

Annexe 6. Mise à jour des cartographies du risque inondation sur le TRI de MAYOTTE - Cerema — Décembre 2019

Mise à jour des cartographies du risque inondation sur le TRI de MAYOTTE

Décembre 2019



Photos Cerema

Étude réalisée pour la DEAL MAYOTTE

Mise à jour des cartographies du risque inondation sur le TRI de MAYOTTE

Historique des versions du document

Version	Date	Commentaire
1	15/10/18	Version provisoire sur le secteur 2
2	15/11/18	Version complétée sur les 3 secteurs d'étude
3	15/06/19	Modélisation avec injection de pluie + Prise en compte des remarques de la DEAL + ajout du secteur 4
4	15/08/19	Reprise des calculs avec modification du calage hydrologique + Prise en compte des remarques de la DEAL
5	21/11/19	Réalisation de la partie Covadisation
6	05/12/19	Prise en compte des dernières remarques et ajout des annexes pour l'intégration dans le rapport de vulgarisation des cartes TRI

Affaire suivie par

Frédéric PONS - Département DREC – SRILH
Tél. : 04 42 24 76 70
Frederic.pons@cerema.fr
Site de Aix en Provence : Cerema Méditerranée – 30 avenue Albert Einstein – CS 13593 Aix en Provence Cedex 3

maître d'ouvrage : DEAL Mayotte

Rapport	Nom
Établi par	Mathieu ALQUIER
Contrôlé par	Frédéric PONS

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION ET PRÉSENTATION.....	5
1.1 Contexte de l'étude.....	5
1.2 Présentation des secteurs d'études.....	5
2 PRÉSENTATION DE LA MÉTHODOLOGIE DE MODÉLISATION SUR LES TRI COURS D'EAU À MAYOTTE.....	9
3 ESTIMATION DES PLUIES DE PROJET.....	10
4 ÉTUDE HYDRAULIQUE.....	13
4.1 Choix du modèle hydraulique.....	13
4.2 Topographie.....	13
4.3 Construction du modèle hydraulique.....	14
4.4 Cartographie des trois événements étudiés.....	19
5 LIMITES ET DISCUSSIONS.....	25
6 MISE AU FORMAT CARTOGRAPHIQUE DIRECTIVE INONDATION.....	26
7 CONCLUSION.....	27
8 BIBLIOGRAPHIE.....	27
9 ANNEXES.....	28
9.1 Présentation du logiciel Telemac-2D.....	28
9.2 Présentation du logiciel Bluekenue.....	30
9.3 Comparaison entre le déplacement des personnes et le débit linéique.....	32

Index des illustrations

Illustration 1: localisation du bassin versant de la Kawénilajoli – source rapport TRI.....	5
Illustration 2: localisation du bassin versant de la Kirissoni – source rapport TRI.....	6
Illustration 3: localisation du bassin versant de la Gouloué – source rapport TRI.....	7
Illustration 4: localisation du bassin versant de la Majimbini.....	8
Illustration 5: extrapolation pluie T1000.....	10
Illustration 6: pluie de projet – T10 ans.....	11
Illustration 7: pluie de projet – T100 ans.....	12
Illustration 8: pluie de projet – T1000 ans.....	12
Illustration 9: vue globale du maillage – secteur 1.....	14
Illustration 10: vue détaillée du maillage - secteur 1.....	14
Illustration 11: vue globale du maillage – secteur 2.....	15
Illustration 12: vue détaillée du maillage - secteur 2.....	15
Illustration 13: vue globale du maillage – secteur 3.....	16
Illustration 14: vue détaillée du maillage - secteur 3.....	16
Illustration 15: vue globale du maillage – secteur 4.....	17
Illustration 16: vue détaillée du maillage - secteur 4.....	17
Illustration 17: carte des coefficients de rugosité - secteur 1.....	18
Illustration 18: carte des coefficients de rugosité - secteur 2.....	18
Illustration 19: carte des coefficients de rugosité - secteur 3.....	18
Illustration 20: carte des coefficients de rugosité - secteur 4.....	18
Illustration 21: secteur 1 – Qfreq – Hmax.....	20
Illustration 22: secteur 1 – Qfreq – Vmax.....	20
Illustration 23: secteur 1 – Qmoy – Hmax.....	20
Illustration 24: secteur 1 – Qmoy – Vmax.....	20

Illustration 25: secteur 1 – Qex – Hmax.....	20
Illustration 26: secteur 1 – Qex – Vmax.....	20
Illustration 27: secteur 2 – Qfreq – Hmax.....	21
Illustration 28: secteur 2 – Qfreq – Vmax.....	21
Illustration 29: secteur 2 – Qmoy – Hmax.....	21
Illustration 30: secteur 2 – Qmoy – Vmax.....	21
Illustration 31: secteur 2 – Qex – Hmax.....	21
Illustration 32: secteur 2 – Qex – Vmax.....	21
Illustration 33: secteur 3 – Qfreq – Hmax.....	22
Illustration 34: secteur 3 – Qfreq – Vmax.....	22
Illustration 35: secteur 3 – Qmoy – Hmax.....	22
Illustration 36: secteur 3 – Qmoy – Vmax.....	22
Illustration 37: secteur 3 – Qex – Hmax.....	22
Illustration 38: secteur 3 – Qex – Vmax.....	22
Illustration 39: secteur 4 – Qfreq – Hmax.....	23
Illustration 40: secteur 4 – Qfreq – Vmax.....	23
Illustration 41: secteur 4 – Qmoy – Hmax.....	23
Illustration 42: secteur 4 – Qmoy – Vmax.....	23
Illustration 43: secteur 4 – Qex – Hmax.....	23
Illustration 44: secteur 4 – Qex – Vmax.....	23
Illustration 45: Possibilité de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau.....	40

Index des tableaux

Tableau 1: valeurs fréquentielles des pluies journalières, source [2].....	10
Tableau 2: valeurs de a et b de la relation de passage entre pluie journalière et pluie de durée t, source [2].	11

1 Introduction et présentation

1.1 Contexte de l'étude

Dans le cadre de la mise en œuvre du second cycle de la directive inondation, une mise à jour des cartes d'aléa est demandée pour 2019.

1.2 Présentation des secteurs d'études

1.2.1 La Kawénilajoli à Mamoudzou

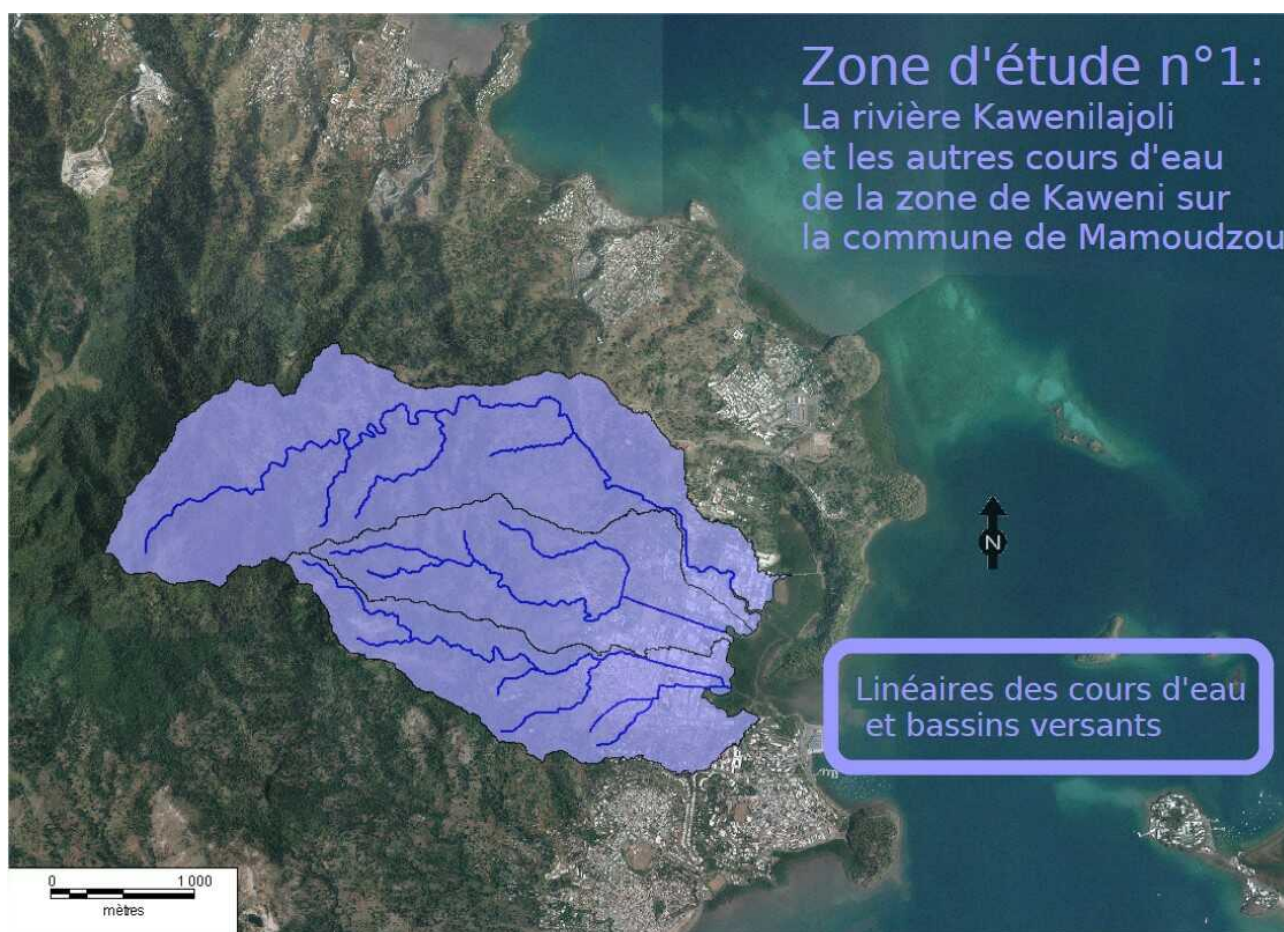


Illustration 1: localisation du bassin versant de la Kawénilajoli – source rapport TRI

Trois bassins versants constituent cette zone d'étude. Ils se rejoignent dans la mangrove :

- Au nord le cours d'eau principal, la Kawénilajoli, mesure 6,5 km et draine un bassin versant de l'ordre de 4 km².
- La Kawéni nord, qui mesure 3,5 km pour une surface de bassin versant d'environ 2 km².

- La Kawéni sud, qui mesure 3,8 km pour une surface de bassin versant d'environ 2 km².

De manière générale les enjeux sont situés sur la frange littorale de l'île de Mayotte, en raison du relief très marqué sur l'île. Sur ce bassin en particulier la partie amont est constituée de reliefs à végétation dense (altitude maximale de 300m), les enjeux à l'aval sont constitués de zones denses habitées et de zones industrielles.

1.2.2 La Kirissoni à Koungou

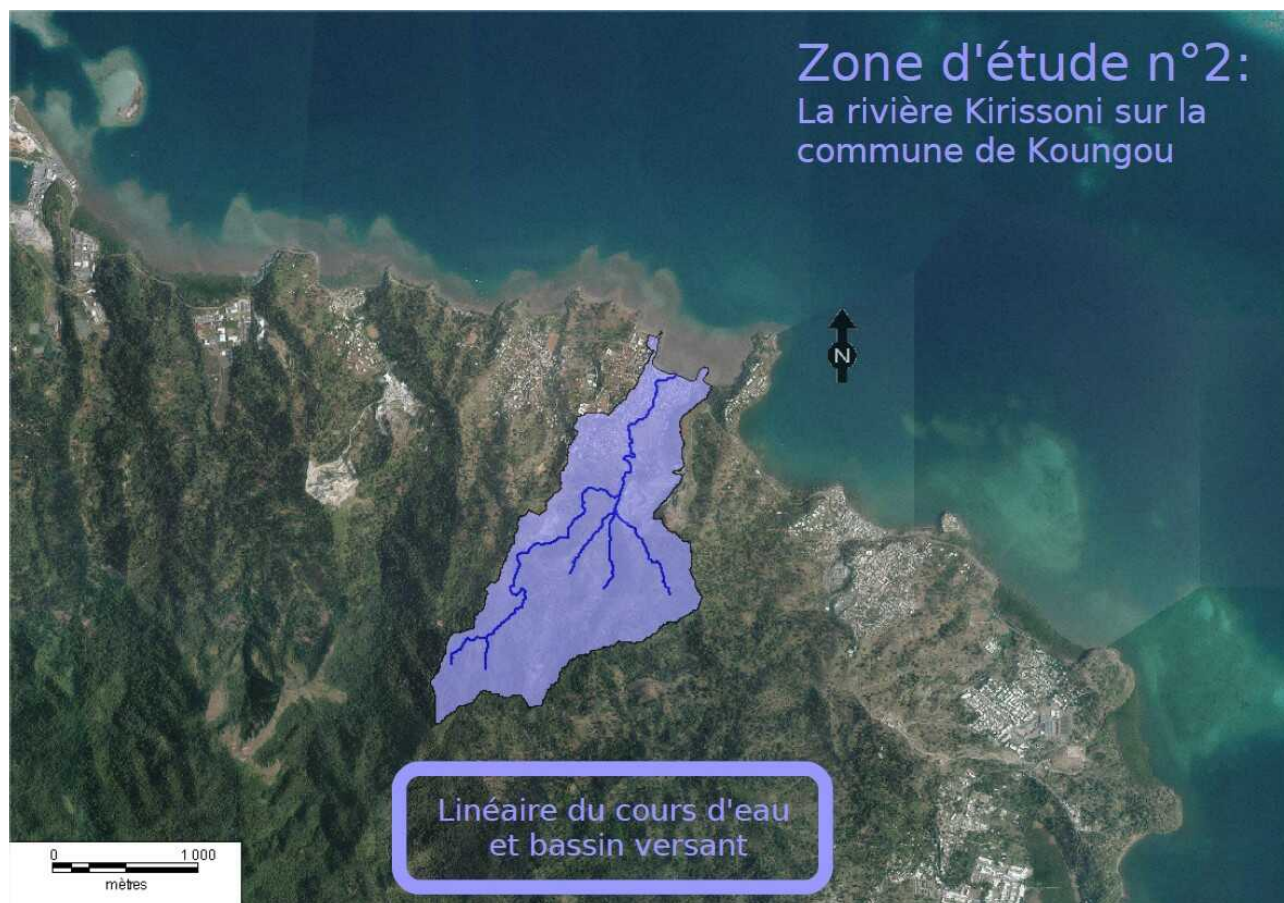


Illustration 2: localisation du bassin versant de la Kirissoni – source rapport TRI

La taille du bassin versant de la Kirissoni est de 2,5 km². La longueur du cours d'eau est de 2,2 km.

Sur ce bassin versant, la partie amont est constituée de reliefs à végétation dense (altitude maximale de 300 m). Les enjeux sont également concentrés à l'aval où le cours d'eau traverse des zones habitées denses.

