

Réalisation d'une étude pour la conception et l'opérationnalisation d'un système de suivi et de modélisation environnemental de la zone côtière de Saint-Louis

L5-2 Rapport Intermédiaire – Tests préliminaires des variantes

Version B



SEN_WAMH044RIV_MODELISATION

Septembre 2020

Informations qualité

Contrôle qualité

Version	Date	Rédigé par	Visé par :
B	21/09/2020	C. LESCOULIER, N. GUILLOT, A. DE BAKKER, P.K. TONNON, B. ROBKE, J. GRENNENBOOM, F. ROELVINK, C. LENEVEU, J. REYNS, J.A. ROELVINK, M. VAN DER LUGT, F. SCERRI, R. CARREL	C. LESCOULIER, E. MOSSELMAN

Destinataires

Envoyé à :		
Nom	Organisme	Envoyé le :
MARIE NDAW	ADM	21/09/2020
SOULEYMANE FALL	ADM	21/09/2020

Copie à :		
Nom	Organisme	Envoyé le :
GEORGES CLAVERIE	SGI CONSULTING	21/09/2020

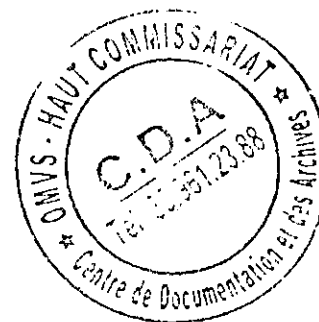


Table des matières

0.	Résumés et conclusions.....	26
0.1	Résumés des scénarios.....	26
0.1.1	Résumé du scénario 1 – Pas d'intervention sur la brèche.....	26
0.1.2	Résumé du scénario 2 – Embouchure éloignée de Saint-Louis.....	33
0.1.3	Résumé du scénario 2-1 – Mise en place d'une brèche contrôlée en aval de Saint-Louis.....	40
0.1.4	Résumé du scénario 2-2 – Actions de diminution du risque inondation sur Saint-Louis.....	43
0.1.5	Résumé du scénario 2-3 – Mise en œuvre d'une liaison fluviomaritime pérenne au droit de l'embouchure pré-2003.....	46
0.1.6	Résumé du scénario 2-4 – Un wharf de pêche.....	51
0.1.7	Résumé du scénario 3 – Embouchure contrôlée aux abords de Saint Louis.....	54
0.1.8	Résumé du scénario 3-1 – Actions de diminution du risque inondation sur Saint Louis.....	59
0.1.9	Résumé du scénario 4 – Dérivation partielle du fleuve Sénégal au nord de Saint Louis.....	61
0.2	Conclusion.....	64
1.	Introduction	69
1.1	Contexte.....	69
1.2	Objectifs du projet.....	70
1.3	Objectifs du présent rapport	71
1.4	Organisation du rapport	71
2.	Modélisation de l'hydraulique fluviale.....	73
2.1	Les données de base du modèle.....	74
2.1.1	Données topographiques et bathymétriques	74
2.1.1.1	Le Lidar du delta du fleuve Sénégal	74
2.1.1.2	Données bathymétriques.....	75
2.1.1.3	Vérification de la cote IGN des échelles limnimétriques de Saint-Louis et de Diama.....	77
2.1.1.4	Les digues du fleuve Sénégal	77
2.1.2	Le cordon littoral.....	78
2.1.3	Les ouvrages de protection contre les crues du fleuve	81
2.1.3.1	Inventaire des protections existantes sur Saint-Louis	81
2.1.3.2	Etat des murs de quais et des digues de Saint-Louis	85
2.1.4	Inondations par remontée de nappe et ruissellement pluvial.....	85

2.2	Construction et calage du modèle	86
2.2.1	Présentation du logiciel de calcul.....	86
2.2.2	Construction du modèle.....	86
2.2.3	Calage du modèle à l'aval de Diama	89
2.2.3.1	Les crues de calage.....	89
2.2.3.2	Conditions aux limites du modèle	89
2.2.3.3	Les configurations de modèle utilisées	89
2.2.3.4	Les résultats retenus.....	91
2.2.4	Calage du modèle entre Diama et Richard Toll	91
2.2.5	La crue de 1999	93
2.3	Le risque Inondation en situation actuelle (2019)	96
2.3.1	Inondabilité de Saint-Louis.....	96
2.3.2	Inondabilité des communes du delta.....	100
3.	Modélisation de la dynamique côtière.....	104
3.1	Evolution morphodynamique à court terme et hydrodynamique de l'embouchure.....	104
3.2	Evolution morphodynamique à long terme	105
3.3	Intrusion saline.....	105
3.4	Impact des tempêtes	106
4.	Les configurations océano-météorologiques étudiées	107
4.1	Projections climatiques	107
4.1.1	Vagues	107
4.1.2	Niveau de la mer	107
4.1.3	Scénarios étudiés	108
4.2	Les débits caractéristiques de crue du fleuve Sénégal.....	108
4.3	Marée.....	109
4.4	Caractéristiques des tempêtes.....	110
4.5	Débit caractéristique pour étudier l'intrusion d'eau saline	112
4.6	Evènements concomitants	113
5.	Vulnérabilité et enjeux.....	116
5.1	Les enjeux mis en évidence dans le rapport L5-1.....	116
5.2	Vulnérabilité de la ville de Saint-Louis aux inondations	117
5.2.1	Définition des seuils d'inondation sur les quartiers de l'Ile, Sor, Khor et Langue de Barbarie.....	118
5.2.1.1	Les quartiers de l'Ile	118
5.2.1.2	Les quartiers de Sor	118
5.2.1.3	Les quartiers de Khor.....	120

5.2.1.4	Les quartiers de la Langue de Barbarie	120
5.2.2	Définition des seuils d'inondation sur les quartiers de Bango, Ngallele et Université.....	123
5.2.3	Exposition de la population de Saint-Louis	125
5.2.4	Conclusion	125
5.3	Vulnérabilité des communes du delta aux inondations	126
5.4	Vulnérabilité de la ville de Saint-Louis et des villages du Gandiolais au risque de formation d'une nouvelle brèche.....	131
5.4.1	Introduction	131
5.4.2	Zone au sud de Saint-Louis	134
5.4.2.1	Paramétrage	134
5.4.2.2	Hydrodynamique.....	135
5.4.2.3	Résultats	139
5.4.2.4	Conclusion sur les risques du côté mer	146
5.4.3	Zone au nord de Saint-Louis	146
5.4.3.1	Paramétrage	146
5.4.3.2	Hydrodynamique.....	148
5.4.3.3	Résultats	152
5.4.3.4	Conclusion sur les risques du côté mer	155
5.4.4	Au sud de l'embouchure actuelle du fleuve Sénégal.....	156
5.4.4.1	Paramétrage	156
5.4.4.2	Résultats	157
5.4.4.3	Conclusions risques du côté mer	159
5.4.5	Conclusions générales sur les risques de formation des nouvelles brèches	159
6.	Impacts des projets en cours	160
6.1	Projet Tortue.....	160
6.2	Protection contre l'érosion et l'inondation côtière à Saint-Louis	166
6.3	Port de N'Diogo	169
7.	Scénario 1 : Pas d'intervention sur la brèche.....	171
7.1	Le scénario de base	171
7.1.1	Evolution morphodynamique à long terme	171
7.1.2	Hydrodynamique et évolution morphodynamique à court-terme	178
7.1.2.1	Evolution morphologique	178
7.1.2.2	Hydrodynamique.....	180
7.1.2.3	Conclusion	181
7.1.3	Risques d'inondation induits par les crues du fleuve	182
7.1.3.1	Impact sur Saint-Louis	182
7.1.3.2	Evolution du risque inondation fluviale à Saint-Louis en fonction de la position de l'embouchure du fleuve.....	189

7.1.3.3	Impact sur les communes du delta.....	190
7.1.4	Risques d'inondation induits par les tempêtes.....	193
7.1.4.1	Conditions actuelles.....	194
7.1.4.2	À l'horizon 2050	197
7.1.4.3	À l'horizon 2100	198
7.1.4.4	Évènements concomitants	201
7.1.4.5	Conclusion	202
7.1.5	Intrusion saline	203
7.1.5.1	Résultats	204
7.1.5.2	Discussion et conclusions	209
7.2	Mesures complémentaires envisagées.....	210
7.2.1	Le renforcement et l'exhaussement du cordon littoral ?	210
7.2.2	Autres mesures.....	211
7.3	Coût du scénario	214
7.4	Evaluation du scénario	214
7.4.1.1	Du point de vue de l'évolution hydrodynamique et morphodynamique.....	214
7.4.1.2	Du point de vue des risques d'inondation induits par les crues du fleuve.....	215
7.4.1.3	Du point de vue des risques d'inondation et de formation de nouvelles brèches induits par les tempêtes ...	215
7.4.1.4	Du point de vue de la salinité	216
8.	Scénario 2 : Embouchure éloignée de Saint-Louis	217
8.1	Le scénario de base	217
8.1.1	Evolution morphodynamique	218
8.1.2	Hydrodynamique.....	219
8.1.3	Risques d'inondation induits par les crues du fleuve	219
8.1.3.1	Impact sur Saint-Louis	219
8.1.3.2	Impact sur les communes du delta.....	228
8.1.4	Risques d'inondation induits par les tempêtes	231
8.1.5	Intrusion saline	231
8.2	Scénario 2-1 : Mise en place d'une brèche contrôlée en aval de Saint-Louis	232
8.2.1	Objectifs et caractéristiques de la brèche contrôlée	232
8.2.2	Impact sur la dynamique côtière.....	234
8.2.3	Impact sur le risque d'inondation lié aux crues du fleuve	237
8.2.3.1	Impact sur Saint-Louis	237
8.2.3.2	Impact sur les communes du delta.....	247
8.3	Scénario 2-2 : Actions de diminution du risque inondation sur Saint-Louis	248
8.3.1	Description des travaux envisagés.....	248

8.3.2	Impact sur la dynamique côtière	250
8.3.3	Impact sur le risque d'inondation lié aux crues du fleuve	250
8.3.3.1	Impact sur Saint-Louis	250
8.3.3.2	Impact sur les communes du delta	251
8.4	Scénario 2-3 : Mise en œuvre d'une liaison fluvio-maritime pérenne au droit de l'embouchure pré-2003	252
8.4.1	Impact sur la dynamique côtière	252
8.4.2	Impact sur le risque d'inondation lié aux crues du fleuve	253
8.4.2.1	Impact sur Saint-Louis	253
8.4.2.2	Impact sur les communes du delta	259
8.5	Scénario 2-4 : Un wharf de pêche	260
8.5.1	Impact sur la dynamique côtière	261
8.5.2	Impact sur le risque d'inondation lié aux crues du fleuve	261
8.6	Estimation du coût du scénario 2 et de ses variantes	262
8.6.1	Estimation du coût du scénario 2 de base	262
8.6.2	Estimation du coût du scénario 2-1	262
8.6.3	Estimation du coût du scénario 2-2	263
8.6.4	Estimation du coût du scénario 2-3	263
8.6.5	Estimation du coût du scénario 2-4	263
8.7	Evaluation du scénario 2 et de ses variantes	264
8.7.1.1	Du point de vue de l'évolution hydrodynamique et morphodynamique	264
8.7.1.2	Du point de vue des risques d'inondation induits par les crues du fleuve	265
8.7.1.3	Du point de vue des risques d'inondation et de formation de nouvelles brèches induits par les tempêtes ...	265
8.7.1.4	Du point de vue de la salinité	266
9.	Scénario 3 : Embouchure contrôlée aux abords de Saint-Louis	267
9.1	Le scénario de base	267
9.1.1	Evolution morphodynamique à long terme	268
9.1.2	Hydrodynamique et évolution morphodynamique à court terme	270
9.1.2.1	Configuration du port comme prévu par l'OMVS	270
9.1.2.2	Variante pour la configuration des brise-lames	273
9.1.3	Risques d'inondation induits par les crues du fleuve	286
9.1.3.1	Impact sur Saint-Louis	286
9.1.3.2	Impact sur les communes du delta	293
9.1.4	Risques d'inondation induits par les tempêtes	295
9.1.5	Intrusion saline	295
9.1.5.1	Résultats	297
9.1.5.2	Discussion et conclusions	300

9.2	Scénario 3-1 : Actions de diminution du risque inondation sur Saint-Louis	301
9.3	Estimation du coût du scénario 3 et de sa variante.....	302
9.3.1	Estimation du coût du scénario 3	302
9.3.2	Estimation du coût du scénario 3-1	302
9.4	Evaluation du scénario et de sa variante.....	302
9.4.1.1	Du point de vue de l'évolution hydrodynamique et morphodynamique.....	302
9.4.1.2	Du point de vue des risques d'inondation induits par les crues du fleuve.....	303
9.4.1.3	Du point de vue des risques d'inondation et de formation de nouvelles brèches induits par les tempêtes ...	304
9.4.1.4	Du point de vue de la salinité	304
10.	Scénario 4 : Dérivation partielle du fleuve Sénégal au nord de Saint-Louis	305
10.1	Le scénario de base	305
10.1.1	Impact sur la dynamique côtière	308
10.1.2	Impact sur le risque d'inondation lié aux crues du fleuve	308
10.1.2.1	Impact sur Saint-Louis	308
10.1.2.2	Impact sur les communes du delta.....	316
10.2	Scénario 4-1 : Tests complémentaires sur le Site 3.....	317
10.2.1	Impact sur la dynamique côtière.....	318
10.2.2	Impact sur le risque d'inondation	318
10.3	Evaluation du scénario	319
10.3.1.1	Du point de vue de l'évolution hydrodynamique et morphodynamique.....	319
10.3.1.2	Du point de vue des risques d'inondation induits par les crues du fleuve.....	320
11.	Impact des scénarios d'aménagement sur le barrage de Diama	321
12.	Scénarios complémentaires : Espace pour le fleuve.....	324
12.1	Résultats du scénario R-1	325
12.2	Résultats du scénario R-2	327
12.2.1	Augmentation de la capacité de stockage dans la retenue de Diama	327
12.2.2	Augmentation de la capacité de stockage dans la retenue du lac de Guiers.....	328
12.2.3	Conclusion	329
13.	Références bibliographiques	330

Liste des annexes

Annexe 1 : Vue d'ensemble des simulations numériques	332
Annexe 2 : Cartes des inondations induites par les tempêtes	340
Annexe 3 : Cartes d'érosion	350
Annexe 4 : Coupes types de la brèche contrôlée	357

Liste des figures

Figure 1-1 : Evolution de la largeur de brèche	69
Figure 1-2 : Evolution de la largeur de brèche (suite)	70
Figure 2-1 : Emprise du Lidar sur le delta du fleuve Sénégal.....	75
Figure 2-2 : Levés bathymétriques entre le barrage de Diama et le débouché en mer	76
Figure 2-3 : Levés bathymétriques entre Richard Toll et le barrage de Diama	76
Figure 2-4 : Echelles de Saint-Louis et de Diama amont. Repère RRS2 sur le bajoyer de l'écluse de Diama.....	77
Figure 2-5 : Localisation des digues du fleuve Sénégal de Diama à Rosso	78
Figure 2-6 : Vue aérienne des plantations de Filaos sur la Langue de Barbarie.....	79
Figure 2-7 : Hauteur et largeur du cordon littoral sur la zone d'étude	80
Figure 2-8 : Pièges à sable	81
Figure 2-9 : Ouvrages de protection sur l'île de Saint-Louis	82
Figure 2-10 : Localisation des travaux de vérification de la cote altimétrique des murs de quais de Saint-Louis.....	82
Figure 2-11 : Localisation et altitude IGN des principaux ouvrages de protection de Saint-Louis	84
Figure 2-12 : Brèches sur les parapets sud et ouest de l'île	85
Figure 2-13 : Maillage du modèle hydraulique	88
Figure 2-14 : Localisation des profils en travers levés en Juin 2000.....	90
Figure 2-15 : Modélisation de la crue de 1999 entre Diama et Richard Toll	92
Figure 2-16 : Hauteurs d'eau maximales – Crue de 1999 – Delta du fleuve	94
Figure 2-17 : Zoom sur Saint-Louis – Cartographie de la zone inondable modélisée et des cartographies issues des photos satellites.....	95
Figure 2-18 : Situation actuelle (2019) : Localisation des points de contrôle.....	96
Figure 2-19 : Cotes d'eau maximales – Q100 – Situation actuelle (2019) – Delta du fleuve.....	98

Figure 2-20 : Cotes d'eau maximales – Q100 – Situation actuelle (2019) – Zoom sur Saint-Louis	99
Figure 2-21 : Communes du delta du fleuve Sénégal.....	102
Figure 2-22 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Situation actuelle (2019) – Q100	103
Figure 2-23 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiole – Situation actuelle (2019) – Q100	103
Figure 4-1 : Courbe de marée pour un cycle de mortes-eaux/vives-eaux du 17/01/2019 au 13/02/2019 résultant des 32 constituants de la marée définis le long de la limite ouverte au large du modèle. L'analyse est détaillée au sein du rapport L4 (paragraphe 4.4.1 de Egis Eau et Deltares, 2019d) Les constituants de la marée entraînent une amplitude moyenne de la marée au large d'environ 0,4 m.....	110
Figure 4-2 : Conditions limites hydrodynamiques pour le modèle XBeach basées sur le PoT de la hauteur significative des vagues, de la période de pic et de la surcote.	112
Figure 4-3 : Comparaison entre hauteurs moyennes, minimales et maximales (en bas) des débits du fleuve et (en haut) du niveau de la mer (TWL : marée astronomique + surcote + setup) tout au long de l'année.	113
Figure 4-4 : Distributions conjointes basées sur les données ERA5 1979-2018 distributions conjointes pour toutes les données ERA5 1979-2018 estimées par la fonction de densité de probabilité conjointe empirique (plus foncé est plus fréquent). Le panneau supérieur et le panneau à droite représentent la distribution marginale de niveau d'eau (TWL : marée astronomique + surcote + setup) et le débit du fleuve (Q en m ³ /s).....	114
Figure 5-1 : Quartiers de Saint-Louis étudiés pour la définition des seuils d'inondation.....	117
Figure 5-2 : Hauteurs de submersion sur l'île, Sor, Khor et la Langue de Barbarie pour un niveau d'eau théorique à l'échelle de Saint-Louis - Test pour des niveaux théoriques de 1.1 à 1.4 mIGN	121
Figure 5-3 : Hauteurs de submersion sur l'île, Sor, Khor et la Langue de Barbarie pour un niveau d'eau théorique à l'échelle de Saint-Louis - Test pour des niveaux théoriques de 1.5 à 1.8 mIGN	122
Figure 5-4 : Hauteurs de submersion sur l'île, Sor, Khor et la Langue de Barbarie pour un niveau d'eau théorique à l'échelle de Saint-Louis - Test pour des niveaux théoriques de 1.9 à 2 mIGN	123
Figure 5-5 : Hauteurs de submersion sur Bango, Ngallele et l'Université pour un niveau d'eau théorique à l'échelle de Saint-Louis - Test pour des niveaux théoriques de 1 à 2.1 mIGN	124
Figure 5-6 : Exposition de la population de Saint-Louis aux inondations	125
Figure 5-7 : Exposition de la population du delta (hors Saint-Louis) aux inondations	127
Figure 5-8 : Exposition de la population des villages côtiers du Gandiolais aux inondations pour différentes cotes d'inondation à l'échelle de Saint-Louis.....	128
Figure 5-9 : Hauteurs de submersion sur les villages côtiers du Gandiolais pour un niveau d'eau théorique à l'échelle de Saint-Louis - Test pour des niveaux théoriques de 1 à 2 mIGN	129
Figure 5-10 : Hauteurs de submersion sur les villages côtiers du Gandiolais pour un niveau d'eau théorique au droit des villages – Test pour des niveaux théoriques de 1 à 2 mIGN.....	130
Figure 5-11 : Localisation des points bas sur le cordon littoral.....	131

Figure 5-12 : Aperçu des zones vulnérables étudiées	133
Figure 5-13 : Étendue du domaine de calcul du modèle local. Un quadrillage est représenté sur la figure afin de se rendre compte de la résolution est (une seule ligne tracée pour 10 lignes de grille de calcul).	134
Figure 5-14 : Résultats instantanés du comportement hydrodynamique du modèle XBeach au sud de Saint-Louis après 15 heures de simulation. Les résultats sont présentés pour une tempête avec une période de retour de 10 ans, dans le scénario actuel. La bathymétrie initiale (A), les vagues courtes (périodes typiques entre 2 et 20 s) (B), le champ d'écoulement et l'élévation du niveau d'eau (C), et les ondes infragravitaires (périodes typiques entre 20 et 200 s) (D) juste avant le pic de la tempête.	137
Figure 5-15 : Résultats instantanés du comportement hydrodynamique du modèle XBeach au sud de Saint-Louis après 15 heures de simulation. Les résultats sont présentés pour une tempête avec une période de retour de 100 ans, dans le scénario actuel. La bathymétrie initiale (A), les vagues courtes (périodes typiques entre 2 et 20 s) (B), le champ d'écoulement et l'élévation du niveau d'eau (C), et les ondes infragravitaires (périodes typiques entre 20 et 200 s) (D) juste avant le pic de la tempête.	139
Figure 5-16 : Cartes de la profondeur maximale d'inondation pour le scénario actuel, pour toutes les zones initialement au-dessus de la moyenne de marée haute. Les tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentées pour le modèle XBeach de la pointe sud de Saint-Louis.	140
Figure 5-17 : Cartes de la profondeur maximale d'inondation à l'horizon de 2050, pour toutes les zones initialement supérieures à la marée haute. Les tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentées pour le modèle XBeach de la pointe sud de Saint-Louis. .	141
Figure 5-18 : Cartes de la profondeur maximale d'inondation à l'horizon de 2100, pour toutes les zones initialement supérieure à la marée haute. Les tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentées pour le modèle XBeach de la pointe sud de Saint-Louis.	141
Figure 5-19 : En haut : topographie initiale et démarcation de la ligne de crête de la flèche sableuse du modèle XBeach au sud de Saint-Louis. En bas : hauteur de la crête des dunes post-tempête modélisée pour 3 périodes de retour de tempête, pour les conditions actuelles.	143
Figure 5-20 : En haut : topographie initiale et démarcation de la ligne de crête de la flèche sableuse du modèle XBeach au sud de Saint-Louis. En bas : hauteur de la crête des dunes post-tempête modélisée pour 3 périodes de retour de tempête, à l'horizon 2050.	143
Figure 5-21 : En haut : topographie initiale et démarcation de la ligne de crête de la flèche sableuse du modèle XBeach au sud de Saint-Louis. En bas : hauteur de la crête des dunes post-tempête modélisée pour 3 périodes de retour de tempête, à l'horizon 2100.	144
Figure 5-22 : En haut : topographie initiale du modèle XBeach au sud de Saint-Louis. Milieu : topographie post-tempête. En bas : zones d'érosion (rouge) - sédimentation (bleu), obtenues en soustrayant la topographie post-tempête de la topographie pré-tempête. Dans la colonne A, les résultats sont affichés à l'horizon 2050 avec une tempête de période de retour de 100 ans, dans la colonne B à l'horizon 2100 avec une tempête une fois par an.	145
Figure 5-23 : En haut : topographie initiale du modèle XBeach au sud de Saint-Louis. Milieu : topographie post-tempête. En bas : zones d'érosion (rouge) - sédimentation (bleu), obtenues en soustrayant topographie post-tempête de la topographie pré-tempête. Dans la colonne A, les résultats à l'horizon 2050 avec une tempête de période de retour de 10 ans, dans la colonne B à l'horizon 2100 avec une tempête de période de retour de 100 ans.	145

Figure 5-24 : Dépôts typiquement créés par des submersions de vagues (encadré en rouge) observées sur Google Earth, pour la section étroite de la flèche sableuse au nord de Saint-Louis, entre Y = 1780,8 km N et 1781,2 km N.	147
Figure 5-25 : Étendue du domaine de calcul XBeach de la zone au nord de Saint-Louis, avec une impression de la résolution (chaque ligne de grille sur 10 est tracée).	147
Figure 5-26 : Résultats instantanés du comportement hydrodynamique du modèle XBeach au nord de Saint-Louis après 15 heures de simulation. Les résultats sont présentés pour une tempête avec une période de retour de 10 ans, dans le scénario actuel. La bathymétrie initiale (A), les vagues courtes (périodes typiques entre 2 et 20 s) (B), le champ d'écoulement et l'élévation du niveau d'eau (C), et les ondes infragravitaires (périodes typiques entre 20 et 200 s) (D) juste avant le pic de la tempête.	150
Figure 5-27 : Résultats instantanés du comportement hydrodynamique du modèle XBeach au nord de Saint-Louis après 15 heures de simulation. Les résultats sont présentés pour une tempête avec une période de retour de 100 ans, dans le scénario actuel. La bathymétrie initiale (A), les vagues courtes (périodes typiques entre 2 et 20 s) (B), le champ d'écoulement et l'élévation du niveau d'eau (C), et les ondes infragravitaires (périodes typiques entre 20 et 200 s) (D) juste avant le pic de la tempête.	152
Figure 5-28 : À gauche : Bathymétrie initiale du modèle XBeach au nord de Saint-Louis, indiquant la position du transect. À droite, la bathymétrie et le niveau d'eau maximal sont indiqués pour trois moments pendant la tempête (après 15, 20 et 25 heures). Les résultats sont affichés pour les conditions actuelles avec une tempête de période de retour de 1 ans (en haut), 10 ans (au milieu) et 100 ans (en bas).....	153
Figure 5-29 : Cartes de la profondeur maximale d'inondation pour le scénario actuel, pour toutes les zones initialement supérieures à la marée haute. Les tempêtes avec une période de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentées pour le modèle XBeach au nord de Saint-Louis.....	154
Figure 5-30 : En haut : Bathymétrie initiale et démarcation de la ligne de crête de la flèche sableuse du modèle XBeach au nord de Saint-Louis. En bas : hauteur de la crête des dunes post-tempête modélisée pour les trois périodes de retour de tempête, pour le scénario actuel.....	154
Figure 5-31 : En haut : Bathymétrie initiale du modèle XBeach au nord de Saint-Louis. Milieu : Bathymétrie post-tempête. En bas : zones d'érosion (rouge) - sédimentation (bleu), obtenues en soustrayant la bathymétrie post-tempête de celle pré-tempête. Dans la colonne A, les résultats sont affichés pour les conditions actuelles avec une tempête de période de retour de 1 ans, la colonne B pour les conditions actuelles avec une tempête une fois par 10 ans et la colonne C pour les conditions actuelles avec une tempête une fois par 100 ans.	155
Figure 5-32 : Image satellitaire de Google Earth, datant de 18 mars 2020. Section vulnérable juste au sud de l'embouchure du fleuve Sénégal. Pour positionnement se référer à Figure 5-12.	156
Figure 5-33 : Étendue du domaine de calcul. Pour une impression de la résolution, un quadrillage est proposé avec une seule ligne tracée pour 10 lignes de grille de calcul.	157
Figure 5-34: En haut : topographie initiale et démarcation de la ligne de crête de la flèche sableuse au sud de l'embouchure. En bas : hauteur de la crête post-tempête modélisée pour 3 périodes de retour de tempête, pour les conditions actuelles.	158
Figure 5-35: Topographie avant et après la tempête pour la section de la flèche sableuse sud de l'embouchure, illustrant les résultats pour la tempête avec un période de retour de 100 ans.	158
Figure 6-1 : Positionnement des FLNG (Floating Liquefied Natural Gas) et la brise-lame d'accostage sur la frontière entre le Sénégal et la Mauritanie. Source : Kosmos Energy	160

Figure 6-2 : Effet du projet Tortue sur la hauteur moyenne des vagues (sans réfraction) ; panneau de gauche et la direction moyenne des vagues.....	161
Figure 6-3 : Effet du brise-lame envisagé dans le projet Tortue sur le transport moyenné sur différentes périodes.	162
Figure 6-4 : Effet du brise-lame envisagé dans le projet Tortue sur l'accrétion et l'érosion côtière pour les prochaines décennies.....	162
Figure 6-5 : Effet du brise-lame sur l'accrétion et l'érosion côtière prédit par ShorelineS (sans prise en compte de la réfraction), après 20 et 40 ans.	163
Figure 6-6 : Effet du projet Tortue sur la hauteur moyenne des vagues (à gauche) et la direction moyenne (à droite) en prenant en compte réfraction.	164
Figure 6-7 : Différence entre la méthode appliquée par ShorelineS – sans réfraction (lignes bleues) et méthode avec réfraction et shoaling (lignes rouges).	164
Figure 6-8 : Résultats de l'analyse du projet Tortue de l'Étude d'impact environnemental et social du projet de production de gaz Grand Tortue / Ahmeyin – EIES page 828 – Annexe I-3 paragraphe 3.2.5. Prévision de l'érosion et de la sédimentation 10 ans après la construction. La ligne rouge représente l'emplacement du brise-lames à 4 km de la côte, la ligne verte à 7 km de la côte, la ligne rose à 10 km de la côte – ce qui est retenu comme configuration finale, et la ligne grise représente le cas du brise-lame avec extension à 4 km de la côte. La ligne noire des abscisses représente le cas sans brise-lames.....	165
Figure 6-9 : Effet d'une digue à une distance permettant le passage de 70% du transport littoral	168
Figure 6-10 : Effet d'une digue à une distance permettant le passage de 50% du transport littoral	168
Figure 6-11 : Image Google Earth situant le développement portuaire de N'Diogo. Les lignes colorées indiquent l'évolution du trait de côte et sont datées : 10-2017 (jaune), 04-2018 (orange), 11-2018 (rouge) et 09-2019 (violet).	169
Figure 6-12 : Un exemple du transport sédimentaire le long de la côte dans la zone d'intérêt, (à gauche) sans aménagement et (à droite) avec un port avec des brise-lames.	170
Figure 7-1 : Présentation du scénario 1	171
Figure 7-2 : Évolution sur quarante ans du trait de côte entre Saint-Louis et Potou.	173
Figure 7-3 : De gauche à droite : trait de côte en 2018 ; trait de côte après 40 ans ; migration des extrémités des flèches nord (noir) et sud (bleu) ; évolution de la largeur de la brèche.....	173
Figure 7-4 : Positions initiales et prévues de la flèche sableuse au nord pour 2018, 2028, 2038 et 2058 pour le scénario 1.....	175
Figure 7-5 : Positions initiales et prévues de l'embouchure pour la zone Gandiolais pour 2018, 2028, 2038 et 2058 pour le scénario 1.	175
Figure 7-6 : Positions initiales et prévues de la côte de la flèche sableuse au sud et de la zone lagunaire pour 2018, 2028, 2038 et 2058 pour le scénario 1.	176
Figure 7-7: Effet d'unhaussement du niveau de la mer de 0.33m après 40 ans ; barres rouges montrent l'érosion additionnelle, vertes l'accrétion additionnelle relative à la situation sans changement de climat. Hauteur des barres exagérée par un facteur de 5, voir l'échelle.	177
Figure 7-8 : Bathymétrie initiale (à gauche), bathymétrie prévue après 5 ans (au milieu) et prédiction sédimentation-érosion après 5 ans (à droite) pour le scénario 1.....	178

Figure 7-9 : la bathymétrie prévue pour 2050, directement après la saison sèche (à gauche) et la bathymétrie prévue pour 2050 directement après la saison de pluie (milieu) et les différences (à droite).	179
Figure 7-10 : Vitesses maximales des courants de flot (à gauche) et de jusant (à droite) de la marée en vives-eaux pour un débit du fleuve faible de 148 m ³ /s (en haut) et un débit du fleuve élevé de 1126 m ³ /s (en bas) sans vagues, pour la position de l'embouchure actuelle (2019)..	181
Figure 7-11 : Scénario 1 : Localisation des échelles et des surverses sur le cordon	183
Figure 7-12 : Profils en long des lignes d'eau du fleuve à l'horizon 2050 du Pont Faidherbe à l'embouchure du fleuve - Scénario 1.....	184
Figure 7-13 : Cotes d'eau maximales – Scénario 1 – Horizon 2050 – Q30 – Delta du fleuve	185
Figure 7-14 : Cotes d'eau maximales – Scénario 1 – Horizon 2050 – Q30 – Zoom sur Saint-Louis	186
Figure 7-15 : Cotes d'eau maximales – Scénario 1 – Horizon 2100 – Q2 – Delta du fleuve	187
Figure 7-16 : Cotes d'eau maximales – Scénario 1 – Horizon 2100 – Q2 – Zoom sur Saint-Louis	188
Figure 7-17 : Evolution des cotes d'inondation d'une crue biennale à Saint-Louis en conditions climatiques actuelles en fonction de la position de l'embouchure et des conditions en mer ..	189
Figure 7-18 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Scénario 1 – Horizon 2050 – Q100	190
Figure 7-19 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Scénario 1 – Horizon 2100 – Q100	191
Figure 7-20 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiole – Scénario 1 – Horizon 2050 – Q100.....	192
Figure 7-21 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiole – Scénario 1 – Horizon 2100 – Q100.....	192
Figure 7-22 : Étendue du domaine de calcul. Pour une impression de la résolution, un quadrillage est proposé avec une seule ligne tracée pour 10 lignes de grille de calcul.	193
Figure 7-23 : Conditions limites hydrodynamiques pour le modèle XBeach basées sur le PoT de la hauteur significative des vagues, de la période de pic et de la surcote.	194
Figure 7-24: Figures du comportement hydrodynamique du modèle XBeach dans l'embouchure après 15 heures de simulation. Les graphiques représentent le champ d'ondes courtes pour une tempête avec une période de retour de 1, 10 et 100 ans, dans les conditions actuelles. Les flèches indiquent la direction des vagues.	195
Figure 7-25: Résultats du comportement hydrodynamique du modèle XBeach dans l'embouchure au moment du setup maximal induit par les vagues. Les graphiques représentent le niveau d'eau par rapport au niveau d'eau moyen (marée) pour une tempête avec une période de retour de 1, 10 et 100 ans, dans les conditions actuelles.	196
Figure 7-26 : Cartes de la profondeur d'inondation pour toutes les zones situées initialement au-dessus du niveau de marée haute dans les 3 scénarios de tempête. Les tempêtes avec une période de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentées pour le grand modèle de l'embouchure du fleuve Sénégal avec XBeach.....	196
Figure 7-27: Cartes de la profondeur d'inondation pour toutes les zones situées initialement au-dessus de la marée haute dans les 3 scénarios de tempête à l'horizon 2050 (RCP 4.5). Les	

tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentées pour le grand modèle de l'embouchure du fleuve Sénégal avec XBeach..... 197

Figure 7-28 : Résultats du comportement hydrodynamique du modèle XBeach dans l'embouchure au moment du setup maximal induit par les vagues. Les graphiques représentent le niveau d'eau par rapport au niveau d'eau moyen (marée + élévation du niveau de la mer de 19 cm) pour des tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans à l'horizon 2050. 198

Figure 7-29 : Résultats du comportement hydrodynamique du modèle XBeach dans l'embouchure au moment du setup maximal induit par les vagues. Les graphiques représentent le niveau d'eau par rapport au niveau d'eau moyen (marée + élévation du niveau de la mer avec 66 cm) pour des tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans à l'horizon 2100.. 199

Figure 7-30 : Cartes de la profondeur d'inondation pour toutes les zones situées initialement au-dessus marée haute dans les 3 scénarios de tempête, à l'horizon 2100. Les tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentées pour le grand modèle de l'embouchure du fleuve Sénégal avec XBeach..... 200

Figure 7-31 : En haut : topographie initiale du modèle XBeach de l'embouchure du fleuve Sénégal. Milieu : topographie post-tempête. En bas : taux d'érosion (rouge) - sédimentation (bleu), obtenus en soustrayant la topographie post-tempête de la topographie pré-tempête. Les résultats sont à l'horizon 2100 avec une tempête de période de retour de 100 ans..... 200

Figure 7-32 : Visualisation de la bathymétrie actuelle (A) et de la bathymétrie simulée pour 2040 par le modèle ShorelineS, (B) telles qu'utilisées pour les simulations avec le modèle Delft3D-FM. 204

Figure 7-33 : Salinité simulée à la surface et près du fond dans les passages de référence à marée basse (panneaux de gauche) et à marée haute (panneaux de droite) basée sur un faible débit (Simulation Ref. faible débit ; panneaux supérieurs) et sur un débit élevé (Simulation Ref. débit élevé ; panneaux inférieurs)..... 205

Figure 7-34 : Transects en coupe transversale à travers le fleuve Sénégal et la partie sud de l'embouchure actuelle du fleuve..... 206

Figure 7-35 : Sections transversales de salinité à marée basse (panneaux de gauche) et à marée haute (panneaux de droite) basées sur un débit faible et sur un débit élevé pour la bathymétrie 2019 avec +0 cm d'élévation du niveau de la mer et +66 cm d'élévation du niveau de la mer . 207

Figure 7-36 : La salinité simulée à la surface et près du fond pour le littoral de 2040 à marée basse (panneaux de gauche) et à marée haute (panneaux de droite) sur la base d'un faible débit (Simulation *Bathy 2040 – faible débit* ; panneaux supérieurs) et d'un débit élevé (Simulation *Bathy 2040 – faible élevé* ; panneaux inférieurs). 208

Figure 7-37 : Sections transversales de salinité à marée basse (panneaux de gauche) et à marée haute (panneaux de droite) basées sur un débit faible et un débit élevé pour la bathymétrie 2040 avec une élévation du niveau de la mer de +0 cm (Simulations *Bathy 2040 – faible débit* et *Bathy 2040 – faible élevé*. 209

Figure 7-38 : La salinité dans le fleuve moyennée dans la profondeur et la durée (sur la période du 10 mars 2019 au 8 avril 2019) en coupe transversale pour le transect allant de Diama à la zone de l'estuaire au sud pour tous les simulations. 210

Figure 7-39: Rechargements des plages des villages du Gandiolais proposées, afin de contrebalancer l'érosion prévu avec la migration de l'embouchure vers le sud dans les décennies à venir. 212

Figure 7-40 : Mesures complémentaires envisagées 213

Figure 8-1 : Présentation du scénario 2.....	217
Figure 8-2 : Scénario 2 : Localisation des points de contrôle.....	220
Figure 8-3 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2 – Horizon 2050 – Q100 – Delta du fleuve	222
Figure 8-4 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis	223
Figure 8-5 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Degounaye – Q100 – Delta du fleuve	224
Figure 8-6 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Degounaye – Q100 – Zoom sur Saint-Louis.....	225
Figure 8-7 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Potou – Q100 – Delta du fleuve	226
Figure 8-8 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Potou – Q100 – Zoom sur Saint-Louis	227
Figure 8-9 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Degounaye – Q100	229
Figure 8-10 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Potou – Q100	229
Figure 8-11 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiole – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Degounaye – Q100	230
Figure 8-12 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiole – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Potou – Q100	230
Figure 8-13 : Présentation du scénario 2-1.....	232
Figure 8-14 : Principe de fonctionnement de la brèche contrôlée	233
Figure 8-15 : La bathymétrie de départ de 2000 avec un déversoir (à gauche), les prévisions après 5 ans (au milieu) et les différences (à droite) pour un calcul dans lequel le débit à Dama a été augmenté jusqu'à 2449 m ³ /s durant la première année (période de retour 1/10).	235
Figure 8-16 : bathymétrie de 2000 avec déversoir (à gauche), prédit après 5 ans (au milieu) et leur différence (à droite) pour le calcul dans lequel le débit à Dama la première année est augmenté jusqu'à 3384 m ³ /s (période de retour de 1/100).	236
Figure 8-17 : Scénario 2-1 – Horizon 2050 : Localisation des points de contrôle	238
Figure 8-18 : Impacts sur les cotes d'inondation – Scénario 2-1 – Horizon 2050 – Q100 – Delta du fleuve	239
Figure 8-19 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2-1 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis	240
Figure 8-20 : Scénario 2-1 – Horizon 2100 : Localisation des points de contrôle	242
Figure 8-21 : Impacts sur les cotes d'inondation – Scénario 2-1 – Horizon 2100 – Q100 – Embouchure Potou – Delta du fleuve	244
Figure 8-22 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2-1 – Horizon 2100 – Q100 – Embouchure Potou – Zoom sur Saint-Louis	245
Figure 8-23 : Présentation du scénario 2-2.....	248
Figure 8-24 : Confortement des ouvrages de protection de Saint-Louis	249

Figure 8-25 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2-2 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis	251
Figure 8-26 : Présentation du scénario 2-3.....	252
Figure 8-27 : Scénario 2-3 : Localisation des points de contrôle.....	253
Figure 8-28 : Impacts sur les cotes d'inondation – Scénario 2-3 – Horizon 2050 – Q100 – Delta du fleuve	255
Figure 8-29 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2-3 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis	256
Figure 8-30 : Impacts sur les cotes d'inondation – Scénario 2-3 – Horizon 2100 – Q100 – Delta du fleuve	257
Figure 8-31 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2-3 – Horizon 2100 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis	258
Figure 8-32 : Présentation du scénario 2-4.....	260
Figure 8-33 : Schéma du wharf de pêche issu du rapport COSEC de 2002.....	261
Figure 9-1 : Présentation du scénario 3	267
Figure 9-2 : Evolution du cordon du littoral en 10 ans après la construction d'un port près de Saint-Louis, sans bypass (contournement du sable).....	268
Figure 9-3 : Evolution du cordon du littoral en 40 ans après la construction d'un port près de Saint-Louis, en l'absence de bypass (contournement du sable).	268
Figure 9-4 : Positions initiales et prévues du littoral pour 2018, 2028, 2038 et 2058 pour le scénario 3.	269
Figure 9-5 : Bathymétrie initiale (à gauche), bathymétrie prévue après 5 ans (au milieu) et prévision des sédimentation-érosion après 5 ans (à droite) pour le scénario 3.	271
Figure 9-6 : Vitesses d'écoulement moyennes en profondeur autour du port (scénario 3) pendant le pic de flot (à gauche) et le pic de jusant (à droite), pendant la saison sèche (faible débit du fleuve).	272
Figure 9-7 : Vitesses d'écoulement moyennes en profondeur autour du port (scénario 3) pendant le pic de flot (à gauche) et le pic de jusant (à droite) en vives-eaux pour les débits faibles du fleuve (en haut) et élevés (bas) sans vagues, pour le scénario 3.	273
Figure 9-8 : Variantes portuaires en jaune évaluées à l'aide des modèles Delft3D. Conception selon le scénario 3 en noir. Variante 1 - brise-lames plus courts (à gauche), variante 2 - brise-lames plus longs (au milieu) et variante 3 - port plus large (à droite).	274
Figure 9-9 : Bathymétrie initiale (à gauche), bathymétrie prévue après 5 ans (au milieu) et prévision de la sédimentation-érosion après 5 ans (à droite) pour la variante portuaire 1, brise-lames plus courts.	275
Figure 9-10 : Vitesses moyennées en profondeur des courants induits par la marée montante en vives-eaux (gauche) et lors de la marée descendante en vives-eaux (droite) pendant la saison sèche (faible débit du fleuve) pour la variante portuaire 1, brise-lames plus courts.....	276
Figure 9-11 : Bathymétrie initiale (à gauche), bathymétrie prévue après 5 ans (au milieu) et prévision de la sédimentation-érosion après 5 ans (à droite) pour la variante portuaire 1, brise-lames plus longs.	277

Figure 9-12 : Vitesses moyennées en profondeur des courants induits par la marée montant en vives-eaux (gauche) et lors de la marée descendante en vives-eaux (droite) pendant la saison sèche (faible débit du fleuve) pour la variante portuaire 2, brise-lames plus longs.	278
Figure 9-13 : Bathymétrie initiale (à gauche), bathymétrie prévue après 5 ans (au milieu) et prévision de la sédimentation-érosion après 5 ans (à droite) pour la variante 3 du port, port plus large.	279
Figure 9-14 : Vitesses moyennées en profondeur des courants induits par la marée montante en vives-eaux (gauche) et lors de la marée descendante en vives-eaux (droite) pendant la saison sèche (faible débit du fleuve) pour la variante portuaire 3, port plus large.	280
Figure 9-15 : Bathymétrie initiale, bathymétrie modélisée après 5 ans et sédimentation-érosion pour un port sans brise-lames, avec une ouverture oblique de 700 m de large à travers la flèche sableuse.	281
Figure 9-16 : Bathymétrie initiale, bathymétrie modélisée après 5 ans et sédimentation-érosion pour un port sans brise-lames, avec une ouverture perpendiculaire de 700 m de large à travers la flèche sableuse.	282
Figure 9-17 : Bathymétrie initiale, bathymétrie modélisée après 5 ans et sédimentation-érosion pour un port sans brise-lames, avec une ouverture perpendiculaire de 350 m de large à travers la flèche sableuse.	283
Figure 9-18 : Bathymétrie initiale, bathymétrie modélisée après 5 ans et sédimentation-érosion pour un port avec des brise-lames très courts et recourbés, avec une ouverture oblique de 700 m de large à travers la flèche sableuse.	284
Figure 9-20 : Niveau initial du lit avec les lieux de dragage et de dépôt en rouge (à gauche), niveau modélisé du lit après 5 ans (au milieu) et leur différence (à gauche).	285
Figure 9-21 : Extrait du plan de masse général du projet de port fluviomaritime de Saint-Louis (Source : Etude APD OMVS SOGENAV, 2017)	287
Figure 9-22 : Scénario 3 : Localisation des échelles et des surverses sur le cordon	288
Figure 9-23 : Cotes d'eau maximales – Scénario 3 – Horizon 2050 – Q100 – Delta du fleuve ..	289
Figure 9-24 : Cotes d'eau maximales – Scénario 3 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis	290
Figure 9-25 : Cotes d'eau maximales – Scénario 3 – Horizon 2100 – Q100 – Delta du fleuve ..	291
Figure 9-26 : Cotes d'eau maximales – Scénario 3 – Horizon 2100 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis	292
Figure 9-27 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Scénario 3 – Horizon 2050 – Q100	293
Figure 9-28 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Scénario 3 – Horizon 2100 – Q100	294
Figure 9-29 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiole – Scénario 3 – Horizon 2050 – Q100.....	294
Figure 9-30 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiole – Scénario 3 – Horizon 2100 – Q100.....	295
Figure 9-31 : Visualisation de la bathymétrie actuelle incluant le port et le chenal de navigation prévus (plans Consulmar) tels qu'utilisés pour les simulations avec le modèle Delft3D-FM...	296

Figure 9-32 : Salinité simulée à la surface et près du fond du scénario du port (+ 0 cm d'élévation du niveau de la mer) à marée basse (panneaux de gauche) et à marée haute (panneaux de droite) en fonction des faibles débits (simulation 3a; panneaux du haut) et des forts débits (simulation 3b; panneaux inférieurs).....	297
Figure 9-33 : Sections transversales de salinité à marée basse (panneaux de gauche) et à marée haute (panneaux de droite) basées pour un débit faible et pour un débit élevé pour la bathymétrie 2019, y compris le port prévu avec une élévation du niveau de la mer de +0 cm à +66 cm.	298
Figure 9-34 : Effet de saisonnalité sur l'intrusion d'eau saline avec un port. Pendant un débit du fleuve élevé, l'eau salée entrée pendant la période précédente avec faible débit est remplacée par de l'eau douce-sauf autour le chenal de navigation. Au contraire, pour la distribution de l'eau saline lors d'un période avec faible débit, il est moins élevé s'il est précédé d'une période avec un débit du fleuve élevé.....	299
Figure 9-35 : La salinité dans le fleuve moyennes en profondeur et en temps (sur la période du 10 mars 2019 au 8 avril 2019) en coupe transversale pour le transect allant de Diama à la section au sud de l'embouchure (comme illustré sur la Figure 7-34) pour tous les simulations avec port.	300
Figure 9-36 : Présentation du scénario 3-1.....	301
Figure 10-1 : Présentation du scénario 4.....	305
Figure 10-2 : Localisation des aménagements du scénario 4.....	306
Figure 10-3 : Position des aménagements du scénario 4 sur le cordon littoral.....	307
Figure 10-4 : Scénario 4 : Localisation des points de contrôle.....	310
Figure 10-5 : Impacts sur les cotes d'inondation – Scénario 4 – Horizon 2050 – Q100 – Delta du fleuve	311
Figure 10-6 : Cotes d'eau maximales – Scénario 4 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis	312
Figure 10-7 : Scénario 4 : Localisation des points de contrôle.....	313
Figure 10-8 : Impacts sur les cotes d'inondation – Scénario 4 – Horizon 2100 – Embouchure Potou – Q100 – Delta du fleuve.....	314
Figure 10-9 : Cotes d'eau maximales – Scénario 4 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis	315
Figure 10-10 : Déversoir de crue en rive droite sur les digues du fleuve Sénégal.....	317
Figure 10-11 : Schéma de principe du surcreusement du cordon littoral au Site 3.....	317
Figure 10-12 : Scénario 4-1 : Localisation des points de contrôle et des sites de surverse sur le cordon	319
Figure 11-1 : Horizon 2050 – Impact des scénarios 1, 2 et 3 entre Richard Toll et Diama –Crue centennale.....	322
Figure 11-2 : Horizon 2100 – Impact des scénarios 1, 2 et 3 entre Richard Toll et Diama	323
Figure 12-1 : Scénario « Espace pour le fleuve ».....	324
Figure 12-2 : Scénario R-1 : Localisation des points de contrôle et des sites de surverse sur le cordon	325
Figure 12-3 : Cotes d'eau maximales – Scénario R-1 – Horizon 2050 – Q100 – Delta du fleuve.....	326

Figure 12-4 : Impact du surstockage sur le barrage de Diama – crue de 1999.....	327
Figure 12-5 : Impact du surstockage sur le lac de Guiers – crue de 1999	328

Liste des tableaux

Tableau 0-1 : Estimation sommaire des coûts d'investissement et d'exploitation des scénarios	65
Tableau 0-2 : Synthèse des impacts des scénarios d'aménagement sur les enjeux de la zone d'étude	68
Tableau 2-1 : Cotes IGN du 0 des échelles limnimétriques	77
Tableau 2-2 : Altitude minimum et maximum des ouvrages de protection de Saint-Louis.....	83
Tableau 2-3 : Niveau de protection assuré par les ouvrages de protection de Saint-Louis	84
Tableau 2-4 : Prise en compte des ouvrages de protection de la ville de Saint-Louis	89
Tableau 2-5 : Niveaux d'eau calculés et observés : crues de 2018, 2003 et 1999 (mIGN)	91
Tableau 2-6 : Niveaux d'eau calculés et observés lors de la crue de 1999 entre Diama et Richard Toll (mIGN)	92
Tableau 2-7 : Risque inondation en situation actuelle (2019) sur Saint-Louis	96
Tableau 4-1 : Débits maximums instantanés de crue estimés à Dagana en prenant en compte l'écrêtement des barrages, retenus pour les trois horizons d'étude.....	109
Tableau 4-2 : Période de retour des tempêtes avec la surcote prévue pour des conditions actuelles, valable en 20 mètres de profondeur, pour la situation actuelle (2019). Le niveau d'eau maximum comprend la marée et un surcote due au vent.....	111
Tableau 4-3 : Période de retour des tempêtes avec la surcote prévue pour les projections climatiques sans prendre en compte l'élévation du niveau d'eau (2050 et 2100) et un changement dans la direction moyenne des vagues : 3 degrés dans le sens horaire, valable en 20 mètres de profondeur. Le niveau d'eau maximum comprend la marée et un surcote due au vent – pas l'élévation de niveau de la mer pour 2050 et 2100.....	111
Tableau 4-4 : Conditions limites en aval pour les simulations de l'hydraulique fluviale	112
Tableau 4-5 : Débit moyen faible / élevé pendant la saison sèche / des pluies sur la base de la période 2010-2019	113
Tableau 4-6 : Configuration océano-météorologiques retenues pour les tests d'aménagement	115
Tableau 5-1 : Seuils d'inondation sur les quartiers de l'Ile.....	118
Tableau 5-2 : Seuils d'inondation sur les quartiers de Sor.....	120
Tableau 5-3 : Seuils d'inondation sur les quartiers de Khor	120
Tableau 5-4 : Seuils d'inondation sur les quartiers de la Langue de Barbarie	120
Tableau 7-1 : Impact du scénario 1 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis.....	183
Tableau 7-2 : Setup maximal induit par les vagues mesurées à deux endroits (voir les marqueurs blancs sur la Figure 7-25), pour les conditions actuelles, à l'horizon de 2050 et 2100.	195
Tableau 7-3 : Impact des événements concomitants sur le risque d'inondation à Saint-Louis.	202

Tableau 7-4 : Vue d'ensemble des 8 simulations effectuées pour étudier l'impact de (i) l'élévation du niveau de la mer et (ii) de la migration vers le sud de l'embouchure du fleuve due au développement naturel du littoral, sur l'intrusion saline dans l'estuaire du fleuve Sénégal. ...	203
Tableau 7-5 : Impact de la rehausse du cordon littoral sur le risque d'inondation sur Saint-Louis	211
Tableau 7-6 : Coût du scénario 1	214
Tableau 8-1 : Impact du scénario 2 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis	220
Tableau 8-2 : niveaux d'eau maximaux avec et sans la mise en place d'un déversoir. Pour une période de retour de 1/10 (2449 m3/s) et une période de retour de 1/100 (3384 m3/s).	235
Tableau 8-3 : Impact de la brèche contrôlée en aval de Saint-Louis sur les inondations – Horizon 2050.....	238
Tableau 8-4 : Impact de la brèche contrôlée en aval de Saint-Louis sur les inondations – Horizon 2100.....	242
Tableau 8-5 : Brèche contrôlée en aval de Saint-Louis – Horizon 2050 – Volume et durée des déversements	246
Tableau 8-6 : Impact du scénario 2-3 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis.....	253
Tableau 8-7 : Coût du scénario 2 de base	262
Tableau 8-8 : Coût du scénario 2-1.....	262
Tableau 8-9 : Coût du scénario 2-2.....	263
Tableau 8-10 : Coût du scénario 2-3.....	263
Tableau 9-1 : Variantes portuaires - brise-lames - évaluées à l'aide du modèle Delft3D	274
Tableau 9-2 : Impact du scénario 3 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis.....	288
Tableau 9-3 : Aperçu des 6 simulations effectuées pour étudier l'impact à la fois (i) de l'élévation du niveau de la mer et (ii) de la construction d'un port et d'un chenal de navigation de Saint-Louis à la mer (plans Consulmar) sur l'intrusion de salinité dans l'estuaire du fleuve Sénégal.	296
Tableau 9-4 : Coût du scénario 3	302
Tableau 9-5 : Coût du scénario 3-1.....	302
Tableau 10-1 : Test de positionnement de la brèche contrôlée au nord de Saint-Louis – Horizon 2050	309
Tableau 10-2 : Tests brèche contrôlée Site 1 – Longueurs de 1500 et 3000 m – Horizon 2050	309
Tableau 10-3 : Impact du scénario 4 sur le risque d'inondation à Saint-Louis – Horizon 2050	310
Tableau 10-4 : Impact du scénario 4 sur le risque d'inondation à Saint-Louis – Horizon 2100	313
Tableau 10-5 : Impact du scénario 4-1 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis – Horizon 2050	318
Tableau 12-1 : Impact du scénario R-1 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis – Horizon 2050	325
Tableau 12-2 : Comparaison des impacts des scénario 1, 2-1 et R-1 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis – Horizon 2050.....	325

Tableau 15-1 : Le climat des vagues est schématisé dans une direction moyenne de 310° N, une hauteur de houle significative Hs de 1,4 m et un étalement uniforme de 60°..... 334

Tableau 15-2 : Les calculs ont été réalisés en MPI sur 8 processeurs..... 336

Acronymes et abréviations

ADC	Agence de Développement Communal
ADM	Agence de Développement Municipal
AFD	Agence Française de Développement
AGU	American Geophysical Union
AMC	Analyse Multi-Critères
ANAM	Agence Nationale des Affaires Maritimes
AVE	Analyse des Valeurs Extrêmes
BM	Banque Mondiale
CSE	Centre de Suivi Ecologique
DEEC	Direction de l'Environnement et des Etablissements Classés
DREEC	Direction Régional de l'Environnement et des Etablissements Classés
ECMWF	Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme
EIES	Etude d'Impact Environnemental et Social
EOMAP	Données bathymétriques dérivée des observations satellitaires des cotes Sénégalais et Mauritanien en 2018 https://www.bathymetry.store/#main .
FM	Maillage Flexible
GEBCO	Carte Bathymétrique GÉnérale de l'Océan - https://www.gebco.net/
FED	Fonds Européen de Développement
FND	Fonds Nordique de Développement
GIZC	Projet Gestion Intégré du Littoral Côtier
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
LIDAR	Light Detection And Ranging, Laser Imaging Detection And Ranging
MEDD	Ministère de l'Environnement et du Développement Durable
MHA	Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement
OLAC	Office des Lacs et Cours d'Eau
OMVS	Organisation de Mise en Valeur du Fleuve Sénégal
ONAS	Office Nationale de l'Assainissement du Sénégal
ORCA	Ocean data Transformation, Classification and Analysis https://www.deltares.nl/en/software/orca/
PDU	Plan Directeur d'Urbanisme
PNLB	Parc National de la Langue de Barbarie
PROGEP	Projet de gestion des eaux pluviales et d'adaptation au changement climatique

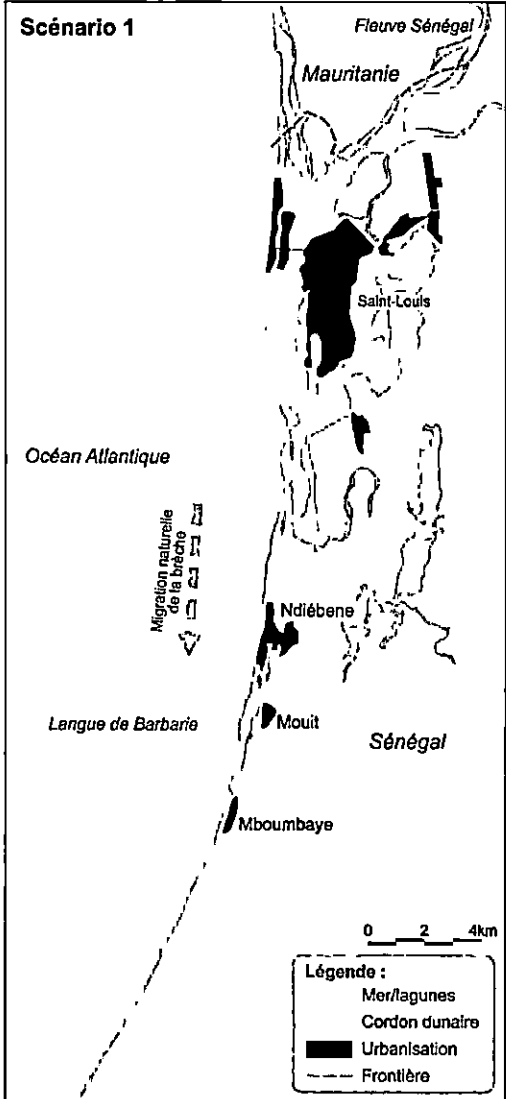
RGPHAE	Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage
SOGENAV	Société de Gestion et d'Exploitation de la Navigation sur le Fleuve Sénégal
UCAD	Université Cheikh-Anta-Diop
UE	Union Européenne
UGB	Université Gaston Berger
UNOPS	Bureau des Nations unies pour les services d'appui aux projets
WACA	Programme de gestion du littoral ouest-africain

0. Résumés et conclusions

0.1 Résumés des scénarios

0.1.1 Résumé du scénario 1 – Pas d'intervention sur la brèche

1. Résumé des interventions

Schéma de principe	Description des interventions prévues
<p>Scénario 1</p>  <p>The map illustrates the coastal area of Senegal and Mauritania. It shows the Senegal River (Fleuve Sénégal) flowing into the Atlantic Ocean (Océan Atlantique). Key locations marked include Saint-Louis, Ndiébène, Moult, Mboumbaye, and the Langue de Barbarie. A dashed line indicates the 'Migration naturelle de la brèche' (natural migration of the breach) towards the south. A legend in the bottom right corner defines symbols for Mer/lagunes (sea/lagoons), Cordon dunaire (dune cord), Urbanisation (urban areas, shown in black), and Frontière (border, shown as a dashed line). A scale bar at the bottom indicates distances of 0, 2, and 4 km.</p>	<p>Aucune action spécifique n'est menée sur la brèche. Le scénario 1 prend en compte la dérive naturelle de la brèche vers le sud sous l'action du transport littoral, soit l'avancée par engraissement de la pointe nord et le recul par érosion de la pointe sud de l'embouchure.</p> <p>Bien qu'aucune intervention ne soit menée sur la brèche, des mesures complémentaires destinées à limiter les impacts de ce scénario sur les principaux enjeux sont envisagées.</p> <p>Ces mesures sont présentées ci-après.</p>

2. Mesures complémentaires

De manière à parer aux principaux impacts du scénario 1, une série de mesures complémentaires ont été proposées dans l'étude :

- Le balisage d'un chenal permettant un accès plus sécurisé en mer pour les pêcheurs. Cette mesure pourrait être complétée par la présence d'un bateau de sauvetage, par la formation des pêcheurs à la navigation dans l'embouchure du fleuve et à l'adoption de mesures basiques de sécurité (alerte sur les conditions en mer avant sortie, gilet de sauvetage...),
- Le rechargement en sable sur la Langue de Barbarie, devant le front de mer bâti de Saint-Louis. Cette mesure permettrait que les pêcheurs puissent accoster leurs bateaux sur la plage, comme ils le faisaient avant la brèche de 2003 et participerait également à la protection du front bâti de Saint-Louis. (cf Etude SERRP)
- Une gestion par dragage et rechargement des plages du Gandiolais permettant de limiter l'érosion côtière et de protéger par anticipation les enjeux bâtis de la côte du Gandiolais (habitations, hôtels),
- La protection des principaux enjeux sur le milieu naturel : délocalisation de l'île aux oiseaux. Cette action sera à engager le plus rapidement possible : l'île a déjà perdu 50% de sa superficie entre 2002 et 2013,
- La stabilisation de la pointe nord de la Langue de Barbarie au fur et à mesure de sa migration par pièges à sable, plantation de Filaos, sans cependant éviter la possibilité de surverse par-dessus le cordon littoral,
- L'exhaussement des points bas du cordon littoral au Nord de Saint Louis.

3. Coût estimé du scénario

Coût global du scénario : 9.4 Milliards FCFA

4. Résumé des résultats

L'évolution morphodynamique à court terme pour le scénario 1 est caractérisée par la migration et l'élargissement de l'embouchure du fleuve ; la flèche sableuse au nord migre vers le sud et le sable s'accumule dans la partie centrale de l'embouchure du fleuve Sénégal. Les vitesses d'écoulement dans l'embouchure sont fortes et imprévisibles car régies par les vagues, les marées et le débit du fleuve, ainsi que les variations importantes de profondeurs. Ces circonstances ne changeront pas avec la migration de l'embouchure vers le sud, et resteront très éprouvantes pour les pêcheurs qui tentent de passer par l'embouchure pour se rendre en mer, causant jusqu'à présent de nombreuses victimes.

Dans les décennies à venir, la migration de l'embouchure vers le sud exposera à l'érosion littorale, un par un, les villages du Gandiolais. En 2050, l'embouchure du fleuve aura migré vers le sud d'environ 12 km et sera à quelques kilomètres au sud de Dégounaye, la largeur de l'embouchure est estimée à environ 1.1 km (actuellement 6 km de large). L'embouchure parviendrait à Potou (sa position originelle de 2003) en 2076. Pour le Gandiolais, la réduction de la largeur de la brèche semble plutôt favorable et l'érosion littorale semble limitée.

En prenant en compte l'adaptation du cordon littoral à l'élévation du niveau de la mer (recul du trait de côte et augmentation de la crête selon la théorie de Bruun, 1962), il faudra compter, à l'horizon 2050, sur une érosion additionnelle d'environ 25 m pour les plages situées près de Saint-Louis, et d'environ le double pour 2100.

Il convient de noter que les effets du projet en cours (gazier Tortue/Ahmeyin (paragraphe 6.1), le port de N'Diogo (paragraphe 6.3) et la protection d'urgence du front de mer de la ville de Saint-Louis (paragraphe 6.2) rendront la flèche sableuse moins stable. Il est recommandé de surveiller les zones à risque dans les décennies à venir, pour anticiper des contre-mesures comme des apports de sable. Lors du projet SERRP ces influences seront étudiées en plus de détail.

Risque inondation :

A l'état actuel (2019), La plus grande partie de la ville de Saint-Louis (96%) est protégée des inondations jusqu'à l'occurrence centennale. Il n'est pas observé de déversements sur le cordon littoral.

Du fait de la migration de l'embouchure vers le sud, à l'horizon 2050, la ville de Saint Louis se trouve confrontée à des inondations importantes dès l'occurrence décennale, pour des débits de l'ordre de 2300 – 2400 m³/s. Pour des crues trentennale et centennale, des surverses sur le cordon littoral commencent à apparaître au nord de Saint Louis et sont susceptibles d'initier une nouvelle brèche, exposant la ville à un risque majeur : la formation d'une nouvelle embouchure du fleuve au nord de Saint Louis avec migration vers le sud en direction de la ville.

A l'horizon 2100, avec une embouchure située à Potou, Saint Louis est inondé pour des crues très fréquentes (période de retour inférieure à 2 ans). Pour une crue biennale, la ville est sujette à de fortes inondations, les cotes dépassant 1.75 mIGN au pont Faidherbe. Dès l'occurrence quinquennale, le risque de formation de brèche au nord et au sud de Saint-Louis est fort, exposant à la fois Saint-Louis et le littoral Gandiolais à une très forte érosion.

En ce qui concerne les risques d'inondation et de formation de nouvelles brèches induits par les tempêtes,

- Avec la position de l'embouchure actuelle, le risque d'inondation induit par les tempêtes semble restreint à des zones bordant la mer. Les zones touchées sont néanmoins plus étendues, dans le cas de fortes tempêtes (avec des périodes de retour > 100 ans), et la surcote et setup qui pénètrent dans l'embouchure atteindront environ 40 cm au niveau de Saint-Louis, et 45 cm au niveau des villages du Gandiolais.
- Cependant, la réponse à l'élévation du niveau de la mer du cordon littoral est sévère, montrant des niveaux d'inondation importants (environ 60 cm à l'horizon 2050 et environ 110 cm à l'horizon 2100 pour des tempêtes avec une période de retour de 100 ans) et un risque élevé de formation de nouvelles brèches. Il est clair que la flèche sableuse n'est pas suffisamment résiliente pour faire face aux tempêtes plus fortes et à l'élévation du niveau de la mer, ce qui peut constituer une menace pour la région de Saint-Louis.
- Pour éviter des impacts désastreux pour Saint-Louis et les villages du Gandiolais, plusieurs sections du cordon littoral vulnérables devraient être renforcées ou adaptées pour créer un cordon littoral plus résistant.
- Avec la migration de l'embouchure vers le sud dans les décennies à venir, les augmentations des niveaux d'eau dans le fleuve, provoquées par la pénétration de surcote et setup lors d'une tempête, diminueront en amont de l'embouchure, protégeant à terme les villages du Gandiolais et Saint-Louis.
- Dans le cas d'événements concomitants (une tempête et un fort débit du fleuve) les niveaux d'eau seront plus élevés qu'en cas d'événement isolé. Même si la probabilité d'un tel événement reste faible celle-ci ne doit pas être négligée. Cependant, lors d'un événement concomitant, des forts courants du fleuve bloquent en partie l'influence des vagues. Les effets d'une tempête par intrusion de setup et surcote dans l'embouchure, diminuent ainsi quand elles se propagent en amont dans le fleuve, vers Saint-Louis. Avec l'embouchure du fleuve dans sa position actuelle, pendant un tempête annuelle lors d'une crue centennale, les hauteurs augmenteront de 16 cm à Saint-Louis au lieu de 28 cm à l'embouchure elle-même. Avec l'embouchure plus au sud, au





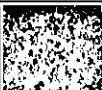
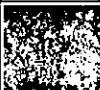



niveau de Dégounaye, les effets des tempêtes seront encore plus réduits, et la hauteur d'eau à Saint-Louis augmente de seulement 6 centimètres lors d'une tempête annuelle.

Du point de vue de la salinité, l'intrusion d'eau salée dans l'embouchure, puis dans la nappe, provoquera dans les décennies à venir des effets négatifs notamment sur l'agriculture. Avec la configuration de l'embouchure actuelle, les effets de l'élévation du niveau de la mer sont relativement modérés à l'horizon 2050 par rapport à la situation actuelle, mais plus prononcés à l'horizon 2100. Avec la migration de l'embouchure vers le sud dans les décennies à venir, l'intrusion d'eau salée se limitera progressivement plus au sud, et un retour à la situation de 2003 pourrait être observé, ce qui sera plus bénéfique pour l'agriculture du Gandiolais. Cependant, les effets de l'élévation du niveau de la mer pourraient réduire cet effet positif, en provoquant une augmentation de salinité à l'horizon de 2100 amont de l'embouchure comme vu pour la configuration actuelle.

5. Efficacité du scénario sur les principaux enjeux

Légende : Vert : Scénario favorable, Orange : Scénario peu favorable, Rouge : Scénario défavorable					
		2020	2050	2100	
Inondations fluviales Saint Louis	Population exposée pour une crue centennale	8000	188600	201500	En état actuel, du fait de la proximité de l'embouchure du fleuve, Saint Louis n'est pas menacée par les inondations. En 2050 la situation commence à se dégrader, et Saint Louis est affectée par des inondations avec une fréquence décennale. A l'horizon 2100, retour aux problématiques d'avant la brèche de 2003, et inondations très fréquentes de la ville (une fois tous les 2 ans).
	Population exposée pour une crue centennale	3900	23900	33300	De la même manière que pour Saint-Louis, le delta n'est que faiblement menacé par les inondations à court terme. En 2050 la situation se dégrade et les inondations couvrent une large superficie du delta. En 2100, la montée du niveau marin aggrave l'exposition des villages, notamment sur la commune côtière de Ndiébène Gandiole.
Erosion côtière Gandiolais	Sans mesures complémentaires				Dans les décennies à venir, et jusqu'à l'horizon 2076, la migration de l'embouchure vers le sud exposera à l'érosion, la côte et les villages du Gandiolais. Après 2050, à l'aval de Dégounaye, les enjeux seront moins importants car la cote est peu peuplée.
	Avec mesures complémentaires				Le rechargement des plages et la mise en œuvre de protections localisées permettront de limiter l'impact de l'érosion côtière. Les cotes du Gandiolais resteront cependant soumises au risque d'une nouvelle rupture naturelle du cordon littoral entraînant les mêmes phénomènes que ceux observés post 2003.
Erosion côtière Saint Louis par risque de rupture du cordon littoral Nord	Sans mesures complémentaires				En état actuel il n'y a pas de risque de nouvelle rupture du cordon littoral pour des inondations fluviales. Ces risques apparaissent à l'horizon 2050 au Nord de Saint Louis avec une fréquence trentennale.

					Par contre les modélisations prenant en compte l'effet des tempêtes montrent que ce risque est considérable dès l'état actuel pour un tempête > 1/100 ans ou quand plusieurs tempêtes se succèdent).
	Avec mesures complémentaires				L'exhaussement des points bas du cordon littoral au Nord de Saint Louis permet d'éviter la formation de brèche au Nord de Saint Louis, ce qui constitue le risque majeur pour la zone d'étude. Le risque formation d'une nouvelle brèche au Sud de Saint Louis demeure.
Activité pêche Gandiolais					A court terme, prédominance de l'influence marine A moyen et long terme, dès 2050, retour à des conditions plus favorables pour la pêche dans le fleuve. Cette activité peut cependant être impactée par la formation d'une nouvelle brèche naturelle au sud de Saint Louis.
Activité pêche Saint Louis	Sans mesures complémentaires				La position de la brèche affecte directement le parcours des pêcheurs pour accéder à leur lieu de pêche. Ce parcours est rallongé de 12 km en 2050 par rapport à la situation actuelle. En 2100 le trajet est augmenté de 18 km. Quel que soit l'horizon envisagé le danger de naufrage durant le franchissement de la barre est présent.
	Avec mesures complémentaires				Le balisage d'un chenal permet d'améliorer la situation pour le passage de la barre. Le rechargement en sable devant le front bâti de Saint Louis permet aux pirogues d'accoster sur la plage. La problématique de l'allongement des temps de trajet des pêcheurs demeure.
Activité portuaire					Les conditions hydrodynamiques au droit de l'embouchure du fleuve ne permettent pas la mise en œuvre d'un débouché maritime pour le projet de mise en navigation du fleuve.
Activité agricole Gandiolais					En état actuel, prédominance de l'influence marine. Les intrusions salines sont favorisées et impactent les rendements de l'activité agricole et forcent à l'abandon des parcelles cultivées. En 2050 la prédominance de l'influence fluviale en amont de Dégounaye permet le retour aux cultures. En 2100 la problématique saline pourrait rester cantonnée aux abords de Potou., Cependant, avec l'augmentation du niveau de la mer, l'intrusion d'eau de mer salée dans l'embouchure augmentera considérablement, surtout pendant la saison sèche.
Activité touristique	Sans mesures complémentaires				La destruction de la Langue de Barbarie impacte l'activité touristique principalement par le risque de destruction des hôtels et lodges présents soit sur la langue de Barbarie soit le long du fleuve.
	Avec mesures complémentaires				La gestion par dragage et rechargement des plages du Gandiolais ainsi que la protection des hôtels de la côte du Gandiolais permettent de limiter les effets sur l'activité touristique.

Milieu naturel	Sans mesures complémentaires				En situation actuelle (2019) le Parc Naturel de la Langue de Barbarie commence à être impacté par l'élargissement de l'embouchure et sa migration vers le sud. L'île aux Oiseaux, un des principaux enjeux du Parc devrait être atteinte (et détruite) en 2050. Le risque de formation de brèches au Nord de Saint Louis peut affecter le Parc National du Diawling en Mauritanie
	Avec mesures complémentaires				Protection de l'île aux oiseaux mais fort impact sur le PNLB par l'élargissement de l'embouchure et sa migration vers le sud.
Marée, submersion marine					A court terme, prédominance de l'influence marine sur le littoral, par la surcote et le setup qui pénètrent dans l'embouchure (et atteindront environ 40 cm au niveau de Saint Louis). A long terme, élévation du niveau de la mer alarmante à l'horizon 2100.

Efficacité du scénario :

Sans mesure complémentaire (ne rien faire...)

L'adoption du scénario 1 ne permet pas d'apporter de solution aux multiples enjeux présents sur le territoire.

Le seul aspect positif mis en évidence dans l'étude est que la proximité de l'embouchure apporte un répit pour le risque inondation fluvial, ceci jusqu'à l'horizon 2035-2050.

Dans le Gandiolais, le scénario 1 ne permet pas d'améliorer la situation vis-à-vis de la pêche, de l'érosion côtière, de l'activité agricole et touristique.

Sur le territoire de Saint Louis les préoccupations liées à la pêche et à la mise en place d'un débouché maritime pour le projet de mise en navigation du fleuve restent présentes.

Par ailleurs, les simulations des tempêtes montrent que les risques d'une formation d'une nouvelle brèche dans les zones faibles du cordon littoral quelques kilomètres au nord et sud de Saint-Louis sont considérables, ce qui constitue un risque majeur pour les zones bâties de Saint Louis.

Avec mesures complémentaires :

Les mesures complémentaires permettent d'apporter une amélioration sur la problématique érosion côtière sur Saint Louis et dans le Gandiolais. En particulier ces mesures permettent d'éviter le risque de rupture du cordon littoral au Nord de Saint Louis.

Elles permettent une amélioration des conditions des pêcheurs de Saint Louis, de préserver les activités touristiques existantes, et de parer aux impacts sur le milieu naturel les plus cruciaux (délocalisation de l'île aux oiseaux).

Les problématiques restantes sont les suivantes :

- Activité portuaire, pas de débouché possible pour la mise en navigabilité du fleuve,
- Activité agricole et activité pêche dans le Gandiolais soumise à la salinité du fleuve

Ainsi que la problématique des inondations fluviales à gérer à l'horizon 2050.

6. Complexité technique et faisabilité

Complexité technique et faisabilité :

L'exhaussement du cordon littoral au nord de Saint Louis se situe en majorité sur le territoire Mauritanien.

7. Montant des travaux (Millions de FCFA) et échéance de réalisation

	2020-2035	2035-2050	>2050	Coût annuel d'exploitation	Maitre d'ouvrage
Balisage chenal pêcheurs	200			67	ANAM ?
Rechargement des plages du Gandiolais	2555	975	1410		DEEC ?
Délocalisation île aux oiseaux	1300				PNLB ?
Stabilisation de la Langue de Barbarie (Sud)	460	460	320	124	PNLB ?
Exhaussement cordon littoral Nord Saint Louis	1726			173	OMVS- SOGENAV ?

8. Résumé de la modélisation

Tous les modèles numériques ont été mise en œuvre. Le modèle Infoworks pour les risques d'inondation du côté fluviale (paragraphe 7.1.3), le modèle ShorelineS pour l'évolution du cordon littoral à long-terme (paragraphe 7.1.1) et le modèle Delft3D pour apporter plus d'information sur l'hydrodynamique et l'évolution morphologique à court terme (paragraphe 7.1.2). Ensuite le modèle XBeach a été utilisé afin d'étudier les effets de tempêtes (paragraphe 7.1.4), et le modèle Delft3D-FM pour l'étude de l'intrusion d'eau salée dans l'embouchure et plus en amont (paragraphe 7.1.5).

9. Possibilités d'évolution du scénario ? (Vers le scénario 5...)

Les travaux de protection de Saint Louis contre les inondations fluviales (présentés dans le scénario 2.2) pourraient compléter le scénario 1.

A noter que le scénario 1 n'est pas incompatible avec le scénario 3 (projet de port de Saint Louis). La majorité des travaux complémentaires prévus dans ce scénario peuvent (doivent) être réalisés dans l'attente de la création du port.

0.1.2 Résumé du scénario 2 – Embouchure éloignée de Saint-Louis

1. Résumé des interventions

Schéma de principe	Description des interventions prévues
<p>Scénario 2</p> <p>Comblement des points bas par rechargement en sable</p> <p>Fleuve Sénégal</p> <p>Mauritanie</p> <p>Saint-Louis</p> <p>Océan Atlantique</p> <p>Sénégal</p> <p>Ndiébène</p> <p>Mouit</p> <p>Mboumbaye</p> <p>Degounaye</p> <p>Potou</p> <p>Langue de Barbarie</p> <p>Brèches naturelles et dérive Sud</p> <p>Migration naturelle de la brèche</p> <p>Légende :</p> <ul style="list-style-type: none"> Migration naturelle de la brèche jusqu'à Potou Lorsque l'embouchure atteint Potou, on ouvre la langue au Sud de Degounaye La Langue entre Degounaye et Potou est réservée pour le mouvement naturel de la Langue de Barbarie: formation de brèches naturelles et dérive Sud Stabilisation et exhaussement de la Langue par plantation de Filaos et pièges à sable 	<p>Le scénario 2 s'inscrit dans le prolongement du scénario 1 :</p> <ul style="list-style-type: none"> Dans un premier temps on laisse l'évolution naturelle de la brèche se faire jusqu'à Potou (position de l'embouchure 2003) à l'instar du scénario 1. Dans un deuxième temps, le mouvement naturel de la Langue de Barbarie (succession de brèches et de dérive sud) est sanctuarisé sur une partie de la langue où les enjeux sont moins présents, et où historiquement les brèches ont été les plus nombreuses. Cette partie de la Langue se situe au sud immédiat de l'agglomération de Degounaye (8 km au nord de la position de l'embouchure de 2003). Sur ce secteur, quand la brèche atteint Potou, on crée artificiellement une brèche plus au nord, qui deviendra la nouvelle embouchure. <p>Les actions à mener intègrent la stabilisation et l'exhaussement du cordon entre Degounaye et Saint-Louis par la plantation de filaos et de pièges à sable de manière à éviter les risques de nouvelle brèche. Le cordon littoral au nord de Saint-Louis est également exhausé et renforcé afin de prévenir les surverses et les risques de brèches associés.</p> <p>La portion de 8 km de langue située entre Potou et Degounaye reproduit le fonctionnement naturel du système : dérive de l'embouchure vers le sud et possibilité de surverses et brèches naturelles sur un secteur. Toutefois, lorsque l'embouchure du fleuve atteindra Potou, une brèche sera créée au sud de Degounaye, au PK 23.</p> <p>Par rapport au scénario 1, le scénario 2 permet de cantonner le fonctionnement naturel de la Langue de Barbarie uniquement sur sa partie sud entre Potou et Degounaye : la possibilité de formation d'une brèche naturelle au nord de Degounaye est évitée par le renforcement du cordon littoral.</p>

2. Mesures complémentaires

De manière à parer aux principaux impacts du scénario 2, une série de mesures complémentaires ont été proposées dans l'étude :

- Le balisage d'un chenal permettant un accès plus sécurisé en mer pour les pêcheurs. Cette mesure pourrait être complétée par la présence d'un bateau de sauvetage, par la formation des pêcheurs à la navigation dans l'embouchure du fleuve et à l'adoption de mesures basiques de sécurité (alerte sur les conditions en mer avant sortie, gilet de sauvetage...),
- Le rechargement en sable sur la Langue de Barbarie, devant le front de mer bâti de Saint-Louis. Cette mesure permettrait que les pêcheurs puissent accoster leurs bateaux sur la plage, comme ils le faisaient avant la brèche de 2003 et participerait également à la protection du front bâti de Saint-Louis. (cf Etude SERRP)
- Une gestion par dragage et rechargement des plages du Gandiolais permettant de limiter l'érosion côtière et de protéger par anticipation les enjeux bâtis de la côte du Gandiolais (habitations, hôtels),
- La protection des principaux enjeux sur le milieu naturel : délocalisation de l'île aux oiseaux,

3. Coût estimé du scénario

Coût global du scénario : 9.1 Milliards FCFA

Mesures complémentaires comprises dans le scénario : 6.44 Milliards FCFA

4. Résumé des résultats

Evolution morphodynamique

À l'état actuel (2019-2020), les résultats obtenus sont similaires à ceux du scénario 1, l'embouchure du fleuve migre vers le sud et s'élargit au cours des premières années. L'embouchure du fleuve est très dynamique et exposée aux vagues.

A l'horizon 2050, les résultats de ShorelineS montrent que l'embouchure sera arrivée juste au sud de Dégounaye, et que sa largeur sera réduite à 1 km maximum (actuellement 6 km de large). Lors des décennies à venir, la migration de l'embouchure vers le sud exposera à l'érosion, un par un, les villages du Gandiolais. L'embouchure du fleuve restera très dynamique avec la migration de l'embouchure vers le sud, et les conditions resteront très éprouvantes pour les pêcheurs qui tentent de passer par l'embouchure pour se rendre en mer.

A l'horizon 2100, l'embouchure sera positionnée entre Potou et Dégounaye, sa position la plus éloignée de Saint-Louis étant Potou.

Risque inondation.

À l'état actuel (2019) les résultats obtenus sont analogues à ceux du scénario 1, Saint-Louis est protégée des inondations jusqu'à l'occurrence centennale. Il n'est pas observé de déversements sur le cordon littoral.

A l'horizon 2050, à l'instar du scénario 1, du fait de la migration de l'embouchure vers le sud, la ville de Saint-Louis se trouve confrontée à des premières inondations dès l'occurrence décennale, pour

des débits de l'ordre de 2300 – 2400 m³/s. Par contre, la ville de Saint-Louis est protégée contre le risque de brèche du cordon littoral jusqu'à une fréquence centennale.

A l'horizon 2100, deux positions d'embouchure ont été étudiées : à Potou ou à Degounaye. Avec une position d'embouchure située à Potou le niveau de protection de Saint-Louis contre les inondations est inférieur à 2 ans. Avec une position d'embouchure située à Degounaye, les cotes d'inondation diminuent de manière significative, mais le niveau de protection contre les inondations de Saint-Louis reste inférieur à 2 ans.

En ce qui concerne les risques d'inondation et de formation de nouvelles brèches induits par les tempêtes, avec la migration de l'embouchure vers le sud dans les décennies à venir, les augmentations des niveaux d'eau dans le fleuve, provoquées par la pénétration de surcote et setup lors d'une tempête, diminueront fortement en amont de l'embouchure, ce qui protégera à terme les villages du Gandiolais et Saint-Louis. En revanche, le front bâti de Saint-Louis situé sur le cordon littoral continuera d'être exposé si des mesures complémentaires ne sont pas mises en œuvre. Avec l'élévation de niveau de la mer, à l'horizon 2050 les effets sur les niveaux d'eau en face de Saint-Louis et les villages du Gandiolais seront modérées (environ 19 cm), mais seront plus alarmant à l'horizon 2100 (+ 66 cm selon RCP 8.5).

Formation nouvelles brèches

La flèche sableuse est faible en hauteur et le risque de formation de nouvelles brèches par les tempêtes sera considérable si aucune action de renforcement du cordon littoral n'est menée.

Du point de vue de la salinité, la propagation d'eau saline dans l'estuaire sera limitée avec une embouchure proche de Potou. Ce positionnement de l'embouchure permettrait donc aux nappes phréatiques de se réalimenter en eau douce, et à terme d'améliorer la qualité des eaux souterraines pour l'irrigation, ce qui sera bénéfique pour les maraichers du Gandiolais. Par contre, l'élévation du niveau de la mer pourraient réduire cet effet positif, car il favorisera une plus forte intrusion de l'eau salée dans l'estuaire. Ces effets sont prédits d'être relativement modérés à l'horizon 2050, mais plus prononcés à l'horizon 2100 – avec des effets négatifs pour l'agriculture.

5. Efficacité du scénario sur les principaux enjeux

Légende : Vert : Scénario favorable, Orange : Scénario peu favorable, Rouge : Scénario défavorable

		2020	2050	2100	
Inondations fluviales Saint Louis	Population exposée pour une crue centennale	8000	188600	222900	En état actuel, du fait de la proximité de l'embouchure du fleuve, Saint-Louis n'est pas menacée par les inondations. En 2050, Saint-Louis est affecté par des inondations avec une fréquence décennale. A l'horizon 2100 retour aux problématiques d'avant la brèche de 2003, et inondations très fréquentes de la ville (une fois tous les 2 ans), ceci, que la position de l'embouchure soit à Potou ou à Degounaye.
Inondations fluviales communes du delta	Population exposée pour une crue centennale	3900	23900	44200	De la même manière que pour Saint-Louis, le delta n'est que faiblement menacé par les inondations à court terme. En 2050 la situation se dégrade et les inondations couvrent une large superficie du delta. En 2100, l'embouchure à Degounaye permet de maintenir le niveau d'exposition de 2050 malgré la montée du niveau marin, tandis qu'une embouchure à Potou aggrave considérablement la vulnérabilité des populations.
Erosion côtière Gandiolais	Sans mesure complémentaire				Dans les décennies à venir, et jusqu'à l'horizon 2076, la migration de l'embouchure vers le sud exposera à l'érosion, la côte et les villages du Gandiolais. Au-delà de 2050 la stabilisation du cordon jusqu'à Degounaye permettra la protection de la partie la plus sensible du littoral Gandiolais.
	Avec mesures complémentaires				Le rechargement des plages et la mise en œuvre de protections localisées permettront de limiter l'impact de l'érosion côtière.
Erosion côtière Saint-Louis par risque de rupture du cordon littoral Nord					Les travaux d'exhaussement du cordon littoral en amont de Saint-Louis permettent de se prémunir de ce risque.
Activité pêche Gandiolais					A court terme, prédominance de l'influence marine. A moyen et long terme, dès 2050, retour à des conditions plus favorables pour la pêche dans le fleuve.
Activité pêche Saint-Louis	Sans mesure complémentaire				La position de la brèche affecte directement le parcours des pêcheurs pour accéder à leur lieu de pêche. Ce parcours est rallongé de 12 km en 2050 par rapport à la situation actuelle. En 2100 le trajet est augmenté de 20 km. Quel que soit l'horizon envisagé, le danger de naufrage durant le franchissement de la barre est présent.
	Avec mesures complémentaires				Le balisage d'un chenal permet d'améliorer la situation pour le passage de la barre. Le rechargement en sable devant le front bâti de Saint Louis permet aux pirogues d'accoster a nouveau sur la plage. La problématique de l'allongement des temps de trajet des pêcheurs demeure.

Activité portuaire					Les conditions hydrodynamiques au droit de l'embouchure du fleuve ne permettent pas la mise en œuvre d'un débouché maritime pour le projet de mise en navigation du fleuve.
Activité agricole Gandiolais					En état actuel, prédominance de l'influence marine. Les intrusions salines sont favorisées et impactent les rendements de l'activité agricole, forçant l'abandon des parcelles cultivées. En 2050, la prédominance de l'influence fluviale permet le retour aux cultures au nord du Gandiolais. Au droit de Degounaye, l'influence marine domine et altère les rendements des cultures. En 2100, la problématique saline concerne tout le sud du Gandiolais, au gré du déplacement naturel et artificiel de l'embouchure entre Degounaye et Potou et l'élévation du niveau de la mer. Les cultures récentes, apparues suite à la désertion du nord du Gandiolais, en seront fortement impactées.
Activité touristique	Sans mesure complémentaire				La destruction de la Langue de Barbarie impacte l'activité touristique principalement par le risque de destruction des hôtels et lodges présents soit sur la Langue de Barbarie soit le long du fleuve.
	Avec mesures complémentaires				La gestion par dragage et rechargement des plages du Gandiolais ainsi que la protection des hôtels de la côte du Gandiolais permettent de limiter les effets sur l'activité touristique.
Milieus naturels	Sans mesure complémentaire				En situation actuelle (2019) le PNLB commence à être impacté par l'élargissement de l'embouchure et sa migration vers le sud. L'île aux Oiseaux, un des principaux enjeux du Parc devrait être atteinte (et détruite) en 2050. Ce scénario est par contre favorable à la préservation de l'Aire Marine Protégée de Saint Louis, qui s'étend des limites de la ville jusqu'à Degounaye.
	Avec mesures complémentaires				Relocalisation de l'île aux oiseaux mais fort impact sur le PNLB par l'élargissement de l'embouchure et sa migration vers le sud.
Marée, submersion marine					A court terme, prédominance de l'influence marine sur le littoral, par la surcote et le setup qui pénètrent dans l'embouchure (et atteindront environ 40 cm au niveau de Saint-Louis). A long terme, l'influence des tempêtes sera moins ressentie à Saint-Louis, par contre l'élévation du niveau de la mer est alarmante à l'horizon 2100.

Efficacité du scénario :

Une des principales mesures du Scénario 2 est de stabiliser et d'exhausser le cordon littoral entre Saint-Louis et Degounaye. Par rapport au scénario 1 (avec mesures complémentaires), l'adoption du scénario 2 permet, à l'horizon 2050, de protéger le littoral Gandiolais sur ce secteur, contre le risque érosion côtière et permet au-delà de cet horizon, du fait d'un retour à la prédominance d'eau douce dans le fleuve, un retour à l'état pré 2003 favorisant l'activité pêche fluviale et l'agriculture au nord de Degounaye.

La gestion d'une localisation de l'embouchure à Degounaye permet au-delà de l'horizon 2050, d'atténuer le risque inondation pour Saint-Louis et le Gandiolais sans cependant réussir à le compenser de manière significative.

Sous réserve de la mise en place de mesures complémentaires le scénario 2 permet d'améliorer les conditions pour les pêcheurs Saint-Louis (balisage d'un chenal, rechargement en sable du front de mer de Saint-Louis), ainsi que d'atténuer les problématiques sur le milieu naturel (délocalisation de l'île aux oiseaux) et touristiques.

Les problématiques restantes sont les suivantes :

- Activité portuaire, pas de débouché possible pour la mise en navigabilité du fleuve,
- Pas ou peu d'impact sur le risque inondation qui devient très présent à l'horizon 2050.

Ce scénario s'inscrit dans une Protection long terme du Gandiolais (2050)

6. Complexité technique et faisabilité

Complexité technique et faisabilité :

Le renforcement du cordon entre Saint-Louis et Dégounaye (stabilisation et exhaussement), pour conserver son efficacité (et éviter le risque de brèche naturelle), devra être contrôlé après chaque tempête et chaque crue importante.

7. Montant des travaux (Millions FCFA) et échéances de réalisation

	2020-2035	2035-2050	>2050	Coût annuel d'exploitation	Maître d'ouvrage
Scénario de base					
Exhaussement cordon littoral Nord Saint-Louis	1726			173	OMVS-SOGENAV ?
Stabilisation et exhaussement de la Langue de Barbarie entre Saint-Louis et Degounaye	460	460			PNLB ?
Gestion de la brèche à Degounaye					OMVS-SOGENAV ?
Mesures complémentaires					
Balisage chenal pêcheur	200			67	ANAM ?
Rechargement des plages du Gandiolais	2555	975	1410		DEEC ?
Délocalisation île aux oiseaux	1300				PNLB ?

8. Résumé de la modélisation

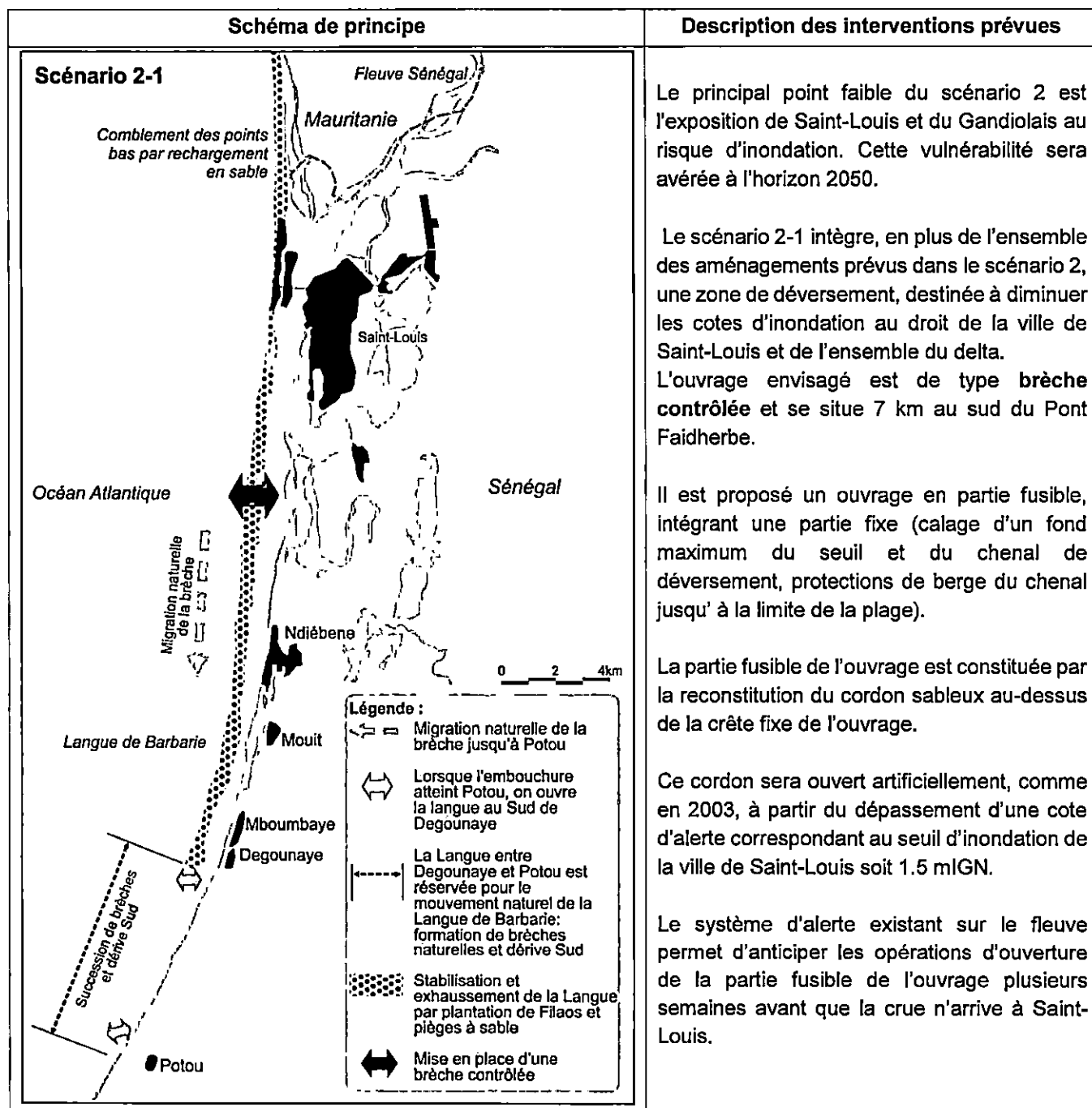
Le modèle Infoworks a été utilisé pour étudier les risques d'inondation fluviale (paragraphe 8.1.3). Les modèles maritimes n'ont pas été mobilisés pour le scénario 2 de base. Le modèle Delft3D a été mobilisé uniquement pour les analyses de l'influence d'une brèche contrôlée sur le cordon littoral (variante 2.1).

9. Possibilités d'évolution du scénario ? (Vers le scénario 5...)

Un moyen d'assurer un niveau de protection plus important pour la ville de Saint Louis serait d'adopter un autre mode opératoire que celui prévu dans le scénario 2. Le système d'alerte en fonction sur le fleuve permet d'anticiper l'importance de la crue d'hivernage plusieurs semaines à l'avance. La création d'une brèche artificielle à Dégounaye en cas de fortes crues (> 5 à 10 ans), permettrait de diminuer le risque inondation sur la ville de Saint Louis et le Gandiolais.

0.1.3 Résumé du scénario 2-1 – Mise en place d'une brèche contrôlée en aval de Saint-Louis

1. Résumé des interventions



2. Mesures complémentaires

Les mesures complémentaires sont celles du scénario 2 de base.

3. Coût estimé du scénario

Coût global du scénario 23 Milliards de FCFA

(Dont coût de la brèche contrôlée : 14 Milliard de FCFA)

(Dont mesures complémentaires scénario 2 : 6.44 Milliards de FCFA)

4. Résumé des résultats

Risque inondation.

Des modélisations ont été réalisées pour des longueurs de brèche contrôlées de 1500 et 3000m.

A l'horizon 2050, et pour une crue centennale, les cotes d'inondation chutent respectivement de 18 et 26 cm pour des longueurs de brèche de 1500 et 3000m. Néanmoins, à l'occurrence décennale, l'impact sur les inondations est très limité avec une diminution maximum de 10 cm pour une brèche de 3000 m. En outre, quelle que soit la longueur de la brèche contrôlée, les niveaux d'inondation calculés sont supérieurs au seuil d'inondation des quartiers de Saint-Louis (1.50 mIGN) dès l'occurrence trentennale.

A l'horizon 2100, dans l'hypothèse d'une embouchure située à Dégounaye, les modélisations mettent en évidence un impact très faible de la brèche contrôlée sur les côtes d'inondations à Saint-Louis quelle que soit l'occurrence et la largeur de la brèche.

Dans l'hypothèse d'une embouchure située à Potou, l'impact de la brèche contrôlée est plus prononcé, de 25 cm à 35 cm en fonction de l'occurrence des crues pour une brèche de largeur 1500 m. Néanmoins l'impact hydraulique obtenu, ne permet pas d'amener la ligne d'eau sous la cote de protection de Saint-Louis, pour aucune des occurrences.

La brèche contrôlée étudiée permet donc de limiter les hauteurs de submersion sans pour autant éviter les inondations de la ville de Saint Louis et des communes du delta.

Risque morphodynamique

Le modèle Delft3D a analysé l'impact d'un déversoir sur la stabilité du cordon littoral. En théorie, le transport littoral peut être affecté par les forts courants créés par l'écoulement des eaux fluviales, cependant, du fait que le déversoir sera en fonction sur une période relativement courte, il est prédit par le modèle Delft3D une influence limitée sur le développement du littoral à long terme. Il est recommandé d'effectuer des mesures complémentaires de renforcement du cordon littoral avec des rechargements de sable, et la mise en œuvre de structures en dur autour du déversoir, afin de limiter les problèmes d'affouillement.

En ce qui concerne les risques d'inondation et de formation de nouvelles brèches induits par les tempêtes, il est à noter que l'effet des tempêtes sur la zone autour du déversoir n'a pas été étudié explicitement. Dans ce cas, les vagues pourront surpasser la déversoir (fixé à + 1 m IGN) et entrer dans le fleuve, et éroder ainsi la côte fluviale située directement derrière le déversoir. Si cet aménagement devait être retenu des protections supplémentaires de la côte devront être mises en place.

5. Efficacité du scénario sur les principaux enjeux

Les effets hydrauliques de la brèche contrôlée ne sont pas suffisants pour modifier les impacts principaux mis en évidence dans le scénario 2 de base. L'efficacité globale du scénario 2-1 sur les principaux enjeux est la même que celle du scénario 2 de base.

6. Complexité technique et faisabilité

La mise en place d'une brèche contrôlée au Sud de Saint Louis sera complexe. Cet ouvrage fixe disposera de peu de possibilité d'adaptation face à une côte dynamique et très mobile. Les risques sont liés à l'évolution générale du trait de côte mettant en péril les ancrages de l'ouvrage. En particulier les effets du projet Tortue ou la protection des zones côtières de Saint Louis, peuvent impacter le littoral sur ce secteur.

Le système d'alerte de crue mis en place sur le fleuve permet d'anticiper (délais de 3 semaines à 1 mois ?) sur les opérations de déblais d'une partie de la section fusible de l'ouvrage. Ceci nécessitera néanmoins un temps de réaction rapide des autorités en charge, et qu'il soit anticipé la mobilisation d'entreprises disposant des moyens en matériels nécessaires.

Le fonctionnement de l'ouvrage suppose que la partie fusible du cordon couronnant l'ouvrage fixe, soit détruite par l'action des déversements du fleuve à partir de saignées réparties le long du déversoir. Ceci devra être vérifié par des modélisations spécifiques avant de passer en phase travaux.

7. Montant des travaux (Milliards de FCFA) et échéance de réalisation

	2020-2035	2035-2050	>2050	Maitre d'ouvrage
Mise en œuvre de la brèche contrôlée		14		OMVS - SOGENAV ?

8. Résumé de la modélisation

Le modèle Infoworks a effectué les analyses sur les niveaux d'inondation avec la mise en place d'une déversoir (paragraphe 8.2.3). Le modèle Delft3D a analysé l'impact d'une telle structure sur la stabilité du cordon littoral (paragraphe 8.2.2).

0.1.4 Résumé du scénario 2-2 – Actions de diminution du risque inondation sur Saint-Louis

1. Résumé des interventions

Schéma de principe	Description des interventions prévues
<p>Scénario 2-2</p>	<p>Ce scénario intègre dans le scénario 2 de base, des travaux supplémentaires visant à la protection de la ville de Saint-Louis contre les inondations.</p> <p>Le diagnostic réalisé au §5.2, met en évidence que sur les secteurs de l'Ile et de Sor (qui abritent 75% de la population en zone inondable de Saint-Louis), les ouvrages de protection déjà en place assurent une protection jusqu'à une cote du fleuve de 2 mIGN :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Pour 70% du linéaire des ouvrages de l'Ile, ■ Pour 62 % du linéaire des ouvrages de Sor. <p>Le niveau de protection peut être homogénéisé jusqu'à la cote 2 mIGN en mettant à niveau et confortant :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Un linéaire de 2.2 km de quais sur l'Ile, ■ Un linéaire de 6.7 km de digues sur Sor. <p>Sur le secteur de Sor, les analyses menées mettent en évidence l'importance de renforcer en priorité la digue de Darou.</p> <p>Ces travaux doivent également prendre en compte la réhabilitation des quais de l'Ile, qui sont en de nombreux secteurs fortement dégradés et ne sont pas à même de jouer leur rôle de protection anti-inondation. De la même manière, les ouvrages d'endiguement de Sor devront faire l'objet d'un diagnostic géotechnique de manière à s'assurer de leur stabilité et éviter les risques de dysfonctionnement en période de crue (la digue de Darou a cédé lors des inondations de 1999).</p>

2. Mesures complémentaires

Les mesures complémentaires sont celles du scénario 2 de base.

3. Coût estimé du scénario

Coût global du scénario : 37 Milliards de FCFA

(Dont coût des protections des quartiers de Sor et de l'Ile: 28 Milliards de FCFA)

(Dont mesures complémentaires scénario 2 : 6.44 Milliards de FCFA)

4. Résumé des résultats

Risque inondation.

A l'horizon 2050, les travaux permettent un niveau de protection centennal pour les quartiers de l'Ile et de Sor (il n'était que de 10 ans dans le scénario 2 de base).

A l'horizon 2100, l'aménagement conserve son efficacité lorsque l'embouchure est située à Dégounaye (protection centennale). Le niveau de protection est abaissé à une occurrence de 5 à 10 ans si l'embouchure évolue jusqu'à Potou.

5. Efficacité du scénario sur les principaux enjeux

Les effets hydrauliques des travaux apportent une nette amélioration sur la protection contre les inondations des quartiers de l'Ile et de Sor. L'efficacité globale du scénario 2-2 sur les autres enjeux est la même que celle du scénario 2 de base.

6. Complexité technique et faisabilité

Complexité technique et faisabilité :

Les travaux de protection concernent uniquement les quartiers de Sor et de l'Ile (75% de la population de Saint Louis située en zone inondable).

La principale incertitude de cette variante est relative à l'estimation de son coût. Au stade de l'étude nous ne disposons pas des éléments techniques (mode de fondation des quais de Saint Louis, géotechnique sur les digues de protection existantes...) permettant d'affiner notre estimation. A notre connaissance ces éléments n'existent pas.

Le quartier de l'Ile étant inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO, des contraintes complémentaires seront probablement à prendre en compte pour la définition finale des travaux.

La problématique du ruissellement pluvial à l'intérieur des zones endiguées devra être prise en compte dans la définition des aménagements. (Etude SERRP en cours)

7. Montant des travaux (Millions de FCFA) et échéance de réalisation

	2020-2035	2035-2050	>2050	Maitre d'ouvrage
Mise en œuvre de la protection des quartiers de l'Ile et de Saint Louis		27900		ADM ?

8. Résumé de la modélisation

Modélisation de l'hydraulique fluviale à partir du modèle INFOWORKS

9. Possibilités d'évolution du scénario ? (Vers le scénario 5...)

Le seul moyen d'assurer un niveau de protection centennal à l'horizon 2100 serait d'adopter un autre mode opératoire que celui prévu dans le scénario 2. Le système d'alerte en fonction sur le fleuve permet d'anticiper l'importance de la crue d'hivernage plusieurs semaines à l'avance. Son exploitation permet d'assurer une position de l'embouchure à Dégounaye en cas de fortes crues (> 5 à 10 ans), par la création d'une brèche artificielle au moment opportun. Dans cette hypothèse les quartiers de l'île et de Sor seraient protégés en 2100 jusqu'à une crue centennale.

0.1.5 Résumé du scénario 2-3 – Mise en œuvre d'une liaison fluvio-maritime pérenne au droit de l'embouchure pré-2003

1. Résumé des interventions

Schéma de principe	Description des interventions prévues
<p>Scénario 2-3</p> <p>Comblement des points bas par rechargement en sable</p> <p>Fleuve Sénégal</p> <p>Mauritanie</p> <p>Saint-Louis</p> <p>Océan Atlantique</p> <p>Ndiébène</p> <p>Mouit</p> <p>Langue de Barbarie</p> <p>Sénégal</p> <p>Mboumbaye</p> <p>Degounaye</p> <p>By-pass</p> <p>Potou</p> <p>Légende :</p> <ul style="list-style-type: none"> Fermeture de l'embouchure actuelle Embouchure localisée sur sa position pré-2003 Dragage du fleuve à la cote -7,5 m IGN Stabilisation et exhaussement de la Langue par plantation de Filaos et pièges à sable Liaison fluvio-maritime (digue en mer) 	<p>Le scénario 2-3 introduit la possibilité de créer un ouvrage permettant une liaison fluvio-maritime pérenne à l'extrémité sud de la Langue de Barbarie par la mise en place de digues en mer.</p> <p>L'embouchure du fleuve est donc fixée au droit de Potou et la brèche actuelle colmatée.</p> <p>Les ouvrages sont de même type que ceux retenus pour le projet portuaire de l'OMVS (cf Scénario 3).</p> <p>Un bypass permettant de rétablir le transport littoral devra être mis en place pour éviter les problématiques d'érosion côtières au sud de Potou.</p> <p>Le cordon littoral est conforté et exhausé :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Au Nord de Saint Louis sur un linéaire de 15 km. ■ Au Sud de Saint Louis sur un linéaire de 31 km. <p>Le dragage du fleuve jusqu'à son embouchure est également prévu dans cette variante. Le dragage assure une cote minimale de -7.5 m IGN sur une largeur de 100 m permettant un accès facilité à la mer. Le volume de dragage nécessaire est de 4.1 millions de m³.</p>

2. Mesures complémentaires

Ce scénario ne comprend pas de mesures complémentaires

3. Coût estimé du scénario

Coût global du scénario : 247 Milliards de FCFA

4. Résumé des résultats

Evolution morphodynamique

Les impacts locaux seront très comparables aux impacts étudiés pour le scénario d'une embouchure contrôlée aux abords de Saint-Louis, comme décrit aux §9.1.1 et 9.1.1 : en l'absence de by-pass, une forte accrétion au nord et une érosion aussi forte au sud du port auront lieu.

Risque inondation.

A l'horizon 2050, les cotes d'inondation à Saint-Louis (comprises entre 1.31 et 1.43 mIGN pour le débit biennal et de 2.08 mIGN pour le débit centennal) sont plus importantes que pour le scénario 2 de base (comprises entre 1.26-1.38 mIGN pour le débit biennal et de 1.90 mIGN pour le débit centennal). L'installation de l'embouchure à Potou dès 2050 entraîne un impact négatif sur les niveaux d'inondation en comparaison du positionnement naturel à Dégounaye attendu en 2050.

A l'horizon 2100, la configuration étudiée est plus pénalisante que pour une embouchure à Dégounaye pour laquelle les cotes d'inondation à Saint-Louis sont plus faibles (+ 8 cm pour la crue centennale pour le scénario étudié).

En revanche, ce scénario présente une amélioration comparée au scénario 2 de base avec l'embouchure à Potou. Les cotes d'inondation sont sensiblement plus faibles, entre -9 cm pour le débit biennal et -28 cm pour le débit centennal.

Du point de vue risque inondation, pour les deux horizons d'étude, la variante étudiée n'apporte pas d'amélioration.

Du point de vue de la salinité, la propagation d'eau saline dans l'estuaire sera limitée avec une embouchure proche de Potou. Ce positionnement de l'embouchure permettrait donc aux nappes phréatiques de se réalimenter en eau douce, et à terme d'améliorer la qualité des eaux souterraines pour l'irrigation, ce qui sera bénéfique pour les maraichers du Gandiolais.

5. Efficacité du scénario sur les principaux enjeux

Légende : Vert : Scénario favorable, Orange : Scénario peu favorable, Rouge : Scénario défavorable

		2020	2050	2100	
Inondations fluviales Saint-Louis	Population exposée pour une crue centennale		209600	190600	Dans le scénario de base, en état actuel, du fait de la proximité de l'embouchure du fleuve, Saint-Louis n'est pas menacée par les inondations. Dans le cas où le scénario 2-3 est mis en œuvre avant 2050 les inondations sur Saint Louis seront aggravées par rapport à l'état actuel. En 2050, Saint-Louis est affecté par des inondations avec une fréquence d'une fois tous les 5 ans. A l'horizon 2100 retour aux problématiques d'avant la brèche de 2003, et inondations très fréquentes de la ville (une fois tous les 2 ans), ceci, que la position de l'embouchure soit à Potou ou à Degounaye.
Inondations fluviales communes du delta	Population exposée pour une crue centennale		34100	27300	En 2050, le positionnement de l'embouchure au droit de Potou augmente considérablement l'inondabilité du delta. En 2100, le dragage du fleuve permet d'améliorer légèrement la situation par rapport à 2050, mais l'inondabilité demeure supérieure à une configuration d'embouchure à Degounaye.
Erosion côtière Gandiolais					La mise en place d'une embouchure fixe à Potou, le colmatage de la brèche existante, permettent de stopper les érosions côtières entre Saint Louis et Potou. Mais de nouvelles érosions sont à prévoir à l'aval de Potou si un bypass pérenne n'est pas mis en place.
Erosion côtière Saint-Louis par risque de rupture du cordon littoral Nord					Les travaux d'exhaussement du cordon littoral en amont de Saint-Louis permettent de se prémunir de ce risque.
Activité pêche Gandiolais					Retour aux conditions pré-2003 pour la pêche dans le fleuve.
Activité pêche Saint-Louis					La position de la brèche affecte directement le parcours des pêcheurs pour accéder à leur lieu de pêche. Ce parcours est rallongé de 36 km par rapport à la situation actuelle. Le danger de naufrage durant le franchissement de la barre est très fortement limité.
Activité portuaire					Le scénario autorise la mise en œuvre d'un débouché maritime pour le projet de mise en navigation du fleuve.
Activité agricole Gandiolais					Retour aux conditions pré-2003 pour l'agriculture dans le Gandiolais.

Activité touristique				Retour aux conditions pré-2003 pour l'activité touristique. Amélioration de la fréquentation touristique liée au projet de navigation fluviale.
Milieu naturel				Retour aux conditions pré-2003, favorables pour le Parc National de la Langue de Barbarie et l'Aire Marine Protégée de Saint Louis.
Marée, submersion marine				Avec le colmatage de l'embouchure actuelle, l'influence des tempêtes sera moins ressentie à Saint-Louis, par contre l'élévation du niveau de la mer est alarmante à l'horizon 2100.

Efficacité du scénario :

Par rapport au scénario 2, le scénario 2-3 permet d'améliorer la situation pour de nombreux enjeux. En particulier dans le Gandiolais pour l'activité pêche, l'agriculture et la problématique érosion côtière.

Le scénario permet un débouché maritime pour le projet de mise en navigation du fleuve et les impacts sur le Parc National de la Langue de Barbarie sont limités.

Les effets sur les pêcheurs de Saint Louis sont plus mitigés. Le scénario permet de limiter le nombre de naufrages (et donc la mortalité des pêcheurs) mais les temps de trajet pour accéder aux zones de pêche situées en Mauritanie est fortement rallongé (près de 40km par rapport à l'état actuel).

Par rapport à la problématique des inondations fluviales, le scénario entraîne une aggravation des inondations sur Saint Louis à court terme (dès que le projet sera mis en œuvre), ainsi que pour les deux horizons d'étude pris en compte.

6. Complexité technique et faisabilité

Complexité technique et faisabilité :

Le scénario 2-3 inclut la mise en œuvre d'un bypass permettant de rétablir le transport sédimentaire. Si ce bypass est insuffisant en terme de quantité ou interrompu, des risques de destruction des ouvrages portuaires en mer existent, ainsi que le développement de fortes érosion pour le littoral au sud de Potou.

L'altitude du cordon entre Saint-Louis et Potou devra être contrôlée après chaque tempête et avant chaque saison des pluies. L'investissement important que représente la mise en place d'un port à l'extrémité Sud de la Langue de Barbarie invite à la prudence quant aux effets potentiels d'une défaillance du système produit par la formation d'une brèche naturelle.

Dans cette configuration, la brèche naturelle à l'amont viendrait court-circuiter l'embouchure du fleuve à Potou. Ceci mènerait à rendre inopérant les ouvrages portuaires. A terme, la migration naturelle de l'embouchure viendrait détruire ces ouvrages.

Il est important de noter que de grands volumes de sable seront nécessaires pour colmater l'embouchure actuelle du fleuve (une première estimation porte sur un volume de 18 Millions m³). Des études antérieures ont montré que la zone au large de Saint-Louis est constituée de matériaux très fins, qui ne sont pas exploitables pour le rechargement du sable. La disponibilité du sable pourrait donc être un facteur limitant pour ce scénario.

7. Montant des travaux (Millions FCFA) et échéancier de réalisation

	2020-2035	2035-2050	>2050	Coût d'exploitation annuel	Maitre d'ouvrage
Exhaussement cordon littoral Nord Saint-Louis	1726			173	OMVS-SOGENAV ?
Stabilisation et exhaussement de la Langue de Barbarie entre Saint-Louis et Potou	1240			124	Opérateur portuaire
Colmatage brèche existante	50400				Opérateur portuaire
Dragage du fleuve	15815				Opérateur portuaire
Ouvrages en mer	178000			3333	Opérateur portuaire

8. Résumé de la modélisation

Le modèle Infoworks a été utilisé pour étudier les risques d'inondation fluviale (paragraphe 8.4.2). Les modèles maritimes n'ont pas été mobilisés pour ce scénario.

9. Possibilités d'évolution du scénario ? (Vers le scénario 5...)

Mise en place des ouvrages de protection contre les inondations de Saint Louis (Quartiers de l'Île et de Sor)

0.1.6 Résumé du scénario 2-4 – Un wharf de pêche

1. Résumé des interventions

Schéma de principe	Description des interventions prévues
<p>Scénario 2-4</p> <p>Comblement des points bas par rechargement en sable</p> <p>Mauritanie</p> <p>Fleuve Sénégal</p> <p>Saint-Louis</p> <p>Océan Atlantique</p> <p>Migration naturelle de la brèche</p> <p>Ndiébène</p> <p>Mouit</p> <p>Mboumbaye</p> <p>Degounaye</p> <p>Potou</p> <p>Lingue de Barbarie</p> <p>Brèches naturelles et dérive Sud</p> <p>Légende :</p> <ul style="list-style-type: none"> Migration naturelle de la brèche jusqu'à Potou Lorsque l'embouchure atteint Potou, on ouvre la langue au Sud de Degounaye La Langue entre Degounaye et Potou est réservée pour le mouvement naturel de la Langue de Barbarie: formation de brèches naturelles et dérive Sud Stabilisation et exhaussement de la Langue par plantation de Filaos et pièges à sable Brise-lame/Wharf de pêche 	<p>Ce scénario intègre dans le scénario 2 de base, des travaux supplémentaires visant à améliorer les conditions de mise à l'eau des pêcheurs et diminuer les risques de naufrage au passage de la barre. Il est proposé de mettre en place un wharf permettant un meilleur accès pour les pêcheurs.</p> <p>Cet aménagement, retenu dans le rapport du COSEC de 2002, n'offre pas de nouvel accès mer/fleuve, et ne permet d'améliorer la situation que pour le secteur de la pêche artisanale de Saint Louis.</p> <p>L'ouvrage envisagé est de type wharf : structure sur pieux avec voie de roulement, prolongée d'un quai brise-lames pour la protection des opérations de débarquement contre l'agitation.</p> <p>Cet aménagement permet de sécuriser l'accostage et le débarquement des grandes pirogues au large de la barre ainsi que de sécuriser le passage de la barre et l'accostage à la plage des plus petites pirogues, dans la zone d'ombre du quai brise-lames.</p> <p>Les dimensions de l'ouvrage sont les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Une jetée de 250 m permettant d'atteindre la cote -4 mCM (-5 mIGN), ■ Un quai brise-lames de longueur de longueur 300 m. <p>Ce wharf doit être positionné au sud des zones urbanisées de Saint Louis pour ne pas exposer le front de mer bâti de la ville à l'érosion littorale.</p>

2. Mesures complémentaires

Les mesures complémentaires sont celles du scénario 2 de base.

3. Coût estimé du scénario

Coût du wharf : 8.7 Milliards de FCFA

4. Résumé des résultats

Risque inondation

Cet ouvrage n'a pas d'impact sur le risque d'inondation lié aux crues du fleuve.

Impact sur la dynamique côtière

La structure devra être la plus transparente possible, par exemple construite sur des piliers, pour laisser passer les vagues et les sédiments le long de la côte. Une telle structure a été mise en œuvre avec succès à Grand Bassam, en Côte d'Ivoire ou à Bargny au Sénégal. Néanmoins, elle servirait seulement pour le débarquement des prises de poisson, sous conditions peu protégées, et ne permettrait pas de laisser les pirogues dans un environnement sûr.

Le wharf n'aurait pas un gros impact sur la dynamique côtière s'il était construit sur piles ou treillis ; en revanche, s'il était construit comme une digue fermée (comme cela est prévu pour la partie en eau profonde), l'impact serait sévère. Une telle structure fermée bloquerait les vagues et créerait des gradients dans le transport des sédiments le long de la côte, provoquant une grave érosion pouvant, à terme, entraîner une brèche dans le cordon littoral vers le sud-est du wharf.

5. Efficacité du scénario sur les enjeux

Sur l'enjeux pêche artisanale de Saint Louis.

Deux modes de fonctionnement existent pour les pêcheurs:

- Soit les grandes barques accostent sur les quais de St Louis,
- Soit de petites pirogues assurent l'approvisionnement des grandes barques au large (équipage,avitaillement, glace, matériel de pêche, moteurs, ...) et rejoignent la terre ferme en traversant la barre.

La majorité des naufrages entraînant des décès pour les pêcheurs sont liés au naufrage des grandes barques (non équipées de matériel de sécurité) au retour des campagnes de pêche en Mauritanie, au passage de la barre, alors que leur cargaison est pleine et leur ligne de flottaison très proche du niveau de la mer. Il est enregistré la disparition d'une vingtaine de pêcheurs chaque année

La mise en place d'un wharf ne permettra de répondre qu'en partie aux préoccupations des pêcheurs pour qui il est plus économique de rejoindre les quais de Saint Louis pour assurer leurs travaux de déchargement, d'approvisionnement et de maintenance.

Sur le milieu naturel.

Le wharf est positionné au centre de l'Aire Marine Protégée de Saint Louis. De forts impacts environnementaux sont donc à redouter.

6. Complexité technique et faisabilité

Complexité technique et faisabilité :

La construction du wharf ne présente pas de difficultés techniques particulières.

Les impacts de cet ouvrage sur la dynamique littorale peuvent par contre conduire à favoriser la formation de brèches au sud immédiat de Saint Louis.

Les impacts sur l'Aire Marine Protégée peuvent remettre en cause la faisabilité du projet.

7. Montant des travaux (Millions FCFA) et échéance de réalisation

	2020-2035	2035-2050	>2050	Maître d'ouvrage
Mise en œuvre d'un wharf au sud de Saint Louis	8700			ANAM?

8. Résumé de la modélisation

Ce scénario n'a pas fait l'objet de modélisations spécifiques.

9. Possibilités d'évolution du scénario ? (Vers le scénario 5...)

Un alternative plus prometteuse que le wharf, serait de mettre en place un grand rechargement en sable devant Saint Louis pour que les pêcheurs puissent accoster leurs bateaux sur la plage, comme ils le faisaient avant la brèche de 2003.

Cette solution sera étudiée dans le cadre du SERRP.

0.1.7 Résumé du scénario 3 – Embouchure contrôlée aux abords de Saint Louis

1. Résumé des interventions

Schéma de principe	Description des interventions prévues
<p>Scénario 3</p> <p>Comblement des points bas par rechargement en sable</p> <p>By-pass</p> <p>Océan Atlantique</p> <p>Ndiébène</p> <p>Mouit</p> <p>Langue de Barbarie</p> <p>Mboumbaye</p> <p>Degounaye</p> <p>Potou</p> <p>Légende :</p> <ul style="list-style-type: none"> Embouchure fixée à l'aval de Saint-Louis Fermeture de l'embouchure actuelle Ouvrages en mer : Courts, Longs Dragage du fleuve à la cote -7,5 m IGN Stabilisation et exhaussement de la Langue par plantation de Filaos et pièges à sable 	<p>Dans le cadre de ce scénario, il est envisagé de fixer l'embouchure du fleuve au sud immédiat de Saint-Louis, au droit de l'emplacement prévu dans le projet OMVS, à environ 7,3 km du pont Faidherbe.</p> <p>Dans le projet de l'OMVS, il est prévu de construire un <u>port de pêche</u> et un <u>port de plaisance</u>. Egalement des ouvrages d'accessibilité, ainsi qu'un chenal de navigation et une passe d'accès sont prévus.</p> <p>Afin d'analyser l'influence de ces constructions sur la zone d'étude, les dimensions des ouvrages d'accessibilité, ainsi que la bathymétrie du chenal de navigation et de la passe d'accès, comme définis dans l'étude APD de la SOGENAV, sont intégrés dans les modèles numériques.</p> <p>Les caractéristiques de l'ouvrage sont les suivantes (Error! Reference source not found.):</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Passe d'entrée de largeur 800 m, draguée à la cote - 3 mIGN ■ Chenal de navigation de largeur 100 m, draguée à la cote - 8.5 mIGN ■ La nouvelle passe sera fixée et protégée par deux digues en talus, avec des longueurs d'environ 1,7 km et 0,9 km, respectivement au Nord et au Sud. <p>L'embouchure actuelle du fleuve est colmatée.</p> <p>Le cordon littoral est conforté et exhausé :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Au Nord de Saint Louis sur un linéaire de 15 km. ■ Au Sud de Saint Louis sur un linéaire de 31 km <p>Le projet de port de l'OMVS intègre des ouvrages en mer conséquents, ayant un rôle important sur la dynamique côtière. L'étude du scénario 3 intègre d'autres configurations d'ouvrages en mer pour tenter de diminuer leur impact sur la dynamique côtière.</p> <p>Des actions de by-passing seront nécessairement associées au scénario 3. Un risque rémanent existera en cas d'arrêt de ces actions pouvant conduire à la destruction des ouvrages portuaires et de la Langue de Barbarie.</p>

2. Mesures complémentaires

Ce scénario ne comprend pas de mesures complémentaires

3. Coût estimé du scénario

Coût global du scénario : 231 Milliards de FCFA

4. Résumé des résultats

Evolution morphodynamique

Les brise-lames du port et les forts courants bloquent le transport de sédiment littoral, ce qui entraîne une sédimentation en amont et une érosion en aval qui, avec le temps, **entraîneront une brèche au sud du port après 5 ans environ**. Avec la migration de la brèche au sud, la Langue de Barbarie sera amenée à disparaître totalement. Ceci se caractérise également par des **dommages importants, notamment pour les villages du Gandiolais**. Cet impact négatif du port peut être évité par le contournement artificiel du sable (pompage ou dragage du sable de la plage au nord du port vers la plage au sud du port). Le taux de bypass est probablement proche du transport littoral de 0.8 à 1.2 Mm³/an, (1.4 Mm³/an est estimée par le modèle Delft3D).

Plusieurs variantes de la conception originale du port ont été testées. Quatre de ces variantes sont examinées et présentées en détail dans le rapport (paragraphe 9.1.2), avec des brise-lames plus longs, plus courts et plus espacés, ainsi que sans brise-lames. **Même une embouchure fixe sans brise-lames nécessitera une by-pass de sédiments très important, du même ordre de grandeur que dans la conception du port actuel de l'OMVS.**

Risque inondation.

A l'horizon 2050, les principaux quartiers de Saint Louis sont protégés contre les inondations. Pour une crue centennale les niveaux atteints par le fleuve sont de 1.39 mIGN soit une cote contenue par les ouvrages de protection existants. Il n'est pas observé de déversements sur le cordon littoral au Nord de Saint Louis.

A l'horizon 2100, la fréquence d'inondation de Saint Louis est inférieure à 2 ans. L'augmentation du niveau de la mer se traduit par de fortes cotes d'inondations à Saint Louis (>1.7 mIGN). Il n'est pas observé de déversements importants sur le cordon littoral en amont de Saint Louis.

Inondation et formation de nouvelles brèches induites par les tempêtes.

Compte tenu de la largeur d'ouverture limitée du port et de la protection contre les impacts des vagues par les brise-lames, une intrusion très limitée de surcote et setup induite par les vagues est prévue dans l'embouchure du fleuve. Ainsi, les villages du Gandiolais et la ville de Saint-Louis seront protégés des tempêtes. Cependant, les quartiers Saint-Louisiens de la Langue de Barbarie, continueront à être exposés, si aucune mesure de protection supplémentaire n'est mise en œuvre.

A l'horizon 2050 et 2100

Avec l'élévation de niveau de la mer, à l'horizon 2050 les effets sur les niveaux d'eau en face de Saint-Louis et des villages du Gandiolais seront modérés (environ 19 cm), mais seront plus alarmant à l'horizon 2100 (+ 66 cm selon RCP 8.5).

Du point de vue de la salinité.

Du fait de la configuration du port, l'intrusion d'eau salée dans l'embouchure, puis dans les eaux souterraines, peut provoquer des effets négatifs notamment sur l'agriculture comme c'est le cas actuellement. Une augmentation considérable de la salinité dans le fleuve en amont du port est notée par rapport à la situation actuelle. Ceci est associée à la relocalisation de l'embouchure du fleuve vers le nord. Au contraire, les concentrations de salinité dans la zone au sud du port, au niveau des


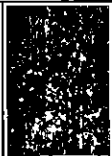




villages du Gandiolais diminuent distinctement, lors de forts débits, mais restent élevées pendant la période sèche.

A l'horizon 2050 et 2100

L'impact de l'élévation du niveau de la mer sur les concentrations de salinité n'est visible que lors de faibles débits fluviaux. Une légère augmentation de la salinité dans l'estuaire peut être observée à l'horizon 2050, tandis que l'impact est considérable à l'horizon 2100.

5. Efficacité du scénario sur les principaux enjeux

Légende : Vert : Scénario favorable, Orange : Scénario peu favorable, Rouge : Scénario défavorable		2020	2050	2100	
Inondations fluviales Saint-Louis	Population exposée pour une crue centennale		7500	100600	La ville de Saint Louis est protégée contre les inondations jusqu'à l'horizon 2050. A l'horizon 2100 la ville est à nouveau exposée aux inondations du fait de la montée des niveaux de la mer.
Inondations fluviales communes du delta	Population exposée pour une crue centennale		3500	15600	Les communes du delta sont protégées contre les inondations jusqu'à l'horizon 2050. A l'horizon 2100 les communes sont à nouveau exposées aux inondations du fait de la montée des niveaux de la mer.
Erosion côtière Gandiolais					La mise en place d'une embouchure fixe au Sud de Saint Louis, le colmatage de la brèche existante, permettent de stopper les érosions côtières entre Saint Louis et Potou. Mais de nouvelles érosions sont à prévoir si un bypass pérenne n'est pas mis en place.
Erosion côtière Saint-Louis par risque de rupture du cordon littoral Nord					Les travaux d'exhaussement du cordon littoral en amont de Saint-Louis permettent de se prémunir de ce risque.
Activité pêche Gandiolais					A court et long terme, prédominance de l'influence marine dans le fleuve impactant fortement l'activité pêche fluviale.
Activité pêche Saint-Louis					Importante amélioration des conditions pour les pêcheurs de Saint Louis : le danger de naufrage durant le franchissement de la barre est très fortement limité, et le parcours pour accéder au lieu de pêche est le plus court de tous les scénarios étudiés.
Activité portuaire					Le scénario autorise la mise en œuvre d'un débouché maritime pour le projet de mise en navigation du fleuve.
Activité agricole Gandiolais					A court et long terme, prédominance de l'influence marine dans le fleuve impactant fortement l'activité agricole.
Activité touristique					Retour aux conditions pré-2003 pour l'activité touristique. Amélioration de la fréquentation touristique liée au projet de navigation fluviale.

Milieu naturel				Dégradation de la diversité des habitats du Parc National de la Langue de Barbarie. Travaux conservatoires pour conserver les spécificités de l'île aux oiseaux. Impact important sur l'Aire Marine Protégée de Saint Louis.
Marée, submersion marine				Compte tenu de la largeur d'ouverture limitée du port et de la protection contre les impacts des vagues par les brise-lames, une intrusion très limitée de surcote et setup induite par les vagues est prévue dans l'embouchure du fleuve. Ainsi, les villages du Gandiolais et la ville de Saint-Louis seront protégés des tempêtes. Avec l'élévation de niveau de la mer, à l'horizon 2050 les effets sur les niveaux d'eau en face de Saint-Louis et des villages du Gandiolais seront modérés (environ 19 cm), mais seront plus alarmant à l'horizon 2100 (+ 66 cm selon RCP 8.5).

Efficacité du scénario :

Le scénario 3 présente des impacts positifs pour de nombreux enjeux : l'activité pêche sur Saint Louis, le tourisme et la possibilité de mise en place d'un débouché pour le projet de mise en navigabilité du fleuve.

Par rapport à la problématique des inondations fluviales, le scénario permet la protection de Saint Louis jusqu'à l'horizon 2050. Au-delà de cet horizon des mesures complémentaires seront à prendre.

La mise en place d'une embouchure fixe au Sud de Saint-Louis, le colmatage de la brèche existante, permettent de stopper les érosions côtières pour le Gandiolais. Mais de nouvelles érosions sont à prévoir si un bypass pérenne n'est pas mis en place.

Les impacts négatifs se situent dans le Gandiolais et concernent les activités pêche fluviale et agriculture. De manière plus générale sur les sujets environnementaux, il faut noter le fort impact direct sur l'AMP de Saint-Louis (le port et son chenal d'accès se situent au milieu de l'AMP), et éventuellement indirect sur le PNLB, en cas d'érosion en aval du transit littoral.

6. Complexité technique et faisabilité

Complexité technique et faisabilité :

Le scénario 3 inclut la mise en œuvre d'un bypass permettant de rétablir le transport sédimentaire. Ce bypass est absolument indissociable du scénario étudié. Si ce bypass est insuffisant en terme de quantité ou interrompu, des risques de destruction des ouvrages portuaires en mer existent, ainsi que le développement de fortes érosion pour le littoral du Gandiolais, à l'instar des phénomènes observés depuis 2003.

L'altitude du cordon littoral au sud de Saint-Louis devra être contrôlée après chaque tempête et avant chaque saison des pluies. Cette surveillance doit permettre d'éviter une brèche naturelle qui viendrait court-circuiter l'embouchure fixée au sud de Saint Louis et qui rendrait les ouvrages mis en place inopérants.

Il est important de noter que de grands volumes de sable seront nécessaires pour colmater l'embouchure actuelle du fleuve (une première estimation porte sur un volume de 18 Millions de m³). Des études antérieures ont montré que la zone au large de Saint-Louis est constituée de matériaux très fins, qui ne sont pas exploitables pour le rechargement du sable. La disponibilité du sable pourrait donc être un facteur limitant pour ce scénario.

7. Montant des travaux (Millions FCFA) et échéancier de réalisation

	2020-2035	2035-2050	>2050	Coût d'exploitation annuel	Maitre d'ouvrage
Exhaussement cordon littoral Nord Saint-Louis	1726			173	OMVS-SOGENAV ?
Stabilisation et exhaussement de la Langue de Barbarie entre Saint-Louis et Potou	1240			124	Opérateur portuaire
Colmatage brèche existante	50400				Opérateur portuaire
Ouvrages en mer	178000			Bypass: 3333	Opérateur portuaire

8. Résumé de la modélisation

Le modèle Infoworks a été mis en œuvre pour analyser les risques d'inondation fluviale (paragraphe 9.1.3), le modèle ShorelineS pour l'évolution du cordon littoral à long-terme (paragraphe 9.1.1) et le modèle Delft3D pour apporter plus d'information sur l'hydrodynamique et l'évolution morphologique à court terme (paragraphe 9.1.2). Le modèle Delft3D-FM a été utilisé pour l'étude de l'intrusion d'eau salée dans l'embouchure et plus en amont (paragraphe 9.1.5.).

9. Possibilités d'évolution du scénario ? (Vers le scénario 5...)

Mise en place des ouvrages de protection contre les inondations de Saint Louis (Quartiers de l'Île et de Sor)

0.1.8 Résumé du scénario 3-1 – Actions de diminution du risque inondation sur Saint Louis

1. Résumé des interventions

Schéma de principe	Description des interventions prévues
<p>Scénario 3-1</p> <p>Légende :</p> <ul style="list-style-type: none"> Embouchure fixée à l'aval de Saint-Louis Fermeture de l'embouchure actuelle Ouvrages en mer : Courts, Longs Dragage du fleuve à la cote -7,5 m IGN Stabilisation et exhaussement de la Lingue par plantation de Filas et pièges à sable Poldérisation de Saint-Louis 	<p>Ce scénario intègre dans le scénario 3 de base, des travaux supplémentaires visant à la protection de la ville de Saint-Louis contre les inondations.</p> <p>Le diagnostic réalisé au §5.2, met en évidence que sur les secteurs de l'Ile et de Sor (qui abritent 75% de la population en zone inondable de Saint Louis), les ouvrages de protection déjà en place assurent une protection jusqu'à une cote du fleuve de 2 mIGN :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Pour 70% du linéaire des ouvrages de l'Ile, ■ Pour 62 % du linéaire des ouvrages de Sor. <p>Le niveau de protection peut être homogénéisé jusqu'à la cote 2 mIGN en mettant à niveau et confortant :</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Un linéaire de 2.2 km de quais sur l'Ile, ■ Un linéaire de 6.7 km de digues sur Sor. <p>Sur le secteur de Sor, les analyses menées mettent en évidence l'importance de renforcer en priorité la digue de Darou.</p> <p>Ces travaux doivent également prendre en compte la réhabilitation des quais de l'Ile, qui sont en de nombreux secteurs fortement dégradés et ne sont pas à même de jouer leur rôle de protection anti-inondation. De la même manière, les ouvrages d'endiguement de Sor devront faire l'objet d'un diagnostic géotechnique de manière à s'assurer de leur stabilité et éviter les risques de dysfonctionnement en période de crue (la digue de Darou a cédé lors des inondations de 1999).</p>

2. Mesures complémentaires

Ce scénario ne comprend pas de mesures complémentaires

3. Coût estimé du scénario

Coût global du scénario : 259 Milliards de FCFA
(Dont coût de protection des quartiers de l'Ile et de Sor : 28 Milliards de FCFA)

4. Résumé des résultats

Risque inondation.

Les actions de diminution du risque inondation envisagées dans le cadre du scénario 3-1 permettent de protéger les principaux quartiers de Saint-Louis à L'horizon 2100.

5. Efficacité du scénario sur les principaux enjeux

Efficacité du scénario :

Les effets hydrauliques des travaux apportent une nette amélioration sur la protection contre les inondations des quartiers de l'Ile et de Sor. Ces quartiers sont protégés jusqu'à l'horizon 2100. L'efficacité globale du scénario 3-1 sur les autres enjeux est la même que celle du scénario 3 de base.

6. Complexité technique et faisabilité

Complexité technique et faisabilité :

Les travaux de protection concernent uniquement les quartiers de Sor et de l'Ile (75% de la population de Saint Louis située en zone inondable).

La principale incertitude de cette variante est relative à l'estimation de son coût. Au stade de l'étude nous ne disposons pas des éléments techniques (mode de fondation des quais de Saint Louis, géotechnique sur les digues de protection existantes...) permettant d'affiner notre estimation. Le quartier de l'Ile étant inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO, des contraintes complémentaires seront probablement à prendre en compte pour la définition finale des travaux.

7. Montant des travaux et échéance de réalisation

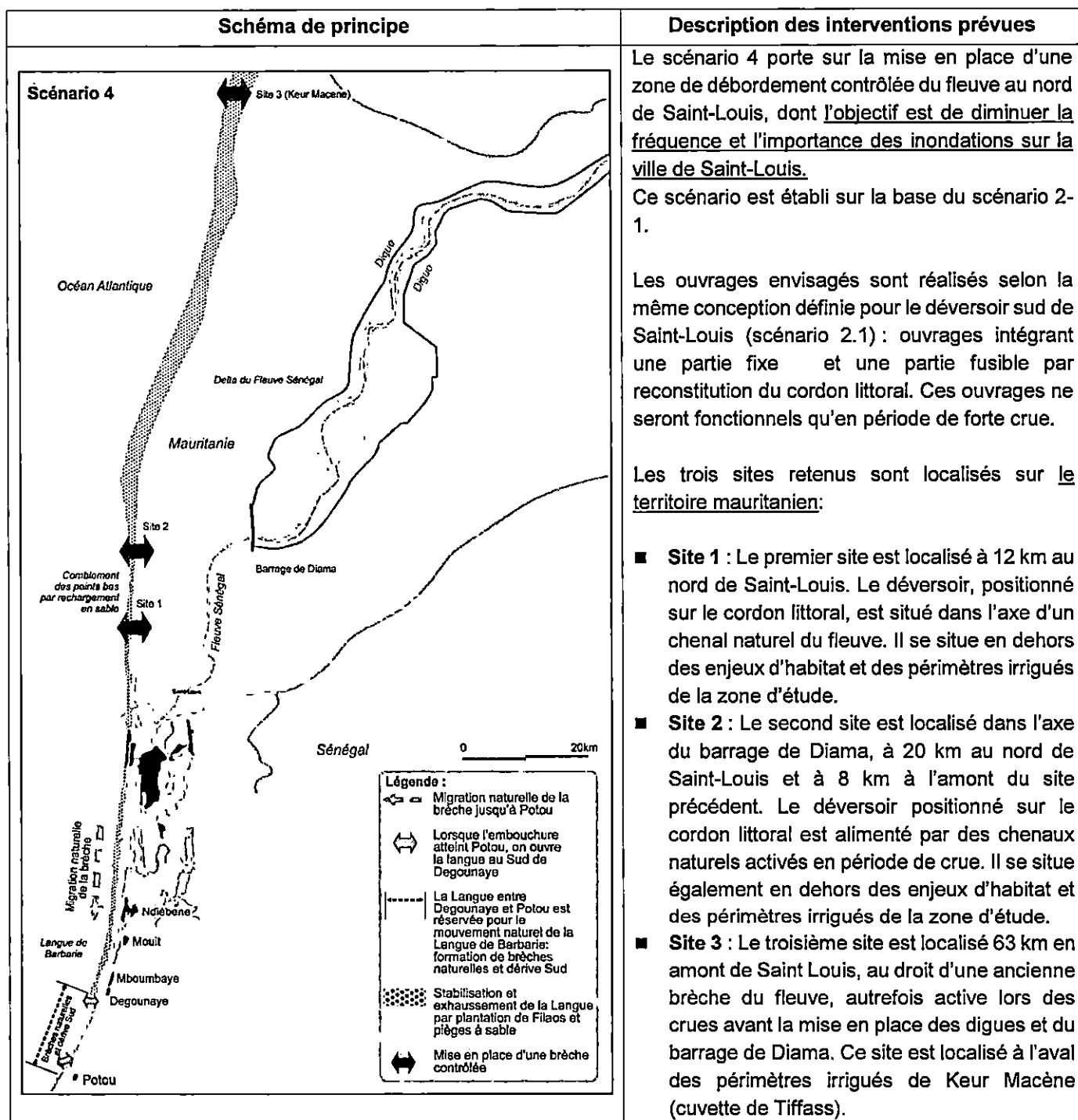
	2020-2035	2035-2050	>2050	Maitre d'ouvrage
Mise en œuvre de la protection des quartiers de l'Ile et de Saint Louis			27900	ADM ?

8. Résumé de la modélisation

Il n'a pas été utilisé de modèles dans le cadre de ce scénario.

0.1.9 Résumé du scénario 4 – Dérivation partielle du fleuve Sénégal au nord de Saint Louis

1. Résumé des interventions



2. Mesures complémentaires

Ce scénario ne comprend pas de mesures complémentaires

3. Coût estimé du scénario

Coût de la brèche contrôlée : 14 Milliards FCFA

4. Résumé des résultats

Risque inondation.

Les modélisations mettent en évidence que pour les trois sites étudiés les déversements contrôlés du fleuve en crue permettent de limiter les hauteurs de submersion sans pour autant éviter les inondations de la ville de Saint Louis.

