



Etude de l'hydrodynamisme du lagon de Mayotte : Elaboration d'un modèle opérationnel et multitâches

Julien BAILLS¹, Didier RIHOUEY¹, Clémence FOULQUIER¹,
Vincent DINHUT¹, Clément LELABOUSSE²

1. CASAGEC INGENIERIE, 18 rue Maryse Bastié, Zone de Maignon, 64600 Anglet,
France.

contact@casagec.fr

2. Parc Naturel Marin de Mayotte, Centre d'affaires de l'aéroport de Mayotte, 97615
Pamandzi, Mayotte.

clement.lelabousse@ofb.gouv.fr

Résumé :

Le Parc naturel marin de Mayotte (PNMM) couvre un espace de 68 381 km² comprenant un lagon de 1 100 km² qui constitue un milieu exceptionnel. Souhaitant parfaire ses connaissances sur l'hydrodynamisme des masses d'eau lagonaires, le Parc naturel marin de Mayotte a décidé de doter Mayotte d'un outil numérique d'aide à la décision destiné aux besoins des différents acteurs assurant la gestion du parc. Parallèlement, le PNMM s'est engagé dans une caractérisation des habitats marins récifaux de Mayotte à travers la thèse de DUPONT (dans le cadre du projet CARMAYOTTE, DUPONT *et al.*, 2020).

Cette cartographie des habitats sert de socle au développement d'un modèle numérique 2DH (couplage TELEMAC-TOMAWAC) intégrant l'ensemble des forçages océano-climatiques impactant l'hydrodynamisme lagonaire (vents, marée astronomique, états de mer, hydrologie). Les campagnes historiques (DE LA TORRE *et al.*, 2008 ; CHEVALIER *et al.*, 2008) ont été valorisées pour calibrer les coefficients de frottement du modèle numérique en fonction des différents types d'habitats (récif barrière, récif frangeant, mangrove, ...) impactant la courantologie de la zone d'étude.

Une fois ce modèle validé en niveaux d'eau et vitesses, des scénarios caractéristiques des quatre saisons affectant Mayotte ont été simulés afin de caractériser la courantologie du lagon (effets des passes, des récifs). Dans un second temps, des modèles 3D locaux ont été construits au droit des principaux bassins versants pour modéliser la dispersion des matières en suspension dans le lagon. Ces modèles sont forcés par des relations débits liquides / flux de MES élaborées dans le cadre du projet LESELAM porté par le BRGM, le CIRAD et la CAPAM. Cet article présente les possibilités et les limitations des outils numériques développés pour les besoins opérationnels du PNMM.

Mots-clés :

Hydrodynamique, Vents, Vagues, Coefficient de frottement, Calibration, Habitats récifaux.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

1. Introduction

Située dans l’océan Indien au Nord du canal du Mozambique, à 300 km au Nord-Ouest de Madagascar et à 450 km du continent africain, approximativement à 13° de latitude Sud et à 45° de longitude Est, Mayotte fait partie de l’archipel des Comores. Le climat est régi par la Zone de Convergence Inter Tropicale (ZCIT). La ZCIT est une bande de basse pression d’environ 400 km de large, siège d’une confrontation entre les vents chauds et humides du nord (Mgnombéni de secteur NE à N d’octobre à mi-janvier et Kaskasi de secteur N-NW de janvier à mars) et les vents plus froids et secs du sud (Koussi de secteur S à SE d’avril à juillet et Matouläi de secteur S à SE de juillet à septembre). Le régime des marées, quant à lui est semi-diurne à inégalité diurne, avec un marnage de 4 m en marée de vives-eaux.

D’une superficie de 374 km², Mayotte est composée de deux îles principales, Grande Terre et Petite Terre, et d’une trentaine d’îlots d’origine volcanique ou corallienne épars dans le lagon. Mayotte est ceinturée par un réseau de récifs coralliens d’une circonférence de 197 km, dont un récif barrière presque continu de 157 km et 40 km de barrière immergée au Nord. Cette barrière récifale délimite un des lagons les plus étendus de l’océan Indien, d’une superficie de près de 1 500 km².

