

**PROJET D'AMENAGEMENT DU POLE D'ECHANGE MULTIMODAL  
DE MAMOUDZOU**  
**LOT 2 : ETUDE DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES ET  
HYDROSEDIMENTAIRES**



## INFORMATIONS GENERALES SUR LE DOCUMENT

<b>Contact</b>	<b>CASAGEC INGENIERIE</b> 18 rue Maryse Bastié Z.A. de Maignon 64600 Anglet - FRANCE Tel : + 33 5 59 45 11 03 Web : <a href="http://www.casagec.fr">http://www.casagec.fr</a>
<b>Titre du rapport</b>	Projet d'aménagement du Pôle d'Echange Multimodal de Mamoudzou Lot 2 : Etude des conditions hydrodynamiques et hydrosédimentaires
<b>Maître d'Ouvrage</b>	Conseil Départemental de Mayotte
<b>Auteur(s)</b>	Clémence Foulquier, Myriam Mahabot, Vincent Dinhut
<b>Responsable du projet</b>	Didier Rihouey – <a href="mailto:rihouey@casagec.fr">rihouey@casagec.fr</a>
<b>Rapport n°</b>	CI-19026

## SUIVI DU DOCUMENT

Rev.	Date	Description	Rédigé par	Approuvé par
00	04/09/2019	1ère version envoyée au MOA	CFR, MMT, VDT	DRY
01				
02				

## TABLE DES MATIERES

1.	Contexte et objet de la mission d'étude .....	8
1.1.	Contexte .....	8
1.2.	Objet de la mission .....	8
1.3.	Organisation du document.....	9
2.	Description générale de la zone d'étude – Synthèse des données bibliographiques.....	10
2.1.	Contexte géographique général .....	10
2.2.	Localisation de la zone d'étude .....	10
2.3.	Données climatiques .....	11
2.3.1.	Climatologie générale .....	11
2.3.2.	Les températures .....	12
2.3.3.	Les précipitations .....	13
2.3.4.	Les vents.....	13
2.4.	Les niveaux d'eau .....	15
2.4.1.	La marée astronomique .....	15
2.4.2.	Surcote et décote .....	15
2.5.	Conditions hydrodynamiques.....	15
2.5.1.	Conditions hydrodynamiques au large.....	15
2.5.2.	Conditions hydrodynamiques dans le lagon .....	17
2.5.3.	Conditions hydrodynamiques de l'anse Choa.....	18
2.6.	Bathymétrie .....	18
2.7.	Nature du trait de côte .....	18
2.8.	Hydrologie .....	21
2.8.1.	Bassins versants et cours d'eau dans le voisinage de la zone d'étude.....	21
2.8.2.	Débit liquide de la Kaouénilajoli.....	21
2.8.3.	Débit solide .....	22
2.9.	Qualité de l'eau .....	22
2.9.1.	Etat de la masse d'eau .....	22
2.9.2.	Eléments de connaissance actuelle sur la qualité de l'eau .....	25
2.10.	Nature, origine et qualité des sédiments .....	27
2.10.1.	Nature des sédiments.....	27
2.10.2.	Origine des sédiments .....	29
2.10.3.	Qualité des sédiments .....	29
3.	Présentation générale des aménagements du PEM .....	32
3.1.	Nature et consistance des travaux maritimes .....	32
3.2.	Phasage et planning prévisionnel .....	34
4.	Caractérisation de l'état initial du milieu marin avant travaux.....	35
4.1.	Qualité physico-chimique de l'eau .....	35

4.1.1.	Modalités du suivi de la qualité de l'eau .....	35
4.1.2.	Résultat des suivis de la qualité de l'eau .....	37
4.2.	Qualité physico-chimique des sédiments .....	40
4.2.1.	Modalités de suivi de la qualité des sédiments.....	40
4.2.2.	Valeurs de référence pour l'interprétation des résultats .....	42
4.2.3.	Résultat des suivis de la qualité des sédiments .....	43
4.3.	Modélisation du fonctionnement hydrosédimentaire .....	48
4.3.1.	Mise en place du modèle numérique .....	48
4.3.2.	Calage et validation du modèle numérique .....	50
4.3.3.	Résultats de modélisation .....	53
4.4.	Caractérisation des fonds marins .....	57
4.4.1.	Modalités d'acquisition au sonar à balayage latéral .....	57
4.4.2.	Résultat de la caractérisation des fonds marins .....	60
5.	Impacts du projet en phase travaux et exploitation sur le fonctionnement hydrosédimentaire du secteur d'étude.....	62
5.1.	Impacts en phase travaux.....	62
5.1.2.	Impacts sur les conditions hydrodynamiques de la zone.....	63
5.1.3.	Impacts sur la dispersion et le transport de ces sédiments .....	63
5.2.	Impacts en phase exploitation .....	63
5.2.1.	Impacts sur la qualité du milieu .....	63
5.2.2.	Impacts sur le fonctionnement hydrosédimentaire de la zone .....	63
5.2.3.	Impacts sur la dispersion et le transport de ces sédiments .....	66
6.	Préconisation de mesures pour Eviter-Réduire-Compenser.....	67
6.1.	Limitation du risque de pollution accidentelle des sables et de l'eau par les engins de chantier.....	67
6.2.	Limitation du risque de pollution lié au matériaux de remblaiement.....	67
6.3.	Limiter les départs de matériaux de remblai dans le milieu .....	67
6.4.	Limiter le départ de produits de démolition .....	67
7.	Proposition de modalités de suivi .....	68
7.1.	Suivi de l'augmentation potentielle de la turbidité liée au travaux .....	68
7.2.	Suivi de la qualité des sédiments aux abords du nouveau remblai et des zones de démolition .....	68
8.	Synthèse et conclusion.....	69

## LISTE DES FIGURES

Figure 1: Variantes d'aménagement étudiées sur le site de Mamoudzou .....	8
Figure 2: Délimitation de la zone d'étude .....	10
Figure 3 : Direction des vents dominants (Raunet, 1992) à gauche et fréquence mensuelle des vents par secteur de provenance pour la station de Pamandzi sur la période 1951-2007 (Source : Jeanson, 2009) à droite.....	11
Figure 4 : Trajectoire des cyclones tropicaux avec un passage dans un rayon de 300 km au voisinage de Mayotte entre 1976 et 2010 (Source : Legoff, 2010 dans Cerema, 2019).....	12
Figure 5: Evolution mensuelle des températures de l'air entre 1981 et 2010 à Pamandzi et des eaux lagunaires entre 1999 et 2005 (Source : CEREMA, 2019).....	12
Figure 6: Cumul annuel moyen des précipitations à l'échelle de Mayotte (a) et diagramme ombrothermique de la station de Pamandzi (b) sur la période 1981-2010 (Source : Météo-France) .....	13
Figure 7: Caractéristiques mensuelles des vents sur la période 1951-2007 pour la station météorologique de Pamandzi.....	14
Figure 8 : Rose des houles et courbes de dépassement de hauteur significative pour les 4 saisons .....	16
Figure 9. Illustration des courants généraux à proximité de l'archipel des Comores .....	17
Figure 10 : Remblaiement du quai des douanes (à gauche BD Ortho historique IGN 1950, à droite BD Ortho HR 2016, source : CEREMA 2017) .....	19
Figure 11: Bathymétrie de la zone d'étude. ....	20
Figure 12 : Réseau hydrographique dans le voisinage de la zone d'étude (source : DEAL Mayotte, Les cours d'eau à enjeux sur Mayotte : La Gouloué, Kawenilajoli et Kirissoni. Rapport de présentation de la cartographie du Risque inondation sur le Territoire à Risque Important) .....	21
Figure 13: Localisation des masses d'eau DCE "FRMC10" aux abords du projet (matérialisé par le rectangle rouge) (source : wwz.ifremer.fr/surval) .....	23
Figure 14: Etat écologique et chimique de la masse d'eau côtière FRMC10- Mamoudzou - Dzaoudzi (source : IFREMER Atlas DCE, envlit.ifremer.fr). ....	23
Figure 15 : Localisation des stations de prélèvement eau suivies dans le cadre de l'étude antérieure de Cambert <i>et al.</i> , 2011a. ....	25
Figure 16 : Coupe transversale généralisée du système récifo-lagonnaire de Mayotte (Jeanson, 2009 d'après Zinke <i>et al.</i> , 2001).....	27
Figure 17 : Stations d'échantillonnage des sédiments des campagnes Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) 2008 et 2010 et délimitation des masses d'eau côtières (Pareto et Asconit, 2013) (Les classes de couleurs correspondent aux 12 types de masse d'eau : 5 masses d'eau côtières, 4 masses d'eau lagunaires, baie de Bouéni, vasière des Badamiers et la masse d'eau du large.....	28
Figure 18 : Localisation des stations de prélèvement sédimentaire suivies dans le cadre d'étude antérieures (d'après données bibliographiques : Thomassin <i>et al.</i> , 2006, Cambert <i>et al.</i> , 2011a, et Cambert <i>et al.</i> , 2011b). 30	
Figure 19: Principaux aménagements maritimes actuels du PEM (Source : SAFEGE, 2019) .....	33
Figure 20 : Localisation des stations de suivi de la qualité de l'eau .....	36
Figure 21 : Dendrogramme des 10 stations (automnales et hivernales) à partir des paramètres hydrologiques. ....	39

Figure 22: Localisation des stations de suivi de la qualité des sédiments .....	41
Figure 23 : Histogramme des fractions sédimentaires au sein des différents échantillons.....	43
Figure 24 : Dendrogramme des stations de sédiments fondé sur la prise en compte de la plupart des paramètres sédimentologiques.....	47
Figure 25. Emprise du modèle hydrodynamique 2DH .....	49
Figure 26. Zoom du maillage autour du secteur d'étude.....	50
Figure 27. Comparaison entre le modèle et le marégraphe de Dzaoudzi sur la période du 14 au 21 Juillet 2018. ....	52
Figure 28. Comparaison des courants dans la direction principale (positif vers le Nord et négatif vers le Sud) sur la période du 17 au 24 Novembre 2006.....	52
Figure 29 : Illustration de la circulation tidale dans le lagon de Mayotte.....	53
Figure 30. Illustration de la circulation tidale dans le lagon de Mayotte (suite).....	54
Figure 31. Marée de vive-eau - Courants à PM.....	54
Figure 32. Marée de vive-eau - Courants à PM+3.....	55
Figure 33. Marée de vive-eau - Courants à BM.....	55
Figure 34. Marée de vive-eau - Courants à BM+3.....	56
Figure 35: Principe d'utilisation du sonar à balayage latéral .....	57
Figure 36: Sonar de type Tritech Starfish 452F .....	57
Figure 37: Localisation de l'emprise de l'acquisition au sonar à balayage latéral et position des stations de prélèvement de sédiments pour l'analyse granulométrique.....	59
Figure 38: Nature de fonds au sein de la zone d'étude .....	61
Figure 39 : Position des profils d'extraction des courants. ....	63
Figure 40. Vitesses sans et avec projet pour une marée de vive-eau au niveau du profil 1.....	64
Figure 41. Vitesses sans et avec projet pour une marée de vive-eau au niveau du profil 2.....	65
Figure 42. Vitesses sans et avec projet pour une marée de vive-eau au niveau du profil 3.....	66

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Références altimétriques maritimes au port de Dzaoudzi (Source : SHOM, 2017).....	15
Tableau 2 : Paramètres suivis sur les masses d'eau côtières tous types confondus .....	23
Tableau 3 : Résultats des paramètres hydrologiques généraux mesurés au niveau des 4 stations localisées à proximité de la zone d'étude (d'après Cambert <i>et al.</i> , 2011a) .....	25
Tableau 4: Compilation des résultats d'analyses sédimentaires issus d'études antérieures mises en œuvre sur la zone d'étude .....	31
Tableau 5 : Coordonnées géographiques des stations de prélèvement d'eau .....	35
Tableau 6 : Résultats de la qualité de l'eau en saison humide .....	37
Tableau 7 : Résultats de la qualité de l'eau en saison sèche .....	37
Tableau 8 : Coordonnées géographiques des stations de prélèvement sédiments. ....	40
Tableau 9: Valeurs guides des niveaux 1 et 2 à prendre en compte dans les analyses de sédiments marins ou estuariens, exprimés par kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm. ....	42
Tableau 10 : Composition granulométrique des échantillons. ....	43
Tableau 11: Paramètres généraux et nutriments au sein des échantillons sédimentaires .....	44
Tableau 12 : Concentrations en contaminants chimiques dosés dans les sédiments prélevés en juillet 2019. ...	46
Tableau 13 : Classification de l'indice ARMAE (Sutherland <i>et al.</i> 2004).....	51



### 1.3. ORGANISATION DU DOCUMENT

Le présent rapport dresse dans une première section (section 2) une synthèse des données bibliographiques disponibles sur le milieu physique.

La section suivante (section 3) rappelle les aménagements maritimes prévus dans le cadre du futur PEM.

La quatrième section dresse l'état initial de la zone d'un point de vue hydrosédimentaire. Elle décrit les campagnes de terrain ainsi que le travail de modélisation mis en œuvre, présente et interprète les résultats acquis et évalue la sensibilité du milieu aux travaux et ouvrages prévus.

La cinquième section évalue les incidences potentielles du projet sur le fonctionnement hydrosédimentaire, en phase travaux et exploitation.

La section suivante préconise des mesures ERC sur la base des incidences identifiées.

Enfin, la sixième et dernière partie propose des modalités de suivi environnemental.

## 2. DESCRIPTION GENERALE DE LA ZONE D'ETUDE – SYNTHESE DES DONNEES BIBLIOGRAPHIQUES DISPONIBLES

### 2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE GENERAL

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 avec les îles d'Anjouan, de Mohéli et de Grande Comores.

D'une superficie de 374 km<sup>2</sup>, Mayotte est composée de deux îles principales, Grande Terre et Petite Terre (12 km<sup>2</sup>), et d'une trentaine d'îlots d'origine volcanique ou corallienne épars dans le lagon.

L'île est ceinturée par une barrière corallienne de 160 km de long entrecoupée de plusieurs passes, isolant un lagon de 1 100 km<sup>2</sup>. Le littoral est également occupé par des mangroves qui se répartissent sur environ 720 hectares et représentent environ 29% du linéaire littoral (Jeanson, 2009). Créé par le décret N°2010-71 du 18 janvier 2010, le Parc naturel marin de Mayotte (PNMM) couvre un espace de 68 381 km<sup>2</sup> comprenant un lagon de 1 100 km<sup>2</sup> qui constitue un milieu exceptionnel.

### 2.2. LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude se situe dans l'anse Choa, sur le littoral de la commune de Mamoudzou, au droit du futur aménagement du PEM. Afin d'intégrer les différents enjeux environnementaux présents aux abords du projet dans sa partie maritime, la zone d'étude du milieu marin s'étend entre :

- Au Nord, la limite Sud de la mangrove de Kawéni. Cette mangrove d'une superficie estimée à 46,2 ha en 2011 (Cerema, 2019) fait partie de la réserve forestière de Majambini,
- Au Sud, la Pointe Mahabou, colline rocheuse.

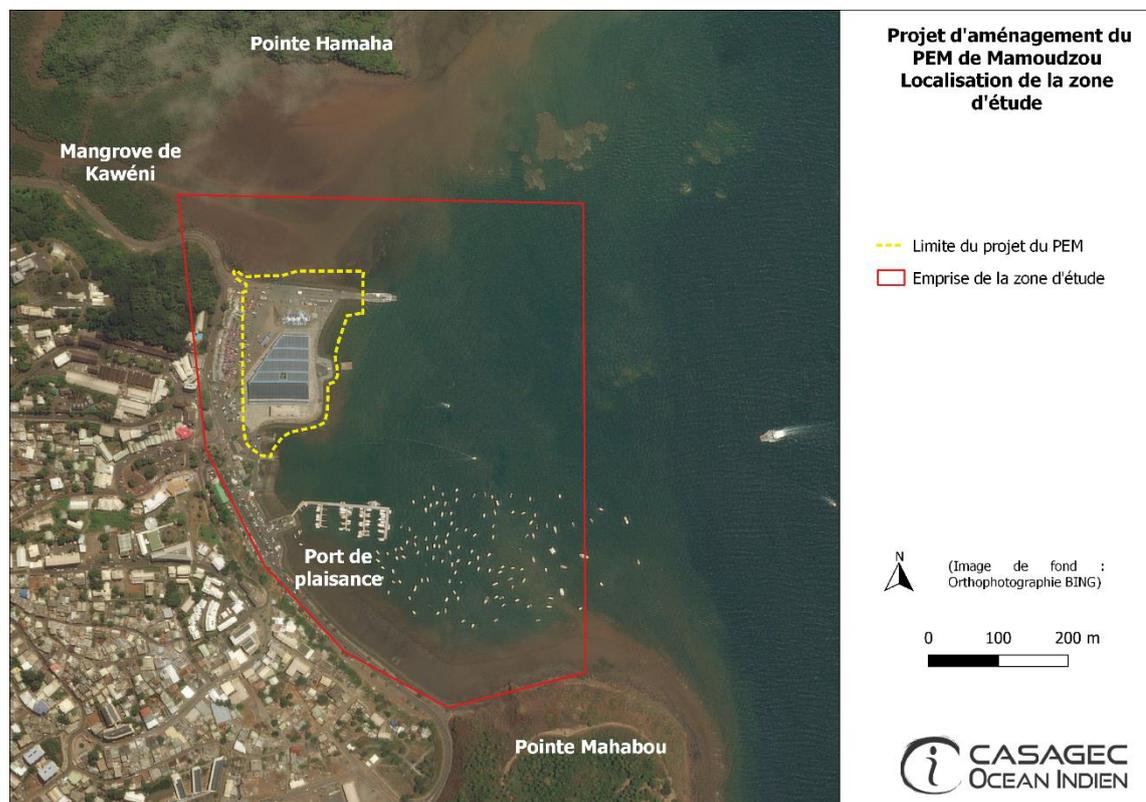


Figure 2: Délimitation de la zone d'étude

## 2.3. DONNEES CLIMATIQUES

### 2.3.1. Climatologie générale

Le climat à Mayotte est de type tropical maritime. Deux saisons ponctuent l'année, séparées par deux intersaisons plus brèves :

- La période de mousson : une saison chaude et pluvieuse en été austral, marquée par le passage régulier de systèmes dépressionnaires voire occasionnellement de tempêtes ou de cyclones (influence de la zone de convergence inter-tropicale). La mousson dure à peu près d'octobre à mars et comporte deux phases :
  - D'octobre à mi-janvier, elle souffle de secteur NE à N (« *Miombéni* ») : c'est l'établissement progressif des pluies. Pendant ce temps l'alizé Sud-Sud-Est va décroissant d'importance,
  - De janvier à mars, c'est la pleine mousson de secteur N-NW (« *Kaskasi* » ou « *Kashkasi* »),
- La période de l'alizé : une saison plus fraîche et moins pluvieuse, caractérisée par des situations anticycloniques. Elle dure d'avril à septembre et comporte également deux phases successives :
  - D'avril à juillet, l'alizé, de secteur S-SW à S-SE, arrive encore humide sur l'archipel, parce que remontant le canal de Mozambique. Ce vent (« *Koussi* » ou « *Kusi* ») prolonge les pluies sur les versants exposés Sud,
  - De juillet à septembre, l'alizé souffle de secteur S à SE, arrivant sec sur Mayotte après avoir perdu son humidité au-dessus de Madagascar (« *Matoulai* »). C'est le cœur de la saison sèche.

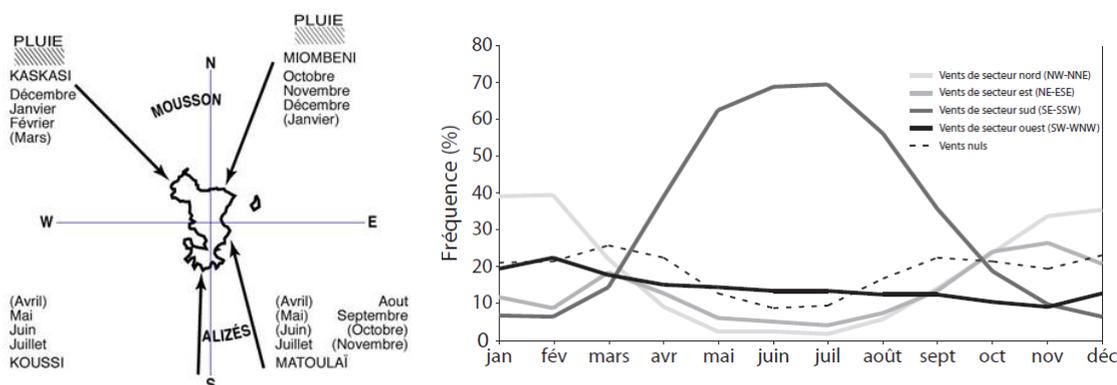


Figure 3 : Direction des vents dominants (Raunet, 1992) à gauche et fréquence mensuelle des vents par secteur de provenance pour la station de Pamandzi sur la période 1951-2007 (Source : Jeanson, 2009) à droite.

Les conditions les plus extrêmes en termes de vent et de précipitations sont enregistrées durant le passage de tempêtes ou de cyclones au voisinage de l'île avec une trajectoire globalement Est/Ouest (Figure 4). L'île apparaît toutefois bien protégée de ce type de trajectoire par Madagascar.



Figure 4 : Trajectoire des cyclones tropicaux avec un passage dans un rayon de 300 km au voisinage de Mayotte entre 1976 et 2010 (Source : Legoff, 2010 dans Cerema, 2019)

### 2.3.2. Les températures

La température de l'air sur la période 1981 à 2010 montre les tendances suivantes :

- Durant l'été austral, les températures de l'air sont comprises entre 25 et 31°C de décembre à avril sur la côte Nord-Est ;
- Elles baissent ensuite à partir du mois d'avril pour atteindre de 21 à 28°C en juillet et août.

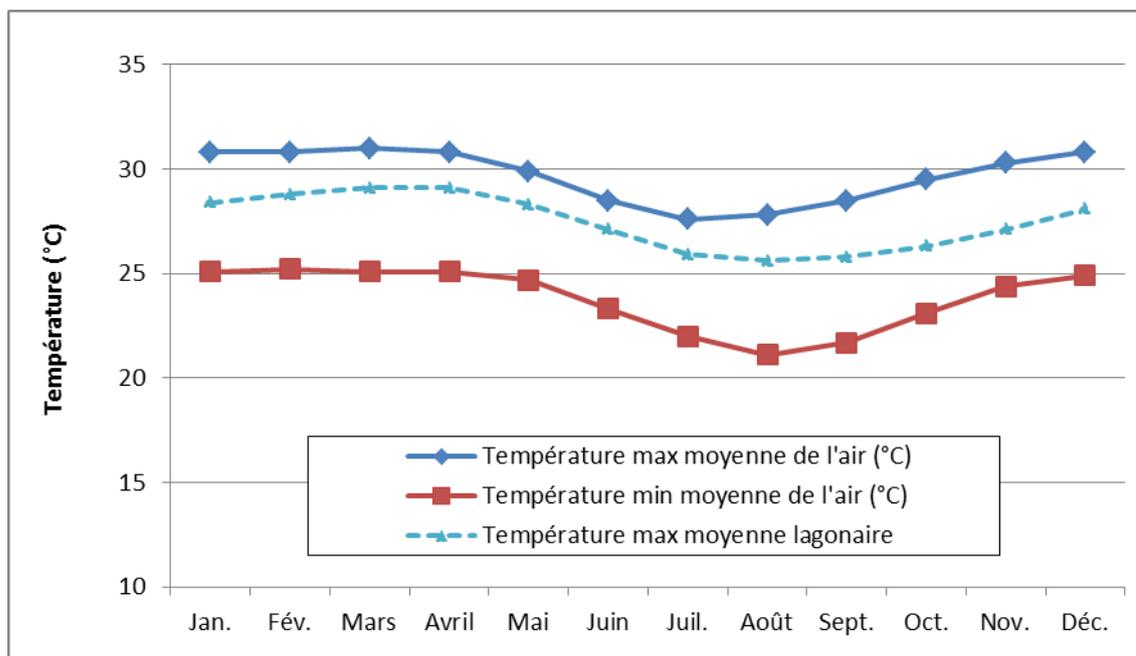


Figure 5: Evolution mensuelle des températures de l'air entre 1981 et 2010 à Pamandzi et des eaux lagonnaires entre 1999 et 2005 (Source : CEREMA, 2019)

### 2.3.3. Les précipitations

A l'échelle régionale, les conditions pluviométriques sont contrôlées par les fluctuations latitudinales des masses d'air humides associées à la zone de convergence inter-tropicale (ZCIT).

A l'échelle de l'île, le relief joue également un rôle prépondérant dans la répartition spatiale des précipitations. Les cumuls les plus importants s'observent sur la moitié Nord de l'île en particulier dans la région Nord-Ouest.

La portion littorale de la commune de Mamoudzou est soumise à des cumuls annuels moyens de l'ordre de 1300 à 1400 mm (Figure 6). Les précipitations les plus fortes sont enregistrées de janvier à mars (>200mm).

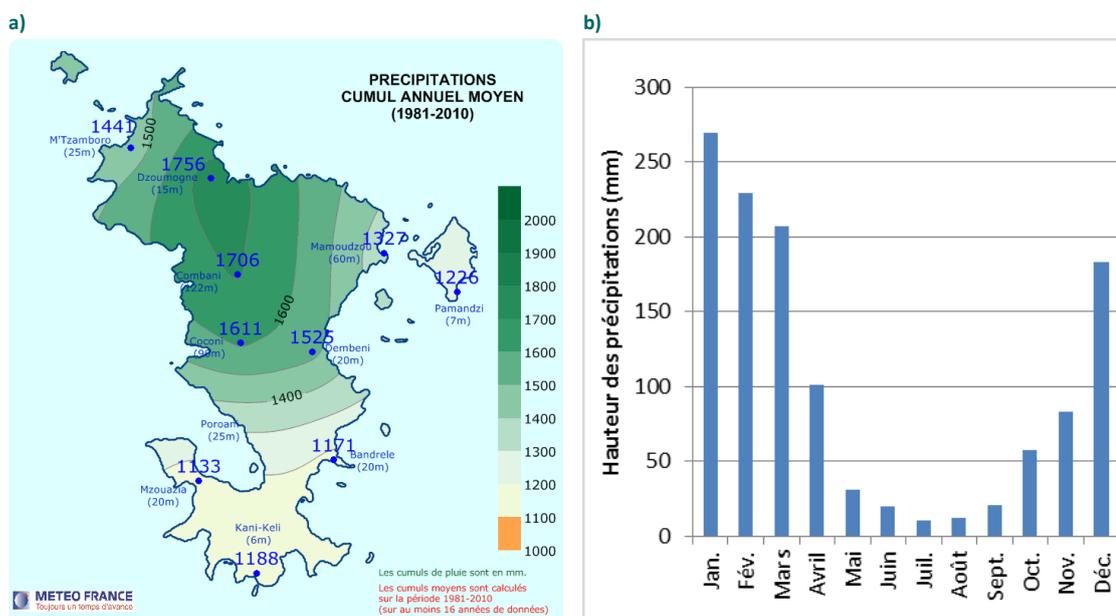


Figure 6: Cumul annuel moyen des précipitations à l'échelle de Mayotte (a) et diagramme ombrothermique de la station de Pamandzi (b) sur la période 1981-2010 (Source : Météo-France)

### 2.3.4. Les vents

Les caractéristiques des vents à Mayotte, issues de l'analyse des données Météo France de la station météorologique de Pamandzi, peuvent être synthétisées comme suit :

- Une direction de provenance des vents se décomposant de la façon suivante :
  - Environ 50% des vents proviennent du secteur Sud-Est à Sud-Sud-Ouest (SE-SSO),
  - 19% des vents proviennent du secteur Nord-Ouest à Nord-Nord-Est (NO-NNE),
  - 14,5% des vents proviennent du secteur Nord-Est à Est-Sud-Est (NE-ESE),
  - 16,5% des vents proviennent secteur Sud-Ouest à Ouest-Nord-Ouest (SO-ONO),
- En moyenne, les vents les plus forts proviennent des secteurs :
  - SE-SSO où ils atteignent 4,3 m/s,
  - SO-ONO où ils atteignent 3,7 m/s,
- Pour les secteurs NO-NNE et NE-ESE, les vitesses moyennes sont de l'ordre de 3 m/s,
- Les vitesses maximales absolues des vents sont enregistrées pour les secteurs SO-ONO et NE-ESE.

L'évolution mensuelle (Figure 7) montre :

- De janvier à février, une dominance des vents de NO-NNE (55%) avec les vitesses moyennes les plus fortes de l'ordre de 4,10 m/s. D'intensité variable, il est à noter une alternance de périodes de vents forts et de vents calmes,
- En mars, une période de transition entre le flux de mousson et le flux d'alizés. Les conditions calmes prédominent (26,04% des vents) avec des directions des vents très variables, des vitesses moyennes faibles avec un maximum pour la direction ENE (3,26 m/s),
- D'avril à septembre, une dominance des vents de SE-SSO (80% des vents),
- D'octobre à décembre, une présence de vents de mousson de secteur N-NE à NNO.

Enfin, en période estivale, Mayotte peut être concernée par des cyclones ou tempêtes tropicales. Ces évènements ont pour effet d'exacerber les effets du vent et de la pression mais aussi de la houle et par conséquent des courants induits. Lors du cyclone Kamisy en avril 1984, les vents ont été mesurés à 150 km/h (41,6 m/s) à Pamandzi pour une pression de 985 hPa.

