



Cartographie du phénomène de submersion marine dans le cadre des Territoires à Risque Important d'Inondation à Mayotte (2^{ème} cycle)

Rapport final

BRGM/RP-69461-FR

Novembre 2019



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Caractérisation du phénomène de submersion marine dans le cadre des Territoires à Risque Important d'Inondation à Mayotte

Rapport final

BRGM/RP-69461-FR

Novembre 2019

Étude réalisée dans le cadre des projets d'Appuis aux Politiques Publiques du BRGM

R. Belon

Avec la collaboration de **G. Dectot, L. Moutoussamy et J. Salomero**

Vérificateur :

Nom : C. Oliveros

Fonction : Expert littoral

Date : 13/02/2020

Approbateur :

Nom : F. Tronel

Fonction : Directeur Régional du BRGM à Mayotte

Date : 13/02/2020

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots-clés : TRI, submersion marine, SIG, cartographie, Mayotte

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

Belon R. (2019) – Caractérisation du phénomène de submersion marine dans le cadre des Territoires à Risque Important d'Inondation à Mayotte. Rapport final. BRGM/RP-69461-FR, 41 p., 16 ill.

© BRGM, 2019, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Ce projet s'inscrit dans la directive européenne du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques inondation, dites directive inondation (DI), transposée en droit français dans la loi LENE du 13 juillet 2010 et dans le décret N°2011-227 du 2 mars 2011 qui imposent la mise en œuvre et l'élaboration des cartes des surfaces inondables et des cartes des risques inondation dans les Territoires à Risque important d'Inondation (TRI) comme l'est le territoire de Mayotte.

L'objectif est ici de caractériser le phénomène de submersion marine pour différents scénarios à savoir, un scénario de forte (période de retour de 20 ans), moyenne (période de retour de 100 ans) et faible probabilité (période de retour de 1000 ans) avec pour certains la prise en compte des effets du changement climatique.

Dans le cas de Mayotte, c'est principalement le phénomène de submersion par débordement qui est ainsi caractérisé excepté pour les aléas de moyenne probabilité avec et sans prise en compte du changement climatique qui sont issus directement des cartographies réalisées dans le cadre de l'élaboration de Plans de Prévention des Risques Littoraux et qui intègrent également le phénomène de submersion marine par franchissement de paquets de mer.

Pour chaque scénario, des classes de hauteur d'eau sont définies :

- Hauteur d'eau faible : $0 \text{ m} < h \leq 0,5 \text{ m}$;
- Hauteur d'eau moyenne : $0,5 \text{ m} < h \leq 1 \text{ m}$;
- Hauteur d'eau forte : $1 \text{ m} < h \leq 2 \text{ m}$;
- Hauteur d'eau extrême : $h > 2 \text{ m}$.

Ce projet vient ainsi compléter la connaissance du phénomène de submersion marine issue des Plans de Prévention des Risques Littoraux en cours d'élaboration pour des événements fréquents (scénario de forte probabilité, période de retour de 20 ans), qui montrent que le littoral de Mayotte reste très exposé à cet aléa, et pour les événements faible probabilité (période de retour de 1000 ans). Dans un contexte de changement climatique et plus récemment avec la formation d'un volcan sous-marin au large de Mayotte entraînant un phénomène de subsidence qui n'est pas intégré dans cette cartographie mais qui renforce le besoin de connaître les territoires vulnérables à la submersion marine dans un souci d'aménagement du territoire. Ces nouvelles connaissances seront également utiles pour la gestion de crise.

Certains secteurs semblent particulièrement affectés par la submersion marine comme ceux de Kawéni, Mtsapéré, l'aéroport de Pamandzi ou encore Mzouazia...

Sur ces secteurs les plus exposées, un travail permettant d'étudier la dynamique de submersion marine serait intéressant afin de disposer d'éléments plus précis permettant la mise en place d'actions concrètes pouvant être intégrées aux Plans Communaux de Sauvegarde (PCS) des communes concernées.

Sommaire

1. Introduction	9
1.1. CONTEXTE	9
1.2. OBJECTIFS	9
2. Rappels théoriques du phénomène de submersion marine	11
3. Données disponibles	15
3.1. DONNEES TOPO-BATHYMETRIQUES	15
3.2. REFERENCES ALTIMETRIQUES	15
3.3. INCERTITUDE PRISE EN COMPTE DANS LA MODELISATION.....	15
3.4. DONNEES ISSUES DU PROJET CYCLOREF	15
3.5. DONNEES ISSUES DE LA PREMIERE VERSION DE LA DIRECTIVE INONDATION (1 ^{ER} CYCLE)	16
4. Choix des différents scénarios.....	17
4.1. RECOMMANDATIONS NATIONALES	17
4.2. APPLICATION SUR MAYOTTE.....	17
4.3. ANALYSE STATISTIQUE DES NIVEAUX D'EAU.....	17
4.3.1. Niveaux moyens de la mer.....	18
4.3.2. Niveau de pleine mer et probabilité de dépassement.....	19
4.3.3. Niveaux marins pour différentes périodes de retour	20
4.4. ALEA DE FORTE PROBABILITE.....	21
4.5. ALEA DE PROBABILITE MOYENNE.....	22
4.6. ALEA DE PROBABILITE MOYENNE AVEC CHANGEMENT CLIMATIQUE ...	23
4.7. ALEA DE FAIBLE PROBABILITE	24
4.8. BANDE DE PRECAUTION LIEE AUX STRUCTURES DE PROTECTION COTIERE (BANDE DE SUR-ALEA)	25
5. Comparaison entre les TRI du premier cycle et celui du second cycle.....	27
6. Incertitudes sur les résultats	29
6.1. PERIODE DE RETOUR.....	29

6.2. PHENOMENE DE SUBSIDENCE RECENT	29
7. Méthode cartographique	31
7.1. PRINCIPES GENERAUX	31
7.2. TRAITEMENT SIG POUR LA COHERENCE DES DIFFERENTS SCENARIOS32	
8. Conclusion	33
9. Bibliographie	35

Liste des figures

Illustration 1 - Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.	12
Illustration 2 - Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).	13
Illustration 3 - Références altimétriques maritimes pour Dzaoudzi et Mtiti (SHOM, 2016)	15
- Illustration 4 – Localisation des 6 points de référence autour de Mayotte (image GoogleEarth).....	18
Illustration 5 – Coordonnées des points de référence et niveaux moyens (NM) de la mer associés par rapport au zéro hydrographique (ZH) et par rapport au zéro terrestre de l'IGN (IGN50).	19
Illustration 6 - Gauche: densité de probabilité des hauteurs de pleine mer prédites par les harmoniques FES 2004 ; Droite : « fonction de répartition » empirique des hauteurs de pleine mer.	19
Illustration 7 - Niveaux de pleine mer associés à différentes probabilités de dépassement, scénarios pour un niveau de référence actuel et à échéance 2100	20
Illustration 8 - Synthèse des niveaux marins calculés pour les 6 points autour de Mayotte pour différentes périodes de retour	21
Illustration 9 - Synthèse des niveaux marins calculés pour les différentes façades de Mayotte pour une période de retour de 20 ans.....	22
Illustration 10 - Synthèse des niveaux marins « référence actuel » calculés pour les différentes façades de Mayotte pour une période de retour de 100 ans	22
Illustration 11 - Synthèse des scénarios centennaux retenus basés sur l'occurrence simultanée d'une hauteur de pleine mer donnée et d'un Hs donné pour les différents points de référence autour de Mayotte.....	23
Illustration 12 - Synthèse des niveaux marins calculés pour les différentes façades de Mayotte pour une période de retour de 100 ans avec prise en compte du changement climatique	23
Illustration 13 - Synthèse des scénarios centennaux retenus basés sur l'occurrence simultanée d'une hauteur de pleine mer donnée et d'un Hs donné pour les deux points de référence autour de Mayotte.....	24

