Préparé car:

SHELTER

Quelques Considérations sur les Conséquences de l'Eau et du Changement Climatique – St. Louis, Sénégal

C04021.002622

Janvier 2011

UN-HABITAT / ARCADIS Shelter Initiative

This document is a product of the *Shelter* Initiative.
The *Shelter* Initiative is a partnership between UN-HABITAT and the ARCADIS company which started in March 2010 around a common goal: to improve the quality of life in rapidly growing cities around the world. Through *Shelter*, ARCADIS offers staff expertise on specific technical issues to support UN-HABITAT projects in developing countries.

Ce document est un produit de l'initiative *Shelter*.
L'initiative Shelter est issue d'un partenariat entre l'agence ONU-HABITAT et la compagnie ARCADIS, démarré en mars 2010 autour d'un objectif commun aux deux organisations : l'amélioration de la qualité de vie dans les villes en développement du monde entier. A travers *Shelter*, ARCADIS met à disposition des experts de haut niveau afin d'appuyer les projets mis en œuvre par ONU-HABITAT dans les pays en développement.

DISCLAIMER:
The designations employed and the presentation of the material in this report do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of the Secretariat of the united Nations concerning the legal status of any country, territory, city or area, or of its authorities, or concerning delimitation of its frontiers or boundaries, or regarding its economic system or degree of development. The analysis, conclusions and recommendations of the report do not necessarily reflect the views of the United Nations Human Settlements Programme, the Governing Council of the United Nations Human Settlements Programme or its Member states.

AVERTISSEMENT:
Les appellations qui sont employées dans le présent rapport et la présentation des éléments qui y figurent n'impliquent de la part du Secrétariat Général des Nations Unies aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites, ou concernant leur économie ou niveau de développement.
Les analyses, conclusions et recommandations figurant dans ce rapport ne reflètent pas nécessairement les vues du Programme des Nations Unies pour les Etablissements Humains, le Conseil d'Administration du Programme des Nations Unies pour les Etablissements Humains ou ses états Membres.

Client Shelter

Title Quelques Considérations sur les Conséquences de l'Eau et du Changement Climatique – St. Louis, Sénégal

Rev.	Originator		Date	Remarks	Checked by		Approved by	
0	R.C. Steijn		19 Nov 10				R.C. Steijn	
1	R.C. Steijn		6 Dec. '10	Translation	M.C.		R.C. Steijn	
2	R.C. Steijn		20 Jan '11	by S. Beesley	Onderwater		R.C. Steijn	

Document Control	Contents	Status
Report number: C04021.002622R1r2 Keywords: Senegal, estuary, coastal morphology, River floods, urban planning. Project number: C04021.002622	text pages : 43 tables : 1 figures : 19 appendices : 2	☐ preliminary ☐ draft ☑ final

ARCADIS
Infrastructure, environment, facilities

postal address
PO Box 248
8300 AE, Emmeloord
The Netherlands

visiting address
Voorsterweg 28, Marknesse
tel : 0527 24 81 00
fax: 0527 24 81 11

e-mail
rob.steijn@arcadis.nl
internet
http://www.arcadis.nl

Sommaire

ARCADIS et ONU-HABITAT, le programme des Nations Unies pour les lieux où les hommes établissent leur habitat, ont lancé un partenariat visant à améliorer la qualité de vie dans les villes à croissance rapide du monde entier. Ce partenariat, appelé SHELTER (signifiant abri en anglais), crée une plateforme qui rend le partenariat visible et concret. Un de ces projets porte sur le développement urbain à Saint-Louis, au Sénégal.

La situation particulière de Saint-Louis dans l'estuaire du fleuve Sénégal complique la planification urbaine. De nombreux districts de la ville sont situés sur des terrains (anciennes îles), qui sont si bas qu'ils sont inondables pendant les périodes de forte montée des eaux. Il est prévu que la situation s'aggrave si l'élévation du niveau de la mer continue et si le développement urbain se poursuit.

Les restrictions posées par la nature sur le développement urbain ne sont pas encore bien comprises, jusqu'à présent, elles n'ont pas non plus été décrites de manière holistique. Les ambitions urbaines, en revanche, sont grandes. ONU-HABITAT souhaite renforcer les capacités locales afin de faire face à la «dimension eau» dans la planification urbaine de la ville. Ils ont demandé à ARCADIS d'effectuer une mission sur le terrain et de préparer un rapport dans lequel en particulier les aspects de gestion des inondations soient étudiés. En raison de la nature technique de la mission, reflétée dans la composition de l'équipe, ce rapport traite principalement de questions techniques (génie côtier et hydraulique).

Les éléments suivants liés à l'eau sont considérés dans le présent rapport:

1. Le risque d'inondation de la ville (chapitre 4);
2. Les changements morphologiques après la création de la nouvelle brèche (chapitre 5);
3. L'érosion côtière locale (chapitre 6);
4. Le drainage médiocre des eaux de pluie (chapitre 7).

Ad 1 Le risque d'inondation de la ville

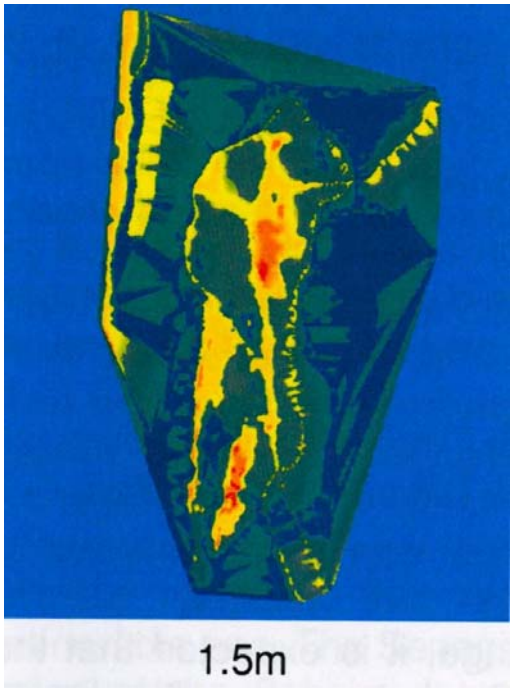
Les niveaux d'eau extrêmes d'une fréquence de survenue estimée à 1/an sont composés du niveau de marée et du niveau des eaux fluviales: Marée (MSL 0,5), fleuve (MSL 1 m) = MSL 1,5 m (Soit MSL Medium Sea Level, en français niveau moyen des marées).

Les débits fluviaux plus extrêmes augmentent le niveau d'eau à un degré plus élevé. Par exemple: MSL 2 m ne s'est produit qu'une seule fois depuis 1970 (1 / 40 ans). La probabilité d'occurrence augmentera à l'avenir avec la montée des eaux. Si les chiffres ci-dessus sont corrects, alors une prévision de hausse de 50 cm du niveau de la mer en 2100, augmente la probabilité d'inondations d'un facteur de 40 pour ce siècle.

La hauteur moyenne du centre historique est à MSL 1,5 m. La topographie de l'île de Sor est quant à elle, un peu plus complexe. Les districts de Ndiolofene et Pikine III (sud), ont

des hauteurs allant jusqu'à MSL 3 m. Certains autres districts, tels que Leona et Diaminar sont beaucoup plus faibles, avec un minimum de MSL 1 m.

Si les données extrêmes des niveaux d'eau sont combinées avec les données topographiques, des cartes dites d'inondations peuvent être produites. Lors des périodes «régulières» de crues extrêmes de l'ordre de MSL 1,5 m, le centre historique reste relativement sec.



En même temps, avec un niveau extrême d'eau de MSL 1,5 m, les zones basses de l'île de Sor sont inondées (Seck, 2010):

Dans les parties plus profondes de cette île, cela peut même conduire à des profondeurs de 0,5 m d'inondation sinon plus. Ces profondeurs ne vont pas nécessairement se conclure en pertes humaines, mais les dégâts aux habitations seront certains, et la vie de la ville sera perturbée.

Selon une théorie de risques relatifs, deux paramètres sont à prendre en compte. Le premier est la probabilité de survenance de tout événement de crue, l'autre est le dommage au cas où tel événement se produise. Le risque d'inondation réel est le produit mathématique des probabilités et des conséquences.

L'effet du changement climatique (hausse du niveau de la mer pour être précis) augmente le risque d'inondation le long de son «axe de probabilité». Toutefois, l'urbanisme et les autres projets d'investissements augmentent également le risque d'inondation le long de son «axe de conséquences». Toute stratégie de lutte contre les risques d'inondations devra prendre en compte les deux composantes de l'équation des risques d'inondations.

Des mesures techniques spécifiques peuvent être envisagées pour réduire la probabilité de risques d'inondations, soit par exemple:

- Un système de circuit fermé de digues robustes, y compris des solutions adaptées mises en œuvre à chaque portail étanche (par exemple, où une route croise une digue). Afin de contrôler le niveau des eaux souterraines dans la zone de la digue, des systèmes supplémentaires tels que des pompes devront aussi être considérés ;
- Des protections contre les inondations temporaires ou adaptables, telles que des sacs de sable, des murs mobiles d'endiguement, ou des barrières à panneaux multiples ;
- Une installation de systèmes d'atténuation d'inondations, qui s'activent quand un niveau d'eau critique est atteint. La montée des eaux est ainsi réduite, à mesure que l'eau se déverse dans des bassins de rétention en contrebas ou dans l'océan par la brèche, aménagée d'une structure de débordement adaptée.

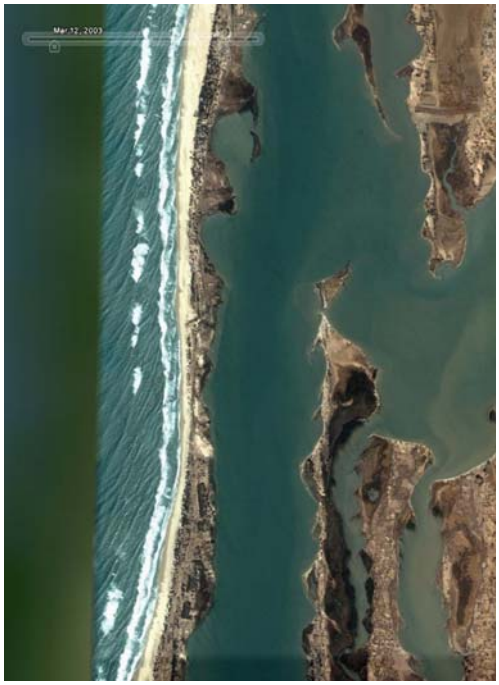
Des mesures spécifiques peuvent être envisagées pour réduire les conséquences dues à toute inondation, soit par exemple:

- Construire où le terrain est élevé;
- Sécuriser les voies d'évacuation, et accroître la compréhension locale sur la façon d'agir face aux crues, ou
- Concevoir de nouveaux bâtiments de telle sorte que les inondations (par exemple jusqu'à 0,5 m d'inondation) ne causent pas de dégâts graves.

Une combinaison de ces deux types de mesures peut être considérée afin de développer une approche durable plus intégrée et équilibrée.

Ad 2. Les changements morphologiques après la création de la nouvelle brèche

En 2003, de fortes pluies dans le bassin du fleuve Sénégal alarmèrent les autorités, car il était prévu que les niveaux d'eau à Saint-Louis s'élèveraient au-dessus des niveaux critiques. Il fut décidé de creuser un canal de délestage (la nouvelle brèche) au travers de la flèche (Langue de Barbarie) pour évacuer les eaux du fleuve.



Le canal d'environ 100 m de longueur (soit de la largeur de la Langue de Barbarie à cet endroit précis), 4 m de large et environ 1,5 m de profondeur fut creusé. Sa taille s'est développée rapidement dans les premiers jours et le canal a continué de croître au cours des mois et des années suivantes.

Les conséquences la nouvelle brèche ont été:

- La plage en face de Doun Baba Dièye, située en face de la nouvelle embouchure du fleuve, s'est érodée rapidement, causant la perte de dizaines de maisons.
- La zone située au sud de la nouvelle embouchure du fleuve a été dépourvue d'apport d'eau douce, ce qui a augmenté la salinité de l'eau. Cette partie de l'ancien estuaire est devenue un lagon. Cela a été positif pour l'extraction de sel dans cette région, mais d'un point de vue général, posa plutôt un inconvénient pour l'écosystème (en particulier les mangroves).
- Les marées peuvent plus facilement pénétrer dans l'estuaire et atteindre Saint-Louis. La moyenne du niveau des eaux a augmenté d'environ 0,3 m.
- Puisque les eaux fluviales peuvent plus facilement s'écouler dans l'océan, le niveau d'eau lié aux débits fluviaux extrêmes est devenu moindre. Cet effet est plus important que son opposé, l'effet de la hausse des marées, ce qui signifie que la probabilité d'inondation de Saint-Louis est en fait réduite. (Les données statistiques d'avant 2003 ne sont donc plus utiles).

Alors que la nouvelle brèche s'est agrandie et a migré vers le sud, l'ancienne embouchure du fleuve s'est refermée.

La nouvelle embouchure a atteint sa taille maximale et ne présente plus que des fluctuations saisonnières. Elle n'entamera pas la Langue au nord de son emplacement actuel et, par conséquent, ne causera pas une menace pour la ville. En fait, la nouvelle embouchure réduit la probabilité d'occurrence des inondations en milieu urbain, qui était l'idée première motivant la création du canal.

La nouvelle embouchure migre plus vers le sud. Le taux de migration est d'environ 300 m/an, mais cela peut varier d'année en année (200 à 5000 m/an). A chaque nouvel emplacement de l'embouchure du fleuve, des problèmes semblables à ceux observés à l'emplacement actuel se produiront. Le recul du rivage, par exemple, comme cela a été expérimenté à Doun Baba Dièye, se produit également dans des zones nouvellement exposées au sud de l'entrée actuelle de l'estuaire. En termes de développement spatial, il est donc préférable de ne pas construire d'infrastructure nouvelle face à tout emplacement futur de l'embouchure.

L'écosystème, qui a déjà souffert du fait de son ancien caractère estuarien (en particulier les apports d'eau douce), est transformé en un système lagunaire. Mais en deçà, il est attendu que l'érosion se produise dans les régions qui seront directement exposées. Cela s'est produit plusieurs fois dans le passé, et l'on peut dire que la nature n'a pas besoin d'être protégée contre elle-même. En fait, tandis que l'embouchure migre vers le sud, de nouveaux écosystèmes estuariens se développent au nord, ce qui, en temps voulu, créera de nouvelles possibilités de conservation de la nature.

Avec un taux de migration vers le sud de 300 m / an, on peut facilement déterminer le moment où l'adaptation locale liée à l'embouchure se produira pour tel ou tel endroit.

Une option pour contrôler la dynamique de l'embouchure est la construction de barrages sur les deux côtés de l'entrée (fixation de l'embouchure du fleuve). D'un point de vue économique et risques d'inondations, nous ne voyons aucune justification pour les investissements considérables qui seraient nécessaires. En outre, du point de vue morphologie côtière, nous vous recommandons d'être extrêmement prudents lorsque cette option est envisagée.

Ad 3 L'érosion côtière locale

À long terme et en général, le recul de la côte n'est pas considéré comme très probable. Il existe cependant au moins deux endroits où l'érosion locale a déjà causé des dégâts. L'un est au mur de Ndar, l'autre est à Doun Baba Dièye, en face de l'embouchure actuelle.

L'érosion au long de la côte à Doun Baba Dieye devrait se poursuivre jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre de l'orientation de la côte soit atteint. Un tel «équilibre statique de la forme de la baie» sera atteint lorsque l'orientation du nouveau rivage sera perpendiculaire aux vagues. L'érosion a probablement déjà ralenti, mais la côte pourrait encore se retirer plus loin. Une zone de distance de sécurité relative aux présentes HW (High Water, en français Hautes Eaux) serait d'au moins 10 m, afin d'éviter tout dommage supplémentaire si une telle érosion continuait vraiment de se produire.

Les vagues de réflexion et de rupture, au cours des grandes marées et des tempêtes, créent une désagrégation du mur à Ndar. Cette désagrégation peut être reconnue d'après les profondeurs légèrement plus prononcées en face du mur de mer (la ligne des hautes eaux se dirige vers le mur). Si le mur avait été placé à l'extérieur de la zone dynamique, aucun dommage ne se serait produit. Etablir une distance de sécurité exige des études approfondies de morphologie de la plage, mais en premier lieu 20 m de recul est probablement une estimation raisonnable.

Sans aucune donnée quantitative sur l'érosion rapportée pour Goxumbaac, il est difficile de faire des prévisions, mais il est probable que plus de dégradation se produira en condition de tempête plus extrême.

Ad 4 Le drainage médiocre des eaux de pluie

Le non-écoulement des précipitations est l'une des causes principales des inondations à Saint-Louis. La mauvaise situation a des causes différentes:

- Faible capacité de drainage et niveaux comparatifs élevés des eaux souterraines dans le terrain;
- La topographie particulière de l'île de Sor et ses districts d'altitude plus basse où l'eau de pluie se collecte; et

- L'obstruction des évacuations d'eau de surface par des structures, telles que routes, (petites) digues et autres.

Le problème de drainages médiocres semble être la plus manifeste de l'île de Sor. Cependant, la nappe phréatique élevée est aussi à la source des dommages aux sous-sols de bâtiments coloniaux dans le centre historique (l'île de Ndar). Des solutions à prendre en considération vis-à-vis de l'île de Sor, sont potentiellement:

- Créer des parties plus profondes dans chaque quartier, où l'eau de pluie puisse être recueillie pour être rejetée dans l'estuaire environnant. Ces parties inférieures peuvent servir de places communales, places de stationnement, jardins en dehors des pluies.
- Creuser un système de canaux de délestage qui puissent avoir une utilité multiple (transport sur l'eau, collection et évacuation des pluies excessives, valeur spatiale, etc.) La terre récupérée en creusant ces canaux peut être utilisées pour élever le terrain sur lequel de nouveaux bâtiments peuvent être prévus.
- Adapter la topographie de telle manière que l'eau ne soit plus collectée dans des dépressions localisées, mais qu'elle puisse s'écouler dans l'estuaire. Cela comprend la mise à jour des dispositifs spécifiques de drainage pour passer différents obstacles.

Si le sujet de l'eau est abordé comme une opportunité au lieu d'un ennemi qui doit être combattu, alors Saint-Louis peut faire sa forte déclaration au monde entier, semblable à ce que les Vénitiens ont fait il y a longtemps: utiliser la dimension de l'eau comme un point de vente unique, et l'intégrer complètement dans la planification du milieu urbain à court et à long terme.

Table des Chapitres

Liste des Tables
Liste des Figures
Liste des Abréviations

1 Introduction 1

2 Rapport de mission 4
- 2.1 Objectif et Programme 4
- 2.2 Quelques Considérations sur les Echelles de Référence 5

3 Description du système côtier 7
- 3.1 Contexte 7
- 3.2 Genèse du Littoral 13
- 3.3 Le Fleuve Sénégal 21

4 Elévations des Eaux et des Terres 25
- 4.1 Introduction 25
- 4.2 Situation 26
- 4.3 Préoccupations 33
- 4.4 Stratégies Possibles 33

5 Dynamiques de l'Embouchure du Fleuve 35
- 5.1 Introduction 35
- 5.2 Situation 35
- 5.3 Préoccupations 40
- 5.4 Fixation de l'Embouchure du Fleuve 42

6 Erosion côtière 45
- 6.1 Introduction 45
- 6.2 Situation 45
- 6.3 Préoccupations 48
- 6.4 Approches Possibles 48

7 Précipitations 51

Références

Annexes
A Sommaire des activités pendant la mission
B Impression Photo

Liste des Tables

Tableau 3.1: Probabilité commune de la survenue (%) de la mer à son plus haut niveau et la houle dans les classes données

Liste des Figures

Figure 1.1: Situation géographique de Saint-Louis

Figure 3.1 Calcul des fluctuations de l'amplitude des marées au large de Saint-Louis (Septembre 2010)
Figure 3.2: Rose des vents annuelle au large de la côte de Saint-Louis
Figure 3.3: Représentation annuelle du climat des vagues d'eaux profondes (mer et houle) au large de Saint-Louis
Figure 3.4: Evolution de la zone côtière au cours des derniers 5000ans [source: Sy, 2009]
Figure 3.4a: Carte historique du delta du fleuve Sénégal – 1789
Figure 3.5: Positions historiques de l'embouchure du fleuve Sénégal (image satellite)
Figure 3.6: Contours des précipitations pour les périodes de 1931-1960 et de 1961 à 1990 [source: http://www.cartographie.ird.fr]
Figure 3.7: Restant du delta à l'ancienne embouchure, au nord de Saint Louis [Photo: Google Earth]
Figure 3.8: Augmentation de la superficie de la flèche (1983 - 1998) d'après I. Diop.
Figure 3.9. Taux de débit du fleuve pour la période 1900 – 1965
Figure 3.10: Distribution des écoulements du fleuve sur l'année (période 1900-1965)

Figure 4.1 Water level recordings inside the estuary
Figure 4.2 Maximum water level rise at St. Louis during extreme river run-off
Figure 4.3 The districts of St. Louis
Figure 4.4 Land heights
Figure 4.5 Flooded areas for the extreme water level MSL +1.5 m

Figure 5.1 Water level changes in the weeks before the new breach was made
Figure 5.2 Situation before (left) and one year after the opening (right)
Figure 5.3 Evolution of the old and new inlet

Liste des Abréviations

AFD	Agence Francaise de Developpement
ARD	Agence Regionale de Developpement
ATT	Admiralty Tide tables
CD	Chart Datum (vertical reference level)
DTM	Digital Terrain Model (map of topographic heights)
IPCC	Intergovernmental panel on Climate Change
MLW	Mean Low Water (tide)
MLWN	Mean Low Water Neap
MSL	Mean Sea Level (average water level)
MHW	Mean High Water (tide)
MHWS	Mean High Water Spring
OMVS	Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal

1 Introduction

ARCADIS et ONU-HABITAT, le programme des Nations Unies pour les lieux où les hommes établissent leur habitat, ont lancé un partenariat visant à améliorer la qualité de vie dans les villes à croissance rapide du monde entier. Ce partenariat, appelé SHELTER (signifiant abri en anglais), crée une plateforme qui rend le partenariat visible et concret.