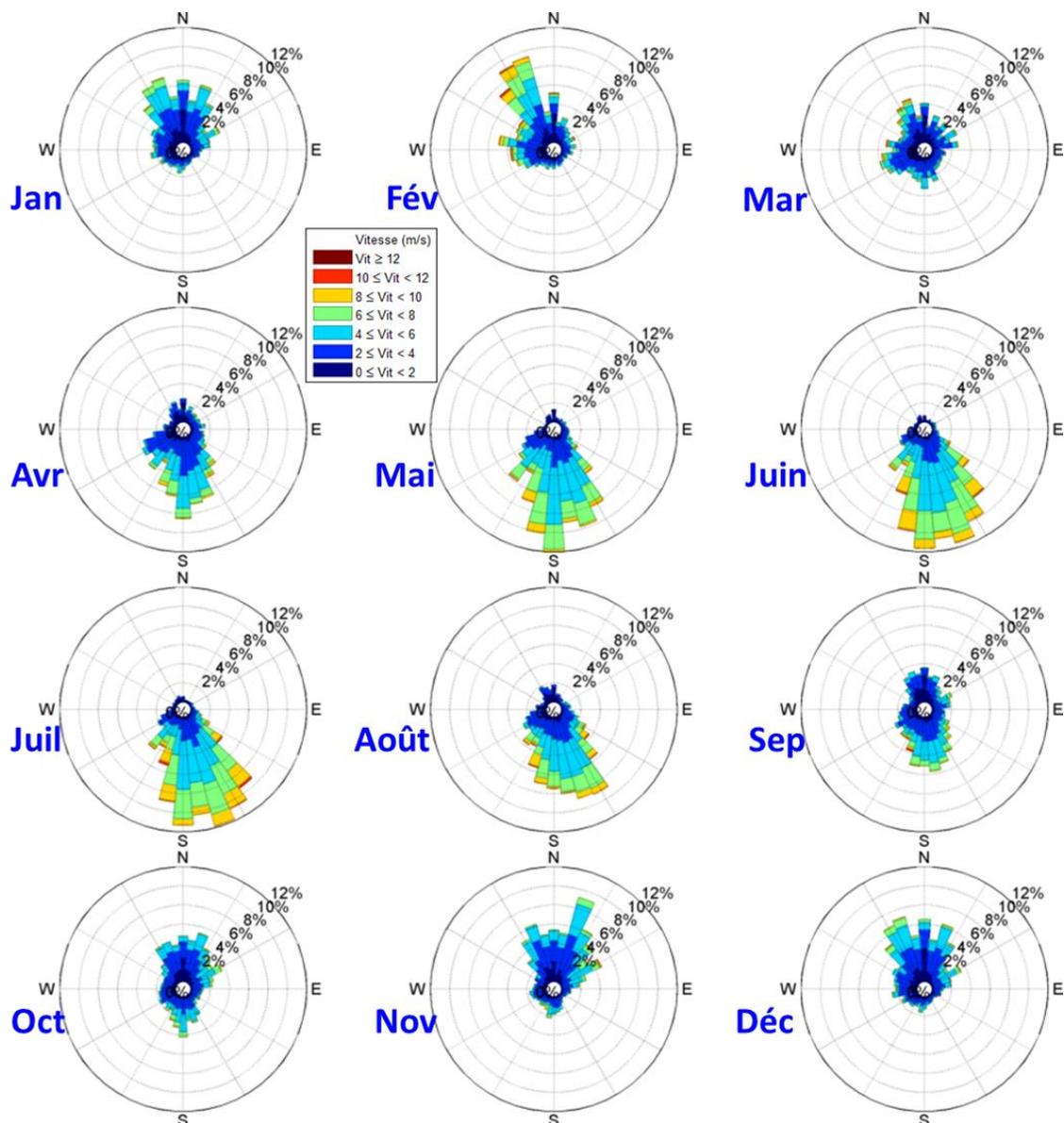


Figure 7: Caractéristiques mensuelles des vents sur la période 1951-2007 pour la station météorologique de Pamandzi.

## 2.4. LES NIVEAUX D'EAU

### 2.4.1. La marée astronomique

A Mayotte, les marées sont de type semi-diurne à inégalité diurne. Le marnage est de type méso-tidal. Le marnage caractéristique à Dzaoudzi (45°15' E et 12°47' S) est donné dans le tableau ci-après. L'onde de marée provient du Nord-Nord-Est au flot et du Sud-Sud-Ouest au jusant.

Tableau 1 : Références altimétriques maritimes au port de Dzaoudzi (Source : SHOM, 2017)

Marée type*	Niveau Cote Marine	Niveau IGN (m)
PHMA	4,30	2,52
PMVE	3,70	1,92
PMME	2,80	1,02
NM	2,13	0,35
BMME	1,45	-0,33
BMVE	0,50	-1,28
PBMA	0,08	-1,70

### 2.4.2. Surcote et décote

Les surcotes atmosphériques générées à l'intérieur du lagon par le passage des dépressions et cyclones tropicaux ont été estimées par modélisation numérique dans l'étude CYCLOREF (Chateauminois *et al.*, 2015). A partir de simulations numériques de 20 cyclones historiques ayant affecté Mayotte sur la période 1981-2014, la surcote totale maximale dans le lagon à l'Est de Grande-Terre a été estimée à 0,36 m (plus forte surcote totale, CEREMA, 2019).

## 2.5. CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES

### 2.5.1. Conditions hydrodynamiques au large

En ce qui concerne les caractéristiques des houles (hauteur significative, période et direction), il n'existe pas de houlographe à proximité de Mayotte, les seules données disponibles sont issues de campagnes de mesure in-situ ponctuelles disponibles dans la bibliographie ou de modèles numériques globaux.

#### 2.5.1.1. Climatologie des houles au large

L'analyse des données d'états de mer au large issues des modèles WAVEWATCH III d'IFREMER permet de dégager les climats de houle suivants :

- Dominance d'états de mer du vent peu énergétiques (50 % des Hs < 1 m avec des périodes de 5 à 6 s),
- Seulement 1,5% des vagues >3 m, associées au passage des tempêtes et cyclones pendant l'été et au renforcement des alizés durant l'hiver,
- Le climat de houle est lié à la saisonnalité des vents avec les houles les plus fortes et les plus fréquentes provenant du Sud et dans une moindre mesure du Nord-Est. Ainsi :
  - D'octobre à mi-janvier (« *Miombéni* »), les houles sont faibles et proviennent majoritairement du secteur N-NE avec une dominance de vagues <1 m (88%), 10% des vagues comprises entre 1 et 2 m, et 2 % des vagues > 2 m,
  - De janvier à mars (« *Kashkasi* »), les houles de secteur N-NW sont plus fortes : <1m (78%), 19% des vagues comprises entre 1 et 2m, 3 % des vagues > 2m,

- o D'avril à septembre, l'agitation est la plus forte : 60% <1 m, 35 à 38% entre 1 et 2 m et 2 % >2 m. D'avril à juin (« Koussi »), la direction de provenance des vagues est de S-SW à S-SE puis à partir de juillet (« Matoulai »), la proportion de houle S-SE augmente.

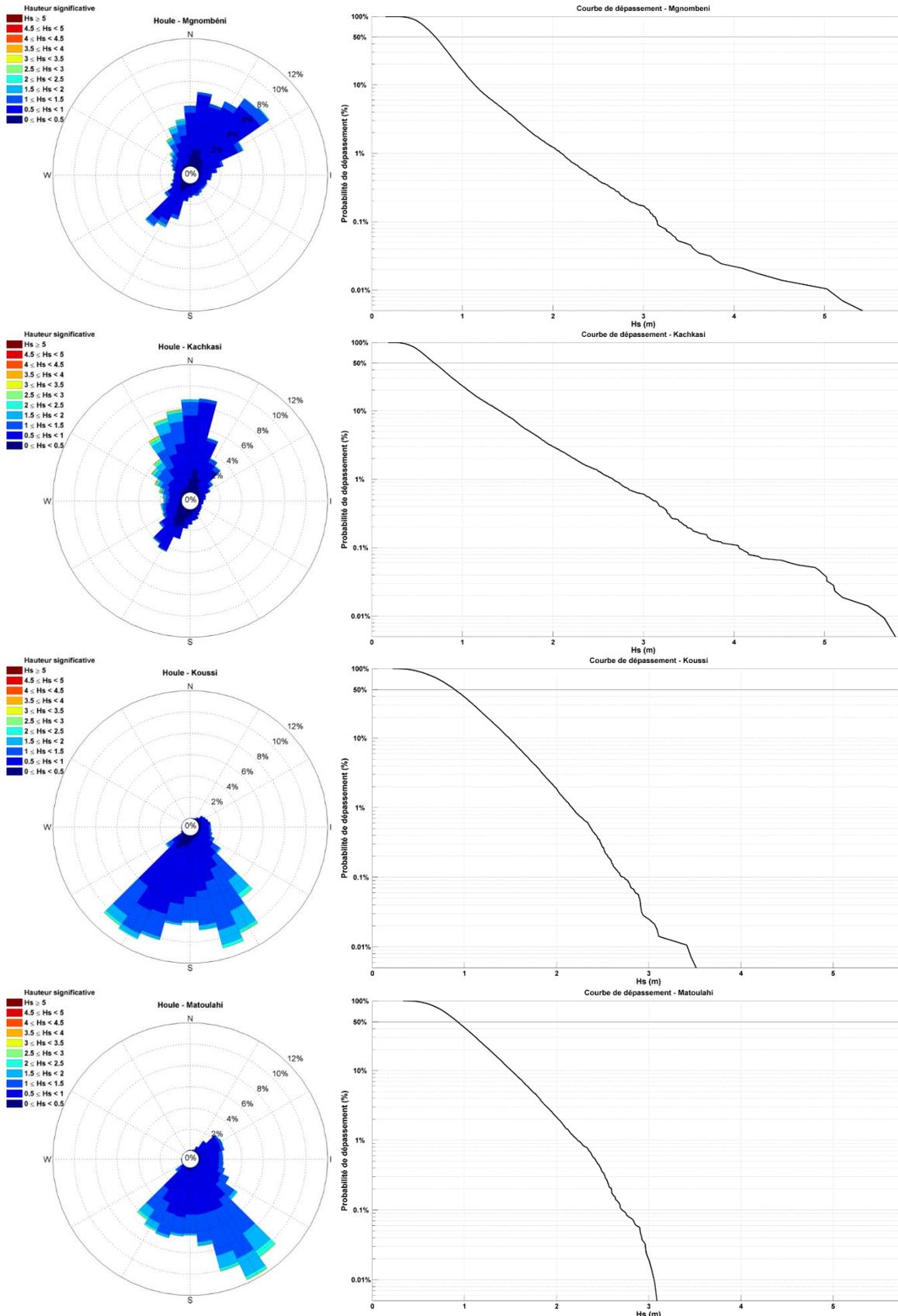


Figure 8 : Rose des houles et courbes de dépassement de hauteur significative pour les 4 saisons

### 2.5.1.2. Courantologie régionale

A l'échelle régionale, Mayotte est située sur une branche du Courant Sud Equatorial (CSE) et à l'extrémité Nord de la zone de tourbillons générés dans le canal du Mozambique (Shouten *et al.*, 2003). Les figures ci-dessous, issues des modèles globaux Mercator Océan, illustrent les modulations saisonnières des courants régionaux.

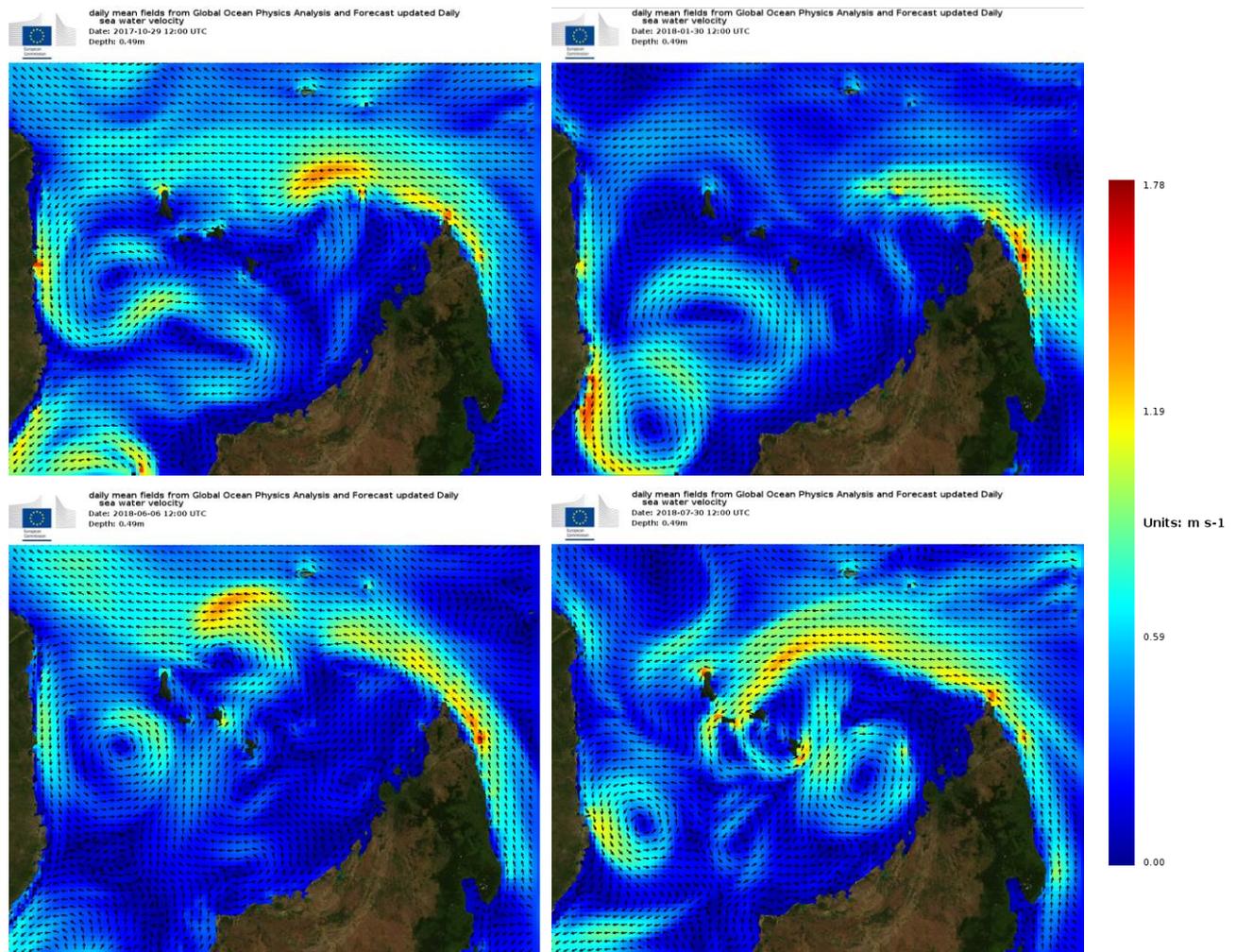


Figure 9. Illustration des courants généraux à proximité de l'archipel des Comores

### 2.5.2. Conditions hydrodynamiques dans le lagon

Différentes études ont pu être recensées traitant de la circulation hydrodynamique au sein du lagon de Mayotte basés sur :

- Des campagnes de mesures in-situ ponctuelles : Guilcher, 1965 ; Thomassin, Gourbesville, 1998 ; Shom, 1985 ; Jeanson, 2009,
- Des modèles courantologiques: le modèle SAFEGE (De la Torre *et al.*, 2008 ; Jeanson, 2009) ; le modèle du BRGM (Idier *et al.* 2008) ; et celui de l'IRD (Chevalier *et al.*, 2017).

Cependant, les données disponibles à ce jour concernant la circulation hydrodynamique spécifique à la zone d'étude sont très limitées.

Les grands traits de la courantologie lagonaire dégagés à partir de ces différentes études peuvent être synthétisés comme suit :

- Les courants à l'intérieur du lagon sont peu influencés par les courants régionaux,

- Ils subissent une alternance de direction en fonction du régime de marée : ainsi, au flot les courants sont orientés Nord/Sud tandis qu'au jusant, ils sont orientés Sud/Nord,
- Dans le voisinage de la zone d'étude, la circulation hydrodynamique est également influencée par la morphologie de la côte et notamment par le détroit formé entre la Pointe Mahabou et Petite-Terre (Chevalier *et al.*, 2017). Dans ce secteur, les courants peuvent être supérieurs à 0,5 m/s. De plus, les mesures in-situ réalisées dans ce secteur montrent que 50% des courants ne sont pas associés aux phénomènes tidaux et sont donc engendrés par d'autres phénomènes,
- En raison de la courantologie, le temps de résidence des masses d'eau au voisinage de la zone d'étude est estimé inférieur à 20 jours.

### 2.5.3. Conditions hydrodynamiques de l'anse Choa

L'anse Choa, au fond de laquelle se situe le terre-plein du marché de Mamoudzou (ancien « quai des Douanes », cf. THOMASSIN *et al.*, 2000), est une zone de relatif calme hydrodynamique, car :

- Elle est à l'abri des courants de marées traversant le détroit de Mamoudzou – Pointe Choa (ou Mahabou) et Pointe de Dzaoudzi (Gourbesville & Thomassin, 1998 ; Gourbesville *et al.*, 2000 ; SAFEGE, 2005 ; CHEVALIER *et al.*, 2008),
- Elle est protégée des vents d'Est par l'île de Pamandzi, des vents de Sud par la Pointe Choa, et des vents de Nord-Nord-Est par le récif frangeant des 4 Frères.

La modélisation hydrodynamique (Gourbesville *et al.*, 2000) montre que :

- Par vent de N-NE, à la pleine mer de mortes-eaux, on observe la formation d'un courant littoral le long du rivage de la partie Sud de l'anse Choa, avec un "oeil" de calme hydrodynamique au centre de celle-ci,
- Par vent de Sud, en pleine mer de mortes-eaux, au contraire, on observe un transfert littoral longeant d'Est en Ouest le bord Nord de la Pointe Mahabou, puis vers le Nord le littoral de l'anse Choa (niveau du ponton du port de plaisance). Cette situation est également observée à basse-mer. La dérive littorale vers le Nord est encore plus forte en pleine mer de vives-eaux.

## 2.6. BATHYMETRIE

Dans sa partie maritime, la bathymétrie est régulière et descend en pente douce au Nord. Elle est plus accidentée au Sud, avec des pinacles coralliens épars, jusqu'à présenter des pentes importantes aux abords de la pointe Mahabou. (Figure 11, page 20). La zone au droit du futur aménagement du PEM est dépourvue de récifs frangeants mais il est à noter la présence de pinacles coralliens plurimétriques selon un axe Est-Ouest dans l'alignement de l'extrémité Sud du quai « croisiéristes ».

Des hauts-fonds sont également présents à l'extrémité Nord, au niveau de la Pointe Hamaha.

## 2.7. NATURE DU TRAIT DE COTE

La zone fait partie de la province sédimentaire allant de la Pointe du Rassi Douamounyo à la Pointe de Mahabou qui se caractérise par des côtes majoritairement rocheuses. Vingt-deux pourcents du linéaire de cette province est artificialisé dont la zone d'étude. La gare maritime de Mamoudzou et le quai « croisiéristes » ont été construits entre 1986 et 1989 sur une avancée rocheuse du front de mer. Cet aménagement a fait l'objet d'un remblai pour une extension sur la mer (Figure 10).



Figure 10 : Remblaiement du quai des douanes (à gauche BD Ortho historique IGN 1950, à droite BD Ortho HR 2016, source : CEREMA 2017)

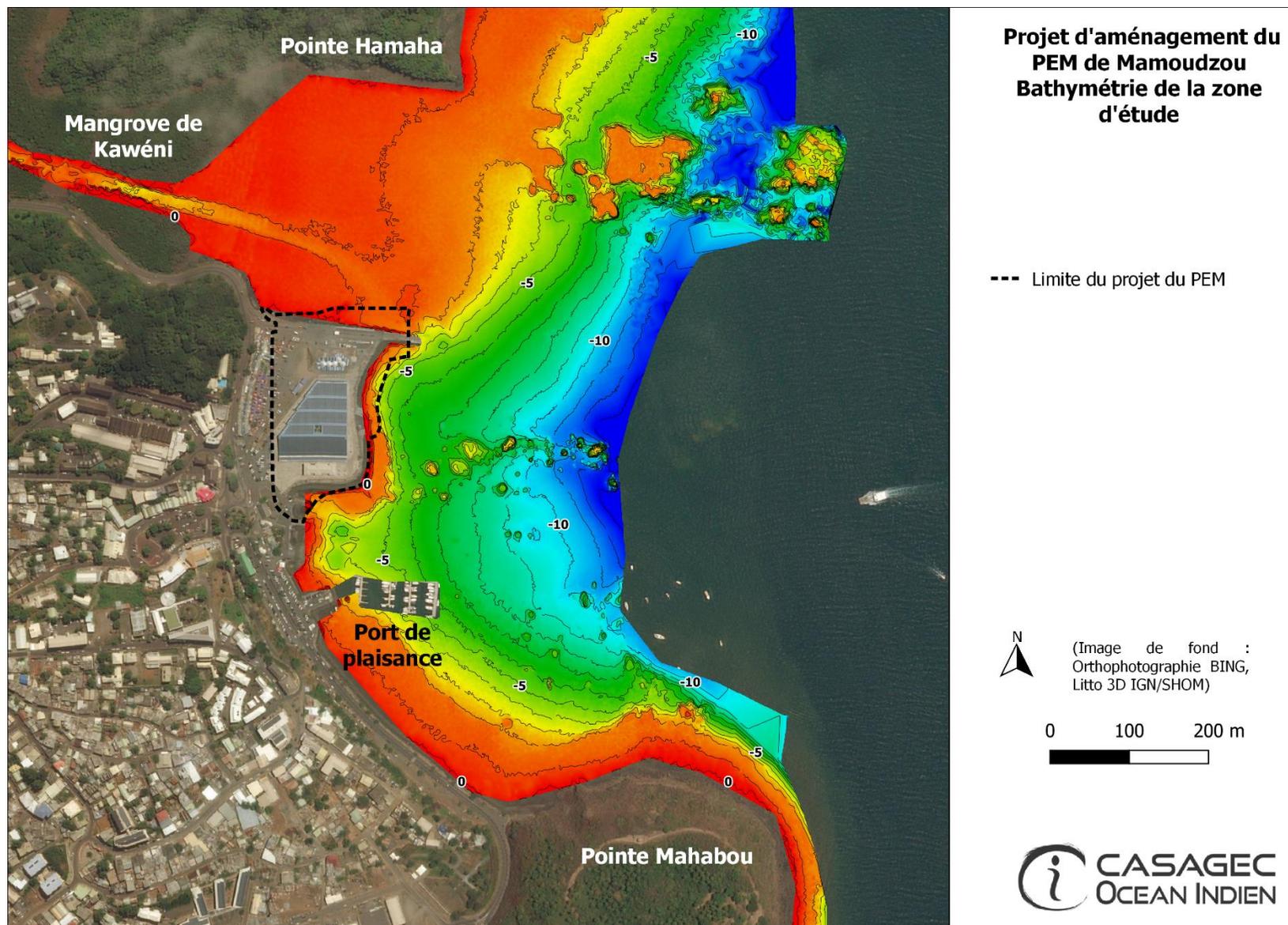


Figure 11: Bathymétrie de la zone d'étude.

## 2.8. HYDROLOGIE

### 2.8.1. Bassins versants et cours d'eau dans le voisinage de la zone d'étude

La zone de projet se situe dans le secteur de la Kawéni, caractérisé par trois cours d'eau dont le plus important est la rivière Kaouénilajoli, de par ces crues torrentielles.

Leurs exutoires sont localisés dans la mangrove de Kawéni



Figure 12 : Réseau hydrographique dans le voisinage de la zone d'étude (source : DEAL Mayotte, Les cours d'eau à enjeux sur Mayotte : La Gouloué, Kawenilajoli et Kirissoni. Rapport de présentation de la cartographie du Risque inondation sur le Territoire à Risque Important)

### 2.8.2. Débit liquide de la Kaouénilajoli

La rivière Kaouénilajoli présente un bassin versant intermittent, partiellement à sec durant l'année, alimenté soit par écoulement, soit par des sources aquifères (Jaouën *et al.*, 2011). Les débits y sont globalement faibles voire nuls.

Lors du passage de cyclones et dépressions tropicales (les précipitations sont concomitantes à une surcote marine atmosphérique), d'importants phénomènes de crue sont observés. Les débits de pointe caractéristiques en crue de la Kawéni (Sud, centrale et Nord) sont évalués<sup>1</sup> à :

- 3 000m<sup>3</sup>/s pour l'événement extrême,
- 750m<sup>3</sup>/s pour l'événement moyen,
- 300m<sup>3</sup>/s pour l'événement fréquent.

<sup>1</sup> Les cours d'eau à enjeux sur Mayotte : La Gouloué, Kawenilajoli et Kirissoni. Rapport de présentation de la cartographie du Risque inondation sur le Territoire à Risque Important. DEAL

### 2.8.3. Débit solide

Les mangroves situées dans des estuaires ou en fond de baies sont soumises à des écoulements d'eaux douces dont les variations de débit peuvent être importantes en fonction des saisons.

Les sédiments observés dans les mangroves sont en majeure partie constitués de limons et d'argiles (de 40 à 80 %). Ils comportent également une fraction grossière de granules, ainsi que des sables grossiers, à très grossiers (Herteman, 2010). Ces écoulements apportent au lagon d'importantes quantités de sédiments issus de l'érosion des sols : il s'agit essentiellement de sédiments argileux et de sédiments issus de roches volcaniques. Les estimations de volumes transportés sont de l'ordre de 300 000 à 600 000 t/an (Lapègue, 1999 ; Ferret, Sarrailh, 2005). Le volume moyen annuel est de 293 560 t de matériel détritique en mer (De La Torre, Aubie, 2003).

## 2.9. QUALITE DE L'EAU

### 2.9.1. Etat de la masse d'eau

Pour la mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE 2000/60/CE), un état des lieux du bassin hydrologique réalisé en 2006, a conduit à retenir 17 masses d'eau côtières réparties selon 8 types distincts pour le suivi de l'état écologique et chimique des eaux littorales (internes au récif barrière).

La zone d'étude se situe au sein de la masse d'eau FRMC10 « Mamoudzou - Dzaoudzi (côtière) » (Figure 13) appartenant au Type 6 « Eaux côtières » qui se caractérise par :

- Renouvellement eau : Faible à Moyen,
- Courant : Fort,
- Houle (intensité, nature) : Faible à Moyen, Mousson,
- Fond : Moyen,
- Substrat dominant : Sablo-vaseux.

Depuis 2013, la compétence de surveillance doit être transférée des DEAL vers les Offices de l'eau. En l'absence d'office de l'eau sur Mayotte, la maîtrise d'ouvrage de la surveillance des eaux littorales a été transférée à l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB) – Parc Naturel Marin de Mayotte (PNM Mayotte). Ainsi, le PNM Mayotte sous-traite et participe, au travers du Réseau hydrologique du littoral mahorais (RHLM), à l'acquisition de données de qualité des eaux littorales. Les paramètres physico-chimiques mesurés (Tableau 2) sont : la salinité, la température, le taux d'oxygène dissous, la turbidité et les nutriments, au cours de deux campagnes par année suivie : 1 campagne en période sèche (octobre-novembre), 1 campagne en période humide (mars-avril).

A l'heure actuelle, il n'y a pas de fascicule de prescriptions techniques pour les réseaux de surveillance DCE de Mayotte mais le groupe de travail s'est appuyé sur ceux réalisés pour La Réunion.

L'état des lieux du district hydrographique de 2013 classe l'état environnemental global comme « Médiocre » pour cette masse d'eau au regard de l'état écologique (Comité de bassin de Mayotte, 2015), avec cependant un niveau de confiance faible compte tenu du manque important de données antérieures.

Ces éléments sont toutefois confirmés par le bilan provisoire établi sur la base des résultats acquis dans le cadre du programme de surveillance DCE 2000/60/CE (Figure 14) et disponible sur le site envlit.ifremer.fr (dernière mise à jour 30/07/2018).