A l'horizon 2050, dans le cadre du scénario de base, la ville de Saint-Louis est protégée jusqu'à une crue trentennale pour une position de brèche sur le site 1 et une longueur de 1500m. Ce niveau de protection est porté à 100 ans dans le cas de la variante 4-1.

A l'horizon 2100, quel que soit le scénario étudié, du fait de la montée des eaux liée au changement climatique, la ville de Saint Louis est exposée à un risque très fort d'inondation pour des crues courantes du fleuve.

La mise en œuvre d'une dérivation partielle au Nord de Saint Louis n'as donc un intérêt que jusqu'à l'horizon 2050.

Risque morphodynamique

La dérivation partielle du fleuve Sénégal pourrait créer de forts changements dans le fonctionnement du bas-delta du fleuve et donc affecter fortement la stabilité du cordon littoral. Dans le cas le plus optimiste, ce scénario fonctionnera comme prévu et créera une dérivation partielle du débit du fleuve. Il est attendu sur la base des modélisations d'un tel déversoir dans le cadre du scénario 2 (**Error! Reference source not found.**) qu'il aura une influence limitée sur le développement du littoral à long terme. Il est important de noter qu'on ne peut pas exclure que les vitesses d'écoulement relativement élevées puissent entraîner l'affouillement (scour) à l'interface des protections et/ou des barrages d'un côté et les fonds marins et la plage de sable à l'autre. Dans le cas le plus pessimiste, le site choisi pourrait devenir la nouvelle embouchure dominante du fleuve Sénégal, et avec le temps migrer vers le sud, vers Saint-Louis. Cela entraînera une forte érosion et la destruction de Saint-Louis.

5. Efficacité du scénario pour enjeux risque inondation fluviale

Efficacité du scénario :

La mise en œuvre d'une dérivation partielle au Nord de Saint Louis n'a un intérêt pour le risque inondation fluviale que jusqu'à l'horizon 2050.

6. Complexité technique et faisabilité

Complexité technique et faisabilité :

L'ouvrage étudié est fixe et ne disposera que de peu de possibilité d'adaptation face à une côte dynamique et très mobile.

Les risques sont liés à l'évolution générale du trait de côte mettant en péril les ancrages de l'ouvrage, sur une section où le cordon littoral est très fragile et dispose de peu de possibilité d'adaptation du fait du positionnement d'un bras du fleuve longeant le cordon côté delta.

Le système d'alerte de crue mis en place sur le fleuve permet d'anticiper (délais de 3 semaines à 1 mois ?) sur les opérations de déblais d'une partie de la section fusible de l'ouvrage. Ceci nécessitera

néanmoins un temps de réaction rapide des autorités en charge, et qu'il soit anticipé la mobilisation d'entreprises disposant des moyens en matériels nécessaires. La brèche contrôlée étudiée est située sur le territoire Mauritanien ce qui risque de compliquer les modalités d'interventions, en particulier en cas de crise entre les deux pays.

Le fonctionnement de l'ouvrage suppose que la partie fusible du cordon couronnant l'ouvrage fixe, soit détruite par l'action des déversements du fleuve à partir de saignées réparties le long du déversoir. Ceci devra être vérifié par des modélisations spécifiques avant de passer en phase travaux.

7. Montant des travaux (Millions de FCFA) et échéance de réalisation

	2020-2035	2035-2050	>2050	Maitre d'ouvrage
Mise en œuvre d'une brèche contrôlée en amont de Saint Louis		13910		OMVS-SOGENAV?

8. Résumé de la modélisation

Le modèle Infoworks a été mis en œuvre afin d'étudier les effets sur les niveaux d'eau au niveau de Saint-Louis et du delta.

9. Possibilités d'évolution du scénario ? (Vers le scénario 5...)

La brèche contrôlée peut être mise en place en complément du scénario 2.

0.2 Conclusion

L'analyse des scénarios menée dans le cadre de la phase L5-2 de l'étude met en évidence :

- L'extrême sensibilité de la Langue de Barbarie à tout aménagement pouvant influencer sur le transport littoral. Les modélisations et expertises menées dans le cadre du scénario 2-1 (brèche contrôlée au sud de Saint Louis), 2-3 (embouchure fixée à Potou), scénario 2-4 (wharf), scénario 3 (ouvrages brise lames du port), scénario 4 (dérivation partielle du fleuve Sénégal au nord de Saint Louis) conduisent à identifier de forts risques mettant en péril la Langue de Barbarie mais aussi les ouvrages eux-mêmes.
Les dysfonctionnements identifiés peuvent intervenir à court terme en fonction de l'importance du blocage du transport littoral : dans le cadre du scénario 3, il est prévu l'apparition d'une brèche de la Langue de Barbarie, au sud immédiat de l'ouvrage, cinq ans après la construction du port. Ces impacts négatifs ne peuvent être compensés que par le contournement artificiel du sable (pompage ou dragage). Dans le cas du scénario 3, le contournement de sable nécessaire est de 1.4 million m³/an.
- La sensibilité au risque de brèche au nord et au sud de Saint-Louis et la nécessité de conforter le cordon littoral en grande partie sur le territoire mauritanien.
- L'extrême vulnérabilité de la ville de Saint-Louis au risque inondation et l'aggravation de son exposition en fonction de la dérive au sud de la brèche. La population soumise à ce risque à l'horizon 2050 est évaluée à 188 000 habitants pour une crue centennale.

Le Tableau 0-2 présente une synthèse des impacts des scénarios d'aménagement sur les principaux enjeux de la zone d'étude. Par souci de lisibilité, les scénarios présentés intègrent l'ensemble des travaux complémentaires associés.

Les scénarios 2-4 (un Wharf de pêche) et 4 (« dérivation partielle du fleuve Sénégal au nord de Saint Louis ») ne sont pas intégrés dans la synthèse finale. Le scénario 2-4 ne permet de répondre que partiellement aux enjeux de la pêche artisanale de Saint Louis. Le scénario 4 n'apporte un intérêt hydraulique qu'à court terme avec des risques avérés sur la dynamique côtière.

La problématique inondation fluviale est très forte sur Saint Louis et directement liée à la position de l'embouchure. Il est conseillé, au vu des investigations réalisées dans cette étude, que la solution de poldérisation des quartiers les plus exposés et vulnérables de Saint Louis (l'île et Sor) soit adoptée. Ces travaux de protection peuvent être intégrés dans les scénarios 1 (« Pas d'intervention sur la brèche »), 2 (« Embouchure éloignée de Saint-Louis ») et 3 (« Embouchure contrôlée aux abords de Saint Louis »). Seuls les horizons de travaux changent : 2050 pour les scénarios 1 et 2, après 2050 pour le scénario 3. La problématique inondation fluviale n'est donc pas discriminante pour le choix du scénario à retenir.

De la même manière, l'ensemble des scénarios prennent en compte le renforcement du cordon littoral en amont de Saint Louis. Cette action est commune aux scénarios 1, 2 et 3.

Le scénario 1 et le scénario 2 (y compris ses déclinaisons 2-1, 2-2) ont en commun le fait de laisser dériver l'embouchure au sud de Saint Louis. Jusqu'en 2050 les effets de ces scénarios sont très proches. Le scénario 1 permet de retrouver le fonctionnement historique de la Langue de Barbarie, caractérisé par la formation de brèches naturelles au droit des points de faiblesse du cordon littoral, conduisant à la formation d'une nouvelle embouchure du fleuve. Le scénario 2 (et ses déclinaisons 2-1 et 2-2) se distinguent du scénario 1, à partir de 2050, par une gestion de l'embouchure située entre Degounaye et Potou, permettant de protéger le Gandiolais contre un risque de nouvelle brèche.

Le scénario 2-1 a permis d'étudier l'effet d'une brèche contrôlée au sud de Saint-Louis sur le risque inondations fluviales de Saint Louis. Les résultats obtenus montrent que ce scénario ne permet pas de trouver une solution durable au-delà de l'horizon 2050.

Le scénario 2-2, en proposant la mise à niveau des protections de Saint Louis jusqu'à la cote 2 mIGN, permet de répondre de manière plus globale à la problématique des inondations fluviales. En ce sens il constitue un apport important au scénario 2 de base.

Les travaux complémentaires envisagés dans ces deux scénarios permettent de limiter les effets du déplacement de l'embouchure du fleuve sur bon nombre d'enjeux existants, en particulier sur le territoire du Gandiolais. Néanmoins certains effets sont incontournables : sur l'activité pêche de Saint-Louis et bien sûr, sur l'absence de débouché maritime pour le projet de mise en navigation du fleuve.

Le scénario 3 est clairement antinomique des scénarios précédents : son impact principal est de favoriser les activités pêche saint-louisienne et le projet portuaire associé à la mise en navigabilité du fleuve. Dans le cas de son adoption les activités pêche fluviale et agriculture dans le Gandiolais sont clairement défavorisées. Ce scénario se distingue également des précédents par son coût d'investissement (ne pouvant être financé que dans le cadre d'un projet portuaire) mais surtout par son coût d'exploitation : des actions de bypass du transport littoral devront être engagées dès le premier jour de construction des ouvrages, ce qui constituera une charge pour les générations futures. Le coût de ce bypass est évalué à 3.3 Milliards FCFA par an. Les modélisations montrent que s'il n'est pas ou insuffisamment réalisé, l'ouvrage sera détruit dans un délai de 5 ans. Avec la migration de cette brèche au sud, la Langue de Barbarie sera amenée à disparaître totalement. Plusieurs variantes de la conception originale du port ont été testées. Quatre de ces variantes sont examinées et présentées en détail dans le rapport, avec des brise-lames plus longs, plus courts et plus espacés, et enfin sans brise-lames. Même une embouchure fixe sans brise-lames nécessiterait un by-pass de sédiments très important, du même ordre de grandeur que dans la conception de l'OMVS du port actuel.

Le scénario 2-3 constitue plutôt une variante du scénario 3. Dans ce cas de figure un ouvrage permettant un débouché maritime pour le projet de navigation du fleuve est placé à Potou. Les principaux inconvénients liés à ce scénario sont son impact sur le risque inondation de Saint-Louis qui prendra effet dès la mise en œuvre de l'ouvrage. Là encore cet impact pourrait être mitigé par une poldérisation de la ville de Saint-Louis.

Cette solution fut la solution retenue dans le cadre des études du COSEC de 2002. La brèche de 2003 illustre parfaitement les risques associés à ce scénario : une brèche naturelle se produisant entre Potou et Saint-Louis peut court-circuiter l'embouchure fixe de Potou en conduisant dans un premier temps à son ensablement puis à terme, à la destruction des ouvrages permettant le débouché en mer si rien n'est fait pour juguler ses effets. La stabilisation et renforcement du cordon littoral seront nécessaires. De la même manière que pour le scénario 3, la mise en œuvre d'un bypass pour le transport littoral sera l'unique condition de la pérennité de l'ouvrage.

Une estimation sommaire des coûts d'investissement et d'exploitation est présentée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 0-1 : Estimation sommaire des coûts d'investissement et d'exploitation des scénarios

	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 2-1	Scénario 2-2	Scénario 2-3	Scénario 3	Scénario 3-1
Investissement (Milliards FCFA)	9.4	9.1	23	37	247	231	259
Exploitation (Milliards FCFA)	0.36	0.33	0.33	0.33	3.6	3.6	3.6

Les coûts d'investissement des scénarios 2-3, 3 et 3-1 sont impactés par le coût très élevé des ouvrages d'accessibilité fluviomaritime définis dans l'APD du projet de port de Saint Louis. Ces coûts témoignent de la difficulté de réalisation de ce type d'ouvrages dans le contexte saint-louisien.

Les scénarios 2-3, 3 et 3-1 se distinguent également par de très forts coûts d'exploitation liés au bypass à mettre en œuvre pour rétablir le transport littoral (de l'ordre de 3.3 Milliards FCFA).

Au final les études menées permettent de distinguer deux grands types de solution :

- Une solution laissant dériver la brèche au sud, illustrée par le scénario 1 puis le scénario 2 dans sa continuité au-delà de 2050. Dans ce cas, le scénario 2-2 (mise à niveau de protections de Saint Louis), associé aux mesures complémentaires définies, permet d'apporter des réponses à la majeure partie des enjeux existants,
- Une solution sous-tendue par la réalisation du projet portuaire de l'OMVS, dont le coût est sans commune mesure avec le coût des solutions précédentes. Ce scénario se caractérise par une prise de risque importante en cas de non-respect du bypass à mettre en œuvre.

Il est à noter que l'OMVS avance sur le projet portuaire associé à la mise en navigabilité du fleuve. L'horizon de réalisation de ces travaux n'est cependant pas connu. **Il est à observer que les éléments présentés dans les scénarios 1 et 2 peuvent être engagés dès à présent, dans l'attente de décisions concernant la réalisation du port.**

Quel que soit le choix final du scénario d'aménagement, les études menées mettent en évidence un certain nombre de solutions « sans regret » à adopter dans les prochaines années. Ces solutions ne sont pas sensibles aux incertitudes scientifiques existantes ou au choix final du scénario d'aménagement :

1. **Renforcement du cordon littoral au nord de Saint-Louis**: confortement et exhaussement des points bas au nord de Saint-Louis. Dans le cas contraire une brèche naturelle pourrait conduire à une destruction du front bâti sur le cordon littoral de Saint-Louis ainsi que menacer à terme les quartiers de l'Ile et de Sor.
2. **Protection du milieu naturel** : délocalisation de l'île aux oiseaux.
3. **Amélioration de l'activité pêche artisanale de Saint Louis** : balisage d'un chenal de navigation dans l'embouchure, adapté chaque mois, permettant un accès sécurisé en mer pour les pêcheurs. Mise en place de mesures basiques de sécurité, rechargement en sable devant le front bâti de Saint Louis.
4. **Protection des villages du Gandiolais** : gestion par dragage et rechargement des plages du Gandiolais permettant de limiter l'érosion côtière,
5. **Renforcement du cordon littoral au sud de Saint-Louis** : stabilisation de la pointe nord de la Langue de Barbarie au fur et à mesure de sa migration par pièges à sable, plantation de Filaos, sans cependant éviter la possibilité de surverse par-dessus le cordon littoral,
6. **Protection de la ville de Saint-Louis** : mise à niveau des ouvrages de protection contre les inondations de Saint-Louis jusqu'à une cote de 2 m IGN.

Les actions 1, 2 et 3 sont à engager le plus rapidement possible. Les actions 4 et 5 sont à engager également dès maintenant et à poursuivre en anticipant le déplacement de la brèche. L'action 6 devra être effective dès l'horizon 2035.

Enfin, plusieurs pistes pourraient être envisagées pour parfaire les scénarios étudiés et arriver à l'étude du scénario 5. Ces pistes sont les suivantes :

- Le scénario 2-2, prévoit la protection de Saint-Louis par poldérisation. Dans l'approche originelle, cette protection est mise en défaut avec une embouchure du fleuve à Potou. Un moyen d'assurer un niveau de protection centennal à l'horizon 2100 serait d'adopter un autre mode opératoire que celui prévu dans le scénario 2. Le système d'alerte en fonction sur le fleuve permet d'anticiper l'importance de la crue d'hivernage plusieurs semaines à l'avance. La création d'une brèche artificielle à Degounaye en cas de fortes crues (> 5 à 10 ans), permettrait d'assurer un niveau de protection centennal.
- Les travaux de protection de Saint-Louis contre les inondations fluviales (présentés dans le scénario 2-2) pourraient compléter le scénario 1.

Tableau 0-2 : Synthèse des impacts des scénarios d'aménagement sur les enjeux de la zone d'étude

	Scénario 1			Scénario 2			Scénario 2-1			Scénario 2-2			Scénario 2-3			Scénario 3			Scénario 3-1		
	2020	2050	2100	2020	2050	2100	2020	2050	2100	2020	2050	2100	2020	2050	2100	2020	2050	2100	2020	2050	2100
Inondations fluviales Saint-Louis																					
Inondations fluviales Gandiolais																					
Erosion côtière Gandiolais																					
Erosion côtière Saint-Louis par risque de rupture du cordon littoral nord																					
Activité pêche Gandiolais																					
Activité pêche Saint-Louis																					
Activité portuaire																					
Activité agricole Gandiolais																					
Activité touristique																					
Milieu naturel																					
Marée, submersion marine																					

1. Introduction

1.1 Contexte

Le bas-delta du fleuve Sénégal est soumis à la dynamique fluviale pendant le passage de la crue entre septembre et novembre ; la dynamique marine est quant à elle dominante en saison sèche. Comme le reste du bassin du fleuve Sénégal et l'ensemble de la région sahélienne en général, la zone du delta présente une forte vulnérabilité aux aléas climatiques, allant des sécheresses extrêmes aux inondations répétitives. Les inondations de fin 2003 avaient conduit les autorités Sénégalaises à percer la Langue de Barbarie à 7 km en aval de Saint-Louis, pour faciliter l'évacuation de la crue fluviale vers la mer. Cette percée n'étant pas contrôlée par des structures en dur, il s'en est suivi un processus d'érosion et aujourd'hui la largeur de la « brèche » atteint environ 6 kilomètres (Figure 1-1 et Figure 1-2). L'ancienne embouchure s'est fermée, tandis que l'extension importante de la brèche, devenue la nouvelle embouchure, et son déplacement progressif vers le sud, ont entraîné des problèmes d'érosion côtière sur la Langue de Barbarie et sur les rives de la zone du Gandiolais.

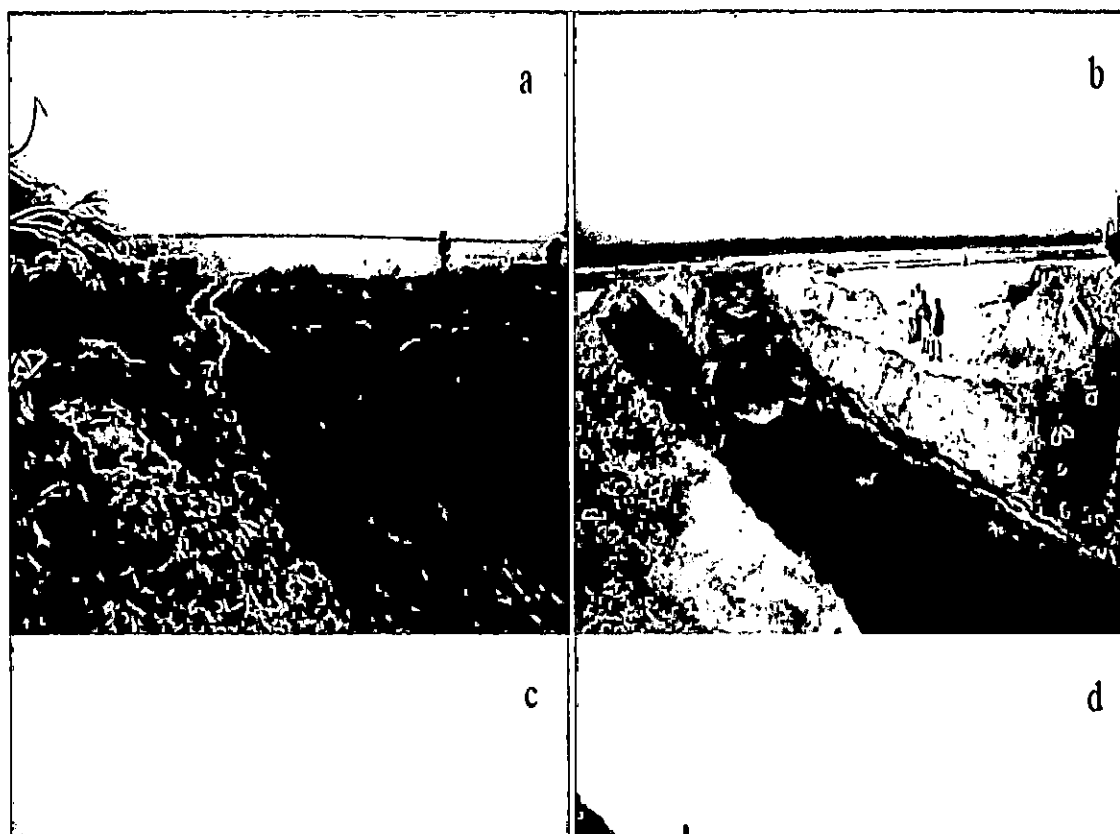


Figure 1-1 : Evolution de la largeur de brèche

(a) quelques heures après l'ouverture initiale ; (b) 1 jour après ouverture (affichage d'ondes stationnaires et élargissement) ; (c) quelques jours après l'ouverture (vue de l'océan Atlantique) ; (d) quelques semaines après l'ouverture (vue vers l'océan Atlantique) - Crédit photo : Ibrahima DIOP, 2003 et 2004, Laurent GERRER, 2003.

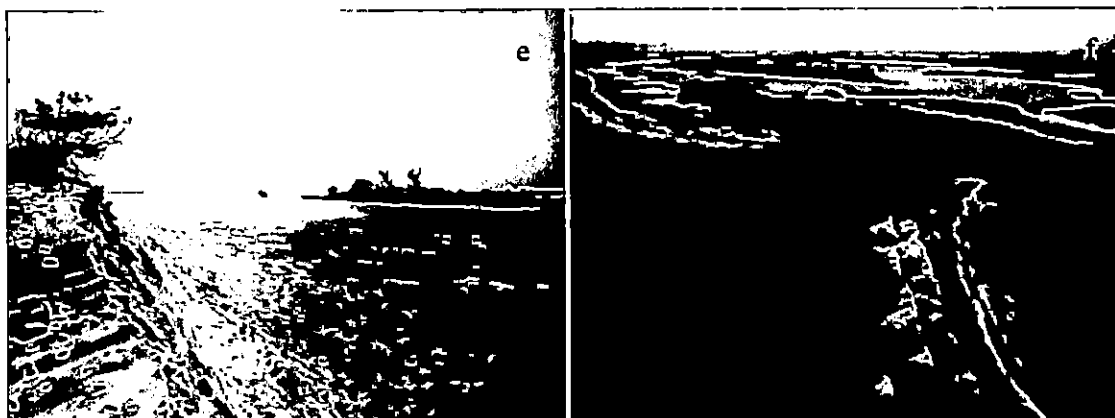


Figure 1-2 : Evolution de la largeur de brèche (suite)

(e) quelques mois après l'ouverture ; (f) un an après l'ouverture - Crédit photo : Ibrahima DIOP, 2003 et 2004, Laurent GERRER, 2003.

La brèche a dans un premier temps facilité l'accès à la mer pour les pêcheurs de la région de Saint-Louis. La pêche en mer a permis à ces pêcheurs d'augmenter leurs revenus. Cependant, son passage s'est avéré dangereux ; plus de deux cents pêcheurs ont péri depuis son ouverture en 2003. Il est à noter aussi que plusieurs espèces de poissons ont disparu du fleuve, avec un effet négatif sur la pêche fluviale. Par ailleurs, la large ouverture de la nouvelle embouchure permet à la houle d'impacter la rive du fleuve en face de celle-ci. Initialement, une forte érosion de cette rive s'est produite ; un village situé sur cette rive (Doun Baba Dieye) a totalement disparu en 2012. Le village de Pilote Barre était fortement menacé en 2014 nécessitant l'application d'un rechargement de plage par le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD). Avec l'élargissement et le déplacement de l'embouchure vers le sud, d'autres zones riveraines sont maintenant soumises à l'érosion et directement menacées.

1.2 Objectifs du projet

Dans le cadre de l'exécution du Projet de Gestion des Eaux Pluviales et d'Adaptation aux Changements Climatiques (PROGEP), l'Agence de Développement Municipal (ADM) a reçu un financement du Fonds Nordique de Développement destiné entre autres à la zone de l'embouchure du fleuve Sénégal à Saint-Louis. A terme, il est prévu d'élaborer une étude du Plan Directeur d'Urbanisme (PDU). Le contexte particulier du site recommande cependant la réalisation préalable d'une étude de la dynamique hydro-sédimentaire, afin de définir une stratégie d'aménagement de la zone en vue de la préparation du PDU.

A cet effet, le gouvernement du Sénégal a confié la mission d'étude au groupement Egis Eau - Deltares pour développer des modèles de simulation numériques, notamment des processus hydro-sédimentaires. Les modèles aideront à la préparation d'un plan d'intervention qui, en plus des considérations techniques, devra aussi se baser sur des considérations d'ordre social, économique, financier et environnemental. Le plan devra promouvoir le développement durable du bas-delta du fleuve Sénégal et devra pour cela donner une réponse aux défis causés par le changement climatique et par la croissance démographique et économique.

1.3 Objectifs du présent rapport

Ce rapport s'inscrit dans la continuité des phases précédentes du projet qui ont permis d'aboutir à un ensemble de modèles numériques imbriqués, permettant la représentation du fonctionnement complexe du système, et à la définition précise de quatre scénarios d'aménagement et de leurs variantes.

Les modèles numériques sont exploités afin d'évaluer les impacts des scénarios envisagés sur les enjeux du secteur, décrits en détail dans les phases précédentes.

Enfin, des pistes pour l'élaboration d'un cinquième scénario d'aménagement sont proposées sur la base des résultats obtenus.

Le rapport « L5-2 : Tests préliminaires des variantes » sera suivi du rapport « L5-3 : proposition d'un cinquième scénario », et du « rapport L5-4 : Rapport d'analyse des 5 scénarios » une fois le scénario 5 défini par l'ADM.

Les rapports suivants viendront par la suite compléter l'analyse afin d'aider le choix du scénario retenu pour la phase AVP :

:

- L6-2 : Etude Environnementale Stratégique (EES) – Analyse des scénarios,
- L7-1 : Etude institutionnelle – Rapport final,
- L7-2 : Etude socio-économique – Analyse des scénarios, et
- L8 : Analyse Coûts-Bénéfices / Analyse Multicritères / Synthèse : rapport final

1.4 Organisation du rapport

Dans un premier temps, le rapport vise à rappeler les modélisations numériques mises en place pour représenter les différents phénomènes naturels de la zone d'étude. Le chapitre 2 se focalise sur la modélisation hydraulique fluviale et introduit de nouveaux éléments intégrés au modèle depuis la version présentée au rapport L4. Le chapitre 3 se concentre sur les différents modèles employés pour représenter la dynamique côtière.

Le chapitre 4 propose un rappel des configurations océano-météorologiques employées pour tester les scénarios aux horizons 2050 et 2100.

Le chapitre 5 a pour objectif (1) de rappeler tous les enjeux présents sur le secteur ; (2) de fournir des éléments chiffrés sur la vulnérabilité des populations au risque d'inondation afin de définir des objectifs de protection ; et (3) de mettre en exergue le risque de formation d'une brèche du cordon littoral qui entraînerait des effets dévastateurs sur Saint-Louis et le Gandiolais.

Le chapitre 6 traite des impacts générés par les projets en cours sur le littoral.

Les chapitres 7 à 10 constituent le cœur du rapport et décrivent les impacts attendus des scénarios d'aménagement. Ils offrent dans un premier temps un descriptif du scénario de base suivi d'une étude du comportement du système dans cette configuration. Les variantes sont ensuite traitées via l'analyse de leurs impacts sur l'inondabilité et la dynamique côtière. Une synthèse du scénario et de ses variantes est proposée en fin de chapitre afin d'évaluer son efficacité vis-à-vis des problématiques évoquées.

Le chapitre 11 montre l'impact des scénarios d'aménagement sur la ligne d'eau du fleuve en amont du barrage de Diamo.

Le chapitre 12 traite de l'étude de scénarios complémentaires visant à offrir plus d'espace au fleuve pour l'expansion des crues.

Le chapitre 13 présente les références bibliographiques.

2. Modélisation de l'hydraulique fluviale

La modélisation hydraulique porte sur le périmètre d'étude suivant :

- Le Fleuve Sénégal depuis l'aval de Richard Toll jusqu'à son embouchure (environ 160 km de linéaire),
- Les ouvrages anthropiques (barrage de Diama, aménagements de la ville de St Louis, digues, routes, ...),
- Les bras « morts » du Fleuve Sénégal (anciens lits et zones d'expansion des crues dans le delta),
- Le niveau marin fonction des scénarios étudiés sur la future position de l'embouchure du fleuve (condition limite aval du modèle).

La modélisation hydraulique a pour objet :

- D'évaluer précisément les impacts des crues du fleuve Sénégal sur la ville de Saint-Louis, et de manière plus générale sur l'ensemble de delta du fleuve,
- D'identifier les problématiques de risques d'érosion des berges et des ouvrages dans le lit (majeur et mineur),
- De caractériser les zones inondables de Saint-Louis, en état actuel et à moyen et long terme (avec prise en compte des effets du changement climatique),
- De tester les scénarios d'aménagements envisagés, valider leur pertinence et préciser leurs spécifications techniques (dimensionnement hydraulique),
- De calculer l'impact des différents scénarios d'aménagement sur les zones inondables de Saint-Louis à moyen et long terme (prise en compte des effets du changement climatique).

La modélisation permettra également de fournir les éléments de base concernant le risque inondation dans le cadre de l'élaboration du PDU :

- Cartographie de l'emprise de l'inondation pour différentes occurrences de crues,
- Carte des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement sur ces mêmes emprises.

2.1 Les données de base du modèle

2.1.1 Données topographiques et bathymétriques

Deux types de données sont utilisées pour la construction du modèle :

- Les données topographiques issues du Lidar réalisé par la société Sintégra
- Les données bathymétriques issues de la campagne de mesures Shore Monitoring (cf rapport L3-1 et L3-2)

Par ailleurs un certain nombre de vérifications ponctuelles ont été réalisées lors des travaux topographiques : altimétrie des murs de quais de Saint-Louis, du 0 des échelles de Saint-Louis et de Diama.

2.1.1.1 Le Lidar du delta du fleuve Sénégal

Les levés Lidar ont été réalisés sur la période comprise entre le 22 et le 27 Janvier 2019 et ont permis la fourniture d'un Modèle Numérique de Terrain à partir de mesures laser aéroportées portant sur une surface totale de près de 4000 km².

Le système de géoréférencement altimétrique est rattaché au système UTM28S – RGS, avec une précision altimétrique de +/- 15 cm. Le MNT est fourni sur une grille de pas d'espace 1m.

Les données Lidar fournissent des informations capitales pour la modélisation hydraulique:



- Altimétrie des zones bâties de Saint-Louis (ci-contre) permettant d'identifier les points bas existants dans les quartiers de Sor en particulier,
- Altimétrie des zones non bâties en périphérie de Saint-Louis pouvant accueillir les extensions de l'urbanisation prévues dans le PDU,
- Altimétrie du cordon littoral, avec identification des points de faiblesse existants et donc les risques de brèche,
- Les zones d'épanchement des crues en particulier sur le territoire Mauritanien,
- Le système d'endiguement du fleuve Sénégal et les ouvrages d'irrigation des périmètres irrigués...

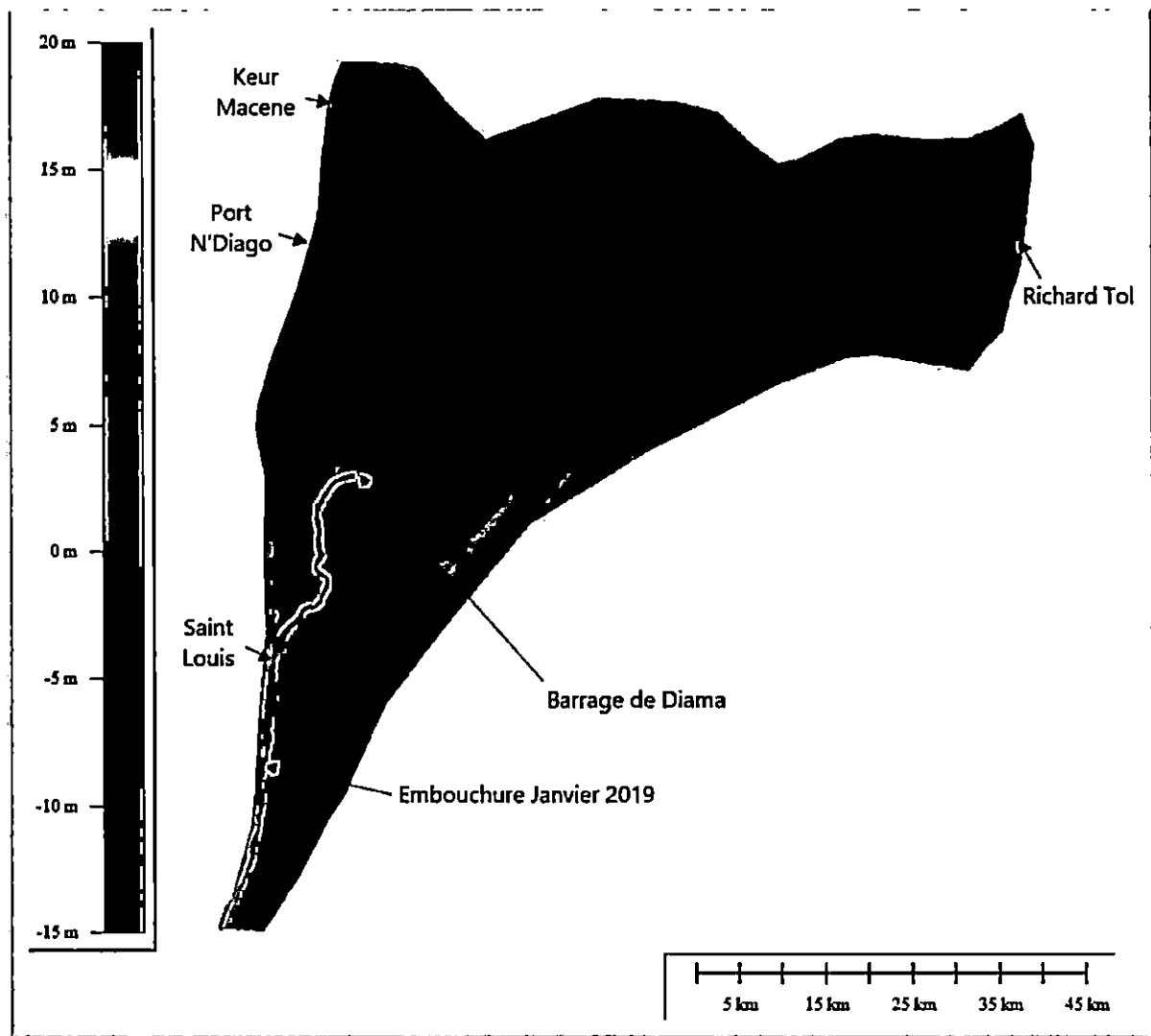


Figure 2-1 : Emprise du Lidar sur le delta du fleuve Sénégal.

2.1.1.2 Données bathymétriques

A l'aval de Diama

Les données bathymétriques du fleuve ont été réalisées en Janvier 2019 par la Société Shore Monitoring entre le barrage de Diama et le débouché en mer.

Ces données bathymétriques sont fournies sous forme de profils en travers comportant des points x, y, z, avec des cotes altimétriques fournies dans le système EGM2008 et dans le système IGN.

Un MNT bathymétrique a été construit en interpolant les données des profils en travers sur l'ensemble de la zone d'étude.

Le mode de réalisation de ces travaux est décrit dans le rapport d'étude L3-1

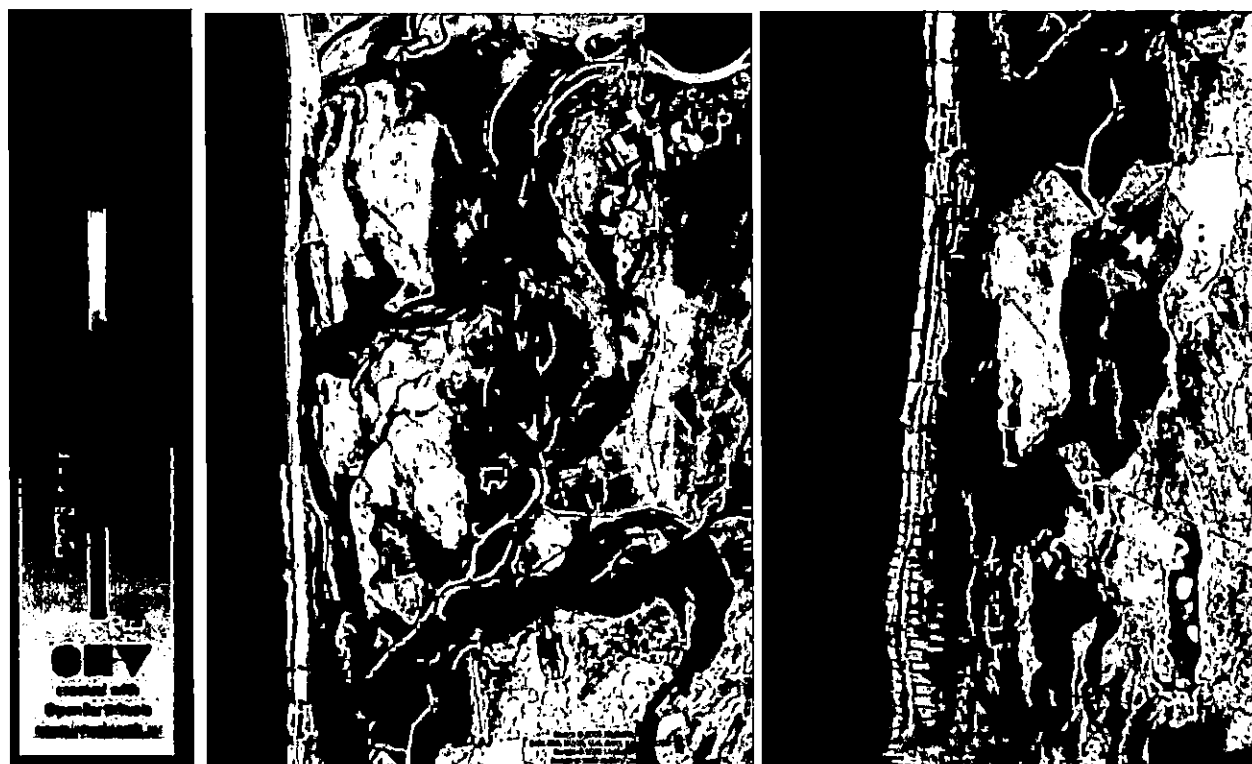


Figure 2-2 : Levés bathymétriques entre le barrage de Diama et le débouché en mer

A l'amont de Diama

Une seconde campagne de levés bathymétriques a été conduite en novembre 2019 par la société Tous Travaux Sous-Marins (TTSM) en amont, entre le barrage de Diama et Richard Toll. Un profil bathymétrique tous les kilomètres a été réalisé pour un total de 128 profils comportant des points x, y, z. Les cotes altimétriques sont fournies dans le système IGN.

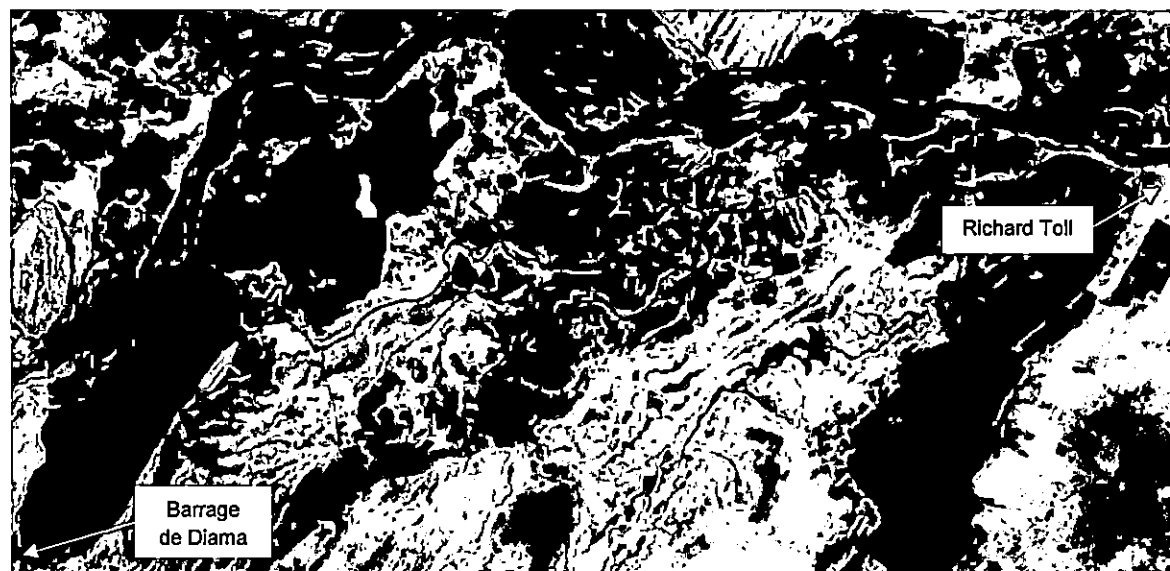


Figure 2-3 : Levés bathymétriques entre Richard Toll et le barrage de Diama

Ces levés ont permis de compléter les levés topographiques des digues du Sénégal de 2018, présentés plus bas.

2.1.1.3 Vérification de la cote IGN des échelles limnimétriques de Saint-Louis et de Diama

Le cabinet de géomètres Sintégra a vérifié la cote du 0 de l'échelle limnimétrique et du limnigraphe de Saint-Louis qui est la référence des données de crue recueillies sur le delta du fleuve.

Cette cote a été établie à partir de levés au sol, à la cote de -0.43m IGN. Jusqu'à présent deux côtes étaient présentes dans la littérature : -0.455 m IGN (Source IRD), -0.53 m IGN (Source IRD).

Dans la suite de l'étude la valeur de -0.43m IGN sera retenue pour caractériser les enregistrements de hauteurs de crue à l'échelle de Saint-Louis ce qui permettra de rendre homogènes les levés LIDAR, la bathymétrie et les données hydrométriques.



Figure 2-4 : Echelles de Saint-Louis et de Diama amont. Repère RRS2 sur le bajoyer de l'écluse de Diama

Le 0 de l'échelle de Diama aval a été vérifié à partir des levés réalisés par le cabinet Sintégra. La cote du bajoyer de l'écluse de Diama est établie à 3.577 m IGN et fait partie du réseau de référence du Sénégal de deuxième ordre (RRS2). Dans ce système de référence la cote du 0 de l'échelle aval de Diama est de 0.17 m IGN.

Une différence de 0.15m existe avec la valeur retenue jusqu'à présent (0.02m IGN pour le 0 de l'échelle aval).

Cette vérification permet de corriger les incohérences mises en évidence par l'IRD entre les cotes enregistrées aux échelles de Saint-Louis et de Diama qui indiquaient pour des fortes crues des niveaux IGN observés plus hauts à Saint-Louis qu'à Diama (« Etude d'évaluation des inondations dans le bassin du fleuve Sénégal », IRD Février 2013).

Tableau 2-1 : Cotes IGN du 0 des échelles limnimétriques

Localisation	Cote IGN du 0 de l'échelle
Echelle de Saint-Louis	-0.43
Echelle de Diama aval	0.17
Echelle de Diama amont	0.15

2.1.1.4 Les digues du fleuve Sénégal

Le levé topographique des digues du Sénégal a été réalisé par le cabinet Alphaconsult du mois de janvier au mois de mars 2018.

La borne de référence qui est utilisée pour le calage de la polygonale de base du système d'endiguement (et qui sert au contrôle topographique annuel du barrage de DIAMA), est la broche scellée (repère Rn) sur le mur du bâtiment ateliers du barrage de DIAMA dont l'altitude est à la cote 3.963 m IGN.

Les aménagements en rive gauche du fleuve comprennent un endiguement continu de 79.5 km de longueur entre le pk 0 de la digue et Rosso Sénégal. Une digue de fermeture raccorde la plateforme douanière à l'entrée du village de DIAMA, son linéaire est de 794 mètres. Les premiers endiguements et ouvrages hydrauliques ont été créés dans les années 1960.

Les aménagements de la rive droite comprennent un endiguement réalisé en deux tranches (de 1989 à 1995), et intègrent :

- Un endiguement continu de 76.5 Km de longueur, entre le carrefour de BOUHAJRA (extrémité ouest de la digue) et la digue dite "Chinoise" (extrémité est de la digue),
- La digue de Bell, d'un linéaire de 5.4 Km entre le carrefour de BOUHAJRA (Tound Birette) et la dune de la Tound Hagui au nord.
- La digue de fermeture, suivie d'une piste de liaison endiguée, permet la fermeture de l'ancien lit mineur du fleuve entre le barrage proprement dit et le carrefour de BOUHAJRA.

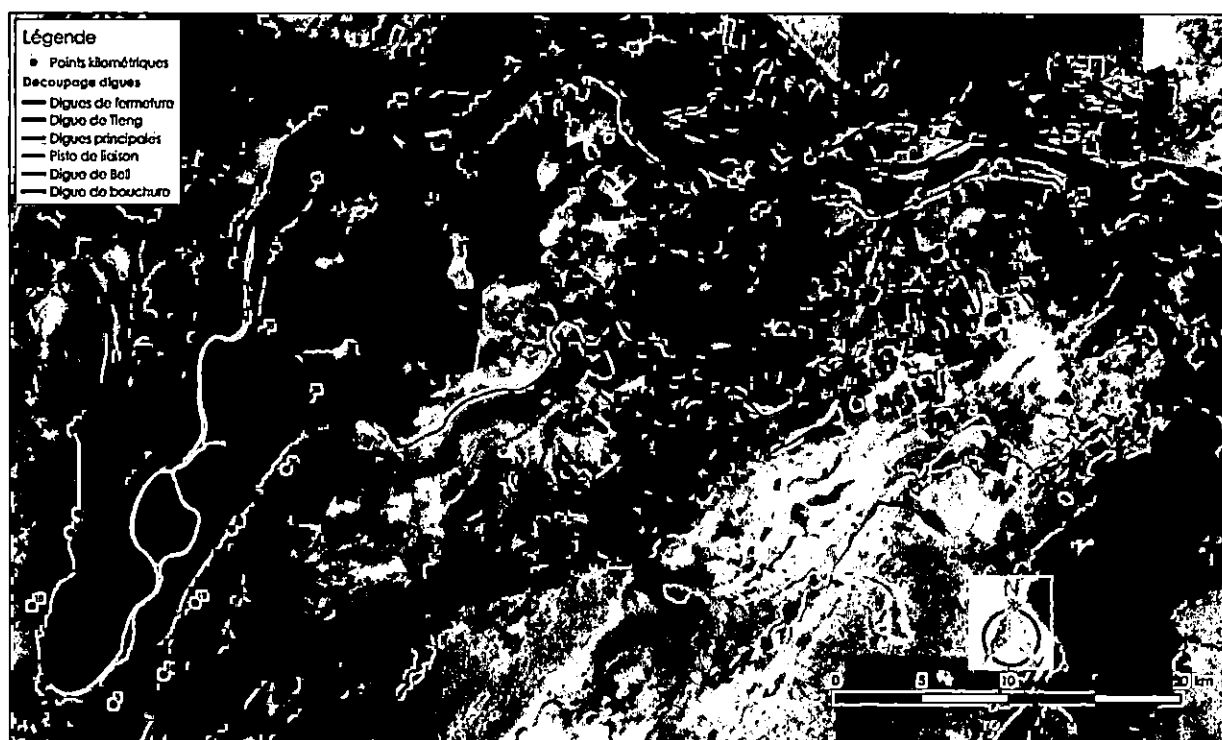


Figure 2-5 : Localisation des digues du fleuve Sénégal de Diama à Rosso

2.1.2 Le cordon littoral

Le cordon littoral présente plusieurs points de faiblesse (Figure 2-7) :

- En Mauritanie sur le secteur de Keur Macène situé 65 km au nord de de Saint-Louis où est présent un ancien défluent du fleuve (marigot des maringouins).
- Au nord immédiat de la zone urbanisée de Saint-Louis et en Mauritanie: sur un linéaire de 15 km, l'altitude du cordon est proche de 2 mIGN avec des points bas à 1.80 mIGN,
- Au Sénégal, à l'aval de Saint-Louis la pointe Sud de la brèche se reconstitue à une altitude de 1.80 mIGN, alors que la partie de la langue de Barbarie non encore touchée par la dérive de l'embouchure se situe à une altitude moyenne supérieure à 3 mIGN.

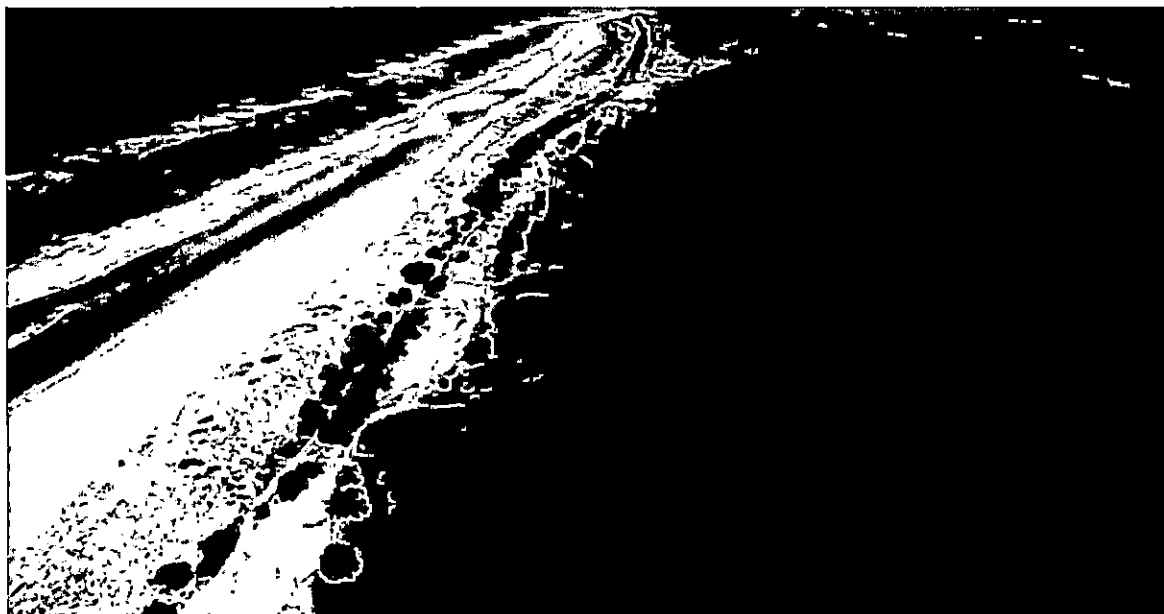


Figure 2-6 : Vue aérienne des plantations de Filaos sur la Langue de Barbarie

Profil en Long du cordon littoral entre Keur Macène et l'embouchure 2003 à Potou

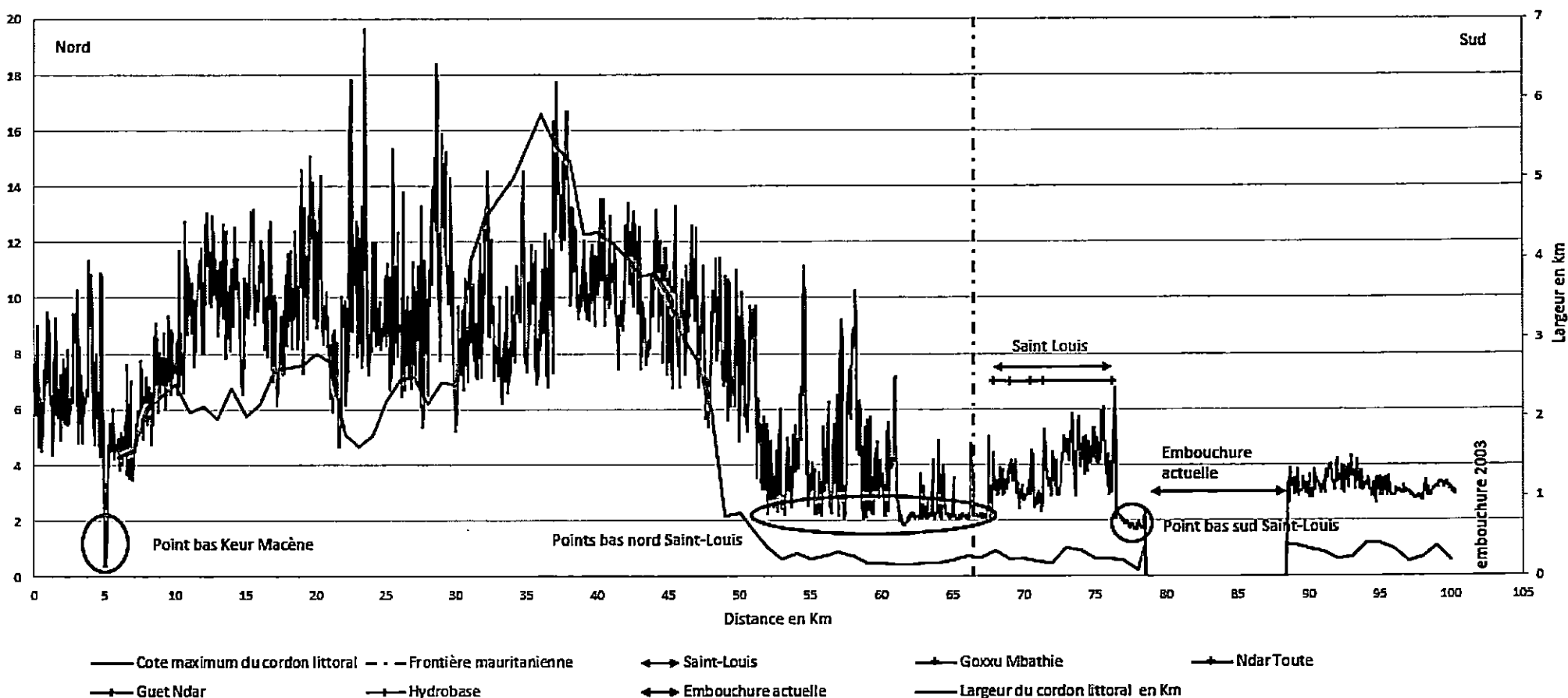


Figure 2-7 : Hauteur et largeur du cordon littoral sur la zone d'étude

Le vent est l'agent principal de la dynamique du système dunaire de la langue de Barbarie. Il favorise l'édification de la dune bordière, là où elle est végétalisée ; à l'inverse, au Nord de Saint-Louis où la végétation sur dune est très peu présente, l'action éolienne devient un facteur limitant du développement en hauteur du cordon dunaire. Le vent participe donc à l'élargissement du cordon, au développement du rivage coté fleuve et est à l'origine d'atterrissements de sable fin dans la lagune ou les défluent du fleuve.

La photo ci-dessus montre les plantations de filaos destinées à stabiliser la Langue de Barbarie. Ces plantations sont réalisées depuis le début du siècle dernier de manière à limiter les risques de rupture du cordon.



Des pièges à sable permettent d'exhausser l'altitude du cordon au Sud de Saint-Louis.

Une opération pilote est menée en ce moment par la coopération Luxembourgeoise. Ces pièges sont mis en place sur la pointe Nord de la brèche.

Un second projet « Solutions douces et suivi des risques côtiers au Bénin, Sénégal et Togo », financée par le Fonds Français pour l'Environnement Mondiale (FFEM) poursuit le même objectif.

Figure 2-8 : Pièges à sable

2.1.3 Les ouvrages de protection contre les crues du fleuve

2.1.3.1 Inventaire des protections existantes sur Saint-Louis

Suite aux inondations de 1994 et de 1999, l'Ile et Sor ont été protégés par la mise en place de murs de quais, de digues (Pikine, Darou) et de digues-routes (route de Khor).

Les principaux ouvrages de protection de Sor sont les suivants :

- La digue route qui s'étend sur 4 500 m, longe le marigot de Khor depuis le pont (vanne) pour rejoindre la route nationale n° 2 en face du quartier de Pikine. Cet ouvrage vise à protéger les quartiers de Ndiolofène Nord, Ndiolofène Sud et Médina Course contre les crues.
- La digue de Darou, longue d'environ 2 100 m, s'étend du pont de Khor à la Corniche et protège le quartier de Darou contre la montée des eaux du fleuve. Cet ouvrage a été submergé en plusieurs endroits lors de la crue de 1999 (ONAS, 1999).
- La digue de Pikine située à l'Ouest de Sor le long du quartier Pikine 1 sur un linéaire de 1.3 km, a été réalisée en 2001,
- Une digue écluse fermant la lagune au Sud et évitant les remontées des eaux du fleuve. Cet ouvrage a été complété par une station de pompage pour contrôler les niveaux de la lagune de Pikine.
- Les quais au Nord-Ouest de Sor (RN2) permettent la jonction des protections entre la digue de Darou et la digue de Pikine.

Suite aux inondations de 1999, un plan d'urgence comportant un ensemble de mesures a été mis en place sous la coordination du Service Régional de l'Office National de l'Assainissement (ONAS) de Saint-Louis :

- Réhabilitation des stations de pompage de Diawlingue (Sor Nord) et de Léona-Diamaguène qui n'étaient plus fonctionnelles,
- Construction d'une nouvelle station de pompage à Diaminar (Sud Eaux Claires).

Ces ouvrages sont fonctionnels en 2019.

L'altimétrie de ces ouvrages a une grande importance dans la problématique d'inondation des zones habitées de Saint-Louis. Cette altimétrie n'était pas connue précisément en particulier pour les murs de quais existants. Des levés topographiques complémentaires, calés sur le 0 de l'échelle de Saint-Louis, ont donc été réalisés pour les quais de protection de l'île de Saint-Louis et de Sor, par SC Afrique en juin 2019.



Figure 2-9 : Ouvrages de protection sur l'île de Saint-Louis



Figure 2-10 : Localisation des travaux de vérification de la cote altimétrique des murs de quais de Saint-Louis

Les résultats obtenus sont les suivants :

- L'altitude des murs de quais de l'Ile est comprise entre 1.35 mIGN et 2.20 mIGN. La continuité des parapets de protection ne semble pas assurée entre l'Hôtel Keur Dada et le quai Roume. Par ailleurs il n'existe pas de protection le long du quai Roume, qui avec des altitudes comprises entre 1.35 et 1.40 m IGN constitue le point faible des protections de l'Ile. A noter également, des points bas sur les parapets du secteur Sud de l'Ile.
- L'altitude des quais de Sor situés au Nord du pont Faidherbe (Corniche) est comprise entre 2.05 mIGN et 2.53 mIGN.

Par ailleurs les données Lidar permettent de préciser l'altitude des principales digues et routes digues de protection de Sor :

- L'altitude de la digue route qui longe le marigot de Khor entre le pont Vanne et la RN2 est comprise entre 1.55 mIGN et 2.40 mIGN. Les points de faiblesse altimétrique sur cet ouvrage se situent face au quartier Ndiolofène Nord sur un linéaire d'environ 400m.
- L'altitude de la digue de Darou située entre le pont de Khor et la corniche est comprise entre 1.40 mIGN et 1.70 mIGN ; Cet ouvrage de linéaire 2km est l'ouvrage le plus bas altimétriquement de l'ensemble des protections de Sor et constitue (à l'instar de la crue de 1999) le principal point de pénétration des eaux sur Sor.
- L'altitude de la digue de Pikine est comprise entre 1.60 mIGN et 1.90 mIGN

Tableau 2-2 : Altitude minimum et maximum des ouvrages de protection de Saint-Louis

Localisation	Date de construction	Altitude minimum (mIGN)	Altitude maximum (mIGN)
Quais de l'Ile	2000 (Renforcement)	1.60	2.20
Quais corniche	2000 (Renforcement)	2.05	2.53
Digue route	1995	1.55	2.40
Digue Darou	1995	1.40	1.70
Digue Pikine	2001	1.60	1.90

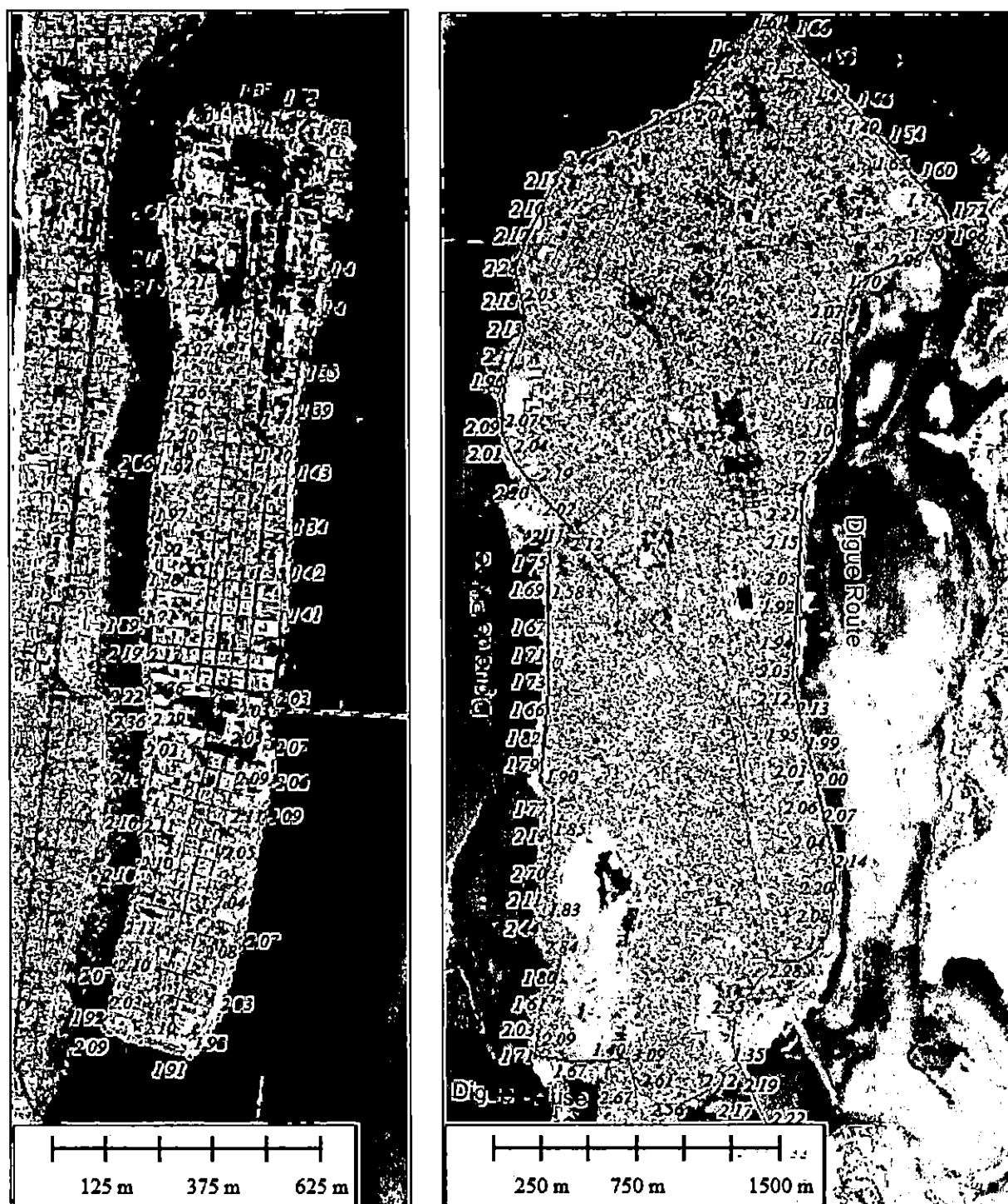


Figure 2-11 : Localisation et altitude IGN des principaux ouvrages de protection de Saint-Louis

Tableau 2-3 : Niveau de protection assuré par les ouvrages de protection de Saint-Louis

Localisation	Point faible	Début de débordement (mIGN)	Début de débordement : hauteur à l'échelle de Saint-Louis (m)
Ile	Quai Roume	1.35	1.78
Sor	Digue de Darou	1.40	1.83

2.1.3.2 Etat des murs de quais et des digues de Saint-Louis

L'état des murs de quais et des digues de Saint-Louis est préoccupant :

- Les parapets des quais de l'île sont en voie de ruine sur de nombreux secteurs, notamment sur la pointe Sud, au Nord de l'île entre l'hôtel la Louisiane et l'hôtel Keur Dada ainsi qu'en aval de la capitainerie.
- Les quais de la corniche (Sor Nord) ont été échancrés pour permettre l'assainissement pluvial de la voirie et des quartiers adjacents ce qui diminue leur niveau de protection contre les crues du fleuve.

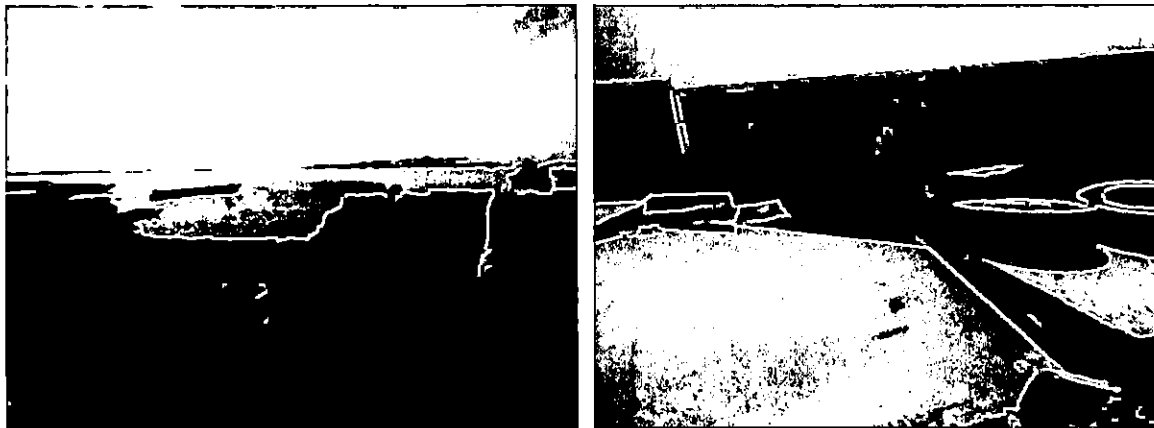


Figure 2-12 : Brèches sur les parapets sud et ouest de l'île

La structure de la digue de Pikine doit être vérifiée par des sondages géotechniques de manière à s'assurer de sa stabilité.

Il est nécessaire qu'un état des lieux de ces ouvrages débouchant sur un programme de réhabilitation soit réalisé au plus vite de manière à maintenir le niveau de protection existant contre les inondations.

2.1.4 Inondations par remontée de nappe et ruissellement pluvial

Les inondations de la ville de Saint-Louis par remontée de nappe et par ruissellement pluvial ne sont pas prises en compte au stade actuel de l'étude.

2.2 Construction et calage du modèle

Ce chapitre propose un rappel synthétique des éléments présentés dans le rapport L4 – Rapport sur le développement, la calibration et la validation des modèles. Les derniers ajouts au modèle y sont également présentés.

2.2.1 Présentation du logiciel de calcul

La modélisation est réalisée avec le logiciel bidimensionnel Infoworks ICM 2D développé par HR Wallingford, qui permet de modéliser les écoulements de surface complexes en zone inondable par un maillage bidimensionnel. La zone inondable est représentée par des mailles triangulaires. Les hauteurs d'eau et vitesses sont calculées localement en chaque point du maillage.

La modélisation 2D se justifie pour représenter finement les écoulements bidimensionnels à surface libre, et permet de calculer précisément le fonctionnement sur les secteurs particuliers (zones urbaines, digues, ...).

Le module 2D utilise le principe de discrétisation de la zone inondable sous forme de mailles triangulaires et résout les équations de St Venant pour la hauteur et la vitesse en deux dimensions. Un modèle numérique de terrain (MNT) est utilisé pour la création du maillage. Des zones de vides, des lignes de contrainte et des murs peuvent être inclus dans le maillage.

Le modèle permet de représenter les écoulements en lit majeur et mineur, les ouvrages de franchissements, et les aménagements connexes (digue, seuils, bras morts ...). Toutes les lois d'hydraulique classiques sont modélisables en fonction du type d'ouvrage et de son fonctionnement (lois d'orifice, lois de Bernoulli, lois de seuils, siphons, vannes mobiles...).

Les lits mineurs et majeurs avec des écoulements complexes sont représentés par le module bidimensionnel du logiciel. Le maillage est adapté aux contraintes du terrain.

Le maillage 2D est construit pour prendre en compte les particularités des écoulements en se basant sur des lignes topographiques structurantes appelées « lignes de contraintes » (obstacles, remblais, ouvrages, discontinuités topographiques...).

2.2.2 Construction du modèle

La zone d'étude modélisée au stade de la phase 4 concernait le fleuve Sénégal et sa zone inondable entre l'aval du barrage de Diama et le débouché en mer.

Pour la phase 5, le modèle a été complété à l'amont du barrage de Diama dans la zone inter-digue suite à la réception des données bathymétriques du fleuve.

L'emprise totale de la zone modélisée couvre **5300 km²**.

Le modèle est construit par un maillage 2D comportant 460 000 mailles dont la taille varie entre 10 m² (zone urbanisée de Saint-Louis, digues, berges du fleuve...) et 20 000 m² dans les zones d'expansion de l'inondation.

Le positionnement de l'embouchure du fleuve pour les modélisations aux horizons futurs est issu des résultats du modèle morphodynamique à long terme ShorelineS, présenté au chapitre 3.2.

Le modèle prend en compte la bathymétrie du lit mineur du fleuve et des principaux bras secondaires. Lorsque la donnée était disponible, les levés bathymétriques ont été utilisés pour représenter au mieux le gabarit du fleuve. Pour les autres cas de figures, les résultats du modèle Delft3D (chapitre 3.1) ont été employés. Les configurations modélisées sont précisées dans chacune des sections dédiées aux scénarios d'aménagement.

A l'amont du barrage de Diama, le fleuve endigué est représenté en 1D grâce à des profils en travers correspondant aux levés bathymétriques.

Dans le lit majeur, les éléments structurants de type digues, remblais et routes sont intégrés par le biais de « lignes de rupture » représentant leur topographie. C'est le cas en particulier :

- Des murs de quais et des digues de St Louis,
- Des routes principales en remblais,
- Les ouvrages vannés sur la partie Est (Bango...),
- Les digues en amont du barrage de Diama.

Les ouvrages de franchissements sous remblais sont modélisés par les lois d'ouvrages adaptées à chaque type (orifice, seuil, etc).

Les lignes topographiques structurantes prises en compte dans la modélisation sont figurées page suivante.

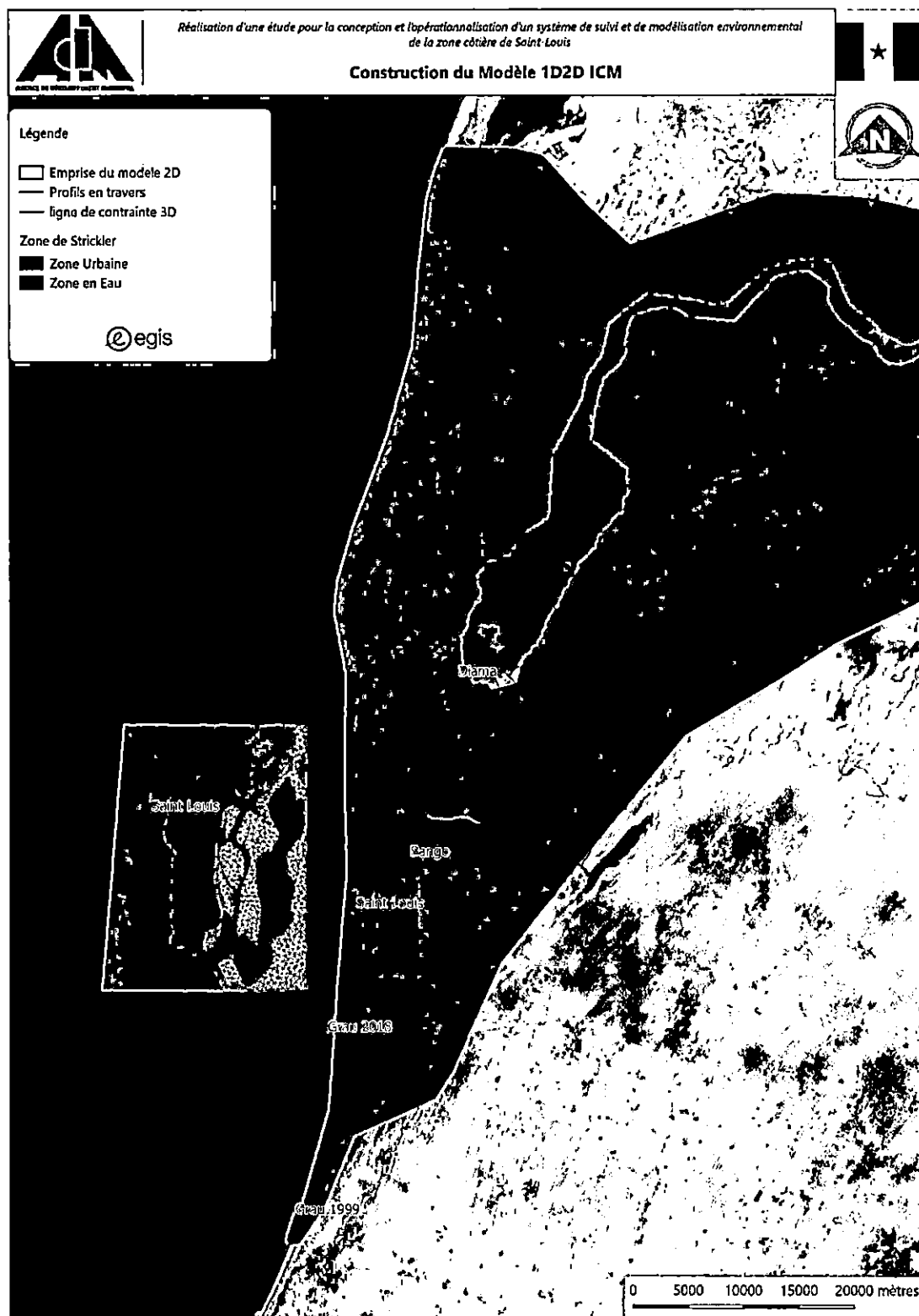


Figure 2-13 : Maillage du modèle hydraulique

2.2.3 Calage du modèle à l'aval de Diama

2.2.3.1 Les crues de calage

Le calage du modèle hydraulique a été présenté dans le rapport L4. Il a consisté à ajuster les paramètres de calage (coefficients de Strickler) de façon à faire coïncider les résultats des cotes calculées avec les cotes observées sur les épisodes de crues historiques.

Les cotes observées qui ont permis le calage sont celles observées aux échelles de St Louis et de Diama. Les crues retenues pour le calage du modèle sont les suivantes :

- Crue de 2018 (21/07/2018 - 29/10/2018).
- Crue de 2003 (15/08/2003 – 3/10/2003 : date de l'ouverture de la brèche)
- Crue de 1999 (15/08/1999 - 08/12/1999)

Les crues de 1999 (2070 m³/s) et de 2003 (2060 m³/s) correspondent aux épisodes de crues les plus importants de la période précédant l'ouverture artificielle de la brèche.

2.2.3.2 Conditions aux limites du modèle

Les conditions aux limites sont constituées par :

- Les hydrogrammes de crue injectés en amont du modèle
- Le marégramme imposé en condition limite en mer.

Les hydrogrammes de crue utilisés proviennent des hydrogrammes observés au droit du barrage de Diama pour les trois crues de calage.

Les marégrammes utilisés sont issus des marées astronomiques définies par rapport au niveau moyen de la mer. Une valeur de +15 cm a été appliquée aux données de la marée astronomique pour tenir compte des surcotes et du setup.

Le niveau moyen de mer est pris égal à +1 m CM, soit 0 m IGN.

2.2.3.3 Les configurations de modèle utilisées

La configuration topographique du modèle a été adaptée par la prise en compte des ouvrages de protection existants lors de la crue étudiée.

Tableau 2-4 : Prise en compte des ouvrages de protection de la ville de Saint-Louis

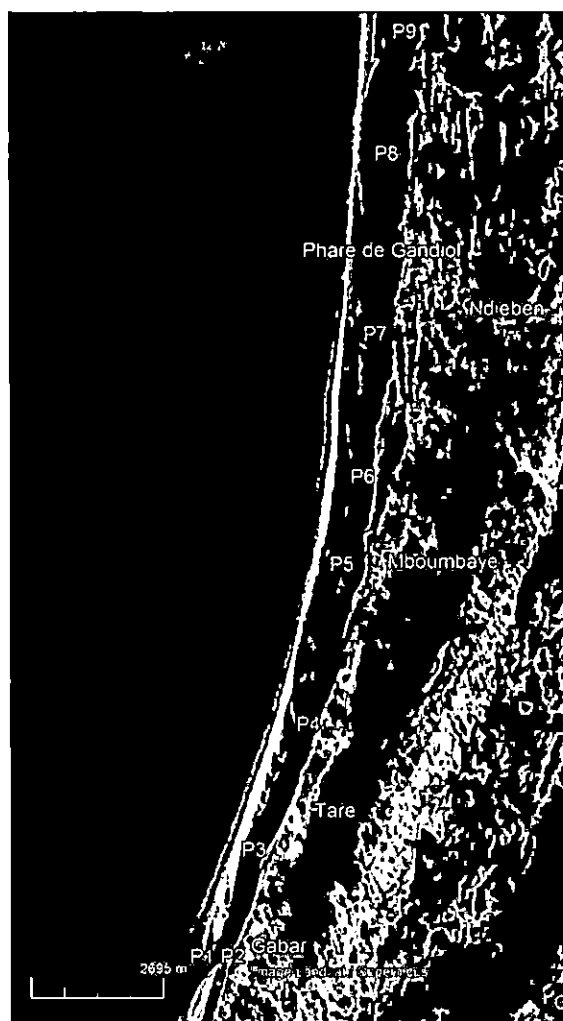
Localisation	Crue de 2018	Crue de 2003	Crue de 1999
Quais de l'île	X	X	X
Quais corniche	X	X	X
Digue route	X	X	X
Digue Darou	X	X	X
Digue Pikine	X	X	

Deux configurations de l'embouchure du fleuve ont été modélisées :

- Configuration actuelle (2019). Cette configuration est décrite topographiquement par les levés réalisés en Janvier 2019.
- Reconstitution de la configuration de l'embouchure du fleuve antérieure à l'ouverture artificielle de la brèche de Saint-Louis. Cette configuration correspondant à la situation de Juin 2000 a été utilisée pour l'étude et le calage de crues de 1999 et de 2003.

Pour la configuration antérieure à 2003 de l'embouchure, le MNT bathymétrique a été construit à partir des données de profils en travers fournies dans le rapport de l'IRD pour l'OMVS « Inondation de la ville de St Louis » en 2000.

Le tableau ci-dessous synthétise les informations issues de la campagne bathymétrique.



N° Profil	Distance Pont Faidherbe (m)	Section (m²)	Largeur (m)
P9	10000	3047	617
P8	12485	3400	989
Phare Gandiol	14450	3551	887
P7	16144	3070	809
P6	19049	1933	429
P5	20835	2012	714
P4	24075	1833	406
P3	26636	1752	458
P1	28846	936	289
P2	28846	911	286

Le tableau met en évidence la variation de surface mouillée en fonction de la distance au pont Faidherbe. Il apparaît que la diminution de la section d'écoulement constatée d'amont en aval, qui induit la mise en vitesse des écoulements, est nécessaire pour que le fleuve puisse déboucher en mer en compensant les apports du transport littoral.

La vitesse des écoulements est accentuée à marée descendante par l'effet de seuil au niveau de l'embouchure.

Figure 2-14 : Localisation des profils en travers levés en Juin 2000

2.2.3.4 Les résultats retenus

Les meilleurs résultats de calage ont été obtenus pour les coefficients de Strickler suivants :

- Lit mineur : 45 à 50
- Lit majeur : 40
- Zones bâties : 10

Le tableau ci-dessous présente une synthèse du calage sur les trois épisodes étudiés.

Tableau 2-5 : Niveaux d'eau calculés et observés : crues de 2018, 2003 et 1999 (mIGN)

Localisation	Crue 2018		Crue 2003		Crue 1999	
	Observé	Calculé	Observé	Calculé	Observé	Calculé
Mer	0.94	0.94	0.9	0.9	0.85	0.85
Saint-Louis	0.76	0.93	1.54	1.47	1.57 – 1.65	1.60
Diam	1.24	1.29	1.72	1.77	1.79	1.87

Les résultats de la modélisation pour les trois crues de calage fournissent des écarts inférieurs à 10 cm entre cotes observées et mesurées, à l'exception du niveau observé à St Louis lors de la crue de 2018 dont la cote reste peu précise (seuls des enregistrements journaliers sont disponibles à Saint-Louis lors de cette crue).

Le modèle permet donc de représenter de manière fidèle la dynamique des inondations sur le delta du fleuve Sénégal en période de forte crue.

Il est cependant à observer que le jeu de crue utilisé pour le calage reste entaché d'incertitudes (condition limite en mer, hauteurs journalières sur les échelles de Saint-Louis et Diam, recalage IGN du 0 des échelles limnimétriques...). Malgré la qualité des résultats obtenus lors de la phase de calage et étant donné les résultats de l'analyse de sensibilité, il est probable que la précision du modèle soit comprise entre 10 et 20 cm. Cette incertitude devra être intégrée aux sécurités et revanches prises dans le dimensionnement des futurs ouvrages de protection

2.2.4 Calage du modèle entre Diam et Richard Toll

Cette partie du modèle correspond à la zone intra-digue comprise entre le barrage de Diam et Richard Toll. Les hypothèses suivantes sont retenues :

- La bathymétrie levée en Novembre 2019 correspond uniquement au lit mineur du fleuve. La partie du lit comprise entre les rives du fleuve et les endiguements n'a pas été levée du fait de l'encombrement par les Thyphas. Les profils ont donc été extrapolés sur cette zone. De ce fait, le niveau d'envasement de la retenue du barrage n'est pas connu avec précision.
- La condition limite aval est définie dans le « *Manuel de Gestion du Barrage de Diam* » (IRD, Octobre 2001). Ce manuel définit les consignes d'exploitation permettant d'atteindre les objectifs de gestion (maintien d'un plan d'eau amont élevé le plus longtemps possible hors période de crue), et définit la position des vannes du barrage en fonction des débits pour respecter les règles de sécurité imposées par le constructeur du barrage. Le manuel définit également les pertes de charge pour les fortes crues (> 1850 m³/s) pour lesquelles la totalité des vannes sont ouvertes.

Le modèle a été calé sur la crue de 1999, à partir des enregistrements réalisés lors de cette crue aux stations de Diama, Rosso et Richard Toll, en prenant en compte les coefficients de Strickler suivant :

- Lit mineur : 52.5
- Lit moyen : 22

Tableau 2-6 : Niveaux d'eau calculés et observés lors de la crue de 1999 entre Diama et Richard Toll (mIGN)

Localisation	Crue 1999	
	Observé	Calculé
Diama	1.87	1.87
Rosso	2.87	2.90
Richard Toll	3.03	3.03

Le profil en long met en évidence :

- Une non homogénéité de la cote des digues entre la rive droite (Mauritanie) et la rive gauche (Sénégal). Ces différences de cote peuvent atteindre 0.50 m sur la partie médiane du fleuve.
- Une faible revanche (sécurité) lors de la crue de 1999 par rapport aux cotes des digues de rive droite (0.50m).

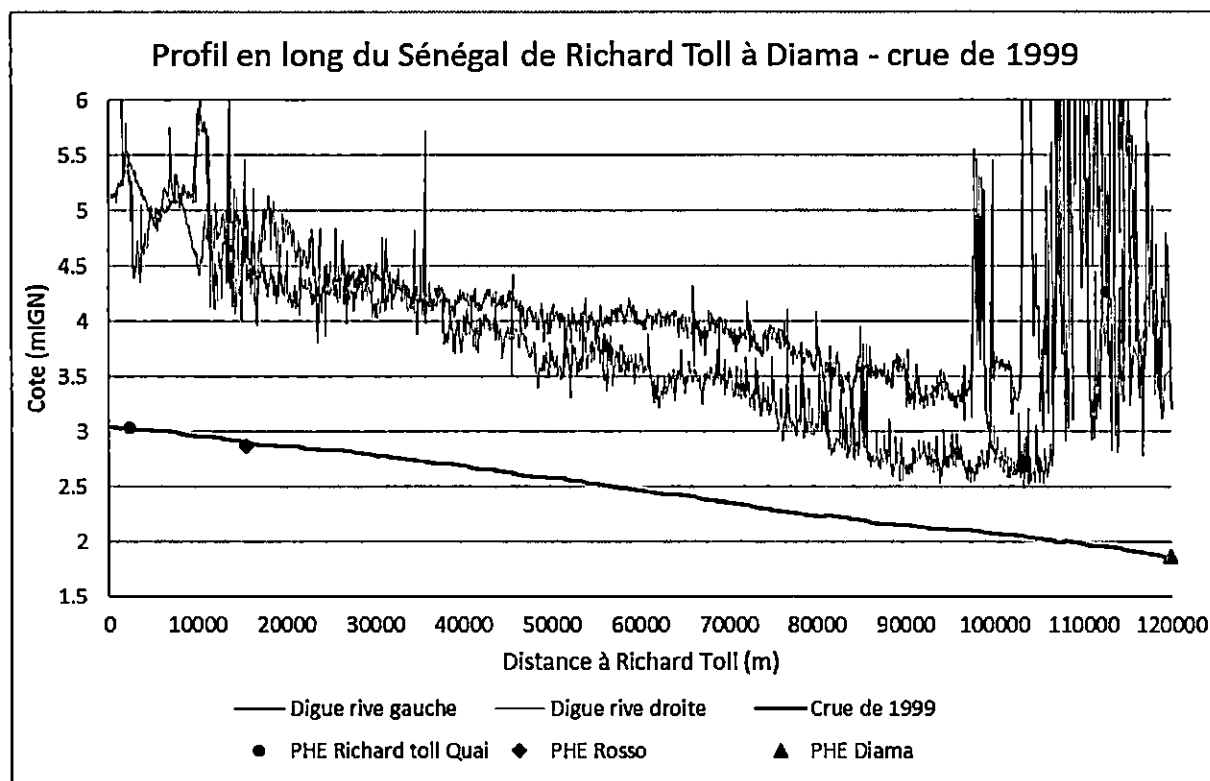


Figure 2-15 : Modélisation de la crue de 1999 entre Diama et Richard Toll

2.2.5 La crue de 1999

La Figure 2-16 montre une très vaste extension des zones inondées en Mauritanie. La zone inondable s'étend jusqu'à Keur Macène (60 km en amont de Saint-Louis) et se propage même au-delà dans les zones dépressionnaires bordant le littoral Mauritanien.

Le volume total de la crue de 1999 est de 17.4 Milliards de m³ pour un débit de pointe de 2070 m³/s.

Les surfaces inondées sont les suivantes :

- 745 km² en Mauritanie,
- 482 km² au Sénégal.

Les volumes stockés dans le delta au paroxysme de la crue sont de 396 Millions de m³ au Sénégal et de 700 Millions de m³ en Mauritanie.

En aval du barrage de Diama les chenaux de crue existants dans le lit majeur d'inondation sont activés et amènent les eaux de crue :

- Au nord, en direction du Parc du Diawling puis de Keur Macene. A noter la présence d'une ancienne embouchure sur le secteur de Keur Macene (le Marigot des Maringouins) pouvant être possiblement activé lors de crues fortes.
- Au sud en direction de Saint-Louis. Sur ce secteur plusieurs bras défluent se dirigent vers l'Ouest et longent le cordon littoral en le fragilisant sur un linéaire de près de 16 km.

Les cotes atteintes par l'inondation entre Saint-Louis et Keur Macene sont de 1.80 m IGN, soit des cotes très proches de l'altitude des points bas observées sur le cordon littoral (de l'ordre de 1.80 à 2 m IGN en amont immédiat de Saint-Louis). Ces données confirment les informations recueillies auprès de l'UGB : une des raisons de l'ouverture de la brèche artificielle de 2003 était de parer au risque de création d'une brèche naturelle du fleuve en amont des zones habitées de Saint-Louis.

En rive gauche du fleuve, sur la partie sénégalaise du delta, l'extension de l'inondation est limitée par l'altitude moyenne du terrain naturel ainsi que par les nombreux ouvrages longitudinaux (routes, ouvrages d'irrigation) qui entravent la remontée des eaux de crue vers le Nord.

Au sud de Saint-Louis, dans le Gandiolais, la cartographie de l'inondation de 1999 montre une faible extension des zones inondées, en particulier les communes situées à l'aval de Mouit ont été très peu inondées.

A l'échelle du delta les cartographies des zones inondées en 2003 et 1999 sont sensiblement identiques.

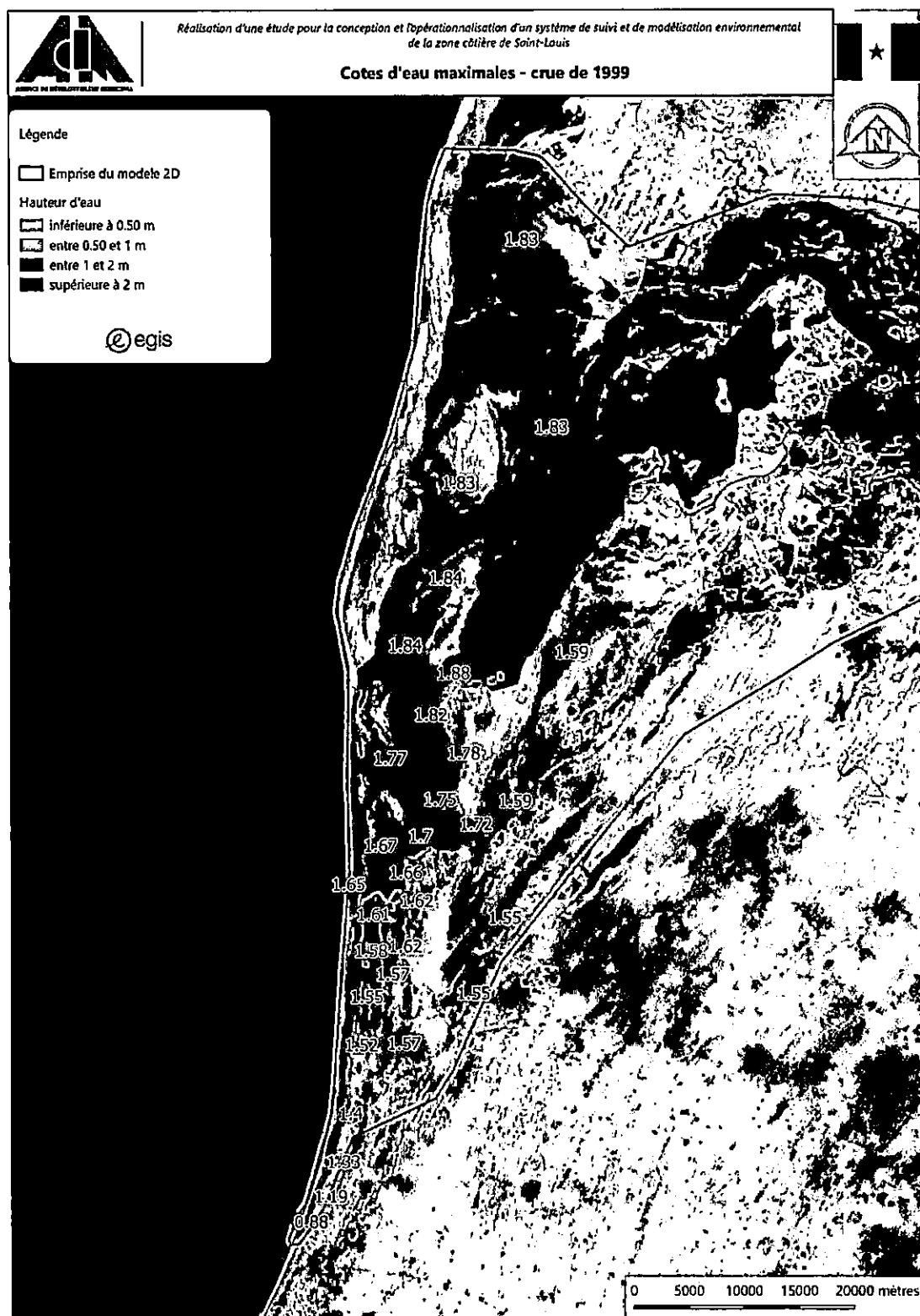


Figure 2-16 : Hauteurs d'eau maximales – Crue de 1999 – Delta du fleuve

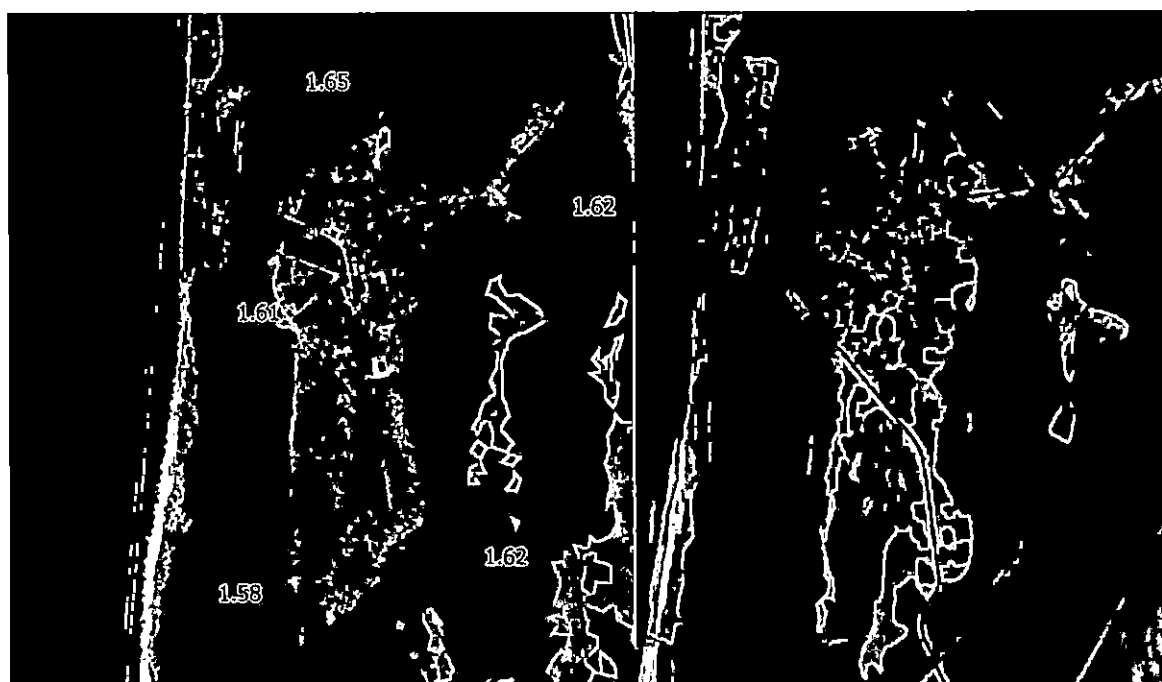


Figure 2-17 : Zoom sur Saint-Louis – Cartographie de la zone inondable modélisée et des cartographies issues des photos satellites

Les cartes ci-dessus permettent la comparaison entre :

- La cartographie de l'inondation de 1999 zoomée sur Saint-Louis résultante de la modélisation,
- La cartographie des zones inondées en 1999 identifiées à partir de l'analyse de photos satellites Landsat et Spot prises le 23 Octobre 1999 (OMVS 2013).

Les résultats obtenus sont sensiblement équivalents et la modélisation représente bien les inondations qui se sont déroulées en 1999.

A noter que le modèle ne représente pas l'inondation des points bas de cité Niakh et de Médina Course qui sont liées à la remontée de la nappe phréatique et à la pluviométrie, ce secteur étant protégé par la digue route.

Au droit de Saint-Louis, il est observé :

- L'inondation de la partie Nord de l'île,
- Sur Sor, l'inondation des quartiers de Darou, Ndiolofène Nord, Diamaguène, Léona, Eaux Claires, Diaminar, Pikine 2, Pikine 3,
- L'inondation de Khor.

Ces inondations ont été aggravées par la conjonction de la crue du fleuve avec des pluies importantes ainsi qu'avec la remontée de la nappe qui a touché l'ensemble des points bas de Sor.

En 1999 les villages de pêcheurs du Gandiolais ont été également inondés le long du fleuve, le village de Keur Barka situé à 5km au sud-ouest de Saint-Louis a été abandonné, le village de Doun Baba Dieye a aussi été inondé.

2.3 Le risque inondation en situation actuelle (2019)

L'emploi du modèle hydraulique pour la définition de l'aléa dans la situation actuelle (2019) permet de dresser un premier bilan de l'exposition de Saint-Louis et des autres communes du delta aux risques d'inondation induits par les crues du fleuve. Cette situation sert de référence pour mesurer l'évolution de l'aléa dans les années à venir pour chaque scénario d'aménagement.

Les modélisations hydrauliques portent sur des crues de période de retour comprises entre 2 et 100 ans pour la situation de 2019.

Les hypothèses retenues pour la configuration du fleuve et de l'embouchure sont les suivantes :

- L'embouchure se situe 11 km à l'aval du Pont Faidherbe. La bathymétrie retenue est celle levée en Janvier 2019.

2.3.1 Inondabilité de Saint-Louis

Le Tableau 2-7 présente les cotes atteintes par le fleuve en différents points le long du cordon littoral et notamment au niveau des échelles limnimétriques de Diama et du Pont Faidherbe. Le point kilométrique (PK) de l'embouchure en 2019 est donné en kilomètres à l'aval du Pont Faidherbe, retenu comme PK 0 pour notre étude.

Tableau 2-7 : Risque inondation en situation actuelle (2019) sur Saint-Louis

Horizon d'étude	Position de l'embouchure	Période de retour (ans)	Débit (m³/s)	Cote max S3 (mIGN)	Cote max Diama (mIGN)	Cote max S2 (mIGN)	Cote max S1 (mIGN)	Cote max amont Saint-Louis (mIGN)	Cote max Saint-Louis (Faidherbe) (mIGN)	Cote max aval Saint-Louis (mIGN)
2019	Position 2019 PK 11	2	1944	1.25	1.47	1.35	1.26	1.16	1.15	1.12
		5	2333	1.48	1.62	1.50	1.39	1.21	1.19	1.15
		10	2449	1.53	1.67	1.55	1.44	1.24	1.21	1.16
		30	3060	1.76	1.89	1.77	1.64	1.39	1.34	1.23
		100	3384	1.86	1.99	1.87	1.75	1.48	1.41	1.28

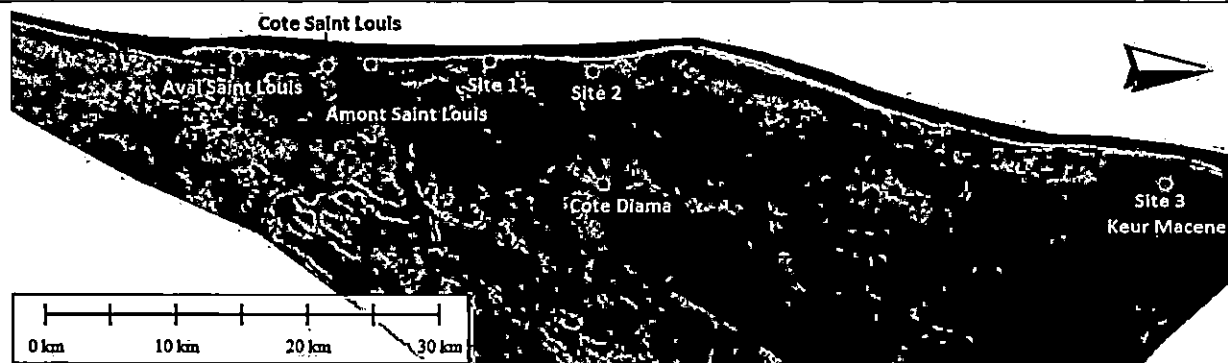


Figure 2-18 : Situation actuelle (2019) : Localisation des points de contrôle

Dans la situation actuelle, les cotes du fleuve ne dépassent pas la cote de 1.50 mIGN jusqu'à l'occurrence centennale. En cohérence avec les éléments présentés plus loin, au chapitre 5, Saint-Louis est protégée des inondations jusqu'à l'occurrence centennale et aucune surverse sur le cordon littoral n'est à prévoir.

A l'heure actuelle, une crue de type 1999 ($2070 \text{ m}^3/\text{s}$) n'engendrerait aucune inondation sur Saint-Louis en raison de la proximité de la brèche. En effet, la cote observée en 1999 au Pont Faidherbe atteignait 1.61 mIGN avec une embouchure localisée à Potou (PK 31), tandis que dans la situation actuelle, avec une embouchure située 20 km plus en amont, un débit similaire amène la ligne d'eau entre 1.15 et 1.19 mIGN.

Cette situation est cependant très évolutive en fonction de la migration de la brèche vers le sud, la ville de Saint-Louis sera par conséquent de plus en plus exposée au risque au fil des années, à mesure que l'embouchure s'éloigne de la ville.

Pour une crue centennale, les inondations touchent 8000 habitants, soit 3% de la population saint-louisienne.

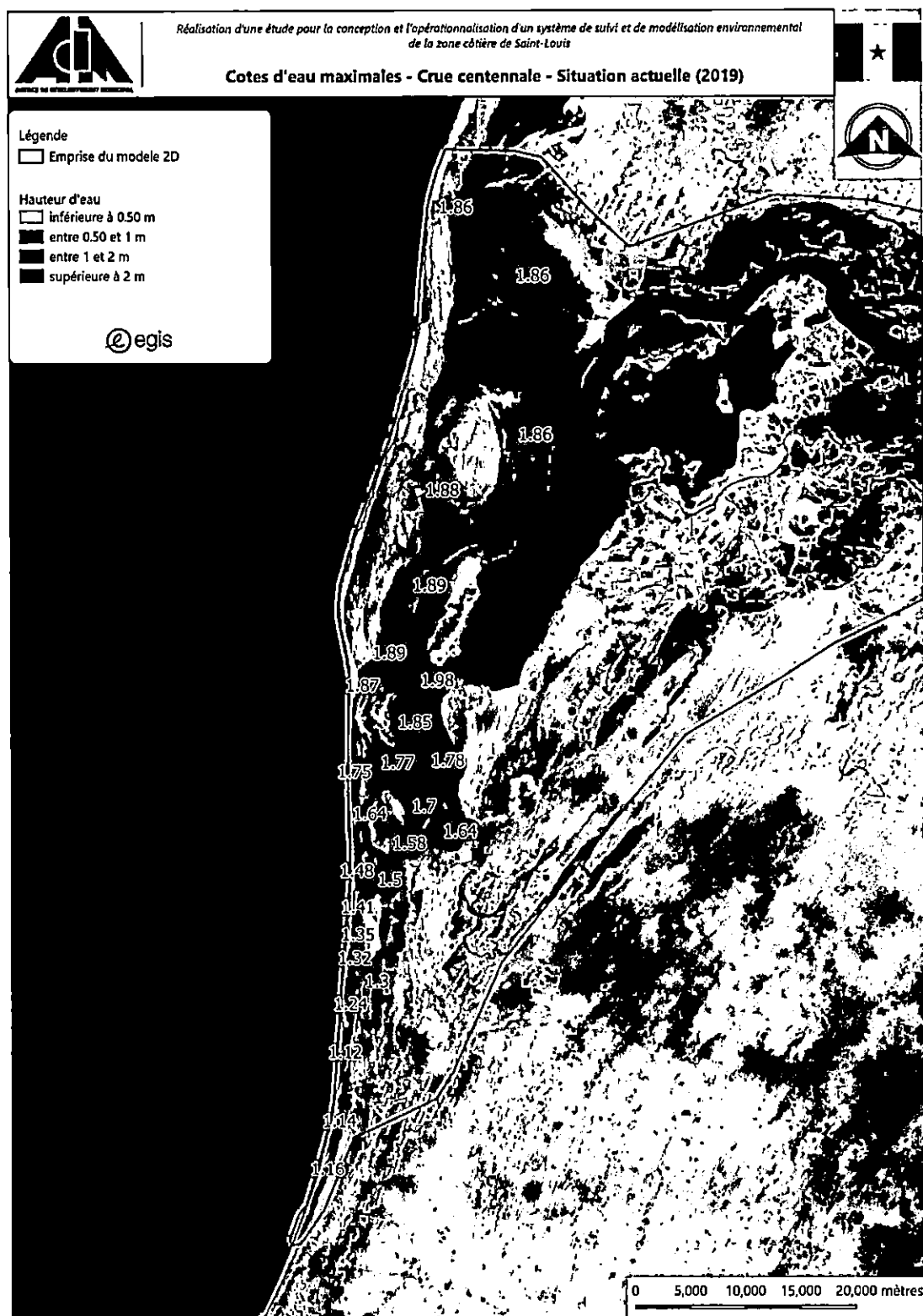


Figure 2-19 : Cotes d'eau maximales – Q100 – Situation actuelle (2019) – Delta du fleuve

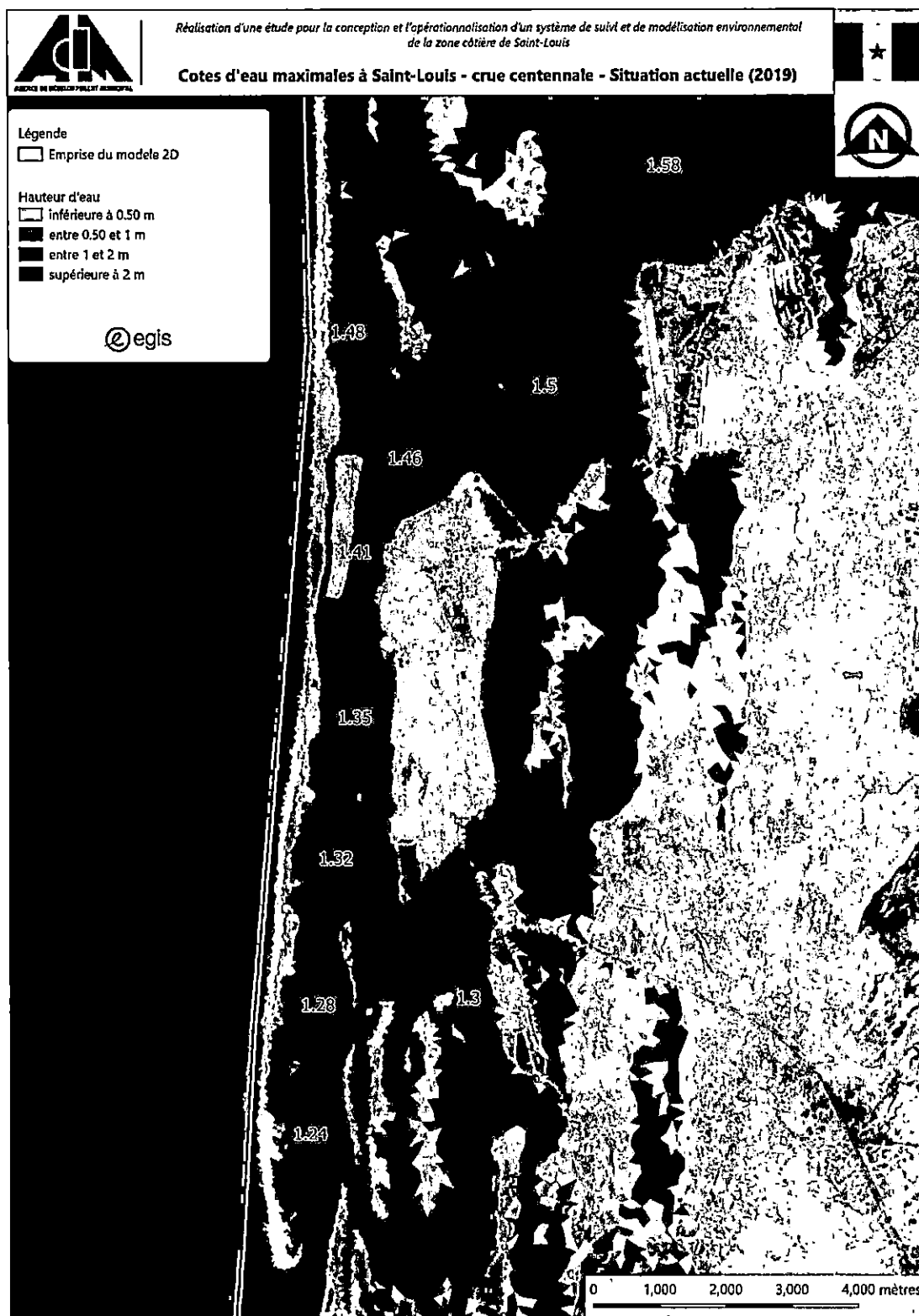


Figure 2-20 : Cotes d'eau maximales – Q100 – Situation actuelle (2019) – Zoom sur Saint-Louis

2.3.2 Inondabilité des communes du delta

Le delta du Sénégal est couvert dans sa partie nord par la Mauritanie, et en rive gauche par 5 communes sénégalaises dont la commune de Saint-Louis (Figure 2-21). Les caractéristiques des communes du delta, à l'exclusion de Saint-Louis, sont les suivantes :

- **Ndiébène Gandiole (25 100 habitants)** s'étend long de la rive gauche du fleuve du sud de Saint-Louis (village de Diéle Mbame), à Mbao au sud. Elle comprend les villages côtiers du Gandiolais de Ndiébène, Pilote Barre-Tassinère, Mouit, Mboumbaye et Degounaye, qui sont actuellement menacés par la migration de l'embouchure vers le sud.
- **Leona (1 100 habitants)** se trouve à l'extrémité sud du delta. Elle inclue les villages de Tare et Gabar situés en rive gauche du fleuve Sénégal ainsi que Potou, plus dans les terres, au niveau de la position de l'embouchure avant la brèche artificielle de 2003.
- **Gandon (48 500 habitants)** est située à l'est de Saint-Louis. Elle comprend notamment les zones peuplées de Gandon et Diougop Peul, en périphérie de Saint-Louis.
- **Diama (49 000 habitants)**, située le long des digues en rive gauche du fleuve, regroupe une cinquantaine de municipalités dont la plus peuplée est Ross Béthio, à l'est de du delta.
- **Mauritanie (1 900 habitants sur le delta)**. La partie mauritanienne du delta comprend principalement les communes de Diemar et Ndiago, ainsi que Keur Macène à l'extrême nord.

La population totale présente sur le delta, hors Saint-Louis, avoisine les 127 500 habitants.

Dans la situation actuelle, les inondations n'impactent que très peu les communes du delta. La population impactée par une crue centennale est la suivante :

- **Ndiébène Gandiole** : aucun habitant touché,
- **Gandon** : 2 700 habitants touchés,
- **Diama** : aucun habitant touché,
- **Mauritanie** : 1 200 habitants touchés,
- **Leona** : aucun habitant touché,
- **TOTAL** : 3 900 habitants touchés.

A l'état actuel, seules la commune de Gandon (Figure 2-22) et la Mauritanie sont impactées dans la situation actuelle (2019).

Sur la commune de Ndiébène Gandiole, du fait de la proximité de l'embouchure, les cotes dans le fleuve sont trop basses pour générer des inondations fluviales sur les villages (Figure 2-23).

Sur Diama, les localités, surtout les plus peuplées (Ross Béthio, etc.), sont positionnées suffisamment en hauteur pour être préservées des inondations.

De manière générale, l'analyse du positionnement des zones bâties des différentes communes révèle les éléments suivants :

- **Ndiébène Gandiole** : une large partie de la population est installée près des points bas, notamment à proximité du littoral, l'exposant ainsi aux remontées de nappe et à la propagation des débordements fluviaux dans les terres. La cote de l'ancienne rive gauche du fleuve est par endroit assez haute (> 2.2 mIGN), mais certains points de faiblesse sous la cote 1.8 mIGN exposent les villages côtiers aux plus fortes crues du fleuve.

- **Gandon** : la majeure partie de la population de cette commune est installée en hauteur, à l'abri des inondations. L'étalement urbain non maîtrisé de certaines localités peuplées, en particulier Diougop Peul, expose une partie des habitants aux inondations.
- **Diama** : les municipalités de cette commune sont en grande partie construites en hauteur. La population impactée par les inondations est composée de populations isolées disséminées à travers le vaste territoire de la commune.
- **Mauritanie** : environ un tiers de la population mauritanienne présente sur le delta est régulièrement exposée aux inondations. Les villages sont construits pour beaucoup le long d'anciennes branches du fleuve mises en eau lors des crues d'hivernage et constituant un danger lors de fortes crues.
- **Leona** : les villages côtiers de Tare et Gabar sont construits en hauteur, autour de la cote 3 mIGN et sont par conséquent préservés des crues du fleuve. Le reste des localités de la commune est situé à l'intérieur des terres, hors de l'influence du fleuve Sénégal.

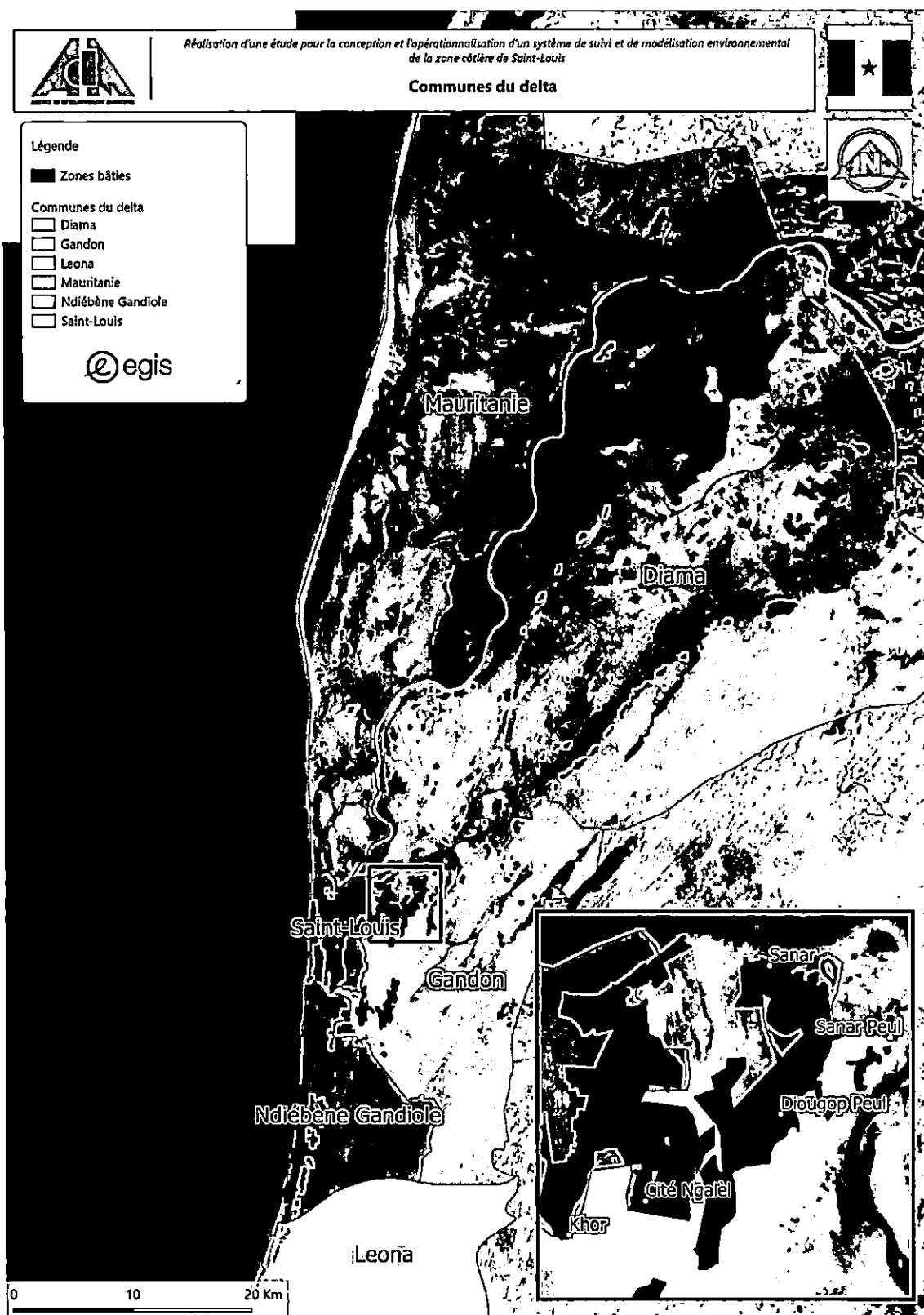


Figure 2-21 : Communes du delta du fleuve Sénégal

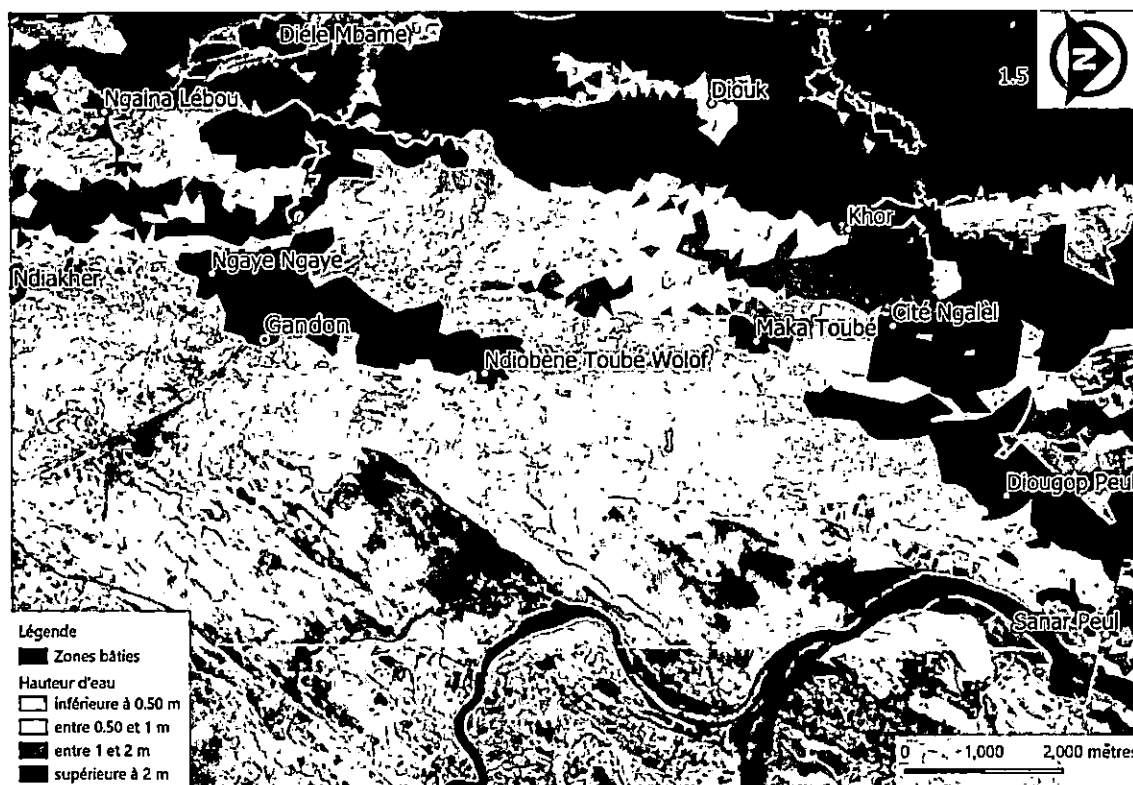


Figure 2-22 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Situation actuelle (2019) – Q100

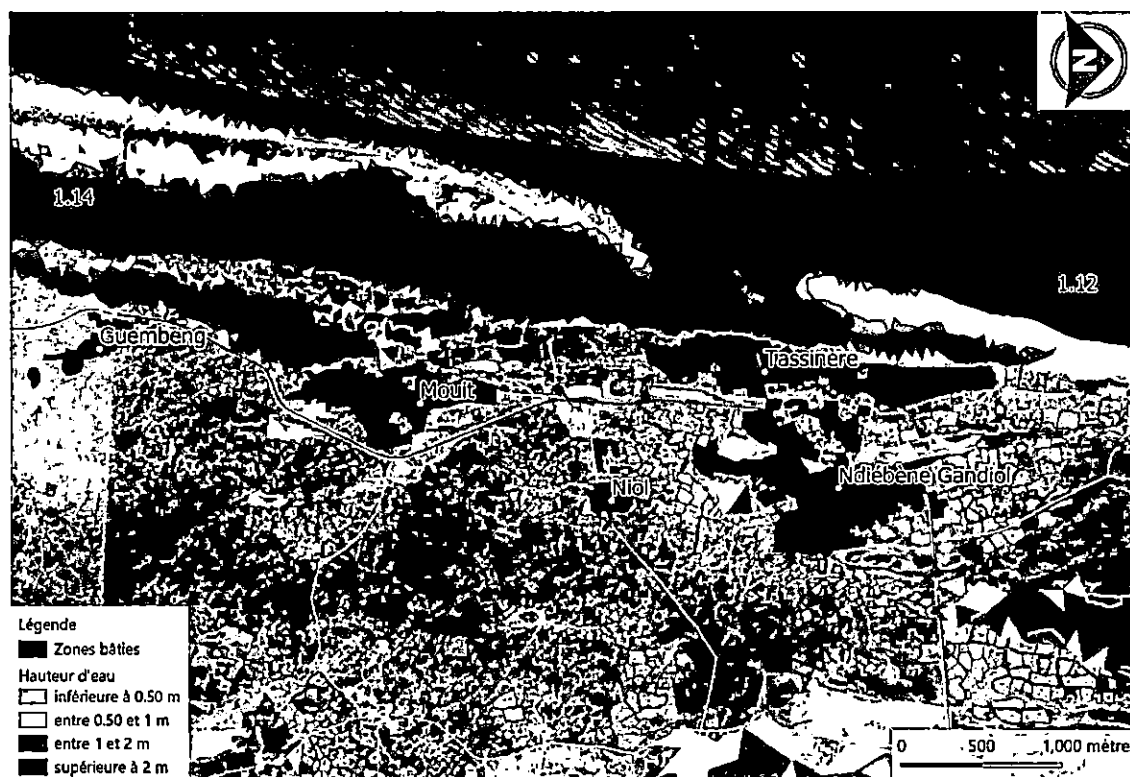


Figure 2-23 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiole – Situation actuelle (2019) – Q100

3. Modélisation de la dynamique côtière

L'analyse du système côtier est essentielle pour comprendre les problèmes actuels dans le bas-delta du fleuve Sénégal et pour la formulation de mesures d'intervention efficaces et durables. Cette analyse s'appuie, entre autres, sur des outils de modélisation numérique et sur le jugement d'experts pour l'interprétation des résultats obtenus et le fonctionnement du système physique. Les différents modèles employés pour représenter la dynamique côtière sont brièvement présentés ci-dessous. Des informations plus détaillées sur les modèles et leur calibration sont disponibles dans le rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d).

Dans cette étude, nous appliquons les modèles représentant la dynamique côtière afin d'évaluer spécifiquement l'impact de deux scénarios ; scénario 1 « Pas d'intervention sur la brèche » avec la migration naturelle vers le sud de l'embouchure du fleuve, ainsi que scénario 3 « Embouchure contrôlée aux abords de Saint-Louis » où la construction d'un port et d'un chenal de navigation de Saint-Louis à la mer sera étudié. Ces scénarios sont étudiés pour des nombreuses configurations océano-météorologiques et prennent en compte par exemple l'élévation du niveau de la mer dans les décennies à venir (cf. chapitre 4).

3.1 Evolution morphodynamique à court terme et hydrodynamique de l'embouchure

Les zones touchées à l'avenir par l'érosion peuvent être prédites – avec une marge d'erreur importante – avec des modèles morphodynamiques. Pour comprendre et prédire l'évolution morphodynamique de l'embouchure du fleuve Sénégal à court terme, il est essentiel d'avoir une vue d'ensemble des circulations et des vitesses d'écoulement, ainsi que des niveaux d'eau dans la zone d'intérêt afin de mieux comprendre les modes de transport sédimentaire qui induisent des changements de morphologie.

A cet effet, un modèle hydrodynamique étendu au calcul des taux de transport sédimentaire et à l'évaluation des fonds (morphodynamique) est mis en place pour couvrir les processus pertinents sur différentes échelles temporelles et spatiales. Le modèle hydrodynamique sélectionné est le modèle Delft3D (Deltares, 2014b) qui prend en compte les variations du niveau de la mer résultant des marées, mais également tient compte de l'influence des vagues, par couplage avec le modèle de propagation des vagues. Ce modèle hydrodynamique est ensuite étendu à un modèle morphodynamique, qui permet de modéliser le transport des sédiments par charriage et en suspension, et de mettre à jour le niveau des fonds, en tenant compte des différences d'échelle entre les temps hydrodynamique et morphodynamique.

La grille pour les calculs hydrodynamiques mesure environ 40 km le long de la côte sur 4 km au large, avec une résolution d'environ 100 m le long des côtes, et 35 m en direction du large. La grille hydrodynamique inclut le fleuve Sénégal jusqu'à Diama. La grille des vagues n'inclut pas le fleuve Sénégal et s'étend sur environ 3,5 km au nord le long de la côte pour tenir compte des effets d'erreurs aux limites du modèle. Dans le rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d) des informations détaillées peuvent être trouvées sur le paramétrage du modèle.

Lors de l'étape actuelle du projet, le modèle morphodynamique de Delft3D a été modifié (i) pour inclure une deuxième fraction de sable avec un diamètre médian de 400 μm et (ii) pour appliquer des sous-couches de sédiments gradués de 0,2 m pour tenir compte (de l'évolution) de la stratigraphie du lit. La composition initiale des sédiments des fractions de sable de 250 μm et de 400 μm dans le fleuve et la zone littorale (jusqu'à des profondeurs de 3 m MSL) est de 50/50 (en masse). En dehors de cette zone, seule la fraction de sable de 250 μm est présente initialement. Cela permet une prédiction plus réaliste des profondeurs et de la largeur des canaux (canaux plus étroits et plus larges proches de la dimension observée), car la fraction de sable la plus fine est érodée des canaux en premier et avec le temps, le mélange de sable devient localement plus grossier et plus résistant à l'érosion (effet d'armure).

Pour l'évaluation du scénario 3, les grilles des modèles d'écoulement et de vagues ont été affinées localement à une résolution d'environ 30 m x 30 m pour permettre une meilleure représentation du port et des digues portuaires. Par conséquent, le pas de temps de calcul a été abaissé à 30 s. Pour étudier l'effet de plan de ports alternatifs, trois configurations de ports différentes ont été mises en œuvre dans le modèle.

3.2 Evolution morphodynamique à long terme

Pour simuler l'évolution à long terme du littoral, jusqu'à plusieurs décennies, l'approche utilisant un modèle bidimensionnel complet, telle que décrite dans le paragraphe précédent, risque d'être trop lourde. Afin de représenter l'évolution complexe de la côte autour de la Langue de Barbarie, avec son embouchure du fleuve en migration et l'effondrement dramatique d'une grande partie du cordon littoral après l'ouverture artificielle de la brèche en 2003, le modèle ShorelineS a été sélectionné.

Le modèle ShorelineS, mis au point récemment à l'IHE Delft en collaboration avec Deltares, permet de gérer les formes arbitraires du littoral et de simuler l'évolution des côtes sablonneuses dont le comportement est dominé par les processus induits par les vagues. ShorelineS est capable de décrire des transformations côtières radicales, ce qui repose sur des principes relativement simples : (i) des changements induits par le gradient de transport sédimentaire le long de la côte résultant de la courbure du littoral et (ii) de la formation de flèches à l'incidence d'ondes à angle élevé. Les principales formulations du modèle (*open source*) sont présentées dans Roelvink et al. (2020).

Le domaine modelé s'étend de UTM 1 740 000 à 1 777 00 m Nord et de 332 000 à 342 000 m Est. Après des tests de sensibilité concernant les résolutions spatiales, une résolution côtière initiale de 100 m a été choisie. Les lignes du trait de côte pour la condition initiale sont basées sur l'imagerie LANDSAT, qui a été convertie pour être conforme aux conventions ShorelineS. Le paramétrage détaillé pour le modèle créé pour le cordon littoral de Saint-Louis est décrit dans le rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d).

3.3 Intrusion saline

La relocalisation et la migration de l'embouchure du fleuve Sénégal observées depuis 2003 ont un impact important sur la salinité de l'estuaire du fleuve Sénégal. En particulier, le déplacement de l'embouchure en 2003 a entraîné une augmentation de l'intrusion de sel et de la pollution des eaux souterraines, ce qui a des effets durables sur l'écosystème estuarien et les possibilités d'irrigation pour l'agriculture. Le changement climatique (en particulier l'élévation du niveau de la mer et les changements des taux de précipitation), le développement du littoral et les interventions humaines affecteront en outre la salinité estuarienne à l'avenir.

Dans cette étude, nous appliquons le modèle hydrodynamique tridimensionnel Delft3D-FM validé tel que décrit dans le rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d). Le modèle se compose de 35 couches verticales avec une résolution verticale de 0,5 m dans la partie supérieure de la colonne d'eau tandis que l'épaisseur de la couche augmente progressivement vers le fond. Le modèle est basé sur la même période de forçage et de simulation (1^{er} janvier 2019 au 8 avril 2019) que celle décrite dans le rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d), à l'exception du débit du fleuve, qui a été idéalisé afin d'étudier l'intrusion saline lors de faibles débits (saison sèche) et débit élevé (saison des pluies). Plus de détails au §4.5.

3.4 Impact des tempêtes

Les tempêtes peuvent être responsables de graves phénomènes d'érosion, même si elles ne se produisent que rarement et que les tempêtes de grande envergure sont rares. L'interaction entre les processus hydrodynamiques et morphodynamiques est complexe et varie au cours des différentes étapes de la tempête. Le modèle XBeach est spécialement développé pour modéliser de manière dynamique l'érosion des plages et des dunes lors d'événements extrêmes.

En mode *surf-beat*, le modèle résout explicitement les courants, la configuration des vagues et les ondes infragravitaires. Les ondes courtes sont résolues par le biais du bilan d'action des vagues et d'une équation du roller, et les gradients des contraintes de radiation des vagues sont renvoyés directement dans le champ d'écoulement. Le transport sédimentaire est modélisé avec une équation d'advection-diffusion moyennée sur la profondeur. Les gradients dans le transport sédimentaire conduisent à l'actualisation du niveau des fonds grâce à l'équation d'Exner. Roelvink et al (2009, 2018) fournissent une description complète des processus des équations du logiciel XBeach. La version de XBeach utilisée dans cette étude est XBeach-X (dernière version au moment de la réalisation de l'exercice de modélisation).

Dans cette phase de l'étude, le modèle XBeach est appliqué pour deux objectifs spécifiques :

- Le premier objectif est d'étudier les **risques d'inondation lors des tempêtes**,
- Deuxièmement, le modèle XBeach est appliqué pour déterminer les **risques de formation des nouvelles brèches dans la cordon littoral** (plus spécifiquement la flèche sableuse).

Les forçages peuvent être trouvés dans le chapitre 4.

4. Les configurations océano-météorologiques étudiées

L'analyse des scénarios d'aménagement est conduite à partir de modélisations qui prennent en compte :

- Des périodes de retour de crue du fleuve Sénégal comprises entre 2 et 100 ans, intégrant le changement climatique,
- Des conditions en mer intégrant des marées de tempêtes pour des périodes de retour des vagues entre 1 et 100 ans en état actuel et avec prise en compte de l'exhaussement du niveau de la mer lié au changement climatique et au changement de climat des vagues, et les surcotes correspondant.

Les configurations océano-météorologiques sont élaborées pour trois horizons d'étude :

- Conditions actuelles (2019),
- Horizon 2050,
- Horizon 2100.

Dans l'Annexe 1, toutes les configurations pour chaque simulation de chaque modèle sont listées.

4.1 Projections climatiques

4.1.1 Vagues

La dynamique des sédiments à l'embouchure du fleuve Sénégal dépend fortement du climat des vagues à la côte, et donc du climat des vagues au large. Hemer et al. (2013) ont étudié les changements climatiques relatifs aux vagues et, même si ces prévisions reposent sur plusieurs modèles, ils sont soumis à des incertitudes considérables. Les prévisions pour le climat des vagues en 2070-2100 au large du Sénégal sont les suivantes :

- Légère diminution d'environ 3% de la hauteur significative des vagues, plus importante en hiver,
- La période moyenne des vagues devrait baisser d'environ 0,2 seconde, principalement en hiver,
- La direction moyenne des vagues devrait se décaler d'environ 3 degrés dans le sens horaire.

4.1.2 Niveau de la mer

Considérant les quartiers à basse altitude sur la Langue de Barbarie, la ville elle-même et ses environs sont très sensibles à l'élévation du niveau de la mer. Les configurations hydro-climatiques étudiées sont précisées en rapport L4 (Egis Eau et Deltares, 2019d). Les projections de l'élévation du niveau de la mer sont obtenues à partir des modèles globaux du GIEC (Church et al. 2013).

Les deux scénarios climatiques pour les horizons de 2050 et 2100 ont été définis avec pour but de capter l'écartement des scénarios du GIEC, tout en évitant un excès de simulations. D'une part, les

prévisions du GIEC concernant l'élévation du niveau de la mer dans le cadre d'un scénario d'émission modéré (RCP 4.5) et pessimiste (RCP 8.5) sont très similaires pour 2046-2065 avec respectivement + 19 cm et + 22 cm par rapport à la situation en 2019. En choisissant ensuite la prévision pessimiste de RCP 8.5 à l'horizon de 2100, la situation la plus extrême pour l'embouchure du fleuve Sénégal a été saisie :

- Suivant le scénario d'émissions modéré de RCP 4.5 scénario pour 2046-2065 le niveau de la mer augmentera de 19 cm,
- Suivant le scénario d'émissions pessimiste de RCP 8.5 scénario pour 2100 le niveau de la mer augmentera de 66 cm.

4.1.3 Scénarios étudiés

Sur la base des projections susmentionnées, nous avons retenu trois scénarios pour évaluer la durabilité des aménagements proposés dans un climat en évolution (en maintenant constant le changement prévu du climat des vagues). D'abord selon les conditions actuelles, et ensuite avec le projection modérée jusqu'au 2050, suivi par un scénario plus pessimiste pour la suite, pour capturer l'écartement des projections :

- Situation actuelle (2019)
- A l'horizon de 2050 – (Suivant le scénario modéré de RCP 4.5 pour 2046-2065) :
 - Niveau de la mer : +19 cm
 - Hauteur significative des vagues : -3 %
 - Période moyenne des vagues : -0.2 s
 - Direction moyenne des vagues : 3 degrés dans le sens horaire
- A l'horizon de 2100 – (Suivant le scénario pessimiste de RCP 8.5 pour 2100) :
 - Niveau de la mer : +66 cm
 - Hauteur significative des vagues : -3 %
 - Période moyenne des vagues : -0.2 s
 - Direction moyenne des vagues : 3 degrés dans le sens horaire

4.2 Les débits caractéristiques de crue du fleuve Sénégal

Les valeurs caractéristiques des débits de crue ont été estimées à partir des fréquences de dépassement empiriques pour les deux horizons d'étude. Ces estimations ont été effectuées sur les deux périodes suivantes :

- Un scénario qui correspond à la situation observée depuis le début du XXème siècle (période 1903-2018), qui comporte des périodes d'hydraulicité variable. Ce scénario permet de prendre en compte l'occurrence possible de très fortes crues, comme celles observées dans la première moitié du XXème siècle. Il est représentatif pour l'état actuel jusqu'à l'horizon 2050,
- Un scénario plus pessimiste qui correspond à une baisse significative de la pluviométrie après 2050, induite par le changement climatique. La période 1968-2018 est proposée pour caractériser les débits de crue. Elle comporte la longue sécheresse de 1968 à 1993, puis

une période d'hydraulicité un peu plus élevée, quoiqu'inférieure à celle de la période antérieure à 1968.

Cette baisse de la pluviométrie a été mise en évidence dans l'étude Artelia de 2018 pour le PGIRE II. Elle indique que les tendances d'évolution des modèles climatiques montrent tout d'abord une relative stabilité par rapport à la période de référence (1975-2004), puis, pour le scénario RCP8.5, une diminution de l'ordre de 20% de la pluviométrie après 2050.

Il n'existe à l'heure actuelle aucun consensus sur l'impact du changement climatique sur le fleuve Sénégal. Et les hypothèses réalisées dans le cadre de cette étude restent entachées d'une forte incertitude.

Les risques liés à ces incertitudes portent en particulier sur une possible surestimation des débits de crue à l'horizon 2050. Ceci pourrait fausser l'analyse et induire en erreur dans le choix des scénarios d'aménagement.

Nous proposons donc de retenir deux hypothèses pour les débits de période de retour inférieurs à 30 ans, à l'horizon 2050.

Ceci permettra de traduire l'importance des incertitudes dans le choix des scénarios d'aménagement. Les débits de périodes de retour supérieures à 30 ans n'ont pas été modifiés de manière à conserver une approche sécuritaire, en particulier dans le cadre du dimensionnement des ouvrages de protection.

De nouvelles valeurs de débits de crue à l'horizon 2050 ont été établies en se basant sur l'hypothèse d'une décroissance linéaire des débits entre l'état 2019 (caractérisés par l'analyse statistique de la série 1903-2018) et l'horizon 2100 (caractérisés par l'analyse statistique de la série 1968-2018).

Le tableau suivant fournit les valeurs de débits maximum instantanés estimées pour les différents horizons d'étude.

Tableau 4-1 : Débits maximums instantanés de crue estimés à Dagana en prenant en compte l'écrêtement des barrages, retenus pour les trois horizons d'étude

	Etat actuel (2019)	Horizon 2050	Horizon 2100
Période de retour	Débits estimés m ³ /s Période 1903-2018	Débits estimés m ³ /s Période 1903-2018 <i>Avec deux hypothèses pour les débits < 30 ans</i>	Débits estimés m ³ /s Période 1968-2018
100 ans	3384	3384	2331
30 ans	3060	3060	2263
10 ans	2449	2311 - 2449	2080
5 ans	2333	2165 - 2333	1885
2 ans	1944	1769 - 1944	1476

4.3 Marée

Les composantes dominantes des marées extraites sont M2 ($\approx 0,44$ m), S2 ($\approx 0,16$ m) et N2 ($\leq 0,07$ m). La prise en compte de l'ensemble des constituants de la marée donne une amplitude moyenne de la marée au large d'environ 0,4 m, avec une amplitude minimale de 0,25 m en marée de mortes-eaux et un maximum de près de 0,8 m en marée de vives-eaux (rapport L4, paragraphe 4.4.1 de Egis Eau et

Deltares, 2019d). Le modèle Delft3D-FM, utilisé pour l'étude de la salinité est forcé directement avec ces composantes.

Le modèle morphodynamique Delft3D est forcé avec une marée moyenne constante ainsi que des vagues et des débits moyennés sur une semaine afin de maintenir la saisonnalité (rapport L4, paragraphe 4.6.2 et paragraphe 4.6.4 Egis Eau et Deltares, 2019d).

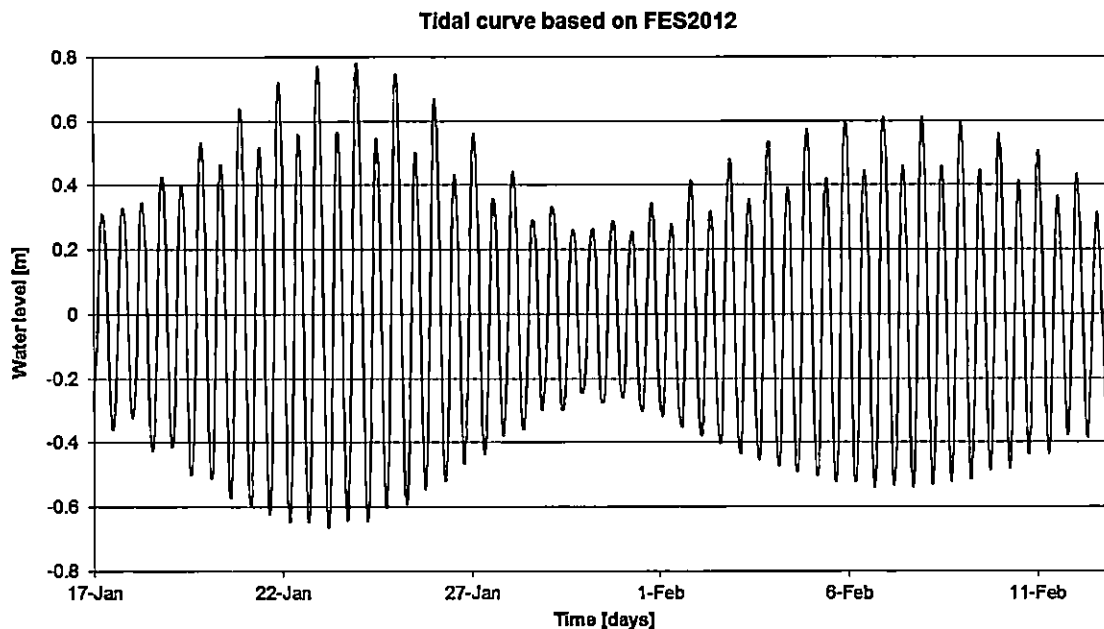


Figure 4-1 : Courbe de marée pour un cycle de mortes-eaux/vives-eaux du 17/01/2019 au 13/02/2019 résultant des 32 constituants de la marée définis le long de la limite ouverte au large du modèle. L'analyse est détaillée au sein du rapport L4 (paragraphe 4.4.1 de Egis Eau et Deltares, 2019d) Les constituants de la marée entraînent une amplitude moyenne de la marée au large d'environ 0,4 m.

4.4 Caractéristiques des tempêtes

L'évolution à court et à long terme de l'embouchure du fleuve dans le cadre des mesures proposées est étudiée pour des conditions extrêmes, telles que les tempêtes et les forts débits, car elles peuvent provoquer de grands changements morphologiques et déclencher des inondations de zones habitées.

Les effets des tempêtes sur les débordements, l'érosion et les brèches potentielles dans la zone de la flèche sableuse et de l'embouchure du fleuve seront évalués à l'aide de XBeach. Les effets des tempêtes avec une période de retour de 1, 10, et 100 ans seront modélisés pour plusieurs endroits vulnérables et critiques le long du cordon littoral, en prenant en compte les niveaux d'eau à Saint-Louis pendant ses conditions – pour les conditions actuelles (Tableau 4-2) et prenant en compte les projections climatiques (Tableau 4-3).

Dans le rapport L4 (Chapitre 2.9.2, Egis Eau et Deltares 2019d), les profondeurs d'inondation et les risques pour l'érosion autour de l'embouchure ont été étudiés pour plusieurs périodes de retour. Dans

le rapport actuel, les conditions ont été limitées aux périodes de retour de 1, 10 et 100 ans, afin de montrer les écarts de résultats pour les différentes projections climatiques.

Tableau 4-2 : Période de retour des tempêtes avec la surcote prévue pour des conditions actuelles, valable en 20 mètres de profondeur, pour la situation actuelle (2019). Le niveau d'eau maximum comprend la marée et un surcote due au vent.

Période de retour (ans)	H_s (m)	T_p (s)	Niveau d'eau maximum (m)
1	2,6	15,7	0,76
10	3,1	17,1	0,84
100	3,5	18,9	0,87

Tableau 4-3 : Période de retour des tempêtes avec la surcote prévue pour les projections climatiques sans prendre en compte l'élévation du niveau d'eau (2050 et 2100) et un changement dans la direction moyenne des vagues : 3 degrés dans le sens horaire, valable en 20 mètres de profondeur. Le niveau d'eau maximum comprend la marée et un surcote due au vent – pas l'élévation de niveau de la mer pour 2050 et 2100.