1.2.3 La Gouloué à Mamoudzou

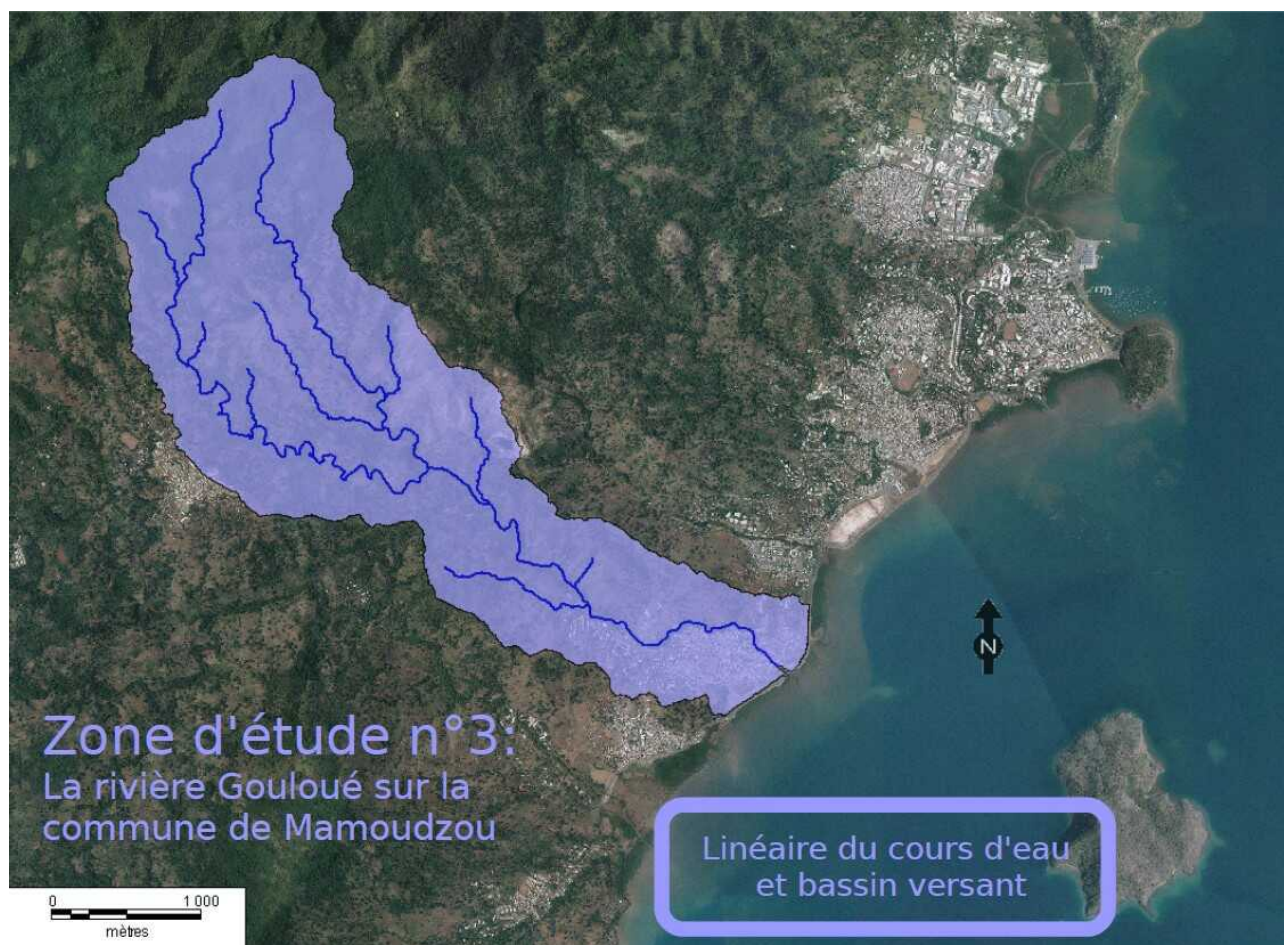


Illustration 3: localisation du bassin versant de la Gouloué – source rapport TRI

La taille du bassin versant de la Gouloué est de 7,5 km². La longueur du cours d'eau est de 8 km.

Sur cette zone, l'amont du bassin versant est constitué de reliefs végétalisés (altitude maximale de 500 m). Sur la partie aval le cours d'eau longe une zone de relief en rive gauche et les enjeux sont ici regroupés en rive droite. Ils sont constitués de zones d'habitations et d'activités denses.

1.2.4 La Majimbini à Mtsapéré

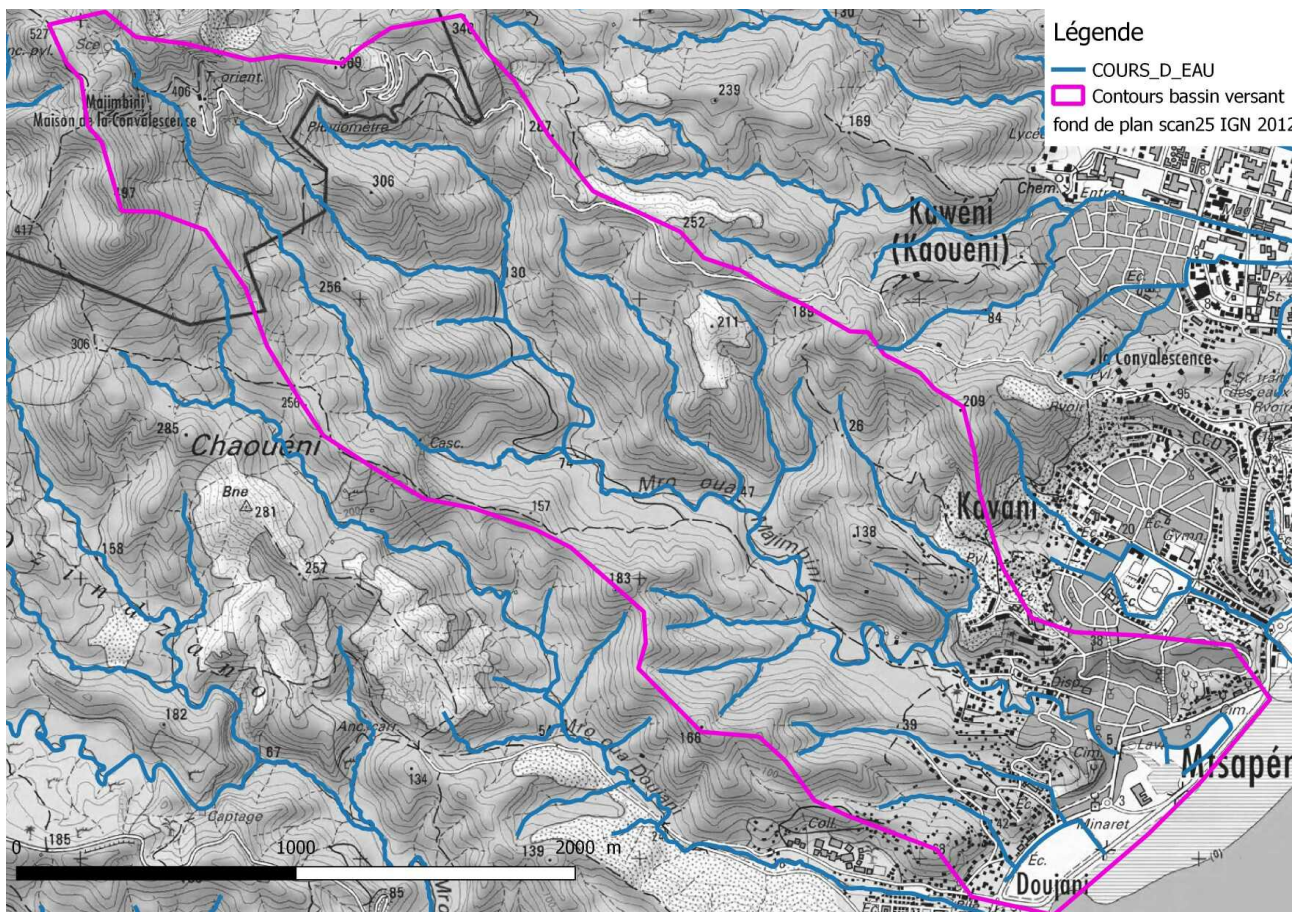


Illustration 4: localisation du bassin versant de la Majimbini

La taille du bassin versant de la Majimbini est de 5,3 km². La longueur du cours d'eau est de 6,2 km.

L'amont du bassin versant est constitué de reliefs végétalisés (altitude maximale supérieure à 500 m).

Les enjeux, principalement de type habitations, sont regroupés sur la côte à l'aval du bassin, sur les deux rives du cours d'eau. L'axe routier en remblai (la RN2) qui longe le littoral, forme un obstacle à l'écoulement du cours d'eau. Deux écoulements secondaires sont modélisés au-dessus du village de Doujani. La zone inondable à l'aval, située entre le versant et le remblai routier est commune. Il était plus opportun de traiter en globalité ces petits réseaux hydrographiques pour disposer d'une évaluation des zones inondables homogène.

2 Présentation de la méthodologie de modélisation sur les TRI Cours d'eau à Mayotte

Les modèles mis en œuvre pour cette cartographie du TRI Cours d'Eau sur Mayotte suivent les mêmes principes que la dernière vague en cours de PPRi réalisée sur Mayotte sur les secteurs à forts enjeux.

Pour rappel, les PPRi vague 3 combinent sur la plupart des secteurs de Mayotte, des résultats de méthodes Exzeco¹ et Cartino² du Cerema après expertise et validation du groupement.

Sur certains secteurs à forts enjeux, le groupement du PPRi vague 3 réalise des modélisations sur l'ensemble des bassins versants avec des modélisations 2D.

Le principe général de ces modélisations 2D est le même que celui mis en œuvre pour les cartographies des cours d'eau dans les TRI.

Le calcul se base sur un modèle 2D demandant un maillage de l'ensemble du bassin versant avec des triangles. Ces triangles ont des cotés les plus longs de 3 à 10 mètres dans les calculs TRI. Les calculs dans les PPRi vague 3 indiquent que les mailles ont une surface moyenne de 15 m² sur les zones d'enjeux à cartographier en 2D et de 30 m² sur le reste du bassin versant.

La topographie utilisée est le Lidar IGN levé en 2009 et fourni en 2011. La seule différence entre les cartes TRI et PPRi 3ème vague est l'obstruction considérée à 50 % de certains ouvrages en lit mineur dans les PPRi vague 3 (4.3.1 Maillage).

Il n'y a pas de modèle hydrologique classique utilisé pour convertir la pluie en débit. L'hydrologie est intégrée directement par de la pluie sur chaque point du maillage. Cette pluie dans la cartographie TRI est définie par des pluies de projet utilisant les mêmes hypothèses que le PPRi vague 3 (3 Estimation des pluies de projet).

Pour les divers paramètres de calcul, tel que rugosité, coefficient SCS pour la conversion Pluie-débit sur chaque maille, ces valeurs sont les valeurs classiques et cohérentes entre les deux approches.

Les conditions limites utilisées en mer sont elles aussi identiques à celle utilisées dans les PPRi vague 3 (4.3.3 Conditions limites).

Dans le cadre des PPRi vague 3, une cohérence des résultats 2D avec les zones Exzeco est vérifiée et dans certains cas, des zones cartographiées Exzeco sont intégrées dans les résultats finaux. Ceci n'a pas été intégré dans la cartographie des TRI, car on raisonne en hauteur, vitesse ce qui n'est plus possible avec l'intégration des zones Exzeco.

Par rapport aux méthodes des PPRi vague 1 et 2, les cartographies PPRi 3^e vague et Carto DI sont différentes. L'approche naturaliste et hydrogéomorphologique utilisée ne produisait que des emprises d'aléas et ne permettaient pas d'avoir une vision fine des hauteurs et vitesses atteintes par zone.

Les données de hauteurs d'eau sont obligatoires pour la directive inondation et nécessitent de réaliser la plupart du temps un modèle hydraulique. Lors des premières cartographies de la directive inondations, des modélisations 1D avaient été réalisées. Ces cartes nécessitaient des améliorations importantes. Par exemple, la modélisation 1D ne représentait pas la complexité des écoulements déconnectés, les débits avaient été choisis de manière empirique et le résultat final comportait des incohérences comme des emprises touchées par un scénario et pas touchées le scénario supérieur avec un débit plus important.

En synthèse, la méthode utilisée dans la cartographie directive inondation 2019 s'appuie sur :

- Estimations des pluies de projet (pour chaque scénario) suivant l'état de l'art à Mayotte
- Réalisation d'un maillage fin sur le Lidar 1m IGN
- Définition des paramètres de calcul
- Calcul sur un modèle 2D mondialement reconnu
- Post-traitement des résultats

1 <https://www.cerema.fr/fr/actualites/modelisation-du-ruissellement-bassins-versants-methode>

2 <https://www.cerema.fr/fr/actualites/outils-phase-cartographie-directive-inondation-cartino-pc>

3 Estimation des pluies de projet

Sur l'ensemble des secteurs modélisés, afin d'être en cohérence avec les PPRI vague 3, des pluies de projet sont injectées sur la totalité des bassins versants étudiés.

Ces pluies de projet proviennent ainsi des recommandations des études [1] et [2] du BRGM. Elles sont calculées de la manière suivante :

Une pluie de durée t et de fréquence f sera égale à $P_t(f) = P_j(f).a.t^b$

- avec $P_j(f)$: pluie journalière de fréquence f . Les valeurs fréquentielles des pluies journalières sont définies dans 3 zones distinctes dans le tableau suivant :

Période de retour T (année)	Moyenne	2	5	10	20	50	100
Région 1 :	110	100	145	170	200	235	260
Région 2 :	135	125	175	210	245	290	320
Région 3 « Convalescence »		150	210	250	290	340	380

Tableau 1: valeurs fréquentielles des pluies journalières, source [2]

L'ensemble des zones étudiées sont situées dans la région « Convalescence » (zone correspondant à des projets à forts enjeux ou à des altitudes élevées). La période maximale fournie dans ce tableau est de 100 ans. Pour obtenir la pluie pour période de retour 1000 ans, nous effectuons une simple corrélation linéaire, qui nous donne une valeur de pluie journalière de 510 mm, voir graphique suivant :

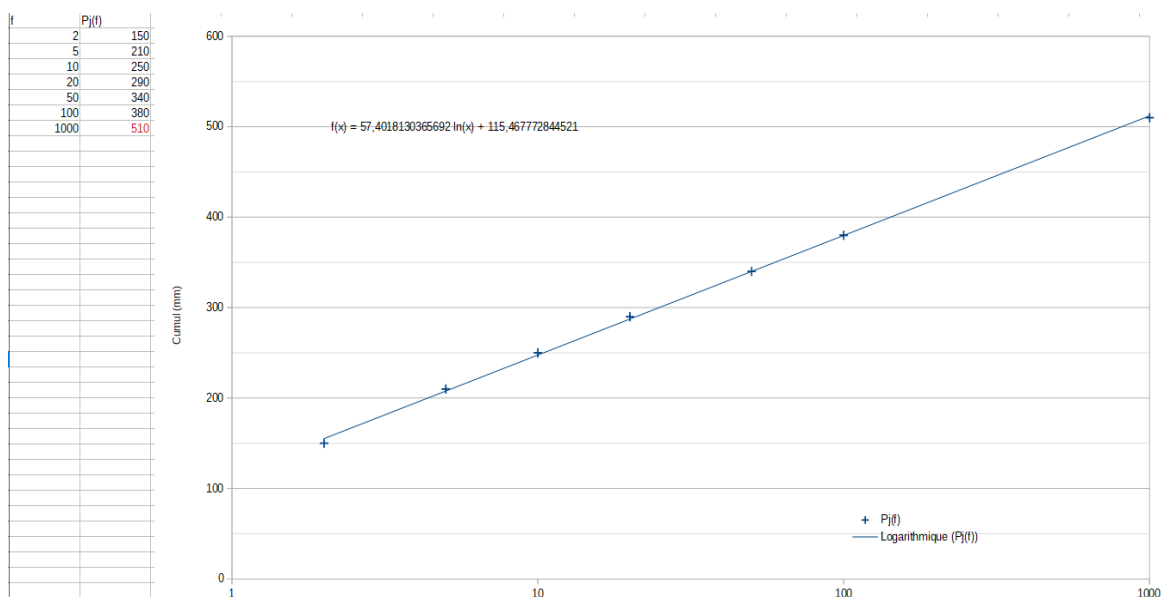


Illustration 5: extrapolation pluie T1000

- t : durée (en heure).
- a et b : coefficients a et b déterminés à l'aide du tableau 2 en fonction du temps de concentration du

bassin.

Durée	a	b
t < 1 h	0,52	0,6828
t > 1 h	0,54	0,257

Tableau 2: valeurs de a et b de la relation de passage entre pluie journalière et pluie de durée t, source [2]

L'application de la formule précédente nous permet de calculer nos pluies de projet, récapitulées dans le tableau suivant. La période intense est de 12 min correspond au temps de concentration moyen des sous bassins versants, hypothèse retenue par les études BRGM [1] et [2]. La durée totale est de 6 heures afin de prendre en compte une saturation initiale du sol au début de l'épisode pluvieux.