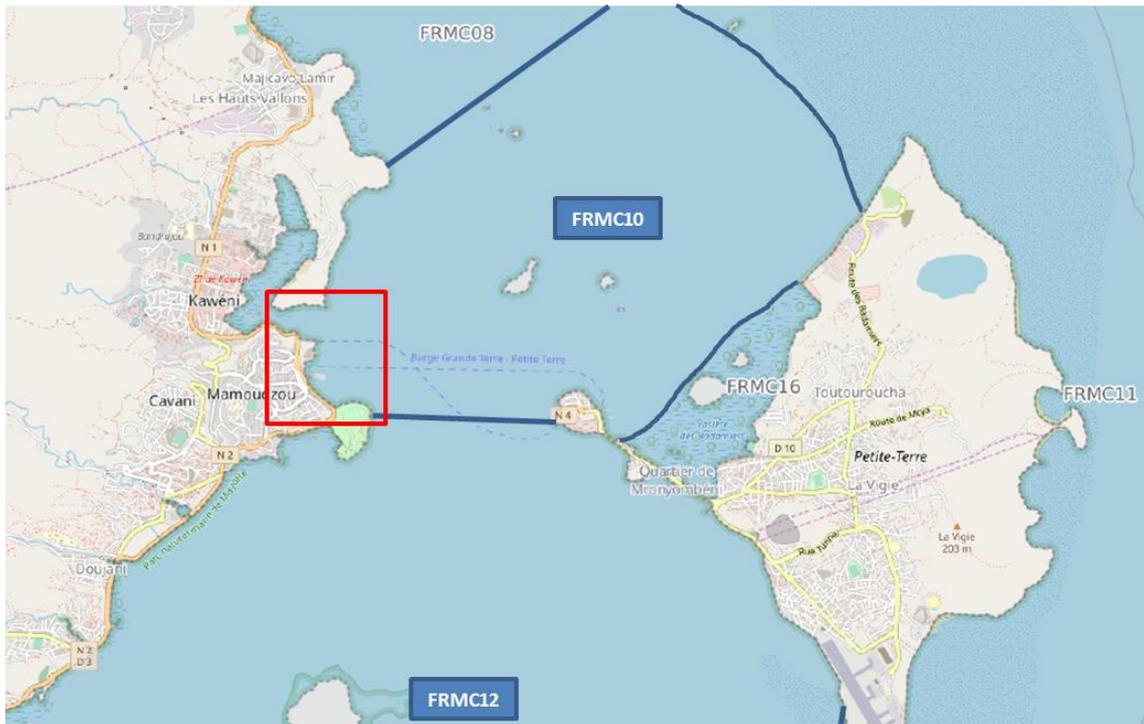


Figure 13: Localisation des masses d'eau DCE "FRMC10" aux abords du projet (matérialisé par le rectangle rouge) (source : wwz.ifremer.fr/surval)

Tableau 2 : Paramètres suivis sur les masses d'eau côtières tous types confondus

Paramètres	Surface (0-1m)	Fond-1m
Température	X	X
Salinité	X	X
Oxygène dissous	X	X
Turbidité	X	
Nutriments	X	
pH	X	X

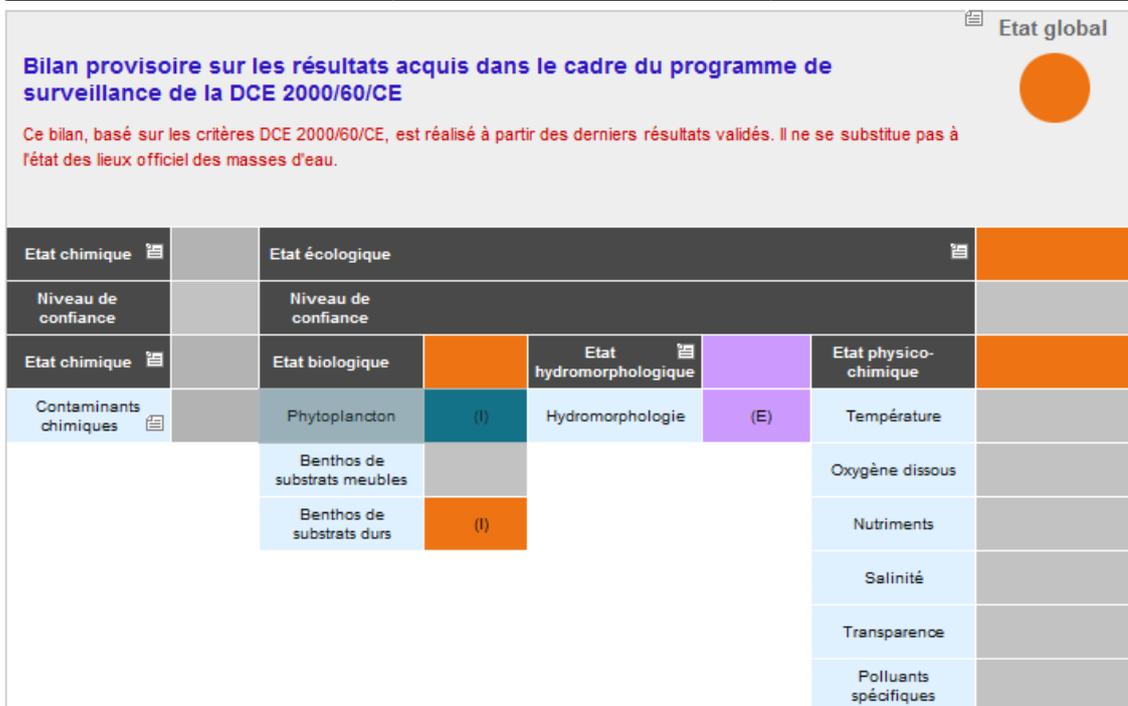


Figure 14: Etat écologique et chimique de la masse d'eau côtière FRMC10- Mamoudzou - Dzaoudzi (source : IFREMER Atlas DCE, envlit.ifremer.fr).

Dans la suite de l'étude, nous nous appuyons essentiellement sur les travaux issus de la DCE et notamment dans le cadre de l'évaluation de l'état et du Risque de Non Atteinte des Objectifs Environnementaux (RNAOE). Dans un contexte d'état environnemental considéré comme « Médiocre » pour cette masse d'eau FMRC10 au regard de l'état écologique (Comité de bassin de Mayotte, 2015), sont ici présentés les paramètres retenus pour le RNAOE (source : ARVAM, PARETO, 2013) :

- L'indicateur « température » peut se définir comme le pourcentage de valeurs de température de l'eau considérées comme exceptionnelles, c'est-à-dire qui sortent de l'enveloppe de référence considérée comme assurant le bon fonctionnement écologique d'un écosystème et qu'il reste à définir sur Mayotte,
- L'indicateur « salinité » a été déclaré non pertinent par les experts, car les prélèvements instantanés tels que prescrits par la DCE ne permettent pas de suivre la durée et la fréquence d'éventuelles dessalures. Il est cependant indispensable de continuer à mesurer ce paramètre afin d'appuyer l'interprétation des autres paramètres hydrologiques (nutriments et oxygène dissous) et biologiques.
- L'indicateur « oxygène dissous » est caractérisé par le paramètre « concentration en oxygène dissous dans l'eau mesurée à 1 m au-dessus du fond » pour observer les éventuels phénomènes de désoxygénation. L'indicateur est défini par le percentile 10 et les seuils au niveau national (voir ci-dessous).
- L'indicateur « turbidité » s'est porté sur le choix du percentile 90, en raison de l'impact des valeurs élevées de turbidité sur la survie et le développement des organismes vivants. Une grille avec 0,4 NTU comme valeur de référence a été proposée aux référents DCE nationaux pour validation.
- L'indicateur « paramètre nutriments » est ici défini comme étant la combinaison des indices ammonium, nitrate, nitrite, phosphate et silicate ; dont la pertinence de certains reste à l'étude en métropole. Actuellement cet indicateur intègre uniquement les concentrations d'azote inorganique dissous (NID ; c'est à dire la somme ammonium + nitrate + nitrite).

Tableau 3 : Grille de qualité pour les paramètres retenus (PARETO, ASCONIT, 2013)

Grille de qualité nationale	Très bon	Bon	Moyen	Médiocre	Mauvais
Paramètre « Température »	< 5% en dehors de l'enveloppe				> 5% en dehors de l'enveloppe
<b>Paramètre « oxygène dissous »</b>					
Grille de l'indice (mg/L)	> 5	3 - 5	2 - 3	1 - 2	< 1
<b>Paramètre « Turbidité »</b>					
Valeurs de référence	écotype 1 et 2 : 3,3 NTU				
Grille de l'indice (NTU)	< 5	5 - 10	> 10		
Valeurs de référence	Adaptation La Réunion : 0,4 NTU				
Grille de l'indice (NTU)	< 0,6	0,6 - 3,0	> 3,0		
<b>Paramètre « Nutriments »</b>					
NID (mmol/L)	< 16	16 - 29	> 29		

### 2.9.2. Eléments de connaissance actuelle sur la qualité de l'eau

Le fonctionnement interne du lagon de Mayotte résulte des échanges entre les différents secteurs récifolagunaires (Duran et Thomassin, 1992), combinés à ceux avec l'océan via les passes récifales, et le littoral. Soumis par ailleurs à différentes sources de pression (volcanisme, impacts anthropiques, ...), les compartiments eau comme sédiment voient leurs paramètres physico-chimiques évoluer en permanence. Il est donc objectivement difficile de présenter des valeurs type pour ces compartiments.

Des données visant à qualifier la qualité de l'eau ont néanmoins été acquises au sein de la zone d'étude dans le cadre d'une étude portant sur la contamination des eaux et sédiments portuaires à Mayotte (Cambert *et al.*, 2011a). Cette étude couvrait un secteur depuis l'extrémité du quai Colas, au Nord, jouxtant l'embouchure de la Kawéni ; jusqu'au ponton des Croisiéristes, au centre du terre-plein du marché ; et à l'embarcadère des barges. Dans ce cadre, des prélèvements d'eau ont notamment été mis en œuvre en mai 2010 au niveau des quatre ports de commerce ou de plaisance (Mamoudzou, Dzoudzi, Boueni, Longoni), dont 4 points localisés dans la zone d'étude (cf. Figure ci-dessous).

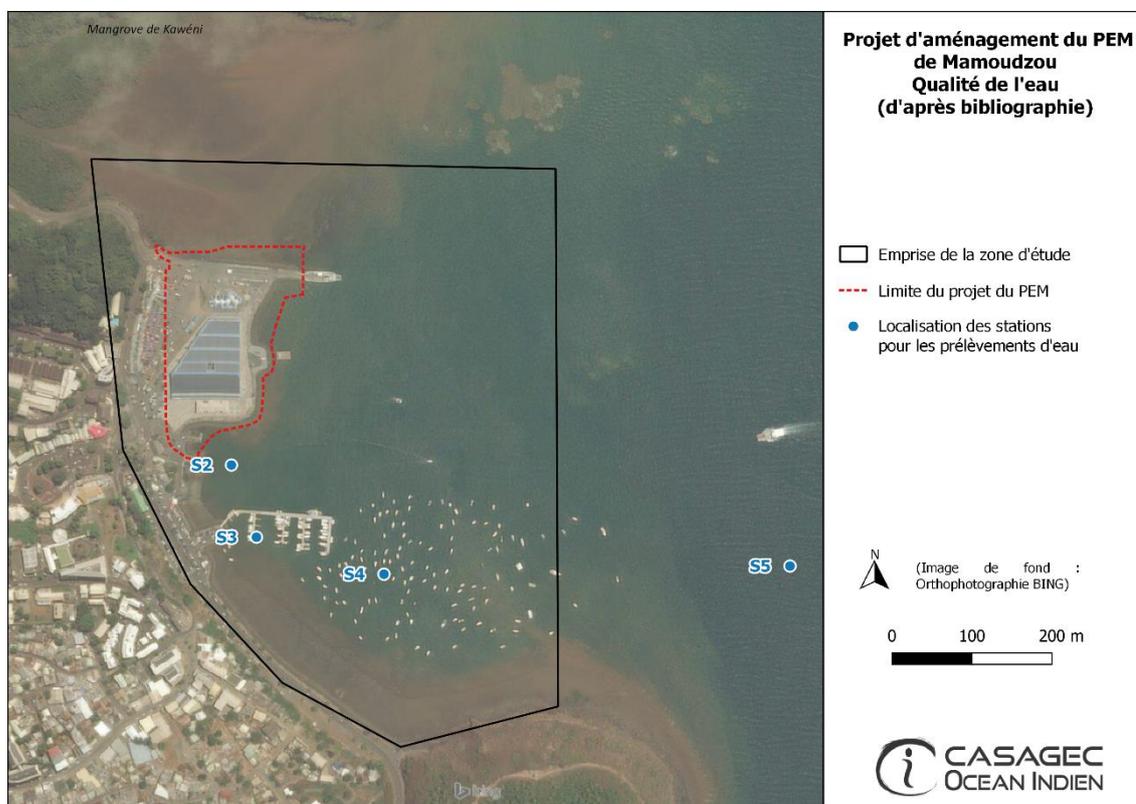


Figure 15 : Localisation des stations de prélèvement eau suivies dans le cadre de l'étude antérieure de Cambert *et al.*, 2011a.

Au regard des données physico-chimiques recueillies lors de cette étude, aucune anomalie particulière n'est relevée. Les résultats paraissent conformes aux gammes de valeur observées dans le cadre du RHLM (Réseau Hydrologique du Littoral de Mahorais).

Tableau 3 : Résultats des paramètres hydrologiques généraux mesurés au niveau des 4 stations localisées à proximité de la zone d'étude (d'après Cambert *et al.*, 2011a)

Stations	T (°C)	Conductivité (mS/cm)	Salinité (PSU)	Oxygène (%)	Oxygène (mg/l)	pH	Turbidité (FSU)
S2	29,3	54,7	35,67	81,3	5,37	8,16	3,3
S3	29,2	54,1	35,68	85,9	5,4	8,16	3,1
S4	29	52,5	34,4	82,3	5,32	8,15	1,7
S5	29,2	53,3	35,03	88,4	5,57	8,16	1,9

En termes de qualité chimique, 11 biocides ont été analysés dont une molécule listée comme substance prioritaire par la DCE : le Diuron, herbicide sélectif dont la vente et l'utilisation sont interdites depuis 2003, pour une utilisation en agriculture. Dans les peintures antisalissures, son utilisation reste à ce jour non légiférée. Au niveau du port de Mamoudzou, devant le débarcadère des barges près du « café 5/5 », les eaux côtières ne paraissent pas encore trop contaminées par divers polluants considérés comme « biocides ». Seuls du Diuron (un herbicide) et un peu de DCA (3,4 di-chloro-aniline), un produit de dégradation de ce Diuron, y ont été trouvés (Cambert *et al.*, 2011a).

## 2.10. NATURE, ORIGINE ET QUALITE DES SEDIMENTS

### 2.10.1. Nature des sédiments

Le littoral de Mayotte est découpé en six unités morphosédimentaires au sein desquelles les types de côte et l'exposition face aux forçages hydrodynamiques sont homogènes. Le littoral de Mamoudzou, objet de la présente étude, appartient au secteur Nord-Est, de la pointe de Rassi Douamounyo à la pointe de Mahabou (Cerema, 2019).

Le lagon de Mayotte se caractérise par une faible profondeur et des forts courants de marée dans les passes des récifs. La répartition des sédiments sur les fonds marins s'explique par les contraintes hydrodynamiques (voir section 2.5) et par l'héritage géologique récent. La répartition des sédiments varie selon les profondeurs du lagon : le pourcentage de fines (particules de diamètre inférieur à 63µm) est élevé dans le glacis distal et la plaine abyssale ; à l'inverse le domaine fronto-récifal exposé à la houle est composé de sables grossiers et moyens. La plaine sédimentaire est composée de vase terrigène près des côtes et de sables bioclastiques carbonatés près du lagon distal (Zinke, 2000 ; Zinke *et al.*, 2001 ; Jeanson, 2009). Le platier récifal constitue une zone recouverte d'herbiers de phanérogames et de dépôts détritiques fluviatiles près des côtes et de matériel plus grossier ou induré (sables, débris coralliens) près du front récifal (Jeanson, 2009).

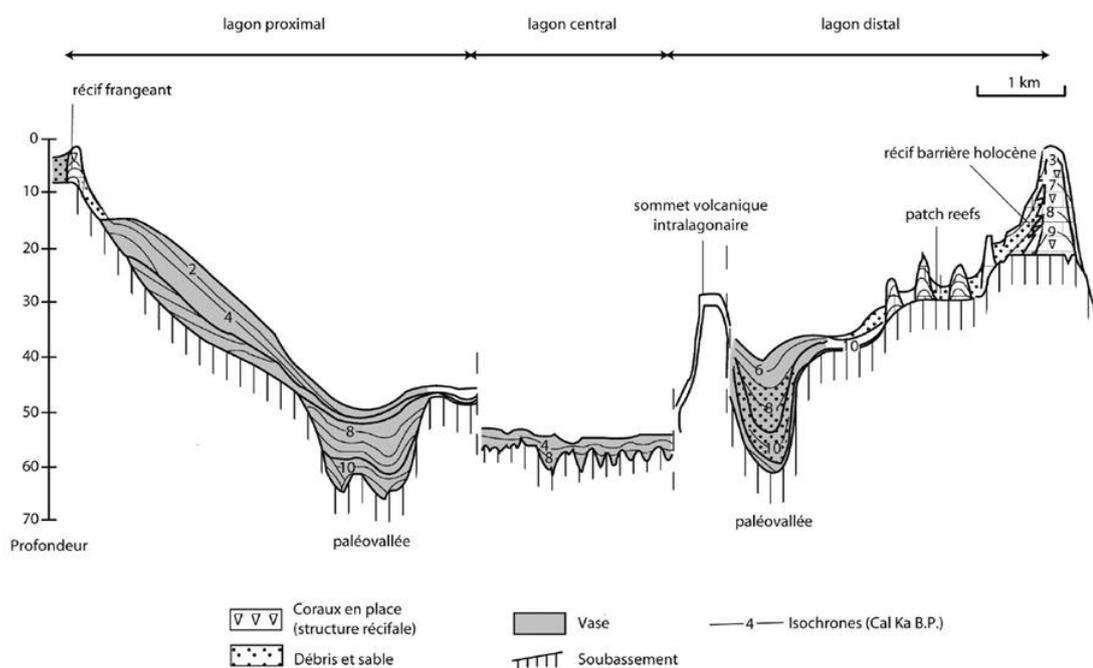


Figure 16 : Coupe transversale généralisée du système récifo-lagonnaire de Mayotte (Jeanson, 2009 d'après Zinke *et al.*, 2001)

La connaissance de la répartition générale des sédiments au sein du lagon a été améliorée dans le cadre de la Directive cadre sur l'Eau (DCE) avec des campagnes menées en 2008 et 2010 (Pareto, Asconit, 2013). Au sein de la masse d'eau côtière « FRMC10-Mamoudzou-Dzaoudzi », le substrat dominant présente une proportion de fines comprise entre 5 % et 75 %.

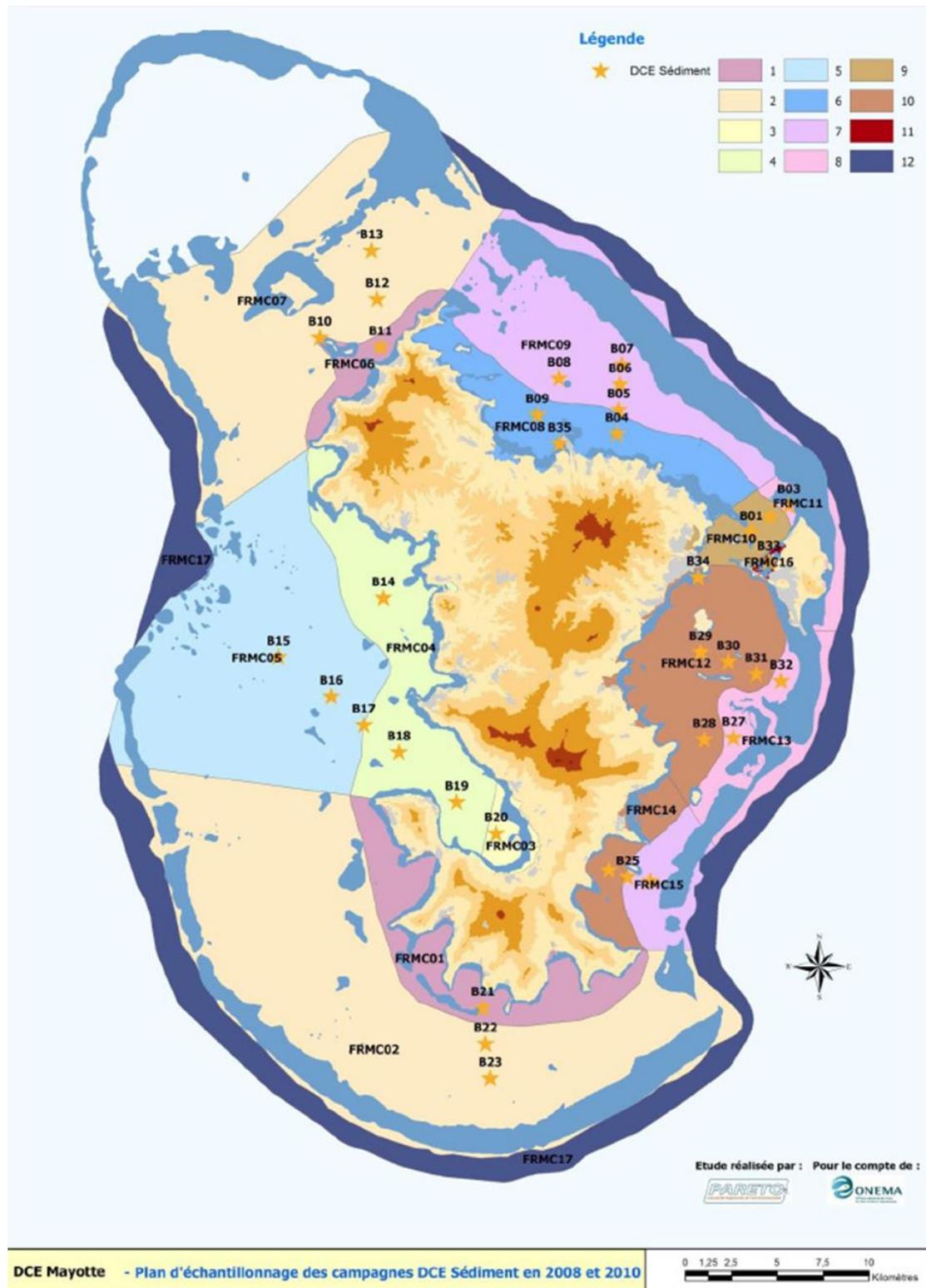


Figure 17 : Stations d'échantillonnage des sédiments des campagnes Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) 2008 et 2010 et délimitation des masses d'eau côtières (Pareto et Asconit, 2013) (Les classes de couleurs correspondent aux 12 types de masse d'eau : 5 masses d'eau côtières, 4 masses d'eau lagonaires, baie de Bouéni, vasière des Badamiers et la masse d'eau du large.

### 2.10.2. Origine des sédiments

Deux sources préférentielles des sédiments sont présentes sur les fonds marins de Mayotte :

- Des sédiments biogènes carbonatés issus des récifs et des fonds sableux lagonaires,
- Des sédiments meubles sablo-vaseux qui, avec l'accroissement de l'érosion terrestre, tendent à envahir les baies côtières et les zones lagonaires proximales.

### 2.10.3. Qualité des sédiments

Des données visant à qualifier la qualité des sédiments ont été acquises au sein de la zone d'étude (Figure 18) :

- Teneurs en polluants des sédiments de la mangrove de Kaouéni (Thomassin *et al.*, juillet 2006) : Comparaison de la qualité des sédiments de la mangrove anthropisée de Kaouéni et de la mangrove non anthropisée d'Ironi Bé.
- Contamination eaux et sédiments portuaires - Mayotte (Cambert *et al.*, 2011a) : Mise en œuvre de prélèvements d'eau et de sédiments en mai 2010 au niveau des quatre ports de commerce ou de plaisance (Mamoudzou, Dzoudzi, Boueni, Longoni),
- Rapport final DCE sédiment Mayotte (Cambert *et al.*, 2011b) : Dans le cadre du programme de définition des réseaux de surveillance « qualité des masses d'eau côtières » de Mayotte, une campagne de prélèvement a été mise en œuvre en mai 2010 afin de :
  - Réaliser un test pour la mise en œuvre opérationnelle des campagnes de prélèvement du futur réseau de surveillance, en particulier sur les moyens à la mer à mobiliser,
  - Acquérir des données de référence pour les sédiments du lagon de Mayotte sur des paramètres peu étudiés localement : macrofaune endogée et contamination chimique,
  - Appliquer les grilles ou indices DCE aux données collectées afin de réaliser un premier diagnostic.

La station K1 (Figure 18) localisée sur l'estran vaseux situé au débouché du chenal de Kaouéni dans le lagon (Thomassin *et al.*, 2006) présente une contamination métallique (Tableau 4 page 31). Le chrome, le nickel, le zinc présentent en effet des concentrations supérieures à celles des vases de la mangrove non anthropisée d'Ironi Bé et au niveau de référence N1 et N2 de l'arrêté du 09 août 2006 dans sa version consolidée. Les autres éléments traces métalliques présentent quant à eux des valeurs comparables, voire inférieures.

Concernant les sédiments du port de Mamoudzou (station B34, Figure 18), les résultats soulignent également une contamination métallique des sédiments du port de Mamoudzou (Tableau 4 page 31), où une concentration en Arsenic plus de cinq fois supérieure au niveau N2 de l'arrêté ministériel a été enregistrée en mai 2010 (Cambert *et al.*, 2011b). Cette forte valeur peut être le reflet d'apports anthropiques. Les sources potentielles connues sont : la combustion des énergies fossiles (apports par voie atmosphérique dominante) : le charbon en particulier et dans une moindre mesure le pétrole, ou encore les traitements antifongiques, insecticides (vignes, protection du bois, peintures antisalissure des bateaux), désherbants. Un dépassement du niveau N2 est également enregistré pour le Nickel et deux dépassements du N1 sont observés pour le Chrome et le Cuivre. Pour le Chrome et le Nickel, ces valeurs élevées peuvent être liées aux caractéristiques naturelles volcaniques des sols de l'île. Concernant le Cuivre, l'hypothèse qui aurait pu être envisagée est celle d'une diffusion et d'un stockage dans les milieux portuaires de peintures antifouling à base de cuivre, qui se sont progressivement substituées depuis une dizaine d'années aux anciennes peintures composées à base d'étain. Toutefois, cette hypothèse n'est pas confortée du fait de l'absence d'autres indicateurs de pollution (hydrocarbure et PCB notamment). L'altération des roches volcaniques de l'île pourrait également expliquer cette valeur.

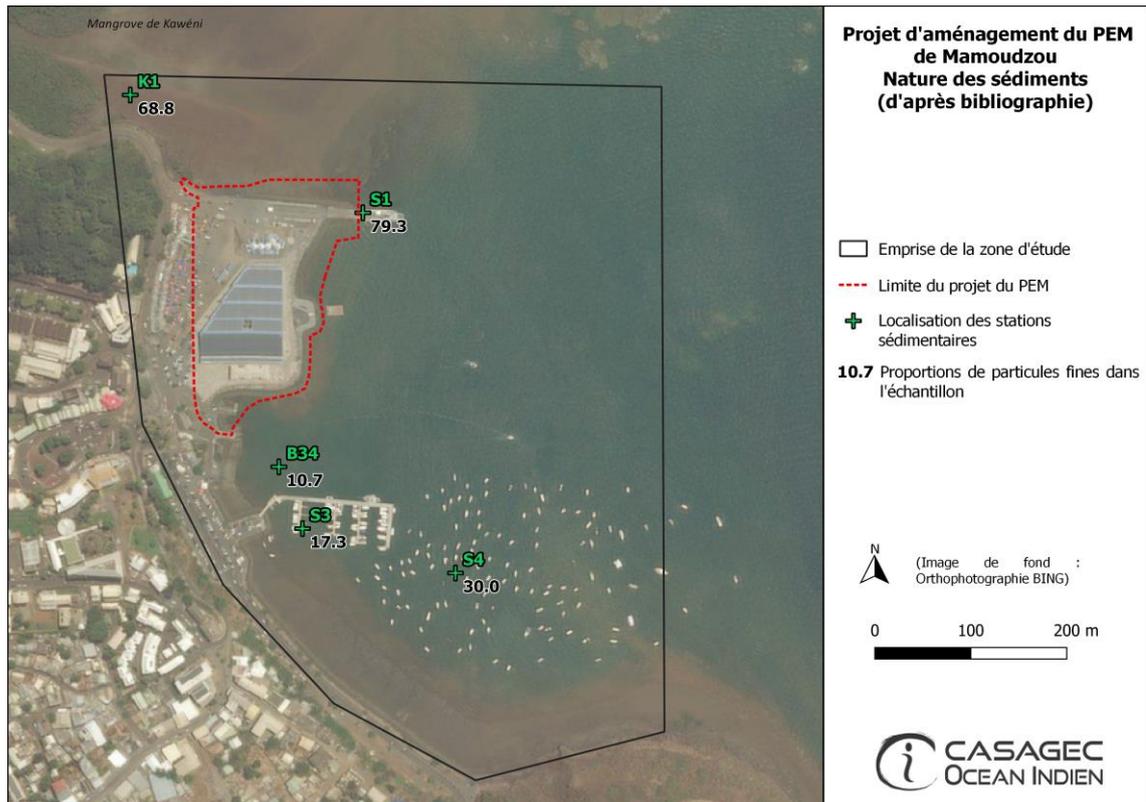


Figure 18 : Localisation des stations de prélèvement sédimentaire suivies dans le cadre d'étude antérieures (d'après données bibliographiques : Thomassin *et al.*, 2006, Cambert *et al.*, 2011a, et Cambert *et al.*, 2011b).