Illustration 14 – Niveaux d'eau utilisés pour la cartographie de l'évènement extrême en fonction du secteur géographique (données CÉREMA, DEAL Mayotte, 2015)	25
Illustration 15 - Principe de détermination de la bande de précaution en arrière des structures de protection contre la submersion marine (modifié d'après le guide méthodologique, MEDDE, 2014).....	26
Illustration 16 – Différences entre les niveaux marins utilisés pour le premier et le second cycle	27

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

La directive européenne du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et à la gestion des risques inondation, dite directive inondation (DI), a été transposée en droit français dans la loi LENE du 13 juillet 2010 et dans le décret N°2011-227 du 2 mars 2011. La loi impose la mise en œuvre et l'élaboration des cartes des surfaces inondables et des cartes des risques inondation dans les TRI.

C'est dans ce cadre que la DEAL de Mayotte a sollicité le BRGM afin de réaliser la cartographie des surfaces inondables par submersion marine du littoral de Mayotte.

1.2. OBJECTIFS

La méthodologie ainsi proposée pour cette étude et développée dans les paragraphes suivants prend en compte les derniers éléments de cadrage rédigés par la Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) :

- la circulaire du 16 juillet 2012 relative à la phase cartographique pour l'évaluation et la gestion du risque inondation, MEDDE¹,
- la note méthodologique relative à la mise en œuvre de la phase de cartographie des territoires à risques d'inondation (TRI) du 2^{ème} cycle de la directive inondation datant du 26 décembre 2018 transmise par le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, ainsi que la note complémentaire datée de mars 2019 concernant les aspects SIG). Ces nouveaux éléments permettent notamment d'intégrer des méthodes de caractérisation des aléas issus du guide méthodologique d'élaboration des PPRL (DGPR, 2014) ainsi que des spécificités liées au couches SIG (correction de géométries, correspondance et cohérence des différents scénarios...).

La directive recommande la réalisation de plusieurs cartes de surfaces inondables par submersion marine :

- quatre cartes de surfaces inondables : une carte des surfaces inondables pour 3 scénarios (probabilités forte, moyenne et faible dans la mesure où elles n'ont pas été exclues) et une carte de plus pour les scénarios prenant en compte le changement climatique pour la submersion marine ;
- une carte de synthèse des surfaces inondables de l'ensemble des scénarios avec l'indication des limites des surfaces inondables.

¹ MEDDE : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie

2. Rappels théoriques du phénomène de submersion marine

« Les submersions marines sont des inondations temporaires de la zone côtière par la mer lors de conditions météorologiques et océaniques défavorables (basses pressions atmosphériques et fort vent d'afflux agissant, pour les mers à marée, lors d'une pleine mer) ; elles peuvent durer de quelques heures à quelques jours » (Guide méthodologique, MEDDE, mai 2014). Elles sont le plus souvent associées à des surélévations temporaires du niveau de la mer (surcotes) lors de tempêtes ou de cyclones, voire de tsunamis. Les submersions par tsunamis sont exclues des cartographies PPRL et TRI.

Les surcotes marines sont contrôlées par deux processus principaux (Illustration 1) :

- **La surcote atmosphérique** : le passage d'un important système dépressionnaire (tempête) est caractérisé par des variations du niveau marin selon deux mécanismes :
 - La chute de pression atmosphérique entraîne une surélévation du niveau du plan d'eau. C'est le phénomène de *baromètre inverse* : une diminution d'1 hPa équivaut à une élévation d'1 cm du plan d'eau (valeurs pour une situation théorique d'un plan d'eau infini et d'une pression atmosphérique uniforme).
 - A cela s'ajoute l'effet du vent, qui en fonction de son intensité et de sa direction est susceptible de provoquer des accumulations d'eau sur la bande littorale.

La surélévation du plan d'eau provoquée par la chute de pression et l'action du vent correspond à la surcote atmosphérique. La combinaison de la marée et de cette surcote atmosphérique génère le niveau de la mer dit « au repos » (Illustration 1).

- **La surcote liée aux vagues (*wave setup*)** : à l'approche de la côte, les vagues générées au large déferlent en transférant leur énergie sur la colonne d'eau, dont une partie provoque une surélévation du niveau moyen du plan d'eau (le « *wave-setup* » ou surcote liée aux vagues) qui peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres.

Le **niveau moyen du plan d'eau** (ou niveau statique) lors d'une tempête résulte de la contribution de la surcote atmosphérique, de la surcote des vagues et de la marée (Illustration 1).

A Mayotte, les marées sont de type semi-diurne à inégalité diurne, c'est-à-dire qu'on observe chaque jour deux basses mers et deux pleines mers mais qui ont des marnages² sensiblement différents, ces différences pouvant varier entre 0,20 et 0,60 m. Le marnage est de type méso-tidal, avec des niveaux de pleine et basse mer de vive-eau respectivement de 3,70 m CM³ et +0,50 m CM (source SHOM RAM 2016).

² Le marnage est l'amplitude de la marée, c'est-à-dire la différence entre la hauteur d'eau à marée haute et celle à marée basse

³ CM : Cote Marine, aussi appelé zéro hydrographique.

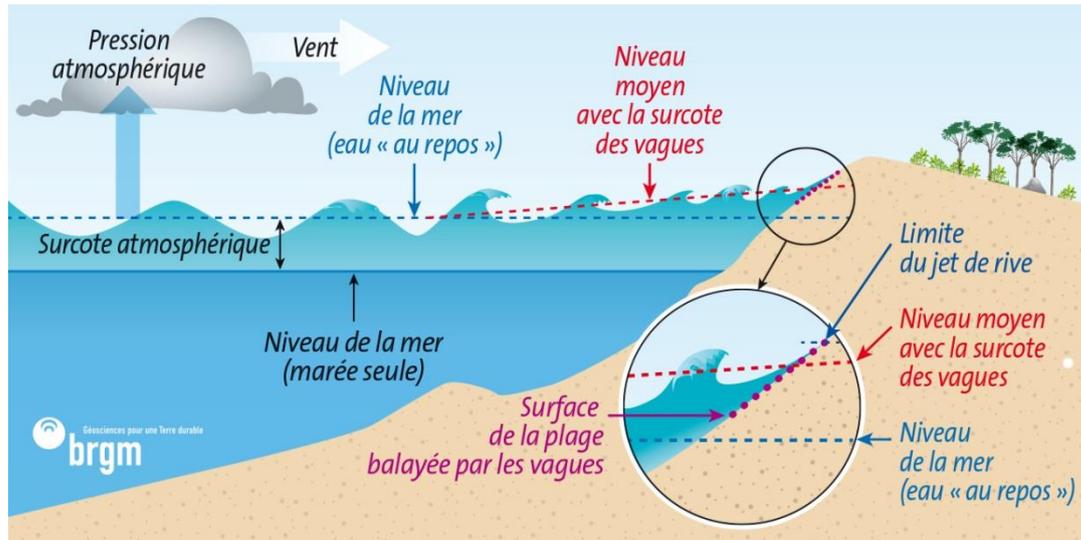


Illustration 1 - Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.