SHELTER se concentre sur deux activités principales. Le premier est la participation d'ARCADIS professionnels dans les projets d'ONU-HABITAT, comme par exemple le programme de reconstruction après le séisme en Haïti. Le deuxième est le transfert de connaissances spécialisées à travers l'organisation de séminaires et de conférences dans le monde entier. Toutes ces activités visent à soutenir la mission humanitaire de l'ONU-HABITAT.

Comme les villes et les cités se développent à un rythme sans précédent, l'urbanisation durable est l'un des défis les plus urgents auxquels est confrontée la communauté mondiale au 21e siècle. L'impact des variations dues au changement climatique rend ce défi plus difficile. L'approche générale de l'ONU-HABITAT est de renforcer les capacités locales de manière à ce que des urbanistes locaux et les décideurs puissent mieux tenir compte les défis auxquels ils sont confrontés. Un thème important à cet égard est l'adaptation au changement climatique.

Un des nombreux projets menés par des accords de l'ONU-HABITAT couvre le développement urbain à Saint-Louis, Sénégal. La figure 1.1 présente sa position géographique, qui est sur la côte et à la frontière avec la Mauritanie au nord. La ville est située à même l'estuaire du fleuve Sénégal.

Figure 1.1: Situation géographique de Saint-Louis

Saint-Louis a servi pendant longtemps de capitale au Sénégal et à l'Afrique occidentale française (Dakar est devenue la capitale en 1958). Saint-Louis a toujours été l'une des villes les plus importantes et les plus actives d'Afrique. Le centre historique de la ville a un statut de patrimoine mondial. L'urbanisation à grande échelle a eu lieu dans les dernières décennies, qui a conduit à la situation où des milliers de personnes vivent aujourd'hui dans des zones inondables. Selon Diagne (2007), qui fonde sa conclusion sur un recensement de 1995, la population de Saint-Louis en 2002 était d'environ 200 000.

La situation particulière de Saint-Louis dans l'estuaire du fleuve Sénégal complique la planification urbaine. La topographie de la zone urbanisée est si faible que certains quartiers peuvent être inondés pendant les périodes de crues extrêmes des fleuves. La situation devrait s'aggraver au cas où l'élévation du niveau de la mer continuerait et si, comme prévu, s'accélérait. Les restrictions que le système naturel impose au développement urbain ne sont pas encore bien comprises, et elles n'ont pas été décrites de manière holistique. Les ambitions de développer davantage la ville, cependant, sont solides.

Dans le cadre de la «Ville et initiative sur le changement climatique", l'ONU-HABITAT veut renforcer la capacité locale à faire face à la "dimension eau" dans la planification urbaine de la ville. Ils ont demandé à ARCADIS d'effectuer une mission sur le terrain dans laquelle les aspects de gestion des inondations sont examinés et expliqués aux acteurs locaux.

Une équipe de deux experts de chez ARCADIS a effectué une mission sur le terrain du 13 au 18 Septembre 2010. Au cours de cette mission, ils ont recueilli des données sur le terrain et ont eu des discussions avec les parties prenantes aux niveaux national et local. Les conclusions de leur mission, y compris des recommandations pour de futures actions, sont données dans le présent rapport. Les deux experts étaient les suivants:

- Robbert C. Steijn, Directeur des côtes et des systèmes marins, ARCADIS Pays-Bas - ingénieur côtier senior et chef d'équipe
- Sarah Beesley, Chef de projet, ARCADIS Royaume-Uni - assistant ingénieur morphologiste côtier et interprète.

En raison de la nature technique de la mission, reflétée dans la composition de l'équipe, ce rapport ne traite que des questions techniques (génie côtier et hydraulique). Les questions institutionnelles ou de planification ne sont pas considérées. L'objectif de ce rapport est de fournir des informations techniques sur le système physique lié à l'eau à Saint-Louis et de présenter des recommandations sur la façon dont ces connaissances peuvent être intégrées dans les activités d'ONU-HABITAT pour Saint-Louis. Les données techniques présentées dans ce rapport sont fondées sur les conclusions de la mission ainsi que certains résultats d'études préliminaires. Aucune étude (détaillée) n'a été réalisée.

Un résumé de la mission sur le terrain est donné au chapitre 2. Une brève introduction sur les échelles temporelle et spatiale est donnée, cela constituant une information clé au cours des débats à Saint-Louis.

Ensuite, au chapitre 3, une description (conceptuelle) du système physique est donnée, incluant les données sur les paramètres hydrauliques et côtiers, et une description globale de l'évolution et de la dynamique de la région sur les différentes échelles de

temps. Le chapitre 4 décrit plus spécifiquement les fluctuations des niveaux d'eau par rapport à la topographie du terrain.

Les chapitres 5 à 7 présentent les résultats de la mission et l'analyse ultérieure. Le chapitre 5 traite plus en détail la dynamique de l'embouchure du fleuve et les changements possibles dans un proche avenir. Il aborde également la question de savoir si la stabilisation de l'entrée serait une sage décision ou non. Le chapitre 6 traite plus des phénomènes d'érosion locale en face de la nouvelle embouchure du fleuve et le long des villages de pêcheurs de Guet Ndar et de Ndar Toute(tous deux situés sur la langue qui sépare l'estuaire de l'océan). Le chapitre 7 donne seulement une brève introduction sur le mauvais drainage des eaux pluviales dans les zones urbaines.

Les résultats de l'étude (comme indiqué dans la première version de ce rapport, en date du 6 Décembre 2010) ont été présentés et discutés lors de deux ateliers qui ont eu lieu au cours d'une deuxième mission du 13 au 18 Décembre 2010. Des informations complémentaires ont été recueillies sur le terrain et quelques nouvelles idées ont été acquises, les deux ont été inclus dans cette deuxième version du rapport (daté du 20 Janvier 2011).

Il est à noter qu'aucune étude détaillée n'a put être effectuée. Conclusions et déclarations fournies dans le présent rapport sont basées sur notre meilleur jugement professionnel seulement, en utilisant les impressions de la mission sur le terrain, les résultats des discussions avec d'autres experts et à partir de sources (données et documentation) qui ont été étudiées.

2 Rapport de mission

2.1 Objectif et Programme

L'objectif de la première mission (Septembre 2010) était de recueillir et examiner les données et informations pertinentes sur le comportement physique du système côtier (y compris l'estuaire), et de comprendre l'utilisation actuelle des terres ainsi que les modalités de croissance de la ville, y compris tous les projets d'activités économiques en cours.

Une mission d'une semaine a été effectuée sur le terrain à Saint-Louis par deux membres du personnel ARCADIS (chapitre 1) dans le but de se familiariser avec la situation locale physique. Une attention particulière a été accordée à la zone autour des côtes de la nouvelle embouchure, aux quartiers de pêcheurs de Guet Ndar, Ndar, et Goxuumbac, aux environs de l'île principale de Saint-Louis et dans les habitations existantes de Sor (voir Figure 4.3 au chapitre 4 pour une carte des quartiers de la ville). Des délibérations ont eu lieu avec les représentants locaux de la municipalité et avec les différents organismes impliqués et autres organisations ainsi qu'avec d'autres acteurs locaux et nationaux.

Le programme général de la première mission a été le suivant (voir l'annexe A pour une description plus détaillée des activités):

- Lundi 13 Septembre: Arrivée à Dakar. Rencontre avec l'ONU-HABITAT, l'UNESCO, organismes de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge, Dakar Anta Diop; transfert en voiture à Saint-Louis, arrivée dans la soirée;
- Mardi 14 Septembre: Rencontre avec les représentants de la municipalité, la DC, ARD et l'Université Gaston Berger. Reste de la journée: excursion au barrage de Diama et de la bande nord de la Langue de Barbarie (ci-après dénommée «la flèche»);
- Mercredi 15 Septembre: Visite de terrain de Saint Louis à Potou. Rencontres avec le Gouverneur de la Région et de l'ARD;
- Jeudi 16 Septembre: Rencontre avec la DC sur les stratégies de développement urbain, la collecte de données au centre de données de l'OMVS, analyse des données recueillies, des discussions avec la représentante de l'ONU-HABITAT, conversation téléphonique avec l'AFD, préparation de la présentation finale;
- Vendredi 17 Septembre: Présentation des résultats préliminaires pour les acteurs locaux. Transfert dans l'après-midi à Dakar;
- Samedi 18 Septembre: Vols retour.

L'objectif de la deuxième mission (Décembre 2010) était de présenter et discuter les conclusions relatives à l'érosion côtière et à la dynamique de l'embouchure du fleuve (la "nouvelle brèche"). Les représentants locaux semblaient s'intéresser plus particulièrement à ces deux sujets. Le programme général de la deuxième mission fut comme suit:

- Lundi 13 Décembre: Arrivée à Dakar. Transfert en voiture à Saint-Louis, discussions avec Mme Laura Petrella de l'ONU-HABITAT, rencontre avec le professeur Sy de l'Université Gaston Berger, Saint-Louis, préparatifs pour la présentation du lendemain.
- Mardi 14 Décembre: Atelier avec les représentants de la communauté, en particulier ceux des villages Guet Ndar, Ndar, Goxuumbax, et Doun Baba Dieye (les villages qui souffrent le plus de l'érosion côtière). L'atelier était présidé par le maire de Saint-Louis.
- Mercredi 15 Décembre: voyage à la Langue de Barbarie (au nord de Goxuumbac du côté nord de la nouvelle embouchure du fleuve). Discussions avec les pêcheurs locaux. Préparatifs pour la présentation du lendemain.
- Jeudi 16 Décembre: Présentation sur l'érosion côtière et sur la dynamique de l'embouchure du fleuve à la session plénière du Forum International «Changements Climatiques et Gouvernance Locale". Participation au débat à la fin des séances orales. Ce forum accueillait environ 500 personnes. Discussions préliminaires tenues par Joseph Guiebo (Conseiller) et Alioune Badiane (Directeur), tous deux de l'ONU-HABITAT.
- Vendredi 17 Décembre: Réunion finale avec les représentants de l'ONU-HABITAT, transfert en voiture à Dakar, retour à Amsterdam

Nous, les membres de l'équipe ARCADIS Rob Steijn et Sarah Beesley, tenons à exprimer notre gratitude à tous ceux qui ont contribué au succès de la mission. Chaque personne avec qui nous avons communiqué au cours de la mission a montré une grande volonté de partager avec nous ses pensées et ses informations. Ils l'ont également fait dans une atmosphère tellement amicale et ouverte qui a fait de la mission non seulement un succès en termes de collecte de données, mais aussi en échanges humains.

Nous tenons en outre à exprimer notre sincère gratitude et reconnaissance à la direction que nous avons reçue au cours de deux missions de Marie Dariel Scognamillo, Consultante pour les villes et le changement climatique de l'ONU-HABITAT, dans son engagement et soutien de Saint-Louis. Elle arrangea toutes les réunions, et eut un rôle important dans la présentation des résultats au cours de la deuxième mission.

Pour une impression photo de la première mission, référer à l'annexe B.

2.2 Quelques Considérations sur les Echelles de Référence

Lorsque nous avons affaire à des phénomènes physiques, ainsi qu'à des activités humaines, il est important de faire une distinction entre les différentes échelles de référence.

L'échelle d'espace est souvent liée aux dimensions d'un problème ou fonctionnalité côtière. Par exemple: l'échelle spatiale de la flèche est de l'ordre de plusieurs dizaines de km de long et des centaines de mètres de large (donc: km2). Cela coïncide avec l'échelle spatiale du développement global urbain de St. Louis. L'estuaire a lui-même une échelle spatiale de quelques dizaines à quelques centaines de km2, alors que les cuvettes dans certaines parties de la ville se produisent sur des échelles spatiales de quelques dizaines ou centaines de mètres carrés (m2).

L'échelle de temps est généralement considérée comme la durée nécessaire à certains procédés pour s'établir. L'échelle temporelle requise pour que la nouvelle brèche se développe en une nouvelle embouchure du fleuve (chapitre 5) a été de l'ordre de mois. Le développement de la ville se déroule sur une échelle de temps de plusieurs décennies (générations). Une élévation accélérée du niveau de la mer se trouve aussi sur l'échelle de temps des générations, mais les événements climatiques extrêmes (sécheresses et inondations) se produisent sur des échelles de temps de quelques jours à quelques mois.

Entre les différentes échelles, très souvent, une hiérarchie peut être distinguée. L'échelle au niveau le plus large fournit souvent les conditions générales (ou des tendances) pour des développements ou des processus sur une échelle de niveau inférieur. Par exemple: la retraite de la côte en face de la nouvelle embouchure du fleuve (à Doun Baba Dièye - chapitre 6) est grande sur la petite échelle temporelle et limitée aux circonstances spécifiques qui ont été causées par la nouvelle embouchure du fleuve. Mais ensuite, l'embouchure du fleuve a évolué vers le sud (sur une longue échelle de temps), éventuellement cette érosion localisée s'arrêtera.

Si les conditions générales imposées du niveau à grande échelle changent, alors les dynamiques localisées changent aussi. Il en va de même pour la planification de la ville ou des établissements humains. Si les gens ont tendance à s'éloigner des zones rurales en raison de la grande échelle spatiale et au long terme de la désertification, ceci donne une dimension importante pour les villes avoisinantes, vers lesquelles les gens se déplacent. Ce développement à grande échelle (personnes se déplaçant vers les villes) augmente la nécessité de prendre ces personnes en compte, ce qui est essentiellement un problème d'échelle locale et sur des horizons de temps court.

La «hiérarchie des échelles" signifie que si nous traitons avec la planification urbaine pour l'ensemble de Saint-Louis, nous avons à considérer les phénomènes physiques qui se produisent sur la même échelle spatiale. Et de même, si nous traitons de questions locales telles que le mauvais drainage des eaux de pluie dans certaines régions, alors nous devons examiner les processus physiques à ce niveau.

La hiérarchie ou règle des échelles de référence peut également être importante si des solutions sont envisagées. Les solutions sont souvent trouvées à la même échelle que celle du problème qu'elles sont censées résoudre. Donc, si nous traitons le problème mondial de l'élévation du niveau de la mer, seule la solution globale (réduction de CO2) peut réussir. Ou, à l'échelle locale: si nous voulons éviter de voir se remplir les cuvettes dans les rues après les fortes pluies, des solutions sur l'échelle spatiale de quelques dizaines ou centaines de m2 doit être envisagées (un meilleur drainage, le nettoyage des routes, etc.)

Nous avons essayé de structurer notre rapport dans la logique des règles d'échelles de référence. Les chapitres 3 et 4 traitent du système fluvial, estuarien et côtier dans son ensemble. Cela signifie que nous considérons des échelles de temps de plusieurs décennies à plusieurs siècles (ou plus). Le chapitre 5 porte sur la dynamique de l'embouchure du fleuve, sur une échelle spatiale de 1-10 km2, et sur l'échelle temporelle correspondante d'années à des décennies. Les chapitres 6 et 7 portent sur des problèmes plus localisés sur des échelles temporelles correspondantes à court terme.

3 Description du système côtier

3.1 Contexte

Cette section récapitule quelques données hydro-morphologiques pertinentes afin de mieux comprendre le comportement du système côtier. L'information traite simplement des données hydrodynamiques telles que courants, marées, débit des fleuves, hauteur des vagues, et quelques informations climatiques. Ces informations ont été récupérées à partir des sources suivantes:

- Volume pilote en Afrique 1 ;
- Tableaux des Marées de l'Amirauté (ATT) Volume 2 ;
- Base de Données des Fleuves de l'Unesco;
- Hydrobase (vent et vagues) d'Alkyon ;
- Références diverses figurant à la fin du présent rapport;
- Sites Internet Divers (Wikipedia et autres recherches par Google).

Les Courants Océaniques

Les courants océaniques au large des côtes de Saint-Louis sont en général très faibles. Cet emplacement est sur la zone de séparation entre le courant des Canaries dans le sens Sud-Ouest (SW) et le contre-courant Equatorial dans le sens Est. Au cours de l'année, les courants océaniques au large de la côte près de Saint-Louis montrent les tendances suivantes (en général pas très cohérentes):

- Mars-mai: Courant sens Sud avec une vitesse d'environ ¼ nœud (soit 0,1 m / s);
- Juin-août: Courant dans le sens antihoraire à une vitesse d'environ ¼ de nœud;
- Septembre-Novembre: Courant dans le sens Nord avec une vitesse d'environ ¼ de nœud;
- Décembre-Février: Courant sens Sud avec une vitesse d'environ ½ nœud.

La zone côtière de Saint-Louis peut être affectée par le phénomène de remontée d'eau en raison des vents persistants d'échange nord-est. Cela peut conduire à une augmentation temporaire (décimètres) des eaux côtières.

Les Marées (verticales et horizontales)

D'après les tables ATT les caractéristiques suivantes de la marée verticale (niveaux d'eau) à Saint-Louis ont été établies:

- MHWS et MLWS: +1,6m et +0,5m (variation de marées de vives eaux de 1,1 m);
- MHWN et MLWN: +1,3m et +0,8m (variation de marées de mortes eaux de 0,5 m);
- MSL: 1,03 au-dessus du zéro des cartes (CD).

Un exemple de la fluctuation de la marée verticale (pour Septembre 2010) est illustré en figure 3.1. Notez que ces chiffres sont valables pour les côtes maritimes de Saint-Louis (donc pas à l'intérieur de l'estuaire). Les niveaux d'eau ont été calculés en utilisant les composantes de marée comme celles-ci sont données dans l'ATT. La marée est semi-diurne, ce qui signifie que deux pleines mers et deux basses mers se produisent chaque

jour. Sur un jour particulier, les deux pleines mers successives peuvent différer considérablement.

La marée de vives eaux (le plus haut niveau de l'eau des changements) a eu lieu vers le 11 août et à nouveau deux semaines plus tard. Ces périodes coïncident avec pleine et nouvelle lune. Les marées de mortes eaux (avec les fluctuations les plus basses) se produisent une semaine après la marée de vives eaux. Lors des inspections sur le terrain (14-16 Septembre) les marées étaient entre leur niveau moyen et leur niveau de mortes eaux.

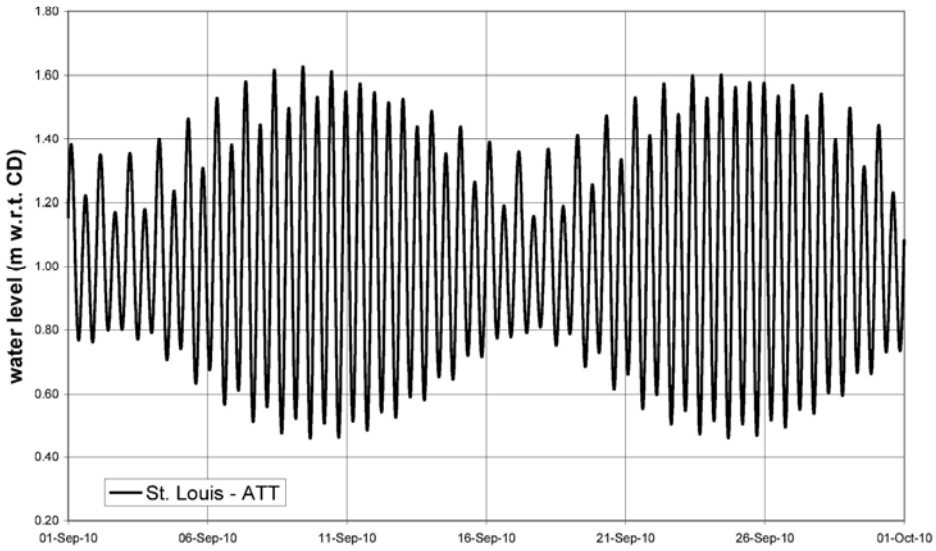


Figure 3.1 Calcul des fluctuations du niveau d'eau des marées au large de Saint-Louis (Septembre 2010)

La marée horizontale large de la côte (vitesses de débit de marée), à l' écart de l'embouchure du fleuve, a tendance à se tenir du Nord ou de l'Ouest en marée montante (lorsque les niveaux d'eau montent) et du Sud ou de l'Est ou en marée descendante, parallèlement à la côte. Ces courants de marée sont généralement très faibles et au large (plus de quelques lieues) de la côte, les courants de marée sont négligeables.

Près de l'embouchure du fleuve, un courant de marée se conduit vers l'estuaire lorsque la marée monte (les niveaux d'eau montent) et s'en éloigne quand les niveaux d'eau baissent à nouveau. En général, le courant sortant /reflux (dit descendant) à marée descendante, est plus fort que le courant venant/ flux de la marée montante. C'est parce que le débit du fleuve augmente le courant reflue. Dans des conditions de haut débit du fleuve, au cours de la saison des pluies, le courant sortant (en intensité et durée) est plus fort et plus long, que le courant montant.

En ce qui concerne l'embouchure du fleuve Sénégal à Saint Louis aucune information spécifique sur les vitesses d'écoulement de marée ne nous était disponible. Toutefois, au cours de la mission sur le terrain, des bouteilles flottantes ont été utilisées pour estimer la vitesse de débit reflux (debout sur la plage sur le côté nord de l'embouchure). La vitesse d'écoulement reflux estimée était d'environ 1m/s, à quelques 10-100m de la rive.

Les Vents

Les alizés du Nord-est sont relativement frais au nord de 20°N, mais au sud du 20°N ces vents apportent l'air poussiéreux chaud et sec de l'intérieur du continent africain. Ces vents chauds, appelés "Harmattan" sont au plus intense en Janvier entre 10° à 30°N, et la brume épaisse de poussière transportée vers la mer cause des problèmes de navigation dans certains endroits. La force moyenne de l'Harmattan est de force 3 à 4 Bf en toutes saisons et les tempêtes sont rares.