Le Parc Naturel Marin de Mayotte (PNMM), créé en 2010, couvre un espace de 68 381 km² dont 1 100 km² de lagon et près de 200 km de récifs coralliens. Le Parc naturel marin de Mayotte vise à la fois le bon état des écosystèmes, des espèces et des habitats patrimoniaux ou ordinaires, le bon état des eaux marines, mais aussi l’exploitation durable des activités et le maintien du patrimoine culturel.

La volonté de disposer d’outils permettant de mieux comprendre et surtout d’aider à la décision lors d’aménagements ou d’évènements affectant le lagon a largement été manifestée ces dernières années par l’ensemble des acteurs mahorais œuvrant de près ou de loin sur le milieu marin.

Le modèle développé par le BRGM en 2008 (DE LA TORRE *et al.*, 2008), basé sur l’utilisation du code MARS-2D, n’est pas adapté et pas suffisamment raffiné (maille de 130m pour la résolution spatiale du dernier rang des modèles emboîtés) pour répondre aux nombreux besoins actuels des gestionnaires. Par ailleurs, le modèle n’intégrait pas les effets de la houle sur la courantologie dans le lagon. Enfin, le code MARS est un code « académique » peu interfacé.

Cet article présente les modèles 2DH et 3D développés avec la suite de calcul TELEMAC pour répondre aux besoins opérationnels du PNMM. Ces modèles s’appuient sur les campagnes de mesures « anciennes » (DE LA TORRE *et al.*, 2008 ; CHEVALIER *et al.*, 2009) ainsi que sur les données récentes des projets CARMAYOTTE (DUPONT *et al.*, 2020) et LESELAM (LANDEMAINE *et al.*, 2020).

2. Mise en place du Modèle 2DH

2.1 Code de calcul, maillage et données topo-bathymétriques

La suite logicielle TELEMAC-TOMAWAC (écoulement à surface libre - propagation de la houle - transport sédimentaire) a été utilisée dans le cadre de cette étude. Elle repose sur l'utilisation d'un maillage non-structuré adapté pour représenter les environnements complexes.

Le modèle 2DH couvre l'ensemble du lagon de Mayotte et s'étend au large à environ 8km de la barrière récifale jusqu'à des profondeurs de 1500 m. La taille des mailles varie de 1000 m au large à 10m au niveau des secteurs présentant des morphologies complexes (passes, cap, aménagements,).

Au total, le modèle comporte 120 000 nœuds de calcul et 235 000 mailles. En termes de temps de calcul, 8h sont nécessaires pour simuler 24h avec un couplage houle /courant (TELEMAC / TOMAWAC) en considérant un pas de temps de 5s sur une machine de 40 CPU. Les données topo-bathymétriques utilisées pour générer le modèle numérique de terrain sont le MNT bathymétrique de façade de Mayotte (Projet Homonim, SHOM 2016) et le Litto3D Mayotte 2012.