Tableau 4: Compilation des résultats d'analyses sédimentaires issus d'études antérieures mises en œuvre sur la zone d'étude

Paramètres	Unités	Seuils		B34	S1	S3	S4	K1
		N1	N2					
Fines <63 µm	%	-	-	10.7	79.3	17.3	30	68.83
Matière sèche totale	% m. brute	-	-	73.2	43.6	69.9	66.7	
<b>METAUX</b>								
Arsenic (As)	mg/kg MS	25	50	265				11
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	1.2	2.4	<0.1				0.1
Chrome (Cr)	mg/kg MS	90	180	137				493
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	45	90	24	53	19	19	59
Mercure (Hg)	mg/kg MS	0.4	0.8	0.05				0.15
Nickel (Ni)	mg/kg MS	37	74	93				193
Plomb (Pb)	mg/kg MS	100	200	4				2.5
Zinc (Zn)	mg/kg MS	276	552	122	202	173	181	248
<b>PCB</b>								
PCB 28	µg/kg MS	5	10	<1				0.2
PCB 52	µg/kg MS	5	10	<1				0.4
PCB 101	µg/kg MS	10	20	<1				0.98
PCB 118	µg/kg MS	10	20	<1				0.25
PCB 138	µg/kg MS	20	40	<1				0.65
PCB 153	µg/kg MS	20	40	<1				0.56
PCB 180	µg/kg MS	10	20	<1				0.33
Σ 7 PCB	µg/kg MS	-	-	<1				4.3659
<b>HAP</b>								
Acénaphthylène	µg/kg MS	40	340	<10				<10
Acénaphthène	µg/kg MS	15	260	<2,00				<10
Anthracène	µg/kg MS	85	590	<1,00				<10
Benzo(a)pyrène	µg/kg MS	430	1015	24,4				5
Benzo(b)fluoranthène	µg/kg MS	400	900	26,3				11
Benzo(a)anthracène	µg/kg MS	260	930	3,98				5
Benzo(ghi)Pérylène	µg/kg MS	1700	5650	18,7				5
Benzo(k)fluoranthène	µg/kg MS	200	400	12,9				5
Chrysène	µg/kg MS	380	1590	4,37				7.5
Dibenzo(a,h)anthracène	µg/kg MS	60	160	5,95				<10
Fluoranthène	µg/kg MS	600	2850	<2,00				11
Fluorène	µg/kg MS	20	280	<5,00				<10
Indeno (1,2,3-cd) Pyrène	µg/kg MS	1700	5650	24,00				7.5
Naphtalène	µg/kg MS	160	1130	<1,00				7.5
Phénanthrène	µg/kg MS	240	870	<5,00				7.5
Pyrène	µg/kg MS	500	1500	<2,00				7.5
Somme des HAP	µg/kg MS	-	-					
<b>PRODUITS ORGANIQUES DIVERS</b>								
Dibutylétain	µg /kg MS	-	-	7.1	<LQ	<LQ	<LQ	<10
Monobutylétain	µg /kg MS	-	-	4.3	<LQ	<LQ	<LQ	14
Tributylétain	µg/kg MS	100	400	3.3	<LQ	<LQ	<LQ	<10
<b>NUTRIMENTS</b>								
Phosphore total	mg/kg MS	-	-	2160				2852

Légende :

[X]<N1	N1≤[X]<N2	N2≤[X]	No data
--------	-----------	--------	---------

### 3. PRESENTATION GENERALE DES AMENAGEMENTS DU PEM

#### 3.1. NATURE ET CONSISTANCE DES TRAVAUX MARITIMES

Afin d'améliorer la desserte de transports et l'accès à la navette maritime de Petite Terre à Grande Terre, tout en intégrant les futures liaisons par bus et navettes maritimes, le conseil départemental envisage de réaliser un pôle d'échange multimodal de transport concentré sur la place du marché. Les objectifs d'un tel projet sont :

- D'un point de vue transport, de :
  - Pallier aux problématiques de circulation actuelles révélées et amplifiées depuis la mise en service d'amphidromes de plus grande capacité,
  - Proposer des échanges intermodaux performants,
  - Faciliter les correspondances entre tous les modes de déplacements : terrestres et maritimes, motorisés et modes doux, collectifs ou particuliers,
  - Garantir le confort et la sécurité des déplacements et des déposes / reprises des stationnements,
  - Intégrer les autres projets transports et leurs objectifs propres : le TCSP CARIBUS, les lignes de transports terrestres et les nouvelles liaisons maritimes interurbaines,
- En termes de qualité urbaine et paysagère, de :
  - Tenir compte des différents usages du site : marché couvert, office du tourisme, places évènementielles,
  - Créer des liens entre le site et le centre-ville,
  - Intégrer les autres projets concernant le centre-ville de Mamoudzou : Requalification de la place de l'ancien marché et Projet du Front de mer.

Parmi les différentes opérations nécessaires à la création du Pôle d'Echange Multimodal de Transports Collectifs à Mamoudzou, une partie des travaux est en contact direct avec le milieu marin. Ces aménagements maritimes ont pour objet le réaménagement du front de mer de Mamoudzou par la création d'une nouvelle et unique rampe de mise à l'eau au Nord du site et l'extension du terre-plein sur l'ensemble du périmètre. Les aménagements actuels seront ainsi déposés (cale, pontons, enrochements) pour étendre la surface sur toute la nouvelle périphérie. Les objectifs suivants sont visés :

- Sécuriser l'activité et l'accueil des barges et amphidrome,
- Protéger le bord de mer,
- Conserver l'aspect naturel du site (en privilégiant des blocs naturels notamment).

Les travaux maritimes porteront ainsi sur :

- La création d'une rampe de mise à l'eau unique au Nord. Ces travaux comprennent :
  - La démolition de structures existantes :
    - La rampe de mise à l'eau au Nord (Quai Colas) : une structure en béton armé,
    - Le quai des pêcheurs : structure en béton sur pieux béton de 7m,
  - Le démontage du ponton des croisiéristes, structure flottante en aluminium, ancrée sur corps morts et reliée à la terre par une passerelle. La structure devrait être réinstallée en fin de travaux,

- La reconstruction d'une rampe de mise à l'eau unique et plus large afin d'accueillir l'ensemble des barges et amphidromes. Des talus en enrochements sont à prévoir pour maintenir les terrains entre le terre-plein et la cale d'une part et la cale côté mer d'autre part,
- La reprise de la cale des barges par décapage et ragréage. Celle-ci deviendra l'accès aux pêcheurs,
- L'extension du terre-plein sur l'ensemble du périmètre sur une surface d'environ 9000 m<sup>2</sup> :
  - Au Nord au débouché de la mangrove de Kawéni,
  - Au droit du marché couvert jusqu'à l'actuel quai des barges.

L'extension nécessitera des travaux de dragage et terrassement du terre-plein et la réalisation d'un talus en enrochement. Les travaux de remblaiement s'accompagneront de la création préalable d'une digue périphérique en enrochements (de récupération ou de carrière) équipée d'un géotextile permettant de clôturer la zone destinée à accueillir le remblai.

L'accès aux différentes zones et l'évacuation des déblais de chantier se feront par voie terrestre.

Durant les travaux de la cale Nord, l'accès aux barges se fera depuis le quai des barges Sud. L'accès à l'embarcadère Nord sera rétabli à la fin des travaux de celle-ci. Ainsi le plan de circulation des barges ne prévoit pas de modification des voies de navigation par rapport à l'existant.



Figure 19: Principaux aménagements maritimes actuels du PEM (Source : SAFEGE, 2019)

### 3.2. PHASAGE ET PLANNING PREVISIONNEL

Les travaux sont organisés en 5 phases principales :

- Phase 1 : extension sur le lagon, création du nouvel embarcadère Nord et aménagement du côté mer des abords du marché,
- Phase 2 : suppression de l'embarcadère Sud, aménagement de la place des croisiéristes, place de la république et plage urbaine,
- Phase 3 : aménagement du côté ville des abords du marché,
- Phase 4 : construction des bâtiments et finalisation de l'aménagement de la gare maritime,
- Phase 5 : aménagement provisoire des abords du PEM avant le démarrage des travaux du TCSP Caribus.

Les travaux pouvant impacter le milieu marin auront lieu principalement durant les phases 1 et 2.

Le planning des travaux maritimes est envisagé comme suit :

- Démolition des ouvrages existants : 3 semaines,
- Dépose et stockage des enrochements existants : 1 mois,
- Mise en œuvre talus d'enclôture : à l'avancement,
- Mise en œuvre des remblais du terre-plein et compactage : 2,5 mois (22 000 m<sup>3</sup> pour ≈500m<sup>3</sup>/j),
- Mise en œuvre des enrochements du talus définitif : 3 mois (14 000 t pour ≈250t/j),
- Couche de fondation et coulage en place des bétons pour la cale de mise à l'eau : 2 mois.

## 4. CARACTERISATION DE L'ETAT INITIAL DU MILIEU MARIN AVANT TRAVAUX

### 4.1. QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU

#### 4.1.1. Modalités du suivi de la qualité de l'eau

##### 4.1.1.1. Paramètres suivis

Les paramètres hydrologiques retenus sont ceux de la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) en place à Mayotte (cf. rapport BRGM / ARVAM-PARETO, 2008), exceptés les Silicates et la chlorophylle a ; peu pertinentes dans ces zones très turbides et proches de l'étage intertidal :

- Température,
- Salinité,
- Oxygène dissous,
- Turbidité,
- Matières en Suspension,
- Concentration en nutriments : Ammonium, Nitrite, Nitrate, Phosphate.

##### 4.1.1.2. Plan et fréquence d'échantillonnage

Deux campagnes de prélèvements ont été réalisées pour caractériser le compartiment eau, sensible aux variations météorologiques :

- En période de pluie, le 13/05/2019. Cette campagne de prélèvement a été anticipée et réalisée avant la réception de l'ordre de service afin de pouvoir couvrir la période de la saison des pluies,
- En période sèche, le 17/07/2019. Cette campagne a permis de couvrir la saison sèche, sous régime d'Alizés.

Le plan d'échantillonnage est donné en Figure 20. Il résulte des aménagements envisagés à ce jour, du trait de côte actuel et de la géomorphologie des fonds de l'anse Choa (avec un alignement de pinacles coralliens et des colonies éparses).

Trois stations d'études (profondeur de prélèvement de 5m) ont été définies sur un transect suivant les courbes isobathes de l'anse Choa, au droit :

- De l'embouchure de la rivière Kawéni,
- Du terre-plein du marché,
- Du ponton plaisance.

Ce transect est complété par deux stations « témoins » sur une radiale centrale de même profondeur, au droit du terre-plein du marché, centre des travaux d'extension de cette zone.

Les coordonnées géographiques des stations sont précisées dans le tableau ci-après.

Tableau 5 : Coordonnées géographiques des stations de prélèvement d'eau

St1	12° 46.630'S	45° 14.025'E
St2	12° 46.630'S	45° 14.044'E
St3	12° 46.631'S	45° 14.100'E
St4	12° 46.573'S	45° 14.115'E
St5	12° 46.687'S	45° 14.108'E

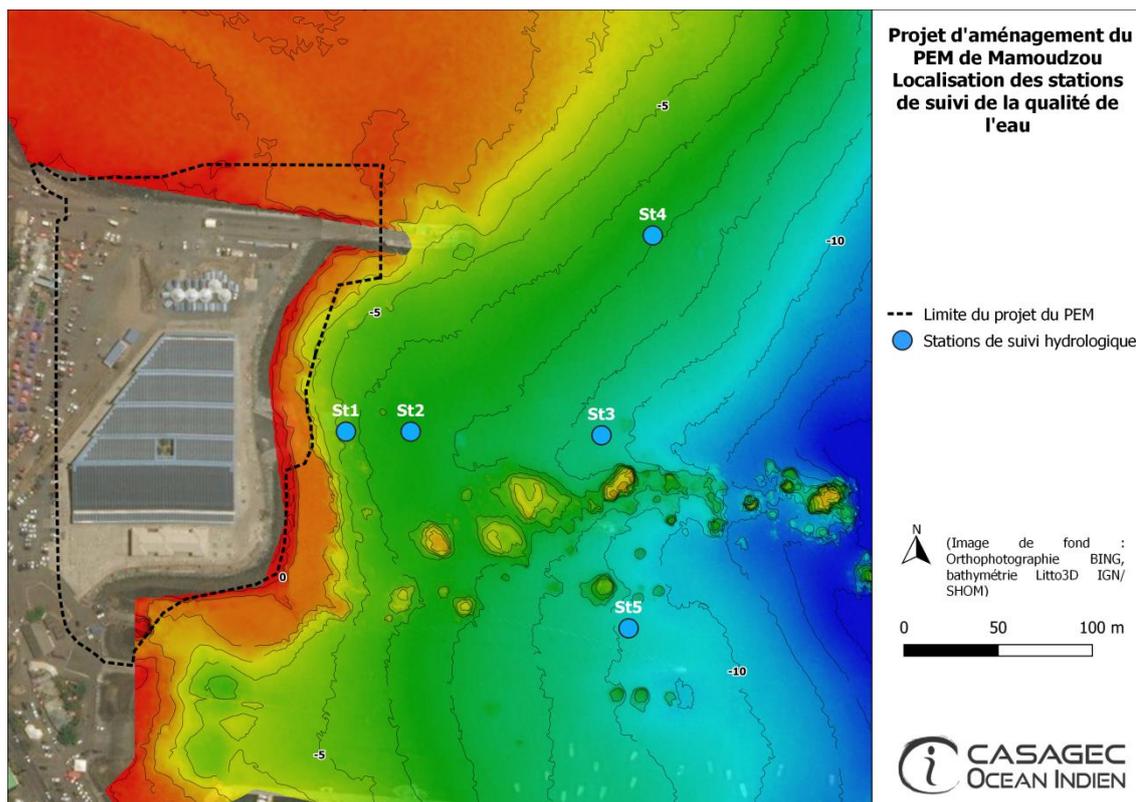


Figure 20 : Localisation des stations de suivi de la qualité de l'eau

#### 4.1.1.3. Méthodologie de suivi

En l'absence de guide technique spécifique au littoral mahorais, le suivi de la qualité physico-chimique de l'eau s'est appuyé sur les préconisations du GT DCE portant sur les conditions de mise en œuvre des différents suivis du réseau de contrôle de la surveillance (RCS) DCE en milieu marin à La Réunion (GT DCE Réunion « Physico-chimie et phytoplancton », 2016). Ainsi :

- Les paramètres température, conductivité, oxygène dissous ont été mesurés à l'aide de sondes multiparamètre Hanna Instruments (HI 7037 M et HI 98360),
- La salinité des eaux est obtenue par la formule de Millero & Leung (1976), recommandée par l'UNESCO. Elle est ici exprimée en psu (practical salinity unit),
- La turbidité a été mesurée à l'aide d'un turbidimètre de terrain Orbeco-Hellige (Modèle 966),
- Les sels nutritifs et les MES ont fait l'objet d'un prélèvement d'eau en s'appuyant sur les recommandations du Guide méthodologique pour la surveillance des rejets urbains dans les eaux littorales réunionnaises et du GT DCE Réunion "Physico-Chimie et Phytoplancton" (2016).

L'ensemble des échantillons a été conditionné dans un flaconnage à usage unique fourni par le Laboratoire d'Analyse Départemental (LAD Kawéni), après rinçage préalable des flacons avec les eaux prélevées. Sur le terrain l'ensemble des échantillons, dès le prélèvement, a été conservé au frais et à l'abri de la lumière dans des glacières équipées de plaques eutectiques.

#### 4.1.2. Résultat des suivis de la qualité de l'eau

Les résultats issus des deux campagnes de prélèvements sont présentés dans les tableaux suivants.

Tableau 6 : Résultats de la qualité de l'eau en saison humide

Paramètres	Unités	Stations				
		St1	St2	St3	St4	St5
Température	° C	29	29,3	29,5	29,3	29,6
Conductivité	mS	53,9	54,3	54,1	53,2	54,3
Salinité calculée	psu	32,55	32,62	32,31	31,81	32,39
pH		8	8,2	8,2	8	8,2
Oxygène dissous	mg/l O2	4,18	4,5	4,86	4,85	5,18
Turbidité	NTU	5,17	4,07	4,63	4,34	3,67
MES	mg/L	269	21	42	45	49
Nitrites	mg/L NO2-	0	0,002	0,003	0,007	0
Nitrates	mg/L NO3-	0,07	0,05	0,04	0,06	0,03
Phosphate	mg/L PO4	0,98	0,41	<0,05	0,25	0,21
Ammonium	mg/L NH4+	2,68	3	3,24	3,36	3,72

Tableau 7 : Résultats de la qualité de l'eau en saison sèche

Paramètres	Unités	Stations				
		St1	St2	St3	St4	St5
Température	° C	27,3	29,3	27,4	27,6	26,8
Conductivité	mS	42,9	53,3	53,6	52,4	52,6
Salinité calculée	psu	25,83	31,91	33,50	32,46	33,22
pH		8,3	8,3	8,3	8,2	8,2
Oxygène dissous	mg/l O2	4,64	5,03	4,86	4,6	4,34
Turbidité	NTU	21,73	21,40	20,30	23,30	21,47
MES	mg/L	40	39	36	30	39
Nitrites	mg/L NO2-	0	0,003	0	0	0
Nitrates	mg/L NO3-	0,25	0,07	0,02	0,04	0,02
Phosphate	mg/L PO4	<0,05	<0,05	0,08	<0,05	0,09
Ammonium	mg/L NH4+	2,6	3,48	0,38	0,23	<0,02

Les données des prélèvements et les résultats des mesures des différents paramètres hydrologiques ont été synthétisés et une comparaison des valeurs de ces derniers a été réalisée entre la situation en hiver austral (saison fraîche et sèche) et en automne austral (fin de la saison chaude et pluvieuse).

Les résultats ont fait l'objet d'un traitement statistique (logiciel « Statistica 12 ») pour avoir une matrice de corrélation des paramètres entre eux, et avoir les corrélations entre variables et stations (= observations) par analyse multivariée et production de dendrogrammes.

Au regard de ces analyses, les observations suivantes peuvent être formulées pour les différents paramètres étudiés :

- En mai, la température des eaux a tendance à augmenter du bord du remblai du marché vers le large (de 29,0 à 29,6 °C), peut-être sous l'influence d'arrivées d'eaux phréatiques percolant sous ce remblai datant des années 2000. Une diminution normale de la température, d'un delta de -1,7 à -2,8 °C, s'observe en hiver austral (juillet),
- Le pH augmente à toutes les stations entre mai et juillet 2019, devenant ainsi plus basique (+ 0 à 0,3 unité pH), les eaux se refroidissant un peu au début de la saison fraîche et sèche,

- Au niveau des stations les plus à la côte, la salinité diminue entre mai et juillet 2019. A l'inverse, elle a tendance à augmenter légèrement au large (de +0,6 à +1,2 unités S) en hiver austral, saison sèche, probablement sous l'effet de l'évaporation plus grande (le ciel étant dégagé de nuages). A la côte des apports d'eau douce d'origine inconnue, probablement anthropique, pourraient expliquer cette diminution de la salinité de l'ordre de -6,7 unités S au niveau de la station St1 et de -0,7 unité S à la station St2,
- La teneur en oxygène dissous semble présenter des tendances opposées au large et à la côte. Les concentrations ont en effet tendance à augmenter à la côte en juillet sur les stations St1 et St2 (+0,46 et + 0,53 mg/l) alors qu'elles diminuent au large sur les stations St4 et St5 (-0,25 et -0,84 mg/l) qui sont à des profondeurs plus importantes (donc non soumises à la dégradation de ce paramètre par les bactéries benthiques),
- Transparence :
  - La Turbidité augmente à toutes les stations et aux différentes profondeurs, entre mai et juillet 2019 (de 15,7 à 19,0 NTU). Ceci peut être en relation avec divers facteurs : vents locaux plus forts et générant (1), des vagues avec remise en suspension des sédiments des fonds et/ou (2), des apports de poussières depuis la terre, les sols étant plus secs. D'après des observations faites en plongée subaquatique, ces eaux étaient de couleur très vert clair en mai 2019, donc chargées en pigments divers, dont ceux chlorophylliens,
  - Les teneurs en matières en suspension (MES) ont tendance à diminuer à toutes les stations entre mai et juillet 2019 (de -229 mg/l à la station 1 et de -6 à -15 mg/l aux stations 3, 5 et 4), les apports d'eaux douces chargées en MES diminuant en saison sèche. Seule la station St2 voit sa charge en MES augmenter en juillet (+18 mg/l), probablement sous l'effet des courants générés par les hélices des barges manœuvrant ici, entraînant la remise en suspension des vases du fond. Le passage d'une barge sur ces fonds peu profonds peut également être à l'origine de la forte concentration en MES enregistrée à l'automne en St1.
- Nutriments :
  - Ammonium NH<sub>4</sub> : Les teneurs ont tendance à diminuer entre mai et juillet (de -0,08 mg/l à la station St1, à -2,7 et -3,7 mg/l aux stations St3, St4 et St5), le bloom de production primaire (phyto- planctonique et benthique) étant terminé. Seule la station St2 présente une très légère augmentation (+0,48 mg/l),
  - Nitrites NO<sub>2</sub> : Les teneurs sont toujours très basses, les nitrites s'oxydant très vite en nitrates,
  - Nitrates NO<sub>3</sub> : Les teneurs varient peu entre mai et juillet 2019, à l'exception de la station St1 où elles augmentent (+0,18 mg/l),
  - Pool azoté (NH<sub>4</sub> + NO<sub>2</sub> + NO<sub>3</sub>) : Avec les variations de l'ammonium entre mai et juillet 2019 ce paramètre d'azote inorganique dissous (NID) augmente faiblement entre ces 2 périodes pour les stations côtières St1 et St2 ; et il diminue fortement (de -2,9 à -3,7 mg/l) sur les 3 autres stations situées plus au large. Dans le secteur côtier de Mamoudzou, l'origine de cet ammonium serait plutôt anthropique (cf. THOMASSIN, 1997, repris par THOMASSIN *et al.* 2000),
  - Teneur en phosphates PO<sub>4</sub> : Les teneurs en phosphates diminuent généralement entre mai et juillet 2019, les apports d'eaux douces et/ou saumâtres venant de terre diminuant à l'hiver austral, et ceci d'autant plus que l'on se rapproche du remblai côtier (de -0,12 à -0,22mg/l aux stations St5 et St4, les plus au large ; jusqu'à -0,37 et -0,94 mg/l aux stations St2 et St1, respectivement, les plus côtières).

D'après l'analyse multivariée, les corrélations entre les différentes stations aux 2 saisons, automne (fin de la saison chaude et des pluies) et hiver austral (saison fraîche et sèche), montrent que (Figure ci-dessous) :

- La station la plus côtière, St1, s'individualise nettement de toutes les autres à la même saison ;
- Deux sous-ensembles s'observent, avec :
  - D'une part, les stations hivernales 1, 2 et 4, qui sont assez proches de la station 3 à l'automne ;
  - Et, d'autre part, les stations 2, 4 et 5 automnales, qui sont assez proches de la station 3 hivernale ;
  - La station 5 hivernale se détachant des autres stations.

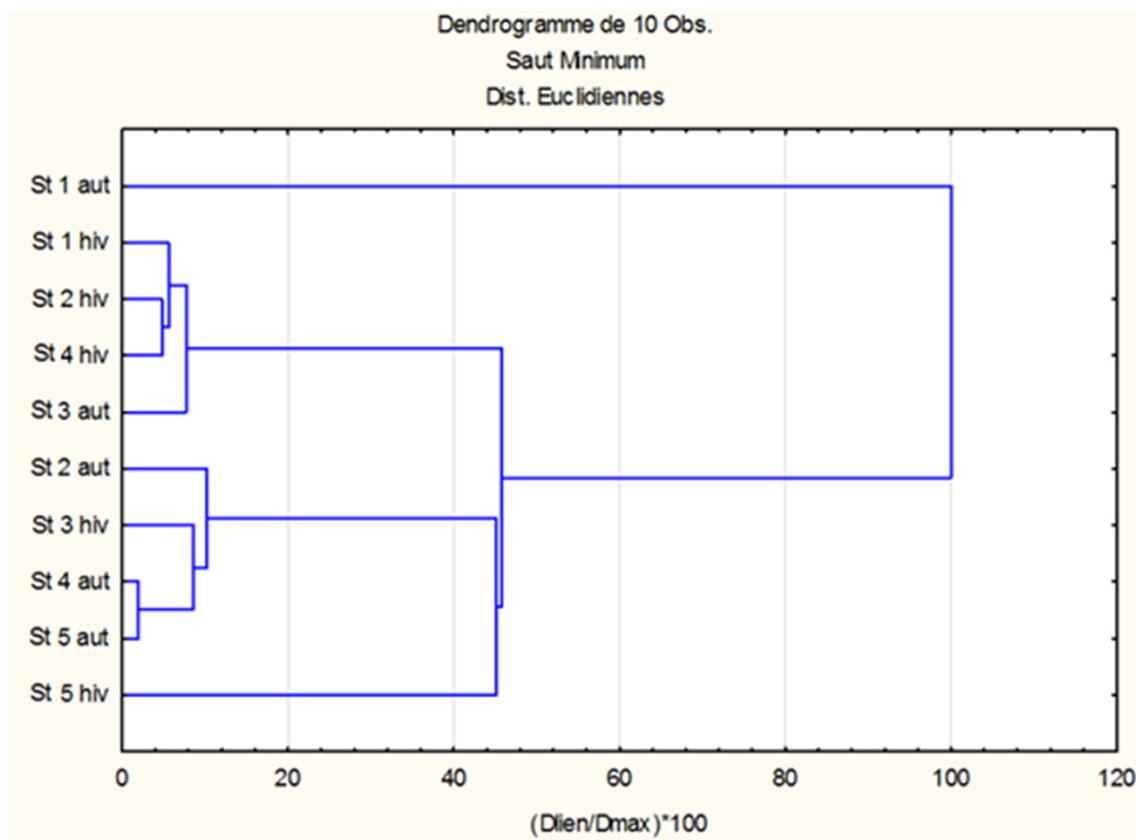


Figure 21 : Dendrogramme des 10 stations (automnales et hivernales) à partir des paramètres hydrologiques.

Au regard des grilles nationales et des seuils proposés actuellement dans le cadre du RNAOE (ARVAM, PARETO, 2013), la qualité pour les paramètres exploitables est jugée de :

- Bonne à très bonne pour le paramètre « oxygène dissous » (>3mg/l),
- Très bonne pour le paramètre « NID » ou concentration d'azote inorganique dissous (>4,5mg/l),
- Moyenne pour la turbidité (percentile 90 : 21,9 NTU).

Rappelons ici le besoin d'adapter encore ces seuils aux caractéristiques de Mayotte. La bibliographie permet une comparaison des données acquises en mai 2019 dans la zone d'étude avec celles issues d'une campagne de mai 2010 portant sur les polluants portuaires dans l'anse Choa, siège des débarcadères des amphidromes et barges (Cambert *et al.*, 2011a). Les résultats de cette étude (cf. section 2.9.2) présentent pour les paramètres hydrologiques suivis des valeurs comparables (à l'exception de la turbidité pour laquelle l'unité choisie ne permet pas la comparaison). Ainsi, conformément aux conclusions de l'étude de Cambert *et al.*, 2011a, aucune anomalie particulière dans les valeurs prises par ces paramètres n'est donc à souligner en été austral.

## 4.2. QUALITE PHYSICO-CHIMIQUE DES SEDIMENTS

### 4.2.1. Modalités de suivi de la qualité des sédiments

#### 4.2.1.1. Paramètres suivis

Les paramètres analysés s'appuient sur les exigences réglementaires en matière de dragage définies par la circulaire du 14 juin 2000 et l'arrêté du 09 août 2006 dans sa version consolidée :

- Paramètres physiques
  - Granulométrie :
    - Argile : Particules de taille inférieure à 2 µm ;
    - Limon fin : Particules de taille comprise entre 2 µm et 20 µm ;
    - Limon grossier : Particules de taille comprise entre 20 µm et 63 µm ;
    - Sable fin : Particules de taille comprise entre 63 µm et 200 µm ;
    - Sable grossier : Particules de taille comprise entre 200 et 2000µm ;
    - Graviers : Particules de taille supérieure à 2 mm.
  - Matière sèche totale,
  - Densité,
  - Carbone Organique Total,
  - Aluminium.
- Nutriments :
  - Azote Kjeldhal,
  - Phosphore total,
- Contaminants chimiques :
  - Métaux (8 éléments traces métalliques réglementaires),
  - HAP (16 HAP réglementaires et somme des HAP),
  - PCB (7 congénères réglementaires et somme des PCB),
  - Composés organostanniques (MBT, DBT et TBT).

#### 4.2.1.2. Plan d'échantillonnage

Les analyses physico-chimiques des sédiments ont porté sur plan d'échantillonnage donné sur la Figure 22 ci-dessous. La radiale des stations 1 à 3 est la même que celle échantillonnée pour l'analyse de la qualité de l'eau. Les stations 4 et 5 ont quant à elles été déplacées au pied des futurs aménagements (remblaiement) pour évaluer le relargage de potentiels contaminants, tout en gardant une discrimination des apports de la Kawéni et au Sud des apports à forte origines anthropiques. Les coordonnées géographiques des stations sont précisées dans le tableau ci-dessous.

Les stations ont été prélevées le 17/07/2019 et le 18/07/2019.

Tableau 8 : Coordonnées géographiques des stations de prélèvement sédiments.