10 ans		
Pj	250	
t (min)	t (h)	Pt(10 ans)
12	0.2	43
36	0.6	92
60	1	130
84	1.4	147
108	1.8	157
132	2.2	165
156	2.6	173
180	3	179
204	3.4	185
228	3.8	190
252	4.2	195
276	4.6	200
300	5	204
324	5.4	208
348	5.8	212
372	6.2	216

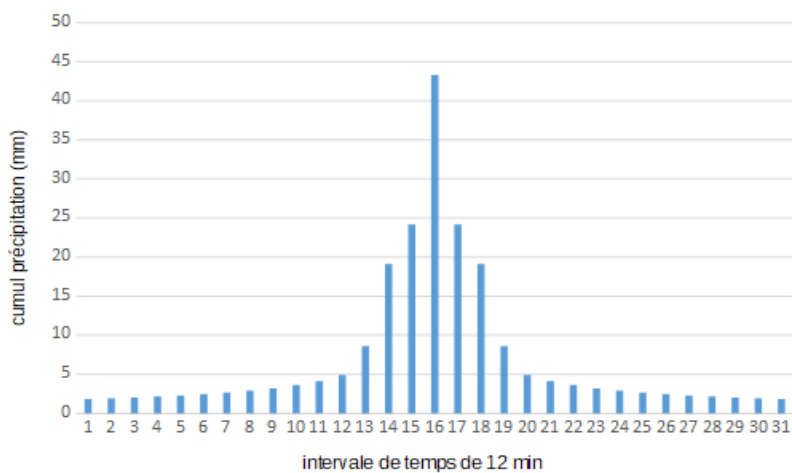


Illustration 6: pluie de projet – T10 ans

	100 ans	
Pj	380	
t (min)	t (h)	Pt(100 ans)
12	0,2	66
36	0,6	139
60	1	198
84	1,4	224
108	1,8	239
132	2,2	251
156	2,6	262
180	3	272
204	3,4	281
228	3,8	289
252	4,2	297
276	4,6	304
300	5	310
324	5,4	317
348	5,8	322
372	6,2	328

t (min)	t (h)	Pt(1000 ans)
12	0.2	88
36	0.6	187
60	1	265
84	1.4	300
108	1.8	320
132	2.2	337
156	2.6	352
180	3	365
204	3.4	377
228	3.8	388
252	4.2	398
276	4.6	408
300	5	416
324	5.4	425
348	5.8	433
372	6.2	440

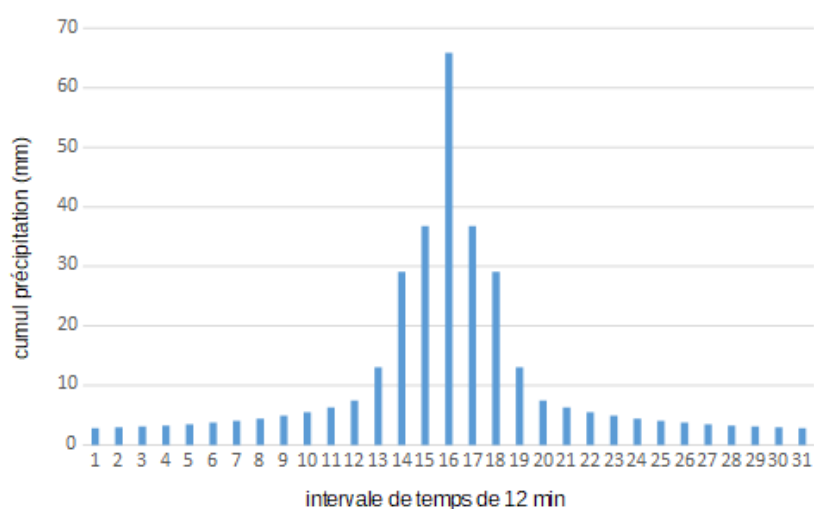


Illustration 7: pluie de projet – T100 ans

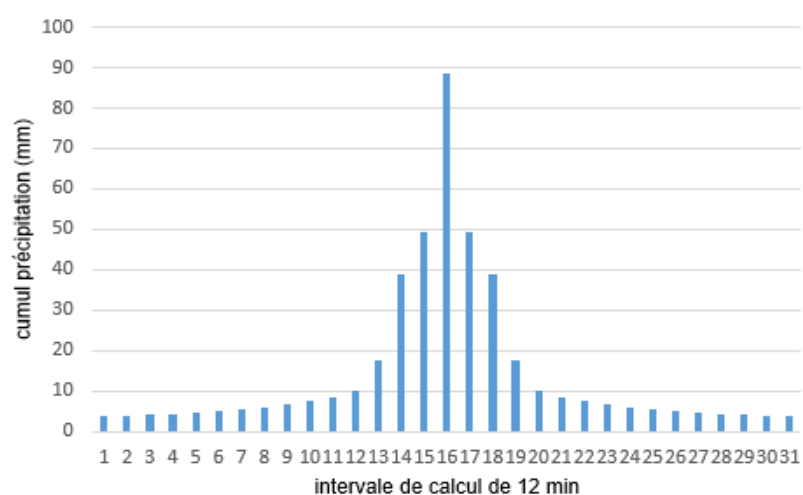


Illustration 8: pluie de projet – T1000 ans

4 Étude hydraulique

4.1 Choix du modèle hydraulique

Sur les quatre secteurs d'étude le fonctionnement hydraulique est complexe en raison de la configuration locale. Ainsi la modélisation hydraulique dans le cadre de la DI et des études PPRI a mis en évidence les limites d'utilisations de modèles 1D :

- ➔ Des écoulements secondaires déconnectés du lit mineur dès les premiers débordements sur plusieurs secteurs, puis des échanges lit mineur-lit majeur.
- ➔ Des apports intermédiaires latéraux.
- ➔ Des vitesses d'écoulement multidirectionnelles.
- ➔ Sur le secteur de la Kawénilajoli, une zone inondable parfois très large, avec une cote d'eau non horizontale dès que les trois cours d'eau se rejoignent dans la plaine.

Pour l'ensemble de ces raisons, une modélisation hydraulique 2D semble nécessaire pour représenter au mieux ces écoulements complexes.

Le logiciel de calcul hydraulique utilisé est Telemac 2D (voir référence en annexe). Le logiciel permettant de réaliser le maillage est Bluekenue.

4.2 Topographie

Les données topographiques de type Lidar disponibles utilisées dans la présente étude sont issues de la base RGEALTI datée d'août 2016.

Sur plusieurs secteurs, le Lidar ne prend pas correctement en compte le fond du lit, dans le cas de franchissements de cours d'eau par certains remblais routiers. Nous avons alors effectué une correction du fond topographique manuellement pour ramener l'altitude du MNT au niveau du fond de thalweg. C'est le cas du franchissement de la RN1 à Koungou, Kawéni et de l'ancienne RN près du cimetière à Mtsapéré.

Nous avons également utilisé les données suivantes pour construire le modèle hydraulique :

- couche Exzeco : utilisée pour détecter tous les affluents

La méthode Exzeco est une méthode d'extraction des zones d'écoulements basée sur les algorithmes SIG de calcul de réseau de drainage. Cette méthode purement topographique nécessite l'utilisation d'un MNT. Le Lidar du RGE ALti au pas de 1m a été dégradé au pas de 5m.

Les résultats de la méthode Exzeco sont disponibles sur l'ensemble de l'île de Mayotte¹.

- couches remblai et pente (traitement du lidar par les outils DICARTO) : utilisée pour détecter les zones où une ligne de contrainte devra être intégrée au maillage, notamment des points hauts de remblais sur lequel le maillage 2D devra s'appuyer.

Ces deux données ont aussi été fournies dans le cadre des études PPR vague 3 à la DEAL.

1 <https://www.cerema.fr/fr/actualites/modelisation-du-ruissellement-bassins-versants-methode>

4.3 Construction du modèle hydraulique

Pour disposer d'un maillage précis sur les zones inondables mais pas trop volumineux pour des questions de temps de calcul, la taille des mailles a été définie par zones. Dans les zones dites Exzeco, la maille sera plus fine que dans le reste du territoire modélisé. Les valeurs des paramètres sont fournis pour chaque bassin versant associé à une rivière.

4.3.1 Maillage

4.3.1.1 Secteur 1 : La Kawénilajoli à Mamoudzou

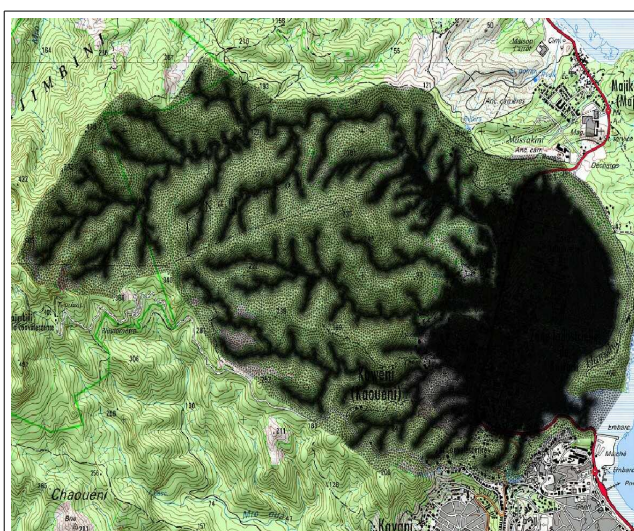


Illustration 9: vue globale du maillage – secteur 1

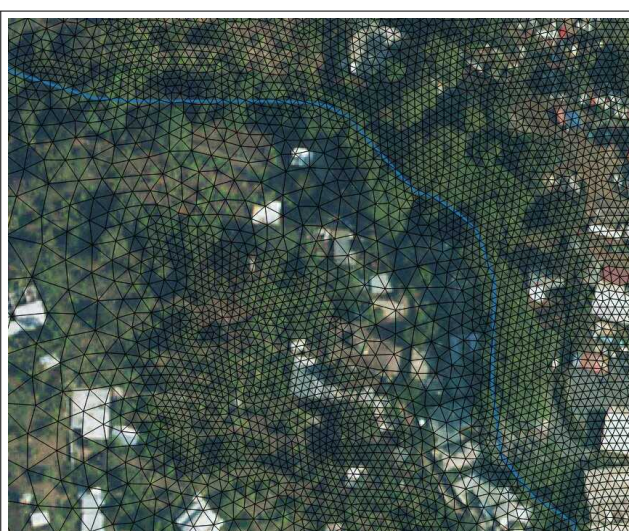


Illustration 10: vue détaillée du maillage - secteur 1

La zone modélisée s'étend sur la totalité du bassin versant de la Kawenilajoli, soit environ 10 km², pour une longueur de cours d'eau de 5 km. L'utilisation de la donnée exzeco comme squelette nous permet de modéliser de manière suffisamment fine l'ensemble des affluents du bassin versant jusqu'à la mangrove et la sortie en mer.

Le maillage est constitué de 350 000 nœuds de calculs. 2 tailles de mailles ont été définies pour construire le maillage :

- 3 m dans les zones définies par exzeco.
- 20 m maximum sur le reste du bassin versant modélisé.

4.3.1.2 Secteur 2 : La Kirissoni à Koungou

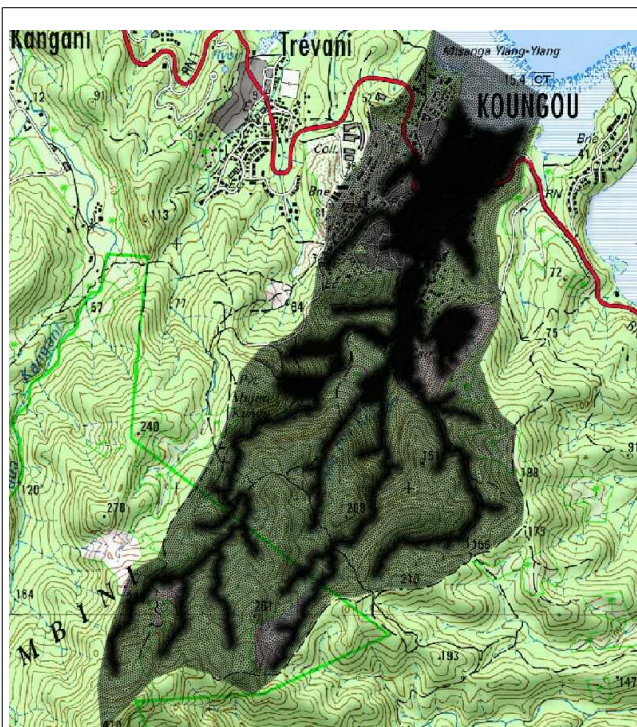


Illustration 11: vue globale du maillage – secteur 2

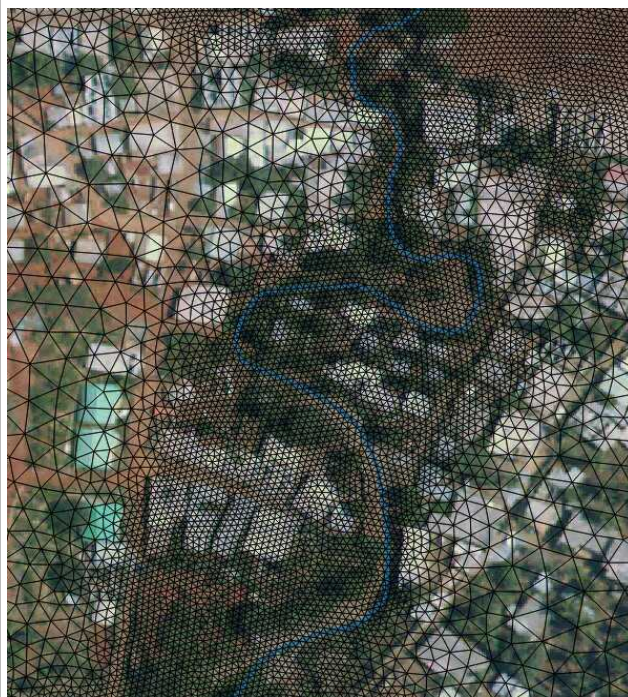


Illustration 12: vue détaillée du maillage - secteur 2

La zone modélisée s'étend sur la totalité du bassin versant de la Kirissoni, soit environ 2,5 km², pour une longueur de cours d'eau de 3 km. L'utilisation de la donnée exzeco comme squelette nous permet de modéliser de manière suffisamment fine l'ensemble des affluents du bassin versant.

Le maillage est constitué de 150 000 nœuds de calculs. 2 tailles de mailles ont été définies pour construire le maillage :

- 3 m dans les zones définies par exzeco.
- 10 m maximum sur le reste du bassin versant modélisé.

4.3.1.3 Secteur 3 : La Gouloué à Mamoudzou

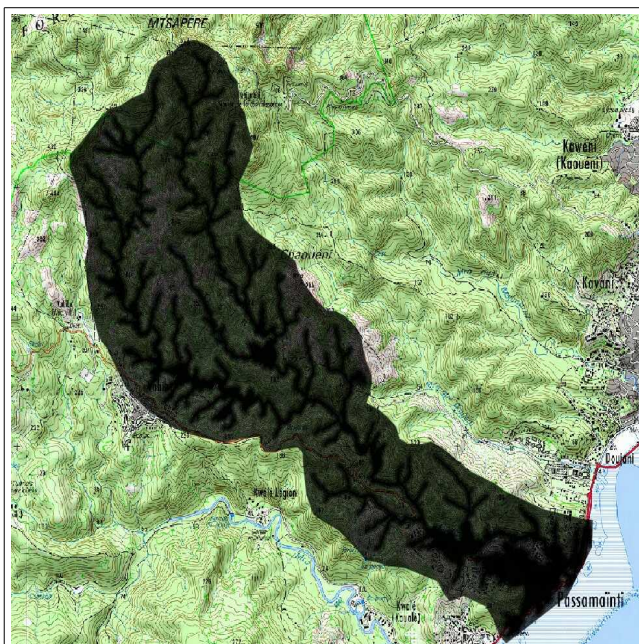


Illustration 13: vue globale du maillage – secteur 3

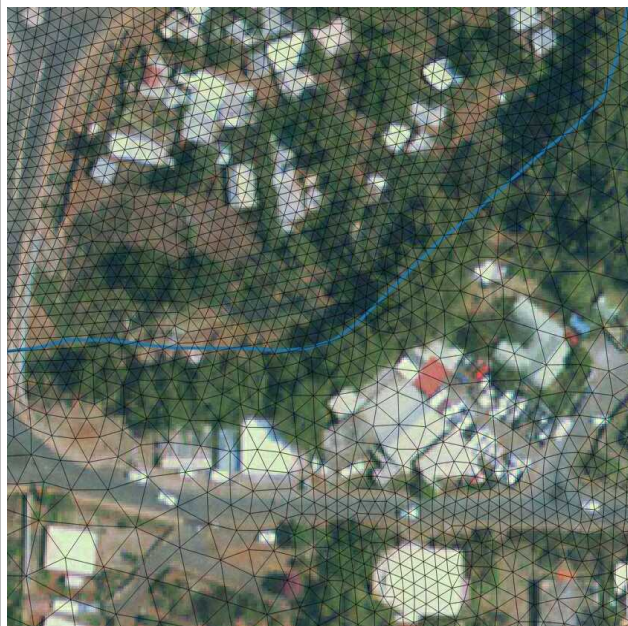


Illustration 14: vue détaillée du maillage - secteur 3

La zone modélisée s'étend sur la totalité du bassin versant de la Gouloué, soit environ 7 km², pour une longueur de cours d'eau de 3 km. L'utilisation de la donnée exzeco comme squelette nous permet de modéliser de manière suffisamment fine l'ensemble des affluents du bassin versant.