La submersion peut se manifester sous trois formes différentes (Illustration 2) :

- le **franchissement** par paquets de mer, qui correspond au passage des vagues par-dessus les défenses côtières (naturelles ou artificielles), l'accumulation d'eau résultante peut s'avérer importante selon l'ampleur des franchissements, sa durée et le linéaire concerné ; le franchissement est conditionné essentiellement par la position du plan d'eau (niveau statique) par rapport à la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, et par les caractéristiques locales des vagues (hauteurs et périodes) ;
- le **débordement**, qui correspond à une élévation du niveau d'eau statique au-dessus de la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection ; il entraîne un déversement continu d'eau à terre ; les volumes d'eau mis en jeu dépendent de l'écart entre le niveau d'eau et celui de la cote maximale du terrain naturel ou des ouvrages de protection, la durée du débordement et de la vitesse de l'écoulement ;
- la **rupture** de structures de protection est causée par l'action répétée des vagues et/ou la surverse. Les structures de protection peuvent être alors endommagées progressivement ou brutalement, et des brèches ou une défaillance généralisée peuvent se produire, provoquant le passage à un régime de débordement. Le déversement de l'eau en arrière des ouvrages est également de nature à dégrader fortement les ouvrages.

Un épisode de submersion peut résulter de la succession de ces différents processus, voire de leur occurrence simultanée en des endroits différents. Lors de tempêtes, on assiste généralement à une montée progressive du niveau statique et à un renforcement de l'intensité des vagues (temps 1). Au-delà d'une certaine intensité, il peut y avoir franchissements par paquets de mer, la submersion associée restant en général limitée (temps 2). Si le niveau statique continue à s'élever et dépasse la cote maximale des défenses côtières, la submersion passe alors en régime de débordement (temps 3A). Lorsque le niveau statique diminue du fait de la marée et/ou de la baisse de la surcote, on peut observer, suivant la configuration, une « vidange » partielle de l'eau accumulée à terre vers la mer ou de nouveaux franchissements jusqu'à ce que les conditions de mer diminuent (temps 3B). En cas de rupture d'un ouvrage de protection, il peut y avoir submersion par débordement alors que le niveau statique ne dépasse pas la cote maximale de l'ouvrage avant rupture (temps 3C).

Caractérisation du phénomène de submersion marine dans le cadre des Territoires à Risque Important d'Inondation à Mayotte

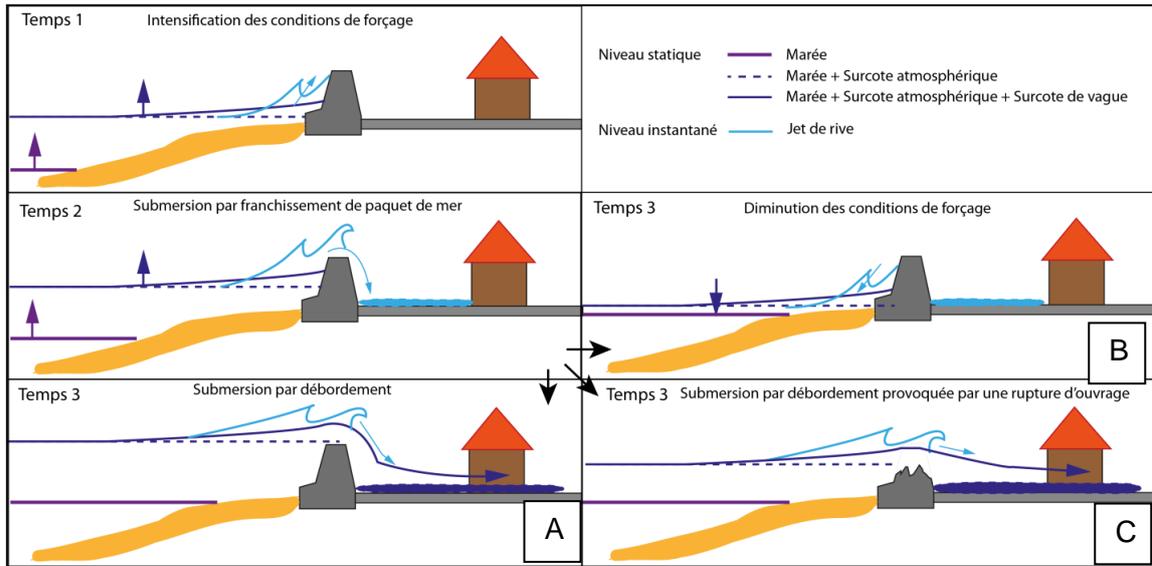


Illustration 2 - Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).

3. Données disponibles

3.1. DONNEES TOPO-BATHYMETRIQUES

Les données topo-bathymétriques utilisées dans le cadre de cette étude sont issues d'un couplage de données entre Litto3D Mayotte (levés Lidar à haute résolution livrés le 10/12/2012) et Litto3D Composite (plus grande emprise géographique mais avec une résolution plus faible livré le 14/02/2013) acquises par le SHOM et l'IGN. Les bâtiments n'ont pas été pris en compte, et seule la topographie issue du MNT Litto3D a été utilisée.

Dans un premier temps, ces différentes données ont été assemblées pour réaliser un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de résolution 1 m.

Ce MNT a ensuite été ré-échantillonné à une résolution de 10 m sur l'ensemble du littoral de Mayotte et 5 m sur les secteurs à fort enjeu (Chirongui, Mamoudzou, Petite-Terre et Koungou).

3.2. REFERENCES ALTIMETRIQUES

Les références altimétriques utilisées pour cette étude sont issues du document de référence publié par le SHOM (Illustration 3, Références Altimétriques Marines, 2016). Seuls deux sites y sont référencés pour l'Île de Mayotte :

Site	Plus haute mer astronomique (m/ ZH)	Pleine mer de vives eaux (m/ ZH)	Pleine mer de mortes eaux (m/ ZH)	Niveau moyen (m/ZH)	Basse mer de mortes eaux (m/ ZH)	Basse mer de vives eaux (m/ ZH)	Plus basse mer astronomique (m/ ZH)	ZH /0 IGN50 (m)
Dzaoudzi	4.30	3.70	2.80	2.13	1.45	0.50	0.08	-1.779
Mtiti	4.39	3.75	2.85	2.17	1.45	0.50	0.08	-
Longoni	4.31	3.70	2.80	2.13	1.45	0.50	0.08	-1.735

Illustration 3 - Références altimétriques maritimes pour Dzaoudzi et Mtiti (SHOM, 2016)

3.3. INCERTITUDE PRISE EN COMPTE DANS LA MODELISATION

Niveau marin

Au titre des incertitudes liées à la prédiction du niveau de pleine mer, à l'hétérogénéité des niveaux de marée sur l'ensemble du lagon Mahorais (Rapport « CYCLOREF – Phase 1 » Chateauminois & al., 2015)) ainsi qu'à l'utilisation de modèles numériques pour le calcul de la surélévation du niveau de la mer due au déferlement des vagues, il est proposé de considérer une incertitude de 25 cm au niveau marin de référence pour l'ensemble des scénarios étudiés en conformité avec le guide méthodologique national (MEDDE, 2014). Ces 25 cm ont ainsi été ajoutés aux hypothèses du niveau marin dans les différentes modélisations.