St1	12° 46.630'S	45° 14.025'E
St2	12° 46.630'S	45° 14.044'E
St3	12° 46.631'S	45° 14.100'E
St4 bis	12° 46.559'S	45° 14.030'E
St5 bis	12° 46.682'S	45° 13.968'E

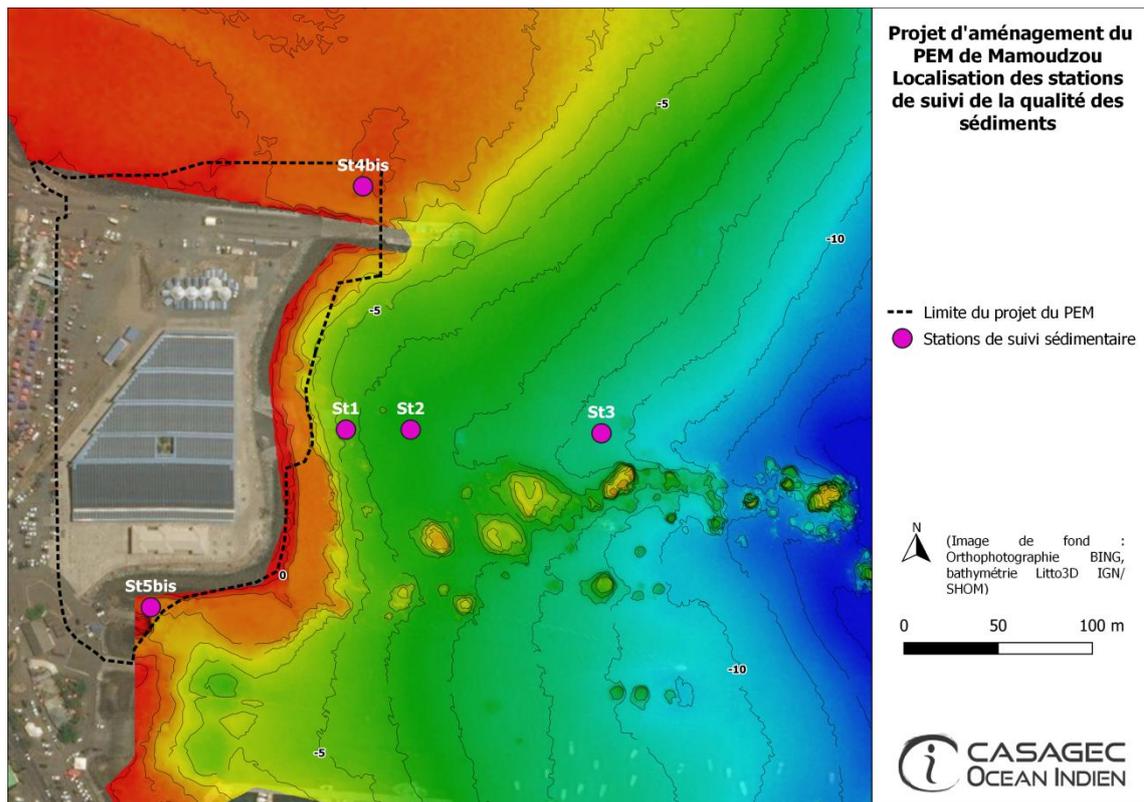


Figure 22: Localisation des stations de suivi de la qualité des sédiments

#### 4.2.1.3. Méthodologie de suivi

Le guide Aquaref de 2015 portant sur les opérations d'échantillonnage en milieu marin dans le cadre des programmes de surveillance DCE (AQUAREF, 2015) préconise un prélèvement à la benne type Eckman (carottier boîte). Toutefois, la présence sur le fond d'objets métalliques de taille pluri-décimétriques (macrodéchets, épaves), de pinacles coralliens, à fortement contraint l'utilisation de la benne. Ainsi, les prélèvements ont été réalisés directement sur le fond par un scaphandrier à l'aide de carottiers manuels et de sacs à prélèvement à usage unique.

L'ensemble des matériaux ainsi prélevé a ensuite été conditionné sur le bateau dans un flaconnage adapté, fourni par le laboratoire EUROFINS. L'ensemble des échantillons, dès le conditionnement, a été conservé au frais et à l'abri de la lumière dans des glacières équipées de plaques eutectiques. Les échantillons ont été expédiés au laboratoire dans un délai de 48 heures et ont été reçus par le laboratoire dans un délai de 5 jours après prélèvement.

Les analyses ont été réalisées par le laboratoire EUROFINS qui dispose d'une accréditation COFRAC pour l'ensemble des analyses listées. En termes de limites de quantification, les valeurs atteintes sont globalement inférieures ou égales aux seuils préconisés en Annexe 6 du guide GEODE. Elles restent nettement inférieures aux seuils N1 et répondent ainsi aux exigences de l'arrêté du 9 août 2006.

#### 4.2.2. Valeurs de référence pour l'interprétation des résultats

Le Groupe d'Étude et d'Observation sur les Dragages et l'Environnement (GEODE) a défini des valeurs de référence pour les contaminants chimiques des sédiments dragués dans les ports français, destinés à être immergés en mer. Ces valeurs ont été officialisées par l'arrêté interministériel du 14 juin 2000 et reprises dans l'arrêté du 9 août 2006, complétées par celui du 08 février 2013 et du 17 juillet 2014.

Ces seuils caractérisent la qualité chimique du matériau et contribuent à déterminer la démarche à retenir en termes d'études et de solutions techniques en vue d'une immersion.

Ce référentiel commun permet d'harmoniser les interventions des services chargés du contrôle de la qualité de l'eau et, d'autre part, fournit des éléments de référence clairs permettant aux maîtres d'ouvrage d'optimiser leurs projets, notamment pour leurs opérations de dragage.

Ainsi, pour chaque substance, sélectionnée en fonction des connaissances et de sa représentativité en matière de potentiel d'impact, deux seuils ont été définis (N1 et N2), correspondant à des niveaux d'impact différents sur un même milieu.

Les tableaux ci-dessous synthétisent les valeurs seuils : N1 et N2 à prendre en compte pour les différentes analyses. Rappelons que le niveau N1 est la valeur plafond pour une immersion des sédiments de dragage sans étude complémentaire. Le niveau N2, quant à lui, est la valeur plafond au-delà de laquelle l'immersion des sédiments de dragage est susceptible d'interdiction, en particulier, si elle ne constitue pas la solution la moins dommageable pour le milieu marin par rapport à des solutions in situ ou terrestres. Entre ces deux niveaux, l'éventualité de l'immersion est soumise à des études complémentaires.

**Tableau 9: Valeurs guides des niveaux 1 et 2 à prendre en compte dans les analyses de sédiments marins ou estuariens, exprimés par kg de sédiment sec analysé sur la fraction inférieure à 2 mm.**

a) Eléments traces métalliques (mg/kg) (Arrêté du 09/08/2006)

Contaminants	N1	N2
Arsenic	25	50
Cadmium	1.2	2.4
Chrome	90	180
Cuivre	45	90
Mercurure	0.4	0.8
Nickel	37	74
Plomb	100	200
Zinc	276	552

c) Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (µg/kg) (Arrêté du 08/02/2013)

Contaminants	N1	N2
Naphtalène	160	1130
Acénaphthylène	40	340
Acénaphthène	15	260
Fluorène	20	280
Phenanthrene	240	870
Anthracène	85	590
Pyrène	500	1500
Benzo(a)anthracène	260	930
Chrysène	380	1590
Benzo(b)fluoranthène	400	900
Benzo(k)fluoranthène	200	400
Benzo(a)pyrène	430	1015
Dibenzo(ah)anthracène	60	160
Indéno(123-cd)pyrène	1700	5650
Benzo(ghi)pérylène	1700	5650
Fluoranthène	600	2850

b) PBC et TBT (µg/kg) (Arrêté du 17 juillet 2014 modifiant l'arrêté du 9 août 2006)

PCB	N1	N2
PCB 28	5	10
PCB 52	5	10
PCB 101	10	20
PCB 118	10	20
PCB 138	20	40
PCB 153	20	40
PCB 180	10	20
TBT	100	400

### 4.2.3. Résultat des suivis de la qualité des sédiments

#### 4.2.3.1. Composition granulométrique

Afin d'avoir une vue d'ensemble de la granulométrie des sédiments, et sans tenir compte de la masse volumique des chacune des fractions sédimentaires, il a été pris en compte la fraction « granules & graviers» supérieure à 2 mm dans le calcul des pourcentages des différentes fractions.

Les stocks sédimentaires ont alors été définis selon les normes internationales (cf. WEYDERT, 1975, pour les sédiments récifolagonaires à Madagascar) en : granules et graviers >2 mm, sables très grossiers (STG), sables grossiers (SG), sables moyens (SM), sables fins (SF), sables très fins (STF), silts grossiers (StIG), silts moyens (SrtM), silts fins (StIF), argiles (Cl), argiles très fines (VFCI) (cf. Tableau 10 et Figure 23).

Tableau 10 : Composition granulométrique des échantillons.

Stations	Embouchure de la Kawéni	Radiale devant la partie centrale du terre-plein du marché			Sud du terre-plein du marché
	St4bis	St1	St2	St3	St5bis
Granules et graviers (GG)	26,2	22	19	23,4	6,9
Sables très grossiers (STG)	0	0	0	0	13,3
Sables grossiers (SG)	5	0,4	0	0	33,9
Sables moyens (SM)	10,3	1,3	3,1	1	28,8
Sables fins (SF)	7	4,6	7,9	2,8	6,6
Sables très fins (STF)	5,2	6,6	5,8	3,7	1
Silts grossiers (StIG)	6,6	7,9	8,3	6	1,1
Silts moyens (SrtM)	9,7	13,7	18,1	15	1,5
Silts fins (StIF)	10,7	18	18,4	20,3	2,5
Argiles (Cl)	13	17,6	13,5	19,3	3,1
Argiles très fines VFCI	6,4	7,9	6,1	8,5	1,4

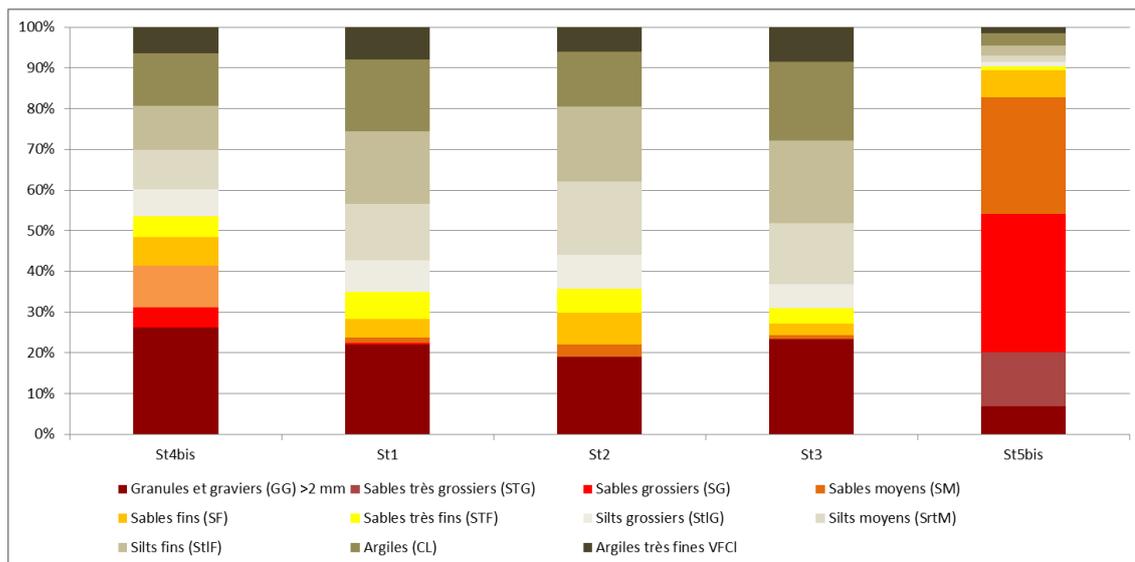


Figure 23 : Histogramme des fractions sédimentaires au sein des différents échantillons.

A l'exception de la station 5bis située à proximité du quai des Pêcheurs, à l'extrémité Sud du terre-plein actuel, toutes les autres stations montrent des sédiments où la fraction grossière >2 mm (granules et graviers) est prédominante (de 26 à 19 %), alors que la fraction de « sables grossiers » y est nulle (Stations

St1 à St3) ou peu représentée (SG = 5 % à la station St4bis). Au niveau des stations 1 à 3, localisées sur la radiale au droit du terre-plein, les autres stocks dominants sont des silts plus ou moins colmatés par des argiles. **Les sédiments des stations St1, St2, St3 et St4bis sont ainsi des vases qu'enrichissent une fraction granuleuse et/ou graveleuse, plus ou moins importante**, provenant de granules et graviers basaltiques et de bioclastes grossiers, issus de la flore (articles d'*Halimeda*, d'*Amphiroa*, morceaux de Corallinacées) et de la faune (piquants d'oursins, débris de coquilles de mollusques, morceaux de Bryozoaires, etc.) des pâtés coralliens épars sur ces fonds (observés lors des prélèvements). Parmi ces stations, la station St4bis, localisée au niveau de l'embouchure de la Kawéni se distingue néanmoins par une proportion non négligeable de sables de l'ordre de 28%, contre seulement 13, 17 et 8% respectivement pour les stations St1, St2 et St3.

La **station 5bis**, à l'extrémité Sud du terre-plein actuel, **est au contraire constituée d'un sable, grossier et moyen, en cours de colmatage par des lutites** (9,64 % du sédiment total <0,63 µm), constitués de silts (5,13 %) et d'argiles (4,51 %). Il diffère donc complètement des autres sédiments prélevés au sein de la zone d'étude.

#### 4.2.3.2. Nutriments

Concernant les teneurs en matière organique, carbone organique et azote total, les teneurs de ces 3 paramètres physico-chimiques sont maximales aux stations St1 à St3, localisées sur la radiale au droit du marché, du fait d'apports organiques, soit en provenance du terre-plein (eaux usées chargées, ordures diverses, etc.) ou d'organismes vivants dans ces vases et/ou sur les pâtés coralliens épars sur ces fonds.

Le pH des eaux "interstitielles"<sup>2</sup> de ces sédiments varie de 8,5 à 9,0. Il figure parmi les plus « acides » à la station St4bis, comme à la station St2 (8,5 u pH) du fait d'apports organiques. Il est le plus « basique » (= 9,0 et 8,9 u pH) aux stations St5bis et St3, au Sud immédiat du terre-plein ou alors le plus au large.

Tableau 11: Paramètres généraux et nutriments au sein des échantillons sédimentaires

Paramètre	Unités	St1	St2	St3	St4bis	St5bis
Matière sèche totale	% MB	45	46.7	42.3	<b>68.3</b>	<b>69.8</b>
Densité	g/cm3	1.42	1.49	1.36	<b>1.88</b>	<b>1.91</b>
Perte au feu à 550°C % MS	% MS	13,7	14,6	15	6,65	6,68
pH extrait à l'eau	pH	8,6	8,5	<b>9,0</b>	8,5	8,9
Azote Kjeldhal	g/kg MS	1.7	1.4	1.8	0.6	<0.5
Carbone Organique Total	mg/kg MS	<b>20100</b>	<b>18900</b>	<b>26400</b>	14700	4150
Phosphore total	mg/kg MS	4610	4370	4180	4760	4010

#### 4.2.3.3. Contaminants chimiques

##### ■ Teneurs en métaux

Les résultats relatifs à la teneur en métaux dans les sédiments prélevés en juillet 2019 sont présentés dans Tableau 12 page 46.

La fraction fine des sédiments étant issue principalement des altérites des sols terrestres à dominante d'oxydes de fer (ferreux et ferrique) et de silicates d'alumine (altération de roches volcaniques et processus de latéritisation sous climat tropical), il est normal que les teneurs en **aluminium** soient très élevées : entre 39,6 et 26,0 g/kg MS. Elles le sont beaucoup plus dans des sols et même dans les sédiments du fond de la Kawéni (104 g/kg de MS en moyenne d'après Thomassin, 2006).

Par contre, les teneurs en **zinc** sont un bon indicateur de l'origine anthropique (dégradations de tous les matériaux galvanisés : tôles ondulées, tuyaux, etc., des peintures à base de Zn, etc.) (cf. Thomassin *et al.*, 2006, 2008). Ici les teneurs décroissent donc de la station St4bis (en bordure de l'embouchure de la

<sup>2</sup> Mesuré sur des extraits à l'eau des sédiments.

Kawéni (186 mg/kg MS), en passant par les 3 stations St1, St2 et St3 de la radiale du terre-plein (de 136 à 119 mg/kg MS), pour atteindre la valeur minimale à la station St5bis en bordure Sud du terre-plein, côté de l'embarcadère (107 mg/kg MS). Cette teneur maximale reste bien inférieure à celle mesurée dans les sédiments de la Kawéni en Janvier 2006 (19/01/2006), où à l'embouchure, la concentration était de 248 mg/kg MS (Thomassin, 2006, cf. section 2.10.3). Elle est néanmoins supérieure à la concentration de 122 mg/kg MS mesurée en 2010 dans le cadre du suivi DCE (Cambert *et al.*, 2011b) au niveau du ponton du Port de Mamoudzou (cf. section 2.10.3).

Les teneurs en **nickel** montrent globalement les mêmes variations que le zinc sur la station S4bis, à l'embouchure de la Kawéni qui présente une teneur maximale de 143 mg/kg MS (contre 193 mg/kg MS en Janv. 2006 ; Thomassin, 2006), et les stations St1, St2 et St3. La teneur en Ni remonte néanmoins à la station St5bis (86.6 mg/kg MS) près du terre-plein du marché, côté embarcadère. Ces valeurs sont, à l'exception de la station St4bis, dans l'ordre de grandeur de celles mesurées dans le cadre du suivi DCE (93 mg/kg MS, Cambert *et al.*, 2011b).

Sur la radiale St1 à St3, les teneurs en **chrome** semblent décroître un peu de la côte vers le large (de 198 à 174 mg/kg MS). Toutefois, à l'instar du zinc et du nickel, la valeur maximale s'observe à la station St4bis, à l'embouchure de la Kawéni (382 mg/kg MS). La concentration en Chrome est aussi élevée à la station St5bis (253 mg/kg MS) en bordure du terre-plein côté embarcadère. Des teneurs élevées en Cr ont été observées dans les sédiments en aval de la Kawéni (493 mg/kg MS en Janv. 2006, mais aussi dans les sédiments de l'aval de la mangrove non anthropisée d'Ironi Bé, à la même époque : 322 mg/kg MS). La valeur mesurée, dans le cadre du suivi DCE en 2010, reste néanmoins nettement inférieure, de l'ordre de 137 mg/kg MS.

Pour le **cuivre** et le **plomb**, les teneurs sont les plus élevées aux stations de la radiale St1-St3 et sont relativement proches pour le plomb (entre 16 et 18,6 mg/kg MS). Par contre, elles sont plus faibles aux stations St4bis, à l'embouchure de la Kawéni, et minimales à la station St5bis. Ces valeurs restent encore supérieures à celles du suivi DCE de 2010 ([Cu]=24 et [Pb]=4 mg/kg MS, cf. section 2.10.3). Elles restent, pour le cuivre, inférieures aux teneurs enregistrés en 2006 à l'embouchure de la Kawéni.

En revanche, les teneurs en **arsenic** (qui peut être d'origine tellurique, comme souvent à Mayotte, mais aussi d'origine anthropique) montrent des variations globalement opposées à l'ensemble des éléments traces métalliques précédents. La teneur maximale (74,4 mg/kg MS) s'observe dans les sables de la station St5bis, en bordure du terre-plein côté embarcadère. Aux autres stations de la radiale devant le terre-plein, les teneurs décroissent du bord vers le large (24,2 mg/kg MS à la station St1 et 18,7 mg/kg à la station St3). La teneur la plus faible est enregistrée à la station St4bis (14,0 mg/kg MS), à l'embouchure de la Kawéni. Ces concentrations sont nettement inférieures à celle mesurées en 2010 où une valeur de 265 mg/kg MS a été dosée dans les sédiments présents au niveau du ponton du Port de Mamoudzou. Elles restent néanmoins supérieures à la teneur observée en 2006 dans les sédiments de l'embouchure de la Kawéni (11 mg/kg MS). L'origine de cet arsenic est donc complexe, à la fois tellurique et anthropique, mais à la station St5bis, elle est nettement plus d'origine anthropique.

Enfin, selon les seuils définis pour les sédiments de la France métropolitaine relatifs aux sédiments des dragages et des ports, seuils difficilement applicables sous climat tropical humide comme à Mayotte<sup>3</sup> (du fait des conditions entropiques), les métaux montrant principalement des teneurs supérieures au niveau N2 et/ou N1 sont :

- L'arsenic à la station St5bis tout particulièrement (d'origine plutôt anthropique ici),
- Le nickel (d'origine probablement tellurique) à toutes les stations,
- Le chrome (lui aussi très probablement d'origine plus tellurique).

<sup>3</sup> Sous climat tropical humide comme à Mayotte, ces seuils devraient être redéfinis avec des critères objectifs (zone non polluée et/ou vierge comparée à des zones particulièrement polluées sous impacts anthropiques – il n'y a pas encore à Mayotte de véritable industrie polluante, à l'exception peut-être des dépôts d'hydrocarbures, de zones de stockage (exemple : port de Longoni) ou d'épandage (Dzoumogné).

Tableau 12 : Concentrations en contaminants chimiques dosés dans les sédiments prélevés en juillet 2019.

METAUX	Unités	Seuils		St1	St2	St3	St4bis	St5bis
		N1	N2					
Aluminium	mg/kg MS			39600	31900	37700	34800	26000
Arsenic (As)	mg/kg MS	25	50	24.2	24	18.7	14	74.4
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	1.2	2.4	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
Chrome (Cr)	mg/kg MS	90	180	198	181	174	382	253
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	45	90	38.2	34.6	48.1	30.5	16
Mercuré (Hg)	mg/kg MS	0.4	0.8	<0.10	<0.10	0.12	<0.10	<0.10
Nickel (Ni)	mg/kg MS	37	74	87.9	70.3	76	143	86.6
Plomb (Pb)	mg/kg MS	100	200	17	16.1	18.6	11.7	6.98
Zinc (Zn)	mg/kg MS	276	552	136	119	133	186	107
<b>PCB</b>								
PCB congénère 28	µg/kg MS	5	10	<1	<1	<1	<1	<1
PCB congénère 52	µg/kg MS	5	10	<1	<1	<1	<1	<1
PCB congénère 101	µg/kg MS	10	20	<1	<1	<1	<1	<1
PCB congénère 118	µg/kg MS	10	20	<1	<1	<1	<1	<1
PCB congénère 138	µg/kg MS	20	40	<1	<1	<1	<1	<1
PCB congénère 153	µg/kg MS	20	40	<1	<1	<1	<1	<1
PCB congénère 180	µg/kg MS	10	20	<1	<1	<1	<1	<1
Σ 7 PCB	µg/kg MS	-	-	<1	<1	<1	<1	<1
<b>HAP</b>								
Acénaphthylène	µg/kg MS	40	340	2.7	<2.3	<2.3	<2.3	<2.2
Acénaphène	µg/kg MS	15	260	<2.3	<2.3	<2.3	<2.3	<2.2
Anthracène	µg/kg MS	85	590	<2.3	<2.3	<2.3	<2.3	4.1
Benzo(a)pyrène	µg/kg MS	430	1015	46	30	19	8	210
Benzo(b)fluoranthène	µg/kg MS	400	900	32	50	33	15	380
Benzo(a)anthracène	µg/kg MS	260	930	24	25	16	9.3	210
Benzo(ghi)Pérylène	µg/kg MS	1700	5650	34	48	29	12	290
Benzo(k)fluoranthène	µg/kg MS	200	400	6.9	23	14	12	170
Chrysène	µg/kg MS	380	1590	20	30	21	10	210
Dibenzo(a,h)anthracène	µg/kg MS	60	160	15	9.3	14	3.5	28
Fluoranthène	µg/kg MS	600	2850	19	7.9	5.6	3.3	41
Fluorène	µg/kg MS	20	280	2.3	2.4	2.6	2.3	3.1
Indeno (1,2,3-cd) Pyrène	µg/kg MS	1700	5650	31	50	30	16	2.9
Naphtalène	µg/kg MS	160	1130	4.2	<2.3	<2.3	<2.3	<2.2
Phénanthrène	µg/kg MS	240	870	9.8	6.9	7.4	5	13
Pyrène	µg/kg MS	500	1500	11	7	5	2.6	32
Somme des HAP	µg/kg MS	-	-	260	290	200	100	1600
<b>PRODUITS ORGANIQUES DIVERS</b>								
Dibutylétain	µg /kg MS	-	-	<3.94	<3.94	<3.94	<3.94	<3.94
Monobutylétain	µg /kg MS	-	-	<3	<3	<3	<3	<3
Tributylétain	µg/kg MS	100	400	<4.9	<4.9	<4.9	<4.9	8.82

Légende :

[X]<N1	N1≤[X]<N2	N2≤[X]
--------	-----------	--------

#### ■ Poly-chloro-biphényles (PCB)

Pour l'ensemble des congénères dosés, les concentrations restent inférieures à la limite de quantification du laboratoire, à l'instar des résultats du suivi DCE de 2010 (Cambert *et al.*, 2011b, cf. section 2.10.3).

Ainsi, au regard des seuils de la Circulaire du 14 juin 2000, l'ensemble des PCB présentent dans concentrations strictement inférieures aux N1.

#### ■ Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP)

Pour pouvoir être analysées selon les seuils N1 et N2, les valeurs des HAP données par le laboratoire en mg/kg MS ont été transformées en µg/kg MS.

Toutes les teneurs maximales en HAP se rencontrent à la station St5bis, en bordure du terre-plein près du débarcadère des barges. Cela est tout à fait normal compte tenu des eaux polluées et des hydrocarbures déversés dans ce secteur du littoral : « escalier du Préfet » où les barques de pêche déchargent leurs poissons et manipulent du carburant et où un égout drainant une partie de Mamoudzou est présent.

Dans les sédiments de la radiale de stations St1 à St3, les teneurs en : benzo(a)anthracène, benzo(a)pyrène, pyrène, fluoranthène et dans une moindre mesure naphthalène et acénaphthylène, décroissent de la côte vers le large. Le fluorène présente la tendance inverse et tend à légèrement augmenter vers le large.

Ces HAP semblent inversement corrélés avec les teneurs en granules et graviers (fraction > 2mm) des sédiments.

Ces concentrations en HAP restent nettement supérieures à celles issues de l'étude de Thomassin au débouché de la Kawéni (Thomassin, 2006) et majoritairement supérieures à celles du suivi DCE de 2010 (Cambert *et al.*, 2011b).

Au regard des seuils de la Circulaire du 14 juin 2000, l'ensemble des HAP présentent néanmoins des concentrations strictement inférieures aux N1.

#### 4.2.3.4. Bilan sur les contaminants chimiques-Analyse multivariée

Ces descriptions se concluent sur les résultats d'une analyse multivariée :

- Pratiquement tous les paramètres montrent que la station 5bis, en bordure du terre-plein à proximité des débarcadères, s'isole particulièrement des autres stations.
- Quant à la station 4bis, à l'embouchure de la Kawéni, c'est avec la station 2 de la radiale, par le travers du terre-plein, central, qu'elle présente le plus d'affinité.

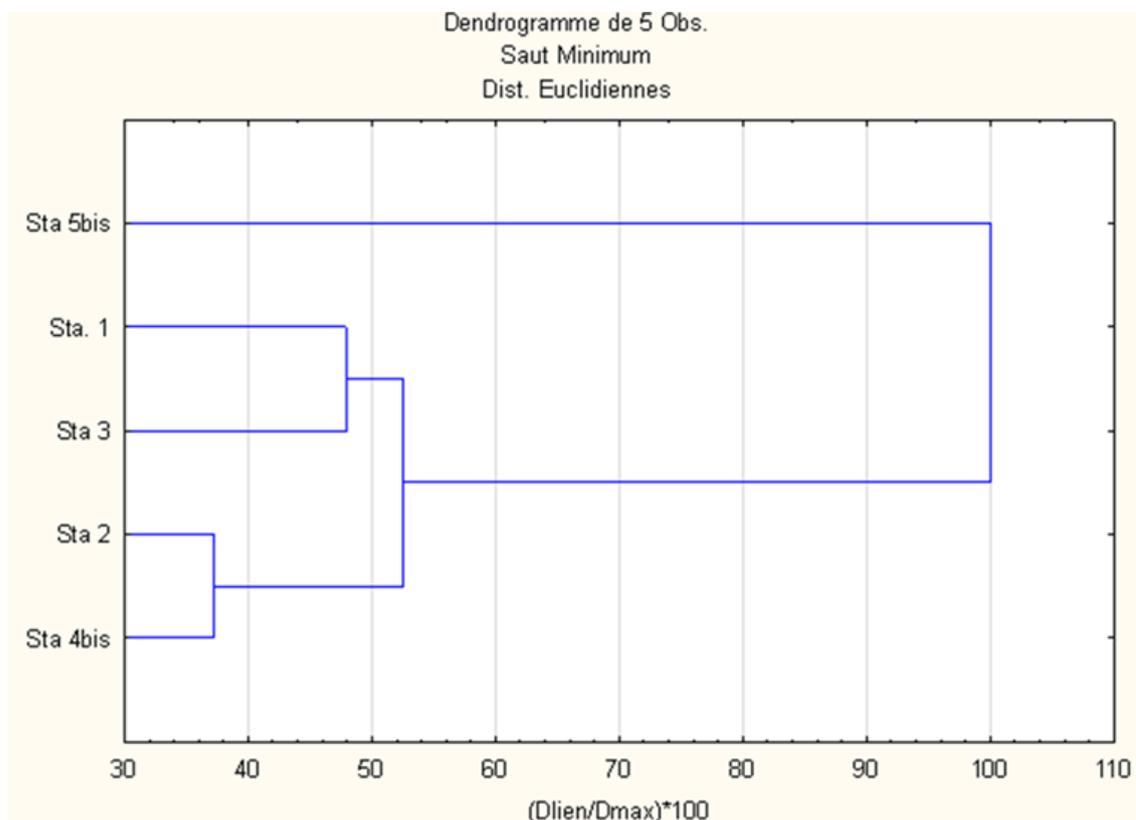


Figure 24 : Dendrogramme des stations de sédiments fondé sur la prise en compte de la plupart des paramètres sédimentologiques

## 4.3. MODELISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROSEDIMENTAIRE

### 4.3.1. Mise en place du modèle numérique

#### 4.3.1.1. Code de calcul

Les modélisations numériques des courants et de la houle se feront avec la suite logicielle **TELEMAC-TOMAWAC**. Elle permet de reproduire les conditions hydrosédimentaires du secteur à l'étude. La marée astronomique, la pression atmosphérique, le vent, la houle et les courants induits ainsi que le transport sédimentaire sont pris en compte par le modèle. Développée par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE), la suite logicielle repose sur l'utilisation d'un maillage déstructuré adapté pour représenter les environnements complexes. Utilisé depuis de nombreuses années dans le cadre de plusieurs centaines d'études à travers le monde, il fait référence dans le domaine des écoulements à surface libre.