Période de retour (ans)	H_s (m)	T_p (s)	Niveau d'eau maximum (m)
1	2,52	15,5	0,76
10	3,0	16,9	0,84
100	3,4	18,7	0,87

Le modèle XBeach est forcé avec des événements de vagues extrêmes basés sur le jeu de données de réanalyse ERA5 (17.5W, 16.5N). Le climat des vagues au large des côtes est converti en une série temporelle correspondante en zone côtière (16.5°W, 16.0°N) et combiné au modèle mondial de marée (GTSM à 16.5381°W, 15.86426°N) pour estimer la marée astronomique et la surcote. Ensuite, les valeurs exactes de la hauteur maximale des vagues, de la période des vagues et du niveau d'eau sont déterminées à l'aide d'une analyse de seuil-crête, afin d'étudier la fréquence d'apparition de vagues et surcote d'une certaine gravité (se référer à rapport L4, Section 2.7-2.9 Egis Eau et Deltares, 2019d).

Les scénarios de tempête (XBeach) ont été établis sur une période de 32 heures au cours de laquelle, au plus fort de la tempête, la surcote maximale coïncidait avec les vagues les plus fortes, mais également en incluant un temps de montée et de descente pour tenir compte du temps de passage de la tempête. Les conditions limites hydrodynamiques pour le modèle XBeach basées sur le PoT de la hauteur significative des vagues, de la période de pic et de la surcote, sont présentées en Figure 4-2.

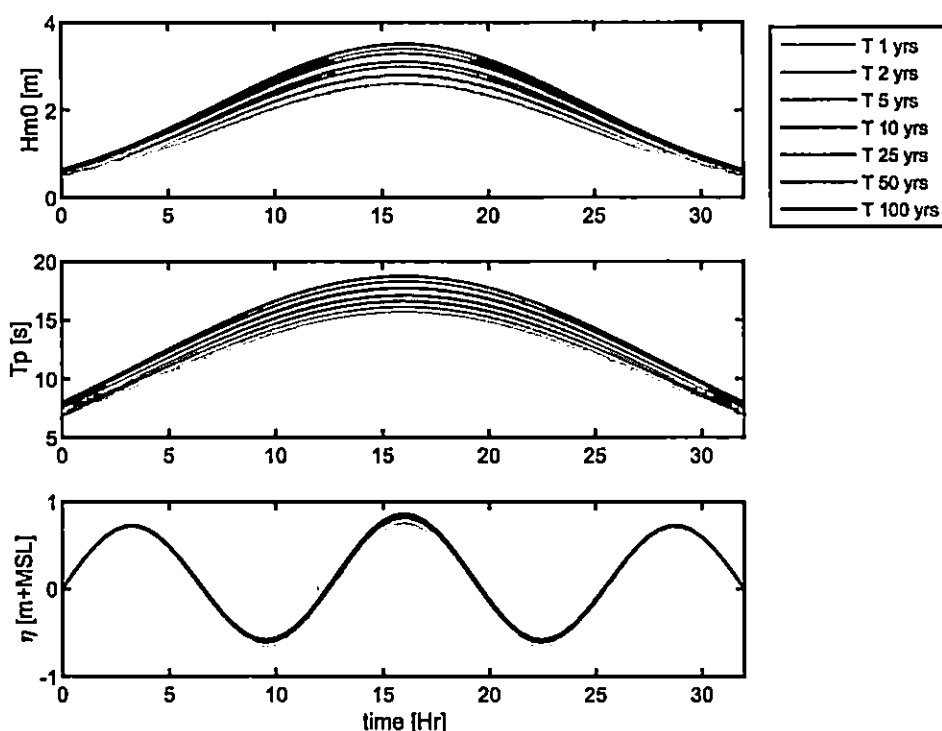


Figure 4-2 : Conditions limites hydrodynamiques pour le modèle XBeach basées sur le PoT de la hauteur significative des vagues, de la période de pic et de la surcote.

Conditions limites en aval pour les simulations de l'hydraulique fluviale

Les simulations menées avec XBEACH et DELFT3D permettent de mettre en évidence que le setup est un élément important à prendre en compte pour représenter la condition limite aval du modèle fluvial (~30 cm pour une période de retour de 100 ans). Les surcotes pouvant être observées pendant une tempête et le setup étant lié aux vagues, les surcotes ont été estimées à l'embouchure du fleuve pour différentes périodes de retour :

Tableau 4-4 : Conditions limites en aval pour les simulations de l'hydraulique fluviale

Période de retour (ans)	1	2	5	10	25	50	100
Surcote (m)	0,06	0,11	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17
Setup (m)	0,28	0,29	0,31	0,33	0,36	0,35	0,38
Total (m)	0,34	0,40	0,44	0,47	0,51	0,51	0,55

4.5 Débit caractéristique pour étudier l'intrusion d'eau saline

Le débit du fleuve Sénégal a été idéalisé afin d'étudier l'intrusion de salinité lors de faibles débits (saison sèche) et de débits élevés (saison des pluies), à voir en Tableau 4-5. Le faible débit ($148 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) est dérivé du débit moyen pendant la saison sèche (de décembre à juillet) entre 2010 et 2019. Le débit

élevé est égal au débit moyen pendant la saison des pluies (août à novembre) dans la période de 2010 à 2019 ($1126 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Tous les cas (référence et scénarios) sont simulés pour des débits faibles et élevés, prenant en compte les projections pour l'élévation du niveau de la mer.

Tableau 4-5 : Débit moyen faible / élevé pendant la saison sèche / des pluies sur la base de la période 2010-2019

	Débit	Saison	Période
Débit faible (saison sèche)	$148 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	Dec-Jul	2010-2019
Débit élevé (saison des pluies)	$1126 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$	Aout-Nov	2010-2019

4.6 Evènements concomitants

Pour étudier s'il existe une dépendance entre les vagues extrêmes et les débits élevés du fleuve Sénégal pendant la saison des pluies, nous avons comparé les débits quotidiens de Diama (1986-2016) aux maxima quotidiens du niveau total de la mer (marée astronomique + surcote + setup par les vagues), comme présenté dans le rapport L4 (Chapitre 2.9.2, et Annexe 1 du rapport L4, Egis Eau et Deltares 2019d). Les analyses menées sur un échantillon de 32 années de valeurs de débit du fleuve, de surcotes et de setup montrent de très faibles coefficients de corrélation ($< 0,033$) entre les débits du fleuve et les tempêtes. Ainsi, les tempêtes ne se produisent pas systématiquement plus souvent pendant la saison des pluies qu'elles le font pendant la saison sèche (Figure 4-3). Comme le montre le Figure 4-4, des fortes tempêtes se sont produites en même temps que des fortes crues, mais leur concomitance sont rares. Malheureusement les données disponibles ne couvrent pas une période suffisamment longue pour calculer les périodes de retour combinées.

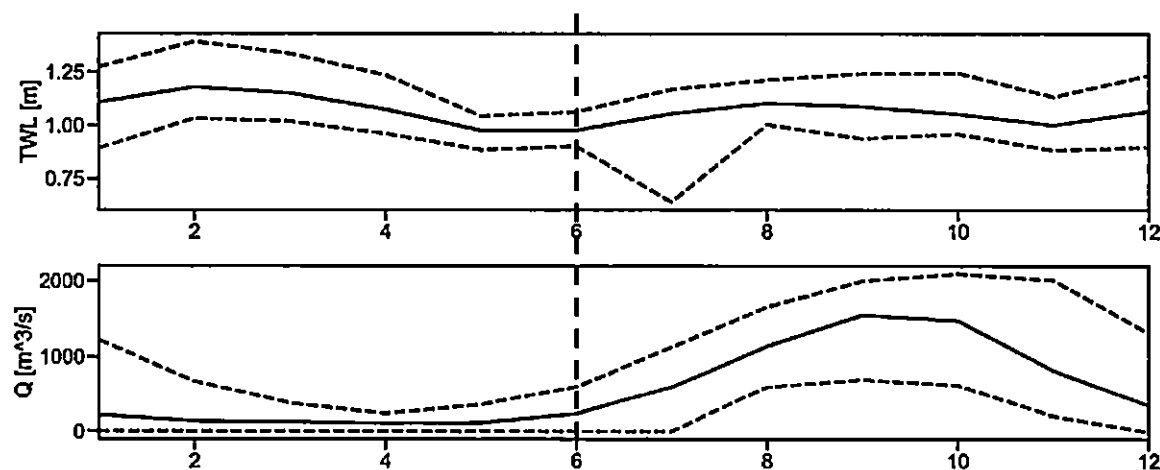


Figure 4-3 : Comparaison entre hauteurs moyennes, minimales et maximales (en bas) des débits du fleuve et (en haut) du niveau de la mer (TWL : marée astronomique + surcote + setup) tout au long de l'année.

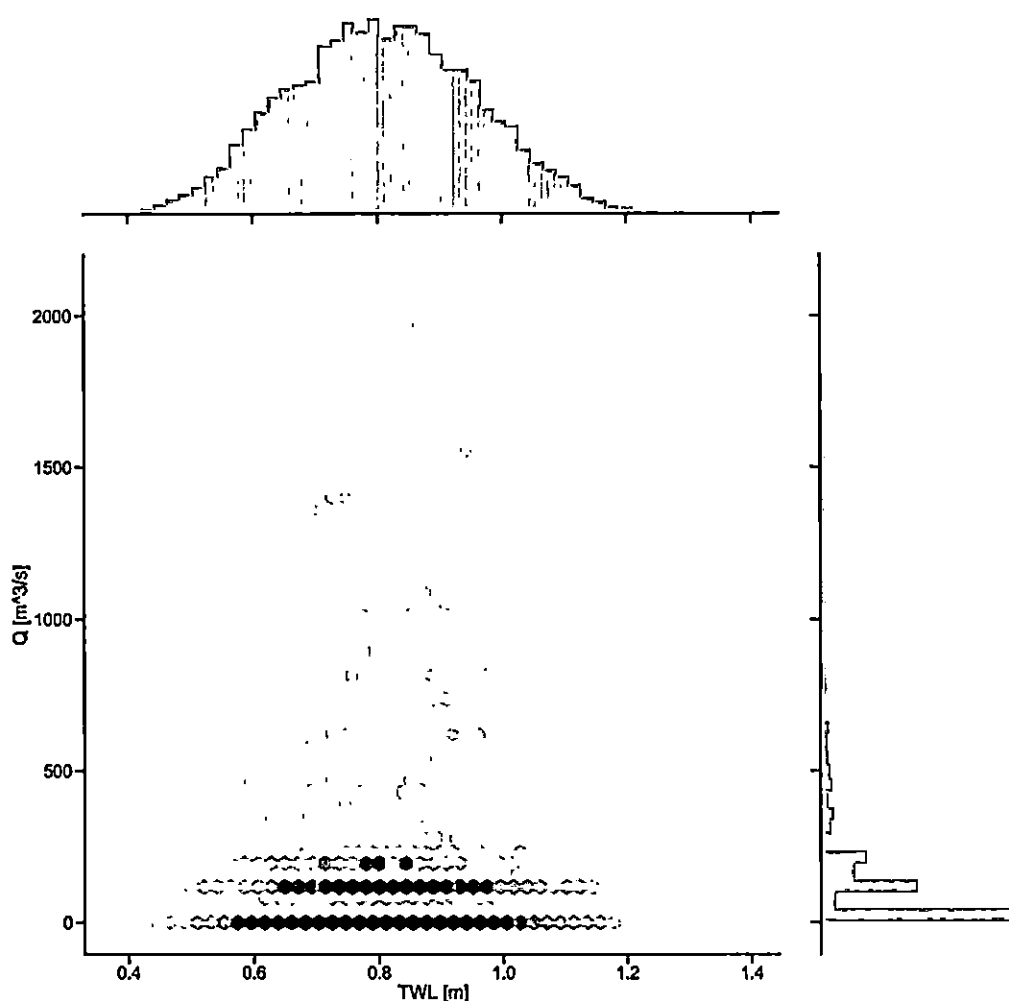


Figure 4-4 : Distributions conjointes basées sur les données ERA5 1979-2018 distributions conjointes pour toutes les données ERA5 1979-2018 estimées par la fonction de densité de probabilité conjointe empirique (plus foncé est plus fréquent). Le panneau supérieur et le panneau à droite représentent la distribution marginale de niveau d'eau (TWL : marée astronomique + surcote + setup) et le débit du fleuve (Q en m³/s).

Pour bien représenter les possibilités des concomitances (afin de définir des critères de conception), l'approche suivante a été choisie :

- Dans la majorité de l'analyse hydraulique, le setup et surcote correspondant à une tempête de côté mer de 1/1 an seront considérés (surcote de 6 cm et setup de 28 cm)
- L'effet des événements concomitants entre une forte crue et une tempête de 1/10 ans ont été testés (surcote de 14 cm et setup de 33 cm, se référer à paragraphe 7.1.4.4)
- La distribution des niveaux d'eau dans le fleuve sans tempête sera également testée, avec un setup représentatif pour l'année (de l'ordre de 5 cm, se référer à paragraphe 7.1.4.4).

Dans l'Annexe 1, toutes les configurations pour chaque simulation de chaque modèle sont listées.

4.7 Les configurations océano-météorologiques retenues pour les modélisations fluviales

Les configurations présentées dans le Tableau 4-6 ont été retenues pour étudier l'impact des aménagements sur les inondations liées aux crues du fleuve.

Tableau 4-6 : Configuration océano-météorologiques retenues pour les tests d'aménagement

	Scénario de débit de crue	Augmentation du niveau de la mer	Surcotes tempêtes	Set Up
Etat actuel (2019)	Débits estimés sur la période 1903- 2018	Aucune	T = 1 an (+6 cm)	T = 1 an (+28 cm)
Horizon 2050	Débits estimés sur la période 1903- 2018 avec deux hypothèses pour les débits < 30 ans	RCP 4.5 (+19 cm)	T = 1 an (+6 cm)	T = 1 an (+28 cm)
Horizon 2100	Débits estimés sur la période 1968-2018	RCP 8.5 (+66 cm)	T = 1 an (+6 cm)	T = 1 an (+28 cm)

5. Vulnérabilité et enjeux

Les outils de modélisation déployés lors de cette phase d'étude permettent de **quantifier les impacts des scénarios d'aménagement par rapport à un certain nombre d'enjeux précités** : le risque inondation, la salinité en liaison avec l'activité agricole, l'érosion côtière, le port de Saint-Louis, la submersion marine.

Pour le risque d'inondation, la vulnérabilité de Saint-Louis d'une part et des communes du delta d'autre part ont fait l'objet d'une analyse approfondie présentée ci-dessous, aboutissant à la définition d'objectifs de protection pour les scénarios.

Les vulnérabilités de la ville de Saint-Louis et des communes du delta sont mesurées en termes de bâti et population impactés, permettant une quantification préliminaire des impacts des scénarios d'aménagement. La méthodologie de cartographie du bâti et d'estimation de la population sera détaillée dans le rapport L8 : Analyse Coûts-Bénéfices.

Enfin, le risque de formation d'une nouvelle brèche est abordé en détail, étant donné l'impact désastreux qu'aurait un tel évènement.

5.1 Les enjeux mis en évidence dans le rapport L5-1

Les principaux enjeux de la zone d'étude ont été mis en évidence dans le rapport L5-1 et sont les suivants :

- L'activité pêche dans le Gandiolais,
- L'activité pêche de Saint-Louis,
- L'activité agricole dans le Gandiolais,
- L'activité touristique,
- L'activité portuaire,
- Le risque inondation,
- L'érosion côtière du Gandiolais,
- Les impacts environnementaux,
- Le risque lié à la submersion marine.

L'objet du présent rapport n'est pas de faire une évaluation exhaustive des scénarios étudiés vis-à-vis des enjeux définis ci-dessus. Cette évaluation sera réalisée dans le livrable L8 : Analyse Coûts-Bénéfices.

Le présent rapport vise à tester l'efficacité des scénarios vis-à-vis d'un certain nombre d'enjeux présentés dans les sous-chapitres suivants.

Toutefois, une analyse simplifiée de tous les enjeux impactés est présentée dans les résumés des scénarios, ainsi que dans la synthèse des scénarios, au début de ce rapport.

5.2 Vulnérabilité de la ville de Saint-Louis aux inondations

Les seuils d'inondation sont définis uniquement pour les inondations fluviales hors problématique remontée de nappe et pluviométrie. Les quartiers objets de l'étude sont présentés sur la figure ci-dessous.



Figure 5-1 : Quartiers de Saint-Louis étudiés pour la définition des seuils d'inondation

5.2.1 Définition des seuils d'inondation sur les quartiers de l'Ile, Sor, Khor et Langue de Barbarie

Les figures Figure 5-2, Figure 5-3 et Figure 5-4 présentées plus bas montrent les hauteurs de submersion sur les quartiers de l'Ile, Sor, Khor et de la Langue de Barbarie pour différents niveaux d'eau théoriques dans le fleuve.

5.2.1.1 Les quartiers de l'Ile

Sur le secteur de l'Ile les premiers débordements notables se produisent pour une hauteur à l'échelle de Saint-Louis de 1.16 m soit une cote de 1.60 mIGN. Ces débordements ont pour origine le nord-est de l'Ile où la hauteur des quais est insuffisante.

- A partir d'une cote IGN de 1.80m, les quais Sud sont également submergés et l'inondation envahit la partie Sud de l'Ile. Pour cette cote, près de 70% des quartiers de l'Ile sont inondés. Les hauteurs de submersion sont faibles, inférieures à 0.50 m,
- A partir d'une cote IGN de 2m, seule la partie centrale de l'Ile est hors d'eau. Les hauteurs de submersion demeurent faibles, en majorité inférieures à 0.50 m, à l'exception de la partie nord-ouest de l'Ile, où très ponctuellement ces hauteurs peuvent dépasser 0.50 m.

L'analyse menée confirme les éléments principaux déjà identifiés à partir des levés topographiques. Les murs de quais de l'Ile, de longueur totale 4.9 km, assurent sur 70% de leur linéaire une protection jusqu'à un niveau de crue de 2 mIGN. Des points de faiblesse de ce système de protection existent :

- La continuité des parapets de protection n'est pas assurée entre l'Hôtel Keur Dada et le quai Roume.
- Il n'existe pas de parapets de protection le long du quai Roume,
- Des points bas sur les parapets du secteur sud de l'Ile augmentent la fréquence des inondations.

Ces points de faiblesse sont les vecteurs de l'inondation de l'Ile.

L'homogénéisation du niveau de protection de l'Ile jusqu'à une cote de 2 mIGN nécessiterait la surélévation/confortement d'un linéaire de 1.6 km de quais.

Tableau 5-1 : Seuils d'inondation sur les quartiers de l'Ile

Cote en mIGN	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Hauteur échelle Saint-Louis (m)	0.66	0.76	0.86	0.96	1.06	1.16	1.26	1.36	1.46	1.56
% de surface inondée	0	0	0	0	7.4%	24.6%	38.9%	68.3%	78.9%	86.5%

5.2.1.2 Les quartiers de Sor

Il n'est pas observé d'inondation notable des quartiers de Sor jusqu'à la cote de 1.4 mIGN, à partir de laquelle la digue de Darou est submergée sur ses points les plus bas. Ces inondations touchent les quartiers de Darou Medina Marmyal et Darou Route de Khor, puis se propagent en direction des quartiers de Ndiolofène Nord et Sud.

- A partir de la cote 1.60 IGN : la digue route est contournée sur sa pointe sud et les inondations atteignent les quartiers de Pikine Sor Diagne. Les hauteurs de submersion sont fortes (> 1 m) sur les quartiers en contrebas de la digue de Darou.
- A partir de la cote 1.70 IGN : La digue de Pikine et la digue écluse sont submergées : les inondations envahissent la lagune de Pikine et submergent les quartiers avoisinants : Pikine Sor Daga et Pikine Tableau Walo. Dès cette cote des hauteurs de submersion supérieures à 0.50m sont observées sur les points bas de ces quartiers.
- A partir de la cote 1.80 IGN : les débordements se produisant sur la digue de Darou envahissent les quartiers Nord-Ouest de Sor : Tendjiguene, Balacos, Diamaguene, HLM, Leona. Au sud l'inondation des quartiers ceinturant la lagune de Pikine devient généralisée. Les hauteurs de submersion fortes (>1m) sont présentes sur les quartiers de Darou et Diolofene.
- A partir de la cote 1.90 IGN : les débordements en provenance de la Digue de Darou envahissent les quartiers de cité Niakh, Médina Course, Guinaw Rail pourtant protégés par la digue route. Cette digue empêche tout retour des eaux au fleuve et aggrave les inondations sur les points bas situés en contrebas de la digue route ou des hauteurs de submersion supérieures à 1.50m sont observées.
- A partir de la cote 2 IGN : les inondations sont généralisées sur l'ensemble de Sor, 85 % de la zone agglomérée est inondée, seuls les points hauts des quartiers historiques de Ndiolofène et de Cité Niakh sont hors d'eau.

L'analyse menée met en évidence les points suivants :

- Les ouvrages de protection existants (quais et digue route de linéaire total 8.5 km, soit 62% du périmètre de Sor) assurent une protection du territoire de Sor jusqu'à une cote de 2 mIGN,
- Les ouvrages de protection de Darou et de Pikine offrent un niveau de protection inférieur, respectivement 1.40 mIGN pour la digue de Darou, 1.70 mIGN pour les digues de Pikine,
- Le système de protection est incomplet : on observe des pénétrations d'eau entre la digue écluse et la digue de Pikine pour des cotes mIGN supérieures à 1.70 mIGN, ainsi qu'entre la digue route et la digue écluse pour des cotes IGN supérieures à 1.60 mIGN.
- Les hauteurs de submersion sont fortes et peuvent atteindre 1.50 à 2m sur les points bas de Sor en contrebas des digues de Darou et de la route digue par exemple.

L'homogénéisation du niveau de protection des quartiers de Sor jusqu'à une cote de 2m IGN nécessiterait :

- La mise à niveau des digues de Pikine (1.3 km), de la digue Ecluse (0,5 km) et de la digue de Darou (2km) sur un linéaire total de 3.8 km,
- La création de nouveaux ouvrages de protection sur un linéaire de 1.5 km.

Tableau 5-2 : Seuils d'inondation sur les quartiers de Sor

Cote en mIGN	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Hauteur échelle Saint-Louis (m)	0.66	0.76	0.86	0.96	1.06	1.16	1.26	1.36	1.46	1.56
% de surface inondée	0	0	0	0	15.5%	24.3%	37.8%	53.6%	80.3%	84.8%

5.2.1.3 Les quartiers de Khor

Les quartiers de Khor sont extrêmement sensibles aux inondations. Dès la cote 1.10 mIGN des inondations se produisent sur 70 % de la surface du quartier. A la cote 1.60m IGN 90% du territoire de ces quartiers est inondé. C'est la partie située au sud de la route de Khor qui est la plus exposée avec des hauteurs de submersion comprises entre 0.50 et 1 m.

Tableau 5-3 : Seuils d'inondation sur les quartiers de Khor

Cote en mIGN	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Hauteur échelle Saint-Louis (m)	0.66	0.76	0.86	0.96	1.06	1.16	1.26	1.36	1.46	1.56
% de surface inondée	66.2%	69.9%	73.3%	79.1%	81.1%	86.6%	93.6%	97.0%	97.6%	98.5%

5.2.1.4 Les quartiers de la Langue de Barbarie

Les premières inondations apparaissent dès la cote 1.3 mIGN sur le quartier de l'Hydrobase au sud, où les enjeux sont plus restreints. Les inondations sur les quartiers peuplés de Goxxu Mbathie, Ndar Toute et Guet Ndar se produisent à partir de la cote 1.70 mIGN. A la cote de 2 mIGN, 65% de ces quartiers sont inondés avec des hauteurs de submersion faibles, inférieures à 0.50 m.

Il est très difficile de protéger ces quartiers contre les crues du fleuve : la surélévation des quais coté fleuve conduirait à une aggravation des hauteurs de submersion en cas de submersion marine.

Tableau 5-4 : Seuils d'inondation sur les quartiers de la Langue de Barbarie

Cote en mIGN	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2
Hauteur échelle Saint-Louis (m)	0.66	0.76	0.86	0.96	1.06	1.16	1.26	1.36	1.46	1.56
% de surface inondée	15.8%	18.7%	23.0%	24.3%	30.5%	35.9%	40.3%	47.3%	51.9%	53.5%

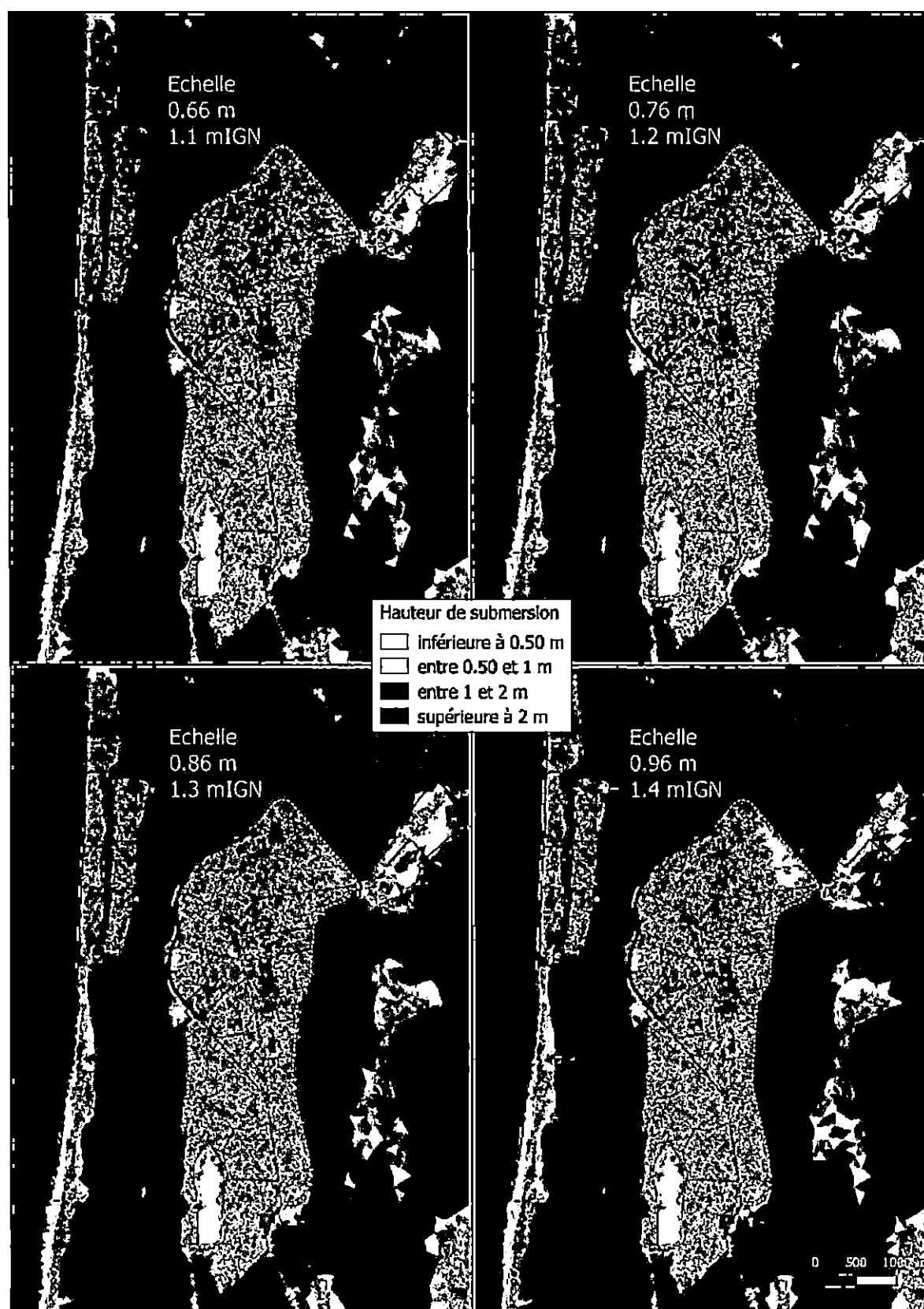


Figure 5-2 : Hauteurs de submersion sur l'Ile, Sor, Khor et la Langue de Barbarie pour un niveau d'eau théorique à l'échelle de Saint-Louis - Test pour des niveaux théoriques de 1.1 à 1.4 mIGN

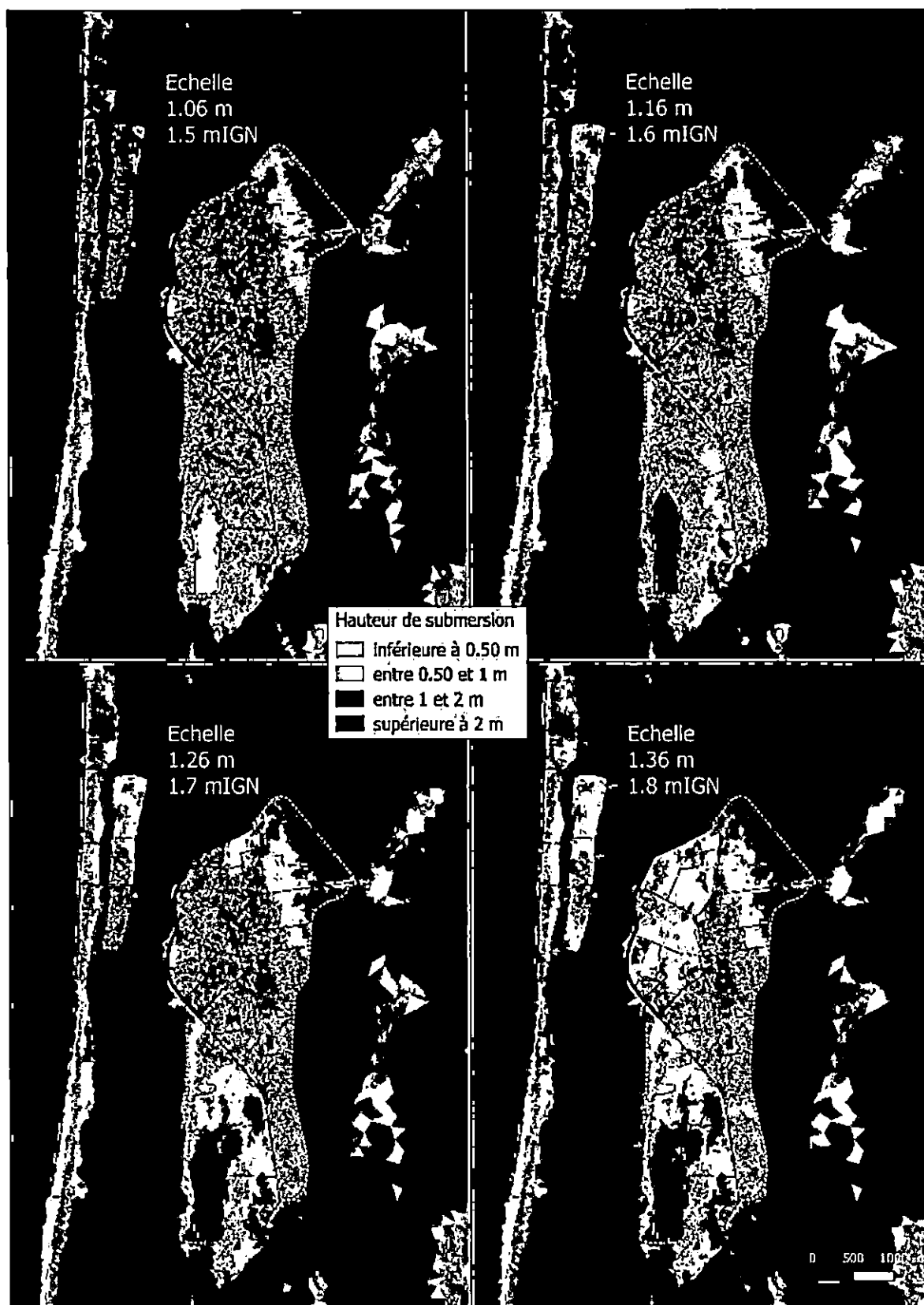


Figure 5-3 : Hauteurs de submersion sur l'île, Sor, Khor et la Langue de Barbarie pour un niveau d'eau théorique à l'échelle de Saint-Louis - Test pour des niveaux théoriques de 1,5 à 1,8 mIGN

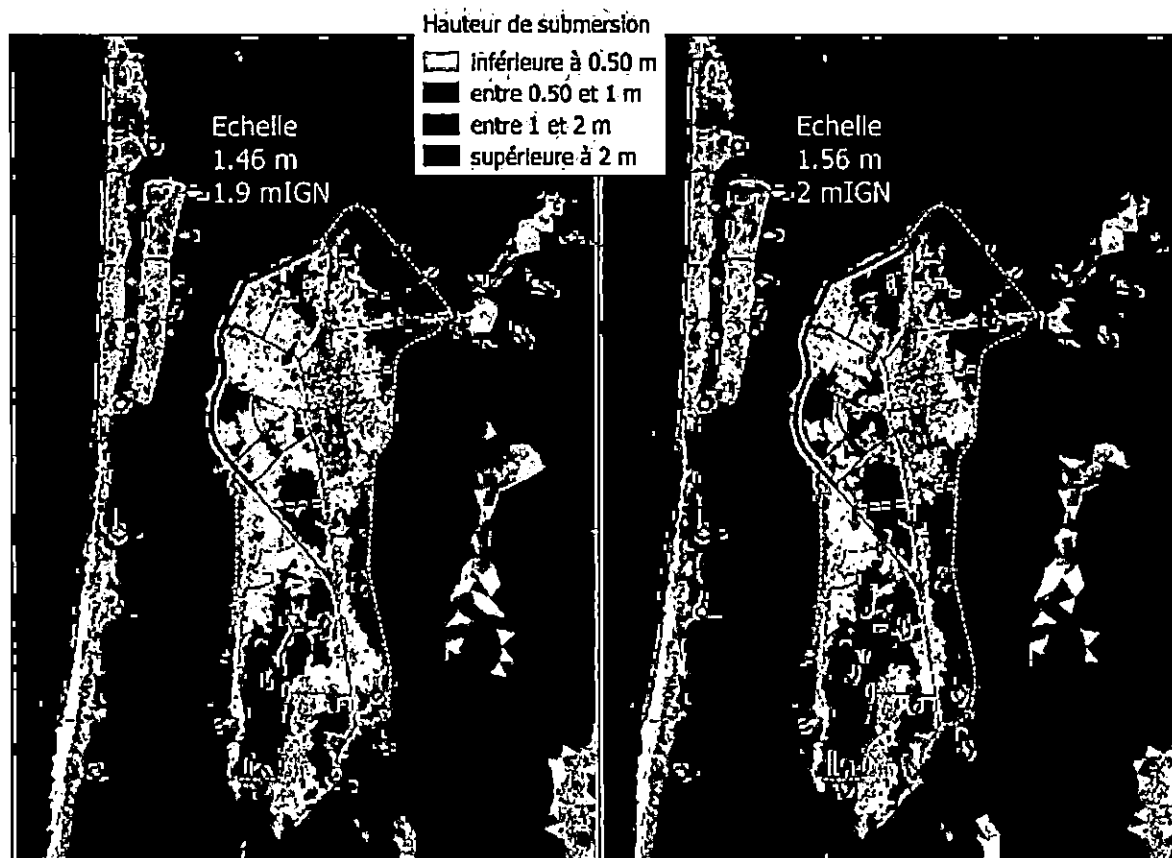


Figure 5-4 : Hauteurs de submersion sur l'Ile, Sor, Khor et la Langue de Barbarie pour un niveau d'eau théorique à l'échelle de Saint-Louis - Test pour des niveaux théoriques de 1.9 à 2 mIGN

5.2.2 Définition des seuils d'inondation sur les quartiers de Bango, Ngallele et Université

La Figure 5-5 présentée plus bas montre les hauteurs de submersion sur les quartiers de Bango, de Ngallele et de l'Université pour différents niveaux théoriques dans le fleuve.

Ces quartiers sont relativement préservés des inondations jusqu'à des cotes de 1.80 à 2 mIGN, à l'exception des quartiers suivants :

- **Bango Sud, à l'est de l'aéroport** : la zone est largement inondée à partir de la cote 1 mIGN, exposant de nombreux bâtiments construits dans les points bas,
- **Ngallele Nord et Sud** : ces quartiers sont traversés en leur centre par un axe d'écoulement nord-sud mis en eau à partir d'une cote de 1.5 mIGN. A partir de cette cote, on note également des début d'inondation sur des enjeux bâtis à l'ouest et à l'est de Ngallele.
- **A Diougop Peul (commune de Gandon), entre Ngallele et le quartier de l'Université** : à partir de la cote 1.5 mIGN, les inondations sur les enjeux bâtis sont nombreuses.

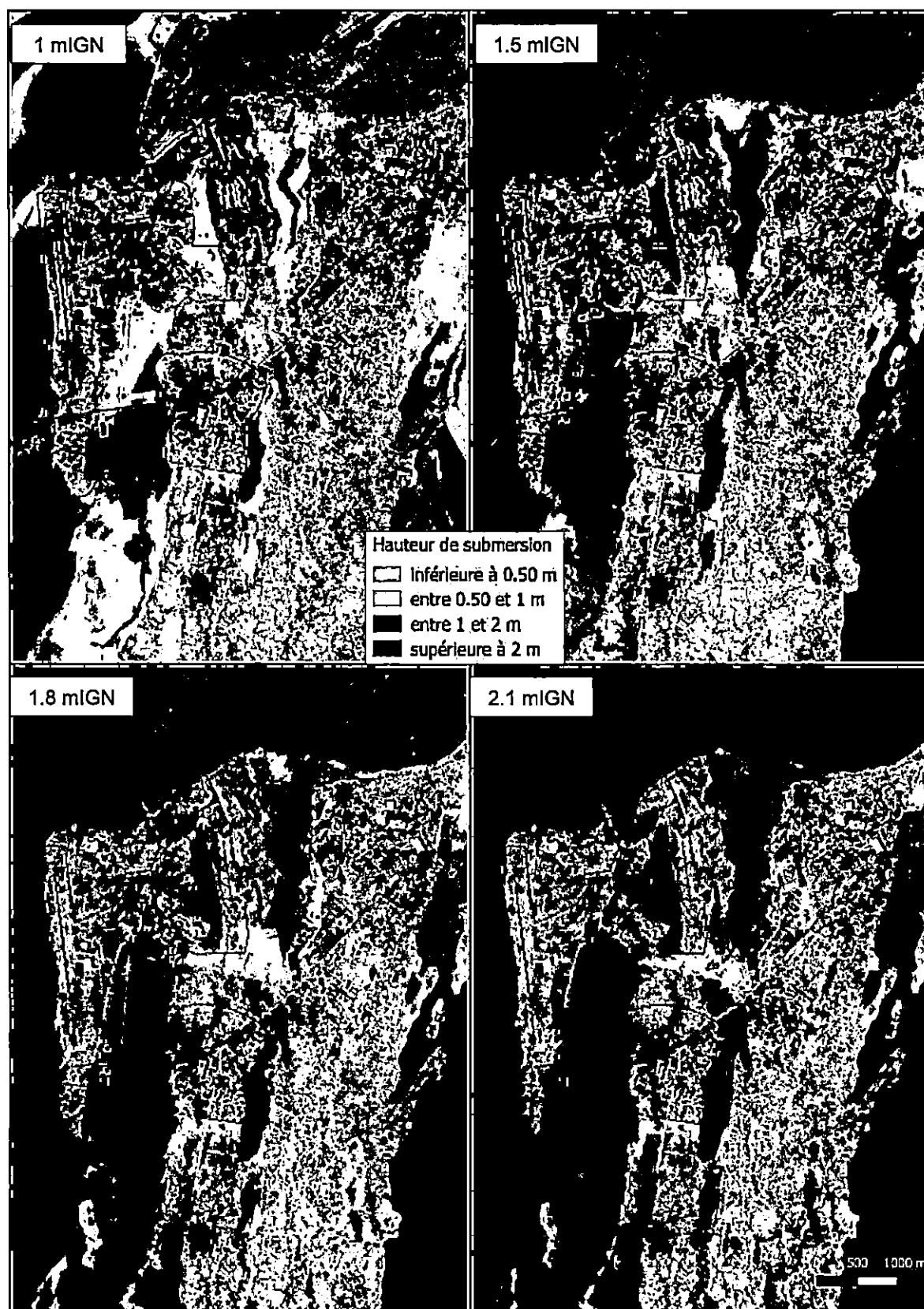


Figure 5-5 : Hauteurs de submersion sur Bango, Ngallele et l'Université pour un niveau d'eau théorique à l'échelle de Saint-Louis - Test pour des niveaux théoriques de 1 à 2.1 mIGN

5.2.3 Exposition de la population de Saint-Louis

Les données de bâti et d'occupation du sol disponibles, ainsi que les orthophotos de janvier 2019, ont permis de quantifier les enjeux bâtis présents à Saint-Louis. La méthodologie employée sera décrite en détail dans le rapport L8.

Le RGPHAE (Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage) de 2013 définit le foyer moyen à **8 personnes/bâtiment** en zone urbaine. En considérant cette moyenne, la population exposée sur Saint-Louis s'élève à 200 300 pour une cote d'inondation de 2 mIGN, soit 80% de la population de la ville (251 500 habitants).

La figure suivante décrit la population exposée aux inondations pour chaque cote IGN d'inondation à l'échelle de Saint-Louis. On observe une nette augmentation du nombre d'habitants exposés à partir de la cote 1.5 mIGN, correspondant aux premiers points de faiblesse du système d'endiguement. Entre les cotes 1.9 et 2 mIGN, la population exposée évolue peu, traduisant la saturation quasi-totale des zones inondables.

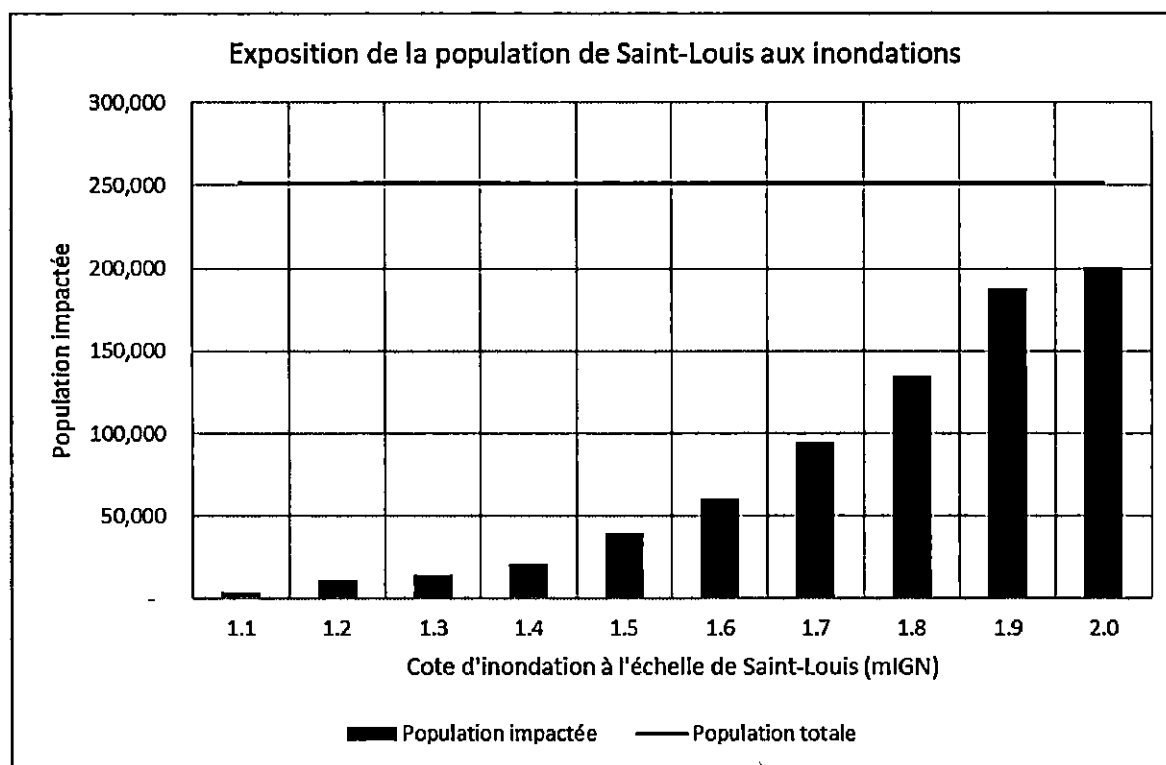


Figure 5-6 : Exposition de la population de Saint-Louis aux inondations

5.2.4 Conclusion

Les seuils d'inondation sur les principales zones agglomérées de Saint-Louis sont les suivants :

- L'Ile : 1.60 mIGN
- Sor : 1.50 mIGN
- Langue de Barbarie (Goxxu Mbathie, Ndar Toute et Guet Ndar) : 1.70 mIGN
- Bango, Ngallele, Université : 1.50 mIGN

Ces niveaux de protection ne sont pas suffisants pour faire face ni aux inondations provoquées par les crues du fleuve, ni au changement climatique (élévation du niveau de l'océan jusqu'à 1.80 IGN en 2100).

Les secteurs de l'Ile et de Sor présentent les enjeux les plus importants en termes de fréquence d'inondation, d'importance des zones urbanisées, de hauteurs de submersion.

Sur ces secteurs des ouvrages de protection sont déjà en place et assurent une protection jusqu'à une cote de 2 mIGN :

- Pour 70% du linéaire des ouvrages de l'Ile,
- Pour 62 % du linéaire des ouvrages de Sor.

Le niveau de protection peut être homogénéisé jusqu'à la cote 2 mIGN en mettant à niveau et confortant :

- Un linéaire de 1.6 km de quais sur l'Ile,
- Un linéaire de 5.3 km de digues sur Sor.

Dans l'étude des scénarios d'aménagement nous proposons de retenir les objectifs suivants :

- « Non dépassement de la cote 1.50 mIGN », qui est actuellement le seuil de vulnérabilité de la ville aux inondations,
- Dans le cas où ce premier objectif ne peut être atteint, « non dépassement de la cote de 2 mIGN » qui peut être atteint en homogénéisant le niveau de protection des ouvrages d'endiguement existant.

5.3 Vulnérabilité des communes du delta aux inondations

La vulnérabilité aux inondations ne se limite pas à la seule commune de Saint-Louis, les autres communes du delta sont elles aussi exposées aux débordements du fleuve.

Les données de bâti et d'occupation du sol disponibles, ainsi que les orthophotos de janvier 2019, ont permis de quantifier les enjeux bâtis présents sur le delta. La méthodologie employée sera décrite dans le rapport L8. Le RGPHAE de 2013 définit le foyer moyen à **10 personnes/bâtiment** en zone rurale.

Pour les mêmes cotes IGN à l'échelle de Saint-Louis, l'exposition de la population sur le reste du delta est présentée en Figure 5-7.

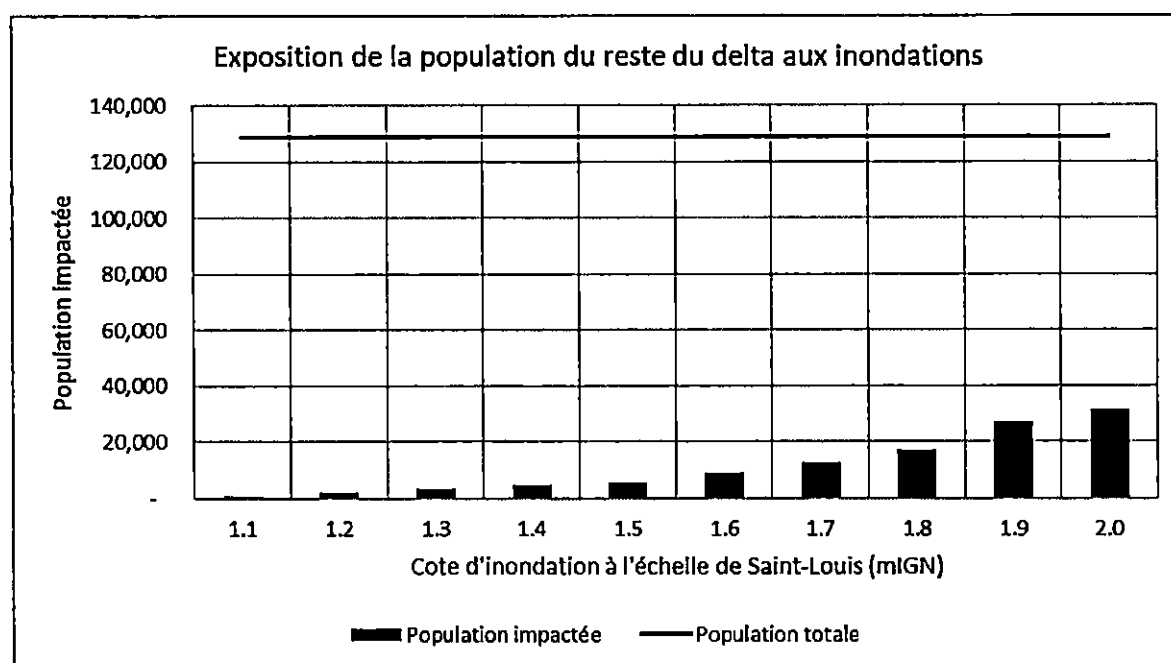


Figure 5-7 : Exposition de la population du delta (hors Saint-Louis) aux inondations

L'exposition des populations du delta à l'aléa inondation est moins forte qu'à Saint-Louis, en valeur absolue mais surtout, plus notablement, en proportion. Néanmoins, ce ne sont pas moins de 31 500 habitants qui demeurent exposés à ces risques, soit 25% de la population du delta.

Les principaux villages du Gandiolais impactés par les inondations sont dans l'ordre : Ndiébène, Diélé Mbame, Pilote Barre-Tassinère, Mouit et Ndieulé Mbam.

Ces villages se situent sur des zones basses atteignant régulièrement la cote 1.5 mIGN. De plus, de nombreuses dépressions situées sous la cote 1 mIGN parsèment le secteur. L'ancienne rive gauche du fleuve Sénégal, actuellement alignée à l'embouchure sur ce secteur, présente une cote variant de 1.8 à 2 mIGN.

Une analyse plus approfondie des seuils d'inondation a été menée sur les villages côtiers de Pilote Barre-Tassinère, Ndiébène et Mouit. La Figure 5-9, présentée plus bas, montre les hauteurs de submersion sur ces villages pour différents niveaux d'eau théoriques à l'échelle de Saint-Louis. L'exposition des populations correspondante est présentée en Figure 5-8.

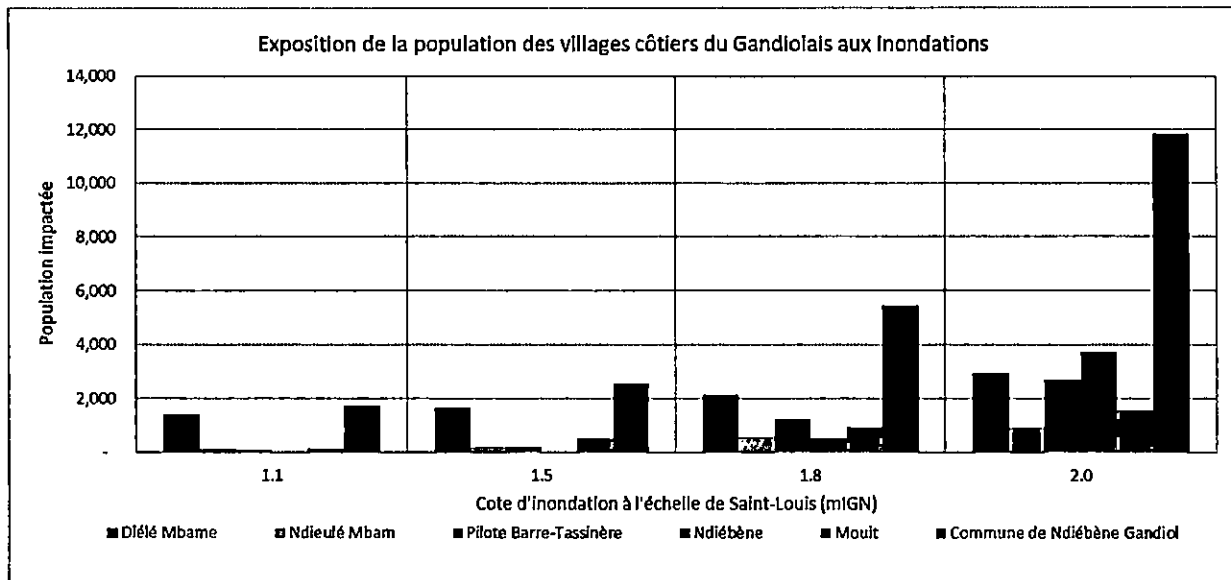


Figure 5-8 : Exposition de la population des villages côtiers du Gandiolais aux inondations pour différentes cotes d'inondation à l'échelle de Saint-Louis

Cette représentation de la vulnérabilité des villages côtiers du Gandiolais présente néanmoins un défaut majeur en ce sens qu'elle n'inclut pas la totalité des phénomènes générant des inondations sur ces villages. En effet, les épisodes de crue ou de surcote marine entraînent des remontées de nappe impactant fortement ces villages côtiers. La Figure 5-10 montre les hauteurs de submersion sur les villages de Pilote Barre-Tassinère, Ndiébène et Mouit pour des niveaux d'eau théoriques dans le fleuve, cette fois au droit de ces villages.

Dès la cote 1 mIGN, le village de Ndiébène est partiellement inondé. A 1.5 mIGN, les dépressions saturant et commencent à déborder. Les inondations se généralisent sur Ndiébène, et commencent à apparaître sur Pilote Barre-Tassinère.

Il convient de noter que les autres villages côtiers du Gandiolais (Mboumbaye, Degounaye, Lakhrar, Mbao, Tare et Gabar) sont situés à des altitudes suffisantes (> 2 mIGN) pour les maintenir hors d'eau.

A partir de la cote 1.8 mIGN, la montée des eaux à l'amont des villages dépasse notamment la cote de la route menant à Saint-Louis (1.75 mIGN), engendrant des déversements en direction de Ndiébène. De plus, les premiers débordements apparaissent en provenance de l'ouest, par-dessus la cote de l'ancienne rive gauche du fleuve. Cette situation correspond à la montée du niveau marin attendue pour l'horizon 2100 et montre la vulnérabilité de ce secteur à cette hausse.

A 2 mIGN, la zone est très largement inondée à l'exception de quelques points hauts à Pilote Barre-Tassinère et Ndiébène, le village de Mouit étant le moins exposé des trois.

La comparaison des Figure 5-9 et Figure 5-10 révèle la nécessité de mesurer les hauteurs d'eau au droit des villages côtiers, et pas exclusivement à Saint-Louis, pour anticiper les inondations sur ces secteurs.

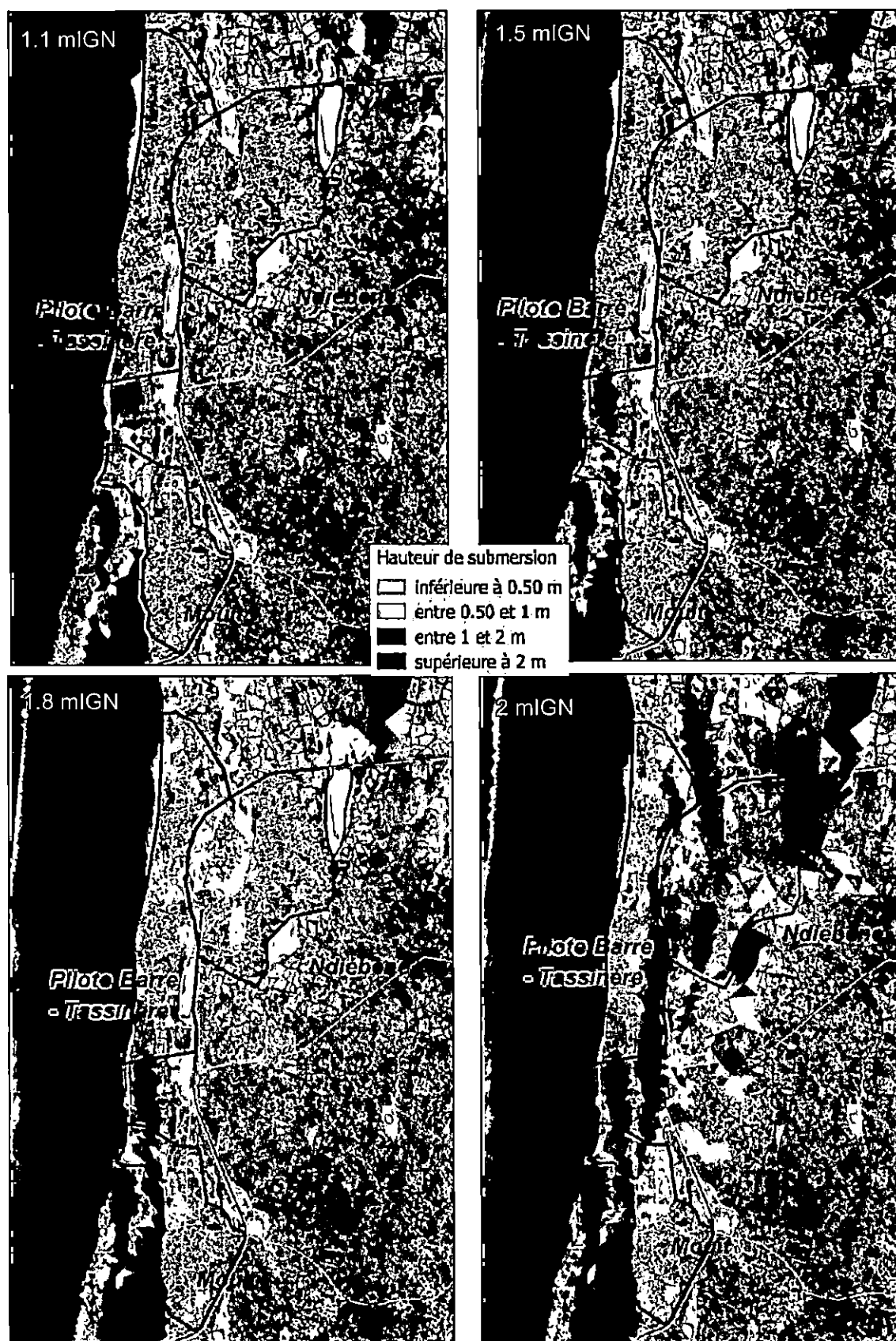


Figure 5-9 : Hauteurs de submersion sur les villages côtiers du Gandiolais pour un niveau d'eau théorique à l'échelle de Saint-Louis - Test pour des niveaux théoriques de 1 à 2 mIGN

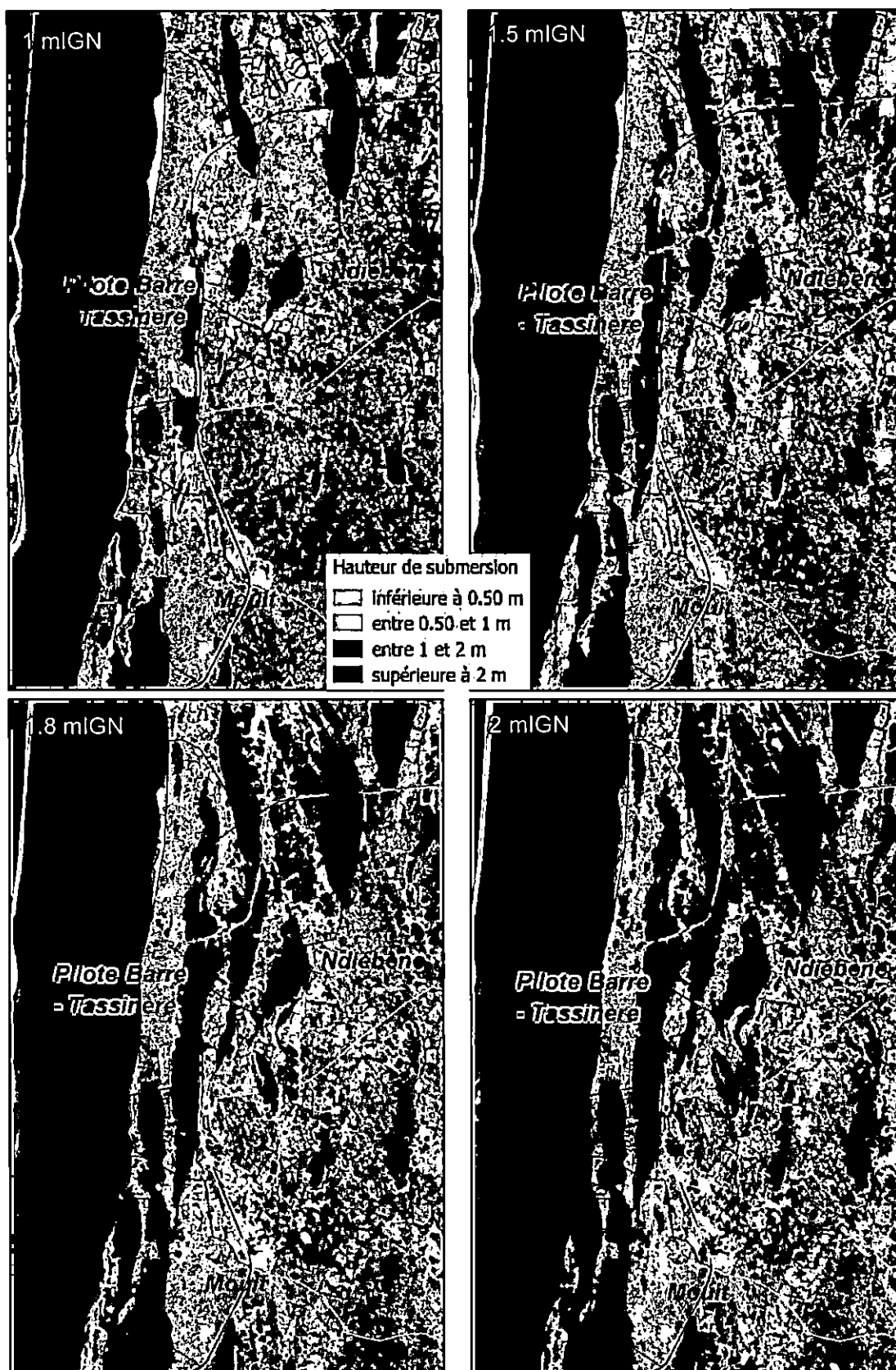


Figure 5-10 : Hauteurs de submersion sur les villages côtiers du Gandiolais pour un niveau d'eau théorique au droit des villages – Test pour des niveaux théoriques de 1 à 2 mIGN

5.4 Vulnérabilité de la ville de Saint-Louis et des villages du Gandiolais au risque de formation d'une nouvelle brèche

5.4.1 Introduction

La flèche sableuse, qui forme une protection naturelle entre le fleuve Sénégal et l'Océan Atlantique, est relativement vulnérable en raison de sa faible hauteur (généralement à quelques mètres au-dessus du niveau moyen de la mer) et de sa largeur étroite (une centaine de mètres par endroits).

À la suite de changements dans le transport côtier, de l'impact des tempêtes, des débits élevés du fleuve Sénégal, des variations induites par le changement climatique ou d'une combinaison de ces facteurs, une forte érosion de la flèche sableuse peut se produire et conduire à la formation de brèches à travers cette flèche. Cela dégraderait progressivement la première ligne de défense côtière et augmenterait les risques d'inondation ainsi qu'une forte érosion de l'arrière-pays proche.

À plus long terme (plusieurs mois à plusieurs années), cela pourrait provoquer des changements à grande échelle et à long terme dans le fonctionnement et la morphologie du delta du fleuve, impactant ainsi Saint-Louis et ses villages environnants, comme observé après la brèche formée (initialement artificiellement) en 2003. Cette nouvelle embouchure conduirait à la destruction des quartiers habités de Saint-Louis situés sur le cordon littoral ce qui constitue un risque majeur sur la zone d'étude, avec ensuite la migration de l'embouchure présentant un risque majeur pour les villages du Gandiolais.

Ce risque doit être pris en compte dans le cadre de l'étude détaillée des scénarios d'aménagement et des actions devront être menées sur le cordon littoral pour éviter la formation d'une nouvelle embouchure du fleuve, comme spécifié dans le paragraphe 5.4.5.

Risques du côté fleuve

La modélisation de la crue de 1999 a mis en évidence le risque de submersion du cordon littoral en amont de Saint-Louis. Sur un linéaire de 15 km l'altitude moyenne du cordon littoral est de 2 mIGN, avec ponctuellement des points bas à 1.80 mIGN (Figure 2-7 et Figure 5-11). Ces submersions peuvent conduire à la formation d'une brèche naturelle et la création d'une nouvelle embouchure du fleuve en amont de Saint-Louis.

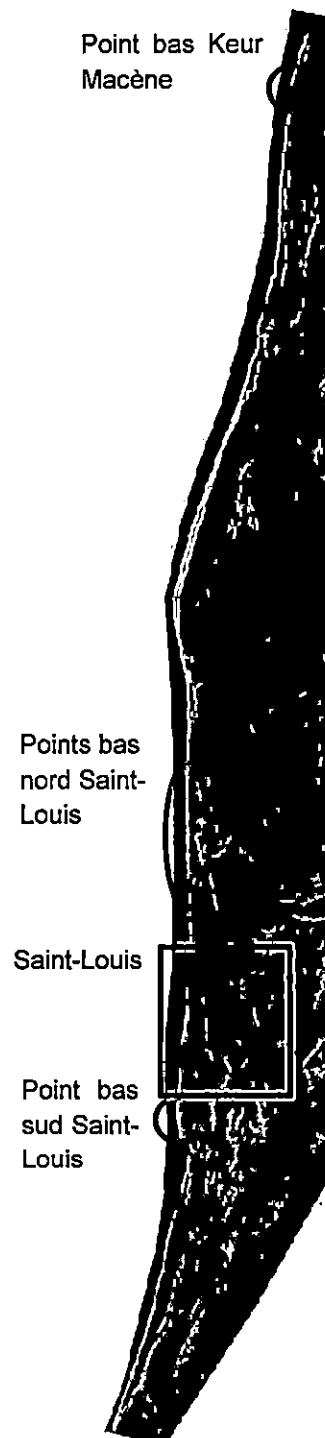


Figure 5-11 : Localisation des points bas sur le cordon littoral

Risques du côté mer

Pour évaluer le risque de formation de nouvelles brèches dans la flèche sableuse dû aux actions de la mer (notamment l'impact des tempêtes), trois emplacements vulnérables (faible largeur et hauteur de la flèche sableuse) ont été étudiés en détail : pour deux sections juste au nord et au sud de Saint-Louis (pour lesquels des modèles XBeach détaillés ont été mis en place) et un emplacement supplémentaire au sud de l'embouchure actuelle du fleuve (analyse basée sur un jugement d'expert et comparaison avec un modèle de la flèche sableuse à grande échelle) (Figure 5-11 et Figure 5-12).

La zone au sud de Saint-Louis (Figure 5-12C) a été modélisée en détail, à la suite de l'étude initiale décrite dans le rapport L4 (Chapitre 7 du rapport L4, Egis Eau et Deltares, 2019d). Des scénarios de changement climatique sont ajoutés aux séries de modèles existantes pour étudier l'effet combiné de l'élévation prévue du niveau de la mer et des tempêtes (§5.4.2).

De plus, un nouveau modèle XBeach a été mis en place pour la région au nord de Saint-Louis (Figure 5-12B), afin de vérifier si l'impact des tempêtes est tel que des mesures immédiates doivent être prises (§5.4.3). Les effets des changements climatiques pour cette zone nord sont évalués en fonction des effets des changements climatiques pour le modèle sud, car les hauteurs de la flèche sableuse sont similaires pour les deux zones.

Pour évaluer le risque de brèche pour la région de la flèche sableuse au sud de l'embouchure du fleuve (Figure 5-12D), les résultats du modèle XBeach pour l'ensemble de la flèche au sud de Saint-Louis sont analysés (§5.4.4) en incluant différents scénarios de conditions de tempête.

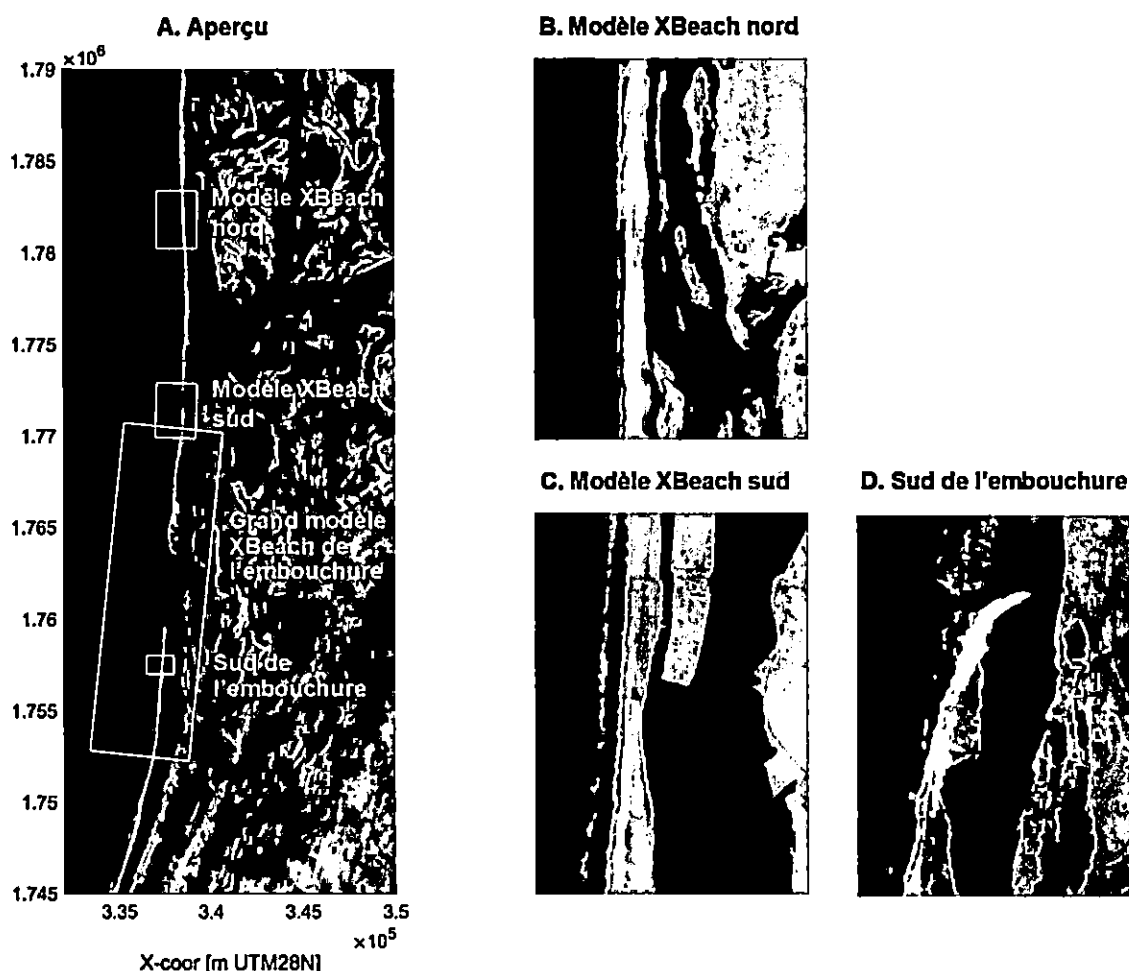


Figure 5-12 : Aperçu des zones vulnérables étudiées

Il convient de noter que dans les simulations ci-dessous, une éventuelle augmentation naturelle progressive de la hauteur de la flèche sableuse, avec l'élévation du niveau de la mer au cours des prochaines décennies, n'est pas prise en compte. Suivant la théorie de Bruun (1962), un système naturel pourrait en principe s'adapter aux variations du niveau de la mer si le niveau de la mer ne monte pas trop vite pour que le système s'adapte, et si la quantité des sédiments dans le système est suffisante.

La théorie suppose que des profils de plage exposés aux vagues s'érodent selon lehaussement du niveau de la mer, divisé par la pente du profil actif de la plage entre le pied du profil actif et la crête de la berme ou dune, et peuvent monter en hauteur en reculant. En revanche, de grandes parties de la flèche sableuse ont des environnements construits qui ne pourront pas s'adapter, car leur configuration naturelle est fixée.

Les réponses prédites du cordon littoral aux élévations du niveau de la mer sont présentées au §7.1.1. Afin de s'affranchir de ces incertitudes, et d'aborder les risques imminents pour les conditions actuelles, des simulations ont été réalisées sans correction pour ces processus d'adaptation, et peuvent donc être considérées comme le scénario le plus conservateur.

Les conditions aux limites hydrodynamiques pour le modèle XBeach sont dérivées d'une analyse des valeurs extrêmes des hauteurs de vagues historiques, des périodes pic des vagues et des relevés de

surcotes, comme expliqué dans le §4.3. Plus spécifiquement, dans ce rapport des tempêtes ont été modélisées avec une période de retour d'un an ($H_s = 2,6$ m, $T_p = 15,7$ s, surcote = 0,76 m), de 10 ans ($H_s = 3,1$ m, $T_p = 17,1$ s, surcote = 0,84 m) et de 100 ans ($H_s = 3,5$ m, $T_p = 18,9$ s, surcote = 0,87 m).

Pour le paramétrage de XBeach et l'étalonnage du modèle, se référer au chapitre 7 du rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d).

5.4.2 Zone au sud de Saint-Louis

5.4.2.1 Paramétrage

Un modèle XBeach a été mis en place pour la zone au sud de Saint-Louis, capturant la section de la flèche sableuse faible (très étroite et basse) juste au sud de Saint-Louis. La grille s'étend sur 3 km le long de la côte et 2,3 km sur la rive, avec un grossissement de la grille près des limites latérales et au large pour l'efficacité du calcul.

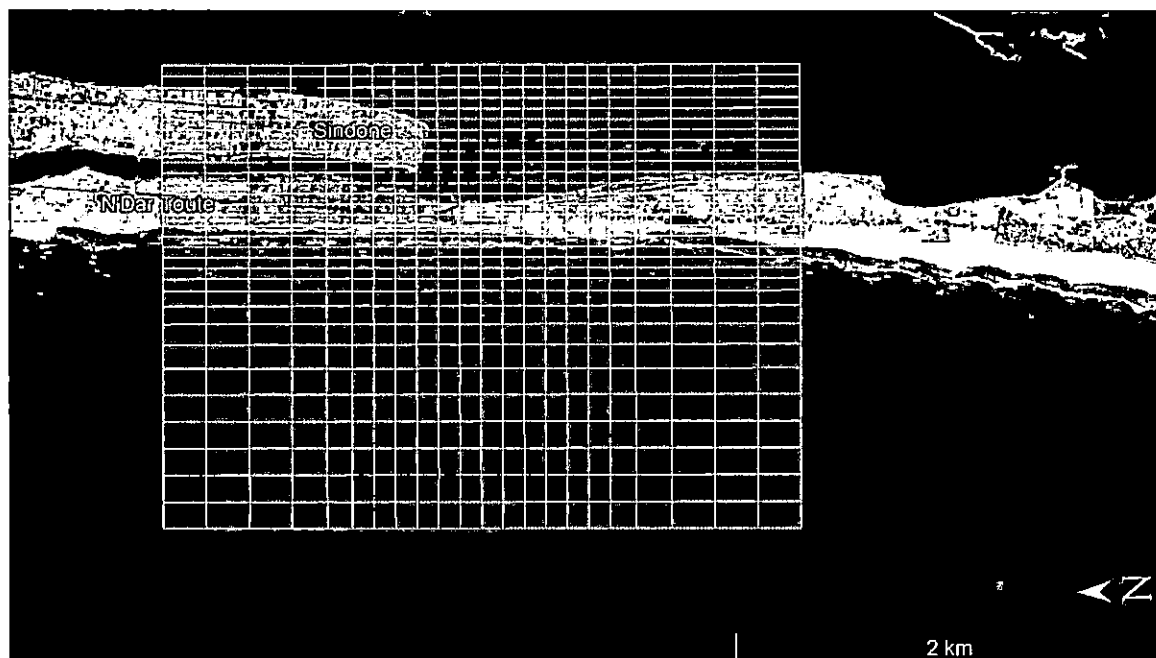


Figure 5-13 : Étendue du domaine de calcul du modèle local. Un quadrillage est représenté sur la figure afin de se rendre compte de la résolution est (une seule ligne tracée pour 10 lignes de grille de calcul).

En plus des simulations de modèles existant (scénario actuel), 2 scénarios de changement climatique sont évalués : à l'horizon 2050 (élévation du niveau de la mer = +19 cm) et à l'horizon 2100 (élévation du niveau de la mer = +66 cm). Les deux scénarios de changement climatique sont exécutés pour des tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans.

Les modèles XBeach sont initiés avec un niveau d'eau de 1 m dans le fleuve. Ce niveau d'eau n'a d'effet que pour les grands épisodes de débordement excessif, pour lesquels un niveau d'eau plus bas dans le fleuve pourrait entraîner une surestimation de l'érosion des dunes en raison des gradients de niveau d'eau.

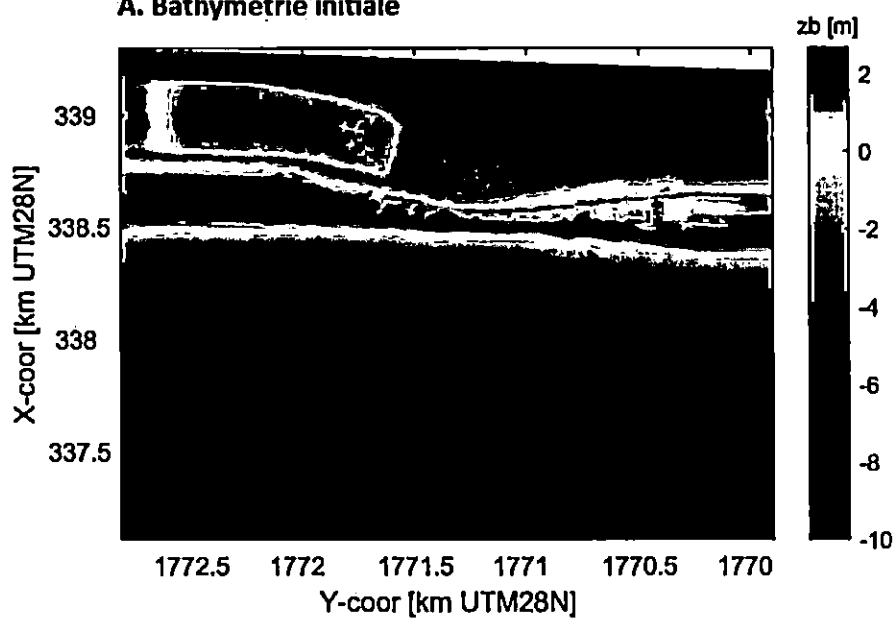
Une analyse du modèle supplémentaire a été exécutée pour vérifier si cet effet avait une influence sur les résultats du modèle. Ce modèle a été forcé avec un niveau d'eau de 1,6 m, correspondant à un grand débit fluvial ($\sim 2000 \text{ m}^3/\text{s}$) tel que calculé par le modèle ICM pour la crue historique de 2003 (rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d)). Comme aucune différence dans les profils d'érosion n'a été observée, tous les modèles ont été exécutés avec un niveau d'eau de 1 m dans le fleuve.

Pour le paramétrage de XBeach et l'étalonnage du modèle, nous référons au chapitre 7 du rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d).

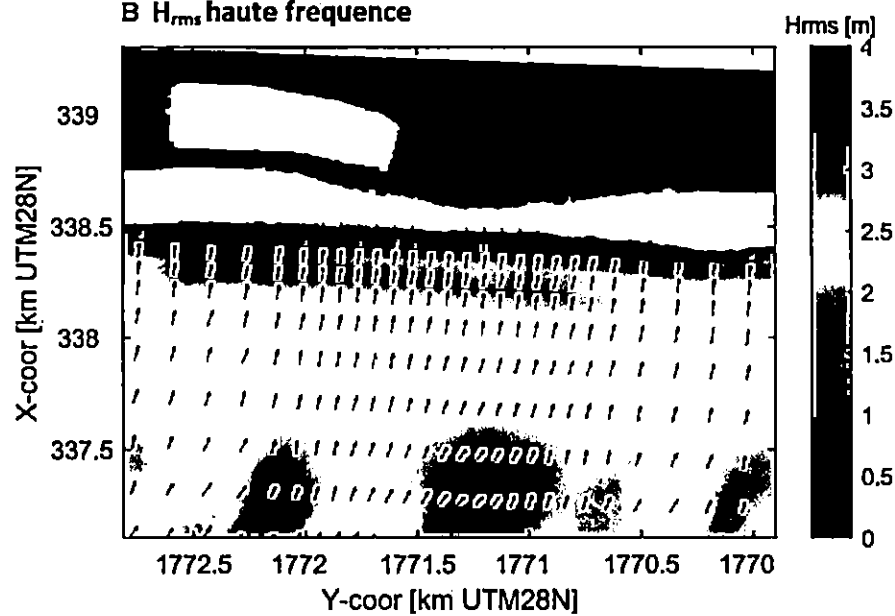
5.4.2.2 Hydrodynamique

Les Figure 5-14 (simulation d'une tempête avec une période de retour de 10 ans) et Figure 5-15 (simulation d'une tempête avec une période de retour de 100 ans) présentent la bathymétrie initiale (A), les vagues courtes (périodes typiquement entre 2 et 20 s) (B), l'élévation du niveau d'eau et directions. Les courants (C), et les ondes infragravitaires (périodes typiquement entre 20 et 200 s) (D) juste avant le pic de la tempête.

A. Bathymétrie initiale



B H_{rms} haute fréquence



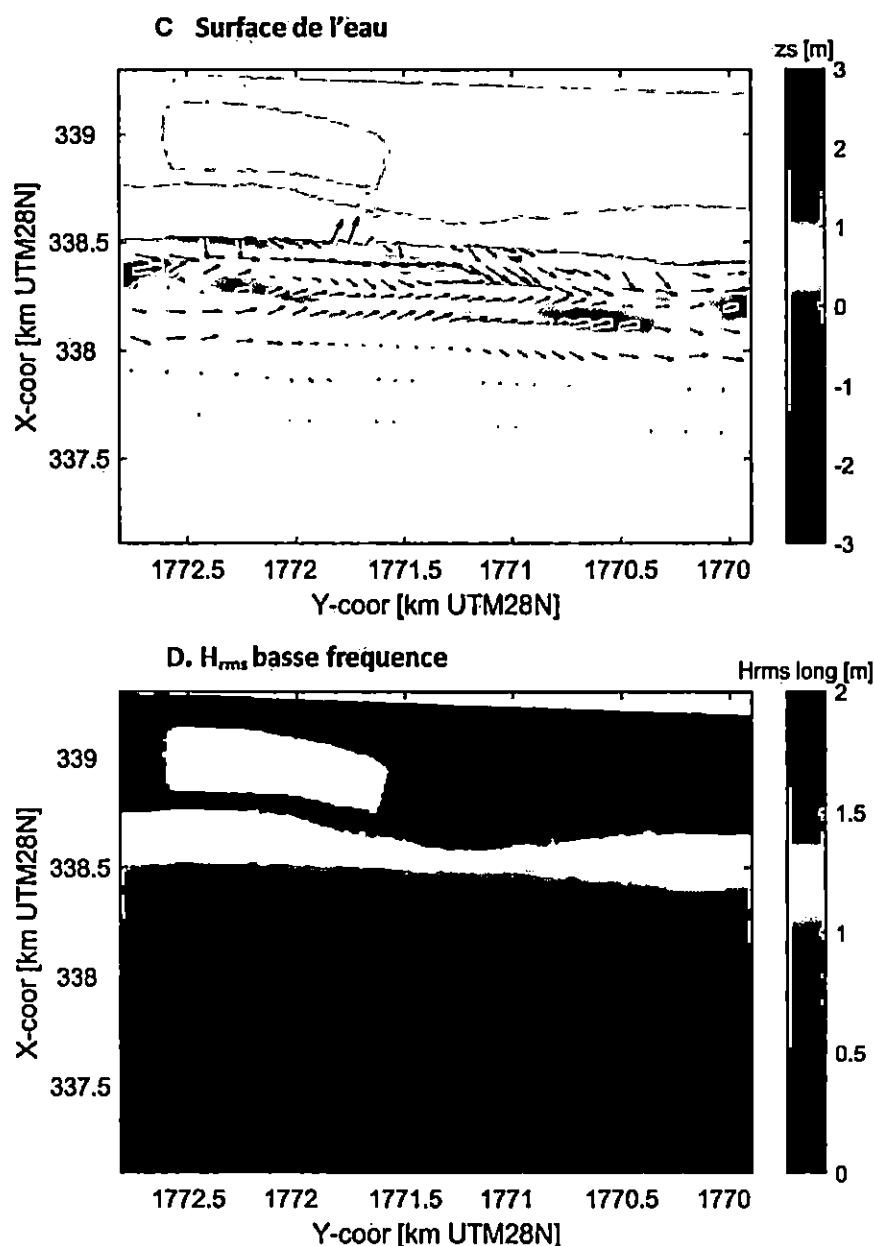
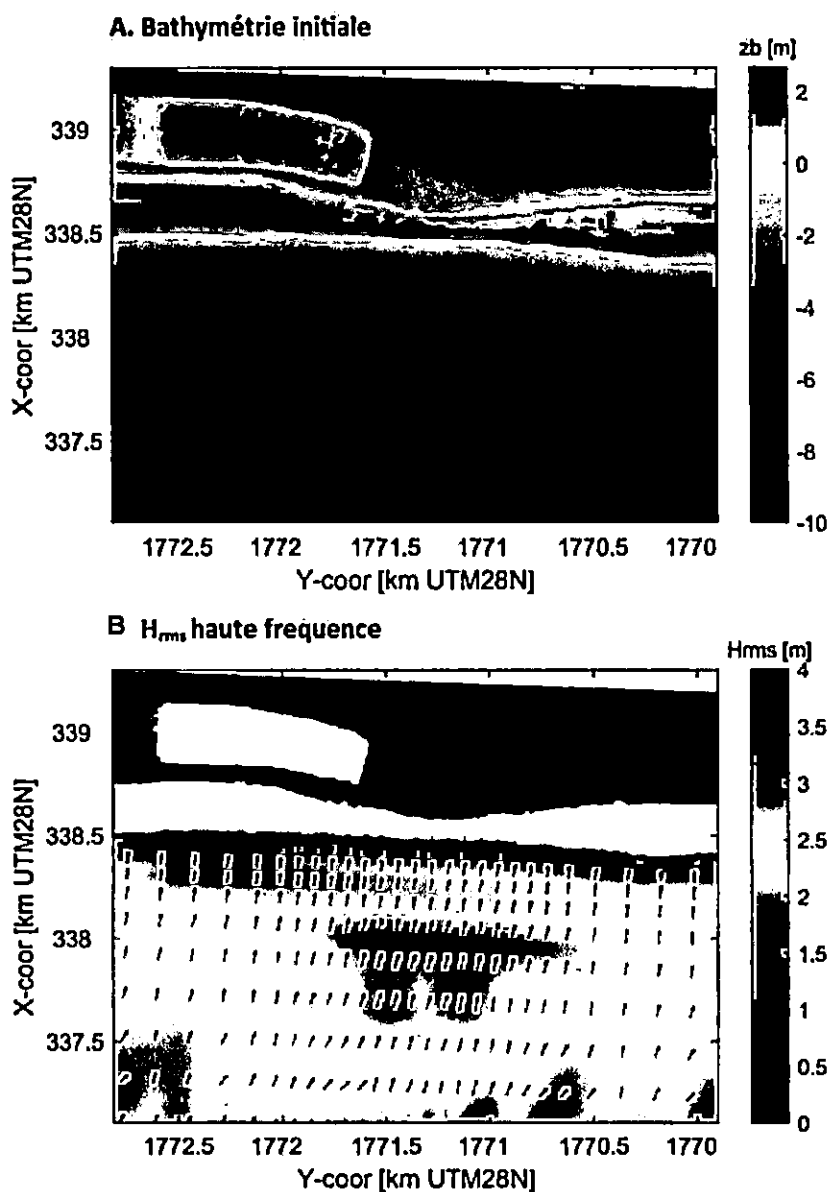


Figure 5-14 : Résultats instantanés du comportement hydrodynamique du modèle XBeach au sud de Saint-Louis après 15 heures de simulation. Les résultats sont présentés pour une tempête avec une période de retour de 10 ans, dans le scénario actuel. La bathymétrie initiale (A), les vagues courtes (périodes typiques entre 2 et 20 s) (B), le champ d'écoulement et l'élévation du niveau d'eau (C), et les ondes infragravitaires (périodes typiques entre 20 et 200 s) (D) juste avant le pic de la tempête.

Le graphique de la hauteur des vagues courtes montre que les vagues se réfractent vers l'incidence normale à la côte et dissipent l'énergie dans l'estran peu profond (B, Figure 5-14). L'incidence des vagues sous un angle crée un courant parallèle à la plage dans la zone de déferlement, qui est dirigée vers le sud (C).

Conformément à la théorie, le champ des vagues plus au large est dominé par les mouvements des ondes courtes, tandis que près du rivage, l'énergie infragravitaire est également importante (hauteur des ondes infragravitaires jusqu'à 0.7 m) en raison de la dissipation des ondes courtes et du transfert d'énergie des ondes courtes aux ondes infragravitaires. Les ondes infragravitaires peuvent être

distinguées dans le graphique du niveau d'eau (graphique B) sous forme d'ondulations à crête longue sur le niveau d'eau moyen, et dans le graphique D qui représente la hauteur des vagues. Les hauteurs des ondes infragravitaires (panneau D) et de la surcote près de la plage (panneau C) accroissent avec l'augmentation de l'intensité des tempêtes (comparer Figure 5-14 avec Figure 5-15), tandis que les hauteurs des vagues courtes (panneau B) sont limitées en profondeur et donc moins sensibles aux conditions de forçage changeantes.



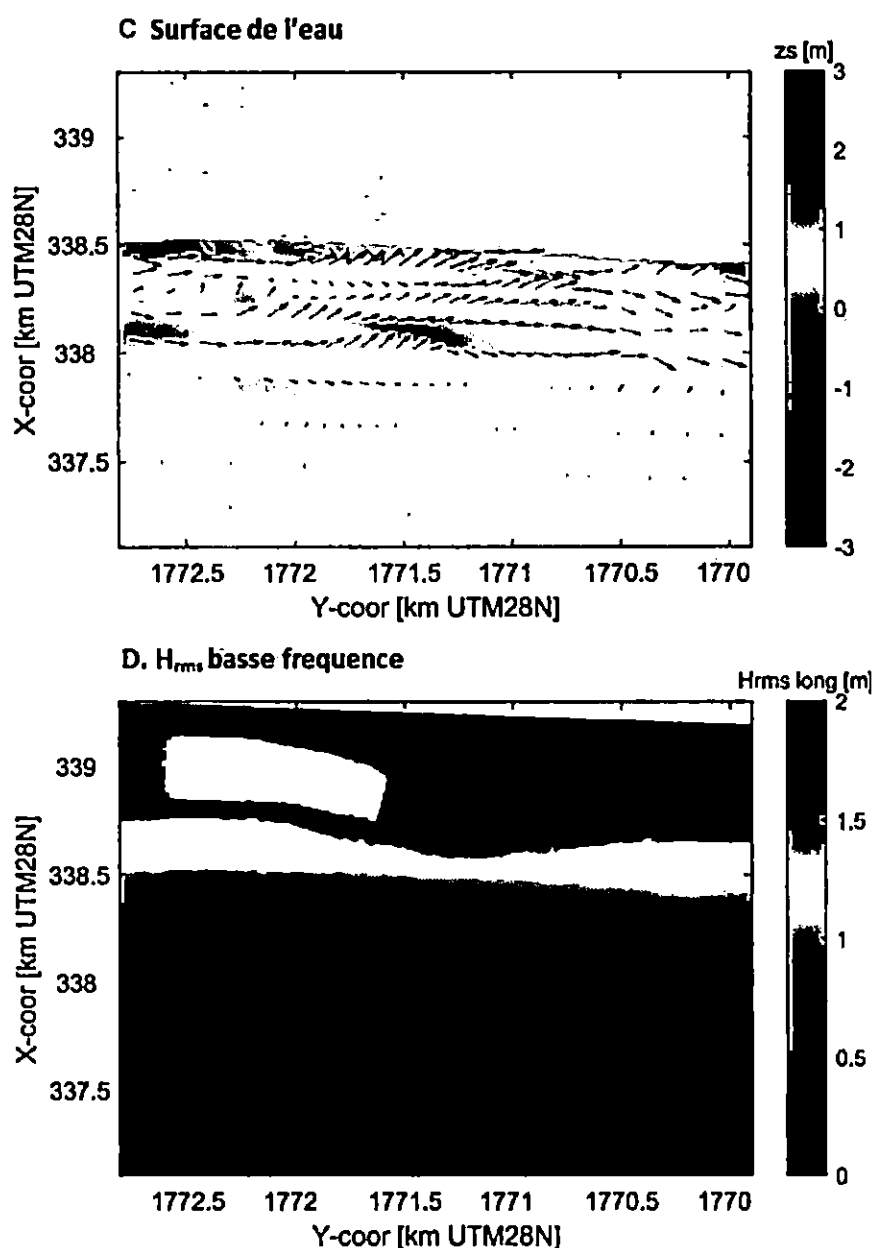


Figure 5-15 : Résultats instantanés du comportement hydrodynamique du modèle XBeach au sud de Saint-Louis après 15 heures de simulation. Les résultats sont présentés pour une tempête avec une période de retour de 100 ans, dans le scénario actuel. La bathymétrie initiale (A), les vagues courtes (périodes typiques entre 2 et 20 s) (B), le champ d'écoulement et l'élévation du niveau d'eau (C), et les ondes infragravitaires (périodes typiques entre 20 et 200 s) (D) juste avant le pic de la tempête.

5.4.2.3 Résultats

Le modèle XBeach a été utilisé pour démontrer l'impact des tempêtes sur la section étroite de la flèche sableuse à la pointe sud de Saint-Louis, sous différents forçages liés aux changements climatiques. Cela nous permet d'évaluer le risque de rupture de la flèche sableuse et donc le risque d'inondation de l'arrière-pays. À l'aide de ces informations, nous pouvons évaluer si des mesures d'adaptation sont nécessaires, maintenant ou à l'avenir, pour garantir un niveau de protection côtière acceptable.

Submersion par les vagues et inondation

Sur les figures suivantes, les cartes d'inondation sont présentées pour le scénario actuel (Figure 5-16) et les scénarios de changement climatique à l'horizon 2050 (Figure 5-17) et à l'horizon 2100 (Figure 5-18), respectivement. La profondeur d'inondation est calculée comme le niveau d'eau maximal lors d'une tempête moins la topographie initiale et n'est évaluée que pour les zones supérieures à la marée haute. La profondeur maximale d'inondation est un indicateur indirect des dommages de la zone touchée, mais il convient de garder à l'esprit que les dégâts réels dépendent également fortement de l'utilisation des terres de la zone inondée.

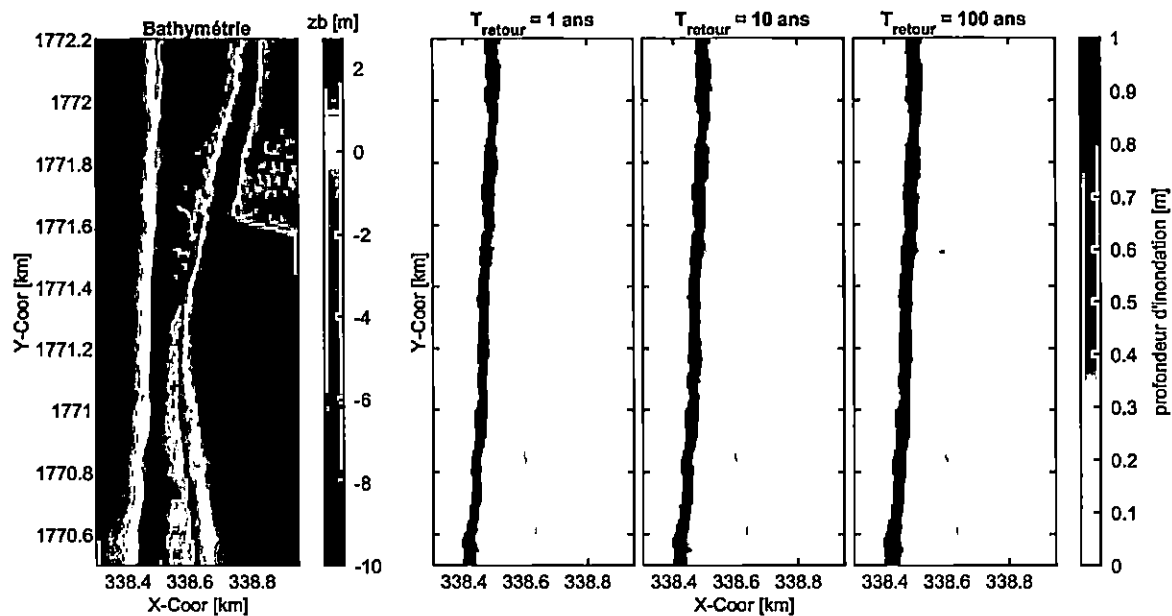


Figure 5-16 : Cartes de la profondeur maximale d'inondation pour le scénario actuel, pour toutes les zones initialement au-dessus de la moyenne de marée haute. Les tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentées pour le modèle XBeach de la pointe sud de Saint-Louis.

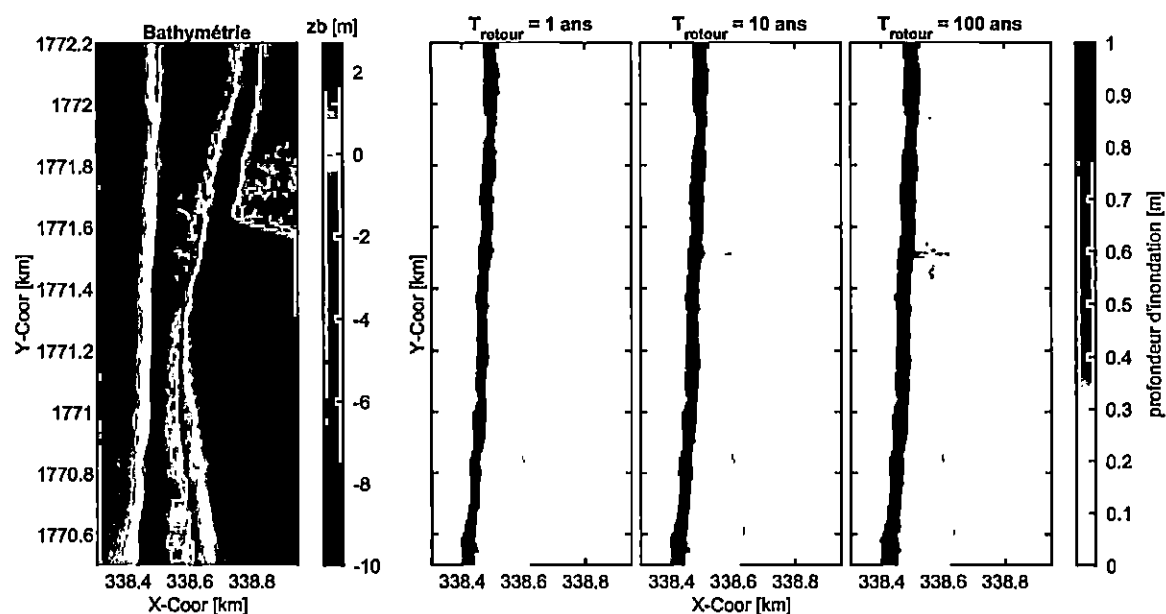


Figure 5-17 : Cartes de la profondeur maximale d'inondation à l'horizon de 2050, pour toutes les zones initialement supérieures à la marée haute. Les tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentées pour le modèle XBeach de la pointe sud de Saint-Louis.

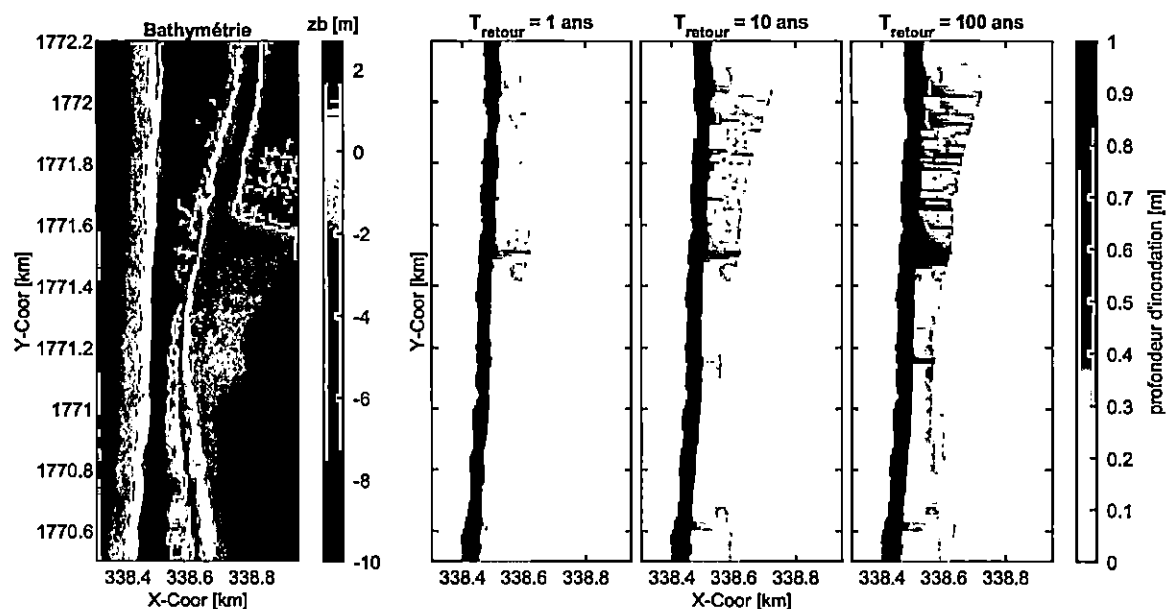


Figure 5-18 : Cartes de la profondeur maximale d'inondation à l'horizon de 2100, pour toutes les zones initialement supérieure à la marée haute. Les tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentées pour le modèle XBeach de la pointe sud de Saint-Louis.

Les résultats montrent que dans le scénario actuel, aucune inondation complète de la flèche sableuse ne se produit pour aucune des conditions de tempête, sauf pour le front de mer où les profondeurs d'inondation maximales peuvent atteindre 1 m. Ces résultats indiquent que le risque de brèche de la flèche sableuse est limité pour les conditions actuelles. Il convient de noter que les simulations ont été exécutées avec une résolution de la grille de calcul de 8 m x 10 m au niveau de la flèche sableuse / ville pour couvrir cette grande zone. En raison de la résolution choisie, les bâtiments et les rues ne sont pas

représentés, et de ce fait insuffisamment détaillés pour étudier la propagation des inondations dans la ville – ce qui probablement sous-estime les impacts des tempêtes sur la ville. Dans le projet SERRP, les risques et la taille de la zone touchée par la tempête dans les quartiers bordant le front de mer de Saint-Louis seront étudiés plus en détail.

Le risque comme prédit actuellement est d'observer une augmentation du niveau de la mer au large en raison du changement climatique. Compte tenu de l'élévation du niveau de la mer de 19 cm, des submersions par les vagues de tempête peuvent être observées pour les tempêtes énergétiques ($T_{\text{retour}} = 100$ ans), voir la Figure 5-17.

Avec une élévation du niveau de la mer de 66 cm, la submersion par les vagues se produit également pour les tempêtes moins intenses, tandis que la flèche sableuse se brise complètement pour la tempête avec une période de retour de 100 ans (Figure 5-18). L'inondation est due à la combinaison de niveaux d'eau élevés, de vagues courtes et d'ondes infragravitaires, qui augmentent en hauteur avec l'augmentation de l'intensité des tempêtes.

Érosion de la flèche sableuse

Une submersion de la flèche sableuse par les vagues entraîne généralement un changement morphologique, qui pourrait éventuellement entraîner une rupture de la flèche sableuse si la tempête est intense et / ou suffisamment longue. Ce changement morphologique est évalué (i) en inspectant l'abaissement du niveau de la crête de la flèche sableuse (comme cela a été fait dans le rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d)) et (ii) en évaluant les changements de morphologie et de taux d'érosion.

(i) Abaissement du niveau de la crête de la flèche sableuse

Pour évaluer l'abaissement du niveau de la flèche sableuse, la crête de la flèche sableuse est représentée (ligne noire dans le graphique supérieur de la Figure 5-19). Dans les figures suivantes, les résultats du modèle sont montrés respectivement pour le scénario actuel et à l'horizon 2050 et 2100, montrant le changement de niveau de la crête de la flèche sableuse pour les tempêtes avec $T_{\text{retour}} = 1$ an, 10 ans et 100 ans.

Pour les deux premiers scénarios de tempête ($T_{\text{retour}} = 1$ an et $T_{\text{retour}} = 10$ ans), aucune baisse de la hauteur de la crête n'est observée pour le scénario actuel et à l'horizon de 2050. Seule une tempête de $T_{\text{retour}} = 100$ ans affecte le niveau de la crête dans ces scénarios, montrant une diminution de la crête près de la coordonnée $Y = 1771,5$ km N, ainsi qu'une légère diminution près de $Y = 1771,9$ km N. La première, la coordonnée Y de 1771,5 km N, correspond aux dépôts des sédiments par les vagues comme observées ci-dessus.

La situation se dégrade considérablement à l'horizon 2100. Des grands dépôts de sédiments par les vagues et la rupture de la flèche sableuse qui ont été observés ci-dessus sont également clairement visibles ici (Figure 5-21).

Tous les points bas de la flèche sableuse sont submergés par les vagues et des brèches se produisent à la fois au nord et au sud de la grande dune (située entre $Y = 1771,3$ km N et 1771,4 km N). Cela est attribué aux niveaux d'eau élevés, aux vagues courtes, aux grandes ondes infragravitaires et à la concentration de courants dans les zones inférieures au nord et juste au sud du point de dune le plus élevé.

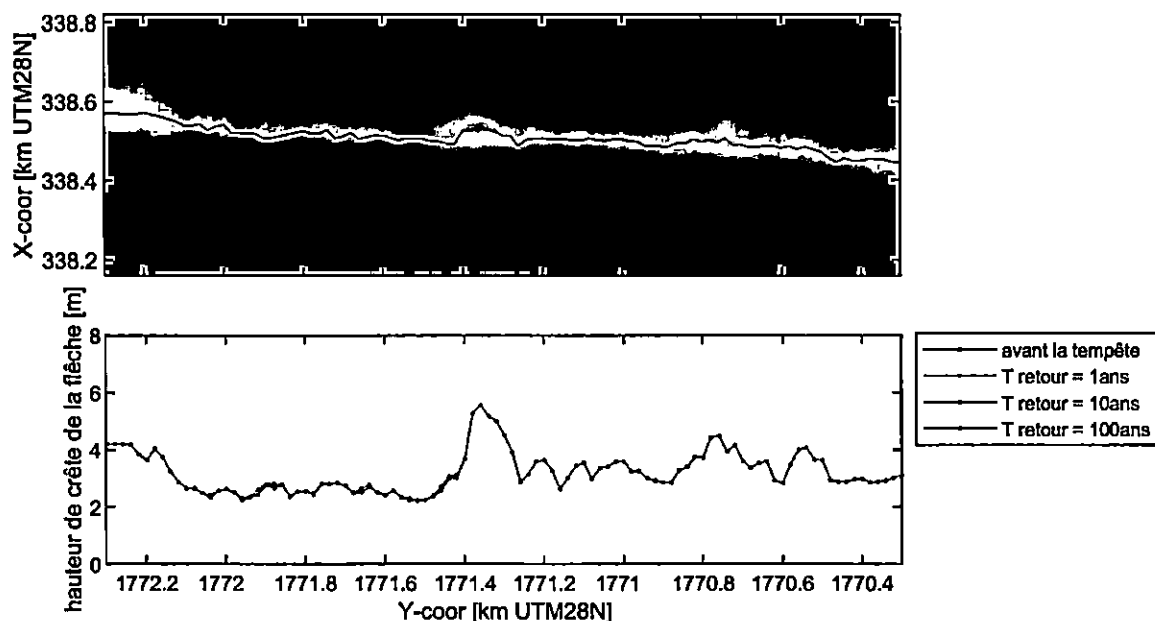


Figure 5-19 : En haut : topographie initiale et démarcation de la ligne de crête de la flèche sableuse du modèle XBeach au sud de Saint-Louis. En bas : hauteur de la crête des dunes post-tempête modélisée pour 3 périodes de retour de tempête, pour les conditions actuelles.

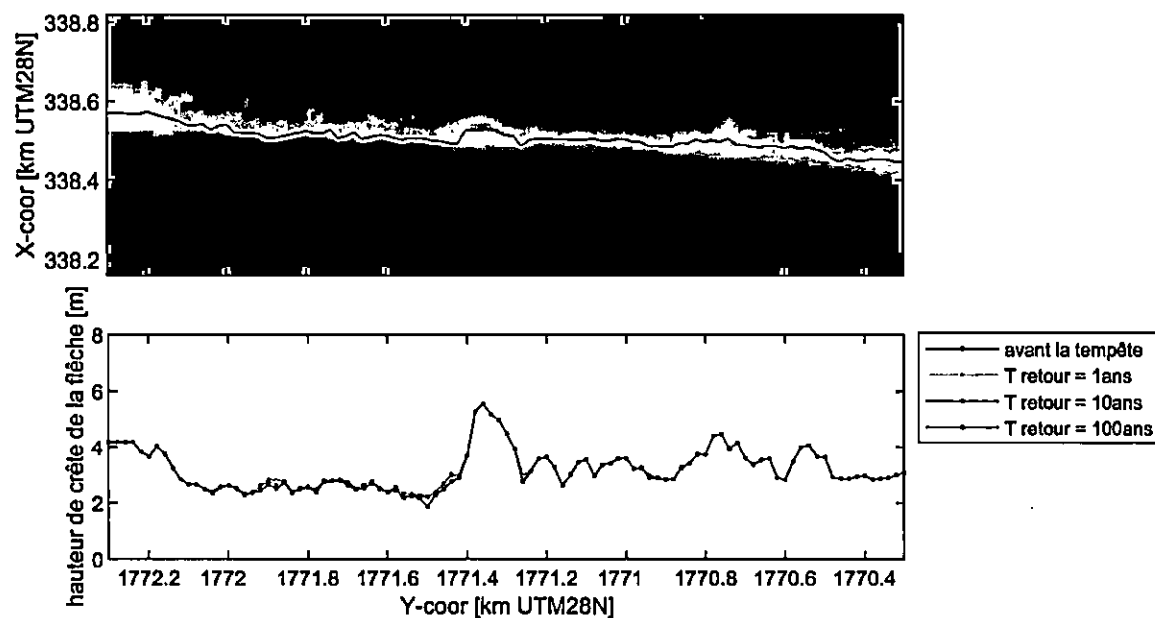


Figure 5-20 : En haut : topographie initiale et démarcation de la ligne de crête de la flèche sableuse du modèle XBeach au sud de Saint-Louis. En bas : hauteur de la crête des dunes post-tempête modélisée pour 3 périodes de retour de tempête, à l'horizon 2050.

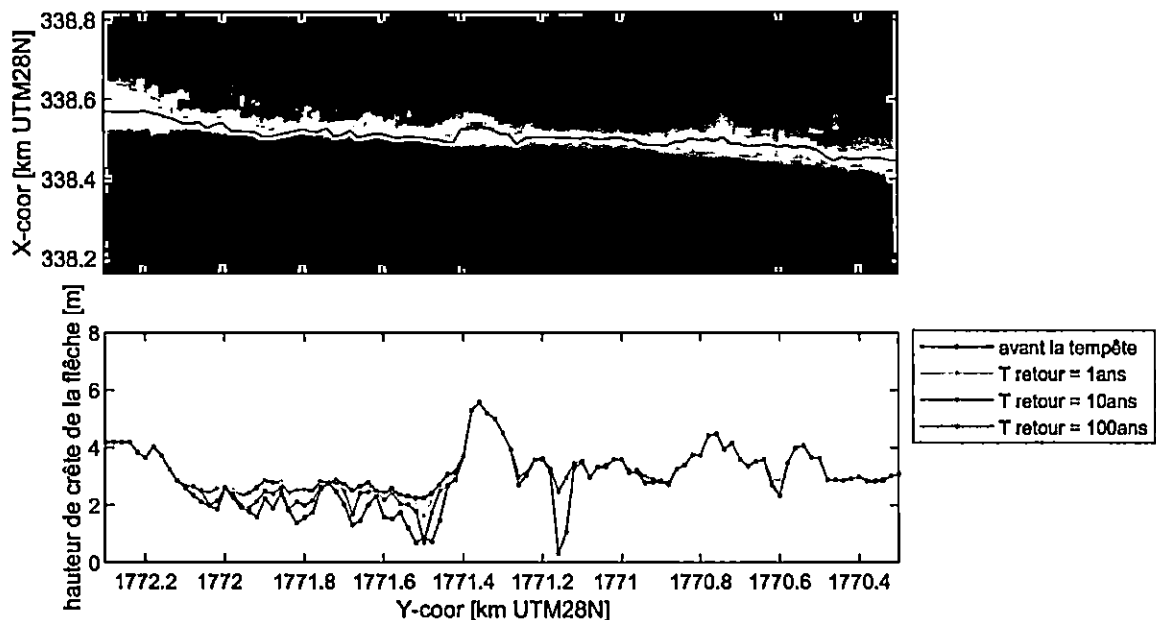


Figure 5-21 : En haut : topographie initiale et démarcation de la ligne de crête de la flèche sableuse du modèle XBeach au sud de Saint-Louis. En bas : hauteur de la crête des dunes post-tempête modélisée pour 3 périodes de retour de tempête, à l'horizon 2100.

(ii) Volumes d'érosion et de sédimentation

Les figures montrant les volumes des sédiments érodés et déposés donnent un meilleur aperçu des effets morphodynamiques des tempêtes, montrant où les sédiments sont érodés et où ils se déposent. Ces volumes d'érosion sont calculés en soustrayant la bathymétrie post-tempête de la bathymétrie pré-tempête. Ils sont présentés pour des conditions de submersion et de formation de brèches :

- RCP 4.5, tempête de 1/100 ans (Figure 5-22 A.)
- RCP 8.5, tempête de 1/1 ans (Figure 5-22 B.)
- RCP 8.5, tempête de 1/10 ans (Figure 5-23 A.)
- RCP 8.5, tempête de 1/100 ans (Figure 5-23 B.)

Les résultats du modèle donnent un aperçu clair de la façon dont la submersion par les vagues conduit finalement à la rupture de la flèche sableuse. L'érosion progressive de la zone de la flèche sableuse brisée pendant la tempête entraîne rapidement une grande ouverture, en raison des vitesses de courant élevées. Les sédiments se déposent dans le fleuve où une minuscule flèche sableuse s'est formée qui suit la direction d'écoulement dominante (l'écoulement d'eau avec une direction de courant dominante du nord au sud conduit à un transport dirigé vers le nord-est).

A noter que dans le modèle XBeach les courants fluviaux ne sont pas pris en compte, ce qui transportera probablement les sédiments plus au sud et limitera fortement la formation de cette nouvelle flèche sableuse dans le fleuve.

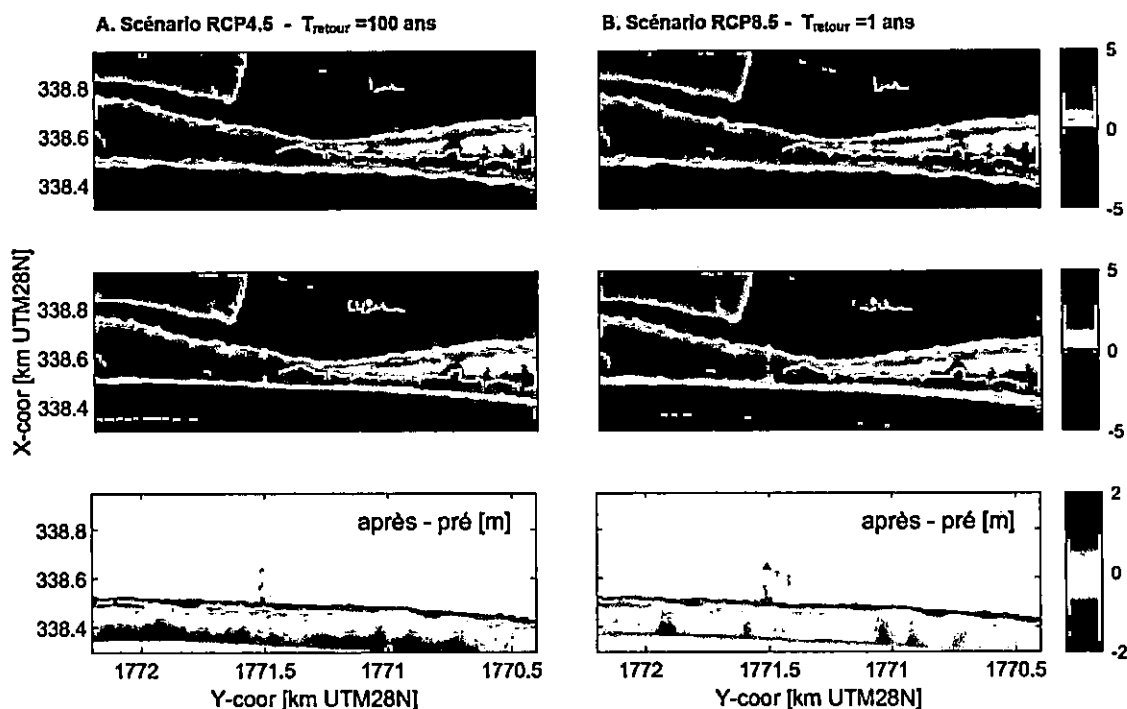


Figure 5-22 : En haut : topographie initiale du modèle XBeach au sud de Saint-Louis. Milieu : topographie post-tempête. En bas : zones d'érosion (rouge) - sédimentation (bleu), obtenues en soustrayant la topographie post-tempête de la topographie pré-tempête. Dans la colonne A, les résultats sont affichés à l'horizon 2050 avec une tempête de période de retour de 100 ans, dans la colonne B à l'horizon 2100 avec une tempête une fois par an.

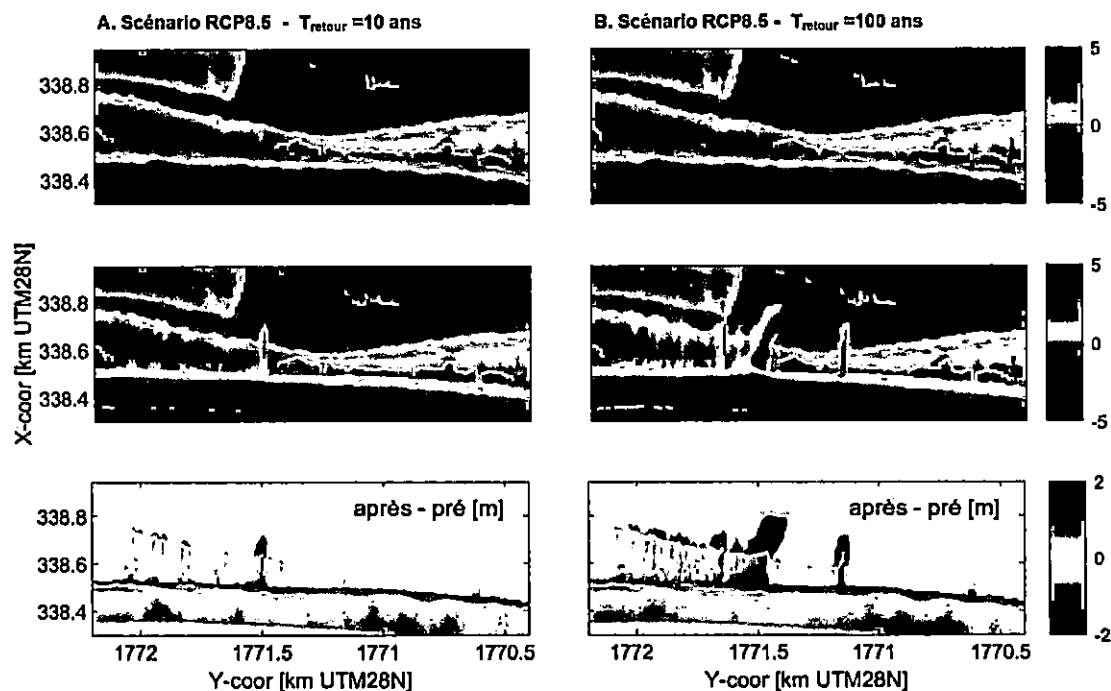


Figure 5-23 : En haut : topographie initiale du modèle XBeach au sud de Saint-Louis. Milieu : topographie post-tempête. En bas : zones d'érosion (rouge) - sédimentation (bleu), obtenues en soustrayant topographie post-tempête de la topographie pré-tempête. Dans la colonne A, les résultats à l'horizon 2050 avec une tempête de période de retour de 10 ans, dans la colonne B à l'horizon 2100 avec une tempête de période de retour de 100 ans.

5.4.2.4 Conclusion sur les risques du côté mer

Pour les conditions actuelles, la section de la flèche sableuse à la pointe sud de Saint-Louis semble stable, même pendant les tempêtes plus énergétiques. Les événements de submersion sont rares, et un léger dépassement ne conduit pas à une brèche de la flèche sableuse, bien qu'il puisse endommager les constructions le long des sections de la flèche sableuse les plus basses.

À l'horizon 2050, avec une élévation prévue du niveau de la mer de 19 cm, le risque de submersion augmente, ce qui peut entraîner des dommages aux infrastructures dans les sections de la flèche sableuse les plus vulnérables, en particulier pour la tempête avec une période de retour de 100 ans. Cependant, aucune formation d'une brèche n'est attendue pour ce scénario.

Ce n'est que lorsque le niveau de la mer augmente de manière considérable, avec environ 66 cm pour la projection du scénario RCP 8.5 pour 2100, que des impacts importants peuvent se produire. Même pour une tempête avec une période de retour d'un an, des événements de submersion sont observés, tandis qu'une brèche complète semble se former pour la tempête avec une période de retour de 100 ans.

Les simulations montrent que la flèche sableuse est sensible à l'élévation du niveau de la mer et à l'intensité des tempêtes, et que les sections peuvent devenir instables, entraînant des impacts importants à court et à long terme. La flèche sableuse, avec sa faible élévation de 2 m à différentes sections transversales, est vulnérable. Des mesures d'adaptation telles que l'alimentation des plages et des dunes pourraient réduire le risque de brèche, accroître la sécurité contre les inondations pour la ville de Saint-Louis et réduire les dommages aux bâtiments et aux infrastructures présentes sur la flèche sableuse.

Il convient de noter que les simulations ont été exécutées avec une résolution de la grille de calcul de 8 m x 10 m au niveau de la flèche sableuse / ville pour couvrir cette grande zone. En raison de la résolution choisie, les bâtiments et rues ne sont pas représentés de manière suffisamment détaillée pour étudier la propagation des inondations dans la ville – ce qui sous-estime probablement les impacts des tempêtes sur la ville. Dans le projet SERRP, les inondations dans les quartiers du front de mer de Saint-Louis seront étudiées plus en détail. Lors du projet SERRP une nouvelle mesure de la bathymétrie sera également acquise avec une plus haute résolution (une transect de 15 m profondeur jusqu'aux bâtiments à chaque 50 m devant la ville prêt du pont Faidherbe, et une transect chaque 250 m dans la reste de la zone) pour mieux capter la transformation des vagues. En utilisant cette approche plus détaillée, des protections adéquates et durables du front marin de la ville de Saint-Louis seront proposées contre les inondations des tempêtes.

5.4.3 Zone au nord de Saint-Louis

5.4.3.1 Paramétrage

À environ 10 km au nord de Saint-Louis, une section très vulnérable (étroite et basse) est présente, où les vagues dépassent régulièrement la flèche sableuse, indiquée par des dépôts de sédiment formés par des submersions des vagues, (*washovers*) identifiés sur des images satellites historiques (Figure 5-24). Une brèche à cet endroit pourrait créer une nouvelle embouchure de fleuve qui, avec le temps, sous le transport littoral par les vagues dirigé vers le sud, migrerait vers le sud et dévasterait Saint-Louis.



Figure 5-24 : Dépôts typiquement créés par des submersions de vagues (encerclé en rouge) observées sur Google Earth, pour la section étroite de la flèche sableuse au nord de Saint-Louis, entre Y = 1780.8 km N et 1781.2 km N.

Pour étudier le risque de formation d'une nouvelle brèche au nord de Saint-Louis, un deuxième modèle XBeach a été créé, où le domaine capture la flèche sableuse et la section du fleuve, sans modéliser la zone de l'arrière-pays. La grille s'étend sur 3,2 km le long de la côte et 2,2 km dans la direction perpendiculaire à la côte. Elle présente un grossissement près des limites latérales et extracôtières pour des raisons d'efficacité de calcul.

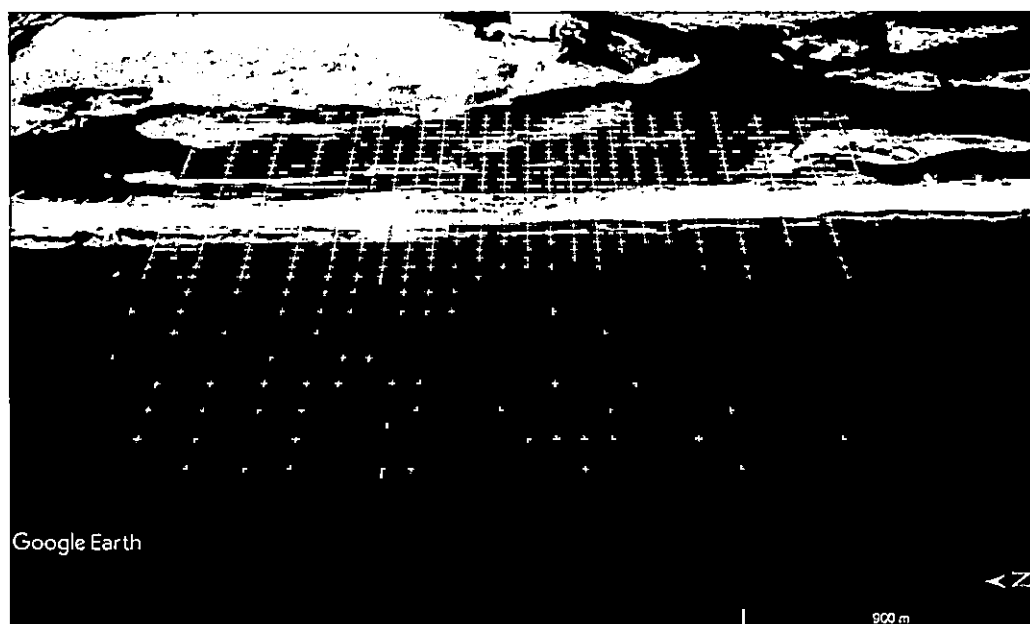


Figure 5-25 : Étendue du domaine de calcul XBeach de la zone au nord de Saint-Louis, avec une impression de la résolution (chaque ligne de grille sur 10 est tracée).

Les conditions aux limites hydrodynamiques sont dérivées comme décrit dans le §3.4. Les tempêtes avec une période de retour d'un an ($H_s = 2,6$ m, $T_p = 15,7$ s, surcote = 0,76 m) et une période de retour de 10 ans ($H_s = 3,1$ m, $T_p = 17,1$ s, surcote = 0,84 m) sont modélisées.

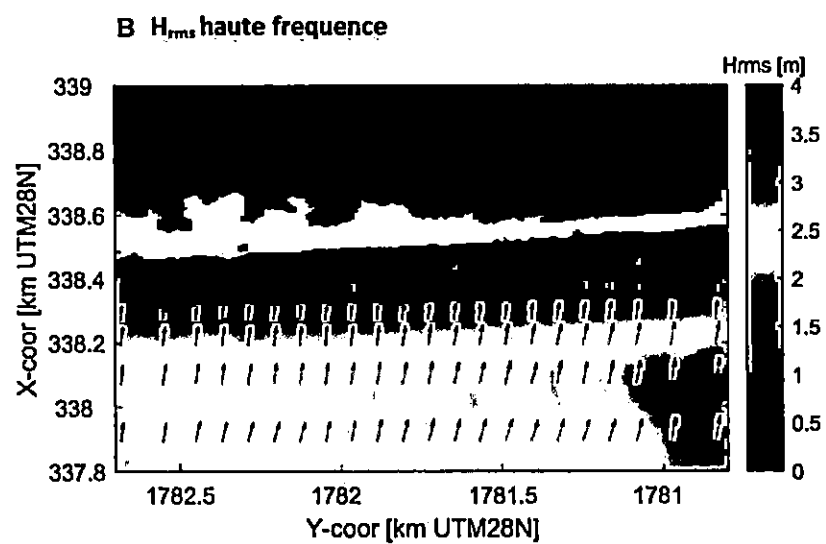
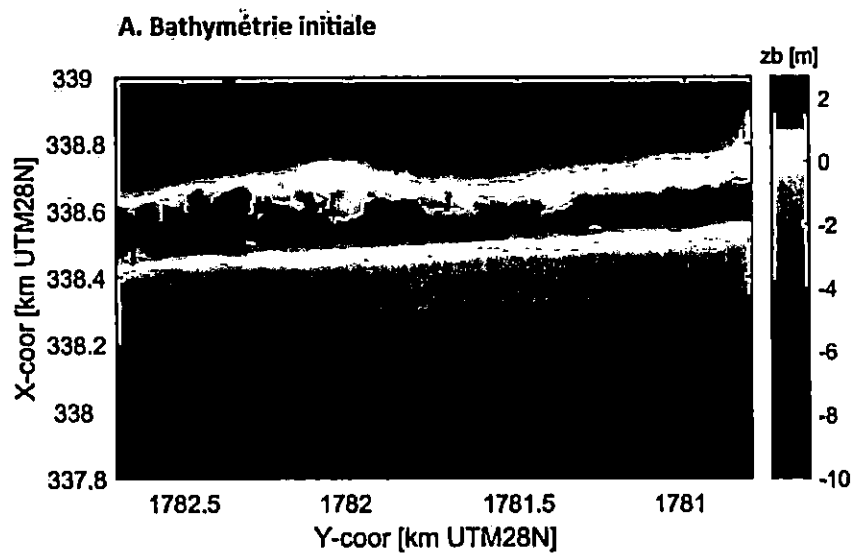
Le fleuve est schématisé avec un niveau d'eau constant local de 1,72 m, correspondant à un événement à fort débit de ~ 2000 m³ / s, obtenu avec le modèle ICM pour la crue historique de 2003. Pour le paramétrage de XBeach et l'étalonnage du modèle, nous nous référons aux paragraphes 7.5 et 7.6 du rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d).

5.4.3.2 Hydrodynamique

Les Figure 5-26 et Figure 5-27 présentent un comportement hydrodynamique pendant des tempêtes de 1/1 et 1/100 ans similaire à celui observé dans la zone modélisée au sud de Saint-Louis (§5.4.2.2). Le graphique de la hauteur des vagues courtes montre que les vagues se réfractent vers l'incidence normale à la côte et dissipent l'énergie dans l'estran peu profond (B). L'incidence des vagues sous un angle crée un courant parallèle à la plage dans la zone de déferlement, dirigée vers le sud (C).

Il est important de noter qu'alors que les données LIDAR acquises lors du projet PROGEP couvrent cette zone d'intérêt, les données bathymétriques du COASTVAR qui sont utilisées datent de 2016 (résolution jusqu'à 30 m suivant la direction transversale). Dans ces données l'estran semble à la fois plus large et moins profond que dans la section côtière au sud, protégeant mieux le rivage contre l'énergie entrante des vagues courtes. Les ondes infragravitaires sont importantes près du rivage et sont en partie responsables des inondations et des submersions par les vagues.

Les hauteurs des ondes infragravitaires (panneau D) et de la surcote près de la plage (panneau C) accroissent avec l'augmentation de l'intensité des tempêtes (comparer Figure 5-26 et Figure 5-27), tandis que les hauteurs des vagues courtes (panneau B) sont limitées en profondeur et donc moins sensibles aux conditions de forçage changeantes.



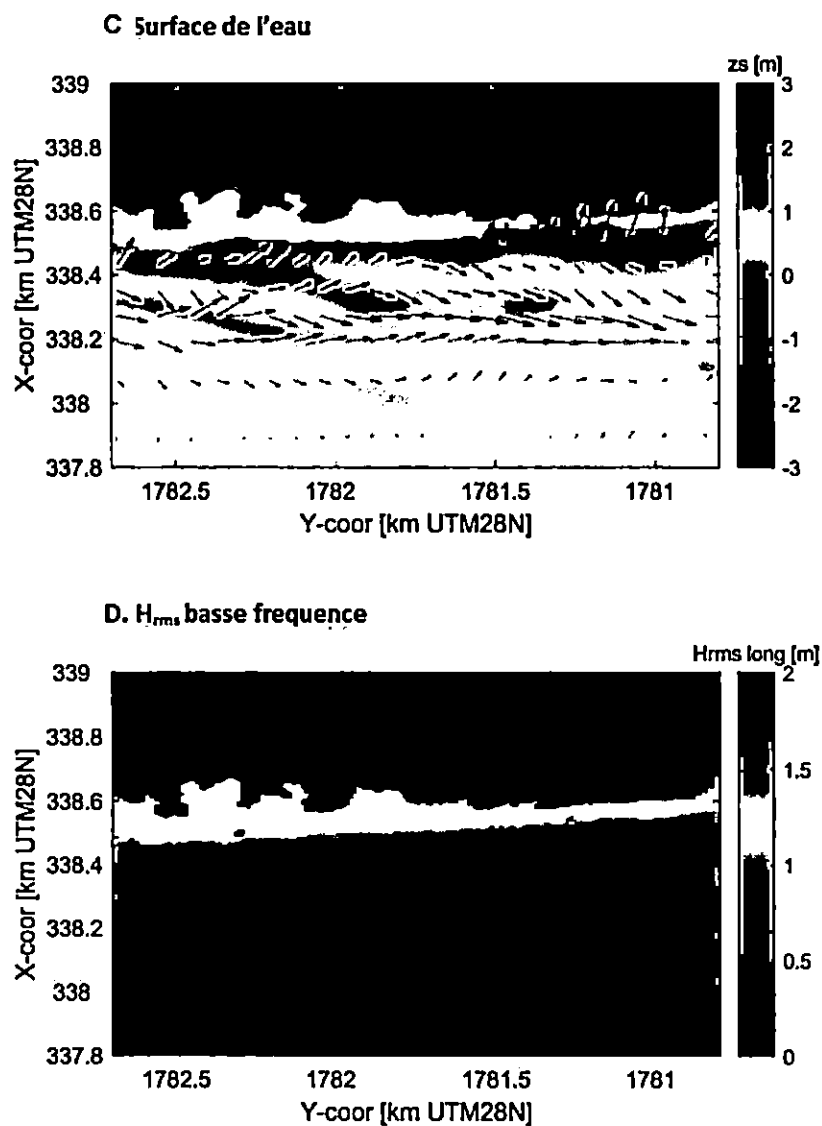
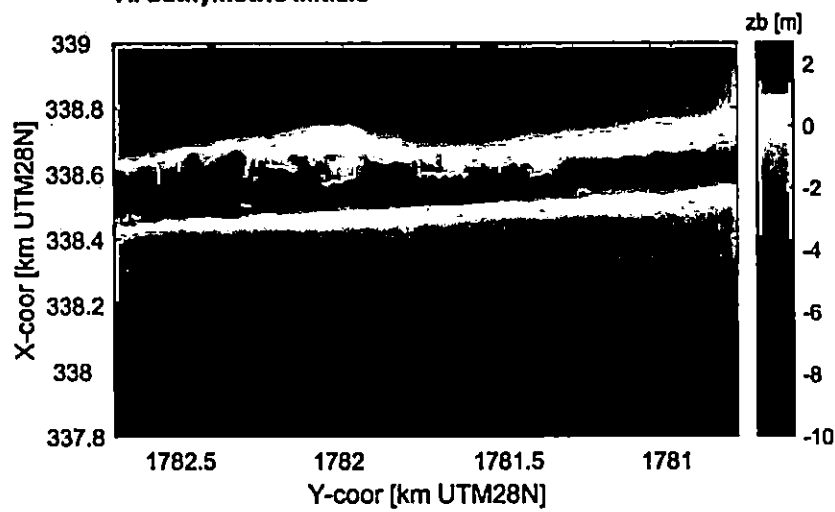
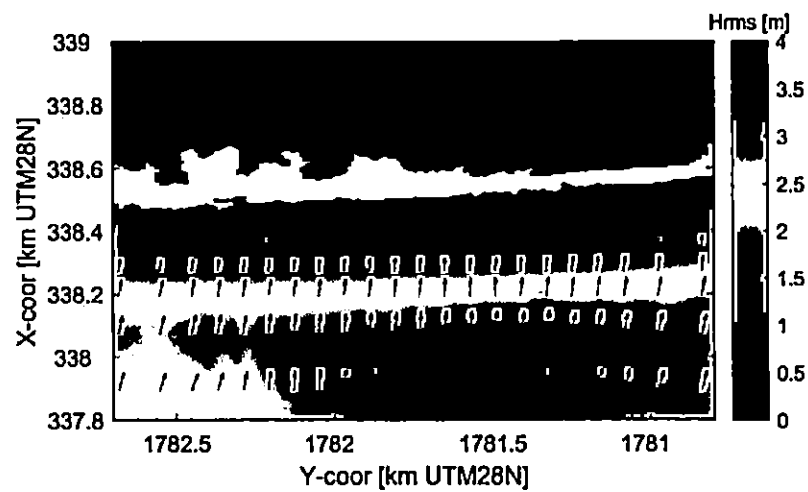


Figure 5-26 : Résultats instantanés du comportement hydrodynamique du modèle XBeach au nord de Saint-Louis après 15 heures de simulation. Les résultats sont présentés pour une tempête avec une période de retour de 10 ans, dans le scénario actuel. La bathymétrie initiale (A), les vagues courtes (périodes typiques entre 2 et 20 s) (B), le champ d'écoulement et l'élévation du niveau d'eau (C), et les ondes infragravitaires (périodes typiques entre 20 et 200 s) (D) juste avant le pic de la tempête.

A. Bathymétrie initiale



B. H_{rms} haute fréquence



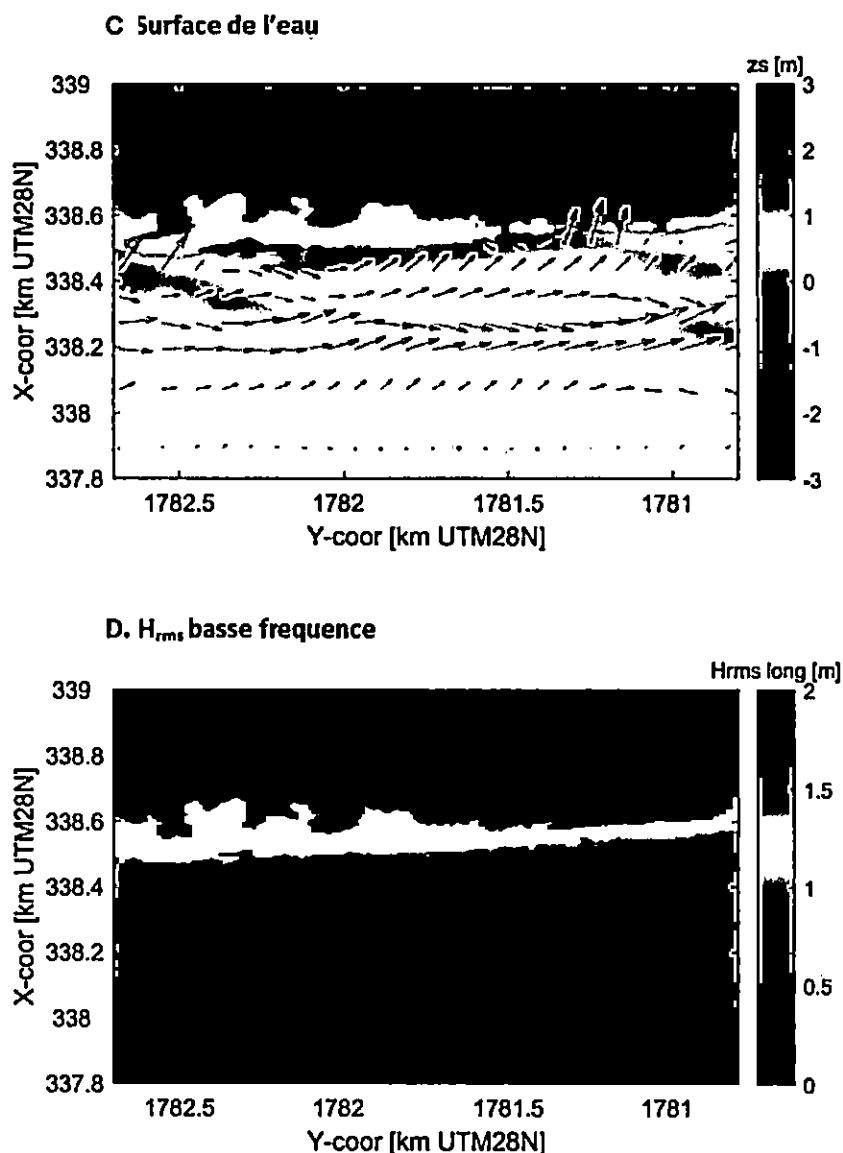


Figure 5-27 : Résultats instantanés du comportement hydrodynamique du modèle XBeach au nord de Saint-Louis après 15 heures de simulation. Les résultats sont présentés pour une tempête avec une période de retour de 100 ans, dans le scénario actuel. La bathymétrie initiale (A), les vagues courtes (périodes typiques entre 2 et 20 s) (B), le champ d'écoulement et l'élévation du niveau d'eau (C), et les ondes infragravitaires (périodes typiques entre 20 et 200 s) (D) juste avant le pic de la tempête.

5.4.3.3 Résultats

Le modèle XBeach est utilisé pour démontrer l'impact de la tempête sur l'étroite section nord de la flèche sableuse. Cela nous permet d'évaluer le risque actuel de brèche de la flèche sableuse. À l'aide de ces informations, nous pouvons évaluer si des mesures d'adaptation directes sont nécessaires pour protéger Saint-Louis des inondations. Il est prévu que la réponse de cette section du cordon littoral au changement climatique ressemble à la réponse de la section au sud (voir le §5.4.2.3).

La Figure 5-28 montre le phénomène d'érosion des dunes en indiquant la bathymétrie et le niveau d'eau maximum pendant trois moments de la tempête pour un transect à travers la flèche sableuse. Au cœur de la tempête (après 15 heures), les vagues atteignent le sommet de la dune (Période de retour = 1 an et 10 ans) ou provoquent une légère inondation (Période de retour = 100 ans). Cela entraîne une érosion du front dunaire supérieur, au cours de laquelle les sédiments sont transportés vers les zones dunaires inférieures, ce qui aplatit le profil côtier.