3.4. DONNEES ISSUES DU PROJET CYCLOREF

Le projet CYCLOREF (rapport CYCLOREF phase 1, BRGM/RP-64913-FR et rapport CYCLOREF phase 2 BRGM/RP-65478-FR) a permis d'établir des cartographies du phénomène de submersion marine pour la mise en œuvre des Plans de Prévention des Risques Littoraux à Mayotte.

Les cartes d'aléas ont été directement utilisées pour établir les cartes de hauteur d'eau des scénarios moyen avec et sans prise en compte du changement climatique.

3.5. DONNEES ISSUES DE LA PREMIERE VERSION DE LA DIRECTIVE INONDATION (1^{ER} CYCLE)

Les données cartographiques issus du premier cycle concernant le scénario de faible probabilité ont été utilisées et adaptées pour établir la cartographie de l'évènement de faible probabilité (données du CEREMA).

4. Choix des différents scénarios

4.1. RECOMMANDATIONS NATIONALES

Il est recommandé d'établir une cartographie pour trois scénarios de probabilité forte, moyenne et faible.

Les gammes d'évènements sont définies de la manière suivante :

- **Aléa de forte probabilité** ou évènement fréquent : évènement provoquant les premiers dommages conséquents dont la période de retour est comprise entre 10 et 30 ans ;
- **Aléa de probabilité moyenne** ou évènement moyen : évènement ayant une période de retour comprise entre 100 et 300 ans, qui correspond à l'aléa de référence du Plan de Prévention des Risques Littoraux s'il existe ;
- **Aléa de faible probabilité** ou évènement extrême : phénomène d'inondation exceptionnel inondant toute la surface de la plaine alluviale fonctionnelle (lit majeur) ou de la plaine littorale fonctionnelle.
L'évènement extrême pouvant être considéré pour la gestion d'un territoire (hors aménagements spécifiques : centrales nucléaires, grands barrages), et pour lequel les éventuels systèmes de protection mis en place ne sont plus efficaces.
À titre indicatif, une période de retour d'au moins 1000 ans sera recherchée.

4.2. APPLICATION SUR MAYOTTE

Aléa de probabilité moyenne

L'aléa de probabilité moyenne sera une déclinaison des aléas déjà cartographiés dans le cadre de la mise en œuvre des Plans de Prévention des Littoraux à Mayotte.

Aléas de probabilité forte et faible

Les aléas de forte et faible probabilité ont été établis dans le cadre de cette étude.

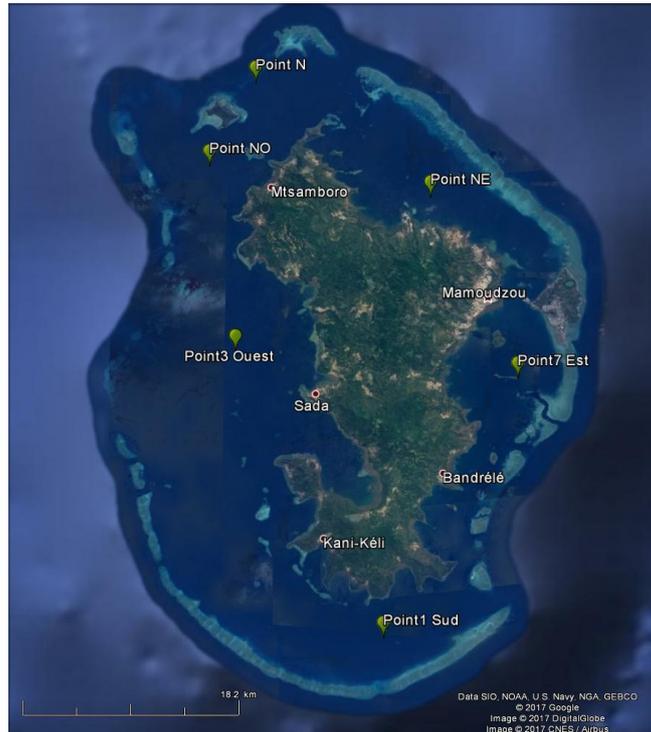
Compte-tenu du contexte de Mayotte dont seule la façade Ouest est exposée à la houle et donc au phénomène de submersion marine par franchissement, il a été choisi de considérer uniquement la submersion marine par débordement pour les aléas de probabilité forte et faible.

Le choix des scénarios de forte et faible probabilité découle donc de la seule analyse des périodes de retour des niveaux d'eau.

4.3. ANALYSE STATISTIQUE DES NIVEAUX D'EAU

Sur la base de l'état actuel des connaissances issues, entre autre, du projet CYCLOREF (rapport CYCLOREF phase 1, BRGM/RP-64913-FR et rapport CYCLOREF phase 2 BRGM/RP-65478-FR), des points de référence ont été positionnés autour de Mayotte (Illustration 4) afin de recueillir des informations sur les niveaux marins au cours des évènements historiques qui ont été rejoués dans le cadre du projet CYCLOREF. Une analyse statistique de ces niveaux a permis de caractériser les niveaux marins pour des périodes de retour données.

Les conditions hydrodynamiques obtenues en modélisant ces événements historiques ont montré que l'exposition du littoral de Mayotte diffèrait suivant les façades. Chaque façade disposera ainsi de caractéristiques particulières pour chaque scénario.



- Illustration 4 – Localisation des 6 points de référence autour de Mayotte (image GoogleEarth)

Les niveaux d'eau sont définis à partir d'une analyse en valeurs extrêmes du niveau d'eau total via une méthode indirecte : en faisant l'hypothèse que le signal de surcote totale (surcote atmosphérique + wave setup) et la marée prédite (ou astronomique) sont indépendants (ce qui est le cas sur les points étudiés). Une analyse en valeurs extrêmes du signal de surcote totale puis une convolution avec la distribution de probabilité des pics de marée en suivant la méthode de Batstone et al., 2013 permet de définir les niveaux d'eau pour une période de retour donnée :

$$F_{N_{tot}}(x) = \left[\prod_{t=1}^M F_{Stot}(x - X_t) \right]^{1/M}$$

$F_{N_{tot}}$: distribution de probabilité du niveau total

F_{Stot} : distribution de probabilité de surcote totale

X_t : pic de marée au cycle t ,

M : nombre de pleines mers sur une période Saros (18,6 ans).

4.3.1. Niveaux moyens de la mer

Dans un premier temps, les niveaux moyens de la mer considérés sur ces différents points autour de l'île sont référencés dans le tableau suivant (Illustration 5).

Nom point	Long. WGS84	Lat.WGS84	NM/ZH (m) ⁴	NM/IGN50 (m)
Point1 Sud	45,14999	-13,02997	2,17	0,39
Point7 Est	45,2501	-12,83993	2,14	0,36
Point3 Ouest	45,04001	-12,81999	2,17	0,39
Point NO	45,0207	-12,68457	2,16	0,38
Point N	45,05514	-12,62336	2,15	0,37
Point NE	45,18518	-12,70746	2,14	0,36

Illustration 5 – Coordonnées des points de référence et niveaux moyens (NM) de la mer associés par rapport au zéro hydrographique (ZH) et par rapport au zéro terrestre de l'IGN (IGN50).