#### ■ Module de courant : TELEMAC

L'outil hydraulique bidimensionnel utilisé pour la représentation des circulations 2DH sera basé sur le système logiciel TELEMAC.

La force de l'approche bidimensionnelle réside dans la caractérisation complète des grandeurs principales de l'écoulement – hauteur d'eau et courant – s'appuyant sur une représentation du terrain naturel fidèle au modèle numérique de terrain (MNT) disponible. En effet, ce type de modèle se construit comme une maquette virtuelle du terrain à l'aide d'un maillage non structuré, constitué de facettes triangulaires 3D de tailles et de formes variables.

Chaque sommet de triangle constitue un point de calcul et est caractérisé par son référencement planimétrique (X, Y) et altimétrique (Z). La méthode des éléments finis sur laquelle repose TELEMAC, associée à un maillage de calcul constitué de facettes triangulaires de tailles et de formes variables, permet un découpage adapté de la topographie et donc la prise en compte des géométries complexes de la zone d'étude (digues, lit mineur des rivières à méandres, îles, ouvrages, routes, rues, affluents secondaires, etc.). Elle autorise de densifier le maillage, et donc d'affiner les résultats fournis par le modèle, dans les zones d'intérêt (par exemple au droit des ouvrages et des zones sensibles). La taille des mailles de calcul peut alors atteindre le mètre.

Les équations décrivant la dynamique des écoulements sont résolues intégralement sur l'ensemble des points du maillage sans hypothèse sur le sens d'écoulement ou le type de loi hydraulique. La hauteur d'eau et les deux composantes horizontales de la vitesse sont ainsi calculées à chaque pas de temps.

#### ■ Module de vague : TOMAWAC

TOMAWAC est un modèle numérique de propagation de vagues qui permet d'obtenir des estimations précises sur les paramètres des vagues dans les zones côtières. Le modèle TOMAWAC est utilisé très largement par la communauté scientifique travaillant sur des problématiques côtières et a fait ses preuves depuis plusieurs années.

TOMAWAC est un modèle spectral de propagation de houle 3<sup>ème</sup> génération. Ce modèle résout l'équation de conservation de l'énergie de la houle aléatoire en milieu peu profond. Le résultat donne les conditions de houle sous forme de phase moyennée.

Les processus de propagation des vagues suivants ont été activés dans le modèle :

- Propagation à travers un espace géographique,
- Réfraction due aux variations du fond marin,
- Phénomène de « shoaling » dû aux variations spatiales,

- Diffraction par approximation,
- Interaction non linéaire des vagues (quadruplet),
- Dissipation due au déferlement des vagues,
- Déferlement dû à la profondeur,
- Dissipation par frottement du fond marin.

#### 4.3.1.2. Maillage

Le modèle 2DH actuellement en place couvre l'ensemble du Lagon de Mayotte et s'étant au large à environ 8km de la barrière récifale jusqu'à des profondeurs de 1500 m (Figure 25).

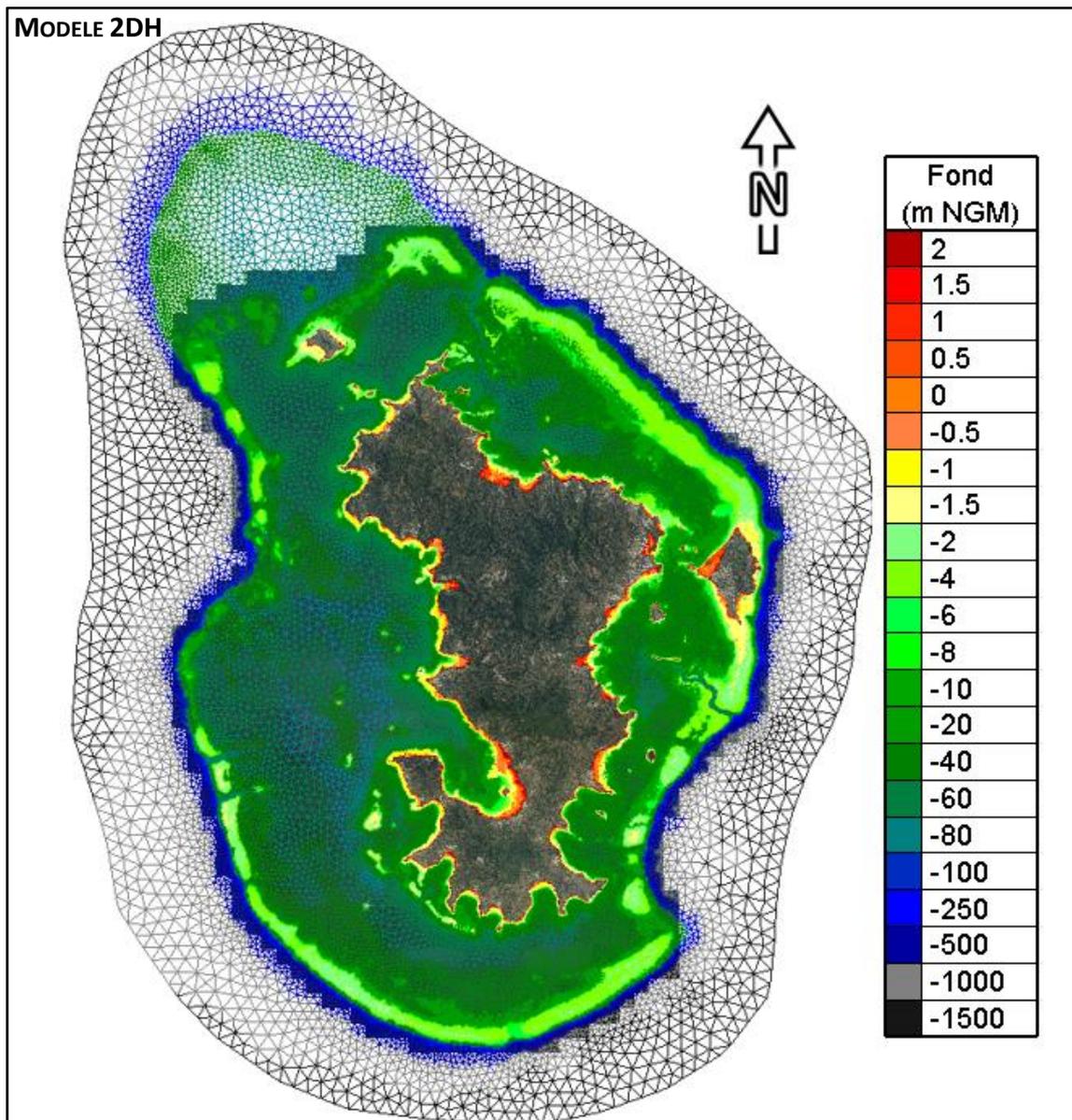


Figure 25. Emprise du modèle hydrodynamique 2DH

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 136 000 Nœuds de calcul et 263 000 Mailles. En termes de temps de calcul, 8h sont nécessaires pour simuler 24h avec un couplage houle /courant (TELEMAC / TOMAWAC).

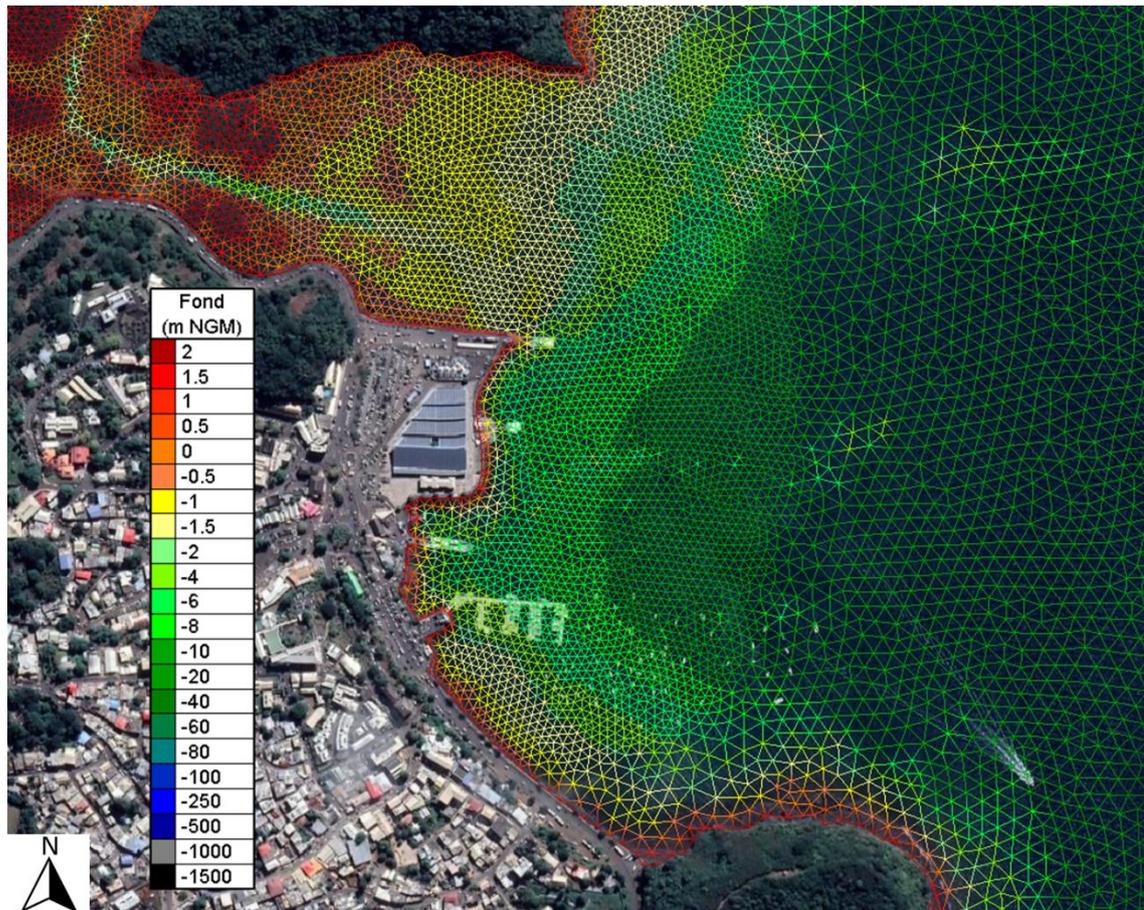


Figure 26. Zoom du maillage autour du secteur d'étude.

#### 4.3.1.3. Forçages

La marée astronomique sera forcée sur la frontière ouverte océanique grâce au modèle de prédiction de marée TPXO (Egbert & Erofeeva, 2002).

Les états de mer au large seront imposés par le modèle WW3 de l'Ifremer.

Concernant la prise en compte du frottement, les valeurs du coefficient de Manning dépendent de la nature des fonds et seront imposées en première approche sur la base du retour d'expérience de CASAGEC INGENIERIE :

- 0,02 m<sup>-1/3</sup>s au niveau de l'océan,
- 0,024 m<sup>-1/3</sup>s pour les fonds sableux du lagon,
- 0,035 m<sup>-1/3</sup>s pour les fonds vaseux du lagon,
- 0,083 m<sup>-1/3</sup>s au niveau du récif barrière.

#### 4.3.2. Calage et validation du modèle numérique

##### 4.3.2.1. Indices statistiques

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 mise en œuvre 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 sont utilisés afin d'analyser les capacités du modèle à reproduire les mesures :

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

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

- **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,

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

- **Le RMAE (Relative Mean Absolute Error)** également applicable aux grandeurs scalaires et vectorielles, rend compte de l'erreur relative. Ainsi un indice RMAE de 0 correspond à une représentation parfaite du modèle. Ce n'est jamais le cas dans la pratique, d'autant que l'indice RMAE ne prend pas en compte l'erreur réalisée lors de la mesure in-situ et du traitement des données,

$$RMAE = \frac{\langle |Y - X| \rangle}{\langle |X| \rangle} = \frac{MAE}{\langle |X| \rangle}$$

- **Le coefficient de corrélation  $r^2$**  défini avec la covariance  $\sigma_{xy}$  entre  $x$  et  $y$  et les écarts types  $\sigma_x, \sigma_y$ ,

$$r^2 = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x * \sigma_y}$$

- **L'ARMAE (Absolute Relative Mean Absolute Error)** prend en compte l'influence de l'erreur réalisée sur la mesure in-situ appelée OE.

$$ARMAE = \frac{\langle |Y - X| - OE \rangle}{\langle |X| \rangle}$$

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. Ne connaissant pas l'OE dans le cas de mesures de niveaux d'eau, l'ARMAE ne sera utilisé que pour la validation sur les vitesses. Enfin, Sutherland *et al.* (2004) proposent une classification (tableau ci-dessous) des valeurs de l'indice ARMAE qui rend compte de la qualité des modèles.

Tableau 13 : Classification de l'indice ARMAE (Sutherland *et al.* 2004).

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

#### 4.3.2.2. Niveau d'eau

Le calage et la validation des niveaux d'eau ont été réalisés par comparaison avec les données du marégraphe de Dzaoudzi.

La Figure 27 présente la comparaison des niveaux d'eau mesurés par le marégraphe et modélisés sur la période du 14 au 21 Juillet 2018. Cette période a été choisie car elle présente peu de surcote, ce qui permet d'observer uniquement l'influence de la marée astronomique.

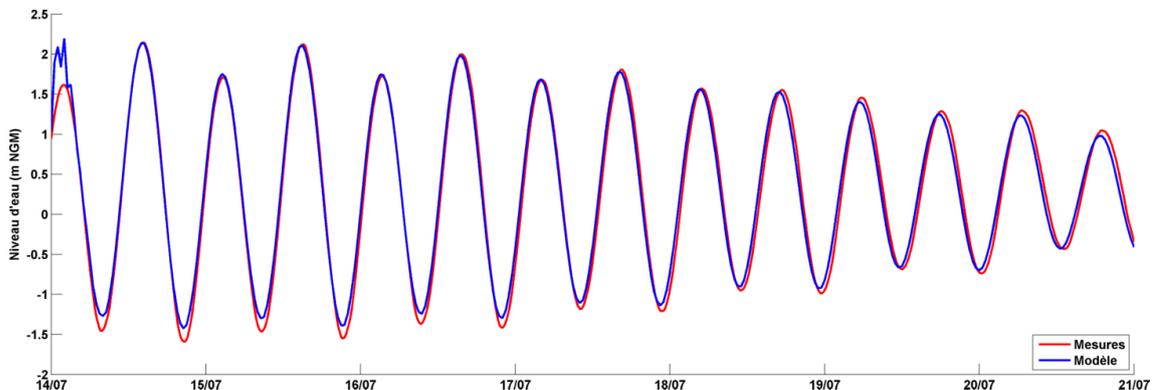


Figure 27. Comparaison entre le modèle et le marégraphe de Dzaoudzi sur la période du 14 au 21 Juillet 2018.

Cette comparaison montre de très bons résultats avec notamment un coefficient de corrélation de 0,99, un biais de 4cm et un ARMAE de 0,07 soit une qualité excellente du modèle d'après la classification de Sutherland présentée précédemment.

#### 4.3.2.3. Courants

Une comparaison sur les courants a également été effectuée à partir des données de Chevalier *et al.* (2017) qui ont été digitalisées.

Cette comparaison est effectuée au niveau du point Sud situé entre la Pointe Mahabou et Petite-Terre sur la période du 17 au 24 Novembre 2006 (cf. Figure 28).

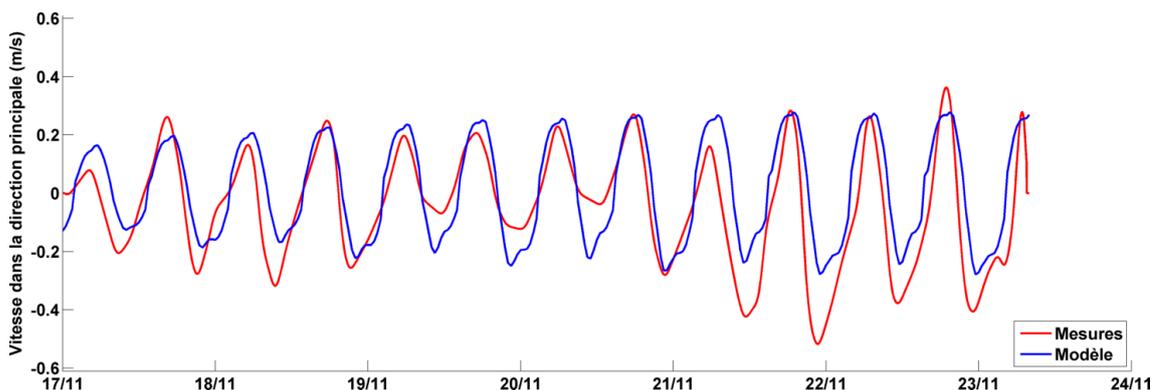


Figure 28. Comparaison des courants dans la direction principale (positif vers le Nord et négatif vers le Sud) sur la période du 17 au 24 Novembre 2006.

Cette comparaison montre des résultats relativement bons avec comme indices statistiques, un coefficient de corrélation de 0,84, un biais de 4cm/s et un ARMAE de 0,1 soit une qualité excellente du modèle d'après la classification de Sutherland présentée précédemment.

### 4.3.3. Résultats de modélisation

#### 4.3.3.1. Caractérisation des courants dans le lagon

Une fois le modèle calé et validé, une marée de vive-eau a été modélisée afin de caractériser les courants liés à la marée astronomique au sein du lagon (Figure 29 et Figure 30).

La marée joue un rôle prépondérant sur la circulation des courants dans le lagon qui est contrainte par deux zones principales d'échange avec le large :

- La large ouverture de 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 et vers le Sud au flot,
- 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, et inversement pour le jusant.

En l'absence de vent, 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 Mstamboro). Les zones à faible hydrodynamisme ( $< 0,2$  m/s) se trouvent à l'Ouest, au Sud-Ouest et à l'Est du lagon.

En période de mortes-eaux, les vents peuvent modifier les circulations tidales « classiques » :

- Par vent de NW (mousson), le courant est inversé au flot dans les parties E et S du lagon tandis qu'au jusant il est inversé dans les parties W et N ;
- Par vent de S (alizé), c'est la situation contraire avec un courant inversé au flot à l'W et au N et au jusant à l'E et au S du lagon.

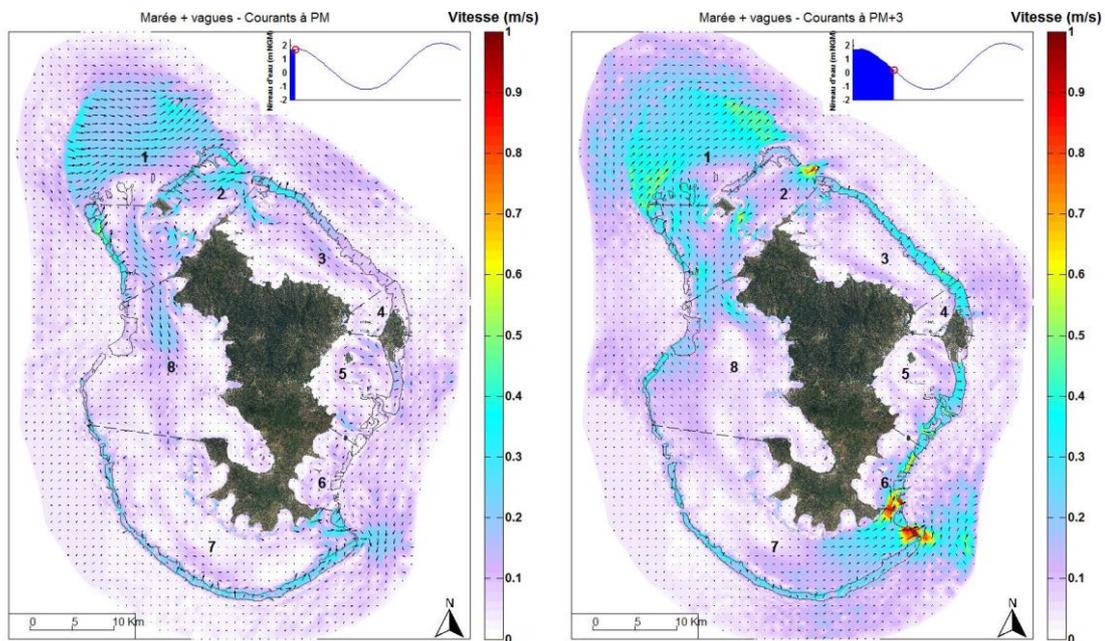


Figure 29 : Illustration de la circulation tidale dans le lagon de Mayotte

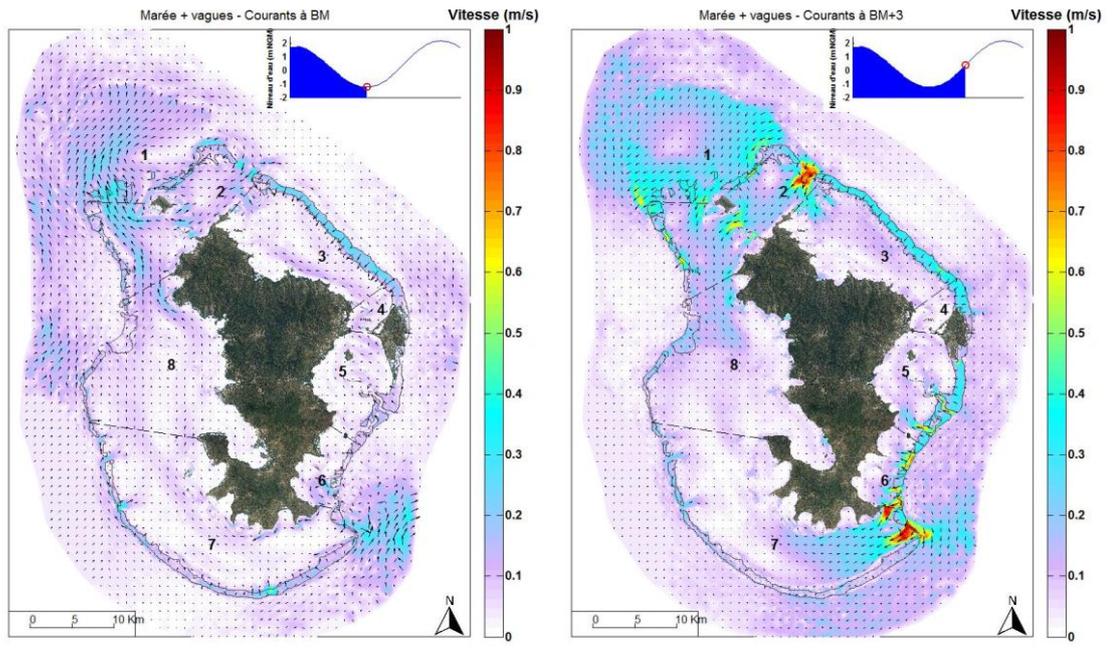


Figure 30. Illustration de la circulation tidale dans le lagon de Mayotte (suite).

#### 4.3.3.2. Caractérisation des courants au droit du site d'étude

Une marée de vive-eau a également été modélisée afin de caractériser les courants liés à la marée astronomique au droit du site d'étude.

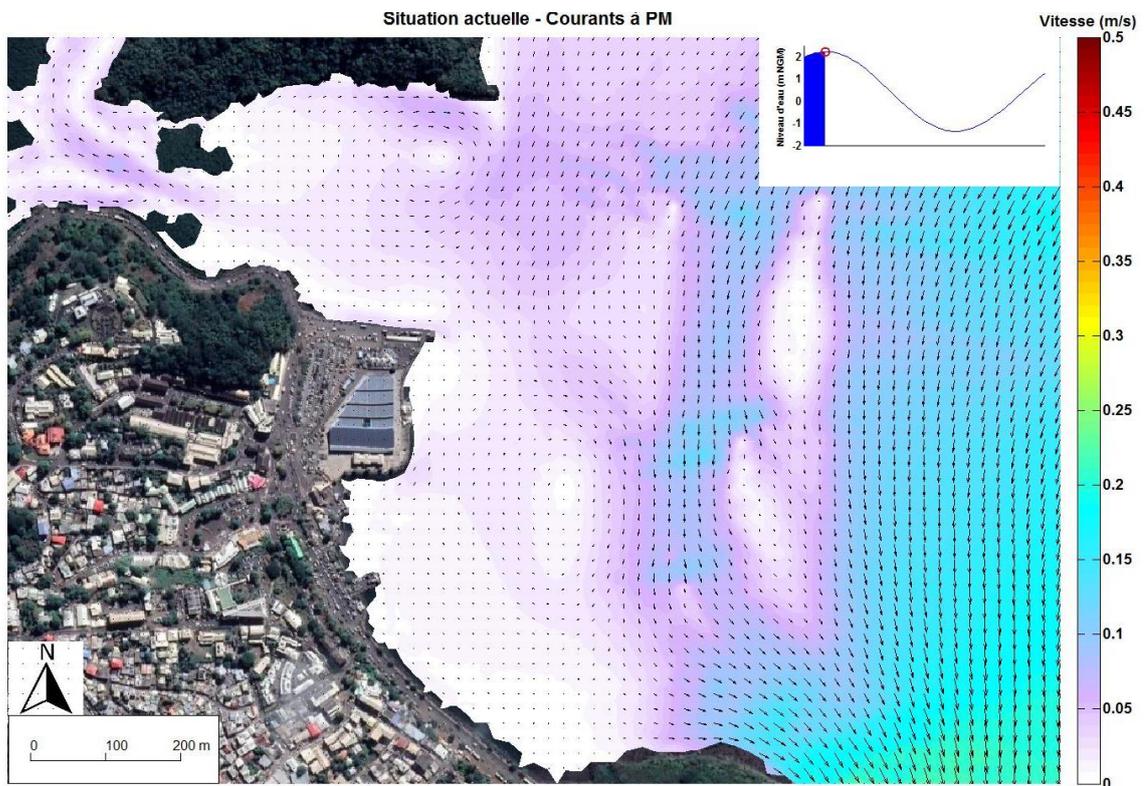


Figure 31. Marée de vive-eau - Courants à PM.

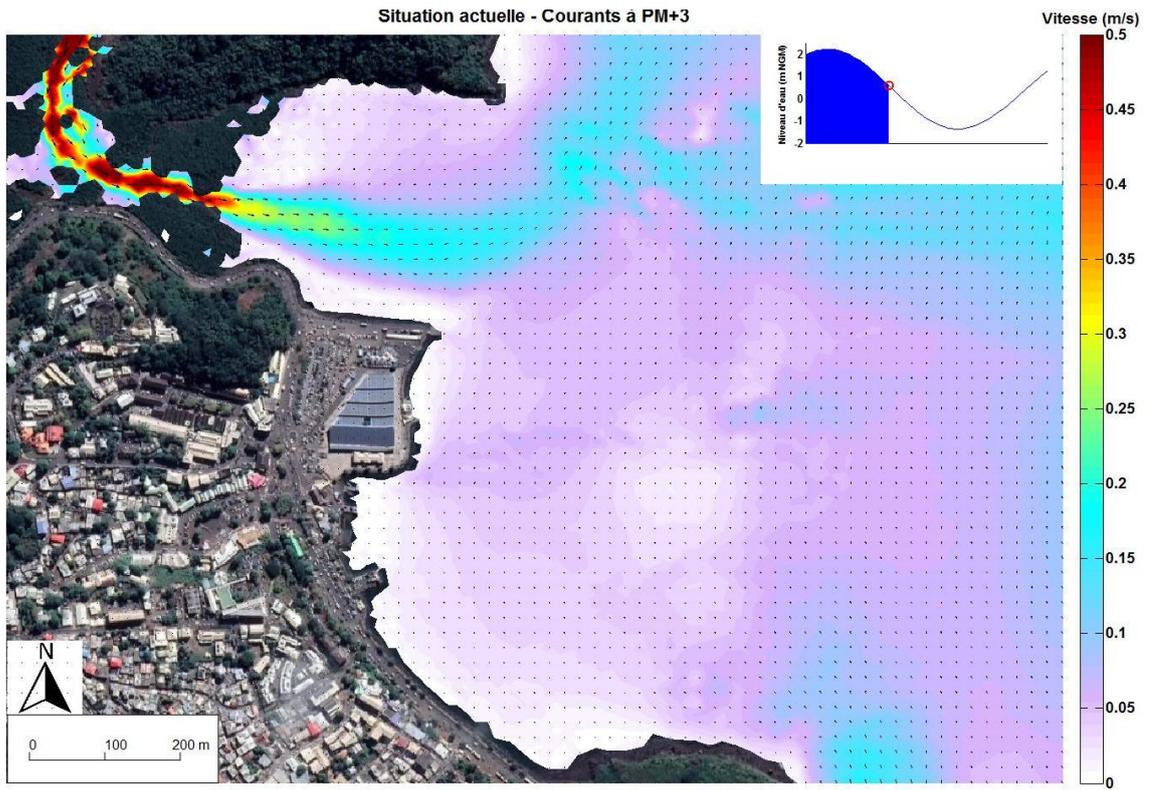


Figure 32. Marée de vive-eau - Courants à PM+3.