Une brèche n'est pas formée dans la flèche sableuse pendant les tempêtes simulées, mais on observe une réduction significative de la largeur de la flèche sableuse, qui est plus importante pour les grandes tempêtes (période de retour plus longue). Cela indique que pour chaque tempête la zone devient plus fragile, qui pourrait mener à la formation d'une brèche durant une prochaine tempête – ou pendant une seule tempête si elle est plus forte, ou encore dans le cas d'une durée de plus 30 heures (comme simulé ici).

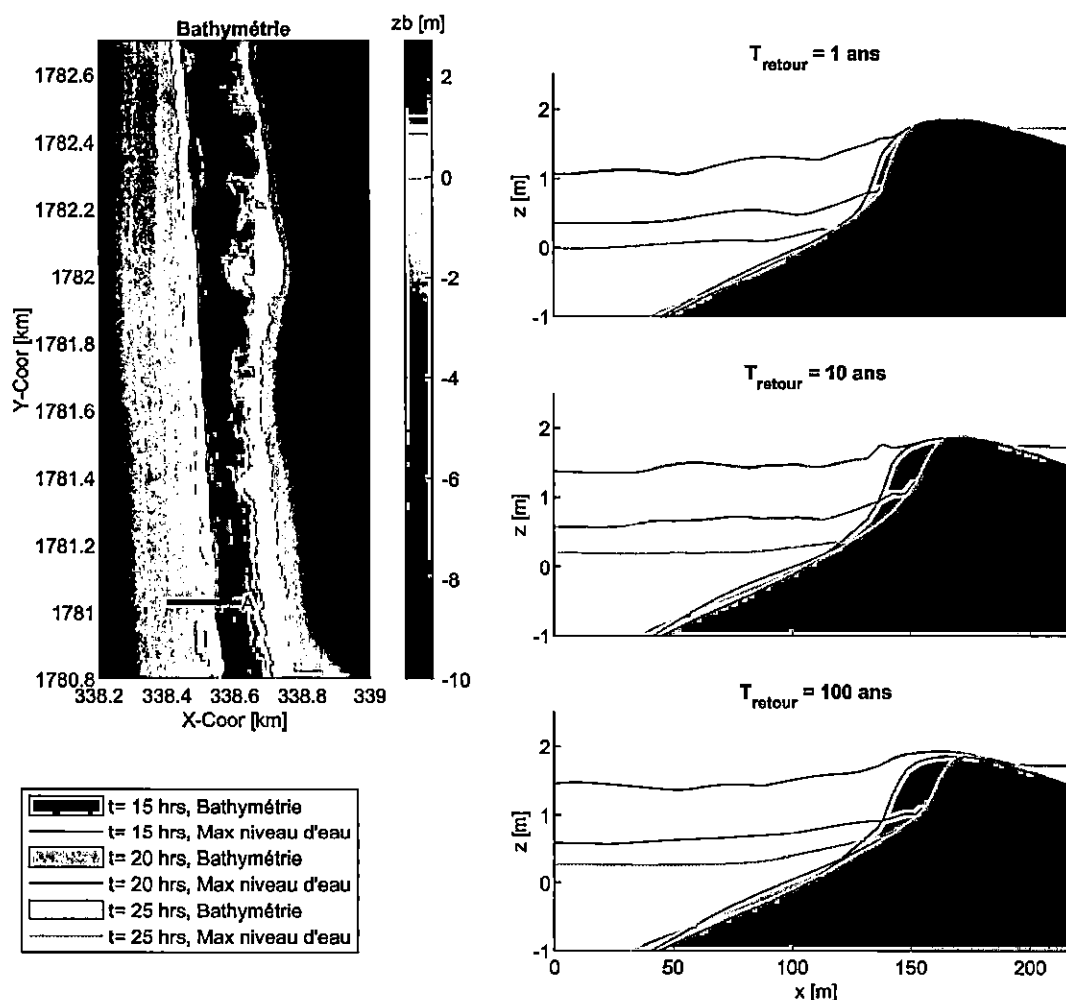


Figure 5-28 : À gauche : Bathymétrie initiale du modèle XBeach au nord de Saint-Louis, indiquant la position du transect. À droite, la bathymétrie et le niveau d'eau maximal sont indiqués pour trois moments pendant la tempête (après 15, 20 et 25 heures). Les résultats sont affichés pour les conditions actuelles avec une tempête de période de retour de 1 ans (en haut), 10 ans (au milieu) et 100 ans (en bas).

Sur la Figure 5-29, des cartes d'inondation sont représentées, sur la Figure 5-31 les changements de niveau de crête de la flèche sableuse et sur la Figure 5-31 les profondeurs d'érosion et de sédimentation.

D'après ces résultats, il est clair que pendant les tempêtes faible (1/1) à énergétiques (1/100), aucune brèche ne se produit dans aucune des tempêtes modélisées, dans la section du cordon littoral au nord de Saint-Louis (Figure 5-30 et Figure 5-31). Par contre, en raison du niveau élevé des eaux du fleuve, une zone d'érosion est apparente dans la zone intérieure de la flèche sableuse, dont les sédiments se déposent plus haut sur la pente. À la suite de l'action des vagues, une partie des sédiments est érodée de la zone externe de la flèche sableuse (voir Figure 5-31).

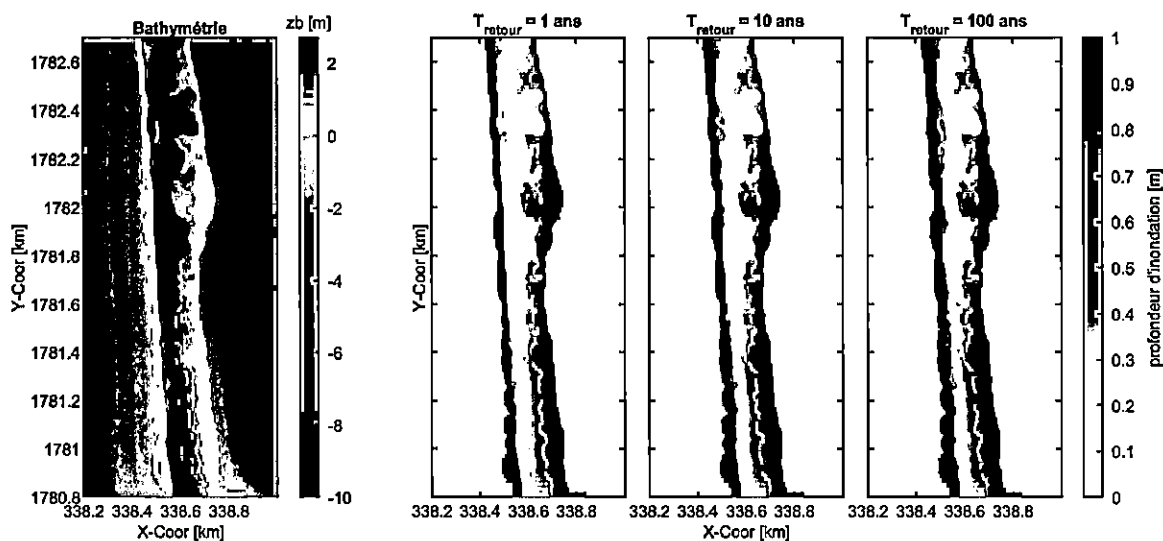


Figure 5-29 : Cartes de la profondeur maximale d'inondation pour le scénario actuel, pour toutes les zones initialement supérieure à la marée haute. Les tempêtes avec une période de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentés pour le modèle XBeach au nord de Saint-Louis.

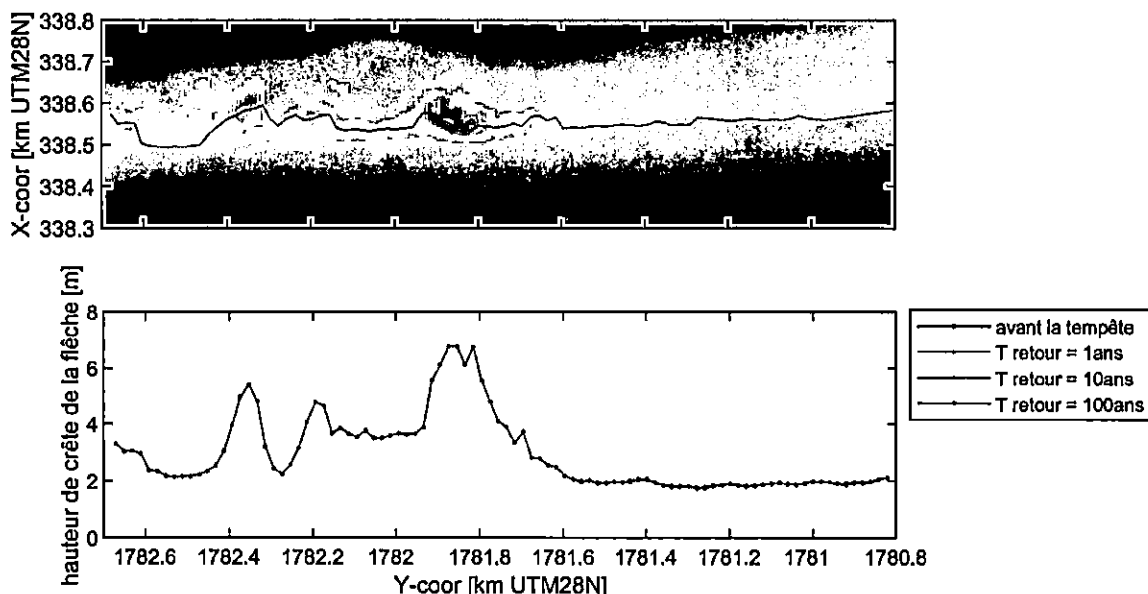


Figure 5-30 : En haut : Bathymétrie initiale et démarcation de la ligne de crête de la flèche sableuse du modèle XBeach au nord de Saint-Louis. En bas : hauteur de la crête des dunes post-tempête modélisée pour les trois périodes de retour de tempête, pour le scénario actuel.

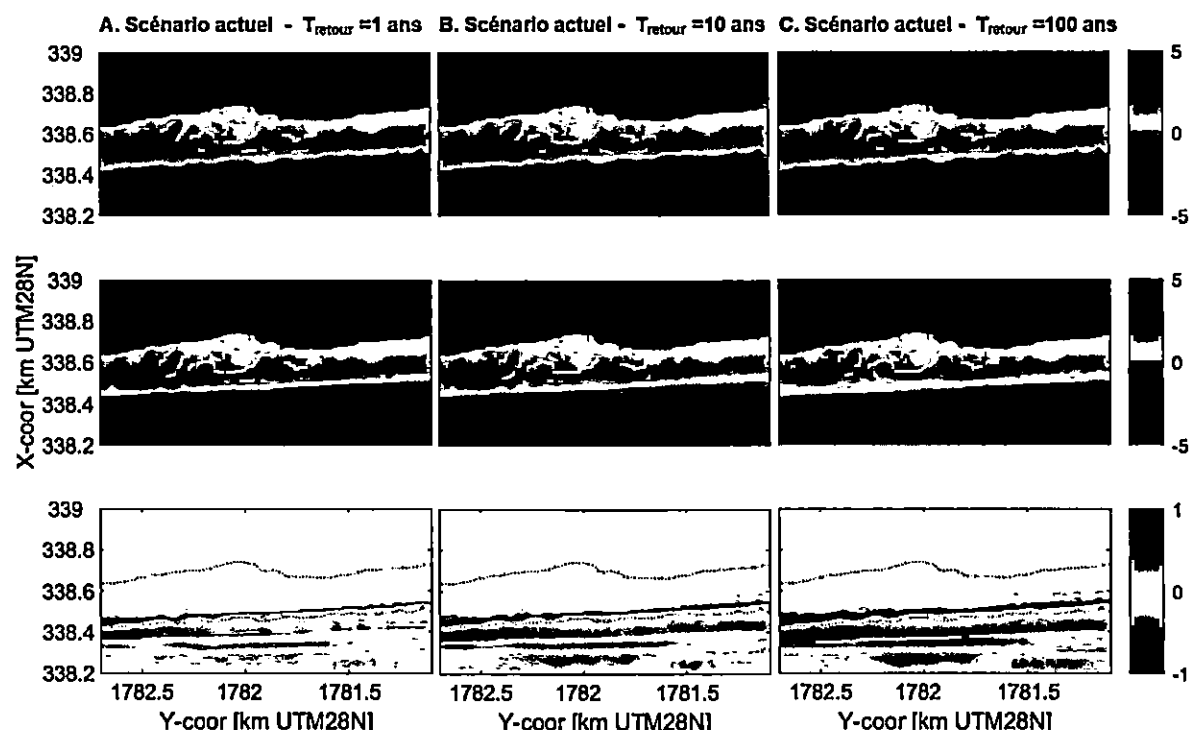


Figure 5-31 : En haut : Bathymétrie initiale du modèle XBeach au nord de Saint-Louis. Milieu : Bathymétrie post-tempête. En bas : zones d'érosion (rouge) - sédimentation (bleu), obtenues en soustrayant la bathymétrie post-tempête de celle pré-tempête. Dans la colonne A, les résultats sont affichés pour le conditions actuelles avec une tempête de période de retour de 1 ans, la colonne B pour les conditions actuelles avec une tempête une fois par 10 ans et la colonne C pour les conditions actuelles avec une tempête une fois par 100 ans.

5.4.3.4 Conclusion sur les risques du côté mer

Dans le scénario actuel, le risque de brèche dans la flèche sableuse semble important à cause de la forte réduction de la largeur de la flèche sableuse lors d'une tempête énergétique (1/10 et 1/100 ans). Cela indique que pour chaque tempête la zone devient plus fragile, ce qui pourrait mener à la formation d'une brèche durant une prochaine tempête – ou pendant une seule tempête si elle est plus forte, ou encore dans le cas d'une durée de plus 30 heures (comme simulé ici). Il convient de noter, qu'avec une élévation du niveau de la mer, le cordon littoral devrait se comporter comme la zone au sud de Saint-Louis, car les hauteurs de crête de la flèche sableuse sont très similaires, et que la formation d'une brèche est attendue pour des niveaux de mer plus élevés. De plus, les vitesses d'écoulement potentiellement importantes dans le fleuve lors d'événements de débit élevé n'ont pas été prises en compte dans le modèle XBeach. Cela pourrait accroître l'érosion au bord du fleuve, diminuer davantage la largeur de la flèche sableuse et augmenter le risque de brèche.

Par conséquent, avec un réel risque de la formation d'une nouvelle brèche, le renforcement de cette section de la flèche sableuse est fortement recommandé.

5.4.4 Au sud de l'embouchure actuelle du fleuve Sénégal

5.4.4.1 Paramétrage

À environ 10 km au sud de l'embouchure du fleuve Sénégal, une section très vulnérable (étroite et basse) est présente, où, dans les images satellites historiques, une forte réduction de la largeur de la flèche sableuse peut être observée au cours des dernières années, de 225 m de large en 2016 à seulement une section de 70 m de large actuellement. La végétation présente il y a quelques années a disparu, et n'est plus capable de fixer le sable. Les images satellites montrent des dépôts de sédiments par les vagues à l'intérieur (côté fleuve) de la flèche sableuse, indiquant une submersion régulière par les vagues à cause de sa faible hauteur. Il est attendu que cette section se brise au cours de la prochaine année ou sinon des prochaines années à venir. Afin d'étudier en plus de détail les risques pour la formation d'une brèche lors d'une tempête pour les conditions de niveau de la mer comme actuellement, des simulations additionnelles ont été exécutées.



Figure 5-32 : Image satellitaire de Google Earth, datant de 18 mars 2020. Section vulnérable juste au sud de l'embouchure du fleuve Sénégal. Pour positionnement se référer à Figure 5-12.

Pour étudier en plus grande échelle les risques d'inondation et d'érosion de la zone adjacente à l'embouchure, un modèle XBeach a déjà été mis en place autour de l'embouchure du fleuve Sénégal et de la flèche sableuse de la Langue de Barbarie, pour étudier l'effet des tempêtes sur celle-ci et sur l'arrière-pays directement au droit de l'embouchure du fleuve (à voir chapitre 7 du rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d)).

Le domaine comprend donc l'embouchure du fleuve, le Gandiolais et une zone importante de la flèche. Les résultats concernant l'inondation du cordon littoral sont présentés au paragraphe 7.1.4 et au chapitre 7 du rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d), et se concentrent ici spécifiquement sur la section faible au sud de l'embouchure.

La grille de calcul couvre 18 km suivant la direction longitudinale et 5,2 km vers le large jusqu'à environ 12 mètres de profondeur. La résolution de la grille suivant la direction longitudinale est de 25 m et, suivant la direction transversale, varie de 8 m près de la flèche à 32 m au large, sur la base d'un critère CFL constant suivant la direction transversale. La configuration du modèle est décrite au paragraphe 3.4 du présent rapport et en plus de détail au chapitre 7 du rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d).

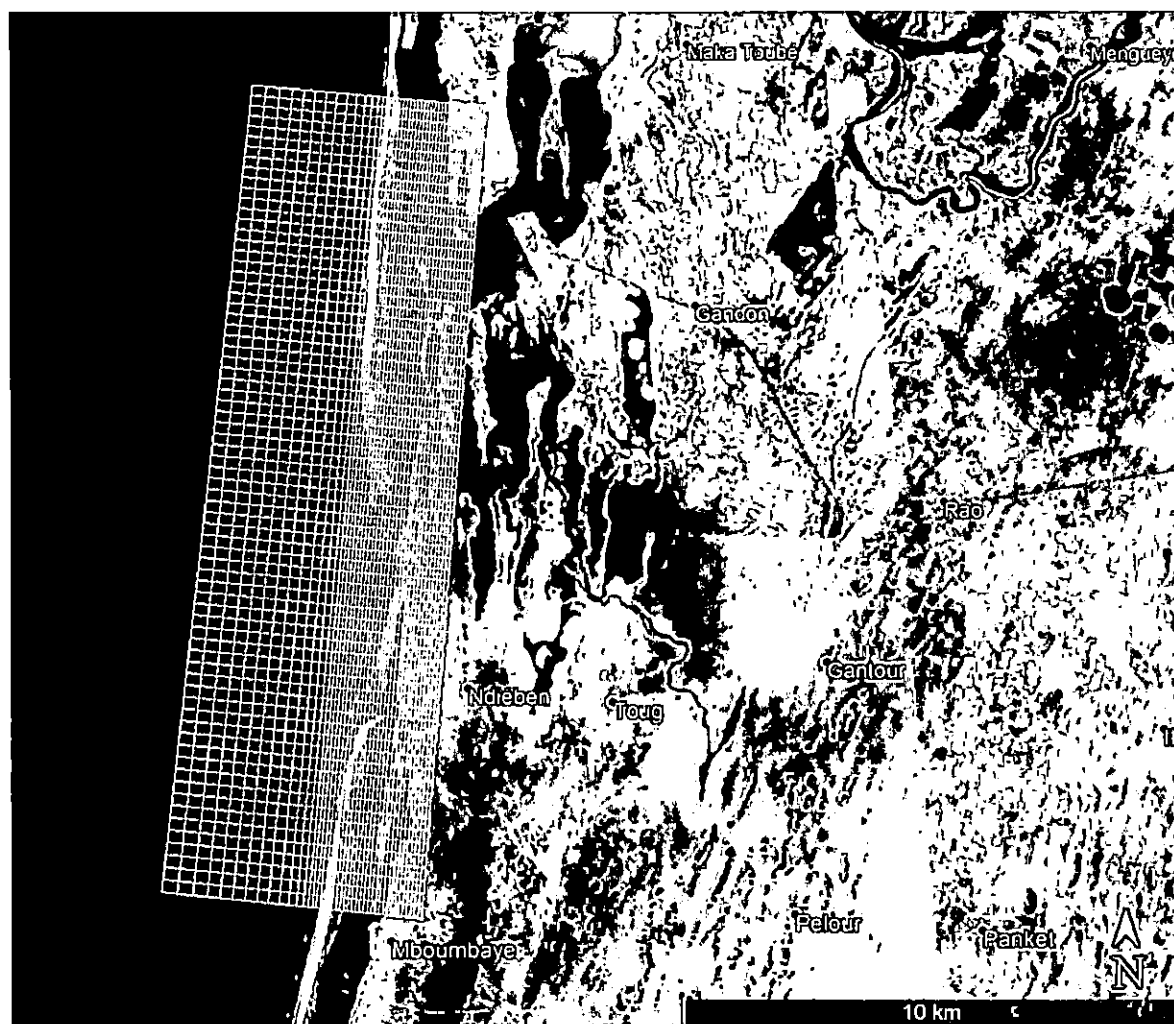


Figure 5-33 : Étendue du domaine de calcul. Pour une impression de la résolution, un quadrillage est proposé avec une seule ligne tracée pour 10 lignes de grille de calcul.

5.4.4.2 Résultats

Pour la période de retour des tempêtes $T_{\text{retour}} = 1$ an, aucune baisse de la hauteur de la crête n'est observée pour les conditions actuelles (Figure 5-34). Au contraire, la situation se dégrade considérablement pour les tempêtes avec des périodes de retour de 1/10 et 1/100 ans. Le niveau de la crête est réduit considérablement par de nombreuses brèches.

De grands dépôts des sédiments par les vagues (comme observés dans les images satellites) et la rupture de la flèche sableuse sont également clairement visibles ici (Figure 5-34 et Figure 5-35). Tous les points bas de la flèche sableuse sont submergés par les vagues et des brèches se produisent.

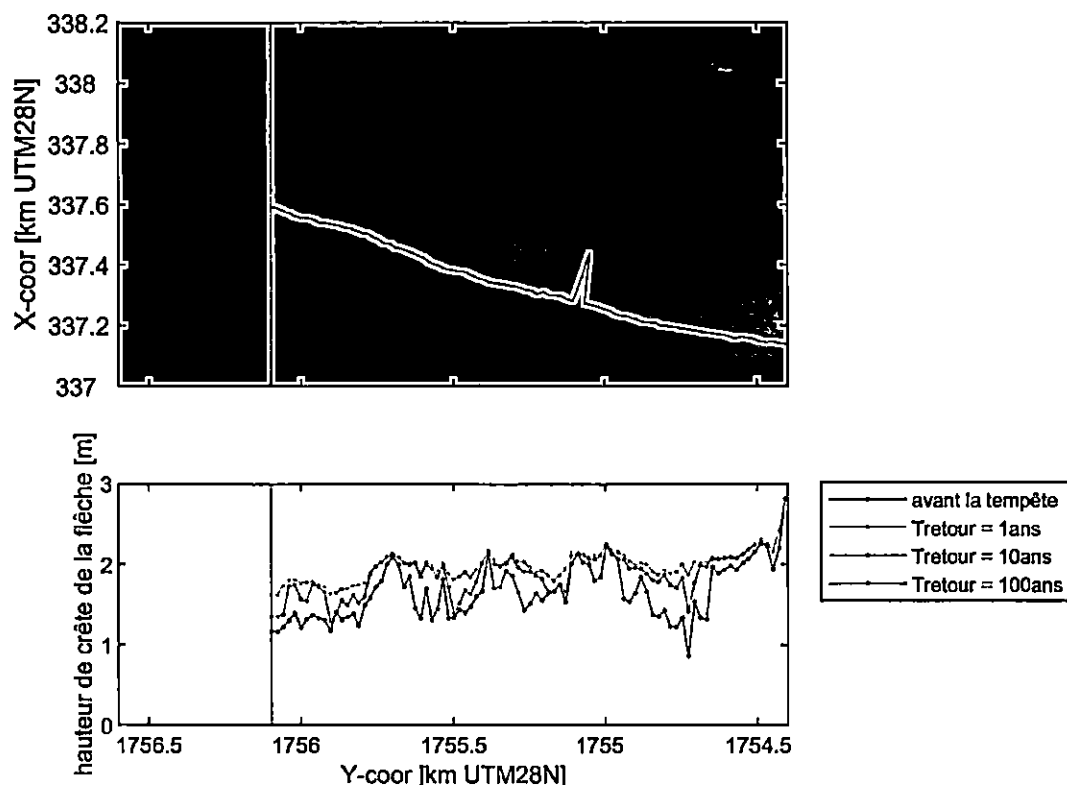


Figure 5-34: En haut : topographie initiale et démarcation de la ligne de crête de la flèche sableuse au sud de l'embouchure. En bas : hauteur de la crête post-tempête modélisée pour 3 périodes de retour de tempête, pour les conditions actuelles.

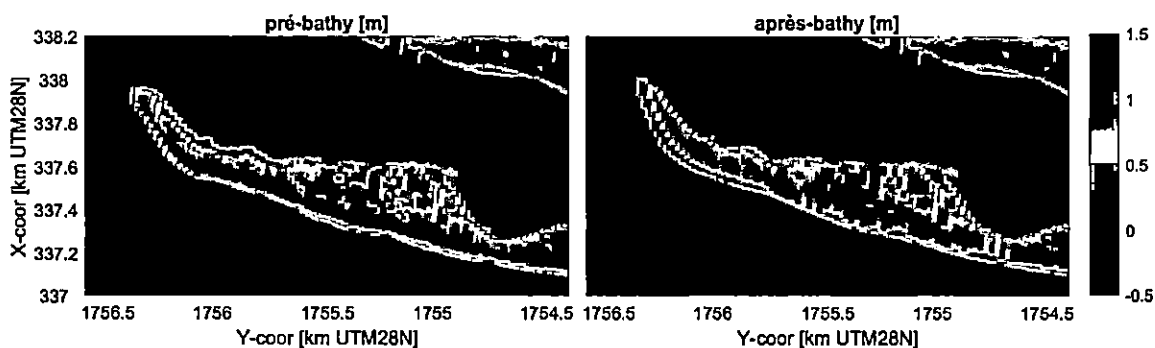


Figure 5-35: Topographie avant et après la tempête pour la section de la flèche sableuse sud de l'embouchure, illustrant les résultats pour la tempête avec un période de retour de 100 ans.

5.4.4.3 Conclusions risques du côté mer

Une brèche semble donc imminente pour cette faible section au sud de l'embouchure du fleuve, ce qui entraînera des changements morphologiques de la flèche sableuse sur une plus grande zone. La formation d'une brèche, dans cette partie de la flèche sableuse n'aura probablement pas immédiatement de grands effets sur les villages du Gandiolais, qui se trouvent plus au sud, mais à plus long terme, la migration de l'embouchure du fleuve vers le sud pourrait imposer des forts taux d'érosion et/ou d'accrétion locaux. Plus d'informations sur les changements morphologiques à plus long terme peuvent être trouvées dans les paragraphes 7.1.1 et 8.1.1.

5.4.5 Conclusions générales sur les risques de formation des nouvelles brèches

Les simulations avec le modèle XBeach montrent que les risques d'une formation d'une nouvelle brèche dans les zones faibles du cordon littoral quelques kilomètres au nord et sud de Saint-Louis sont considérables. Notamment en considérant un risque d'une tempête plus forte que testé dans la situation actuelle, et avec l'élévation du niveau de la mer, les risques augmentent considérablement.

À noter que **les fortes crues du fleuve ont déjà débordé par-dessus le cordon littoral au droit de ces points bas** (rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d)). Au vu des impacts désastreux pour la ville de Saint-Louis et les villages du Gandiolais si une nouvelle brèche se formait, nous insistons sur le besoin de mener **des actions sur le cordon littoral en territoire mauritanien pour éviter la formation d'une nouvelle embouchure du fleuve au nord de Saint-Louis, et également dans la zone au sud de Saint-Louis :**

- Soit en retenant des aménagements permettant de ne pas dépasser la cote actuelle du cordon littoral en amont et ou sud de Saint-Louis.
- Soit en renforçant l'altitude du cordon littoral de manière à éviter le risque de brèche (par rechargement du sable et / ou plantation de végétation et pièges à sable). Les renforcements du cordon littoral augmenteront le niveau du fleuve lors d'une forte crue près de Saint-Louis (paragraphe 7.2), car une surverse de l'eau fluviale plus en amont ne serait plus possible. Des mesures complémentaires doivent donc être mises en place (paragraphe 7.2).

Il convient de noter également que les simulations ont été exécutées avec une résolution de la grille de calcul de 8 m x 10 m au niveau de la ville de Saint-Louis pour couvrir une zone relativement étendue. En raison de la résolution choisie, les bâtiments et les rues ne sont pas représentés explicitement, et de manière suffisamment détaillée pour étudier la propagation des inondations dans la ville – ce qui probablement sous-estime les impacts des tempêtes sur la ville. Dans le projet SERRP, les inondations dans les quartiers du front de mer de Saint-Louis seront étudiées plus en détail. Lors du projet SERRP une nouvelle mesure de la bathymétrie sera obtenue en plus haute résolution que celle du projet PROGEP afin de mieux représenter la transformation des vagues dans les modèles numériques, qui servent à évaluer les solutions d'aménagement. En utilisant cette approche plus détaillée, des protections adéquate et durable du front de mer de la ville de Saint-Louis seront proposées contre les inondations des tempêtes.

6. Impacts des projets en cours

6.1 Projet Tortue

Le Projet Tortue prévoit la construction d'un brise-lame d'accostage d'une longueur d'environ 1 km situé 10 km à l'ouest et 4 km au nord de Saint-Louis, pour accueillir l'usine de liquéfaction flottante et assurer l'accostage des méthaniers (Figure 6-1). Il est attendu que ce brise-lame bloquera localement la propagation des vagues depuis le large vers la côte, et ainsi changera les courants le long la côte qui sont induits par les variations (gradients) dans le déferlement des vagues. En changeant localement les courants, et par conséquent leur capacité de transporter des sédiments le long la côte, cela mènera plausiblement à des risques d'érosion dans la zone d'étude.

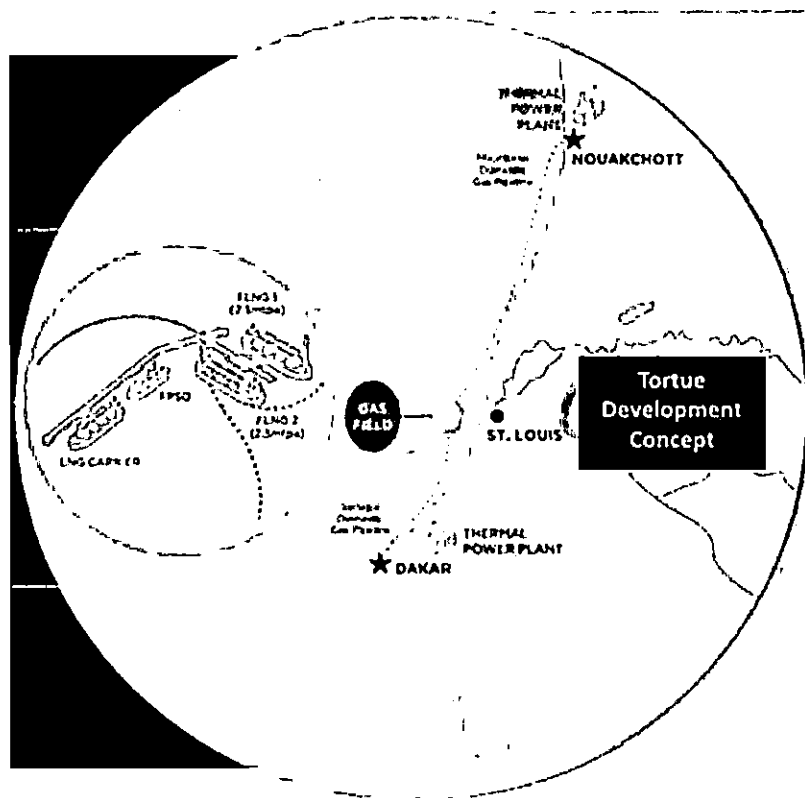


Figure 6-1 : Positionnement des FLNG (Floating Liquefied Natural Gas) et la brise-lame d'accostage sur la frontière entre le Sénégal et la Mauritanie. Source : Kosmos Energy

Pour étudier l'impact de ce brise-lame sur la zone d'étude, le modèle ShorelineS a été mis en œuvre (pour plus de détail sur le modèle se référer au paragraphe 3.2). Dans le modèle, le brise-lame est considéré, de façon simple, comme un obstacle qui crée une ombre de vagues dans la direction de propagation. Le modèle ShorelineS utilise une formule CERC simplifiée pour le calcul du transport sédimentaire, ce transport étant donc fonction uniquement de l'angle et de la hauteur des vagues. Une direction moyenne des vagues de 300 degrés a été appliquée, ce qui correspond à peu près aux conditions au contour de profondeur de 10 m.

Le Figure 6-2 montre l'effet du la brise-lame sur la hauteur et direction moyenne des vagues qui propagent vers la côte. En raison de la diffraction des vagues autour de la structure (diffraction est le processus par lequel les vagues se propagent dans la zone sous le vent derrière les structures par transmission d'énergie latéralement le long des crêtes des ondes), la zone d'ombre contient encore de l'énergie des vagues, bien que plus faible. La hauteur des vagues est réduite en moyenne d'environ 5% près de la côte.

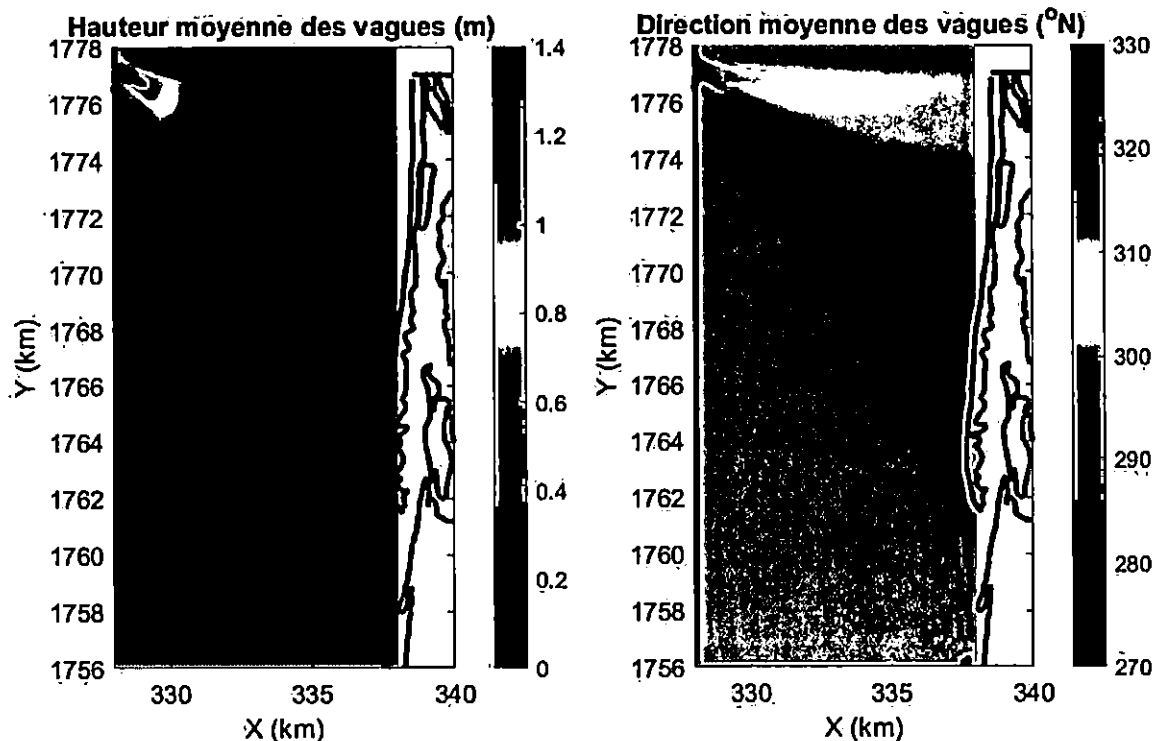


Figure 6-2 : Effet du projet Tortue sur la hauteur moyenne des vagues (sans réfraction) ; panneau de gauche et la direction moyenne des vagues.

Parce que les vagues varient dans leur direction, l'effet de cet ombre est assez diffus et mène à une réduction du transport le long de la côte (estimé en condition normale à $\sim 1000 \text{ m}^3/\text{an}$) sur environ 17 km, d'environ 6-7% (Figure 6-3). La Figure 6-3 montre comment le transport littoral moyen (le long la côte) est modifié à cause de la structure. La réduction de la capacité de transport diminue peu même après 40 ans – ce qui indique que l'effet de la structure sera présent sur le long-terme (au minimum quelques décennies).

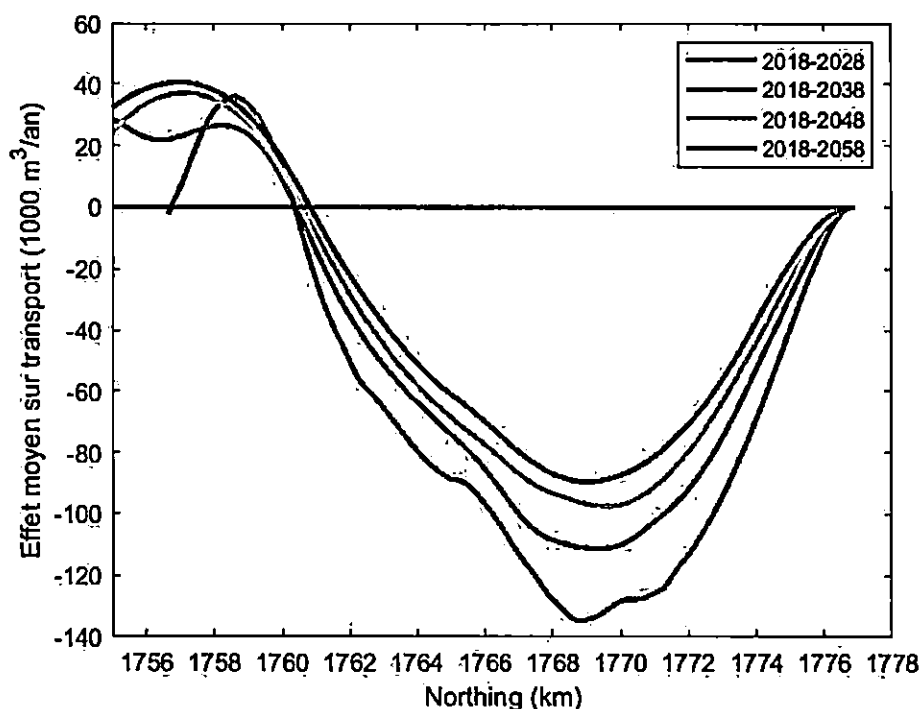


Figure 6-3 : Effet du brise-lame envisagé dans le projet Tortue sur le transport moyenné sur différentes périodes.

L'effet du changement de la capacité de transport sur le développement du trait de côte sur 40 ans est visualisé dans les Figure 6-4 et Figure 6-5. L'accrétion de sédiments est prédite d'être maximale à ~1774 km N, avec jusqu'à 80 m d'accrétion en 40 ans. La zone d'érosion est prédite d'être entre 1757 km N et 1769 km N avec jusqu'à 80 m de recul de la trait de côte en 40 ans.

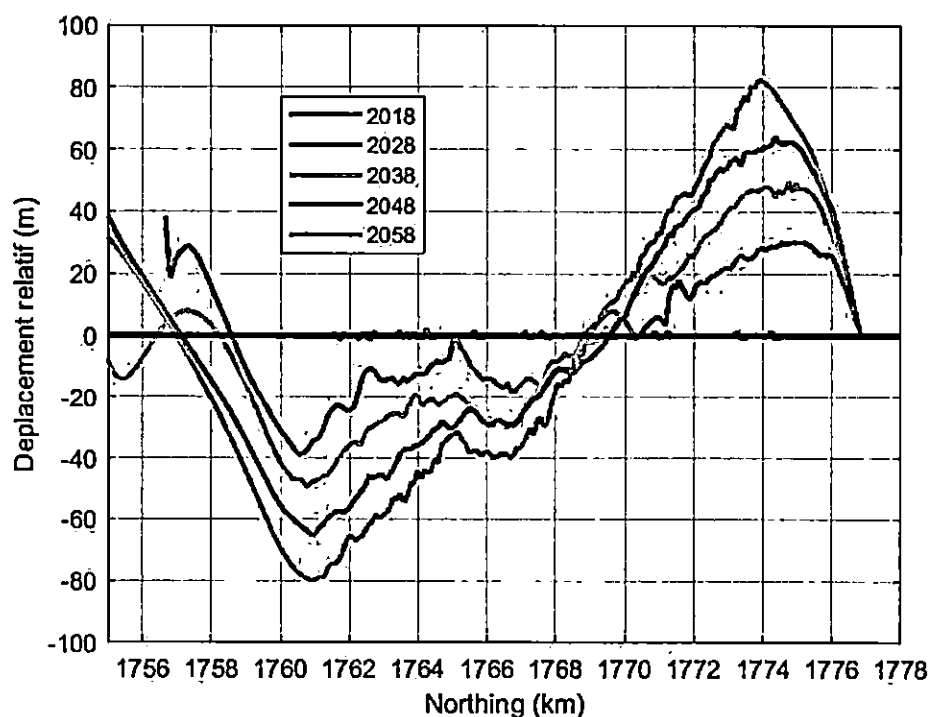


Figure 6-4 : Effet du brise-lame envisagé dans le projet Tortue sur l'accrétion et l'érosion côtière pour les prochaines décennies.

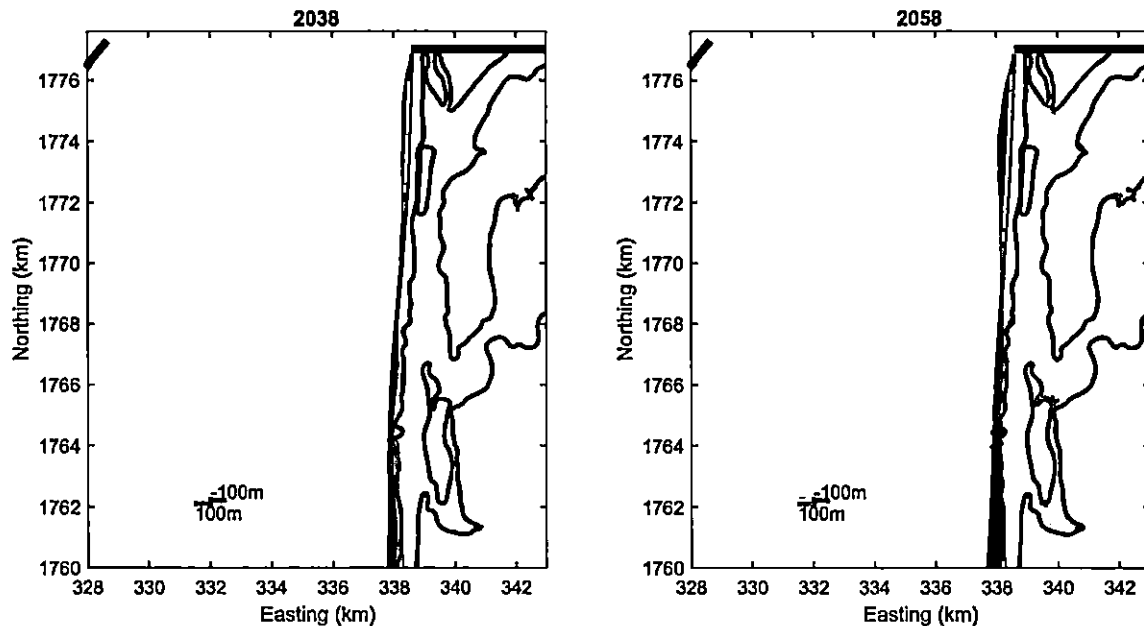


Figure 6-5 : Effet du brise-lame sur l'accrétion et l'érosion côtière prédit par ShorelineS (sans prise en compte de la réfraction), après 20 et 40 ans.

Il est important de noter que le modèle ShorelineS actuellement ne représente pas le processus physique de réfraction des vagues à cause de la profondeur. La réfraction en profondeur est le changement de direction de la propagation des vagues lorsque les crêtes de vagues se déplacent selon un angle par rapport aux contours de la profondeur en eau peu profonde. La réfraction est causée par le fait que les vagues se propagent plus lentement en eau peu profonde qu'en eau profonde. Il en résulte que les crêtes de vagues ont tendance à s'aligner sur les contours de la profondeur.

Actuellement le modèle ShorelineS est forcé avec une direction moyenne des vagues de 300 degrés extraite du modèle de vagues SWAN (se référer à rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d), Chapitre 3), à une profondeur de 10 m. Parce que le brise-lame sera construit à 30 m de profondeur environ, la réfraction naturelle des vagues sera perturbée ce qui changera les caractéristiques des vagues près de la côte (comparer la Figure 6-2 avec la Figure 6-6). La direction moyenne des vagues est de 320 degrés à 30 m de profondeur et à un angle d'épandage de +/- 30 degrés. En général, l'énergie des vagues (liée à leur hauteur) sera réduite sur une partie plus au sud sans prendre compte la réfraction (comparer la Figure 6-2 avec la Figure 6-6), et sera également plus fortement réduite, d'environ 8% (5% sans réfraction).

Puisqu'actuellement le modèle ShorelineS ne représente pas la réfraction, il peut être attendu que les effets prédits pour la zone d'intérêt, seront en fait présent plus au sud et plus forts qu'initialement prédit par le modèle. Dans la Figure 6-7 les effets de la réfraction sur la hauteur et la direction des vagues est visualisé pour un transect parallèle à la côte, en eau peu profonde, avec également un effet estimé sur le transport littoral. Les effets du brise-lame en lui-même suivent la même tendance, mais un décalage de quelques kilomètres vers le sud peut être observé en prenant en compte la réfraction. Les vagues diminueront encore plus en hauteur (~3%, Figure 6-7), menant à une réduction supplémentaire du transport littoral (~3%). Les effets du brise-lame (érosion et accrétion) comme prédit par ShorelineS (sans prenant compte de réfraction) doivent donc être interprétés en gardant à l'esprit ce décalage de quelques kilomètres vers le sud, et avec des taux d'érosion et d'accrétion plus prononcés.

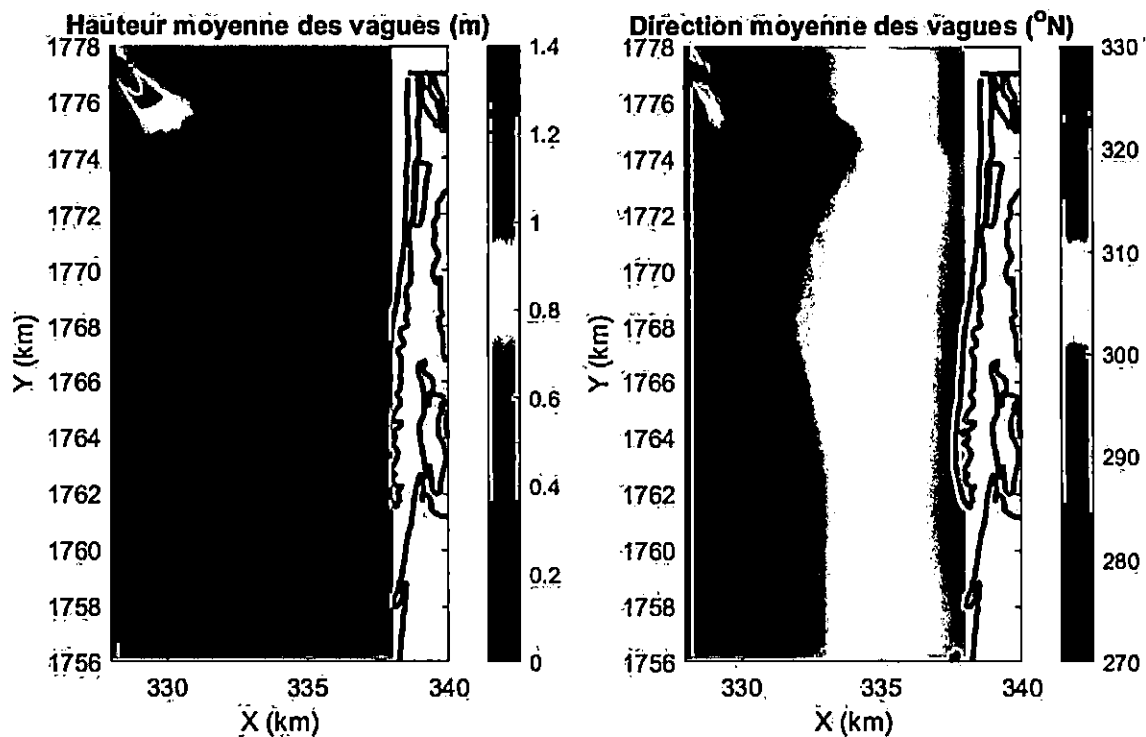


Figure 6-6 : Effet du projet Tortue sur la hauteur moyenne des vagues (à gauche) et la direction moyenne (à droite) en prenant en compte réfraction.

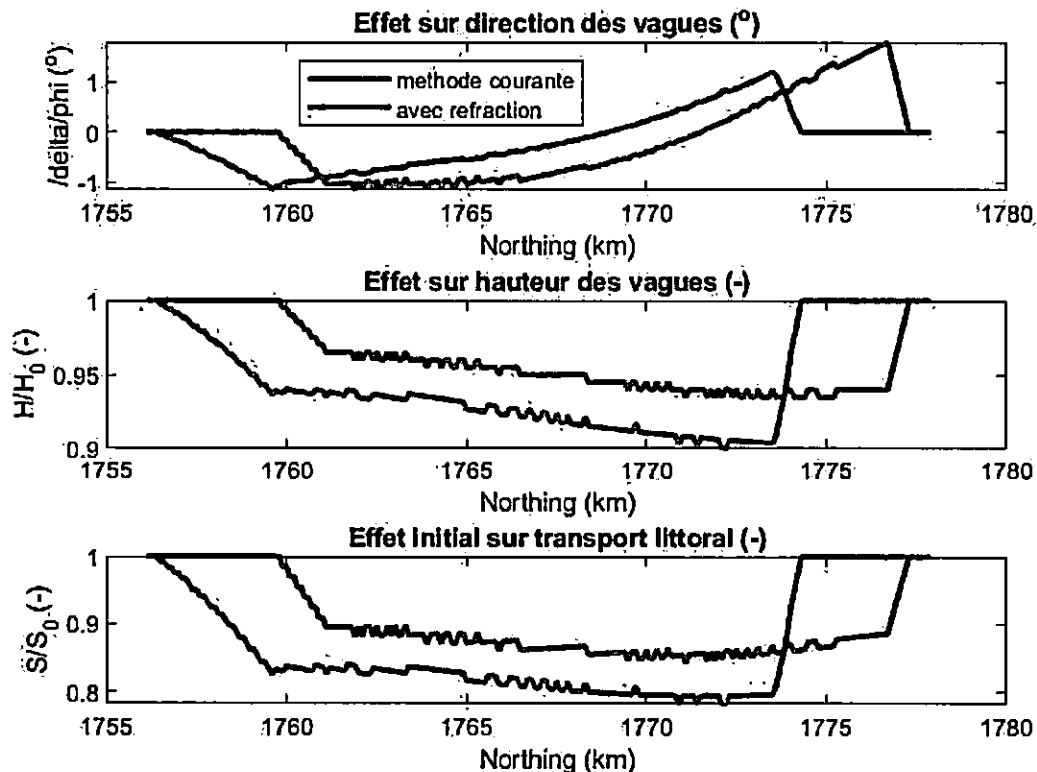


Figure 6-7 : Différence entre la méthode appliquée par ShorelineS – sans réfraction (lignes bleues) et méthode avec réfraction et shoaling (lignes rouges).

En général, sur 40 ans une différence d'érosion ou sédimentation de minimum 80 m est prédite par ShorelineS (sans réfraction), ce qui rendra plus faible la Langue de Barbarie entre Saint-Louis et l'embouchure. Cette tendance restera faible jusqu'en 2058, et se poursuivra donc après cette date. La tendance calculée par ShorelineS (Figure 6-4 et Figure 6-5) correspond globalement aux résultats de l'étude d'évaluation du projet Tortue (EIES), même s'il reste des dissemblances (Figure 6-8).

Dans le rapport EIES du projet sont prédits :

- Une sédimentation en face de Saint-Louis de 50 m en dix ans était prévue ; ShorelineS prévoit plutôt une accrétion de l'ordre du 25 m en dix ans
- Un recul du trait de côte de l'ordre de 15 m en dix ans était prévu pour la zone au sud du km 1768 N ; ShorelineS prévoit un recul jusqu'à 40 m en dix ans, et sur une zone bien plus large – jusqu'à ~1758 km N.

Des cartes détaillées se trouvent en annexe 2. Bien que l'effet de l'ouvrage puisse être positif pour Saint-Louis, l'effet négatif (d'érosion) devrait être compensé par l'initiateur du projet de gaz, par exemple par rechargement de sable sur les plages affectées.

Dans l'étude SERRP, l'impact du brise-lames sur la zone d'étude sera étudié plus en détail. Le modèle de vague détaillé qui a été mis en place lors de l'étude PROGEF (se référer à rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d), Chapitre 2), sera adapté pour valider les impacts plus en détail.

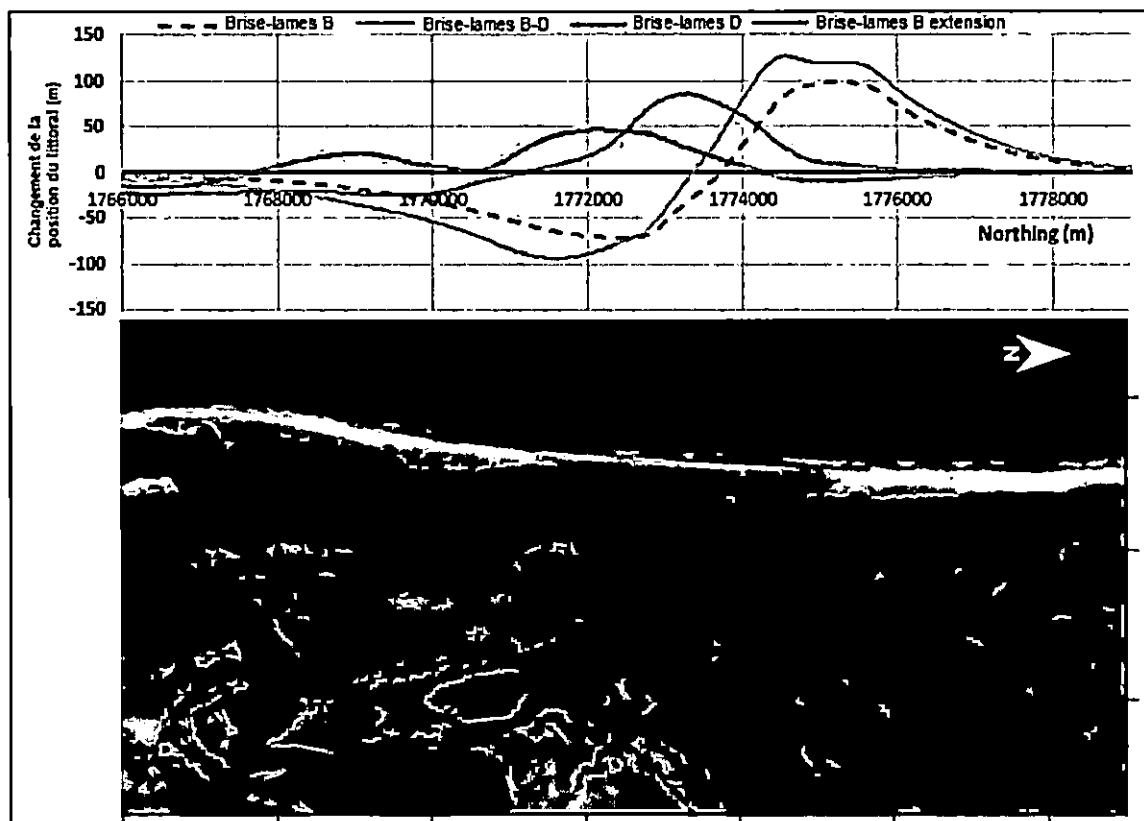


Figure 6-8 : Résultats de l'analyse du projet Tortue de l'Étude d'impact environnemental et social du projet de production de gaz Grand Tortue / Ahmeyin – EIES page 828 – Annexe I-3 paragraphe 3.2.5. Prévission de l'érosion et de la sédimentation 10 ans après la construction. La ligne rouge représente l'emplacement du brise-lames à 4 km de la côte, la ligne verte à 7 km de la côte, la ligne rose à 10 km de la côte – ce qui est retenu comme configuration finale, et la ligne grise représente le cas du brise-lame avec extension à 4 km de la côte. La ligne noire des abscisses représente le cas sans brise-lames.

6.2 Protection contre l'érosion et l'inondation côtière à Saint-Louis

Dans le cadre du projet SERRP, des options pour un aménagement durable contre l'érosion côtière à Saint-Louis seront étudiées.

Jusqu'alors, les efforts de l'équipe se sont concentrés sur la simulation du comportement de la Langue de Barbarie et de l'embouchure, et sur l'érosion de la côte du Gandiolais. Il est important de noter que les actions locales face à Saint-Louis pourraient avoir un fort impact sur la stabilité du cordon littoral dans son ensemble.

Actuellement, une mesure d'urgence de protection existe déjà sous la forme d'un cordon en gabions mis en place en 2017/2018 à la seule initiative de la commune, qui malheureusement s'est déjà révélé ne pas être une solution durable. Un nouveau projet, le Projet de Protection Côtière de Saint-Louis (PPCS) consistera à réaliser en urgence une protection frontale le long d'une partie de la zone urbanisée (environ 2 km). Ce projet vise donc la protection à court terme de la zone urbanisée. La réalisation de ces travaux va démarrer.

Le modèle ShorelineS a été utilisé pour évaluer l'influence d'une telle digue sur la stabilité du cordon littoral plus au sud, en lien avec le blocage partiel du transport de sédiment le long de la côte pouvant entraîner une érosion en aval de la digue.

Pour le moment, sans plus d'information disponible sur la configuration et le positionnement exact de la digue, la représentation d'une telle digue dans le modèle ShorelineS ne peut qu'être approximative.

Nous tentons d'évaluer l'effet d'une digue sur le transport le long de la côte, en estimant que celui-ci dépend de la distance entre le pied de la digue et le trait de côte : quand cette distance est très grande, il n'y aura pas d'effet, mais quand la plage disparaît et que cette distance rétrécit, le transport tendra vers zéro.

Etant donnée l'approche de modélisation très simplifiée de ShorelineS, on considère que le transport varie linéairement entre 0% et 100% quand la distance entre la digue et le trait de côte varie entre 0 m et une distance *reduclength*, prise à 100 m pour le moment.

Avant d'évaluer l'effet d'une telle digue, il est important de noter que dans le cas où la côte est en accrétion, l'effet de la digue sera nul, sauf si la digue est construite très près de la plage.

Dans le modèle ShorelineS, en raison de la légère courbature du trait de côte en face de Saint-Louis, la zone est en accrétion. Comme les taux d'érosion sur place ne sont pas connus, ni les causes (pertes par débordement, minage, vers le large, à cause des variations de bathymétrie, ...) une perte additionnelle de 4 m/an a été supposée, qui mène à une situation légèrement érosive, comme simulation de référence.

A partir de cette simulation de base nous avons exécuté deux simulations :

- Une simulation avec la digue située à 70 m du trait de côte,
- Une simulation avec la digue à 50 m du trait de côte.

Les résultats sont présentés dans les Figure 6-9 et Figure 6-10. Les effets sont très différents :

- Dans le premier cas, le transport est encore assez fort pour nourrir la côte au sud sans créer une brèche dans les décennies qui suivent. Au nord, le transport remplit graduellement la plage en face de la digue. Par contre, plus en aval de la digue, il y a une érosion considérable tout le long de la Langue de Barbarie, qui, avec le recul du trait de côte dans le temps, combiné à une tempête ou à un fort débit du fleuve, pourrait mettre la Langue de Barbarie dans un état critique.
- Quand la largeur de la plage devant la digue est trop faible, comme dans le deuxième exemple, une forte érosion en aval de la digue est créée, qui mène à une distance encore plus faible entre la digue et le trait de côte, qui à son tour réduit davantage le transport. Rapidement, une situation grave se développe où une brèche peut se produire.

Il faut noter que ces simulations donnent une représentation assez crue de l'effet potentiel d'une digue sur le transport le long de la côte. Deuxièmement, les causes de l'érosion sur place ne sont pas bien connues ; si l'érosion était plus forte que dans cette simulation, le deuxième cas pourrait se produire malgré un positionnement reculé de la digue.

Les effets des ouvrages, comme la digue envisagée dans le cadre du projet PPCS, des épis ou les rechargements de sable, **pourraient avoir un fort impact sur la stabilité du cordon littoral en aval des renforcements.**

Avec la nouvelle bathymétrie en haute résolution obtenue dans le cadre du projet SERRP, des modèles numériques plus détaillés et concentrés sur la ville de Saint-Louis (XBeach, Delft3D et Unibest-CL+) seront mis en place afin d'étudier les sources de l'érosion plus en détail, ainsi que le développement d'une solution durable prenant en compte le projet PPCS.

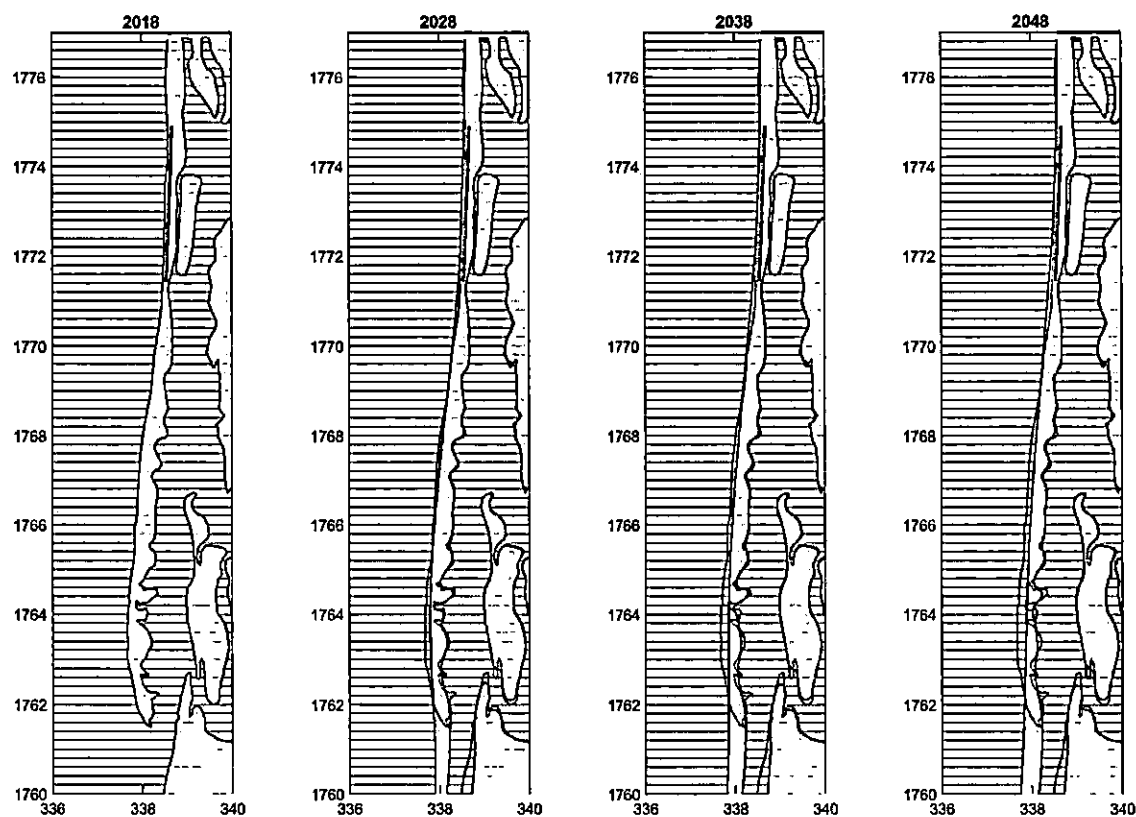


Figure 6-9 : Effet d'une digue à une distance permettant le passage de 70% du transport littoral

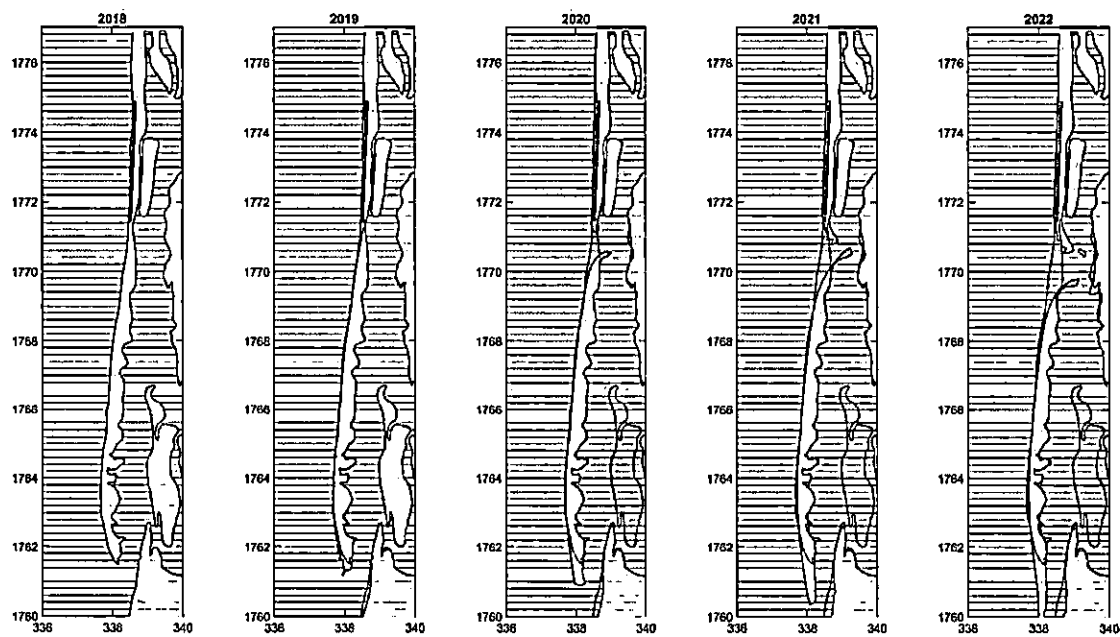


Figure 6-10 : Effet d'une digue à une distance permettant le passage de 50% du transport littoral

6.3 Port de N'Diogo

Le gouvernement mauritanien a annoncé avoir initié la construction d'un nouveau port militaire et commercial dans la commune de N'Diogo, commune frontalière de Saint-Louis avec laquelle elle partage le fleuve Sénégal, et distante de seulement 15 km. La présence d'un tel port pourrait en théorie créer une érosion considérable en aval de cette structure, qui pourrait influencer la stabilité de la flèche sableuse, et par la même, la ville de Saint-Louis.

Du fait de la confidentialité du projet, peu d'informations sont actuellement librement disponibles. Les dernières images satellites disponibles sur Google Earth montrent que le port de N'Diogo est en cours de développement à environ 40 km au nord de Saint-Louis. La construction d'un brise-lame au nord du port a commencé en 2018 et s'est poursuivie en 2019, ses effets actuels sur la côte sont visibles en Figure 6-11. Sur les photos datant de novembre 2018 et septembre 2019, une accumulation de sédiments au nord du brise-lames est observée tandis que l'érosion se produit au sud du brise-lames – comme attendu du fait du blocage du transport de sédiments le long de la côte qui est ici dirigé vers le sud.

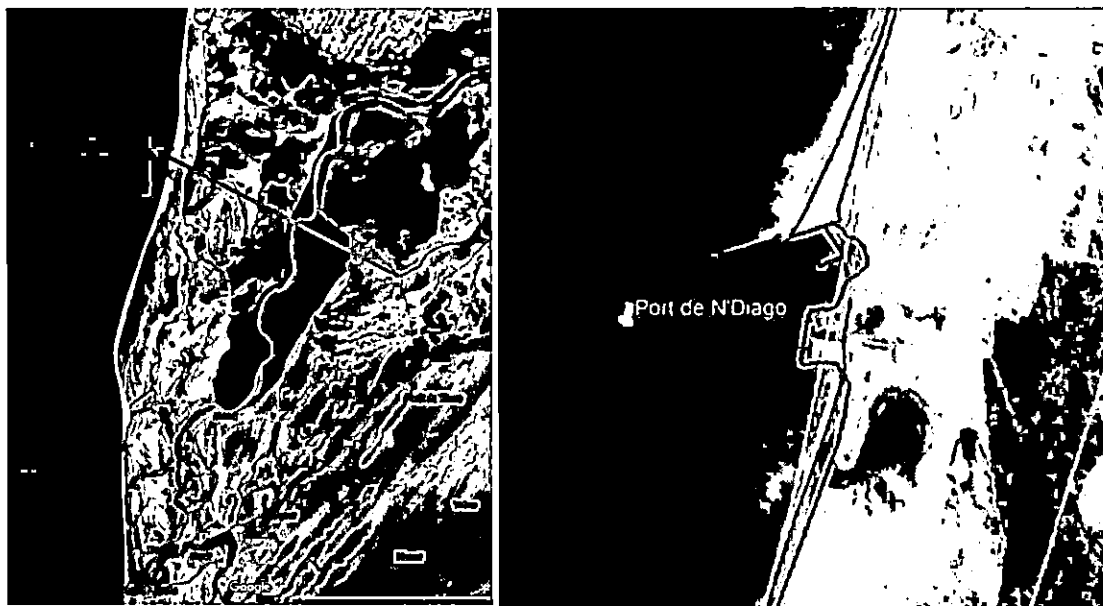


Figure 6-11 : Image Google Earth situant le développement portuaire de N'Diogo. Les lignes colorées indiquent l'évolution du trait de côte et sont datées : 10-2017 (jaune), 04-2018 (orange), 11-2018 (rouge) et 09-2019 (violet).

L'effet général d'un port avec brise-lames sur le transport sédimentaire le long de la côte est esquissé en Figure 6-12. Comme les brise-lames bloquent le transport des sédiments, ceux-ci s'accumuleront en amont du port, ce qui formera une large plage. Les brise-lames abritent également la côte adjacente en dérive des vagues, entraînant un transport de sédiments très limité voire négligeable le long de la côte dans cette zone. Le transport de sédiments reprend après environ 1 à 2 longueurs de brise-lames dans le sens de la dérive descendante, entraînant une zone d'érosion. Selon la longueur des brise-lames, il peut y avoir une certaine sédimentation dans le port. À la pointe des brise-lames, des affouillements se développeront. Le taux d'expansion de la zone d'érosion diminuera avec le temps, au fur et à mesure que les volumes d'érosion nécessaires à l'expansion future de la zone d'érosion deviendront plus importants. Également, en aval des brise-lames, les vitesses d'écoulement diminuent et des tourbillons avec de faibles débits de recirculation se développent. Pendant la phase de marée, l'eau et les

sédiments entrent et sortent du port. Ces flux sont relativement faibles en raison de la faible superficie du port.

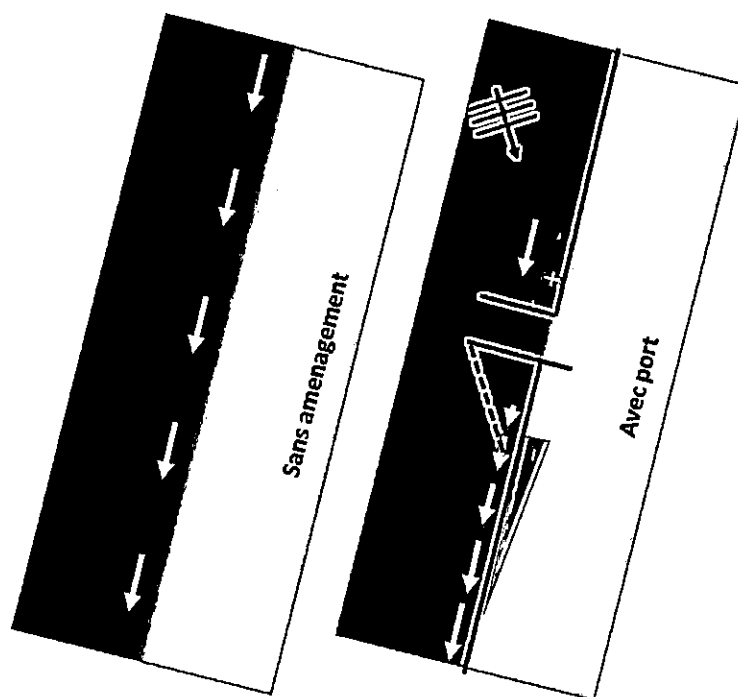


Figure 6-12 : Un exemple du transport sédimentaire le long de la côte dans la zone d'intérêt, (à gauche) sans aménagement et (à droite) avec un port avec des brise-lames.

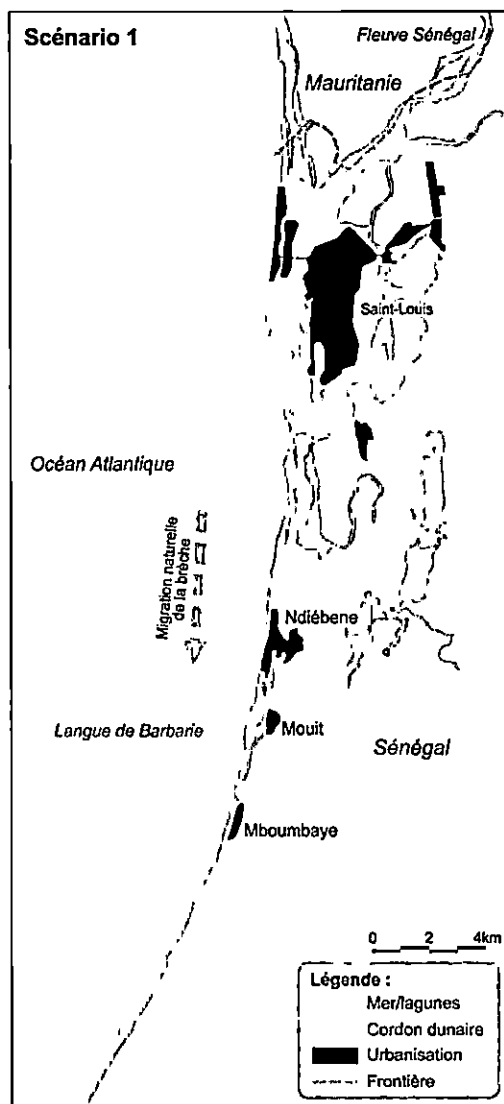
À plus long terme, certains contournements de sédiments peuvent se produire car la plage continue de croître, cela rend les brise-lames moins efficaces pour bloquer le transport des sédiments. Le contournement des sédiments peut également se produire sous la forme de hauts fonds en migration. La longueur d'érosion dépend du taux net de transport côtier, de la hauteur du profil actif et de la forme de la zone d'érosion.

L'hypothèse actuelle est que, dans les décennies à venir et dans sa configuration actuelle, le port de N'Diogo n'affectera pas la zone côtière de Saint-Louis ou la zone de l'embouchure du fleuve Sénégal. Sur le plus long terme, en fonction d'un éventuel blocage total du transport du sédiment le long de la côte, la zone touchée par l'érosion pourrait se propager vers le sud et toucher Saint-Louis. De plus, si le brise-lames du port est prolongé ou si le gouvernement mauritanien vient à prendre des mesures locales/régionales pour limiter l'érosion, la zone touchée par l'érosion se propagera (plus vite) au sud et pourrait avoir un impact à Saint-Louis.

Sur la base des informations qui pourront être fournies par l'ADM et ses partenaires institutionnels, le port de N'Diogo sera pris en compte dans le cadre de l'étude SERRP, par la mobilisation du modèle Unibest-CL+. En particulier les développements morphologiques futurs et à long terme concernant Saint-Louis seront étudiés.

7.Scénario 1 : Pas d'intervention sur la brèche

7.1 Le scénario de base



Aucune action spécifique n'est menée sur la brèche. Le scénario 1 prend en compte la dérive naturelle de la brèche vers le sud sous l'action du transport littoral, soit l'avancée par engraissement de la pointe nord et le recul par érosion de la pointe sud de l'embouchure.

Bien qu'aucune intervention ne soit menée sur la brèche, des mesures complémentaires destinées à limiter les impacts de ce scénario sur les principaux enjeux sont envisagées.

Ces mesures sont présentées en section 7.2.

Figure 7-1 : Présentation du scénario 1

7.1.1 Evolution morphodynamique à long terme

Dans les décennies à venir la migration de l'embouchure vers le sud exposera à l'érosion, un par un, les villages du Gandiolais. Pour apporter plus d'information sur la vitesse de migration de l'embouchure, et pouvoir préciser les zones d'érosion, l'évolution du trait de côte a été simulée par le modèle ShorelineS.

Le modèle ShorelineS est capable de décrire de grandes transformations côtières en se basant sur des principes relativement simples de changements induits par le gradient de transport le long des côtes en raison de la courbure du littoral.

La condition initiale du trait de côte est celle observée en juin 2018, la dernière date pour laquelle un trait de côte complet était disponible à base des images satellites. Les conditions limites, les paramètres et la configuration du modèle ont été retenus de la validation 2004-2018 (cf. rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d)). Une période de 40 ans a été modélisée.

Dans l'ensemble, la position de l'embouchure du fleuve a migré de quelques 14 km en 40 ans selon les prévisions de ShorelineS, soit un taux de migration moyen de 350 m/an (Figure 7-2 et Figure 7-3). **À 2050, l'embouchure du fleuve aura migré vers le sud d'environ 12 km et aura atteint la coordonnée de 1750.6 km N, quelques kilomètres au sud de Degounaye (extrait de la Figure 7-3). Sa largeur est estimée à environ 1.1 km (extrait du Figure 7-3).**

La vitesse de migration prédite varie dans le temps et s'accélère au cours des 5 dernières années de la simulation pour atteindre environ 500 m/an. En conservant le taux de migration moyen (simulé sur les 14 premiers kilomètres) de 350 m/an, puis de 500 m/an pour la distance restante, **l'embouchure parviendrait à Potou (sa position originelle de 2003) en 2076.**

Néanmoins, il est important de noter que ces estimations peuvent être sous-estimées ou surestimées par le modèle, et doivent être interprétées avec une marge d'erreur d'environ 30%, si l'on regarde les résultats lors de la phase de calibration et de validation du modèle. Compte tenu de cette marge de confiance autour des taux de migration, l'embouchure atteindra Potou au plus tôt en 2058 et au plus tard en 2093. Les résultats montrent que l'embouchure aura migré d'environ 14 km vers le sud à l'horizon 2060, et que la largeur de la brèche réduira lors de la migration. La flèche sableuse au nord a tendance à rattraper celle de la flèche sableuse au sud en réduisant ainsi la largeur de la brèche. Avec la diminution de l'embouchure, sera également observée une diminution de l'étendue de la côte du Gandiolais exposée directement aux vagues.

L'évolution dans le temps des positions des extrémités des deux flèches sableuses est visualisée en Figure 7-3. Au début, l'embouchure s'élargit un peu, mais après quelques années la pointe sud stagne et la brèche se rétrécit rapidement. A un certain moment, la flèche sableuse du nord se rapproche, et l'érosion libère la flèche sud et qui migre rapidement vers le sud pendant quelques années. La largeur de la brèche varie entre environ 500 m et 2 km ; une situation comparable a été observée durant la période de calibration de 1984-2003.

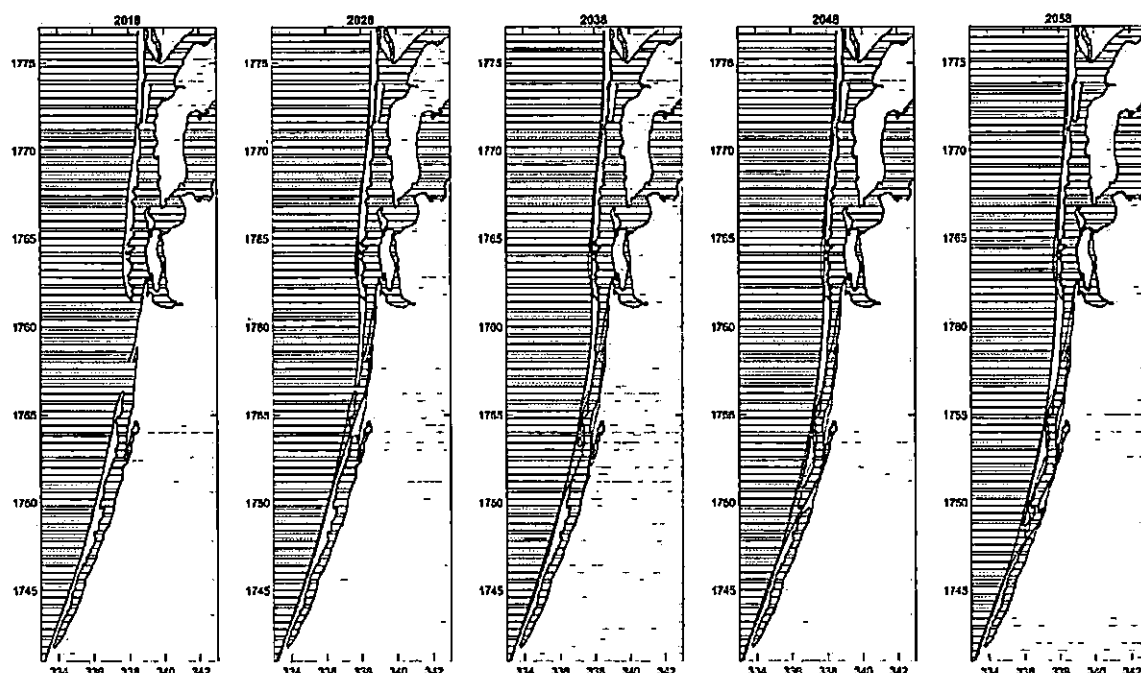


Figure 7-2 : Évolution sur quarante ans du trait de côte entre Saint-Louis et Potou.

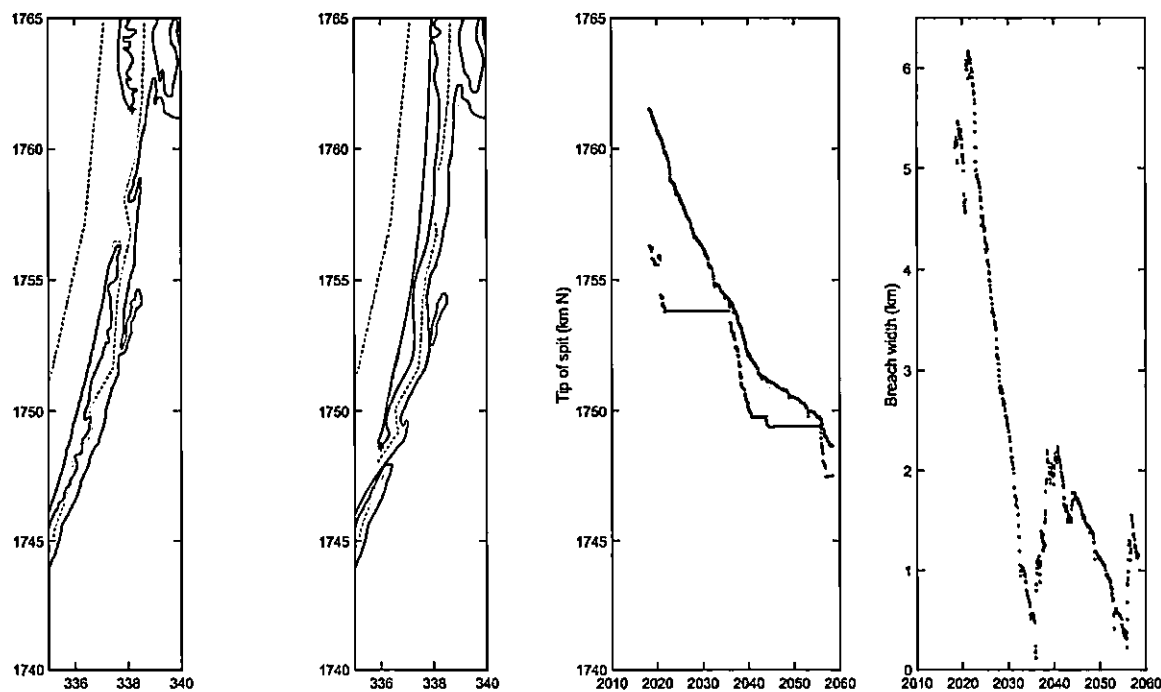


Figure 7-3 : De gauche à droite : trait de côte en 2018 ; trait de côte après 40 ans ; migration des extrémités des flèches nord (noir) et sud (bleu) ; évolution de la largeur de la brèche.

L'évolution prévue du littoral est présentée plus en détail dans les Figure 7-4 à Figure 7-6. Pour les sections de 15 km de long numérotées A-J, la position initiale du littoral et les côtes prévues en 10, 20 et 40 ans sont tracées sur une image aérienne de la zone. Il est à noter que le modèle **ShorelineS** est validé sur le comportement à long terme et à grande échelle de l'embouchure du fleuve et du

littoral adjacent étiré, qu'il applique une pente constante du lit le long de la côte et ne prend pas l'érosion due aux tempêtes et aux réflexions contre les structures en compte – ces résultats doivent être interprétés seulement comme indicatifs. Cela pourrait expliquer l'accroissement prévu le long de la côte « convexe » directement en face de Saint-Louis, ou selon les dernières observations un tendance d'érosion se produit. Les sections B à D montrent l'érosion prévue entre Saint-Louis et la pointe de la flèche nord. La section E-H montre en détail la migration et l'érosion de la flèche sableuse le long de la côte du Gandiolais.

Le développement prévu du cordon littoral peut être résumé comme suit :

- La côte océanique de la flèche nord s'érodera d'environ 100 m au cours des 10 premières années et d'environ 200 m au total sur 40 ans. La pointe de la flèche sableuse migrera vers le sud d'environ 400 m par an en moyenne sur 40 ans, et s'engraïssera.
- La côte océanique de la flèche sableuse sud s'érode, tandis que la pointe se déplace vers l'intérieur, entraînant une accrétion initiale le long de la côte du Gandiol, entre Nioi (1756 km) et Guembeng (1753 km) au cours des 10 premières années. L'érosion de la côte de l'océan se poursuit et migre vers le sud dans le temps, la brèche nord et l'embouchure du fleuve migrant également vers le sud.

Le développement prévu de la côte du Gandiol peut être résumé comme suit :

- La côte du Gandiolais entre Ndiébène (1766 km) et Tassinère (1767 km) s'éroderait d'environ 100 m au cours des 10 prochaines années. Après cette période, lorsque la flèche sableuse au nord aura migré davantage vers le sud, cette zone bordera le fleuve et sera relativement stable.
- La côte du Gandiolais à la hauteur de Nioi (1756 km) devrait s'accumuler d'environ 200 m au cours des 10 premières années et s'éroder jusqu'à peu près à sa position d'origine entre 10 et 40 ans.
- Pour la côte du Gandiolais du Parc National Langue de Barbarie entre Mouit (1755 km) et Guembeng (1753) une forte accrétion est prévue à court terme (0-10 ans) en raison de la pointe de la flèche sableuse au sud qui se dirige vers la côte du Gandiolais. À terme, après l'arrivée de l'embouchure du fleuve au droit de ces villages (10 à 40 ans), une érosion est prévue.
- La côte du Gandiolais à la hauteur de Mboumbaye (1752 km) devrait être relativement stable dans le futur direct (0-30 ans). Cependant, cette section devrait s'éroder après que l'embouchure du fleuve aura dépassé cette hauteur (entre 30 et 40 ans).
- La côte du Gandiolais entre Degounaye (1750 km), Tare (1745 km) et Gabar (1744 km) devrait être stable au cours des 30 prochaines années. Après cette période, lorsque l'embouchure du fleuve s'approchera de la partie nord de cette section, une accrétion est prévue près de Degounaye (1750 km).

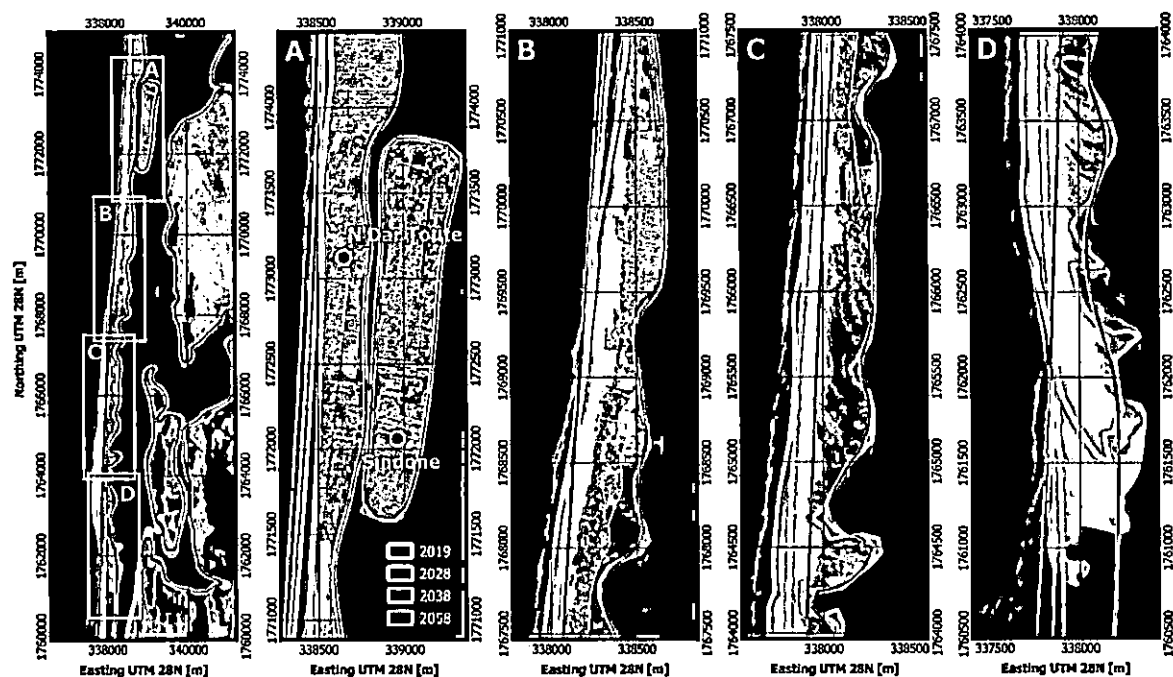


Figure 7-4 : Positions initiales et prévues de la flèche sableuse au nord pour 2018, 2028, 2038 et 2058 pour le scénario 1.

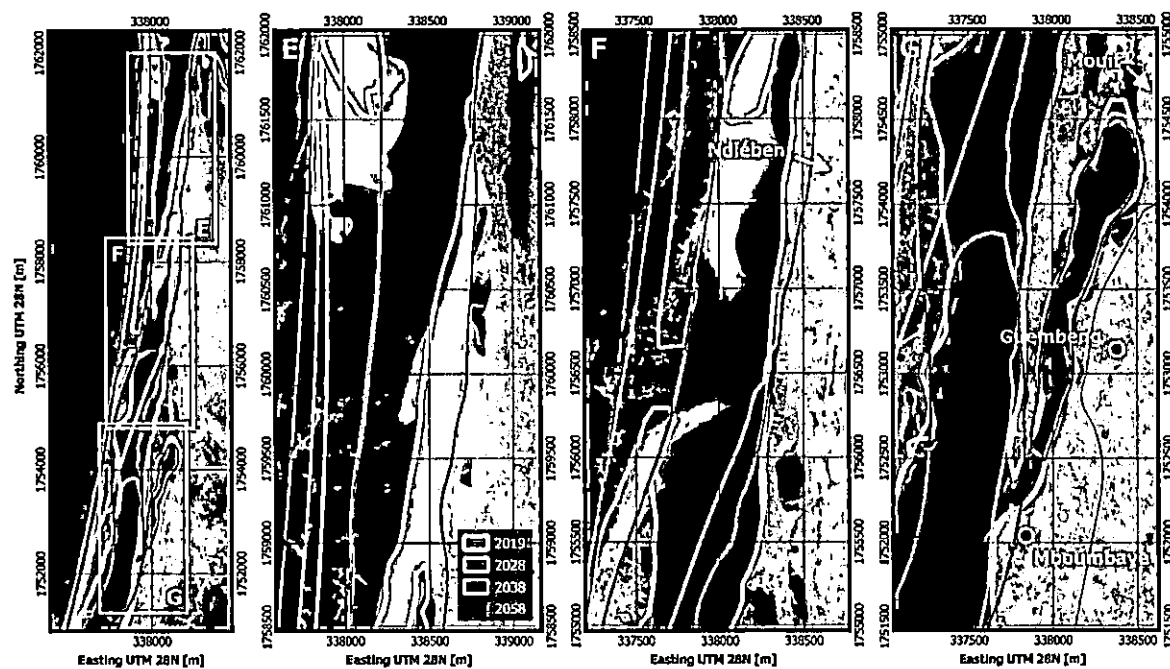


Figure 7-5 : Positions initiales et prévues de l'embouchure pour la zone Gandiolais pour 2018, 2028, 2038 et 2058 pour le scénario 1.

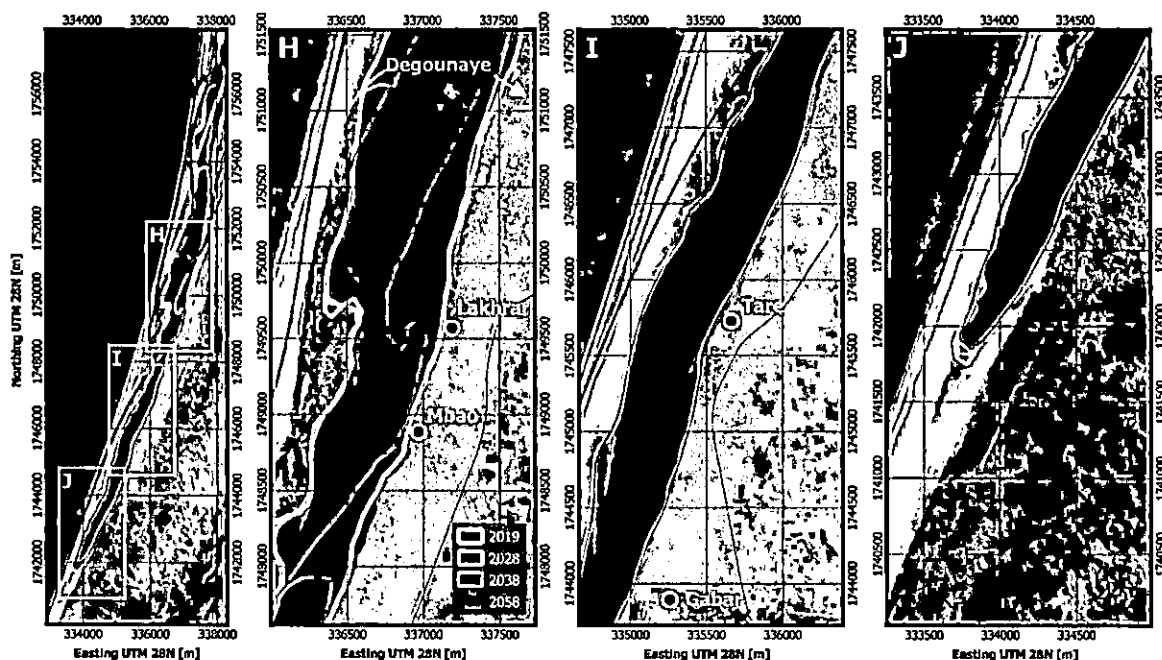


Figure 7-6 : Positions initiales et prévues de la côte de la flèche sableuse au sud et de la zone lagunaire pour 2018, 2028, 2038 et 2058 pour le scénario 1.

Dans les décennies à venir, l'effet du changement climatique peut mener à des changements additionnels, dont lehaussement du niveau de la mer est considéré le plus important. Ici, nous discutons seulement les différences à l'horizon 2050.

Afin de faciliter la comparaison avec les scénarios sans changement climatique nous avons répété le scénario en tenant compte d'un taux d'érosion lié à la théorie de Bruun (1962). Cette théorie suppose que les profils de plage exposés aux vagues s'érodent selon lehaussement du niveau de la mer, divisé par la pente du profil actif de la plage, entre le pied du profil actif et la crête de la berme ou dune, et peuvent monter en hauteur en reculant.

Estimant d'une façon conservative une pente d'environ 1:80, et unhaussement du niveau de la mer de 0.33 m après 40 ans, nous arrivons à un taux d'érosion de 0.66 m/an. Après 40 ans l'effet serait ainsi d'une érosion additionnelle de 26 m pour une côte linéaire. En Figure 7-7 (à gauche), le trait de côte est assez linéaire et un retrait additionnel peut être observé, comme anticipé. Pourtant, comme visible dans la partie sud (Figure 7-7 - à droite), près de l'embouchure l'effet est plutôt non-linéaire et l'effet subtil de l'érosion induit par l'effet de Bruun mène à de grandes variations locales dans l'évolution de l'embouchure et les plages adjacentes, jusqu'à des centaines de mètres. Des cartes détaillées se trouvent à l'annexe 3.

En conclusion, il faut compter, pour l'horizon 2050, sur une érosion additionnelle d'environ 25 m pour les plages près de Saint-Louis, et d'environ le double pour 2100.

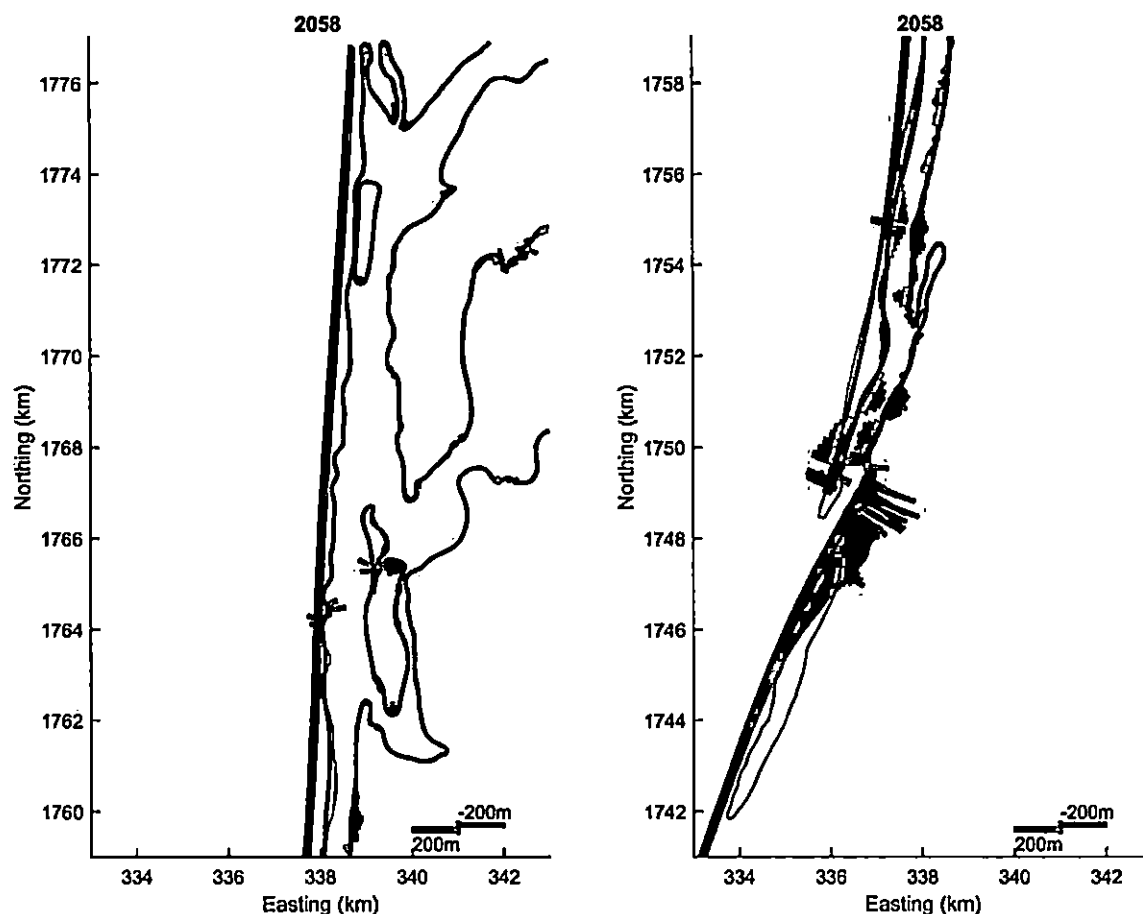


Figure 7-7: Effet d'un haussement du niveau de la mer de 0.33m après 40 ans ; barres rouges montrent l'érosion additionnelle, vertes l'accrétion additionnelle relative à la situation sans changement de climat. Hauteur des barres exagérée par un facteur de 5, voir l'échelle.

Il convient de noter que les effets du projet gazier en cours (Tortue/Ahmeyin (paragraphe 6.1), le port de N'Diogo (paragraphe 6.3) et la protection d'urgence du front de mer de la ville de Saint-Louis (paragraphe 6.2)) ne sont pas considérés pendant les prédictions présentées dans cette section. Il faut donc considérer des zones susceptibles de subir une érosion additionnelle causée par ces projets, ce qui rendra la flèche sableuse moins stable que dans la situation actuelle comme présenté ici. Il est recommandé de surveiller ces zones à risque dans les décennies à venir, pour anticiper des contre-mesures comme des apports de sable. Lors du projet SERRP ces influences seront étudiées plus en détail.

7.1.2 Hydrodynamique et évolution morphodynamique à court-terme

Afin d'apporter plus d'informations sur l'hydrodynamique et l'évolution morphodynamique à court-terme dans l'embouchure du fleuve Sénégal, le modèle Delft3D a été mobilisé.

7.1.2.1 Evolution morphologique

La Figure 7-8 présente la bathymétrie initiale (à gauche), la bathymétrie prévue après 5 ans (au milieu) et les tendances de sédimentation-érosion prévues après 5 ans (à droite) pour le scénario 1. Le modèle prédit un allongement de la flèche sableuse d'environ 1,5 km en 5 ans, avec du sable s'accumulant à la fois vers le bord de la mer d'un petit delta de jusant (corps sableux en forme de delta, accumulé du côté mer d'une embouchure dû aux courants de marée descendante et modifié par l'action des vagues) et le long de la côte centrale directement à l'est de l'embouchure du fleuve. L'entrée de la branche sud de l'estuaire migre de plus de 2 km vers le sud et devient moins profonde. La migration et l'élargissement de l'embouchure du fleuve sont conformes aux comportements observés depuis environ 2014, tout comme l'accumulation de sable le long de la côte centrale directement à l'est de l'embouchure du fleuve. À cet endroit, la formation d'une nouvelle petite flèche sableuse poussant vers le bord sud peut être observée dans la bathymétrie de juillet 2019.

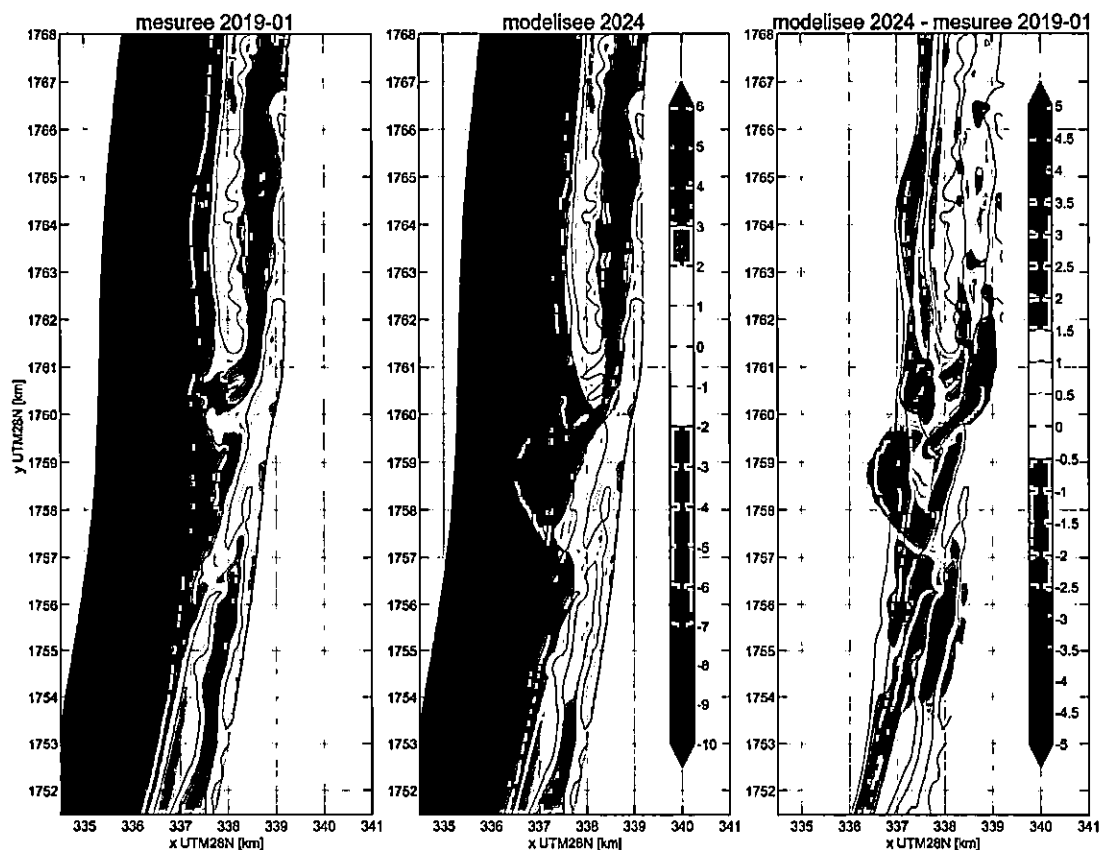


Figure 7-8 : Bathymétrie initiale (à gauche), bathymétrie prévue après 5 ans (au milieu) et prédiction sédimentation-érosion après 5 ans (à droite) pour le scénario 1.

Dynamique de l'embouchure du fleuve

ShorelineS prédit que la position de l'embouchure en 2050 sera vers les coordonnées $x,y = 1751000, 336500$, soit au sud du village de Degounaye. ShorelineS ne peut donner qu'une estimation de la position du trait de côte, mais pas d'information plus détaillée sur la bathymétrie.

Afin d'apporter plus d'information sur la bathymétrie de l'embouchure du fleuve à l'horizon 2050, et de pouvoir effectuer des simulations sur les risques d'inondations lors des fortes crues, une simulation supplémentaire avec Delft3D a été réalisée. Cette simulation a été réalisée en partant de la position du trait de côte prévue pour 2040 à l'aide de ShorelineS – et avec une schématisation artificielle de la profondeur. Après quelques années de simulation avec Delft3D, une estimation plus réaliste de la bathymétrie est obtenue. La largeur de l'embouchure prédite est d'environ 1.1 km (estimation identique aux résultats obtenus avec ShorelineS), et un delta de jusan s'est développé. Une adaptation de l'embouchure à des débits fluctuants lors des saisons a été également étudiée. La Figure 7-9 présente la bathymétrie prévue pour 2050, directement après la saison sèche et ensuite directement après la saison des pluies, et leur différences. Il peut être constaté que l'embouchure du fleuve s'élargit et s'approfondit après le passage d'une crue. La différence maximale de niveau du lit après la saison sèche et après la saison de pluies est de 0,81 m.

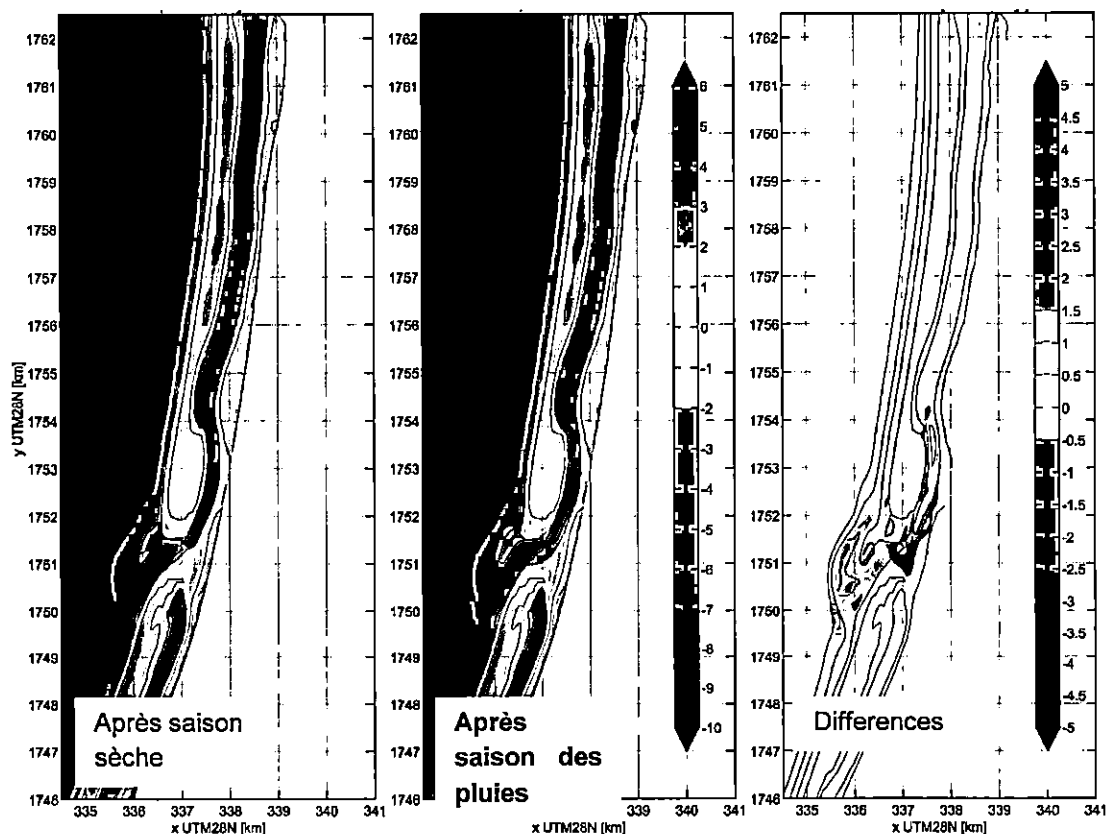


Figure 7-9 : la bathymétrie prévue pour 2050, directement après la saison sèche (à gauche) et la bathymétrie prévue pour 2050 directement après la saison de pluie (milieu) et les différences (à droite).

7.1.2.2 Hydrodynamique

La Figure 7-10 présente les vitesses maximales des courants de flot (à gauche) et de jusant (à droite) de la marée en vives-eaux pour un débit du fleuve faible de $148 \text{ m}^3/\text{s}$ (en haut) et un débit du fleuve élevé de $1126 \text{ m}^3/\text{s}$ (en bas) sans vagues, pour la position de l'embouchure actuelle (2019). Les vitesses maximales de courants de flot et de jusant dans l'embouchure, à faible débit fluvial, sont respectivement de 1,2 à 1,3 m/s et de 1,4 à 1,6 m/s. Les vitesses de courants de flot maximales avec un débit élevé du fleuve sont inférieures avec 0,8 à 1,0 m/s, tandis que les vitesses maximales de jusant avec un débit élevé du fleuve sont plus élevées avec 2,0 à 2,2 m/s. Avec un débit fluvial élevé, les vitesses d'inondation qui pénètrent dans l'embouchure et l'estuaire sont entravées par le débit fluvial tandis que les vitesses des courants de jusant sont renforcées. Une simulation prenant en compte les vagues (non représentée en figure) présente des courants provoqués par les vagues dans la zone de surf d'environ 0,6-0,7 m/s dirigés vers le sud.

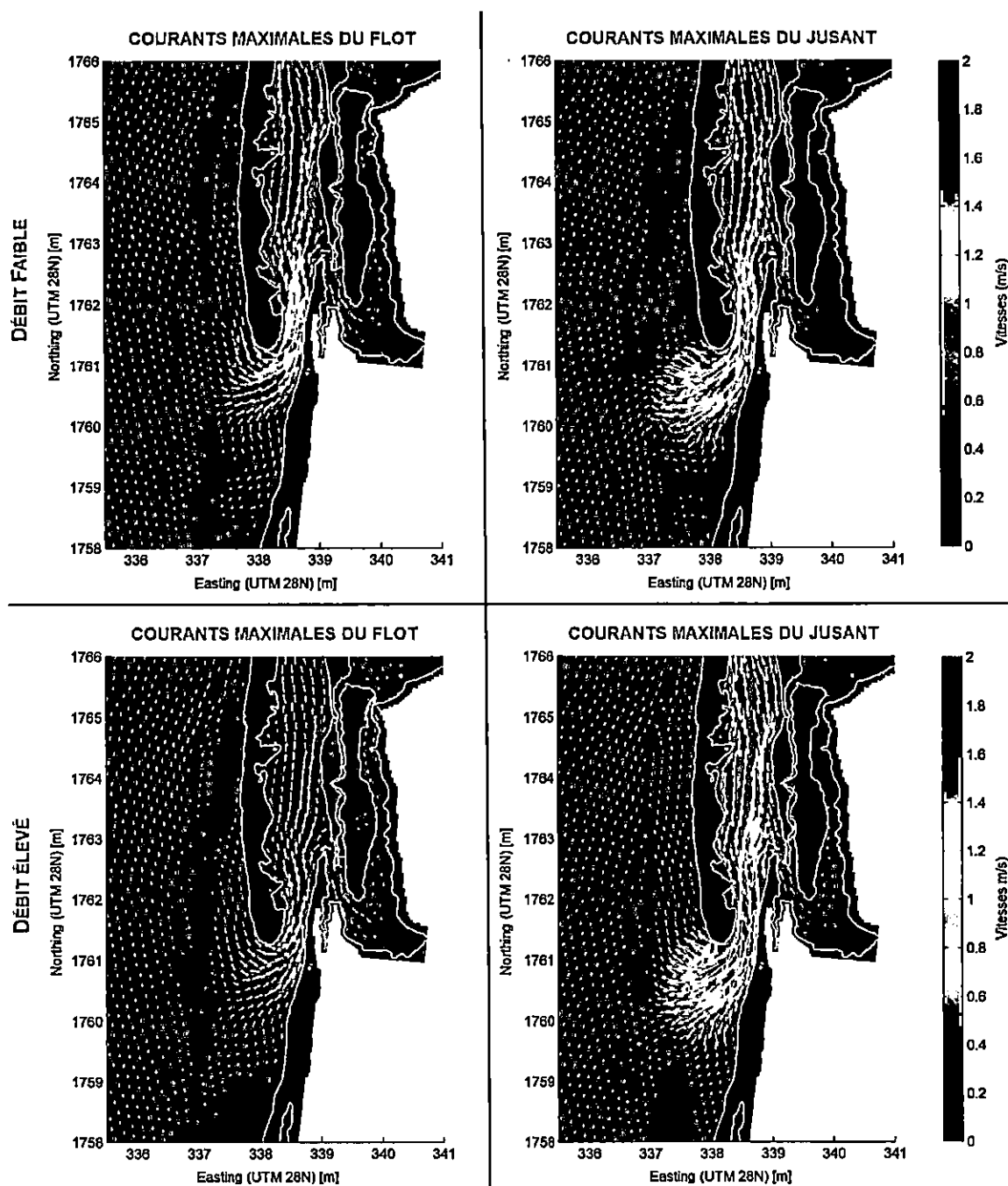


Figure 7-10 : Vitesses maximales des courants de flot (à gauche) et de jusant (à droite) de la marée en vives-eaux pour un débit du fleuve faible de 148 m³/s (en haut) et un débit du fleuve élevé de 1126 m³/s (en bas) sans vagues, pour la position de l'embouchure actuelle (2019).

7.1.2.3 Conclusion

L'évolution morphodynamique à court terme pour le scénario 1 est caractérisée par la migration et l'élargissement de l'embouchure du fleuve. La flèche sableuse au nord migre vers le sud et le sable s'accumule dans la partie centrale de l'embouchure du fleuve Sénégal. Ce comportement est conforme aux tendances observées entre 2014 et 2019.

Dans la situation actuelle, l'embouchure du fleuve est très dynamique et exposée aux vagues. Les vitesses d'écoulement dans l'embouchure sont fortes et imprévisibles car elles sont régies par les vagues, les marées et le débit du fleuve, et les profondeurs changent rapidement. Les vitesses d'écoulement peuvent atteindre des valeurs allant jusqu'à 2,2 m/s pendant les courants du jusant lors d'un débit élevé du fleuve Sénégal.

A l'horizon de 2050, la modélisation prédit que l'embouchure aura migré vers le sud d'environ 12 km, sa largeur est estimée à environ 1.1 km. L'embouchure du fleuve s'adapte à des variations du débit du fleuve, avec des variations du lit de près d'un mètre, ce qui pourrait influencer les niveaux d'eau du fleuve à Saint-Louis.

7.1.3 Risques d'inondation induits par les crues du fleuve

7.1.3.1 Impact sur Saint-Louis

Les modélisations hydrauliques portent sur des crues de période de retour comprises entre 2 et 100 ans pour les deux horizons d'étude, 2050 et 2100, ainsi que pour l'état 2019.

Les hypothèses retenues pour la configuration du fleuve et de l'embouchure sont les suivantes :

- **Etat 2019** : L'embouchure se situe 11 km à l'aval du Pont Faidherbe. La bathymétrie retenue est celle levée en Janvier 2019.
- **Horizon 2050** : l'embouchure se situe au sud immédiat du village de Degounaye , soit 23 km en aval du Pont Faidherbe. La position de l'embouchure est conforme aux résultats obtenus par le modèle ShorelineS. La bathymétrie de l'embouchure et du fleuve est issue des résultats du modèle Delft 3D (bathymétrie après saison des pluies).
- **Horizon 2100** : l'embouchure est située à sa position la plus lointaine jamais observée, soit au niveau du village de Potou, 31 km en aval du Pont Faidherbe. La bathymétrie retenue est celle levée en Juin 2000 faisant suite à la crue de 1999.

L'analyse de la topographie du cordon littoral a montré que des points bas existent aux alentours de 1.80 mIGN au nord et au sud de Saint-Louis. Il existe donc, pour des cotes de fleuve en crue supérieures à ces valeurs, au droit de ces points bas, un risque de déversement sur le cordon pouvant conduire à sa destruction et à la formation d'une nouvelle brèche. Ces points bas ont été localisés au droit de trois secteurs : au sud et au nord de Saint-Louis, ainsi que sur le secteur de Keur Macene (Figure 5-11). Dans ces conditions (risque de surverse sur le cordon) les cotes fournies par le modèle ne sont pas représentatives et sont signalées dans le tableau de résultat (Tableau 7-1) par une croix rouge.

Ce tableau permet d'identifier les configurations hydrauliques pour lesquelles il est à redouter une inondation de la ville de Saint-Louis, sachant que la cote correspondant à des débordements notables sur Saint-Louis a été évaluée à partir de 1.50 mIGN.

Tableau 7-1 : Impact du scénario 1 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis

Horizon d'étude	Position de l'embouchure	Période de retour (ans)	Débit (m³/s)	Cote max Diama (mIGN)	Cote max Saint-Louis (Pont Faidherbe mIGN)	Surverse cordon littoral Sud ST Louis (m³/s)	Surverse cordon littoral Nord ST Louis (m³/s)	Surverse cordon littoral Keur Macene (m³/s)
2019	Position 2019 PK 11	2	1944	1.47	1.15	0	0	0
		5	2333	1.62	1.19	0	0	0
		10	2449	1.67	1.21	0	0	0
		30	3060	1.89	1.34	0	0	0
		100	3384	1.99	1.41	<1	1	33
Horizon 2050	Sud de Degounaye PK 23	2	1769-1944	1.35-1.47	1.26-1.38	0	0	0
		5	2165-2333	1.84	1.51	0	0	0
		10	2311-2449	1.59-1.67	1.48-1.55	0	0	6
		30	3060	2.15	1.78	4	27	24
		100	3384	X	X	5	59	43
Horizon 2100	Potou PK 31	2	1476	1.85	1.75	<1	10	0
		5	1885	X	X	23	70	<1
		10	2080	X	X	49	124	50
		30	2263	X	X	72	175	90
		100	2331	X	X	82	200	106

X : Valeurs non représentatives du fait du risque de formation d'une nouvelle brèche

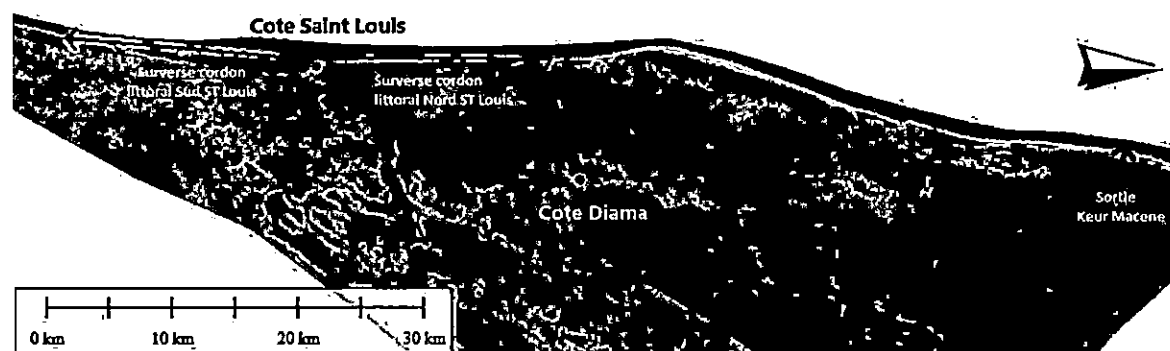


Figure 7-11 : Scénario 1 : Localisation des échelles et des surverses sur le cordon

- **A l'état actuel (2019) :** La plus grande partie de la ville de Saint-Louis (96 %) est protégée des inondations jusqu'à l'occurrence centennale. Il n'est pas observé de déversements sur le cordon littoral.
- **A l'horizon 2050 :** Avec la migration de l'embouchure vers le sud, la ville de Saint-Louis se trouve confrontée à des inondations importantes dès l'occurrence décennale, pour des débits de l'ordre de 2300 – 2400 m³/s. Pour des crues trentennale et centennale, des surverses sur le cordon littoral commencent à apparaître au nord de Saint-Louis et sont susceptibles d'initier une nouvelle brèche, exposant la ville à un risque majeur : la formation d'une nouvelle embouchure du fleuve au nord de Saint-Louis avec migration vers le sud en direction de la ville.
- **A l'horizon 2100 :** l'embouchure a atteint sa position la plus éloignée, à Potou, et la fréquence d'inondation de Saint-Louis devient inférieure à 2 ans. Pour une crue biennale, la ville est sujette à de fortes inondations, les cotes dépassant 1.75 mIGN au pont Faidherbe. Dès l'occurrence quinquennale, le risque de formation de brèche au nord et au sud de Saint-Louis est fort, exposant à la fois Saint-Louis et le littoral gandiolais à une très forte érosion.

Les profils de ligne d'eau dans l'embouchure pour l'horizon 2050 sont donnés en Figure 7-12. Les cartes d'inondation aux horizons 2050 et 2100, respectivement pour la crue trentennale et biennale, sont présentées de la Figure 7-13 à la Figure 7-16.

Pour une crue centennale, dans l'hypothèse d'une absence de rupture du cordon, les inondations toucheraient :

- A l'Horizon 2050 : 188 600 habitants,
- A l'Horizon 2100 : 201 500 habitants.

A partir de 2050, et pour des crues d'occurrence 30 ans, les premiers débordements sur le cordon sont observés au nord immédiat de Saint-Louis, ce qui confirme la vulnérabilité de cette partie du cordon. C'est également sur ce secteur que sont observés les débordements les plus importants en termes de débit de pointe et de volume (200 m³/s pour une période de retour de crue de 100 ans à l'Horizon 2100 par exemple). Ces débordements en 2100 se produisent pour des crues fréquentes : période de retour comprises entre 2 et 5 ans.

Dans cette configuration, le **risque majeur** est lié à la formation de brèches naturelles conduisant à la création d'une nouvelle embouchure du fleuve au nord de Saint-Louis. Ce risque est renforcé par rapport à l'état actuel par la montée du niveau de la mer liée au changement climatique.

Dans ce cas de figure les quartiers situés sur le cordon littoral (Goxxu Mbathie, Ndar Toute et Guet Ndar) et l'île de Saint-Louis sont menacés d'une destruction complète.

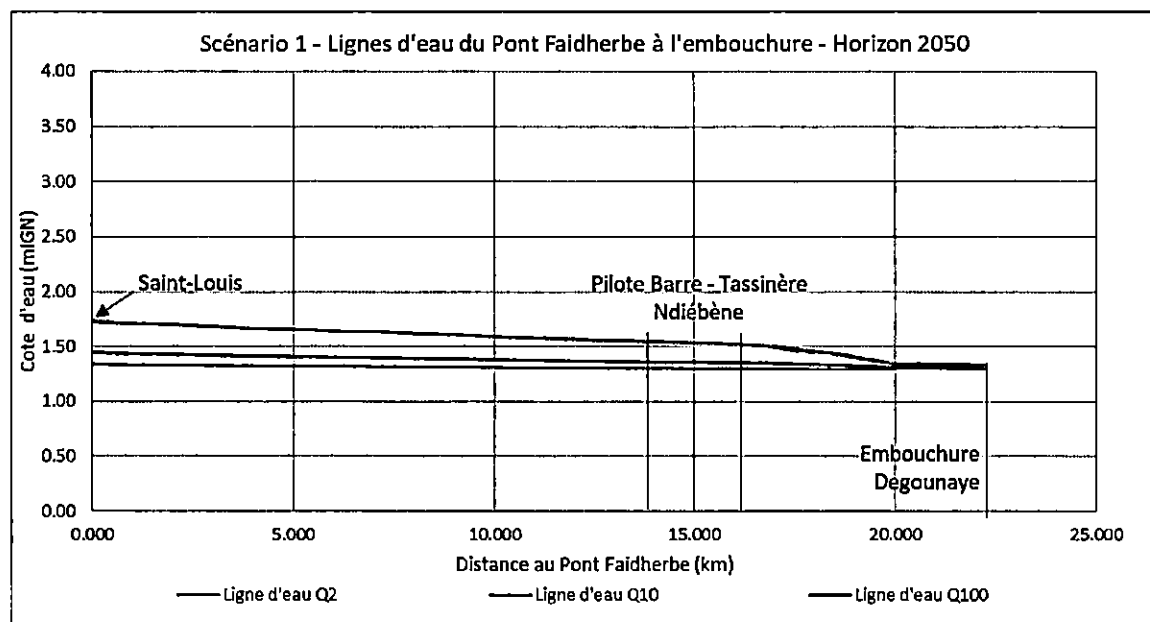


Figure 7-12 : Profils en long des lignes d'eau du fleuve à l'horizon 2050 du Pont Faidherbe à l'embouchure du fleuve - Scénario 1

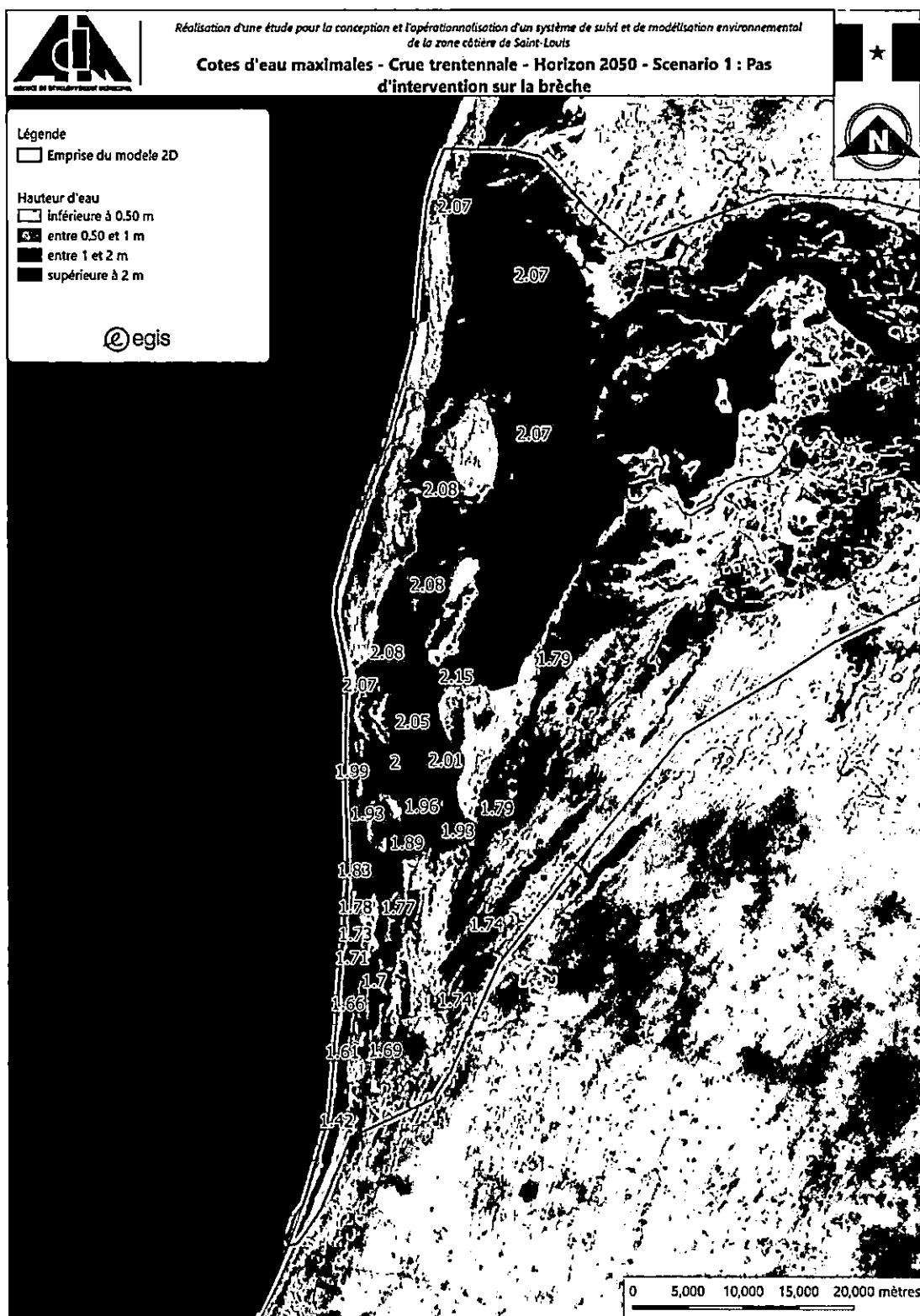


Figure 7-13 : Cotes d'eau maximales – Scénario 1 – Horizon 2050 – Q30 – Delta du fleuve

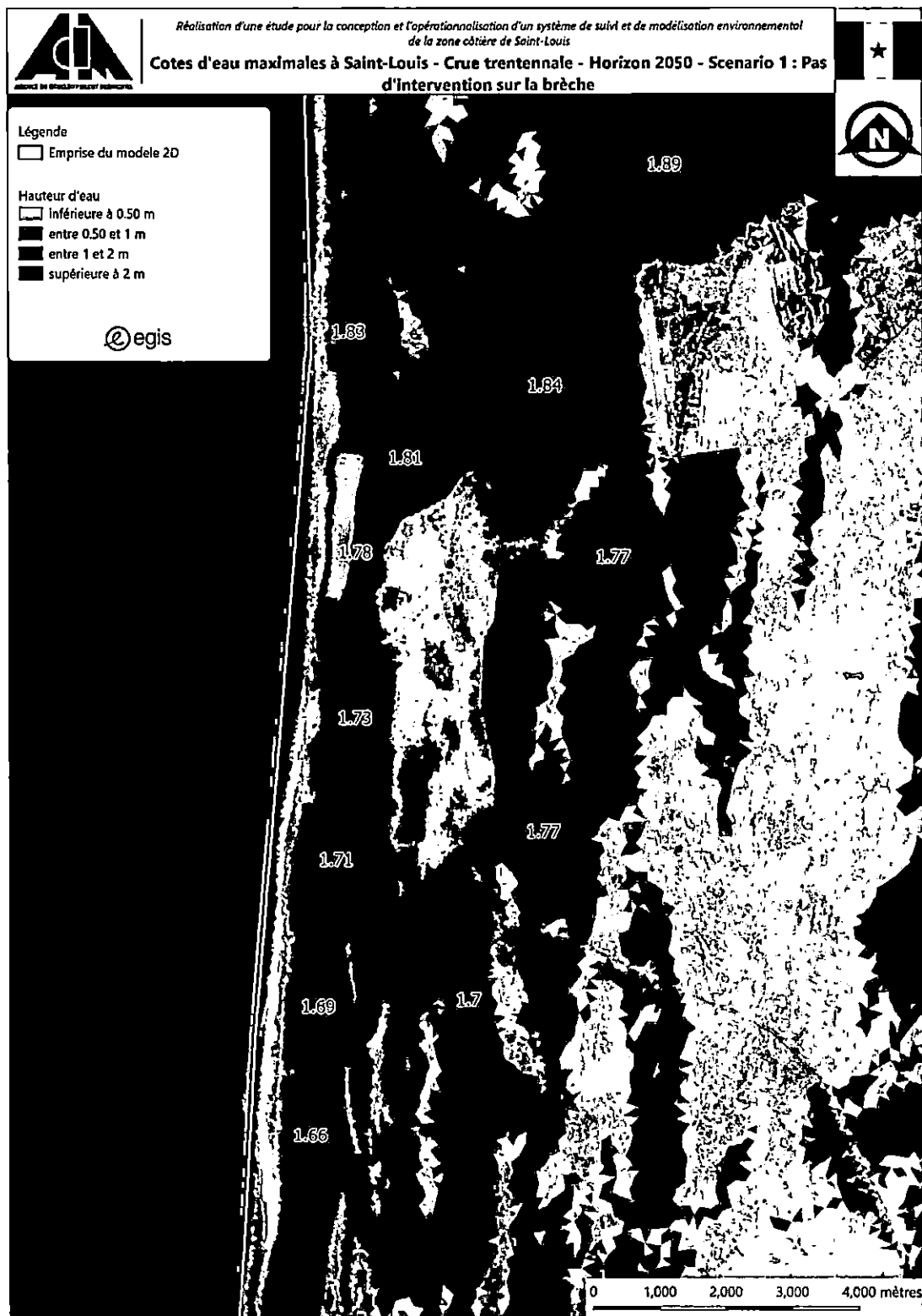


Figure 7-14 : Cotes d'eau maximales – Scénario 1 – Horizon 2050 – Q30 – Zoom sur Saint-Louis

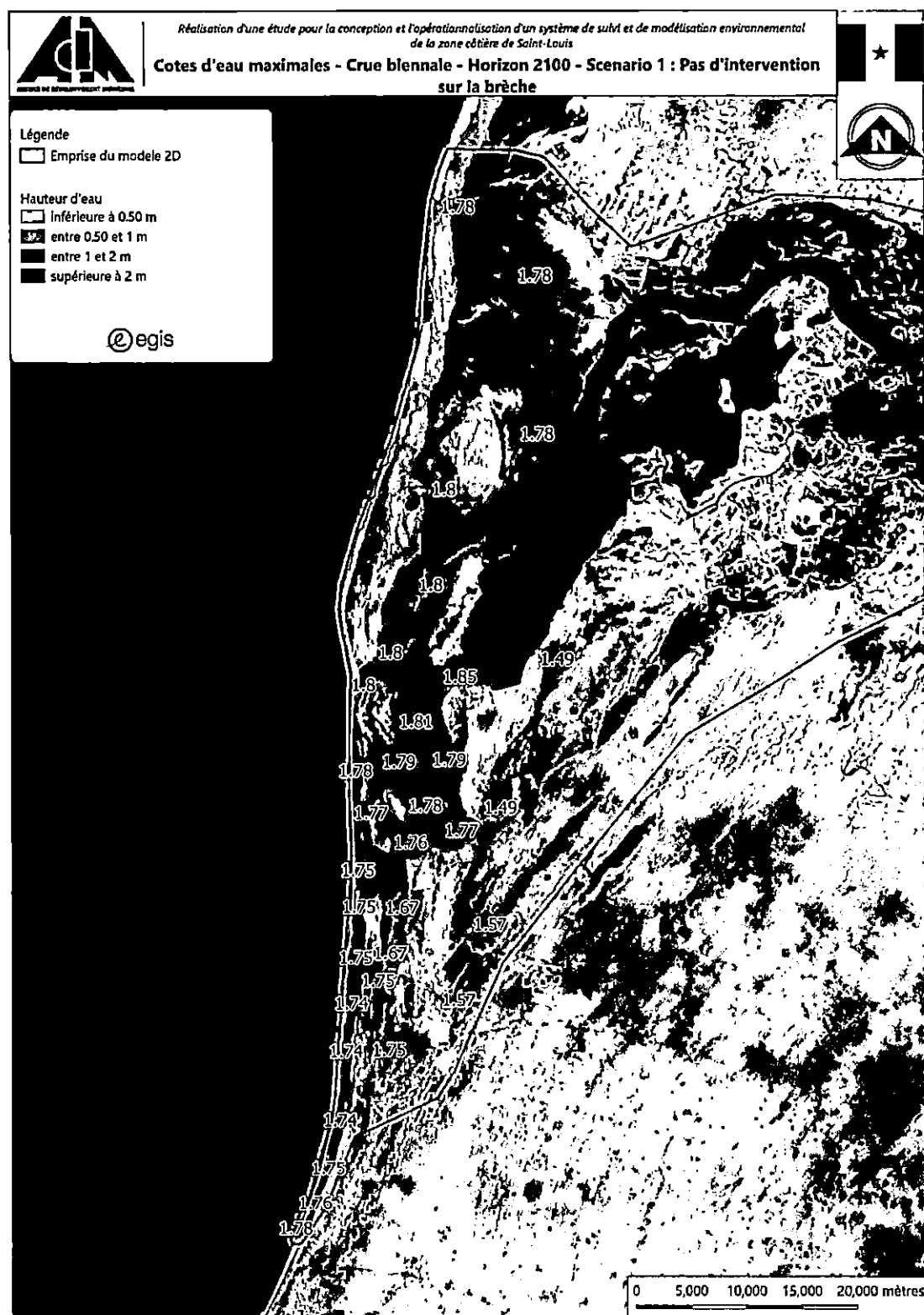


Figure 7-15 : Cotes d'eau maximales – Scénario 1 – Horizon 2100 – Q2 – Delta du fleuve

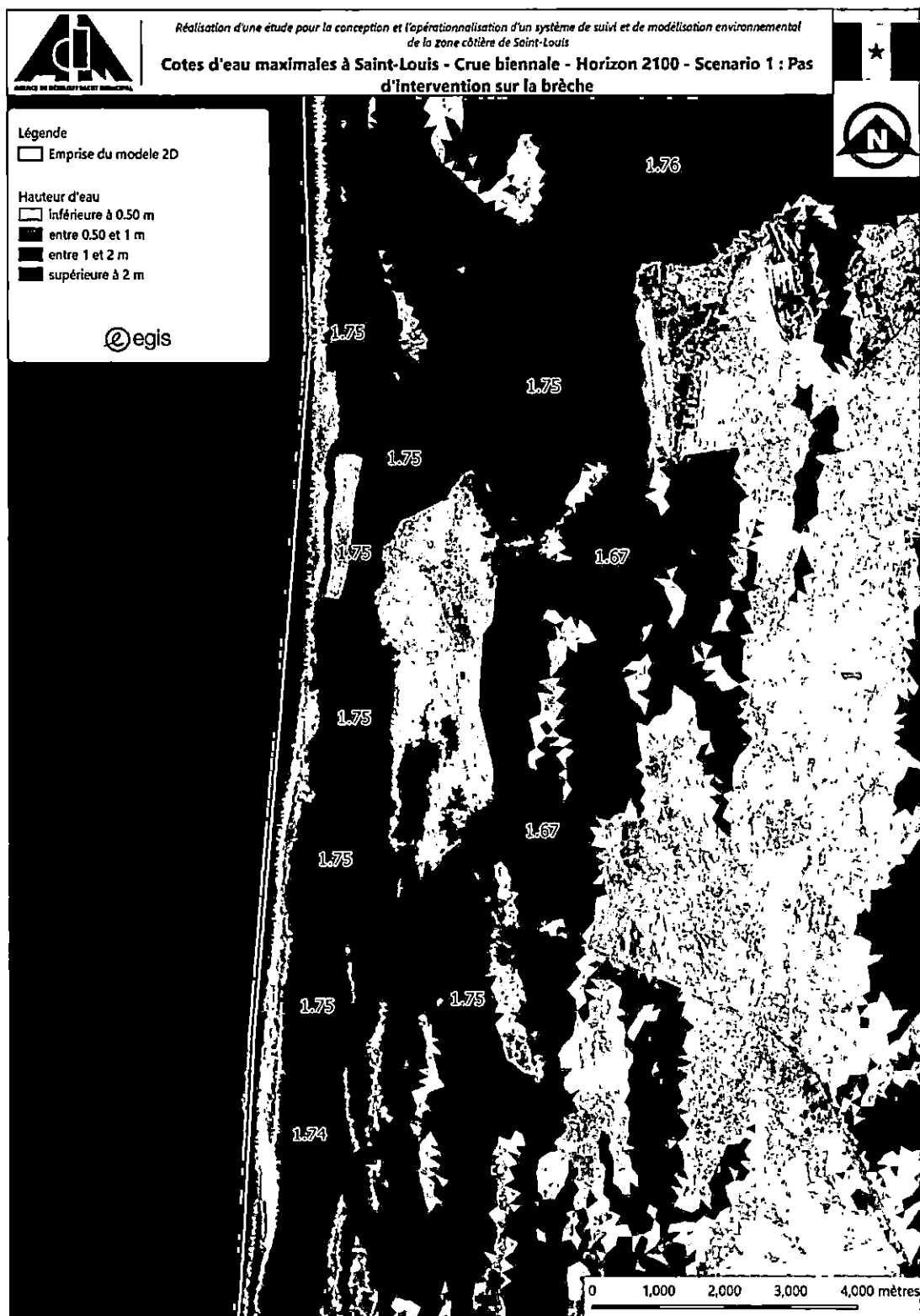


Figure 7-16 : Cotes d'eau maximales – Scénario 1 – Horizon 2100 – Q2 – Zoom sur Saint-Louis

7.1.3.2 Evolution du risque inondation fluviale à Saint-Louis en fonction de la position de l'embouchure du fleuve

La Figure 7-17 présente l'évolution du risque inondation à Saint-Louis dans les conditions océano-météorologiques actuelles, en fonction de la position de l'embouchure du fleuve. Elle intègre les lignes d'eau calculées pour la crue de période de retour 2 ans ($1944 \text{ m}^3/\text{s}$) et deux conditions limites en mer :

- **0.85 mIGN** : condition normale, sans tempête. Cette valeur inclue donc le niveau moyen de haute mer de vives-eaux et le setup moyen annuel, sans surcote de tempête,
- **1.13 mIGN** : surcote et setup correspondant à une concomitance avec une tempête annuelle.

Les cotes des crues historiques supérieures à $1600 \text{ m}^3/\text{s}$ enregistrées au limnigraphe du Pont Faidherbe sont également présentées sur cette figure et positionnées en fonction de la localisation de l'embouchure lors de l'évènement.