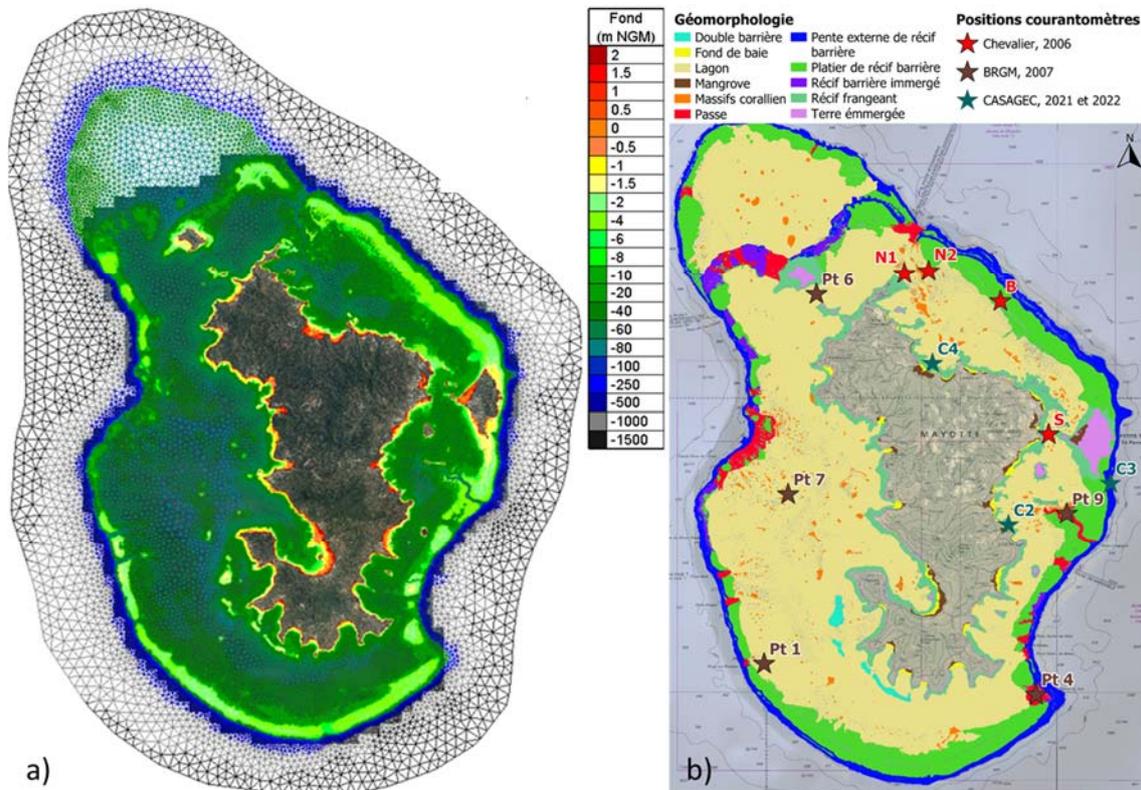


Figure 1. a) Maillage du modèle numérique 2DH. b) Carte d'habitats issue de DUPONT et al. (2020) et localisation des stations de mesures.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

2.2 Frottement au fond et forçages

Le frottement au fond est pris en compte dans le modèle via la paramétrisation de Strickler (plus le coefficient est grand moins il y a de frottement sur le fond). En première approche la paramétrisation du modèle MARS-2D du BRGM 2008 a été utilisée : coefficient de Strickler de $20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ imposé sur les récifs et de $35 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ ailleurs.

En seconde approche, des coefficients de frottement de Strickler ont été appliqués au maillage selon la cartographie récente des habitats marins (DUPONT *et al.*, 2020) réalisée dans le cadre du projet CARMAYOTTE (figure 1). Les valeurs de coefficient de Strickler trouvées dans la littérature pour un même type de fond sont très variables. Dans un premier temps, une valeur moyenne a été appliquée pour chaque type d'habitat identifié. Les coefficients de Strickler, qui constituent le principal paramètre de calibration du modèle, ont ensuite été ajustés pour optimiser les résultats du modèle. Ces coefficients sont récapitulés dans le tableau 1.

Tableau 1. Coefficients de frottement issus de la littérature.

Habitats (ou nature du fond)	Coef de Strickler ($\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$) « Biblio »	Coef de Strickler ($\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$) « Calib »
Mangrove	29	35
Fond de baie	29	35
Récif frangeant	20	22
Lagon	42	42
Massif Corallien	20	28
Double Barrière	20	25
Récif barrière effondré	20	25
Passe	40	40
Récif barrière	12	18
Pente externe Récif barrière	10	10
Large (offshore)	45	45

Concernant les forçages du modèle : la marée astronomique est imposée sur la frontière ouverte océanique grâce au modèle de prédiction de marée TPXO (EGBERT & EROFEEVA, 2002). Les états de mer au large sont imposés par le modèle WW3 de l'Ifremer. Les vents sont issus des données Météo France de la station météorologique de Pamandzi.

