ailleurs, un raffinement du forçage en marée en utilisant ADCIRC dans TPXO 7.2 est aussi en cours de validation et permettrait d'avoir une meilleure précision de la marée près des côtes.

Concernant les sources de variabilité du courant, les observations de la station Moise ainsi que les tests effectués avec MOTHY, nous ont permis de montrer que l'utilisation de FVCOM en mode barotrope marée+vent ne suffit pas pour représenter la circulation hydrodynamique des lagons, au moins pour le lagon Sud-Ouest. Par contre, dès que le gradient d'élévation grande échelle est ajouté, une circulation plus en accord avec les résultats des modèles hydrodynamiques précédents (MARS 3D, P. Douillet et al., 2001) est obtenu. Enfin, en utilisant FVCOM en mode barocline en plus du rappel aux frontières vers les solutions OFAM/BLUElink, nous obtenons de résultats de dérive en assez bon accord avec les observations, traduisant une bonne représentation des courants lagonaires. La prise en compte de la variation du gradient de densité est donc à l'origine d'une variabilité supplémentaire des courants lagonaires qui n'est pas défavorable à la qualité des prévisions, même si on note une intensification des courants qu'il conviendra de limiter en jouant sur la qualité du forçage océanique (MERCATOR Océan en remplacement de OFAM/BLUElink par exemple).

Pour tenter de comprendre le phénomène que nous avons aussi noté sur la série temporelle du courant totale observée à la station Moise, nous avons effectué une analyse spectrale du courant total observé à Moise. Sur ce spectre présenté sur la figure 36, nous retrouvons bien le pic correspondant à l'onde K1 avec une période de 23.9 h soit une fréquence de 0.04 cycle par heure. Le pic correspondant à l'onde M2 est aussi visible à la fréquence de 0.08 c/h correspondant à une période de 12.4 h.

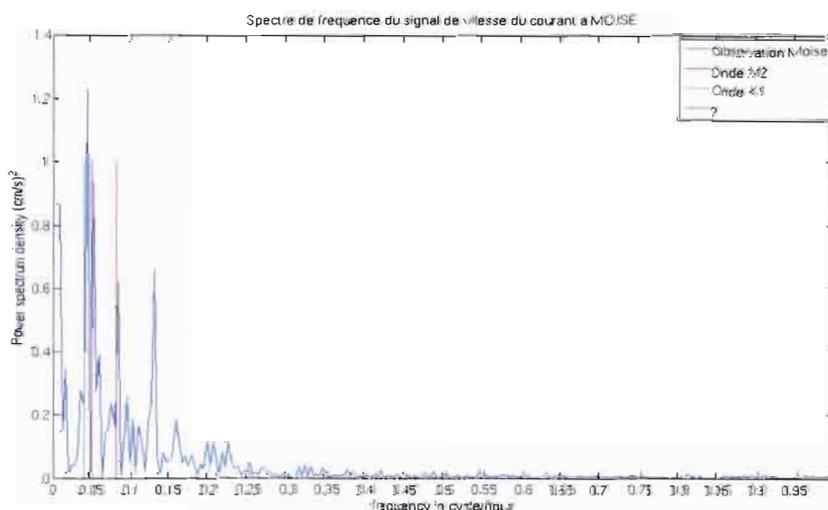


Figure 36. Analyse spectrale du signal de vitesse du courant total observé à la station ADCP Moise sur 2 semaines.

D'autres pics sont remarquables notamment celui à la fréquence de presque 0.05 c/h dont nous supposons être lié à une onde interne. En effet, sur la série temporelle du courant, nous observons des ondes présentent en période de relaxation des vents bien reproduites avec le mode barocline. Des investigations ultérieures seront réalisées pour cerner l'origine de ces ondes et leurs implications sur la circulation lagonaire.

Par ailleurs, en traçant les courants de surface moyennés sur 3 ans, nous obtenons des cartes de circulation résiduelle dans les lagons. La moyenne nous permet d'ôter la circulation liée à la marée. Les ellipses de marée ont été tracées à côté pour les mêmes régions. Celles-ci sont disponibles en annexe C. Nous pouvons remarquer que les vitesses maximales obtenues dans les lagons sont de l'ordre de  $30 \text{ cm.s}^{-1}$ . En comparaison, les courants le long des côtés extérieurs du lagon, où les pentes sont abruptes, atteignent des vitesses de  $1 \text{ m.s}^{-1}$ . En réalité, ces courants ne sont probablement pas aussi puissants comme nous avons pu le voir avec le cas des plongeurs dérivants au large en 2012 dans la section 3.3.1.5. Ces courants de bordure extérieurs importants que nous obtenons sont des artefacts dus au fort gradient de pente introduisant des erreurs dans les calculs du modèle FVCOM. Ce dernier est plus adapté au petit fonds comme à l'intérieur du lagon. Un effort supplémentaire sur le réglage du coefficient de viscosité dans ces zones pourrait possiblement contribuer à diminuer cet effet. L'utilisation d'un autre système de coordonnées verticale est aussi à l'étude, tout comme l'augmentation du nombre de niveaux et/ou un raffinement de la grille au droit du talus externe. La difficulté de notre région d'étude est la combinaison océan profond, barrière affleurante et lagon.

En étudiant les ellipses de marée, nous notons que l'intensité du courant de marée est plus importante dans les lagons Nord et Sud que dans les lagons le long des côtes Est et Ouest. Une bonne représentation de la marée garantit une bonne représentation des courants dans ces régions du Nord et du Sud. La circulation à l'intérieure de lagons Est et Ouest est quant à elle plus influencée par le vent et d'autres phénomènes tels les phénomènes grande échelle et la houle passant par-dessus le récif. En conséquence, l'utilisation du module de houle de FVCOM et un couplage avec WW3 est prévue pour la suite.