ARCADIS maintient sa propre base de données mondiale des conditions de vents et vagues, établie d'après les rapports de navires. A partir de cette base de données, le climat éolien offshore annuel a été déterminé pour la zone comprise entre (13.9°N;-19.3°E) et (18.3°N;-15.7°E). Les résultats sont donnés dans la figure 3.2 (rose des vents).

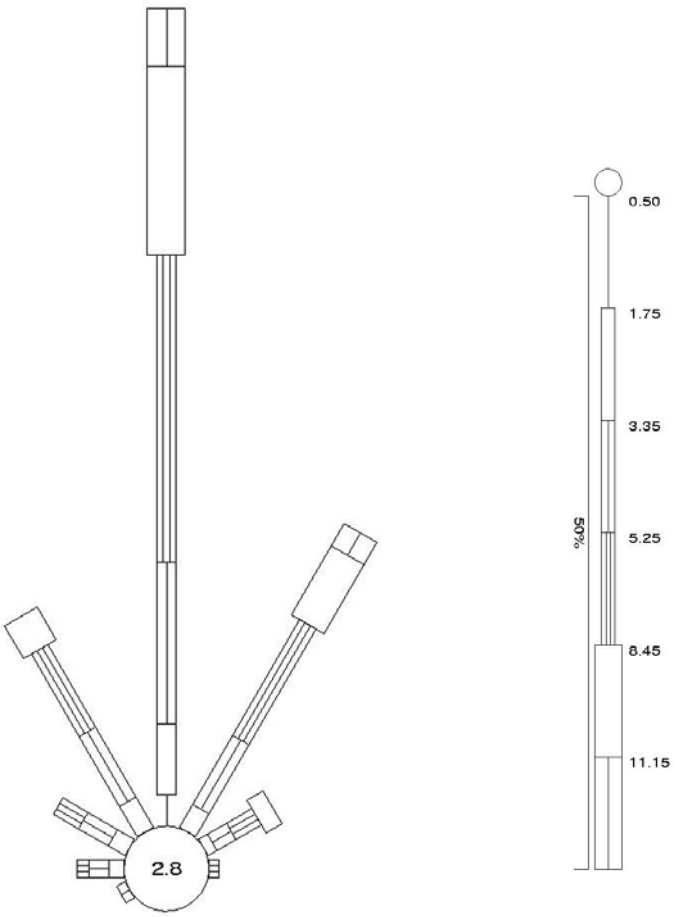


Figure 3.2: Rose des vents annuelle au large de la cote de Saint-Louis

Les roses des vents et vagues sont un moyen rapide de résumer les statistiques de conditions de houle directionnelle. Le nombre au centre de la rose représente le pourcentage du temps pendant lequel les conditions de calme se produisent. La longueur d'un bras de rose représente le pourcentage du temps pendant lequel les vents ou les vagues viennent de la direction vers laquelle bras se dirige (voir la barre d'échelle indiquant le pourcentage représenté par unité de longueur). La longueur de chaque section du bras représente le pourcentage du temps pendant lequel les vagues viennent de cette direction et se produisent dans une classe de hauteur donnée. La classe de hauteur est indiquée par la largeur d'une section du bras et de son modèle.

Il peut être remarqué sur la figure ci-dessous que la direction du vent dominant est du Nord au Nord-est avec des vitesses de vent moyennes de l'ordre de 5 à 8 m/s.

Les Vagues (mer et houle)

Les vents de mousson et alizés produisent généralement une houle faible le long des eaux côtières. Les maximales annuelles des niveaux de mer et de houle ont été récupérées à partir de notre propre base de données pour la même zone que celle du climat éolien offshore. Les résultats sont présentés en figure 3.3 (rose des vagues) et au tableau 3.1 (probabilité conjointe de l'événement). La direction dominante de la vague au large de la côte est du Nord vers le Nord-Est, avec des hauteurs moyennes de vagues de l'ordre de 0,75 m à 1,25 m.

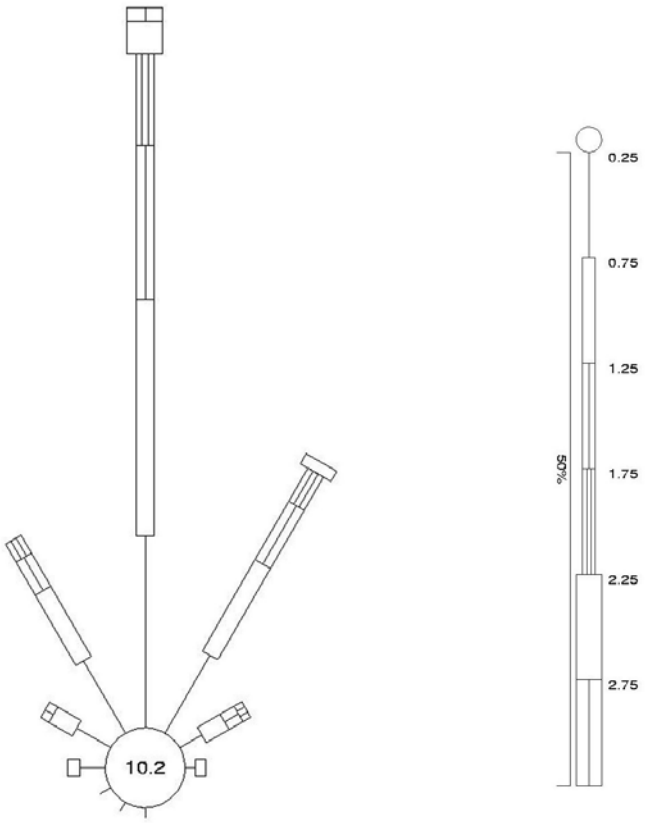


Figure 3.3: Représentation annuelle du climat des vagues d'eaux profondes (mer et houle) au large de Saint-Louis

L'énergie de flux de vagues annuelle, P, est le produit de l'énergie des vagues ($E = \frac{1}{8}\rho g \cdot H_s^2$) et de la célérité du groupe d'ondes. La direction du flux d'énergie peut être calculée pour chacun des secteurs de direction des vagues ci-dessus, et ensuite peut être résumée pour obtenir la direction de l'énergie du flux des vagues annuelle (ce qui est pertinent pour déterminer les capacités de transport des sédiments littoraux – voir ci-dessous). Utiliser tous les secteurs de direction du Tableau 3.1 conduit à une direction de P de 350oN. Conformément à la norme de conventions nautiques c'est la direction d'où P «vient». Si nous laissons de côté la direction du secteur -15°N à +15°N (ces vagues ne peuvent pas vraiment atteindre la côte à Saint-Louis), la direction de l'énergie du flux de vagues annuelle au large des côtes devient 313°N. Le secteur de direction N domine les climats du vent et des vagues.

Une ligne orientée perpendiculairement à la plage à Saint-Louis est (en direction du large) orientée vers 274°N. Cela signifie que l'énergie du flux de vagues au large des côtes atteint la zone littorale avec une obliquité relativement importante (angles de 39° ou 76°, selon que le Nord soit ignoré ou pas).

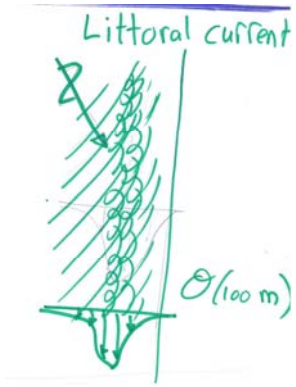
Hs meters		direction degrees												
Lower	Upper	-15 to 15	15 to 45	45 to 75	75 to 105	105 to 135	135 to 165	165 to 195	195 to 225	225 to 255	255 to 285	285 to 315	315 to 345	Total
<	,25	5,75	,93	,30	,18	,07	,11	,32	,20	,20	,46	,60	1,06	10,18
,25	,75	10,80	5,06	1,44	,59	,23	,30	,53	,58	,69	1,43	2,21	4,71	28,56
,75	1,25	13,31	5,95	1,47	,57	,15	,16	,29	,32	,34	,68	1,52	4,56	29,31
1,25	1,75	8,72	3,77	,91	,31	,07	,08	,11	,09	,11	,24	,53	2,15	17,09
1,75	2,25	5,19	2,18	,50	,17	,03	,03	,03	,06	,05	,11	,24	1,18	9,76
2,25	2,75	1,77	,65	,18	,07	,01	,01	,01	,02	,01	,02	,06	,30	3,09
2,75	3,25	,80	,30	,09	,03	,01	,00	,00	,01	,	,01	,04	,10	1,39
3,25	4,25	,28	,11	,05	,02	,	,00	,00	,00	,01	,00	,02	,04	,53
4,25	5,25	,04	,02	,00	,	,	,	,00	,00	,	,	,01	,00	,08
5,25	6,25	,01	,00	,	,	,	,	,	,	,	,	,00	,	,02
6,25	7,25	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,
7,25	8,25	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,
8,25	9,25	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,
9,25	10,25	,	,	,	,	,	,	,00	,	,	,	,	,	,00
10,25	11,25	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,
11,25	12,25	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,
12,25	13,25	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,
13,25	14,25	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,
14,25	15,25	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,
15,25	>	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,	,
Total		46,67	18,97	4,95	1,93	,57	,69	1,29	1,28	1,40	2,95	5,22	14,10	100,00

Season:	All Year
Period:	1900 to 2100
Location:	Hydrobase.net Location (x = -17.75, y =16.25)
Source:	Swan computations
No. of obs.:	45884
Type of data:	Highest of sea & swell
Tidal phase:	undefined level
Record:	all records

Tableau 3.1: Probabilité commune de l'événement (%) de la mer à son plus haut et la houle dans les classes données

La Dérive Littorale

Les vagues approchant un rivage avec un angle oblique génèrent un courant littoral (dérive littorale). Ce "fleuve côtier" transporte des particules de sable des fonds marins qui sont agitées par les turbulences résultant des vagues de rupture (voir croquis ci-dessous).



Pour une meilleure compréhension du comportement du littoral, il est important de quantifier la capacité de transport de sable littoral. Nous avons utilisé un modèle informatique pour effectuer ces calculs (UNIBEST). Il est à noter que nous ne disposons pas de données sur la taille des particules de grains de sable, donc nous avons fait nos propres estimations d'après nos enquêtes sur le terrain. La taille moyenne des grains de sable adoptée, dans les calculs: D_{50} = 200 μm.

Les calculs (intégrés) des taux annuels de transport littoral sont les suivants:

- Au Nord: 15.000 m^3/an
- Au Sud: 190.000 m^3/an
- Résultant vers le Sud: 175. 000 m^3/an (qui devient 115.000 m^3/an si l'on utilise D_{50} = 300 μm)

Le taux le plus élevé de transport littoral a été calculé à une profondeur d'environ MSL -2m, ce qui devient négligeable à des profondeurs supérieures à MSL -6m.

Le Climat

Le temps chaud et humide des pluies de la mousson persiste la plupart de l'année près de l'équateur. Plus au nord, aux environ de 5° à 18°N (NB: St. Louis se trouve à environ 16°N), la longueur de la saison des pluies s'amoindrit progressivement, et est régie par la mesure dans laquelle la Zone de Convergence Inter-Tropicale se déplace vers le Nord. Il y a peu de signes d'une saison des pluies sur la côte africaine N d'environ 18°N.

Les températures moyennes de surface de la mer près de St. Louis sont les suivantes:

- Février: 18 à 19°C
- Mai: 20 à 21°C
- Août: 26 à 27°C
- Novembre: 24 à 25°C

3.2 Genèse du Littoral

Historique du développement géologique à grande échelle

Le delta du fleuve Sénégal a une histoire longue et intéressante par rapport à sa géo-genèse. Considérant à grande échelle la côte du Sénégal et de la Mauritanie, les contours du delta d'un fleuve historique peuvent être observés. Saint Louis est situé à l'extrémité sud de ce delta.

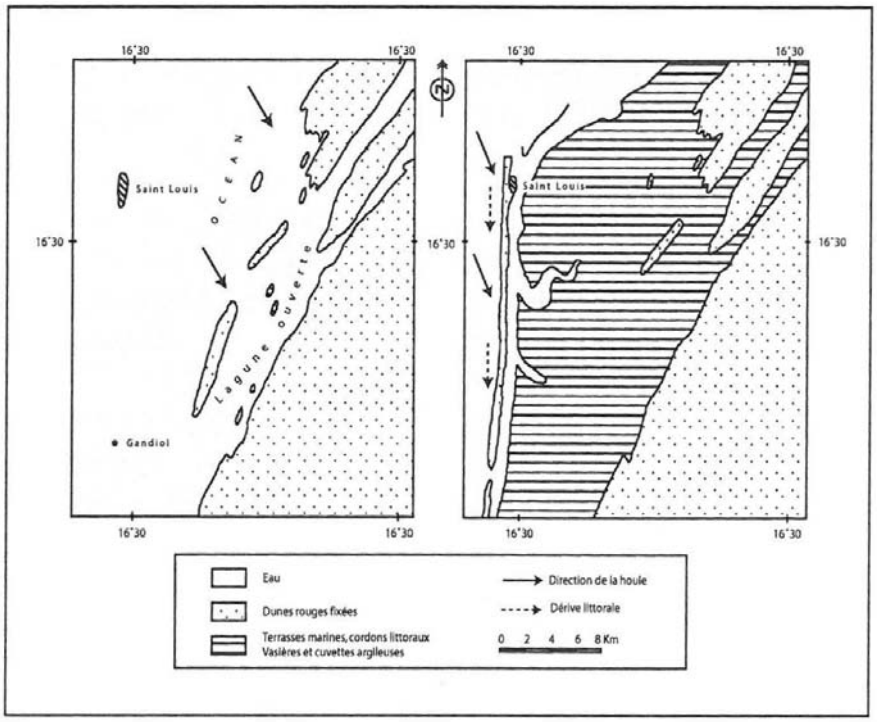


Figure 3.4: Evolution de la zone côtière au cours des derniers 5000ans [source: Sy, 2009]

Le delta du fleuve Sénégal a évolué pendant des milliers d'années. La figure 3.4 présente la zone autour de Saint Louis il ya 5000 ans (à gauche) ainsi que la situation actuelle (à droite).Comme on peut le constater, il y a 5000 ans, l'ile de Ndar (avec son centre historique d'aujourd'hui) était située à environ 15km dans la mer. Le fleuve Sénégal débouchait à cette époque dans l'océan par plusieurs embouchures plus au nord. Petit à petit, l'ancien delta s'est rempli d'alluvions/de dépôts fluviaux.

Pendant des milliers d'années, le fleuve Sénégal a construit un delta "rabougri", qui est visible sur la carte vieille de plus de 200 ans montrée en figure 3.4a (de T Jefferys, un géographe britannique). C'est un genre de triangle avec de fortes influences marines. La forme de la côte du delta sur la carte 1789 est arrondie, ce qui est un peu moins le cas pour les côtes aujourd'hui. Sans nouveaux dépôts fluviaux, le delta entier est appelé à disparaître par les forces de l'érosion marine, mais ce processus se produit généralement sur une échelle des temps géologiques (des milliers d'années). Si l'on compare la côte de 1789 avec celle d'aujourd'hui (voir Figure 3.5), alors on ne peut pas conclure que le delta - dans son ensemble disparaisse rapidement.

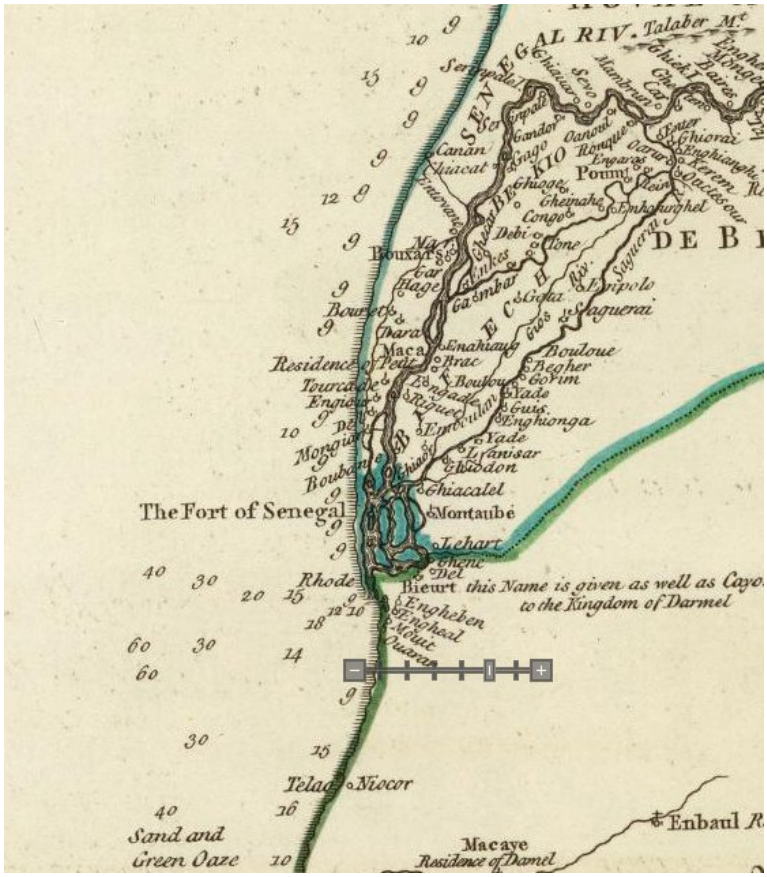


Figure 3.4a: Carte historique du delta du fleuve Sénégal – 1789

Au cours des derniers siècles, l'emplacement de l'embouchure du fleuve s'est considérablement déplacée vers le sud. Les quatre flèches rouges sur la figure 3.5 ci-dessous (source: Google Earth), indiquent les emplacements des anciennes embouchures du fleuve (maintenant fermées). La seule embouchure du fleuve Sénégal est maintenant située au sud de la ville de Saint-Louis.

Vers 1850, l'embouchure du fleuve s'est déplacée du nord de Saint-Louis au sud de Saint-Louis. A cette époque là, la flèche (Langue de Barbarie), s'étendait plus au sud. Entre 1850 et 1900, la flèche a augmenté de 15-16 km, ce qui donne un taux de migration moyenne de 300 m/an.

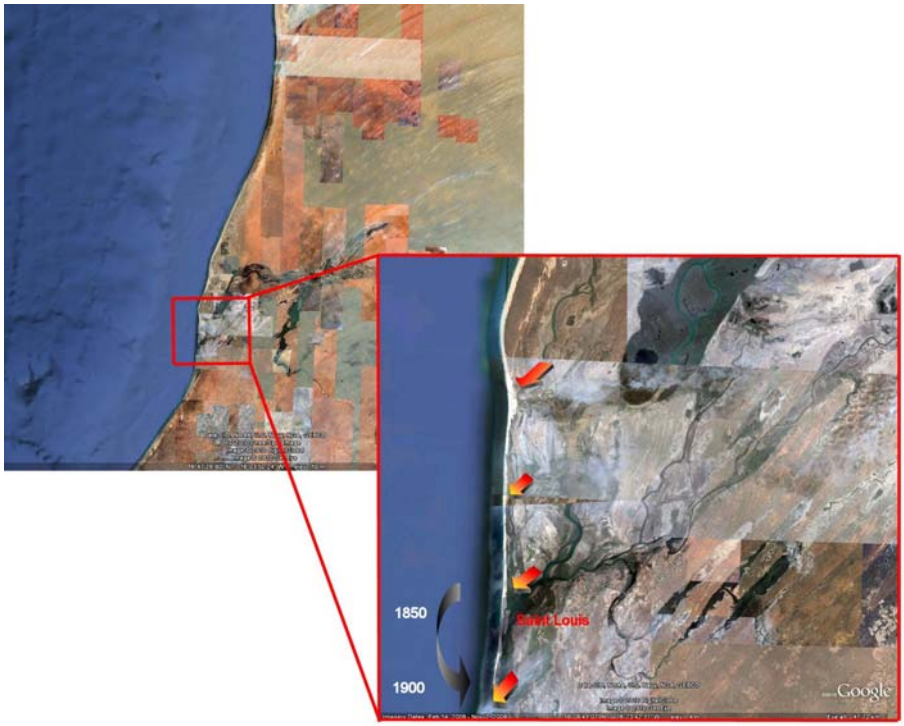


Figure 3.5: Positions historiques de l'embouchure du fleuve Sénégal (image satellite)

Au cours des derniers siècles, la dynamique du fleuve Sénégal a beaucoup changé. Comme on peut le voir sur la figure 3.6, les contours des précipitations (en termes de mm / an) évoluent progressivement en direction du sud. Cela signifie en fait que le Sénégal s'assèche.

En 1985, le barrage de Diama fut construit (voir aussi la section 3.3), ce qui altéra le régime hydraulique du fleuve Sénégal. Barusseau, et al. (1998) décrivent l'impact de la construction du barrage de Diama sur l'estuaire du fleuve Sénégal. A partir de plusieurs mesures, ils ont conclu que:

- L'embouchure du fleuve a migré de 2,8 km en direction sud en 5 ans, ce qui est en moyenne 560 m/an. Vu que la vitesse de migration d'une embouchure de fleuve ne dépend pas tellement du régime hydraulique du fleuve (mais plutôt du transport littoral), il ne peut pas être expliqué pourquoi ce chiffre est presque le double du chiffre indiqué ci-dessus;
- Les dépôts en provenance du fleuve vers l'estuaire et la côte n'ont pas eu lieu (les données sur la situation avant la mise en place du barrage n'ont toutefois pas pu être trouvées).