2.3 Calibration du modèle numérique

Les travaux de SUTHERLAND *et al.*, (2004) proposent une approche statistique pour évaluer les performances des modèles numériques. Cette approche est présentée ci-après et effectuée pour appréhender la validité du modèle mis en place dans le cadre de la présente étude.

Soit Y les N valeurs simulées (y_1, \dots, y_n) et X les N valeurs mesurées (x_1, \dots, x_n) à des positions et des temps identiques, les indices statistiques suivants ont été utilisés afin d'analyser les capacités du modèle à reproduire les mesures :

- Le BIAIS permet d'évaluer les surestimations (valeurs négatives) et les sous-estimations (valeurs positives) du modèle mais ne permet que de comparer des grandeurs scalaires, équation 1 :

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (y_j - x_j) = \langle Y \rangle - \langle X \rangle \quad (1)$$

- Le MAE (Mean Absolute Error) applicable aux grandeurs scalaires et vectorielles, rend compte de l'erreur absolue mais ne permet pas d'évaluer les surestimations et les sous-estimations du modèle, équation 2 :

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |y_j - x_j| = \langle |Y - X| \rangle \quad (2)$$

- L'ARMAE (Absolute Relative Mean Absolute Error) prend en compte l'influence de l'erreur réalisée sur la mesure in-situ appelée OE, voir équation 3 suivante :

$$ARMAE = \frac{\langle |Y - X| - OE \rangle}{\langle |X| \rangle} \quad (3)$$

Cette erreur OE est fonction de la dimension du capteur utilisé, de la méthode de mesure, de la précision du capteur et de la méthode de traitement des données. SUTHERLAND *et al.*, (2004) proposent des valeurs d'OE pour les données de vitesse provenant d'ADCP. Enfin, SUTHERLAND *et al.*, (2004) proposent une classification (tableau 2) des valeurs de l'indice ARMAE qui rend compte de la qualité des modèles.

Tableau 2. Classification de l'indice ARMAE (SUTHERLAND *et al.*, 2004).

Classification de la qualité du modèle	Intervalle de l'indice ARMAE
<i>Excellent</i>	$ARMAE < 0,2$
<i>Bon</i>	$0,2 < ARMAE < 0,4$
<i>Raisonnable</i>	$0,4 < ARMAE < 0,7$
<i>Faible</i>	$0,7 < ARMAE < 1$
<i>Mauvais</i>	$ARMAE > 1$

Deux sources de données sont utilisées pour calibrer / valider le modèle hydrodynamique 2DH du lagon de Mayotte (figure 1b):

- CHEVALIER en 2006 (CHEVALIER *et al.*, 2008) : 4 profileurs de courant (ADCP) immergés une dizaine de jours, en novembre 2006, au niveau de 4 stations, localisées dans le quart Nord Est du lagon ;

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

- BRGM en 2007 : 4 courantomètres ponctuels (AQUADOD) et 1 profileur de courant (ADCP) immergés une dizaine de jours, en novembre / décembre 2007, au niveau de 5 stations, localisées au Sud et à l'Ouest du lagon, (DE LA TORRE et al., 2008).

Les 5 capteurs du BRGM ont été utilisés pour valider le niveau d'eau modélisé. Les résultats du modèle donnent une très bonne représentation des oscillations semi-diurnes et des variations d'amplitude des marées pour l'ensemble des capteurs à l'exception du Pt 6 dont les données du capteur de pression sont sujettes à caution (DE LA TORRE et al., 2008). En termes d'indice statistique (tableau 3), les biais sont quasi nuls et les erreurs absolues moyennes restent inférieures à 10 cm. Ces erreurs sont faibles en comparaison du marnage qui varie entre 1,4 et 3,8m sur la période de mesures.

Tableau 3. Indice statistique du modèle numérique 2DH en termes de niveau d'eau.