4.3.2. Niveau de pleine mer et probabilité de dépassement

Le niveau de pleine mer correspond uniquement au phénomène liée à la marée astronomique. Le paragraphe suivant donne des détails sur ce que pourraient être les niveaux de marées avec la prise en compte du changement climatique.

L'illustration 6 ci-dessous issue la phase 2 du projet CYCLOREF (Belon et al., 2017) présente la densité de probabilité des hauteurs de pleine mer de la prédiction FES 2004 sur 18,6 ans sous la forme d'un histogramme (à gauche) ainsi que la « fonction de répartition » empirique (à droite).

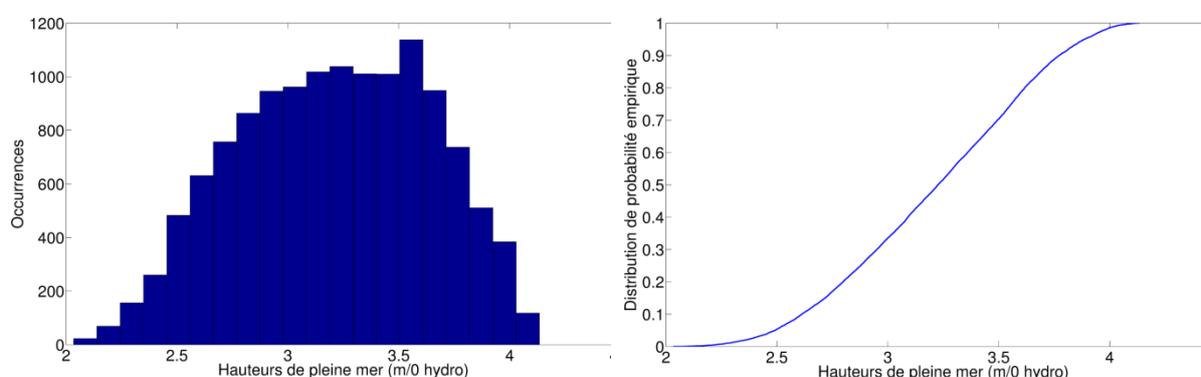


Illustration 6 - Gauche: densité de probabilité des hauteurs de pleine mer prédites par les harmoniques FES 2004 ; Droite : « fonction de répartition » empirique des hauteurs de pleine mer.

L'illustration 7 ci-après donne les niveaux de pleine mer associés à des probabilités de dépassement P_1 données. La surélévation du changement climatique (+20 cm pour la référence actuelle et +60 cm à échéance 2100) ainsi que l'incertitude sur ces niveaux de marée

⁴ Niveaux établis à partir des MNT-100m Mayotte Homonim (Datashom) référencés par rapport au ZH et aux PBMA (Plus Basse Mer Astronomique) et à l'écart entre la PBMA et le ZH (RAM 2016).

(25 cm) ont été intégrées afin d'estimer le niveau de marée à prendre en compte pour différentes probabilités de dépassement :

Probabilité de dépassement P_1	1/2	1/5	1/10	1/100
Niveau de pleine mer (m/IGN50)	1,45	1,84	1,99	2,24
Référence actuel (IGN50) = PM+ 0,25 + 0,20	1,90	2,29	2,44	2,69
2100 (IGN) = PM + 0,25+ 0,60	2,30	2,69	2,84	3,09

Illustration 7 - Niveaux de pleine mer associés à différentes probabilités de dépassement, scénarios pour un niveau de référence actuel et à échéance 2100

Par exemple, on a une chance sur deux d'avoir un niveau de pleine mer qui soit au moins égale à 1,45 m IGN50.

4.3.3. Niveaux marins pour différentes périodes de retour

Contrairement au paragraphe précédent, celui-ci traite du niveau marin total qui intègre à la fois, la marée astronomique, les surcotes atmosphériques ainsi que la surélévation du niveau de la mer dans le lagon du fait du déferlement des vagues sur la barrière de corail.

L'ensemble des niveaux marins calculés pour une période de retour donnée est présenté ci-après (Illustration 8, Belon et al., 2017). A ces niveaux, une marge d'incertitude de 25 cm (voir paragraphe 3.3) sera ajoutée en lien avec la méthode de prédiction du niveau de pleine mer conformément aux instructions du guide PPRL MEDDE (2014).

Des niveaux de référence actuel et à échéance 2100 sont également proposés en intégrant respectivement 20 cm et 60 cm de surélévation du niveau de la mer due au changement climatique.

Point d'étude	Période de Retour (ans)	Ntot (m IGN50)	Référence actuel (IGN50) = Ntot+ 0,25 + 0,20	2100 (IGN50) = Ntot + 0,25+ 0,60
Pt Nord	10	2.62	3.07	3.47
	20	2.64	3.09	3.49
	50	2.66	3.11	3.51
	100	2.69	3.14	3.54
Pt NE	10	2.73	3.18	3.58
	20	2.77	3.22	3.62
	50	2.82	3.27	3.67
	100	2.86	3.31	3.71
Pt NO	10	2.66	3.11	3.51
	20	2.69	3.14	3.54
	50	2.73	3.18	3.58
	100	2.77	3.22	3.62
Pt 1 Sud	10	3.23	3.68	4.08
	20	3.36	3.81	4.21
	50	3.54	3.99	4.39
	100	3.69	4.14	4.54
Pt 3 Ouest	10	2.74	3.19	3.59
	20	2.78	3.23	3.63
	50	2.83	3.28	3.68
	100	2.88	3.33	3.73
Pt 7 Est	10	3.02	3.47	3.87
	20	3.12	3.57	3.97
	50	3.27	3.72	4.12
	100	3.39	3.84	4.24

Illustration 8 - Synthèse des niveaux marins calculés pour les 6 points autour de Mayotte pour différentes périodes de retour

4.4. ALEA DE FORTE PROBABILITE

Il est en général recommandé pour cet aléa de choisir un évènement historique bien documenté. Dans le cas de Mayotte, il n'existe que très peu d'informations sur les impacts des évènements historiques, il a donc été décidé de choisir un évènement de période de retour de 20 ans.

Pour cet aléa de forte probabilité ou évènement fréquent, les niveaux d'eau considérés pour chacune des façades sont représentés dans l'illustration 9. Ces niveaux intègrent, le niveau d'eau dont la période de retour calculée est de 20 ans, l'incertitude de 25 cm sur le niveau marin préconisée par le guide méthodologique national (MEDDE, 2014) ainsi que les 20 cm de prise en compte du changement climatique sur l'élévation du niveau de la mer.

Point d'étude	Période de Retour (ans)	Ntot (m IGN50)	Référence actuel (IGN50) = Ntot+ 0,25 + 0,20
Pt NE	20	2.77	3.22
Pt NO	20	2.69	3.14
Pt 1 Sud	20	3.36	3.81

Pt 3 Ouest	20	2.78	3.23
Pt 7 Est	20	3.12	3.57

Illustration 9 - Synthèse des niveaux marins calculés pour les différentes façades de Mayotte pour une période de retour de 20 ans

4.5. ALEA DE PROBABILITE MOYENNE

L'aléa de moyenne probabilité découle directement des aléas cartographiés dans le cadre de la mise en œuvre des Plans de Prévention des Risques Littoraux à Mayotte (Belon et al., 2017).