Figure 3.6: Contours des précipitations pour les périodes de 1931-1960 et de 1961 à 1990 [source: http://www.cartographie.ird.fr]

Le delta du fleuve Sénégal, qui se trouve pour la plupart en Mauritanie avec la flèche le long de sa frange sud, semble s'être formé dans les 5000 dernières années. Le delta a été construit principalement avec les sédiments déposés par le fleuve Sénégal. Dans les derniers siècles, l'embouchure du fleuve s'est déplacée vers le sud et le transfert de sable a été réduit probablement en raison d'écoulements d'eau plus faibles (taux de la réduction des précipitations dans le bassin de drainage du fleuve). Aujourd'hui, le fleuve Sénégal n'apporte plus de sable dans le delta. Les différents barrages jouent un rôle important à cet égard. Les courants induits par les vagues et autres courants marins redistribuent désormais le sable le long de la côte, ce qui conduit à une réforme de l'ancien delta. Cette redistribution des anciens dépôts de sable du delta, conduit à l'érosion aux endroits où les anciennes branches du fleuve débouchaient dans la mer (là où le front du delta a progressé le plus loin). La migration de la flèche vers le sud est causée par le sable qui est transporté à partir de ces zones en érosion vers sud (dérive littorale - Section 3.1).

D'après la forme encore visible du delta (voir Figure 3.7), nous prévoyons que la flèche continuera à recevoir le sable de ces vieux dépôts de sable pendant au moins les prochains 50 à 100 ans. Il est probable qu'en raison de l'élévation accélérée du niveau de la mer, toute la côte fera de toute façon l'objet d'un changement de système avant que l'approvisionnement en sable de l'ancien delta cesse.

Ci-dessous la figure 3.7 représente la zone côtière au nord de Saint-Louis. Une ligne droite est tracée parallèlement à la côte de Saint-Louis. Comme on peut le constater, la côte au nord de Saint-Louis n'est pas rectiligne. Les contours de l'ancien delta peuvent encore être observés avec la flèche à la frange sud de celui-ci.

Figure 3.7: Restant du delta à l'ancienne embouchure, au nord de Saint Louis [Photo: Google Earth]

Système côtier morphologique existant localisé sur Saint Louis

Vers 1850, la flèche (Langue de Barbarie) a été créé après que l'embouchure du fleuve ait changé du nord vers le sud de Saint Louis. La flèche se développe en direction du sud, avec une vitesse de propagation de l'ordre de 300 à 500 m/an. La figure 3.8 représente la croissance de la flèche de 1983 à 1998 (source: Ibrahima Diop). La vitesse moyenne de migration de l'embouchure du fleuve dans cette période a été en fonction de cette carte d'environ 500 m/an (7 km dans 15 ans). La longueur maximale de la flèche était d'environ 28 km.

Figure 3.8: Elongation de la flèche (1983 - 1998) d'après I. Diop.

Une vérification rapide de ces taux de croissance peut être réalisée en utilisant les taux de transport littoral calculés (175.000m^3/an - voir la section 3.1). Nous supposons une

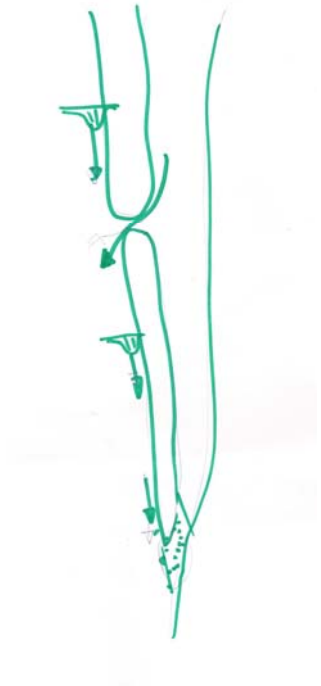
largeur de la flèche de 100 m et un profil de hauteur de 7 m (à partir de MSL -5 m jusqu'à MSL 2 m). Si la flèche se développe de 300 m/an, un apport de sable du littoral total de 210.000 m^3/an serait nécessaire. Ce chiffre correspond en grande partie à la capacité de transport calculée (175.000 m^3/an), ce qui démontre que 300 m/an est peut-être plus plausible que les 500 m/an (ou plus).

Avec une longueur de flèche de plus en plus longue, la longueur du fleuve augmente aussi, ce qui entraîne une augmentation des niveaux d'eau du fleuve, près de Saint Louis (sinon l'eau du fleuve ne peut pas s'écouler de manière efficace).

Dès que la différence entre les niveaux d'eau de chaque coté de la flèche devient trop importante, la flèche se divise (voir croquis ci-dessous). Depuis 1850, 19 ruptures ont été enregistrées. Toutes n'ont pas été importantes; certaines d'entre elles se sont fermées aussitôt après et ne se sont pas développées en une nouvelle embouchure stable du fleuve.

Dans le cas d'une brèche importante, une nouvelle embouchure du fleuve se forme à la partie la plus septentrionale de la flèche (près de Saint-Louis). Dans une telle situation, deux embouchures du fleuve existent et le fleuve s'écoule par celle la plus au nord. A l'embouchure Sud du fleuve, le transport littoral des sédiments reste le même, alors que le débit (de marée et du fleuve) vers l'embouchure est considérablement réduit. Par conséquent, l'embouchure Sud du fleuve sera fermée aidée par la contribution du sable de la rive nord (voir croquis ci-dessous).
Sur le côté nord de l'embouchure nord du fleuve, une flèche se forme à nouveau et l'embouchure du fleuve est peu à peu «poussée» vers le sud. Ce cycle naturel se répète avec une périodicité de l'ordre de quelques dizaines d'années. Des ruptures de la flèche

se sont produites fréquemment dans le passé durant les périodes de hautes crues du fleuve ou de tempêtes océaniques prolongées.



Les Débordements

Les vagues de l'océan qui se brisent sur la plage provoquent un écoulement vers le haut de la plage, appelé la remontée des vagues (en $m^3/m/s$). Ce flux d'eau atteint les niveaux plus élevés de la plage lorsque le niveau d'eau moyen est élevé, quand les vagues sont hautes, ou surtout si les deux sont élevés. Dans des conditions spécifiques de tempête, il est possible que l'eau déferle même au dessus de la Langue de Barbarie. Un tel phénomène est appelé un débordement.

Les pêcheurs locaux ont mentionné que lors de grands orages, l'eau traverse en effet leurs rues (les plus basses) de la mer vers l'estuaire. Il a également été mentionné que la Langue de Barbarie a connu plusieurs percées dans le passé, qui se sont fermées immédiatement après les événements. Ces «percées» ne peuvent être comparées avec les ruptures de l'intérieur, qui restent généralement ouvertes et conduisent à une nouvelle embouchure du fleuve. Les «percées» qui se produisent au cours d'un débordement n'ont généralement pas une capacité de récurage qui suffise à faire une brèche stable. Une rupture du côté fleuve, cependant, est causée par de grandes quantités d'eau qui coulent généralement avec d'énormes capacités à récurer. C'est pourquoi une rupture depuis le côté fleuve (qui heureusement se produit uniquement si le gradient hydraulique est suffisamment important: voir ci-dessus), peut conduire à une nouvelle embouchure, tandis que les ruptures côté mer (par débordement) se referment aussitôt produites.

Ces débordements peuvent conduire à un mouvement progressif de l'intérieur de la flèche de sable vers le fleuve. Pour un emplacement fixe donné, tel que la première rangée de maisons dans les trois villages de pêcheurs, ce mouvement progressif sera traduit en fait comme érosion. Après tout: la plage en face des villages se réduit en largeur et la mer se rapproche des maisons. Toutefois, ce phénomène n'est pas tant d'érosion en termes de pertes de sable, mais d'un mouvement relatif de la flèche dans

son ensemble. L'érosion à grande échelle n'est pas très probable en raison des dépôts de sable de l'ancien delta qui alimentent encore la côte. Mais les débordements peuvent, en effet, s'ils se produisent fréquemment à de nombreux endroits, mener à des problèmes côtiers semblables à l'érosion.L'inspection de la côte sur la rive fluviale de la Langue de Barbarie n'a pas montré de signes évidents de cônes alluviaux. Ce sont des dépôts de sable en éventail qui se trouve parfois sur le côté baie d'un événement de débordement historique. Ainsi, le sentiment général est que le phénomène de débordement ne conduira pas à un mouvement rapide de la langue de Barbarie.

Nous avons trouvé un endroit particulier où les débordements ont probablement causé le transport de sable des terres au travers de la flèche: juste au nord du village de pêcheurs de Goxuumbac. La hauteur de la Langue de Barbarie est ici beaucoup plus faible (estimée visuellement qu'elle ne soit pas plus de 3 m au-dessus du MSL). La photo ci-dessous a été prise au cours de la deuxième mission, le 15 Décembre 2010 à cet endroit (en regardant vers le nord, vers la Mauritanie). L'appareil photo est orienté un peu vers l'estuaire. Les dépôts de sable ont recouvert la végétation d'origine. Une étroite bande de déchets a été trouvé, ce qui borde bien l'ampleur du (dernier) cône de débordement. La largeur de cette embouchure de débordement a été estimée à environ 200-300 m. Le volume de sable à l'intérieur du cône de débordement est difficile à estimer, mais si nous supposons une surface de 30.000 m2 (300 m x 100 m) et sur une couche de 1 m d'épaisseur, le volume pourrait avoisiner les 30.000 m^3.

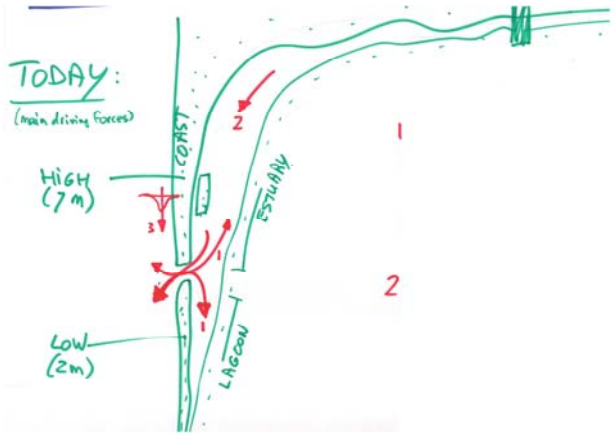
La hauteur de l'embouchure de débordement est estimée à au moins 1 ou 2 m en dessous du niveau des rues de Goxuumbac. Depuis, il a été rapporté que, dans des conditions de tempête, l'eau s'écoule au travers des rues de Goxuumbac, cela signifie que le débordement va sûrement être activé.

L'effet à long terme de ce cône de débordement est qu'il provoque l'érosion des plages. C'est une sorte de «puits de sable". Supposons que les 30.000 m^3 ci-dessus aient été déposés sur une période de dix ans, puis une perte annuelle totale de 3.000 m^3 se soit produite. Cette perte de sable sera distribuée le long d'une certaine étendue de côtes (en raison de l'impact des vagues et des courants), supposons une distance de 3 km. Sous ces hypothèses très approximatives, ceci pourrait expliquer un retrait de la plage d'environ 1 m/an, ce qui est important.

Lagune ou Estuaire

Le croquis ci-dessous montre les mécanismes d'écoulement différents après la création d'une nouvelle embouchure du fleuve (qu'elle soit d'origine humaine ou naturelle, comme décrit au chapitre 5). L'effet de remplissage et de vidange de la marée génère des courants de marée (indiqué par 1). Le débit du fleuve (indiqué par 2) va directement du barrage de Diama à l'embouchure du fleuve et dans l'océan. Le long de la plage, les vagues génèrent un flux littoral (dérive littorale) en se brisant, indiqué par 3 (expliqué dans la section 3.1).

Le système au nord de l'embouchure reçoit les eaux douces du fleuve et l'eau salée des marées; cette partie est appelée estuaire. La partie sud du bassin ne reçoit plus l'eau douce du fleuve et devient salée. Cette partie est appelée lagune.



L'extraction de sel dans ce que nous appelons maintenant la lagune est une des activités économiques. La production de sel a effectivement augmenté après 2003, quand la nouvelle embouchure a été formée (chapitre 5). La conséquence négative d'un changement de système d'estuaire à celui de lagune, est que la nature doit s'adapter aussi. Les mangroves et d'autres valeurs écologiques vont en souffrir, même si on peut dire que ce phénomène s'est déjà produit plusieurs fois dans le passé et que ce changement peut être considéré juste comme une fluctuation naturelle.

3.3 Le Fleuve Sénégal

Le fleuve Sénégal draine un bassin d'environ 300.000 km^2. Un de ses principaux affluents (Bahfing) provient des montagnes de la République de Guinée. L'autre affluent principal (Bahkoye) provient du bassin de Siguiri et incise un plateau au Mali. Sur son chemin, le fleuve reçoit des apports de nombreux petits affluents, qui évoluent tous dans les régions tropicales humides. Le régime hydrologique du fleuve est donc déterminé par les pluies dans les régions supérieures plutôt que par les régions semi-arides et arides qu'il

traverse avant d'atteindre l'océan Atlantique. Actuellement, toutes les eaux du fleuve atteignent l'océan à Saint-Louis.

Les informations sur le débit du fleuve sont dérivées de la base de données de l'écoulement fluvial de l'UNESCO. Cette base de données contient les valeurs annuelles maximales, minimales et moyennes d'écoulement ainsi que les valeurs mensuelles maximales, minimales et moyennes d'écoulement. Les figures 3.9 et 3.10 représentent les valeurs annuelles et mensuelles mentionnées pour la station de Dagana. Cette station est située à environ 120 km en amont du barrage de Diama , lui-même à environ 40 km en amont de Saint-Louis.

La figure 3.9 indique que les débits les plus importants se produisent entre les mois d'août et novembre. Les débits les plus faibles peuvent être observés durant les mois de Janvier à Juin. Le débit le plus élevé observé est d'environ 3.300 m^3/s, alors que 2.300 m^3/s représentent les valeurs élevées moyennes.the mean high values.

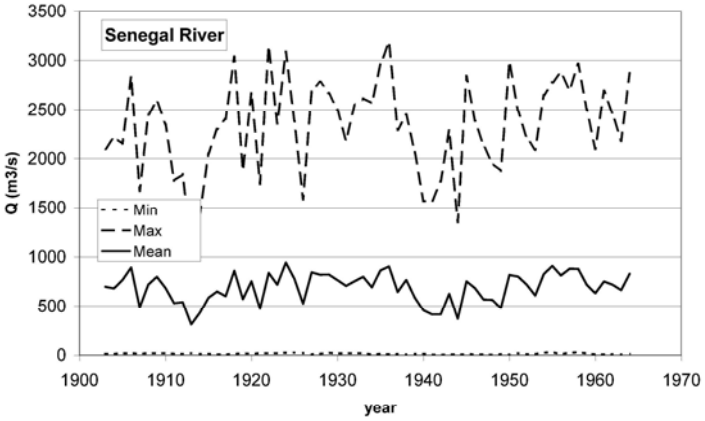


Figure 3.9. Taux de débit du fleuve pour la période 1900 – 1965

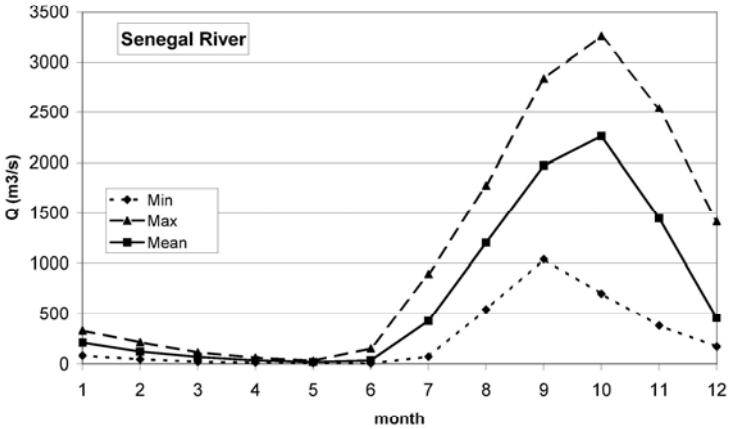


Figure 3.10: Distribution des écoulements du fleuve sur l'année (période 1900-1965)

Organisation pour la Mise en Valeur du Sénégal (OMVS)

L'OMVS fut constituée en 1972. Ses prédécesseurs avaient déjà une histoire séculaire de tentatives pour développer le potentiel hydraulique du fleuve Sénégal. Les cinq Etats membres coopèrent au sein de l'OMVS et prennent des décisions stratégiques communes pour la gestion du régime hydraulique du fleuve.L'OMVS a cinq défis stratégiques (OMVS, 2002), à savoir:

- Sécurité alimentaire des personnes vivant dans le bassin;
- Préservation de l'équilibre des écosystèmes;
- Réduction de la vulnérabilité des économies des États membres vis-à-vis des aléas et des extrêmes climatiques;
- Sécurisation et amélioration du revenu des personnes vivant dans le bassin;
- Accélération de l'économie des États membres.

Le développement des voies navigables et des infrastructures portuaires fait partie de la stratégie de l'OMVS.

Un certain nombre de barrages ont été construits pour contrôler le régime du fleuve. Certains de ces barrages furent construits pour produire de l'électricité, d'autres ont d'autres objectifs. Le barrage de Diama, par exemple, a été construit pour empêcher l'eau salée de pénétrer dans les parties basses du fleuve. De cette manière l'agriculture, la régénération du couvert végétal dans les zones humides et l'amélioration de l'approvisionnement en eau potable ont été améliorées. Le barrage de Diama est en aval la limite de la gestion du bassin l'OMVS et en amont la limite de l'estuaire.

4 Elévations des Eaux et des Terres

4.1 Introduction

La caractéristique principale de la ville de Saint-Louis, c'est qu'elle soit entourée d'eau (la ville a été construite sur trois îles). La nappe phréatique est peu profonde et la surface est relativement basse par rapport au niveau de la mer. Les niveaux d'eau autour de la ville varient à différentes échelles de temps (quelques heures à plusieurs décennies) en raison de:

- L'océan. Les débordements côtiers se produisent parfois, ce qui peut faire augmenter le niveau moyen de l'eau de mer de cm à dm. A cette grande échelle, l'augmentation du niveau des mers se fait également sentir aussi bien à l'intérieur de l'estuaire et la lagune, et donc dans les eaux entourant la ville. La région n'est pas sensible aux basses pressions ou aux ouragans, ce qui à d'autres endroits dans le monde pourrait augmenter le niveau d'eau de 0,5 à 1m pour une durée de plusieurs jours.
- Les marées. Une fois que l'eau côté mer de l'embouchure commence à monter, un dénivelé du niveau d'eau commence à se développer. Après un certain temps, ceci conduit à un afflux d'eau de mer dans l'estuaire (vers la ville) et dans la lagune (vers le sud). Les niveaux d'eau commencent alors à augmenter. Les niveaux d'eau dans l'estuaire descendent une fois que les niveaux d'eau en dehors de l'embouchure deviennent suffisamment bas. La pénétration de la marée dans l'estuaire dépend de la profondeur de l'eau, de la géométrie, des composants de la marée et de la distance à l'embouchure. Après que la nouvelle embouchure se soit développée, ce qui est décrit dans le chapitre 5, cette distance est devenue brusquement plus petite, résultant en une augmentation soudaine des variations des niveaux de la marée (hautes eaux plus hautes et basses eaux plus basses). La marée pourrait plus «facilement» atteindre la ville.
- Le débit du fleuve. Le volume d'eau qui passe par le barrage de Diama passe dans l'estuaire et se jette dans l'océan par l'embouchure du fleuve. L'eau du fleuve n'atteint pas le lagon au sud de l'embouchure et n'a donc aucun effet sur les niveaux d'eau dans cette partie du système. Si le débit du fleuve est élevé au barrage de Diama, les niveaux d'eau vont augmenter en raison de la capacité croissante d'écoulements de l'estuaire. Cette capacité est fonction de la distance, la profondeur moyenne, de la géométrie, des caractéristiques d'écoulements, mais aussi de la distance entre le barrage et l'embouchure. Cette distance est devenue plus petite après que la nouvelle embouchure se soit développée et en conséquence de cela, la montée des eaux due aux débits élevés du fleuve est devenue moindre. Il est devenu "plus facile" pour l'eau du fleuve de s'écouler vers la mer.

Il n'y a pas d'autres phénomènes physiques (tels que les eaux souterraines, les précipitations, le drainage, etc) qui influencent visiblement les niveaux d'eau autour de la ville. A long terme, toutefois (décennies), l'élévation du niveau de la mer va aussi augmenter les niveaux d'eau. Tant que l'ensemble du système côtier ne change pas radicalement (comme la perte de la broche conduisant à une côte ouverte à la place d'un estuaire), les variations de niveau d'eau sont «juste» amplifiées avec la montée réelle du

niveau des mers. Comme mentionné dans la section 3.2, nous ne prévoyons pas un tel changement radical des systèmes dans les 50-100 prochaines années.

La fluctuation des niveaux d'eau n'est pas en soi un problème; sauf quand le niveau d'eau dépasse les hauteurs de la terre. Sans aucune protection, comme des digues ou des murs de soutènement, la région serait alors inondée. Ceci est arrivé à St. Louis dans le passé, ce qui a initié la construction de diverses digues basses et autres murs. Ces structures n'ont toutefois pas l'air d'être robuste, ni fermées dans le sens que les mesures entourent complètement une parcelle de terrain. Pour comprendre la menace potentielle d'inondation par des niveaux d'eau dépassant les hauteurs topographiques, il est important de connaître les niveaux d'eau et les hauteurs des terres. Dans ce chapitre, les données pertinentes présentées sont pour la plupart celles que nous avons recueillies au cours de la mission sur le terrain ainsi que certaines informations présentées dans la thèse de maîtrise de M. Amadou Seck, un ancien habitant de Saint-Louis qui a fait sa maîtrise sur la gestion des inondations à l'UNESCO-IHE à Delft, aux Pays-Bas.