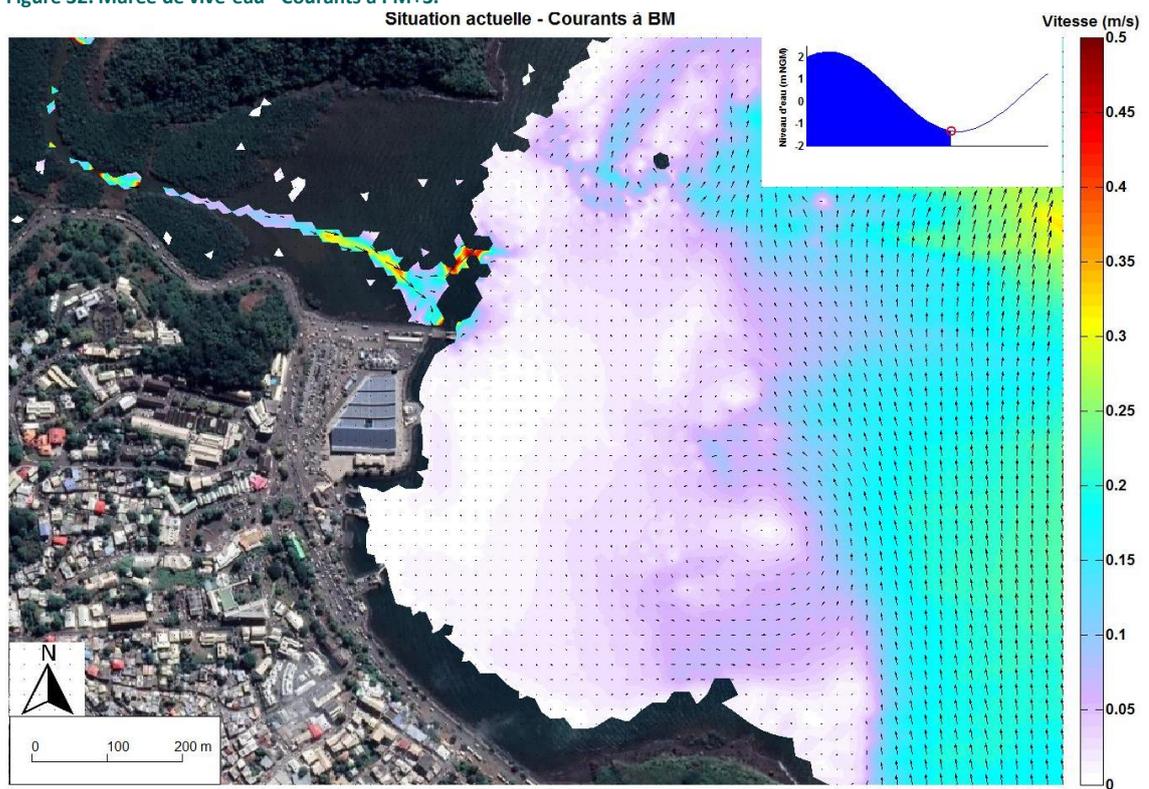


Figure 33. Marée de vive-eau - Courants à BM.

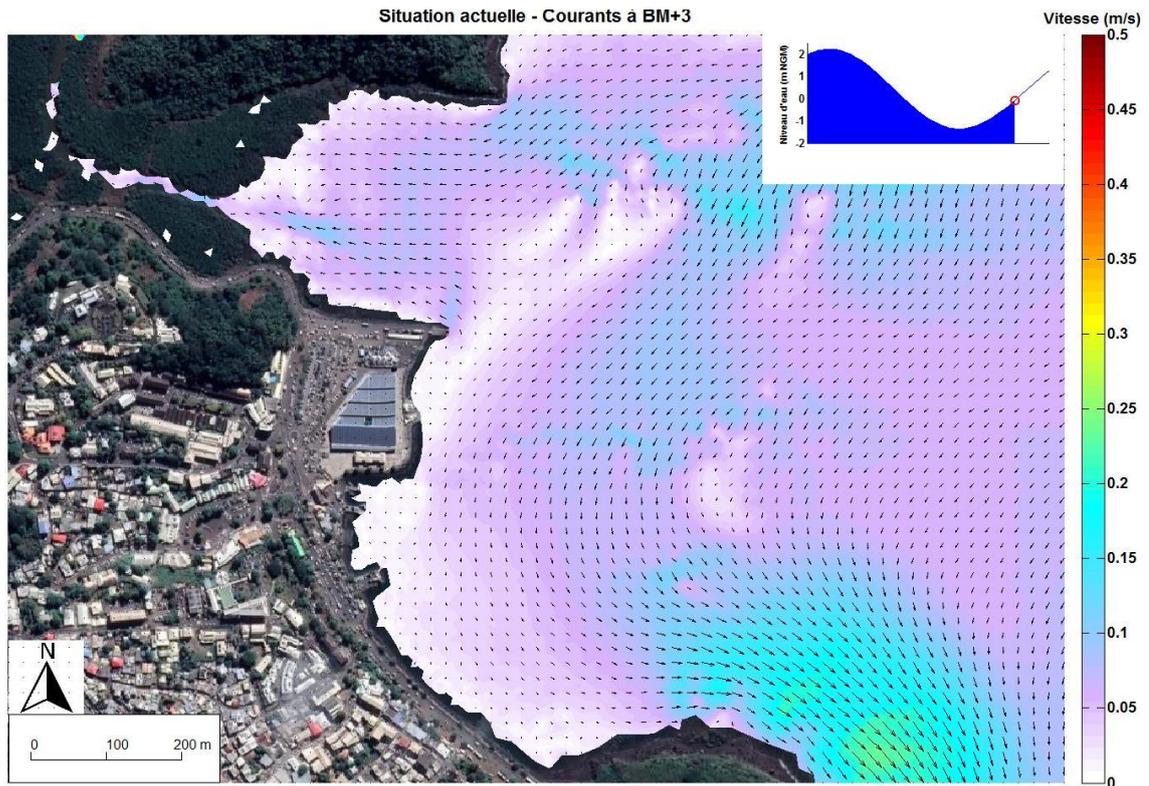


Figure 34. Marée de vive-eau - Courants à BM+3.

Les quatre figures ci-dessus présentent les courants pour une marée de vive-eau à différents instants du cycle de marée (PM, PM+3, BM et BM+3).

Les courants sont globalement relativement faibles autour du site d'étude.

## 4.4. CARACTERISATION DES FONDS MARINS

### 4.4.1. Modalités d'acquisition au sonar à balayage latéral

#### 4.4.1.1. Principe général du sonar à balayage latéral

La cartographie de la nature des fonds a été basée sur l'utilisation d'un sonar à balayage latéral permettant de constituer des images acoustiques détaillées de la réflectivité des fonds marins. Le sonar est immergé dans la colonne d'eau et trainé par une embarcation à vitesse constante. Il émet un faisceau sonore étroit en direction du fond et balaye latéralement les fonds avec un angle d'incidence rasant.

Le sonar capte le signal réfléchi, ce qui permet de mettre en évidence la présence de relief, de petits obstacles et petites irrégularités du fond.

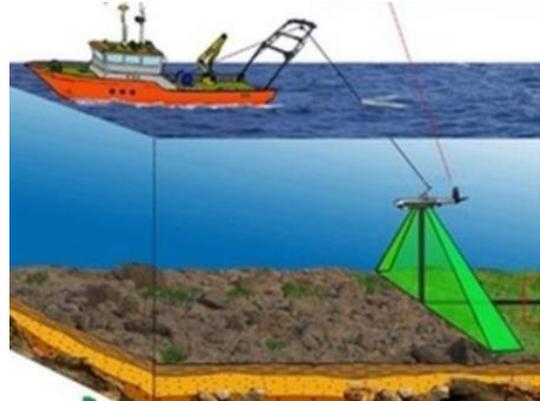


Figure 35: Principe d'utilisation du sonar à balayage latéral

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de cartes des fonds, en niveau de gris. La variation d'intensité du signal reçu permet de mettre en évidence la morphologie et la nature texturale du fond. En effet l'intensité du signal réfléchi dépend de :

- La nature du fond : Pour un même relief, une roche dure dite « fraîche », fortement réfléchive, apparaîtra gris-sombre, alors qu'un sédiment meuble apparaîtra gris-clair sur une dalle en niveau de gris,
- Des reliefs : Pour une nature de roche donnée, l'intensité des contrastes entre plages de teintes différentes (texture) permet d'apprécier les reliefs, et l'intensité du gris la valeur relative des pentes (les fortes pentes et les ondulations des bancs de sables apparaissent plus sombres),
- De la granulométrie du sédiment. Plus les grains sont gros, plus la dispersion des ondes est importante, et plus le signal sonar est dévié. Ainsi, plus la granulométrie est élevée, plus l'image sonar obtenue sera sombre.

Outre la localisation rapide d'objets sur le fond (épaves, ancres, pipelines...), cette technologie permet également de déterminer et de localiser des ensembles géologiques tels que des structures morpho-sédimentaires (roches, sables, granulats) mais également des ensembles biologiques tels que des habitats marins (herbiers, galets...).

#### 4.4.1.2. Protocole de suivi et plan d'échantillonnage

Les acquisitions sonar ont été réalisées par le biais d'un sonar de type Tritech Starfish 452F. Elles ont été pilotées depuis un ordinateur équipé de la suite logicielle HYPACK, permettant la centralisation des données ainsi que la navigation.

Le géoréférencement des données est permis par un GPS VFAN permettant la correction métrique des données, précision suffisante pour ce type de levé.



Figure 36: Sonar de type Tritech Starfish 452F

L'emprise du levé couvre une zone de 17,3 ha (Figure 37) allant :

- Du Nord au Sud de la mangrove de Kawéni jusqu'à la limite Nord de la Pointe Mahabou,
- D'Est en Ouest entre les courbes bathymétriques -3m NGM à -12m NGM. Les zones peu profondes (<-3m NGM) n'ont pas été couvertes car le sonar doit à la fois être suffisamment immergé pour obtenir des données de bonne qualité mais néanmoins être maintenu à une hauteur suffisante dans la colonne d'eau pour ne pas risquer d'entrer en collision avec un haut-fond.

L'acquisition consiste à suivre des profils parallèles à la côte afin de quadriller au mieux la zone d'étude. L'environnement de l'étude a généré des contraintes d'acquisition qui peuvent être décrites selon trois zones, figurant sur la Figure 37:

- La zone 1 au droit du quai a fait l'objet d'une acquisition le 17/07/2019. Dans cette zone, la principale contrainte a été le passage régulier des barges et amphidromes (déplacements toutes les 15 minutes) qui a contraint la navigation et a pu générer des artefacts sur les images en raison de la turbidité provoquée par la remise en suspension des sédiments sur les petits-fonds,
- La zone 2 au droit de la mangrove de Kawéni a fait l'objet d'une acquisition le 18/07/2019. En raison de la présence de hauts fonds pouvant heurter le sonar, l'acquisition a dû être réalisée dans des conditions de marée haute plus favorables,
- La zone 3 au Sud du ponton de plaisance a fait l'objet d'une acquisition le 18/07/2019. Dans cette zone la forte présence des bateaux de plaisance au mouillage et de corps morts abandonnés a fortement contraint la navigation. Ainsi, certaines parties n'ont pu être couvertes.

Afin de confirmer les observations lors de l'acquisition sonar, des prélèvements de sédiments destinés à l'analyse granulométriques ont été réalisés. L'analyse granulométrique a porté sur 14 stations réparties selon le plan d'échantillonnage donné en Figure 37 :

- 9 stations nommées de G1 à G9 dont la répartition fut déterminée consécutivement à l'acquisition sonar en fonction des variations de faciès observés,
- Les 5 stations de suivi de la qualité des sédiments qui ont également fait l'objet d'une analyse granulométrique par le laboratoire.

Les sédiments ont été prélevés directement sur le fond par un plongeur scaphandrier. Les sédiments sont ensuite répartis dans un flaconnage adapté fournis par le laboratoire EUROFINS. Etant donnée leur forte teneur en eau, deux flacons ont été remplis par station afin de disposer de suffisamment de matériel pour analyse après le séchage des sédiments.

L'analyse granulométrique est effectuée par granulométrie laser par le laboratoire EUROFINS selon les tranches 2/ 20/ 63/ 200 / 2000 µm.

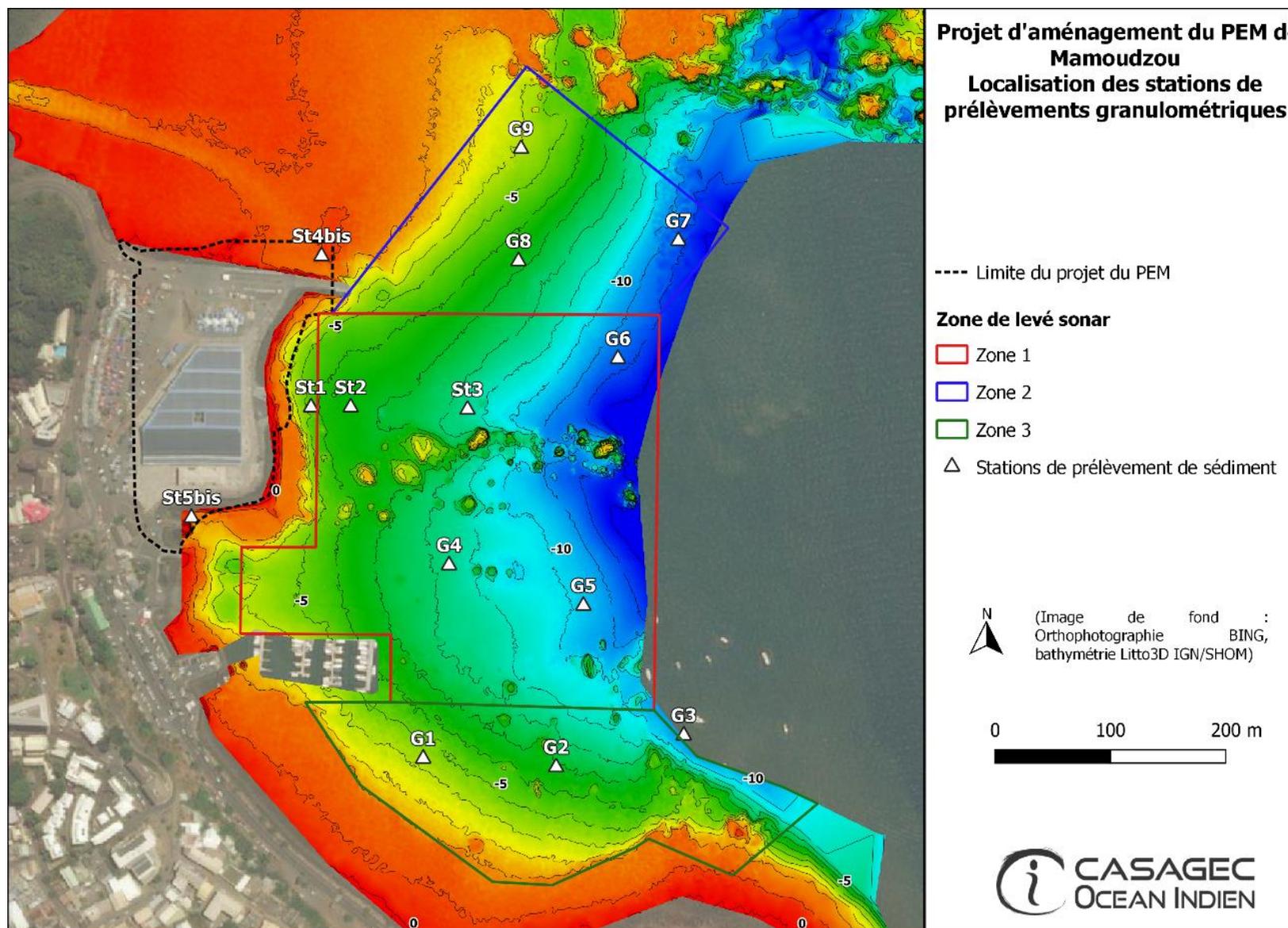


Figure 37: Localisation de l'emprise de l'acquisition au sonar à balayage latéral et position des stations de prélèvement de sédiments pour l'analyse granulométrique

#### 4.4.2. Résultat de la caractérisation des fonds marins

---

La zone est constituée de fonds homogènes en termes de texture. Les principales structures mises en évidence, sur la base du levé et de la compilation des données existantes sur la zone d'étude, sont :

- Les différentes zones de hauts fonds présentes sur la carte bathymétrique au droit du ponton (pinacles coralliens),
- Le récif frangeant au Sud au niveau de la Pointe Mahabou (beach rock),
- Des objets de petite taille et de formes angulaires probablement d'origine anthropique.

Le levé sonar couplé aux analyses granulométriques ainsi que les données bibliographiques permettent de préciser la nature des sédiments et leurs répartitions spatiales dans la zone (Figure 38):

- Une dominance des « vases » (proportion de fines >75%) au sein des zones de levé 1 et 2, localisées au droit de la mangrove et du futur PEM,
- Une zone vaso-sableuse (proportion de fines comprise entre 25 et 75%) qui se prolonge le long de l'amphidrome au débouché du chenal de la Kawénilajolie sur le lagon. Ce même faciès s'observe également au le droit de la barge « piétons » et s'étend sur la moitié des mouillages,
- Un espace à dominante plus sableuse (sables coralliens grossiers) avec une proportion de fines comprise entre 5 et 25% (faciès sablo-vaseux) qui longe la côte depuis l'extrémité Sud de la zone d'accueil du futur PEM jusqu'au port de plaisance,
- Une zone de sédiments hétérogènes en pied des ouvrages composés de sables mixtes (mélange des matériaux terrigènes et marins).

Ces résultats sont cohérents avec les données bibliographiques disponibles présentées précédemment en section 2.10.

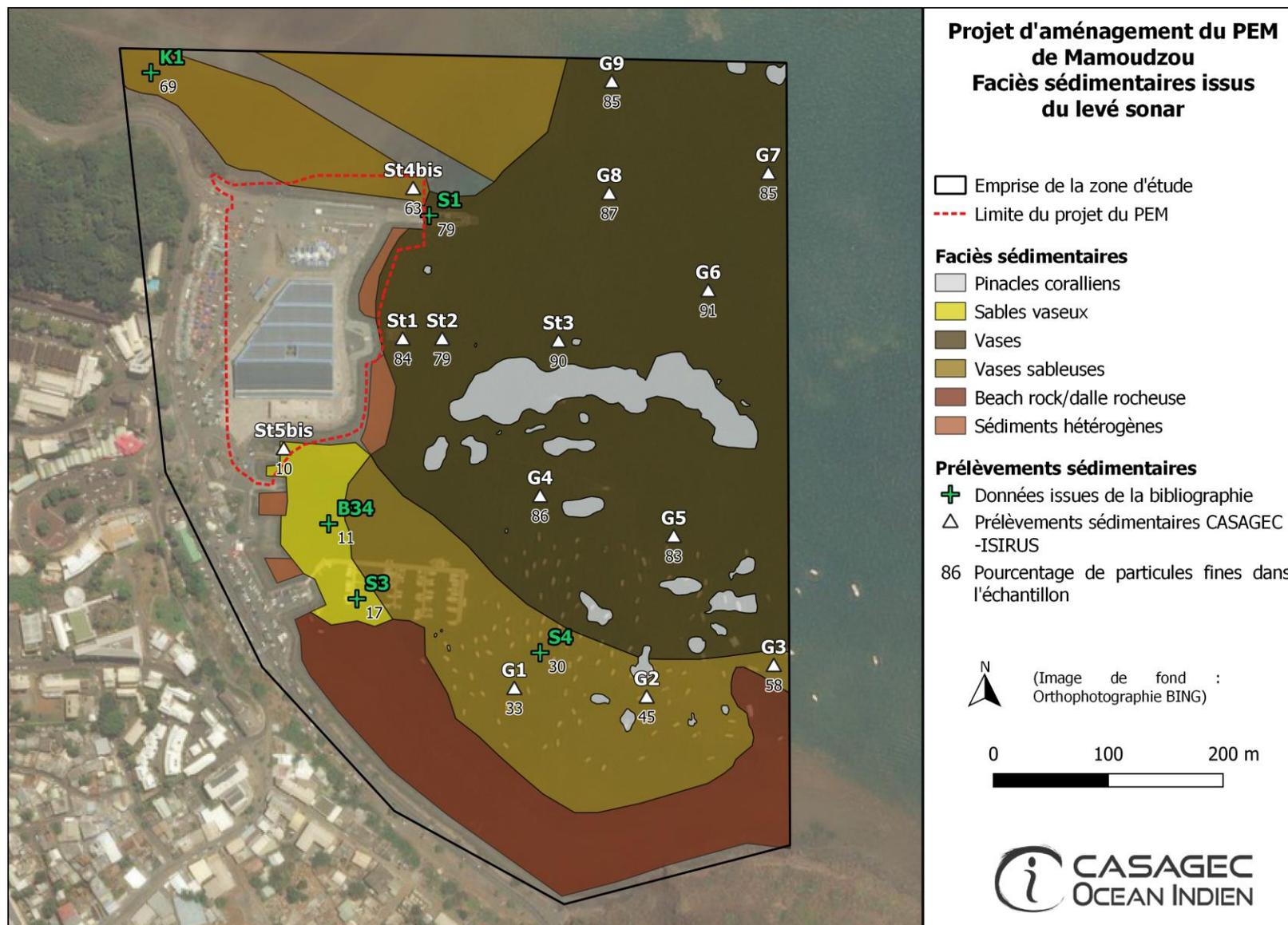


Figure 38: Nature de fonds au sein de la zone d'étude

## 5. IMPACTS DU PROJET EN PHASE TRAVAUX ET EXPLOITATION SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROSEDIMENTAIRE DU SECTEUR D'ETUDE

Les paragraphes ci-après traitent des incidences potentielles que pourrait avoir le projet de PEM sur le fonctionnement hydrosédimentaire du secteur d'étude. Au regard des nombreux projets en cours sur le littoral de la commune (aménagement global du littoral depuis l'esplanade de front de mer au Sud de la zone d'étude (Mairie Mamoudzou) jusqu'à la berge intérieure de la Kawéni au Nord (Projet Caribus), nettoyage et remise aux normes de l'actuel mouillage), des incidences cumulées seront néanmoins à prévoir et à prendre en compte lors de la mise en œuvre des futurs suivis qui devront notamment permettre de dresser un état du milieu post-travaux.

### 5.1. IMPACTS EN PHASE TRAVAUX

#### A. Incidences sur la qualité physico-chimique de l'eau

Une augmentation potentielle de la turbidité et de la dispersion de fines est à envisager, liée notamment à :

- La démolition de certains ouvrages existants,
- La mise en place de la digue d'enclôture,
- Le départ de matériaux de remblai, faute d'étanchéité suffisante de l'ouvrage périphérique.

La zone d'étude, sous l'influence de la Kawéni et du réseau de collecte pluviale d'une partie du chef-lieu, est naturellement exposée à des variations ponctuelles et importantes de turbidité.

#### B. Incidences sur la qualité chimique de l'eau

Les opérations de remblaiement, en remettant en suspension les sédiments chargés en Arsenic présents au Sud du terre-plein du marché, pourront être source de dégradation de la qualité chimique de l'eau par relargage de cet élément trace métallique dans la colonne d'eau.

Par ailleurs, l'intervention d'engins de chantier est susceptible d'entraîner une dégradation ponctuelle de la qualité chimique de l'eau en cas de pollution accidentelle, occasionnée par des fuites d'huile et de carburant.

#### 5.1.1.1. Qualité des sédiments

##### A. Incidences sur la nature des sédiments

Les travaux de démolition et de remblaiement pourront engendrer des apports de matériaux. Ces matériaux de granulométrie variable (fines, gravats, ...) risquent, au regard de la faible courantologie du site, de venir se déposer aux abords de la zone de projet (faible courant), modifiant potentiellement les faciès en présence.

##### B. Incidences sur la qualité chimique des sédiments

Les opérations pourront potentiellement affecter la qualité des sédiments en dispersant les sédiments contaminés en arsenic présents au Sud du marché vers les zones adjacentes non ou plus faiblement contaminées.

Par ailleurs, à l'instar de l'eau (cf. paragraphe précédent), le projet est susceptible d'entraîner une dégradation de la qualité chimique des sédiments (matrice intégratrice) en cas de pollution accidentelle, occasionnée par des fuites d'huile et de carburant.

### 5.1.2. Impacts sur les conditions hydrodynamiques de la zone

En phase travaux, les impacts sur la courantologie seront nuls dans l'anse Choa relativement calme en terme hydrodynamique. Les impacts du nouveau terre-plein seront considérés qu'une fois celui-ci totalement construit, soit en phase d'exploitation.

### 5.1.3. Impacts sur la dispersion et le transport des sédiments

Au regard de l'influence nulle du projet sur les courants locaux en phase travaux, le projet aura une incidence nulle sur le transport des sédiments.

## 5.2. IMPACTS EN PHASE EXPLOITATION

### 5.2.1. Impacts sur la qualité du milieu

#### 5.2.1.1. Qualité de l'eau

En phase d'exploitation, aucune intervention n'aura lieu sur l'aire d'étude. Le projet sera donc sans effet direct sur la qualité de l'eau.

Néanmoins, l'augmentation du trafic maritime pourra être source de dégradation ponctuelle en cas de pollution accidentelle.

#### 5.2.1.2. Qualité des sédiments

En phase d'exploitation, aucune intervention n'aura lieu sur l'aire d'étude. Le projet sera donc sans effet direct sur la qualité des sédiments.

Néanmoins, l'augmentation du trafic maritime pourra être source de dégradation ponctuelle en cas de pollution accidentelle.

### 5.2.2. Impacts sur le fonctionnement hydrosédimentaire de la zone

L'emprise du projet a été intégrée au maillage du modèle numérique.

Les courants sont extraits au niveau de trois profils au flot et au jusant d'une marée de vive-eau afin d'observer l'impact du projet sur l'hydrodynamique du site.



Figure 39 : Position des profils d'extraction des courants.

Les Figure 40 à Figure 42 montrent les vitesses sans et avec projet au flot et au jusant d'une marée de vive-eau pour les trois profils d'extraction.