Capteur	Pt 1	Pt 4	Pt 6	Pt 7	Pt 9
Biais (m)	-0,01	-0,01	0	0	-0,01
MAE (m)	0,1	0,07	0,15	0,08	0,07

Concernant les vitesses, la calibration du modèle est réalisée par ajustement des coefficients de frottement de manière à représenter au mieux les courants mesurés sur la colonne d'eau avec les 5 ADCP : stations N1, N2, B et S (CHEVALIER en 2006) et station Pt 4 (BRGM en 2007).

Tableau 4. Indice statistique du modèle numérique 2DH en termes de niveau d'eau.

	Capteur	N1	N2	B	S	Pt4
Marée + vent Strickler homogène	Biais (m/s)	-0,07	-0,08	-0,07	-0,08	-0,16
	MAE (m/s)	0,12	0,12	0,09	0,1	0,23
	ARMAE	0,25	0,3	0,26	0,41	0,42
Marée + vent Strickler habitat	Biais (m/s)	0	-0,02	-0,08	-0,12	-0,12
	MAE (m/s)	0,05	0,09	0,09	0,13	0,18
	ARMAE	0,02	0,18	0,22	0,43	0,39
Marée + vent + houle Strickler habitat	Biais (m/s)	0,02	0,01	-0,01	-0,11	-0,1
	MAE (m/s)	0,1	0,09	0,08	0,12	0,15
	ARMAE	0,17	0,15	0,17	0,41	0,37

Dans un premier temps les indices statistiques sont calculés pour les coefficients de frottements homogènes utilisés dans le modèle BRGM de 2008 (coefficient de Strickler de 20 m^{1/3}.s⁻¹ imposé sur les récifs et de 35 m^{1/3}.s⁻¹ ailleurs, DE LA TORRE *et al.*, (2008)) avec marée et vent implémentés dans le modèle TELEMAC. Si les résultats sont globalement bons selon la classification de Sutherland (tableau 4), les vitesses modélisées

sont globalement sous-estimées (Biais négatif) et la qualité de reproduction par le modèle des courants observés est très variable selon les stations.

Dans un second temps, des coefficients de frottement de Strickler ont été appliqués au maillage selon la cartographie récente des habitats marins (DUPONT *et al.*, 2020). Les indices statistiques correspondants aux coefficients ajustés avec marée et vent implémentés dans le modèle TELEMAC, mettent en évidence une amélioration des résultats au niveau des stations N1 et N2 de la passe de M'Tsambo.

Enfin, les dernières lignes du tableau 4 présentent ensuite les indices statistiques correspondants aux coefficients ajustés avec marée, vent et houle implémentés dans le modèle couplé TELEMAC-TOMAWAC. La prise en compte des vagues améliore les résultats en termes d'amplitude notamment au niveau de la station N2 de la passe de M'Tsambo où l'asymétrie flot/jusant est bien représentée. Si le modèle couplé donne globalement des résultats satisfaisant au niveau des passes, certaines périodes de mesure au niveau de la station Pt 4 sont sous-estimées alors que d'autres sont bien reproduites. Au niveau de la station B située à l'arrière du Grand Récif du Nord-Est, l'amplitude des vitesses est globalement sous-estimée au jusant en dépit de la calibration et de la prise en compte des vagues. In fine, le modèle (sans et avec prise en compte de la houle) présente les moins bons résultats au niveau du détroit de Mamoudzou (station S) avec une sous-estimation des vitesses et un déphasage marqué.

3. Résultats du modèle 2DH

Afin de caractériser l'hydrodynamique dans le lagon mahorais, le modèle numérique développé et calibré précédemment a été appliqué sur un grand nombre de conditions océano-climatiques définies en lien avec les 4 saisons du climat mahorais (Mgnombéni, Kachkasi, Koussi et Matoulahi). Pour chaque saison, trois hauteurs significatives sont considérées afin de représenter les conditions moyennes ($H_s = 1\text{m}$), fortes ($H_s = 2\text{m}$) et plus exceptionnelles ($H_s = 3\text{m}$). Pour chaque hauteur considérée, une vitesse de vent lui est associée après une analyse de corrélation entre vent et houle. Ces différentes conditions de houle et de vent ont été modélisées pour une marée de vive-eau et une marée de morte-eau soit un total de 24 scénarios.