4.2 Situation

Variations des Niveaux d'Eau

La montée relative des eaux est l'effet combiné de l'affaissement local du sol et de l'élévation eustatique du niveau des océans. Bien que les données sur les affaissements du terrain nous soient inconnues, nous ne prévoyons pas que cela contribue beaucoup à la hausse locale relative du niveau de la mer. Si l'affaissement du sol peut en effet être négligé, nous pouvons nous concentrer sur l'élévation eustatique du niveau de l'océan (ci-après dénommée l'élévation du niveau de la mer).

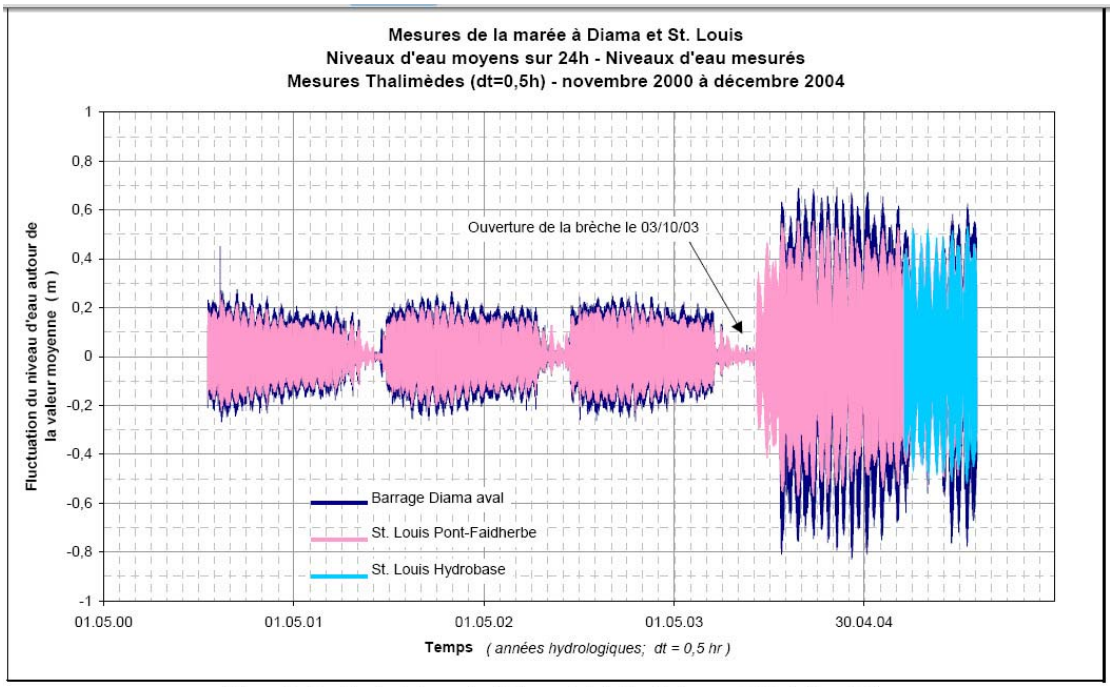


Figure 6 : Amplitude de la marée à Diama et Saint-Louis de nov. 2000 à déc. 2004

Figure 4.1: Archivages de niveau d'eau à l'intérieur de l'estuaire (de Seck, données de l'OMVS)

Depuis la fin de la dernière glaciation, les niveaux des mers ont augmenté. L'élévation du niveau actuel s'est produite à une vitesse moyenne de 18 cm au siècle dernier. Basé sur des observations satellites récentes, ce taux s'est accéléré, et l'attente générale est que l'augmentation de l'élévation du niveau de la mer qui aura lieu dans le prochain siècle sera dû à l'effet de serre. Différents modèles de prédiction donnent des prévisions différentes pour l'élévation du niveau de la mer au siècle prochain. Cela est vrai pour l'élévation globale du niveau des mers, mais aussi pour l'élévation locale du niveau de la mer, telle que la côte de Saint-Louis. En dépit des énormes efforts scientifiques, il y a beaucoup d'incertitude. Il ne peut cependant pas être exclu que pour la côte du Sénégal, une élévation du niveau marin de 1 m se produise dans le siècle à venir. Mais les chiffres plus bas (comme plus hauts) sont également possibles. Dans sa quatrième publication, le GIEC prévoit une élévation mondiale du niveau entre 20 et 85 cm pour le siècle prochain (50 cm jusqu'en 2100 en moyenne).

Les calculs des fluctuations verticales des marées au large de Saint Louis sont présentées dans la figure 3.1. Les niveaux d'eau mesurés à St Louis et à Diama pour la période d'août 2000 à août 2004 sont présentés dans la figure 4.1. Ce chiffre a été obtenu à partir de Seck (2010), qui se réfère à l'OMVS en tant que source. La moyenne de hautes et basses eaux enregistrée est d'environ MSL 0,2 m et MSL -0,2 m, respectivement pour les trois premières années (nous avons admis que le niveau de référence coïncide avec MSL).

L'amplitude des marées (en moyenne environ 0,4m) au Pont Faidherbe est nettement inférieure qu'au large parce que l'amplitude de la marée diminue lorsque la marée pénètre dans l'estuaire. En face du barrage de Diama, l'amplitude de la marée augmente légèrement de nouveau pour des raisons inconnues (peut-être due à la réflexion).

Les fluctuations du niveau des marées ont augmenté après la nouvelle brèche en 2003. La moyenne des hautes eaux a augmenté à MSL 0,5 m, et la moyenne des basses eaux à MSL -0,6 m. Ces chiffres correspondent bien aux moyennes des hautes eaux telles que les données présentées dans la section 3.1 (MSL 0,45 m). Il y a un écart entre les niveaux de basses eaux mesurés et calculés, mais cela est moins pertinent pour l'évaluation des risques d'inondation. La leçon qui peut être tirée de ce constat est que la pénétration des marées depuis la nouvelle embouchure dans la ville est devenue beaucoup plus «facile» (moins de résistance à l'écoulement), conduisant à une augmentation des fluctuations du niveau d'eau des marées.

Au cours de la saison des pluies, les niveaux d'eau peuvent aussi augmenter alors que les chiffres d'écoulements du fleuve Sénégal s'accroissent. La saison des pluies commence en juillet/août et se termine en octobre/novembre. Cela signifie une augmentation constante du débit du fleuve au cours de la période humide et une baisse constante au cours de l'autre période (sèche) (section 3.1)

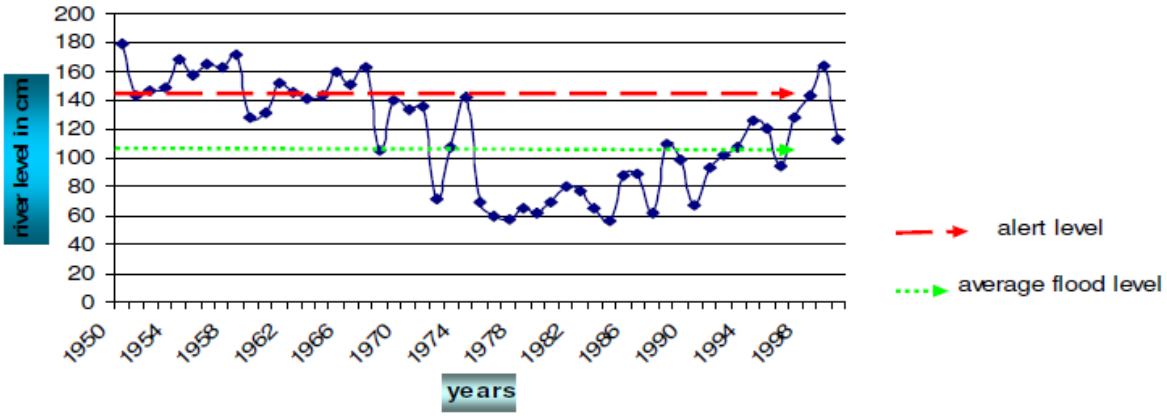


Figure 4.2. Maximales de débits à Saint-Louis pendant les écoulements extrêmes du fleuve (obtenu à partir de Seck, 2010)

Seck (2010) présente un schéma des débits maximaux du fleuve mesurés à Saint-Louis (Figure 4.2). Les coordonnées du point de mesure et le niveau de référence verticale sont inconnus. Si nous supposons que chaque point indique le niveau d'eau mesuré à Saint-Louis au moment où l'écoulement a été à son maximum au barrage de Diama au cours de la saison des pluies, et que les effets de marée peuvent être ignorés (l'amplitude des marées était inférieure à 0,4 m avant 2003), alors le schéma donne des informations importantes sur les niveaux d'eau extrêmes dûs aux écoulements du fleuve.

Le taux des débits au barrage de Diama est calculé en utilisant une formule dans laquelle les niveaux d'eau sont mesurés sur les deux côtés de la barrière. Donc, assurément, les points représentent les moments par an où la différence de la des pics était à son maximum au barrage. Nous supposons en outre que de niveau zéro correspond à MSL.

La figure 4.2 montre les sécheresses qui ont frappé les pays du Sahel dans les années soixante-dix et quatre-vingt. L'augmentation moyenne du niveau d'eau est d'environ 1 m (ligne verte), mais les niveaux de +1,4 m ont eu lieu plus d'une fois.

Le haut débit du fleuve dure généralement quelques jours ou plus. Cela signifie que lorsque les niveaux d'eau sont accrus par les débits d'eau élevés, au moins un cycle de marée va se produire. Étant statistiquement des paramètres indépendants, les niveaux d'eau des marées et des niveaux d'eau du fleuve peuvent être superposés, ce qui signifie que les deux hautes eaux doivent être additionnées. Si le débit maximal du fleuve est atteint pendant plus d'une semaine (ces données ne sont pas disponibles, mais cela semble réaliste), alors les données des marées de vives eaux doivent être utilisées.

Résumé des Niveaux d'Eau Extrêmes

Les niveaux d'eau extrêmes qui devraient se produire au moins une fois par an: la marée (MSL +0,5) + fleuve (MSL +1 m) = MSL +1,5 m.

Des débits du fleuve plus extrêmes (ce qui n'est arrivé qu'une fois depuis 1970 – voir la figure 4.2) augmentent les niveaux d'eau à MSL +2 m.

Les deux chiffres augmenteront à l'avenir avec la montée des eaux.

La Ville

Quatre zones urbaines peuvent être distinguées:

1. La zone de la flèche (appelée «Langue de Barbarie»), est une presqu'île de quelques centaines de mètres de large entre l'océan et l'estuaire. Il y a trois quartiers appelés Guet Ndar, Ndar Toute et Goxumbaac. Un quart de la population totale vit dans ces quartiers (environ 40.000 personnes, essentiellement des familles de pêcheurs).
2. Le centre historique de Saint-Louis (également appelé «l'île de Ndar»), patrimoine mondial de l'UNESCO en raison de son architecture coloniale française unique, est la zone la plus populaire avec les touristes.
3. La plus grande île, Sor avec ses nombreux quartiers. Cette partie de la ville abrite aujourd'hui la plus grande partie de la population totale et a le taux de croissance le plus élevé. Les plus récents développements ont lieu dans les districts du sud appelés «Pikine».
4. Les régions extérieures plus à l'intérieur des terres, ne sont encore guère développées.

Les différents quartiers de Saint-Louis sont présentés dans la figure 4.3 ci-dessous

L'Elévation des Terres

Les terres sont inondées quand le niveau local d'eau dépasse la hauteur topographique locale (quand il n'y a pas de protection contre les inondations). Pendant la mission, il s'est avéré difficile de trouver une carte avec des données fiables sur les hauteurs des terres. Trois cartes anciennes (1972) portant les hauteurs des terres de la région ont pu être trouvées ("Carte du bassin du Sénégal», des cartes au 1:50,000); ces cartes semblent également exister sur microfiche (mais cela n'a pas pu être vérifié vu l'absence de matériel pour lire les microfiches).

Seck (2010), cependant, présente un modèle numérique de terrain (MNT) avec données topographiques détaillées de la ville et ses environs (voir la figure 4.4 ci-dessous). Il n'a pas pu être déterminé ce qui a constitué la base de données pour cette carte.

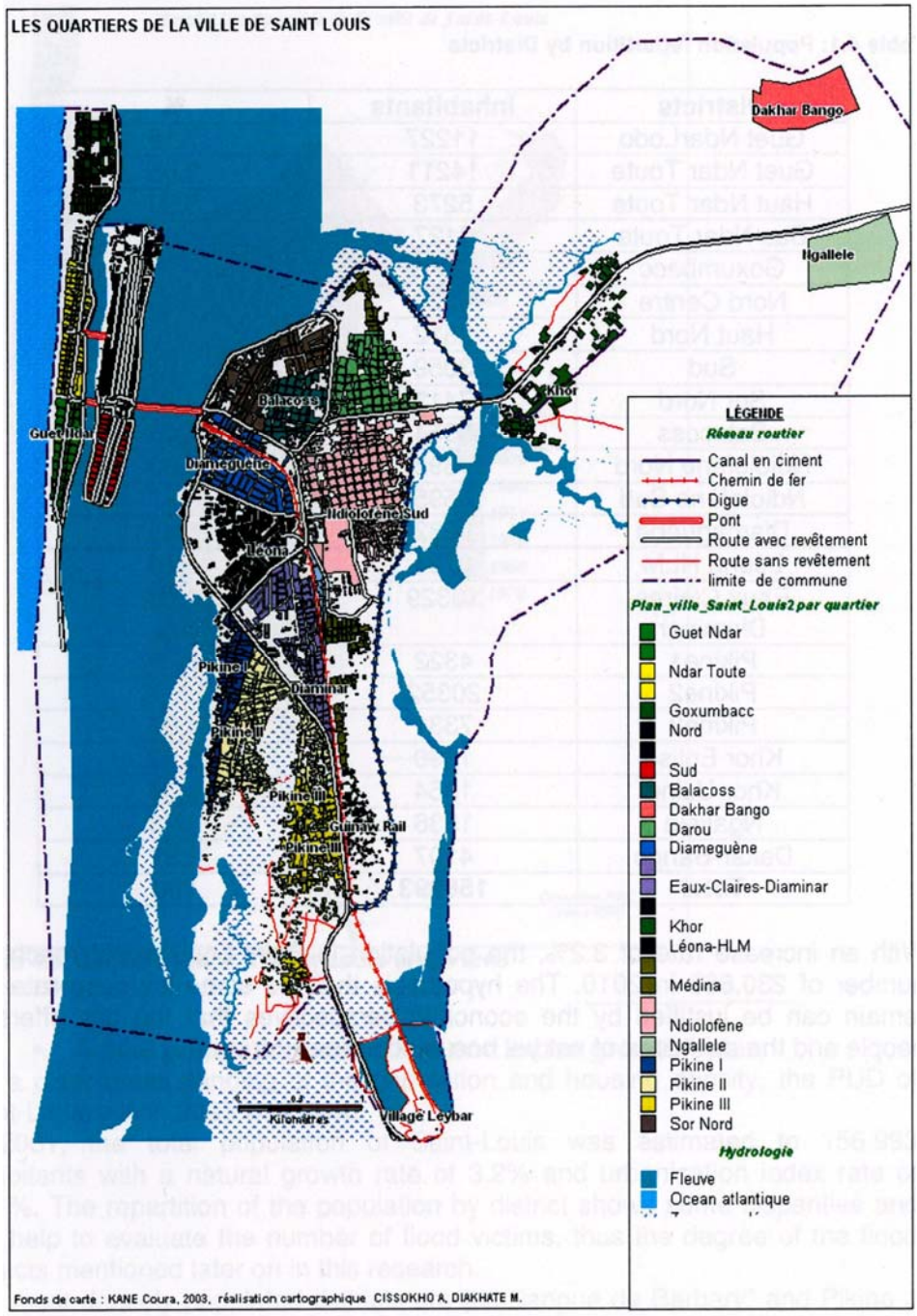


Figure 4.3: Les quartiers de St Louis (Copie de Seck, 2010)

La topographie moyenne du centre historique (L'ile de Ndar) en fonction de ces données est de MSL 1,5 m. La topographie de l'ile de Sor est plus complexe. Les quartiers de Ndiolofene et Pikine III (sud), exposent des hauteurs jusqu'à MSL 3 m. Les autres quartiers tels que Leona et Diaminar sont plus bas à MSL 1 m.

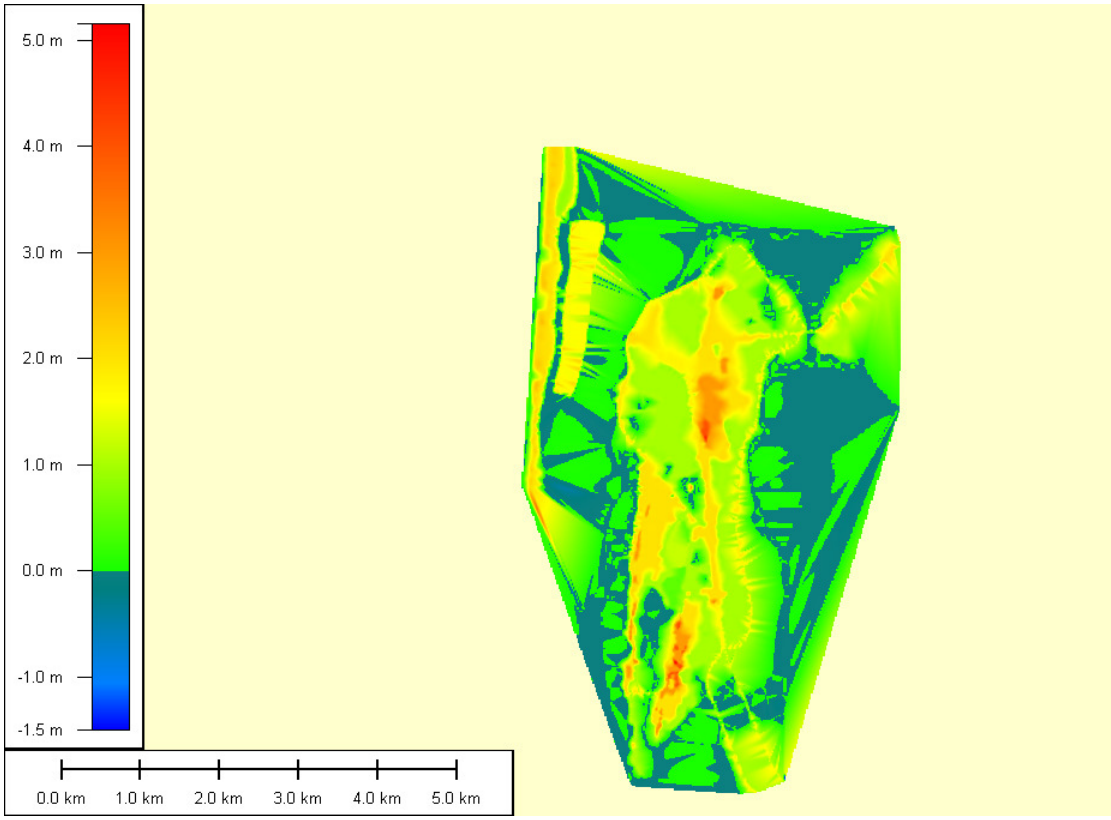


Figure 4.4 Topographie (Seck, 2010)

Cartes des zones inondables

En combinant les données sur les niveaux d'eau extrêmes avec les données topographiques, des cartes d'inondation peuvent être produites. Seck (2010) a fait ces cartes pour un certain nombre de niveaux d'eau extrêmes. Un exemple est montré dans la figure 4.5 ci-dessous, montrant les zones inondées, sans protection contre les inondations, pour un niveau d'eau de MSL 1,5 m. Statistiquement, ce niveau d'eau peut se produire plus d'une fois par an, en fonction du débit du fleuve. Comme expliqué ci-dessus, la fréquence de cette occurrence augmente en même temps que l'élévation du niveau de la mer.

La figure montre que le centre historique, dans ces circonstances reste «un peu sec». Pour les niveaux d'eau plus extrêmes, comme MSL 2 m, ce qui est arrivé une seule fois depuis 1970, ceci rendra l'intérieur du centre historique de Saint-Louis sous environ 0,5 m d'eau.

De même, avec un niveau d'eau extrême de MSL 1,5 m, les zones basses de l'île de Sor sont inondées. Dans les parties plus profondes de l'île, cela peut même conduire à des inondations de profondeur de 0,5 m sinon plus. Ces profondeurs ne vont pas nécessairement conduire à des pertes humaines, mais les dégâts aux propriétés se produiront et la vie de la ville en sera perturbée.

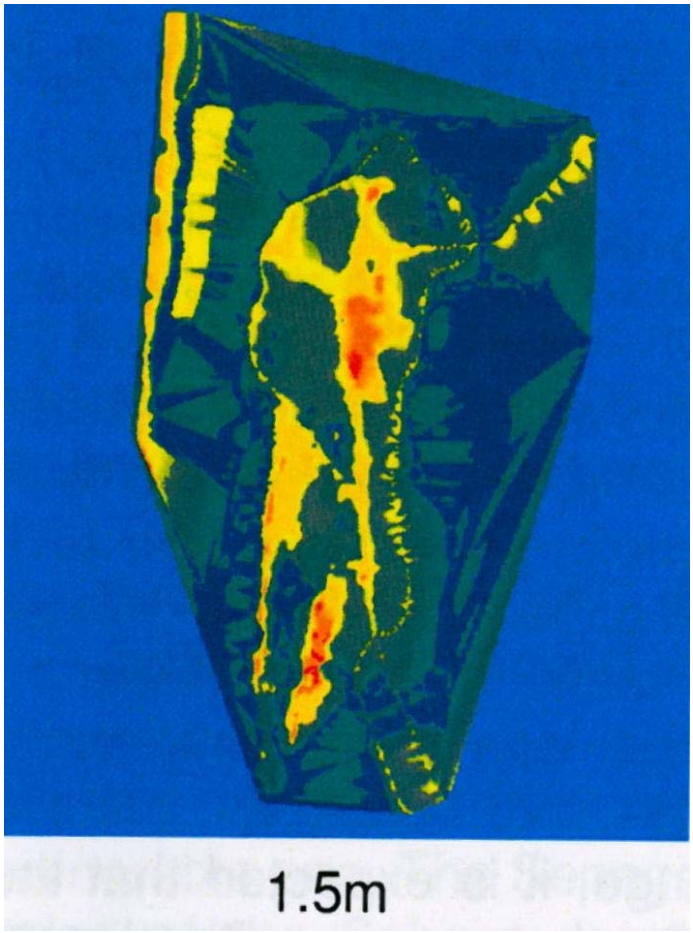


Figure 4.5 Zones inondées pour le niveau extrême d'eau MSL +1.5 m (Seck, 2010)

Les Protections contre les Inondations

Afin d'éviter que certains quartiers soient inondés en cas de crues, différentes tentatives ont été entreprises par les autorités pour mettre en place un système de défense contre les inondations. Au cours de la mission sur le terrain on a pu observer un mur de défense contre les inondations en béton, haut d'environ 0,5 m à différents endroits le long du périmètre de l'île de Ndar et des parties les plus au nord de l'île de Sor (voir photos 1 et 29 par exemple en Annexe B).