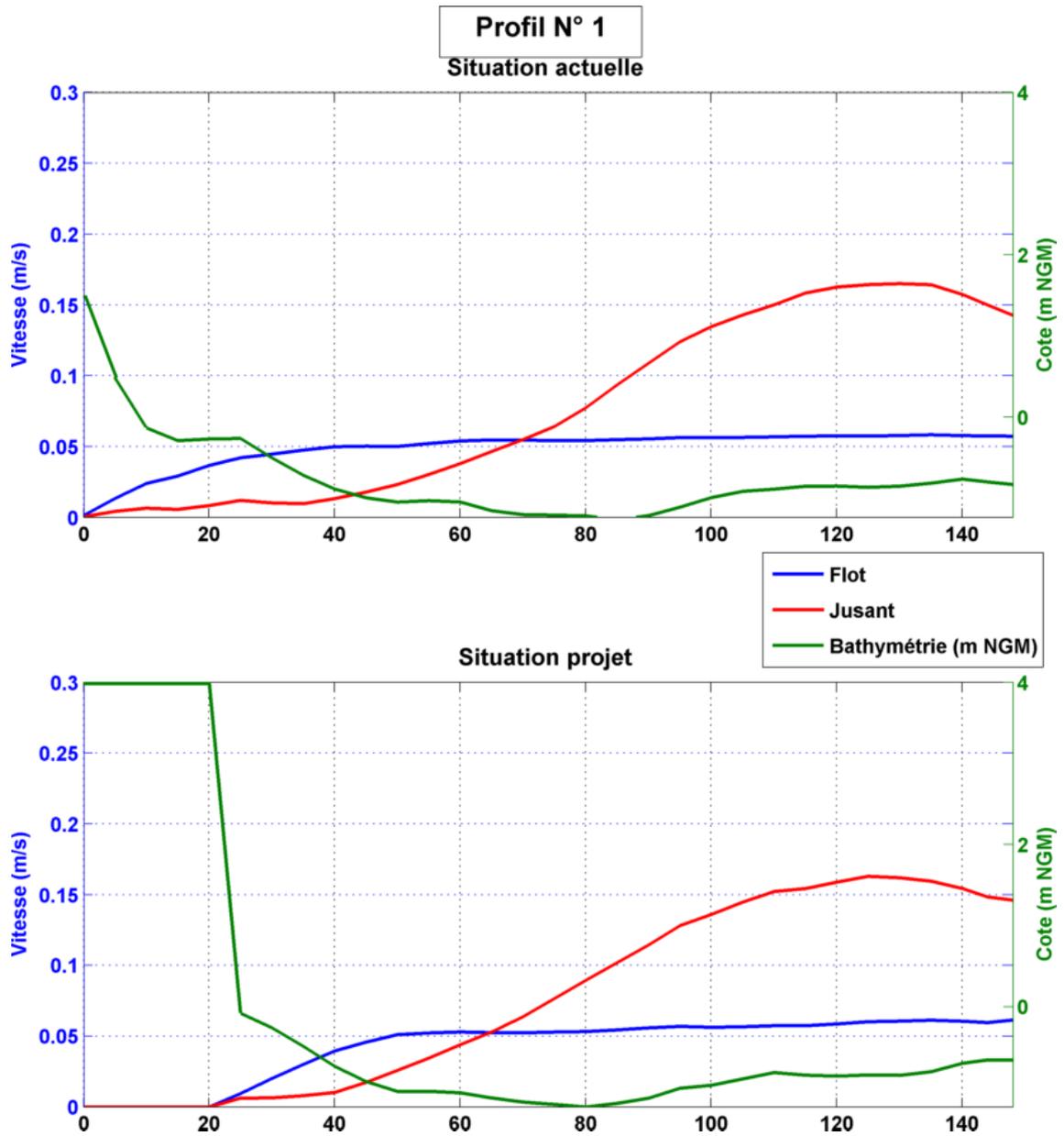


Figure 40. Vitesses sans et avec projet pour une marée de vive-eau au niveau du profil 1.

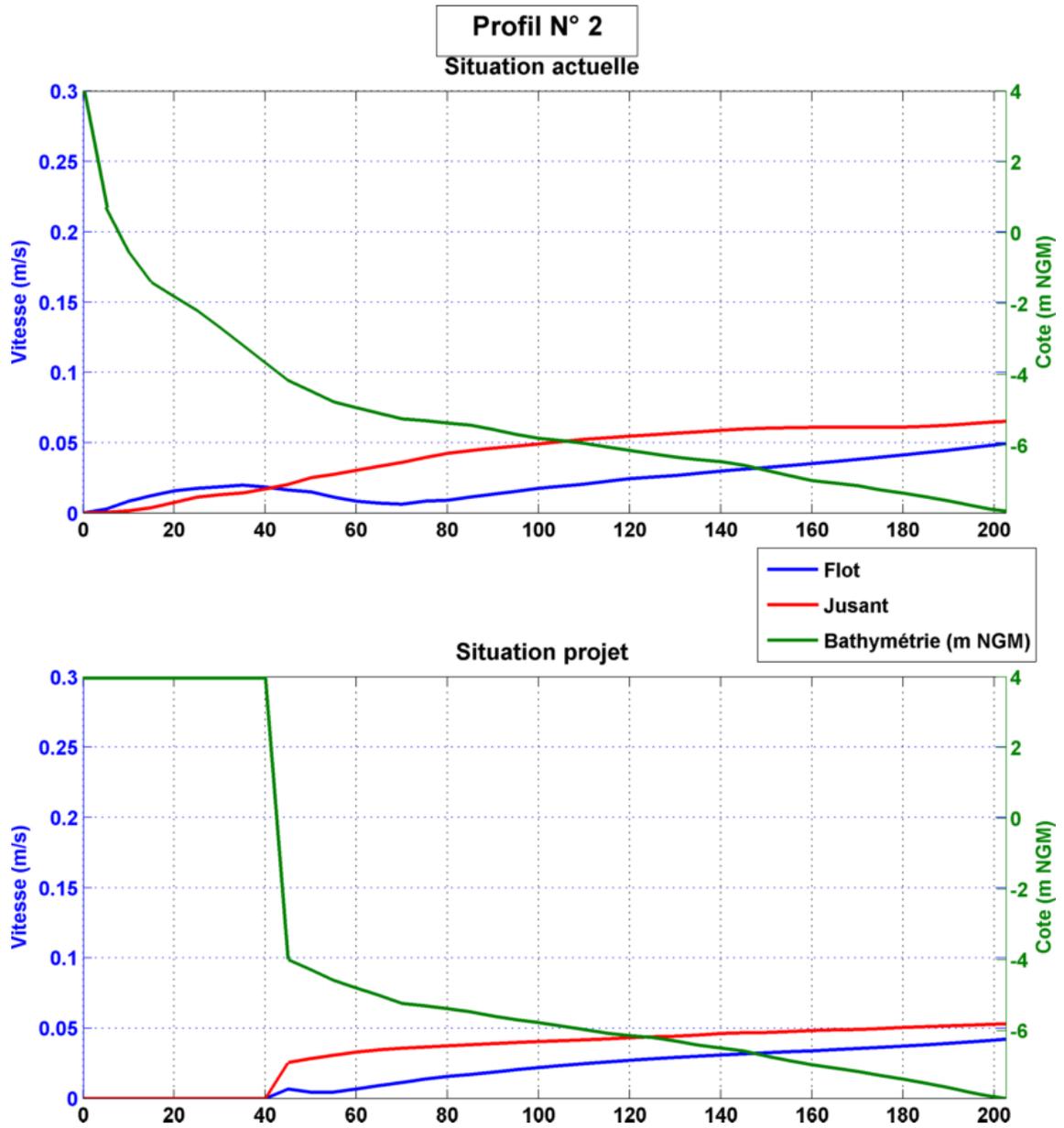


Figure 41. Vitesses sans et avec projet pour une marée de vive-eau au niveau du profil 2.

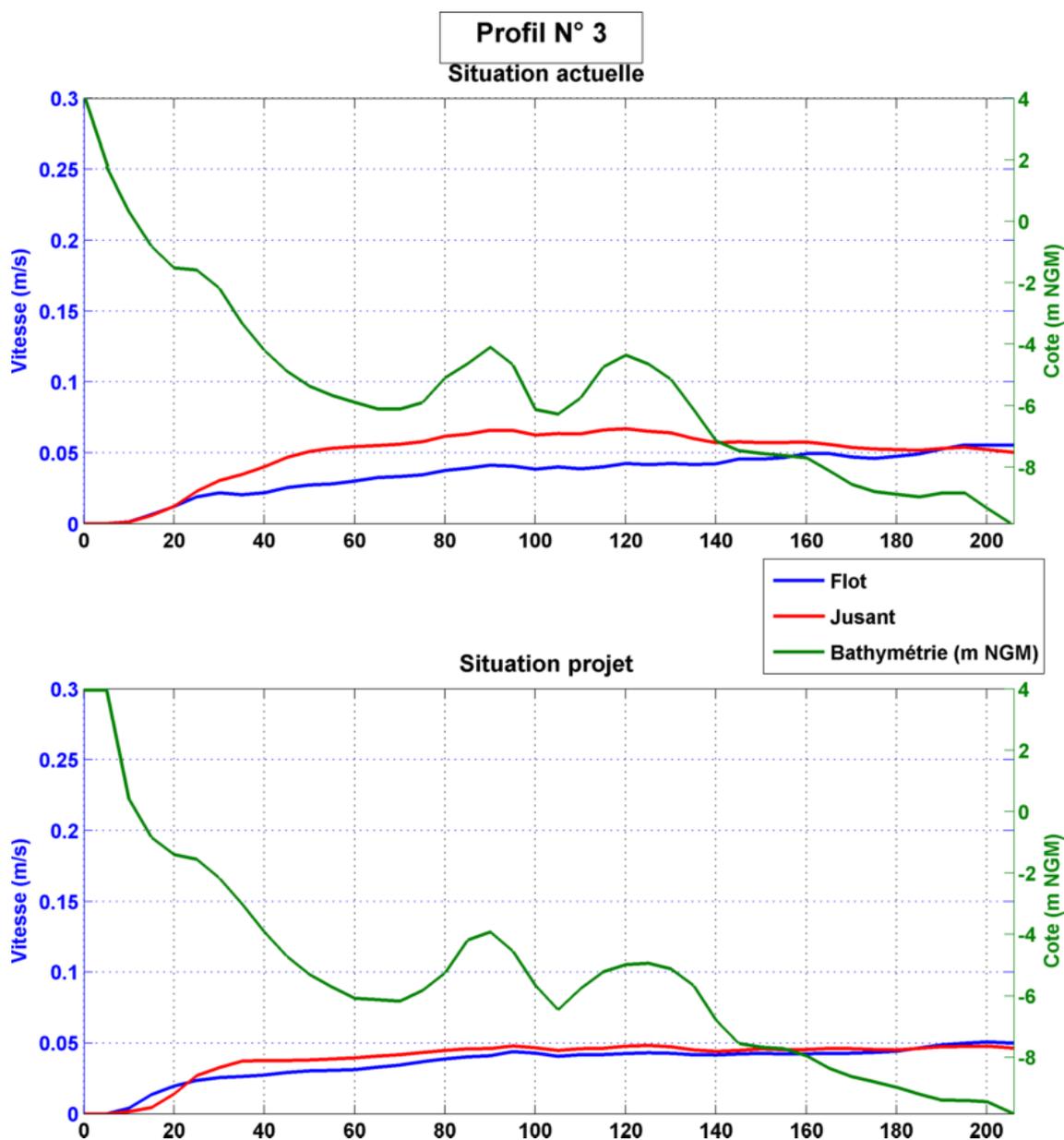


Figure 42. Vitesses sans et avec projet pour une marée de vive-eau au niveau du profil 3.

Que ce soit sans ou avec projet, les vitesses au droit du site d'étude sont relativement faibles et l'ajout du projet, sans autre changement du trait de côte actuel, n'entraîne pas de modification significative des courants. Ces résultats montrent l'impact faible du projet sur l'hydrodynamique et donc sur le fonctionnement hydrosédimentaire du site.

### 5.2.3. Impacts sur la dispersion et le transport de ces sédiments

Au regard de la faible influence du projet sur les courants locaux, le projet aura une incidence directe faible, confinée aux abords de l'ouvrage, sur la dispersion et le transport de ces sédiments, dominés par les particules fines au niveau de la zone d'étude. Les angles du futur quai de débarquement au Nord devraient néanmoins engendrer une légère adaptation de la dérive littorale, du goulot de la Kawéni et des dunes hydrauliques autour de cet ouvrage.

L'augmentation du trafic maritime aura néanmoins une influence indirecte engendrant une remise en suspension régulière des fines sur les fonds de 5m et moins.

## 6. PRECONISATION DE MESURES POUR EVITER-REDUIRE-COMPENSER

Au regard des incidences identifiées dans les sections précédentes, les mesures présentées ci-après portent essentiellement sur la réduction du risque de pollution liée à l'intervention des engins de chantier et aux opérations de remblaiement et de démolition.

### 6.1. LIMITATION DU RISQUE DE POLLUTION ACCIDENTELLE DES SABLES ET DE L'EAU PAR LES ENGIN DE CHANTIER

Les risques de pollution liés au chantier relèvent principalement :

- Des installations de chantier avec stockage des engins, de lubrifiants, carburants, etc... ,
- Des déversements accidentels (renversement de fûts, d'engins, etc...) ou de négligence (déchets non évacués),
- De l'entraînement des fines vers les cours d'eau par ruissellement des eaux pluviales sur des terrassements non stabilisés.

Afin de minimiser ces impacts, les précautions suivantes seront prises durant le chantier :

- Les zones de stockage des hydrocarbures seront étanches et confinées (plate-forme étanche avec rebord ou container permettant de recueillir un volume liquide équivalent à celui des aires de stockage),
- Les vidanges, nettoyages, entretiens et ravitaillements des engins seront réalisés sur des emplacements aménagés à cet effet. Les produits de vidanges seront recueillis ou évacués en fûts fermés vers des décharges agréées,
- Le matériel et les engins utilisés seront soumis à un entretien régulier très strict et équipés de kits anti-pollution,
- Les installations de chantier seront raccordées au réseau d'eaux usées communal,
- Des consignes de sécurité seront établies, de manière à éviter tout accident.

### 6.2. LIMITATION DU RISQUE DE POLLUTION LIE AU MATERIAUX DE REMBLAIEMENT

Afin de limiter les risques de pollution liés aux matériaux de remblai, l'entreprise sélectionnée à l'issue du marché de travaux se verra dans l'obligation de justifier de la bonne qualité chimique des matériaux.

Le maître d'ouvrage se réservera le droit de demander des analyses complémentaires en cas de doute sur l'innocuité des déblais proposés. Il pourra également effectuer de sa propre initiative des contrôles supplémentaires sur la qualité chimique et géotechnique de ces matériaux d'apport.

### 6.3. LIMITER LES DEPARTS DE MATERIAUX DE REMBLAI DANS LE MILIEU

La méthode d'extension de la plateforme sur le lagon permettra de limiter les départs de matériaux dans le milieu à l'aide du confinement offert par l'édification de la digue périphérique, sorte de système d'isolement du chantier, mis en place préalablement à la phase de remblaiement.

### 6.4. LIMITER LE DEPART DE PRODUITS DE DEMOLITION

Lors des phases de démolition (rampe Nord, quai des pêcheurs), les éléments concassés susceptibles de tomber à l'eau seront récupérés en bord de quai avant évacuation vers une filière agréée.

## 7. PROPOSITION DE MODALITES DE SUIVI

Afin de vérifier la correcte appréciation des effets défavorables et le caractère adéquat des mesures prises dans la section précédente (section « 6. Préconisation de mesures pour Eviter-Réduire-Compenser »), des moyens de surveillance pourront être mis en place en phase travaux et en phase exploitation.

### 7.1. SUIVI DE L'AUGMENTATION POTENTIELLE DE LA TURBIDITE LIEE AU TRAVAUX

Des contrôles journaliers de turbidité seront réalisés en amont, au niveau et en aval de la zone de chantier lors des différentes tranches de travaux nécessitant des opérations de démolition, de mise en place de la digue périphérique, de remblaiement et de dépose des systèmes d'amarrage (chaînes mère, chaînes filles, pendilles et manilles), des chaînes d'ancrage du ponton des croisiéristes et des corps-morts.

### 7.2. SUIVI DE LA QUALITE DES SEDIMENTS AUX ABORDS DU NOUVEAU REMBLAI ET DES ZONES DE DEMOLITION

Afin de s'assurer de l'absence de départ de matériaux d'apport et de démolition aux abords de la zone de travaux d'une part et de suivre l'impact du projet sur la qualité chimique d'autre part, des prélèvements sédimentaires seront mis en œuvre le long du futur remblai. A des fins de comparaison, les stations échantillonnées lors de la caractérisation de l'état initial, objet du présent rapport, pourraient servir de points de référence.

Les analyses, à réaliser en phase travaux puis en début d'exploitation, porteront sur la composition granulométrique et la qualité chimique des matériaux.

## 8. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Le Conseil Départemental de Mayotte et la Ville de Mamoudzou se sont associés dans le projet urbain du Pôle d'Echange Multimodal (PEM). Ce projet, localisé sur le littoral de Mamoudzou au niveau du terre-plein de l'actuel marché, est soumis à diverses procédures administratives au titre notamment du Code de l'Environnement. Dans ce contexte et afin d'alimenter les futurs dossiers règlementaires une étude des conditions hydrodynamiques et hydrosédimentaires, objet du présent rapport, a été commanditée par la maîtrise d'ouvrage. Ainsi, une revue bibliographique, plusieurs campagnes de terrain ainsi qu'un travail de modélisation numérique ont été mis en œuvre.

En termes de qualité du milieu, aucune anomalie particulière dans les valeurs prises par les paramètres hydrologiques mesurés en mai n'est à souligner au regard des données bibliographiques disponibles. Les données de qualité physico-chimique de l'eau acquises en juillet présentent quant à elles un état moyen (turbidité élevée) au regard des grilles nationales et des seuils proposés actuellement dans le cadre du RNAOE (ARVAM, PARETO, 2013). Concernant les sédiments, les concentrations en contaminants mesurées traduisent une influence anthropique particulièrement marquée en bordure Sud du terre-plein du marché, près du débarcadère des barges, notamment en termes de concentrations en arsenic et en hydrocarbures.

Les conditions hydrosédimentaires du secteur à l'étude ont été modélisées via la suite logicielle TELEMATOMAWAC (couplage houle /courant). La calibration et la validation de ce modèle 2DH, couvrant l'ensemble du Lagon de Mayotte et raffiné au niveau du littoral de Mamoudzou, se sont appuyés sur les données du marégraphe de Dzaoudzi (niveaux d'eau) et des données de courant issues l'étude de Chevalier *et al.* (2017). A l'échelle globale, la marée joue un rôle prépondérant sur la circulation des courants dans le lagon qui est contrainte par deux zones principales d'échange avec le large. En l'absence de vent, 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 Mstamboro). Les zones à faible hydrodynamisme ( $< 0,2$  m/s) se trouvent à l'Ouest, au Sud-Ouest et à l'Est du lagon. Aux abords de la zone de projet, les courants restent globalement faibles ( $< 0,1$  m/s) à l'exception de l'embouchure de la Kawéni où les vitesses peuvent atteindre 0,3 m/s. Les apports de fines sont gouvernés par le régime hydrologique de la Kawéni. Les faibles circulations globales reprennent peu ces sédiments qui se déposent et s'accumulent pour former une plaine vaseuse. La zone la plus dynamique correspond ainsi au débouché de la Kawéni, modelé sous l'effet des crues.

La nature des fonds au sein de la zone d'étude a été appréhendée à l'aide d'un levé au sonar à balayage latéral complété par la mise en œuvre d'analyses granulométriques et l'exploitation de données bibliographiques pour la caractérisation des zones peu profondes proches de la cote ( $< 3$  m NGF). Une large zone vaseuse, contenant une fraction granuleuse et/ou graveleuse plus ou moins importante, s'étend au droit du futur PEM. L'extrémité Nord du futur terre-plein au débouché de la Kawéni se distingue par une proportion non négligeable de matériaux sableux, bien que les lutites ( $< 0,63$   $\mu$ m) restent majoritaires. A l'inverse, l'extrémité Sud du terre-plein actuel, est constituée d'un sable en cours de colmatage par des lutites.

Enfin, l'ensemble de ces éléments de connaissance a été mis au regard des caractéristiques techniques du projet afin d'identifier ses incidences potentielles sur le fonctionnement hydrosédimentaire du secteur d'étude en phase travaux et exploitation. Les principaux impacts identifiés sont liés à des dégradations ponctuelles de la qualité du milieu du fait de la dispersion de fines et de pollutions accidentelles. Plusieurs mesures ont ainsi été proposées afin de réduire et de suivre ces incidences. Au regard des nombreux projets en cours sur le littoral de la commune (aménagement global du littoral depuis l'esplanade de front de mer au Sud de la zone d'étude (Mairie Mamoudzou) jusqu'à la berge intérieure de la Kawéni au Nord (Projet Caribus), nettoyage et une remise aux normes de l'actuel mouillage), des incidences cumulées non évaluées ici seront néanmoins à prévoir.

## BIBLIOGRAPHIE

- ANDRAL B. et DEROLEZ V. (2007).** Mise en œuvre du contrôle de surveillance : campagne DCE 2006. Rapport Ifremer pour le compte de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse. 193 pages
- AQUAREF** - Opérations d'échantillonnage en milieu marin dans le cadre des programmes de surveillance DCE (matrices : eau, sédiment et biote) - Recommandations techniques – Edition 2015
- CAMBERT H., TURQUET J., JAMON A., WICKEL J., 2011a.** *Etude de la contamination chimique des eaux et sédiments des ports et abris portuaires – Rapport final.* Rapport "ARVAM", "LAGONIA", "IDHESA", "APNEE", Avril 2011. 21 p + annexes
- CAMBERT H., BIGOT L., TURQUET J., NICET J.B., 2011b.** *Etude de la contamination chimique et de l'indicateur faune endogée des sédiments marins du lagon de Mayotte– Rapport final.* Rapport "ARVAM", "ECOMAR", "PARETO", Mai 2011. 36 p + annexes
- CEREMA, 2019.** Dynamiques et évolution du littoral. Fascicule 16 : Synthèse des connaissances de l'archipel de Mayotte. Collection : Connaissances. ISBN : 978-2-37180-311-4
- CHATEAUMINOIS, E., LECACHEUX, S., PARIS, F., BULTEAU, T., PERDREROS, R., 2015.** « CYCLOREF –Phase 1, Définition de valeurs de référence de vagues et de surcotes cycloniques sur les façades littorales de Mayotte », BRGM/RP-64913-FR.
- CHEVALIER, C., DEVENON, J-L., PAGANO, M., ROUGIER, G., BLANCHOT, J., ARFI, R., 2017.** The atypical hydrodynamics of the Mayotte Lagoon (Indian Ocean): Effects on water age and potential impact on plankton productivity. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 196, p. 182-197.
- DURANT et THOMASSIN, 1990.** *Les récifs frangeants de Mayotte : Etats des platiers et du sommet des pentes externes en 1989-1990 ; bilan de l'état de santé global.* Rapp. Centre Oceano. Marseille pour DAFMayotte. 66p+annexes (18 cartes et tableaux).
- GEODE, 2018.** Dragages et immersions en mer et en estuaire : Revue des bonnes pratiques environnementales.
- GOURBESVILLE Ph., THOMASSIN B.A. 1988.** *Station d'épuration des eaux usées de Mamoudzou-Kavani : Construction dans la mangrove de Kavani et rejet de l'effluent dans le lagon « Agangoua-Bandélé » (secteur septentrional, chenal de l'îlot Bouzi). 2<sup>ème</sup> partie. Modélisation hydrodynamique du lagon et de l'effluent ; optimisation de l'émissaire.* Rapport G.I.S. « Lag-May » pour Dir. Equipement Mayotte, déc. 1998 : 101 pp. multigr.
- GOURBESVILLE Ph., SCARCEIEAU F., DESCAMP P., THOMASSIN B.A., 2000 .** *Etudes préalables à l'endiguement de trois secteurs. 1 & 3 Etude d'impacts possibles sur le milieu lagonaire de l'Anse Choa (« quai des Douanes ») et le milieu estuarien de la mangrove de Kaouéni (nouveau tracé de la route R.N. 1 sur Kaouéni-Hamaha), Mamoudzou, par endiguements. 2. Modélisation hydrodynamique de l'Anse Choa, détroit de Dzaoudzi-Mamoudzou, et de l'estuaire de la Kaouéni : impacts des remblais sur la courantologie et les peuplements.* Rapport G.I.S. « Lag-May » pour Dir. Equipement Mayotte, juil. 2000 : 35 pp. multigr.
- GUILCHER, A., BERTHOIS, L., LE CALVEZ, Y., BATTISTINI, R., CROSNIER, A., 1965.** Les récifs coralliens et le lagon de l'île de Mayotte. Orstom, Paris.
- HERTEMAN, M., 2010.** Evaluation des capacités bioremédiatrices d'une mangrove impactée par des eaux usées domestiques. Application au site de Malamani, Mayotte. Thèse de l'Université de Toulouse 3 Paul Sabatier. p. 290.
- IDIER, D., ROMIEU, E., DELATTRE, M., PEDREROS, R., DE LA TORRE, Y., 2008.** Hydrodynamique tidale du lagon de Mayotte: observations in-situ et modélisation. Xèmes Journées Nationales Génie Côtier–Génie Civil, Octobre, Sophia Antipolis.

**JAOUEN, T., VITTECOQ, B., LIONS, J., GOURCY, L., 2011.** Caractérisation hydrogéologique du potentiel en eaux souterraines de Mayotte - Secteur nord ouest. Rapport d'avancement BRGM/RP-59621-FR.

**JEANSON, M., 2009.** Morphodynamique du littoral de Mayotte – Des processus au réseau de surveillance. Thèse.

**LAPEGUE, J-B., 1999.** Aspects quantitatifs et qualitatifs de la pluviométrie dans deux enjeux majeurs de la problématique de l'eau à Mayotte: la ressource hydrique, l'assainissement pluvial et l'érosion. Thèse de doctorat de l'Université de La Réunion. p. 376.

**LEGOFF, N., 2010.** Les Comores et l'aléa cyclonique dans le contexte des changements climatiques: la vulnérabilité différenciée d'Anjouan et de Mayotte. [VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement. Vol. 10.

**MARTY N., 1993.** Distribution et dynamique des sédiments des lagons Est et Nord-est du lagon de Mayotte. (SW Océan Indien). Mém. Maîtrise Océanol. Appl., Programme ERASMUS, Univ. Perpignan-Paris VI Barcelone : 54 pp.

**PARETO, ASCONIT, 2013.** Évaluation de l'état et du Risque de Non Attente des Objectifs Environnementaux (RNAOE) à l'horizon 2021 pour les masses d'eau du bassin de Mayotte au titre de la Directive Cadre sur l'Eau, rapport final, p. 217.

**SAFEGE, 2019.** Création du PEM de Transports Collectifs à Mamoudzou. Avant-Projet, Notice technique.

**SCHOUTEN, M., DE RUIJTERA, W., JAN VAN LEEUWENA, P., RIDDERINKHOF, H., 2003.** Eddies and variability in the Mozambique Channel, Deep-Sea Research II 50, p. 1987–2003.

**THOMASSIN B.A., ARNOUX A., COUDRAY J., FROGET C., GOUT B., KOUYOU MONTZAKIS G., MASSE J.-P., REYRE Y., REYS J.-P., VACELET E., 1989.** La sédimentation dans le lagon de Mayotte (île volcanique à récif-barrière, SW océan Indien) et son évolution récente en liaison avec les apports terrigènes. *Bull. Soc. Géol. France*, (8), 5 (6) : 1235-1251.

**THOMASSIN, B.A., GOURBESVILLE, P., 1998.** Étude d'impact de l'effluent de l'unité de dessalement de petite terre sur la partie nord du récif de pamandzi. Impact sur les peuplements, modélisation du panache actuel de l'effluent et optimisation. Collectivité territoriale de Mayotte, direction de l'agriculture et de la forêt

**THOMASSIN B.A., GOURBESVILLE Ph., DESCAMP P., SCARCEIEAU F., 2000.** *Etudes préalables à l'endiguement de trois secteurs. 1. Etude d'impacts possibles sur le milieu lagonaire : Anse Choa, du projet d'extension sur le lagon du « quai des Douanes », Mamoudzou-Est, par endiguements et remblais.* Rapport G.I.S. « Lag-May » pour Dir. Equipement Mayotte, mars 2000 : 34 pp. multigr. + annexes.

**THOMASSIN B.A. (en coll. avec L.H.M.A., Marseille), 2006.** *Mayotte : évaluation des polluants dans les sédiments d'une mangrove anthropisée : Kaouéni, Mamoudzou ; comparaison avec une mangrove « non anthropisée » : Ironi Bé.* Rapport G.I.S. « Lag-May », juillet 2006: 51 pp. multigr. + annexes "fiches d'analyses" : 53-70.

**THOMASSIN B.A. (en coll. avec L.H.M.A. Marseille & WICKEL J.), 2008.** *Mayotte : Evaluation de la qualité des eaux côtières du lagon à partir des polluants dosés dans les huîtres médiolittorales (Octobre-Novembre 2007).* Rapport pour IFRECOR, Préfecture de Mayotte : 137 pp. multigr.

**THOMASSIN B.A., GARCIA F., WICKEL J., SARRASIN L., SCHEMBRI Th., WAFO E., LAGADEC V. , 2008.** Impacts upon coastal water pollutants and fringing coral reef communities in a small tropical island as developing country: The Mayotte I. example (Northern Mozambique Channel, Indian O.). *13<sup>th</sup> France-Japan Oceanography Symposium, "Global change: interactions mankind-marine environments"*, Marseille, Sept. 8-10th, 2008, Abstract Vol. : 66.

**THOMASSIN B. A., GARCIA F., SARRAZIN L., SCHEMBRI Th., WAFO E., LAGADEC V., RISOUL V., WICKEL J., 2011.** Coastal seawater pollutants in the coral reef lagoon of a small tropical island in development: The Mayotte example (N Mozambique Channel, SW Indian Ocean) : 401-407, *in*: CECCALDI H.-J., DEKEYSER I., GIRAULT M., STORA G., eds., *Global Change Mankind-marine environment interactions*, Proc. 13th French-Japanese Oceanogr. Symp., Springer Science+Business Media, Coll. Earth Sciences: 1-449. ISBN978-90-481-8629-7.

**ZINKE, J., 2000.** Development of the Lagoon of Mayotte During the Holocene (Comoro Archipelago, SW Indian Ocean) (Doctoral dissertation, Christian Albrechts- Universität).

**ZINKE, J., REIJMER, J.J.G., THOMASSIN, B.A., 2001.** Seismic architecture and sediment distribution within the Holocene barrier reef–lagoon complex of Mayotte (Comoro archipelago, SW Indian Ocean). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. Vol 175, n°1, p. 343-368