Le maillage est constitué de 220 000 nœuds de calculs. 2 tailles de mailles ont été définies pour construire le maillage :

- 3 m dans les zones définies par exzeco.
- 10 m maximum sur le reste du bassin versant modélisé.

4.3.1.4 Secteur 4 : La Majimbini à Mtsapéré

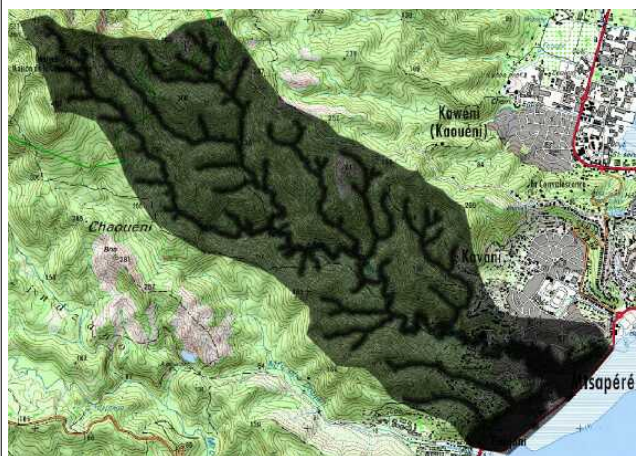


Illustration 15: vue globale du maillage – secteur 4



Illustration 16: vue détaillée du maillage - secteur 4

La zone modélisée s'étend sur la totalité du bassin versant de la Majimbini, soit environ 5 km², pour une longueur de cours d'eau de 4,5 km. L'utilisation de la donnée exzeco comme squelette nous permet de modéliser de manière suffisamment fine l'ensemble des affluents du bassin versant.

Le maillage est constitué de 150 000 nœuds de calculs. 2 tailles de mailles ont été définies pour construire le maillage :

- 3 m dans les zones définies par exzeco.
- 10 m maximum sur le reste du bassin versant modélisé.

Globalement, sur l'ensemble des secteurs étudiés, le maillage est a minima aussi fin que celui du PPRI vague 3.

4.3.2 Choix de la rugosité

Sur l'ensemble des secteurs étudiés nous avons déterminé de grandes zones de rugosité homogènes :

- lit mineur : 15 (20 pour le Gouloué qui semble beaucoup moins rugueux)
- zones de bâti dense : 5
- zones de bâti diffus : 10
- rues qui concentrent l'écoulement principal entre des zones bâties : 40
- zones de friches : 20
- zones marécageuses, mangroves : 5
- lit mineur dans la Mangrove : 30
- zones de relief : 15

Ces zones ont été tracées sur la base des orthophotos IGN les plus récentes.

Les cartes suivantes permettent d'illustrer les zones de rugosité définies sur chaque secteur :



Illustration 17: carte des coefficients de rugosité - secteur 1

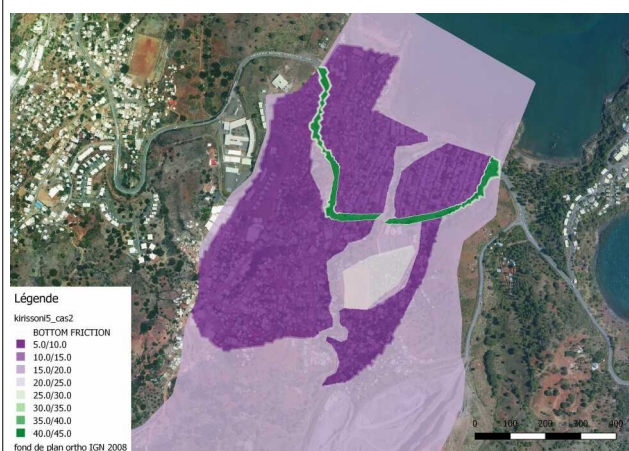


Illustration 18: carte des coefficients de rugosité - secteur 2



Illustration 19: carte des coefficients de rugosité - secteur 3

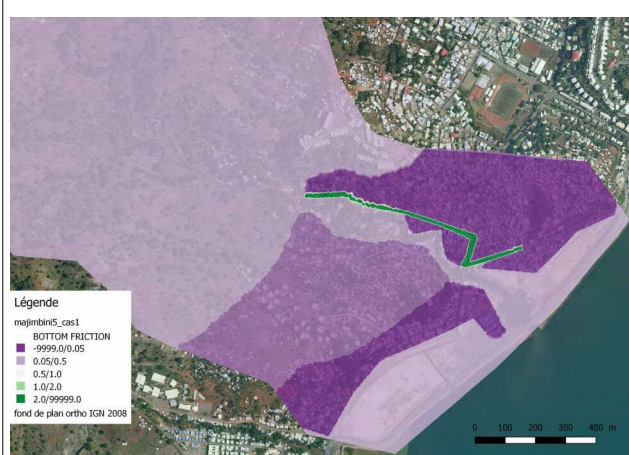


Illustration 20: carte des coefficients de rugosité - secteur 4

Dans des milieux urbains très denses, le maillage peut parfois prendre en compte les formes urbaines. Sur Mayotte, nous avons intégré l'urbanisation au travers d'un coefficient de frottement. L'urbanisation à Mayotte crée moins d'îlot de bâtiments comme dans des centres historiques anciens métropolitains. Rentrer dans le détail du maillage des bâtiments nécessite aussi de disposer de nombreux éléments de calage (Plus hautes Eaux, éléments historiques) non disponibles sur Mayotte à l'heure actuelle et considère qu'aucun écoulements ne peut traverser les habitations, ce qui n'est pas forcément le cas au vu du type d'habitat.

4.3.3 Conditions limites

4.3.3.1 Condition limite amont

Il n'y a pas d'injection de débit à l'amont du modèle. Les pluies de projet sont directement injectées sur la totalité du modèle.

A l'exutoire de chaque bassin versant, les résultats de débits atteints pour les trois événements pluviométriques sont les suivants. Entre parenthèse, les valeurs retenues pour la cartographie en 2013 :

- **150-370-540**m³/s pour la Kawénilajoli. (84-260-990 pour les TRI 1^{re} phase)
- **50-120-200** m³/s pour la Kirissoni. (35-90-370)

- **110-310-540 m³/s** pour la Gouloué. (95-240-950)
- **100-240-380 m³/s** pour la Majimbini.(nouveau secteur)

Les débits pseudo-spécifiques obtenus pour chaque bassin sont de l'ordre de **25-60-100 m³/s/km^{1,6}** pour les 3 scénarios respectifs. Ces valeurs semblent cohérentes avec les études PPRI vague 3.

4.3.3.2 Condition limite aval

La condition limite aval des modèles hydraulique est injectée au niveau de la mer.

Les conditions marines sont les mêmes que dans l'étude PPRI phase 3, à savoir 2 conditions définies à partir des données du SHOM :

1 : PMVE Niveau des pleines mers de vives-eaux = PMVE M_{tti} – ZH/Zref = 3.75 – 1.779 = **1.97 m NGM**

2 : PHMA : Plus Haute Mer Astronomique : PHMA M_{tti} – ZH/Zref = 4.39 – 1.779 = **2.61 m NGM**

La condition limite aval 1 est prise en compte pour les scénarios fréquents et moyens. La condition limite aval 2 est prise en compte pour le scénario extrême.

Ces valeurs sont cohérentes avec les PPRI 3^{ème} vague.

La remontée du niveau marin liée au changement climatique n'est pas intégrée. Le décret n° 2019-715 du 5 juillet 2019 relatif aux plans de prévention des risques concernant les aléas débordement de cours d'eau et submersion marine propose une prise en compte non obligatoire pour les fleuves côtiers. Cette intégration n'a pas été faite sur Mayotte pour deux raisons :

- La submersion marine étant aussi traitée dans la cadre de la cartographie de la directive inondation sur Mayotte, il est intéressant de voir sur le territoire l'impact de chaque type d'inondations
- Le relief de Mayotte et les scénarios de pluie choisis, la contrainte hydraulique aval ne serait pas très importante.

Des déformations du sol provoquées par la crise tellurique en cours à l'est de Mayotte depuis mai 2018 n'ont pas été intégrées¹. Le MNT utilisé est celui levé en 2009. Ces mouvements étant toujours en cours, les 15 cm de déformations maximales verticales souvent cités (atteints actuellement sur certaines stations mais qui peuvent ne pas être la limite haute) n'ont pas été intégrés. Comme pour la remontée du niveau marin, l'argument du relief et des scénarios de pluie choisis est toujours valable.

4.3.4 Paramètres de calcul

Les calculs sont réalisés avec Telemac 2D, version V7P3. Les valeurs des principaux paramètres qui permettent de stabiliser les calculs sont les suivants :

- Résolution des équations de Barré de St Venant par la méthode des éléments finis
- Pas de temps : 0,2 s.
- Modèle de turbulence à viscosité constante.
- Coefficient de diffusion des vitesses (viscosité numérique) : 10⁻⁶
- Utilisation du modèle Rainfall-runoff avec une valeur du Curve Number à 60 sur l'ensemble des secteurs modélisés. Cette valeur est dans la fourchette basse des valeurs usuelles pour ce type de sols (55 à 80) voir guide [3], cependant c'est celle qui nous permet de caler au mieux l'hydrologie afin que les valeurs de débits pseudo spécifiques soient comparables avec ceux des autres bassins étudiés.

4.4 Cartographie des trois événements étudiés

Les résultats des modélisations hydrauliques ont donné lieu à la production de cartes de hauteurs d'eau maximales et de vitesses d'écoulement maximales (moyennées sur la verticale) sur la totalité de la crue, pour chacun des trois scénarios. Les débits linéiques ont aussi été produits mais ne sont pas illustrés dans le

1 <http://mayotte.gnss.fr/>

rapport. Le graphique au chapitre 9.3 Comparaison entre le déplacement des personnes et le débit linéique permet de voir une idée des conséquences de ces hauteurs d'eau. Les pluies simulées en 6h sont considérées comme des crues éclairs avec peu de temps de réaction pour la gestion de crise.

4.4.1 Secteur 1 : La Kawénilajoli à Mamoudzou

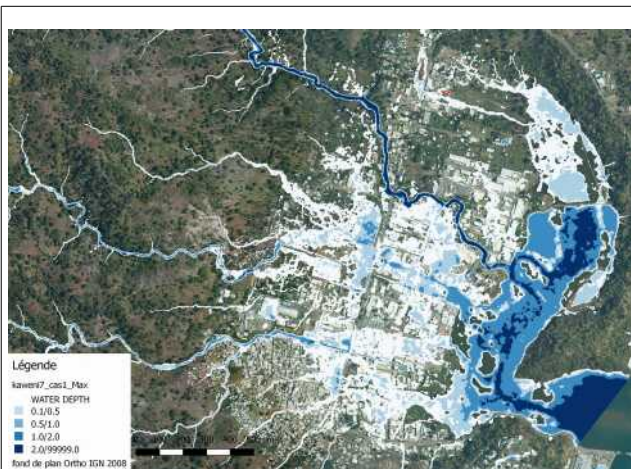


Illustration 21: secteur 1 – Qfreq – Hmax

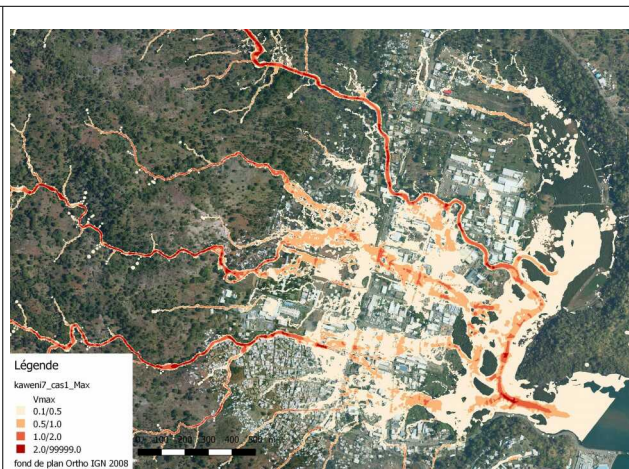


Illustration 22: secteur 1 – Qfreq – Vmax

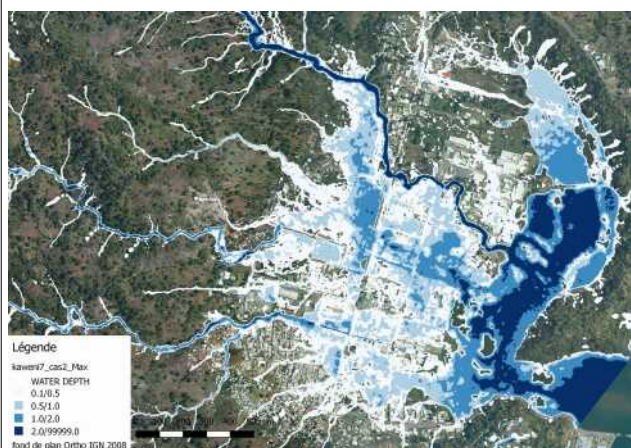


Illustration 23: secteur 1 – Qmoy – Hmax

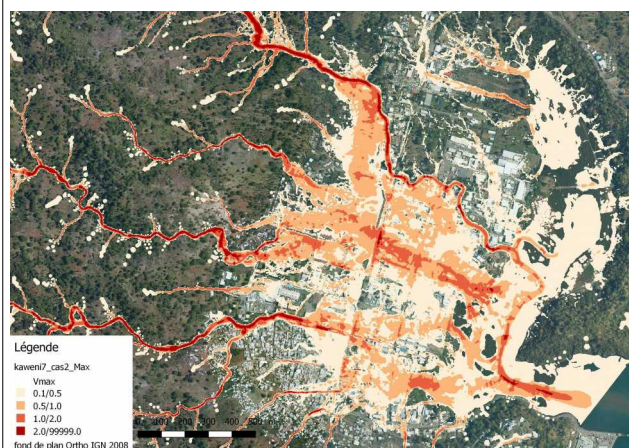


Illustration 24: secteur 1 – Qmoy – Vmax

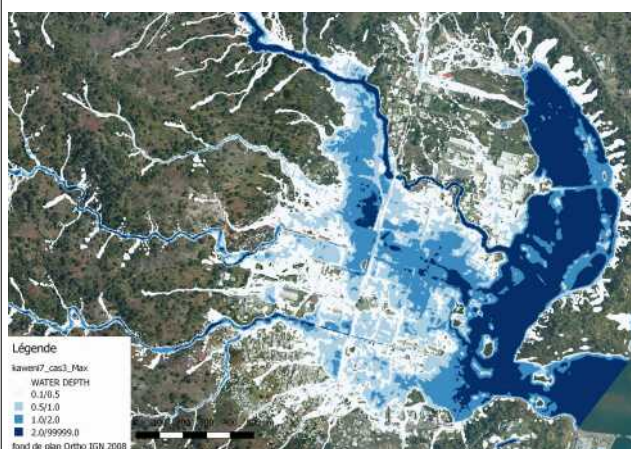


Illustration 25: secteur 1 – Qex – Hmax

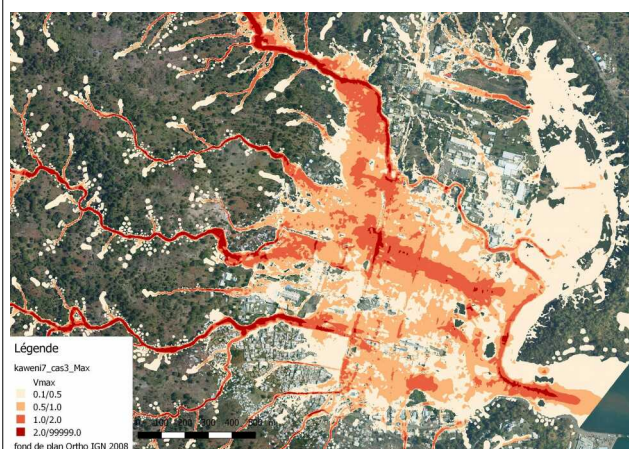


Illustration 26: secteur 1 – Qex – Vmax

Pour la crue extrême, les hauteurs d'eau maximales dépassent les 1 m sur de nombreux secteurs habités. Localement les 2m peuvent même être dépassés.