Sur le reste du périmètre de l'île de Sor, une digue a été construite dans les années quatre-vingt-dix, avec des hauteurs variant de MSL + 1,5 m à MSL 1,8 m. Au cours de la mission sur le terrain, il est devenu évident que la digue n'est pas dans un état technique pour fonctionner effectivement afin d'éviter la moindre inondation. La digue elle-même ne renferme pas tous les quartiers, de telle sorte que même si elle était en état de fonctionner, elle ne protégerait pas tous les districts de l'île de Sor contre les inondations.

Le Système d'Alerte aux Inondations

Seck (2010) décrit les arrangements institutionnels en ce qui concerne la gestion des inondations locales. Les deux organisations locales, régionales et nationales sont toutes impliquées. Il conclut que le problème n'est pas un manque de services administratifs ou

institutionnels, mais celle de différences entre ces organisations conduisant à un manque de coordination.

Une autre question importante est la relation entre les autorités locales et nationales. La municipalité s'occupe de la planification locale et des permis de construire, tandis que toutes les questions liées à l'eau comme aux ouvrages de protection contre les inondations, sont contrôlées par des services de l'Etat. Cela complique l'approche de la gestion des inondations En dépit de ces difficultés d'organisation, un soi-disant niveau d'alerte a été défini. Il s'agit d'un certain niveau d'eau extrême qui, lorsqu'il est atteint, alerte les parties de la population potentiellement vulnérables. La cote d'alerte a été définie par la Direction Régionale de l'Hydraulique à MSL 1.2 m, qui, selon les données précédentes, se produit au moins plusieurs fois à chaque saison des pluies.

4.3 Préoccupations

La préoccupation majeure est bien sûr que certaines parties de la ville seront inondées, dès que l'eau, à court terme (jours, semaines), dépassera certains niveaux. Dans la section 4.2, nous avons estimé que, chaque année, les parties les plus basses de l'île de Sor sont susceptibles d'être inondées, et que d'autres zones, y compris le centre historique, sont susceptibles d'être inondées avec une fréquence d'au moins une fois par an. Par rapport à d'autres régions du monde, ces probabilités sont très élevées. Pour des raisons de comparaison: avant l'ouragan Katrina qui a frappé la côte de Louisiane aux Etats-Unis, le système de défense contre les inondations autour de la Nouvelle-Orléans était conçu pour protéger la ville contre les crues à une fréquence de 1/100 ans (ère pré-Katrina). Les niveaux de protection néerlandais pour les zones de faible altitude à proximité de grands fleuves (Rhin, Meuse) est de l'ordre de 1/1000 ans ou moins.

Puisque les zones urbaines ne sont pas situées dans des zones de polders, une inondation ne devrait pas nécessairement entraîner la perte de vies humaines. Des dommages matériels relativement modestes se produiront dans la situation actuelle.
Potentiellement le risque de dégâts augmentera avec la poursuite des investissements dans l'urbanisation des zones de faible altitude. Dans le cas d'une grave inondation, la vie quotidienne serait perturbée et les procédures d'évacuation pourrait devenir moins efficaces (par exemple parce que des voies d'évacuation seraient difficiles d'accès).

4.4 Stratégies Possibles

Faire face aux risques d'inondation signifie résoudre deux paramètres. L'unest la probabilité d'inondation (en % par an, ou le nombre de manifestations par an), l'autre est le coût des dégâts au cas où une inondation se produirait (par exemple exprimé en termes de pertes monétaires). Le risque d'inondation est souvent défini comme le produit mathématique des probabilités et des dommages. L'unité du risque d'inondation devient alors EUR / an, qui est similaire à celui de l'assurance contre les inondations.

L'effet du changement climatique (hausse du niveau de la mer pour être précis) augmente le risque d'inondation le long de son axe de probabilité. Toutefois, l'urbanisme et de nouveaux investissements augmentent également le risque d'inondation le long de son «axe des conséquences».
Toute stratégie de lutte contre les risques d'inondation devrait porter sur les deux composantes de l'équation des risques d'inondation. La probabilité d'un événement de

crue peut être réduite, par exemple avec de nouvelles digues ou mur anti-inondations. Supposons que l'on réduise la probabilité d'un facteur de 10. Dans le même temps, la planification urbaine pourrait être renforcée parce que les planificateurs et les gens se sentent en sécurité derrière le nouveau système de protection contre les inondations. Supposons que la valeur monétarisée de toutes les propriétés derrière le nouveau système de protection augmente avec un facteur 100 à la suite de ce développement urbain. Alors, le risque d'inondation augmente encore avec un facteur de 10, malgré le fait qu'un nouveau régime de protection ait été installé.

L'exemple ci-dessus montre que les mesures visant à réduire la probabilité d'inondation doivent prendre en compte à la fois la partie technique et la partie la planification urbaine. Après tout, ce serait un gaspillage de ressources de protéger une zone qui n'est pas susceptible d'être développée dans le futur. Mais ce serait aussi un gaspillage de capital investi si une zone fortement développée sans système de protection proprement dit, soit endommagée par les inondations. La situation idéale est quelque part entre les deux, soit: une probabilité d'inondation assez faible pour des valeurs données urbaines ou de potentiels. Le niveau acceptable du risque d'inondation est à déterminer par les décideurs.

Des mesures techniques spécifiques peuvent être envisagées pour <u>réduire la probabilité</u> de risques d'inondations, soit par exemple:

- Un système de circuit fermé par des digues robustes, y compris des solutions adaptées mises en œuvre à chaque portail étanche (par exemple, où une route croise une digue). Afin de contrôler le niveau des eaux souterraines dans la zone de la digue, des systèmes supplémentaires tels que des pompes devront aussi être considérés; (Chapitre 7)
- Des protections contre les inondations, temporaires ou adaptables, telles que des sacs de sable, des murs mobiles d'endiguement, ou des barrières à panneaux multiples;
- L'installation de systèmes d'atténuation d'inondations, qui s'activent quand un niveau critique d'eau est atteint. La montée des eaux est ainsi réduite, à mesure que l'eau se déverse dans des bassines de rétention basse (telles que la zone des Trois Marigots) ou se déverse dans l'océan par la brèche, aménagée d'une structure de débordement adaptée (c'est-à-dire au dessus de la flèche et non pas au travers d'une nouvelle section!).

Des mesures spécifiques peuvent être envisagées pour <u>réduire les conséquences</u> dues à toute inondation, soit par exemple:

- Construire là où le terrain est élevé;
- Sécuriser les voies d'évacuation, et accroître la compréhension locale sur la façon d'agir face aux crues, ou
- Concevoir de nouveaux bâtiments de telle sorte que les inondations (par exemple jusqu'à 0,5 m d'inondation) ne causent pas de dégâts graves.

Une combinaison de ces deux types de mesures peut être considérée afin de développer une approche durable plus intégrée et équilibrée.

5 Dynamiques de l'Embouchure du Fleuve

5.1 Introduction

En 2003, les fortes pluies du bassin versant du fleuve Sénégal ont alarmé les autorités, car il était prévu que les niveaux d'eau à Saint-Louis s'élèveraient au-dessus des niveaux critiques. Il a été décidé de creuser un nouveau débouché pour l'eau du fleuve au travers de la flèche. Cette "sortie de secours" était à quelques 20km en amont de l'embouchure existante du fleuve, laquelle était à 27 km de Saint-Louis.

Le canal creusé sur environ 100m de longueur (soit de la largeur de la flèche à cet endroit précis), par environ 4m de large et environ 1,5m de profondeur (voir photo de gauche ci-dessous). Il s'est développé rapidement en taille comme en témoigne la photo de droite qui a été prise quelques mois après l'ouverture (deux photos obtenues de Barry, e.a, 2009).

La nouvelle embouchure du fleuve a continué de croître en taille et en même temps s'est déplacée dans la direction vers le sud. Ces changements morphologiques ont eu des conséquences graves telles que l'érosion sur la côte intérieure désormais exposée en face de la nouvelle embouchure (chapitre 6).

De plus, de nombreuses personnes ont commencé à craindre que la nouvelle embouchure continue de se creuser et que, après un certain temps risque de menacer l'estuaire entier, y compris Saint-Louis. Dans ce chapitre, nous analysons ce qui s'est passé et comment les changements morphologiques pourraient se développer dans l'avenir. Dans notre analyse, nous tenons à utiliser les résultats d'une étude réalisée par l'US Army Corps of Engineers (Barry, e.a, 2009).

5.2 Situation

La hausse du niveau d'eau autour de la ville de Saint-Louis dans les semaines précédant la création du nouveau canal est illustrée en figure 5.1. Comme on le voit, le niveau d'eau a augmenté jusqu'à 1,9 m (probablement MSL), ce qui doit avoir causé des problèmes graves d'inondations dans la ville. Le canal a été creusé dans la nuit du 3 au 4

Octobre 2003. Le graphique montre clairement la rapidité avec laquelle les niveaux d'eau à Saint-Louis ont chuté (environ 1m en un ou deux jours!).

La baisse rapide du niveau d'eau s'explique par l'écoulement vers la mer via la nouvelle voie. Grâce à l'action érosive de ce courant, le canal s'élargit rapidement, menant à une nouvelle embouchure relativement large. Le petit canal est devenu une nouvelle embouchure pour le fleuve, et a repris la fonction de l'ancienne embouchure. L'ancienne embouchure, située à environ 20 km plus au sud, a commencé à diminuer en taille et, enfin, s'est complètement fermée. A cette époque, la nouvelle brèche était devenue la seule embouchure[1].

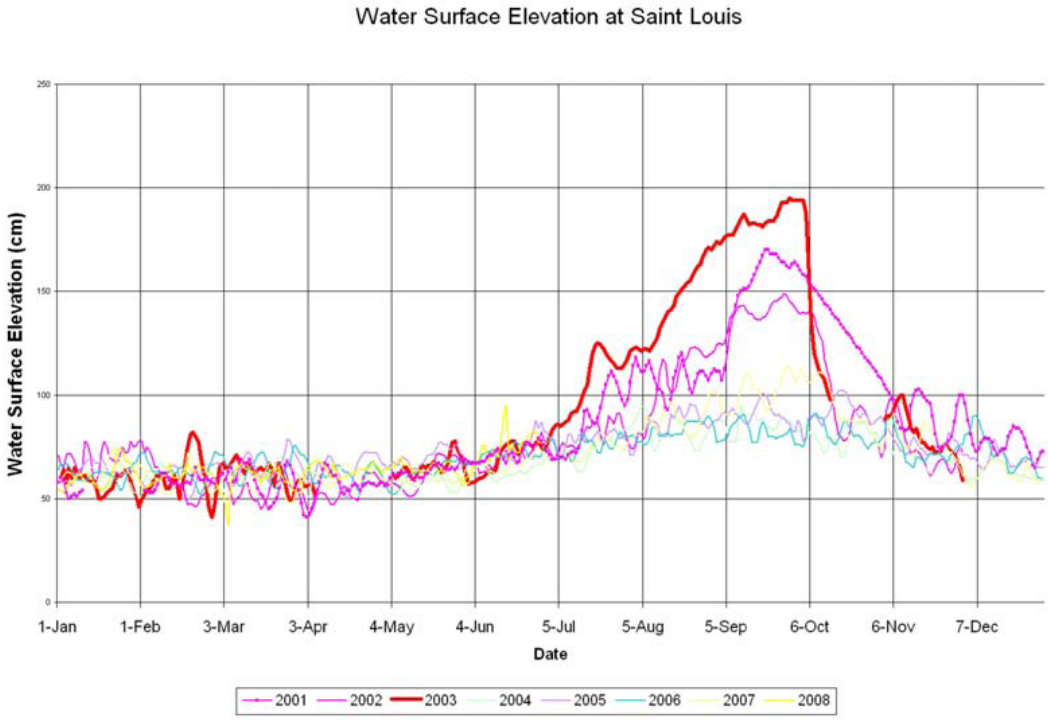


Figure 5.1: Variations des niveaux d'eau dans les semaines avant que la brèche ait été creusée (source: Ibrahima Diop)

La croissance de l'embouchure on peut être vue si l'on compare la situation avant et environ un an après que le canal ait été creusé (figure 5.2 ci-dessous, les photos obtenues de Barry, 2009). Le volume de sable de la flèche qui semble avoir disparu si les deux images sont comparées, a été érodé et déposé pour une majeure partie sur la plage de la nouvelle embouchure. Les vagues déferlantes indiquent la présence de ces bans superficiels extérieurs (visible au cours de la mission sur le terrain). Il n'ya aucun signe qu'un delta intérieur se soit bâtit, mais certains transport de sable dirigés vers l'intérieur ont sans doute eu lieu également.

Barry (2009) écrit que la largeur de la nouvelle embouchure devint 1.4km en Février 2006 et même 2.2km en Février 2009.

[1] On peut considérer qu'il s'agit d'un exutoire, c'est-à-dire l'embouchure de la rivière, mais puisque la marée joue également un rôle important, nous utilisons le terme de passe intertidale.

Les conséquences de la nouvelle embouchure peuvent être résumées comme suit:

- Le littoral en face de la nouvelle embouchure a reculé en raison de l'évolution des conditions hydrauliques (principalement l'action des vagues entrantes). Malheureusement environ 40 maisons ont été détruites à la suite de cette érosion locale dans la ville appelée Doun Baba Dièye (voir chapitre 6).
- L'eau (fraiche) du fleuve n'atteint plus l'ancien estuaire au sud de la nouvelle embouchure, ce qui a augmenté la salinité de l'eau (lagune). Cela a été positif pour l'extraction de sel dans cette région, mais possiblement plutôt négatif pour l'écosystème (y compris les mangroves).
- La marée peut pénétrer plus facilement dans l'estuaire et atteindre Saint-Louis. Comme montré au chapitre 4, les niveaux d'eau à marée haute ont en effet augmenté (Figure 4.1).
- Puisque l'eau du fleuve peut plus facilement s'écouler dans l'océan, la hausse des niveaux d'eau autour de St. Louis sera moindre qu'avant la nouvelle brèche (Figure 5.1). Cet effet devrait être plus grand que l'effet de la hausse des marées (à savoir un abaissement des niveaux extrêmes de crues du fleuve d'environ 1 m par rapport à une augmentation des eaux hautes d'environ 0,3 m). Cela signifie que la probabilité d'inondation de Saint-Louis est réduite.

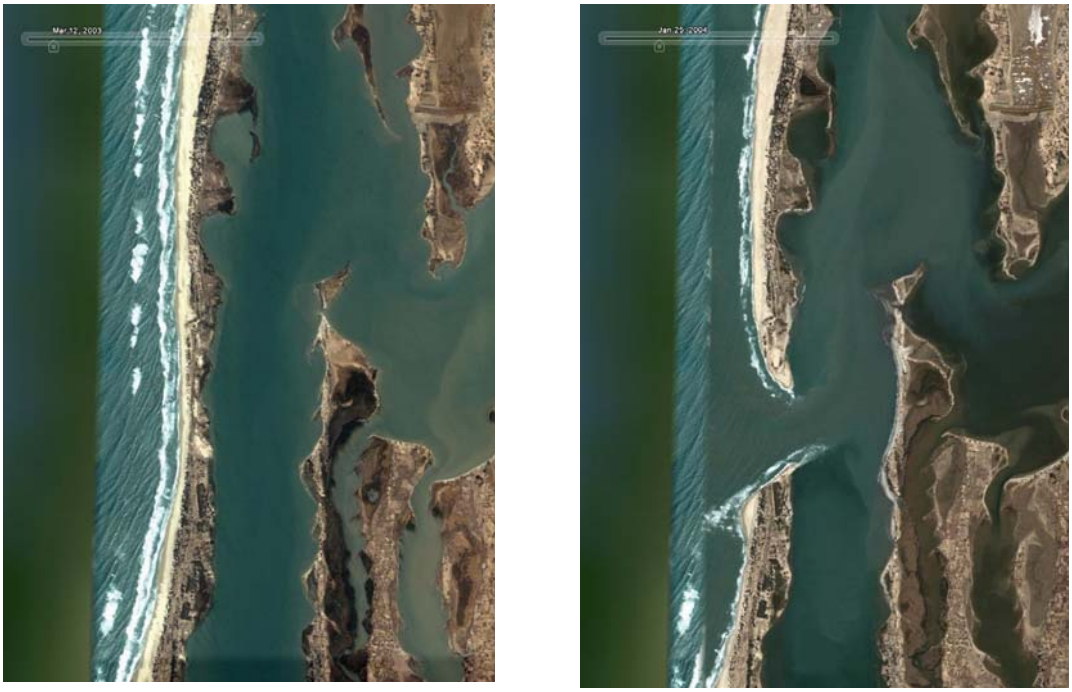
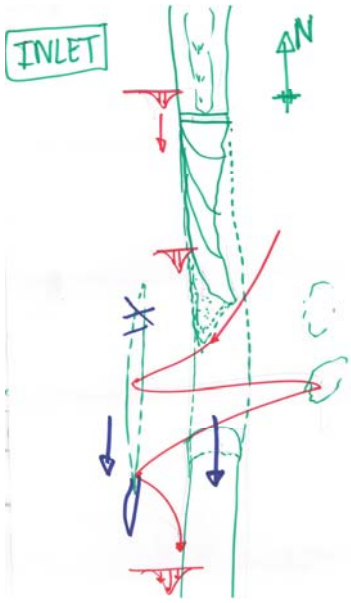


Figure 5.2 Situation avant (à gauche) et un an après l'ouverture (à droite).

Les modes de transport de l'eau et du sable dans la nouvelle situation sont représentés schématiquement ci-dessous sur la page suivante. Après que le nouveau canal ait été creusé, il s'est érodé fortement en raison de grands volumes d'eau circulant vers le large. Le sable érodé de la flèche a été déposé au large des côtes, développant progressivement les zones peu profondes au bord de mer qui sont appelées le delta externe.

Le transport de sable du littoral depuis le nord (175.000 m^3/an selon les calculs présentés dans la section 3.1) n'était pas assez important pour refermer la nouvelle embouchure. Tous les dépôts de sable du littoral ont été très probablement dirigés en direction du large, mettant ainsi en place le delta externe. Après quelques jours, l'écoulement vers la mer fut réduit en raison de la baisse (sérieuse) des niveaux d'eau à l'intérieur de l'estuaire (1 m, selon la figure 5.1).Après quelques jours, la marée a également pénétré dans l'embouchure (encore petite). Les flots combinés de la marée et du fleuve ont toutefois été assez forts pour continuer le processus de récurage. Quelques mois plus tard, la section de passage transversale de la nouvelle embouchure avait tellement augmenté que les vitesses d'écoulement ont commencé à diminuer. Les courants de marée étaient toutefois encore très important car une plus grande partie du bassin de marée (la lagune et l'estuaire) a été rempli et vidé par la nouvelle embouchure. Lorsque la vitesse maximale du débit au travers de l'embouchure régressa après un temps, les apports de sable du littoral du nord ne furent plus évacués au large. Au lieu de cela, les apports de sable du littoral ont été déposés au coté nord de l'embouchure. Les courants de l'embouchure étaient toutefois encore assez forts pour augmenter sa zone d'écoulement en coupe. Cela a conduit à l'érosion à la fois sur les côtés du nord et du sud, mais puisque le dépôt de sable du littoral s'est aussi produit sur le côté nord, l'effet net était toujours qu'une certaine accrétion se produit sur le côté nord de l'embouchure. Au côté sud de l'embouchure un phénomène d'érosion seul s'est produit, alors l'effet net sur le côté sud fut un retraitvers le sud de la ligne d'eau. Ces phénomènes sont esquissés ci-dessous.



Le delta externe a une fonction importante aujourd'hui pour ce qui est appelé la capacité de raccourci de l'embouchure. Il fonctionne comme une sorte de «pont» pour les particules de sable arrivantes, qui après un certain temps atteignent la côte dérivante de l'embouchure. Si l'embouchure migre, généralement le delta externe la suit (voir croquis). Alors que la nouvelle embouchure élargie a migré vers le sud, l'ancienne embouchure du fleuve s'est fermée. Ces deux développements sont présentés dans la figure 5.3 (obtenu à partir de Sy, 2010, sur la base de données par Ba, e.a, 2007).