Pour cet aléa, les deux modes de submersion marine (débordement et franchissement) ont été évalués sur la base de caractéristiques hydrodynamiques de période de retour de 100 ans.

Pour la submersion par débordement, les niveaux d'eau considérés pour chacune des façades sont représentés dans l'illustration 10. Ces niveaux intègrent, le niveau d'eau dont la période de retour calculée est de 100 ans, l'incertitude de 25 cm sur le niveau marin préconisée par le guide méthodologique national (MEDDE, 2014) ainsi que les 20 cm de prise en compte du changement climatique sur l'élévation du niveau de la mer.

Point d'étude	Période de Retour (ans)	Ntot (m IGN50)	Référence actuel (IGN) = Ntot+ 0,25 + 0,20
Pt NE	100	2.86	3.31
Pt NO	100	2.77	3.22
Pt 1 Sud	100	3.69	4.14
Pt 3 Ouest	100	2.88	3.33
Pt 7 Est	100	3.39	3.84

Illustration 10 - Synthèse des niveaux marins « référence actuel » calculés pour les différentes façades de Mayotte pour une période de retour de 100 ans

Pour la submersion par franchissement, seules les façades Ouest et Nord-Ouest sont concernées. Trois scénarios ont été utilisés et comparés afin de ne garder que le scénario le plus impactant le long du littoral. Les caractéristiques sont rappelées dans l'illustration 11.

Nom point	Hs (m)	Tp (s)	Niveau marin = PM+Surcote+Incertitude+C (m IGN050)	Hauteur PM/IGN (m)	Surcote (m)	Incertitude (m)	CC(m)
	2,31	7,7	2,8	2,13	0,22	0,25	0,2

Point 3	2,7 3	8, 4	2,65	1,98	0,22	0,25	0,2
Point Ouest	3,2 4	9, 1	2,26	1,59	0,22	0,25	0,2
	2,0 3	7, 9	2,75	2,12	0,18	0,25	0,2
Point NO	2,3 5	8, 5	2,6	1,97	0,18	0,25	0,2
	2,7 4	9, 1	2,21	1,58	0,18	0,25	0,2

Illustration 11 - Synthèse des scénarios centennaux retenus basés sur l'occurrence simultanée d'une hauteur de pleine mer donnée et d'un Hs donné pour les différents points de référence autour de Mayotte

4.6. ALEA DE PROBABILITE MOYENNE AVEC CHANGEMENT CLIMATIQUE

Tout comme pour l'aléa de moyenne probabilité, les résultats sont repris directement des aléas cartographiés dans le cadre de la mise en œuvre des Plans de Prévention des Risques Littoraux à Mayotte (Belon et al., 2017).

Pour cet aléa, les deux modes de submersion marine (débordement et franchissement) ont été évalués sur la base de caractéristiques hydrodynamiques de période de retour évaluée à 100 ans.

Pour la submersion par débordement, les niveaux d'eau considérés pour chacune des façades sont représentés dans l'illustration 12. Ces niveaux intègrent, le niveau d'eau dont la période de retour calculée est de 20 ans, l'incertitude de 25 cm sur le niveau marin préconisée par le guide méthodologique national (MEDDE, 2014) ainsi que les 60 cm de prise en compte du changement climatique sur l'élévation du niveau de la mer.

Point d'étude	Période de Retour (ans)	Ntot (m IGN50)	Référence actuel (IGN50) = Ntot+ 0,25 + 0,60
Pt NE	100	2.86	3.71
Pt NO	100	2.77	3.62
Pt 1 Sud	100	3.69	4.54
Pt 3 Ouest	100	2.88	3.73
Pt 7 Est	100	3.39	4.24

Illustration 12 - Synthèse des niveaux marins calculés pour les différentes façades de Mayotte pour une période de retour de 100 ans avec prise en compte du changement climatique

Pour la submersion par franchissement, seules les façades Ouest et Nord-Ouest sont concernées. Trois scénarios ont été utilisés et comparés afin de ne garder que le scénario le plus impactant le long du littoral. Les caractéristiques sont rappelées dans l'illustration 13.

Nom point	Hs (m)	Tp (s)	Niveau marin = PM+Surcote+Incertitude+C C (m IGN050)	Hauteur r PM/IGN (m)	Surcote e (m)	Incertitude e (m)	CC(m)
Point 3 Ouest	2,3 1	7, 7	3,2	2,13	0,22	0,25	0,6
	2,7 3	8, 4	3,05	1,98	0,22	0,25	0,6
	3,2 4	9, 1	2,66	1,59	0,22	0,25	0,6
Point NO	2,0 3	7, 9	3,15	2,12	0,18	0,25	0,6
	2,3 5	8, 5	3	1,97	0,18	0,25	0,6
	2,7 4	9, 1	2,61	1,58	0,18	0,25	0,6

Illustration 13 - Synthèse des scénarios centennaux retenus basés sur l'occurrence simultanée d'une hauteur de pleine mer donnée et d'un Hs donné pour les deux points de référence autour de Mayotte

4.7. ALEA DE FAIBLE PROBABILITE

Même si les résultats statistiques nous permettent d'estimer les niveaux d'eau pour une période de retour de 1000 ans, les incertitudes sont telles que ces résultats doivent être considérés avec précaution.

Les résultats montrent que les niveaux d'eau de période de retour 1000 ans sont relativement proches et en général moindre que les niveaux d'eau de période de retour 100 ans intégrant les effets du changement climatique (événement de probabilité moyenne à échéance 2100) excepté pour le sud de l'île.

Toutefois, l'évènement extrême utilisé dans la première version des cartographies de submersion marine dans le cadre des TRI (1^{er} cycle, DEAL Mayotte 2015) fait référence à des niveaux d'eau compris entre 5,6 m et 6,9 m IGN050. Ces niveaux correspondraient à la somme du niveau des plus hautes mers astronomiques avec les surcotes modélisées pour un cyclone dont les caractéristiques seraient celles de Harry avec une trajectoire modifiée ainsi qu'une surélévation du niveau de la mer due aux déferlements des vagues le long de la barrière de corail (wave set-up) estimée entre 0,6 m et 0,9 m.

Zone	Mediane	Moy	Min	Max	Quantile 75%
1	5.9	6.0	5.4	6.5	6.2
2	5.3	5.2	4.5	5.6	5.4
3	6.1	6.1	5.4	6.9	6.3
4	4.8	4.8	4.3	5.6	5.3
5	5.1	5.1	4.2	5.8	5.3

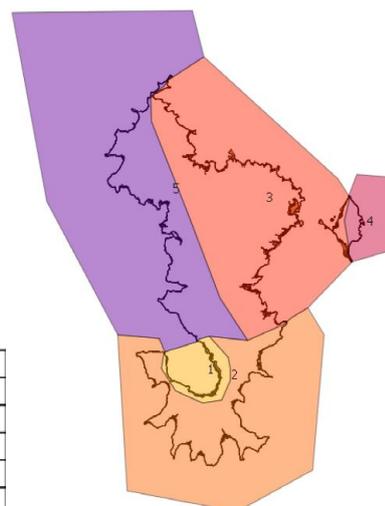


Illustration 14 – Niveaux d'eau utilisés pour la cartographie de l'évènement extrême en fonction du secteur géographique (données CEREMA, DEAL Mayotte, 2015)

Faute de pouvoir définir de nouvelles caractéristiques concernant l'évènement extrême, il a donc été décidé de garder les caractéristiques retenues lors de la première version des TRI (1^{er} cycle).