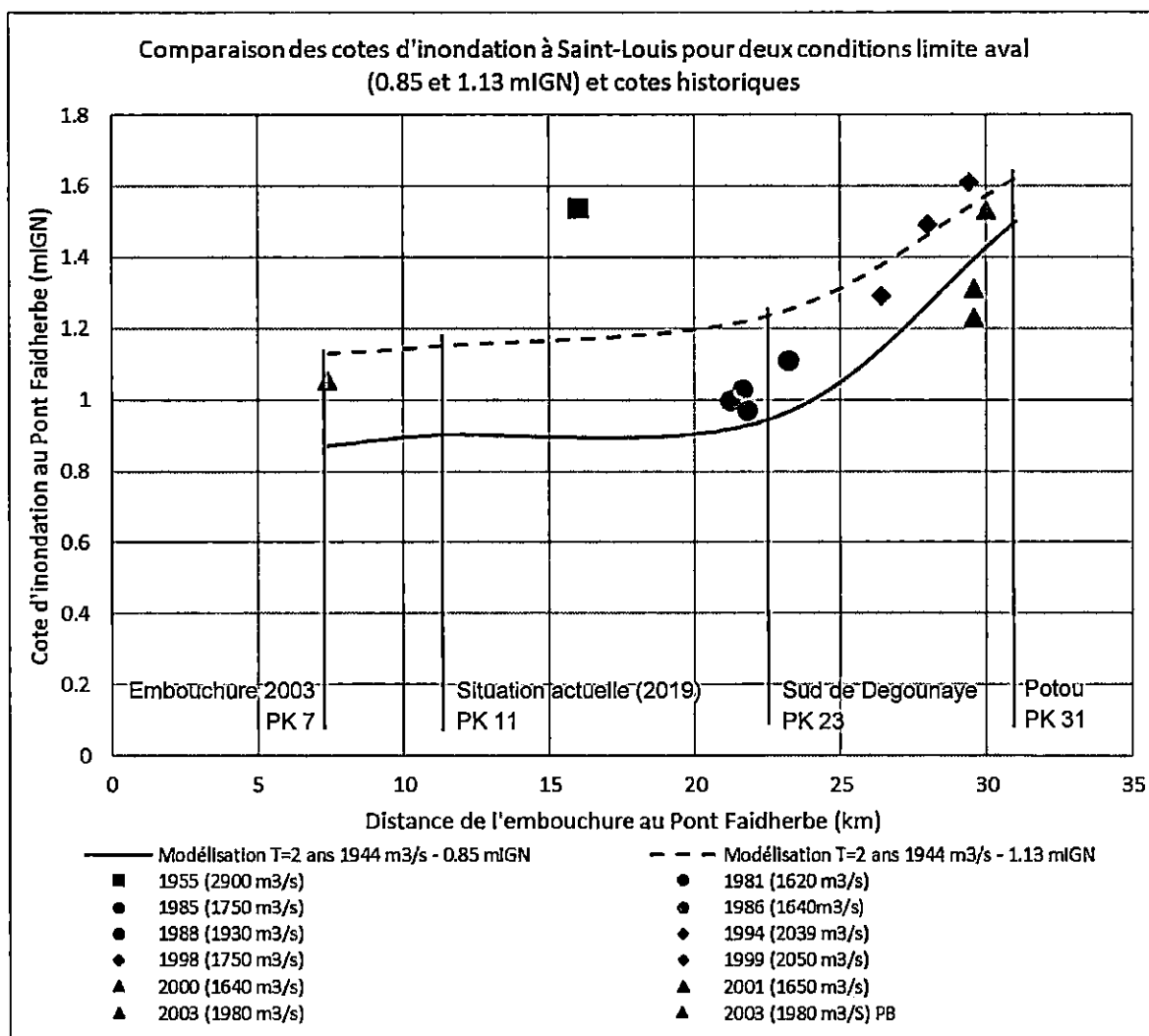


Figure 7-17 : Evolution des cotes d'inondation d'une crue biennale à Saint-Louis en conditions climatiques actuelles en fonction de la position de l'embouchure et des conditions en mer

La figure met en évidence :

- Une forte augmentation des niveaux de crue à Saint-Louis, à débit équivalent, en fonction de l'éloignement de l'embouchure. Pour la crue de 2003 (1980 m³/s), par exemple, les cotes enregistrées au limnigraphe étaient de 1.53 mIGN avant la brèche, et de 1.05 mIGN après la brèche, soit une diminution de près de 0.50 m,
- Pour la crue biennale, des niveaux de crues historiques s'inscrivant dans l'enveloppe des modélisations réalisées pour les deux conditions limite en mer testées.

7.1.3.3 Impact sur les communes du delta

Dans le cadre du scénario 1, les zones inondables couvrent une large superficie du delta tant à l'horizon 2050 qu'à l'horizon 2100. L'impact sur les populations des communes du delta pour une crue centennale est le suivant, sous réserve d'une absence de formation de brèche sur le cordon :

A l'horizon 2050 :

- **Ndiébène Gandiole** : 9 500 habitants touchés,
- **Gandon** : 10 400 habitants touchés,
- **Diama** : 2 100 habitants touchés,
- **Mauritanie** : 2 000 habitants touchés,
- **TOTAL** : 23 900 habitants touchés.

A l'horizon 2100 :

- **Ndiébène Gandiole** : 16 600 habitants touchés,
- **Gandon** : 12 300 habitants touchés,
- **Diama** : 2 600 habitants touchés,
- **Mauritanie** : 1 800 habitants touchés,
- **TOTAL** : 33 300 habitants touchés.

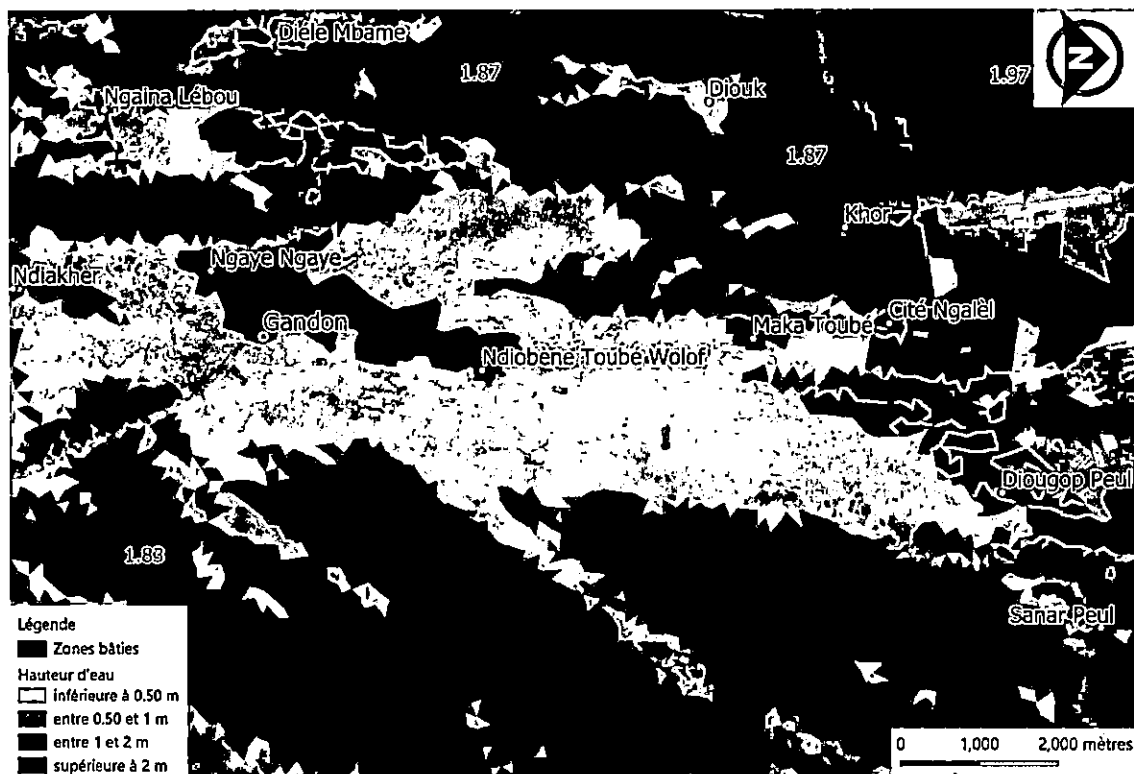


Figure 7-18 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Scénario 1 – Horizon 2050 – Q100

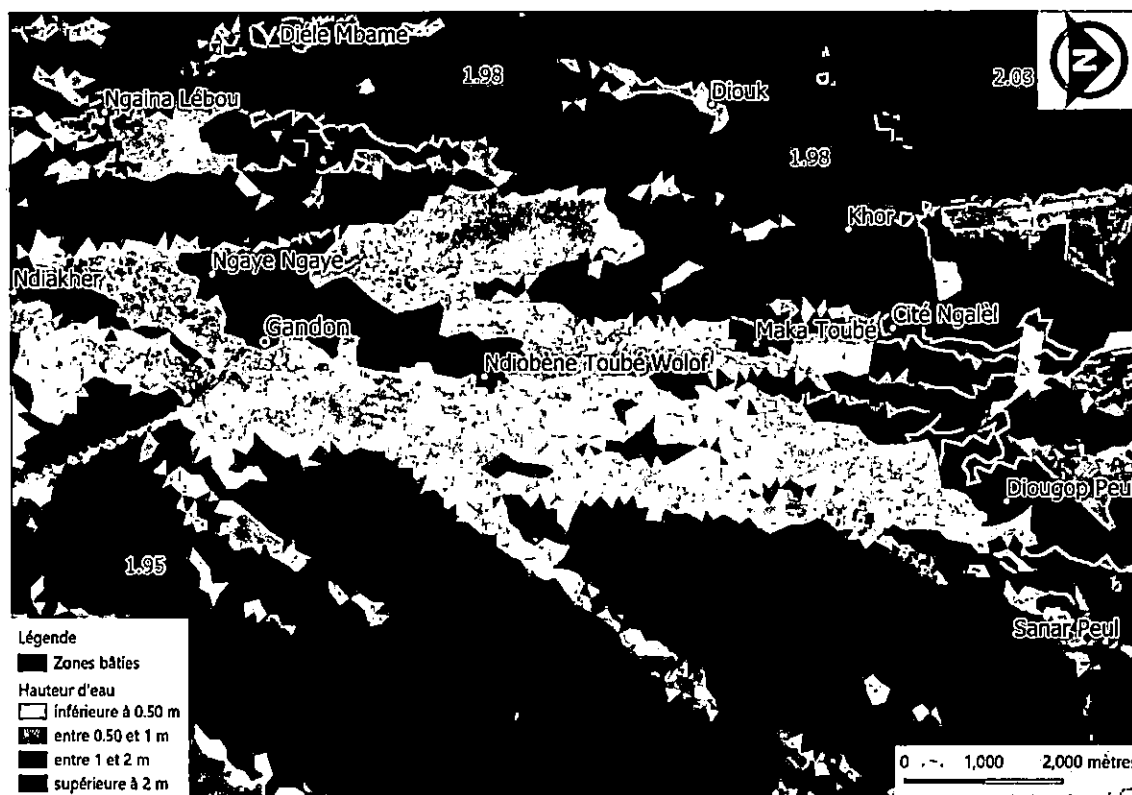


Figure 7-19 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Scénario 1 – Horizon 2100 – Q100

Sur la commune de Gandon, les cotes d'inondation avoisinent les 1.90 mIGN en 2050 (Figure 7-18), exposant une part significative de la population communale (21%). En 2100, les eaux approchent les 2 mIGN (Figure 7-19), exposant près de 2 000 habitants supplémentaires (25%).

A l'horizon 2050, les cotes dans le fleuve au droit de la commune de Ndiébène Gandiole atteignent 1.70 mIGN à l'amont et diminuent jusqu'à 1.45 mIGN à l'aval (Figure 7-20). C'est alors 38% de la population de la commune qui est exposée. A l'horizon 2100, la montée du niveau de la mer limite la diminution des cotes d'eau d'amont vers l'aval, celles-ci avoisinant les 1.95 mIGN (Figure 7-21), et exposant cette fois 66% des habitants.



Figure 7-20 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiolé – Scénario 1 – Horizon 2050 – Q100



Figure 7-21 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiolé – Scénario 1 – Horizon 2100 – Q100

7.1.4 Risques d'inondation induits par les tempêtes

Pour évaluer le risque d'inondation dû aux tempêtes, un modèle XBeach plus large a été créé pour l'embouchure du fleuve et ses environs.

Étant donné que la flèche sableuse protège les villages du Gandiolais et une grande partie de Saint-Louis des impacts directs des vagues, ils ne devraient être affectés que par la surcote induite par le vent et le setup créé par les vagues qui se propagent dans l'embouchure, puis en amont / en aval. Étant donné que le modèle XBeach est intensif en calculs, le modèle est limité à quelques dizaines de kilomètres autour l'embouchure du fleuve, où il fournit des informations directes sur les changements de niveau d'eau induits par les tempêtes dans l'embouchure et une dizaine de kilomètres plus en amont et aval, et qui peut ensuite être utilisé comme donnée d'entrée dans les simulations hydrauliques fluviales (paragraphe 7.1.3) pour estimer les niveaux d'eau plus en amont et en aval.

La grille de calcul couvre 18 km suivant la direction longitudinale et 5,2 km vers le large jusqu'à environ 12 mètres de profondeur. La résolution de la grille suivant la direction longitudinale est de 25 m et, suivant la direction transversale, varie de 8 m près de la flèche à 32 m au large, sur la base d'un critère CFL constant suivant la direction transversale. La configuration du modèle est décrite au paragraphe 3.4 du présent rapport et en plus de détail au chapitre 7 du rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d).

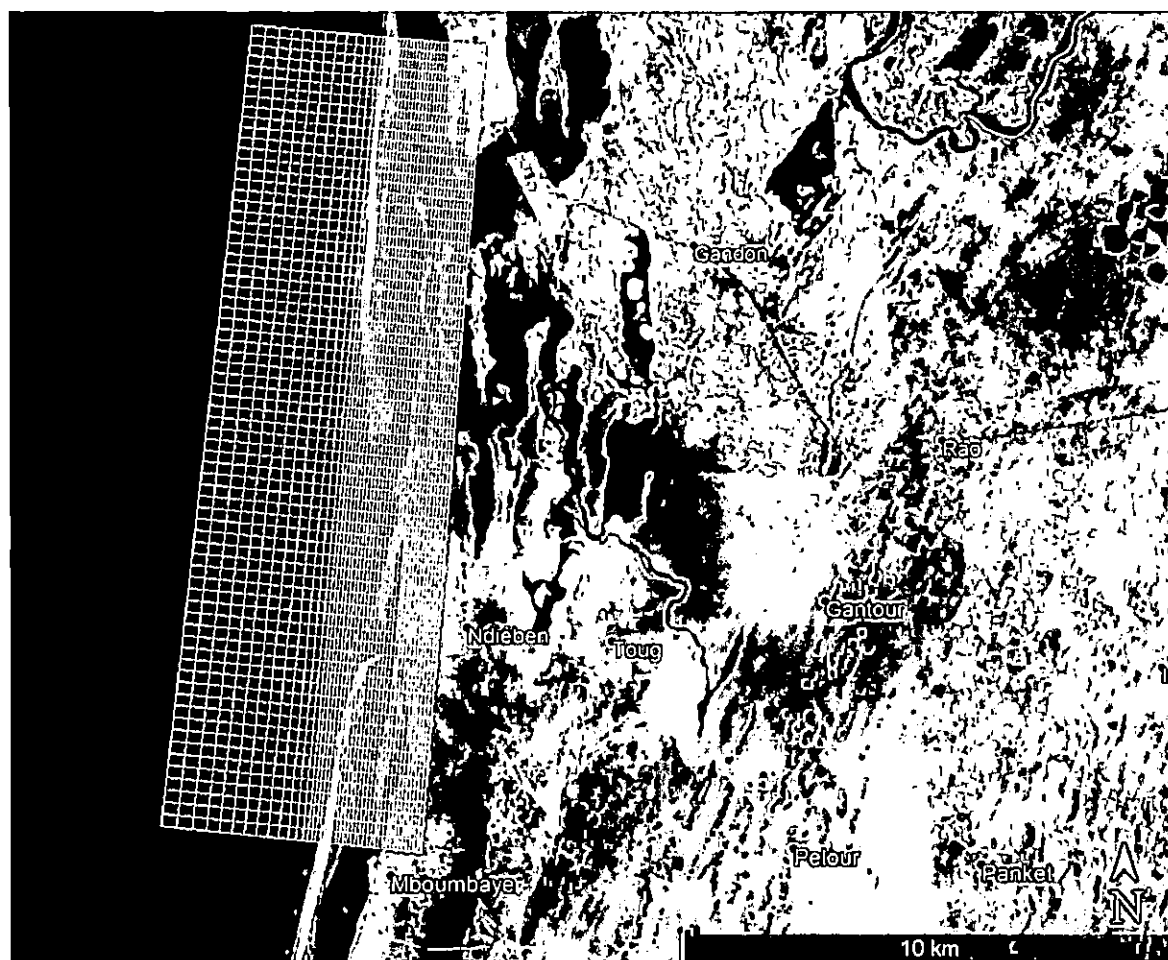


Figure 7-22 : Étendue du domaine de calcul. Pour une impression de la résolution, un quadrillage est proposé avec une seule ligne tracée pour 10 lignes de grille de calcul.

Des séries de modèles avec des scénarios d'élévation du niveau de la mer (+19 cm pour le scénario RCP 4.5 modéré pour 2050 et +66 cm pour le scénario RCP 8.5 pessimiste pour 2100, se référer à paragraphe 4.1.2) ont été ajoutés aux séries de modèles existantes, pour évaluer le risque d'inondation par les tempêtes en conditions actuelles et à l'avenir.

Les conditions limites hydrodynamiques pour le modèle XBeach basées sur le PoT de la hauteur significative des vagues, de la période de pic et de la surcote, sont présentées en Figure 7-23.

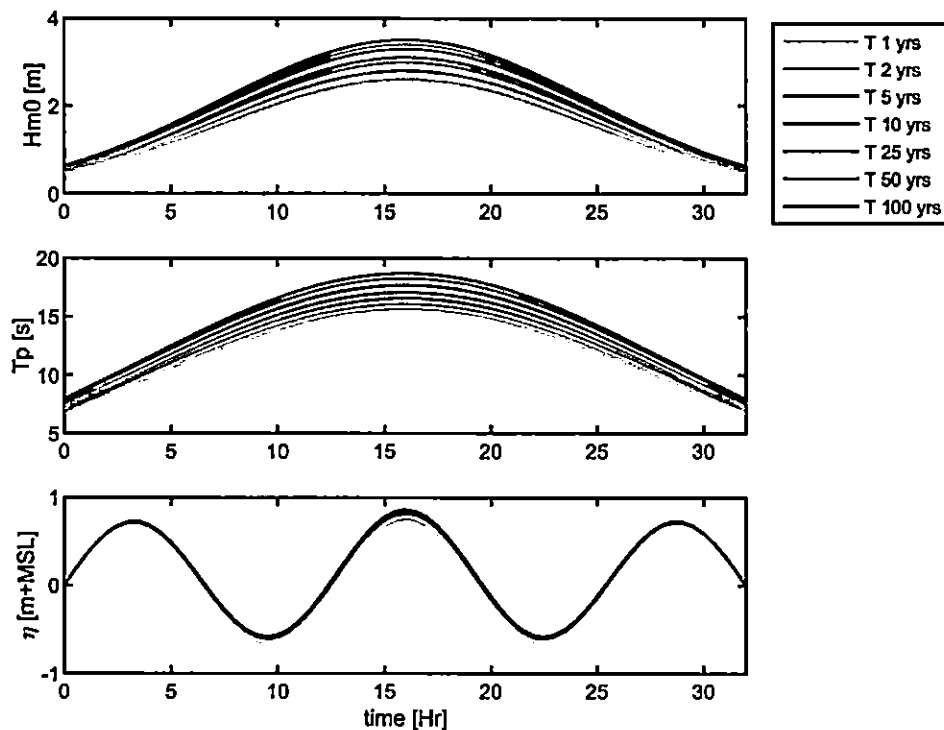


Figure 7-23 : Conditions limites hydrodynamiques pour le modèle XBeach basées sur le PoT de la hauteur significative des vagues, de la période de pic et de la surcote.

7.1.4.1 Conditions actuelles

Dans les conditions actuelles, la flèche sableuse protège la région située derrière elle de l'action des vagues. L'intrusion des vagues courtes au nord et au sud dans l'embouchure du fleuve est limitée, seule une légère intrusion à travers la partie la plus profonde du fleuve est observée, voir la Figure 7-24. Cette intrusion est indépendante de l'intensité de la tempête mais dépend principalement de la profondeur du chenal. L'intrusion des ondes infragravitaires est également limitée mais accroît avec l'augmentation de l'intensité des tempêtes. Les inondations dues aux tempêtes des zones continentales derrière la flèche sableuse sont principalement causées par une augmentation des niveaux d'eau due au setup par les vagues courtes et dans une faible mesure à l'intrusion des ondes infragravitaires. À l'embouchure même, la plupart des vagues atteignent la côte, augmentant le risque d'érosion et d'inondation.

Comme on peut le déduire de la Figure 7-26 la profondeur d'inondation à travers la flèche et l'arrière-pays est limitée pour la tempête de 1/1 et 1/10 ans. Principalement, les zones basses situées entre les coordonnées Y 1762 et 1766 km, à la fois la zone de la flèche sableuse et la zone continentale, sont légèrement touchées, mais l'inondation d'autres zones est jugée comme peu probable. Pour les tempêtes énergétiques, 1 sur 100 ans, une submersion de la flèche sableuse se produit.

En raison de l'augmentation de l'énergie des vagues, la configuration du fleuve augmente (voir le Tableau 7-2), entraînant une augmentation de la profondeur d'inondation dans de plus grandes zones autour du fleuve. Le setup est relativement constant en amont de l'embouchure (voir Figure 7-25), ce qui confirme notre hypothèse que les valeurs de setup peuvent être extrapolées en amont. Le setup induit par les vagues en aval de l'embouchure est plus grand que le setup au nord, ce qui est attribué aux gradients plus importants en bathymétrie dans la section sud. Des cartes d'inondation plus détaillées se trouvent à l'annexe 2.

Tableau 7-2 : Setup maximal induit par les vagues mesurées à deux endroits (voir les marqueurs blancs sur la Figure 7-25), pour les conditions actuelles, à l'horizon de 2050 et 2100.

	Conditions actuelles			à l'horizon de 2050			à l'horizon de 2100		
	1:1	1:10	1:100	1:1	1:10	1:100	1:1	1:10	1:100
Setup amont de l'embouchure	0.26	0.32	0.40	0.23	0.30	0.39	0.26	0.36	0.46
Setup aval de l'embouchure	0.29	0.35	0.45	0.25	0.34	0.41	0.26	0.35	0.46

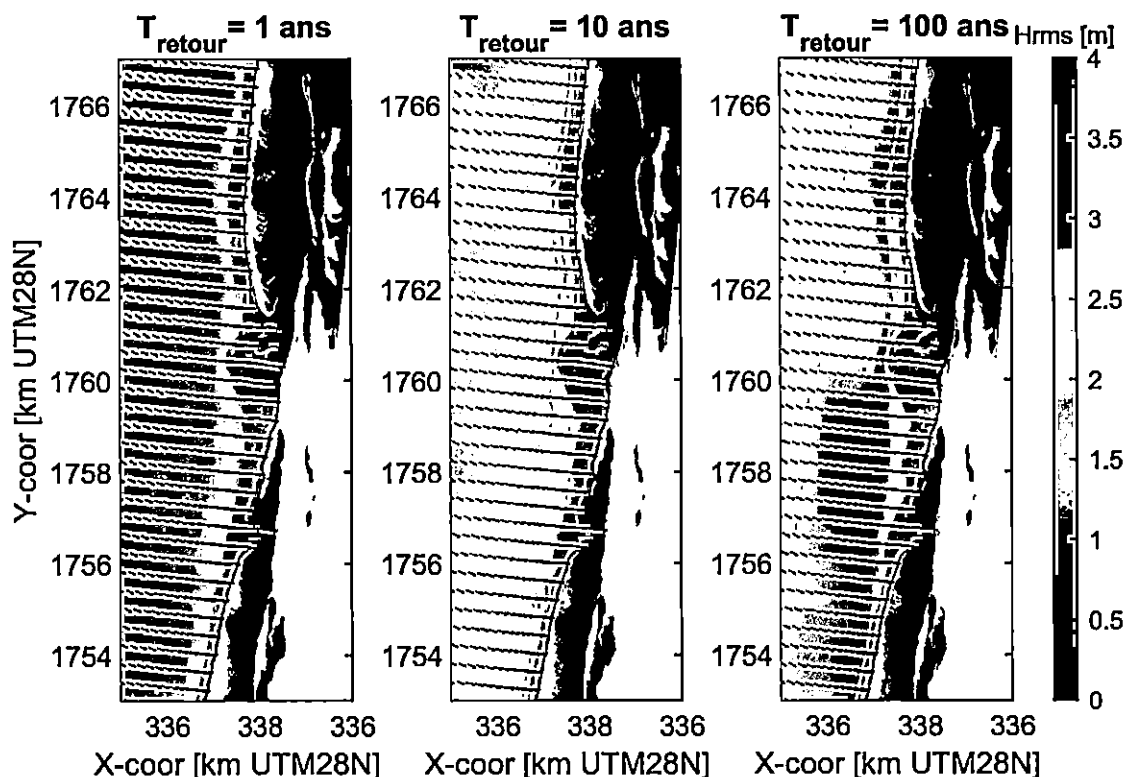


Figure 7-24: Figures du comportement hydrodynamique du modèle XBeach dans l'embouchure après 15 heures de simulation. Les graphiques représentent le champ d'ondes courtes pour une tempête avec une période de retour de 1, 10 et 100 ans, dans les conditions actuelles. Les flèches indiquent la direction des vagues.

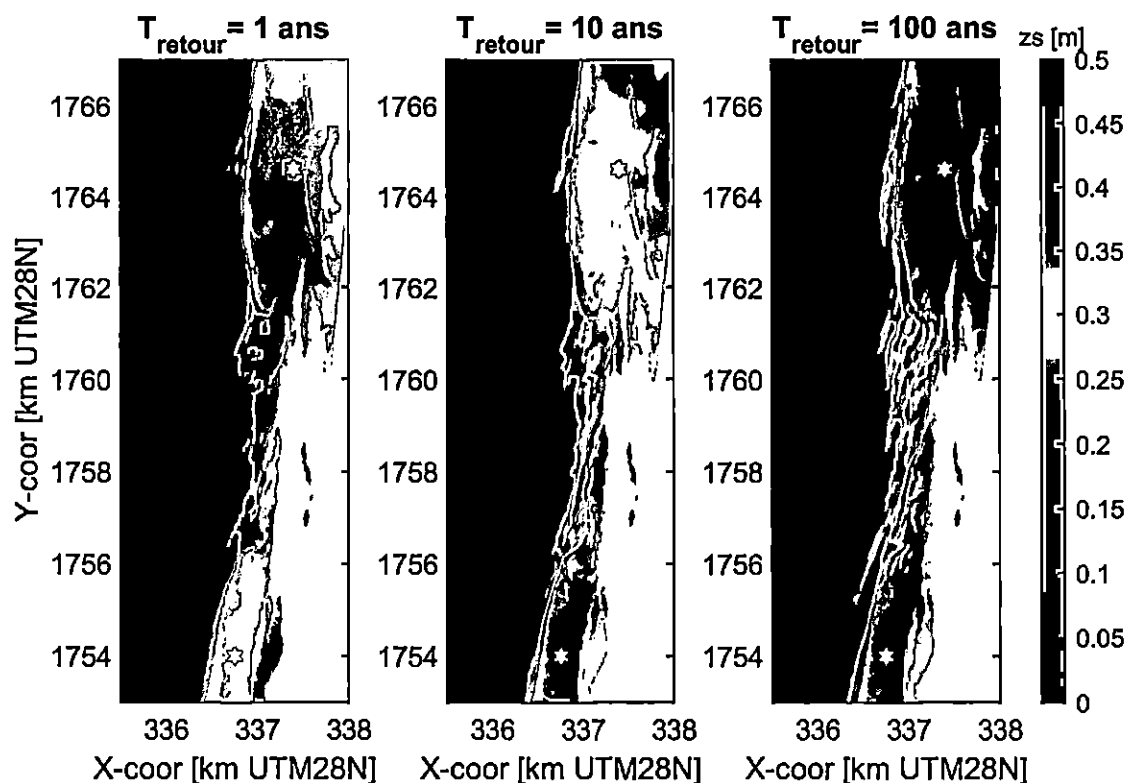


Figure 7-25 : Résultats du comportement hydrodynamique du modèle XBeach dans l'embouchure au moment du setup maximal induit par les vagues. Les graphiques représentent le niveau d'eau par rapport au niveau d'eau moyen (marée) pour une tempête avec une période de retour de 1, 10 et 100 ans, dans les conditions actuelles.

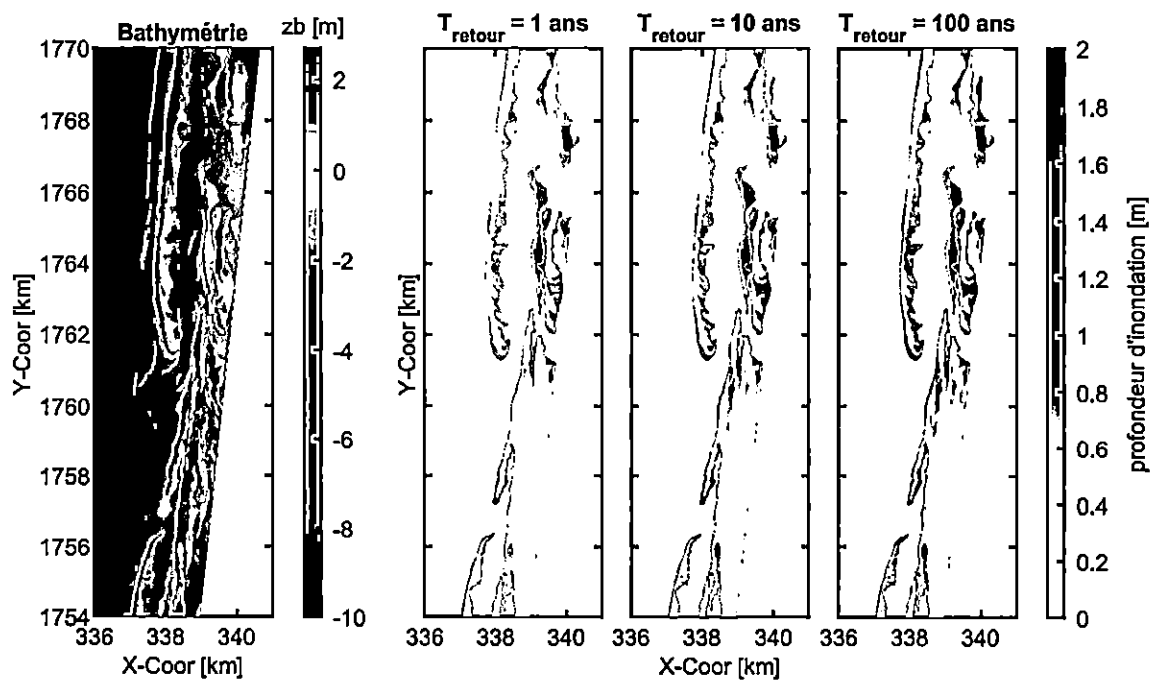


Figure 7-26 : Cartes de la profondeur d'inondation pour toutes les zones situées initialement au-dessus du niveau de marée haute dans les 3 scénarios de tempête. Les tempêtes avec une période de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentées pour le grand modèle de l'embouchure du fleuve Sénégal avec XBeach.

7.1.4.2 À l'horizon 2050

Pour étudier l'impact de l'élévation de niveau de la mer sur l'inondation et la stabilité de la flèche sableuse, des simulations complémentaires ont été réalisées pour l'horizon 2050. Dans l'ensemble, la stabilité du cordon littoral lors des tempêtes est surtout dépendante de la hauteur et largeur de la flèche sableuse, pas de la position de l'embouchure. Pour ensuite étudier les impacts des tempêtes sur les niveaux d'eau tout au long du fleuve, les niveaux d'eau à l'intérieur de l'embouchure lors des tempêtes sont utilisés comme donnée d'entrée dans les simulations hydrauliques fluviales (paragraphe 7.1.3) afin d'estimer les niveaux d'eau plus en amont et en aval, et pour différents positions de l'embouchure.

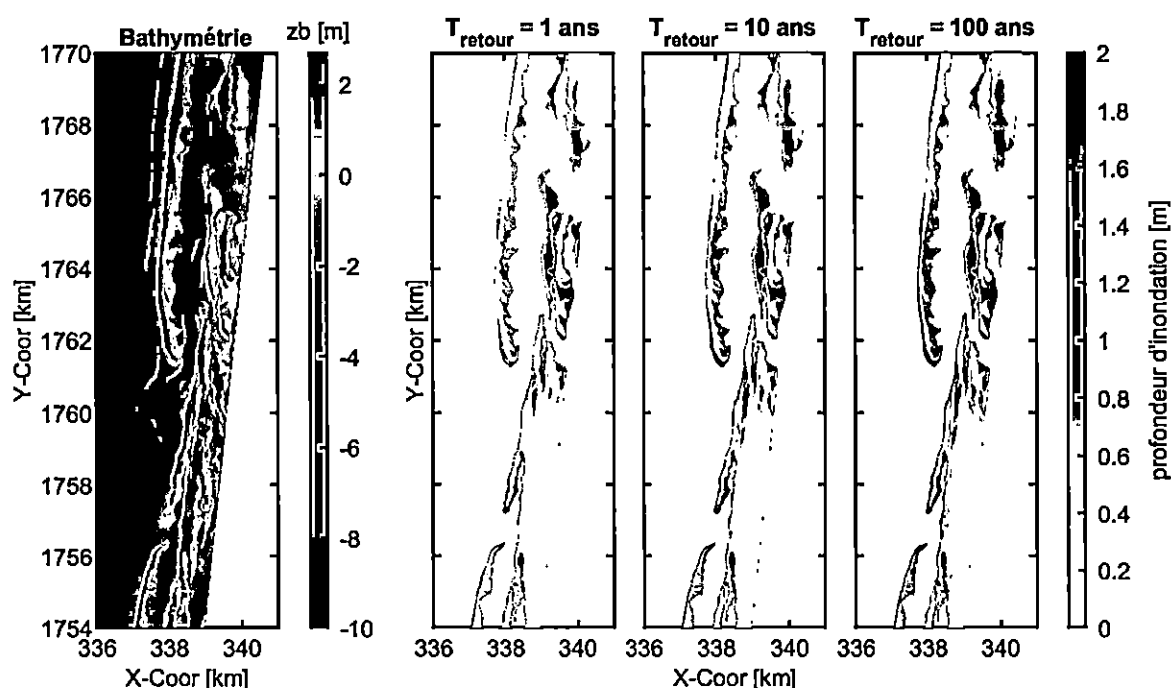


Figure 7-27: Cartes de la profondeur d'inondation pour toutes les zones situées initialement au-dessus de la marée haute dans les 3 scénarios de tempête à l'horizon 2050 (RCP 4.5). Les tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentées pour le grand modèle de l'embouchure du fleuve Sénégal avec XBeach.

Le risque d'inondation augmente légèrement pour une élévation du niveau de la mer de 19 cm, en particulier pour les tempêtes de 10 et 100 ans en raison de niveaux d'eau plus élevés (à voir la Figure 7-27). Les changements dans le comportement hydrodynamique sont faibles (Figure 7-27) et le setup est environ égale aux conditions actuelles (Figure 7-28). La flèche sableuse, bien qu'une submersion plus fréquente se produise, résiste à l'augmentation de la charge et aucune brèche n'est formée.

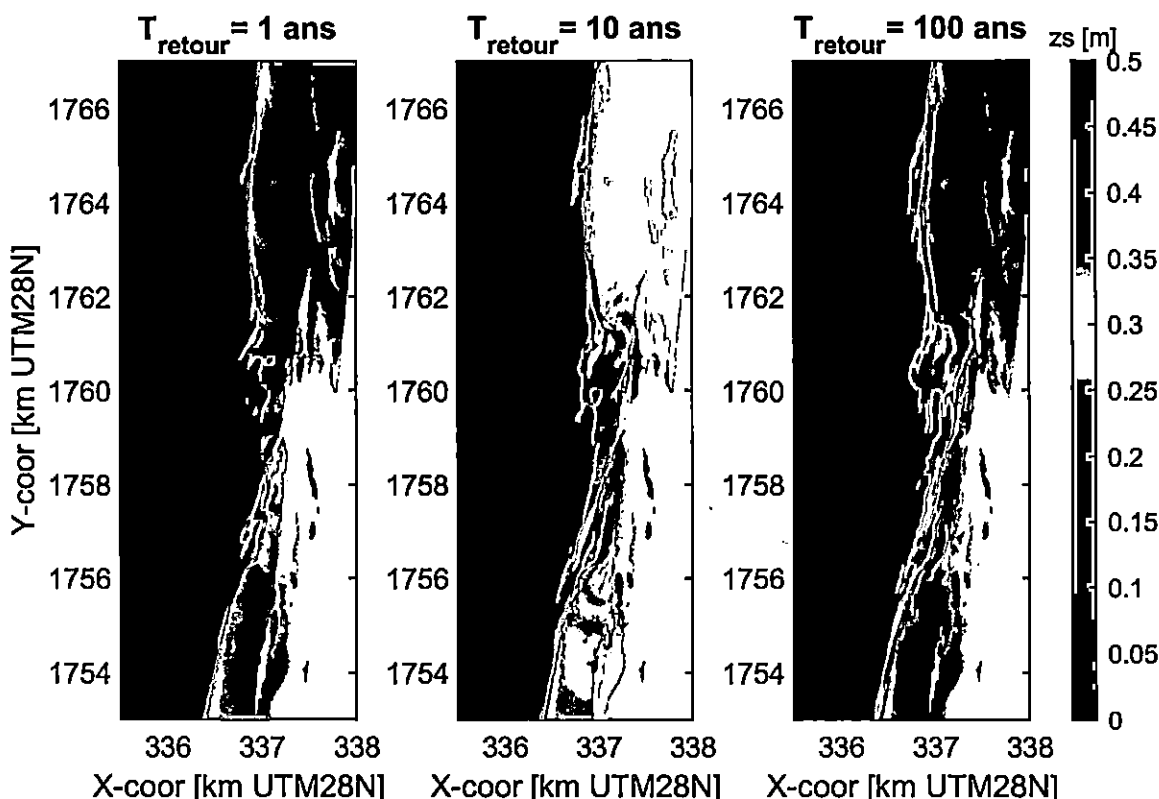


Figure 7-28 : Résultats du comportement hydrodynamique du modèle XBeach dans l'embouchure au moment du setup maximal induit par les vagues. Les graphiques représentent le niveau d'eau par rapport au niveau d'eau moyen (marée + élévation du niveau de la mer de 19 cm) pour des tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans à l'horizon 2050.

7.1.4.3 À l'horizon 2100

Une élévation du niveau de la mer de 66 cm (RCP 8.5) franchit un point de basculement. L'eau s'écoule librement à travers la pointe de la flèche sableuse, permettant à l'énergie des vagues de pénétrer loin au nord et au sud de l'embouchure du fleuve. L'augmentation des niveaux d'eau, en raison du setup accru dans l'embouchure (voir Figure 7-29 et Tableau 7-2) et l'énergie des vagues provoquent de grandes profondeurs d'inondation dans les zones autour de l'embouchure du fleuve et de la section de la flèche sableuse inondée.

Dans la Figure 7-31, les profondeurs d'érosion et de sédimentation sont représentées pour la tempête de 1/100 ans, montrant clairement l'érosion tout au long de la flèche sableuse, du delta du fleuve et de l'arrière-pays. Aucune brèche n'est formée pendant la tempête individuelle simulée, par contre la flèche sableuse est affaiblie, augmentant le risque de brèche lors d'un prochain événement. L'exposition à long-terme à des niveaux d'eau élevés pourrait rendre également la flèche sableuse plus fragile. Il convient de noter que dans les simulations ci-dessous, une éventuelle augmentation naturelle progressive de la hauteur de la flèche sableuse, avec l'élévation du niveau de la mer au cours des prochaines décennies, n'est pas prise en compte. Suivant la théorie de Bruun (1962), un système naturel pourrait en principe s'adapter aux variations du niveau de la mer si le niveau de la mer ne monte pas trop vite pour que le système s'adapte, et si la quantité des sédiments dans le système est suffisante. Des résultats pour l'évolution de l'embouchure à long terme sont présentés en paragraphe 7.1.1.

À l'horizon de 2100 il est fortement probable que les eaux contiennent un taux de salinité important. Les inondations des habitations et des terrains avec des eaux salées sont beaucoup plus préjudiciables qu'avec de l'eau douce.

La théorie suppose que des profils de plage exposés aux vagues s'érodent selon la hausse du niveau de la mer, divisé par la pente du profil actif de la plage entre le pied du profil actif et la crête de la berme ou dune, et peuvent monter en hauteur en reculant. Afin de s'affranchir de ces incertitudes, et d'aborder les risques imminents pour les conditions actuelles, des simulations ont été réalisées sans correction pour ces processus d'adaptation, et peuvent donc être considérées comme le scénario le plus conservateur.

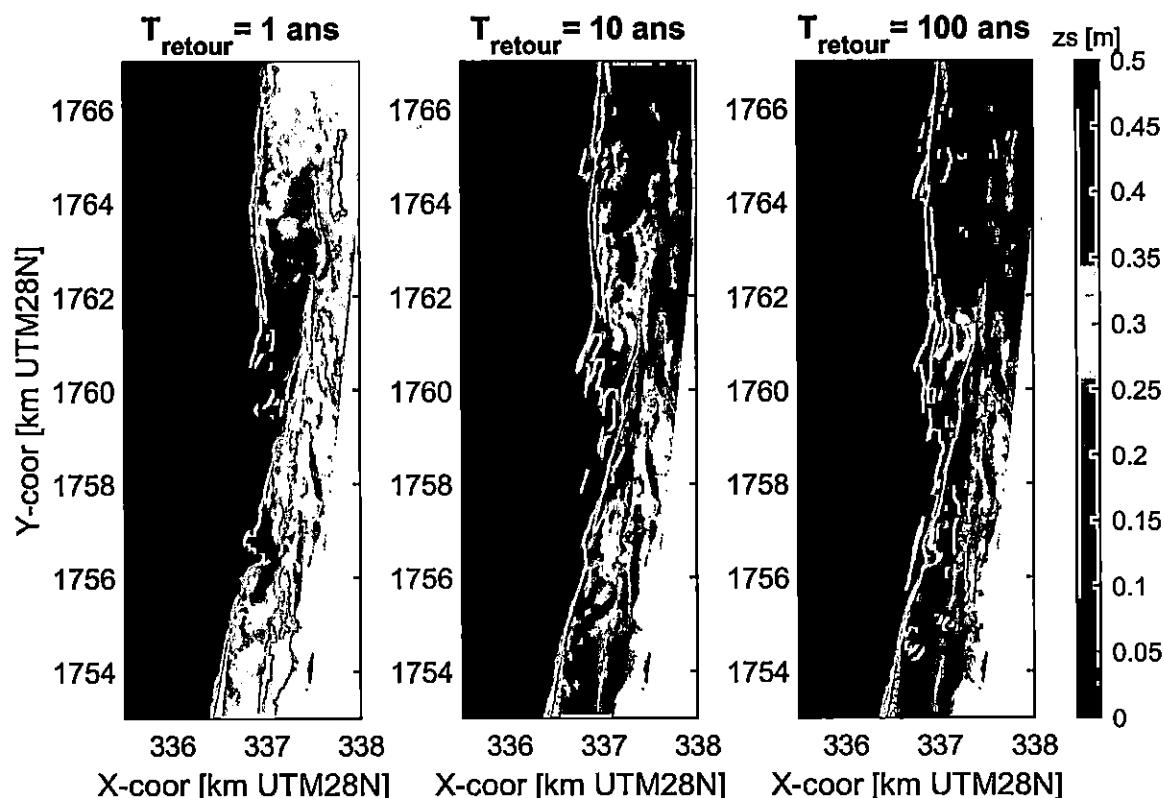


Figure 7-29 : Résultats du comportement hydrodynamique du modèle XBeach dans l'embouchure au moment du setup maximal induit par les vagues. Les graphiques représentent le niveau d'eau par rapport au niveau d'eau moyen (marée + élévation du niveau de la mer avec 66 cm) pour des tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans à l'horizon 2100.

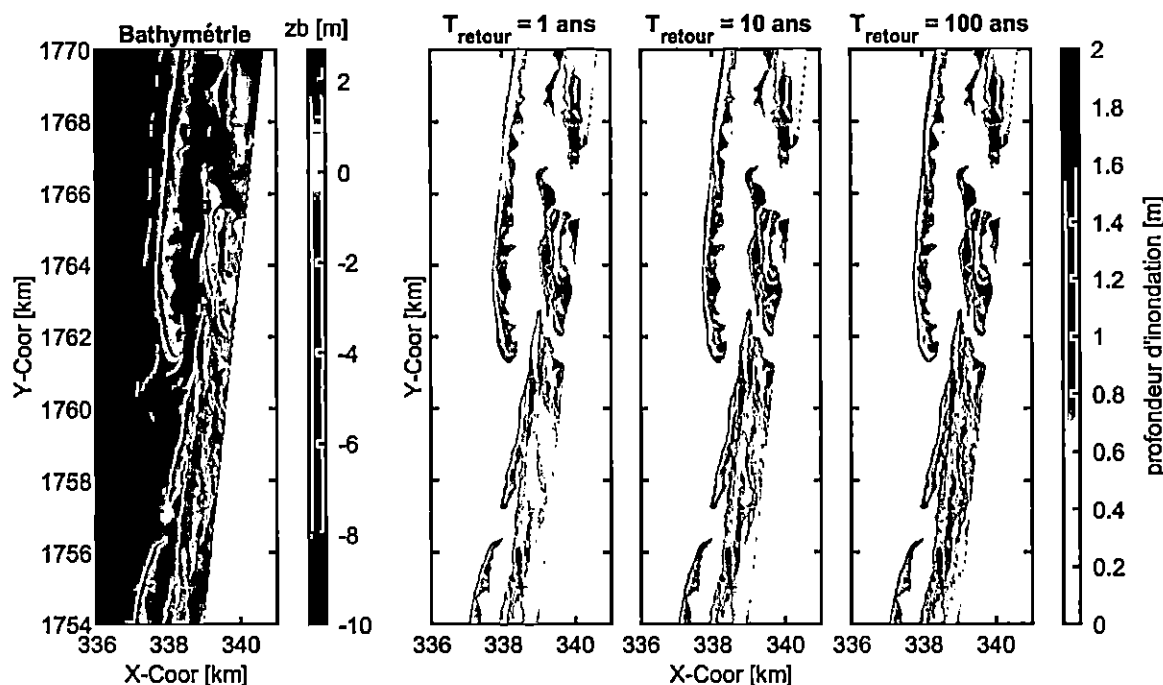


Figure 7-30 : Cartes de la profondeur d'inondation pour toutes les zones situées initialement au-dessus marée haute dans les 3 scénarios de tempête, à l'horizon 2100. Les tempêtes avec des périodes de retour de 1, 10 et 100 ans sont représentées pour le grand modèle de l'embouchure du fleuve Sénégal avec XBeach.

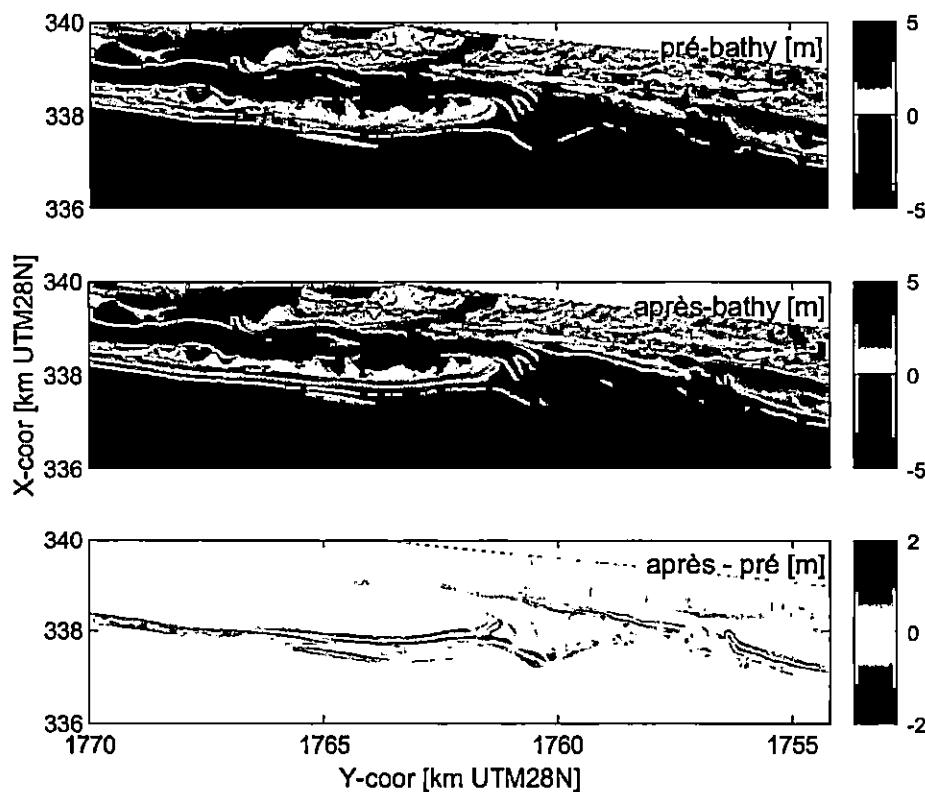


Figure 7-31 : En haut : topographie initiale du modèle XBeach de l'embouchure du fleuve Sénégal. Milieu : topographie post-tempête. En bas : taux d'érosion (rouge) - sédimentation (bleu), obtenus en soustrayant la topographie post-tempête de la topographie pré-tempête. Les résultats sont à l'horizon 2100 avec une tempête de période de retour de 100 ans.

7.1.4.4 Évènements concomitants

Les protections actuelles de la ville de Saint-Louis et des villages du Gandiolais permettent de parer à des tempêtes ponctuelles et modérées. En revanche, dans le cas d'évènements concomitants : une tempête et un fort débit du fleuve, le niveau de protection ne serait pas toujours suffisant. Même si la probabilité d'un tel évènement reste faible, celle-ci ne doit pas être négligée (voir §4.6 et rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d)).

L'impact des évènements concomitantes est discuté ci-dessous. Dans les analyses hydrauliques fluviales le risque d'inondation a été testé avec la surcote et le setup lié à une tempête modérée (avec une période de retour de 1 an – cf. Tableau 4-4). Afin d'étudier les risques liés à des évènements concomitants avec une tempête plus forte (période de retour de 10 ans) des simulations additionnelles ont été effectuées (Tableau 7-3). La distribution des niveaux d'eau dans le fleuve sans tempête a également été testée, avec un setup représentatif pour l'année de l'ordre de 6 cm.

Cependant, lors d'un évènement concomitant, les effets d'une tempête par intrusion de setup et surcote dans l'embouchure, diminuent quand elles se propagent en amont dans le fleuve, vers Saint-Louis. Ceci est grâce à des forts courants du fleuve lors d'une crue qui bloquent en partie l'influence des vagues.

- Avec l'embouchure du fleuve dans sa position actuelle, les différences de hauteur augmenteront de 27 cm à Saint-Louis lors d'une tempête de 1/10 ans, au lieu de 41 cm à l'embouchure elle-même. Pendant une tempête annuelle, les hauteurs augmenteront de 16 cm à Saint-Louis au lieu de 28 cm à l'embouchure elle-même.
- Avec l'embouchure plus au sud, au niveau de Degounaye, les effets des tempêtes seront encore plus réduits, et la hauteur d'eau à Saint-Louis augmente de seulement 8 cm lors d'une tempête de 1/10 ans. Et de seulement 6 centimètres lors d'une tempête annuelle.
- Lorsque l'embouchure atteint Potou, à l'horizon 2100, les débits centennaux seront moins forts (2331 m³/s au lieu de 3384 m³/s) ce qui réduira le blocage de l'influence des vagues. Malgré cela, le niveau maximum de la mer à Saint-Louis varie de seulement 16 cm en cas de forte tempête (1/10 ans) au lieu de 41 cm à l'embouchure elle-même.

Tableau 7-3 : Impact des événements concomitants sur le risque d'inondation à Saint-Louis.

Horizon d'étude	Position d'embouchure	Configuration océano-météorologique	Niveau mer max mIGN	Qmax Diama m³/s	Cmax Saint-Louis mIGN
2019	Position 2019 PK 11	Crue centennale + vagues moyennes	0.85	3384	1.25
		Crue centennale + Tempête de 1/1 an	1.13	3384	1.41
		Crue centennale + Tempête de 1/10 ans	1.26	3384	1.52
2050	Sud de Degounaye PK 23	Crue centennale + vagues moyennes	1.04	3384	1.84
		Crue centennale + Tempête de 1/1 an	1.32	3384	1.90
		Crue centennale + Tempête de 1/10 ans	1.45	3384	1.92
2100	Potou PK 31	Crue centennale + vagues moyennes	1.51	2331	1.89
		Crue centennale + Tempête de 1/1 an	1.79	2331	2.01
		Crue centennale + Tempête de 1/10 ans	1.92	2331	2.05

7.1.4.5 Conclusion

Avec la position de l'embouchure juste au sud de Saint-Louis, à l'heure actuelle, le risque d'inondation induit par les tempêtes semble restreint à des zones bordant la mer, et la surcote et le setup qui pénètrent dans l'embouchure atteindront environ 30 cm au niveau de Saint-Louis et le Gandiolais. Les zones touchées sont néanmoins plus étendues, dans le cas de fortes tempêtes (avec des périodes de retour > 100 ans), la surcote et le setup qui pénètrent dans l'embouchure atteindront environ 40 cm au niveau de Saint-Louis, et 45 cm au niveau des villages du Gandiolais.

Cependant, la réponse à l'élévation du niveau de la mer du cordon littoral est sévère, montrant des niveaux d'inondation importants (environ 60 cm à l'horizon de 2050 et environ 110 cm à l'horizon de 2100 pour des tempêtes avec une période de retour de 100 ans) et un risque élevé de formation de nouvelles brèches.

Il est clair que la flèche sableuse n'est pas suffisamment résiliente pour faire face aux tempêtes les plus fortes et les futurs changements liés à l'élévation du niveau de la mer peuvent constituer une menace pour la région de Saint-Louis. Pour éviter des impacts désastreux pour Saint-Louis et les villages du Gandiolais, certaines sections du cordon littoral vulnérables devraient être renforcées ou adaptées pour créer un cordon littoral plus résistant (§5.4).

Les protections actuelles de la ville de Saint-Louis et des villages du Gandiolais permettent de parer à des tempêtes ponctuelles et modérées. En revanche, dans le cas d'événements concomitants (une tempête et un fort débit du fleuve) les niveaux d'eau seront plus élevés qu'en cas d'événement isolé. Même si la probabilité d'un tel événement reste faible celle-ci ne doit pas être négligée.

Cependant, lors d'un évènement concomitant, des forts courants du fleuve bloquent en partie l'influence des vagues. Les effets d'une tempête par intrusion de setup et surcote dans l'embouchure, diminuent ainsi quand elles se propagent en amont dans le fleuve, vers Saint-Louis. Avec l'embouchure du fleuve dans sa position actuelle, lors d'une tempête annuelle pendant une crue centennale, les hauteurs augmenteront de 16 cm à Saint-Louis au lieu de 28 cm à l'embouchure elle-même. Avec l'embouchure plus au sud, au niveau de Degounaye, les effets des tempêtes seront encore plus réduits, et la hauteur d'eau à Saint-Louis augmentera de seulement 6 cm lors d'une tempête annuelle. Lorsque l'embouchure atteint Potou, à l'horizon 2100, les débits centennaux seront moins forts (2331 m³/s au lieu de 3384 m³/s) ce qui réduira le blocage de l'influence des vagues. Malgré cela, le niveau maximum de la mer à Saint-Louis varie de seulement 12 cm en cas de tempête annuelle au lieu de 28 cm à l'embouchure elle-même.

7.1.5 Intrusion saline

Le Tableau 7-4 donne un aperçu des simulations de référence et des exécutions de scénarios. Les premières simulations sont basées sur la bathymétrie actuelle de la zone d'étude (mesurée en juillet 2019 ; Fig.1a) et se concentrent sur les effets directs de l'élévation du niveau de la mer sur l'intrusion de salinité. Pour cela, une élévation du niveau de la mer de +19 cm et de +66 cm pour respectivement les horizons 2050 et 2100 est considérée en ajoutant les valeurs correspondantes au niveau d'eau aux limites ouvertes du modèle au large. L'effet de l'élévation du niveau de la mer sur le changement des amplitudes et phases des marées à cet endroit devrait être d'un ordre de grandeur plus petit et n'est donc pas pris en compte.

Les simulations '*bathy 2040 - faible débit*' et '*bathy 2040 - débit élevé*' (Tableau 7-4) utilisent la bathymétrie calculée par le modèle ShorelineS (§7.1.1) pour l'année 2040, dans laquelle l'embouchure du fleuve aura migré sur près de 8 kilomètres vers le sud (Fig. 1b). Pour ce scénario, seul le niveau actuel de la mer est pris en compte, ce qui est conforme à l'hypothèse du modèle ShorelineS à partir duquel la bathymétrie 2040 a été dérivée.

Tableau 7-4 : Vue d'ensemble des 8 simulations effectuées pour étudier l'impact de (i) l'élévation du niveau de la mer et (ii) de la migration vers le sud de l'embouchure du fleuve due au développement naturel du littoral, sur l'intrusion saline dans l'estuaire du fleuve Sénégal.

Simulation ID	Bathymétrie	Débit du fleuve	Niveau de la mer
<i>Ref. – faible débit</i>	2019	faible (moyen saison sèche)	+ 0 cm
<i>Ref. débit élevé</i>	2019	élevé (moyen saison de pluies)	+ 0 cm
<i>Ref. – faible débit +19cm</i>	2019	faible (moyen période sèche)	+ 19 cm
<i>Ref. – débit élevé +19cm</i>	2019	élevé (moyen saison de pluies)	+ 19 cm
<i>Ref. – faible débit +66cm</i>	2019	faible (moyen période sèche)	+ 66 cm
<i>Ref. – débit élevé +66 cm</i>	2019	élevé (moyen saison de pluies)	+ 66 cm
<i>bathy 2040 - faible débit</i>	2040 (sortie de ShorelineS)	faible (moyen période sèche)	+ 0 cm
<i>bathy 2040 – débit élevé</i>	2040 (sortie de ShorelineS)	élevé (moyen saison de pluies)	+ 0 cm

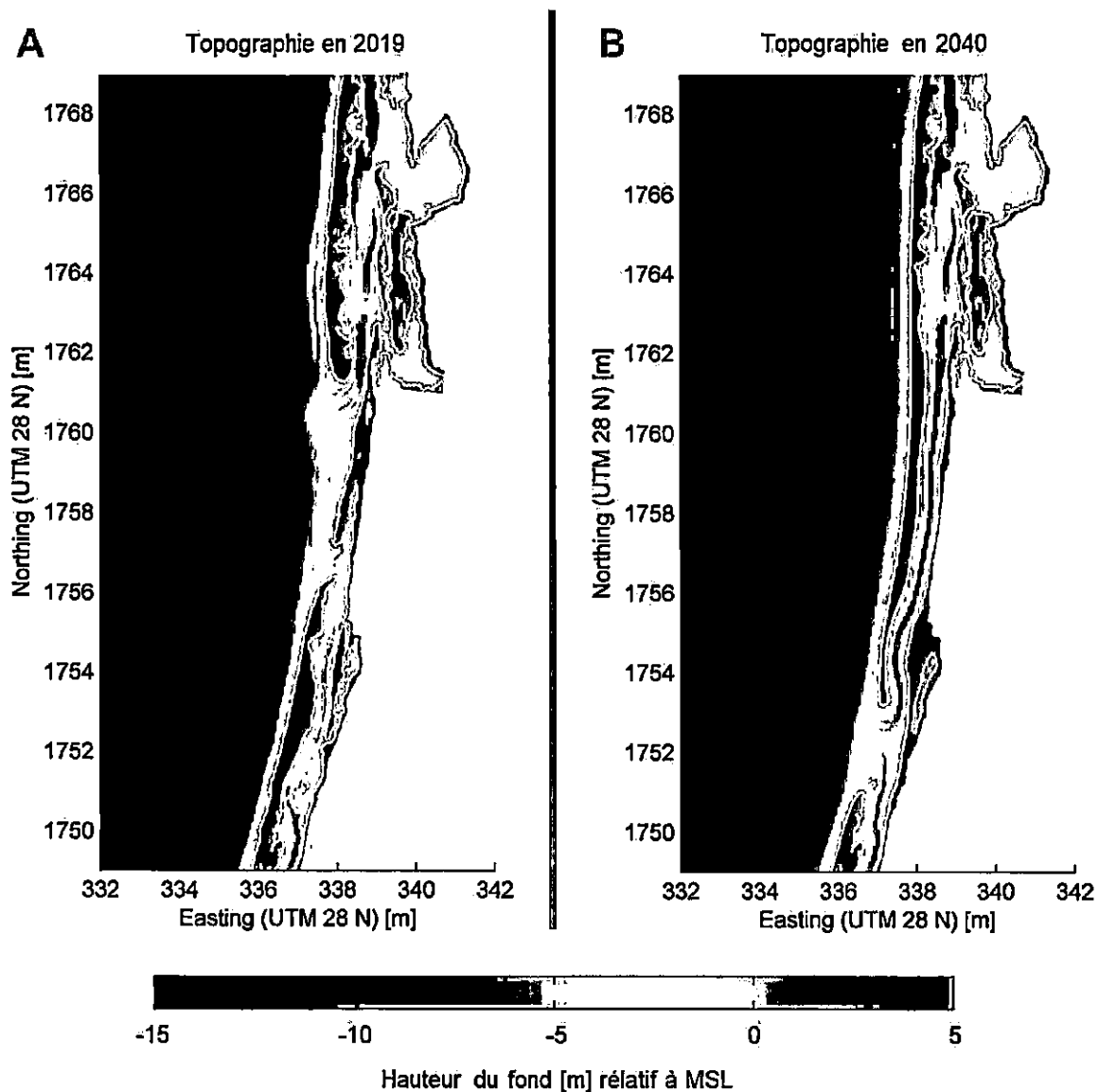


Figure 7-32 : Visualisation de la bathymétrie actuelle (A) et de la bathymétrie simulée pour 2040 par le modèle ShorelineS, (B) telles qu'utilisées pour les simulations avec le modèle Delft3D-FM.

7.1.5.1 Résultats

La Figure 7-33 montre la salinité simulée à la surface et près du fond dans les passages de référence à marée basse (panneaux de gauche) et à marée haute (panneaux de droite) sur la base d'un faible débit (Simulation *Ref. Faible débit* ; panneaux supérieurs) et d'un débit élevé (Simulation *Ref. débit élevé* ; panneaux inférieurs). Comme on peut déduire des différentes figures, il existe une différence considérable de salinité dans la zone d'étude entre les niveaux d'eau bas et haut (marée basse et haute) ainsi qu'entre les débits bas et élevés (saison sèche et des pluies). Les différences sont particulièrement prononcées dans la colonne d'eau supérieure (voir les graphiques de surface), tandis que les couches inférieures ont une variation plus conservatrice (voir les graphiques du bas).

À marée basse, c'est-à-dire au moment d'un cycle de marée où l'eau douce du fleuve atteint son épandage maximal dans la mer, la salinité dans tout le fleuve Sénégal et à l'embouchure du fleuve

baisse clairement. C'est particulièrement le cas lors de forts débits (panneaux du bas sur la Figure 7-33), lorsque la lagune située au sud de l'embouchure du fleuve présente également un minimum de salinité. À marée haute et à faible débit, l'eau de mer pénètre de nombreux kilomètres dans l'estuaire, entraînant une augmentation considérable de la salinité quasiment jusqu'à Diamas. En revanche, la pénétration en amont de l'eau de mer est fortement limitée lors des débits élevés (n'atteignant même pas la Capitainerie) et l'eau douce du fleuve provoque une nette baisse de salinité dans l'embouchure, bien que moindre qu'à marée basse.

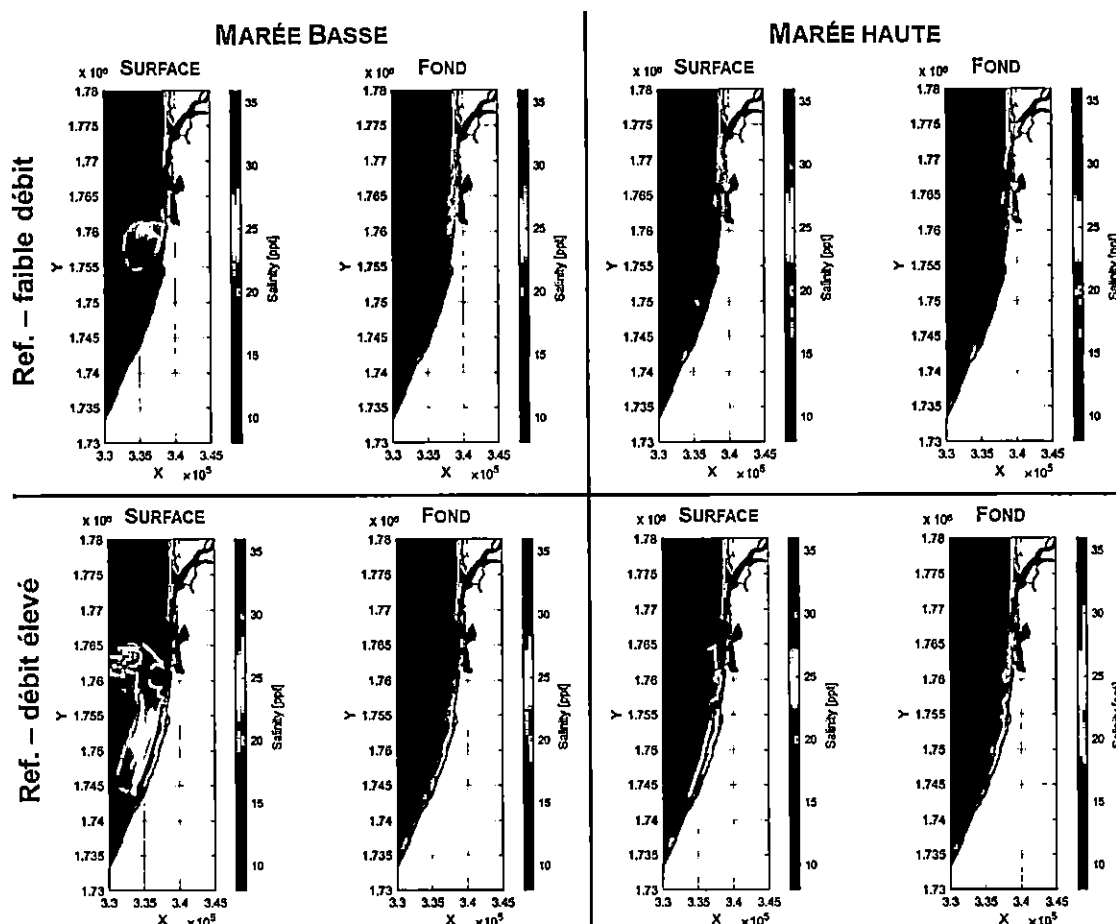


Figure 7-33 : Salinité simulée à la surface et près du fond dans les passages de référence à marée basse (panneaux de gauche) et à marée haute (panneaux de droite) basée sur un faible débit (Simulation Ref. faible débit ; panneaux supérieurs) et sur un débit élevé (Simulation Ref. débit élevé ; panneaux inférieurs).

Généralement, les scénarios d'élévation du niveau de la mer *Ref. Faible débit + 19 cm* et *Ref. débit élevé + 19 cm*, ainsi que *Ref. Faible débit + 66 cm* et *Ref. débit élevé + 66 cm* montrent les mêmes résultats que dans les analyses de référence décrites ci-dessus. Cependant, dans les deux scénarios d'élévation du niveau de la mer, on peut observer que (i) l'épandage vers la mer de l'eau douce du fleuve est réduit et (ii) la pénétration intérieure de l'eau de mer dans l'estuaire augmente. Bien que cet effet soit modéré en cas d'élévation du niveau de la mer de +19 cm (démonstré uniquement par le profil de salinité moyen en temps et en profondeur sur Figure 7-35), l'augmentation de la salinité dans l'embouchure du fleuve et plus en amont est clairement visible lorsqu'une élévation du niveau de la mer de +66 cm est appliquée. L'élévation du niveau de la mer entraîne l'augmentation maximale de la salinité pendant les faibles débits (saison sèche), lorsqu'un volume d'eau de mer plus important peut pénétrer dans l'estuaire, tandis que les effets sont limités pendant les débits élevés (saison des pluies), qui compensent principalement la hausse du niveau des mers.

Pour obtenir une vue plus détaillée, des profils de salinité du fleuve ont été générés depuis l'embouchure jusqu'au barrage de Diama, tel que définis à la Figure 7-34, incluant également la partie sud de l'estuaire. La Figure 7-35, montrant les profils de salinité en coupe transversale correspondants, étaye les observations dérivées des graphiques de surface et de fond de la Figure 7-33. Les coupes transversales démontrent en particulier que les effets de l'élévation du niveau de la mer sont limités dans la partie sud de l'estuaire, alors qu'une réponse beaucoup plus forte peut être observée dans la partie nord de l'estuaire, en particulier lors de faibles débits. De plus, il devient clair que l'élévation du niveau de la mer entraîne une augmentation de la salinité jusqu'à Diama (en particulier lors de faibles débits).

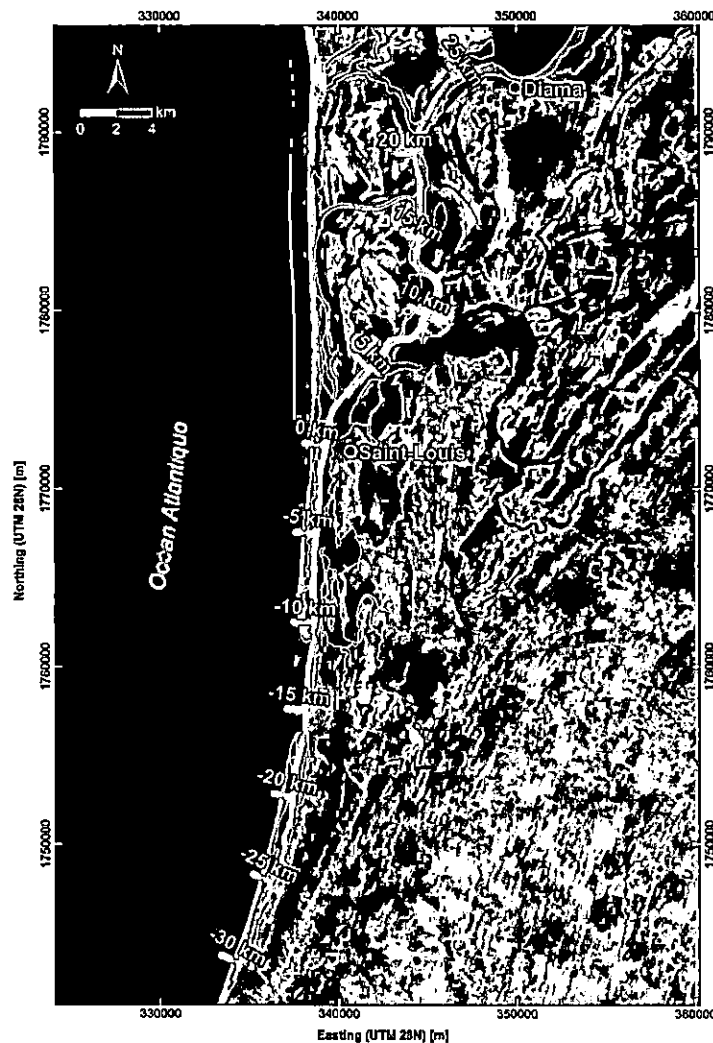


Figure 7-34 : Transects en coupe transversale à travers le fleuve Sénégal et la partie sud de l'embouchure actuelle du fleuve

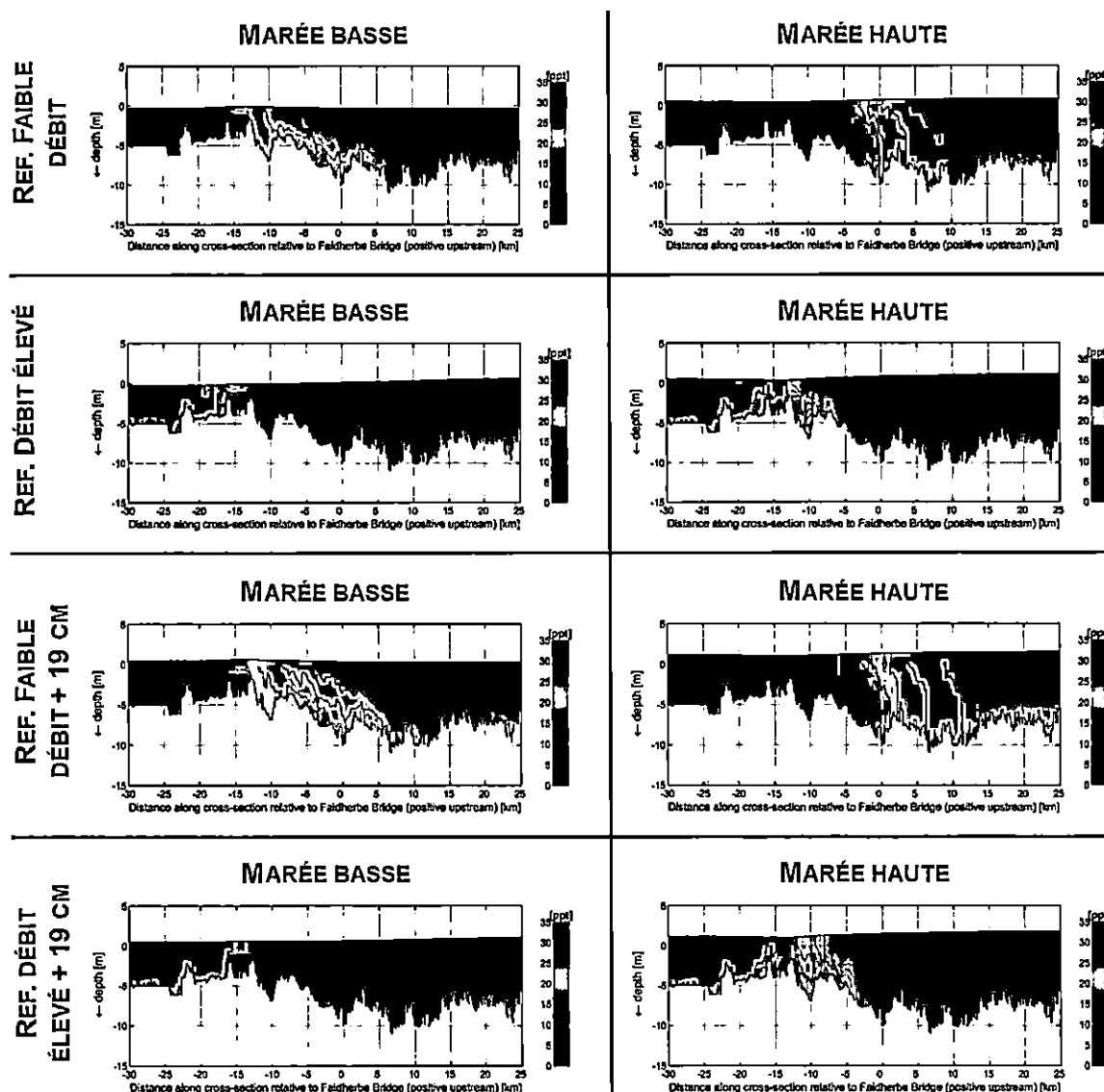


Figure 7-35 : Sections transversales de salinité à marée basse (panneaux de gauche) et à marée haute (panneaux de droite) basées sur un débit faible et sur un débit élevé pour la bathymétrie 2019 avec +0 cm d'élévation du niveau de la mer et +66 cm d'élévation du niveau de la mer .

Pour 2040, le modèle ShorelineS (§7.1.1) prévoit une migration vers le sud de l'embouchure du fleuve Sénégal de près de 8 km (Figure 7-32). L'application d'une bathymétrie correspondante dans le modèle Delft3D FM entraîne une distribution de salinité clairement modifiée dans la zone d'étude. Bien que les tendances générales (c'est-à-dire la distribution de la salinité pendant la marée basse / haute et les débits bas / élevés) soient comparables au cas de référence, il y a un net déplacement vers le sud des concentrations de salinité dans l'estuaire du fleuve Sénégal (Figure 7-36 et Figure 7-37).

Les concentrations de salinité dépassent rarement 0 ppm entre Diamas et la Capitainerie dans les quatre situations (marée basse / haute et débit bas / élevé). Un autre impact de la migration vers le sud de l'embouchure est une diminution considérable de la salinité dans la colonne d'eau supérieure de la partie sud, tandis qu'à une plus grande profondeur, l'eau saline reste présente.

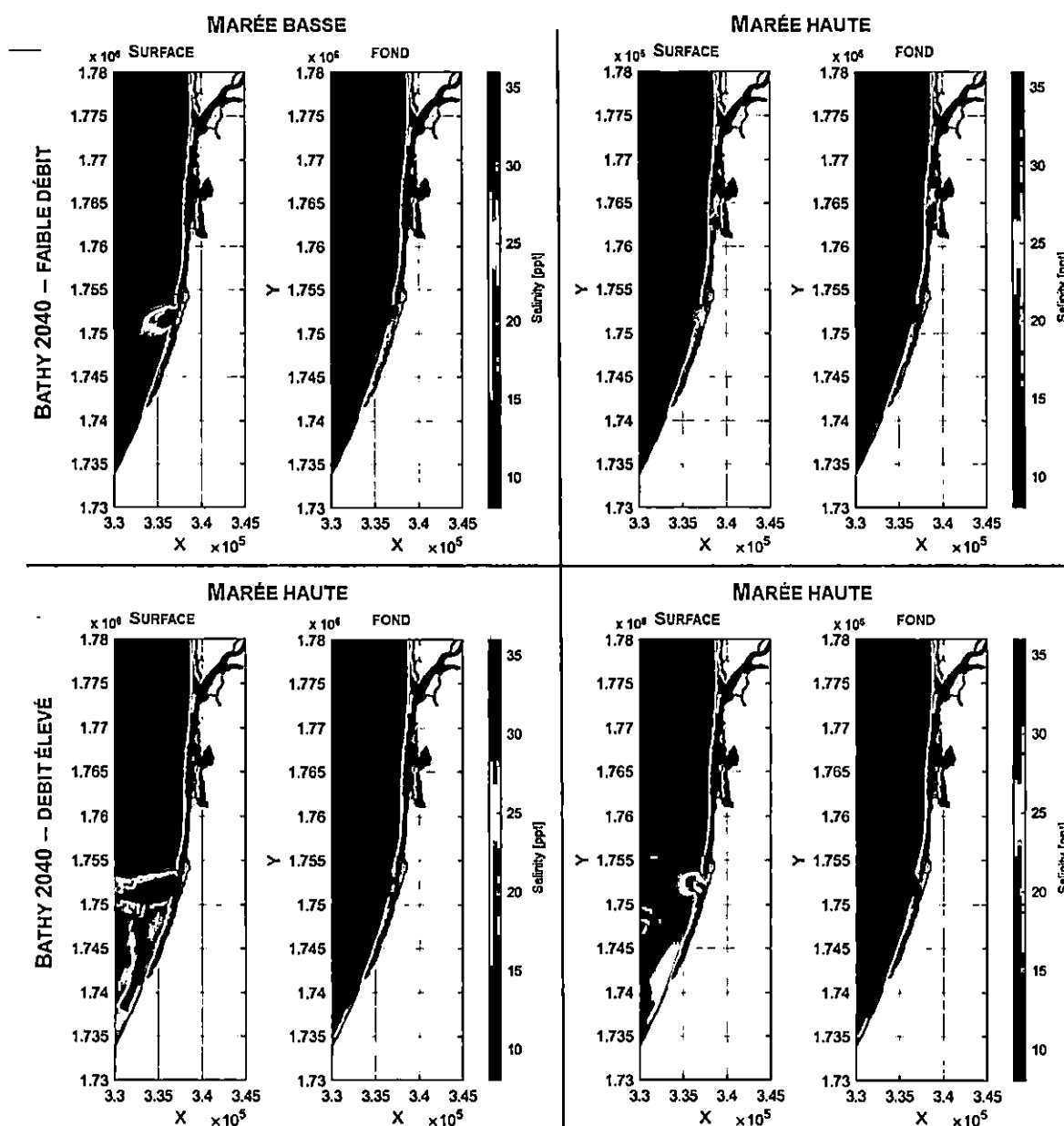


Figure 7-36 : La salinité simulée à la surface et près du fond pour le littoral de 2040 à marée basse (panneaux de gauche) et à marée haute (panneaux de droite) sur la base d'un faible débit (Simulation *Bathy 2040 - faible débit* ; panneaux supérieurs) et d'un débit élevé (Simulation *Bathy 2040 - faible élevé* ; panneaux inférieurs).

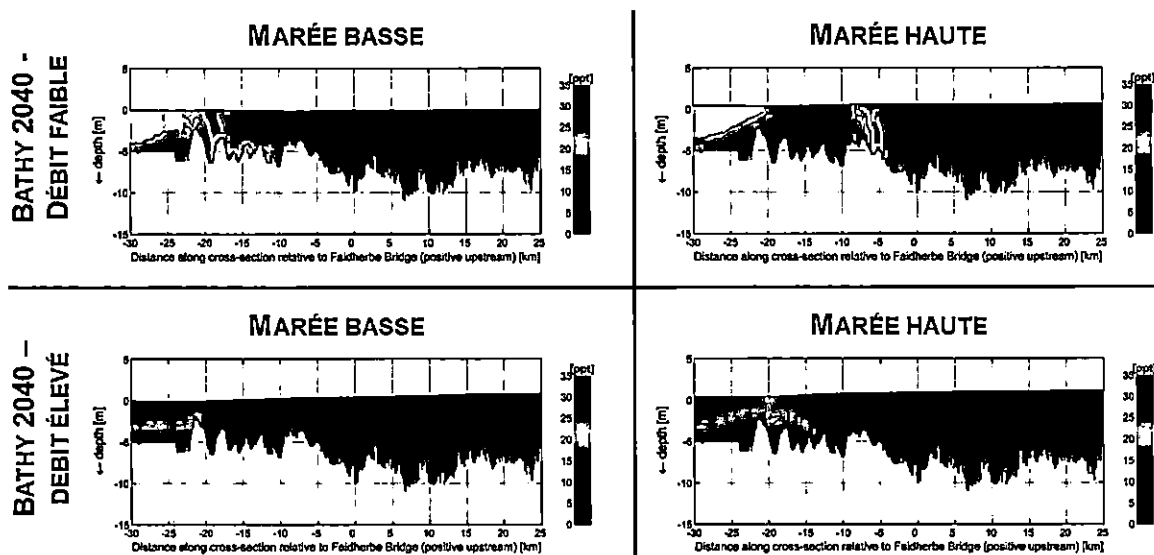


Figure 7-37 : Sections transversales de salinité à marée basse (panneaux de gauche) et à marée haute (panneaux de droite) basées sur un débit faible et un débit élevé pour la bathymétrie 2040 avec une élévation du niveau de la mer de +0 cm (Simulations *Bathy 2040 – faible débit* et *Bathy 2040 – faible élevé*).

7.1.5.2 Discussion et conclusions

Considérant la configuration de l'embouchure actuelle, l'intrusion d'eau salée dans l'embouchure, puis dans les eaux souterraines, provoque des effets négatifs notamment sur l'agriculture (rapport L4 (Egis Eau & Deltares, 2019d)). Afin de récapituler les résultats, la Figure 7-38 montre les profils de salinité moyenne en profondeur et en temps (sur la période du 10 mars 2019 au 8 avril 2019) pour le transect illustré sur la Figure 7-34.. Ainsi, elle donne un aperçu des effets d'élévation du niveau de la mer et de la migration de l'embouchure sur la salinité dans la zone d'étude.

Avec la configuration de l'embouchure actuelle, les effets de l'élévation du niveau de la mer sont relativement modérés à l'horizon de 2050 par rapport à la situation actuelle, mais plus prononcés à l'horizon de 2100. L'augmentation générale de la salinité dans l'estuaire en cas d'élévation du niveau de la mer est liée au fait qu'un volume d'eau saline plus important entre dans l'embouchure. Son impact en amont de la Capitainerie n'est considérable qu'en cas de faible débit du fleuve Sénégal, tandis que les concentrations de salinité descendent à 0 ppm en cas de fort débit pour tous les scénarios considérant une élévation de niveau de la mer. Ce n'est que dans la zone en aval de la Capitainerie (kilomètres -5 à -13) que l'on peut observer une nette augmentation de la salinité également en cas de débit élevé. Lors de faibles débits, l'augmentation de la salinité due à l'élévation du niveau de la mer peut être suivie jusqu'à Diama. Comparé à la partie nord de l'estuaire, l'impact de l'élévation du niveau de la mer sur la salinité est presque négligeable dans la zone au sud de l'embouchure actuelle du fleuve, pour les zones des villages du Gandiolais, car le niveau de salinité actuel est déjà très élevé (> 30 ppm).

Avec la migration de l'embouchure vers le sud, l'intrusion d'eau salée se limitera progressivement plus au sud, et un retour à la situation de 2003 pourrait être observé (lignes bleu foncé). En même temps, les concentrations de salinité dans la lagune au sud de l'embouchure du fleuve baissent clairement. Ceci est associé à un plus grand débit d'eau douce (en particulier lors d'un débit élevé) passant par l'embouchure et entrant directement dans la lagune, où l'eau douce se mélange à l'eau saline et réduit ainsi la salinité. Dans la bathymétrie prévue pour 2040 (Figure 7-32), aucune embouchure distincte n'existe, ce qui pourrait entraîner le débit du fleuve dans une direction plus à l'ouest, c'est-à-dire vers la

mer (comme c'est actuellement le cas) et empêcher ainsi l'eau douce d'entrer dans la partie sud de l'estuaire.

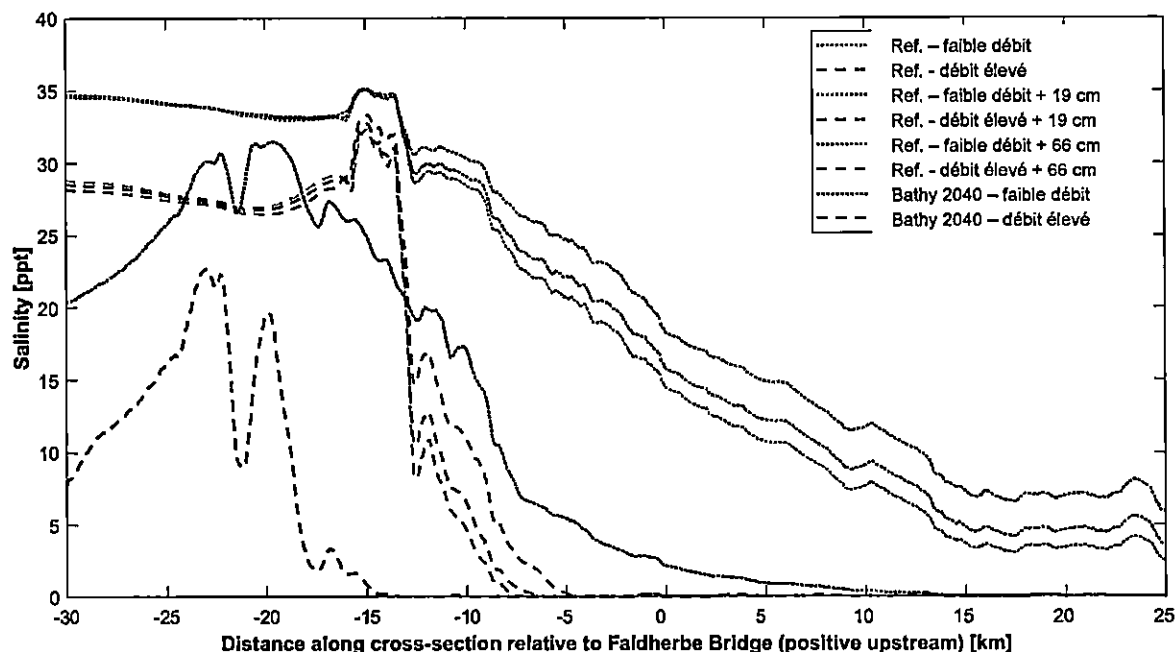


Figure 7-38 : La salinité dans le fleuve moyennée dans la profondeur et la durée (sur la période du 10 mars 2019 au 8 avril 2019) en coupe transversale pour le transect allant de Diama à la zone de l'estuaire au sud pour tous les simulations.

7.2 Mesures complémentaires envisagées

7.2.1 Le renforcement et l'exhaussement du cordon littoral ?

Les modélisations réalisées dans le scénario 1, ont montré le risque existant de surverse sur le cordon et de formation de nouvelles brèches au nord et au sud de Saint-Louis.

Il a donc été étudié l'impact hydraulique du renforcement et de l'exhaussement de l'ensemble du cordon littoral au nord et au sud de Saint-Louis.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 7-5 pour l'horizon 2100. Les cotes correspondantes au scénario 1 avec surverse sont établies sous l'hypothèse qu'il n'y a pas formation de brèche.

Tableau 7-5 : Impact de la rehausse du cordon littoral sur le risque d'inondation sur Saint-Louis

Horizon d'étude	Position de l'embouchure	Période de retour (ans)	Débit (m³/s)	Cote max Saint-Louis (mIGN)	
				Scénario 1 (Avec surverse)	Rehausse du cordon (sans surverse)
Horizon 2100	Potou PK 31	2	1476	1.75	1.75
		5	1885	1.91	1.95
		10	2080	1.97	2.05
		30	2263	2	2.15
		100	2331	2.01	2.20

Il est observé une augmentation des niveaux de crue à Saint-Louis :

- De +8 cm pour une crue décennale,
- De +19 cm pour une crue centennale.

Les modélisations réalisées mettent en évidence que la position de l'embouchure de fleuve n'est pas le seul facteur permettant d'expliquer la vulnérabilité de la région de Saint-Louis aux inondations. Les actions réalisées sur le cordon littoral situé entre Potou et Keur Macène ont également une incidence directe sur le niveau de vulnérabilité de Saint-Louis aux inondations.

Le renforcement et l'exhaussement du cordon littoral permettent d'empêcher le risque de brèche au nord et au sud de Saint-Louis et par conséquent des dommages similaires à ceux constatés lors de la rupture artificielle de 2003. Cependant, ces actions augmentent le risque inondation sur Saint-Louis et le delta.

Dans le cadre du scénario 1, il est donc conseillé de limiter les travaux de confortement/rehausse du cordon littoral au nord de Saint-Louis sur un linéaire de 15 km (Figure 5-11 : Points bas nord Saint-Louis), ceci pour éviter le risque majeur de brèche au nord immédiat de Saint-Louis.

7.2.2 Autres mesures

Les phases précédentes d'étude ont défini les mesures d'accompagnement supplémentaires pouvant être envisagées dans le cadre du scénario 1. Ces mesures sont les suivantes :

- La balisage d'un chenal permettant un accès sécurisé en mer pour les pêcheurs.

Le dragage régulier du chenal et la modification du balisage sont importants pour les pêcheurs. Cependant, l'entretien d'un chenal de navigation naturel par dragage sera très exigeant en raison de la dynamique élevée des courants de marée, du fleuve et des vagues dans l'embouchure et des taux de migration élevés. Le dragage devra probablement être effectué plusieurs fois par an pour maintenir la position du chenal, et concerne de grands volumes de sable.

Notre suggestion serait plutôt d'investir dans la présence d'un bateau de sauvetage, la mise à jour régulière du balisage du chenal avec des bouées lumineuses, la formation des pêcheurs (à la navigation dans l'embouchure du fleuve, et à l'adoption de mesures basiques de sécurité : alerte sur les conditions en mer avant sortie, gilet de sauvetage...).

L'adaptation du balisage sera probablement nécessaire sur une base mensuelle. Les instruments disponibles (comme le jet ski), acquis au cours du projet PROGEP, pourraient bien être utilisés pour fournir plus d'informations sur la bathymétrie du chenal.

- Un grand rechargement en sable devant Saint-Louis pourrait également être mis en place pour que les pêcheurs puissent accoster leurs bateaux sur la plage, comme ils le faisaient avant la brèche de 2003. En outre, un nouveau marché aux poissons pourrait être créé à proximité de la plage pour faciliter la vente du poisson. Ce rechargement permettrait également la protection du front bâti de Saint-Louis. Les matériaux de ce rechargement pourraient être issus d'un dragage partiel de l'embouchure du fleuve.
- Une gestion par dragage et rechargement des plages du Gandiolais permettant de limiter l'érosion côtière,



Figure 7-39 : Rechargements des plages des villages du Gandiolais proposées, afin de contrebalancer l'érosion prévu avec la migration de l'embouchure vers le sud dans les décennies à venir.

Ces rechargements de sable devront être mis en place au cours des décennies à venir, afin de contrebalancer l'érosion prévue du fait de la migration de l'embouchure vers le sud. Les prévisions pour les changements de la position du trait de côte dans les décennies à venir sont basées sur les prévisions du modèle ShorelineS, en prenant compte une marge d'erreur. Nous proposons que les rechargements des plages soient réalisés sous forme d'une berme de sable d'environ 50 m de large et d'environ 2 m de haut. Le Figure 7-39 donne un aperçu des bâtiments et villages bordant la mer, qui risquent d'être touché par l'érosion.

Plus spécifiquement, il s'agit d'environ :

- Ndiedene, Ndiébene : $2.25 \text{ km} \times 50 \text{ m} \times 2 \text{ m} = 225.000 \text{ m}^3$. Mise en œuvre en une fois dans les 5 prochaines années.
- Niol : $1.25 \text{ km} \times 50 \times 2 = 125.000 \text{ m}^3$. Mise en œuvre en une fois dans les 5 à 10 prochaines années.
- Mouit : $1.25 \text{ km} \times 50 \times 2 = 125.000 \text{ m}^3$. Mise en œuvre en une fois dans 10 ans.
- Guembeng : $500 \text{ m} \times 50 \times 2 = 50.000 \text{ m}^3$. Mise en œuvre en une fois dans 15 ans.
- Degounaye & Mboumbaye : $2000 \text{ m} \times 50 \times 2 = 200.000 \text{ m}^3$. Mise en œuvre en une fois dans 20 ans.
- Tare : $500 \text{ m} \times 50 \times 2 = 50.000 \text{ m}^3$. Mise en œuvre en une fois dans plus de 40 ans.
- Mbao : $(1.2 \text{ km} + 0.5 \text{ km}) \times 50 \times 2 = 170.000 \text{ m}^3$. Mise en œuvre en une fois dans plus de 40 ans.
- Gabar : $700 \text{ m} \times 50 \times 2 = 70.000 \text{ m}^3$. Mise en œuvre en une fois dans plus de 40 ans.

Soit un volume total d'environ : $1.000.000 \text{ m}^3$

- La protection des principaux enjeux sur le milieu naturel : délocalisation de l'île aux oiseaux,
- La stabilisation de la pointe nord de la Langue de Barbarie au fur et à mesure de sa migration vers le Sud, par pièges à sable, plantation de Filaos, sans cependant éviter la possibilité de surverse (et donc de brèches) par-dessus le cordon littoral.

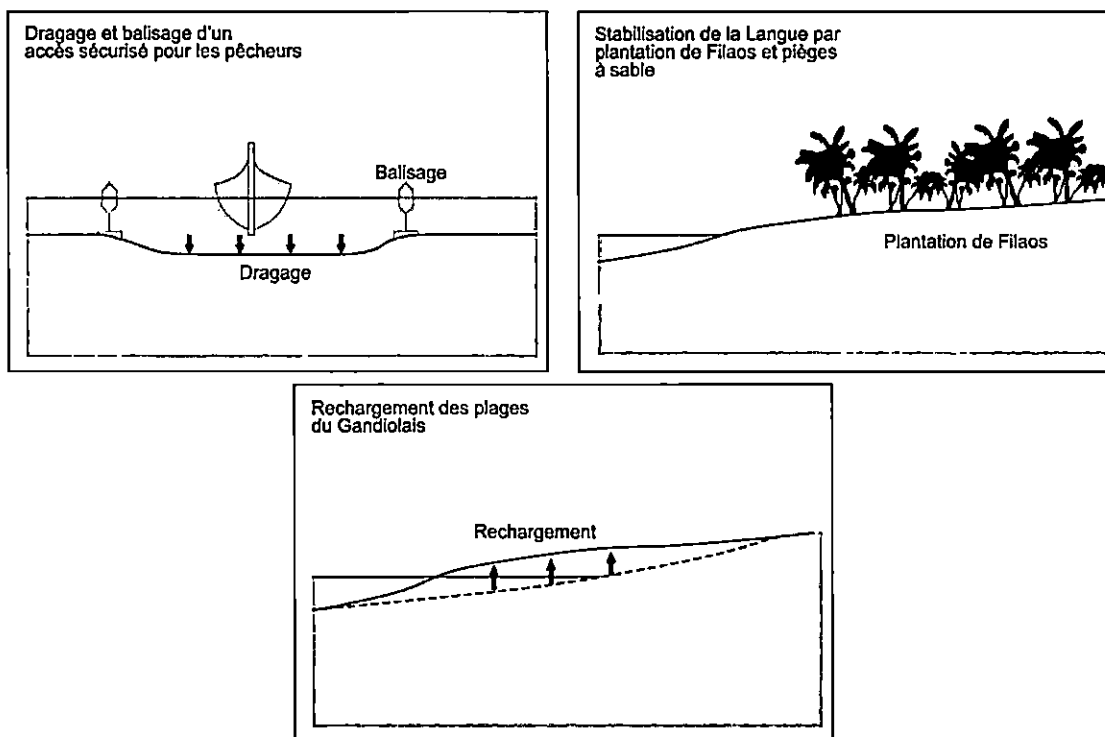


Figure 7-40 : Mesures complémentaires envisagées

7.3 Coût du scénario

Le coût global du scénario 1 est estimé à **9.4 milliards FCFA**, réparti de la manière suivante :

Tableau 7-6 : Coût du scénario 1

Description des travaux	Investissement	Exploitation
	Millions FCFA HT	Millions FCFA HT
Mesures complémentaires		
Balisage chenal pêcheurs	200	67
Rechargement plages Gandiolais	4 940	0
Délocalisation Ile aux oiseaux PLNB	1 300	0
Stabilisation Langue de Barbarie sud	1 240	124
Exhaussement et stabilisation Langue de Barbarie nord	1 726	173
Total	9 406	363

7.4 Evaluation du scénario

7.4.1.1 Du point de vue de l'évolution hydrodynamique et morphodynamique

L'évolution morphodynamique à court terme pour le scénario 1 est caractérisée par la migration et l'élargissement de l'embouchure du fleuve ; la flèche sableuse au nord migre vers le sud et le sable s'accumule dans la partie centrale de l'embouchure du fleuve Sénégal. Ce comportement est conforme aux tendances observées entre 2014 et 2019.

L'embouchure du fleuve est très dynamique et exposée aux vagues. Les vitesses d'écoulement dans l'embouchure sont fortes et imprévisibles car régies par les vagues, les marées et le débit du fleuve, ainsi que les variations importantes de profondeurs. Les vitesses d'écoulement peuvent atteindre des valeurs allant jusqu'à 2,2 m/s pendant le jusan lors d'un débit élevé du fleuve Sénégal. Ces circonstances ne changeront pas avec la migration de l'embouchure vers le sud, et resteront très éprouvantes pour les pêcheurs qui tentent de passer par l'embouchure pour se rendre en mer, causant jusqu'à présent de nombreuses victimes.

Dans les décennies à venir, la migration de l'embouchure vers le sud exposera à l'érosion, un par un, les villages du Gandiolais. Les résultats du ShorelineS montrent que l'embouchure aura migré d'environ 15 km vers le sud à l'horizon 2060, et que la brèche s'élargira d'abord (comme observé par Delft3D) pour se réduire ensuite à 1 km maximum, comme l'embouchure naturelle en 2003 (actuellement 6 km de large). À 2050, l'embouchure du fleuve aura migré vers le sud d'environ 12 km et sera située au sud du village de Degounaye, la largeur de l'embouchure est estimée à environ 1.1 km. L'embouchure parviendrait à Potou (sa position originelle de 2003) en 2076. Pour le Gandiolais, la réduction de la largeur de la brèche semble plutôt favorable. Elle mène à des variations du trait de côte moins importantes que celles prévues par l'extrapolation linéaire basée sur les développements observés des dernières années. À noter que le modèle ShorelineS ne prend pas en compte l'impact des tempêtes, donc que durant le passage de l'embouchure (quand les vagues de tempête peuvent pénétrer l'embouchure et atteindre le rivage gauche du fleuve), les effets sur le littoral peuvent être plus néfastes que prédits actuellement.

En prenant en compte l'adaptation du cordon littoral à l'élévation du niveau de la mer (recul du trait de côte et augmentation de la crête selon la théorie de Bruun, 1962), il faudra compter, à l'horizon 2050, sur une érosion additionnelle d'environ 25 m pour les plages situées près de Saint-Louis, et d'environ le double pour 2100.

Il convient de noter que les effets du projet en cours (gazier Tortue/Ahmeyin (paragraphe 6.1), le port de N'Diogo (paragraphe 6.3) et la protection d'urgence du front de mer de la ville de Saint-Louis (paragraphe 6.2)) ne sont pas considérés pendant les prédictions présentées dans cette section. Il faut donc considérer des zones susceptibles de subir une érosion additionnelle causée par ces projets, ce qui rendra la flèche sableuse moins stable que dans la situation actuelle comme présenté ici. Il est recommandé de surveiller ces zones à risque dans les décennies à venir, pour anticiper des contre-mesures comme des apports de sable. Lors du projet SERRP ces influences seront étudiées plus en détail.

7.4.1.2 Du point de vue des risques d'inondation induits par les crues du fleuve

De 2020 à 2050, les inondations vont s'aggraver au fur et à mesure du déplacement de l'embouchure vers le Sud.

A l'état actuel (2019), La plus grande partie de la ville de Saint-Louis (97%) est protégée contre les inondations jusqu'à l'occurrence centennale. Il n'est pas observé de déversements sur le cordon littoral.

Du fait de la migration de l'embouchure vers le sud, à l'horizon 2050, la ville de Saint-Louis se trouve confrontée à des inondations importantes dès l'occurrence décennale, pour des débits de l'ordre de 2300 – 2400 m³/s. Pour des crues trentennale et centennale, des surverses sur le cordon littoral commencent à apparaître au nord de Saint-Louis et sont susceptibles d'initier une nouvelle brèche, exposant la ville à un risque majeur : la formation d'une nouvelle embouchure du fleuve au nord de Saint-Louis avec migration vers le sud en direction de la ville.

A l'horizon 2100, l'embouchure aura atteint sa position la plus éloignée, à Potou, et la fréquence d'inondation de Saint-Louis devient inférieure à 2 ans. Pour une crue biennale, la ville est sujette à de fortes inondations, les cotes dépassant 1.75 mIGN au pont Faidherbe. Dès l'occurrence quinquennale, le risque de formation de brèche au nord et au sud de Saint-Louis est fort, exposant à la fois Saint-Louis et le littoral Gandiolais à une très forte érosion.

7.4.1.3 Du point de vue des risques d'inondation et de formation de nouvelles brèches induits par les tempêtes

Avec la position de l'embouchure actuelle, le risque d'inondation induit par les tempêtes semble restreint à des zones bordant la mer, et la surcote et setup qui pénètrent dans l'embouchure atteindront environ 30 cm au niveau de Saint-Louis et du Gandiolais. Les zones touchées sont néanmoins plus étendues, dans le cas de fortes tempêtes (avec des périodes de retour > 100 ans), et la surcote et setup qui pénètrent dans l'embouchure atteindront environ 40 cm au niveau de Saint-Louis, et 45 cm au niveau des villages du Gandiolais.

Cependant, la réponse à l'élévation du niveau de la mer du cordon littoral est sévère, montrant des niveaux d'inondation importants (environ 60 cm à l'horizon 2050 et environ 110 cm à l'horizon 2100 pour

des tempêtes avec une période de retour de 100 ans) et un risque élevé de formation de nouvelles brèches. Il est clair que la flèche sableuse n'est pas suffisamment résiliente pour faire face aux tempêtes plus fortes et à l'élévation du niveau de la mer, ce qui peut constituer une menace pour la région de Saint-Louis. Pour éviter des impacts désastreux pour Saint-Louis et les villages du Gandiolais, **plusieurs sections du cordon littoral vulnérables devraient être renforcées ou adaptées pour créer un cordon littoral plus résistant.**

Avec la migration de l'embouchure vers le sud dans les décennies à venir, les augmentations des niveaux d'eau dans le fleuve, provoquées par la pénétration de surcote et setup lors d'une tempête, diminueront fortement en amont de l'embouchure, protégeant à terme les villages du Gandiolais et Saint-Louis.

Les protections actuelles de la ville de Saint-Louis et des villages du Gandiolais permettent de parer à des tempêtes ponctuelles et modérées. En revanche, dans le cas d'événements concomitants (une tempête et un fort débit du fleuve) les niveaux d'eau seront plus élevés qu'en cas d'événement isolé. Même si la probabilité d'un tel événement reste faible celle-ci ne doit pas être négligée.

Cependant, lors d'un événement concomitant, des forts courants du fleuve bloquent en partie l'influence des vagues. Les effets d'une tempête par intrusion de setup et surcote dans l'embouchure, diminuent ainsi quand elles se propagent en amont dans le fleuve, vers Saint-Louis. Avec l'embouchure du fleuve dans sa position actuelle, lors d'une tempête annuelle pendant une crue centennale, les hauteurs augmenteront de 16 cm à Saint-Louis au lieu de 28 cm à l'embouchure elle-même. Avec l'embouchure plus au sud, au niveau de Degounaye, les effets des tempêtes seront encore plus réduits, et la hauteur d'eau à Saint-Louis augmente de seulement 6 centimètres lors d'une tempête annuelle. Lorsque l'embouchure atteint Potou, à l'horizon 2100, les débits centennaux seront moins forts (2331 m³/s au lieu de 3384 m³/s) ce qui réduira le blocage de l'influence des vagues. Malgré cela, le niveau maximum de la mer à Saint-Louis varie de seulement 12 cm en cas de tempête annuelle au lieu de 28 cm à l'embouchure elle-même.

7.4.1.4 Du point de vue de la salinité

L'intrusion d'eau salée dans l'embouchure, puis dans la nappe, provoquera dans les décennies à venir des effets négatifs notamment sur l'agriculture (rapport L5-1). Avec la configuration de l'embouchure actuelle, les effets de l'élévation du niveau de la mer sont relativement modérés à l'horizon 2050 par rapport à la situation actuelle, mais plus prononcés à l'horizon 2100. Avec la migration de l'embouchure vers le sud dans les décennies à venir, l'intrusion d'eau salée se limitera progressivement plus au sud, et un retour à la situation de 2003 pourrait être observé, ce qui sera plus bénéfique pour l'agriculture du Gandiolais. Cependant, les effets de l'élévation du niveau de la mer pourraient réduire cet effet positif, en provoquant une augmentation de salinité à l'horizon de 2100 en amont de l'embouchure, comme vu pour la configuration actuelle.

8.Scénario 2 : Embouchure éloignée de Saint-Louis

8.1 Le scénario de base

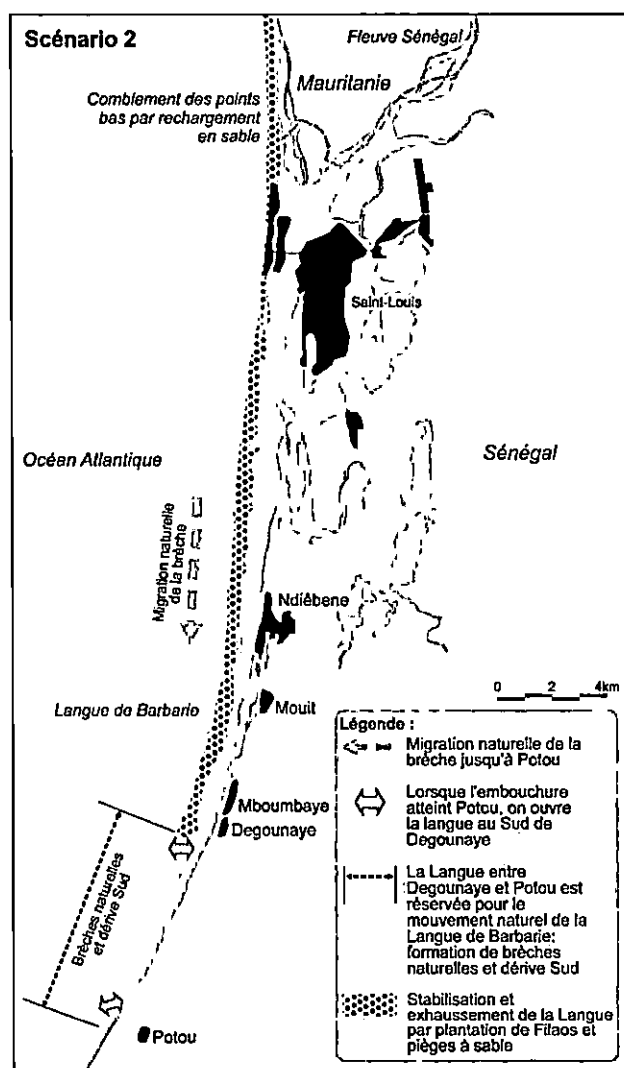


Figure 8-1 : Présentation du scénario 2

Le scénario 2 s'inscrit dans le prolongement du scénario 1 :

■ Dans un premier temps on laisse l'évolution naturelle de la brèche se faire jusqu'à Potou (position de l'embouchure 2003) à l'instar du scénario 1.

■ Dans un deuxième temps, le mouvement naturel de la Langue de Barbarie (succession de brèches et de dérive sud) est sanctuarisé sur une partie de la langue où les enjeux sont moins présents, et où historiquement les brèches ont été les plus nombreuses. Cette partie de la Langue se situe au sud immédiat de l'agglomération de Degounaye (8 km au nord de la position de l'embouchure de 2003). Sur ce secteur, quand la brèche atteint Potou, on crée artificiellement une brèche plus au nord qui deviendra la nouvelle embouchure.

Les actions à mener pour ce scénario sont donc les suivantes :

■ **Stabilisation et exhaussement du cordon entre Degounaye et Saint-Louis** par la plantation de Filaos et de pièges à sable. Le **cordon littoral au nord est également exhausé et renforcé** afin de prévenir les surverses et les risques de brèches associés.

■ La portion de 8 km de langue située entre Potou et Degounaye reproduit le fonctionnement naturel du système : dérive de l'embouchure vers le sud et possibilité de surverses et brèches naturelles sur un secteur où les enjeux pour le Gandiolais sont moins forts. Toutefois, **lorsque l'embouchure du fleuve atteindra Potou, une brèche sera créée au sud de Degounaye, au PK 23.**

Les mesures complémentaires envisagées dans ce scénario sont les suivantes :

- Le balisage d'un chenal permettant un accès sécurisé en mer pour les pêcheurs,
- Une gestion par dragage et rechargement des plages du Gandiolais permettant de limiter l'érosion côtière et de protéger par anticipation les enjeux bâtis de la côte du Gandiolais (habitations, hôtels),
- Rechargement des plages devant le front de mer bâti de Saint-Louis,
- La protection des enjeux environnementaux : délocalisation de l'île aux oiseaux.

8.1.1 Evolution morphodynamique

La migration de l'embouchure vers le sud, comme observée ces dernières décennies, se poursuivra et il est prédit qu'elle devrait atteindre sa position de 2003 (à Potou) en 2076 (§7.1.1). La migration de l'embouchure vers le sud exposera à l'érosion, un par un, les villages du Gandiolais. Les résultats de ShorelineS montrent que l'embouchure migre d'environ 15 km vers le sud à l'horizon de 2060, et que la largeur de la brèche sera réduite au minimum à 1 km lors de la migration (6 km de large à l'heure actuelle).

À l'horizon 2050

L'embouchure du fleuve aura migré d'environ 12 km vers le sud et aura atteint la coordonnée 1750.6 km N, quelques kilomètres au sud de Degounaye (extrait de la Figure 7-3). Sa largeur est estimée à environ 1.1 km (extrait des Figure 7-3 et Figure 7-9). Pour le Gandiolais, la réduction de la largeur de la brèche semble plutôt favorable. Elle mène à des variations du trait de côte moins importantes que selon une extrapolation linéaire à base des développements observés les dernières années. À noter que le modèle ShorelineS ne prend pas en compte l'impact des tempêtes, donc que durant le passage de l'embouchure (quand les vagues de tempêtes et setup/surcote peuvent entrer dans l'embouchure) les effets sur le littoral peuvent être plus néfastes que prédit actuellement.

A l'horizon 2100

La vitesse de migration prédite varie dans le temps et s'accélère au cours des 5 dernières années de la simulation de ShorelineS pour atteindre environ 500 m/an (paragraphe 7.1.1). En conservant le taux de migration moyen (simulé sur les 14 premiers kilomètres) de 350 m/an, puis de 500 m/an pour la distance restante, l'embouchure parviendrait à Potou (sa position originelle de 2003) en 2076. En fixant la flèche sableuse (renforcement avec des apports de sable ou par l'installation de pièges à sable), la position de l'embouchure pourrait ensuite être stabilisée au niveau de Potou, et être utilisée comme situation de référence pour les simulations hydrauliques à l'horizon de 2100.

Il est important de noter que les prédictions de ShorelineS ne prennent pas en compte les tempêtes côté mer, ni les fortes crues du fleuve (au-dessus des débits moyens pendant la saison des pluies). La flèche sableuse restera un système vulnérable à la formation de nouvelles brèches pendant une forte crue ou tempête côté mer comme dans la situation avant 2003 (paragraphe 4.1 du rapport L5.1, Egis Eau et Deltares 2019a), ceci étant confirmé par les modélisations présentées en paragraphes 5.4 et 7.1.3 du présent rapport.

La migration de la flèche sableuse suit un cycle d'une période d'environ 10 à 20 ans en moyenne sur les derniers siècles (Niang et Kane, 2014). La flèche sableuse a connu des ruptures naturelles importantes depuis 1900 (1906, 1923, 1936, 1948, 1959, 1973). L'absence de brèche au cours du dernier quart du XX^{ème} siècle pourrait s'expliquer par le manque de crues majeures au cours de cette période, caractérisée par la sécheresse du Sahel et par les effets de régulation du débit des grands barrages aménagés dans la vallée inférieure du fleuve Sénégal (Anthony, 2015). La forte crue de 2003

démontre que les débits élevés peuvent, malgré ces changements, se produire encore actuellement. Des mesures complémentaires seront donc nécessaires pour renforcer le cordon littoral, et éviter de nouvelles brèches.

8.1.2 Hydrodynamique

À l'horizon de 2050 et 2100

La situation actuelle présentée au §7.1.2 donne une idée des conditions hydrodynamiques lorsque l'embouchure est placée plus au sud. Supposé que l'embouchure du fleuve diminue en largeur en migrant vers le sud, comme estimé avec le modèle ShorelineS (§7.1.1), avec les flux de marée et le débit du fleuve constants, la profondeur des chenaux de l'embouchure devrait s'adapter et s'agrandir, tout en gardant les courants similaires à la situation actuelle. Aux horizons de 2050 et 2100, les vitesses maximales de courants de flot et de jusant dans l'embouchure, à faible débit fluvial ($148 \text{ m}^3/\text{s}$) sont estimées à respectivement 1,2 m/s et 1,5 m/s. Sur la base de l'état actuel, les vitesses de courants de flot maximales avec un débit élevé ($1126 \text{ m}^3/\text{s}$) du fleuve sont estimées inférieures à 0,8 m/s, tandis que les vitesses maximales de jusant avec un débit élevé du fleuve sont estimées à 2,0 m/s. Les courants provoqués par les vagues dans la zone de surf sont estimés à environ 0,6 m/s et dirigés vers le sud.

8.1.3 Risques d'inondation induits par les crues du fleuve

8.1.3.1 Impact sur Saint-Louis

Les modélisations hydrauliques portent sur des crues de période de retour comprises entre 2 et 100 ans pour les deux horizons d'étude, 2050 et 2100, ainsi que pour l'état 2019.

Les hypothèses retenues pour la configuration du fleuve et de l'embouchure sont les suivantes :

- **Etat 2019** : L'embouchure se situe 11 km à l'aval du Pont Faidherbe. La bathymétrie retenue est celle levée en Janvier 2019.
- **Horizon 2050** : l'embouchure se situe au sud immédiat du village de Degounaye, soit 23 km en aval du Pont Faidherbe. La position de l'embouchure est conforme aux résultats obtenus par le modèle ShorelineS. La bathymétrie de l'embouchure et du fleuve est issue des résultats du modèle Delft 3D (bathymétrie après saison des pluies).
- **Horizon 2100** : Le scénario 2 prend en compte la création d'une brèche artificielle à Degounaye une fois que l'embouchure du fleuve a atteint Potou. Ceci induit pour la modélisation deux possibilités de positionnement de l'embouchure du fleuve :
 - Position à Degounaye : l'embouchure se situe au sud immédiat du village de Degounaye, soit 23 km en aval du pont Faidherbe. La position de l'embouchure est conforme aux résultats obtenus par le modèle ShorelineS. La bathymétrie de l'embouchure et du fleuve est issue des résultats du modèle Delft 3D (bathymétrie après saison des pluies).
 - Position à Potou : l'embouchure se situe 31 km en aval du pont Faidherbe, la bathymétrie retenue est celle levée en Juin 2000 faisant suite à la crue de 1999.

Le cordon littoral est exhaussé et renforcé au nord de Saint-Louis et entre Degounaye et Saint-Louis. A l'exception du secteur Potou-Degounaye, il n'y a plus de surverse sur le cordon.

Les cotes d'inondation observées à Saint-Louis sont comprises entre 1.26-1.38 et 1.90 mIGN à l'horizon 2050. A l'horizon 2100, celles-ci sont comprises entre 1.65 et 1.84 mIGN ou entre 1.75 et 2.20 mIGN selon que l'embouchure est située à Degounaye ou à Potou (Tableau 8-1).

Le tableau suivant permet d'identifier les configurations hydrauliques pour lesquelles il est à redouter une inondation de la ville sachant que la cote correspondant à des débordements notables sur Saint-Louis a été évaluée à 1.50 mIGN.

Tableau 8-1 : Impact du scénario 2 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis

Horizon d'étude	Position de l'embouchure	Période de retour (ans)	Débit (m³/s)	Cote max S3 (mIGN)	Cote max Dama (mIGN)	Cote max S 2 (mIGN)	Cote max S 1 (mIGN)	Cote max amont Saint-Louis (mIGN)	Cote max Saint-Louis (Faidherbe) (mIGN)	Cote max aval Saint-Louis (mIGN)
2019	Position 2019 PK 11	2	1944	1.25	1.47	1.35	1.26	1.16	1.15	1.12
		5	2333	1.48	1.62	1.50	1.39	1.21	1.19	1.15
		10	2449	1.53	1.67	1.55	1.44	1.24	1.21	1.16
		30	3060	1.76	1.89	1.77	1.64	1.39	1.34	1.23
		100	3384	1.86	1.99	1.87	1.75	1.48	1.41	1.28
Horizon 2050	Sud de Degounaye PK 23	2	1769-1944	1.43-1.55	1.54-1.66	1.45-1.57	1.39-1.51	1.28-1.40	1.26-1.38	1.23-1.35
		5	2165-2333	1.63-1.75	1.72-1.84	1.63-1.75	1.56-1.68	1.42-1.54	1.39-1.51	1.33-1.45
		10	2311-2449	1.74-1.81	1.82-1.89	1.74-1.81	1.64-1.73	1.51-1.58	1.48-1.55	1.42-1.49
		30	3060	2.07	2.15	2.07	1.99	1.82	1.78	1.68
		100	3384	2.21	2.28	2.20	2.12	1.95	1.90	1.79
Horizon 2100	Sud de Degounaye PK 23	2	1476	1.61	1.75	1.69	1.67	1.65	1.65	1.66
		5	1885	1.79	1.89	1.82	1.79	1.75	1.74	1.74
		10	2080	1.86	1.95	1.89	1.85	1.79	1.78	1.77
		30	2263	1.94	2.02	1.95	1.91	1.83	1.82	1.80
		100	2331	1.96	2.04	1.98	1.93	1.85	1.84	1.81
	Potou PK 31	2	1476	1.78	1.85	1.80	1.78	1.75	1.75	1.75
		5	1885	2.05	2.10	2.05	2.02	1.96	1.95	1.92
		10	2080	2.17	2.21	2.17	2.13	2.07	2.05	2.02
		30	2263	2.28	2.32	2.28	2.24	2.18	2.15	2.12
		100	2331	2.33	2.37	2.32	2.29	2.22	2.20	2.15

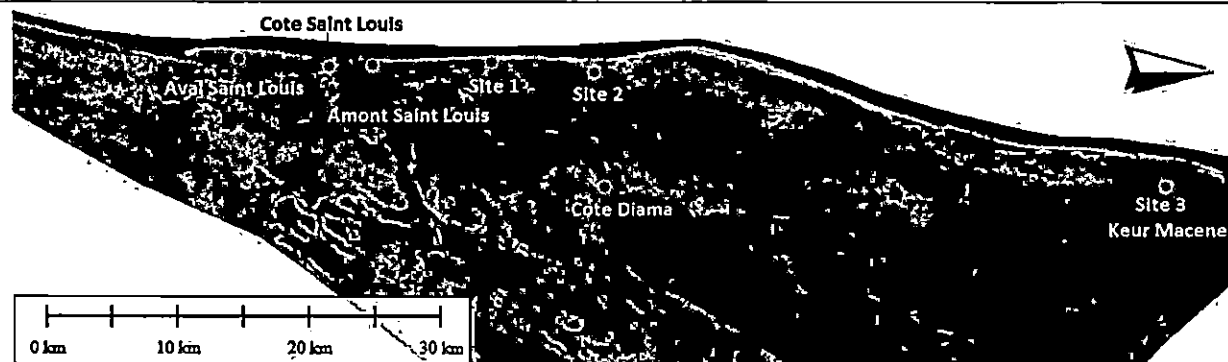


Figure 8-2 : Scénario 2 : Localisation des points de contrôle

- **A l'état actuel (2019):** La plus grande partie de la ville de Saint-Louis est protégée des inondations jusqu'à l'occurrence centennale. Il n'est pas observé de déversements sur le cordon littoral.

- **A l'horizon 2050 :** Avec la migration de l'embouchure vers le sud, la ville de Saint-Louis se trouve confrontée à des inondations importantes dès l'occurrence décennale, pour des débits de l'ordre de 2300 – 2400 m³/s. La ville est protégée contre le risque de brèche du cordon littoral jusqu'à une fréquence centennale.
- **A l'horizon 2100 :**
 - Avec une embouchure positionnée à Potou le niveau de protection contre les inondations de Saint-Louis est inférieur à 2 ans.
 - Avec une embouchure positionnée à Degounaye, les cotes d'inondation diminuent de manière significative mais le niveau de protection contre les inondations de Saint-Louis reste inférieur à 2 ans.

Les cartes d'inondation pour une crue centennale aux horizons 2050 et 2100 (pour les deux positions d'embouchure en 2100), sont présentées de la Figure 8-3 à la Figure 8-8.

Pour une crue centennale, les inondations touchent :

- A l'Horizon 2050 : 188 600 habitants,
- A l'Horizon 2100 :
 - *Embouchure à Degounaye :* 154 900 habitants,
 - *Embouchure à Potou :* 222 900 habitants.

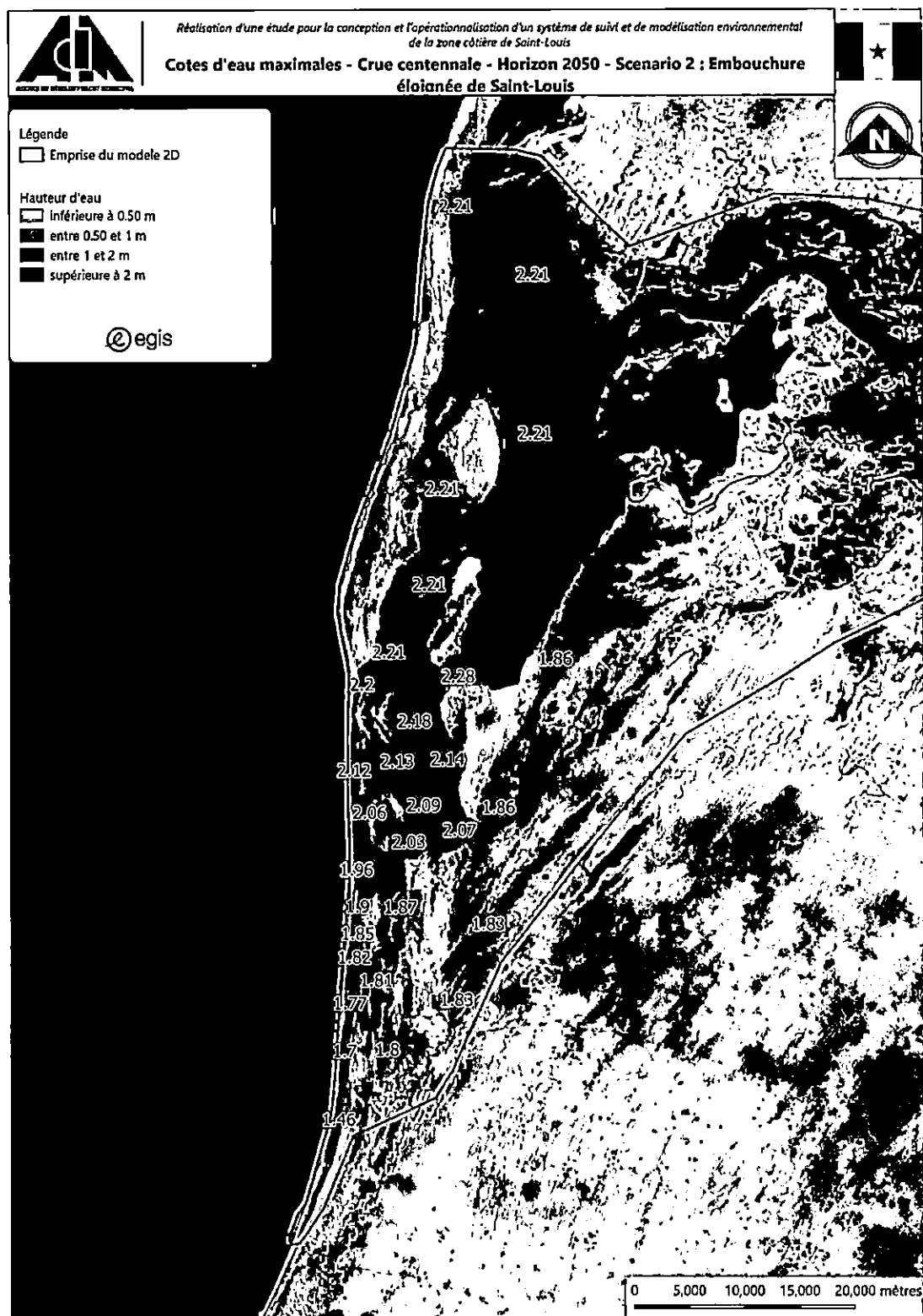


Figure 8-3 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2 – Horizon 2050 – Q100 – Delta du fleuve

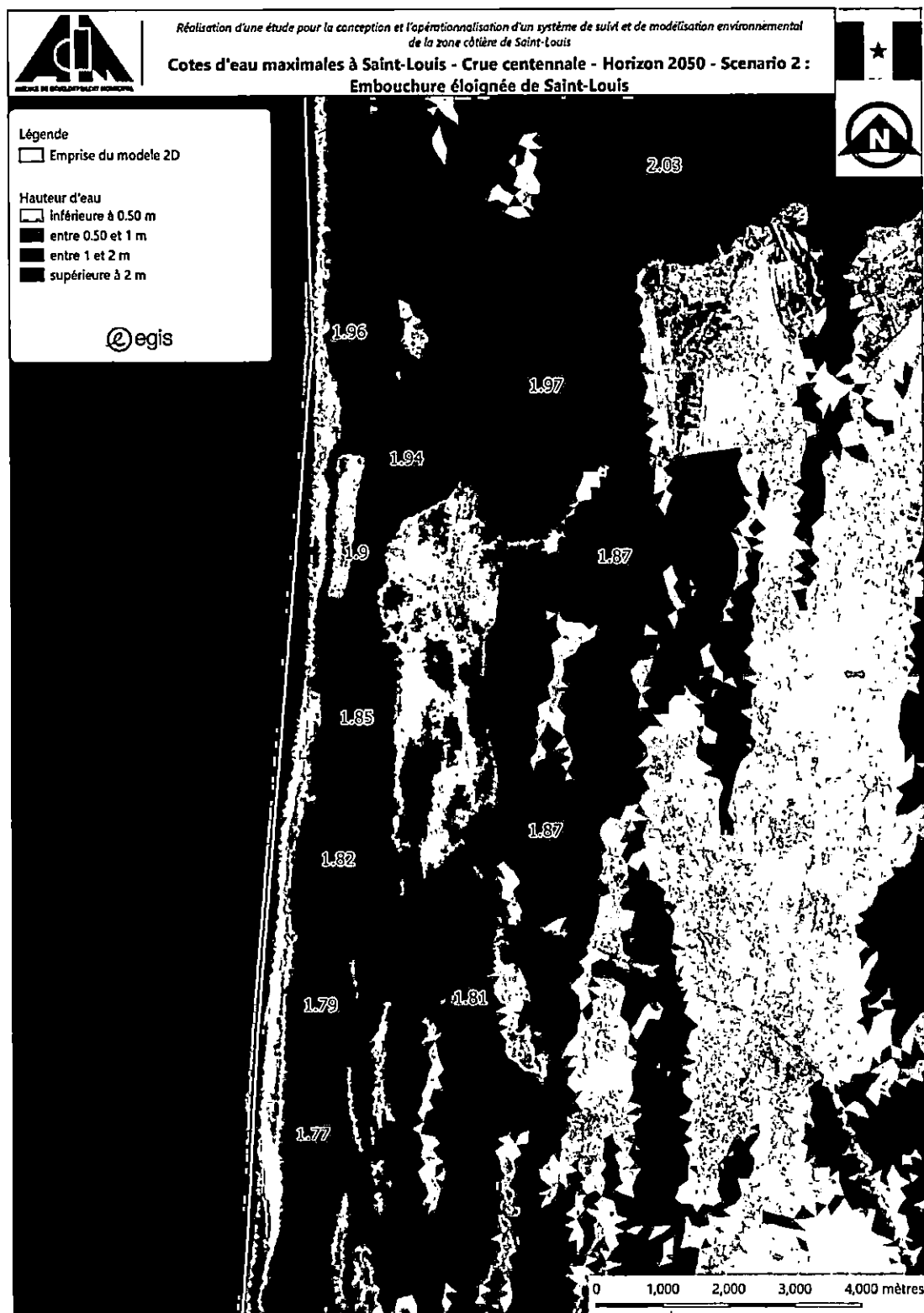


Figure 8-4 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis

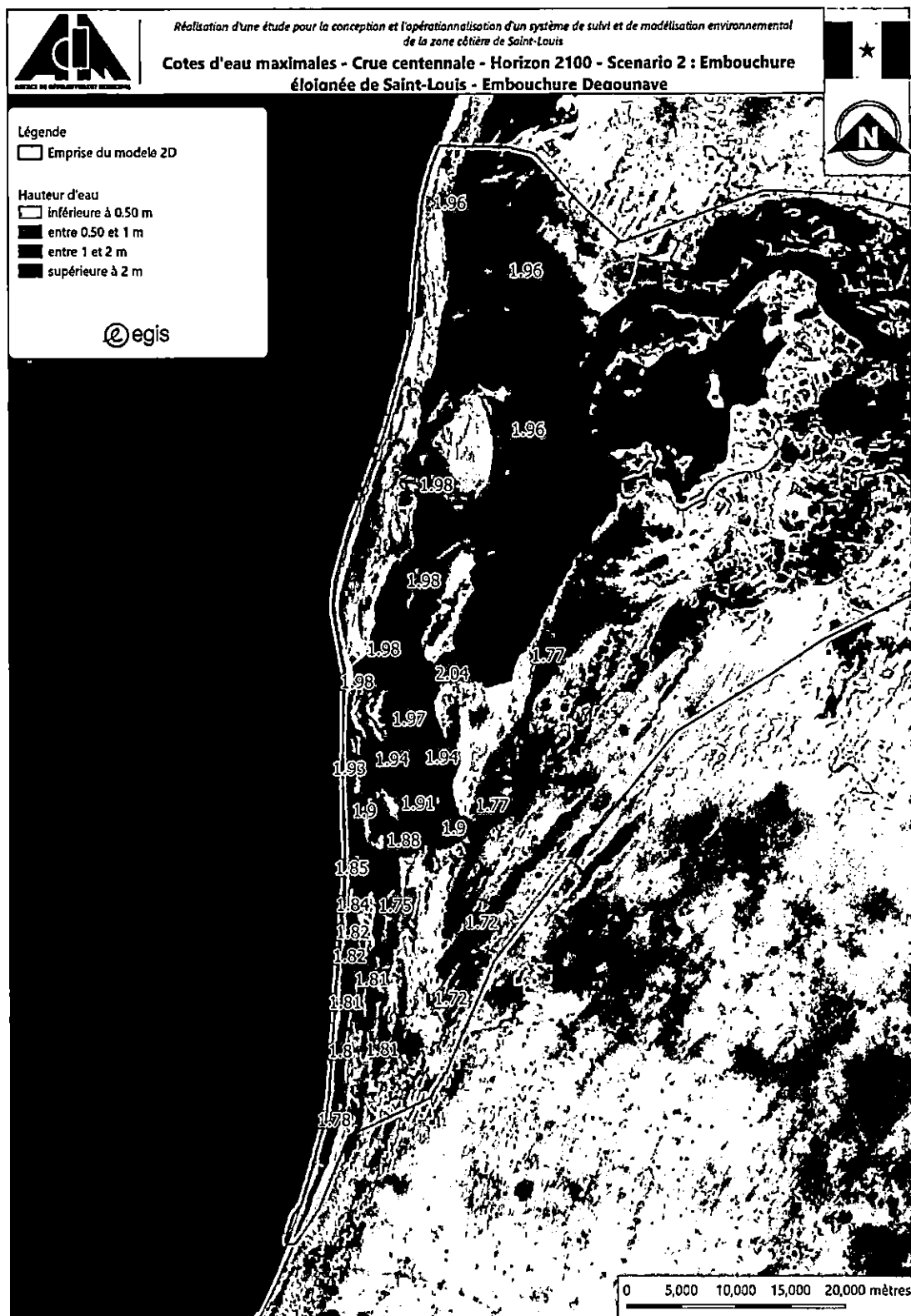


Figure 8-5 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Degounaye – Q100 – Delta du fleuve

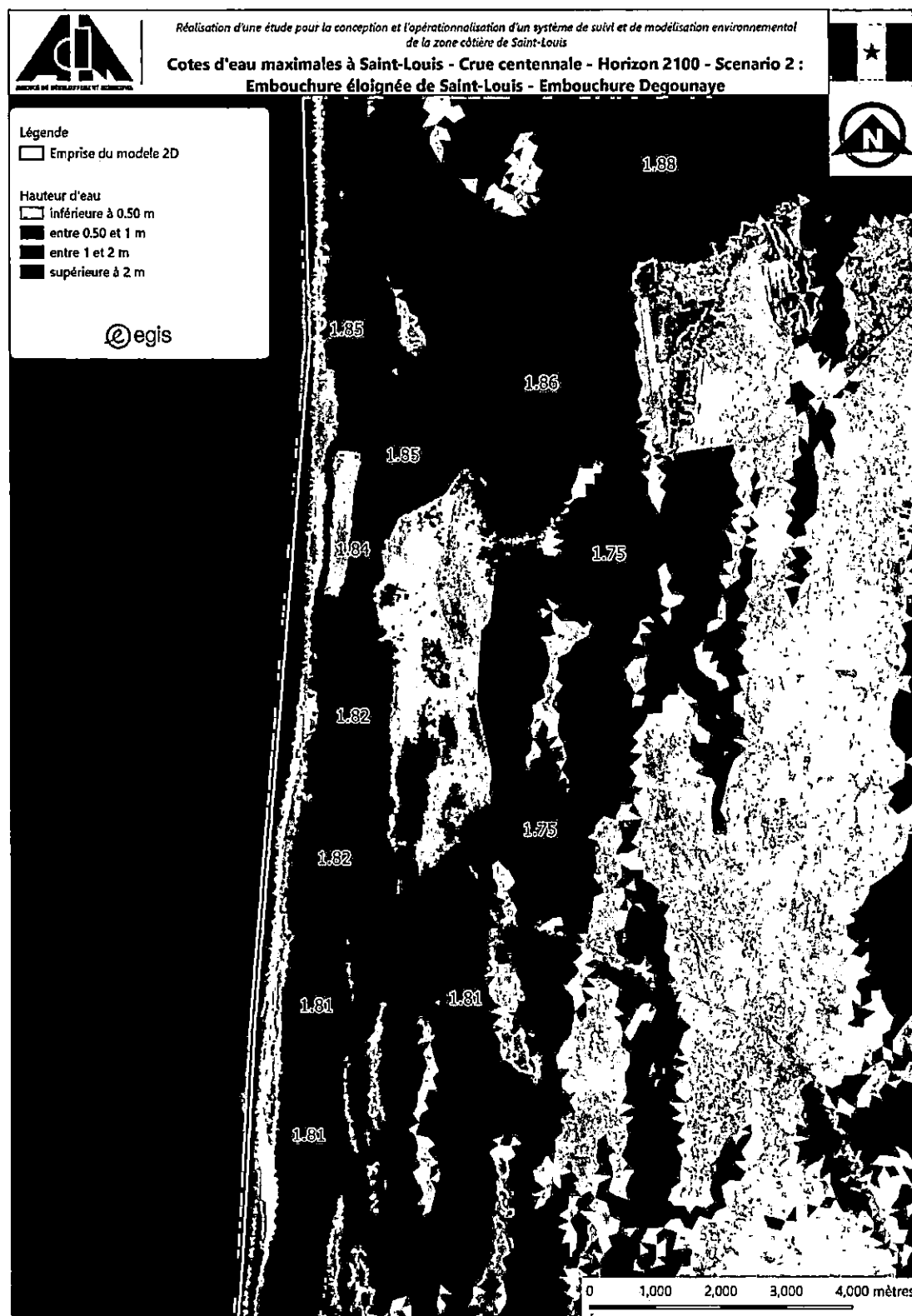


Figure 8-6 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Degounaye – Q100 – Zoom sur Saint-Louis

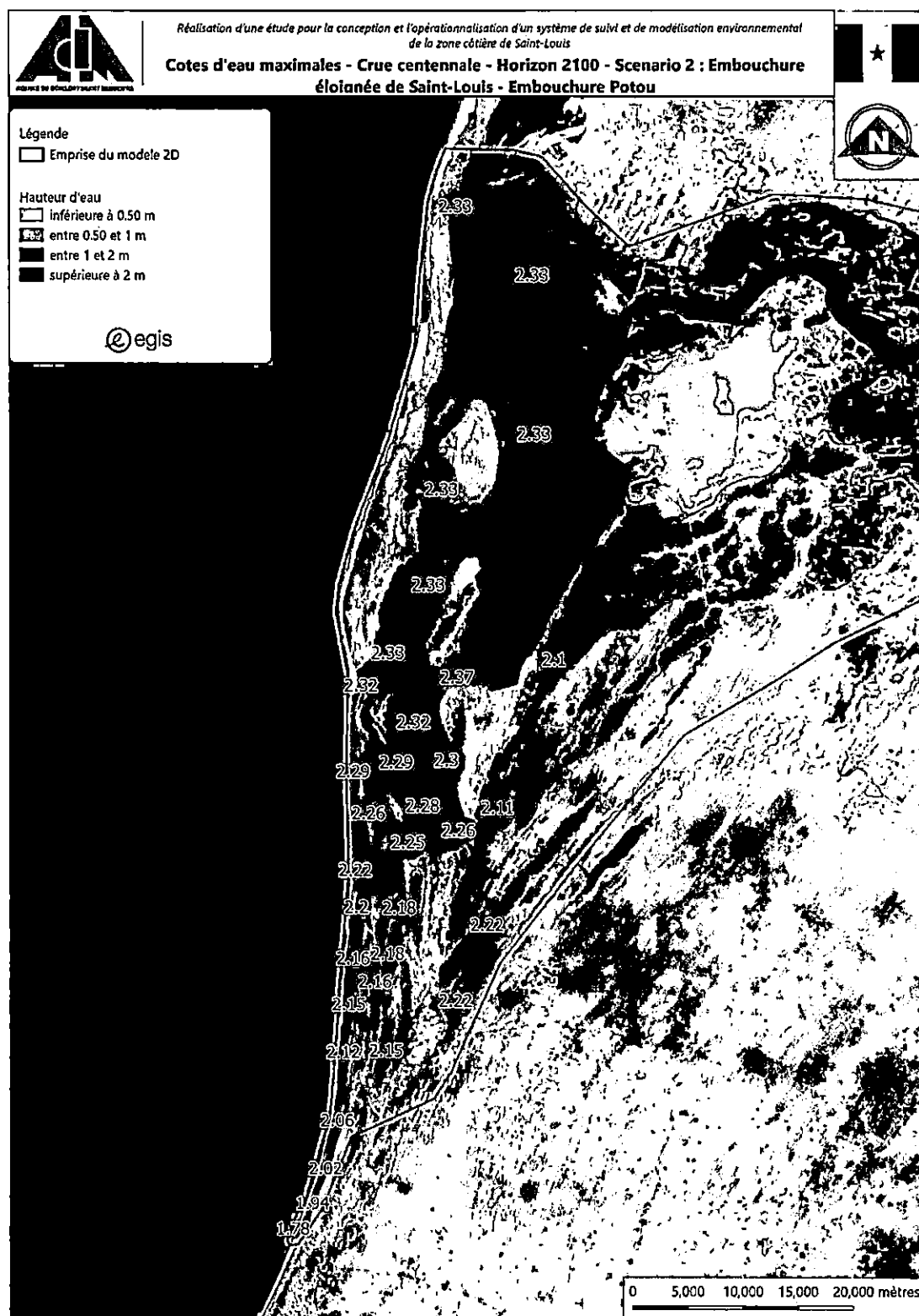


Figure 8-7 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Potou – Q100 – Delta du fleuve

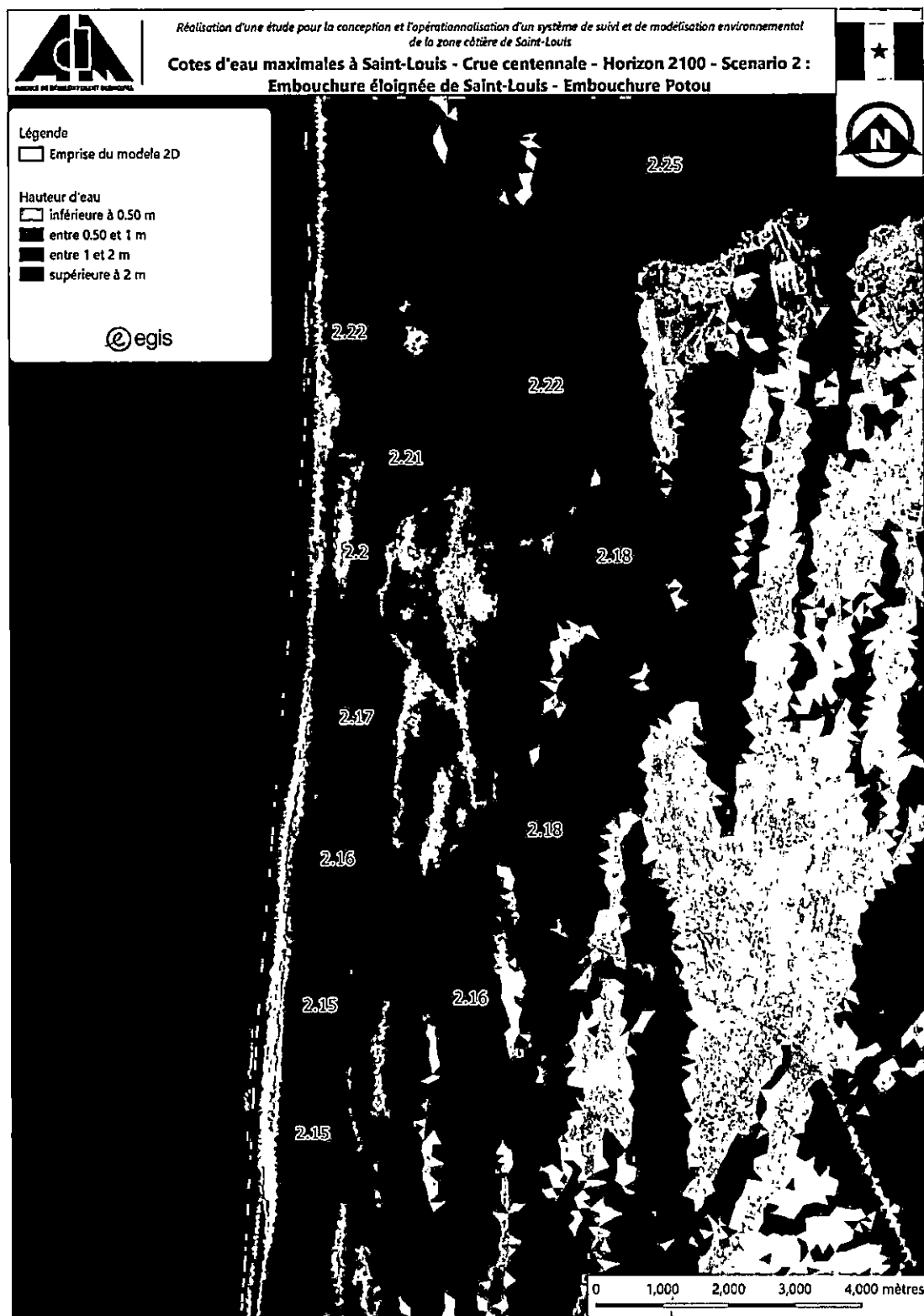


Figure 8-8 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Potou – Q100 – Zoom sur Saint-Louis

8.1.3.2 Impact sur les communes du delta

Les impacts observés pour le scénario 2 sont analogues à ceux du scénario 1 pour l'horizon 2050 (cf. chapitre 7.1.3.2). En revanche à l'horizon 2100, le renforcement du cordon et le positionnement de la brèche à Degounaye ou à Potou influent sur l'inondabilité du delta.