Les vitesses d'écoulement en lit majeur dépassent généralement les 0,5 m/s voir 1 m/s.

4.4.2 Secteur 2 : La Kirissoni à Koungou



Illustration 27: secteur 2 – Qfreq – Hmax



Illustration 28: secteur 2 – Qfreq - Vmax



Illustration 29: secteur 2 – Qmoy – Hmax



Illustration 30: secteur 2 – Qmoy – Vmax



Illustration 31: secteur 2 – Qex – Hmax

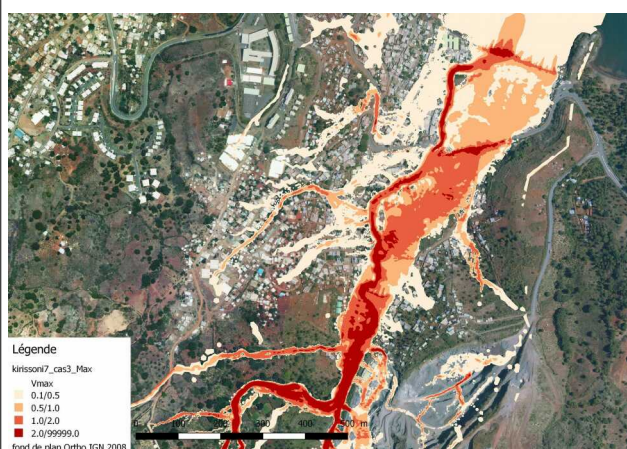


Illustration 32: secteur 2 – Qex – Vmax

Pour la crue extrême, les hauteurs d'eau maximales dépassent de manière générale les 50 cm à 1m en lit majeur rive droite. Les vitesses d'écoulement dépassent généralement les 0,5 m/s. Elles sont même supérieures à 1 m/s sur l'axe d'écoulement principal.

4.4.3 Secteur 3 : La Gouloué à Mamoudzou



Illustration 33: secteur 3 – Qfreq – Hmax



Illustration 34: secteur 3 – Qfreq – Vmax

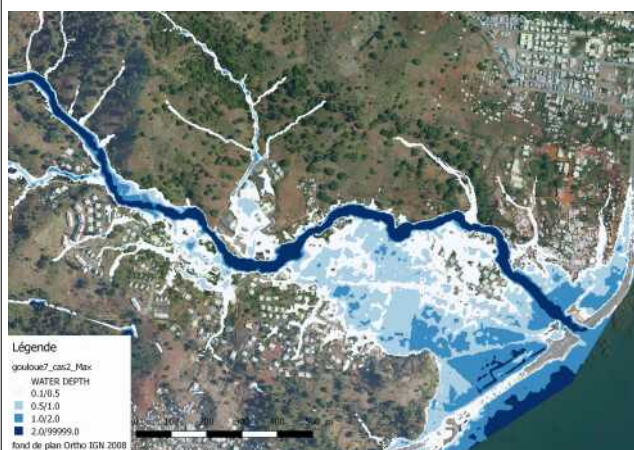


Illustration 35: secteur 3 – Qmoy – Hmax



Illustration 36: secteur 3 – Qmoy – Vmax



Illustration 37: secteur 3 – Qex – Hmax

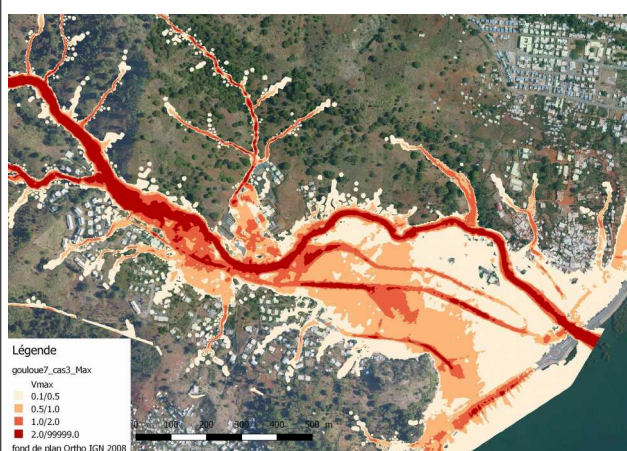


Illustration 38: secteur 3 – Qex – Vmax

Pour la crue extrême, les hauteurs d'eau maximales dépassent de manière générale les 1 m en lit majeur rive droite. Localement les 2m peuvent être dépassés.

Les vitesses d'écoulement dépassent généralement les 0,5 m/s. Elles dépassent même 1 m/s sur des axes d'écoulement que forment les rues principales.

4.4.4 Secteur 4 : La Majimbini à Mtsapéré

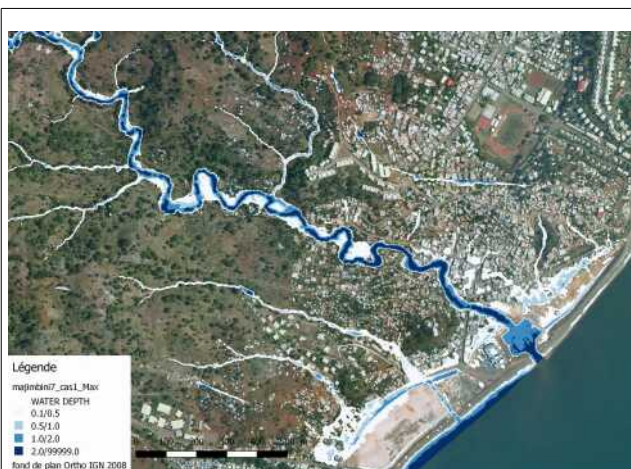


Illustration 39: secteur 4 – Qfreq – Hmax



Illustration 40: secteur 4 – Qfreq – Vmax



Illustration 41: secteur 4 – Qmoy – Hmax



Illustration 42: secteur 4 – Qmoy – Vmax



Illustration 43: secteur 4 – Qex – Hmax



Illustration 44: secteur 4 – Qex – Vmax

Pour la crue extrême, les hauteurs d'eau atteintes sont de l'ordre de 1 m sur les zones de débordement à l'aval. Les vitesses d'écoulement maximales générées atteignent voire dépassent 1 m/s.

5 Limites et discussions

Une modélisation ou une simulation n'est qu'une représentation partielle et potentielle des inondations.

Il est possible de citer les limites ou hypothèses :

- Mayotte ne dispose pas de réseau de mesure permettant d'analyser finement les débits calculés par rapport à des débits historiques. Le calage classique des modèles avec un débit connu et une hauteur d'eau connue n'est pas réalisable. Les paramètres de calcul pris en compte suivent les règles de l'état de l'art mais ne peuvent pas être calés.
- La topographie est celle de 2009 livrée en 2011 et a pu faire l'objet de modification non substantielle en milieu urbain. Comme indiqué précédemment, des déformations du sol provoquées par la crise tellurique en cours à l'est de Mayotte depuis mai 2018 n'ont pas été intégrées¹. Le maillage utilisé (maille de 3 à 10 m) ne permet pas aussi de prendre en compte des micro-éléments topographiques comme des murs, maisons...
- Le changement climatique qui affecte le niveau marin, potentiellement les pluies statistiques, n'est pas pris en compte.
- Les modèles hydrauliques sont à topographie constante et le sol de Mayotte pour des événements pluvieux important peut conduire à des érosions de berges, écoulements saturés entraînant des comportements hydrauliques différents.

Malgré ces limites, des certitudes peuvent être fournies :

- Les crues modélisées affectent des bassins versants de petites tailles ce qui conduit à la production de crue éclair avec très peu ou pas d'anticipation possible. Rappelons que les pluies de projet sont de 6h, en fonction de la position sur le bassin versant, le pic de crue sera atteint en moins d'une heure ;
- Au-delà du temps de réaction du bassin versant et la célérité de la crue, les vitesses atteintes sur ces forts reliefs sont souvent importantes.

Des effets de seuil entre scénarios sont aussi visibles sur les cartographies :

- Pour la Kawénilajoli à Mamoudzou, la pluie rien que sur la zone très urbaine montre une forte zones inondées dès le scénario fréquent. Cependant, le passage au scénario moyen montre un débordement en rive droite de la Kawénilajoli en amont de la zone urbaine et qui crée un écoulement parallèle très puissant ;
- Pour la Kirissoni à Koungou, dès la crue fréquente, il y a débordement en rive gauche. La puissance de ce débordement complètement déconnecté du cours d'eau principal est très visible sur les autres scénarios ;
- Pour la Gouloué à Mamoudzou, la crue fréquente simulée est contenu dans le lit mineur. Les zones inondées en milieu urbain sont uniquement dues à l'impluvium local et peuvent être considérées comme du ruissellement. A partir du scénario moyen, les débordements en rive droite sont importants et suivent fortement les axes routiers, ce qui est très visible sur les cartes de vitesse ;
- Pour la Majimbini à Mtsapéré, la partie aval proche de la mer connaît un débordement progressif entre les trois scénarios. Seul le scénario extrême inonde en totalité la zone compris entre le versant et le remblai routier.

¹ <http://mayotte.gnss.fr/>

6 Mise au format cartographique Directive inondation

Les traitements SIG ont été effectués à l'aide des logiciels Qgis2.16 et le plugin Telemac, le logiciel Qgis3.10, GRASS 7.6.1 et R3.5.3 et Rstudio 1.2.1335.

Les résultats des quatre modèles Telemac2D mis en œuvre, modèles aux éléments finis ont été convertis en premier en fichiers Raster à une maille de 1m cohérente avec le Rge Alti de l'IGN (même position des pixels).

Les résultats convertis sont la hauteur d'eau, la vitesse et le débit linéique.

Ces modèles ont été forcés par uniquement de la pluie. Il a donc fallu seuiller les zones inondables avec des critères sinon tout le territoire pouvait être considéré comme « inondable ». Nous avons considéré une zone inondée comme une zone ayant soit une hauteur d'eau de plus de 10 cm soit un débit linéique de plus de $0.025\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{ml}$, soit les deux.

Le seuil unique sur la hauteur d'eau pouvait conduire à des nombreuses zones non connectées sur des thalwegs amont. Le seuil du débit linéique a permis de pouvoir joindre ces diverses zones. Le débit linéique correspond à la hauteur multipliée par la vitesse. C'est une valeur par mètre linéaire $0.025\text{m}^3.\text{s}^{-1}.\text{ml}$ correspond par exemple à un courant de 25cm/s avec 10 cm de hauteur d'eau.

Les traitements SIG ont ainsi consisté à successivement :

- Calculer les emprises des classes pour chaque paramètre (hauteur, vitesse débit linéique) pour chaque scénario ;
- Vectoriser les résultats (création de polygones) pour chacune des échéances ;
- Filtrer les résultats de manière à éliminer les polygones isolés non représentatifs (voir ci-dessous) ;
- Vérifier la cohérence des résultats / corrections ponctuelles (les effets de bords de frontière du maillage ont été supprimés) ;
- Supprimer les résultats en mer.

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 400 m^2 (soit 400 pixels de 1 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 pendant la phase de vectorisation des cartes en RGM04/UTM38S. Il convient de rappeler que ces modifications restent quasi imperceptibles à l'échelle de restitution des cartes qualifiée au $1/25000^{\text{ème}}$ pour la cartographie de la directive inondation..

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

- $0\text{ m} < \text{hauteur d'eau} \leq 0,5\text{ m}$;
- $0,5\text{ m} < \text{hauteur d'eau} \leq 1\text{ m}$;
- $1\text{ m} < \text{hauteur d'eau} \leq 2\text{ m}$;
- $2\text{ m} < \text{hauteur d'eau}$.

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

- $0 < \text{vitesse d'eau} \leq 0,2\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$;
- $0,2 < \text{vitesse d'eau} \leq 0,5\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$;
- $0,5 < \text{vitesse d'eau} \leq 1\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$;
- $1 < \text{vitesse d'eau} \leq 2\text{ m}^3.\text{s}^{-1}$;
- $2\text{ m}^3.\text{s}^{-1} < \text{vitesse d'eau}$.

Les classes de débit linéique cartographiées pour chaque scénario sont :

- $0 < \text{débit linéique} \leq 0,15 \text{ m}^3.\text{s}^{-1} .\text{ml}$;
- $0,15 < \text{débit linéique} \leq 0,25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1} .\text{ml}$;
- $0,25 < \text{débit linéique} \leq 0,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1} .\text{ml}$;
- $0,5 < \text{débit linéique} \leq 1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1} .\text{ml}$;
- $1 < \text{débit linéique} \leq 2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1} .\text{ml}$;
- $2 < \text{débit linéique} \leq 4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1} .\text{ml}$;
- $4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1} .\text{ml} < \text{débit linéique}$

Ces diverses classes de débits correspondent aux classes indiquées dans le standard COVADIS directive inondations. D'autres limites ont été fournies correspondant à des limites utilisées dans des études antérieures (9.3 Comparaison entre le déplacement des personnes et le débit linéique) et à la multiplication des limites hauteur d'eau vitesse (ex 2 m de hauteur d'eau à $2 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ correspond à $4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1} .\text{ml}$).

Ces classes de débits linéiques sont un moyen d'analyser la dynamique des écoulements indiquées dans le Décret n° 2019-715 du 5 juillet 2019 relatif aux plans de prévention des risques concernant les « aléas débordement de cours d'eau et submersion marine ».

Les fichiers produits et fournis le 04/12/2019 sont établis aux spécifications COVADIS disponible dans le document intitulé : Standard de données - Directive inondation - version 2.1 – juillet 2019 :

- N_MAYO_ECOUL_01_01For_CE_S_976 iso-classes de vitesse du scénario Fort
- N_MAYO_ECOUL_01_02Moy_CE_S_976 iso-classes de vitesse du scénario Moyen
- N_MAYO_ECOUL_01_04Fai_CE_S_976 iso-classes de vitesse du scénario Faible
- N_MAYO_INONDABLE_01_CE_S_976 Limite d'inondations des trois scénarios
- N_MAYO_ISO_DEB_01_01For_CE_S_976 iso-classes de débit linéique du scénario Fort
- N_MAYO_ISO_DEB_01_02Moy_CE_S_976 iso-classes de débit linéique du scénario Moyen
- N_MAYO_ISO_DEB_01_04Fai_CE_S_976 iso-classes de débit linéique du scénario Faible
- N_MAYO_ISO_HT_01_01For_CE_S_976 iso-classes de hauteur d'eau du scénario Fort
- N_MAYO_ISO_HT_01_02Moy_CE_S_976 iso-classes de hauteur d'eau du scénario Moyen
- N_MAYO_ISO_HT_01_04Fai_CE_S_976 iso-classes de hauteur d'eau du scénario Faible

Les fichiers des modèles et les résultats raster, prduit intermédiaire à la cartographie ont aussi été fournis à la DEAL de Mayotte.

7 Conclusion

Ce projet a permis la réalisation de nouvelles cartographies du phénomène d'inondations par débordements de quatre cours d'eau sur Mayotte.