4.8. BANDE DE PRECAUTION LIEE AUX STRUCTURES DE PROTECTION COTIERE (BANDE DE SUR-ALEA)

Le guide méthodologique du MEDDE (2014) prévoit l'application d'une bande de précaution en arrière des structures de protection contre la submersion marine afin de prendre en compte les « sur-aléas » générés par leur éventuelle défaillance. En effet, en cas de rupture de la structure, des vitesses d'écoulement très fortes peuvent se produire. La bande de précaution permet de prendre en compte cette forte dynamique quel (s) que soi(en)t le (ou les) point(s) de surverse ou de rupture.

La largeur de la bande de précaution est déterminée selon les consignes du guide méthodologique pour chaque structure de protection (Illustration 15). Elle correspond à la hauteur, multipliée par 100, comprise entre le pied de l'ouvrage côté terre et :

- soit l'altitude du plan d'eau (c'est-à-dire le niveau marin de l'évènement de référence au droit de l'ouvrage) ;
- soit l'arase de l'ouvrage s'il y a surverse.

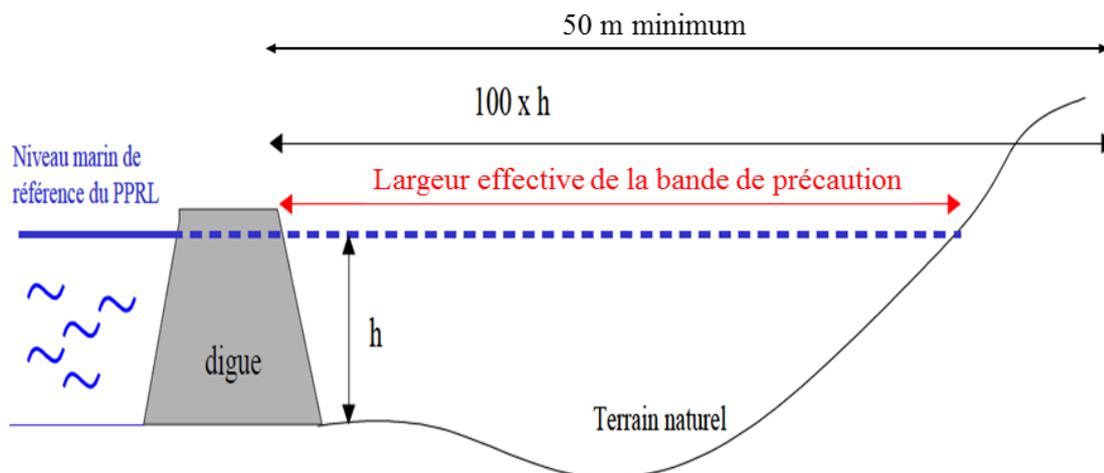


Illustration 15 - Principe de détermination de la bande de précaution en arrière des structures de protection contre la submersion marine (modifié d'après le guide méthodologique, MEDDE, 2014).

Cette bande de précaution a été caractérisée sur le secteur de Mtsapéré, le niveau marin de référence étant de 3,84 m IGN contre un terrain situé au-dessus de la cote altimétrique de 3 m, une bande de précaution de 84 m a été définie sur ce secteur et ne concerne pas les terrains situés au-dessus du niveau marin de référence.

5. Comparaison entre les TRI du premier cycle et celui du second cycle

Les principales différences apportées par le TRI du second cycle vis-à-vis de celui du premier cycle sont :

- Une analyse plus précise des périodes de retour sur la base des caractéristiques de 20 cyclones historiques les plus marquants de Mayotte ;
- L'intégration des données issues de la mise en œuvre des Plans de Prévention des Risques Littoraux sur Mayotte qui prennent en compte les phénomènes de submersion marine par débordement et franchissement par paquets de mer (sur la façade Ouest) ;
- La prise en compte d'une bande de sur-aléa au niveau du secteur de Mtsapéré et Passamainty.

Seul le scénario de faible probabilité est maintenu entre le premier cycle et le second, faute de pouvoir apporter des éléments plus précis.

Les différences de niveaux marins entre les deux cycles utilisées pour caractériser la submersion marine par débordement sont résumées dans l'illustration 16 :

Scénarios	1 ^{er} cycle	2 ^{ème} cycle
Forte probabilité	2.42 m IGN050	De 3.14 à 3.81 m IGN050
Moyenne probabilité	De 3.9 m à 4.2 m IGN050	De 3.22 à 4.14 m IGN050
Moyenne probabilité avec CC	De 4.5 à 4.8 m IGN050	De 3.62 à 4.54 m IGN050
Faible probabilité	De 5.6 à 6.9 m IGN050	

Illustration 16 – Différences entre les niveaux marins utilisés pour le premier et le second cycle

Si les niveaux marins ont été maintenus pour le scénario de faible probabilité, ils ont été revus à la baisse pour les scénarios de moyennes probabilités alors que le scénario de forte probabilité a été revu à la hausse.

6. Incertitudes sur les résultats

6.1. PERIODE DE RETOUR

Les périodes de retour ont été calculées à partir d'une base de données des 20 cyclones historiques les plus impactant à Mayotte entre 1981 et 2014, soit une période de 33 ans (Chateauminos et al., 2015). Si cette base de données d'évènements marquants est la plus complète possible vis-à-vis des données existantes, il se peut que cet échantillon ne soit pas dans le domaine de validité des lois extrêmes. Ceci pourrait amener des incertitudes sur les périodes de retour calculées.

6.2. PHENOMENE DE SUBSIDENCE RECENT

La naissance d'un nouveau volcan sous-marin au large de Mayotte qui a débuté en mai 2018 génère un phénomène de subsidence d'environ 8 à 15 cm selon la localisation sur l'île (http://www.mayotte.gouv.fr/content/download/15287/116525/file/190823_1er_bulletin_info_sis_mo_volcanique_mayotte.pdf). Si cette subsidence est pour l'instant encore dans les gammes d'incertitude du niveau marin (25 cm), ce phénomène pourrait augmenter les surfaces inondables ainsi que les hauteurs d'eau liées au phénomène de submersion marine. Scénario de forte probabilité

Il a été convenu de ne cartographier que le phénomène de submersion marine par débordement pour le scénario de forte probabilité en raison des moyens à mettre en œuvre pour évaluer les effets du franchissement par paquets de mer. Cette approche peut sous-estimer les hauteurs d'eau en limite proche de la plage.

7. Méthode cartographique

7.1. PRINCIPES GENERAUX

Les traitements SIG ont été effectués à l'aide des logiciels ArcGis 10 (ESRI) et QGis 2.6.0.

Ceux-ci ont permis de compiler l'ensemble des résultats des modélisations en jeux de données conformes aux attentes du cahier des charges et de fournir un fichier SIG par résultat, projeté en RGM04/UTM38S.