L'exposition des populations des communes du delta pour une crue centennale est la suivante :

A l'horizon 2050 :

- **Ndiébène Gandiole** : 9 500 habitants touchés,
- **Gandon** : 10 400 habitants touchés,
- **Dama** : 2 100 habitants touchés,
- **Mauritanie** : 2 000 habitants touchés,
- **TOTAL** : 23 900 habitants touchés.

A l'horizon 2100 :

Embouchure Degounaye

- **Ndiébène Gandiole** : 12 000 habitants touchés,
- **Gandon** : 8 500 habitants touchés,
- **Dama** : 1 400 habitants touchés,
- **Mauritanie** : 1 300 habitants touchés,
- **TOTAL** : 23 400 habitants touchés.

Embouchure Potou

- **Ndiébène Gandiole** : 21 800 habitants touchés,
- **Gandon** : 16 000 habitants touchés,
- **Dama** : 4 100 habitants touchés,
- **Mauritanie** : 2 300 habitants touchés,
- **TOTAL** : 44 200 habitants touchés.

On note qu'à l'horizon 2100, pour une embouchure située à Degounaye, la population impactée est quasiment identique à l'échelle du delta par rapport à 2050. D'une part, la commune de Ndiébène Gandiole est davantage impactée du fait de la montée du niveau de la mer (Figure 8-11), d'autre part, celle de Gandon est moins impactée du fait de la diminution des débits du fleuve (Figure 8-9).

En revanche, une embouchure située à Potou amène les cotes d'inondation au-delà de 2 mIGN et double la population impactée. La difficile évacuation des eaux du fait de l'éloignement de l'embouchure entraîne des hauteurs d'eau importantes à la fois sur Ndiébène Gandiole et Gandon (Figure 8-10 et Figure 8-12). La commune de Dama est également menacée avec un doublement de la population exposée entre 2050 et 2100.

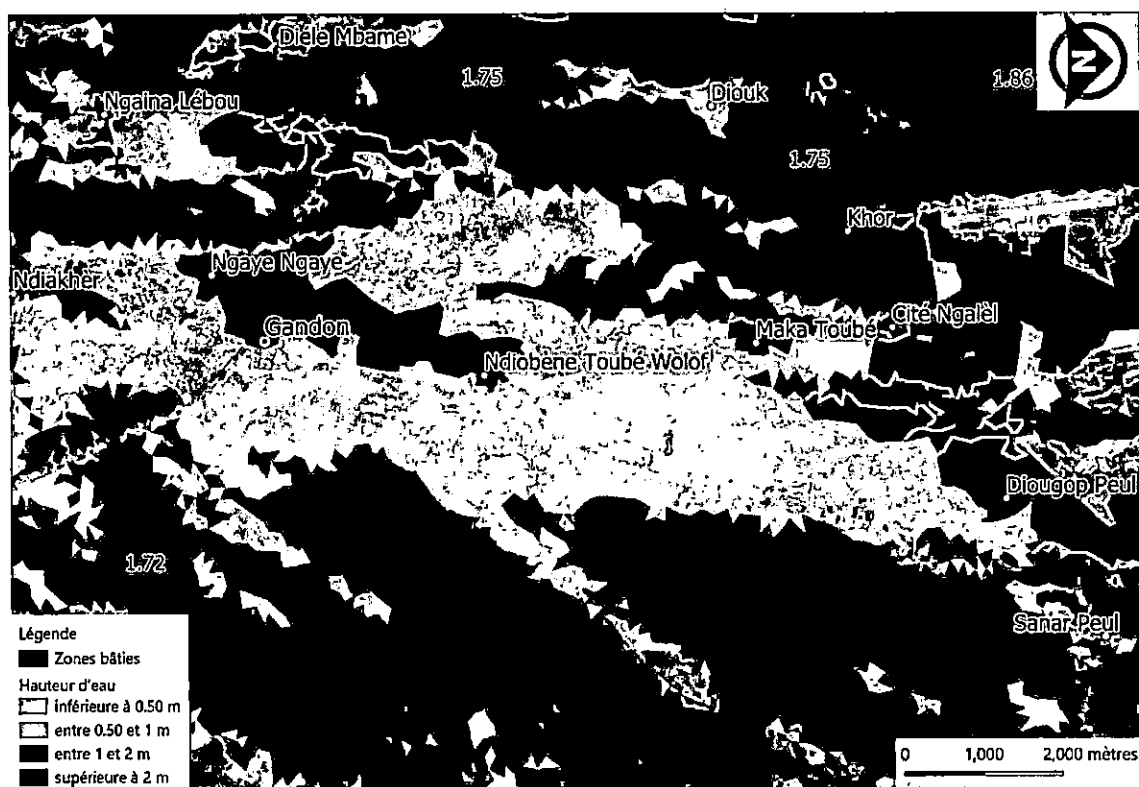


Figure 8-9 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Degounaye – Q100

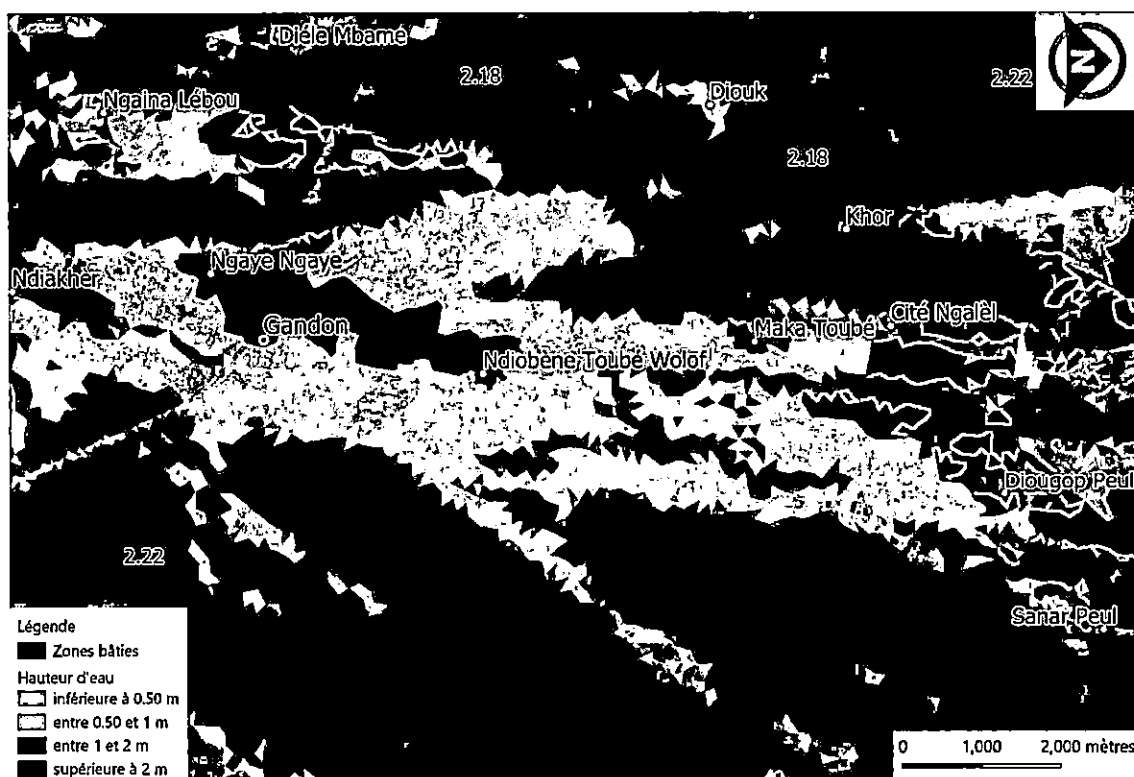


Figure 8-10 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Potou – Q100

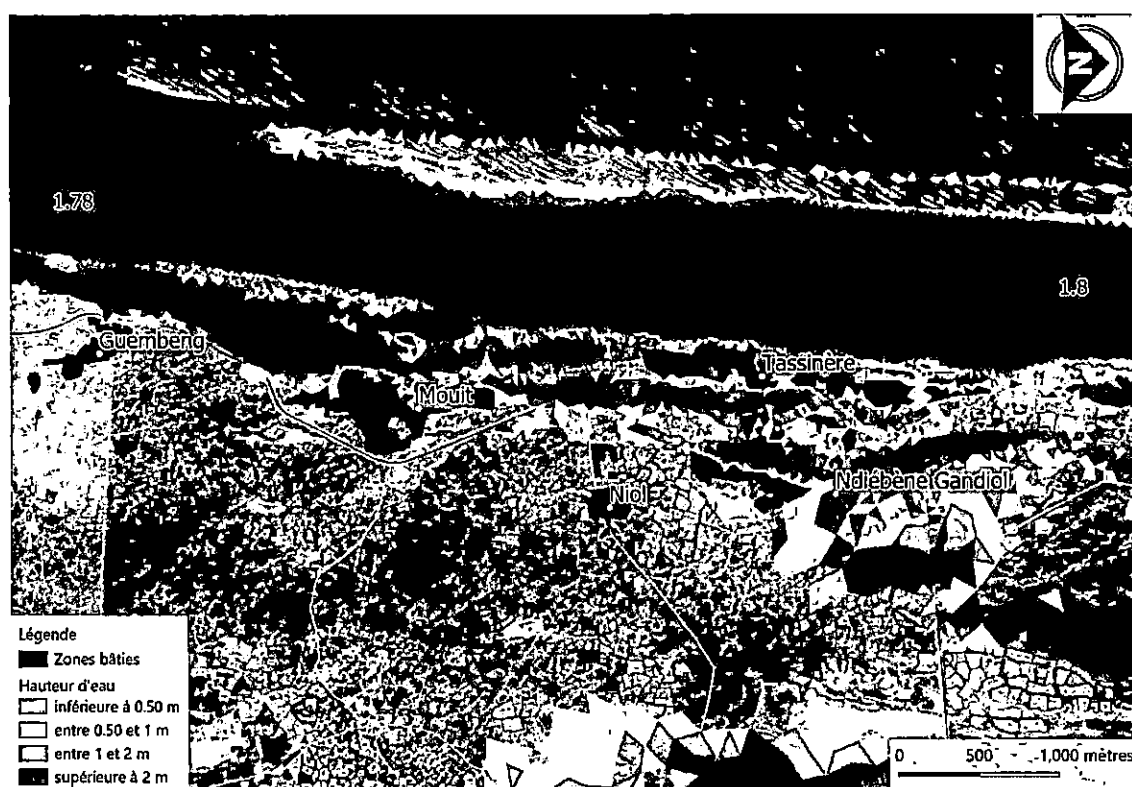


Figure 8-11 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiole – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Degounaye – Q100



Figure 8-12 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiole – Scénario 2 – Horizon 2100 – Embouchure Potou – Q100

8.1.4 Risques d'inondation induits par les tempêtes

Avec la position de l'embouchure actuelle, le risque d'inondation induit par les tempêtes semble restreint à des zones bordant la mer, et la surcote et setup qui pénètrent dans l'embouchure atteindront environ 30 cm au niveau de Saint-Louis et du Gandiolais. Les zones touchées sont néanmoins plus étendues, dans le cas de fortes tempêtes (avec des périodes de retour > 100 ans), et la surcote et setup qui pénètrent dans l'embouchure atteindront environ 40 cm au niveau de Saint-Louis, et 45 cm au niveau des villages du Gandiolais.

A l'horizon de 2050, avec l'élévation de niveau de la mer de 19 cm les effets sur les niveaux d'eau moyens en face de Saint-Louis et les villages du Gandiolais seront modérés. L'influence des tempêtes réduira par rapport à la situation actuelle, grâce à la migration de l'embouchure vers le sud dans les décennies à venir. L'embouchure du fleuve sera à quelques kilomètres au sud de Degounaye vers 2050. Les augmentations des niveaux d'eau dans le fleuve, provoquées par la pénétration de la surcote et du setup lors d'une tempête, devraient diminuer au niveau de Saint-Louis grâce au blocage des influences maritimes par des forts courants du fleuve, ce qui protégera à terme les villages du Gandiolais et Saint-Louis (se référer à Tableau 7-3). Au contraire, le front bâti de Saint-Louis situé sur le cordon littoral continuera d'être exposé si des mesures complémentaires ne sont pas mises en œuvre.

A l'horizon de 2100

Avec l'élévation de niveau de la mer, les effets sur les niveaux d'eau moyens en face de Saint-Louis et les villages du Gandiolais seront alarmants à l'horizon 2100. Avec la position de l'embouchure à Potou (atteinte vers 2076), l'influence des tempêtes sera fortement réduite. Les augmentations des niveaux d'eau dans le fleuve, provoquées par la pénétration de la surcote et du setup lors d'une tempête, devraient diminuer considérablement au niveau de Saint-Louis, ce qui protégera à terme les villages du Gandiolais et Saint-Louis (se référer à Tableau 7-3). Au contraire, le front bâti de Saint-Louis situé sur le cordon littoral continuera d'être exposé si des mesures complémentaires ne sont pas mises en œuvre.

8.1.5 Intrusion saline

Avec l'embouchure du fleuve à quelques kilomètres au sud de Degounaye, la propagation d'eau saline en amont dans l'estuaire sera limitée plus au sud qu'actuellement. Se référer à paragraphe 7.1.5, où la situation pour 2040 donne une idée des conditions lorsque l'embouchure est placée plus au sud.

A l'horizon de 2100

Avec la position de l'embouchure à Potou, nous prévoyons qu'au cours du temps, la situation avant la brèche artificielle de 2003 pourrait être rétablie. La refixation de l'embouchure du fleuve Sénégal au niveau de Potou permettrait donc aux nappes phréatiques de se rétablir en eau douce, et à terme d'améliorer la qualité des eaux souterraines pour l'irrigation, ce qui sera fortement bénéfique pour les maraîchers du Gandiolais. Cependant, les effets de l'élévation du niveau de la mer pourraient réduire cet effet positif, en provoquant une augmentation de salinité à l'horizon de 2100 en amont de l'embouchure, comme vu pour la configuration actuelle.

8.2 Scénario 2-1 : Mise en place d'une brèche contrôlée en aval de Saint-Louis

8.2.1 Objectifs et caractéristiques de la brèche contrôlée

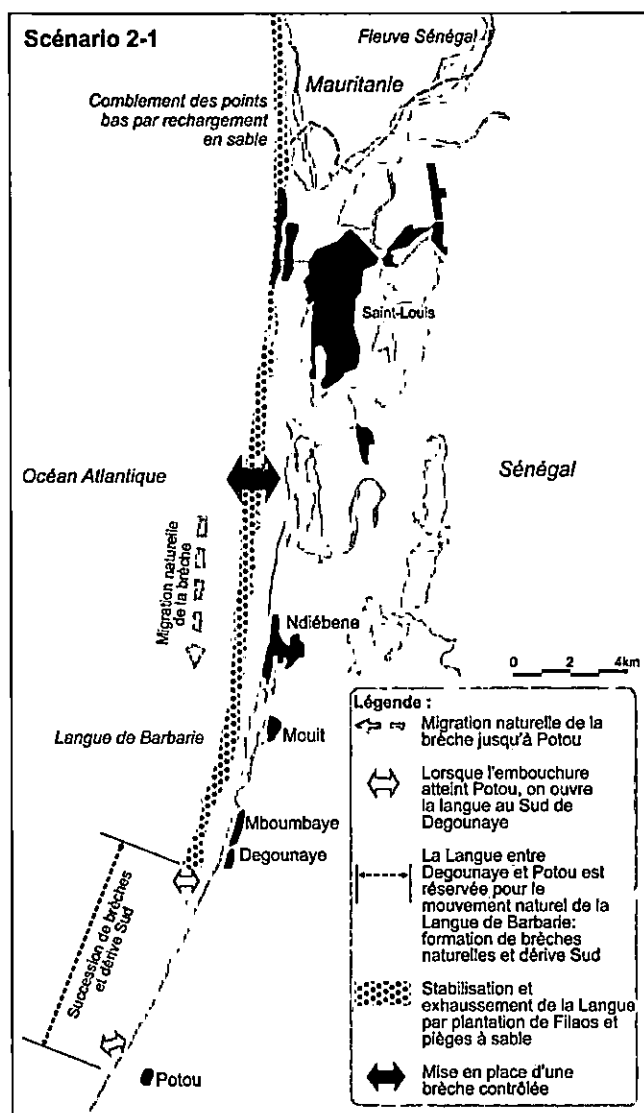


Figure 8-13 : Présentation du scénario 2-1

Le système d'alerte existant sur le fleuve permet d'anticiper les opérations d'ouverture plusieurs semaines avant que la crue n'arrive à Saint-Louis.

Le pré-dimensionnement de cet ouvrage est le suivant :

- Longueur comprise entre 1500 et 3000 m
- Crête du déversoir calée à la cote 1 mIGN, correspondant au niveau de la marée haute de vives-eaux attendu en 2050, hors surcotes liées aux tempêtes,

Le point faible du scénario 2 est l'exposition de Saint-Louis et du delta au risque d'inondation. Il est donc proposé la mise en œuvre d'une zone de déversement contrôlée située au sud immédiat de Saint-Louis, destinée à diminuer les cotes d'inondation au droit de la ville et sur l'ensemble du delta.

L'ouvrage envisagé est de type brèche contrôlée et se situe 7 km au sud du Pont Faidherbe. La conception de cet ouvrage doit intégrer une position de l'embouchure qui évolue au cours du temps, la montée des eaux liée au changement climatique et l'impact des marées de tempêtes.

Au stade actuel de la réflexion, nous proposons un ouvrage en partie fusible, intégrant une partie fixe (calage d'un fond maximum du seuil et du chenal de déversement, protections de berge du chenal jusqu'à la limite de la plage).

La partie fusible de l'ouvrage est constituée par la reconstitution du cordon sableux au-dessus de la crête fixe de l'ouvrage.

Ce cordon sera ouvert artificiellement comme en 2003, à partir du dépassement d'une cote d'alerte correspondant au seuil d'inondation de la ville de Saint-Louis soit 1.5 mIGN.

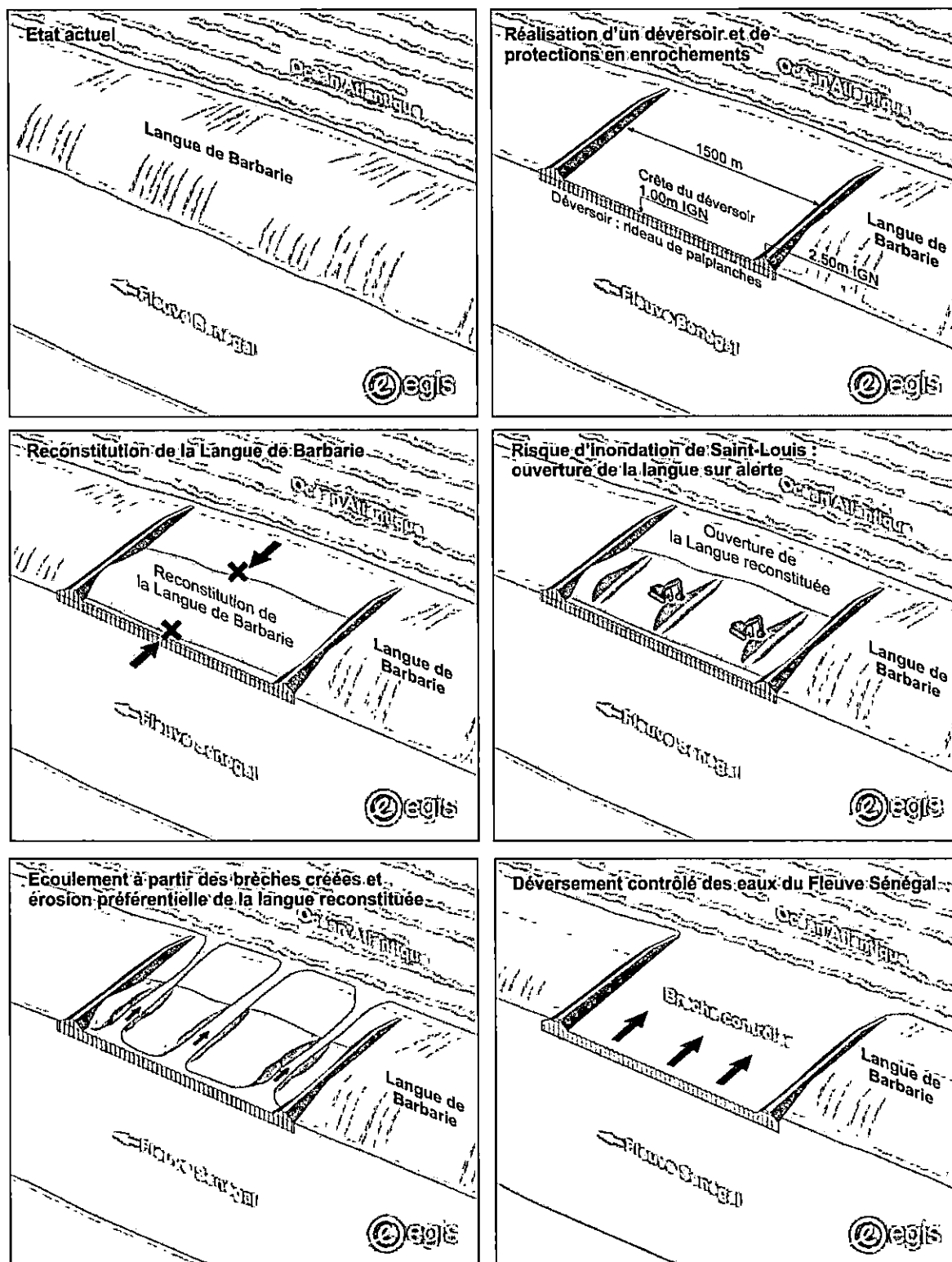


Figure 8-14 : Principe de fonctionnement de la brèche contrôlée

En raison de la crête du déversoir fixée à la cote 1 mIGN, la brèche contrôlée dans sa configuration actuelle ne sera pas accessible aux pêcheurs. Le déversoir est uniquement mis en place pour éviter les risques de brèche naturelle et afin de diminuer les cotes d'inondation à Saint-Louis.

Les coupes types de la brèche contrôlée sont disponibles en Annexe 4.

8.2.2 Impact sur la dynamique côtière

Pour étudier les effets d'un déversoir de l'eau fluviale, deux types de calculs Delft3D ont été effectués :

- 1) Des calculs hydrodynamiques pour déterminer l'effet d'un déversoir sur les niveaux d'eau de Saint-Louis,
- 2) Des calculs morphodynamiques pour étudier l'effet d'un déversoir sur le cordon littoral.

Les calculs ont été effectués pour un déversoir avec une largeur de 1500 m de large et d'une hauteur de 1 mIGN. De part et d'autre du déversoir, des barrages ont été inclus pour fixer la largeur du déversoir (selon Figure 8-15). On suppose qu'une protection du lit du fleuve sera installée sur toute la largeur du déversoir.

Dans les calculs hydrodynamiques, le déversoir a été combiné avec les bathymétries de 2000, 2004, 2009, 2019, et 2040 et un débit maximal à Diama de 2449 m³/s (période de retour de 1/10) et 3384 m³/s (période de retour de 1/100). Pour la bathymétrie de 2000, des calculs hydrodynamiques ont également été effectués avec ces débits mais sans déversoir pour pouvoir comparer les effets d'un tel déversoir sur les niveaux d'eau à Saint-Louis. Dans ces calculs indicatifs, une amplitude de marée fixe de 0,8 m a été utilisée.

Les calculs morphodynamiques ont été effectués sur une période de 5 ans à partir de la bathymétrie de 2000. La première année, le débit maximal à Diama a été porté à respectivement 2449 m³/s (période de retour de 1/10) et 3384 m³/s (période de retour de 1/100).

D'après les calculs hydrodynamiques effectués avec la bathymétrie de 2000, il s'ensuit qu'un déversoir réduit le niveau d'eau maximum à Saint-Louis d'environ 0,3 m pour les débits avec une période de retour de de 1/10 et 1/100 (Tableau 8-2). Ceci est considéré comme une valeur maximale pour la réduction, puisque l'estuaire en 2000 était le plus au sud, pouvant être considérée comme la plus défavorable de toutes les années. Il ressort ensuite des autres calculs que les niveaux d'eau maximaux diminuent à mesure que l'estuaire se trouve plus au nord. Il convient de noter qu'il s'agit de calculs indicatifs avec une amplitude de marée fixe, ce qui signifie que les réductions observées à partir du modèle Infoworks peuvent être considérées comme plus exactes. Toutefois, ces calculs indicatifs confirment les tendances déterminées avec Infoworks ci-dessous.

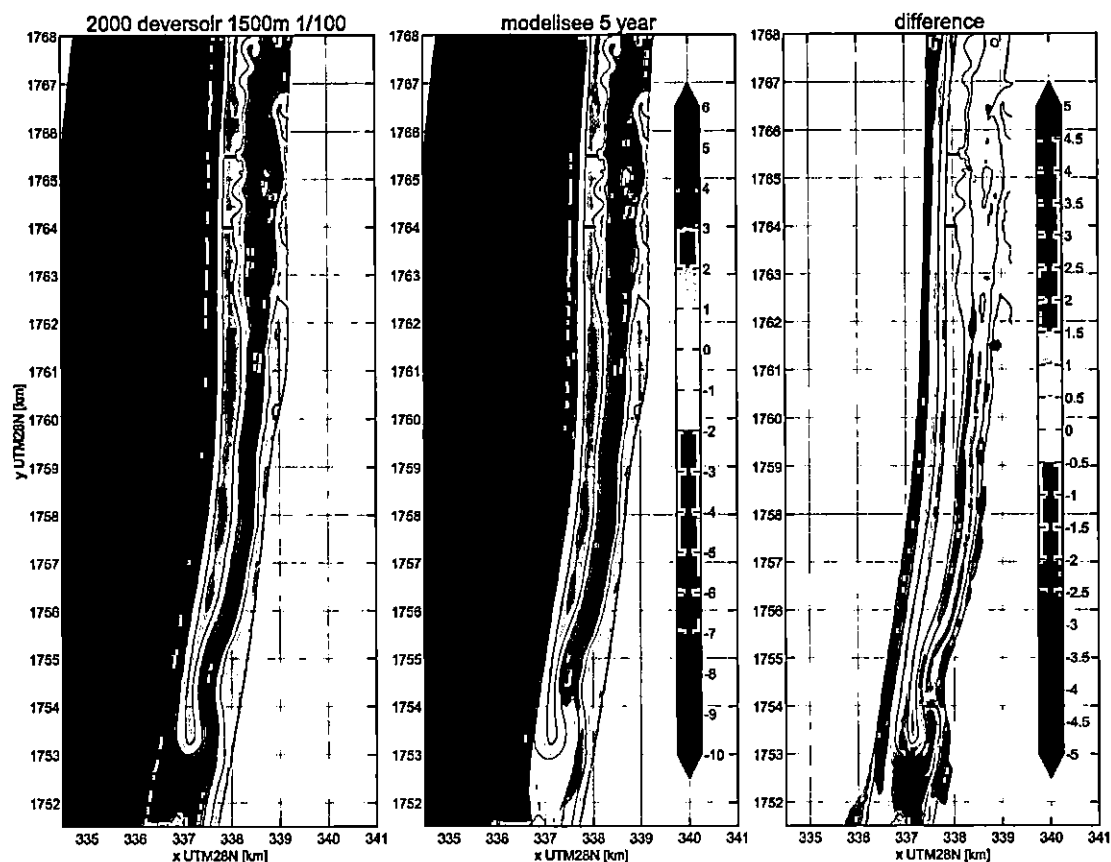


Figure 8-15 : La bathymétrie de départ de 2000 avec un déversoir (à gauche), les prévisions après 5 ans (au milieu) et les différences (à droite) pour un calcul dans lequel le débit à Diama a été augmenté jusqu'à 2449 m³/s durant la première année (période de retour 1/10).

Tableau 8-2 : niveaux d'eau maximaux avec et sans la mise en place d'un déversoir. Pour une période de retour de 1/10 (2449 m³/s) et une période de retour de 1/100 (3384 m³/s).

Année	Distance de l'embouchure du pont Faïdherbe [km]	Niveau d'eau max à Saint-Louis pour une débit de 1/100 [m]	Niveau d'eau max à Saint-Louis pour une débit de 1/10 [m]
2004	6.7	1.1	0.9
2009	7.5	1.1	0.9
2019	11.5	1.5	1.1
2040	20.0	2.1	1.5
2000	30.4	2.3 - 2.0 avec déversoir	2.0 (1.7 avec déversoir)

La Figure 8-16 montre que le déversoir de 1500 m de large et d'une hauteur de 1 mIGN, avec des barrages des deux côtés (pour fixer la largeur) et en incluant une protection du sol sur toute la largeur du déversoir, n'a pratiquement aucun effet sur le cordon littoral qui l'entoure.

Le transport littoral peut être affecté par les forts courants créés par l'écoulement des eaux fluviales, cependant, le fait que le déversoir sera en fonction sur une période relativement courte (Tableau 8-5) il aura une influence limitée sur le développement du littoral à long terme.

Il est important de noter qu'on ne peut pas exclure que les vitesses d'écoulement relativement élevées puissent entraîner l'affouillement (*scour*) à la transition entre les protections et/ou les barrages d'un côté et les fonds marins et la plage de sable de l'autre côté. En outre, une amplitude de marée fixe de 0,8 m a été utilisée dans ces calculs indicatifs, ce qui signifie que les vagues ne pénètrent pas encore dans le déversoir. Cela peut être le cas lors d'une marée de vives-eaux et/ou une tempête. Dans ce cas, la rive fluviale située directement derrière le déversoir peut éventuellement s'éroder.

Il est recommandé d'effectuer des mesures complémentaires de renforcement du cordon littoral avec des rechargements de sable, et la mise en œuvre de structures en dur autour du déversoir, afin de limiter les problèmes d'affouillement.

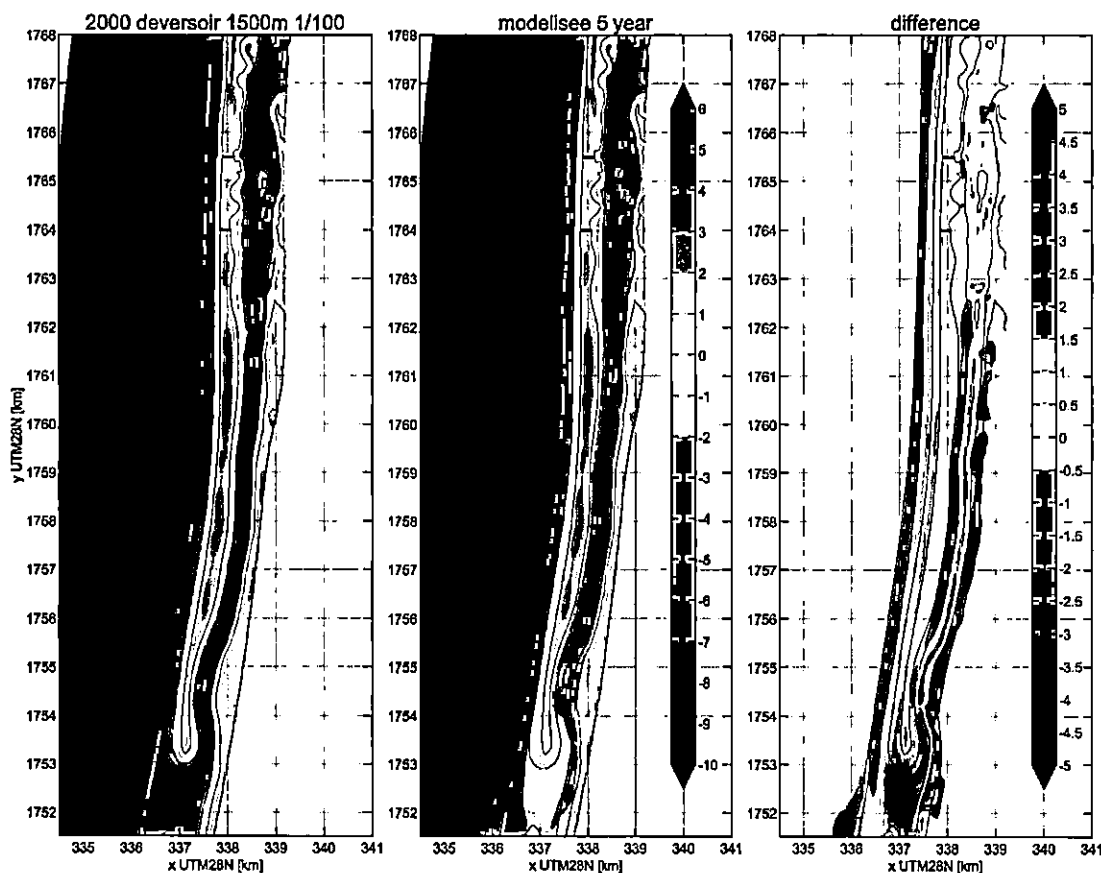


Figure 8-16 : bathymétrie de 2000 avec déversoir (à gauche), prédit après 5 ans (au milieu) et leur différence (à droite) pour le calcul dans lequel le débit à Diama la première année est augmenté jusqu'à 3384 m³/s (période de retour de 1/100).

8.2.3 Impact sur le risque d'inondation lié aux crues du fleuve

8.2.3.1 Impact sur Saint-Louis

Les modélisations hydrauliques portent sur des crues de période de retour 10, 30 et 100 ans pour chacun des deux horizons d'étude.

Deux tests portant sur la longueur de l'ouvrage à mettre en place, 1500 et 3000 m, ont été réalisés. L'objectif est de diminuer les niveaux d'inondation au droit de Saint-Louis en deçà de la cote objectif de 1.50 mIGN.

A l'horizon 2050

Pour rappel, les cotes d'inondations maximales attendues à Saint-Louis en 2050, dans le cadre du scénario 2 sont les suivantes :

- 2 ans : 1.26-1.38 mIGN,
- 5 ans : 1.39-1.51 mIGN,
- 10 ans : 1.48-1.55 mIGN,
- 30 ans : 1.78 mIGN,
- 100 ans : 1.90 mIGN.

L'ouverture de la brèche contrôlée du scénario 2-1 est donc prévue dès l'occurrence décennale (en moyenne une fois tous les dix ans).

Les résultats des modélisations en termes de cote d'inondation et de débit déversé par la brèche contrôlée sont présentés dans le Tableau 8-3.

Tableau 8-3 : Impact de la brèche contrôlée en aval de Saint-Louis sur les inondations – Horizon 2050

Position de l'embouchure	Période de retour (ans)	Débit (m³/s)	Config. de brèche	Débit déversé (m³/s)	Cote max S3 (mIGN)	Cote max Diama (mIGN)	Cote max S2 (mIGN)	Cote max S1 (mIGN)	Cote max amont Saint-Louis (mIGN)	Cote max Saint-Louis (Faidherbe) (mIGN)	Cote max aval Saint-Louis (mIGN)
Sud de Degounaye PK 23	10	2311-2449	Aucune	0	1.74-1.81	1.82-1.89	1.74-1.81	1.64-1.73	1.51-1.58	1.48-1.55	1.42-1.49
			Brèche 1500 m	439	1.69-1.76	1.78-1.85	1.69-1.76	1.61-1.68	1.45-1.52	1.42-1.49	1.35-1.42
			Brèche 3000m	773	1.66-1.73	1.76-1.83	1.67-1.74	1.58-1.65	1.41-1.48	1.38-1.45	1.32-1.39
			Aucune	0	2.07	2.15	2.07	1.99	1.82	1.78	1.68
	30	3060	Brèche 1500 m	642	1.97	2.06	1.97	1.88	1.69	1.63	1.54
			Aucune	0	2.21	2.28	2.20	2.12	1.95	1.90	1.79
	100	3384	Brèche 1500 m	754	2.09	2.17	2.08	1.98	1.78	1.72	1.60
			Brèche 3000m	1221	2.03	2.13	2.03	1.93	1.71	1.64	1.52
			Aucune	0	2.21	2.28	2.20	2.12	1.95	1.90	1.79

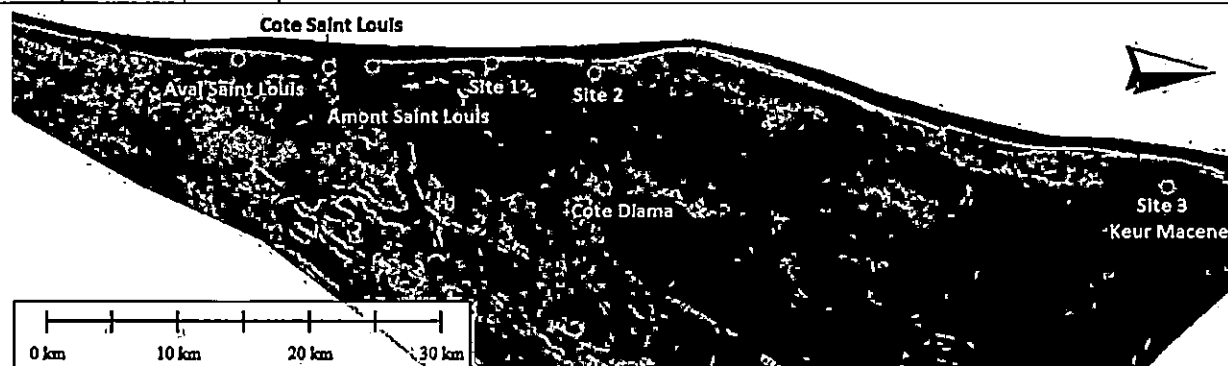


Figure 8-17 : Scénario 2-1 – Horizon 2050 : Localisation des points de contrôle

Les modélisations mettent en évidence un impact notable des déversements par la brèche contrôlée sur les cotes d'inondations à Saint-Louis aux occurrences trentennale et centennale. Pour une brèche de 1500 m, la cote d'inondation d'une crue 100 ans au Pont Faidherbe chute de 18 cm, et de 26 cm pour une brèche de 3000 m pour une crue de période de retour 100 ans. Pour une crue trentennale, les niveaux d'eau baissent de 15 cm à Saint-Louis pour une brèche de 1500 m. Néanmoins, à l'occurrence décennale, l'impact sur les inondations est très limité avec une diminution maximum de 10 cm pour une brèche de 3000 m.

En outre, quelle que soit la longueur de la brèche contrôlée, les niveaux d'inondation calculés sont supérieurs au seuil d'inondation des quartiers de Saint-Louis (1.50 mIGN) dès l'occurrence trentennale. L'ouvrage étudié permet donc de limiter les hauteurs de submersion sans pour autant éviter les inondations de la ville de Saint-Louis.

Enfin, on note qu'une brèche de 3000 m apporte peu de valeur ajoutée en comparaison d'une brèche de 1500 m. Pour une crue centennale, le doublement de la largeur de la brèche ne permet que de gagner 8 cm sur la cote d'inondation, alors qu'une brèche de 1500 m permet à elle seule d'abaisser la ligne d'eau de 18 cm.

L'impact du déversoir de 1500 m au sud de Saint-Louis pour une crue centennale à l'horizon 2050 est présenté en Figure 8-18. Les cotes résultantes à Saint-Louis sont présentées en Figure 8-19.

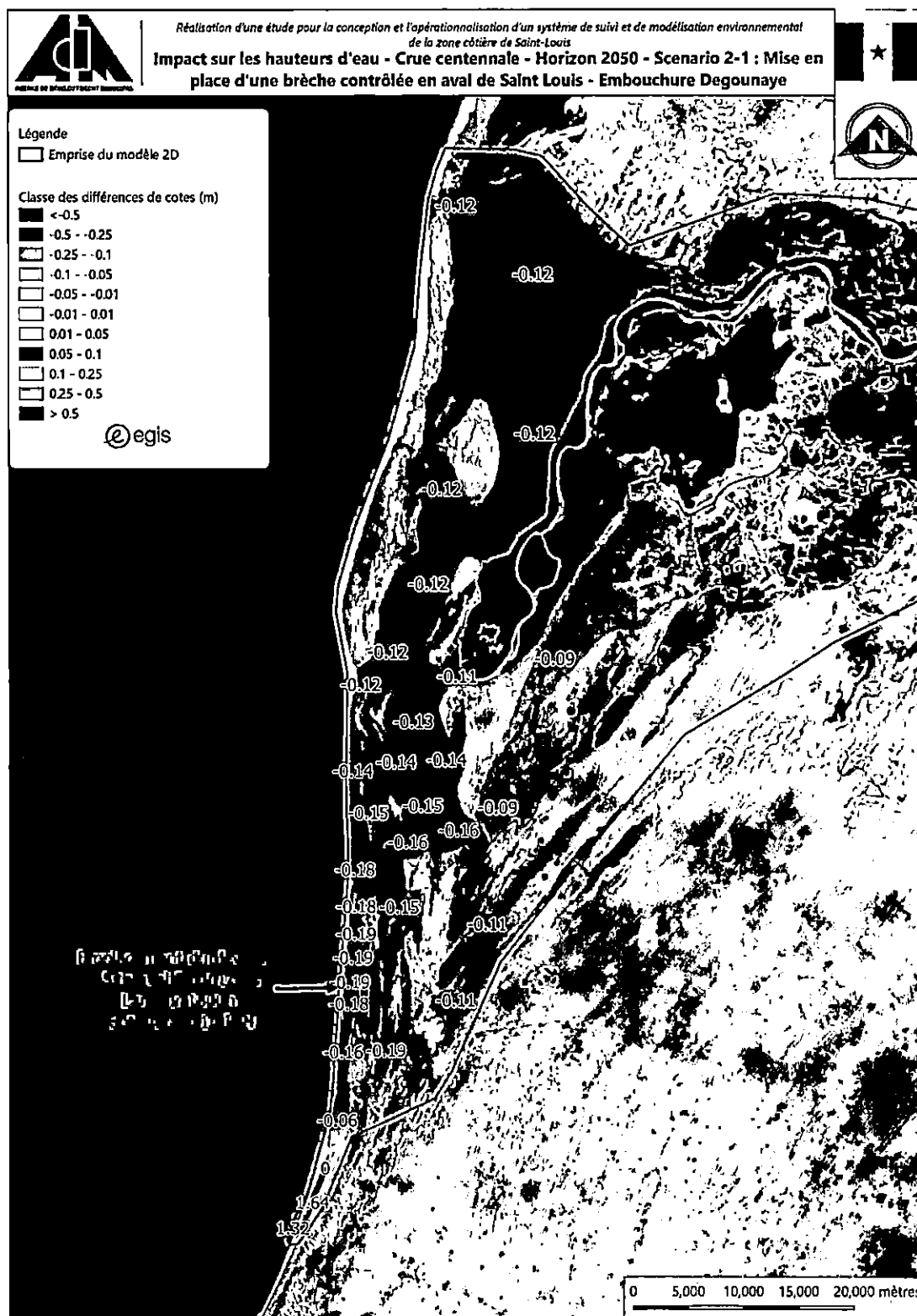


Figure 8-18 : Impacts sur les cotes d'inondation – Scénario 2-1 – Horizon 2050 – Q100 – Delta du fleuve

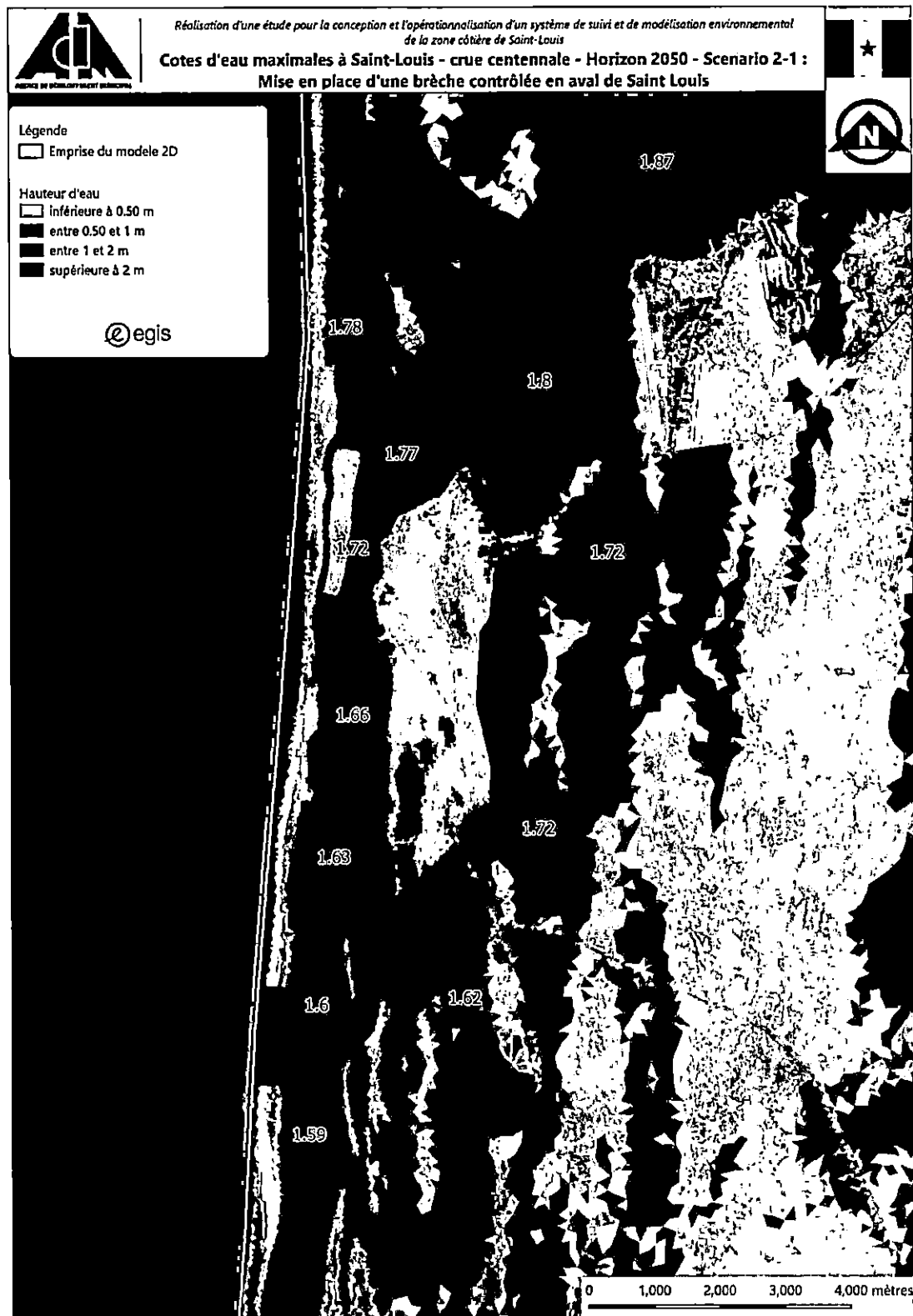


Figure 8-19 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2-1 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis

A l'horizon 2100

Pour rappel, les cotes d'inondations maximales attendues à Saint-Louis en 2100, dans le cadre du scénario 2 sont les suivantes :

■ Embouchure à Degounaye :

- 2 ans : 1.65 mIGN,
- 5 ans : 1.74 mIGN,
- 10 ans : 1.78 mIGN,
- 30 ans : 1.82 mIGN,
- 100 ans : 1.84 mIGN.

■ Embouchure à Potou :

- 2 ans : 1.75 mIGN,
- 5 ans : 1.95 mIGN,
- 10 ans : 2.05 mIGN,
- 30 ans : 2.15 mIGN,
- 100 ans : 2.20 mIGN.

L'ouverture de la brèche contrôlée du scénario 2-1 est donc prévue dès l'occurrence biennale quelle que soit la position de l'embouchure.

Les résultats des modélisations en termes de cote d'inondation et de débit déversé par la brèche contrôlée sont présentés dans le Tableau 8-4.

Tableau 8-4 : Impact de la brèche contrôlée en aval de Saint-Louis sur les inondations – Horizon 2100

Position de l'embouchure	Période de retour (ans)	Débit (m³/s)	Config. de brèche	Débit déversé (m³/s)	Cote max S3 (mIGN)	Cote max Dama (mIGN)	Cote max S2 (mIGN)	Cote max S1 (mIGN)	Cote max amont Saint-Louis (mIGN)	Cote max Saint-Louis (Faidherbe) (mIGN)	Cote max aval Saint-Louis (mIGN)
Sud de Degounaye PK 23	10	2080	Aucune brèche	0	1.86	1.95	1.89	1.85	1.79	1.78	1.77
			Brèche 1500 m	703	1.79	1.89	1.83	1.79	1.74	1.73	1.73
			Brèche 3000m	1280	1.76	1.87	1.81	1.76	1.72	1.71	1.72
	30	2263	Aucune brèche	0	1.94	2.02	1.95	1.91	1.83	1.82	1.80
			Brèche 1500 m	750	1.87	1.96	1.89	1.85	1.78	1.77	1.76
	100	2331	Aucune brèche	0	1.96	2.04	1.98	1.93	1.85	1.84	1.81
			Brèche 1500 m	768	1.89	1.98	1.91	1.87	1.79	1.78	1.77
			Brèche 3000m	1345	1.86	1.96	1.89	1.84	1.77	1.76	1.76
Potou PK 31	10	2080	Aucune brèche	0	2.17	2.21	2.17	2.13	2.07	2.05	2.02
			Brèche 1500 m	1076	1.90	1.98	1.92	1.88	1.81	1.80	1.78
	30	2263	Aucune brèche	0	2.28	2.32	2.28	2.24	2.18	2.15	2.12
			Brèche 1500 m	1167	1.97	2.04	1.98	1.93	1.85	1.84	1.81
	100	2331	Aucune brèche	0	2.33	2.37	2.32	2.29	2.22	2.20	2.15
			Brèche 1500 m	1200	1.99	2.06	2.00	1.95	1.87	1.85	1.82

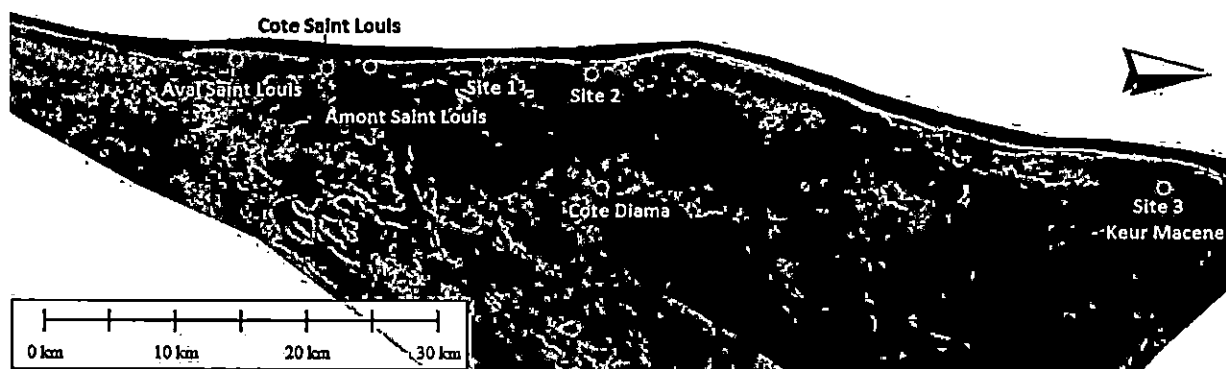


Figure 8-20 : Scénario 2-1 – Horizon 2100 : Localisation des points de contrôle

Dans l'hypothèse d'une embouchure située à Degounaye, les modélisations mettent en évidence l'impact très faible de la brèche contrôlée sur les cotes d'inondations à Saint-Louis quelle que soit l'occurrence et la largeur de la brèche. Seul un abaissement très faible de la ligne d'eau est attendu pour une crue centennale, de 6 à 8 cm en fonction de la largeur de la brèche, qui ne permet pas de protéger Saint-Louis contre les inondations.

Dans l'hypothèse d'une embouchure située à Potou, l'impact de la brèche contrôlée est plus prononcé, de 25 cm à 35 cm en fonction de l'occurrence pour une brèche de largeur 1500 m. Cette diminution plus

importante des cotes est liée aux fortes hauteurs d'eau d'une configuration sans brèche, et ne permet pas d'amener la ligne d'eau sous la cote de protection de Saint-Louis, pour aucune des occurrences.

De manière générale, la cote atteinte par la mer en 2100, proche de 1.80 mIGN, et la proximité du déversoir avec la ville de Saint-Louis limitent grandement l'efficacité de cet aménagement à l'horizon 2100.

L'impact du déversoir de 1500 m au sud de Saint-Louis pour une crue centennale à l'horizon 2100 et une configuration d'embouchure à Potou est présenté en Figure 8-21. Les cotes résultantes à Saint-Louis sont présentées en Figure 8-22.

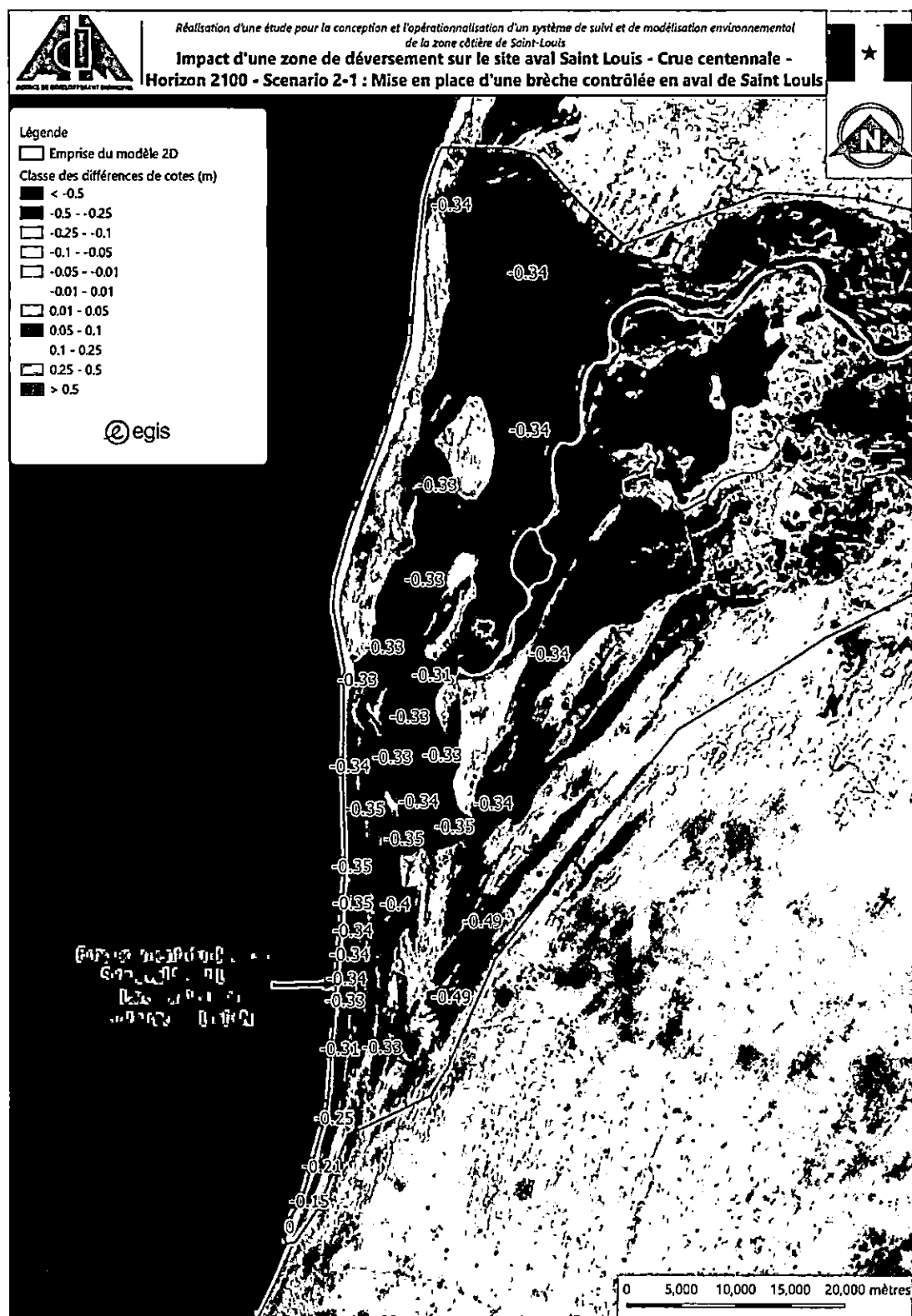


Figure 8-21 : Impacts sur les cotes d'inondation – Scénario 2-1 – Horizon 2100 – Q100 – Embouchure Potou – Delta du fleuve

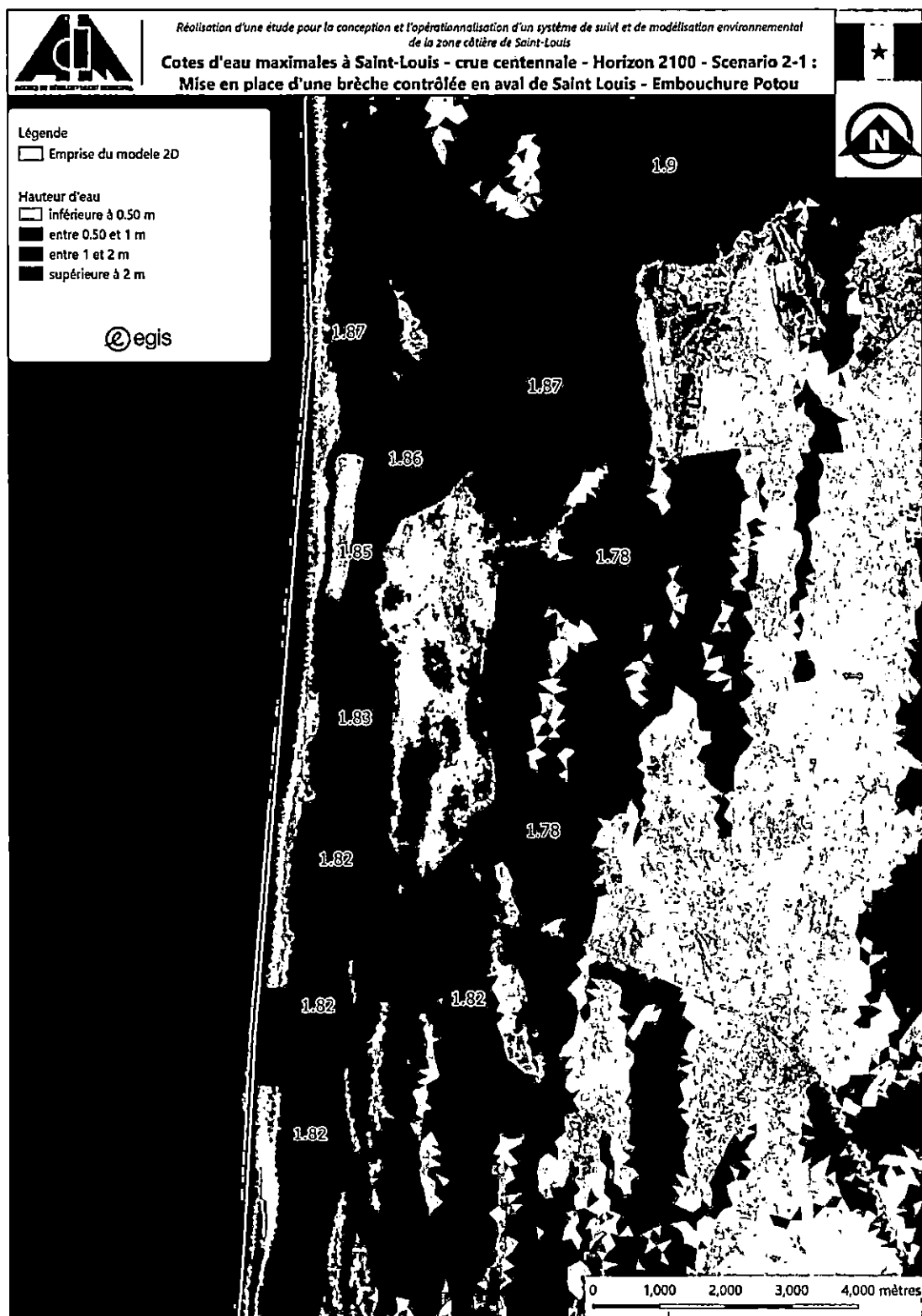


Figure 8-22 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2-1 – Horizon 2100 – Q100 – Embouchure Potou – Zoom sur Saint-Louis

Conclusion

La fréquence d'ouverture de la brèche contrôlée au sud de Saint-Louis est d'une fois tous les 10 ans à l'horizon 2050 et de plus d'une fois tous les 2 ans en 2100, pour prévenir le dépassement de la cote 1.5 mIGN à Saint-Louis.

La brèche contrôlée permet une certaine diminution des hauteurs d'eau pour les crues fortes (30 ans, 100 ans) à l'horizon 2050, pour une largeur de brèche de 1500 m. Une brèche plus large n'apporte que peu d'amélioration, notamment compte tenu du coût d'installation et de gestion que cela représente.

A l'horizon 2100, la montée du niveau marin, couplée à la proximité du déversoir de la ville de Saint-Louis, réduit drastiquement son utilité notamment pour une embouchure à Degounaye.

Dans toutes les situations, cette brèche contrôlée ne permet pas de respecter l'objectif de protection à 1.5 mIGN.

Pour une crue centennale, avec une brèche au sud de Saint-Louis de 1500 m, les inondations touchent :

- A l'Horizon 2050 : 100 600 habitants
- A l'Horizon 2100 :
 - *Embouchure à Degounaye* : 125 700 habitants,
 - *Embouchure à Potou* : 160 200 habitants.

Les volumes, débits moyens et durées de déversement à l'horizon 2050 sont présentées dans le tableau suivant.

Tableau 8-5 : Brèche contrôlée en aval de Saint-Louis – Horizon 2050 – Volume et durée des déversements

Période de retour (ans)	Volume (milliards de m3)	Durée de déversement (jours)	Débit déversé moyen (m³/s)
10	1.0	75	173
30	1.7	80	296
100	2.2	85	365

Un renforcement des ouvrages d'endiguement existants de la ville de Saint-Louis est donc nécessaire, indépendamment de la brèche contrôlée étudiée, pour limiter les dommages à la ville de Saint-Louis en cas de forte inondation.

8.2.3.2 Impact sur les communes du delta

L'impact de la brèche contrôlée sur les populations du delta pour une crue centennale est le suivant :

A l'horizon 2050 :

- **Ndiébène Gandiole** : 6 000 habitants touchés,
- **Gandon** : 8 100 habitants touchés,
- **Diam**a : 1 400 habitants touchés,
- **Mauritanie** : 1 700 habitants touchés,
- **TOTAL** : 17 200 habitants touchés.

A l'horizon 2100 :

Embouchure Degounaye

- **Ndiébène Gandiole** : 11 200 habitants touchés,
- **Gandon** : 7 100 habitants touchés,
- **Diam**a : 600 habitants touchés,
- **Mauritanie** : 1 300 habitants touchés,
- **TOTAL** : 20 300 habitants touchés.

Embouchure Potou

- **Ndiébène Gandiole** : 12 600 habitants touchés,
- **Gandon** : 9 000 habitants touchés,
- **Diam**a : 1 400 habitants touchés,
- **Mauritanie** : 1 500 habitants touchés,
- **TOTAL** : 24 400 habitants touchés.

La mise en place d'une brèche contrôlée de longueur 1500 m permet de diminuer sensiblement les hauteurs d'inondation sur le delta, notamment à l'Horizon 2050 où on note une légère réduction de la surface inondée. Les populations sont en partie protégées, notamment sur Ndiébène Gandiole et Gandon, avec la mise hors d'eau de 3 500 et 2 300 habitants respectivement.

Pour l'Horizon 2100, la montée du niveau marin à une cote de 1.80 mIGN limite l'intérêt de cette brèche. Toutefois, celle-ci permet d'évacuer plus facilement les débits du fleuve et de diminuer les cotes d'inondation. Ce phénomène est le plus marquant pour une position d'embouchure à Potou, pour laquelle les débits sont fortement contraints. On observe alors une diminution de près de la moitié de la population exposée sur l'ensemble du delta. Néanmoins, la configuration de l'embouchure à Degounaye couplée avec la brèche présente les meilleurs résultats.

8.3 Scénario 2-2 : Actions de diminution du risque inondation sur Saint-Louis

8.3.1 Description des travaux envisagés

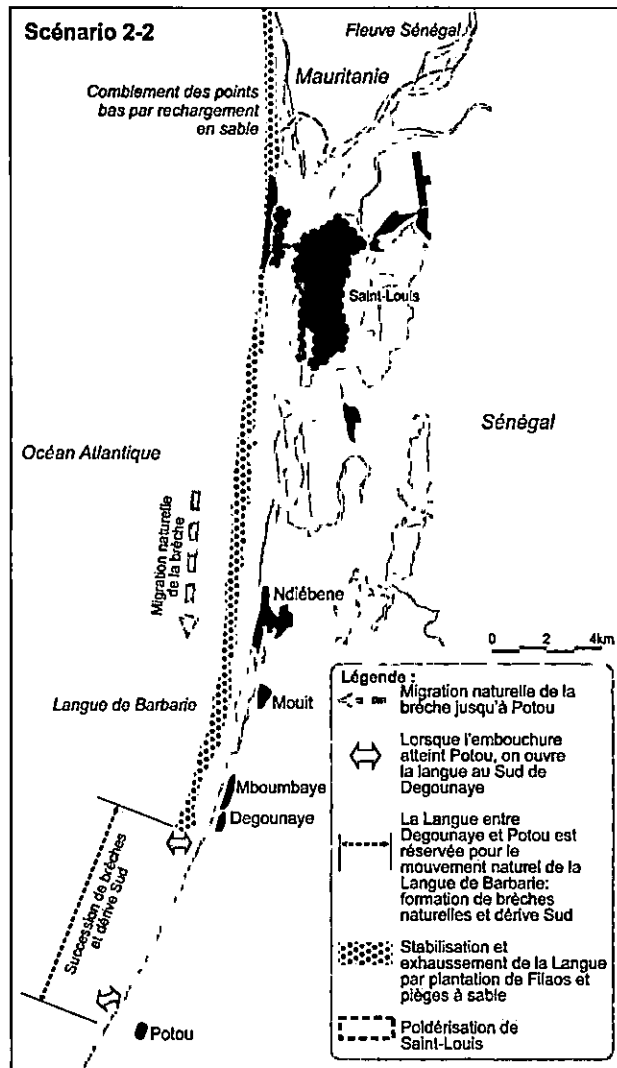


Figure 8-23 : Présentation du scénario 2-2

rôle de protection anti-inondation. De la même manière, les ouvrages d'endiguement de Sor devront faire l'objet d'un diagnostic géotechnique de manière à s'assurer de leur stabilité et éviter les risques de dysfonctionnement en période de crue (la digue de Darou a cédé lors des inondations de 1999).

Ce scénario intègre des travaux visant à la protection de la ville de Saint-Louis contre les inondations.

Le diagnostic réalisé au §5.2, met en évidence que sur les secteurs de l'Ile et de Sor, qui présentent les enjeux les plus importants en termes de fréquence d'inondation et d'importance des zones urbanisées, les ouvrages de protection déjà en place assurent une protection jusqu'à une cote de 2 mIGN :

- Pour 70% du linéaire des ouvrages de l'Ile,
- Pour 62 % du linéaire des ouvrages de Sor.

Le niveau de protection peut être homogénéisé jusqu'à la cote 2 mIGN en mettant à niveau et confortant :

- Un linéaire de 2.2 km de quais sur l'Ile,
- Un linéaire de 6.7 km de digues sur Sor.

Sur le secteur de Sor, les analyses menées mettent en évidence l'importance de renforcer en priorité la digue de Darou.

Ces travaux doivent également prendre en compte la réhabilitation des quais de l'Ile, qui sont en de nombreux secteurs fortement dégradés et ne sont pas à même de jouer leur

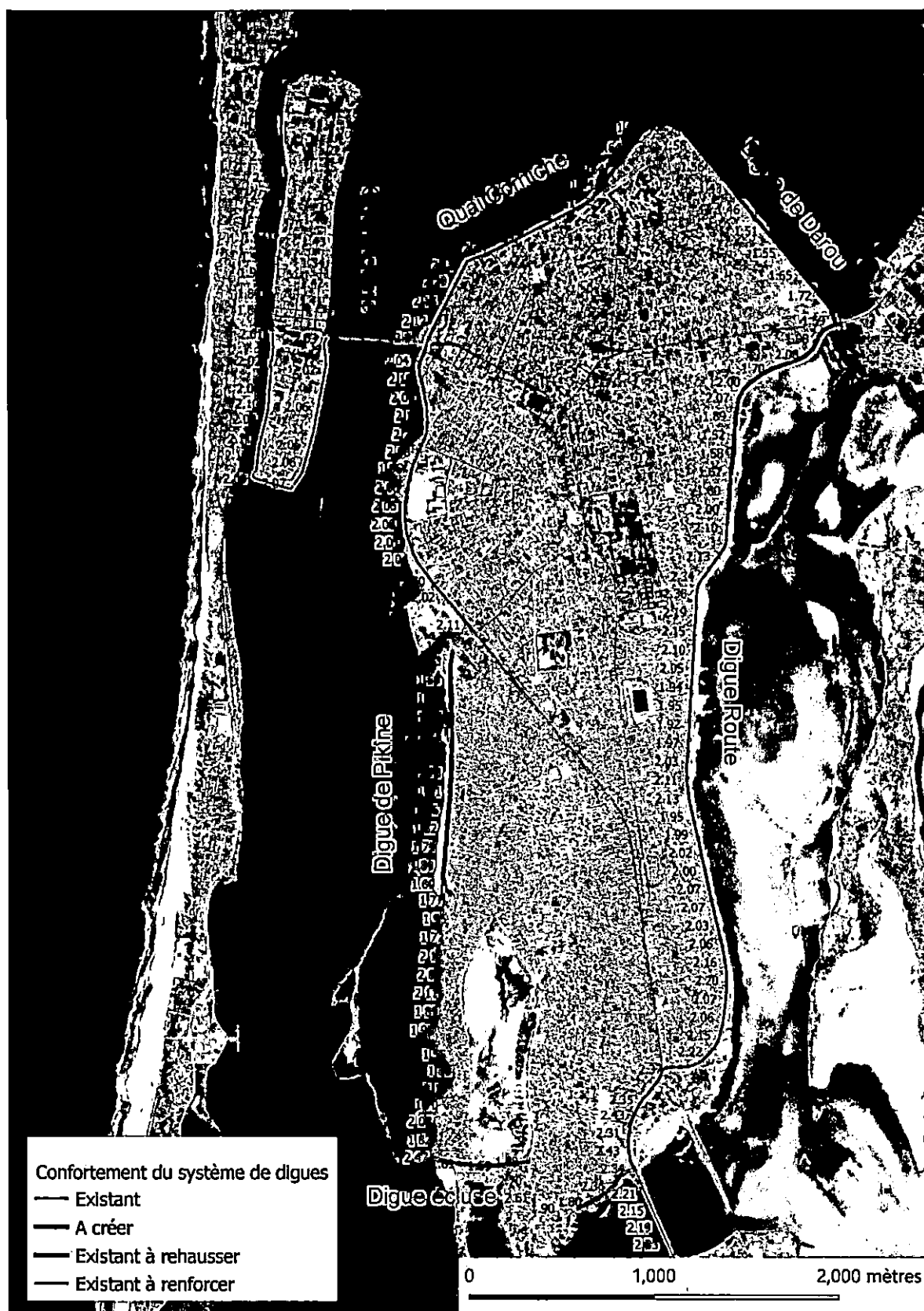


Figure 8-24 : Confortement des ouvrages de protection de Saint-Louis

8.3.2 Impact sur la dynamique côtière

Cette variante n'a pas d'impact sur le dynamique côtière.

8.3.3 Impact sur le risque d'inondation lié aux crues du fleuve

8.3.3.1 Impact sur Saint-Louis

Dans ces conditions la fréquence des inondations sur les quartiers de l'île et de Sor est la suivante :

- A l'horizon 2050 : 100 ans,
- A l'horizon 2100 :
 - Position de l'embouchure à Degounaye : 100 ans,
 - Position de l'embouchure à Potou : 5 à 10 ans

Le confortement des ouvrages de protection contre les inondations à la cote de 2 mIGN est efficace à l'horizon 2050 et permet une protection centennale.

A l'horizon 2100, l'aménagement conserve son efficacité lorsque l'embouchure est située à Degounaye. Le niveau de protection est abaissé à une occurrence 5 à 10 ans si l'embouchure évolue jusqu'à Potou.

Le seul moyen d'assurer un niveau de protection centennal à l'horizon 2100 serait d'adopter un autre mode opératoire que celui prévu dans le scénario 2. Le système d'alerte en fonction sur le fleuve permet d'anticiper l'importance de la crue d'hivernage plusieurs semaines à l'avance. Son exploitation permet d'assurer une position de l'embouchure à Degounaye en cas de fortes crues (> 5 à 10 ans), par la création d'une brèche artificielle au moment opportun.

Ces aménagements permettent de mettre hors d'eau environ 41 000 personnes à l'horizon 2050, et de 81 800 à 104 800 habitants en fonction de la position de l'embouchure à l'horizon 2100.

Pour une crue centennale, les inondations touchent :

- A l'Horizon 2050 : 59 600 habitants
- A l'Horizon 2100 :
 - *Embouchure à Degounaye* : 20 900 habitants,
 - *Embouchure à Potou* : 78 400 habitants.

La population qui reste exposée réside dans les autres quartiers de Saint-Louis non protégés par un système d'endiguement. On la retrouve majoritairement sur la Langue de Barbarie (le long de la rive droite du fleuve), sur Khor et sur l'extrémité sud de Sor, en avant des protections existantes.

L'inondabilité de Saint-Louis pour ce scénario est présentée en Figure 8-25 pour l'horizon 2050.

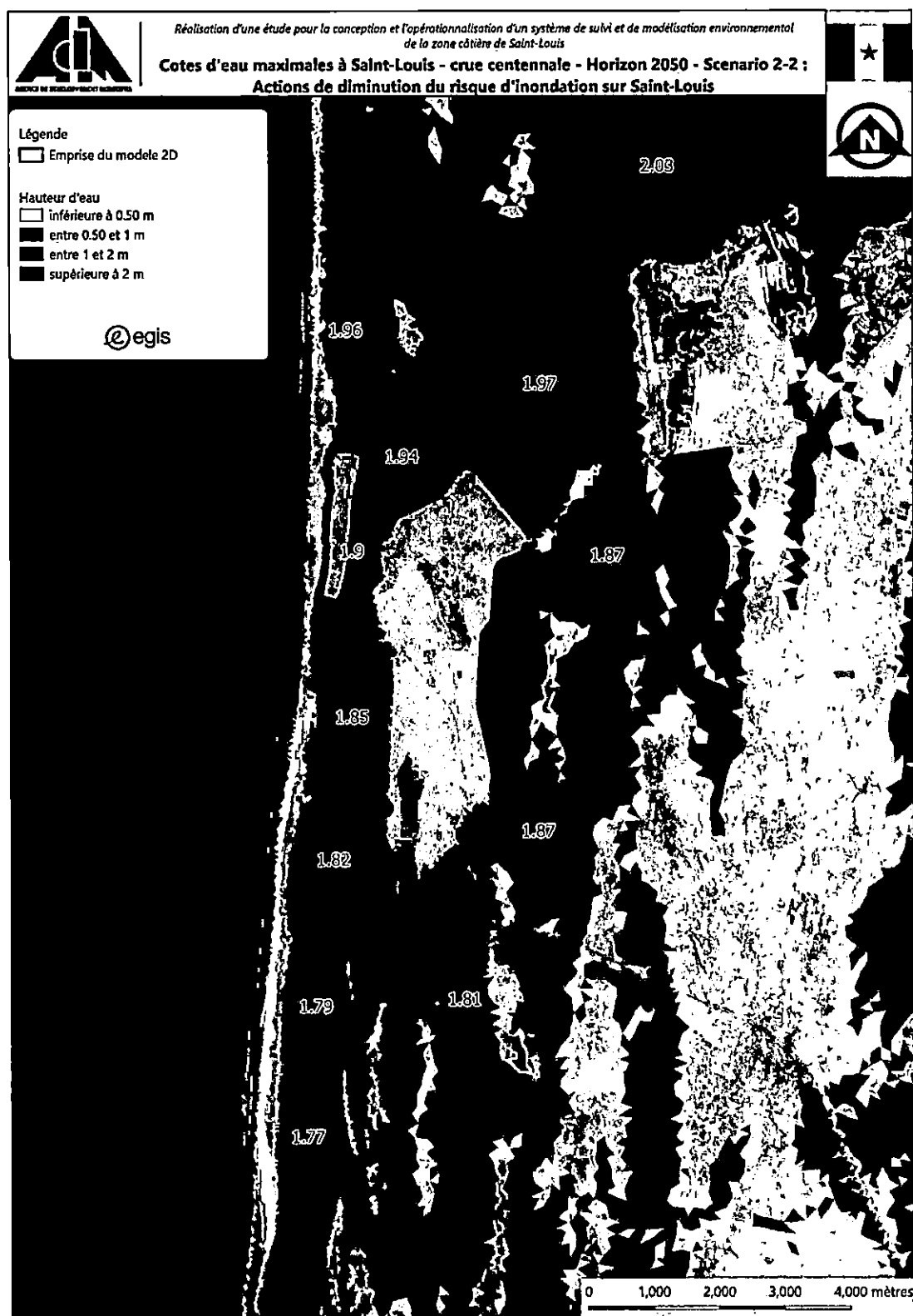
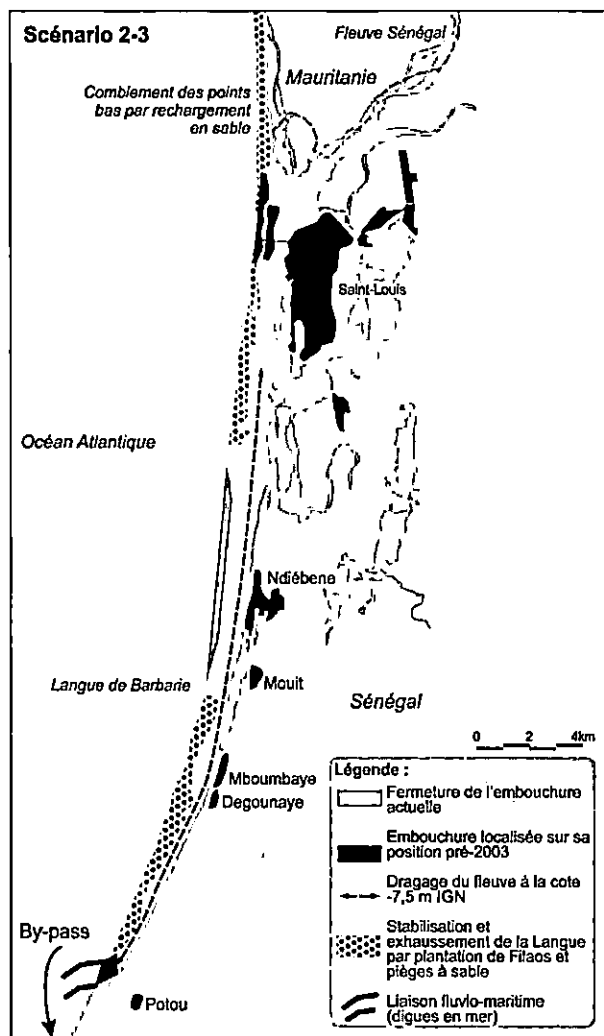


Figure 8-25 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2-2 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis

8.3.3.2 Impact sur les communes du delta

Cette variante du scénario 2 n'engendre pas d'impact sur le delta par rapport au scénario de base.

8.4 Scénario 2-3 : Mise en œuvre d'une liaison fluvio-maritime pérenne au droit de l'embouchure pré-2003



Le scénario 2-3 introduit la possibilité de créer un ouvrage permettant une liaison fluvio-maritime pérenne à l'extrémité sud de la Langue de Barbarie par la mise en place de digues en mer.

L'embouchure du fleuve est donc fixée au droit de Potou et la brèche actuelle colmatée.

Les ouvrages sont de même type que ceux retenus pour le projet portuaire de l'OMVS (cf. scénario 3 au chapitre 9).

Un bypass permettant de rétablir le transport littoral devra être mis en place pour éviter les problématiques d'érosion côtière au sud de Potou.

Le cordon littoral est conforté et exhausé au nord de Saint-Louis sur un linéaire de 15 km, par rechargement en sable et plantation de filaos et pièges à sable.

La partie sud du cordon est également confortée par plantation de filaos et pièges à sable.

Le dragage du fleuve jusqu'à son embouchure est également prévu dans cette variante. Le dragage assure une cote minimale de -7.5 m IGN sur une largeur de 100 m permettant un accès facilité à la mer. Le volume de dragage nécessaire est de 4.1 millions de m³.

Figure 8-26 : Présentation du scénario 2-3

8.4.1 Impact sur la dynamique côtière

La mise en place d'une embouchure fixe à Potou et le colmatage de la brèche existante permettent de stopper les érosions côtières du Gandiolais. Par contre, les impacts locaux seront très comparables aux impacts étudiés pour le scénario d'une embouchure contrôlée aux abords de Saint-Louis, comme décrit aux §9.1.1 et 9.1.2 : en l'absence de by-pass, une forte accrétion au nord et une érosion aussi forte au sud du port auront lieu. Par contre, les effets seront considérablement moins importants que le scénario 3, parce que la région autour du port à Potou connaît moins d'enjeux importants ; un by-pass pourrait réduire considérablement ces impacts nuisibles. Et avec la formation d'une brèche juste au sud du port, le chenal de navigation sera très probablement bouché par les sédiments dans quelques années et abandonné par le fleuve.

8.4.2 Impact sur le risque d'inondation lié aux crues du fleuve

8.4.2.1 Impact sur Saint-Louis

Les modélisations hydrauliques portent sur des crues de période de retour comprises entre 2 et 100 ans pour les deux horizons d'étude, 2050 et 2100.

Les hypothèses retenues pour la configuration du fleuve et de l'embouchure sont les suivantes :

- **Horizon 2050 et 2100** : l'embouchure se situe à Potou, soit 31 km à l'aval du pont Faidherbe. La bathymétrie employée est basée sur celle levée en Juin 2000 faisant suite à la crue de 1999, avec un surcreusement du fond du lit à la cote -7.5 mIGN sur une largeur de 100 m, correspondant au dragage prévu pour le projet de port de l'OMVS (voir chapitre 0).

Les cotes d'inondation observées à Saint-Louis sont comprises entre 1.31-1.43 et 2.08 mIGN à l'horizon 2050. A l'horizon 2100, celles-ci sont comprises entre 1.66 et 1.92 mIGN (Tableau 8-6).

Tableau 8-6 : Impact du scénario 2-3 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis

Horizon d'étude	Position de l'embouchure	Période de retour (ans)	Débit (m³/s)	Cote max S3 (mIGN)	Cote max Diama (mIGN)	Cote max S 2 (mIGN)	Cote max S 1 (mIGN)	Cote max amont Saint-Louis (mIGN)	Cote max Saint-Louis (Faidherbe) (mIGN)	Cote max aval Saint-Louis (mIGN)
Horizon 2050	Potou PK 31	2	1769-1944	1.49-1.61	1.58-1.70	1.51-1.63	1.44-1.56	1.33-1.45	1.31-1.43	1.28-1.40
		10	2311-2449	1.83-1.90	1.91-1.98	1.83-1.90	1.76-1.83	1.63-1.70	1.59-1.66	1.54-1.61
		30	3060	2.19	2.26	2.19	2.12	1.98	1.94	1.86
		100	3384	2.35	2.40	2.34	2.27	2.14	2.08	1.99
Horizon 2100	Potou PK 31	2	1476	1.65	1.76	1.71	1.69	1.67	1.66	1.67
		10	2080	1.93	2.01	1.95	1.91	1.84	1.83	1.81
		30	2263	2.02	2.09	2.03	1.98	1.91	1.89	1.86
		100	2331	2.05	2.12	2.06	2.02	1.94	1.92	1.88

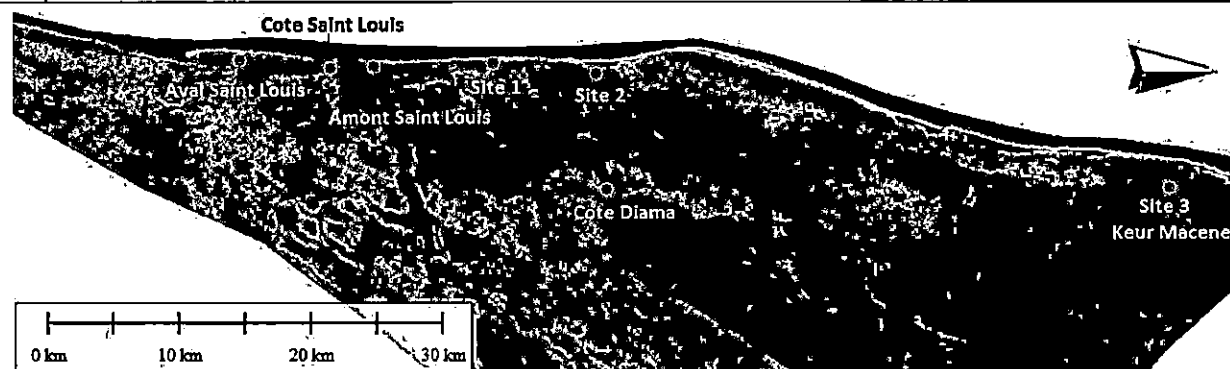


Figure 8-27 : Scénario 2-3 : Localisation des points de contrôle

- **A l'horizon 2050** : Les cotes d'inondation à Saint-Louis (comprises entre 1.31 et 1.43 mIGN pour le débit biennal et de 2.08 mIGN pour le débit centennal) sont plus importantes que pour le scénario 2 de base (comprises entre 1.26 et 1.38 mIGN pour le débit biennal et de 1.90 mIGN pour le débit centennal). L'installation de l'embouchure à Potou dès 2050 entraîne un impact négatif sur les niveaux d'inondation en comparaison du positionnement naturel à Degounaye attendu en 2050.

- **A l'horizon 2100** : Cette configuration est plus pénalisante que pour une embouchure à Degounaye pour laquelle les cotes d'inondation à Saint-Louis sont plus faibles (1.65 à 1.84 mIGN).
En revanche, ce scénario présente une amélioration comparée au scénario 2 de base avec l'embouchure à Potou. Les cotes d'inondation sont sensiblement plus faibles, entre -9 et -28 cm en fonction de l'occurrence.

Pour une crue centennale, les inondations touchent :

- A l'Horizon 2050 : 209 600 habitants,
- A l'Horizon 2100 : 190 600 habitants.

Pour les deux horizons, les cotes du fleuve le long du cordon littoral sont élevées. Même s'il est prévu de renforcer et d'exhausser le cordon, l'investissement important que représente la mise en place d'un port invite à la prudence quant aux effets potentiels d'une défaillance du système.

Dans cette configuration, **l'apparition potentielle d'une brèche naturelle à l'amont viendrait court-circuiter l'embouchure à Potou**. Ceci mènerait dans un premier temps à la formation d'une lagune vers l'aval, comme observé depuis 2003, isolant ainsi les ouvrages prévus au sud. A terme, la migration naturelle de l'embouchure viendrait détruire ces ouvrages.

Par rapport à la problématique des inondations fluviales, **le scénario entraine une aggravation des inondations sur Saint-Louis a court terme** (dès que le projet sera mis en œuvre), ainsi que pour les deux horizons d'étude pris en compte.

L'impact des aménagements de la variante 2-3 pour une crue centennale est présenté en Figure 8-28 à l'horizon 2050, et en Figure 8-30 à l'horizon 2100, en comparaison du scénario 2 de base avec embouchure à Potou pour 2100. Les cotes résultantes à Saint-Louis sont présentées en Figure 8-29 et Figure 8-31 respectivement.

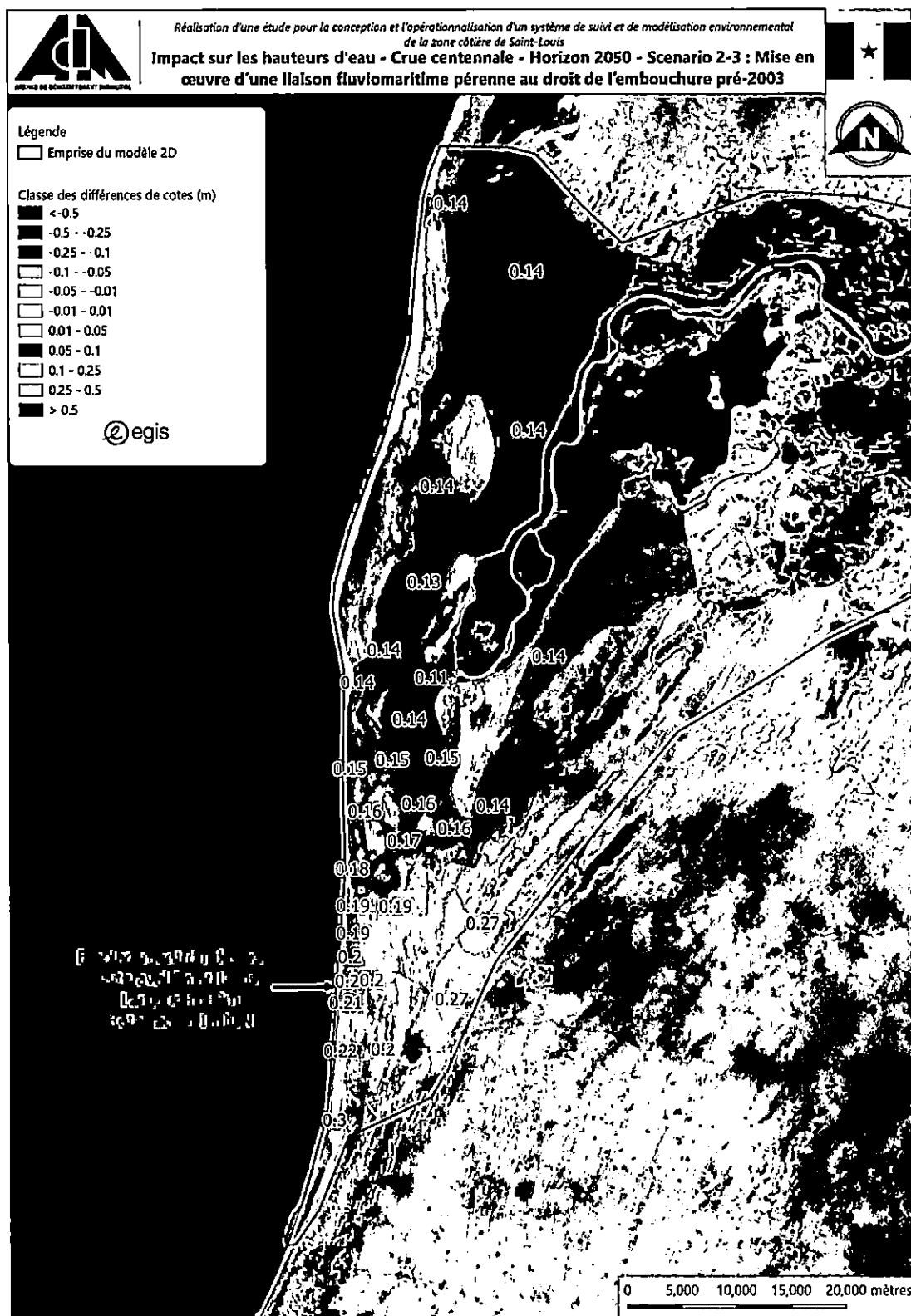


Figure 8-28 : Impacts sur les cotes d'inondation – Scénario 2-3 – Horizon 2050 – Q100 – Delta du fleuve

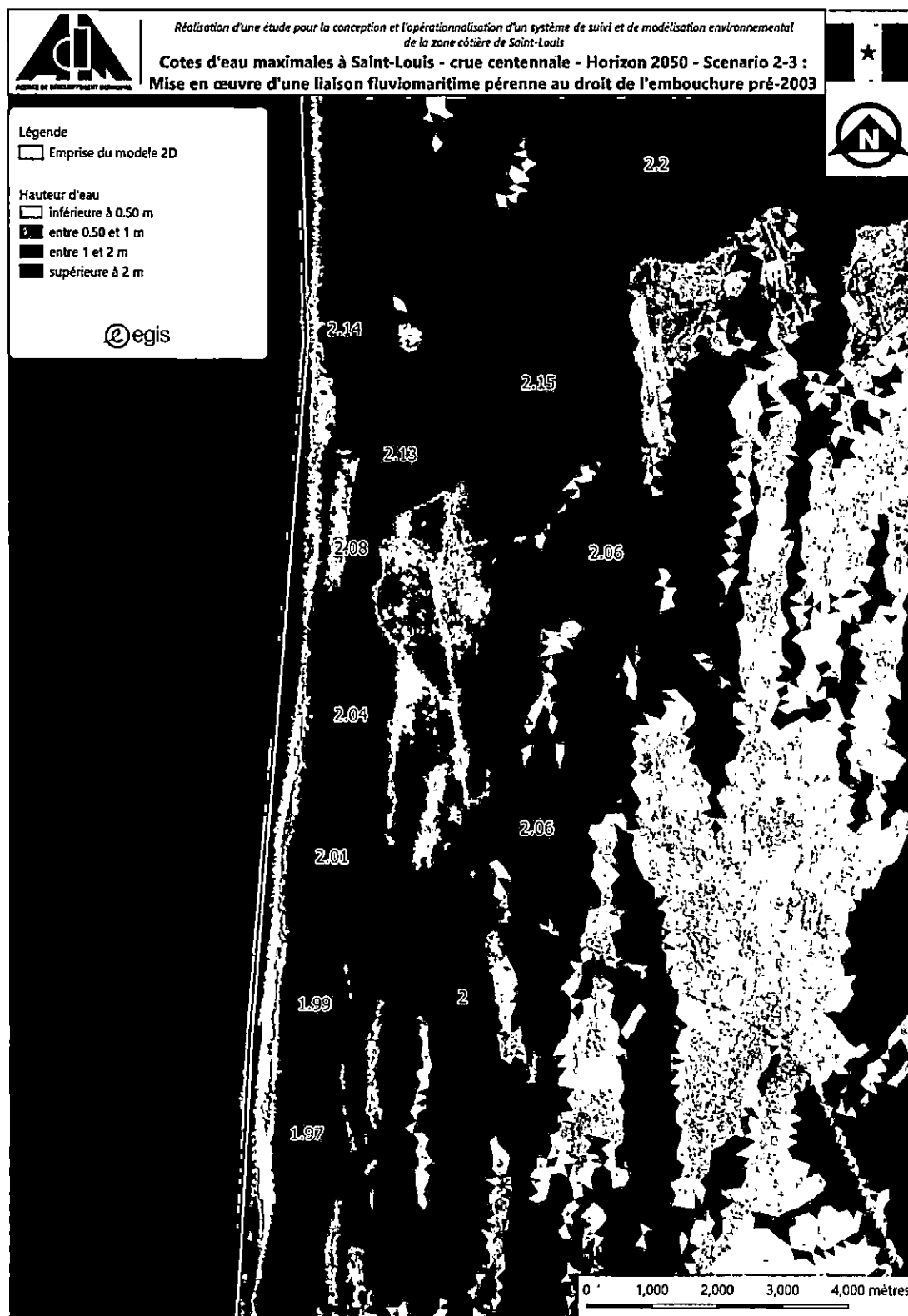


Figure 8-29 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2-3 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis

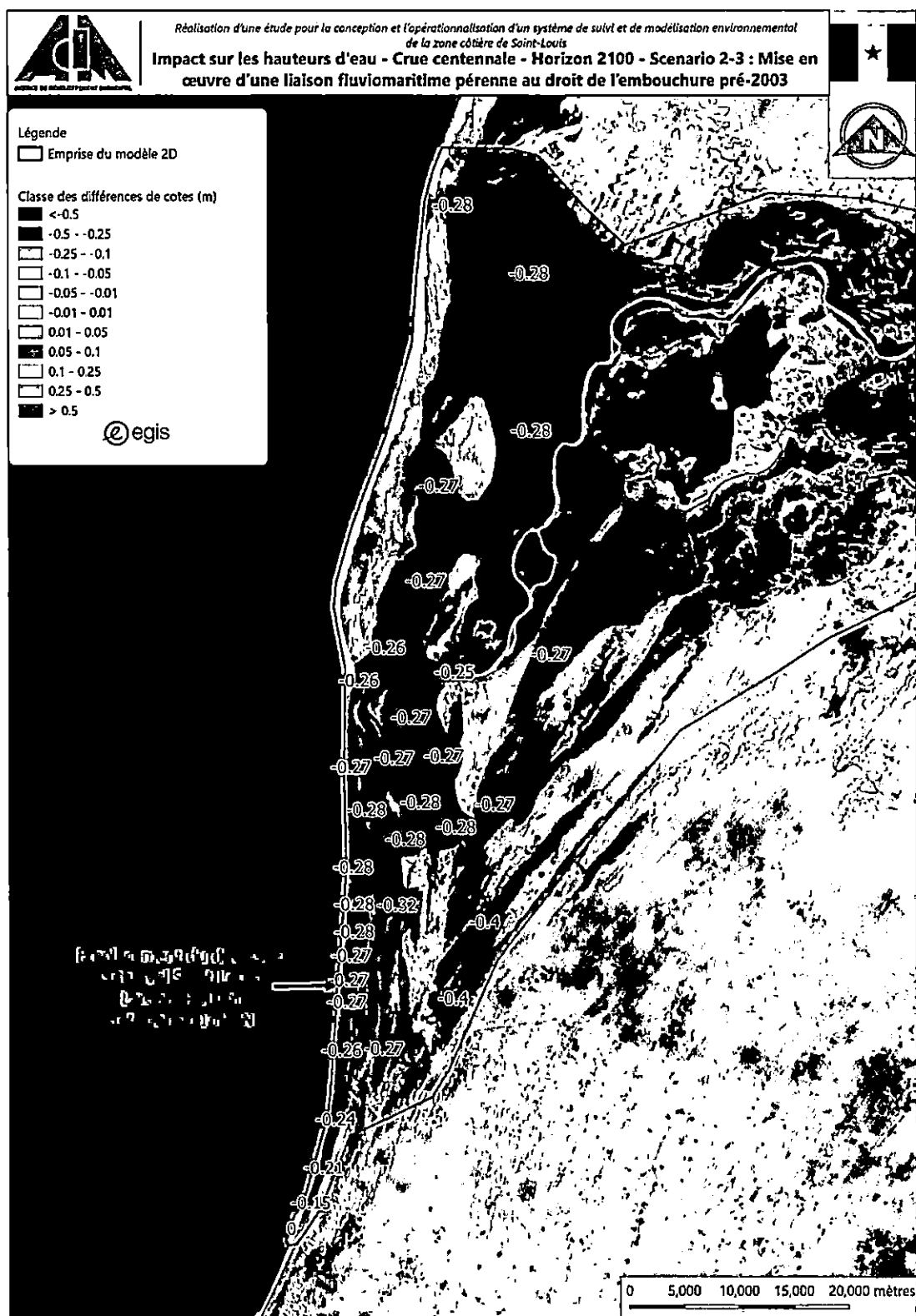


Figure 8-30 : Impacts sur les cotes d'inondation – Scénario 2-3 – Horizon 2100 – Q100 – Delta du fleuve

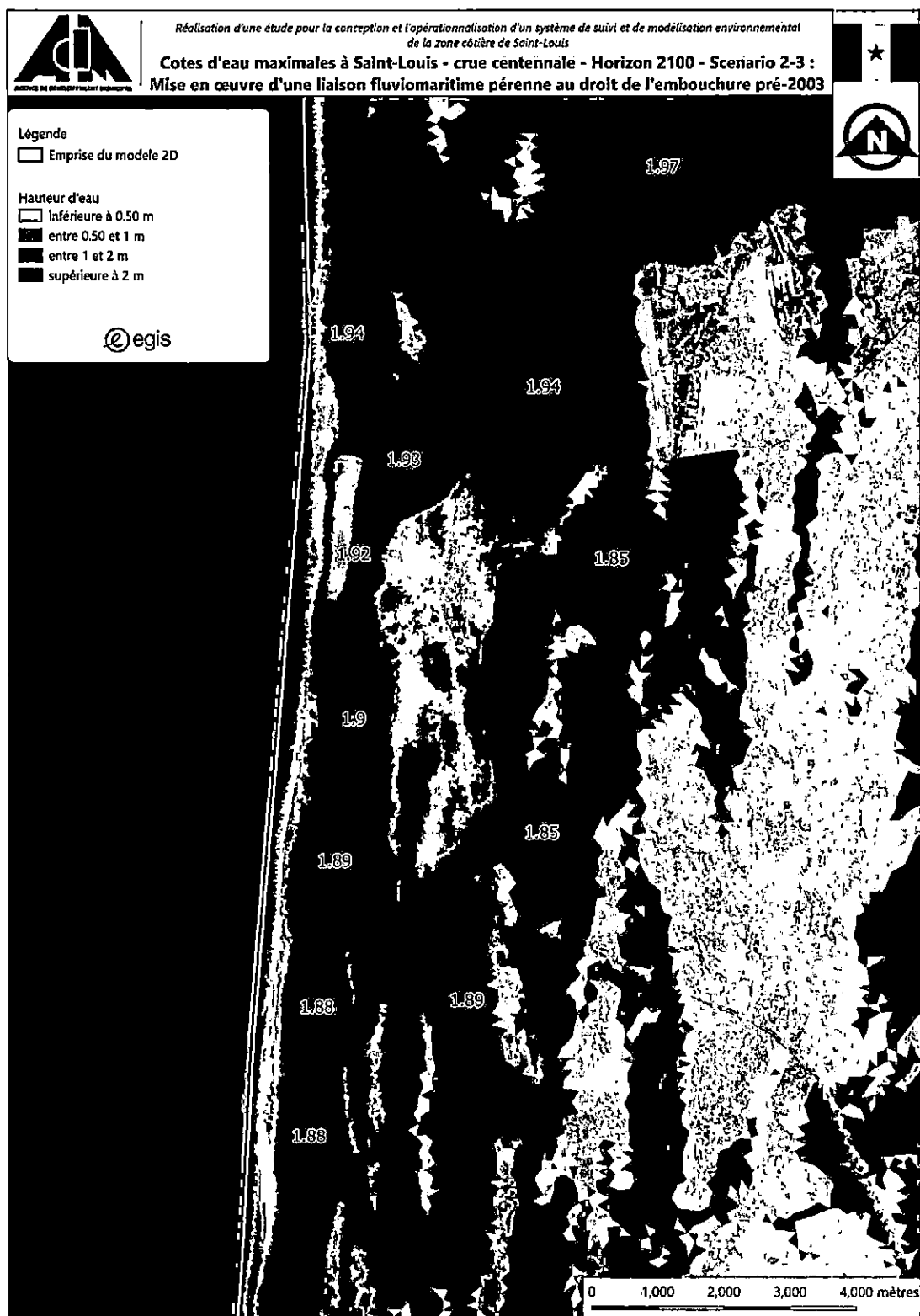


Figure 8-31 : Cotes d'eau maximales – Scénario 2-3 – Horizon 2100 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis

8.4.2.2 Impact sur les communes du delta

L'impact des aménagements prévus pour la variante 2-3 sur les populations du delta pour une crue centennale est le suivant :

A l'horizon 2050 :

- **Ndiébène Gandiole** : 14 800 habitants touchés,
- **Gandon** : 13 700 habitants touchés,
- **Diama** : 3 200 habitants touchés,
- **Mauritanie** : 2 300 habitants touchés,
- **TOTAL** : 34 100 habitants touchés.

A l'horizon 2100 :

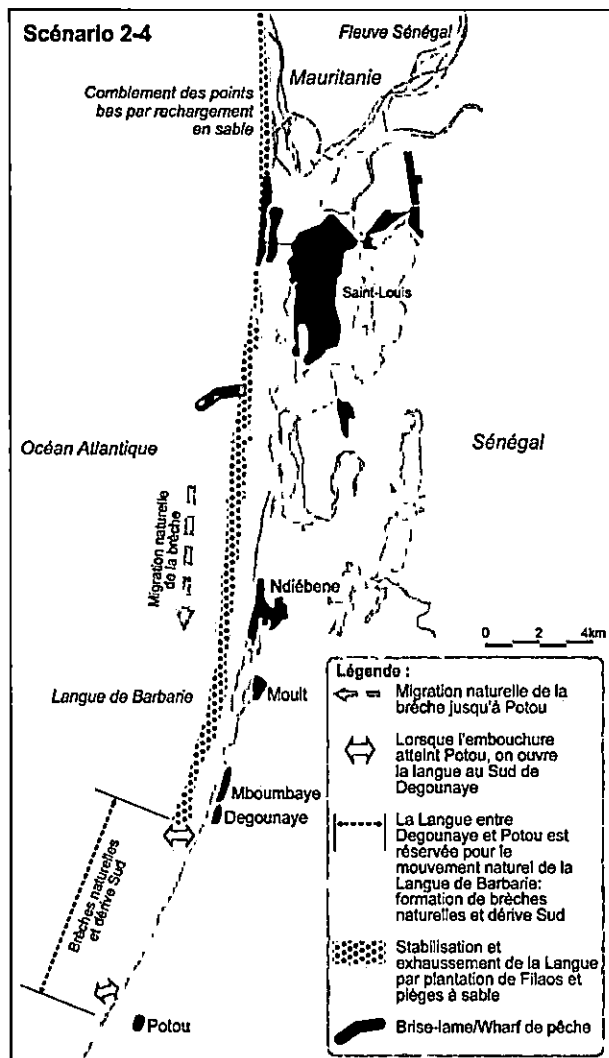
- **Ndiébène Gandiole** : 12 600 habitants touchés,
- **Gandon** : 10 100 habitants touchés,
- **Diama** : 1 900 habitants touchés,
- **Mauritanie** : 1 600 habitants touchés,
- **TOTAL** : 27 300 habitants touchés.

A l'horizon 2050, le positionnement de l'embouchure au droit de Potou augmente de manière importante l'inondabilité du delta. En comparaison du scénario de base, 11 800 habitants supplémentaires sont inondés sur le delta.

A l'horizon 2100, le dragage du fleuve permet d'améliorer l'hydraulique de l'embouchure et de diminuer les cotes d'inondation en comparaison du scénario de base avec l'embouchure à Potou. En revanche, en comparaison du scénario de base avec l'embouchure à Degounaye, la variante 2-3 expose davantage la population. Ce sont 2 900 habitants supplémentaires qui sont inondés dans cette configuration.

En conclusion, cette variante présente un impact globalement négatif sur l'inondabilité du delta.

8.5 Scénario 2-4 : Un wharf de pêche



Pour améliorer les conditions de mise à l'eau des pêcheurs et le passage de la barre, il est proposé de mettre en place un wharf permettant un meilleur accès pour les pêcheurs.

Cet aménagement, retenu dans le rapport du COSEC de 2002, n'offre pas de nouvel accès mer/fleuve, et ne permet d'améliorer la situation que pour le secteur de la pêche artisanale de Saint-Louis.

L'ouvrage envisagé est de type wharf : structure sur pieux avec voie de roulement, prolongée d'un quai brise-lames pour la protection des opérations de débarquement contre l'agitation.

Cet aménagement permet de sécuriser l'accostage et le débarquement des grandes pirogues au large de la barre ainsi que de sécuriser le passage de la barre et l'accostage à la plage des plus petites pirogues, dans la zone d'ombre du quai brise-lames.

Figure 8-32 : Présentation du scénario 2-4

Les dimensions de l'ouvrage sont les suivantes :

- Une jetée de 250 m permettant d'atteindre la cote -4 mCM (-5 mIGN),
- Un quai brise-lames de longueur 300 m.

Ce wharf doit être positionné au sud de Saint-Louis pour ne pas exposer la ville à l'érosion littorale en avant de l'ouvrage brise-lame.

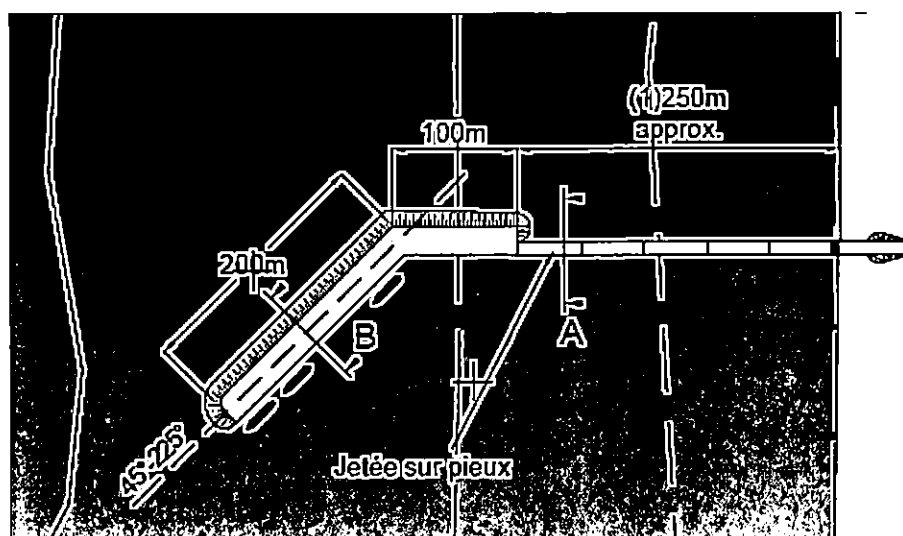


Figure 8-33 : Schéma du wharf de pêche issu du rapport COSEC de 2002

8.5.1 Impact sur la dynamique côtière

La structure devra être la plus transparente possible, par exemple construite sur des piliers, pour laisser passer les vagues et les sédiments le long de la côte. Une telle structure a été mise en œuvre avec succès à Grand Bassam, en Côte d'Ivoire ou à Bargny au Sénégal. Néanmoins, elle servirait seulement pour le débarquement des prises de poisson, sous conditions peu protégées, et ne permettrait pas de laisser les pirogues dans un environnement sûr.

Le wharf n'aurait pas un gros impact sur la dynamique côtière s'il était construit sur piles ou treillis ; en revanche, s'il était construit comme une digue fermée (comme cela est prévu pour la partie en eau profonde), l'impact serait sévère. Une telle structure fermée bloquerait les vagues et créerait des gradients dans le transport des sédiments le long de la côte, provoquant une grave érosion pouvant, à terme, entraîner une brèche dans le cordon littoral vers le sud-est du wharf.

Une alternative plus prometteuse sera de mettre en place un grand rechargement en sable devant Saint-Louis pour que les pêcheurs puissent accoster leurs bateaux sur la plage, comme ils le faisaient avant la brèche de 2003. En outre, un nouveau marché aux poissons pourrait être créé à proximité de la plage pour faciliter la vente du poisson.

8.5.2 Impact sur le risque d'inondation lié aux crues du fleuve

Cet ouvrage n'a pas d'impact sur le risque d'inondation lié aux crues du fleuve.

8.6 Estimation du coût du scénario 2 et de ses variantes

8.6.1 Estimation du coût du scénario 2 de base

Le coût global du scénario 2 est de **9.1 milliards FCFA**, décomposé de la manière suivante :

Tableau 8-7 : Coût du scénario 2 de base

Description des travaux	Investissement	Exploitation
	Millions FCFA HT	Millions FCFA HT
Scénario de base		
Stabilisation Langue de Barbarie sud	920	92
Exhaussement et stabilisation Langue de Barbarie nord	1 726	173
Total Scénario de base	2 646	265
Mesures complémentaires		
Balisage chenal pêcheurs	200	67
Rechargement plages Gandiolais	4 940	0
Délocalisation Ile aux oiseaux PLNB	1 300	0
Total Mesures complémentaires	6 440	67
Global		
Total Global	9 086	331

8.6.2 Estimation du coût du scénario 2-1

Le coût global du scénario 2-1 est de **23 milliards FCFA**, décomposé de la manière suivante :

Tableau 8-8 : Coût du scénario 2-1

Description des travaux	Investissement	Exploitation
	Millions FCFA HT	Millions FCFA HT
Scénario de base		
Stabilisation Langue de Barbarie sud	920	92
Exhaussement et stabilisation Langue de Barbarie nord	1 726	173
Brèche contrôlée	13 910	0
Total Scénario de base	16 556	265
Mesures complémentaires		
Balisage chenal pêcheurs	200	67
Rechargement plages Gandiolais	4 940	0
Délocalisation Ile aux oiseaux PLNB	1 300	0
Total Mesures complémentaires	6 440	67
Global		
Total Global	22 996	331

8.6.3 Estimation du coût du scénario 2-2

Le coût global du scénario 2-2 est de **37 milliards FCFA**, décomposé de la manière suivante :

Tableau 8-9 : Coût du scénario 2-2

Description des travaux	Investissement	Exploitation
	Millions FCFA HT	Millions FCFA HT
Scénario de base		
Stabilisation Langue de Barbarie sud	920	92
Exhaussement et stabilisation Langue de Barbarie nord	1 726	173
Poldérisation Saint Louis	27 907	0
Total Scénario de base	30 553	265
Mesures complémentaires		
Balisage chenal pêcheurs	200	67
Rechargement plages Gandiolais	4 940	0
Délocalisation Ile aux oiseaux PLNB	1 300	0
Total Mesures complémentaires	6 440	67
Global		
Total Global	36 993	331

8.6.4 Estimation du coût du scénario 2-3

Le coût global du scénario 2-3 est de **247 milliards FCFA**, décomposé de la manière suivante :

Tableau 8-10 : Coût du scénario 2-3

Description des travaux	Investissement	Exploitation
	Millions FCFA HT	Millions FCFA HT
Scénario de base		
Stabilisation Langue de Barbarie sud	1 240	124
Exhaussement et stabilisation Langue de Barbarie nord	1 726	173
Colmatage brèche	50 400	0
Dragage Saint-Louis – Potou	15 815	0
Ouvrages d'accessibilité fluviomaritime	178 000	3 333
Total Scénario de base	247 181	3 630

8.6.5 Estimation du coût du scénario 2-4

Le coût du wharf est estimé à **8.7 milliards FCFA**.

8.7 Evaluation du scénario 2 et de ses variantes

8.7.1.1 Du point de vue de l'évolution hydrodynamique et morphodynamique

A l'instar du scénario 1, pour le scénario 2 de base, dans les décennies à venir la migration de l'embouchure vers le sud exposera à l'érosion, un par un, les villages du Gandiolais. Les résultats montrent que l'embouchure aura migré d'environ 15 km vers le sud à l'horizon de 2060 et que la brèche s'élargira d'abord pour ensuite se réduire à 1 km minimum après quelques années (actuellement 6 km de large). Pour le Gandiolais, la réduction de la largeur de la brèche semble plutôt favorable. Elle mène à des variations du trait de côte moins importantes que celles établies par extrapolation linéaire sur la base des développements observés les dernières années. À noter que le modèle ShorelineS ne prend pas en compte l'impact des tempêtes, donc que, durant le passage de l'embouchure, les effets sur le littoral peuvent être plus néfastes que prédits actuellement.

Les courants lors de la situation actuelle donnent une idée des conditions hydrodynamiques lorsque l'embouchure est placée plus au sud. Supposé que l'embouchure du fleuve diminue en largeur, comme estimé par le modèle ShorelineS, la profondeur des chenaux de l'embouchure s'adaptera et augmentera, gardant les courants similaires à ceux observés actuellement.

La mise en place d'une brèche contrôlée (scénario 2.1) fonctionnant avec une fréquence d'une fois tous les cinq ans, pendant 3 mois environ, pourrait entraîner le blocage saisonnier du transport des sédiments le long de la côte. Cependant, du fait que le déversoir sera en fonction sur une période relativement courte, il aura une influence limitée sur le développement du littoral à long terme.

Il est important de noter qu'on ne peut pas exclure que les vitesses d'écoulement relativement élevées puissent entraîner l'affouillement (*scour*) à l'interface des protections et/ou des barrages d'une part et les fonds marins et la plage de sable d'autre part. En outre, une amplitude de marée fixe de 0,8 m a été utilisée dans ces calculs indicatifs, ce qui signifie que les vagues ne pénètrent pas encore dans le déversoir (crête du déversoir étant à 1 mIGN). Cela peut être le cas lors d'une marée de vives-eaux et/ou une tempête. Dans ce cas, la rive fluviale située directement derrière le déversoir peut éventuellement s'éroder.

Dans le cadre du scénario 2-3, les impacts locaux seront très comparables aux impacts étudiés pour le scénario d'une embouchure contrôlée aux abords de Saint-Louis (scénario 3) : en l'absence de by-pass, les ouvrages en mer du port mèneraient à une forte accrétion au nord et à une érosion aussi forte au sud du port, qui peut rendre le brise-lames instable, et potentiellement mener à une brèche au sud du port. Un by-pass pourrait réduire considérablement ces impacts nuisibles.

Le scénario 2-4 prévoit la mise en place d'un wharf. Cet ouvrage doit être le plus transparent possible vis-à-vis des vagues et des sédiments le long de la côte. Une telle structure a été mise en œuvre avec succès à Grand Bassam, en Côte d'Ivoire ou à Bargny au Sénégal. Ces ouvrages permettent uniquement de débarquer les prises de poisson, sous conditions peu protégées, et ne permettent pas de laisser les pirogues dans un environnement sûr.

Le wharf étudié sur Saint-Louis n'aura pas un fort impact sur la dynamique côtière s'il est uniquement constitué d'une jetée posée sur pieux, suffisamment transparente pour ne pas constituer un frein au passage du transport littoral. Par contre le brise-lames prévu en eau profonde, permettant d'abriter les opérations de débarquement des prises, peut engendrer un impact sévère sur le littoral. Une telle structure bloquerait les vagues et créerait des gradients dans le transport des sédiments le long de la côte, provoquant une grave érosion pouvant, à terme, entraîner une brèche dans le cordon littoral vers le sud-est du wharf.

8.7.1.2 Du point de vue des risques d'inondation induits par les crues du fleuve

Le scénario 2 de base ne permet pas d'améliorer la problématique des inondations sur Saint-Louis et le Gandiolais.

Le scénario 2-1 (« mise en place d'une brèche contrôlée ») permet un abaissement des niveaux d'inondation au droit de Saint-Louis et de manière plus générale sur l'ensemble de delta à l'horizon 2050. Néanmoins cet abaissement est insuffisant pour permettre une protection efficace de la ville de Saint-Louis contre les inondations. A l'horizon 2100, la cote atteinte par la mer, proche de 1.80 mIGN, et la proximité du déversoir avec la ville de Saint-Louis limitent grandement l'efficacité de cet aménagement. **Ce scénario n'apporte donc pas une solution globale à la problématique de l'inondation de la ville de Saint-Louis.**

La solution développée dans le scénario 2-2 (« actions de diminution des risques sur Saint-Louis ») permet de respecter les objectifs de protection à l'horizon 2050. A l'horizon 2100, l'aménagement conserve son efficacité lorsque l'embouchure est située à Degounaye. Le niveau de protection est abaissé à une occurrence 5 à 10 ans si l'embouchure évolue jusqu'à Potou. Le seul moyen d'assurer un niveau de protection centennal à l'horizon 2100 serait d'adopter un autre mode opératoire que celui prévu dans le scénario 2. Le système d'alerte en fonction sur le fleuve permet d'anticiper l'importance de la crue d'hivernage plusieurs semaines à l'avance. Ce système permet d'assurer une position de l'embouchure à Degounaye en cas de fortes crues (> 5 à 10 ans), par la création d'une brèche artificielle. **Dans ces conditions, le scénario 2-2 apporte une solution à la problématique de l'inondation de la ville de Saint-Louis.**

Le scénario 2-3 (« mise en œuvre d'une liaison fluvio-maritime pérenne au droit de l'embouchure pré-2003 ») entraîne une aggravation des inondations sur Saint-Louis à court terme (dès que le projet sera mis en œuvre), ainsi que pour les deux horizons d'étude pris en compte. S'il devait être retenu, ces travaux devraient être réalisés en même temps que la mise en œuvre des actions de diminution du risque sur Saint-Louis telles que définies dans le scénario 2-2.

Le scénario 2-4 (« un wharf de pêche »), n'as pas d'impact sur la problématique inondation fluviale.

8.7.1.3 Du point de vue des risques d'inondation et de formation de nouvelles brèches induits par les tempêtes

Inondation par les tempêtes

Avec l'élévation de niveau de la mer, à l'horizon 2050 les effets sur les niveaux d'eau moyens en face de Saint-Louis et les villages du Gandiolais seront modérées (environ 19 cm), mais seront plus alarmants à l'horizon 2100 (+ 66 cm selon RCP 8.5).

L'influence des tempêtes réduira par rapport à la situation actuelle, grâce à la migration de l'embouchure vers le sud dans les décennies à venir. Avec la migration de l'embouchure vers le sud les augmentations des niveaux d'eau dans le fleuve, provoquées par la pénétration de surcote et setup lors d'une tempête, diminueront fortement en amont de l'embouchure. La hauteur de l'eau à Saint-Louis varie peu lorsque l'embouchure se trouve au sud de Degounaye, protégeant à terme les villages du Gandiolais et Saint-Louis.

En revanche, le front bâti de Saint-Louis situé sur le cordon littoral continuera d'être exposé si des mesures complémentaires ne sont pas mises en œuvre.

Formation nouvelles brèches

Comme présenté en paragraphe 5.4 pour la situation actuelle, la flèche sableuse est faible en hauteur et le risque de formation de nouvelles brèches par les tempêtes sera considérable si aucune action de renforcement du cordon littoral n'est menée.

8.7.1.4 Du point de vue de la salinité

La propagation d'eau saline dans l'estuaire sera limitée avec une embouchure proche de Potou. Ce positionnement de l'embouchure permettrait donc aux nappes phréatiques de se réalimenter en eau douce, et à terme d'améliorer la qualité des eaux souterraines pour l'irrigation, ce qui sera bénéfique pour les maraichers du Gandiolais. Par contre, l'élévation du niveau de la mer favorisera une plus forte intrusion de l'eau salée dans l'estuaire. Ces effets sont prédits d'être relativement modérés à l'horizon 2050, mais plus prononcés à l'horizon 2100 – avec des effets négatifs pour l'agriculture.

9. Scénario 3 : Embouchure contrôlée aux abords de Saint-Louis

9.1 Le scénario de base

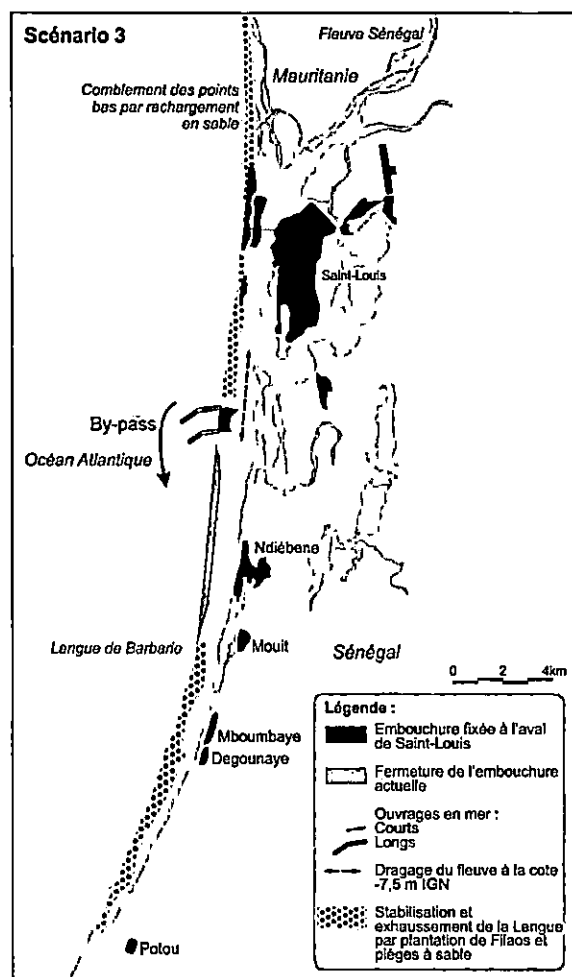


Figure 9-1 : Présentation du scénario 3

Des actions de by-passing seront nécessairement associées au scénario 3. Un risque rémanent existera en cas d'arrêt de ces actions pouvant conduire à la destruction des ouvrages portuaires et de la Lingue de Barbarie.

Dans le cadre de ce scénario, il est envisagé de fixer l'embouchure du fleuve au sud immédiat de Saint-Louis, au droit de l'emplacement prévu dans le projet OMVS, à environ 7,3 km du pont Faidherbe.

Le cordon littoral est conforté et exhausé :

- Au nord de Saint-Louis sur un linéaire de 15 km,
- Au sud de Saint-Louis sur un linéaire de 31 km.

L'embouchure actuelle du fleuve est colmatée.

Les caractéristiques de l'ouvrage portuaire sont les suivantes :

- Passe d'entrée de largeur 800m, draguée à la cote -3 mIGN
- Chenal de navigation de largeur 100 m dragué à la cote -7.5 mIGN.

Le projet de port de l'OMVS intègre des ouvrages en mer conséquents, ayant un rôle important sur la dynamique côtière. L'étude du scénario 3 intègre d'autres configurations des ouvrages en mer pour tenter de diminuer leur impact sur la dynamique côtière.

Des actions de by-passing seront nécessairement associées au scénario 3. Un risque rémanent

9.1.1 Evolution morphodynamique à long terme

L'effet d'un port au sud de Saint-Louis sur l'évolution du trait de côte a été simulé avec le logiciel ShorelineS. L'impact principal de ce port est dû aux brise-lames qui bloquent le transport de sédiments le long de la côte. L'absence de contournement de sable pourra entraîner une forte sédimentation en amont ainsi qu'une érosion en aval (Figure 9-2). Entre 4 et 6 ans après la construction, une brèche se formera et de graves dommages se produiront dans la région du Gandiolais. La Figure 9-3 décrit l'évolution sur une période de 40 ans. Il est fort probable que la **Langue de Barbarie** soit amenée à **disparaître totalement**. Ceci se caractérisera par des dommages importants, notamment pour les villages situés au nord du Gandiolais.

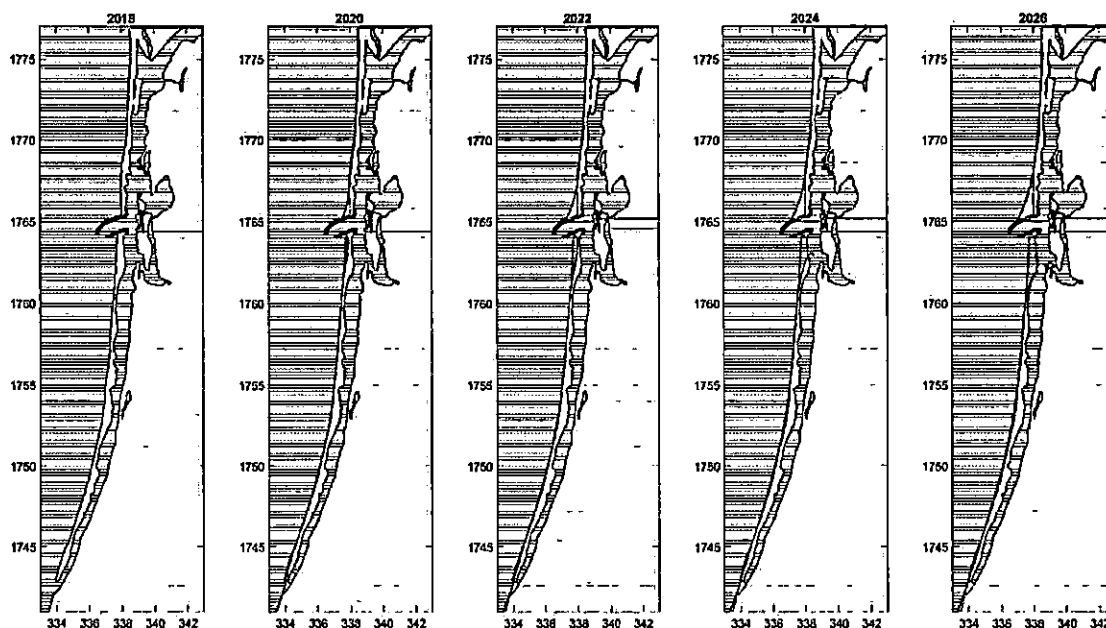


Figure 9-2 : Evolution du cordon du littoral en 10 ans après la construction d'un port près de Saint-Louis, sans bypass (contournement du sable)

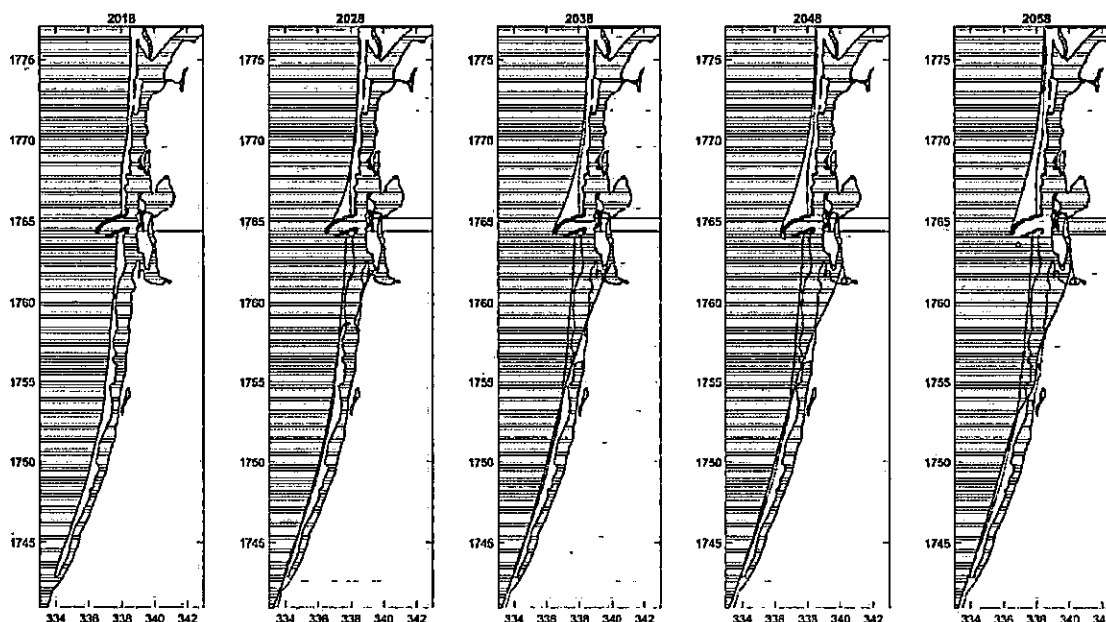


Figure 9-3 : Evolution du cordon du littoral en 40 ans après la construction d'un port près de Saint-Louis, en l'absence de bypass (contournement du sable).

L'évolution prévue du littoral est présentée plus en détail dans Figure 9-4. La position initiale du littoral et les traits de côte prévues pour 10, 20 et 40 ans plus tard sont tracées sur une image aérienne de la région. Le développement prévu de la côte peut être résumé comme suit :

- La côte océanique au nord du port présente une forte accrétion avec près de 1000 m en 10 ans en raison du blocage du transport sédimentaire côtier par le port. En 20 ans, le littoral s'est étendu vers la pointe du brise-lames nord, ce qui entraînera le contournement et la sédimentation du chenal d'accès.
- La côte de l'océan au sud du port s'érode car elle ne reçoit plus de sable du nord, ce qui entraîne une brèche du cordon dans les 10 ans.
- La côte de Gandiol s'érode fortement après la rupture principale du cordon au sud du port. Une zone extrêmement vaste est touchée et le littoral de Gandiol à la hauteur des villages de Ndiébène, Niol et Moult sont fortement touchés. Il est fort probable qu'avec le temps, la Langue de Barbarie soit amenée à disparaître entièrement.

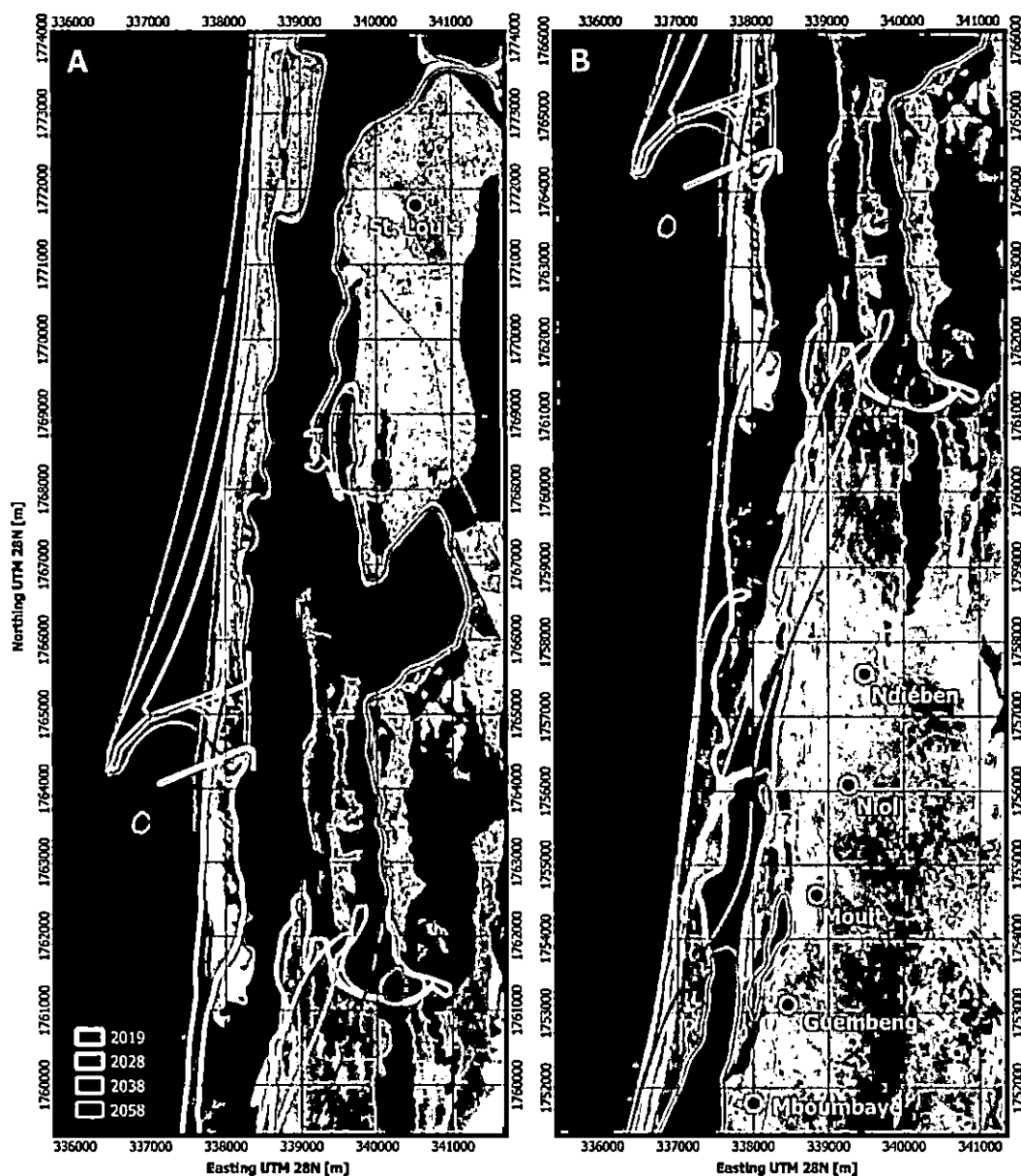


Figure 9-4 : Positions initiales et prévues du littoral pour 2018, 2028, 2038 et 2058 pour le scénario 3.

9.1.2 Hydrodynamique et évolution morphodynamique à court terme

Le modèle Delft3D a été également mis en œuvre, ce qui confirme les prédictions de ShorelineS, et apporte plus de détails. Des variantes sur la conception de l'OMVS ont été étudiées afin d'essayer de limiter les effets pénalisants du projet.

9.1.2.1 Configuration du port comme prévu par l'OMVS

La Figure 9-5 présente la bathymétrie initiale (à gauche), la bathymétrie prédite après 5 ans (au centre) et la sédimentation-érosion prédite après 5 ans (à droite) pour le scénario 3. Du fait de la direction du transport sédimentaire orientée le long du cordon littoral vers le sud, les brise-lames portuaires bloquent le transport sédimentaire le long de la côte. Cela donne des résultats typiques de sédimentation en amont des brise-lames (ici au nord) et d'érosion en aval (ici au sud) - ces tendances sont également visible pour le port à N'Diogo, Mauritanie (paragraphe 6.3). Ce phénomène peut, en principe, être évité en contournant artificiellement le sable transporté naturellement le long la côte (0.8 à 1,2 million de m^3/an).

Après 5 ans, le modèle prévoit une grande accumulation de sable directement au nord du brise-lame nord, aboutissant à des plages plus larges sur plusieurs kilomètres au nord du brise-lame. À mesure que la plage progresse et approche la pointe du brise-lame, le contournement naturel augmente, entraînant la formation de hauts fonds à l'entrée du port (bancs de sable).

Au sud du port, la plage est confrontée à une forte érosion, et après 3 à 4 ans, est submergée à marée haute, entraînant un dépôt de sable dans le bras du fleuve abandonné. Il est prévu que la flèche sableuse finira par se rompre à cet endroit. Dans l'ancien bras du fleuve, au sud du port, une sédimentation de l'ordre d'1 m peut être observée. Pour éviter que ce bras du fleuve devienne très peu profond, et que l'eau stagne, un dragage est recommandé.

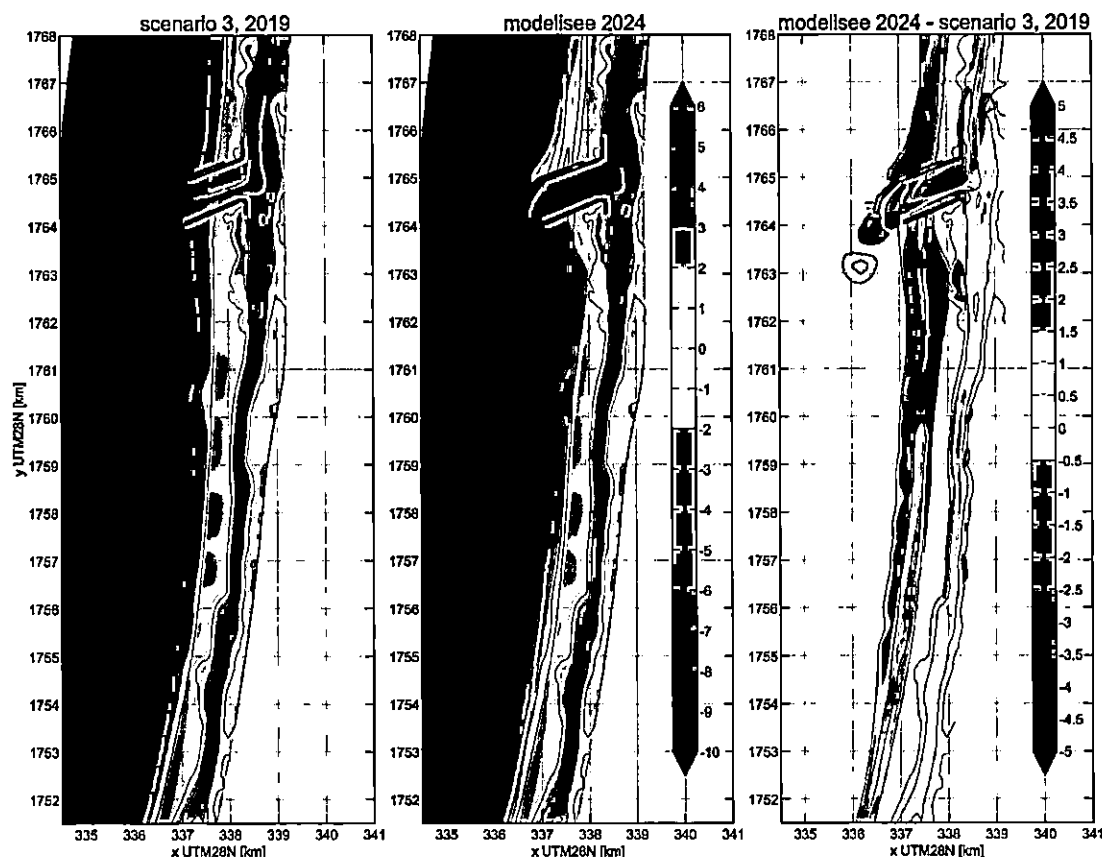


Figure 9-5 : Bathymétrie initiale (à gauche), bathymétrie prévue après 5 ans (au milieu) et prévision des sédimentation-érosion après 5 ans (à droite) pour le scénario 3.