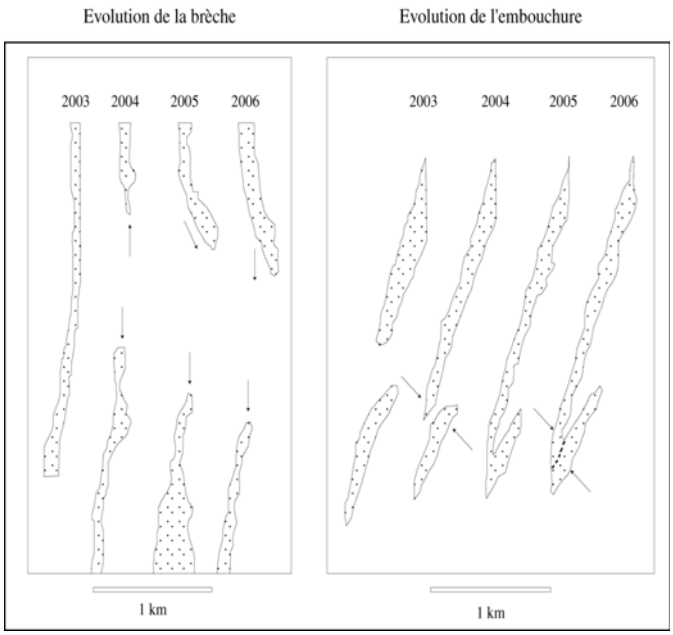


Figure 5.3 Evolution de l'ancienne et nouvelle embouchure (de Sy, 2010)

Une visite de terrain sur la rive, juste au sud de la nouvelle embouchure du fleuve, fin Décembre 2010 par Mme Marie Dariel, exposa des signes évidents d'érosion côtière sur la mer (voir photo ci-dessous). Cette érosion locale du littoral est une conséquence de la dynamique de l'embouchure. Un apport réduit de sable depuis le delta externe (principe du raccourci du sable) vers cette section du littoral particulière, ceci combiné avec la capacité locale de transport du littoral, conduit au retrait des côtes observées. Ce type d'ajustements littoraux fait partie de la dynamique de l'embouchure et ne témoigne pas d'une récession globale de l'ensemble du système côtier.

L'endroit ou cette photo a été prise est indiqué ci dessous:

5.3 Préoccupations

Au cours de la mission plusieurs personnes ont exprimé leurs préoccupations sur le comportement de la nouvelle embouchure. Ci-dessous ces préoccupations ont été formulées comme questions suivies par nos réponses indicatives.

Est-ce que l'embouchure va s'agrandir?

Si la section transversale de l'embouchure (largeur et profondeur) augmente, la vitesse maximale d'écoulement (m/s) diminue aussi. Vitesses (maximales) moindres de débit ont moins de capacité à récurer et, par conséquent, le sable du littoral qui sera déposé va rester à l'intérieur de l'embouchure (moins de récurage). En raison de ce dépôt, la section transversale va diminuer et comme un effet résultant, la vitesse maximale d'écoulement augmentera à nouveau. On peut imaginer qu'il y ait un certain équilibre entre la capacité à récurer des courants de l'embouchure et les dépôts de sable dérivant du littoral.

Barry (2009) a examiné la stabilité de la section transversale de l'embouchure. D'après son analyse dans laquelle il a utilisé le modèle théorique d'Escoffier, on peut conclure que l'embouchure a atteint sa zone d'équilibre transversale (environ 3600 m^2, avec des profondeurs d'entrée maximale de MSL -7m). Des oscillations auront lieu à la suite de changements de marées, et en particulier des apports fluviaux. Barry estime que la section transversale peut augmenter à 4600 m^2 dans la saison des pluies combinée à la marée de vives eaux.

Donc, la réponse à la question posée est non. L'embouchure a atteint sa taille maximale et ne présentent que des fluctuations saisonnières.

Est-ce que l'embouchure menace la ville?

L'effet net de la nouvelle embouchure sur les niveaux d'eau extrêmes à Saint-Louis est positif. Ainsi, la nouvelle embouchure a en fait réduit la probabilité des inondations en milieu urbain, ce qui était l'idée originale amenant le creusement du

canal.

La nouvelle embouchure n'entamera pas le nord de la flèche et, par conséquent, ne causera pas de menace pour la ville. Au lieu de cela, comme expliqué ci-dessous, la nouvelle embouchure continuera de se déplacer dans la direction du sud, loin de la ville.

Est-ce que l'embouchure menace la région au sud d'elle?

Les distinctions suivantes peuvent être faites lorsqu'il s'agit de la stabilité de l'embouchure:

- Stabilité des dimensions géographiques de l'embouchure (la stabilité transversale), et
- Stabilité de l'embouchure par rapport à son emplacement (la stabilité de l'emplacement).

L'embouchure du fleuve a toujours migré en direction sud. Si la nouvelle brèche est considérée simplement comme une accélération du comportement naturel induite par l'homme, alors la nouvelle embouchure va migrer vers le sud semblablement aux embouchures historiques du fleuve. Le taux de migration de l'embouchure du fleuve précédente a été estimé à environ 500 m/an (Figure 3.8). La migration de la nouvelle brèche a été estimée plus lente: environ 200 m/an d'après les observations visuelles au cours de la visite sur le terrain.

Pendant que la nouvelle embouchure migre plus au sud, elle aura une incidence sur les fonctions existantes, comme le parc naturel qui est situé juste au sud de l'embouchure actuelle. Le recul du rivage, par exemple, comme cela a été expérimenté à Doun Baba Dièye, se produit également dans des zones nouvellement exposées au sud de l'embouchure actuelle. En termes de développement de l'espace, il est donc préférable de ne pas localiser les nouvelles infrastructures dans les zones potentiellement exposées (c'est-à-dire face à l'emplacement futur de l'embouchure).

L'écosystème a déjà souffert du fait que son ancien caractère estuarien (y compris les apports d'eau douce) soit transformé en un système de lagunage. Mais, en plus de cela, l'érosion peut être attendue dans les régions qui seront exposées à l'emplacement futur de l'embouchure. Il est à noter que cela est également arrivé dans le passé à de nombreuses reprises, et on peut dire que la nature n'a pas besoin d'être protégée contre elle-même. En fait, tandis que l'embouchure migre vers le sud, de nouveaux écosystèmes estuariens se développent au nord de l'embouchure, ce qui créera de nouvelles possibilités de conservation de la nature en temps voulu.

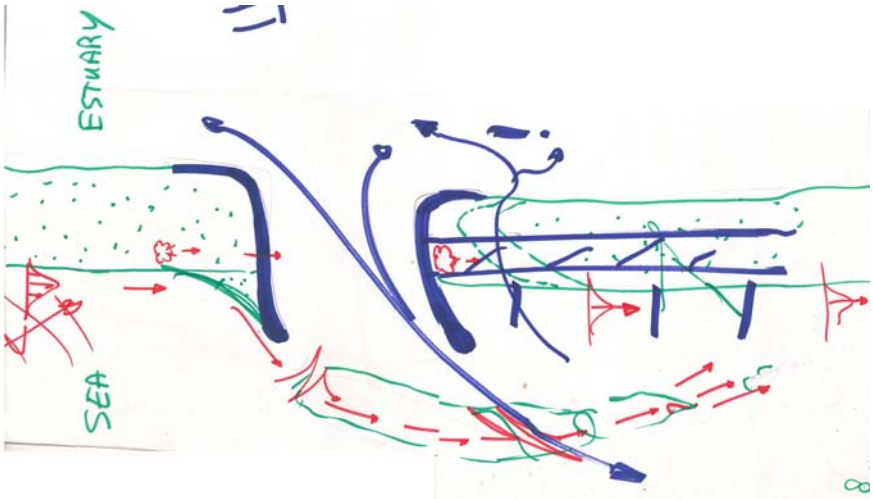
Il n'y a pas d'endroit où les hommes ont établi leur habitat sur la flèche au sud de l'embouchure. Ceci est probablement dû au fait que cette partie de la flèche a connu régulièrement des percées dans le passé, ce qui a gardé cette partie de la flèche basse par rapport à la partie nord et donc dangereuse pour les hommes & leur habitat.

Le taux de migration est de l'ordre de 200-500 m/an, avec une meilleure estimation de 300 m/an (chapitre 3). Avec ce chiffre de taux de migration vers le sud, on peut facilement calculer quand l'adaptation locale liée à l'embouchure peut être attendue à un certains endroits.

5.4 Fixation de l'Embouchure du Fleuve

Une option considérée pour contrôler la dynamique de l'embouchure du fleuve, est la construction de barrages sur les deux côtés de l'embouchure. Cette consolidation de l'embouchure par des jetées est parfois considéré dans des situations où la migration ne peut pas être permise (à cause de graves dommages prévus), ou lorsque certaines profondeurs de navigation doivent être maintenues (par exemple connexion avec un port de mer à l'intérieur de l'estuaire).

Le croquis ci-dessous montre à quoi cela pourrait ressembler. Les barrages doivent être construits des deux côtés de l'embouchure, évitant à la fois le dépôt de sable d'un côté et l'érosion de l'autre côté. Les barrages doivent être étendus dans l'estuaire afin d'éviter tout récurage "par l'arrière" par les courants de l'embouchure. En fonction de la distance entre les deux barrages, une certaine profondeur se développera à l'intérieur de l'embouchure.



Il n'est pas facile de faire une conception qui conduise à une situation de maintien stable, sûre et à faible coût de maintenance. L'une des principales préoccupations porte sur la capacité de rétrécissement de l'embouchure après sa fixation. L'addition de sable du littoral va continuer. L'extension de la jetée nord de quelques centaines de mètres au large (la création d'un barrage) n'aidera pas à cause de la grande obliquité des vagues. Et faire le barrage très long (disons 1 km) bloquerait toute dérive littorale pendant une longue période, entraînant une grave et incontrôlable érosion de dérive vers le sud.

L'addition de sable du littoral nord fera le pont vers la côte de dérive vers le sud (l'autre côté de l'embouchure) par le biais des courants de l'embouchure et du delta extérieur (voir croquis). À un certain moment, il est possible (mais pas garanti) que le sable continue son voyage littoral plus vers le sud. Si le "point de fixation" du sable de passage est à une certaine distance de la jetée sud (à la dérive), le risque est que la flèche à côté de cette jetée, perde du sable (transport de sable local, sans autre apport de sable).Le remplissage régulier de sable peut aider à maintenir le rivage, parce que sans cela, la flèche peut se briser à côté de la jetée sud. Et si cela se produisait, l'ensemble du système de l'embouchure s'effondrerait avec la perte des deux jetées (une enterrée sous le sable, l'autre détruite par récurage).

La conception d'un système d'embouchure équipée de jetées fonctionnant bien est très complexe. Et même si les meilleurs experts sont consultés, personne ne peut prédire

exactement quelle sera la réponse morphologique sur ces petites échelles spatiales. Il y aura aussi le risque de récurage arrière et afin d'éviter cela, une surveillance régulière et un entretien technique si nécessaire, seront essentiels.

Les investissements pour installer un tel système sont énormes (au moins plusieurs dizaines de millions d'euros) et les frais d'inspection et d'entretien sont estimés à quelques millions d'euros par an (les travaux de réparation des jetées après une tempête, le dragage des canaux qui peuvent être utilisés par les navires de haute mer, l'alimentation des plages de dérive vers le sud). Nous n'avons pas reçu d'informations sur les facteurs économiques qui pourraient supporter ces coûts. D'un point de vue risque d'érosion, ces investissements ne peuvent être motivés.

Une approche alternative

Donc, si l'embouchure du fleuve suit son cours naturel, alors comment pouvons-nous faire face aux conséquences? Ces conséquences peuvent être résumées comme suit:

- Salinisation de la lagune et ses environs (voir le dernier croquis à la section 3.2), ce qui pourrait entraîner une baisse de la productivité agricole et un changement dans l'écosystème.
- Peut-être le dépôt de particules fines (limon) dans le lagon, qui modifierait la structure du lit et par conséquent les influences sur la vie marine à l'intérieur du lagon.
- L'érosion des sections côtières qui seraient exposées lorsque l'embouchure migrerait vers le sud (avec une vitesse de migration de 200 m/an).
- Peut-être un changement de configuration de l'écoulement à l'intérieur de la lagune (par rapport à la période pré-rupture), qui pourrait localement conduire à l'érosion des berges dans le lagon, liée au déplacement des canaux de marée.

Nous suggérons qu'ue évaluation de l'impact à proprement dit soit réalisée de telle sorte que les conséquences de la nouvelle embouchure du fleuve sur les écosystèmes du sud soient mieux comprises. Cette évaluation de l'impact devrait être basée sur une approche fondée sur les écosystèmes. Il serait intéressant de faire l'évaluation de l'impact de la situation actuelle de l'embouchure du fleuve ainsi que pour quelques-uns des endroits (à venir) plus au sud. En suivant de près la migration de l'embouchure réelle vers le sud, il est possible d'estimer quand ces endroits de recherche peuvent être prévus.

De cette façon une dynamique naturelle "entre certaines limites" peut être permise, en conservant les avantages d'une embouchure du fleuve près de Saint-Louis (accès facile pour les pêcheurs et les risques d'inondation plus faible pour la ville), et en même temps, minimisant les impacts négatifs (comme résumés ci-dessus). En pratique, cette approche implique que seule une certaine étendue de rivage soit consacrée à accueillir l'embouchure du fleuve (l'avenir). Si cela est bien intégré dans l'aménagement du territoire régional, alors la dynamique naturelle du système n'est pas nécessairement une menace ni un problème majeur pour la société.

6 Erosion côtière

6.1 Introduction

L'érosion côtière est souvent vécue comme le recul moyen de la ligne d'eau sur une période de temps (années). Tout ce qui est traversé par cette ligne d'eau mouvante sera perdu, sauf pour les structures bien conçues qui peuvent (au moins pendant une certaine période) résister aux forces de la mer.

L'érosion se produit lorsque l'équilibre entre les apports et les pertes de sable d'une certaine zone côtière devient négatif. Un gradient dans le transport de sable littoral peut provoquer cela, mais le transport de sable au large des côtes peut aussi être une cause (par exemple si l'on creuse un trou profond en face de la plage). Les extractions du sable de la plage peuvent également entraîner un recul du littoral. Bien que les chiffres fassent défaut, nous n'avons pas l'impression que d'importants volumes de sable soient extraits des plages.

Une grave érosion a été observée à l'échelle locale. A l'échelle de l'ensemble de la flèche, cependant, aucune érosion structurelle n'a été observée, qui pourrait conduire à une perte de la flèche en tant que telle. Certaines personnes âgées ont mentionné au cours de la mission sur le terrain que la plage était beaucoup plus large quand ils étaient jeunes, mais aucune donnée n'a pu être trouvée pour appuyer ces affirmations. Compte tenu de notre analyse à la section 3.2, nous ne prévoyons pas que l'ensemble de la flèche actuelle souffre de l'érosion ou disparaisse peu à peu. Il est possible cependant que, sur une échelle de temps de plusieurs décennies, la plage présente un comportement cyclique avec des largeurs de plage plus larges et plus étroites. Les données sur un tel comportement cyclique n'ont put être trouvées dans les sources étudiées.

À long terme le recul global de la côte n'est pas considéré comme très probable. Il existe cependant au moins deux endroits où l'érosion locale a déjà causé des dégâts. L'un est à la paroi à Ndar, l'autre est à Doun Baba Dièye, en face de l'embouchure actuelle. Ces deux problèmes d'érosion locale sont brièvement présentés dans les sections ci-dessous.

6.2 Situation

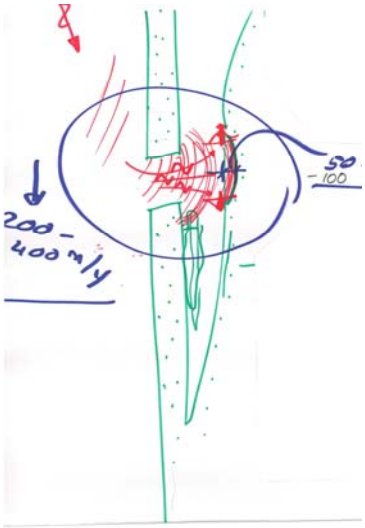
Erosion côtière locale a Doun Baba Dièye

L'érosion le long de l'île de Doun Baba Dièye est bien décrite dans Sy (2010). L'érosion est le résultat d'une réorientation de la rive, qui est visible sur la photo de droite dans la figure 5.2.

Les vagues pénètrent l'estuaire par la nouvelle embouchure et atteignent la plage de la zone côtière frappée (voir croquis ci-dessous). Les vagues entrant génèrent une dérive littorale (similaire, mais beaucoup plus petite que le long de la côte ouverte) qui transporte du sable du centre de la section vers les deux parties extérieures. La forme la plus «circulaire» de la ligne d'eau correspond à l'orientation des fronts de vagues entrantes. L'érosion a peut-être été aggravée par l'intensification de certains

mouvements de sable en mer, mais la réorientation de la côte locale devrait être le mécanisme dominant de l'érosion observée.

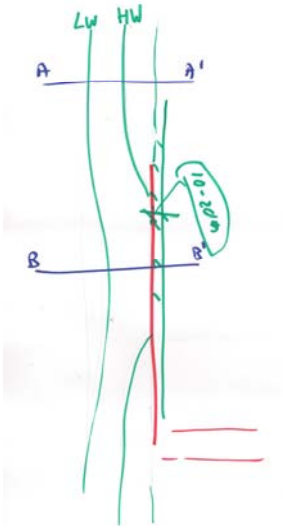
Les endroits du lagon où les futurs changements de rivages semblables peuvent être attendus suivent sommairement la migration de l'embouchure vers le sud. Le taux de cette migration vers le sud était auparavant estimé à environ 300 m/an.



Erosion de la côte le long de la Langue de Barbarie

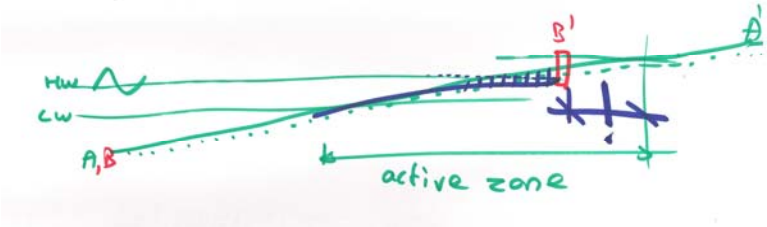
Un autre endroit où les dommages causés par l'érosion locale ont été observés, était à Ndar Toute. Pour être plus précis: en face d'un mur qui est situé le long d'une étendue de côte d'environ 150 m. Cette digue faisait partie d'un boulevard qui remonte à l'époque coloniale.

Au cours de la visite sur le terrain il est apparu que la ligne haute des eaux de la plage se dirige vers le mur (voir croquis ci-dessous). Cela ne pouvait pas être constaté pour la position de la ligne basse des eaux, qui semble plus droite. Pendant les marées hautes et les tempêtes, les vagues peuvent atteindre la digue et s' y briser. Puisque le mur n'a pas été conçu pour résister à l'attaque de telles vagues , il a déjà été endommagé à certains endroits.



La question est : pourquoi la ligne des hautes eaux se dirige-t-elle vers le mur. Une explication possible est que le mur soit situé dans la zone dite dynamique de la plage. C'est la zone qui est influencée par l'action des marées et des vagues. Les particules de sable dans cette zone sont transportées le long de la plage et tant qu'il n'y a pas d'obstacles, la plage peut se développer un équilibre dynamique. Mais si un obstacle dur, comme un mur, empêche le mouvement libre de la plage vers le haut et vers le bas, l'équilibre est perturbé.

Les vagues qui se reflètent / déferlent et qui se brisent finissent par accroitre les turbulences locales, ce qui conduit à du récurage face à la paroi. Cette érosion peut être reconnue par des profondeurs légèrement supérieures en face de la digue (la ligne de hautes eaux HW se dirige vers la digue). Si le mur avait été placé à l'extérieur de la zone dynamique, aucun dommage ne se serait produit. Etablir une distance de sécurité exige des études de morphologie de la plage, pour donner une idée de grandeur, un espace de sécurité de 20m est probablement une estimation raisonnable en un premier temps.



Le quartier de Goxumbaac (au nord de Ndar) n'a pas pu être visité pendant la mission, pour des raisons pratiques. Toutefois, selon la présentation organisée par Mr. le Maire, M. Mamadou Abiboulaye Dieye au cours de la Conférence des Villes Delta à Rotterdam le 30 Septembre 2010, des dégâts dûs à l'érosion locale ont eu lieu ici aussi. Sans données cependant, il est difficile de comprendre la cause de ce préjudice.

Goxumbaac (Décembre 2010)

Dans la section 3.2, l'importance des débordements a été décrite dans l'équilibre du sable côtier. En particulier, la partie inférieure de la Langue de Barbarie au nord de Goxumbaac peut provoquer un retrait général de la rive qui, à plus long terme (décennies) pourrait en effet se faire sentir et entraîner des problèmes de recul du rivage. Il est donc fort possible que la digue et quelques-unes des maisons les plus près du large soient entrés dans la "zone active" décrite ci-dessus, en raison de ce mouvement progressif de la plage et de l'estran (la photo ci-dessus a été prise à la plage de Goxumbaac). Ainsi, bien que le sable ne soit pas vraiment perdu, mais plutôt, "repositionné" en direction perpendiculaire à la rive par de tels débordements, des problèmes d'érosion côtière typique peuvent être rencontrés.

6.3 Préoccupations

Au cours de la mission, il est devenu évident que beaucoup de gens étaient préoccupés par le phénomène d'érosion locale. La question la plus importante est de savoir si l'érosion observée va se poursuivre.

L'érosion le long de la côte à Doun Baba Dieye devrait se poursuivre jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre d'orientation de la côte soit atteint. Un tel "équilibre statique de forme de baie" est atteint lorsque l'orientation de nouveaux rivages est perpendiculaire au flux d'énergie annuel de vagues entrantes. D'après la forme de la baie dans la zone touchée comme observé dans la figure 5.2, on s'attend à ce que l'érosion soit déjà beaucoup moins prononcée aujourd'hui. Il est possible cependant que dans des conditions spécifiques de tempête, un retrait de côte supplémentaire ait lieu. Une zone relativement sûre pour la distance de la ligne HW actuelle est d'au moins10 m, afin d'éviter plus de dommages, si cette érosion continue est effectivement en train de se produire.