8 Bibliographie

- [1] « Actualisation des propositions pour une méthodologie relative aux études hydrologiques et hydrauliques à Mayotte ». BRGM, novembre 2008.
- [2] « Synthèse de la méthodologie relative aux études hydrologiques et hydrauliques à Mayotte ». BRGM, juin 2013.
- [3] Guide « Urban Hydrology for Small Watersheds ». USDA, 2018. 5

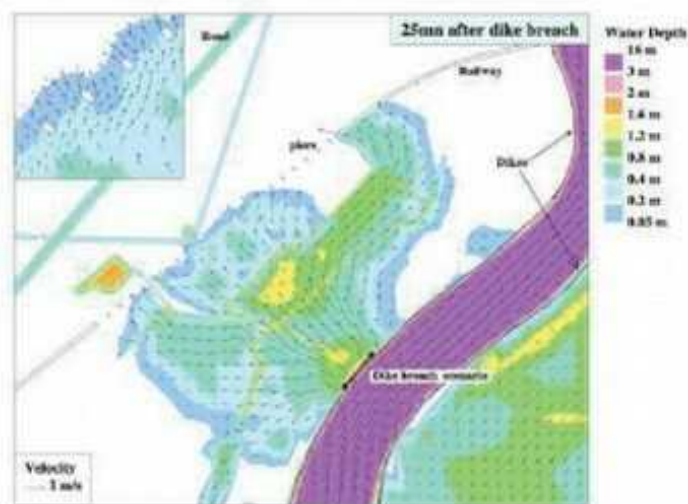
9 Annexes

9.1 Présentation du logiciel Telemac-2D

open TELEMAC-MASCARET The mathematically superior suite of solvers

Presentation

TELEMAC-2D - Two-dimensional hydrodynamic



Overflow subsequent to an embankment failure

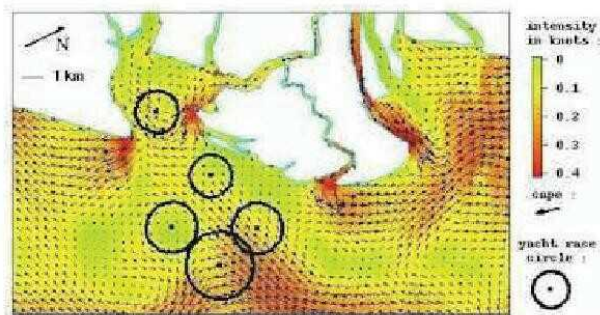
TELEMAC-2D is used to simulate free-surface flows in two dimensions of horizontal space. At each point of the mesh, the program calculates the depth of water and the two velocity components.

A complete and effective program

TELEMAC-2D solves the Saint-Venant equations using the finite-element or finite-volume method and a computation mesh of triangular elements. It can perform simulations in transient and permanent conditions.

TELEMAC-2D can take into account the following phenomena:

- Propagation of long waves, taking into account non-linear effects
- Bed friction
- Influence of Coriolis force
- Influence of meteorological factors: atmospheric pressure and wind
- Turbulence
- Torrent and river flows
- Influence of horizontal temperature or salinity gradients on density
- Cartesian or spherical coordinates for large domains
- Dry areas in the computational domain: intertidal flats and flood plains



Tidal currents in Atlanta Bay

Integrated into the TELEMAC-MASCARET system

TELEMAC-2D is integrated into the TELEMAC-MASCARET modelling system. This contains a group of programs dedicated to fluid mechanics calculations relating to the environment: 2D and 3D current patterns, waves, sedimentology and water quality.

- TELEMAC-2D uses the libraries that are common to all modules of the TELEMAC-MASCARET system. This concerns in particular the use of numerical schemes and high-performance solvers, which are constantly being improved.
- In addition, it is easy to link up TELEMAC-2D with another module in the system (computation of wave-induced currents, sediment transport, etc.)

Like all the modules of the TELEMAC-MASCARET system, TELEMAC-2D was developed in accordance with the quality assurance procedures followed in the Electricité de France's Studies and Research Division. The software is supplied with a complete set of documents: theoretical description, user's manual and first steps, validation file, etc.

Latest News

2017 User Conference - Registration and call for abstract

27 April 2017

The upcoming XXIVth TELEMAC-MASCARET Users Conference will take place this year at the Graz University of Technology in Graz (Austria) on the 17th-20th October 2017. A preceding workshop wil [...]

- 03 April 2017 **Post-doctoral position on Data Assimilation in 2D hydraulic models**
- 03 April 2017 **Post-doctoral position on parametric shape optimisation in hydraulics**
- 30 January 2017 **v7p2r0 is available for download**
- 05 January 2017 **Postdoc position in numerical modelling of coastal particulate transport**

9.2 Présentation du logiciel Bluekenue



Gouvernement
du Canada

Government
of Canada

Canada

Conseil national de recherches Canada

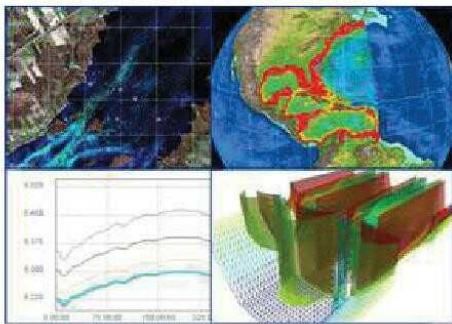
[Accueil](#) > [Programmes et services](#) > [Services techniques et consultatifs](#)

> [Blue Kenue™ : Logiciel pour modélisateurs hydrauliques](#)

Blue Kenue™ : Logiciel pour modélisateurs hydrauliques

[Télécharger Blue Kenue™](#)

Visualisation et animation



Types de visualisations en Blue Kenue™

Blue Kenue™ est un outil perfectionné permettant aux modélisateurs hydrauliques de préparer, analyser et visualiser leurs données. Il s'agit d'une interface graphique de pointe intégrant des bases de données environnementales et des données géo-référencées aux données de modèle (entrées et sorties). Blue Kenue permet de lire directement les résultats des modèles TELEMAC, ADCIRC et HydroSim.

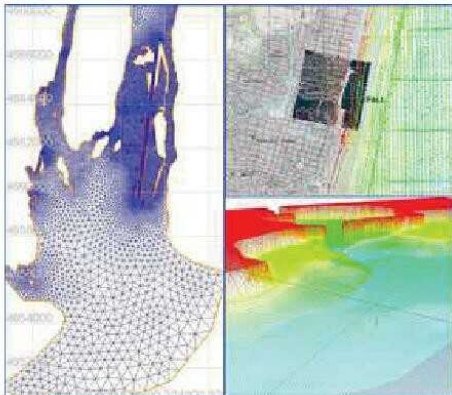
La visualisation de résultats dans Blue Kenue™ se fait par le biais de vues dynamiques 1D, polaires, 2D, 3D ou sphériques que l'utilisateur peut enregistrer sous forme de films ou sauver sous forme d'images pour ses rapports et présentations.

Toutes les vues et les données sont entièrement géo-référencées. Blue Kenue permet de plus la conversion entre systèmes de coordonnées (projections courantes).

Formats et types de données

Blue Kenue™ permet d'exploiter une gamme complète de types de données utilisés couramment par les modélisateurs hydrauliques. Les formats originaux de fichiers ASCII et Binaires sont tous deux disponibles pour les données stationnaires ou variables en temps.

Il est possible d'importer et d'exporter les données aux formats SIG courants, y compris: ArcINFO/ArcView, MapInfo, GeoTIFF, DTED/CDED, BIL, SRTM, WMO-GRIB et Surfer.



Préparation des données du modèle

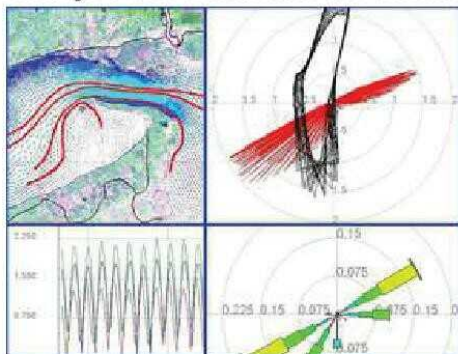
- Séries temporelles (scalaires et vectorielles)
- Données tabulaires, Distributions, Roses de vitesse
- Ensembles de points à attributs multiples
- Ensembles de lignes à attributs multiples
- Réseaux à attributs multiples
- Données (scalaires et vectorielles) sur grille rectangulaire
- Données (scalaires et vectorielles) sur grille triangulaire

Préparation des données du modèle

Blue Kenue™ permet de générer des maillages rectangulaires et triangulaires à partir de points, de lignes, ou même à partir d'autres maillages réguliers ou triangulaires. L'utilisateur a la possibilité d'inclure des « noeuds durs » ou des « lignes de rupture » avec le générateur de grille triangulaire. Ces points et lignes seront préservés lors de la création des noeuds/éléments. La densité de noeuds est calculée à partir de cartes de densité définies par l'utilisateur (grilles rectangulaires, maillages triangulaires ou polygones).

Les cartes de friction hydrodynamique sont quant à elles générées facilement par mappage de données sous forme de polygones ou autres grilles.

Analyse des résultats de simulation



Analyse des résultats de simulation

L'utilisateur peut animer un fichier de résultat, ou le regarder un pas de temps à la fois en avançant ou en reculant dans le temps. Des profils en temps peuvent être extraits à n'importe quel point du domaine. Une sonde permet aussi d'interroger les valeurs numériques interactivement en direct et de créer des lignes de courant pour des données vectorielles. Un simple click de souris permet d'obtenir des statistiques sur le modèle comme la moyenne temporelle, les valeurs minimales et maximales, les fourchettes, l'écart type, les vitesses résiduelles, etc. Un calculateur permet enfin de définir des données complexes (sur le maillage) à partir des résultats de base du modèle.

Personne-ressource

Enzo Gardin, Chef, Relations avec les clients

Téléphone : 613-991-2987

Courriel : Enzo.Gardin@nrc-cnrc.gc.ca

LinkedIn : [in Enzo Gardin](#)

► Signaler un problème ou une erreur sur cette page

Date de modification : 2017-04-26

9.3 Comparaison entre le déplacement des personnes et le débit linéique

Ce graphique est extrait du rapport « Cartographie de l'aléa du PPRI de Nîmes - Analyse des connaissances disponibles et méthode de réalisation » établi par le CETE Méditerranée le 17 Juin 2011.

Il est accessible sur

http://www.gard.gouv.fr/content/download/4616/28968/file/Rapport_presentation_PPRI_NIMES_annexe_tech_nique.pdf.

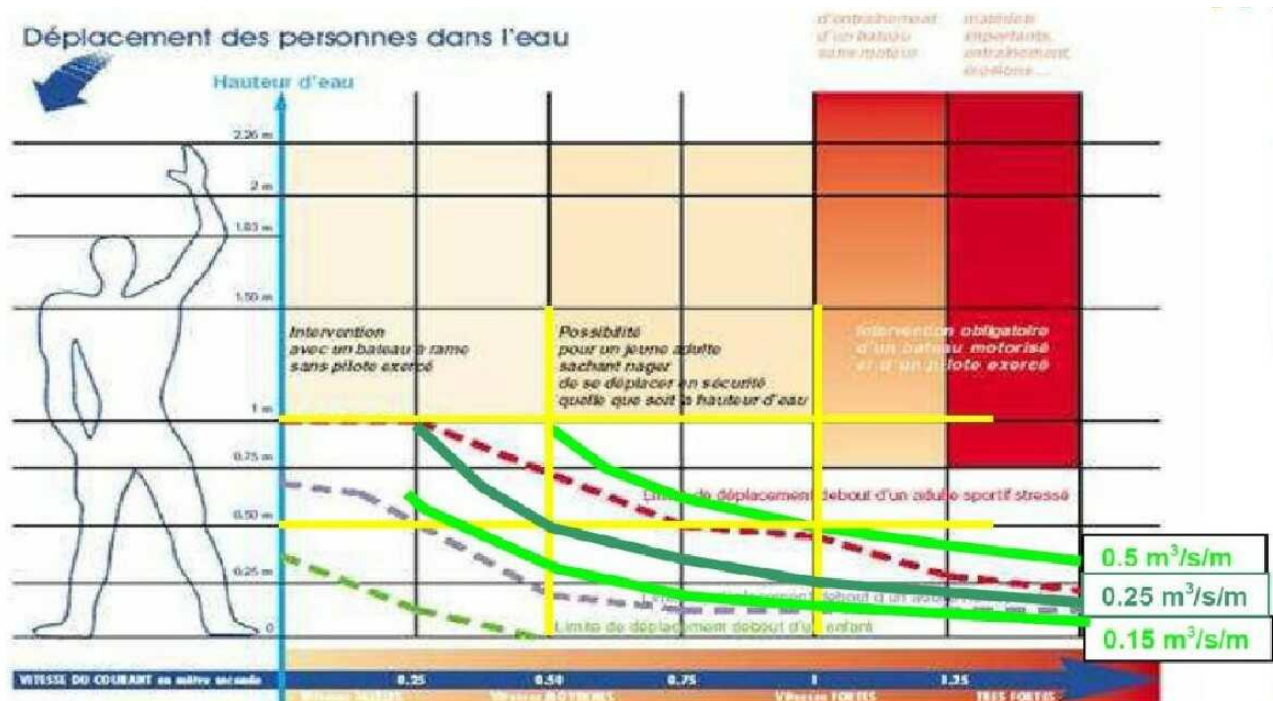


Illustration 32: Possibilité de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau et des vitesses (source DDE84, Guide guide PPR inondations, note complémentaire sur le ruissellement péri-urbain) croisé avec le débit linéique (Sogreah)

Illustration 45: Possibilité de déplacement des personnes en fonction de la hauteur d'eau



[Cerema Méditerranée](#) - Pôle d'activité – 30 rue Albert Einstein – CS 70499 – 13593 Aix-en-Provence CEDEX 3
Tel : 04 42 24 76 76 – mel : DTerMed@cerema.fr

Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30

Établissement public – Siret : 130 018 310 00313 - TVA Intracommunautaire : FR 94 130018310 - www.cerema.fr

Annexe 7. Cartographie du phénomène de submersion marine dans le cadre des Territoires à Risque Important d’Inondation à Mayotte (2ème cycle) — BRGM - Novembre 2019

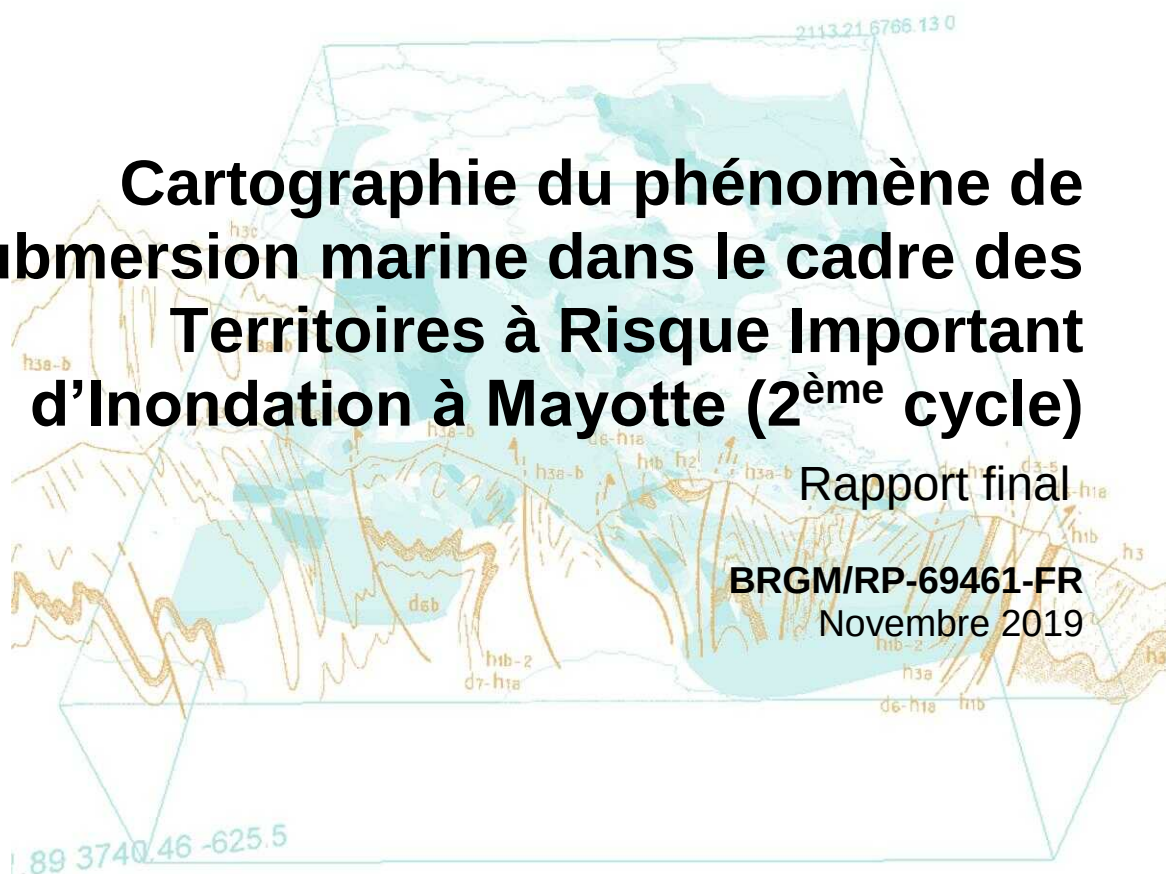


Cartographie du phénomène de submersion marine dans le cadre des Territoires à Risque Important d'Inondation à Mayotte (2^{ème} cycle)

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 SCENARIOS	32
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 Miti (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 CEREMA, 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.