La Figure 9-6 présente les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur autour du port pendant le pic de courants de jusant (à gauche) et le pic de courants de flot (à droite) pendant la saison sèche (faible débit du fleuve), avec des vagues orientées nord-ouest.

Les vitesses sont calculées en utilisant la bathymétrie initiale et les plans de conception du port (Figure 9-20) pour des marées représentatives, donc hors des périodes de vives-eaux, pendant lesquelles les vitesses sont plus fortes (elles seront discutées ci-dessous et montrées en Figure 9-7).

Tant lors des pics de jusant que lors des pics de flot, les courants provoqués par les vagues dans la zone de surf au nord du port s'élèvent à 0,6-0,7 m/s en direction du sud. Directement au sud du port, les courants provoqués par les vagues sont très faibles voire nuls (en raison de l'effet de protection contre les vagues des brise-lames du port) et augmentent de 0 m/s à 0,6 m/s sur une longueur d'environ 2 km.

Pendant les courants de flot maximaux, les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur dans le port sont comprises entre 0,7 et 1,1 m/s, tandis que les vitesses d'écoulement dans le fleuve sont d'environ 0,6 m/s (en amont en raison de la marée). Les vitesses d'écoulement autour de la pointe du brise-lame au nord sont d'environ 0,5 à 0,6 m/s. Pendant le jusant maximal, les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur dans le port sont d'environ 0,8 à 1,3 m/s, tandis que les vitesses d'écoulement dans le fleuve sont d'environ 0,6 m/s (en aval en raison de la marée). Les vitesses d'écoulement à l'entrée du port et autour de la pointe du brise-lame portuaire sud sont d'environ 0,5 m/s en direction sud-ouest. Il est à noter qu'une érosion importante est prévue dans le port au cours des 5 premières années

(entraînant une plus grande surface transversale) et que les vitesses d'écoulement dans le port diminueront donc quelque peu avec le temps.

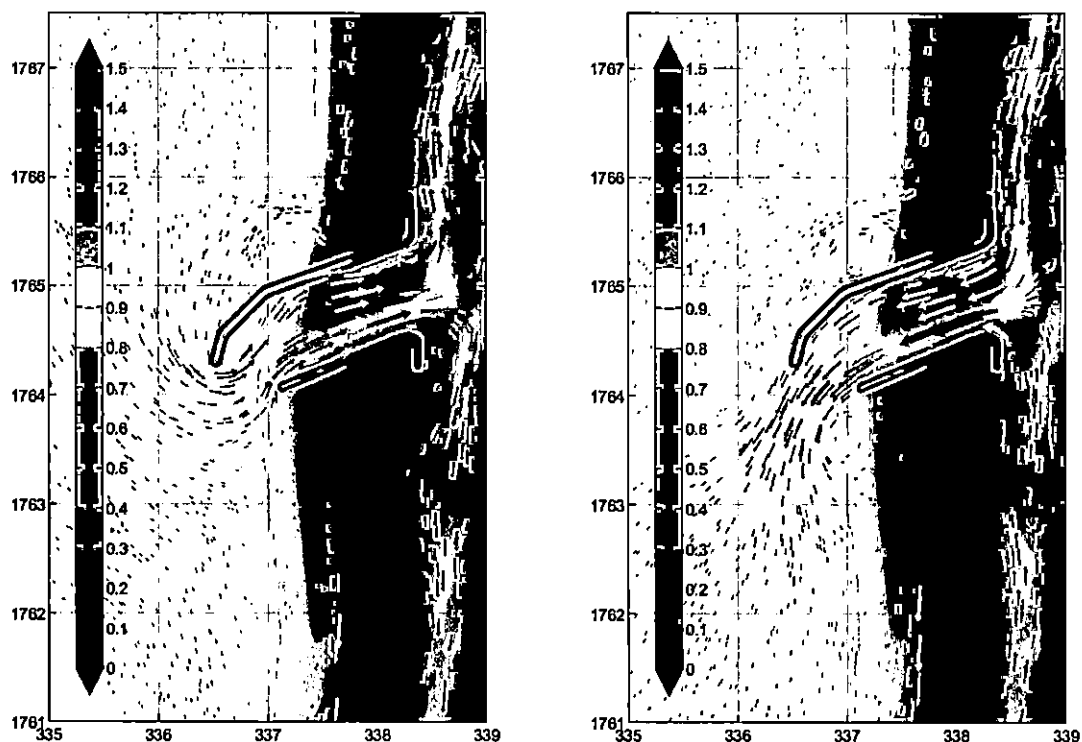


Figure 9-6 : Vitesses d'écoulement moyennes en profondeur autour du port (scénario 3) pendant le pic de flot (à gauche) et le pic de jusant (à droite), pendant la saison sèche (faible débit du fleuve).

La Figure 9-7 présente les vitesses maximales des courants de flot (à gauche) et de jusant (à droite) de la marée lors de vives-eaux pour un débit du fleuve faible de $148 \text{ m}^3/\text{s}$ (en haut) et un débit du fleuve élevé de $1126 \text{ m}^3/\text{s}$ (en bas) sans vague pour le scénario 3.

Les vitesses maximales de courants de flot et de jusant dans le port avec un faible débit fluvial sont respectivement d'environ $1,8 \text{ m/s}$ et $2,0$ à $2,3 \text{ m/s}$. Les vitesses de courants de flot maximales avec un débit du fleuve élevé sont plus faibles, environ $1,6 \text{ m/s}$, et les vitesses de courants de jusant avec un débit du fleuve élevé sont plus élevées et environ $2,2 \text{ m/s}$.

L'effet du débit élevé du fleuve pour le scénario 3 est légèrement plus faible que dans le scénario 1 (environ 10% et 5% de vitesses inférieures pendant le pic de flot et le pic de jusant dans le scénario 3 contre 20% de plus faible et 40% de vitesses de pointe plus élevées pour le scénario 1). Cette réduction est attribuée au fait que l'eau du fleuve s'écoule également en partie dans la branche sud de l'estuaire où elle est temporairement stockée et finit par se déverser à nouveau dans le port pendant une phase de jusant légèrement allongée. Des vitesses d'écoulement élevées se concentrent dans le chenal de navigation.

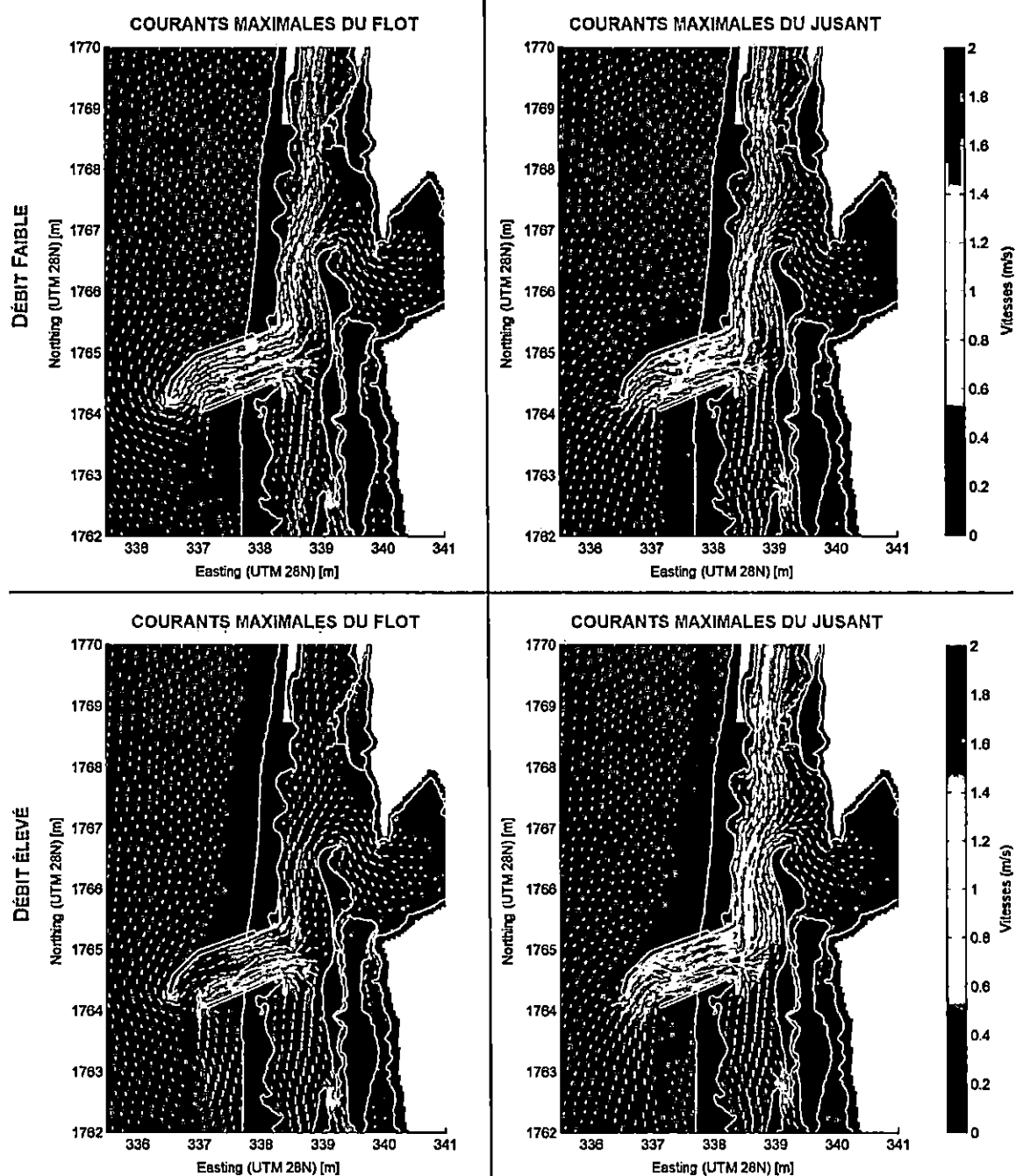


Figure 9-7 : Vitesses d'écoulement moyennes en profondeur autour du port (scénario 3) pendant le pic de flot (à gauche) et le pic de jusant (à droite) en vives-eaux pour les débits faibles du fleuve (en haut) et élevés (bas) sans vagues, pour le scénario 3.

9.1.2.2 Variantes pour la configuration des brise-lames

Pour chercher à minimiser le blocage du transport sédimentaire le long de la côte et le risque de création d'une brèche du cordon littoral au sud du port, différentes configurations des brise-lames ont été testées. Quatre variantes de port avec différentes longueurs et/ou largeurs de brise-lames ont été évaluées à l'aide du modèle Delft3D (voir Tableau 9-1 et Figure 9-8).

Tableau 9-1 : Variantes portuaires - brise-lames - évaluées à l'aide du modèle Delft3D

Aménagement du port	Longueur de brise-lames	Largeur entre les brise-lames
Conception selon le scénario 3	environ 1600m (brise-lames nord)	environ 800m
Variante 1, brise-lames plus courts	environ 1000m (brise-lames nord)	environ 800m
Variante 2, brise-lames plus longs	environ 2200m (brise-lames nord)	environ 800m
Variante 3, port plus large	environ 1600m (brise-lames nord)	environ 1100m
Variante 4, pas de brise-lames	-	-
Variante 5, avec bypass artificiel	environ 1600m (brise-lames nord)	environ 800m

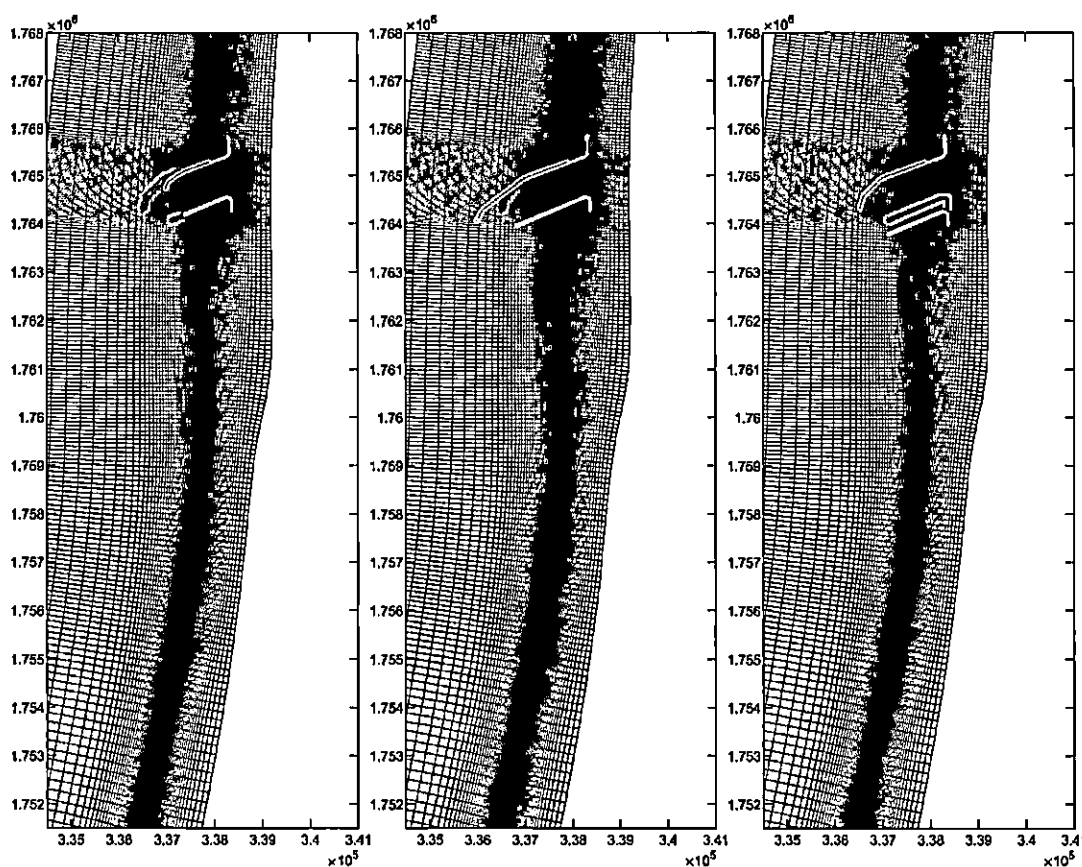


Figure 9-8 : Variantes portuaires en jaune évaluées à l'aide des modèles Delft3D. Conception selon le scénario 3 en noir. Variante 1 - brise-lames plus courts (à gauche), variante 2 - brise-lames plus longs (au milieu) et variante 3 - port plus large (à droite).

Variante 1, brise-lames plus courts

La Figure 9-9 présente la bathymétrie initiale (à gauche), la bathymétrie prévue après 5 ans (au centre) et la sédimentation-érosion prévue après 5 ans (à droite) avec mise en place de brise-lames plus courts. La tendance générale est similaire à celle du scénario 3, bien qu'avec des brise-lames plus courts, l'érosion et la submersion se concentrent directement au sud du port en raison de la plus petite zone à l'abri des vagues.

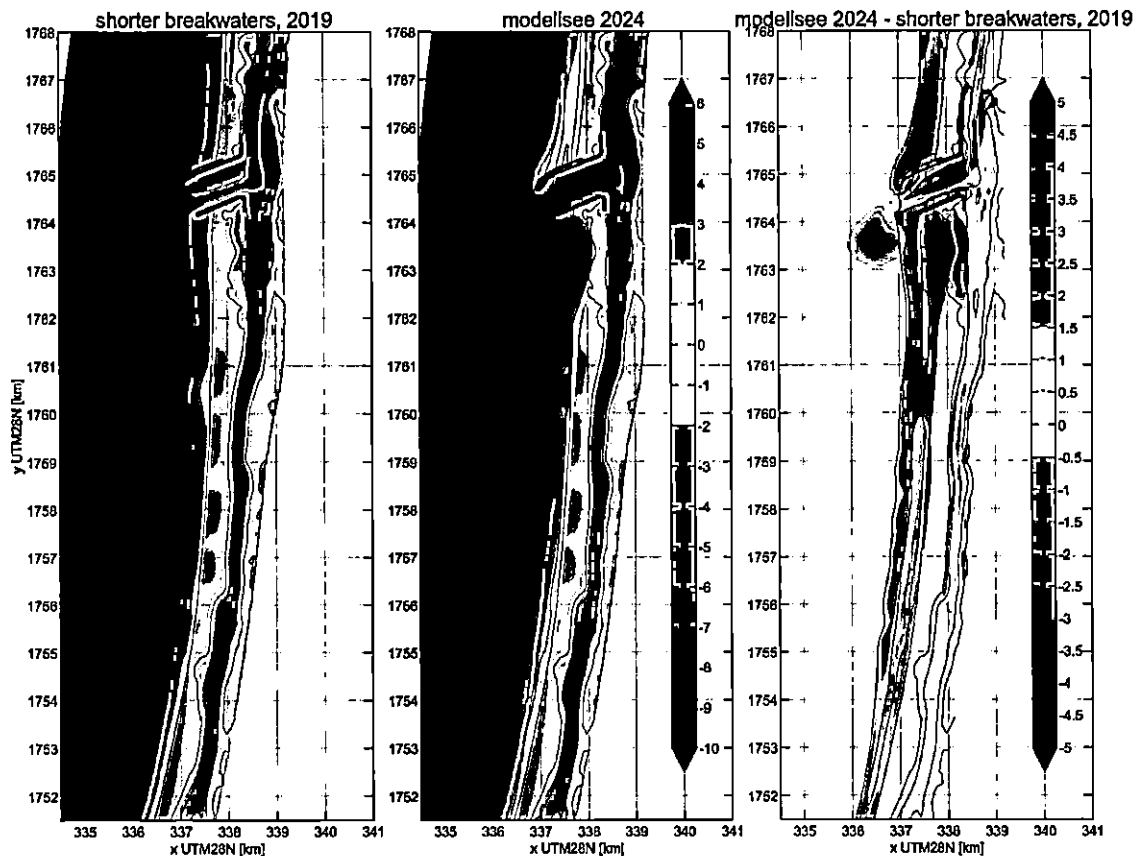


Figure 9-9 : Bathymétrie initiale (à gauche), bathymétrie prévue après 5 ans (au milieu) et prévision de la sédimentation-érosion après 5 ans (à droite) pour la variante portuaire 1, brise-lames plus courts.

La Figure 9-10 présente les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur autour de la variante 1 du port (brise-lames plus courts) pendant le pic de flot (à gauche) et le pic de jusant (à droite) lors de la saison sèche (faible débit du fleuve) pour une marée représentative.

Autant lors des pics de jusant que lors des pics de flot, les courants provoqués par les vagues dans la zone de surf au nord du port sont d'environ 0,6-0,7 m/s vers le sud. Directement au sud du port, les courants provoqués par les vagues sont inexistantes ou très faibles (en raison de l'effet de protection des brise-lames du port) et augmentent d'environ 0 m/s à 0,6 m/s sur 1 km environ.

Pendant le pic des courants de jusant, les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur dans le port sont d'environ 0,7 à 1,1 m/s, tandis que les vitesses d'écoulement dans le fleuve sont d'environ 0,6 m/s (en amont, en raison de la marée). Les vitesses d'écoulement autour de la pointe de la digue portuaire nord sont d'environ 0,5 à 0,6 m/s. Lors des courants de jusant maximaux, les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur dans le port sont d'environ 0,8 à 1,3 m/s, tandis que les vitesses d'écoulement dans le fleuve sont d'environ 0,6 m/s (en aval, en raison de la marée). Les vitesses d'écoulement à l'entrée du port et autour de la pointe du brise-lames sud sont d'environ 0,6 m/s orienté sud-ouest.

L'influence des variations saisonnières du débit du fleuve Sénégal ou l'augmentation des vitesses lors des vives-eaux sont similaires aux résultats obtenus pour le scénario 3 (Figure 9-7). Les vitesses d'écoulement autour du port sont donc très similaires à celles obtenues pour le scénario 3. La section transversale est la même. Il est prévu que les vitesses maximales dans le port diminueront au cours du temps avec l'érosion de la zone portuaire.

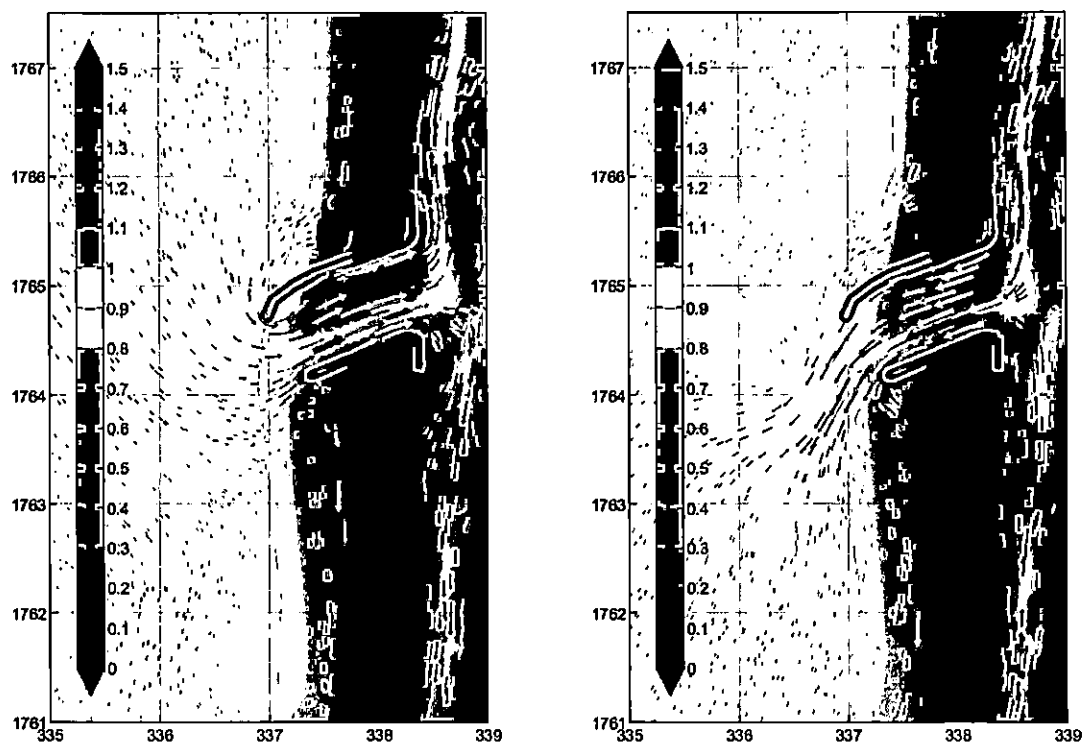


Figure 9-10 : Vitesses moyennées en profondeur des courants induits par la marée montante en vives-eaux (gauche) et lors de la marée descendante en vives-eaux (droite) pendant la saison sèche (faible débit du fleuve) pour la variante portuaire 1, brise-lames plus courts.

Variante 2, brise-lames plus longs

La Figure 9-11 présente la bathymétrie initiale (à gauche), la bathymétrie prévue après 5 ans (au centre) et la sédimentation-érosion prévue après 5 ans (à droite) avec des brise-lames plus longs. La tendance générale est similaire à celle du scénario 3, bien qu'avec des brise-lames plus longs, l'érosion et la submersion se concentrent un peu plus au sud du port en raison de la plus grande zone protégée des vagues.

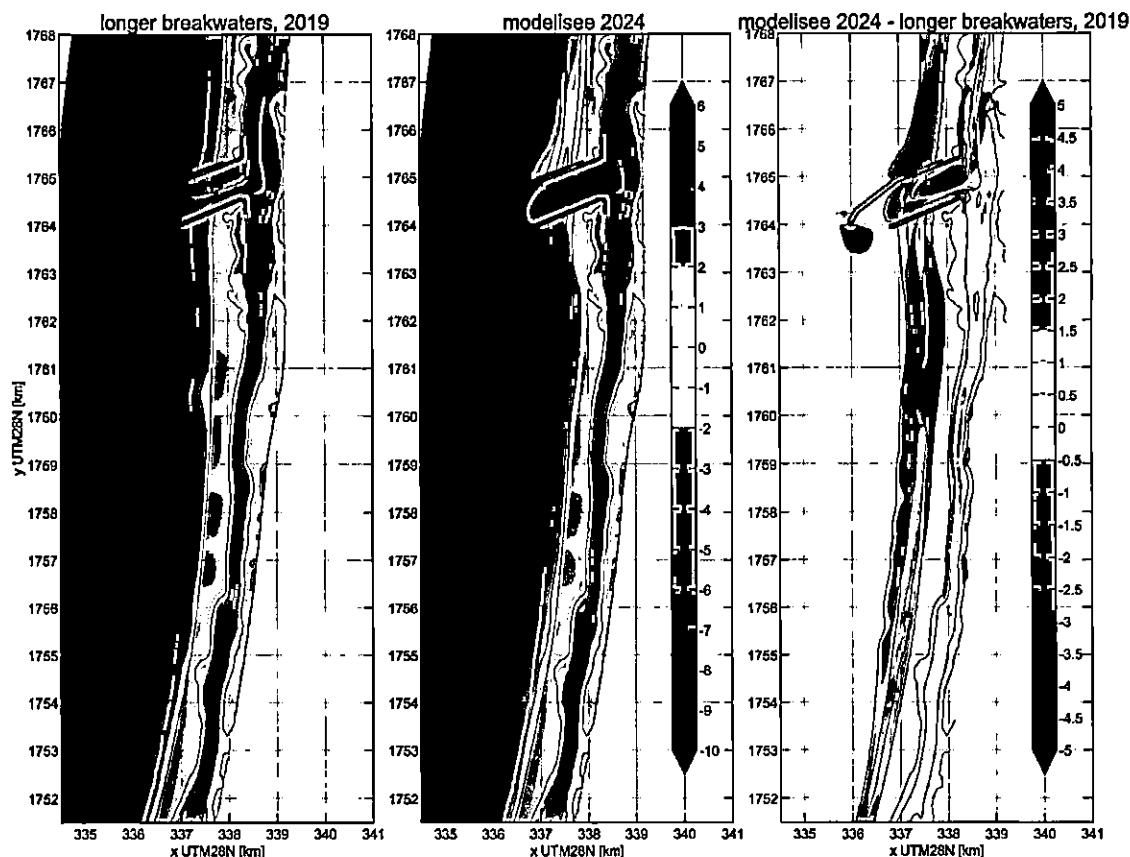


Figure 9-11 : Bathymétrie initiale (à gauche), bathymétrie prévue après 5 ans (au milieu) et prévision de la sédimentation-érosion après 5 ans (à droite) pour la variante portuaire 1, brise-lames plus longs.

La Figure 9-12 présente des vitesses d'écoulement moyennes en profondeur autour de la variante 2 du port (brise-lames plus longs) pendant le pic des courants de flot (à gauche) et le pic des courants de jusant (à droite) pendant la saison sèche (faible débit du fleuve). Autant lors des pics de jusant que lors des pics de flot, les courants provoqués par les vagues dans la zone de surf au nord du port sont d'environ 0,6-0,7 m/s sud. Directement au sud du port, les courants provoqués par les vagues sont inexistants ou très faibles (en raison de l'effet de protection contre les vagues des brise-lames du port) et augmentent d'environ 0 m/s à 0,6 m/s sur 3 km.

Pendant le pic des courants de jusant, les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur dans le port sont d'environ 0,7 à 1,1 m/s, tandis que les vitesses d'écoulement dans le fleuve sont d'environ 0,6 m/s (en amont en raison de la marée). Les vitesses d'écoulement autour de la pointe du brise-lames nord sont d'environ 0,5 à 0,6 m/s. Pendant les courants de jusant maximaux, les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur dans le port sont d'environ 0,8 à 1,3 m/s, tandis que les vitesses d'écoulement dans le fleuve sont d'environ 0,6 m/s (en aval en raison de la marée). Les vitesses d'écoulement à l'entrée du port et autour de la pointe du brise-lame portuaire sud sont d'environ 0,5 m/s en direction sud-ouest.

L'influence des variations saisonnières du débit du fleuve Sénégal ou l'augmentation des vitesses lors des vives-eaux sont similaires aux résultats obtenus le scénario 3 (Figure 9-7). Les vitesses d'écoulement autour du port sont donc très similaires à celles obtenues pour le scénario 3. La section transversale est la même. Il est prévu que les vitesses maximales dans le port diminueront au cours du temps avec l'érosion de la zone portuaire.

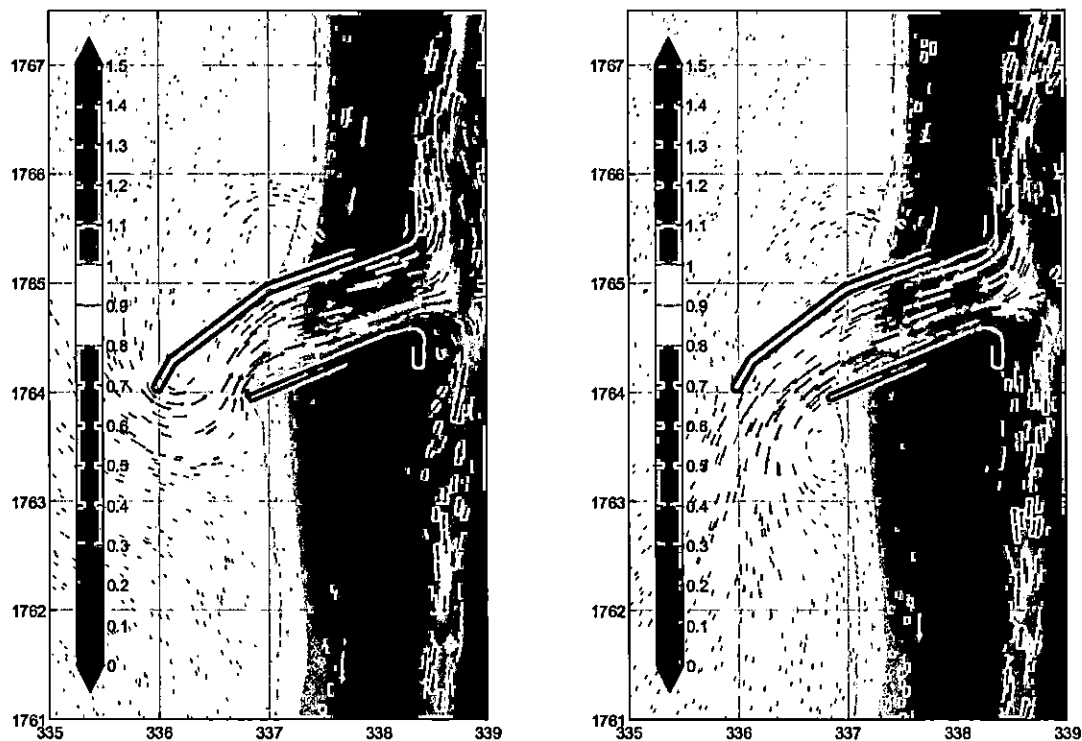


Figure 9-12 : Vitesses moyennées en profondeur des courants induits par la marée montante en vives-eaux (gauche) et lors de la marée descendante en vives-eaux (droite) pendant la saison sèche (faible débit du fleuve) pour la variante portuaire 2, brise-lames plus longs.

Variante 3, port plus large

Figure 9-13 présente la bathymétrie initiale (à gauche), la bathymétrie prévue après 5 ans (au milieu) et la sédimentation-érosion prévue après 5 ans (à droite) pour la variante 3 du port, port plus large. Encore une fois, la tendance générale est similaire à celle du scénario 3, à l'exception de l'érosion à l'intérieur du port, qui est plus petite en raison de la plus grande section transversale et des vitesses plus faibles dans le port.

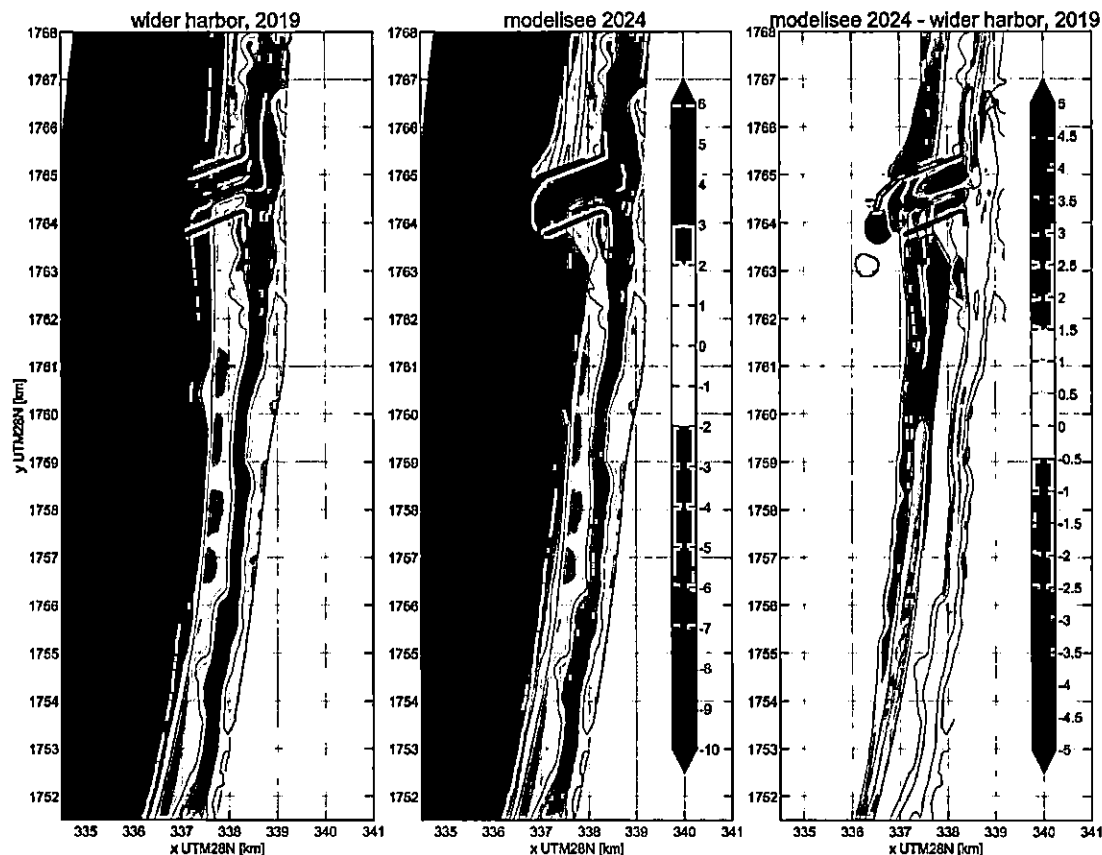


Figure 9-13 : Bathymétrie initiale (à gauche), bathymétrie prévue après 5 ans (au milieu) et prévision de la sédimentation-érosion après 5 ans (à droite) pour la variante 3 du port, port plus large.

La Figure 9-14 présente les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur autour de la variante 3 du port (port plus large) pendant le pic de courants de flot (à gauche) et le pic des courants de jusant (à droite) pendant la saison sèche (faible débit du fleuve). Autant lors des pics de jusant que lors des pics de flot, les courants provoqués par les vagues dans la zone de surf au nord du port sont d'environ 0,6-0,7 m/s au sud. Directement au sud du port, les courants provoqués par les vagues sont inexistantes à très faibles (en raison de l'effet de protection contre les vagues des brise-lames du port) et augmentent d'environ 0 m/s à 0,6 m/s sur 2 km.

Pendant les pics de courants de jusant, les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur dans le port sont d'environ 0,8 m/s, tandis que les vitesses d'écoulement dans le fleuve sont d'environ 0,6 m/s (en amont en raison de la marée). Les vitesses d'écoulement autour de la pointe du brise-lame nord sont d'environ 0,5 à 0,6 m/s. Pendant les courants de jusant maximaux, les vitesses d'écoulement moyennes en profondeur dans le port sont d'environ 0,9 à 1,0 m/s, tandis que les vitesses d'écoulement dans le fleuve sont d'environ 0,6 m/s (en aval en raison de la marée). Les vitesses d'écoulement à l'entrée du port et autour de la pointe du brise-lame portuaire sud sont d'environ 0,5 m/s en direction sud-ouest.

L'influence des variations saisonnières du débit du fleuve Sénégal ou l'augmentation des vitesses lors des vives-eaux sont similaires aux résultats obtenus le scénario 3 (Figure 9-7). Les vitesses d'écoulement autour du port sont donc très similaires à celles obtenues pour le scénario 3. La section transversale est la même. Il est prévu que les vitesses maximales dans le port diminueront au cours du temps avec l'érosion de la zone portuaire.

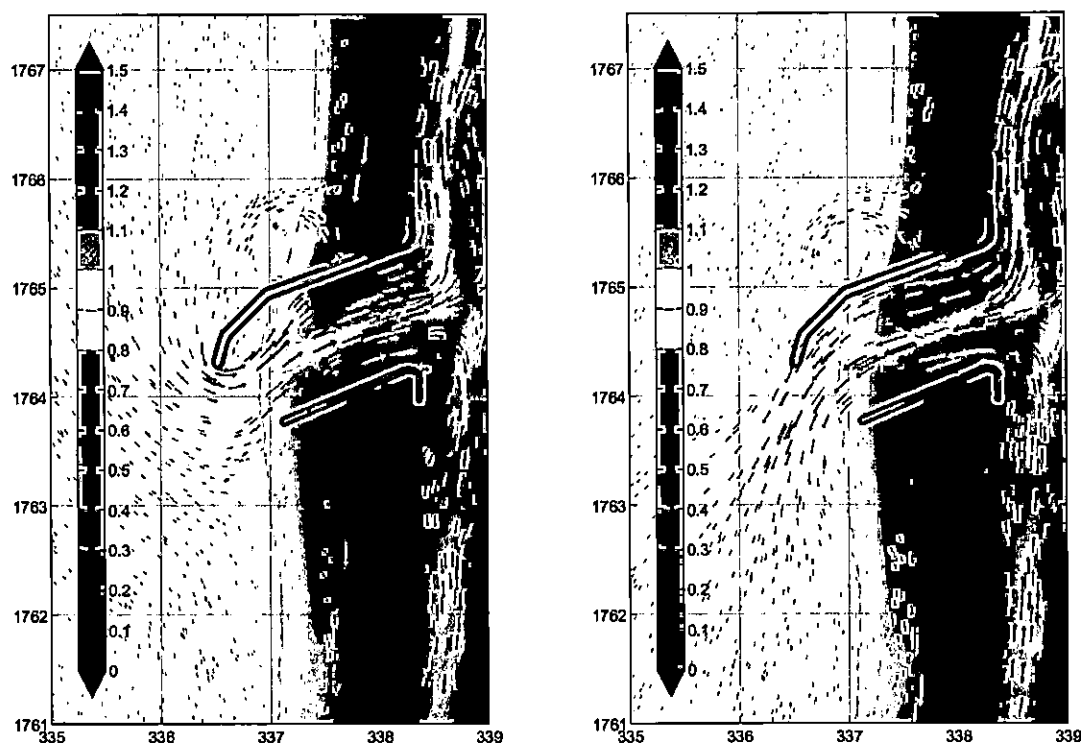


Figure 9-14 : Vitesses moyennées en profondeur des courants induits par la marée montante en vives-eaux (gauche) et lors de la marée descendante en vives-eaux (droite) pendant la saison sèche (faible débit du fleuve) pour la variante portuaire 3, port plus large.

Variante 4, port sans brise-lames

Afin de tester si le contournement naturel du sable se produirait pour une configuration sans brise-lames, et par conséquent empêcherait l'érosion du littoral au sud du chenal de navigation, quatre simulations Delft3D ont été réalisées pour différentes configurations d'un port sans brise-lames :

- Port sans brise-lames, avec une ouverture oblique de 700 m de large à travers la flèche,
- Port sans brise-lames, avec une ouverture perpendiculaire de 700 m de large à travers la flèche,
- Port sans brise-lames, avec une ouverture perpendiculaire de 350 m de large à travers la flèche,
- Port avec des brise-lames très courts et recourbés, avec une ouverture oblique de 700 m de large à travers la flèche.

Les Figure 9-15 à Figure 9-18 présentent la bathymétrie initiale, la bathymétrie modélisée après 5 ans et le schéma de sédimentation-érosion de cette période pour les 4 configurations listées ci-dessus. Bien qu'un contournement naturel dû à la formation et à la migration des bancs de sable puisse être observé dans ces simulations, toutes les configurations montrent un littoral fortement érodé ou percé au sud de l'ouverture après 5 ans. Le taux de contournement naturel n'est pas assez important pour empêcher l'érosion de la côte sud du chenal de navigation.

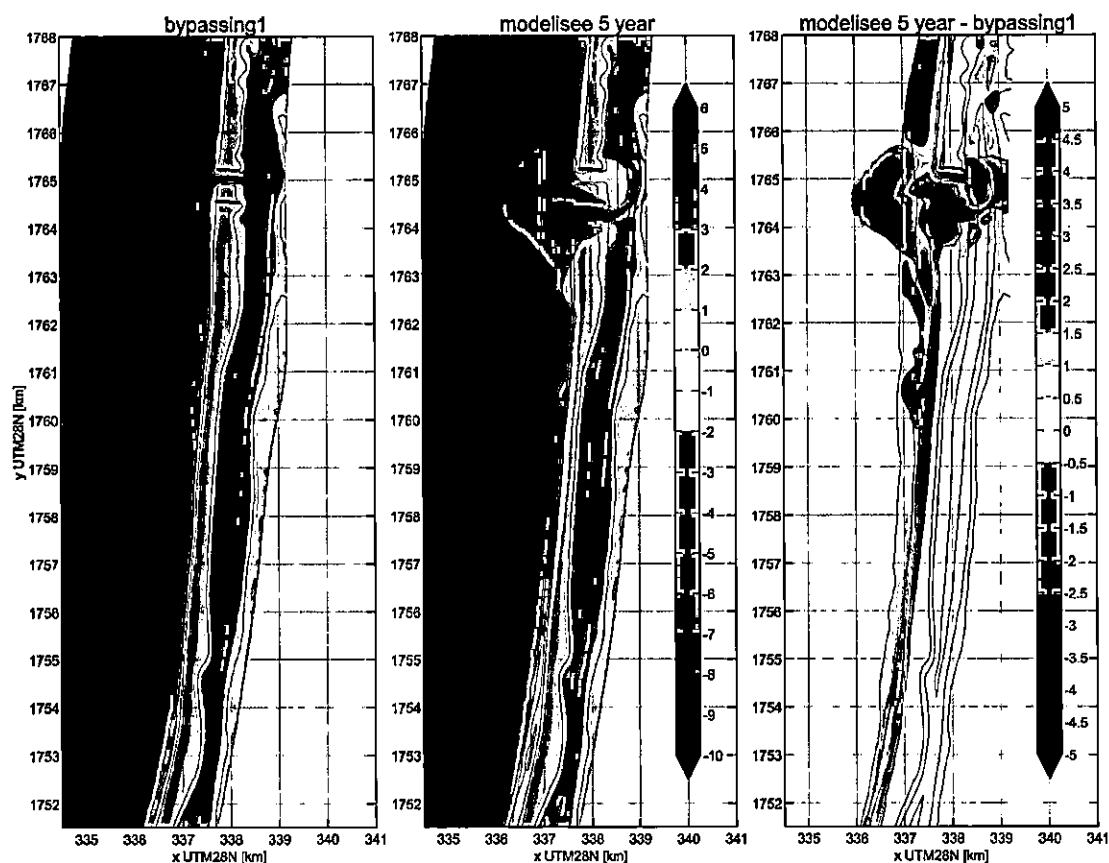


Figure 9-15 : Bathymétrie initiale, bathymétrie modélisée après 5 ans et sédimentation-érosion pour un port sans brise-lames, avec une ouverture oblique de 700 m de large à travers la flèche sableuse.

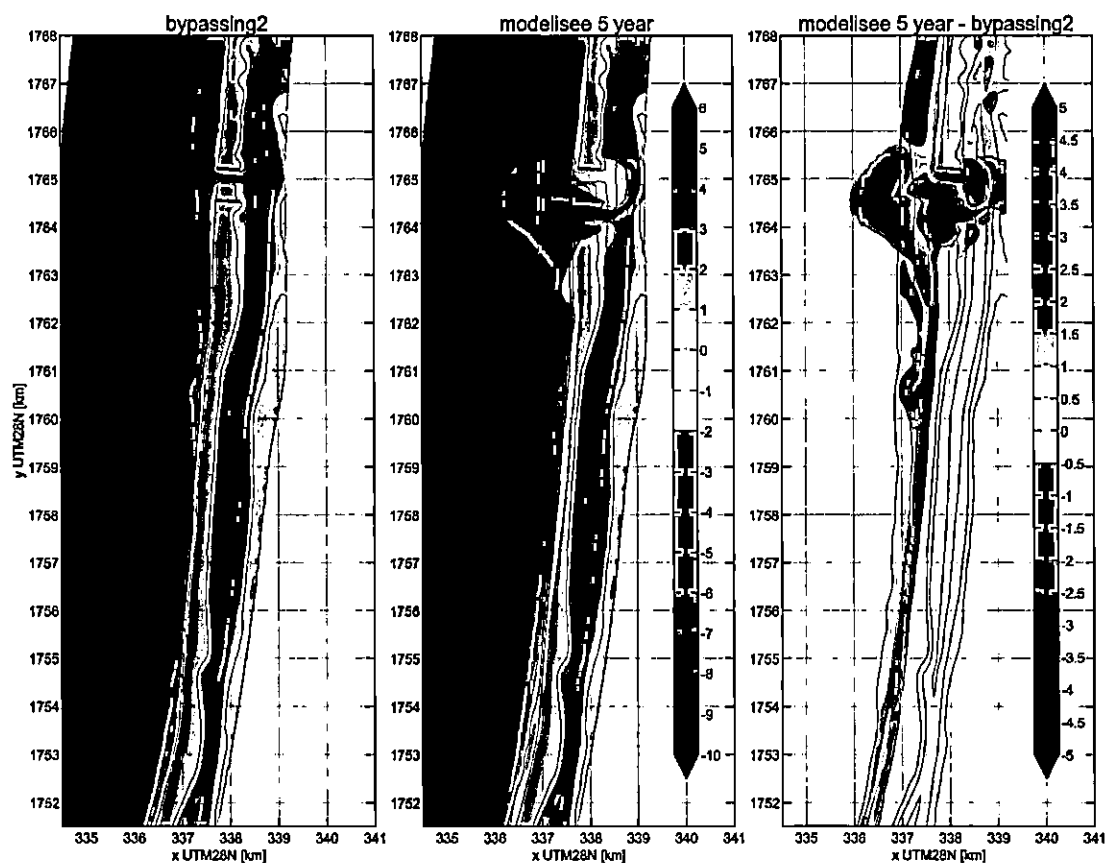


Figure 9-16 : Bathymétrie initiale, bathymétrie modélisée après 5 ans et sédimentation-érosion pour un port sans brise-lames, avec une ouverture perpendiculaire de 700 m de large à travers la flèche sableuse.

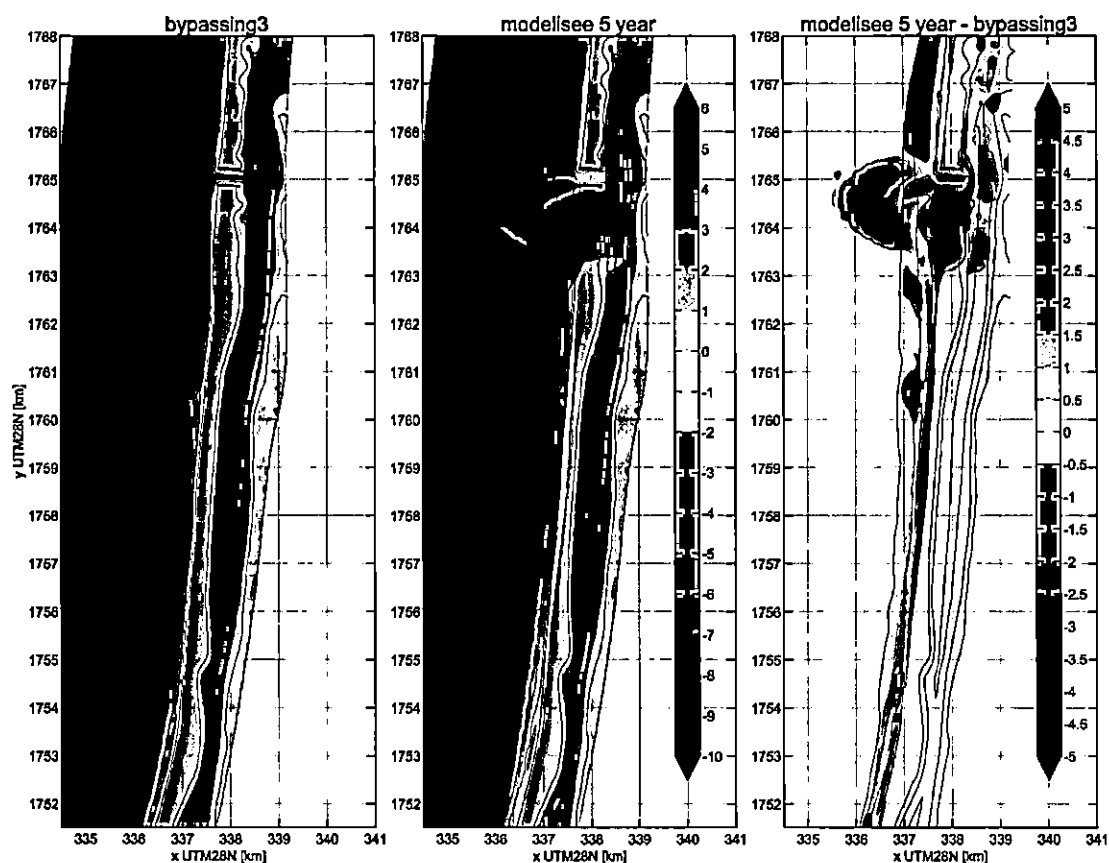


Figure 9-17 : Bathymétrie initiale, bathymétrie modélisée après 5 ans et sédimentation-érosion pour un port sans brise-lames, avec une ouverture perpendiculaire de 350 m de large à travers la flèche sableuse.

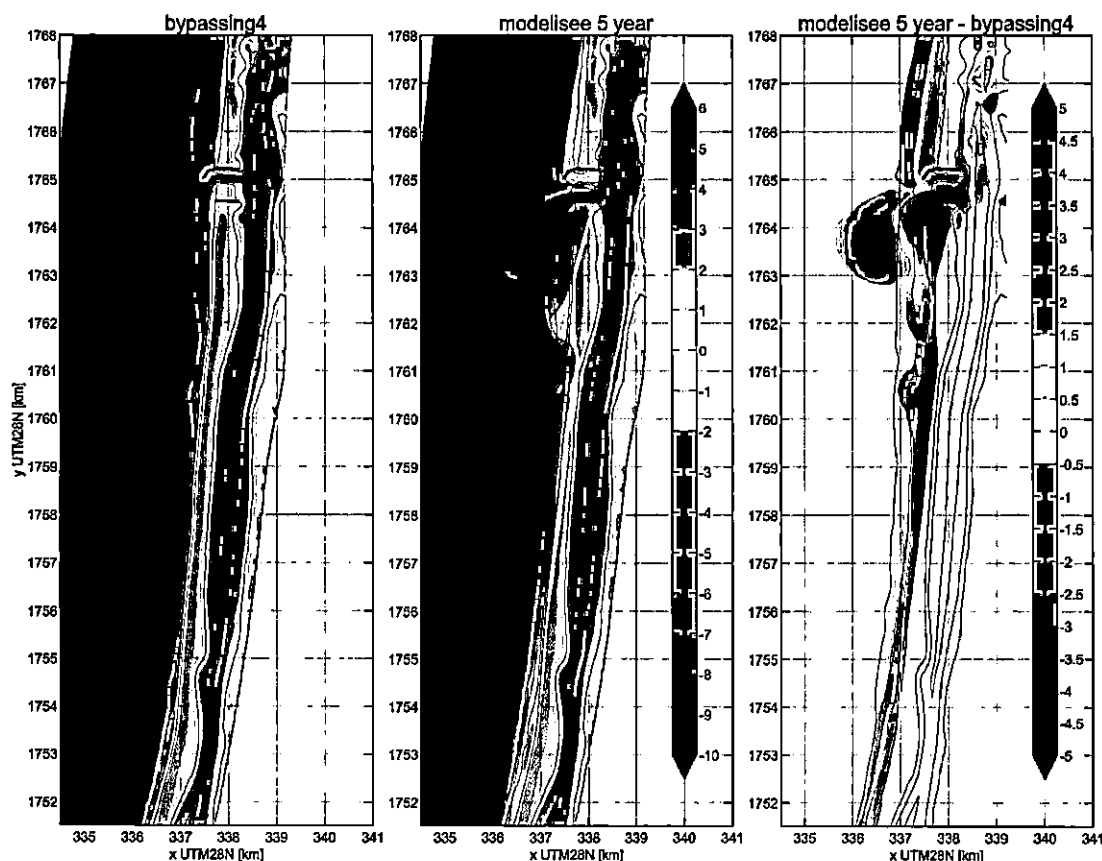


Figure 9-18 : Bathymétrie initiale, bathymétrie modélisée après 5 ans et sédimentation-érosion pour un port avec des brise-lames très courts et recourbés, avec une ouverture oblique de 700 m de large à travers la flèche sableuse.

Variante 5, port avec by-pass artificiel

Afin d'illustrer l'efficacité d'un système de contournement pour prévenir l'érosion et la rupture de la flèche sableuse, directement au sud du port, une simulation Delft3D avec contournement a été réalisée. Une zone de dragage et une zone de déversement ont été définies, et grâce à la fonctionnalité de déversement et de dragage automatisée, tous les sédiments s'accumulant dans la zone de dragage (au-dessus d'un seuil de -4 mMSL) ont été déversés sur la zone au sud du port. La Figure 9-19 montre les morphologies initiale et prédite, la sédimentation et l'érosion dans la zone. On peut voir qu'il n'y a pratiquement pas de sédimentation au nord du port, et surtout, pas d'érosion côtière directement au sud du port. Dans la simulation sans contournement artificiel, (Figure 9-5), après 5 ans de construction, il y a une érosion côtière considérable au sud du port, ce qui se traduit par une flèche de faible élévation et un écoulement d'eau sur cette même flèche - le début de la brèche. Il est donc prouvé que le contournement artificiel d'environ 1,4 millions de mètres cubes de sable par an peut empêcher cela.

La quantité totale de sédiments dragués de la zone de dragage et déversés pendant la simulation est d'environ 7 millions de m³ de sable, ce qui correspond aux taux de transport locaux sur le littoral d'environ 1,4 millions de mètres cubes par an. Il est à noter que les taux de dragage calculés sont assez constants au cours de l'année. Cependant, au sud de la zone où les sédiments sont artificiellement appliqués, un recul du littoral de plusieurs dizaines de mètres est observé 5 ans après la construction. Ce recul est induit par l'effet d'abri du volume de sédiments déposés. Cela suggère qu'une application des sédiments contournés sur une plus grande partie de la côte, ou plus haut sur la flèche de sable, conduirait à un littoral plus stable. Ce volume de sédiments contournés est plus important que le

transport littoral estimé à 0,8-1,2 Mm³ par an (Figure 5.27, rapport L4, Egis Eau et Deltares, 2019d), ce qui est en partie lié à la variabilité naturelle du transport littoral et probablement aussi lié aux choix faits pour la bathymétrie artificielle autour du port. Les taux de by-pass pour les variantes traités ci-dessus sont estimées d'être du même ordre de grandeur, vu que pour aucun des cas le littoral ne reste stable, ou même s'érode plus vite que dans le cas du conception originale du port.

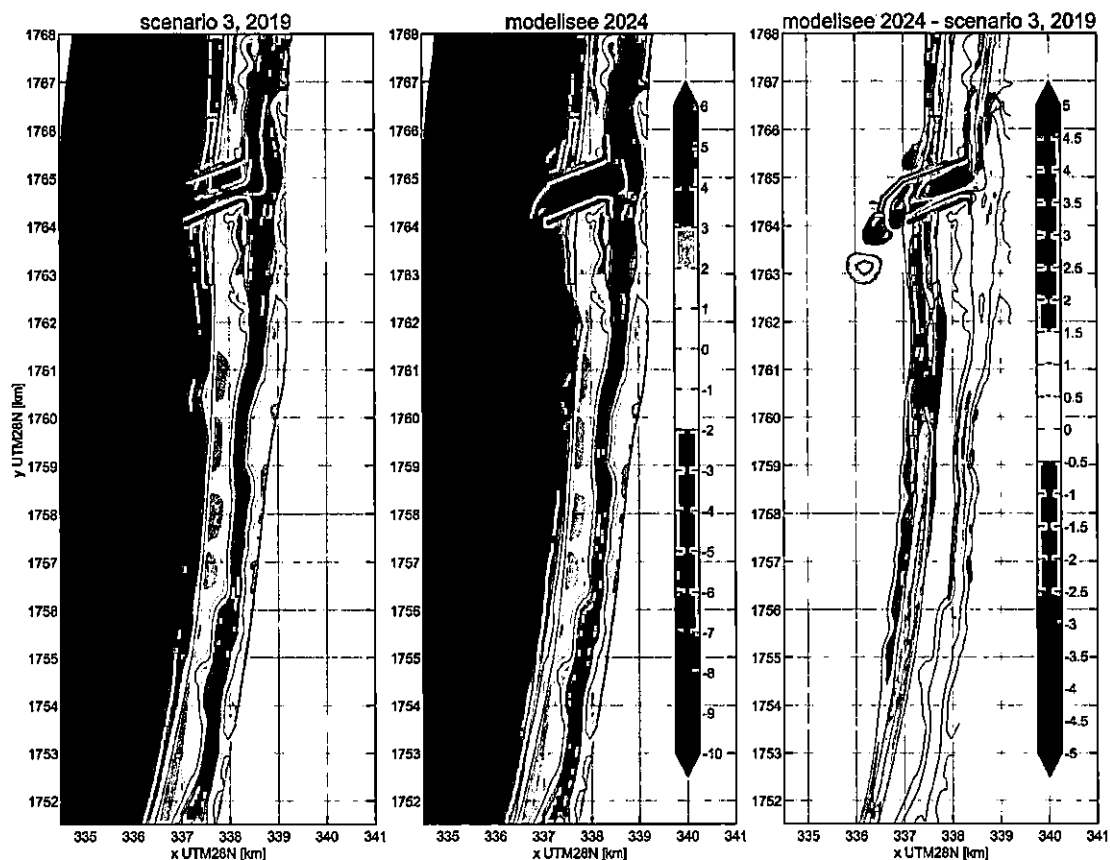


Figure 9-19 : Niveau initial du lit avec les lieux de dragage et de dépôt en rouge (à gauche), niveau modélisé du lit après 5 ans (au milieu) et leur différence (à droite).

Conclusions

- Les brise-lames du port bloquent le transport de sédiments le long de la côte, ce qui entraîne une sédimentation en amont et une érosion en aval (ces tendances sont également visibles pour le port à N'Diogo, Mauritanie, paragraphe 6.3) qui, avec le temps, entraînera une brèche au sud du port. Cet impact négatif du port peut être évité par le contournement artificiel du sable (pompage ou dragage du sable de la plage au nord du port vers la plage au sud du port).
- Les vitesses d'écoulement dans le port dépendent de la marée, du débit du fleuve et de la profondeur locale/de la section transversale. Les vitesses maximales dans le port pendant le flot et le jusant sont assez fortes et varient respectivement entre 1.8 et 2.0 m/s lors d'un faible débit du fleuve et entre 1.6 et 2.2 m/s lors d'un débit élevé du fleuve. Cela signifie que les bateaux pourraient ne pas être en mesure de naviguer dans le port pendant les pics de flot et de jusant, même s'ils seront à l'abri des vagues grâce aux brise-lames du port. Pendant l'étape de marée (marée haute et marée basse), les vitesses se réduisent à presque

zéro. Comme un phénomène d'érosion est prévu à l'intérieur du port, les vitesses d'écoulement diminueront avec le temps.

- Des brise-lames plus courts ou plus longs n'affectent pas les vitesses maximales dans le port pendant le pic des courants de jusant et de flot, car la marée, le débit du fleuve et la profondeur locale / la section transversale dans le port restent les mêmes. A l'inverse, des brise-lames plus larges (variante 3) entraîneront des vitesses plus faibles à l'intérieur du port, facilitant le passage des pêcheurs dans le chenal de navigation. La zone touchée par l'érosion au sud du port est affectée par la configuration des brise-lames : des brise-lames plus courts rapprocheront la zone d'érosion du port. Il est à noter que, quelle que soit la variante, une érosion importante touchera la zone au sud du port.
- Même avec l'hypothèse d'une ouverture sans brise-lames, le contournement naturel de cette ouverture par la formation et la migration des bancs de sable n'est pas suffisant pour empêcher l'érosion du littoral et/ou la rupture de la flèche au sud de l'ouverture.
- Le contournement artificiel d'un port avec des brise-lames, par le dragage d'environ 1,4 millions de mètres cubes par an directement au nord du port et le déversement de ces sédiments directement au sud du port, empêchent l'érosion du littoral, évitant ainsi la rupture de la flèche sableuse.

9.1.3 Risques d'inondation induits par les crues du fleuve

9.1.3.1 Impact sur Saint-Louis

Les modélisations hydrauliques portent sur des crues de période de retour comprises entre 2 et 100 ans pour les deux horizons d'étude, 2050 et 2100.

Les hypothèses retenues pour la configuration du fleuve et de l'embouchure sont les suivantes :

- **Horizon 2050 et 2100** : l'embouchure se situe au niveau de celle prévue pour le projet de port de l'OMVS, soit 7 km en aval du pont Faidherbe. Les dimensions des ouvrages d'accessibilité, ainsi que la bathymétrie du chenal de navigation et de la passe d'accès, définis dans l'étude APD de la SOGENAV (Figure 9-20), ont été intégrés dans le modèle hydraulique.

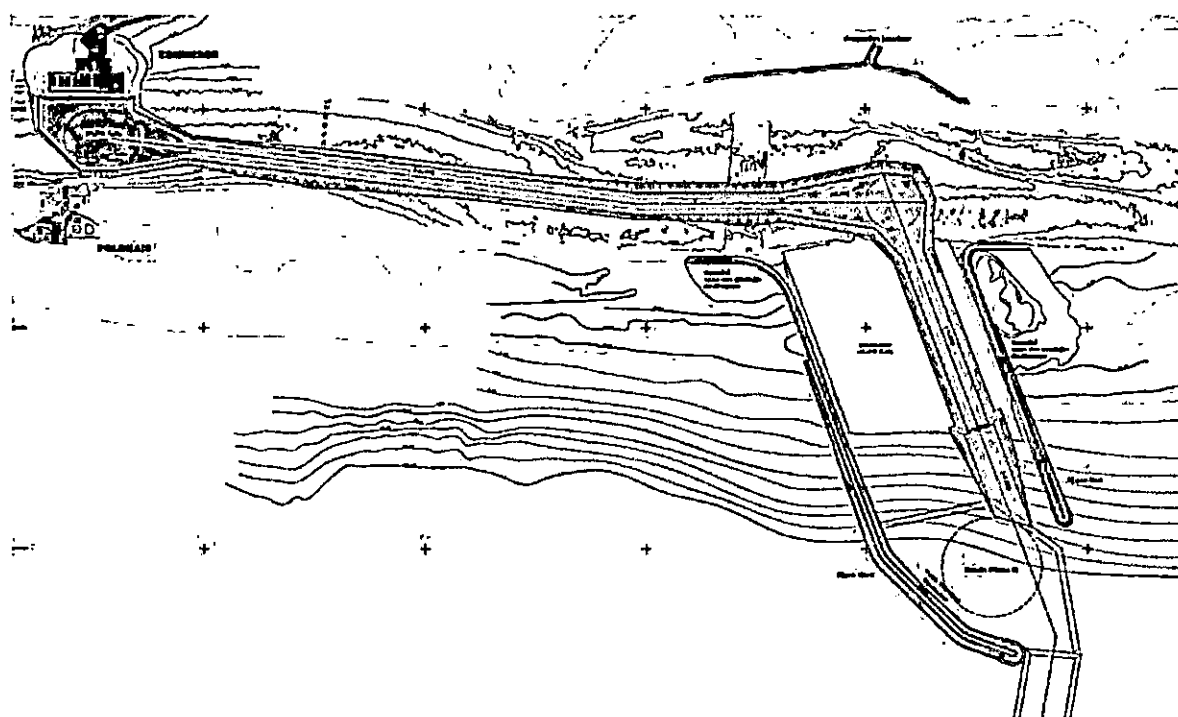


Figure 9-20 : Extrait du plan de masse général du projet de port fluviomaritime de Saint-Louis (Source : Etude APD OMVS SOGENAV, 2017)

Les cotes d'inondation observées à Saint-Louis sont comprises entre 1.16-1.28 et 1.39 mIGN à l'horizon 2050. A l'horizon 2100, celles-ci sont comprises entre 1.63 et 1.72 mIGN (Tableau 8-1).

Le tableau permet d'identifier les configurations hydrauliques pour lesquelles il est à redouter une inondation de la ville de Saint-Louis sachant que la cote correspondant à des débordements notables sur Saint-Louis a été évaluée à 1.50 mIGN.

Tableau 9-2 : Impact du scénario 3 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis

Horizon d'étude	Position de l'embouchure	Période de retour (ans)	Débit (m³/s)	Cote max Diama (IGN)	Cote max Saint-Louis (IGN)	Surverse cordon littoral Sud ST Louis (m³/s)	Surverse cordon littoral Nord ST Louis (m³/s)	Surverse cordon littoral Keur Macene (m³/s)
Horizon 2050	Projet de port PK 7	2	1769-1944	1.39-1.51	1.16-1.28	0	0	0
		5	2165-2333	1.50-1.62	1.20-1.32	0	0	0
		10	2311-2449	1.60-1.67	1.26-1.33	0	0	0
		30	3060	1.84	1.36	0	0	0
		100	3384	1.93	1.39	0	0	0
Horizon 2100	Projet de port PK 7	2	1476	1.7	1.63	0	0	0
		5	1885	1.8	1.68	0	4	0
		10	2080	1.84	1.7	0	6	0
		30	2263	1.88	1.71	0	9	0
		100	2331	1.89	1.72	0	10	0

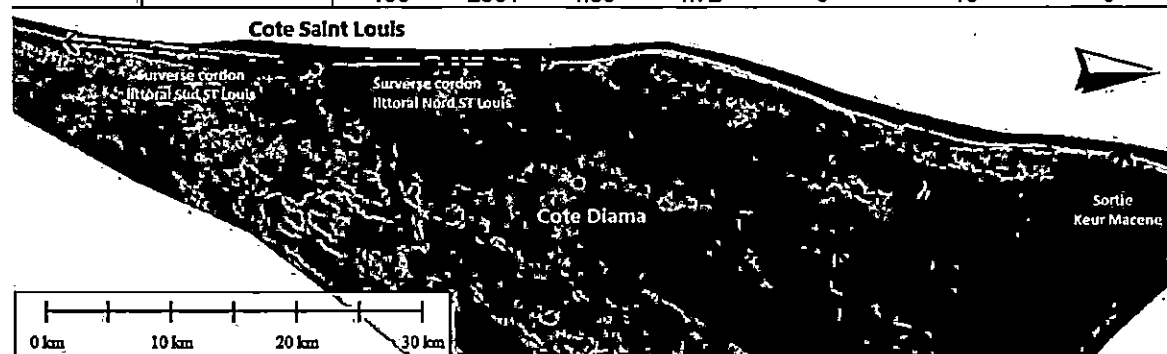


Figure 9-21 : Scénario 3 : Localisation des échelles et des surverses sur le cordon

Les impacts sur le risque inondation de Saint-Louis sont les suivants :

- **A l'horizon 2050** : Les principaux quartiers de Saint-Louis sont protégés contre les inondations. Pour une crue centennale les niveaux atteints par le fleuve sont de 1.39 mIGN soit une cote contenue par les ouvrages de protection existants. Il n'est pas observé de déversements sur le cordon littoral au Nord de Saint-Louis.
- **A l'horizon 2100** : la fréquence d'inondation de Saint-Louis est inférieure à 2 ans. Il n'est pas observé de déversements importants sur le cordon littoral en amont de Saint-Louis. On observe sur la Figure 9-24 que les cotes d'inondation à l'aval de Saint-Louis sont plus élevées qu'à l'amont. L'augmentation du niveau de la mer à cet horizon, et dans cette configuration d'embouchure, se traduit par des cotes d'inondations problématiques à Saint-Louis (> 1.7 mIGN).

Pour une crue centennale, les inondations touchent :

- **A l'Horizon 2050** : 7 500 habitants,
- **A l'Horizon 2100** : 100 600 habitants.

Il n'est donc pas nécessaire d'envisager d'aménagements de protection supplémentaires à l'horizon 2050. A l'horizon 2100, du fait de la montée des eaux liée au changement climatique, un renforcement des ouvrages de protection de la ville de Saint-Louis doit être engagé.

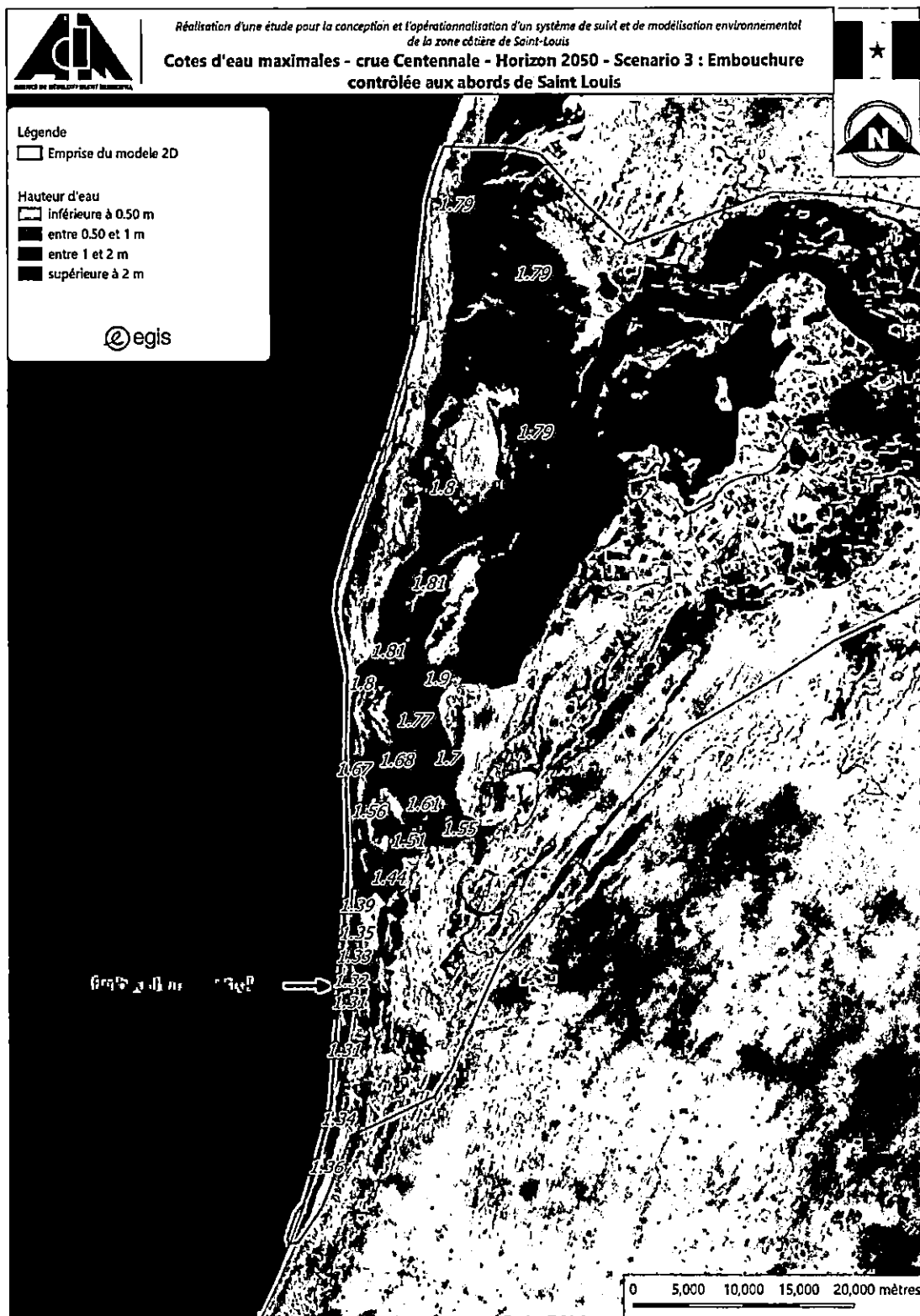


Figure 9-22 : Cotes d'eau maximales – Scénario 3 – Horizon 2050 – Q100 – Delta du fleuve

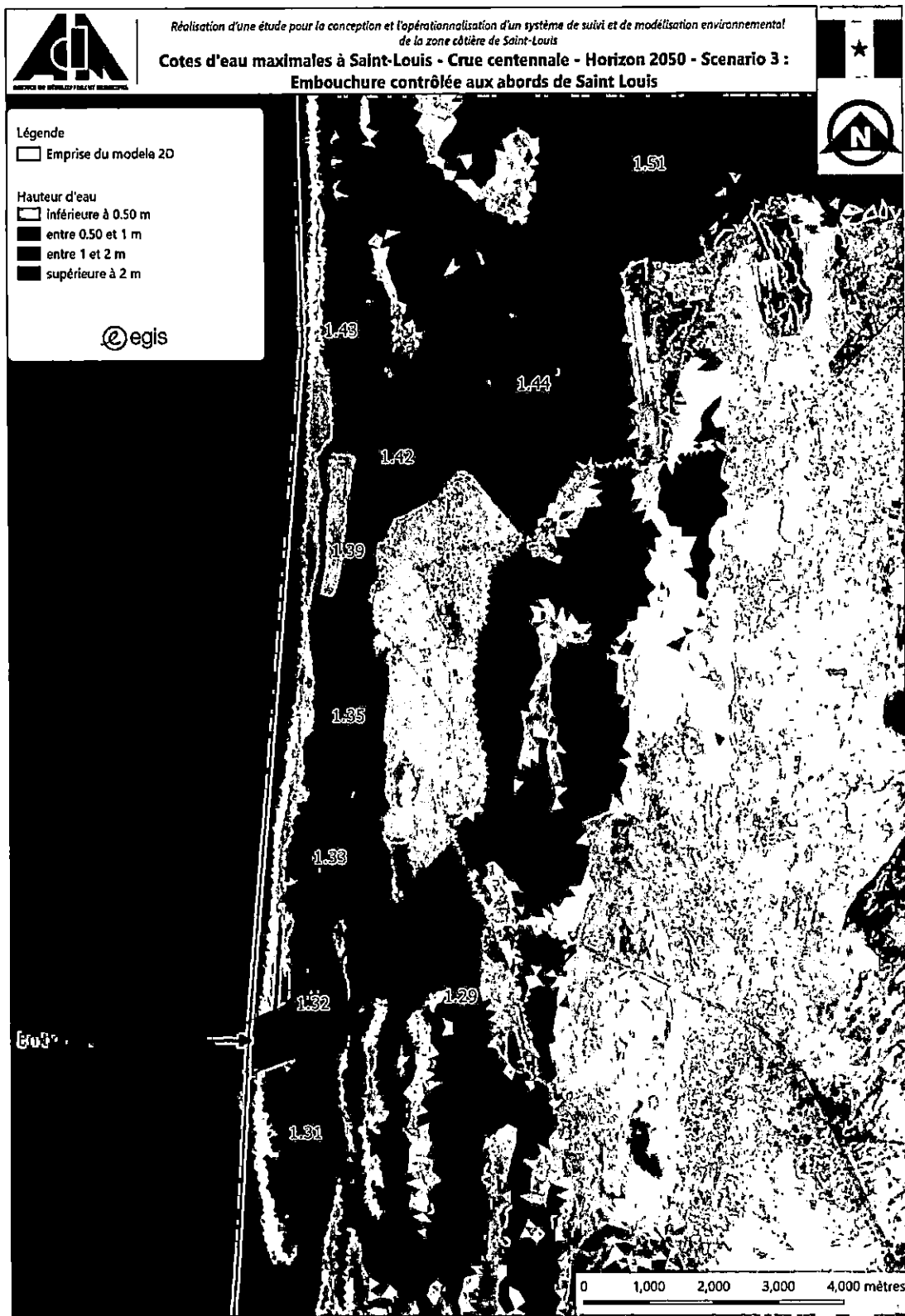


Figure 9-23 : Cotes d'eau maximales – Scénario 3 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis



Figure 9-24 : Cotes d'eau maximales – Scénario 3 – Horizon 2100 – Q100 – Delta du fleuve

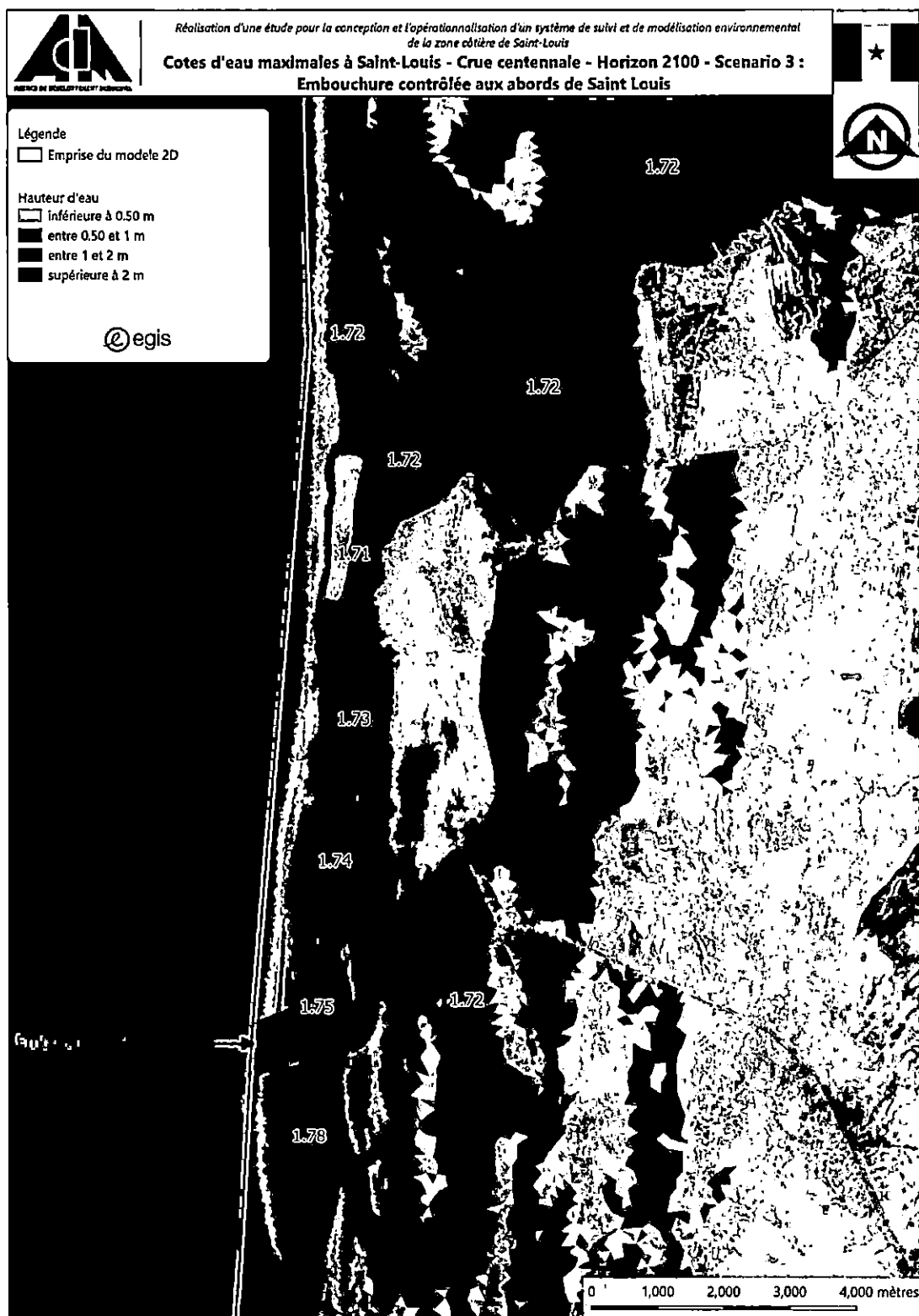


Figure 9-25 : Cotes d'eau maximales – Scénario 3 – Horizon 2100 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis

9.1.3.2 Impact sur les communes du delta

Pour une crue centennale, à l'horizon 2050, la localisation d'une embouchure proche de Saint-Louis permet d'éviter les risques inondations sur une bonne partie du delta. A l'horizon 2100, la montée du niveau marin à la cote 1.80 mIGN limite l'intérêt de ce scénario pour les inondations des communes du delta.

L'impact sur le bâti pour une crue centennale est le suivant :

A l'horizon 2050 :

- **Ndiébène Gandiole** : 1 600 habitants touchés,
- **Gandon** : 900 habitants touchés,
- **Diama** : aucun habitant touché,
- **Mauritanie** : 1 100 habitants touchés,
- **TOTAL** : 3600 habitants touchés.

A l'horizon 2100 :

- **Ndiébène Gandiole** : 11 500 habitants touchés,
- **Gandon** : 3 100 habitants touchés,
- **Diama** : aucun habitant touché,
- **Mauritanie** : 1 000 habitants touchés,
- **TOTAL** : 15600 habitants touchés.

La commune la plus durement touchée par la montée du niveau marin en 2100 est Ndiébène Gandiole, dont les zones peuplées parsèment le littoral. Entre 2050 et 2100, la population impactée passe de 6% à 46% (Figure 9-28 et Figure 9-29).

L'aménagement du port à Saint-Louis permet de mettre hors d'eau toute population de Diama.

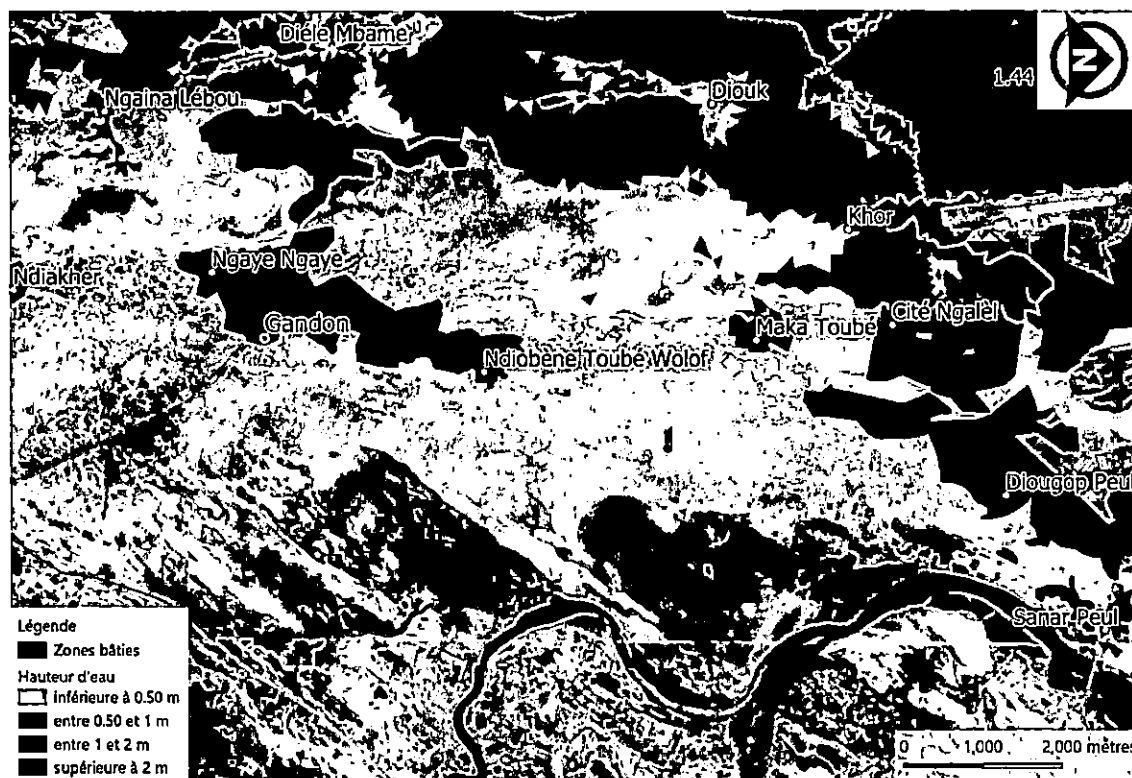


Figure 9-26 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Scénario 3 – Horizon 2050 – Q100

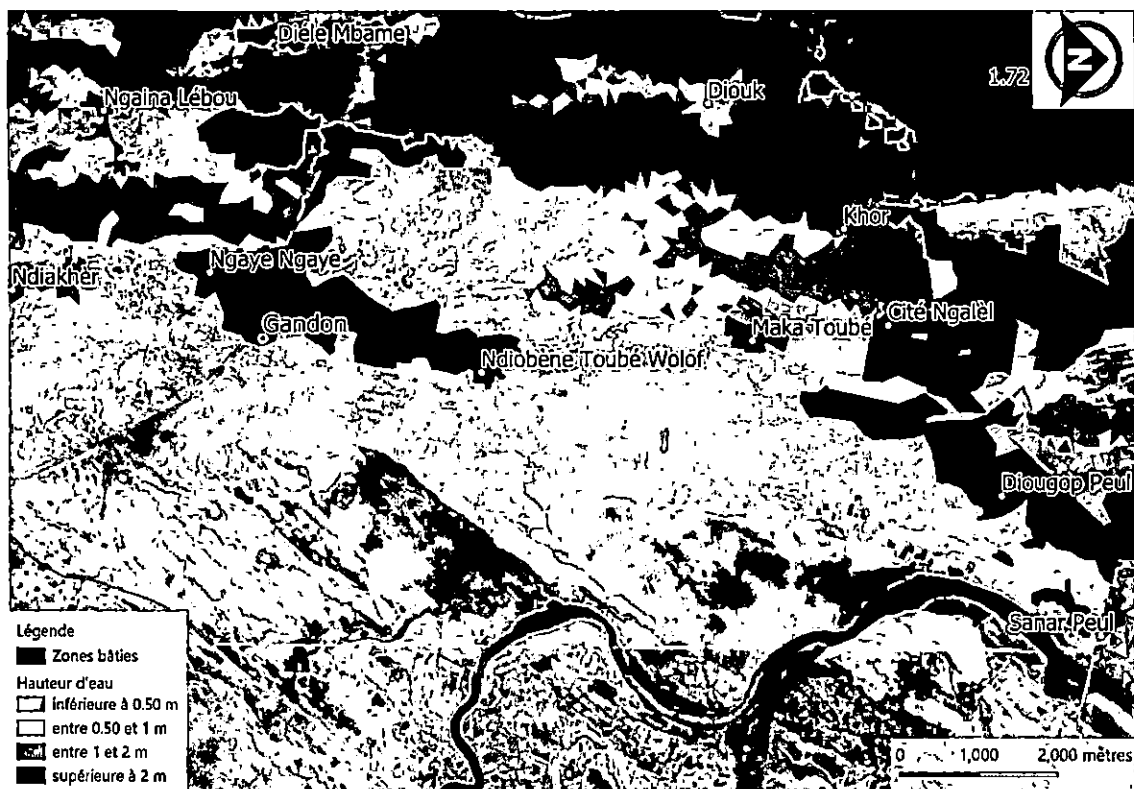


Figure 9-27 : Zones inondables sur la commune de Gandon – Scénario 3 – Horizon 2100 – Q100



Figure 9-28 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiole – Scénario 3 – Horizon 2050 – Q100



Figure 9-29 : Zones inondables sur la commune de Ndiébène Gandiole – Scénario 3 – Horizon 2100 – Q100

9.1.4 Risques d'inondation induits par les tempêtes

Compte tenu de la largeur d'ouverture limitée du port et de la protection contre les impacts des vagues par les jetées du port, une intrusion très limitée de surcote et de setup induite par les vagues est prévue dans l'embouchure du fleuve. Ainsi, les villages du Gandiolais et la ville de Saint-Louis seront protégés des tempêtes. Cependant, le front bâti de Saint-Louis situé sur le cordon littoral continuera à être exposé, si aucune mesure de protection supplémentaire n'est mise en œuvre.

Avec l'élévation de niveau de la mer, à l'horizon 2050 les effets sur les niveaux d'eau en face de Saint-Louis et les villages du Gandiolais seront modérées (d'environ 19 cm), mais seront plus alarmant à l'horizon 2100 (+ 66 cm selon RCP 8.5). À l'horizon de 2100 il est fortement probable que les eaux contiennent un taux de salinité important. Les inondations des habitations et des terrains avec des eaux salées sont beaucoup plus préjudiciables qu'avec de l'eau douce.

9.1.5 Intrusion saline

L'impact de la construction d'un port fluvial et maritime au sud de Saint-Louis sur l'intrusion saline est étudié pour les mêmes projections climatiques que pour le scénario 1. Le modèle de la bathymétrie a été modifié suivant les plans du port fluvial et maritime fournis par l'OMVS. Le port constituera la seule embouchure du fleuve comme illustré par la Figure 9-30.

Tableau 9-3 : Aperçu des 6 simulations effectuées pour étudier l'impact à la fois (i) de l'élévation du niveau de la mer et (ii) de la construction d'un port et d'un chenal de navigation de Saint-Louis à la mer (plans Consulmar) sur l'intrusion de salinité dans l'estuaire du fleuve Sénégal.

Simulation ID	Bathymétrie	Débit du fleuve	Niveau de la mer
<i>Port – faible débit</i>	2019 incl. port	faible (moyen saison sèche)	+ 0 cm
<i>Port - débit élevé</i>	2019 incl. port	élevé (moyen saison de pluies)	+ 0 cm
<i>Port – faible débit + 19 cm</i>	2019 incl. port	faible (moyen période sèche)	+ 19 cm
<i>Port - débit élevé + 19 cm</i>	2019 incl. port	élevé (moyen saison de pluies)	+ 19 cm
<i>Port – faible débit + 66 cm</i>	2019 incl. port	faible (moyen période sèche)	+ 66 cm
<i>Port - débit élevé + 66 cm</i>	2019 incl. port	élevé (moyen saison de pluies)	+ 66 cm

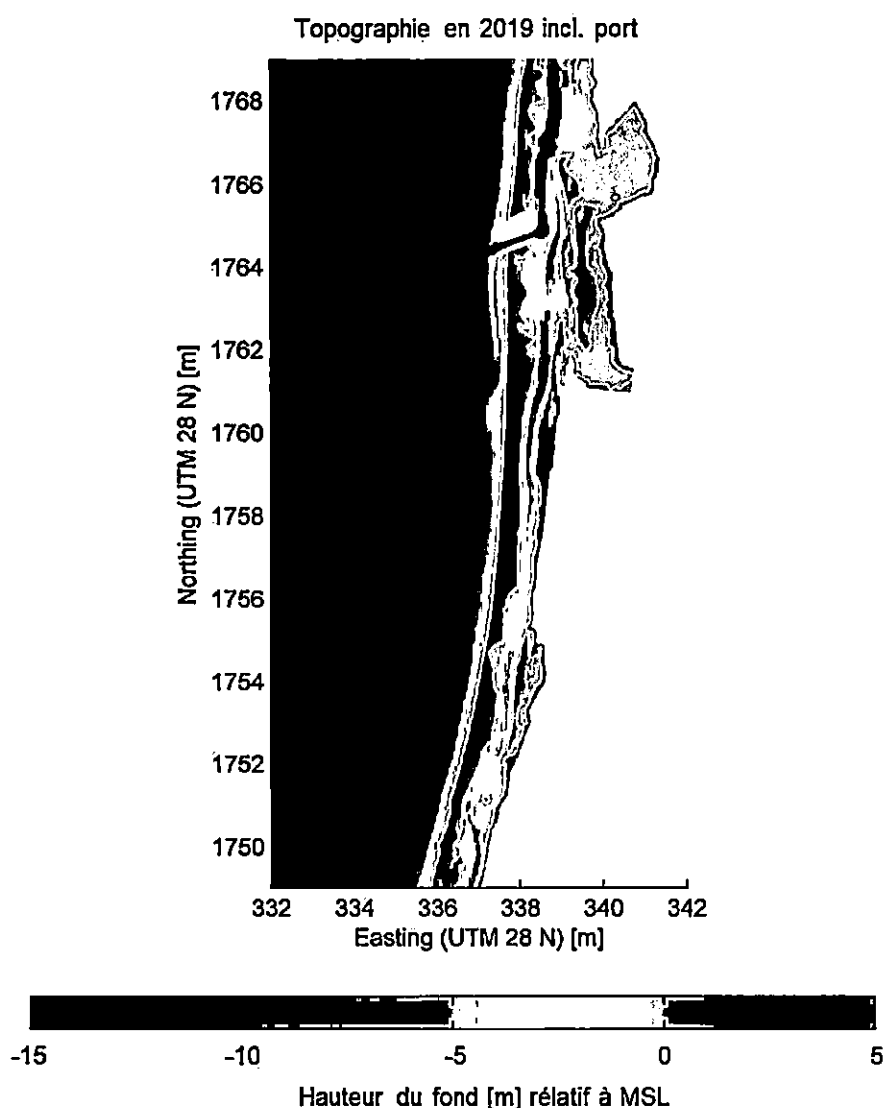


Figure 9-30 : Visualisation de la bathymétrie actuelle incluant le port et le chenal de navigation prévus (plans Consulmar) tels qu'utilisés pour les simulations avec le modèle Delft3D-FM

9.1.5.1 Résultats

La construction d'un port entraînera le déplacement vers le nord de l'embouchure du fleuve Sénégal, puisque l'embouchure actuelle sera fermée selon les plans du port (Figure 9-30). Bien que cela n'ait aucun impact sur les schémas généraux de distribution de la salinité pendant la marée basse / haute et le débit bas / haut, comme déjà décrit pour la bathymétrie actuelle au paragraphe 7.1.5, la relocalisation vers le nord de l'embouchure du fleuve augmenterait considérablement les concentrations de salinité dans l'estuaire en amont du port (comparer les Figure 7-33 et Figure 7-35 aux Figure 9-31 et Figure 9-32). Cet effet est particulièrement prononcé pendant la saison sèche, qui est associée à un débit fluvial plus faible. Une tendance différente peut être observée dans la zone située au sud du port : ici, le modèle indique une nette baisse des concentrations de salinité (notamment lors de forts débits) pour cette configuration (Figure 9-34 en comparant simulation « Ref. débit élevé » avec « Port - débit élevé » par exemple (distances -30 km jusqu'à 0 km) – qui montrent un baisse de salinité de 20 ppt).

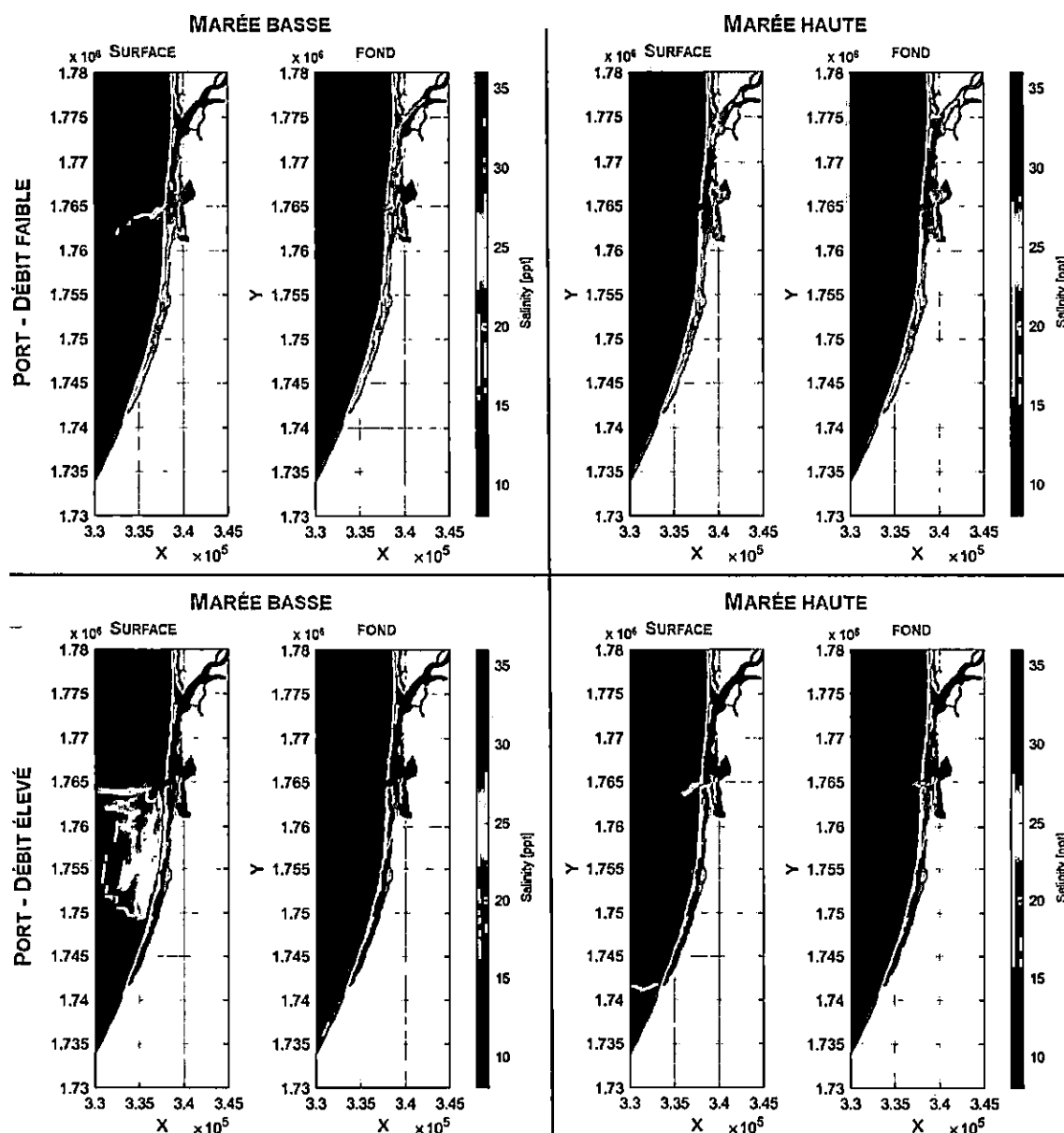


Figure 9-31 : Salinité simulée à la surface et près du fond du scénario du port (+ 0 cm d'élévation du niveau de la mer) à marée basse (panneaux de gauche) et à marée haute (panneaux de droite) en fonction des faibles débits (simulation 3a; panneaux du haut) et des forts débits (simulation 3b; panneaux inférieurs).

L'élévation du niveau de la mer en cas de configuration portuaire aurait des effets similaires à ceux observés dans la configuration actuelle (paragraphe 7.1.5). Par conséquent, l'élévation du niveau de la mer entraînerait une augmentation générale des concentrations de salinité dans l'estuaire du fleuve, en particulier pendant la saison sèche lors de faibles débits (Figure 9-32). Contrairement aux simulations basées sur la bathymétrie actuelle, le modèle indique une nette augmentation de la salinité également pour la zone sud, au moins pendant les faibles débits avec l'élévation du niveau de la mer.

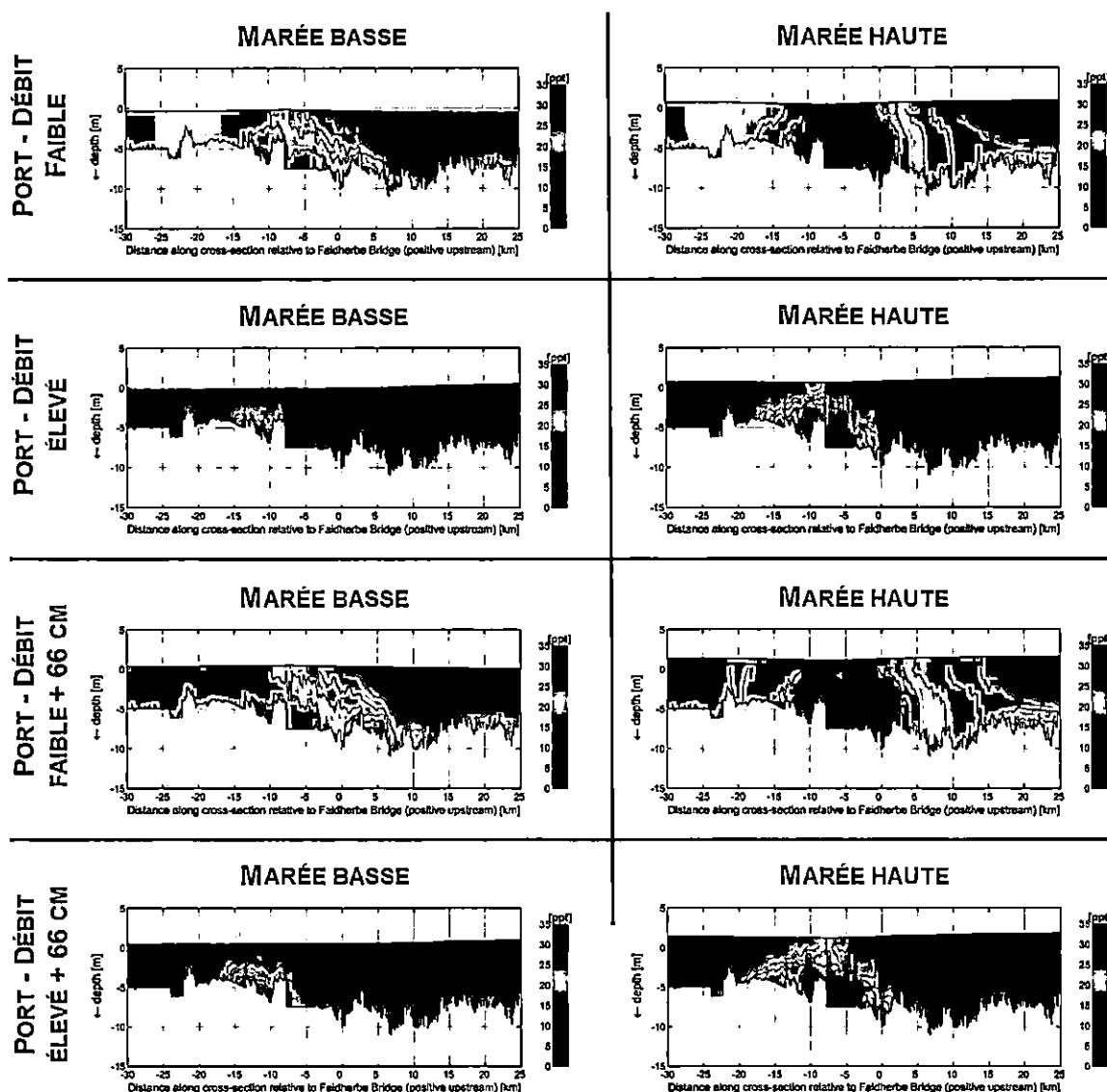


Figure 9-32 : Sections transversales de salinité à marée basse (panneaux de gauche) et à marée haute (panneaux de droite) basées pour un débit faible et pour un débit élevé pour la bathymétrie 2019, y compris le port prévu avec une élévation du niveau de la mer de +0 cm à +66 cm.

Pour étudier l'effet de saisonnalité sur l'intrusion d'eau salée une simulation additionnelle a été réalisée (Figure 9-33). Pendant un débit du fleuve élevé, l'eau salée qui a fait intrusion pendant la période précédente avec un faible débit est remplacée par de l'eau douce, sauf autour du chenal de navigation. Au contraire, lors d'une période avec faible débit, le taux de salinité est moins élevé s'il est précédé d'une période avec un débit du fleuve élevé. Ceci confirme l'effet que la présence d'un port (avec un chenal de navigation relativement réduit en largeur par rapport à la situation actuelle), aidera à baisser légèrement les niveaux de salinité dans la lagune au sud du port également pendant la saison sèche, bien qu'elle restera saumâtre.

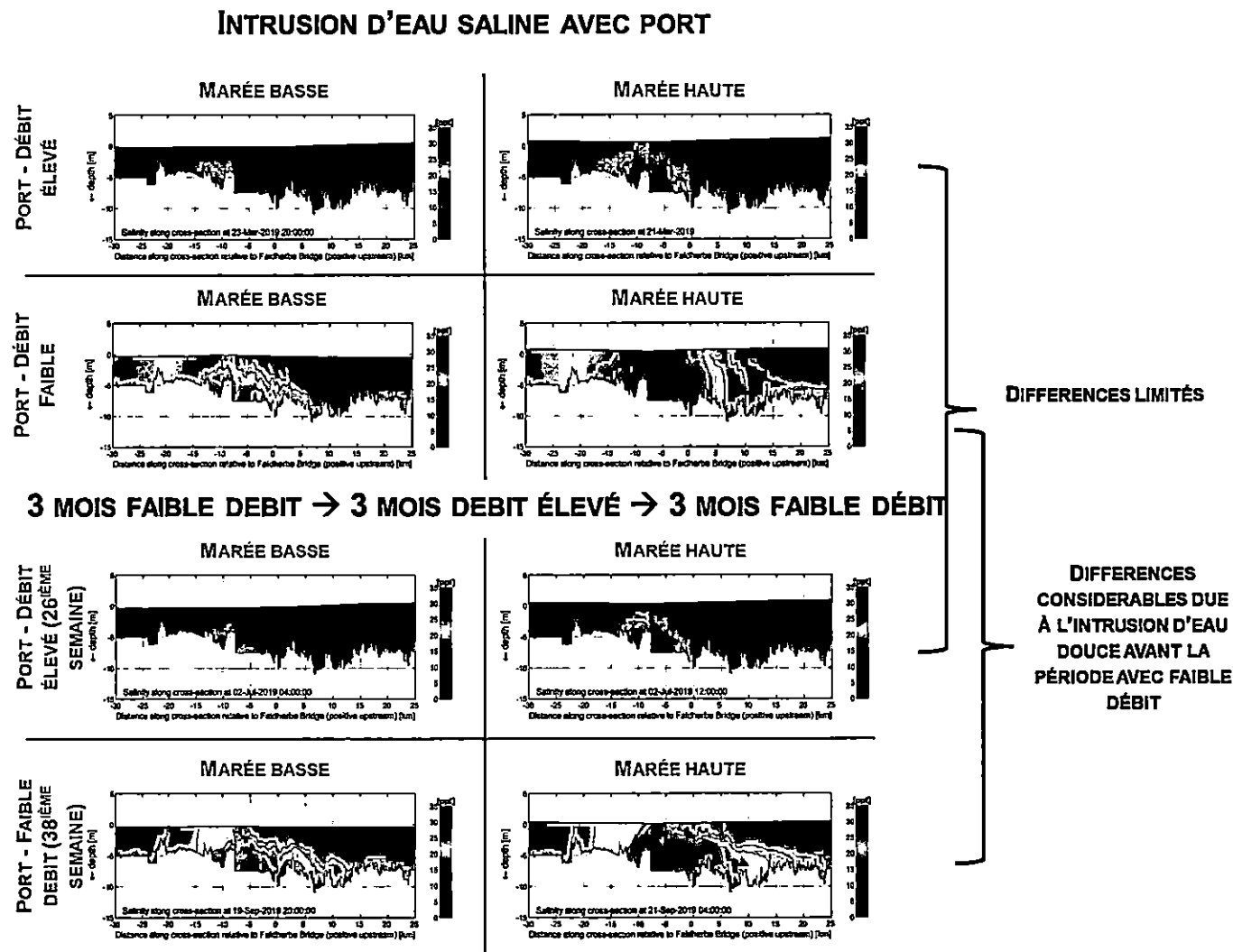


Figure 9-33 : Effet de saisonnalité sur l'intrusion d'eau saline avec un port. Pendant un débit du fleuve élevé, l'eau salée entrée pendant la période précédente avec faible débit est remplacée par de l'eau douce-sauf autour le chenal de navigation. Au contraire, pour la distribution de l'eau saline lors d'un période avec faible débit, il est moins élevé s'il est précédé d'une période avec un débit du fleuve élevé.

9.1.5.2 Discussion et conclusions

Considérant la configuration du port, l'intrusion d'eau salée dans l'embouchure, puis dans les eaux souterraines, peut provoquer des effets négatifs notamment sur l'agriculture comme pour la configuration de l'embouchure en état actuel (rapport L5-1) par rapport à la situation avant 2003.

Afin de récapituler les résultats, la Figure 9-34 montre les profils de salinité moyennes en profondeur et en temps (sur la période du 10 mars 2019 au 8 avril 2019) pour le transect illustré sur la Figure 7-34. Ainsi, elle donne un aperçu des effets d'élévation du niveau de la mer sur la salinité dans la zone d'étude.

Une augmentation considérable de la salinité dans le fleuve en amont du port est notée par rapport à la situation actuelle. Ceci est associé à la relocalisation de l'embouchure du fleuve vers le nord. Au contraire, les concentrations de salinité dans la zone au sud du port, au niveau des villages du Gandiolais diminuent distinctement, lors de forts débits. Pendant la période sèche l'intrusion d'eau saline sera réduit par rapport à la situation actuelle mais restera saumâtre pendant la période sèche.

Concernant l'impact de l'élévation du niveau de la mer, une légère augmentation de la salinité dans l'estuaire peut être observée à l'horizon 2050, tandis que l'impact est considérable à l'horizon 2100. L'impact de l'élévation du niveau de la mer sur les concentrations de salinité n'est visible que lors de faibles débits fluviaux.

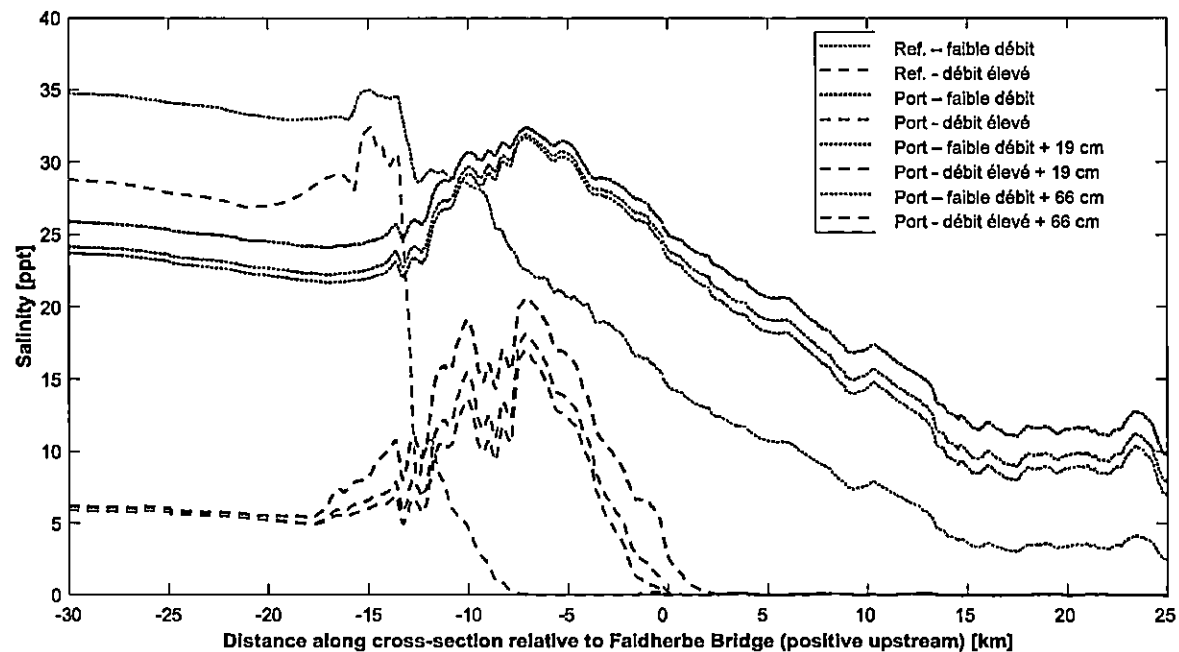


Figure 9-34 : La salinité dans le fleuve moyennes en profondeur et en temps (sur la période du 10 mars 2019 au 8 avril 2019) en coupe transversale pour le transect allant de Diama à la section au sud de l'embouchure (comme illustré sur la Figure 7-34) pour tous les simulations avec port.

9.2 Scénario 3-1 : Actions de diminution du risque inondation sur Saint-Louis

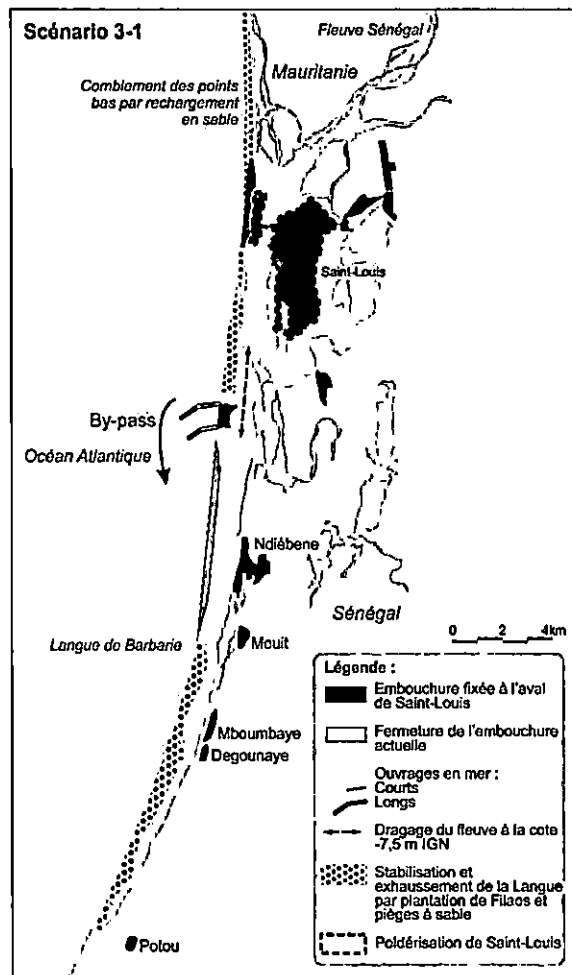


Figure 9-35 : Présentation du scénario 3-1

Les actions de diminution du risque inondation envisagées dans le cadre du scénario 3-1 visent à protéger Saint-Louis à l'horizon 2100.

Tous les éléments présentés pour le scénario 2-2 (§ 8.3) sont valables pour le scénario 3-1.

Ces travaux permettraient de mettre hors d'eau 300 habitants à l'horizon 2050 et 57 400 habitants à l'horizon 2100.

Pour une crue centennale, la population qui reste impactée est la suivante :

- A l'Horizon 2050 : 7 200 habitants,
- A l'Horizon 2100 : 43 200 habitants.

La population qui reste exposée réside dans les autres quartiers de Saint-Louis non protégés par un système d'endiguement. On la retrouve majoritairement sur la Lingue de Barbarie (le long de la rive droite du fleuve), sur Khor et sur l'extrémité sud de Sor, en avant des protections existantes.

9.3 Estimation du coût du scénario 3 et de sa variante

9.3.1 Estimation du coût du scénario 3

Le coût global du scénario 3 est de **231 milliards FCFA**, décomposé de la manière suivante :

Tableau 9-4 : Coût du scénario 3

Description des travaux	Investissement	Exploitation
	Millions FCFA HT	Millions FCFA HT
Scénario de base		
Stabilisation Langue de Barbarie sud	1 240	124
Exhaussement et stabilisation Langue de Barbarie nord	1 726	173
Colmatage brèche	50 400	0
Ouvrages d'accessibilité fluvio-maritime	178 000	3 333
Total Scénario de base	231 366	3 630

9.3.2 Estimation du coût du scénario 3-1

Le coût global du scénario 3-1 est de **259 Milliards FCFA**, décomposé de la manière suivante :

Tableau 9-5 : Coût du scénario 3-1

Description des travaux	Investissement	Exploitation
	Millions FCFA HT	Millions FCFA HT
Scénario de base		
Stabilisation Langue de Barbarie sud	1 240	124
Exhaussement et stabilisation Langue de Barbarie nord	1 726	173
Colmatage brèche	50 400	0
Poldérisation Saint-Louis	27 907	0
Ouvrages d'accessibilité fluvio-maritime	178 000	3 333
Total Scénario de base	258 953	3 598

9.4 Evaluation du scénario et de sa variante

9.4.1.1 Du point de vue de l'évolution hydrodynamique et morphodynamique

Les brise-lames du port bloquent le transport de sédiments le long de la côte, ce qui entraîne une sédimentation en amont et une érosion en aval (ces tendances sont également visibles pour le port à N'Diogo, Mauritanie, paragraphe 6.3) qui, avec le temps, entraîneront une brèche au sud du port après 5 ans environ. Il est fort probable qu'avec la migration de la brèche au sud, la Langue de Barbarie soit amenée à disparaître totalement. Ceci se caractérise également par des dommages importants, notamment pour les villages situés au nord du Gandiolais. Cet impact négatif du port

peut être évité par le contournement artificiel du sable (pompage ou dragage du sable de la plage au nord du port vers la plage au sud du port). Le taux de bypass est estimé proche du transport littoral de 0.8 à 1.2 Mm³/an, (1.4 Mm³/an est estimée par le modèle Delft3D). Il convient de noter que des incertitudes sont inhérentes à cette approche simplifiée, et qu'un sous-dimensionnement des moyens de by-pass serait catastrophique pour le villages dans le Gandiolais. En pratique, les taux de contournement du sable devront être ajustés à l'ensablement actuel du côté nord. Ces travaux d'entretien seront une contrainte permanente et coûteuse. Dans l'ancien bras du fleuve, au sud du port, une sédimentation de l'ordre d'1 m pourrait être observée. Pour éviter que ce bras du fleuve devienne très peu profond, et que l'eau stagne, un dragage est recommandé.

Les vitesses d'écoulement dans le port dépendent de la marée, du débit du fleuve et de la profondeur locale / de la section transversale. Les vitesses maximales dans le port pendant le flot et le jusant sont assez fortes et varient respectivement entre 1.8 et 2.0 m/s lors d'un faible débit du fleuve et entre 1.6 et 2.2 m/s lors d'un débit élevé du fleuve. Cela signifie que les bateaux pourraient ne pas être en mesure de naviguer dans le port pendant les pics du flot et du jusant, même s'ils sont à l'abri des vagues grâce aux brise-lames du port. Pendant l'étape de marée (entre marée haute et marée basse), les vitesses se réduisent à presque zéro. Des érosions sont prévues à l'intérieur du port, de ce fait, les vitesses d'écoulement diminueront avec le temps.

Des brise-lames plus courts ou plus longs n'affectent pas les vitesses maximales dans le port pendant le pic des courants de jusant et de flot, car la marée, le débit du fleuve et la profondeur locale / la section transversale dans le port restent les mêmes. A l'inverse, un espacement plus large entre des brise-lames entraînera des vitesses plus faibles à l'intérieur du port. La zone touchée par l'érosion au sud du port est affectée par la configuration des brise-lames : des brise-lames plus courts rapprocheront la zone d'érosion du port. Il est à noter que, quelle que soit la variante, une érosion importante touchera la zone au sud du port. **Même une embouchure fixe sans brise-lames nécessitera un by-pass de sédiments très important, du même ordre de grandeur que dans la conception de l'OMVS du port actuel.**

9.4.1.2 Du point de vue des risques d'inondation induits par les crues du fleuve

A l'horizon 2050 : La ville de Saint-Louis est protégée contre les inondations. Pour une crue centennale les niveaux atteints par le fleuve sont de 1.39 mIGN soit une cote contenue par les ouvrages de protection existants. Il n'est pas observé de déversements sur le cordon littoral au nord de Saint-Louis. Il n'est pas nécessaire d'envisager d'aménagements de protection supplémentaires à l'horizon 2050.

A l'horizon 2100 : du fait de la montée des eaux, Saint-Louis est à nouveau menacée par les eaux. Sa fréquence d'inondation est inférieure à 2 ans.

A l'horizon 2100, du fait de la montée des eaux liée au changement climatique, un renforcement des ouvrages de protection de la ville de Saint-Louis doit être engagé (scénario 3-1).

9.4.1.3 Du point de vue des risques d'inondation et de formation de nouvelles brèches induits par les tempêtes

Compte tenu de la largeur d'ouverture limitée du port et de la protection contre les impacts des vagues par les jetées du port, une intrusion très limitée de surcote et setup induite par les vagues est prévue dans l'embouchure du fleuve. Ainsi, les villages du Gandiolais et la ville de Saint-Louis seront protégés des tempêtes.

Cependant, les quartiers saint-louisiens de la Langue de Barbarie continueront à être exposés, si aucune mesure de protection supplémentaire n'est mise en œuvre.

Avec l'élévation de niveau de la mer, à l'horizon 2050 les effets sur les niveaux d'eau en face de Saint-Louis et des villages du Gandiolais seront modérés (environ 19 cm), mais seront plus alarmants à l'horizon 2100 (+ 66 cm selon RCP 8.5).

9.4.1.4 Du point de vue de la salinité

Considérant la configuration d'un port, l'intrusion d'eau salée dans l'embouchure, puis dans les eaux souterraines, peut provoquer des effets négatifs notamment sur l'agriculture comme c'est le cas actuellement par rapport à la situation d'avant 2003.

Une augmentation considérable de la salinité dans le fleuve en amont du port est notée par rapport à la situation actuelle. Ceci est associé à la relocalisation de l'embouchure du fleuve vers le nord. Au contraire, les concentrations de salinité dans la zone au sud du port, au niveau des villages du Gandiolais diminuent distinctement, lors de forts débits, mais restent élevées pendant la période sèche.

Concernant l'impact de l'élévation du niveau de la mer, une légère augmentation de la salinité dans l'estuaire peut être observée à l'horizon 2050, tandis que l'impact est considérable à l'horizon 2100. L'impact de l'élévation du niveau de la mer sur les concentrations de salinité n'est visible que lors de faibles débits fluviaux.

10. Scénario 4 : Dérivation partielle du fleuve Sénégal au nord de Saint-Louis

10.1 Le scénario de base

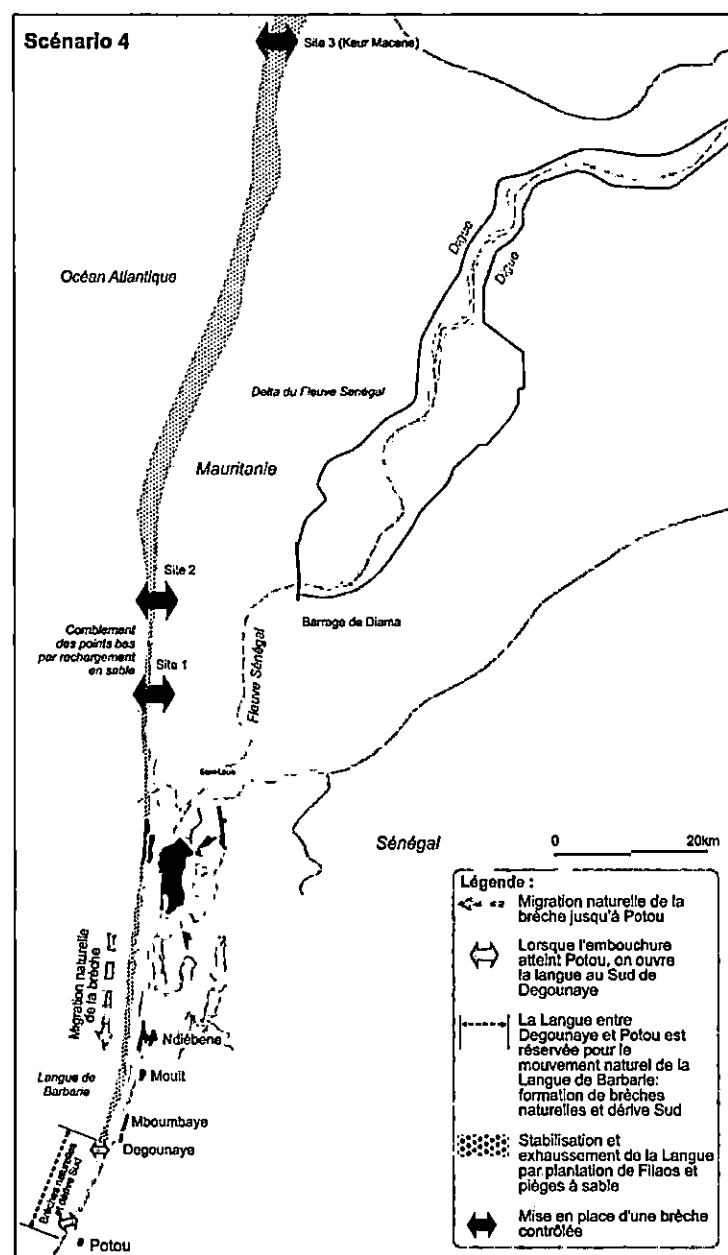


Figure 10-1 : Présentation du scénario 4

Le scénario 4 porte sur la mise en place d'une zone de débordement contrôlée du fleuve au nord de Saint-Louis de type brèche contrôlée, dont l'objectif est de diminuer la fréquence et l'importance des inondations sur la ville de Saint-Louis.

Les ouvrages envisagés sont réalisés selon la même conception définie pour le déversoir sud de Saint-Louis : ouvrages en partie fusible, intégrant une partie fixe (calage d'un fond maximum du seuil et du chenal de déversement, protections de berge du chenal jusqu' à la limite de la plage) et une partie fusible par reconstitution du cordon littoral. Ces ouvrages ne seront fonctionnels qu'en période de forte crue.

Les trois sites retenus sont positionnés sur les points de faiblesse du cordon littoral :

■ **Site 1 :** Le premier site est localisé à 12 km au nord de Saint-Louis. Le déversoir, positionné sur le cordon littoral, est situé dans l'axe d'un chenal naturel du fleuve. Il se situe en dehors des enjeux d'habitat et des périmètres irrigués de la zone d'étude.

■ **Site 2 :** Le second site est localisé dans l'axe du barrage de

Diamas, à 20 km au nord de Saint-Louis et à 8 km à l'amont du site précédent. Le déversoir positionné sur le cordon littoral est alimenté par des chenaux naturels activés en période de crue. Il se situe également en dehors des enjeux d'habitat et des périmètres irrigués de la zone d'étude.

- **Site 3** : Le troisième site est localisé 63 km en amont de Saint-Louis, au droit d'une ancienne brèche du fleuve, autrefois active lors des crues avant la mise en place des digues et du barrage de Diamas. Ce site est localisé à l'aval des périmètres irrigués de Keur Macène (cuvette de Tiffass).

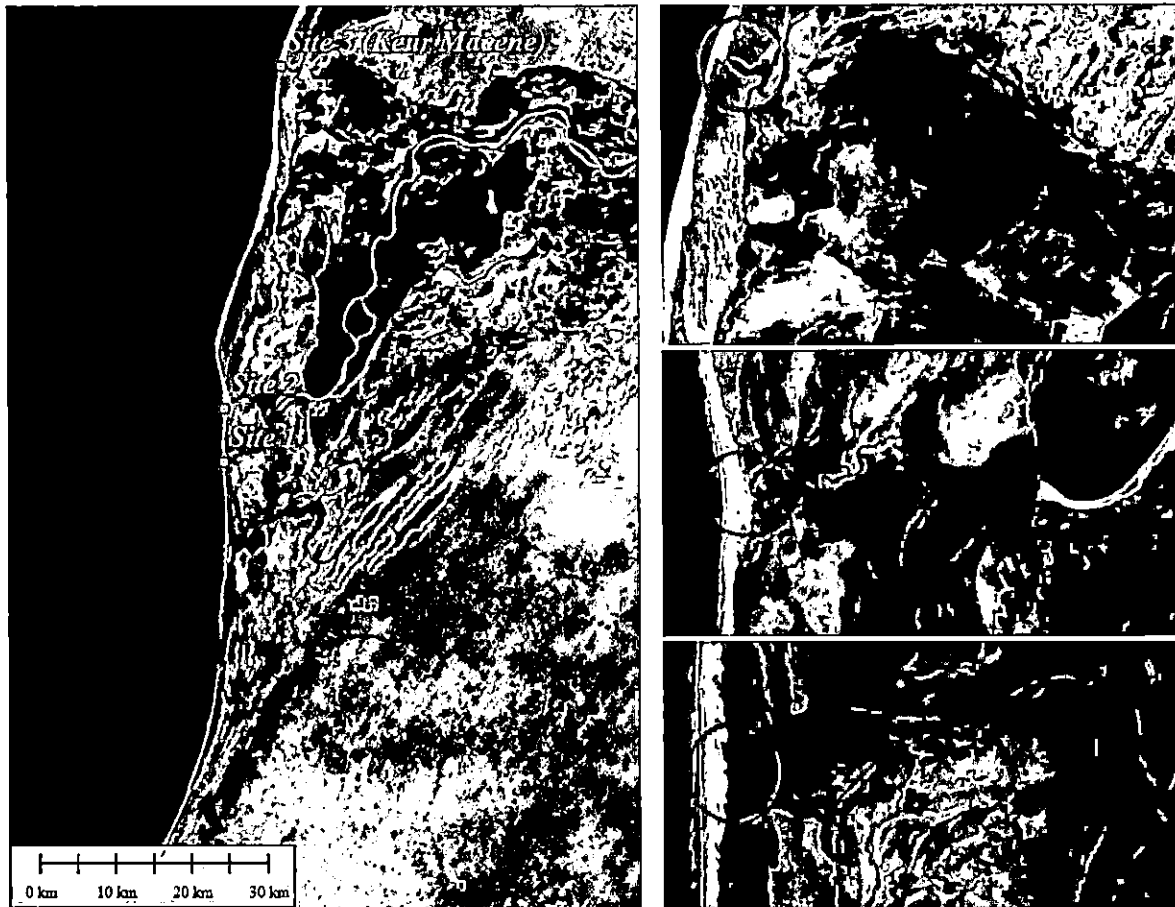


Figure 10-2 : Localisation des aménagements du scénario 4

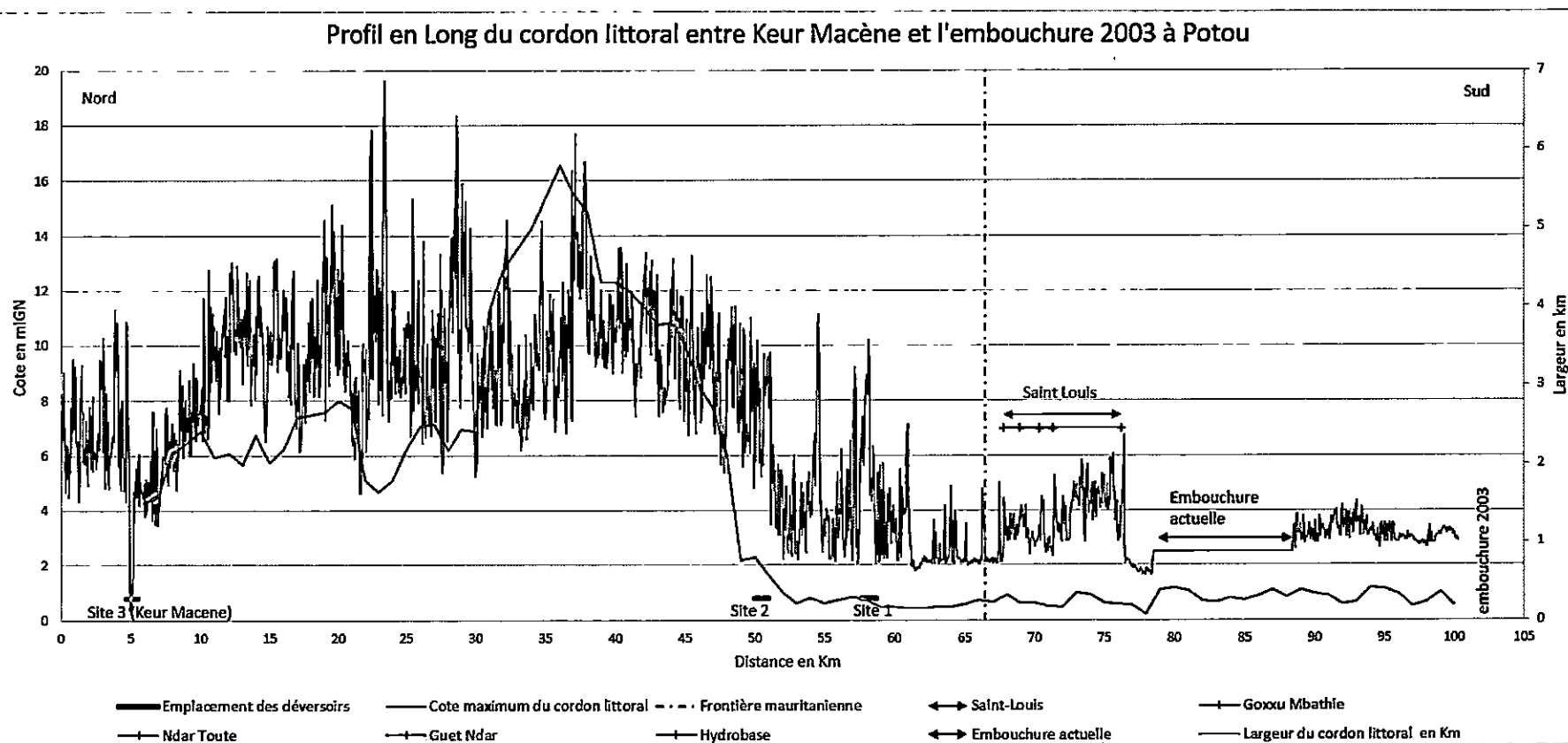


Figure 10-3 : Position des aménagements du scénario 4 sur le cordon littoral

10.1.1 Impact sur la dynamique côtière

La dérivation partielle du fleuve Sénégal pourrait créer de forts changements dans le fonctionnement du bas-delta du fleuve et donc affecter fortement la stabilité du cordon littoral.

Dans le cas le plus optimiste, ce scénario fonctionnera comme prévu et créera une dérivation partielle du débit du fleuve. Il est attendu sur la base des modélisations d'un tel déversoir dans le cadre du scénario 2 (8.2.2) que celui-ci aura une influence limitée sur le développement du littoral à long terme. Il est important de noter qu'on ne peut pas exclure que les vitesses d'écoulement relativement élevées puissent entraîner l'affouillement (*scour*) à l'interface des protections et/ou des barrages d'une part et les fonds marins et la plage de sable d'autre part.

Dans le cas le plus pessimiste, le site choisi pourrait devenir la nouvelle embouchure dominante du fleuve Sénégal, et avec le temps migrer vers le sud, vers Saint-Louis. Cela entraînera une forte érosion et la destruction de Saint-Louis.

Concernant le risque d'inondation à Saint-Louis, le Site 1 est choisi comme site avec la meilleure efficacité (voir paragraphe suivant). Il permet la plus grande réduction des niveaux d'inondation à droite de la ville de Saint-Louis. En revanche, en termes de stabilité du cordon côtier, cette position présente le risque le plus élevé des trois options, vue sa proximité avec la ville.

10.1.2 Impact sur le risque d'inondation lié aux crues du fleuve

10.1.2.1 Impact sur Saint-Louis

Les modélisations hydrauliques portent sur :

- A l'horizon 2050 : des crues de période de retour 10, 30 et 100 ans,
- A l'horizon 2100 : les crues de période de retour 10 et 100 ans,
- La localisation et la longueur des ouvrages à mettre en place,
- Les configurations d'embouchure correspondantes au scénario 2 d'aménagement (scénario de base), soit :
 - Embouchure à Degounaye en 2050,
 - Embouchure à Degounaye ou Potou en 2100.

L'objectif est de diminuer les niveaux d'inondation centennaux au droit de Saint-Louis en deçà de la cote objectif de 1.50 mIGN.

La modélisation du scénario 2 de base présentée au chapitre 8.2.2 est reprise comme base de comparaison des différents tests réalisés.

A l'horizon 2050

Le premier test effectuée porte sur la localisation de la brèche. Des brèches contrôlées de longueur 1500 m ont été testées sur les trois sites d'étude.

Tableau 10-1 : Test de positionnement de la brèche contrôlée au nord de Saint-Louis – Horizon 2050

Position de l'embouchure	Période de retour (ans)	Débit (m³/s)	Config. de brèche	Débit déversé (m³/s)	Cote max S3 (mIGN)	Cote max Dama (mIGN)	Cote max S 2 (mIGN)	Cote max S 1 (mIGN)	Cote max amont Saint-Louis (mIGN)	Cote max Saint-Louis (Faidherbe) (mIGN)	Cote max aval Saint-Louis (mIGN)
Sud de Degounaye PK 23	100	3384	Aucune brèche	0	2.21	2.28	2.20	2.12	1.95	1.90	1.79
			Site 1 - brèche 1500 m	965	1.88	2.00	1.88	1.65	1.60	1.57	1.50
			Site 2 - brèche 1500 m	859	1.82	1.97	1.73	1.76	1.62	1.59	1.52
			Site 3 - brèche 1500 m	416	1.60	2.14	2.04	1.97	1.81	1.76	1.68

Les modélisations mettent en évidence que quelle que soit la localisation de la brèche contrôlée les niveaux d'inondation calculés sont supérieurs au seuil d'inondation des quartiers de Saint-Louis (1.50 mIGN).

Les ouvrages étudiés permettent de limiter les hauteurs de submersion sans pour autant éviter les inondations de la ville de Saint-Louis. Pour une crue centennale les abaisséments constatés sont les suivants :

- -33 cm pour le site 1, cote à Saint-Louis de 1.57 mIGN,
- -31 cm pour le site 2, cote à Saint-Louis de 1.59 mIGN,
- -14 cm pour le site 3, cote à Saint-Louis de 1.76 mIGN.

Le site 1 est le site qui présente la meilleure efficacité. Il permet le plus fort abaissément des niveaux d'inondation au droit de la ville de Saint-Louis.

Le site 3 présente les plus mauvais résultats, de par sa localisation éloignée de Saint-Louis (63 km). Au vu des résultats précédents une modélisation complémentaire a été réalisée pour tester l'impact des longueurs d'ouvrage sur le site 1.

Tableau 10-2 : Tests brèche contrôlée Site 1 – Longueurs de 1500 et 3000 m – Horizon 2050

Position de l'embouchure	Période de retour (ans)	Débit (m³/s)	Config. de brèche	Débit déversé (m³/s)	Cote max S3 (mIGN)	Cote max Dama (mIGN)	Cote max S 2 (mIGN)	Cote max S 1 (mIGN)	Cote max amont Saint-Louis (mIGN)	Cote max Saint-Louis (Faidherbe) (mIGN)	Cote max aval Saint-Louis (mIGN)
Sud de Degounaye PK 23	100	3384	Aucune brèche	0	2.21	2.28	2.20	2.12	1.95	1.90	1.79
			Site 1 - brèche 1500 m	965	1.88	2.00	1.88	1.65	1.60	1.57	1.50
			Site 1 - brèche 3000 m	1240	1.81	1.94	1.81	1.55	1.51	1.49	1.44

Les résultats obtenus montrent que :

- Pour un doublement de la longueur de l'ouvrage (3000 m), les niveaux d'eau d'une crue centennale sont amenés à la cote de protection actuelle de Saint-Louis de 1.50 mIGN.
- Le doublement de la longueur de l'ouvrage n'apporte qu'une diminution supplémentaire de la cote du fleuve de 8 cm, tandis que la brèche de 1500 m réduit à elle seule les niveaux de 33 cm.

Ce test met en avant la faible valeur ajoutée d'une brèche contrôlée de 3000 m. **C'est donc la configuration de brèche contrôlée de 1500 m positionnée au Site 1 qui est retenue pour le scénario 4.**

Les résultats des modélisations pour les crues 10 ans, 30 ans et 100 ans, en termes de cote d'inondation et de débit déversé par la brèche contrôlée sont présentés dans le Tableau 10-3.

Tableau 10-3 : Impact du scénario 4 sur le risque d'inondation à Saint-Louis – Horizon 2050

Position de l'embouchure	Période de retour (ans)	Débit (m³/s)	Config. de brèche	Débit déversé (m³/s)	Cote max S3 (mIGN)	Cote max Diama (mIGN)	Cote max S2 (mIGN)	Cote max S1 (mIGN)	Cote max amont Saint-Louis (mIGN)	Cote max Saint-Louis (Faidherbe) (mIGN)	Cote max aval Saint-Louis (mIGN)
Sud de Degounaye PK 23	10	2311-2449	Aucune	0	1.74-1.81	1.82-1.89	1.74-1.81	1.66-1.73	1.51-1.58	1.48-1.55	1.42-1.49
			Site 1 - brèche 1500 m	573	1.55-1.62	1.67-1.74	1.66-1.63	1.39-1.46	1.34-1.41	1.33-1.40	1.29-1.36
	30	3060	Aucune	0	2.07-1.79	2.15-1.91	2.07-1.79	1.99-1.59	1.82-1.53	1.78-1.51	1.68-1.45
			Site 1 - brèche 1500 m	820	1.79-1.88	1.91-2.00	1.79-1.88	1.59-1.65	1.53-1.60	1.51-1.57	1.45-1.50
	100	3384	Aucune	0	2.21-1.88	2.28-2.00	2.20-1.88	2.12-1.65	1.95-1.60	1.90-1.57	1.79-1.50
			Site 1 - brèche 1500 m	965	1.88-1.88	2.00-2.00	1.88-1.88	1.65-1.65	1.60-1.60	1.57-1.57	1.50-1.50

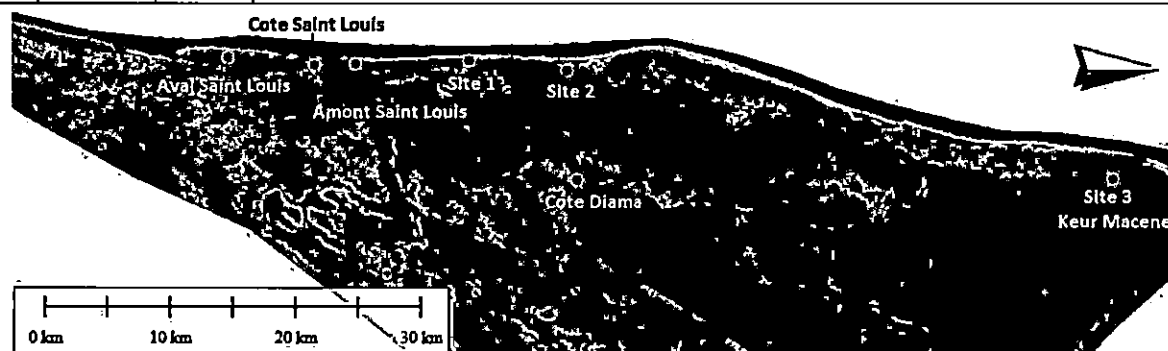


Figure 10-4 : Scénario 4 : Localisation des points de contrôle

A l'horizon 2050, la ville de Saint-Louis est protégée jusqu'à l'occurrence trentennale avec la mise en place d'une brèche contrôlée de 1500 m au droit du Site 1.