Les courants calculés par le modèle FVCOM ajusté à notre zone nous ont permis de reproduire correctement les trajectoires de diverses cibles dérivantes à différents endroits des lagons. Les prévisions sont cependant fortement dépendantes de la physique représentée dans FVCOM (barotrope versus barocline) mais aussi de la résolution de la grille sur laquelle les courants haute résolution FVCOM sont interpolés. De même, MOTHY propose un large choix d'objet dérivant dont le choix va influencer la trajectoire de la dérive principalement pour les cas d'objet ayant une forte prise au vent. Pour la suite, alors que FVCOM sera forcé par Mercator, ALADIN sera peut-être aussi remplacé par les sorties du modèle AROME de Météo France. Cela permettra peut-être encre d'améliorer la qualité des prévisions. La chaîne opérationnelle n'est à ce jour pas encore installée au siège de la DTSI mais fonctionne en interne à l'IRD pour une période de test. Concernant les caractéristiques des fichiers de courant à transférer au centre de Météo France de Toulouse notamment leur format (sur grille structurée ou non), la décision finale n'a pas encore été prise. Les tests entrepris ont permis de conclure qu'une résolution spatiale de 500 m est un bon compromis entre qualité des prévisions et taille du fichier et qu'une fréquence de rafraîchissement d'au moins 20 min est nécessaire pour obtenir l'intégralité des possibilités de dérives.

## Conclusion

L'objectif de ce stage était de contribuer à la mise en place du système opérationnel FVCOM-MOTHY-ALADIN proposée par l'IRD et Météo France.

L'ajustement et la validation du modèle de circulation océanique FVCOM s'est avérée être une part importante et fastidieuse mais nécessaire à l'obtention d'une bonne représentation de la circulation hydrodynamique des lagons de Nouvelle Calédonie. Nous sommes arrivés à la conclusion que la circulation est fortement liée à la marée, au vent mais aussi à une composante liée à la grande échelle et à la stratification. En effet, en ajoutant cette dernière, nous obtenons des courants de surface permettant de reproduire correctement des trajectoires de cibles observées. Les régions lagonaires plus étroites le long de la côte Est et Ouest, mais aussi le lagon Sud-Ouest semble les plus influencés par les phénomènes grandes échelles, les phénomènes internes au lagon liés à la stratification et la houle. Les lagons Nord et Sud sont plus influencés par la marée et les vents. Le modèle ajusté possède toutefois des biais que nous avons identifiés grâce à la distribution de la température de surface.

La chaîne opérationnelle mise en place est fortement inspirée des systèmes opérationnels du NOS en fonction aux Etats Unis depuis plusieurs années. Les scripts perl et fortran développés permettent d'effectuer automatiquement les différentes étapes nécessaires à la préparation des fichiers de forçages et des fichiers de conditions aux frontières. Le principe repose sur 2 simulations FVCOM par jour permettant d'obtenir des forecast sur 48h. Le forecast redémarrant à chaud d'un fichier Restart crée à l'issue d'une simulation en nowcast permettant de limiter la dérive du modèle. La chaîne n'est pas encore installée à la DTSI à ce jour mais est en essai au centre IRD de Nouméa.

Les courants haute résolution FVCOM calculés sur grille non structurée ont été testés avec le modèle de dérive MOTHY. Le rejoue d'une dizaine de situations de dérives localisées dans les lagons, nous ont permis de valider le couplage FVCOM-MOTHY-ALADIN à l'intérieur des lagons.

## Liste des figures

Figure 1. Situation de la Nouvelle Calédonie et sa bathymétrie avec une coupe bathymétrique au Nord (1) et au Sud (2).....	7
Figure 2. En haut : Présentation schématique de la circulation océanique dans le Pacifique Sud-Ouest. Les flèches bleues représentent les branches du Courant Equatorial Sud (SEC). Son intensité est maximale autour de 200 m de profondeur. Les flèches rouges représentent les branches du courant Est Australien (EAC) et du courant subtropical antihoraire. Ils ont une intensité maximale à environ 50 m de profondeur. En bas : Zoom de la circulation autour de la Nouvelle Calédonie. Les courants côtiers notables le long de la barrière sont le courant d'Alis sur la côte Ouest et le courant de Vauban sur la côte Est. Le transport d'Ekman est représenté à droite par une flèche sur la gauche du régime moyen des alizés soufflant parallèlement à la Grande Terre. Les upwellings et les downwellings sont aussi représentés.(Marchesiello, Lefèvre, Vega, Couvelard, & Menkes, 2010) .....	8
Figure 3. Trafic maritime autour de la Nouvelle Calédonie. Source : MRCC de Nouméa.....	9
Figure 4. Risques de pollution maritime en Nouvelle Calédonie. Source : MRCC de Nouméa.....	10
Figure 5. Grille non structurée de 65 206 points (nœuds de calculs) (J.Lefèvre). La résolution peut atteindre 50 m près des côtes. Cette grille peut être utilisée dans ROMS, ADCIRC, FVCOM, et autres modèles.....	11
Figure 6. Les différents modules du modèle FVCOM (C Chen, 2010).....	13
Figure 7. Principe de fonctionnement du modèle de dérive MOTHY de Météo France.....	13
Figure 8. Exemple de prévision de dérive de nappe en baie de Gatope (Commune de Voh) réalisée dans le cadre de l'exercice POLMAR 2009. Prévision employant ADCIRC 2D sur la grille 65206 nœuds (J. Lefèvre) .....	14
Figure 9. Carte des RMSE (en cm) sur le signal de marée en élévation de la composante M2 et situation des stations sélectionnées pour l'étude. En rouge, RMSE supérieur à 4 cm, en jaune supérieur à 2cm, en vert inférieur à 2 cm.....	19
Figure 10. Carte de co-amplitudes et phases pour la composante M2 obtenue avec la grille « récif » .(forçage de marée créé à partir de TPXO7.2) . L'amplitude est en cm et la phase en degrés Greenwich.....	20
Figure 11. Carte de co-amplitudes et phases pour la composante K1 obtenue avec la grille « récif » .(forçage de marée créé à partir de TPXO7.2) . L'amplitude est en cm et la phase en degrés Greenwich.....	21
Figure 12. a) Carte des observations de courants étudiées. b) Carte du SEMA (Semi Major Axis) de l'ellipse de marée de la composante M2 , obtenue avec la grille récif. Cela correspond au courant maximal de marée en cm.s-1. c) Ellipses de marée de la composante M2 obtenues avec la grille « lisse » à la station Moise à gauche et au niveau de la passe de la Sarcelle à droite. Les observations sont tracées en noir et le résultat de FVCOM en rouge. d) Les mêmes ellipses obtenues avec la grille « récif ». e)Les mêmes ellipses obtenues avec la grille « mur ».....	23
Figure 13. A gauche, énergie cinétique turbulente ( $q_2$ en $m^2/s^2$ ) en fonction de la profondeur ( $z$ en m) à la station T16B à un temps donné durant la marée montante. La courbe bleu est le résultat obtenu	

avec une longueur de rugosité  $z_0$  de 3 mm et la courbe rouge avec  $z_0$  égal à 1 cm. A droite, le vent a été rajouté en surface durant la simulation.....24