Les résultats de ces simulations corroborent les travaux du BRGM (DE LA TORRE *et al.*, 2008) en mettant en exergue le rôle prépondérant de la marée sur les circulations dans le lagon qui sont contraintes par deux zones principales d'échange avec le large :

- La plate-forme effondrée du Nord-Ouest influence tout l'Ouest du lagon, le Nord-Ouest et le Nord-Est jusqu'au détroit de Mamoudzou avec des courants globalement orientés vers le Nord au jusant (figure 2a) et vers le Sud au flot (figure 2b),
- Les passes du Sud-Est influencent le Sud et l'Est du lagon jusqu'au détroit de Mamoudzou avec des courants rentrants vers le Nord à l'Est du lagon et vers l'Ouest au Sud du lagon au cours du flot (figure 2b), et inversement pour le jusant (figure 2a).

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

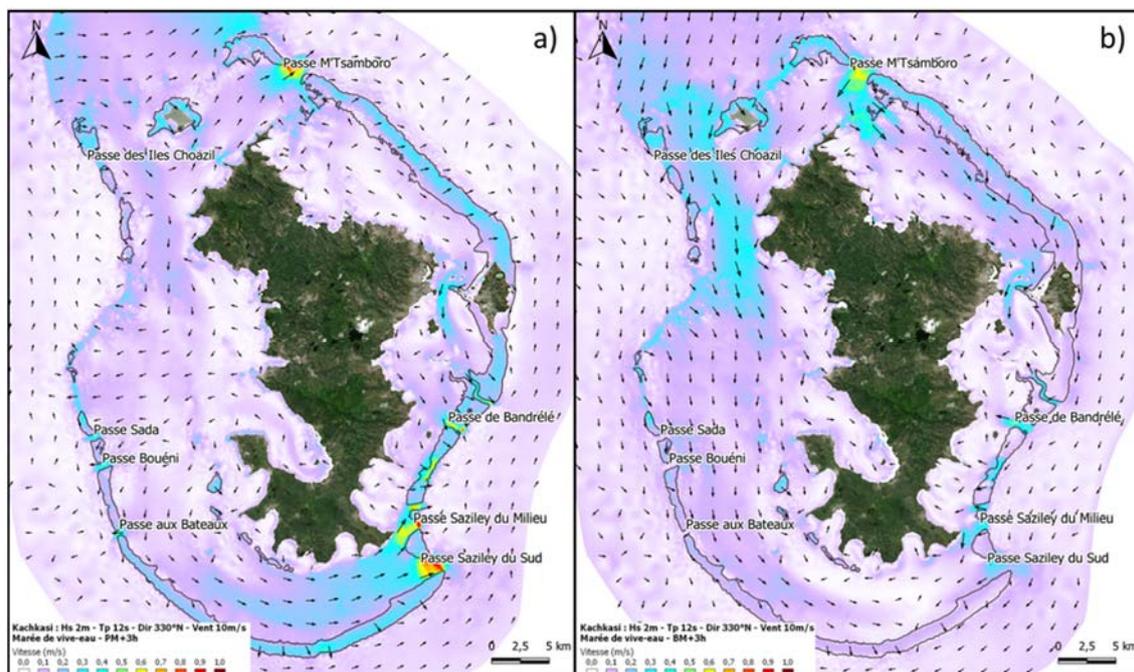


Figure 2. Courants pour une marée de vive-eau pour des conditions fortes de Kachkasi à PM+3 (a) et BM+3 (b).

Par vent faible et houle moyenne, les vitesses maximales au niveau des passes sont de l'ordre de 1 m/s en marée de vive-eau. Des vitesses intermédiaires ($0,2 < v < 0,8$ m/s) s'observent notamment dans le lagon dans les zones d'étranglement (détroit de Mamoudzou / goulet au Sud de l'îlot de Mtsamboro). Les zones à faible hydrodynamisme ($< 0,2$ m/s) se trouvent à l'Ouest, au Sud-Ouest et à l'Est du lagon.