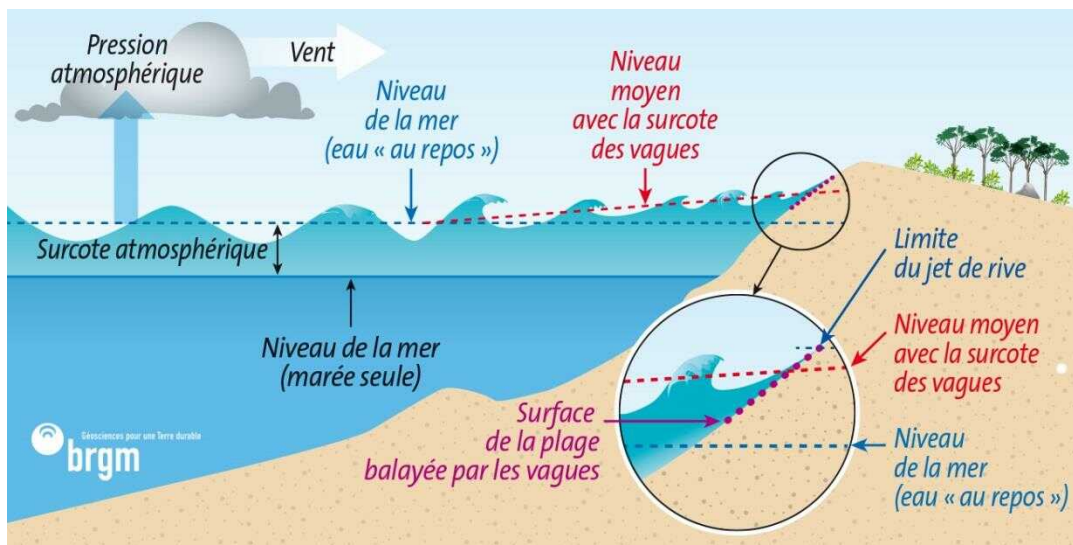


Illustration 1 - Schéma des différentes contributions au niveau du plan d'eau lors d'une tempête (surcotes) jusqu'au rivage.

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).

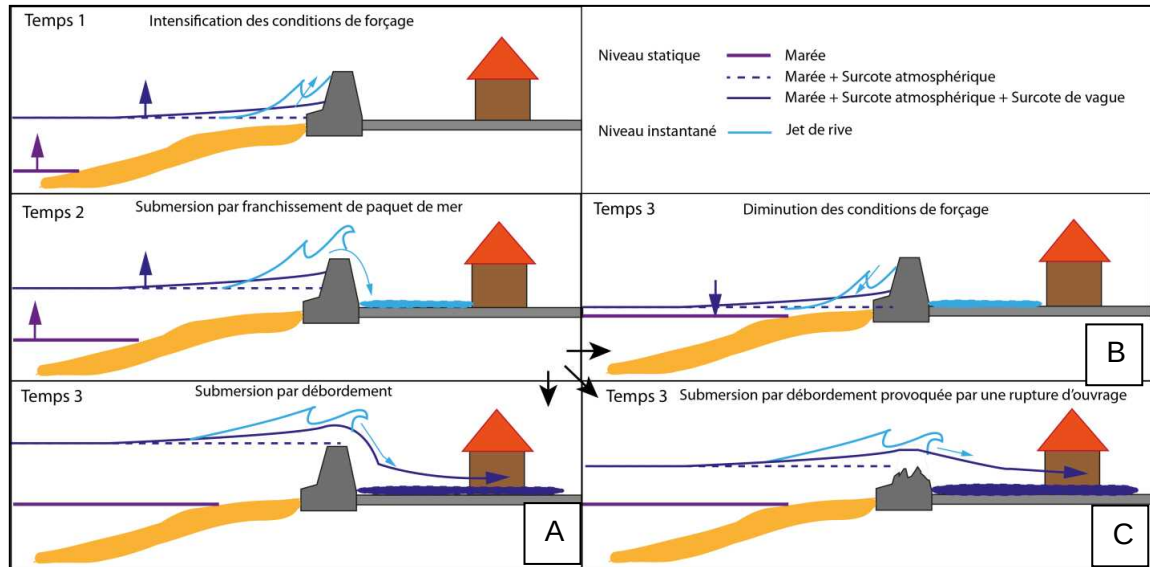


Illustration 2 - Exemple de chronologies possibles en cas de submersion marine (franchissement par paquets de mer / dégradation des ouvrages / débordement, ©BRGM).

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 enjeux (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 différait 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).

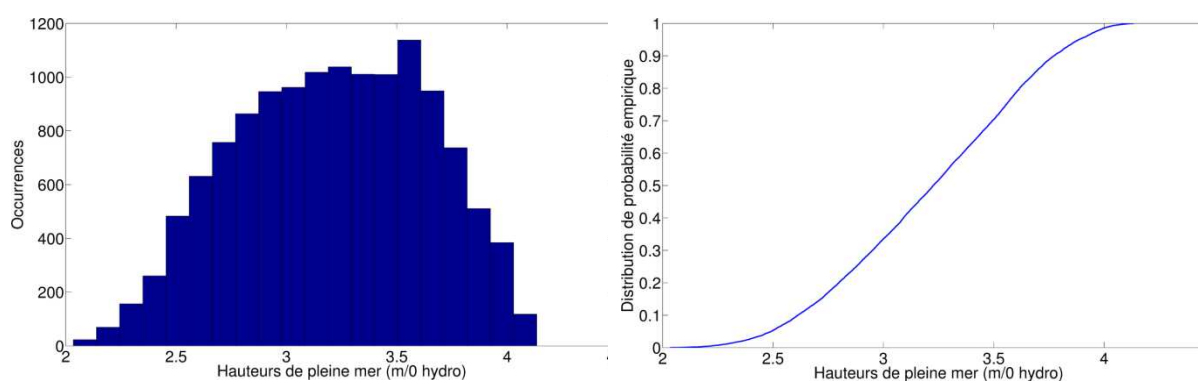


Illustration 6 - Gauche: densité de probabilité des hauteurs de pleine mer prédites par les harmoniques FES 2004 ; Droite : « fonction de répartition » empirique des hauteurs de pleine mer.

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 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 Ouest	2,7 3	8, 4	2,65	1,98	0,22	0,25	0,2
	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 représenté 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

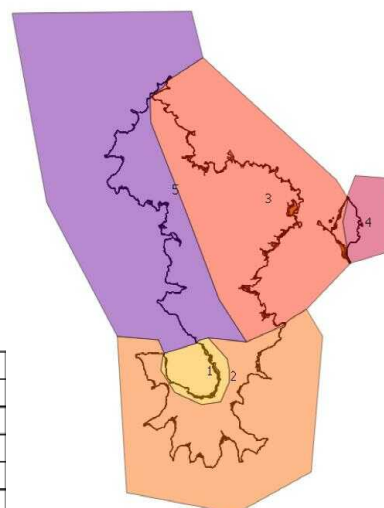


Illustration 14 – Niveaux d'eau utilisés pour la cartographie de l'évènement extrême en fonction du secteur géographique (données CEREMA, DEAL Mayotte, 2015)

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.

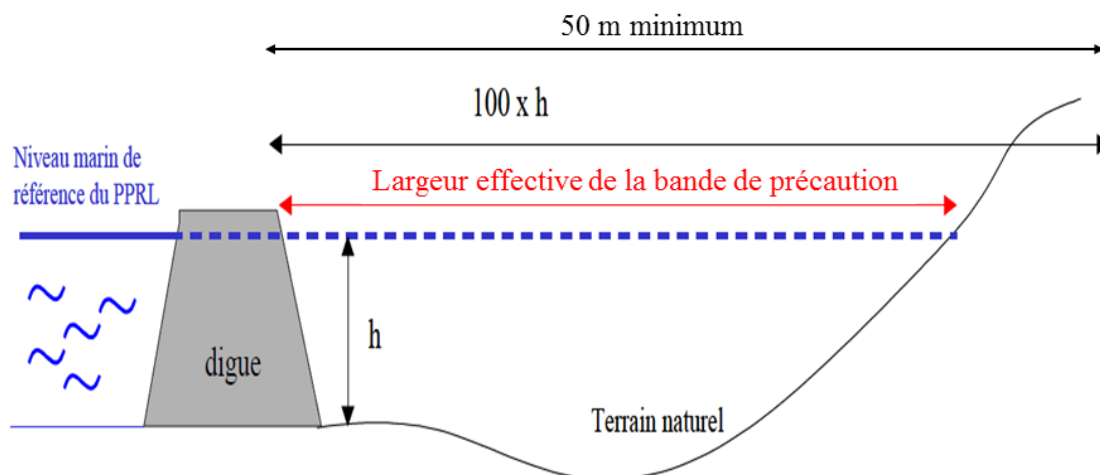


Illustration 15 - Principe de détermination de la bande de précaution en arrière des structures de protection contre la submersion marine (modifié d'après le guide méthodologique, MEDDE, 2014).

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 (Chateauminois et al., 2015). Si cette base de données d'événements 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_sismo_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://validateur-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 seraient 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-Guillemain
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

Annexe 8. Note technique sur les enjeux à Mayotte — DEAL

BASSIN HYDROLOGIQUE DE MAYOTTE

DIRECTIVE INONDATION

CYCLE II

Note technique sur la répartition de la population à Mayotte en 2017 (Bâti)

Note technique sur la localisation des emplois à Mayotte

Fourniture des données d'enjeux autres que la population ou les emplois



Note technique

Mayotte

Répartition de la population 2017 sur le bâti

Affaire suivie par : [Sylvain Charaud](#) (DREC/SVGC) - ① 0442248315

Le Cerema Méditerranée a préparé pour la DEAL Mayotte une couche de bâti avec une estimation de population occupante, issue des données de population de 2017 au village. Le présent rapport décrit les travaux effectués ainsi que les limites de l'exercice.

1 Données source

- Population INSEE 2017 par village (fichier fourni par la DEAL)
- BATI_INDIFFERENCIE de la BD Topo 2018 (IGN)
- SURFACE_ACTIVITE de la BD Topo 2018 (IGN)

2 Traitements effectués

1) Sélection des bâtiments en dehors des surfaces d'activités

2) Répartition de la population de chaque village sur les bâtiments, en fonction de la surface développée du bâtiment (utilisation de l'attribut "hauteur" en m, et de la surface du polygone en m²)

- Si "hauteur" < 3m : Surface du polygone
- Si "hauteur" > 3m : Surface du polygone * valeur absolue("hauteur"/3)

3 Attributs calculés

- village : nom du village
- ratio_m2 : ratio (population du village)/(surface développée des bâtiments dans le village)
- pop17_s : estimation de la population dans le bâtiment, calculée à partir du ratio précédent, et de la surface développée du bâtiment

4 Autres informations

4.1 Fichier livré :

- Format : fichier shape (Bati976_pop17.shp)
- Encodage : UTF8
- Système de coordonnées : RGM04 / UTM 38S (EPSG : 4471)

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30

Établissement public - Siret 130 018 310 00016 - TVA Intracommunautaire : FR 94 130018310 - www.cerema.fr

4.2 Pourquoi adapter la méthode nationale sur Mayotte

En utilisant les informations sur les logements des fichiers fonciers de 2018 (méthode utilisée en métropole et dans les autres DOM), certains ratios semblaient irréalistes : Dans certains villages, le ratio pouvait monter jusqu'à plus de 50 habitants par logement recensé dans les fichiers fonciers. Cela signifie que dans certains villages tous les logements ne sont donc pas encore cadastrés.

Le bâti de la BD Topo est récent, et réalisé par photo interprétation et reconnaissance terrain. Tous les bâtiments sont donc bien cartographiés.

4.3 Limites

Attention, certains bâtiments semblent concentrer trop de population avec la méthode utilisée. Il s'agit notamment de certains bâtiments à Mamoudzou (fléchés dans l'image ci-dessous).

L'erreur d'appréciation n'est pas gênante lorsqu'on calcule la population en zone inondable dans toute une commune, elle est plus importante lorsqu'on se concentre sur une zone de calcul beaucoup plus réduite.



Illustration 1: Mamoudzou : Exemple de bâtiments concentrant une population anormale

Note technique

Mayotte

Localisation des emplois

Date de rédaction : 06 décembre 2019

Affaire suivie par : [Sylvain Charaud](#) (DREC/SVGC) - ☎ 0442248315

En 2018, le Cerema Méditerranée a préparé pour le compte de la DGPR des couches de données prêtes à l'usage afin d'estimer facilement la population touchée et les nombres d'employés touchés par les différents scénarios d'inondation cartographiés pour la directive inondation. Ces couches sont départementales et communément appelées « semis de points de population » et « semis de points d'emplois ». Le contexte Mahorais nécessite des adaptations particulières.

- Pour la population, avec l'absence de fichier foncier fiable, le Cerema a préparé en août 2018 une couche de données spécifique basée sur le bâti de la BD Topo IGN, avec une estimation de population occupante issue des données de population de 2017 au village. Une note « localisation des populations » décrit la méthode employée.
- Pour les emplois, les données nationales disponibles sont basées sur une géolocalisation des fichiers SIRENE de l'INSEE. La présente note décrit les limites de cette géolocalisation sur Mayotte.

1 Rappel de la méthode de création des semis de points d'emplois

Ces fichiers sont issus de la base SIRENE récupérés sur le site data.gouv.fr (fichiers géocodés du 13 mars 2018), préparés par le Cerema Méditerranée en vue d'estimer le nombre d'emplois dans les établissements des entreprises en zone inondable.

La méthode de préparation des données du Cerema en 2018 est la suivante :

1. Exclusion des établissements mal géocodés
2. Exclusion des collectivités territoriales dont des effectifs importants peuvent être mal répartis (NB : les services déconcentrés de l'Etat ne sont pas exclus)
3. Calcul des champs suivants :
 - **taille** : Code calculé par rapport à la tranche d'effectif salarié de l'établissement
 - **emp_min_nc** : Seuil inférieur du nombre d'employés de l'établissement, non corrigé
 - **emp_max_nc** : Seuil supérieur du nombre d'employés de l'établissement, non corrigé
 - **emploi_min** : Seuil inférieur du nombre d'employés de l'établissement, ajusté après répartition du seuil inférieur de nombre d'employés mal géolocalisés dans la commune
 - **emploi_max** : Seuil supérieur du nombre d'employés de l'établissement ajusté après répartition du seuil supérieur de nombre d'employés mal géolocalisés dans la commune
4. Préparation d'un fichier shape pour chaque département (métropole, DOM), dans le système de projection légal correspondant :
 - Pour Mayotte : **RGM 04 / UTM 38 S** (EPSG : 4471)

2 Limites du géocodage des établissements SIRENE sur Mayotte

Le géocodage ou géoréférencement consiste à enrichir un tableau contenant des adresses par les coordonnées géographiques de l'adresse la plus proche, à partir d'une base de données géographique d'adresses et d'une recherche par correspondance des adresses (l'outil informatique utilisé pour cela est appelé géocodeur).

L'amélioration continue des référentiels géographiques d'adresses et des outils de géocodage automatisés, ainsi que la bonne qualité des adresses saisies par l'INSEE dans la base de données SIRENE, font que les résultats d'un géocodage automatique sont généralement exploitables en vue d'estimer les nombres d'emplois en zone inondable.

2.1 A l'échelle du département

Le contexte mahorais est assez particulier, les numéros de rue ne semblent pas encore généralisés, ce qui dégrade significativement la qualité géographique des données issues d'un géocodage à l'adresse sur Mayotte :

- le taux de « très bon » géocodage, c'est à dire au numéro (« housenumber ») est seulement de 15 %, contre 70 à 85 % environ en fonction des départements de France métropolitaine
- de même, le taux de « très mauvais » géocodage, c'est à dire à la commune, (« municipality ») y est beaucoup plus important : 21 %, contre 1 à 3 % environ en France métropolitaine.