Figure 14. Profil vertical de l'axe semi majeur de l'ellipse de marée de la composante M2 en fonction de la profondeur à la station T16B située dans le Sud, au niveau de la passe de la Sarcelle. Les observations sont en noir. Les profondeurs de l'observation et du modèle sont différentes, à gauche l'axe des profondeurs est celui du modèle, à droite celui des observations. Les données de courants observées en surface ont été supprimées car elles étaient biaisées.....25

Figure 15. Module de la vitesse moyenne dans la colonne d'eau en  $\text{cm.s}^{-1}$  à la station ADCP MOISE. En noir, les observations du courant total moyenné entre 0 et 6m. En vert, courant total prédit par la simulation barotrope sans forçage par le vent et sans grande échelle. En bleu, courant total prédit par le modèle barotrope avec l'ajout du forçage par le vent en surface. En rouge, courant total prédit par le modèle en mode barocline avec rappel aux frontières, prise en compte de la grande échelle et stratification. Dans le carré 1, le modèle barocline ne reproduit pas correctement les observations. Dans le carré 2, le modèle barocline est le seul à reproduire la variabilité du courant observé.....27

Figure 16. Profil vertical du SEMA à la station T16B, les résultats obtenus avec la simulation barocline sont en vert.....29

Figure 17. a) Température de surface prédite par le modèle en mode barocline pour le 8 juillet 2011 avec une distance de nudging avec le modèle OFAM de 5. Km et une zone de tampon de 50 km. Le coefficient de viscosité varie linéairement dans le domaine de 5 à 0.05 vers l'intérieur. b) Image de température de surface observée par satellite avec MODIS le 8 juillet 2011. c) A gauche, coefficient de viscosité et grille utilisés pour le cas nudging sur 50 km avec une zone tampon de 50 km. A droite, température de surface prédite avec la configuration de gauche. d) A gauche, coefficient de viscosité et grille utilisés pour le cas de nudging sur 1 rangée d'élément et une zone tampon de 35 km. A droite, température de surface prédite avec la configuration de gauche. Les courants sont importants, des biais froids apparaissent. e) A gauche, configuration stable retenue avec une grille modifiée, un nudging et une zone tampon de 35km. A droite, le résultat prédit pour le 8 juillet 2011.....31

Figure 18. A gauche, résultats de température de surface obtenus avec la simulation barocline longue de FVCOM. Les points noirs représentent les nœuds frontières. Les flèches représentent le courant de surface. A droite, les images MODIS de température de surface (SST) aux dates correspondantes....33

Figure 19. En haut, carte situant les stations avec les capteurs de température dont les séries temporelles sont présentées à la suite. a) Iles Surprise, capteur à 16 m de profondeur. b) Poindimié à 12m. c) Bourail à 4 m. d) Ilot Maitre à 3.5 m. e) Uitoé à 60 m. f) Goro à 11 m.....34

Figure 20. A gauche, température de surface ( $^{\circ}\text{C}$ ) moyenne de 2012 à 2014 calculée à partir du résultat de la simulation longue FVCOM sur la grille de 56 000 points. A droite, température moyenne sur la même période issue des données de SST de qualité du GHRSSST. Les nœuds frontières de notre grille sont représentés par des points noirs.....35

Figure 21. Déroulement temporel du système opérationnel FVCOM .....37

Figure 22. Fonctionnement du système opérationnel FVCOM-MOTHY-ALADIN.....38

Figure 23. Architecture des dossiers de la chaîne opérationnelle.....41

Figure 24. Simulation du cas de la bouée 66574 lâchée en surface dans le canal de la Havannah en février 2007. En haut, à gauche, trajectoire de la bouée observée entre le 16 février 2007 22h38 et le

19 février 2007 18h46 UTC+0. A droite, résultat de la prévision MOTHY couplé avec les courants FVCOM au 19 février 2007 18h00 UTC+0 pour 20 particules lâchées le 16 février 2007 à 22h38. En bas, à gauche, même résultat avec un plan plus large. Les vents sont tracés, ils ont une intensité d'environ 20 nœuds et viennent du Sud Est. Les carrés rouges représentent les particules échouées. A droite, bilan de la simulation MOTHY sur 72h après l'heure du lâcher. La position des particules est colorée en fonction du temps en heures depuis lequel elles dérivent. La flèche noire indique la dernière position observée de la bouée.....43

Figure 25. Simulation du cas de la bouée 13685 lâchée à 10m dans le canal de la Havannah en février 2007. En haut, à gauche, trajectoire de la bouée observée entre le 16 février 2007 22h00 et le 19 février 2007 18h46 UTC+0. A droite, résultat de la prévision MOTHY couplé avec les courants FVCOM au 19 février 2007 18h00 UTC+0 pour 20 particules lâchées le 16 février 2007 à 22h38. En bas, à gauche, même résultat avec un plan plus large. A droite, bilan de la simulation MOTHY sur 72h après l'heure du lâcher. La position des particules est colorée en fonction du temps en heures depuis lequel elles dérivent. La flèche noire indique la dernière position observée de la bouée.....44

Figure 26. Simulation du cas de la bouée 13685 lâchée à Tareti en avril 2007. En haut, à gauche et à droite, trajectoires des bouées 13685 et 25020 observées entre le 23 avril 2007 05h00 et le 26 avril 2007 20h00 UTC+0. En bas à gauche, résultat de la prévision MOTHY couplé avec les courants FVCOM au 26 avril 2007 19h00 UTC+0 pour 20 particules lâchées le 23 avril 2007 à 5h00. En bas, à droite, bilan de la simulation MOTHY sur 72h après l'heure du lâcher.....45