Pour une même longueur de brèche contrôlée (1500 m), le scénario 4 présente des hauteurs d'eau plus faibles à Saint-Louis que le scénario 2-1 (brèche contrôlée à l'aval de Saint-Louis), avec respectivement 1.51 contre 1.63 mIGN pour une crue 30 ans et 1.57 contre 1.72 mIGN pour une crue 100 ans.

La Figure 10-5 montre les différences de niveaux d'eau en crue centennale à l'horizon 2050 entre le scénario 2 de base et le scénario 4 avec un déversoir de 1500 m sur le Site 1.

Les cotes d'inondation à Saint-Louis résultant de ce scénario sont présentées en Figure 10-6.

A l'instar du scénario 2-1, l'ouverture de la brèche est prévue dès l'occurrence décennale (en moyenne une fois tous les dix ans).

Du point de vue du risque d'inondation lié aux crues du fleuve, le positionnement de la brèche contrôlée est plus efficace au nord de Saint-Louis (Site 1).

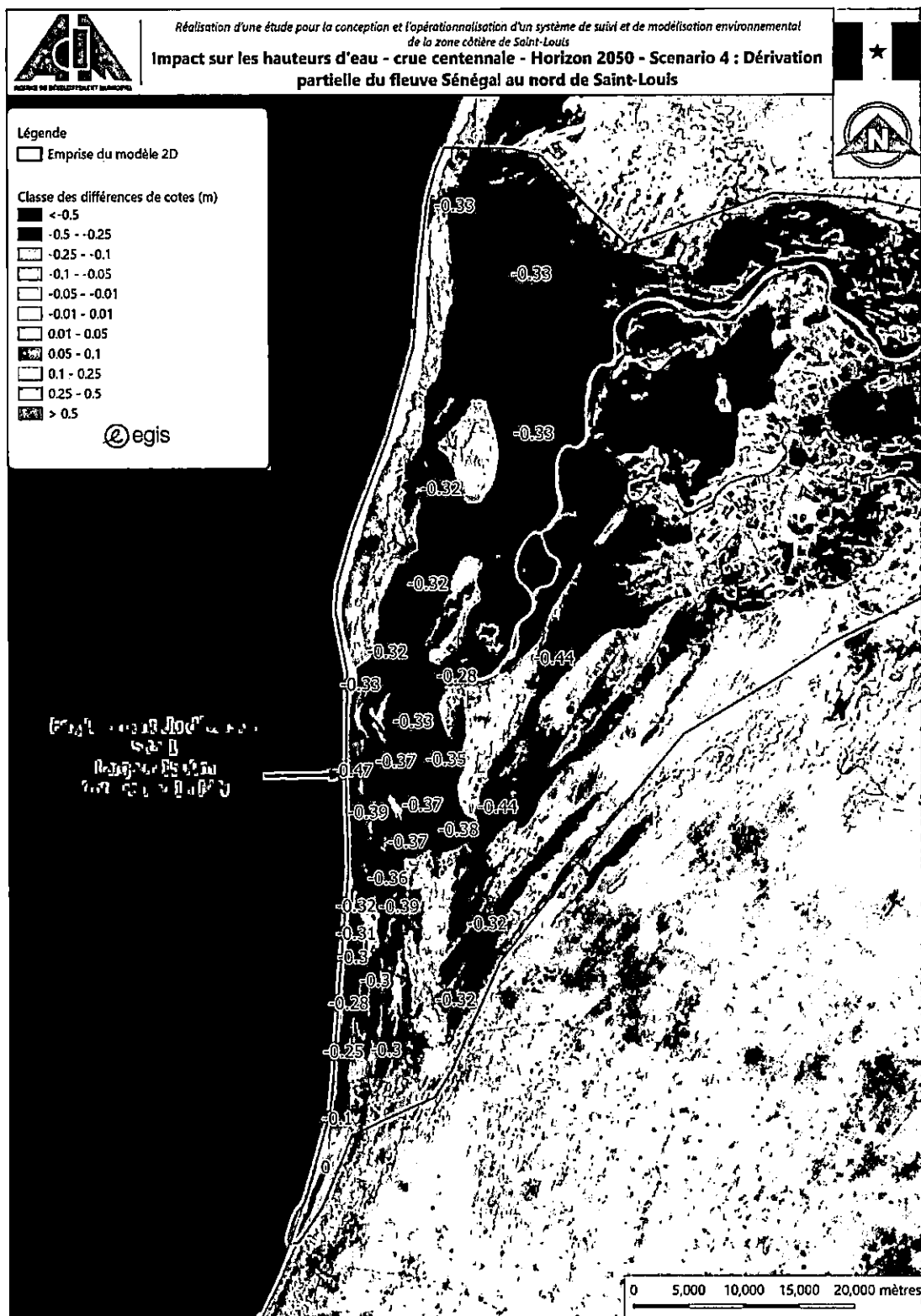


Figure 10-5 : Impacts sur les cotes d'inondation – Scénario 4 – Horizon 2050 – Q100 – Delta du fleuve

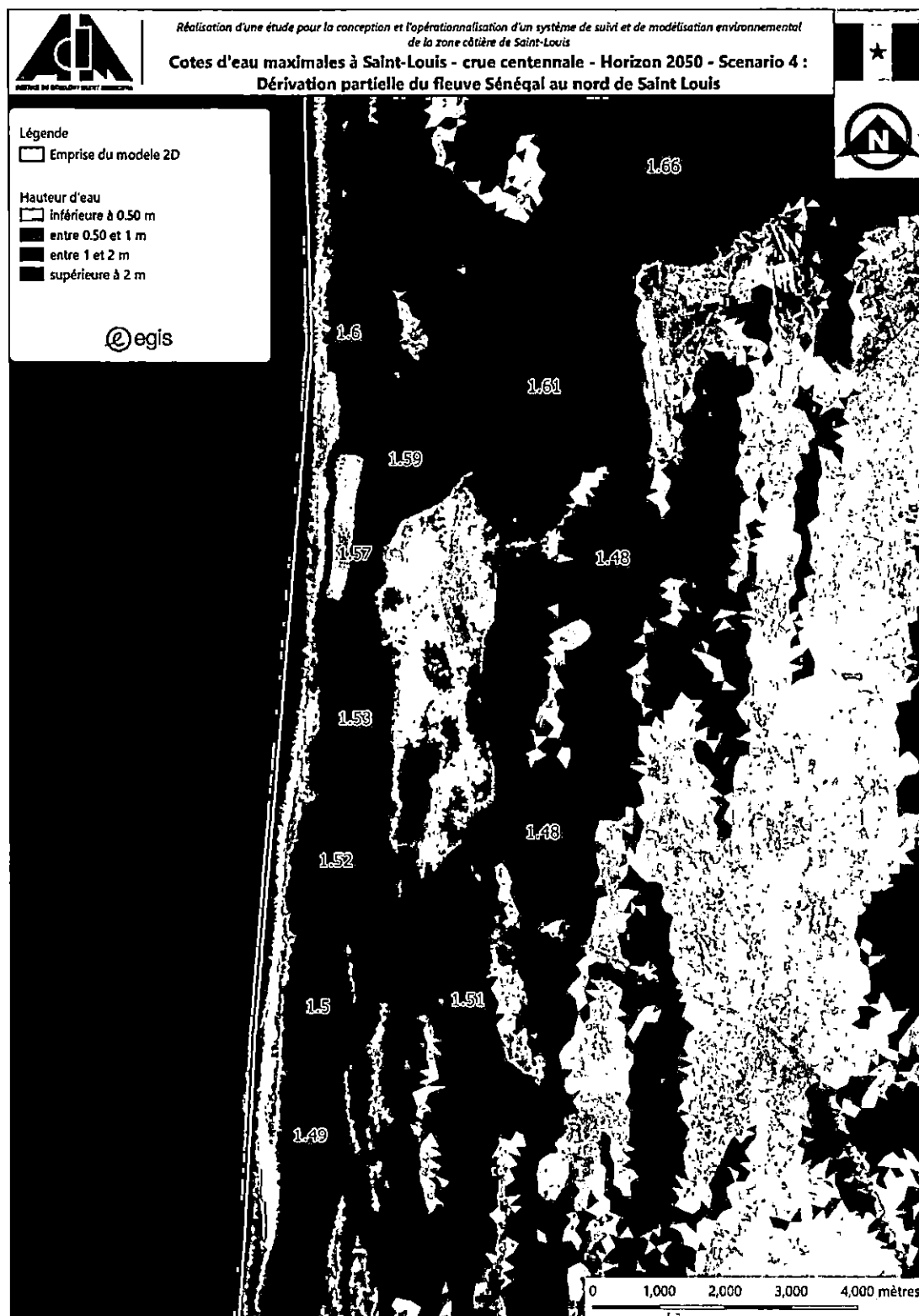


Figure 10-6 : Cotes d'eau maximales – Scénario 4 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis

A l'horizon 2100

Tableau 10-4 : Impact du scénario 4 sur le risque d'inondation à Saint-Louis – Horizon 2100

Position de l'embouchure	Période de retour (ans)	Débit (m³/s)	Config. de brèche	Débit déversé (m³/s)	Cote max S3 (mIGN)	Cote max Dama (mIGN)	Cote max S 2 (mIGN)	Cote max S 1 (mIGN)	Cote max amont Saint-Louis (mIGN)	Cote max Saint-Louis (Faidherbe) (mIGN)	Cote max aval Saint-Louis (mIGN)
Sud de Degounaye PK 23	10	2080	Aucune	0	1.86	1.95	1.89	1.85	1.79	1.78	1.77
			Site 1 - brèche 1500 m	942	1.71	1.84	1.76	1.67	1.71	1.70	1.70
	100	2331	Aucune	0	1.96	2.04	1.98	1.93	1.85	1.84	1.81
			Site 1 - brèche 1500 m	1020	1.77	1.90	1.81	1.71	1.74	1.74	1.73
Potou PK 31	10	2080	Aucune	0	2.17	2.21	2.17	2.13	2.07	2.05	2.02
			Site 1 - brèche 1500 m	1042	1.69	1.87	1.79	1.72	1.74	1.74	1.73
	100	2331	Aucune	0	2.33	2.37	2.32	2.29	2.22	2.20	2.15
			Site 1 - brèche 1500 m	1179	1.86	1.95	1.88	1.78	1.79	1.79	1.78

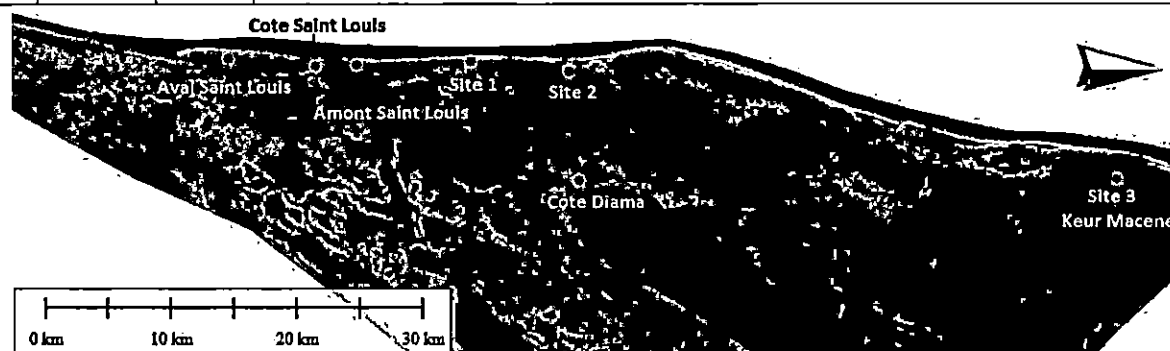


Figure 10-7 : Scénario 4 : Localisation des points de contrôle

Dans l'hypothèse d'une embouchure située à Degounaye, les modélisations mettent en évidence un impact relativement faible de la brèche contrôlée sur les cotes d'inondations à Saint-Louis, de l'ordre de 10 cm. Cette diminution ne permet pas de protéger Saint-Louis contre les inondations.

Dans l'hypothèse d'une embouchure située à Potou, l'impact de la brèche contrôlée au nord de Saint-Louis est plus marqué, de -31 cm à -41 cm en fonction de l'occurrence. Néanmoins, les cotes à Saint-Louis demeurent supérieures à la cote de protection de 1.50 mIGN.

La Figure 10-8 montre les différences de niveaux d'eau en crue centennale à l'horizon 2100 entre le scénario 2 de base avec embouchure à Potou et le scénario 4 avec un déversoir de 1500 m sur le Site 1.

Les cotes d'inondation à Saint-Louis résultant de ce scénario sont présentées en Figure 10-9.

A l'instar du scénario 2-1, L'ouverture de la brèche est prévue dès l'occurrence biennale quelle que soit la position de l'embouchure.

A l'horizon 2100, le scénario 4 ne permet pas de protéger Saint-Louis contre les inondations.

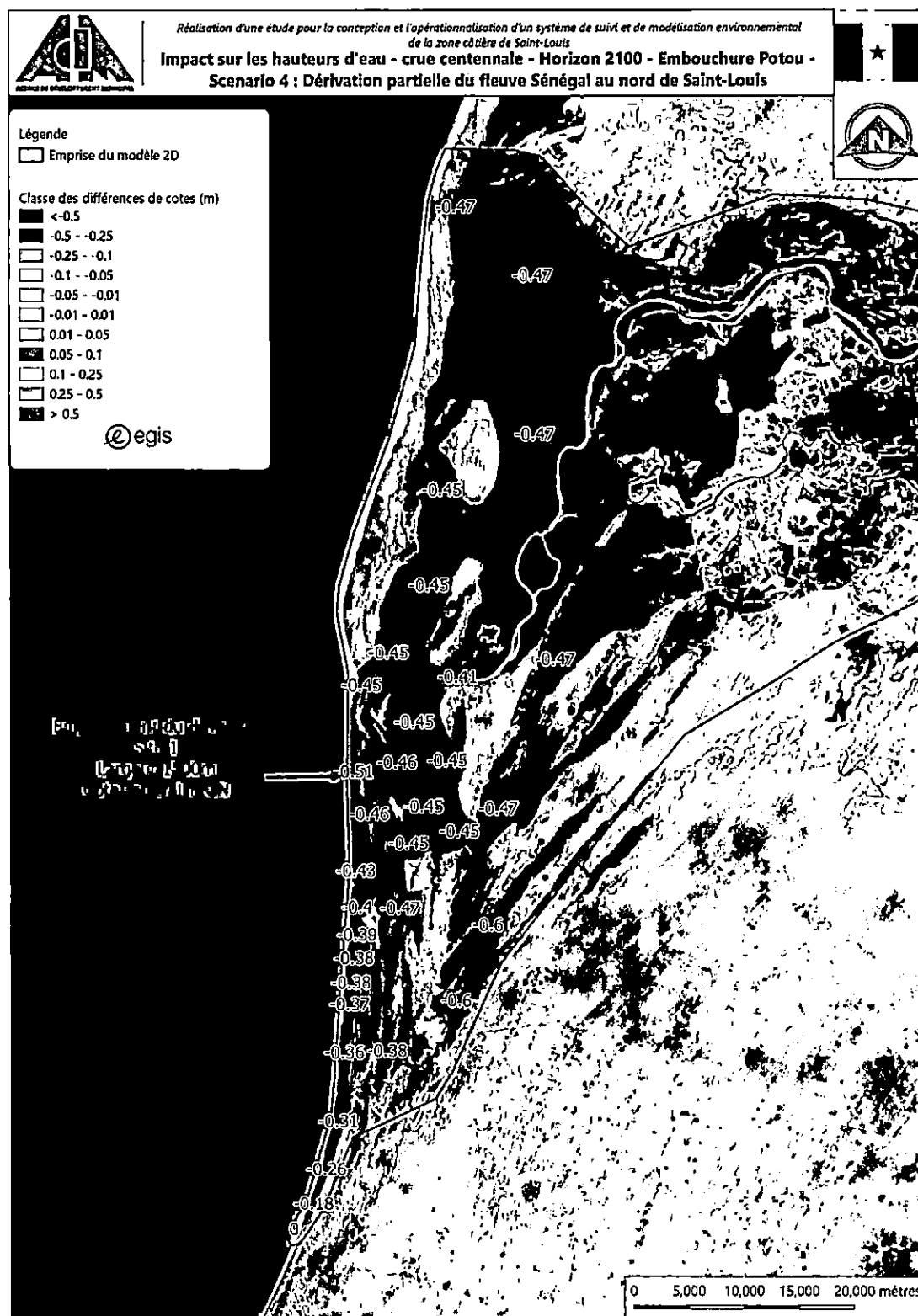


Figure 10-8 : Impacts sur les cotes d'inondation – Scénario 4 – Horizon 2100 – Embouchure Potou – Q100 – Delta du fleuve

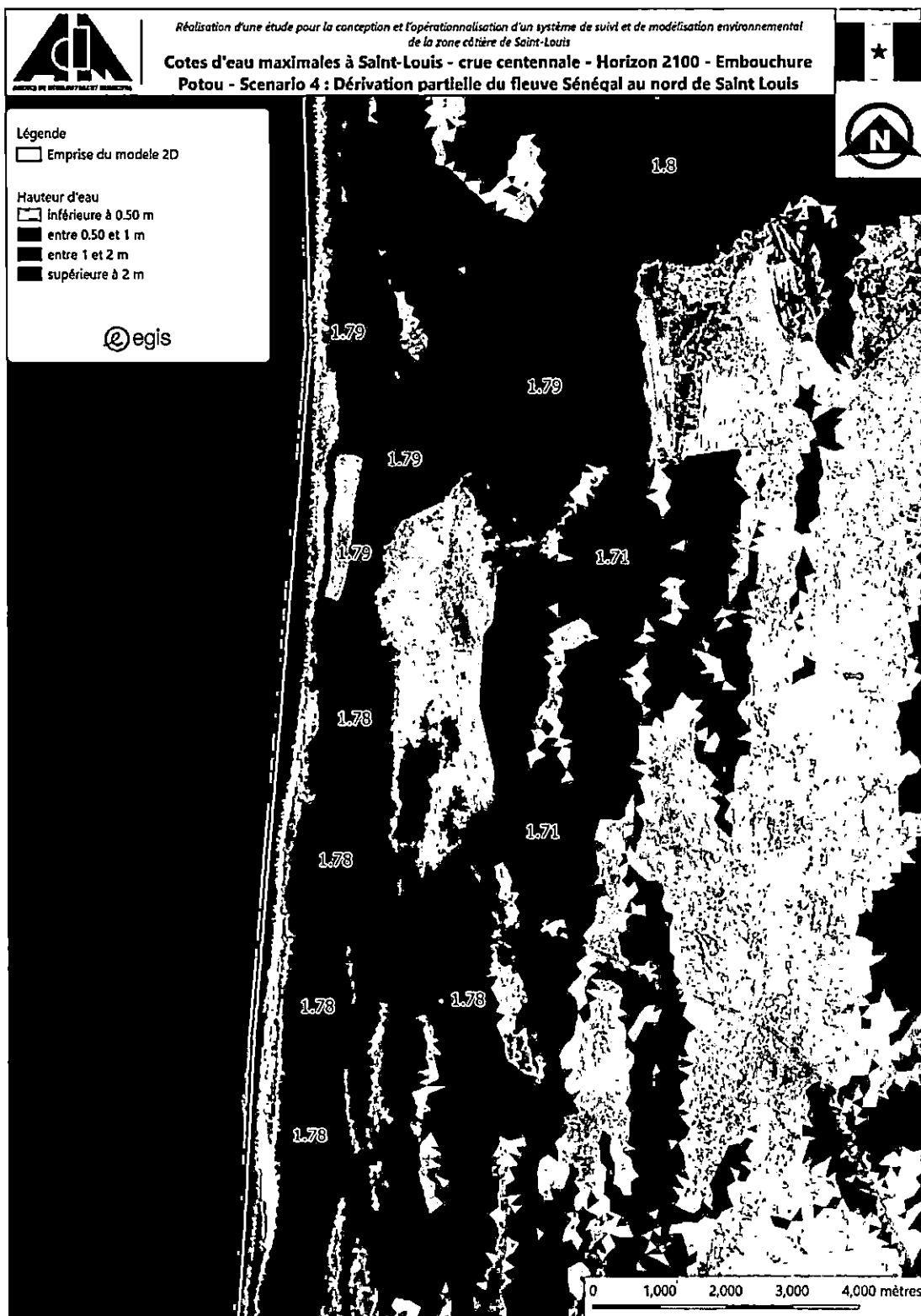


Figure 10-9 : Cotes d'eau maximales – Scénario 4 – Horizon 2050 – Q100 – Zoom sur Saint-Louis

Conclusion

La fréquence d'ouverture de la brèche contrôlée au nord de Saint-Louis est d'une fois tous les 10 ans à l'horizon 2050 et de plus d'une fois tous les 2 ans en 2100, pour prévenir le dépassement de la cote 1.5 mIGN à Saint-Louis.

Pour une crue centennale, avec une brèche au Site 1 de 1500 m, les inondations touchent :

- A l'Horizon 2050 : 54 000 habitants,
- A l'Horizon 2100 :
 - *Embouchure à Degounaye* : 108 500 habitants,
 - *Embouchure à Potou* : 130 300 habitants.

A l'horizon 2050, la brèche contrôlée permet une diminution importante des hauteurs d'eau pour les crues fortes (30 ans, 100 ans), pour une longueur de brèche de 1500 m, mais ne **permet de protéger la ville que jusqu'à l'occurrence trentennale**. Une brèche plus large n'apporte que peu d'améliorations, notamment compte tenu du coût d'installation et de gestion que cela représente.

A l'horizon 2100, les hauteurs d'eau sont diminuées de manière significative seulement pour une embouchure à Potou. Néanmoins, **Saint-Louis n'est pas protégée des inondations, quelle que soit la position de l'embouchure principale**.

10.1.2.2 Impact sur les communes du delta

L'impact du scénario 4 sur les populations du delta pour une crue centennale est le suivant :

A l'horizon 2100 :

Embouchure Degounaye

- **Ndiébène Gandiole** : 10 000 habitants touchés,
- **Gandon** : 5 600 habitants touchés,
- **Diam** : aucun habitant touché,
- **Mauritanie** : 1 100 habitants touchés,
- **TOTAL** : 16 700 habitants touchés.

Embouchure Potou

- **Ndiébène Gandiole** : 11 200 habitants touchés,
- **Gandon** : 7 900 habitants touchés,
- **Diam** : 500 habitants touchés,
- **Mauritanie** : 1 200 habitants touchés,
- **TOTAL** : 20 900 habitants touchés.

A l'horizon 2050 :

- **Ndiébène Gandiole** : 4 200 habitants touchés,
- **Gandon** : 4 900 habitants touchés,
- **Diam** : aucun habitant touché,
- **Mauritanie** : 1 200 habitants touchés,
- **TOTAL** : 10 300 habitants touchés.

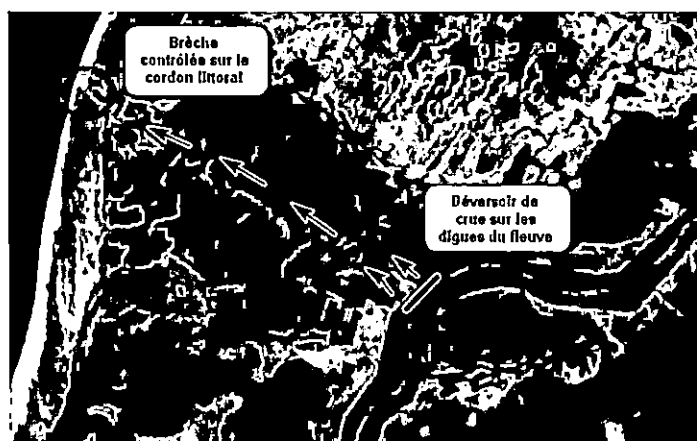
Les impacts du scénario 4 suivent la même logique que pour le scénario 2-1 avec toutefois des effets plus marqués sur les niveaux d'eau liés au positionnement plus efficace de la brèche contrôlée.

La mise en place d'une brèche contrôlée de longueur 1500 m permet de diminuer les hauteurs d'inondation d'une crue centennale sur les communes du delta. Pour l'Horizon 2100, la montée du niveau marin à une cote de 1.80 mIGN limite l'intérêt de cette brèche. La configuration de l'embouchure à Degounaye couplée avec la brèche présente les meilleurs résultats.

10.2 Scénario 4-1 : Tests complémentaires sur le Site 3

Une variante est étudiée et consiste en la mise en œuvre d'un déversoir sur les digues du Sénégal dont l'objectif est de mieux alimenter la brèche contrôlée localisée sur le site n°3.

La mise en place des digues du barrage de Diama au cours du XX^{ème} siècle a réduit les débordements en direction de la Mauritanie. Une partie des débits de crue a donc été transféré vers Saint-Louis et le territoire sénégalais. Ce type d'ouvrage aurait pu être mis en place à l'époque de la construction du barrage en tant que mesure compensatoire, ce qui aurait permis de limiter son impact sur les inondations.



Les hypothèses retenues sont les suivantes :

- Evènement centennal – Horizon 2050
- Embouchure à Degounaye
- Débit déversé en amont de Diama : 1280 m³/s,
- Débit restant dans le fleuve : 2100 m³/s.
- Brèche contrôlée de longueur 1500 m sur le cordon littoral.

Figure 10-10 : Déversoir de crue en rive droite sur les digues du fleuve Sénégal

Le cordon littoral étant très large sur ce secteur, il est nécessaire de surcreuser le cordon sur une certaine largeur afin de faciliter l'alimentation de la brèche lors des épisodes de crue. Deux largeurs de chenal de traversée sont testées : 500 m et 1500 m.

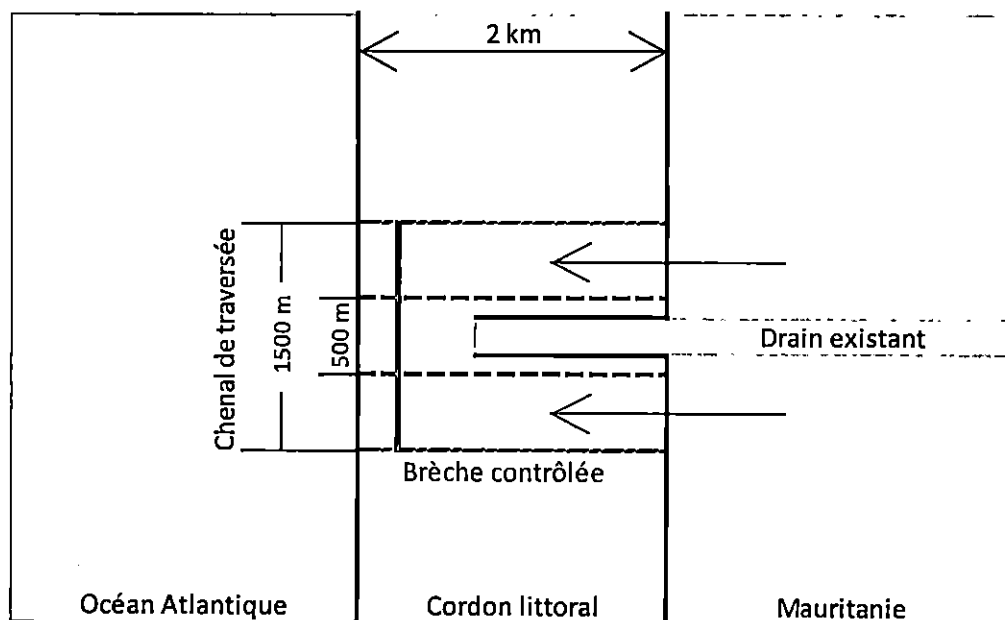


Figure 10-11 : Schéma de principe du surcreusement du cordon littoral au Site 3

10.2.1 Impact sur la dynamique côtière

Il est attendu sur la base des modélisations d'un tel déversoir dans le cadre du scénario 2 (8.2.2) que celui-ci aura une influence limitée sur le développement du littoral à long terme. Il est important de noter qu'on ne peut pas exclure que les vitesses d'écoulement relativement élevées puissent entraîner l'affouillement (*scour*) à l'interface des protections et/ou des barrages d'une part et les fonds marins et la plage de sable d'autre part.

Dans le cas le plus pessimiste, le site choisi pourrait devenir la nouvelle embouchure dominante du fleuve Sénégal, et avec le temps migrer vers le sud, vers Saint-Louis. Cela entraînera une forte érosion et la destruction de Saint-Louis.

10.2.2 Impact sur le risque d'inondation

A l'horizon 2050

Les aménagements testés permettent une forte amélioration de l'alimentation de la brèche contrôlée localisée sur le site n°3 (1044 à 1148 m³/s, au lieu de 420 m³/s).

Ceci se traduit par un abaissement des cotes d'inondation au droit de Saint-Louis. Pour une crue centennale les abaissements constatés en comparaison du scénario 2 de base sont les suivants :

- -0.38 m pour un chenal de largeur 500m, cote à Saint-Louis de 1.52 mIGN,
- -0.41 m pour un chenal de largeur 1500m, cote à Saint-Louis de 1.49 mIGN,

Les deux configurations testées permettent de respecter les objectifs de protection de Saint-Louis (cote inférieure à 1.5 mIGN). Elles montrent des résultats meilleurs que la brèche contrôlée proposée au scénario 2-1, avec un abaissement de -20 cm à -23 cm au pont Faidherbe pour une crue centennale à l'horizon 2050 en fonction de la largeur du chenal, et que pour le scénario 4 avec une brèche contrôlée de 1500 m au site 1 (respectivement -5 et -8 cm au pont Faidherbe).

L'élargissement à 1500m du chenal d'alimentation de la brèche contrôlée, n'apporte pas une amélioration significative des cotes d'inondation à St Louis (-3 cm).

Tableau 10-5 : Impact du scénario 4-1 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis – Horizon 2050

Période de retour (ans)	Configuration de brèche	Débit déversé Brèche contrôlée (m³/s)	Cote max S3 (mIGN)	Cote max Dama (mIGN)	Cote max S 2 (mIGN)	Cote max S 1 (mIGN)	Cote max amont Saint-Louis (mIGN)	Cote max Saint-Louis (Faidherbe) (mIGN)	Cote max aval Saint-Louis (mIGN)
100	Site 3 – Brèche 1500 m – Chenal 500m	1044	1.82	1.84	1.78	1.69	1.55	1.52	1.46
100	Site 3 – Brèche 1500 m – Chenal 1500m	1148	1.72	1.81	1.74	1.66	1.52	1.49	1.44

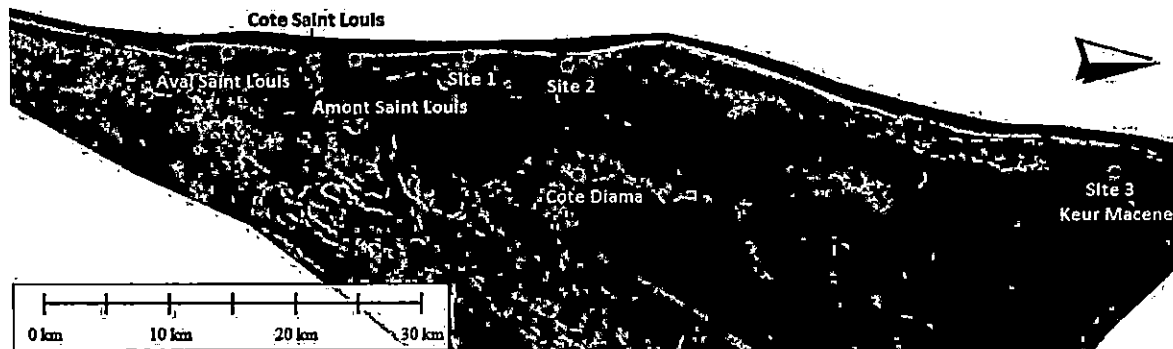


Figure 10-12 : Scénario 4-1 : Localisation des points de contrôle et des sites de surverse sur le cordon

Le principal inconvénient de cette variante est que les déversements du seuil situé sur les digues du fleuve affecteront les périmètres irrigués existants en Mauritanie, le parc du Diawling et le port de N'Diogo. Ceci induit une faisabilité de l'aménagement probablement très faible.

Le positionnement de l'ouvrage sur le territoire mauritanien peut également poser question sur la gestion ultérieure de l'ouvrage.

A l'horizon 2100

A l'horizon 2100, l'intérêt de la brèche contrôlée n'est plus sensible. Avec la montée des eaux liée au changement climatique, la ville de Saint-Louis est à nouveau confrontée à de fortes inondations pour des crues très fréquentes du fleuve.

10.3 Evaluation du scénario

10.3.1.1 Du point de vue de l'évolution hydrodynamique et morphodynamique

Le scénario 4 correspond à une dérivation partielle du fleuve Sénégal au nord de Saint-Louis. Trois positionnement d'ouvrages, de type brèche contrôlée, ont été étudiées.

La dérivation partielle du fleuve Sénégal pourrait créer de forts changements dans le fonctionnement du bas-delta du fleuve et donc affecter fortement la stabilité du cordon littoral.

Dans le cas le plus optimiste, ce scénario fonctionnera comme prévu et créera une dérivation partielle du débit du fleuve. Il est attendu sur la base des modélisations d'un tel déversoir dans le cadre du scénario 2 (8.2.2) que celui-ci aura une influence limitée sur le développement du littoral à long terme. Il est important de noter qu'on ne peut pas exclure que les vitesses d'écoulement relativement élevées puissent entraîner l'affouillement (*scour*) à l'interface des protections et/ou des barrages d'une part et les fonds marins et la plage de sable d'autre part.

Dans le cas le plus pessimiste, le site choisi pourrait devenir la nouvelle embouchure dominante du fleuve Sénégal, et avec le temps migrer vers le sud, vers Saint-Louis. Cela entraînera une forte érosion et la destruction de Saint-Louis.

Concernant le risque d'inondation, le site 1 est le plus efficace hydrauliquement. Il permet la plus grande réduction des niveaux d'inondation de la ville de Saint-Louis. En revanche, en termes de stabilité du cordon côtier, cette position présente le risque le plus élevé des trois options, vu sa proximité avec la ville.

10.3.1.2 Du point de vue des risques d'inondation induits par les crues du fleuve

Les modélisations mettent en évidence que pour les trois sites étudiés les déversements contrôlés du fleuve en crue permettent de limiter les hauteurs de submersion sans pour autant éviter les inondations de la ville de Saint-Louis.

A l'horizon 2050, dans le cadre du scénario de base, la ville de Saint-Louis est protégée jusqu'à une crue trentennale pour une position de brèche sur le site 1 et une longueur de 1500 m. Ce niveau de protection est porté à 100 ans dans le cas de la variante 4-1.

A l'horizon 2100, quel que soit le scénario étudié, du fait de la montée des eaux liée au changement climatique, la ville de Saint-Louis est exposée à un risque très fort d'inondation pour des crues courantes du fleuve.

La mise en œuvre d'une dérivation partielle au nord de Saint-Louis n'a donc un intérêt que jusqu'à l'horizon 2050.

11. Impact des scénarios d'aménagement sur le barrage de Diama

Le modèle utilisé correspond à la zone intra-digue comprise entre le barrage de Diama et Richard Toll. Les éléments suivants sont intégrés dans le modèle :

- La bathymétrie levée en Novembre 2019 correspond uniquement au lit mineur du fleuve. La partie du lit comprise entre les rives du fleuve et les endiguements n'a pas été levée du fait de l'encombrement par les Thyphas. Les profils ont donc été extrapolés sur cette zone. **De ce fait, le niveau d'envasement de la retenue du barrage n'est pas connu avec précision.**
- La condition limite aval est définie dans le « *Manuel de Gestion du Barrage de Diama* » (IRD, Octobre 2001). Ce manuel définit les consignes d'exploitation permettant d'atteindre les objectifs de gestion (maintien d'un plan d'eau amont élevé le plus longtemps possible hors période de crue), et définit la position des vannes du barrage en fonction des débits pour respecter les règles de sécurité imposées par le constructeur du barrage. Le manuel définit également les pertes de charge pour les fortes crues (> 1850 m³/s) pour lesquelles la totalité des vannes sont ouvertes.

Le modèle a été calé sur la crue de 1999, à partir des enregistrements réalisés lors de cette crue aux stations de Diama, Rosso et Richard Toll,

L'impact des scénarios 1, 2 et 3 a été testé sur le fonctionnement du barrage en amont de Diama pour un **débit centennal**.

A l'Horizon 2050 :

- **Scénario 1 et scénario 2** : des points de faiblesse sont observés sur la rive droite du fleuve coté mauritanien : sur certains secteurs la digue est submergée par une lame d'eau d'une vingtaine de cm. Il n'existe pas de points de faiblesse coté Sénégal.
- **Scénario 3** : les niveaux de crue arrivent en limite de la crête des digues en rive droite. Il n'existe pas de revanche de sécurité par rapport à la crue centennale coté mauritanien. L'altimétrie des digues est suffisante coté sénégalais.

A l'Horizon 2100 :

- La diminution des débits du fleuve amène la ligne d'eau à une cote inférieure aux deux digues, pour tous les scénarios.

Ces résultats montrent le lien existant entre les choix d'aménagement qui seront faits pour la brèche de Saint-Louis et le fonctionnement du barrage de Diama. Ils illustrent également l'impact du changement climatique sur les sécurités existantes pour les digues du fleuve :

- A l'horizon 2050, selon les scénarios retenus, des points de faiblesse et donc des risques de rupture des digues coté Mauritanien existent. Si des brèches se formaient en rive droite du barrage de Diama, la capacité de stockage du barrage de Diama serait fortement réduite. Les impacts seraient très fort sur l'ensemble des périmètres irrigués Mauritaniens et Sénégalais.
- A l'horizon 2100 ces risques sont largement atténués.

Il convient de préciser que les débordements par-dessus les digues du fleuve n'ont pas été représentés dans le modèle d'inondation.

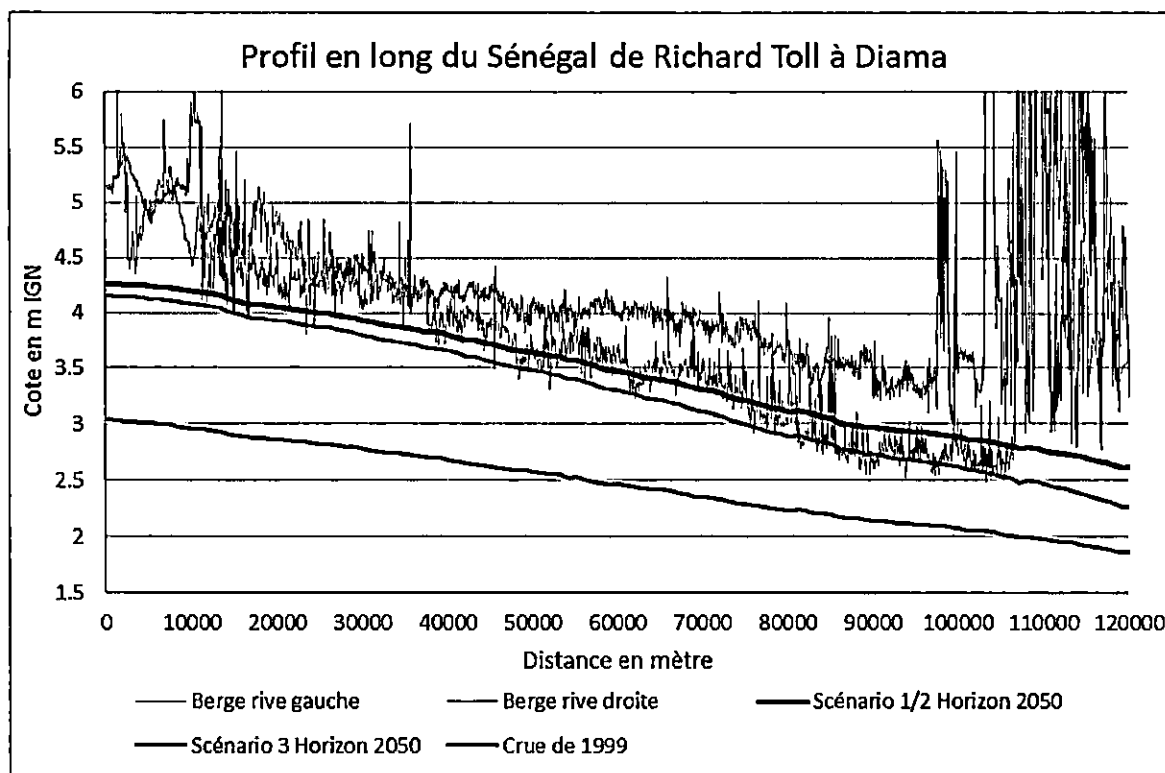


Figure 11-1 : Horizon 2050 – Impact des scénarios 1, 2 et 3 entre Richard Toll et Diama –Crue centennale

Les résultats présentés restent entachés d'une forte incertitude. La bathymétrie dans l'emprise du barrage a été interpolée entre le lit mineur et les endiguements du fait de la présence des thyphas ce qui peut impacter les niveaux de crue calculés.

Etant donnés, les enjeux mis en évidence, il serait nécessaire de réaliser un levé bathymétrique global de toute la zone de retenue de Diama permettant d'affiner la modélisation mise en œuvre dans le cadre de cette étude.

La problématique d'érosion de la crête de la digue coté Mauritanien a été prise en compte par l'OMVS dans le cadre de l'étude « Etude de réparation et de consolidation des endiguements en rive droite et gauche du fleuve Sénégal de Diama à Rosso » réalisée en 2018. Cette étude confirme :

- Des pertes de hauteur de la digue rive droite par rapport aux cotes initiales des digues au moment de leur construction (érosions liées à la circulation routière et au vent),
- Des risques de débordement et/ou rupture pour une crue centennale sur la quasi-totalité de la digue principale coté Mauritanien.

Notre étude conforte donc ce diagnostic.

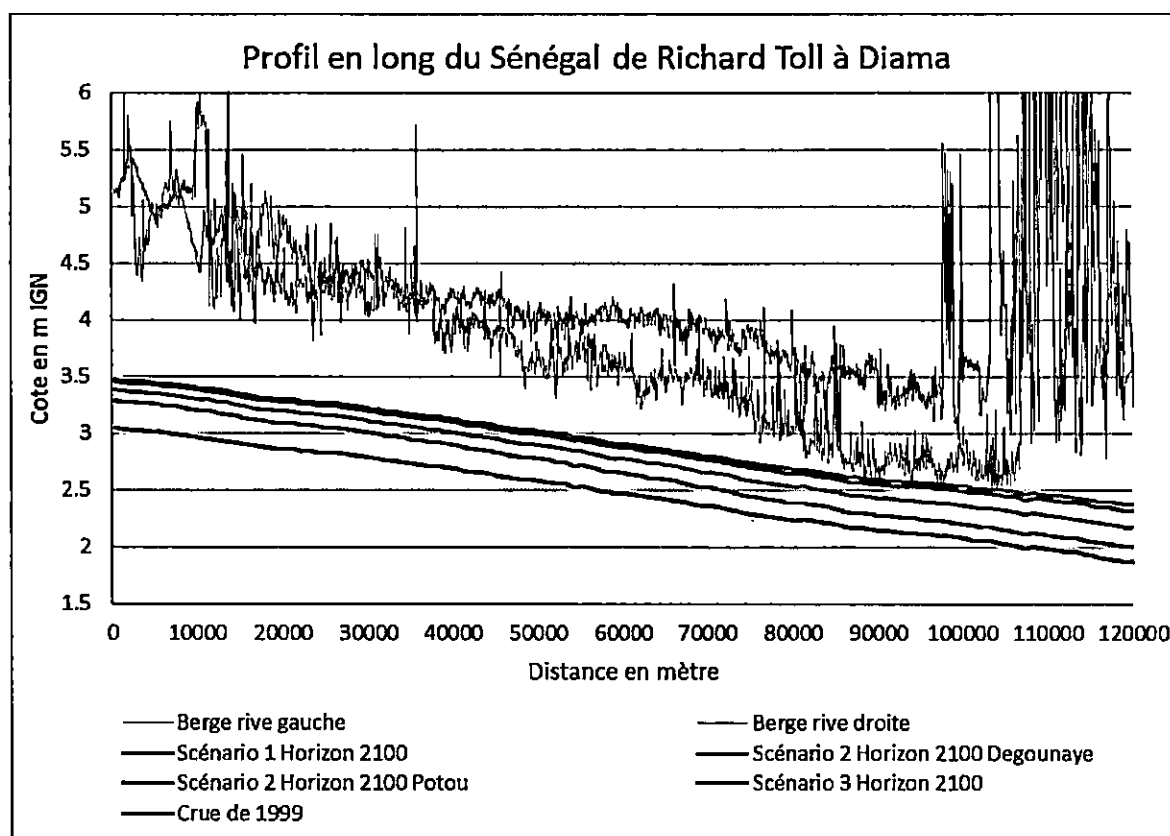


Figure 11-2 : Horizon 2100 – Impact des scénarios 1, 2 et 3 entre Richard Toll et Diama

12. Scénarios complémentaires : Espace pour le fleuve

Il a été étudié deux scénarios complémentaires portant sur des solutions plus globales pour la protection de la ville de Saint-Louis, à l'échelle du delta du fleuve Sénégal :

- **Scénario R-1** : Création de déversoirs de crue sur la partie endiguée du fleuve en amont de Diama en particulier sur la rive gauche côté Sénégal,
- **Scénario R-2** : Augmenter la capacité de stockage en amont du barrage de Diama pour écrêter les crues du fleuve, soit par surélévation de la retenue actuelle du barrage de Diama, soit par une suralimentation du Lac de Guiers.

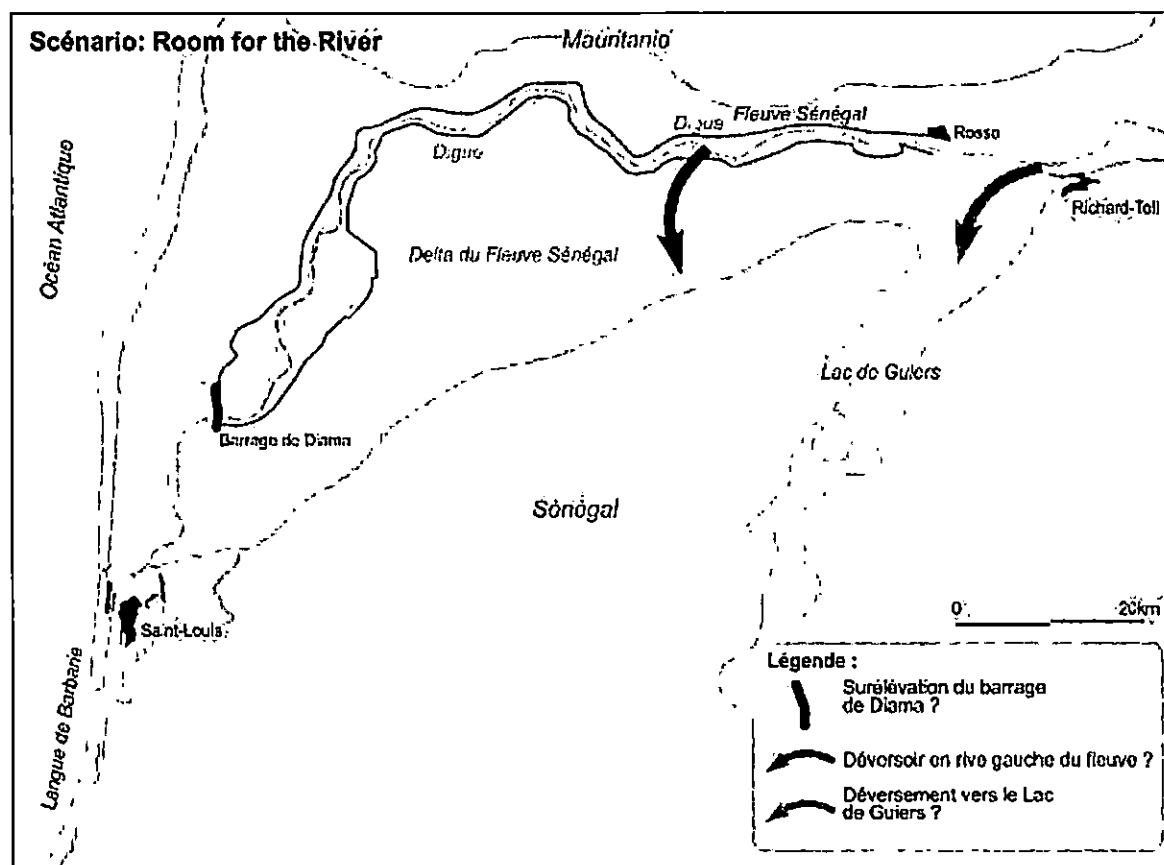


Figure 12-1 : Scénario « Espace pour le fleuve »

12.1 Résultats du scénario R-1

Le déversoir a été localisé en rive gauche du fleuve, coté sénégalais, et positionné dans un coude du fleuve permettant d'alimenter au maximum le lit majeur rive gauche du fleuve. Un débit maximal de 1285 m³/s est dévié à l'Horizon 2050, permettant de rabaisser le débit maximal en sortie de Diama à 2100 m³/s. L'impact de cet aménagement a été étudié pour les scénarios 1 (pas d'intervention) et 2-1 (brèche contrôlée au sud de Saint-Louis).

Tableau 12-1 : Impact du scénario R-1 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis – Horizon 2050

Période de retour (ans)	Configuration embouchure	Cote max S3 (mIGN)	Cote max Diama (mIGN)	Cote max S 2 (mIGN)	Cote max S 1 (mIGN)	Cote max amont Saint-Louis (mIGN)	Cote max Saint-Louis (Faidherbe) (mIGN)	Cote max aval Saint-Louis (mIGN)
100	Scénario 1	2.17	2.26	2.22	2.18	2.10	2.07	2.01
100	Scénario 2-1	2.12	2.17	2.12	2.08	1.94	1.88	1.77

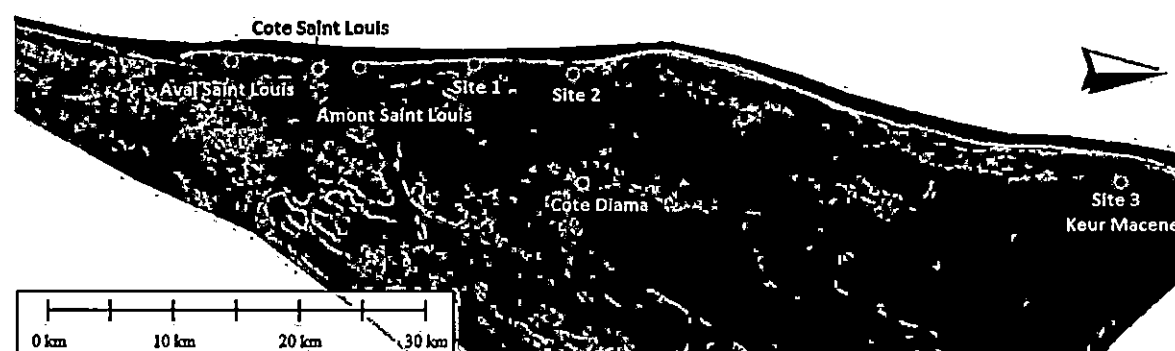


Figure 12-2 : Scénario R-1 : Localisation des points de contrôle et des sites de surverse sur le cordon

L'analyse des résultats montre que :

- Les déversements en amont de Diama n'apportent aucune amélioration notable des niveaux d'inondation sur la ville de Saint-Louis. Dans la configuration actuelle, l'impact est nul ; pour le scénario 2-1, la cote d'inondation à Saint-Louis ne baisse que de 4 cm.
- Les impacts sur les périmètres irrigués en rive gauche du fleuve sont très forts : submersion pendant une durée supérieure à 100 jours ce qui met en péril les cultures de la zone.

Tableau 12-2 : Comparaison des impacts des scénario 1, 2-1 et R-1 sur le risque d'inondation sur Saint-Louis – Horizon 2050

Période de retour (ans)	Configuration embouchure	Déversoir digue rive gauche	Cote max Diama (mIGN)	Cote max Saint-Louis (Faidherbe) (mIGN)
100	Scénario 1	Non	2.34	2.07
		Oui	2.26	2.07
	Scénario 2-1	Non	2.30	1.92
		Oui	2.17	1.88

Ce type de solution ne peut être retenu sur la zone d'étude.



Figure 12-3 : Cotes d'eau maximales – Scénario R-1 – Horizon 2050 – Q100 – Delta du fleuve

12.2 Résultats du scénario R-2

12.2.1 Augmentation de la capacité de stockage dans la retenue de Diama

L'objectif du scénario d'aménagement est d'optimiser au maximum le stockage dans la retenue du barrage de Diama. Les hypothèses retenues pour la modélisation sont les suivantes :

- Surface de la zone intra-digue entre Diama et Richard Toll : 387 km²,
- Volume supplémentaire pour une hauteur de stockage augmentée de 0.50m : 195 Millions de m³.
Ce volume supplémentaire est maximum, au-delà les endiguements existants sont insuffisants.
- Volume de la crue de 1999 : 17.4 Milliards de m³,
- Impact sur la crue de 1999 : diminution de 5.3 % du débit de pointe.

La diminution observée sur le débit de pointe de la crue de 1999 ne permet pas d'éviter les débordements du fleuve sur la ville de Saint-Louis.

Pour des crues plus fortes il n'est pas possible d'augmenter le stockage dans la retenue : les digues du côté mauritanien sont déjà en limite de surverse pour une crue centennale par exemple.

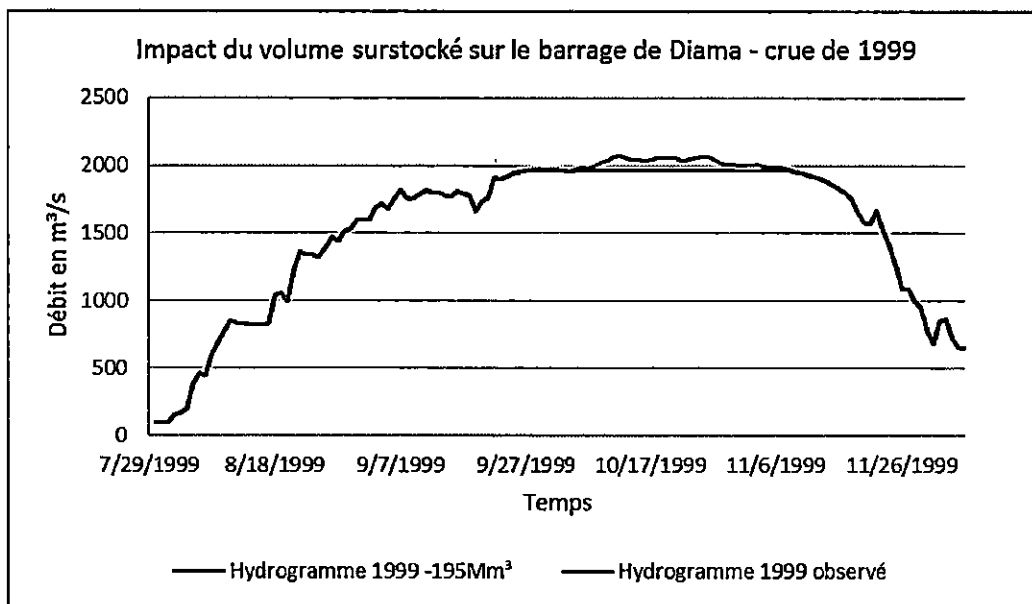


Figure 12-4 : Impact du surstockage sur le barrage de Diama – crue de 1999

12.2.2 Augmentation de la capacité de stockage dans la retenue du lac de Guiers

L'objectif de ce scénario d'aménagement est d'optimiser au maximum le stockage de la crue du fleuve par une suralimentation du lac de Guiers. Les hypothèses retenues pour la modélisation sont les suivantes :

- Surface de la retenue du lac de Guiers : 270 km²,
- Volume supplémentaire pour une hauteur de stockage augmentée de 1 m : 270 Millions de m³. Ce volume supplémentaire correspond à une cote de 3 m IGN dans le lac de Guiers qui est la cote maximale d'alimentation de la retenue à Richard Toll pour la crue de 1999.
- Volume de la crue de 1999 : 17.4 Milliards de m³
- Impact sur la crue de 1999 : diminution de 6.3 % du débit de pointe.

La diminution observée sur le débit de pointe de la crue de 1999 ne permet pas d'éviter les débordements du fleuve sur la ville de Saint-Louis.

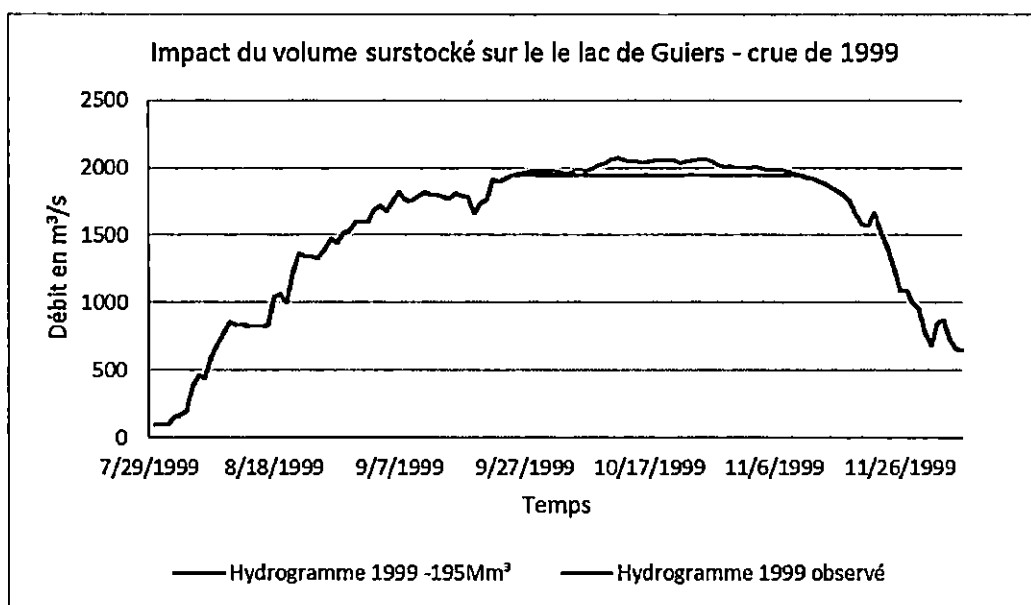


Figure 12-5 : Impact du surstockage sur le lac de Guiers – crue de 1999

Dans le cas d'un cumul stockage en amont de Diama et dans le lac de Guiers, sous les mêmes conditions, le débit du fleuve est atténué de 8.5%, ce qui ne modifie pas de manière significative la ligne d'eau.

12.2.3 Conclusion

Les solutions de stockage étudiées dans la retenue de Dama et dans le lac de Guiers ne permettent pas de diminuer de manière sensible les débits de pointe du fleuve Sénégal pour des crues fréquentes de type 1999.

Pour des crues plus fortes ces volumes de stockage supplémentaires ne sont pas suffisants. A l'horizon 2050, pour limiter le débit centennal du fleuve à 2000 m³/s à l'aval de Dama, il serait nécessaire de stocker un volume de 6.180 milliards de m³. Dans l'absolu cela reviendrait à surélever les digues du fleuve de 16 m de haut.

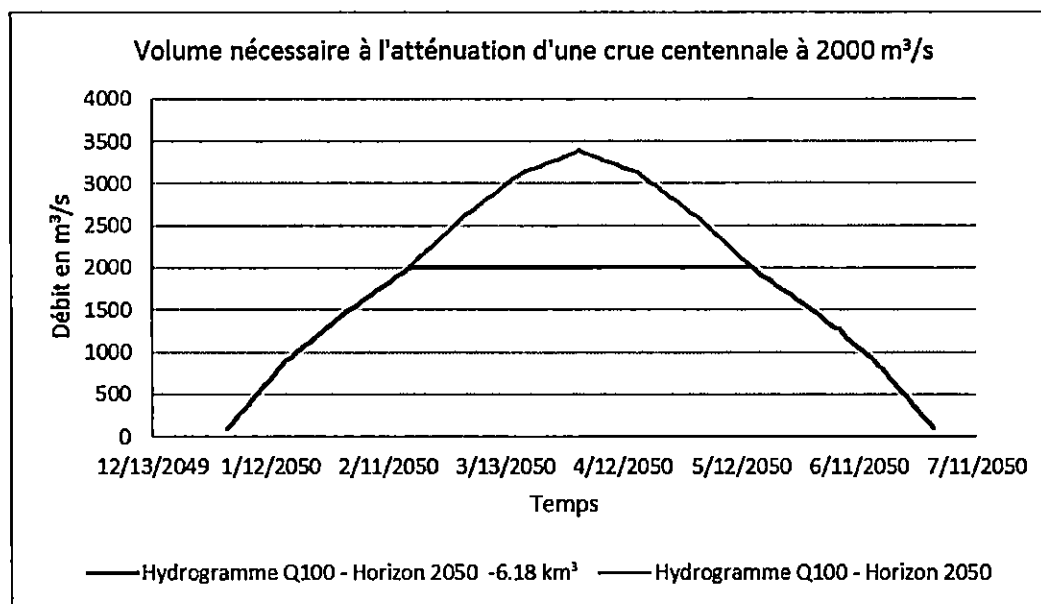


Figure 12-4 : Volume nécessaire à l'atténuation d'une Q100 Horizon 2050 à un débit de 2000 m³/s

13. Références bibliographiques

Brun, P. (1962). Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion. American Society of Civil Engineers Journal of the Waterways and Harbours Division. **88**: 117–130.

Deltares, 2014a. Delft3D-WAVE. Simulation of short-crested waves with SWAN. User manual, version: 3.05.34160. https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/Delft3D-WAVE_User_Manual.pdf 2019-07-11.

Deltares, 2014b. Delft3D-FLOW. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User manual, version 3.15.34158. http://oss.deltares.nl/documents/183920/185723/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf?version=1.0 2019-07-11.

Hemer M., Fan Y., Mori N., Semedo A., Wang X., 2013. Projected changes wave climate from a multi-model ensemble. Nature Climate Change. 10.1038/NCLIMATE1791

Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R., Lescinski, J., 2009. Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. Coast. Eng. 56, 1133–1152. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>

Roelvink, D., Huisman, B., Elghandour, A., Ghonim, M. Reynolds, J., 2019. Efficient modelling of complex coastal evolution at monthly to century time scales. Under review, International Journal of Sediment Research, Elsevier.

ANNEXES

Annexe 1 : Vue d'ensemble des simulations numériques

Simulations – évolution morphologiques à court terme

D3D sim nr	Configuration morphologique	Période de simulation	Temps de calcul [heures]
1	2019 scenario 1	5 ans	27
2	2019 scenario 1	1 semaine	2.3
3	2019 scenario 3	5 ans	65
4	2019 scenario 3	1 semaine	5.6
5	2019 scenario 3 – variante 1	5 ans	65
6	2019 scenario 3 – variante 1	1 semaine	5.6
7	2019 scenario 3 – variante 2	5 ans	65
8	2019 scenario 3 – variante 2	1 semaine	5.6
9	2019 scenario 3 – variante 3	5 ans	65
10	2019 scenario 3 – variante 4	1 semaine	5.6
11	2019 scenario 3 – bypassing 1	5 ans	65
12	2019 scenario 3 – bypassing 2	5 ans	65
13	2019 scenario 3 – bypassing 3	5 ans	65
14	2019 scenario 3 – bypassing 4	5 ans	65
15	2000 1 10 morstat 1yr nowaves	1 an	1.5
16	2000 1 100 morstat 1yr nowaves	1 an	1.5
17	2000 1 10 morstat 1yr nowaves deversoir 1500m	1 an	1.5
18	2000 1 100 morstat 1yr nowaves deversoir 1500m	1 an	1.5
19	2004 1 10 morstat 1yr nowaves deversoir 1500m	1 an	1.5
20	2004 1 100 morstat 1yr nowaves deversoir 1500m	1 an	1.5
21	2009 1 10 morstat 1yr nowaves deversoir 1500m	1 an	1.5
22	2009 1 100 morstat 1yr nowaves deversoir 1500m	1 an	1.5
23	2019 1 10 morstat 1yr nowaves deversoir 1500m	1 an	1.5
24	2019 1 100 morstat 1yr nowaves deversoir 1500m	1 an	1.5
25	2040 1 10 morstat 1yr nowaves deversoir 1500m	1 an	1.5
26	2040 1 100 morstat 1yr nowaves deversoir 1500m	1 an	1.5
27	2000 déversoir, largeur = 1500m $T_p = 1/10$	5 ans	6.3
28	2000 déversoir, largeur = 1500m $T_p = 1/100$	5 ans	6.3
29	2019 scenario 3 – 2 fractions de sédiment	5 ans	65
30	2040 scenario 3 – 2 fractions de sédiment	5 ans	65
31	2019 scenario 3 – 2 fractions de sediment – dragage	5 ans	27

Simulations – évolution morphologiques à long terme

Tableau 13-1 : Le climat des vagues est schématisé dans une direction moyenne de 310° N, une hauteur de houle significative Hs de 1,4 m et un étalement uniforme de 60°.

ShorelineS sim nr.	Niveau de la mer	Configuration morphologique	Autre	Temps de calcul
1	actuelle	Projet Tortue	-	~4 heures
2	actuelle	Protection Saint-Louis	permettant passage de 50% du transport littoral	~4 heures
3	actuelle	Protection Saint-Louis	permettant passage de 70% du transport littoral	~4 heures
4	Montant jusqu'à 2050 selon RCP 8.5	Scenario 1	-	~4 heures
5	actuelle	Scenario 1	-	~4 heures
6	actuelle	Scenario 3	Sans by-pass	~4 heures
7	actuelle	Scenario 3	Avec by-pass	~4 heures

Simulations – Intrusion saline

FM sim nr.	Niveau de la mer	Configuration morphologique	Débit du fleuve	Période de simulation [h]	Temp de calcul [h]
Ref. – faible débit	+ 0 cm	2019	faible (148 m ³ /s moyen saison sèche)	2328	69.37
Ref. - débit élevé	+ 0 cm	2019	élevé (~1126 m ³ /s moyen saison de pluies)	2328	72.84
Ref. – faible débit + 19 cm	+ 19 cm	2019	faible (148 m ³ /s moyen saison sèche)	2328	70.75
Ref. - débit élevé + 19 cm	+ 19 cm	2019	élevé (~1126 m ³ /s moyen saison de pluies)	2328	72.96
Ref. – faible débit + 66 cm	+ 66 cm	2019	faible (148 m ³ /s moyen saison sèche)	2328	70.37
Ref. - débit élevé + 66 cm	+ 66 cm	2019	élevé (~1126 m ³ /s moyen saison de pluies)	2328	73.37
Port – faible débit	+ 0 cm	2019 incl. port	faible (148 m ³ /s moyen saison sèche)	2328	69.17
Port - débit élevé	+ 0 cm	2019 incl. port	élevé (~1126 m ³ /s moyen saison de pluies)	2328	72.43
Port – faible débit + 19 cm	+ 19 cm	2019 incl. port	faible (148 m ³ /s moyen saison sèche)	2328	70.57
Port - débit élevé + 19 cm	+ 19 cm	2019 incl. port	élevé (~1126 m ³ /s moyen saison de pluies)	2328	72.77
Port – faible débit + 66 cm	+ 66 cm	2019 incl. port	faible (148 m ³ /s moyen saison sèche)	2328	70.12
Port - débit élevé + 66 cm	+ 66 cm	2019 incl. port	élevé (~1126 m ³ /s moyen saison de pluies)	2328	73.21
Bathy 2040 – faible débit	+ 0 cm	2040 (Shorelines output)	faible (148 m ³ /s moyen saison sèche)	2328	71.45
Bathy 2040 – débit élevé	+ 0 cm	2040 (Shorelines output)	élevé (~1126 m ³ /s moyen saison de pluies)	2328	74.14

Simulations – impact des tempêtes

XBeach sim nr.	Conditions des vagues	Niveau de la mer	Configuration morphologique	Niveau d'eau du fleuve (m)	Temps de calcul
1	Période de retour : 1/1	actuelle	Zone au nord de Saint-Louis	1 m	5 heures
2	Période de retour : 1/10	actuelle	Zone au nord de Saint-Louis	1 m	5 heures
3	Période de retour : 1/100	actuelle	Zone au nord de Saint-Louis	1 m	5 heures
4	Période de retour : 1/1	actuelle	Zone au sud de Saint-Louis	1 m	5 heures
5	Période de retour : 1/10	actuelle	Zone au sud de Saint-Louis	1 m	5 heures
6	Période de retour : 1/100	actuelle	Zone au sud de Saint-Louis	1 m	5 heures
7	Période de retour : 1/1	+ 19 cm	Zone au sud de Saint-Louis	1 m	5 heures
8	Période de retour : 1/10	+ 19 cm	Zone au sud de Saint-Louis	1 m	5 heures
9	Période de retour : 1/100	+ 19 cm	Zone au sud de Saint-Louis	1 m	5 heures
10	Période de retour : 1/1	+ 66 cm	Zone au sud de Saint-Louis	1 m	5 heures
11	Période de retour : 1/10	+ 66 cm	Zone au sud de Saint-Louis	1 m	5 heures
12	Période de retour : 1/100	+ 66 cm	Zone au sud de Saint-Louis	1 m	5 heures
13	Période de retour : 1/100	actuelle	Zone au sud de Saint-Louis	1,6 m	5 heures
14	Période de retour : 1/1	actuelle	Embouchure – scenario 1	1 m	50 heures
15	Période de retour : 1/10	actuelle	Embouchure – scenario 1	1 m	50 heures
16	Période de retour : 1/100	actuelle	Embouchure – scenario 1	1 m	50 heures
17	Période de retour : 1/1	+ 19 cm	Embouchure – scenario 1	1 m	50 heures
18	Période de retour : 1/10	+ 19 cm	Embouchure – scenario 1	1 m	50 heures
19	Période de retour : 1/100	+ 19 cm	Embouchure – scenario 1	1 m	50 heures
20	Période de retour : 1/1	+ 66 cm	Embouchure – scenario 1	1 m	50 heures
21	Période de retour : 1/10	+ 66 cm	Embouchure – scenario 1	1 m	50 heures
22	Période de retour : 1/100	+ 66 cm	Embouchure – scenario 1	1 m	50 heures
23	Moyenné sûr l'année	actuelle	Embouchure – scenario 1	1 m	50 heures

Tableau 13-2 : Les calculs ont été réalisés en MPI sur 8 processeurs.

Simulations – hydraulique fluviale

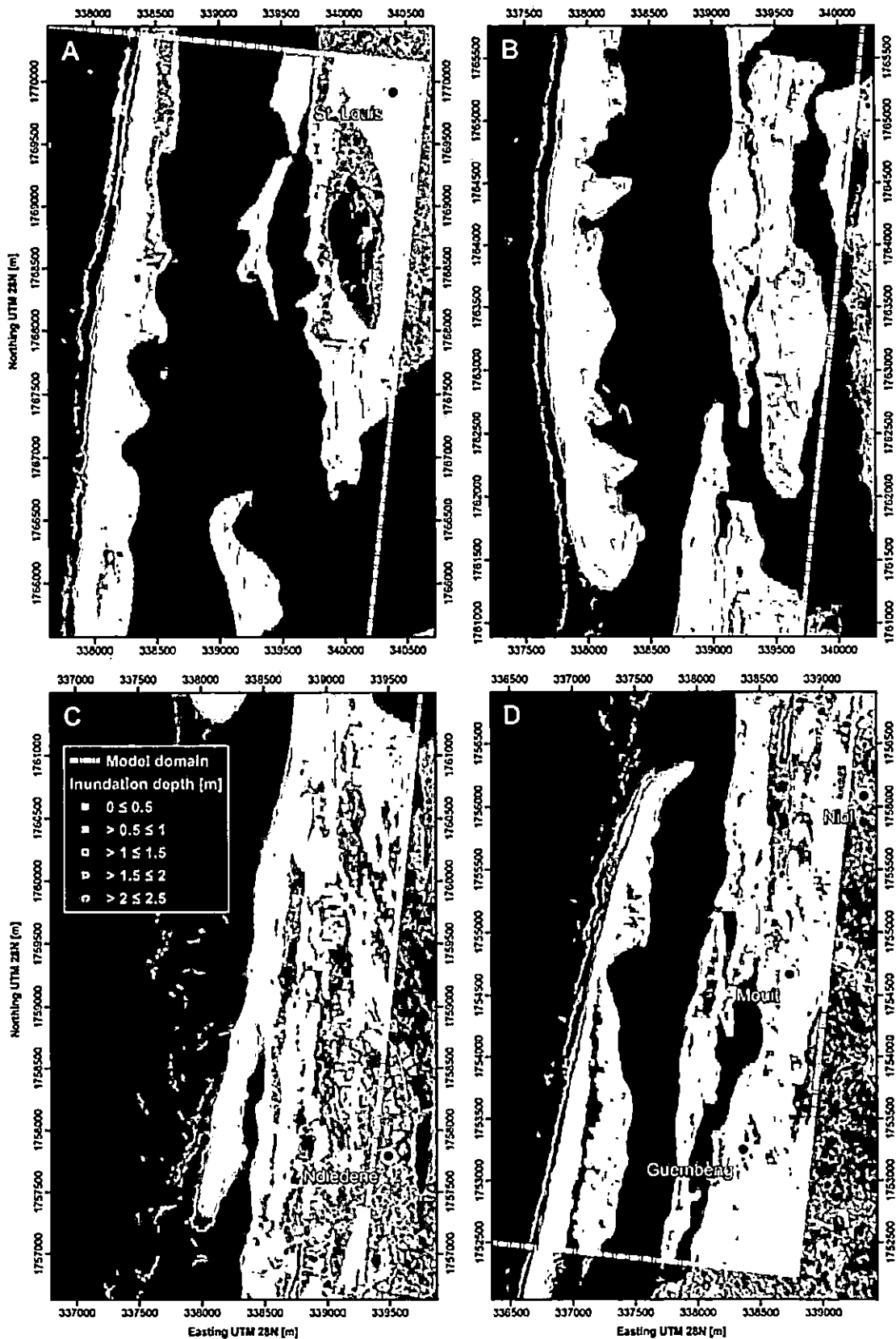
Scénario	Horizon	Condition limite en mer	Position embouchure	Bathymétrie	Cordon littoral	Brèche contrôlée	Période de retour	Débit injecté à Diama																		
Situation actuelle 2019	Actuel (2019)	1.13 mIGN	Position actuelle (2019)	Levés Janvier 2019	Cordon actuel (2019)		2	1944																		
							5	2333																		
							10	2449																		
							30	3060																		
							100	3384																		
			Projet de port	Etude APD de la SOGENAV	Cordon actuel (2019)		2	1944																		
							100	1984																		
							Degounaye	Simulation Delft 3D après saison des pluies	Cordon actuel (2019)		2	1944														
		0.85 mIGN	Position actuelle (2019)	Levés Janvier 2019	Cordon actuel (2019)		100	1984																		
							Projet de port	Etude APD de la SOGENAV	Cordon actuel (2019)		2	1944														
											100	1984														
											Degounaye	Simulation Delft 3D après saison des pluies	Cordon actuel (2019)		2	1944										
							Potou	Levés Juin 2000	Cordon actuel (2019)		100	1984														
			2	1944																						
			100	1984																						
			Sc 1	2050	1.32 mIGN	Degounaye	Simulation Delft 3D après saison des pluies	Cordon actuel (2019)		2	1944															
5	2333																									
10	2449																									
30	3060																									
100	3384																									
100	3384																									
2100	1.45 mIGN	Potou		Levés Juin 2000	Cordon actuel (2019)		2	1476																		
							5	1885																		
							10	2080																		
	30						2263																			
	100						2331																			
	100						2331																			
	1.79 mIGN																									
													1.92 mIGN													

Scénario	Horizon	Condition limite en mer	Position embouchure	Bathymétrie	Cordon littoral	Brèche contrôlée	Période de retour	Débit injecté à Diama
Sc 2	2050	1.32 mIGN	Degounaye	Simulation Delft 3D après saison des pluies	Cordon exhausé		2	1944
							5	2333
							10	2449
							30	3060
							100	3384
	2100	1.79 mIGN	Degounaye	Simulation Delft 3D après saison des pluies	Cordon exhausé		2	1476
							5	1885
							10	2080
							30	2263
							100	2331
			Potou	Levés Juin 2000	Cordon exhausé		2	1476
							5	1885
							10	2080
							30	2263
							100	2331
Sc 2-1	2050	1.32 mIGN	Degounaye	Simulation Delft 3D après saison des pluies	Cordon exhausé	Aval de Saint-Louis 1500 m	10	2449
							30	3060
							100	3384
						Aval de Saint-Louis 3000 m	10	2449
							100	3384
	2100	1.79 mIGN	Degounaye	Simulation Delft 3D après saison des pluies	Cordon exhausé	Aval de Saint-Louis 1500 m	10	2080
							30	2263
							100	2331
						Aval de Saint-Louis 3000 m	10	2080
							100	2331
			Potou	Levés Juin 2000	Cordon exhausé	Aval de Saint-Louis 1500 m	10	2080
							30	2263
							100	2331
Sc 2-3	2050	1.32 mIGN	Potou	Levés Juin 2000 + surcreusement à la cote -7.5 mIGN de Saint-Louis à Potou	Cordon exhausé		2	1944
							10	2449
							30	3060
							100	3384
	2100	1.79 mIGN	Degounaye	Levés Juin 2000 + surcreusement à la cote -7.5 mIGN de Saint-Louis à Potou	Cordon exhausé		2	1476
							10	2080
							30	2263
							100	2331

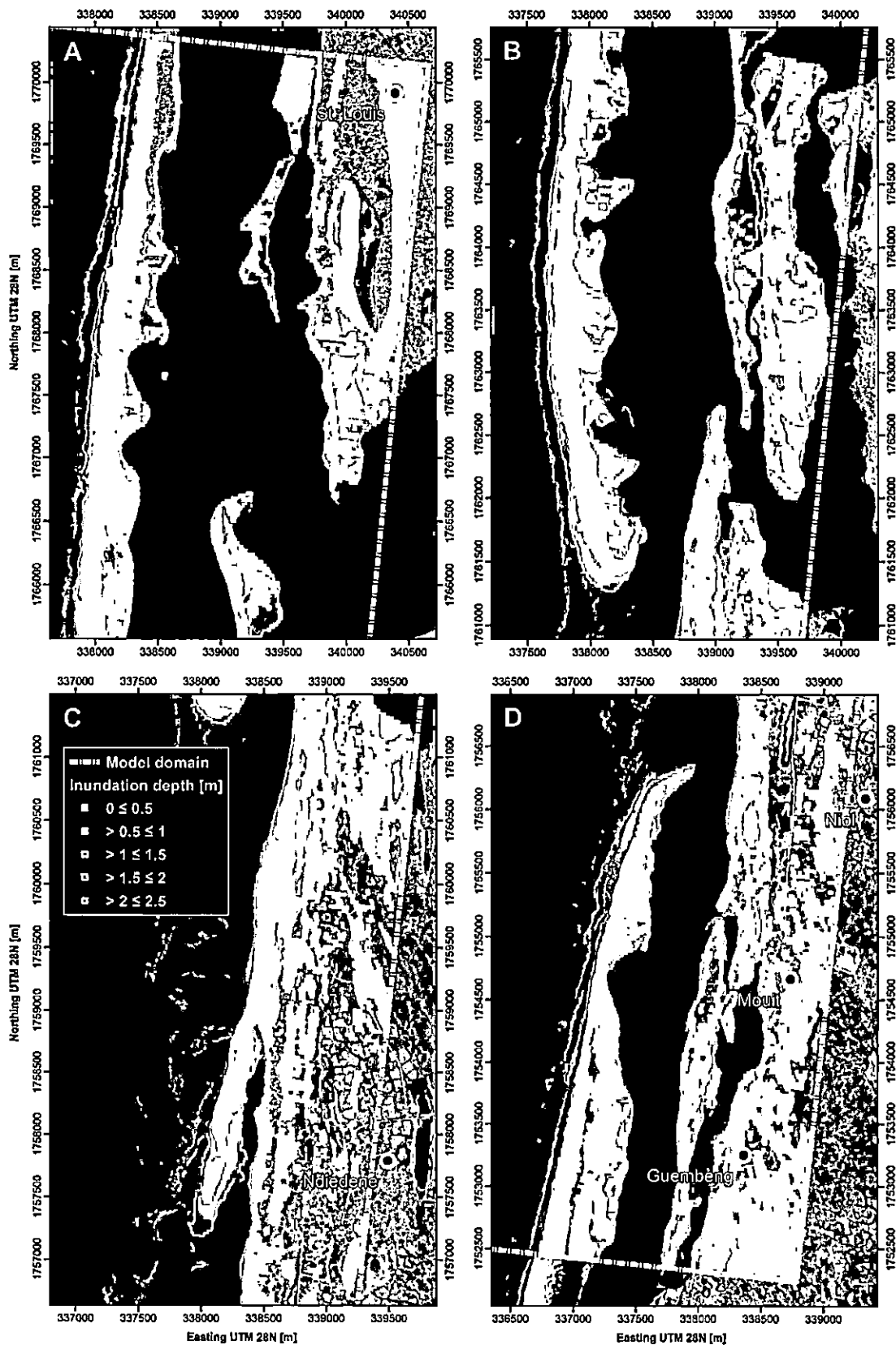
Scénario	Horizon	Condition limite en mer	Position embouchure	Bathymétrie	Cordon littoral	Brèche contrôlée	Période de retour	Débit injecté à Diama					
Sc 3	2050	1.32 mIGN	Projet de port	Etude APD de la SOGENAV	Cordon actuel (2019)		2	1944					
							5	2333					
		10					2449						
		30					3060						
		100					3384						
		100					3384						
	2100	1.79 mIGN	Projet de port	Etude APD de la SOGENAV	Cordon actuel (2019)		2	1476					
							5	1885					
		10					2080						
		30					2263						
		100					2331						
		100					2331						
Sc 4	2050	1.32 mIGN	Degounaye	Simulation Delft 3D après saison des pluies	Cordon exhaussé	Site 1 1500 m	10	2449					
							30	3060					
							100	3384					
						2100	1.79 mIGN	Degounaye	Simulation Delft 3D après saison des pluies	Cordon exhaussé	Site 1 1500 m	100	3384
												100	3384
								Potou		Levés Juin 2000	Cordon exhaussé	Site 1 1500 m	100
	100	2331											
	Sc 4-1	2050	1.32 mIGN	Degounaye	Simulation Delft 3D après saison des pluies	Cordon exhaussé	Site 3 1500 m – Chenal 500 m	100	3384				
							Site 3 1500 m – Chenal 1500 m	100	3384				
	R-1	2050	1.32	Potou	Levés Juin 2000	Cordon exhaussé		100	3384				

Annexe 2 : Cartes des inondations induites par les tempêtes

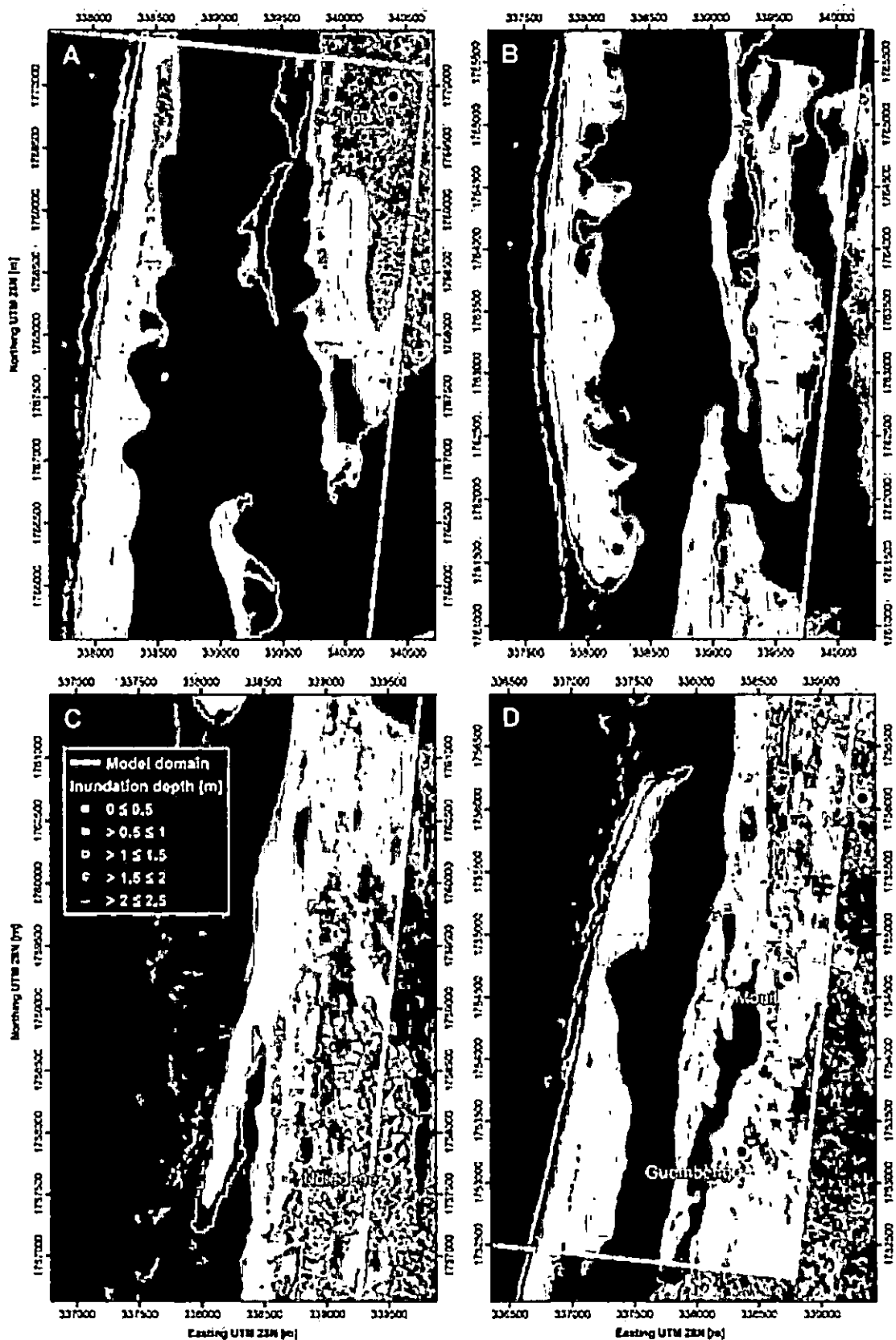
Niveau de la mer actuel – tempête avec période de retour 1 an



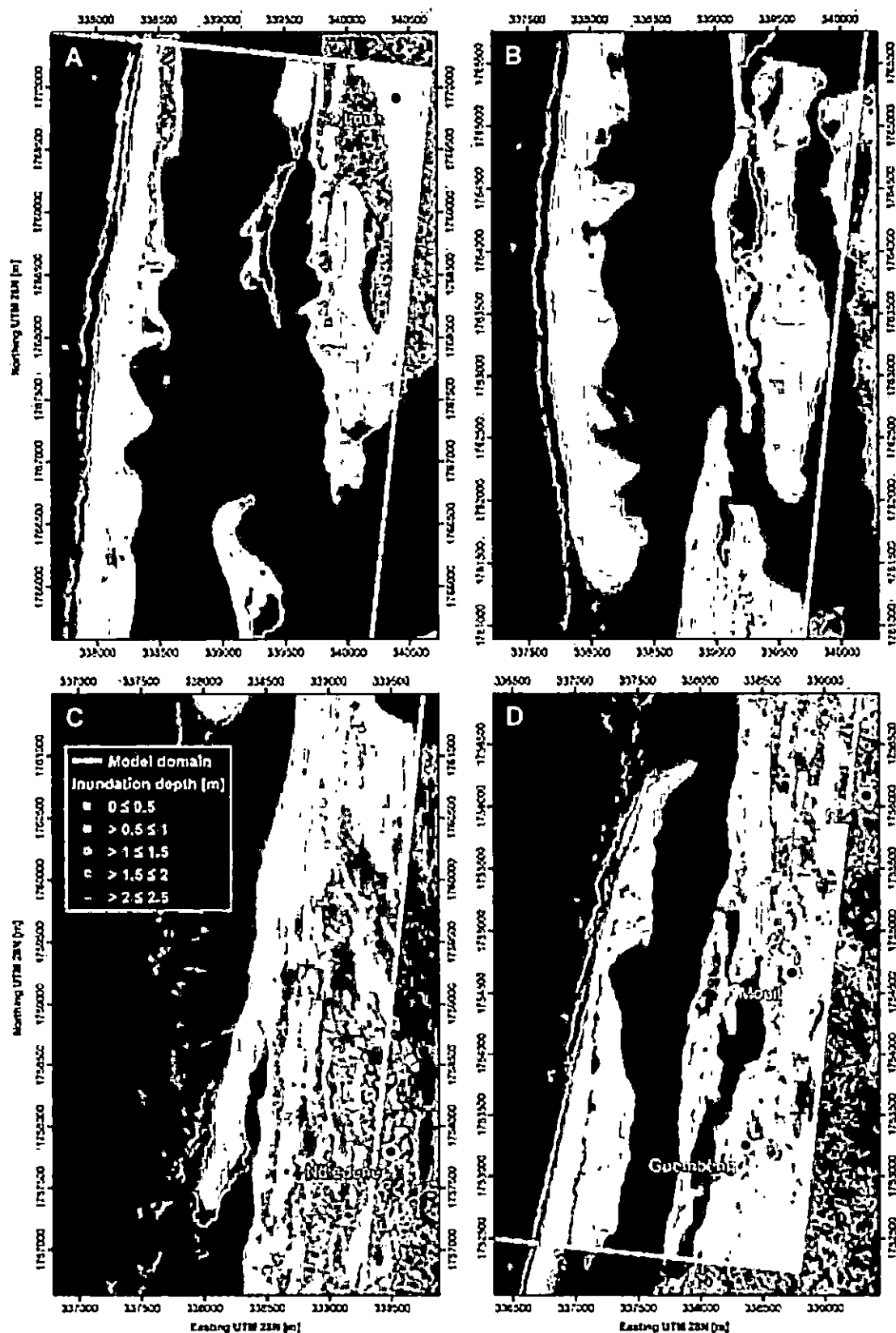
Niveau de la mer actuel – tempête avec période de retour 10 ans



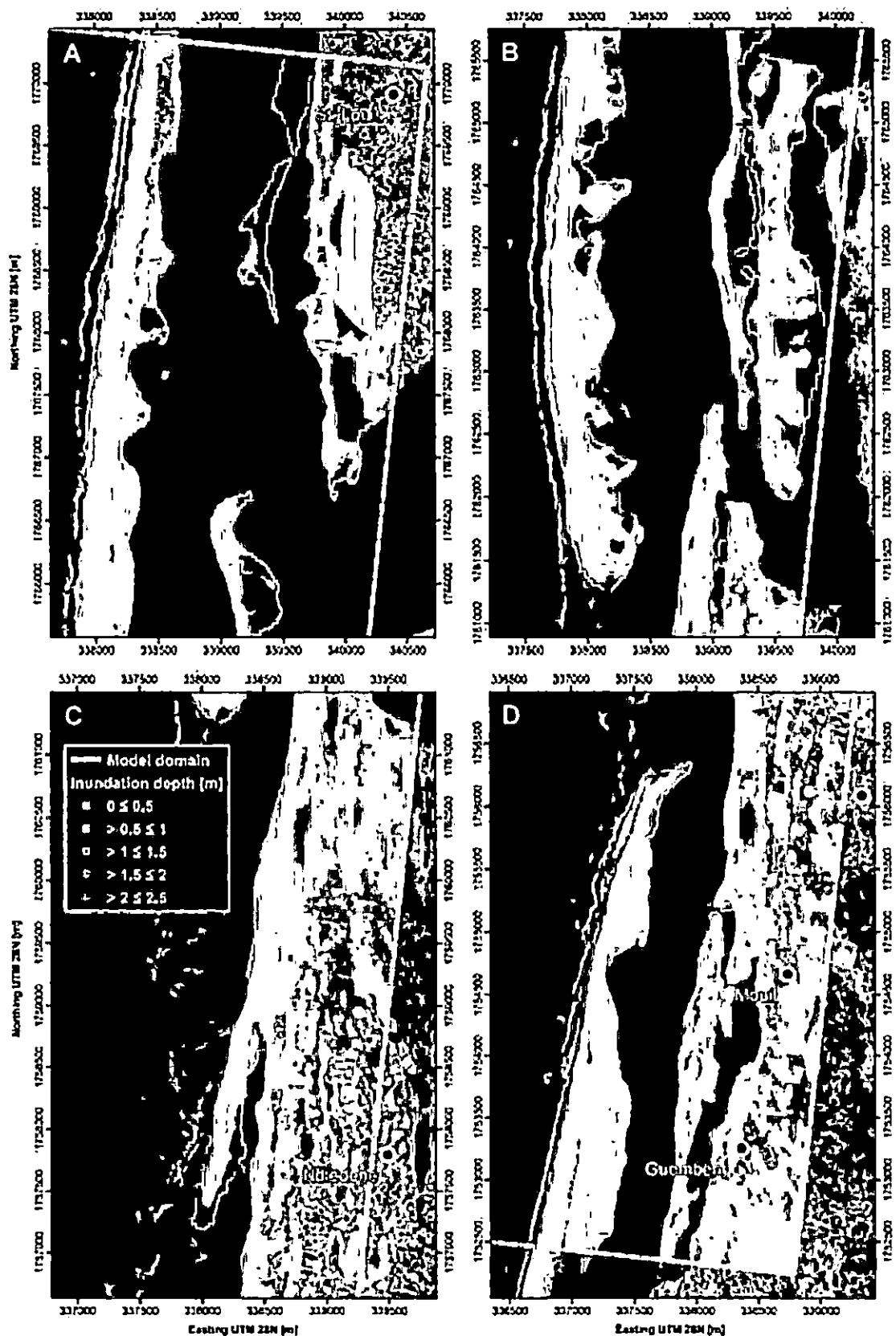
Niveau de la mer actuel – tempête avec période de retour 100 ans



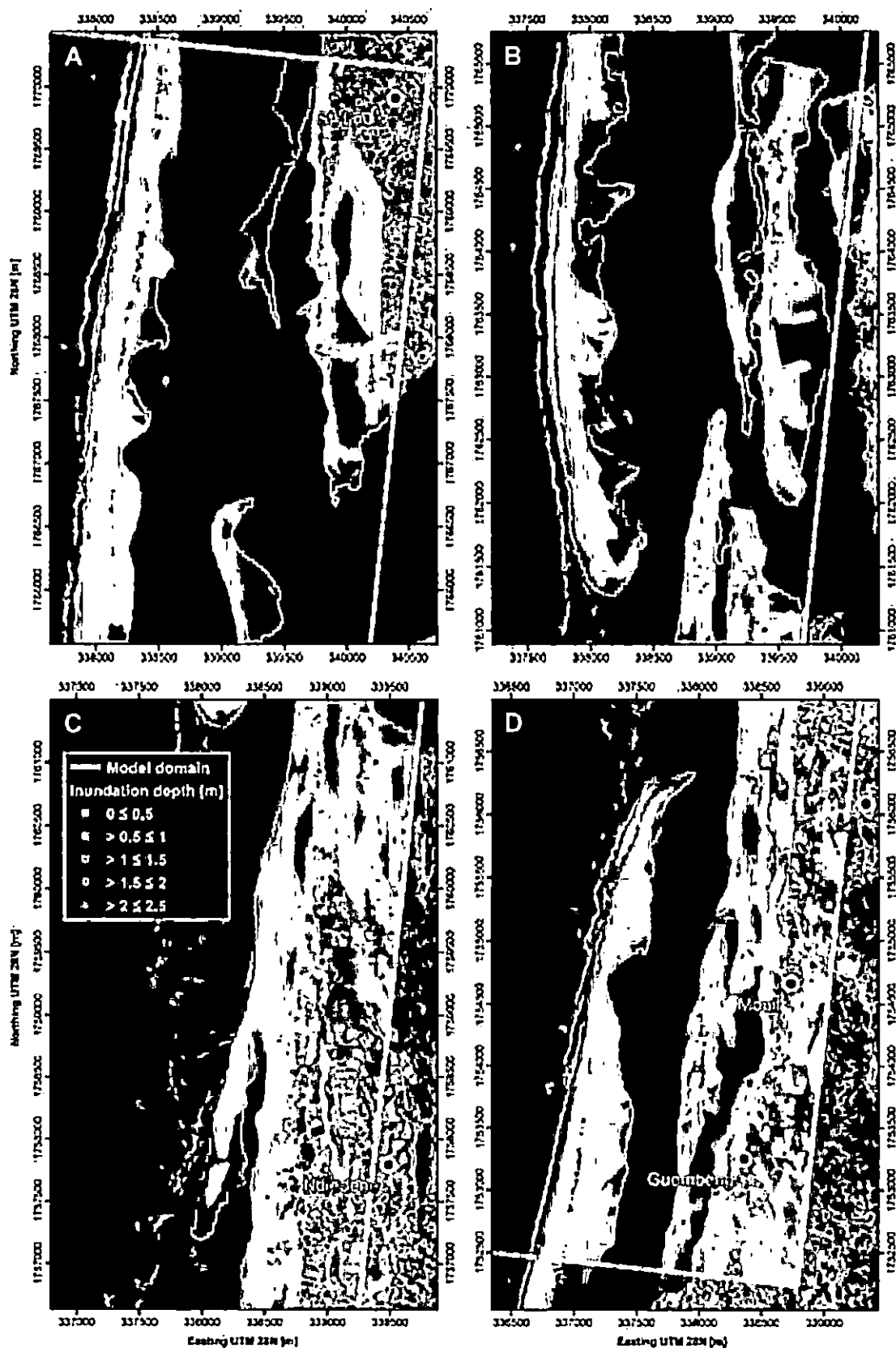
A l'horizon 2050 – tempête avec période de retour 1 an



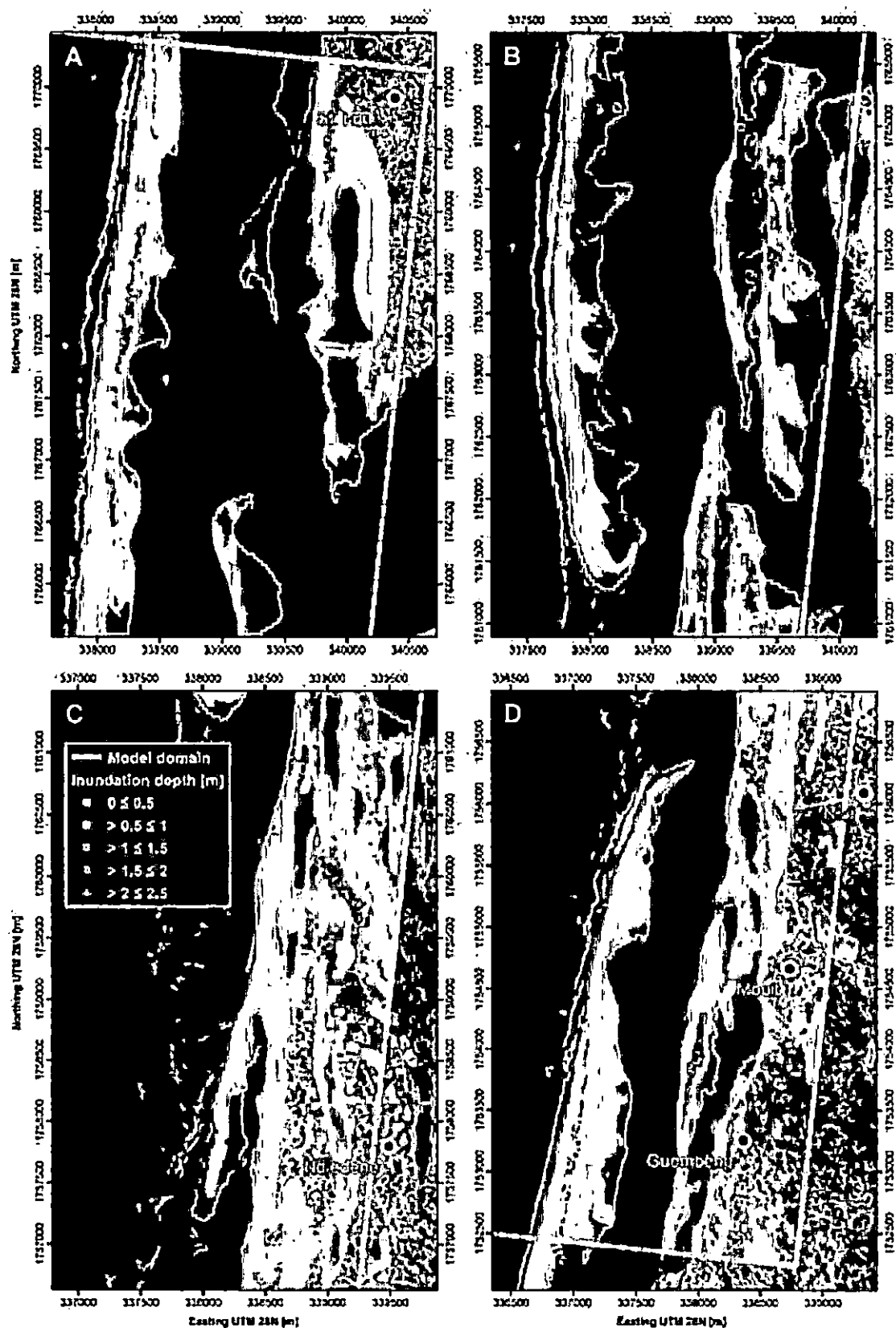
A l'horizon 2050 – tempête avec période de retour 10 ans



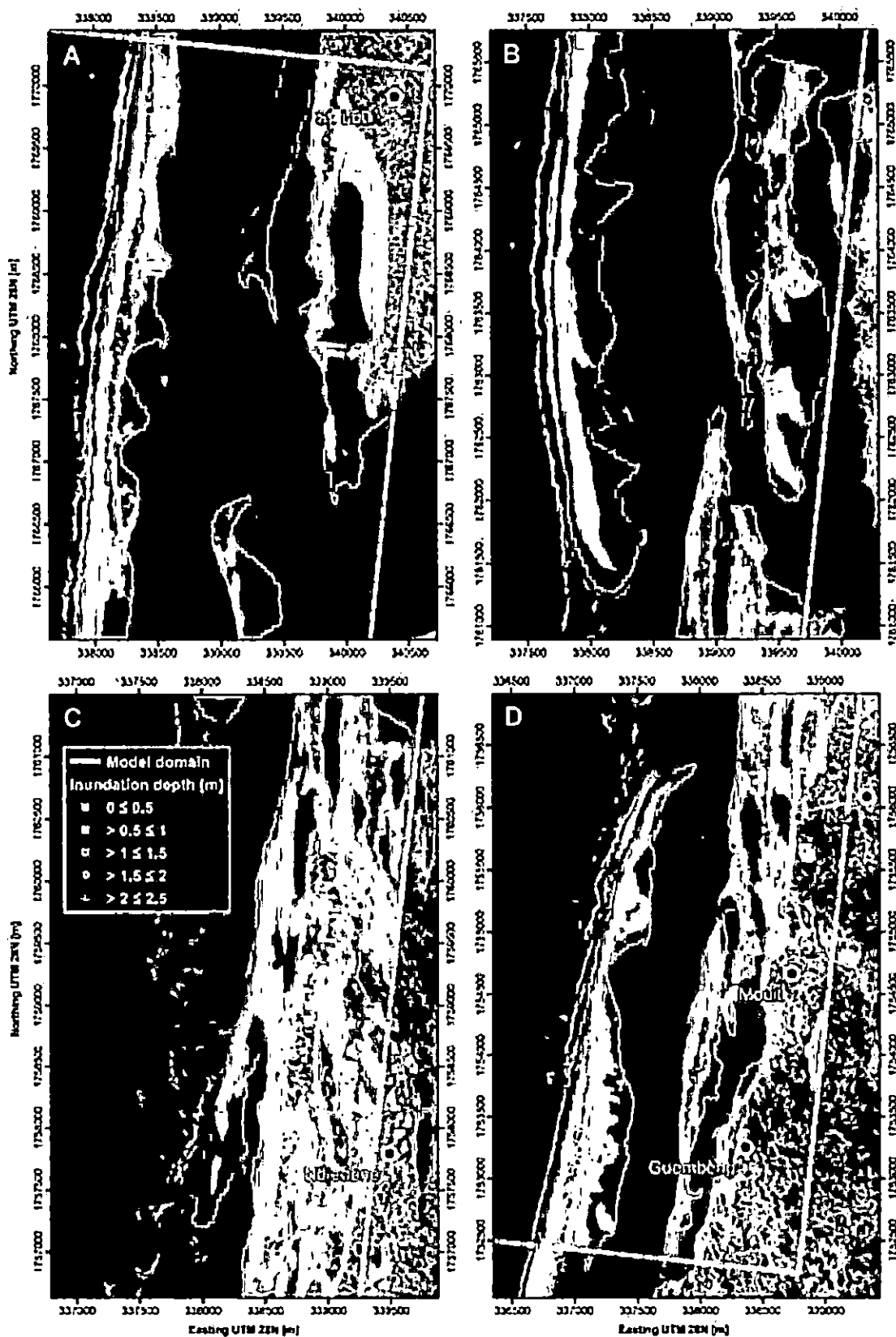
A l'horizon 2050 – tempête avec période de retour 100 ans



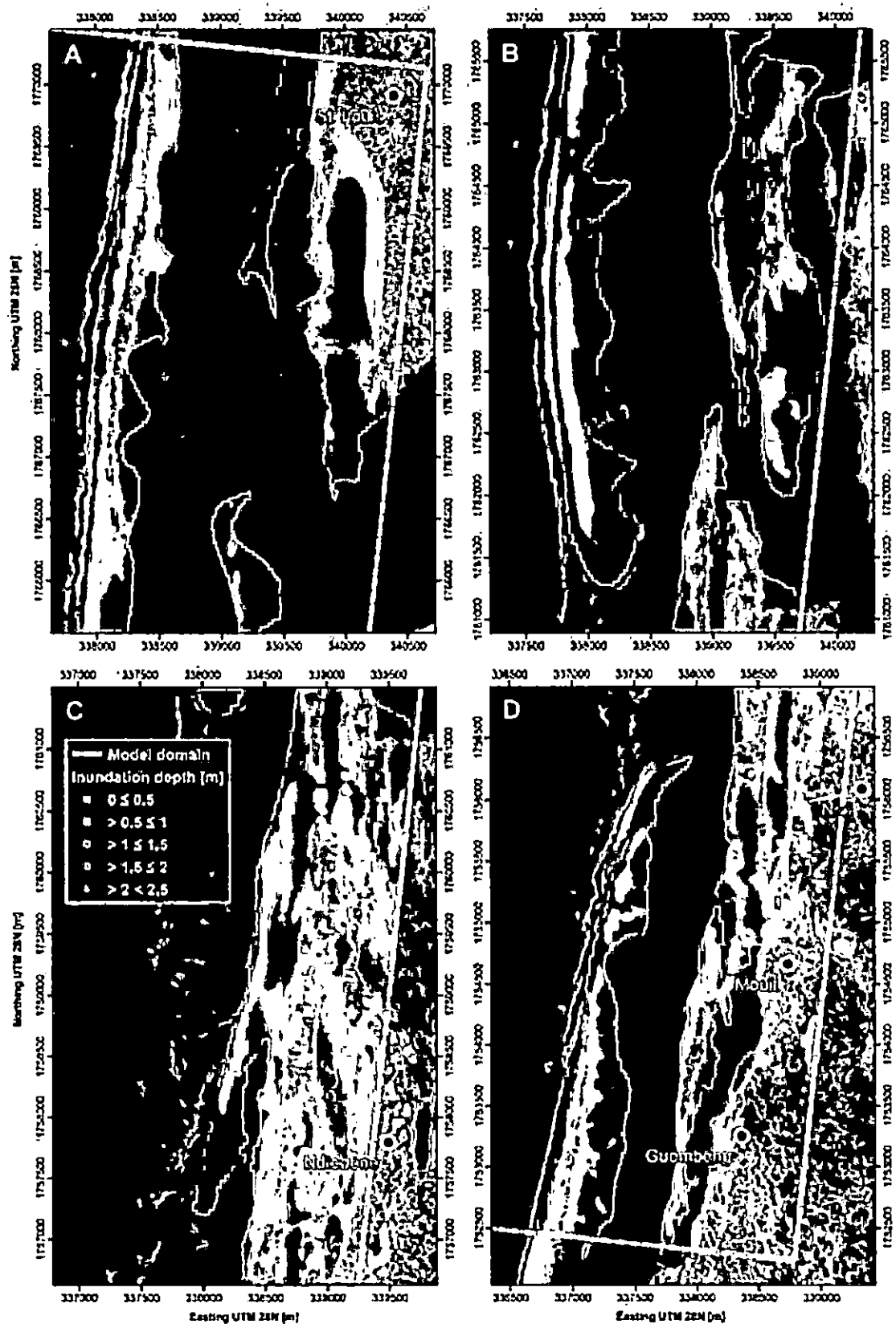
A l'horizon 2100 – tempête avec période de retour 1 an



A l'horizon 2100 – tempête avec période de retour 10 ans



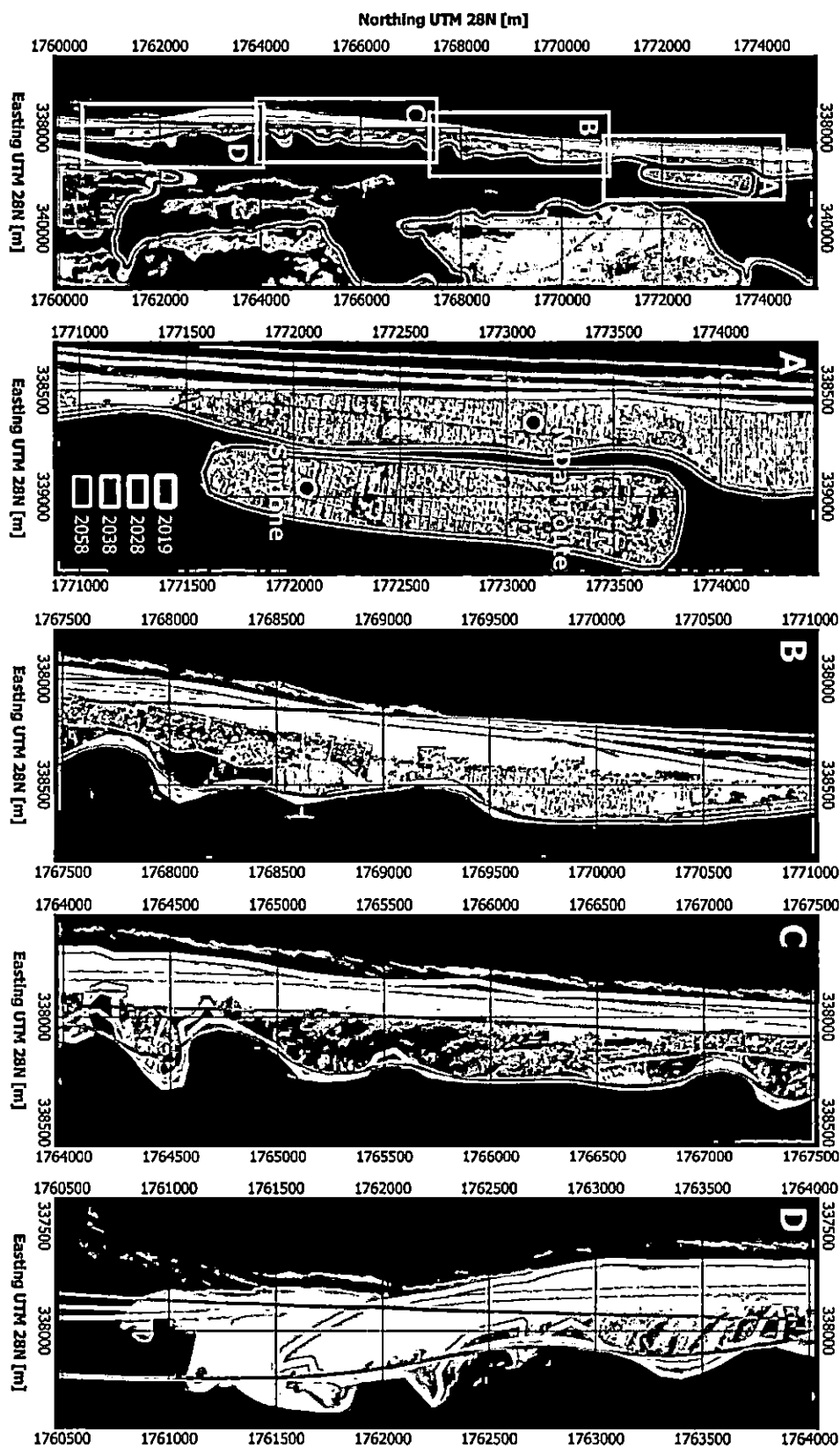
A l'horizon 2100 – tempête avec période de retour 100 ans

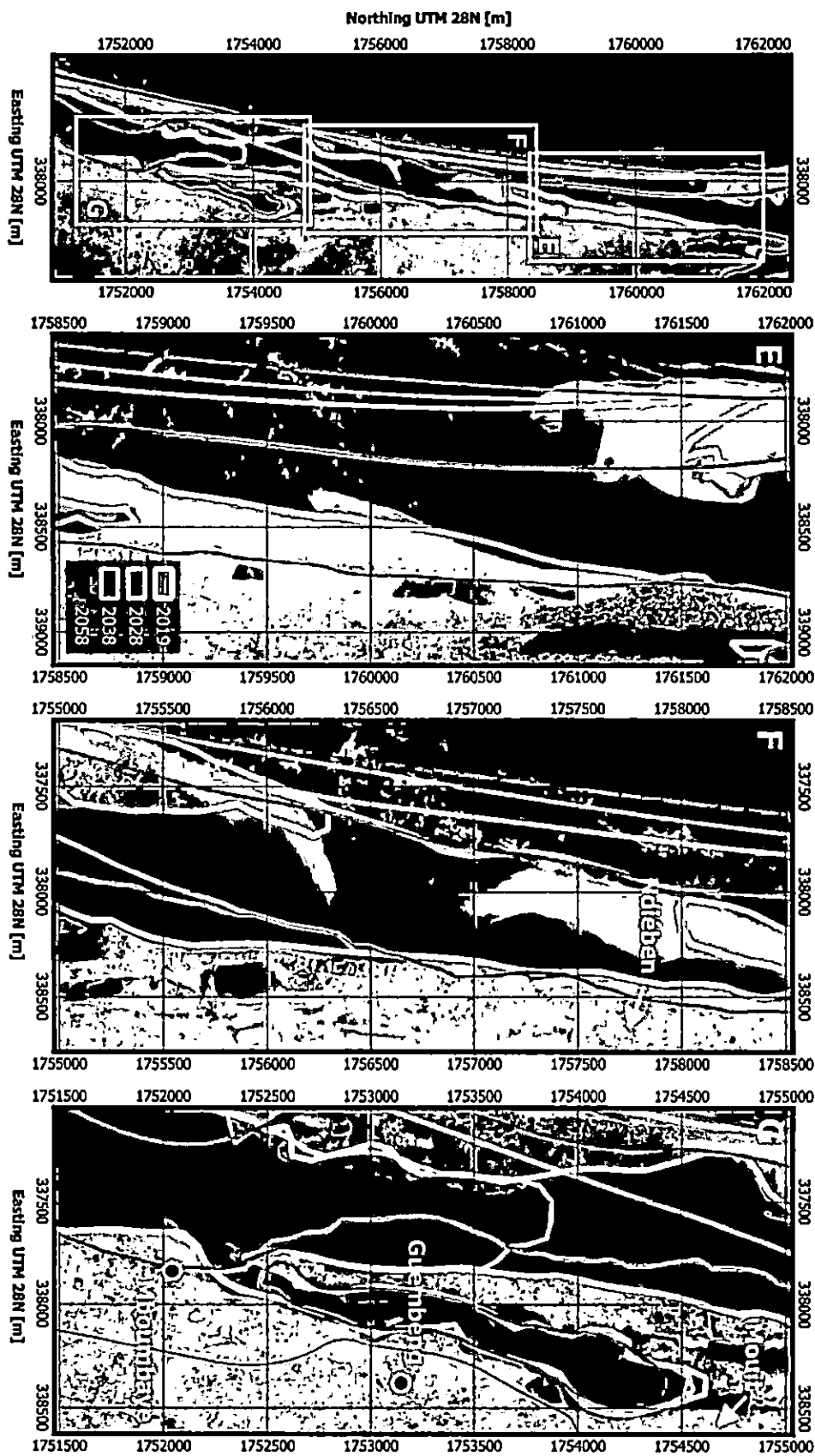


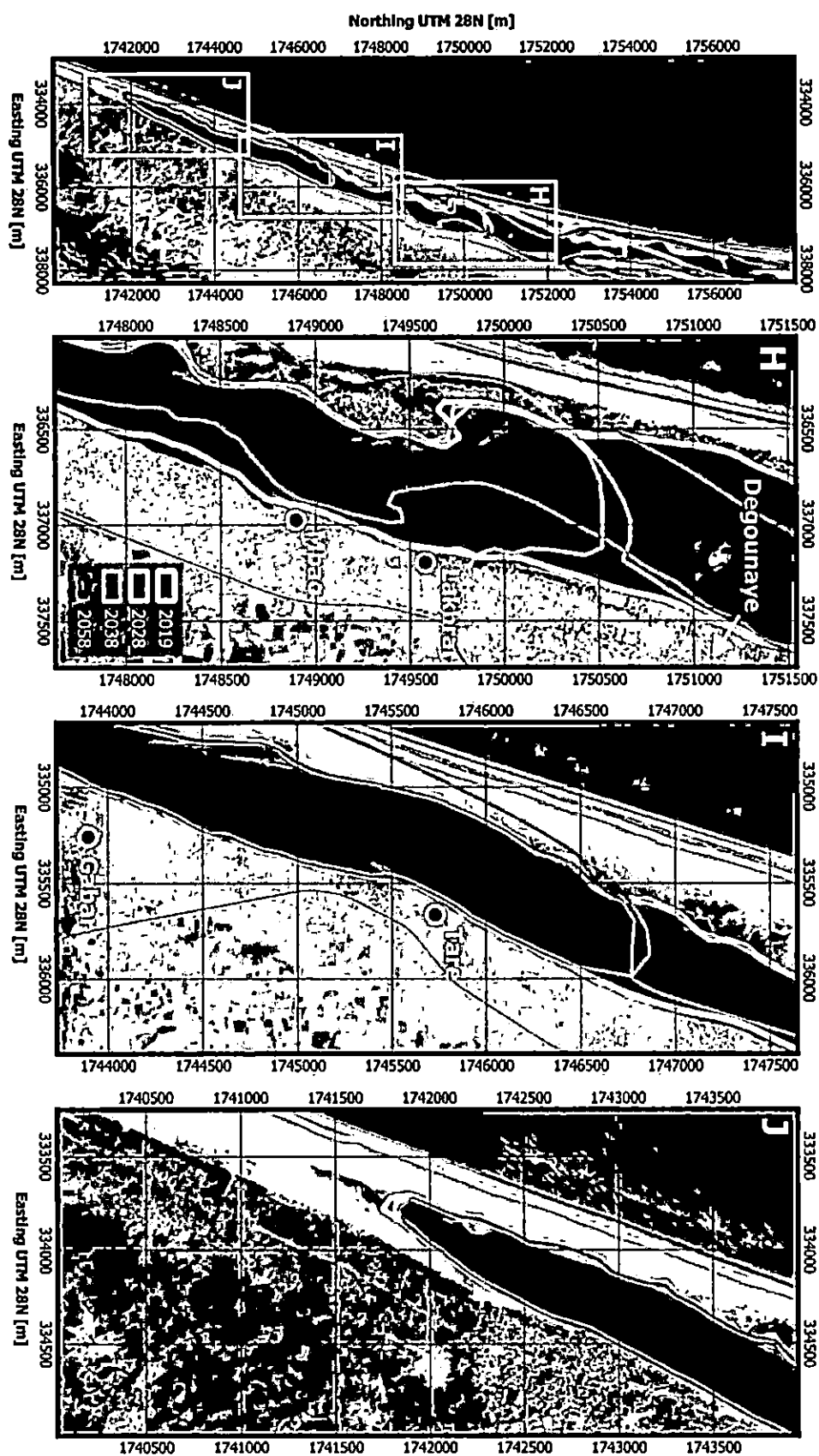
Annexe 3 : Cartes d'érosion

Il est à noter que le modèle ShorelineS est validé sur le comportement à long terme et à grande échelle de l'embouchure du fleuve – ces résultats doivent être interprétée seulement comme indicative.

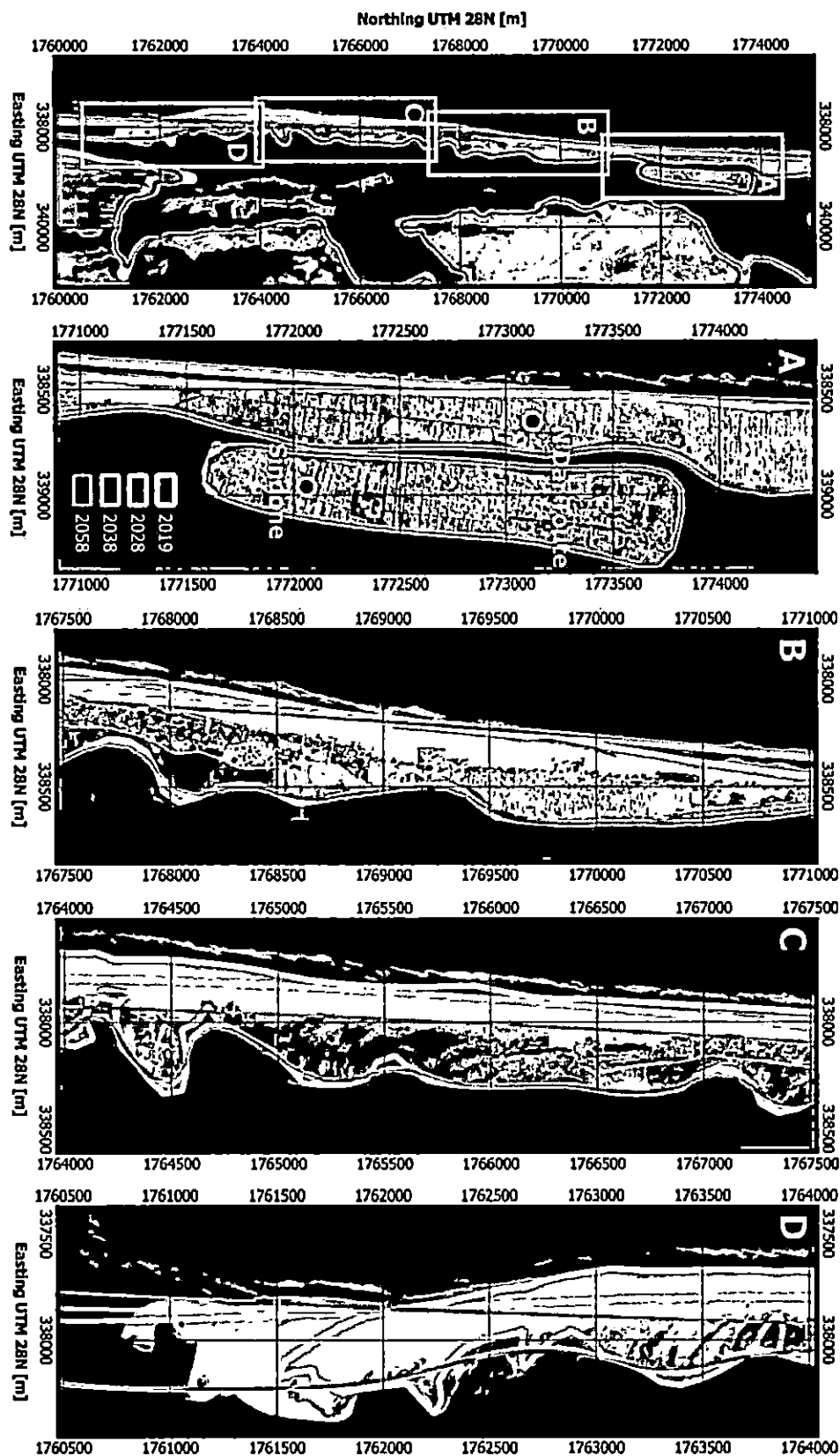
Cartes d'évolution morphodynamique – Projet Tortue

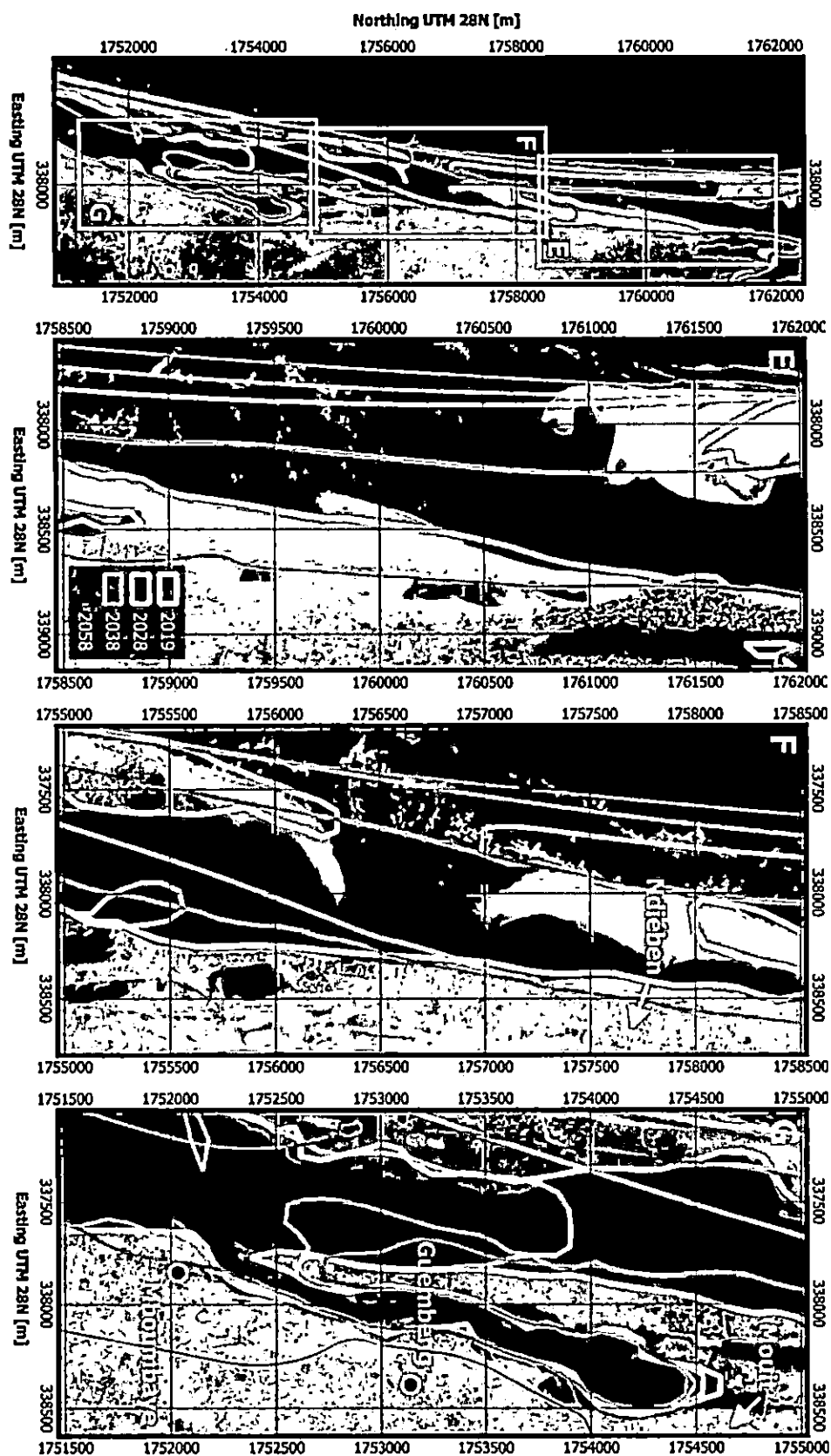


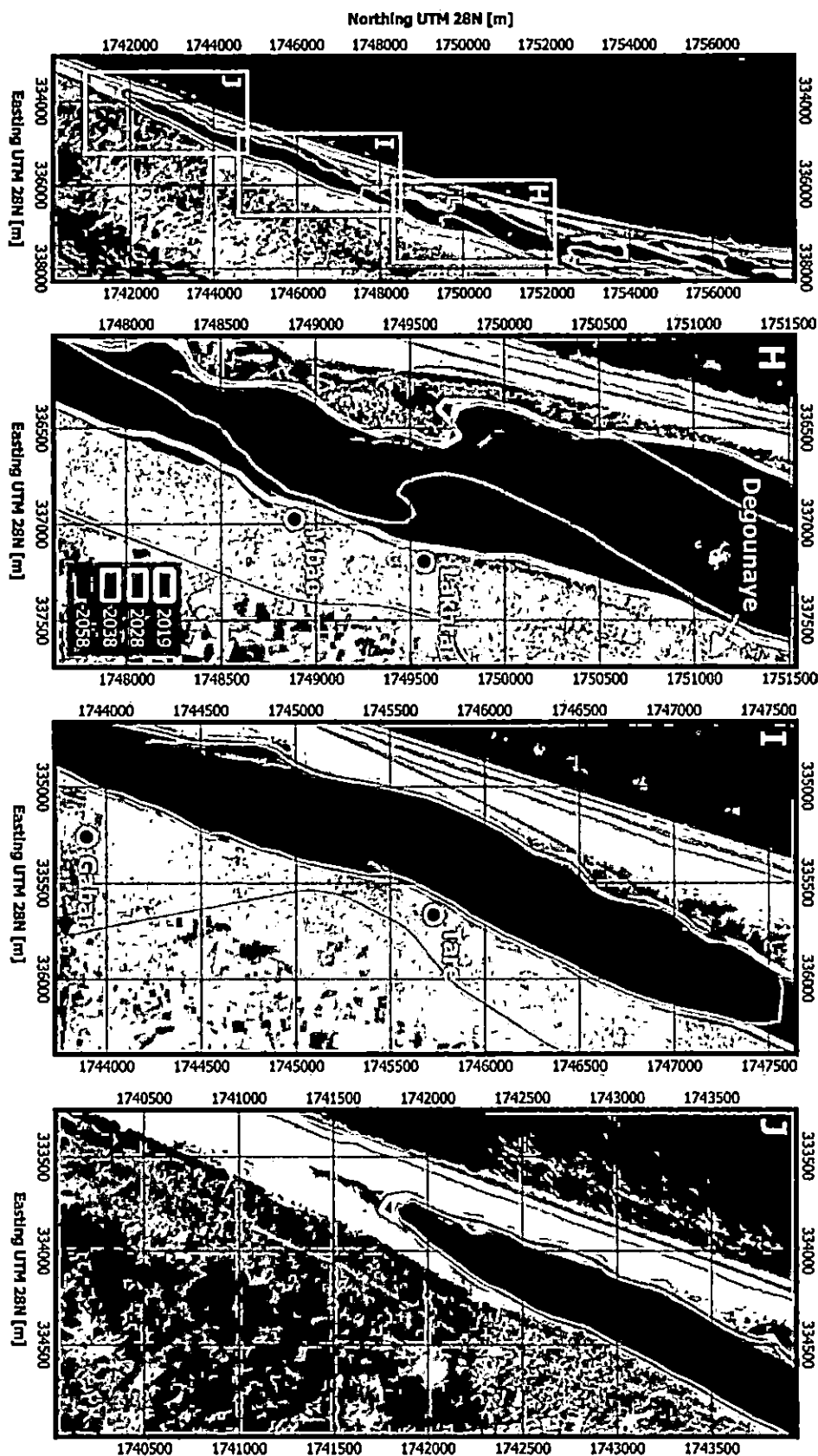




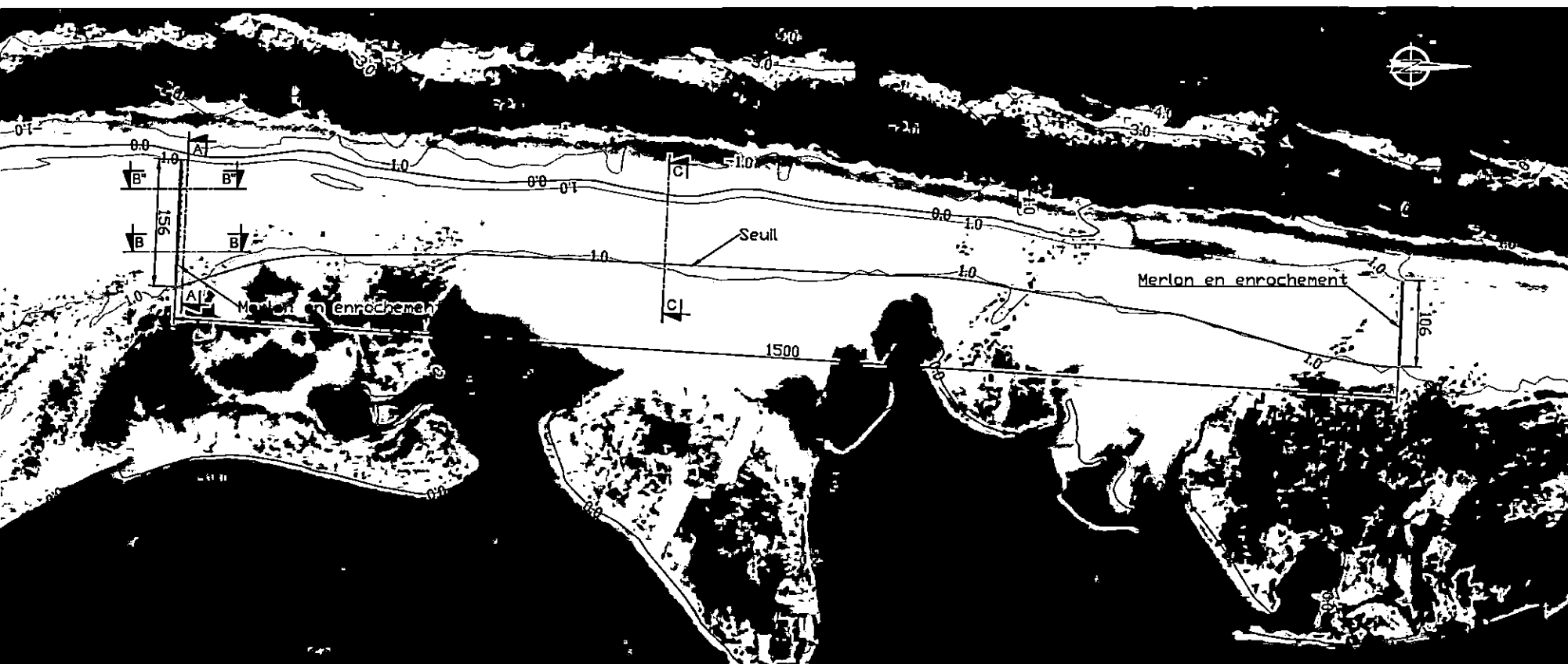
Cartes d'évolution morphodynamique – Changement climatique







Annexe 4 : Coupes types de la brèche contrôlée



				889 rue de la Vieille Poste cs 89017 34000 MONTPELLIER Cedex 2 Tel: +(33) 4 67 13 90 00	
--	--	---	--	---	--

A	16/09/20	Première édition	EBR	FFA	EKU
Indice	Date	Description	Etabli	Vérifié	Approuvé

Scénario "Brèche contrôlée"
Design du déversoir

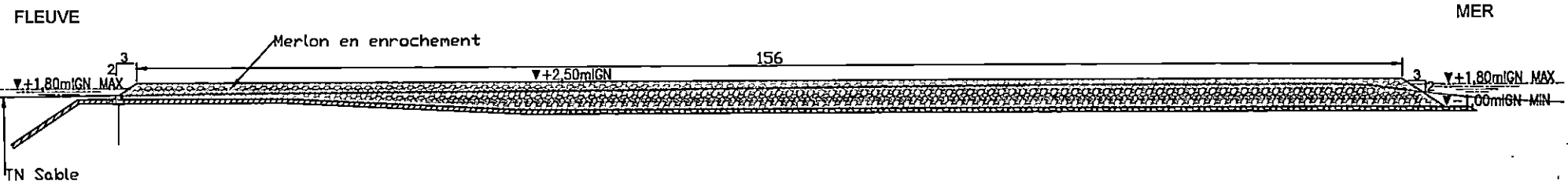
Echelle:	Format:	Numéro du plan:	Phase	Lot	Spécialité	Type	Numéro	Ind
1/100	A3		AVP	-	/	VP	01	A

Nom du fichier: Coupes Types.dwg

Coupe A-A

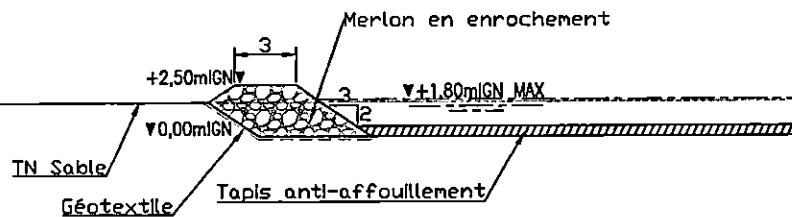
ECHELLE:1/500

PAGE 02/03



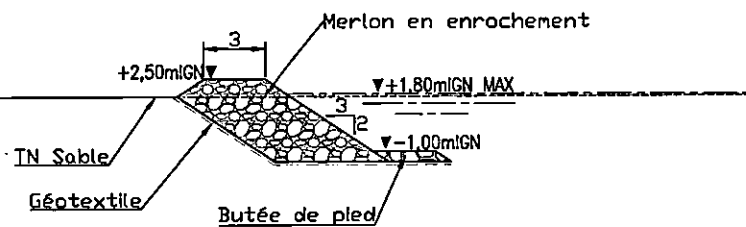
Coupe B-B

ECHELLE:1/250



Coupe B''-B''

ECHELLE:1/250



889 rue de la Vieille Poste cs 89017
34000 MONTPELLIER Cedex 2
Tel: +(33) 4 67 13 90 00

Indice	Date	Description	Etabli	Vérifié	Approuvé
A	16/09/20	Première édition	EBR	FFA	EKU

Scénario "Brèche contrôlée" Design du déversoir

Echelle:	Format:	Numéro du plan:	Phase	Lot	Spécialité	Type	Numéro	Ind
1/100	A3		AVP	-	/	VP	02	A

Nom du fichier: Coupes Types.dwg

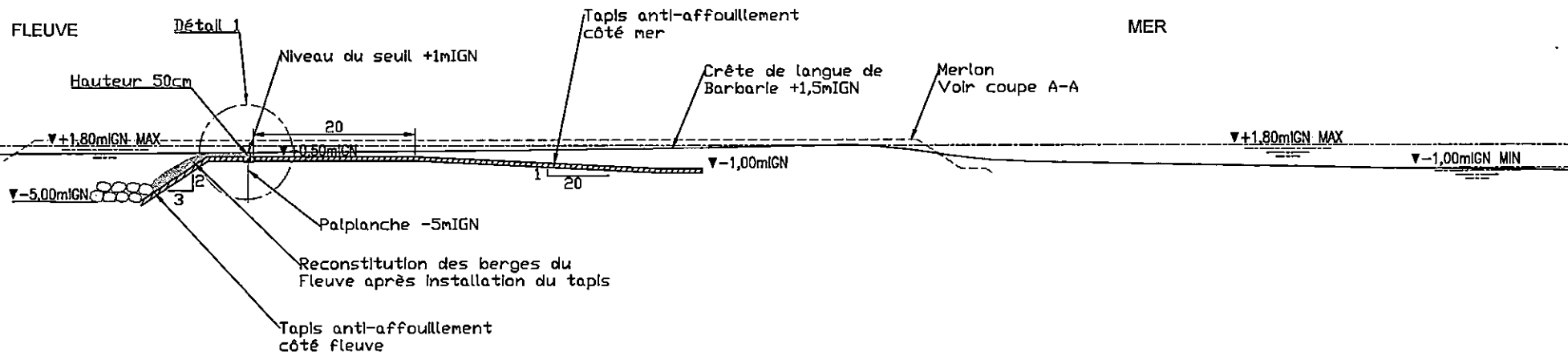
Coupe C-C

ECHELLE:1/500

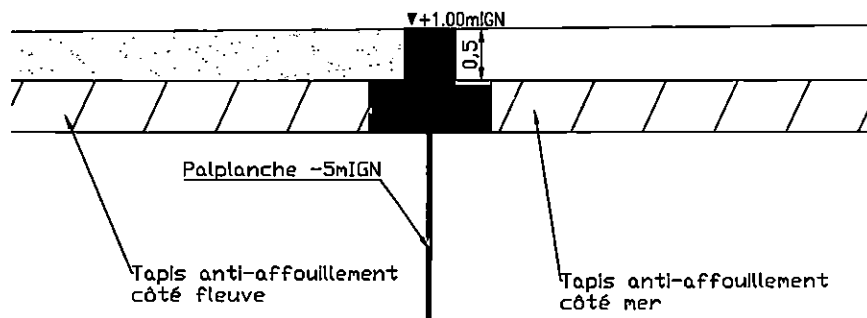
PAGE 03/03

Hypothèse

- Profondeur des palplanches à vérifier avec hydrogéologue pour question d'écoulement souterrain.
- La crête de la langue retiendra sa position naturelle, qui sera entre le déversoir et la mer.



Détail 1
ECHELLE:1/50



889 rue de la Vieille Poste cs 89017
34000 MONTPELLIER Cedex 2
Tel: +(33) 4 67 13 90 00

Indice	Date	Description	Etabli	Vérifié	Approuvé
A	16/09/20	Première édition	EBR	FFA	EKU

Scénario "Brèche contrôlée" Design du déversoir

Echelle:	Format:	Numéro du plan:	Phase	Lot	Spécialité	Type	Numéro	Ind
1/100	A3		AVP	-	/	VP	03	A

Nom du fichier: Coupes Types.dwg

- Études générales
- Assistance au Maître d'Ouvrage
- Maîtrise d'œuvre conception
- Maîtrise d'œuvre travaux
- Formation

Egis Eau Siège social
889 rue de la vieille poste
CS 89017
34965 - Montpellier Cedex 2

Tél. : 04 67 139 000
Fax : 04 67 139 393
montpellier.egis-eau@egis.fr
<http://www.egis-eau.fr>