Le SIG produit contient des données aux formats vecteur (cartographies des hauteurs d'eau pour chaque scénario).

Les classes de hauteur d'eau cartographiées pour chaque scénario sont :

- Hauteur d'eau faible : $0 \text{ m} < h \leq 0,5 \text{ m}$;
- Hauteur d'eau moyenne : $0,5 \text{ m} < h \leq 1 \text{ m}$;
- Hauteur d'eau forte : $1 \text{ m} < h \leq 2 \text{ m}$;
- Hauteur d'eau extrême : $h > 2 \text{ m}$.

Les traitements SIG ont ainsi consisté à successivement :

- Calculer les emprises des classes de hauteur d'eau pour chaque scénario ;
- Vectoriser les résultats (création de polygones) pour chacun des scénarios ;
- Filtrer les résultats de manière à éliminer les polygones isolés non représentatifs (voir ci-dessous) ;
- Vérifier la cohérence des résultats / corrections ponctuelles ;
- Découper les résultats selon l'iso-altitude 0 m IGN050.

Les résultats des modèles, sous forme de fichiers raster, présentent naturellement un « bruit » lié au MNT utilisé (précision, résolution spatiale) qui peut s'avérer important, mais non significatif en rapport aux échelles de travail et aux incertitudes : des pixels isolés ou des petits groupes de pixels peuvent alors contraster fortement avec les pixels environnants et perturber la lecture et l'interprétation des cartes. Par conséquent, il a été choisi de fusionner les polygones de surface inférieure à 300 m^2 (soit 3 pixels de 10 m de côté par exemple) avec les polygones environnants de façon à limiter ce « bruit » (idem pour les « lacunes », i.e. des petits groupes de pixels sans classe de hauteur d'eau alors que tous les pixels environnants présentent un aléa). Cette démarche a été réalisée de manière automatique sous SIG après la vectorisation des cartes en RGM04/UTM38S. Il convient de rappeler que ces modifications restent quasi imperceptibles à l'échelle de restitution des cartes.

Pour les aléas de forte et faible probabilité, un croisement des niveaux d'eau et du MNT a été réalisé afin d'obtenir une cartographie des classes de hauteur d'eau.

Pour les aléas de moyenne probabilité afin de rester cohérent avec les couches produites dans le cadre des PPRL, il a été choisi de retranscrire directement les degré d'aléa en classes de hauteur d'eau à savoir :

- Aléa faible : $0 < h \leq 0,5 \text{ m}$;
- Aléa Modéré : $0,5 < h \leq 1 \text{ m}$;
- Aléa fort : $1 < h \leq 2 \text{ m}$;

- Aléa très fort : $h > 2$ m.

7.2. TRAITEMENT SIG POUR LA COHERENCE DES DIFFERENTS SCENARIOS

Des opérations de lissage ayant été menées sur les couches, de possibles incohérences pourraient apparaître entre les différents scénarios.

Afin de s'assurer de la cohérence des résultats, une comparaison des différentes couches a été faite de manière à s'assurer que :

- Chaque scénario de probabilité plus faible présente une classe de hauteur d'eau au moins égale ou supérieure à celle des scénarios de plus forte probabilité ;
- Les cartographies de moyenne probabilité étant issus de l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Littoraux restent les scénarios référents et ne doivent donc pas être modifiés ;
- Une zone qui serait couverte par le scénario de forte probabilité mais pas par le scénario de moyenne probabilité doit être supprimée.

Des corrections ont également été apportées aux différentes couches afin d'éliminer les erreurs de géométrie et de recouvrement des différentes classes de hauteur d'eau.

L'ensemble des couches SIG réalisées sont mises au format standard COVADIS version V2.1, d'après le guide de la Commission de validation des données pour l'information spatialisée datée de juillet 2019. Cette tâche a pour objectif de produire des données dans un format standard répondant aux prescriptions ministérielles.

Ce travail s'est appuyé sur l'outil en ligne de validation des couches rapportées fourni par l'IGN à l'adresse suivante : <https://valideur-tri.ign.fr/>.

Cinq planches cartographiques à l'échelle 1/25 000^{ème} ont donc été produites pour chacun des TRI :

- Quatre planches répertoriant les différentes classes de hauteur d'eau pour chaque scénario (forte probabilité, moyenne probabilité et moyenne probabilité avec prise en compte du changement climatique et faible probabilité) ;
- Une planche de synthèse des zones submergées regroupant les différents scénarios.

8. Conclusion

Vis-à-vis de la première version des cartographies de la submersion marine pour le TRI de Mayotte, la nouvelle version du TRI permet d'avoir une estimation des périodes de retour sur les niveaux marins pour les scénarios de moyenne et forte probabilité. Le scénario de moyenne probabilité avec et sans prise en compte du changement climatique sont issus des aléas du PPRL et donc prennent en compte à la fois la submersion marine par débordement mais également par franchissement des paquets de mer. Seul le scénario de faible probabilité de la première version est maintenu.

Ce projet a permis la réalisation de nouvelles cartographies du phénomène de submersion marine par débordement sur le littoral de Mayotte notamment pour un aléa de forte probabilité qui permet de visualiser les secteurs qui serait assujettis à des problématiques d'inondations par la mer pour des conditions hydrodynamiques relativement fréquente (période de retour de 20 ans). La méthode dite « statique » permet de caractériser les zones situées en-dessous du niveau marin de référence en y associant des classes de hauteur d'eau.

Ces informations sont indispensables pour une meilleure gestion du littoral de Mayotte qui montre une forte exposition à cet aléa submersion marine.

9. Bibliographie

Batstone C, Lawless M, Tawn J, Horsburgh K, Blackman D, McMillan A, Worth D, Laeger S, Hunt T (2013). A UK best-practice approach for extreme sea-level analysis along complex topographic coastlines. *Ocean Engineering* 71 (2013) 28–39

Belon R., Pedreros R., Bulteau T., Paris F., Salomero J. (2017) – CYCLOREF Phase 2 - Caractérisation et cartographie de l'aléa submersion marine sur les communes littorales de Mayotte. Rapport final. BRGM/RP- 65478 -FR

Chateauminois E., Lecacheux S., Paris F., Bulteau T., Pedreros R. Bonnardot F. (Météo-France), (2015). « CYCLOREF Phase 1 - Définition des valeurs de référence de vagues et de surcotes cycloniques sur les façades littorales de Mayotte ». BRGM/RP-64913-FR, 88 p., 53 fig., 20 tab.

Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Mayotte (2015). Inondation par submersion cyclonique sur Mayotte : Rapport explicatif de la cartographie du Risque inondation sur le territoire à Risque important

Direction Générale de la Prévention des Risques (DGPR) et Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE) (2014) – Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux. 169 p., 72 ill., 30 encarts.

SHOM RAM - Références Altimétriques Maritimes – Ports de France métropolitaine et d'outre-mer – Côtes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée – édition 2016.

Zijlema M., Stelling G., Smit P. (2011) - SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters *Coastal Engineering* 58, 992–1012.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Mayotte

Immeuble Jacaranda - Quartier des Hauts-Vallons
BP 363 Kaweni

97600 Mamoudzou – Mayotte – France

Tél. : 02 69 61 28 13