Figure 27. En haut, capture Google Earth situant les évènements. En bas à gauche, résultat de la simulation MOTHY-Mercator-ALADIN (24 h après le lâcher) faite par Météo France à l'époque des faits. En bas à droite, résultat de la simulation MOTHY-FVCOM-WRF 24h après le lâcher au même endroit et à la même heure. Dans les 2 cas, le mode LEEWAY de MOTHY a été utilisé, permettant de simuler la probabilité initiale du bateau à dériver à droite ou à gauche. ....46

Figure 28. En haut, capture Google Earth situant les évènements et leurs chronologies. En bas à gauche, résultats de la prévision de dérive FVCOM-MOTHY-ALADIN au 15 juin 2015 20h00 UTC+0 et en zoom à 00h00 UTC+0. A droite, bilan au bout de 18 h de dérive. Les points sont colorés en fonction du temps depuis lequel elles ont été lâchées. La méthode LEEWAY de MOTHY a été utilisée afin de simuler la dérive d'un petit bateau.....47

Figure 29. A gauche, capture Google Earth localisant la situation. Le voilier était amarré à Port Moselle et s'est détaché durant la nuit du 8 juin. Il a été retrouvé au large de la passe de Dumbéa. A droite, résultat de la prévision de dérive MOTHY-FVCOM avec un forçage en vent et radiations ALADIN . Le cercle noir représente la zone où le voilier a été retrouvé.....48

Figure 30. En haut, capture Google Earth situant la situation. En bas, résultat de la prévision au 26 décembre 2012 à 07h00 UTC+0 soit 5 heures après le lâcher. Le mode LEEWAY simulant une personne à la mer portant une combinaison de plongée a été utilisé.....49

Figure 31. A gauche, prévision de dérive d'une nappe de pétrole brut lourd lâchée le 30 novembre depuis 24h dans le lagon Nord, résultat obtenu avec les courants de Mercator intégrés dans MOTHY. A droite, prévision de la même situation obtenue avec les courants haute résolution FVCOM intégrés dans MOTHY. ....50

Figure 32. Résultat de la prévision MOTHY-FVCOM associé à Google Earth pour positionner le récif.....50

Figure 33. a) Prévion obtenue avec le mode barocline dans le cas de la bouée 66574 Goro. En petit : observation. b) Prévion obtenue avec le mode barotrope avec forçage grande échelle. c) Prévion obtenue avec le mode barotrope sans grande échelle dans le cas bouée 13685 Porc Epic. d) Prévion obtenue avec le mode barocline. En petit : observation. e) Prévion obtenue avec le mode barotrope avec forçage grande échelle. f) Prévion obtenue avec le mode barotrope sans grande échelle.....52

Figure 34. A gauche, bilan de la prévion obtenue avec une fréquence de rappel des courants FCOM de 20 minutes. En échelle de gris en fond est représentée la bathymétrie haute résolution. A droite, bilan de la prévion avec les mêmes paramètres mais avec une fréquence de rappel d' 1 heure. Les particules sont colorées en fonction du temps depuis lequel elles ont été lâchées.....53

Figure 35. En haut à gauche, bilan de prévion obtenu avec des courants FVCOM ré interpolés sur une grille de 100m. En haut à droite, bilan de prévion obtenu avec une grille de résolution d'environ 500m. En bas, à gauche, une résolution de 1km a été utilisée. En bas, à droite, une résolution d'environ 2 km a été utilisée. Les particules sont colorées en fonction du temps (en heures) depuis lequel elles ont été lâchées.....55

Figure 36. Analyse spectrale du signal de vitesse du courant total observé à la station ADCP Moise sur 2 semaines.....56

## Liste des tableaux

Tableau 1. Tableau des coordonnées des stations choisis pour l'analyse de la marée.....	17
Tableau 2. Tableau des valeurs de RMSE (cm) pour les composantes M2, K1 et S2 sur les 6 stations pour chaque bathymétrie utilisée. ....	20
Tableau 3. Comparaison des amplitudes et phases des composantes M2, K1 et S2 obtenues par FVCOM (grille "récif") forcé avec TPXO7.2 et les meilleurs résultats obtenus avec ADCIRC 2D forcé par TPXO6.0.....	21
Tableau 4. Résultats des analyses harmoniques faites sur l'élévation à la station indiquée obtenue par une simulation FVCOM avec une longueur de rugosité de 3mm et 1 cm.....	26
Tableau 5. Tableau du temps de calculs pour une simulation sur 48h en fonction du nombre de processeurs utilisés.....	42
Tableau 6. Taille des fichiers de courant FVCOM entre 22 et 23° S de latitude et 166.3 et 167.5 °E de longitudes interpolés sur grille régulière au format HYCOM. ....	54

## Liste des abréviations

<b>IRD</b>	Institut pour la Recherche et le Développement
<b>FVCOM</b>	Finite Volume Coastal Ocean Model – Modèle communautaire de circulation océanique côtière à volumes finis en grille non structurée résolvant les équations primitives de Navier-Stokes développé par l'Université de Massachusetts (Dartmouth) et l'Institut Océanographique de Woods Hole. (Leader : Changsheng Chen, Site Web : <a href="http://www.fvcom.smast.umassd.edu/">http://www.fvcom.smast.umassd.edu/</a> )
<b>MOTHY</b>	Modèle Océanique de Transport des Hydrocarbures développé par Météo-France (Leader : Pierre Daniel)
<b>ADCIRC</b>	Advanced CIRculation model – Modèle de circulation en éléments finis à grille non structurée adapté aux eaux peu profondes reposant sur les équations de Barré Saint-Venant (Développeurs : Rick Luetlich et Joannes Westerink, Site web : <a href="http://www.adcirc.org/">http://www.adcirc.org/</a> )
<b>ROMS</b>	Regional Ocean Modeling System, modèle communautaire de circulation océanique régionale et côtier résolvant les équations primitives de Navier-Stokes en différences finies (Sites web : <a href="http://www.myroms.org/">http://www.myroms.org/</a> et <a href="http://www.romsagrif.org/">http://www.romsagrif.org</a> )
<b>MRCC</b>	Maritime Rescue Coordination Center - Centre de Coordination de Sauvetage en Mer (équivalent du CROSS métropolitain)
<b>CNPM</b>	Centre National de Prévisions Marines
<b>POLMAR</b>	plan d'Intervention de lutte contre la Pollution marine accidentelle déclenché par le Préfet
<b>IFREMER</b>	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
<b>WRF</b>	Weather Research and Forecast Model – Modèle atmosphérique développé par la communauté scientifique pour la recherche et la prévision météorologique (Site web : <a href="http://wrf-model.org/">wrf-model.org</a> )
<b>MERCATOR océan</b>	Centre français d'analyses et de prévisions océanique
<b>OFAM / BlueLink</b>	Ocean Forecasting Australia Model – Modèle de prévision océanique australien développé avec Bluelink (Site web : <a href="http://wp.csiro.au/bluelink/global/ofam/">http://wp.csiro.au/bluelink/global/ofam/</a> )
<b>DTSI</b>	Direction des Technologies et Services de l'Information (Etablissement publique de la Nouvelle-Calédonie)
<b>ADCP</b>	Acoustic Doppler Current Profiler – appareil de mesure acoustique du profil de courant
<b>SEMA</b>	Semi Major Axis – Axe semi majeur de l'ellipse de marée