Lorsque le vent est fort (> 10 m/s) et la marée de faible amplitude, les circulations tidales peuvent être modifiées :

- Par vent de Nord-Ouest (mousson), le courant est inversé au flot dans les parties Est et Sud du lagon tandis qu'au jusant il est inversé dans les parties Ouest et Nord ;
- Par vent de Sud (alizé), la situation contraire s'observe avec un courant inversé au flot à l'Ouest et au Nord et au jusant à l'Est et au Sud du lagon.

La prise en compte de la houle dans la modélisation modifie principalement les vitesses au niveau des récifs barrières et des passes exposées. Par forte houle de Sud-Ouest ou de Nord-Ouest, les vagues parviennent à pénétrer le lagon au niveau de la barrière immergée Ouest, et les circulations proches de la côte et sur les récifs internes au lagon sont légèrement modifiées.

4. Conclusions et perspectives du modèle 3D

Le modèle 2DH couplé TELEMAC-TOMAWAC, mis en place pour les besoins opérationnels du Parc naturel marin de Mayotte (PNMM), permet d'appréhender les circulations tidales au sein du lagon ainsi que les contributions du vent et des vagues.

A l'instar des travaux du BRGM (DE LA TORRE *et al.*, 2008), la comparaison avec les données traitées montre que le modèle estime correctement les intensités des courants dans les passes, tandis qu'il les sous-estime au sein du lagon.

En complément, un modèle 3D est implémenté pour appréhender les problématiques de qualité microbiologique des eaux du lagon et d'apport de matières en suspension (MES). Concernant ce second point, la forte pression anthropique tend à accélérer le phénomène d'érosion des sols. Sur la période 2017 - 2020, les exports sédimentaires moyens annuels au lagon sont évalués à un peu moins de 20 000 t/an soit une progression de 245% par rapport à 1950 (LANDEMAINE *et al.*, 2020). Dans ce contexte, le projet LESELAM (Lutte contre l'Erosion des Sols et l'Envasement du Lagon à Mayotte) vise à quantifier les processus d'érosion et hiérarchiser les priorités quant aux actions à entreprendre, notamment les bonnes pratiques agricoles et la gestion efficace de l'urbanisation. Dans le cadre de ce projet, des relations débits liquides / flux de MES ont été définies pour les 28 principaux bassins versants (figure 3a) et servent de forçages pour le modèle 3D dont le maillage a été raffiné au niveau des exutoires. Les premiers résultats (figure 3b) donnent des résultats satisfaisants au niveau de la station de mesure C2 (figure 1b) où des sondes multi-paramètres Samba ont été installées en mars 2021.