Qualité de géocodage	Nombre d'établissements	Pourcentage
« street »	10116	56,58 %
« locality »	1128	6,31 %
« housenumber »	2688	15,03 %
« municipality »	3770	21,09 %
« interpolation »	178	1,00 %
Total	17880	100 %

Tableau 1: Qualité de géocodage du fichier SIRENE sur Mayotte

En comparaison, voici les résultats sur le département des Bouches-du-Rhône :

Qualité de géocodage	Nombre d'établissements	Pourcentage
« street »	80122	21,55 %
« locality »	10950	2,95 %
« housenumber »	272195	73,21 %
« municipality »	6549	1,76 %
« interpolation »	1688	0,45 %
« poi »	295	0,08 %
Total	371799	100,00 %

Tableau 2: Qualité de géocodage du fichier SIRENE dans les Bouches-du-Rhône

Ceci amène à écarter 27 % du nombre d'employés en moyenne sur Mayotte (ratio emploi bien géolocalisé/emploi total).

2.2 A l'échelle de la commune, de grandes disparités

Ces résultats ne sont pas homogènes sur tout le territoire :

- si les communes de **Dzaoudzi et Mamoudzou** obtiennent des résultats (**9 % d'emplois dans des établissements mal géolocalisés**) se rapprochant de la moyenne nationale,
- ce n'est pas le cas des autres communes,
 - en particulier Mtsamboro, où plus de la moitié des employés recensés dans Sirene sont dans des établissements mal géolocalisés.

Insee	Commune	Emploi minimum	Emploi maximum	Emploi min (bien géolocalisé)	Emploi max (bien géolocalisé)	Ratio correctif (emploi min)	Ratio collectif (emploi max)
97601	Acoua	321	321	210	210	1,53	1,53
97602	Bandraboua	840	840	547	547	1,54	1,54
97603	Bandrele	641	641	487	487	1,32	1,32
97604	Bouéni	576	576	340	340	1,69	1,69
97605	Chiconi	528	528	409	409	1,29	1,29
97606	Chirongui	769	769	509	509	1,51	1,51
97607	Dembeni	738	739	528	529	1,40	1,40
97608	Dzaoudzi	906	906	831	831	1,09	1,09
97609	Kani-Kéli	455	455	291	291	1,56	1,56
97610	Koungo	1416	1416	1233	1233	1,15	1,15
97611	Mamoudzou	6314	6315	5770	5771	1,09	1,09
97612	Mtsamboro	766	766	349	349	2,19	2,19
97613	M'Tsamgamou	523	523	299	299	1,75	1,75
97614	Ouangani	586	586	336	336	1,74	1,74
97615	Pamandzi	836	836	720	720	1,16	1,16
97616	Sada	712	712	560	560	1,27	1,27
97617	Tsingoni	931	931	674	674	1,38	1,38
	Total	17858	17860	14093	14095	1,27	1,27

2.3 Localisations « à la rue » et profil des zones inondables de Mayotte

Dans la méthode nationale, un géocodage est considéré comme « bon » même s'il est fait « à la rue », c'est à dire que l'établissement est localisé en un point (« centroïde ») de cette rue. Le tableau montre que c'est le cas pour plus de la moitié des établissements SIRENE recensés sur

Mayotte.

En fonction de la longueur de la rue, les erreurs de localisation peuvent donc être relativement importantes, et remettre en question les résultats de calculs de nombre d'employés en zone inondable, sur un territoire où les zones inondables sont relativement étroites.

Pour des zones inondables larges de plusieurs centaines de mètres sur des territoires denses où les rues ne sont pas très longues, l'erreur reste limitée, ce qui a justifié la prise en compte de ces établissements dans le « semis de points d'emplois » sur le territoire national.

Sur Mayotte, **l'erreur liée à la localisation sur un point de la rue et non au numéro est au mieux de quelques dizaines, plus généralement de centaines de mètres.**

Cette erreur devient alors comparable à **la largeur des zones inondables, de quelques dizaines de mètres à au maximum quelques centaines de mètres en aval.**

3 Recommandations pour l'estimation du nombre d'employés en zone inondable

En observant les taux de bon géocodage des établissements Sirene, le semis de points d'emplois produit par le Cerema pour la cartographie directive inondation pourrait être utilisé sur les communes de **Dzaoudzi et Mamoudzou, éventuellement Koungo et Pamandzi**, en respectant les précautions d'usages du rapport du Cerema « Directive inondation, cycle 2 - Fourniture de données pour le calcul de la population et des emplois » de juin 2018.

Au vu de la proportion d'adresses localisées à la rue et non au numéro, tout résultat de croisement de données doit tout de même être interprété avec une grande prudence, même sur ces communes.

Pour les autres communes, toute estimation de nombre d'employés en zone inondable basée sur ce semis de points sera très imprécise, sachant que 25 % à plus de 50 % des emplois sont localisés dans des établissements dont les coordonnées géographiques sont de mauvaise qualité.

La fiabilité des données de population au bâti produites par le Cerema en août 2018 est bien meilleure, ce qui peut amener des difficultés d'interprétation de résultats de calcul : L'estimation de nombre d'habitants en zones inondable restera relativement précise, alors que celle du nombre d'employés est toujours imprécise.

En conclusion, **les estimations de nombre d'employés en zone inondable** basées sur les semis de points d'emplois 2018 du Cerema **restent toujours soumises à caution sur le territoire Mahorais** en tant qu'indicateur d'évaluation de l'exposition du territoire aux inondations, **au contraire de l'indicateur « population en zone inondable »** dont la précision reste comparable aux résultats de France métropolitaine.

Directive inondation – cycle 2

Fourniture des données d'enjeux autre que la population ou les emplois

Décembre 2019

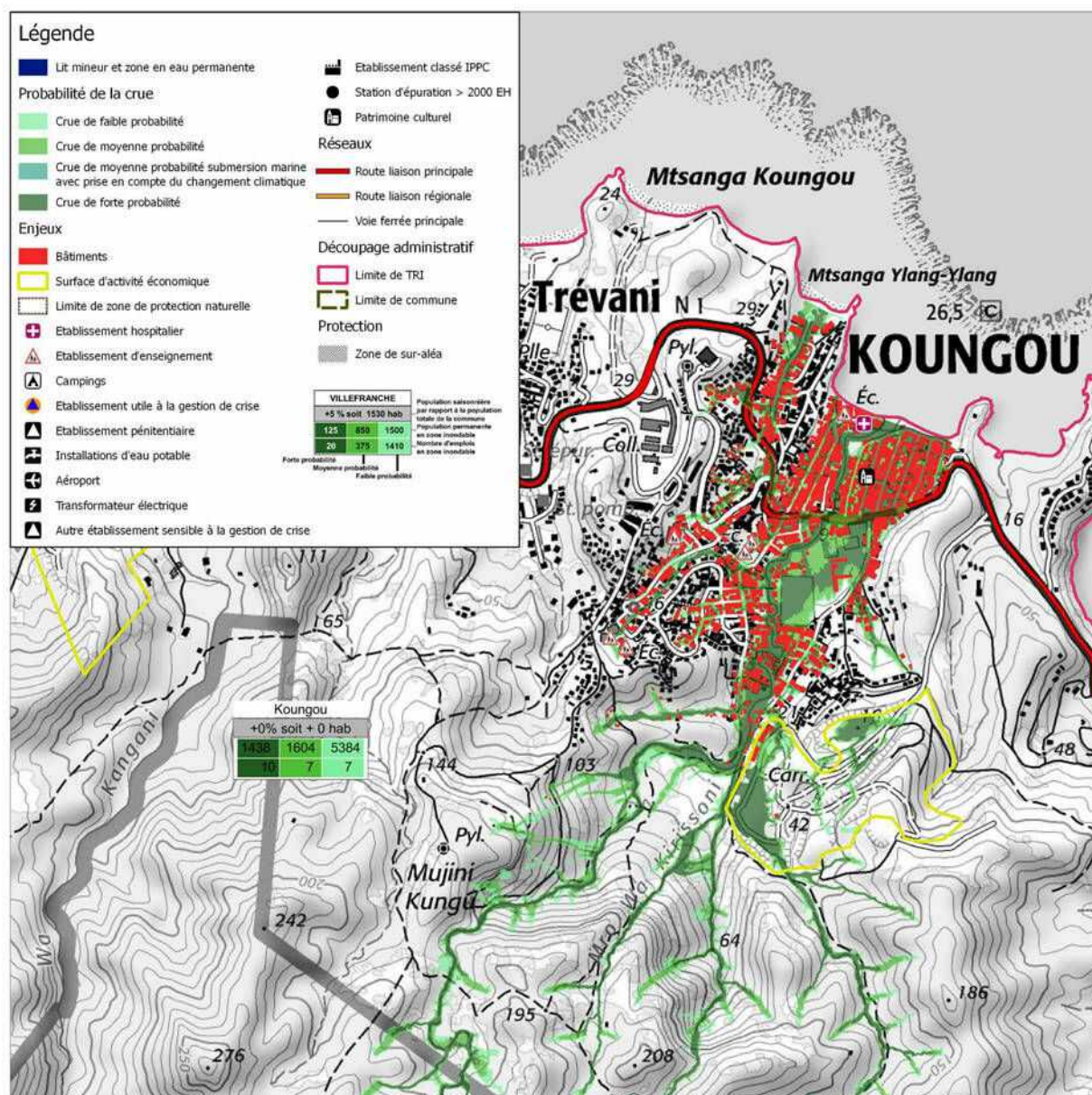


Table des matières

1. Couche Enjeux_zone_protegee_DCE.....	2
2. Couche Enjeux_station_traitement_eaux_usees.....	2
3. Couche Enjeux_IED.....	2
4. Couche Enjeux_gestion_crise.....	3
5. Couche Enjeux_activite_economique.....	3
6. Couche Enjeux_patrimoine.....	4

Ce document vise à décrire les éléments mis en œuvre afin de produire les cartographies d'enjeux dans le cadre du Territoire à Risque Important d'inondations (TRI) de Mayotte.

Les données ont ainsi été traitées au cours du mois de décembre 2019 avec les éléments les plus à jour disponibles et issus :

- De la Bd Topo V3 datant du 19 Septembre 2019 ;
- Des données de la Direction de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DEAL) de Mayotte dans leur dernière version mise à jour ;
- Des données de l'Agence régionale de santé de MAYotte dans leur dernière version mise à jour
- Des données de la base S3IC dans sa dernière version mise à jour
- De la BD ROSEAU

Ces données ont fait également l'objet d'une relecture attentive et d'une correction à la marge en cas de mauvais positionnement des éléments géographiques.

1. Couche Enjeux_zone_protegee_DCE

La couche des enjeux des zones protégées a été construite à partir des données issues de l'ARS de Mayotte

Concernant les points de captage d'eau potable, chaque captage a fait l'objet d'une expertise afin de déterminer si ces derniers étaient potentiellement impactés par une IED (installation industrielle potentiellement impactante pour l'environnement) ou une STEU (Station de Traitement des Eaux Usées) en amont de ce dernier. Il s'avère qu'aucun captage n'est concerné sur le territoire.

Concernant les zones de baignade, l'ensemble des zones a fait également l'objet d'une analyse afin de déterminer si ces dernières pouvaient potentiellement être impactées par une IED ou une STEU. Ainsi, il a été retenu 4 sites sur l'ensemble de la zone du TRI.

2. Couche Enjeux_station_traitement_eaux_usees

La couche des stations de traitement des eaux usées a été produite à partir de la couche BD ROSEAU. Elle a été reprise à la marge afin de mieux localiser certaines stations par confrontation des informations disponible sur le SCAN25 et des données disponibles dans la couche d'enjeux produite par la DEAL Mayotte dans le cadre de l'élaboration des PPRn du département.

3. Couche Enjeux_IED

La couche des enjeux IED a été produite à partir d'une extraction d'information issue de la base S3IC. Elles ont été reprises afin d'améliorer la localisation de IED en utilisant l'orthophotographie et le SCAN25.

4. Couche Enjeux_gestion_crise

Les bâtiments liés à la gestion de crise ont été extraits essentiellement de trois bases de données :

- La BD Topo V3
- La couche des enjeux produites par le DEAL de Mayotte dans le cadre de l'élaboration des PPRn sur le département (FUSION_PPR_V2)
- La couche des crèches produites par Conseil Départemental de Mayotte

Sur le plan des enjeux de transport, la couche BD Topo V3 TRONCON_DE_ROUTE a été utilisée afin de cartographier le réseau routier et en conservant uniquement les niveaux d'importance « 1, 2, 3 ». La BD Topo ayant cartographié les liaisons maritimes entre Petite Terre et Grande Terre, ces dernières ont été laissées afin de prendre en compte les liaisons entre les deux îles. En complément du réseau routier, l'aéroport a été extrait de la couche AERODROME. Cette couche étant surfacique et le résultat attendu étant sous forme ponctuelle, un point a été placé au niveau du terminal de l'aéroport en remplacement de l'emprise globale cartographiée.

Il n'existe pas de réseau ferré sur le département, aucun élément sur ce thème n'a été reporté dans les enjeux.

Les réservoirs d'eau et les points d'eau ont été extraits respectivement de la couche RESERVOIR avec la nature « Réservoir d'eau ou château d'eau au sol » et la couche BD Topo V3 TOPONYME_SERVICES_ET_ACTIVITES avec la nature « Usine de production d'eau potable ». Ces données ont ensuite été complétées manuellement en rajoutant les éléments présents et non redondant issus de la couche des enjeux DEAL FUSION_PPR_V2.

Les enjeux liés aux transformateurs ont été extraits de la BD Topo V3 POSTE_DE_TRANSFORMATION. Cette couche étant surfacique, elle a été rendue ponctuelle en retenant le centroïde intérieur du polygone. Ces données ont ensuite été complétées manuellement en rajoutant les éléments présents et non redondant issus de la couche des enjeux DEAL FUSION_PPR_V2.

Les enjeux associés aux établissements pénitentiaires, Enseignement primaire, Hôpital, Caserne de pompier, Gendarmerie, Mairie, Poste ou Hôtel de police, Préfecture ont été extraits de la BD Topo V3 TOPONYME_SERVICES_ET_ACTIVITES. Ces données ont ensuite été complétées manuellement en rajoutant les éléments présents et non redondant issus de la couche des enjeux DEAL FUSION_PPR_V2.

Les enjeux de Maisons de retraites et de Crèches ont été produits à partir de la couche DEAL FUSION_PPRN_V2 et complétés avec la couche Crèches produites par le Conseil Départemental de Mayotte.

La BD Topo ne mentionnant pas de données concernant les campings, aucunes informations n'a été intégrée à ce sujet dans les enjeux

5. Couche Enjeux_activite_economique

La couche d'enjeux des activités économique a été renseignée à partir d'enveloppes disponibles dans la BD Topo V3.

Les activités industrielles et commerciales ont été extraites de la couche BD Topo V3 ZONE_D_ACTIVITE_OU_D_INTERET et en ne retenant que la catégorie « Industriel et commercial ».

Les aéroports ont été extraits également de la BD Topo V3 PISTE_D_AERODROME.

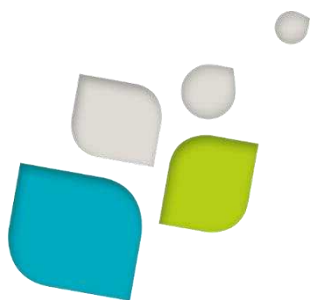
Les ports ont enfin été ajoutés à partir de la couche BD Topo V3 EQUIPEMENT_DE_TRANSPORT ayant la nature Port.

La BD Topo ne mentionnant pas de données concernant les campings, aucune information n'a été intégrées dans les enjeux

6. Couche Enjeux_patrimoine

La couche du patrimoine a été produite en extrayant les données de la BD Topo V3 :

- ZONE_D_ACTIVITE_OU_D_INTERET en retenant la catégorie « Religieux ». Cette couche étant surfacique, elle a été rendue ponctuelle en retenant le centroïde intérieur du polygone
- PARC_OU_RESERVE en retenant uniquement la Réserve Naturelle de l'Îlot Mbouzi. Cette couche étant surfacique, elle a été rendue ponctuelle en retenant le centroïde intérieur du polygone
- CONSTRUCTION_PONCTUELLE en retenant la nature « Minaret » afin d'intégrer les éléments religieux dans la couche de patrimoine
- CIMETIERE en intégrant l'intégralité des données présentes dans cette table



www.brl.fr/brli

*Société anonyme au capital de 3 183 349 euros
SIRET : 391 484 862 000 19 - RCS : NÎMES B 391 484 862
N° de TVA intracom : FR 35 391 484 862 000 19*

BRL
Ingénierie

1105, avenue Pierre Mendès-France
BP 94001 - 30 001 Nîmes Cedex 5
FRANCE
Tél. : +33 (0) 4 66 84 81 11
Fax : +33 (0) 4 66 87 51 09
e-mail : brli@brl.fr