<b>NOS - NOAA</b>	National Ocean Service - National Oceanic and Atmospheric Administration - Service océanographique national des Etats-Unis développant plusieurs systèmes océanographiques opérationnels.
<b>SST</b>	Sea Surface Temperature – Température de surface de l’océan
<b>GHR SST</b>	Group for High Resolution SST – Groupe international fournissant des données SST traitées et validées avec des observations in situ.
<b>UNESCO</b>	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization - Organisation des Nations unies pour l’éducation, la science et la culture
<b>WW3</b>	WaveWatch 3 – Modèle de vagues

## ANNEXE A

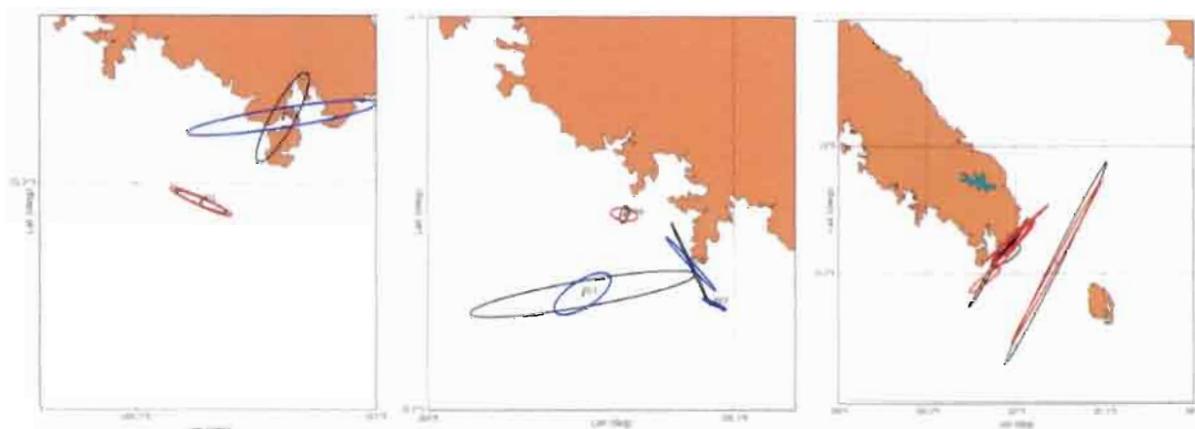
Amplitudes et phases des composantes M2 et K1 calculées par analyse harmonique aux 6 stations présentées.

M2	Observations		Grille « lisse »		Grille « récif »		Grille « mur »	
	Amp	Phase	Amp	Phase	Amp	Phase	Amp	Phase
Stations								
Nouméa	40,9	270	39,5	274	39,6	273	39,8	288
Hienghène	34,4	217	34,2	216	34,2	215	34,2	276
Lifou	37,7	214	37,5	215	37,6	215	37,6	24,9
Ouiné	35,7	220	36,5	219	36,5	219	36,5	272
Thio	36,7	214	36,3	217	36,1	217	36,3	20,6
Poingam	34,9	241	33,5	232	33,1	235	34,9	133

K1	Observations		Grille « lisse »		Grille « récif »		Grille « mur »	
	Amp	Phase	Amp	Phase	Amp	Phase	Amp	Phase
Stations								
Nouméa	13,9	27,5	14,1	24,6	14,3	24,7	14,3	212,5
Hienghène	16,8	32,0	17,2	29,8	17,4	30,5	17,2	226,2
Lifou	15,7	37,4	15,5	29,8	15,4	30,2	15,4	30,2
Ouiné	14,7	28,5	15,5	26,5	15,5	26,5	15,5	199,2
Thio	16,2	28,3	16,0	27,3	16,2	28,2	16,1	29,1
Poingam	18,9	39,5	17,8	33,6	18,2	34,4	19,2	98,4