Il est attendu que l'érosion en face de la paroi à Ndar Toute menace la stabilité de la paroi. Il est raisonnable de supposer que des dommages graves se produiront lorsque les niveaux de la mer seront plus élevés et au cours de fortes tempêtes.

Sans aucune donnée quantitative sur l'érosion rapportée pour Goxumbaac, il est difficile de faire des prédictions, mais il est probable que plus de dommages se produiront dans des conditions plus extrêmes de tempête.

6.4 Approches Possibles

Pour la définition d'une stratégie de défense côtière rationnelle et durable, il faut prendre en compte d'une part les bénéfices nets obtenus à partir de la protection de la côte, et d'autre part les coûts des mesures de défense côtière, tout en essayant d'intégrer la stratégie de défense dans le cadre plus large du développement durable de la région. Pour cette définition, les trois étapes suivantes peuvent être suivies:

1. Analyse de la situation sans défense côtière;
2. Analyse de la situation avec des mesures de défenses côtières; et
3. Intégration des meilleures mesures de défenses côtières avec autres fonctions et potentiels socio-économiques.

Les ingénieurs de génie côtier ont mis au point toutes sortes de techniques pour ralentir ou arrêter l'érosion côtière (étape 2). Les solutions bien conçues ont en commun qu'elles sont coûteuses et nécessitent un entretien régulier. Les solutions de mauvaise ingénierie dans un environnement dynamique comme celle dont nous traitons ici, ont en commun qu'elles seront détruites au cours d'une violente tempête.

On résume ci-dessous un nombre de solutions de génie côtier:

- Groynes (barrages perpendiculaires à la plage). Ceux-ci ne fonctionneront pas au travers de la brèche, ceci dû à la grande oblique des vagues entrantes.
- Brise-vagues isolés (barrages perpendiculaires et à distance de la plage). Ceux-ci ne coûtent pas très cher, mais ne sont probablement pas efficaces et seraient très dangereux pour les pêcheurs qui utilisent la plage.
- Approvisionnements réguliers de la plage. Cette option aide à agrandir la plage, mais nécessite des approvisionnements réguliers. Une autre option est de surélever les parties les plus basses de la Langue de Barbarie afin d'éviter que le phénomène de débordement ne se reproduise. La première zone à traiter serait celle au nord de Goxumbaac.
- Mur de plage. Ces structures finissent par détruire les plages et ne devraient pas être considérées.

En plus de ces mesures d'ingénierie, une ligne de recul générale peut aussi être considérée. Cela implique que les investissements ne sont autorisés passé une certaine distance de sécurité de la zone dynamique de plage. Dans la définition d'une telle ligne de retrait, il faut considérer le recul de la côte à long terme, causé par l'élévation du niveau de la mer. Les dommages peuvent être réduits en vertu de cette stratégie, mais l'engagement de tous les intervenants est une condition préalable au succès.

Quelle que soit la solution adoptée, la communication et le soutien local est de la plus haute importance. Un grand approvisionnement de la plage par exemple, afin d'élargir la plage, conduira à une plus grande sécurité des maisons et plus d'espace pour les bateaux de pêcheurs. Cependant, cette "nouvelle terre" sera probablement utilisée pour de nouveaux logements vu que le besoin d'espace est très grand. Eventuellement, cela entraînera de nouveaux et encore pire problèmes d'érosion côtière, une fois que le sable ajouté sera transporté par les vagues. Une communication claire et un respect strict des règles de non-construction sur la plage, seraient peut-être même plus importants que l'approvisionnement de la plage lui-même.

Ce dernier point est également vrai pour une stratégie vers la terre, comme la définition d'une ligne de recul. Si les gens de la "première ligne" sont réinstallés ailleurs (et donc ayant été payés pour le faire), alors il doit être activement empêché que d'autres commencent à reconstruire sur la plage récemment abandonnée.

Une dernière remarque est à propos de savoir ce qui se passe. Choisir des stratégies et des solutions finales exigent une pleine compréhension du comportement réel du littoral. Et ce n'est pas encore complètement le cas. L'impact des débordements, par exemple, sur le retrait de la côte devrait être mieux compris et les données sur les changements littoraux devraient être recueillies sur une longue période (au moins plusieurs années). L'Université Gaston Berger peut jouer un rôle important à cet égard

(comme la surveillance sur le terrain faisant partie du programme d'éducation et de recherche des étudiants).

Un site intéressant pour la surveillance détaillée des débordements se trouve juste au nord de Goxumbaac. Si, après la collecte de données appropriée (y compris ce qui se passe pendant une tempête) et leur analyse, il apparaisse qu'il s'agisse bien d'une localisation des pertes importantes de sable, alors une mesure adéquate serait d'augmenter la hauteur de ces terres. Ce faisant, les débordements futurs peuvent être efficacement empêchés, conduisant à de moindres pertes de sable de la plage et donc moins d'érosion du littoral. Cela peut se faire facilement, en retournant le sable de l'intérieur (du cône de débordement) vers la plage où les dunes sont censées être. Une estimation très préliminaire du volume de sable en cause est d'environ 25.000 m^3, ce qui est un volume qui peut éventuellement être pris en charge par les équipements locaux et des entrepreneurs locaux. La hauteur et la largeur de ces nouvelles dunes dans cette région devrait être légèrement supérieure à la hauteur et la largeur des dunes intactes (voir photo dans la section 3.2).

7 Précipitations

La stagnation des précipitations est l'une des causes principales des inondations à Saint-Louis. Le problème est aggravé dans certains quartiers où l'écoulement des eaux usées domestiques est médiocre.

Le mauvais drainage des eaux de pluie est causé par la capacité faible de drainage et des eaux souterraines relativement élevées. Cela prend son origine dans la formation géologique de la région.

La topographie particulière de l'île de Sor est un inconvénient, avec ses dépressions dans les quartiers de Leona et Diaminar (Figure 4.4). L'eau des quartiers environnants s'investit / s'engouffre dans ces dépressions, ce qui augmente les problèmes locaux.

Un mauvais drainage résulte également de l'obstruction aux écoulements de l'eau de surface à certains endroits par des structures, telles que les routes, les digues (basses) et autres structures.

Des bassins de rétention, dans lesquelles des quantités excessives d'eau de pluie peuvent être temporairement stockées ne sont pas présents.

Des stations de pompage ont été construites sur l'île de Sor, et l'une des pompes était en effet en fonctionnement au cours de la mission sur le terrain (en saison des pluies et après un certain nombre de jours de fortes pluies). Néanmoins, une grande partie de Sor était inondée (par l'eau de pluie), montrant que la capacité des pompes n'est pas suffisante pour éviter de telles inondations.

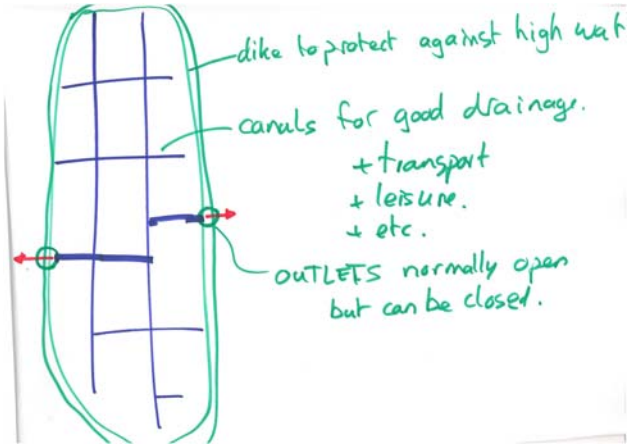
Le problème de drainage médiocre semble être le plus manifeste sur l'île de Sor. Cependant, la nappe phréatique élevée peut aussi causer des dommages aux sous-sols des bâtiments coloniaux dans le centre historique (l'île de Ndar).

Il y a une variété d'actions qui peuvent être envisagées pour accroître la capacité de drainage des zones urbaines ou à augmenter la capacité de rétention des eaux de pluie locales. Les mesures possibles sont:

- Creuser des dépressions locales dans lesquelles l'eau des quartiers environnants puisse être recueillie et d'où l'eau peut être pompée ou s'écouler à travers un réseau souterrain de canalisations. De telles dépressions peuvent servir de squares locaux, places de stationnement, ou jardins dans des conditions normales (non-inondées).
- Un système de canaux dans lequel les différentes fonctions peuvent être combinées (transport sur l'eau, la collecte et l'évacuation des pluies excessives, valeur spatiale, etc.) Ces canaux de drainage peuvent s'écouler dans l'estuaire à un ou deux endroits (voir croquis ci-dessous). Une sorte de dispositif de fermeture sera nécessaire lorsque ces canaux traversent la digue entourant (n'oubliant pas que la digue est destinée à empêcher l'eau de l'estuaire à entrer dans la ville si le niveau de l'eau devient trop élevée - Chapitre 4). Les matériaux creusés des

canaux peuvent être utilisés pour élever la terre sur laquelle de nouveaux bâtiments peuvent être planifiés.

- Augmentation de la porosité du sol en améliorant les caractéristiques (locales) du sol.
- Régler la topographie de telle manière que l'eau ne soit plus collectée dans des dépressions locales, mais qu'elle puisse s'écouler jusqu'à l'estuaire. Cela comprend la mise à jour des dispositifs de drainage spécifiques pour traverser les différentes structures.



Tout choix de la mise à jour d'un système de drainage doit être intégré aux autres dimensions du processus de planification urbaine. Beaucoup d'inspiration peut être trouvée partout dans le monde, mais l'aspect le plus important, c'est qu'il doit être coordonné à la stratégie globale du développement local.

À cet égard, nous tenons à pointer le caractère unique de Saint-Louis, qui, dans une certaine mesure, est semblable aux autres villes lagune, telles que Venise, Italie (Saint-Louis est parfois appelée la "Venise de l'Afrique"). Venise est célèbre pour ses eaux et la façon dont l'eau a été intégrée dans la planification urbaine et dans la vie de la ville. Beaucoup de touristes visitent Venise pour vivre la dimension unique de l'eau dans la ville. Saint-Louis pourrait choisir de faire la même chose, et en même temps résoudre certains de leurs problèmes les plus urgents liés à l'eau (gestion du problème de drainage et de réduction des risques d'inondation).

Si le sujet de l'eau est abordé en tant qu'opportunité au lieu d'un ennemi à combattre, alors Saint-Louis peut faire une déclaration forte au monde entier, semblable à ce que les Vénitiens ont fait il y a bien longtemps: utiliser la dimension de l'eau comme un point de vente unique, et l'intégrer complètement dans la planification du milieu urbain à court et à long terme.

Références

Ba, K., S. Wade, et.al, 2007 Cartographie Radar en Zone Côtière Laide d'images multi datés RSO DÉRS-2. Revue Télédétection, 2007, Vol. 7, Nr 1-2-3-4.

Barry, K.M. and N.C. Kraus, 2009 Stability of Blocked River Mouth on West Coast of Africa: Inlet of Senegal River Estuary. Coastal and Hydraulics Laboratory USACE. ERDC/CHL TR-09-20, December 2009

Barusseau. J.P. et.al, 1998 Morphological and Sedimentological changes in the Senegal River estuary after the construction of the Diama dam. Journal of African Earth Sciences, Vol. 26. nr 2, pp 317-326.

Diagne, K. 2007 Governance and natural Disasters: Addressing Flooding in Saint Louis, Senegal. Environment and urbanization, nr 19 (2007)

OMVS, 2002 1972-2002: 30 Years of Existence. OMVS Brochure celebrating its 30th anniversary

Seck, A.Urban Development, Climate Change and Flood Risk management – a case study of Saint Louis, Senegal. M.Sc. Thesis MWI.2010.032, UNESCO-IHE, April 2010.

Sy, M.B.A., 2010 L'histoire Morphodynamique de Doun Baba Dièye du Sénégal. In: Revue Perspectives & Sociétés, nr. 1 January 2010, ISSN 1840-6130

Liste d'autres documentations pertinentes (sans référence dans le texte)

Stratégie nationale initiale de mise en œuvre de la convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique, Sénégal, octobre 1999

Stratégie Nationale Initiale de Mise en Œuvre (SNMO) de la CCNUCC, 1999

Profil environnemental de St Louis, Commune de St Louis-IAGU-ONU HABITAT, 2005

Agenda 21 Ville de St Louis: cadre de concertation - Gestion durable des déchets, mars 2009

Project document ACCC UNDP/UNESCO: Adaptation au changement de climat – Réponse au changement du littoral et à ses dimensions humaines en Afrique de l'Ouest dans le cadre de la gestion intégrée du littoral (ACCC)

Project document UNDP TACC: Vers un Développement Local Moins Emetteur de Gaz à Effet de Serre et Plus Résistant aux Changements Climatiques dans la zone sylvo-pastorale du Ferlo et la zone du Siné Saloum au Sénégal

Project Document UNDP/Japon: Sénégal - Appui à la mise en œuvre d'approches intégrées et globales de l'adaptation face au changement climatique : Intégration de l'Adaptation au Changement Climatique dans le Développement Durable au Sénégal (PAA/INTAC).

Termes de Référence AFD, Programme de développement touristique de la Région de Saint-Louis (Sénégal), réalisation de l'Etude de faisabilité de l'évaluation environnementale et du plan cadre de gestion environnementale associé

Article "Télédétection et Gestion des Catastrophes Naturelles: Applications à l'étude des inondations urbaines de St Louis", Souleye Wade, Kader Ba, Jean-Paul Rudant, Birama Ndoye, UCAD- Univ Marne la Vallée, 2008

Article: "Flood Risk Reduction in St Louis, Senegal" by Khady Diagne and Souleye Wade, in Disaster Risk Reduction, Cases from Urban Africa, Edited by Mark Pelling and Ben Wisner, 2009

Article: "Cartographie radar en zone côtière à l'aide d'images multidates rso d'ers-2 : application au suivi environnemental de la langue de barbarie et de l'estuaire du fleuve sénégal", Isabelle Niang, Souleye Wade, Kader Ba, Jean-Paul Rudant, Hervé Trebossen, UCAD- Univ Marne La Vallée, 2007

Etude: Stability of Blocked River Mouth on West Coast of Africa: Inlet of Senegal River Estuary, US Army Corps of Engineers, Engineering and Development Research, Kevin M. Barry and Nicholas C. Kraus December 2009

Rapport de l'étude pilote: "Préparation à la Gestion des Périls Naturels et des risques liés aux Changements Climatiques à Dakar, Sénégal, Une approche spatiale et Institutionnelle" (publication remise par Oumar Cissé), Banque Mondiale-IAGU-GeoVille Group, juin 2009

Présentation du programme régional de lutte contre l'érosion côtière d'UEMOA (PREC-UEMOA) avec 1ère phase de diagnostic confiée à UICN: "Suivi du trait de côte et mise en place d'un schéma directeur du littoral ouest africain" (English/French versions.

Rapport disponible en septembre 2010).Rapport Governance around flood crisis in Saint Louis, Final Report (2005 – 2006) ENDA RUP

Offre technique UCAD/ENDA: Ateliers de formation sur la réduction des Risques de catastrophes (remis par Pr Souleye Wade)

De L'Alerte Précoce à L'Action Anticipée : Rapport d'activité de l'Atelier de formation en Adaptation aux Changements Climatiques et Gestion du Risque Climatique (GRC) au niveau communautaire (2-4 Décembre 2009) FICR, Arame Tall

Appendix A

Sommaire des Activités de la Première Mission

Sommaire des Activités de la Mission du 13-18 Septembre 2010

Lundi 13 Septembre (Dakar)

01:00 Arrivée et transfert à l'hôtel Djouff.

08:30 UN Habitat représentante Marie Dariel Scognamillo.

09:00 UNESCO Mrs Isabelle Niang, Coordinatrice Régionale pour le projet ACCC de l'UNESCO.

11:00 Association de la Croix Rouge et du Croissant Rouge. Momodou Lamin Faye, Aram, Maboury Diouf

14:00 Universite Cheik Anta Diop de Dakar. Professeur Alioune Kane.

16:00 to 19:30 transfert à St Louis.

Mardi 14 Septembre (St. Louis)

09:00 Hôtel de Ville – Présentation de la mission UN Habitat aux représentants de:
Municipalité de St Louis – Demba, Soumare,
Mme NbaDC (Agence de Développement Communal) – Ali, Antoine Descleves.
ARD (Agence Régionale de Développement) – Mahmoud Diop
Université Gaston Berger– Processeur Boubou Sy + 2 doctorants.
Ministère de l'Hydrologie – Adama Ndianor successeur d'Ibrahim Dioup

10:30 Reconnaissance sur le terrain du barrage de Diama et la bande nord de la Langue de Barbarie

10:45 Grand Faubourg de Sor. Observation des problèmes d'écoulement et des digues.

13:00 Barrage de Diama. Présentation du directeur du barrage sur le contexte du barrage et ses opérations.

15:00 Langue de Barbarie, pointe nord. Observation des interactions entre la plage, la brèche, l'océan atlantique et le fleuve Sénégal.

17:30 Habitat sur la Langue de Barbarie. Observation du cimetière et des bancs à sécher les poissons, vue du haut depuis la terrasse du bâtiment de l'association des femmes. Observation des interactions entre la plage, la brèche, l'océan atlantique et le fleuve Sénégal. Observation de l'adaptation locale à son environnement.

19:30 Close.

Mercredi 15 Septembre (St. Louis a Potou)

09:00 Bountou Ndour. Observation de l'estuaire et des plantations de mangrove (plantation propre gérée par Mme Simone N'daw), Observation des bassins salins.Gadga Moubaye. Observation de mini falaises érodées par les vagues en provenance de la brèche. Observation des espaces village et agri-culturaux.Potou. Observation de l'ancienne embouchure de l'estuaire, devenu lagune.

16:00 Conseil Régional de St Louis, Mr le Préfet Serigne Mbaye.

17:30 ARD, Mahmoud Kane. Présentation informelle des projets au alentours de St Louis, en particulier l'utilisation du site des 3 Marigots.

20:00 Close

Jeudi 16 Septembre (St. Louis)

08:30 DC. Présentation des stratégies et de la vision du développement urbain de St Louis 2030, une métropole africaine.

11:00 Bibliothèque de l'OMVS, Mbacke Guaye. Recherche de cartes et données.

14:30 ARCADIS / UN Habitat séance de brainstorm, préparation de la présentation a la municipalité.

17:15 Telcon avec Agence Française de Développement, Matthieu Vasseur. Discussion des plans pour la région de St Louis. Recommandation de contacter François Laurent, Directeur de projet basé à Lausanne, Suisse.

19:30 Conclusion d'ARCADIS, ébauche de présentation à UN Habitat.

01:00 Close

Vendredi 17 Septembre (St. Louis et Dakar)

09:30 Hôtel de Ville. Présentation des conclusions préliminaires par Rob Steijn et Sarah Beesley aux acteurs de St Louis de la région.

11:30 Mission Accomplie!

14:00 transfert vers Dakar.

19:00 Dakar.

Samedi 18 Septembre

01:55 Départ.

Appendix B

Photo Impression

Photo Impression field mission

Photo 1: Road along the northern part of Sor (named Boulevard El Hadj Momar Sourang). Poor water drainage from the road to the estuary. Small scattered damages to the wall.

Photo 2: same position looking to the west with St Louis on the horizon

Photo 3: Between Sor and Khar (towards Richard Toll). People enjoying and using (washing) the water. The road cuts the water in two; a sluice (said to be widened) allows water to flow.

Photo 4: North of Sor. Low lying area where huts and houses are built on top of a foundation of garbage and litter. Most of the area was wet because of rainfall and bad drainage.

Photo 5: On our way to the Diama dam. Low lying land and lots of water everywhere.

Photo 6: The downstream side of the Diama dam. At the time of the visit the discharge was said to be 1600 m^3/s.

Photo 7: Ship Lock adjacent to the Diama dam.

Photo 8: Upstream side of the Diama dam

Photo 9: On the spit on our way to the new river mouth. On the left side the estuary; the wall on the right side separates the road from the cemetery (which was largely flooded at the time of the mission as a result of heavy rainfall)

Photo 10: Large pools on the way forced us to change cars. Pools caused by rainfall.

Photo 11: Standing close to the new river mouth (inlet) looking northward. The location of the breach was near the vegetated part of the spit, at some 500 distance.

Photo 12: Discussion on the beach just north of the inlet. Waves breaking at some 300 m distance from the shore indicating the presence of an outer bar (ebb-tidal delta).

Photo 13: Almost standing in the inlet looking northward

Photo 14: the locally called “Polish Port” is hardly used by the fishermen because the quays are too high for their boats.

Photo 15: From Guet Ndar looking soutwards. The estuary on the left; the ocean on the right with the spit in between. Left from the wall is the cemetery, right of it the fish drying area.

Photo 16: same location, looking northwards

Photo 17: Same location as photos 15 and 16 looking eastward - St. Louis on the back

Photo 18: Sarah and Antoine on the roof in Guet Ndar

Photo 19: Seawall at Ndar Toute looking soutwards. Narrow beach which disappears at high waters (waves breaking on the seawall causing locally some damage). Wall was said to be part of a boulevard built in colonial times (at least a century ago)

Photo 20: Same location looking northwards

Photo 21: Young coastal morphologists

Photo 22: Idem

Photo 23: On our way to the old river mouth location. Mangroves on the other side of the road. Cut for firewood, but more and more replanted by local communities.

Photo 24: same location, zooming in

Photo 25. Bank erosion in the estuary some 10 km south of the inlet. Looking northward (inlet not visible). Bank erosion was said to be very small (cm/y).

Photo 26: Same location looking southwards

Photo 27: At the location where the old river mouth was (now closed) looking northward.

Photo 28: ARCADIS team standing on the closed old river mouth.

Photo 29: The famous bridge connecting the main island of St. Louis with the island of Sor (bridge was under reconstruction)

Photo 30: Street view of St. Louis.