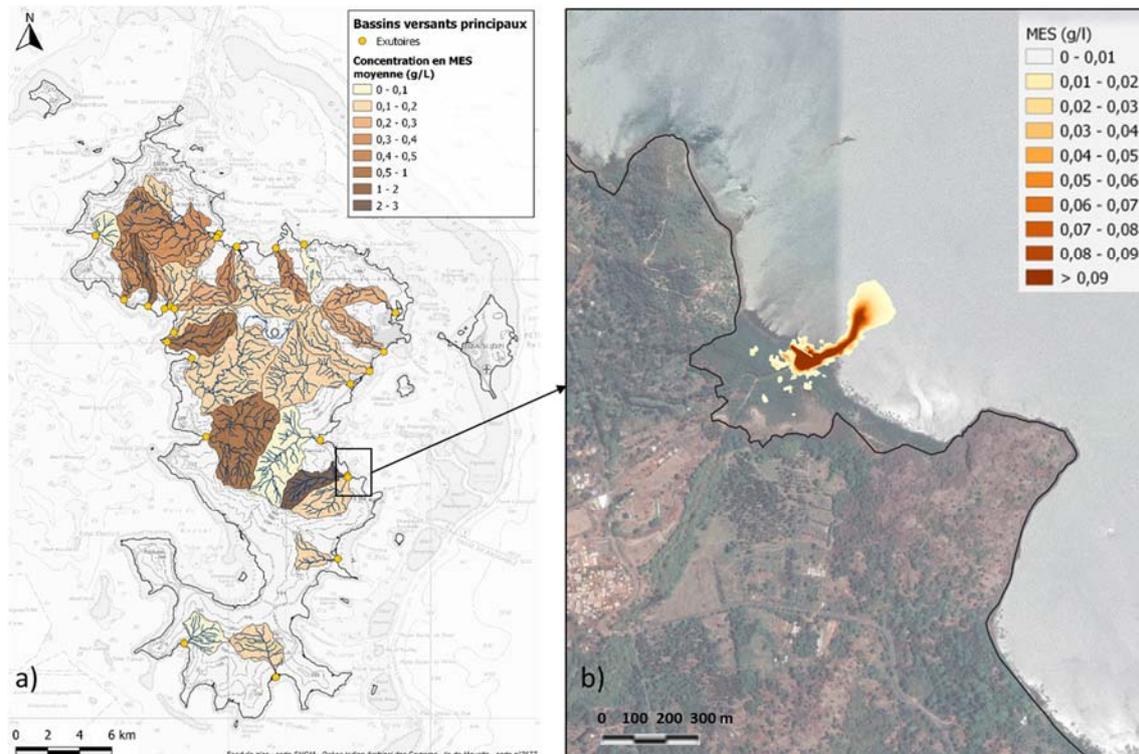


Figure 3. Concentrations en MES moyenne pour les 28 bassins versants principaux.

Thème 1 – Hydrodynamique marine et côtière

Remerciements

Les auteurs remercient :

- L’Institut Méditerranéen d’Océanologie (en particulier Cristèle Chevalier) pour les données de la campagne de 2006 ;
- le BRGM à double titre pour les données de la campagne de 2007 (en particulier Frédéric Tronel) et les données LESELAM (en particulier Valentin Landemaine) ;
- Priscilla Dupont pour les cartographies d’habitat réalisées dans le cadre du projet CARMAYOTTE.

5. Références bibliographiques

- CHEVALIER C., DEVENON J.L., ROUGIER G. (2008). *Experimental characterization of the water exchanges with ocean in a macro-tidal intermittently open lagoon bounded by semi-submerged coral reef*, Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale, Florida, 7-11 July 2008, Session number 15, pp 465-469.
- DE LA TORRE, Y., DELATTRE M., IDIER D., ROMIEU E., DELVALLEE E., LE COZANNET G. (2008). *Modélisation courantologique du lagon de Mayotte*, Rapport BRGM/RP- 56334-FR, 133 p.
- DUPONT P., NICET J.-B., MOUQUET P. (2020). *CARMAYOTTE- Cartographie des habitats récifaux de Mayotte*, Contrat de recherche et développement relatif à la production d’une cartographie des habitats marins récifaux de Mayotte AFB/CUFR/MAREX, 73p+annexes
- EGBERT G., EROFEEVA S. (2002). *Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides*, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 19 2, pp 183-204, [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2)
- SHOM (2016). MNT Bathymétrie de façade de Mayotte (Projet HOMONIM).
- SUTHERLAND J., WALSTRA D.J.R., CHESHER T.J., VAN RIJN L.C., SOUTHGATE H.N. (2004). *Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth*, Coastal Engineering 51, pp 119– 142, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.12.003>
- LANDEMAINE V., DESPRATS J.F., DECTOT G., VIGNEROT B., CERDAN O., RINAUDO J.D., CARME E., SAID K., VITTER M., SALVADOR-BLANES S., VANHOOYDONCK P., MAVOUNA A. (2020). *Suivi hydro-sédimentaire et modélisation de l’érosion des sols à Mayotte – Projet LESELAM 2*, Rapport final – Mars 2021, BRGM/RP- 70572-FR, 218p.