## ANNEXE B

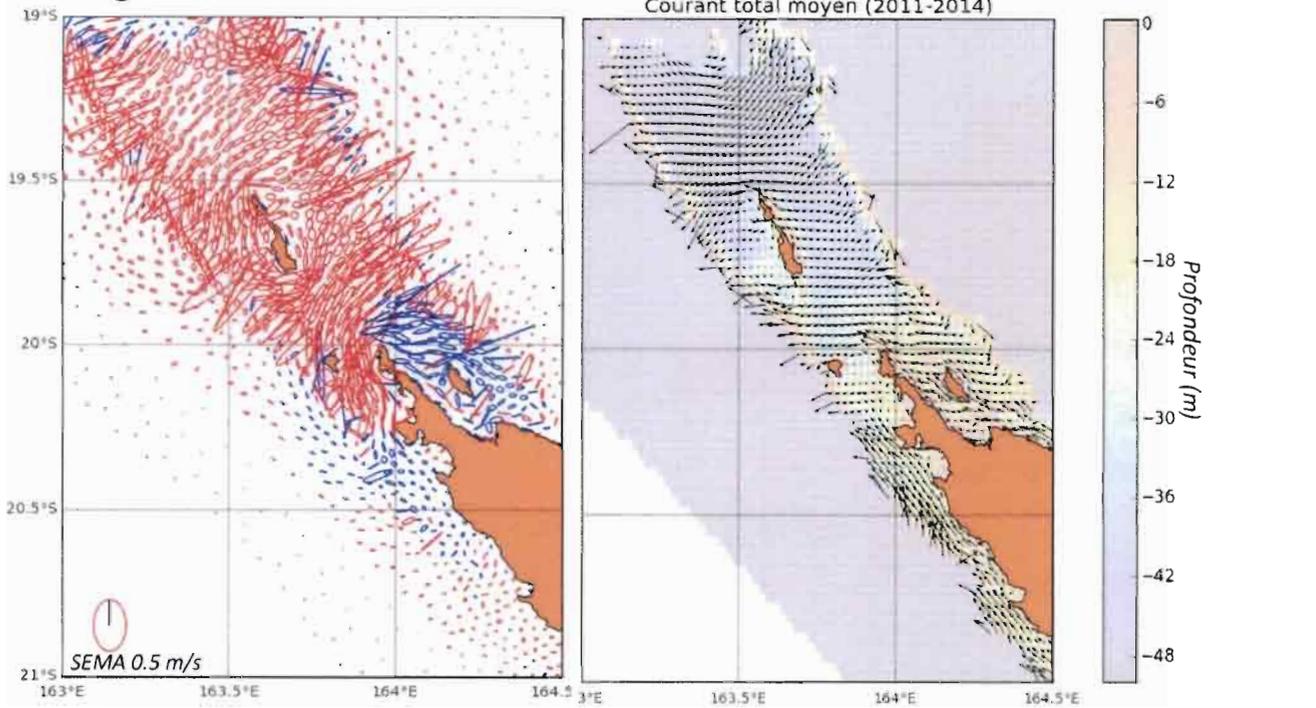
Les ellipses de marée de la composante M2 obtenues avec la simulation longue, la solution globale TPXO a été utilisée près des côtes.



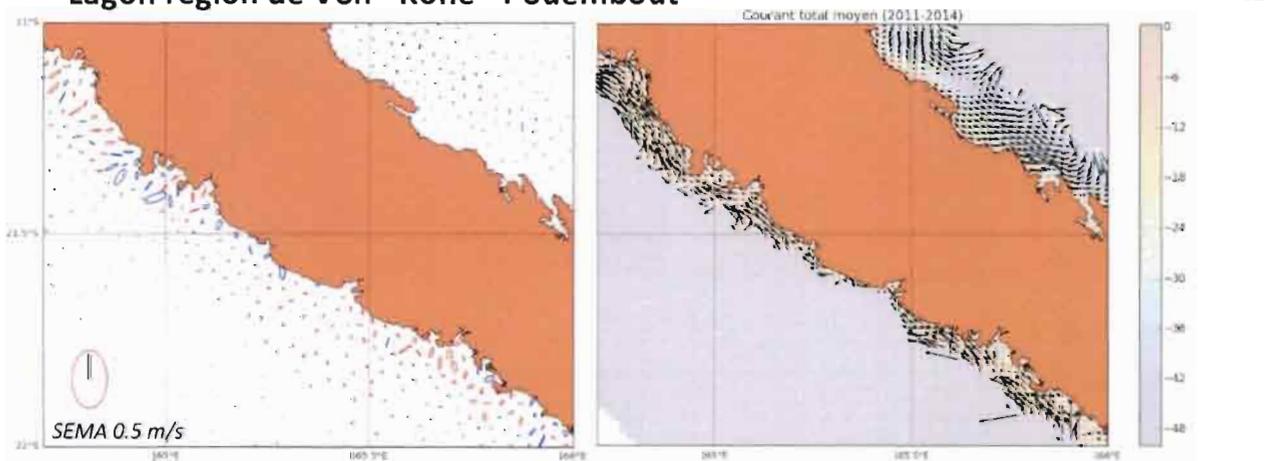
Ellipses de marée tracées aux stations Moise, M13, M19, M15, M02 et dans les passes de la Sarcelle et de la Havannah, obtenue avec la solution retenue.

## ANNEXE C

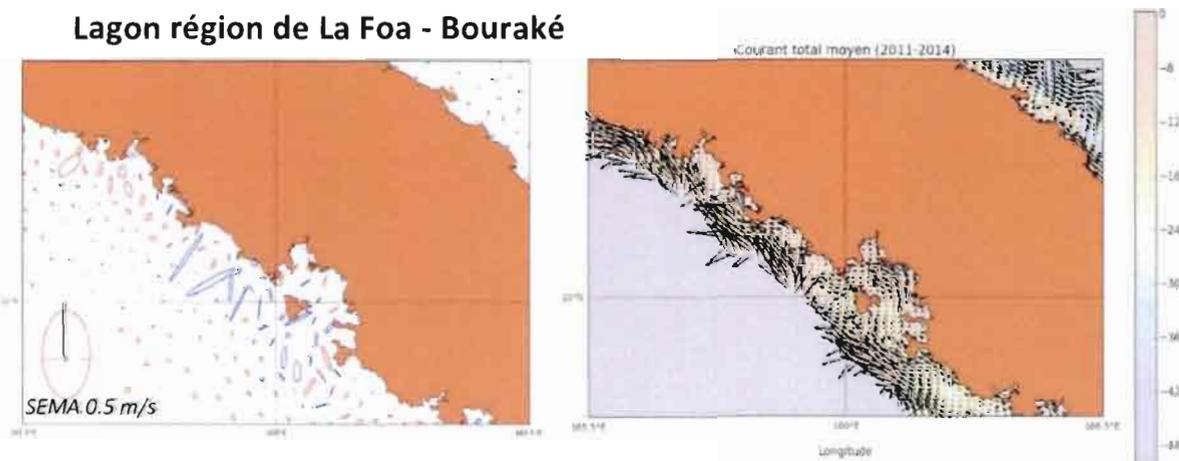
### Lagon Nord



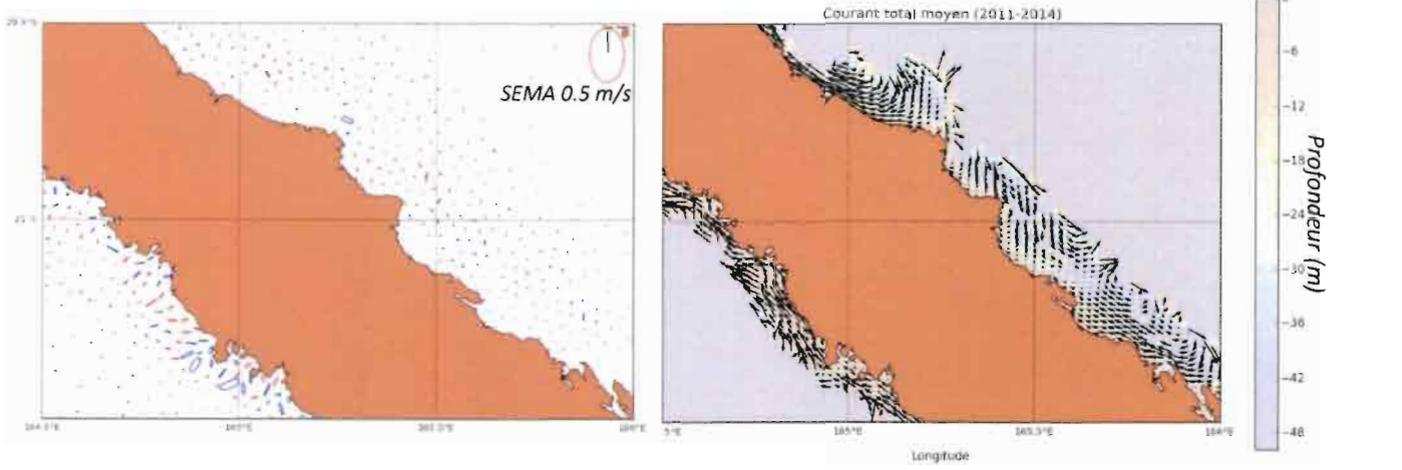
### Lagon région de Voh -Koné - Pouembout



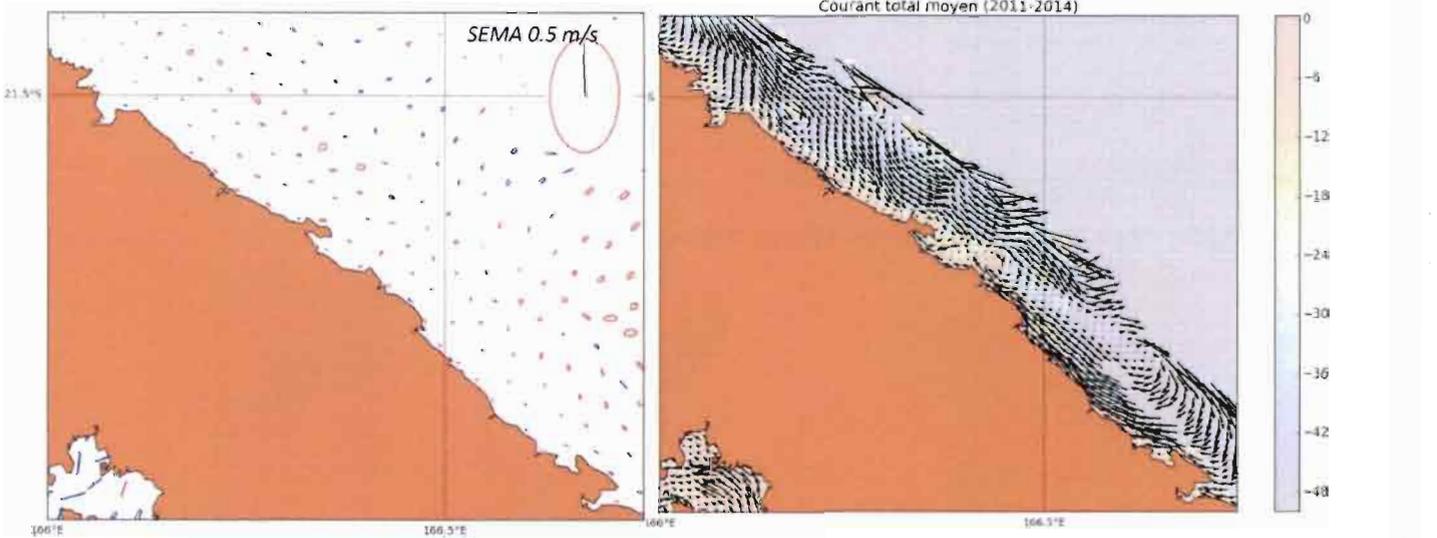
### Lagon région de La Foa - Bouraké



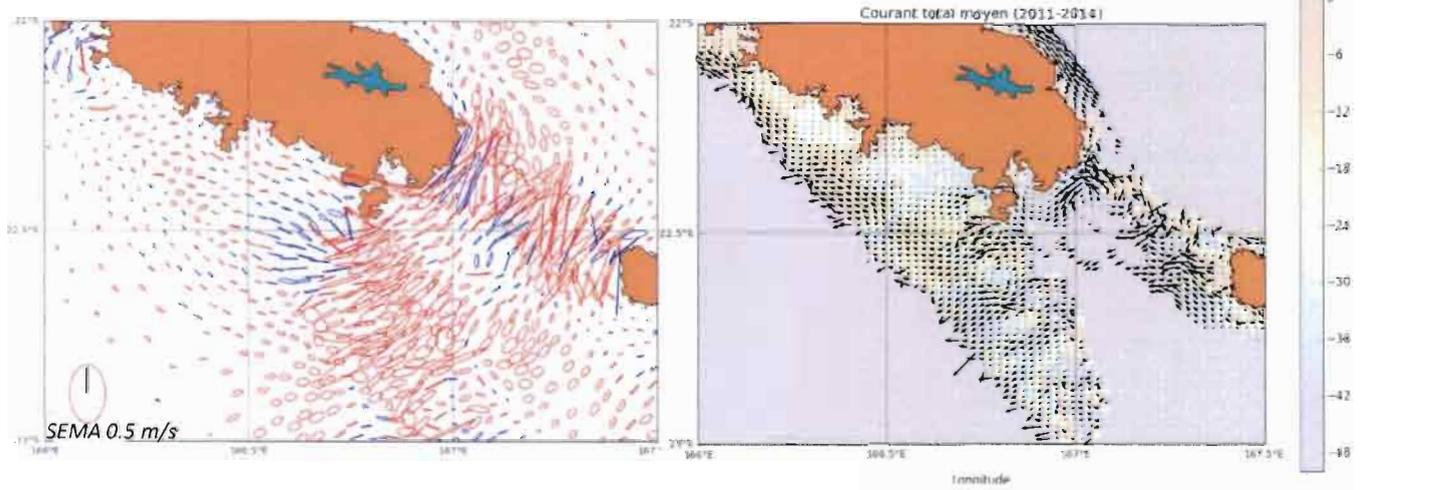
### Lagon région de Hienghène -Touho



### Lagon région de Thio



### Lagon Sud



## Bibliographie

- Charria, G., & Repecaud, M. (2014). PREVIMER: A contribution to in situ coastal observing systems. *Mercator Ocean- Quaterly Newsletter*, 49, 9–20. Retrieved from <http://archimer.ifremer.fr/doc/00197/30785/>
- Chen, C., Beardsley, R. C., & Cowles, G. W. (2006). An unstructured-grid, finite-volume coastal ocean model (FVCOM) system. *Oceanography*, 19(1), 78–89. <http://doi.org/10.5670/oceanog.2006.92>
- Chen, X., Liu, C., O'Driscoll, K., Mayer, B., Su, J., & Pohlmann, T. (2013). On the nudging terms at open boundaries in regional ocean models. *Ocean Modelling*, 66, 14–25. <http://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.02.006>
- Chen, C, Beardsley, R.C, et al. (2011). Community Ocean Model FVCOM User Manual ( 3rd edition ), *SMASST/UMAS*.
- Cravatte, S., Kestenare, E., Eldin, G., Ganachaud, A., Lefèvre, J., Marin, F., ... Aucan, J. (2015). Regional circulation around New Caledonia from two decades of observations. *Journal of Marine Systems*, 148, 249–271. <http://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2015.03.004>
- Daniel, P. (1996). Oil spill drift forecast and operational oceanography systems. In *Meteo-France* (pp. 1–10).
- Daniel, P., Varlamov, S., & Dandin, P. (2006). Impact of operational ocean forecasting on improvement of oil spill drift modelling in Météo France. *World Maritime Technology Conference*. Retrieved from <http://www.meteorologie.eu.org/mohty/references/wmtc2006.pdf>
- Douillet, P. (1998). Tidal dynamics of the south-west lagoon of New Caledonia: observations and 2D numerical modelling. *Oceanologica Acta*, 21(1), 69–79. [http://doi.org/10.1016/S0399-1784\(98\)80050-9](http://doi.org/10.1016/S0399-1784(98)80050-9)
- Douillet, P., Ouillon, S., & Cordier, E. (2001). A numerical model for fine suspended sediment transport in the southwest lagoon of New Caledonia. *Coral Reefs*, 20(4), 361–372. <http://doi.org/10.1007/s00338-001-0193-6>
- Fuchs, R., Pinazo, C., Douillet, P., Fraysse, M., Grenz, C., Mangin, a., & Dupouy, C. (2013). Modelling ocean-lagoon interaction during upwelling processes in the South West of New Caledonia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 135, 5–17. <http://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.03.009>
- Lefèvre, J., Marchesiello, P., Jourdain, N. C., Menkes, C., & Leroy, A. (2010). Weather regimes and orographic circulation around New Caledonia. *Marine Pollution Bulletin*, 61(7-12), 413–431. <http://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.06.012>
- Lerczak, J. a. (2003). Observations of the semidiurnal internal tide on the southern California slope and shelf. *Journal of Geophysical Research*, 108(C3), 1–13. <http://doi.org/10.1029/2001JC001128>
- Marchesiello, P., Marchesiello, P., Penven, P., Penven, P., Debreu, L., Debreu, L., ... Dewitte, B. (2008). Keys to affordable regional marine forecast systems. *Mercator Ocean Quarterly Newsletter*, 38–48.
- McDonald, C. B., Koseff, J. R., & Monismith, S. G. (2006). Effects of the depth to coral height ratio on drag coefficients for unidirectional flow over coral. *Limnology and Oceanography*, 51(3), 1294–1301. <http://doi.org/10.4319/lo.2006.51.3.1294>
- Ouillon, S., Douillet, P., Fichez, R., & Panché, J. Y. (2005). Amplification des variations régionales en salinité et température dans un lagon de Nouvelle-Calédonie. *Comptes Rendus - Geoscience*, 337(16), 1509–1517. <http://doi.org/10.1016/j.crte.2005.08.005>

- Peng, M., Jr., R., Zhang, A., & Iii, F. (2014). Towards the Development of the National Ocean Service San Francisco Bay Operational Forecast System. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2(1), 247–286. <http://doi.org/10.3390/jmse2010247>
- Rosman, J. H., & Hench, J. L. (2011). A framework for understanding drag parameterizations for coral reefs. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(8). <http://doi.org/10.1029/2010JC006892>
- Ryan, a. G., Regnier, C., Divakaran, P., Spindler, T., Mehra, a., Smith, G. C., ... Liu, Y. (2015). GODAE OceanView Class 4 forecast verification framework: global ocean inter-comparison. *Journal of Operational Oceanography*, 8(sup1), s98–s111. <http://doi.org/10.1080/1755876X.2015.1022330>
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhi, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., ... Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *Technical Report*, (June), 113. <http://doi.org/10.5065/D6DZ069T>
- Ursella, L., Kovačević, V., & Gačić, M. (2014). Tidal variability of the motion in the Strait of Otranto. *Ocean Science*, 49–67. <http://doi.org/10.5194/os-10-49-2014>
- Wang, X., Chao, Y., Shum, C. K., Yi, Y., & Fok, H. S. (2012). Comparison of two methods to assess ocean tide models. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 29(8), 1159–1167. <http://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00166.1>
- Zhang, a., Hess, K. W., & Aikman, F. (2010). User-based skill assessment techniques for operational hydrodynamic forecast systems. *Journal of Operational Oceanography*, 3(2), 11–24. <http://doi.org/10.1080/1755876X.2010.11020114>
- Zhang Aijun, Z. Y. (2014). Coastal Ocean Modeling Framework on NOAA's High Performance Computer (COMF-HPC), *NOAA Techn.*