UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

Thèse en cotutelle présentée pour obtenir le titre de Docteur de l'université de Strasbourg et de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar

Discipline : Géographie

par **Coura KANE**

Vulnérabilité du système socio-environnemental en domaine sahélien : l'exemple de l'estuaire du fleuve Sénégal

De la perception à la gestion des risques naturels

Soutenue publiquement le 22 novembre 2010 à l'Université de Strasbourg

Membres du jury :

Directeur de thèse :	**Joël HUMBERT**, Professeur, Université de Strasbourg
Directeur de thèse :	**Alioune KANE**, Professeur, Université Cheikh Anta Diop de Dakar
Rapporteur externe :	**Michel MIETTON**, Professeur, Université de Lyon 3
Rapporteur externe :	**Eric SERVAT**, Directeur de recherche, IRD Montpellier
Rapporteur interne :	**Dominique SCHWARTZ**, Professeur, Université de Strasbourg
Examinateur :	**Amadou Abdoul SOW**, Maître de conférences, Université Cheikh Anta Diop de Dakar

Image Ville Environnement ERL 7230 — cnrs — EDEQUE — Laboratoire de Morphologie et d'Hydrologie — AUF

Remerciements

Au terme de la rédaction de cette thèse, je tiens à remercier les personnes qui m'ont apporté leur soutien, leur aide, leurs conseils et leurs encouragements pour la réalisation de ce travail.

Je remercie tout d'abord mes deux directeurs de thèse Alioune Kane et Joël Humbert d'avoir accepté de diriger ce travail. Je souhaite par la présente leur exprimer toute ma gratitude pour l'encadrement qu'ils ont bien voulu m'accorder et les conseils pratiques qui m'ont permis de mener à terme ce travail. Leur rigueur scientifique a été d'un grand apport durant toutes les étapes de la réalisation de ce travail. Je leur dois ma reconnaissance et je les assure de ma détermination à rester fidèle à cet esprit de rigueur.

Je tiens également à remercier Messieurs Michel Mietton, A. Abdoul Sow, Dominique Schwartz et Eric Servat pour le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à l'examen de ce manuscrit.

Je témoigne ma reconnaissance à A. Abdoul Sow, Awa Niang Fall, Ndiacé Diop, Amadou Tahirou Diaw, Alioune Ba, Honoré Dacosta, Pape Sakho et Diène Dione du département de Géographie de l'UCAD qui m'ont toujours réservé un accueil chaleureux et également au doyen Saliou Ndiaye, Mamadou Bop, chef de service de la scolarité de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines de l'UCAD de Dakar et André d'Almeida de l'UGB pour leurs conseils.

Je remercie Madame Christiane Weber de m'avoir acceptée au sein du laboratoire Image Ville Environnement (ERL 7230) et ses membres particulièrement Anne Puissant, Aziz Serradj, Paul Salze, Grégoire et Jérôme Colin du Laboratoire des Sciences de l'Image, de l'Informatique et de la Télédétection (UMR 7005) pour leur aide pour les SIG et la télédétection. A Hamadou Issakha, avec qui j'ai partagé le bureau, je voudrais dire merci pour ses encouragements.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de Besdaly Coulibaly de la DRDR, Malang Diatta de l'OMVS, Gora Ndiaye de la DGPRE pour leur aide combien précieuse et spontanée, leurs conseils m'ont été d'un apport inestimable. Ces remerciements vont droit aussi à Boubou A. SY de la section de Géographie de l'Université Gaston Berger de Saint-Louis, Daouda Mbodj de l'ANCAR, Aliou Seydi de l'ISRA, Souleymane Diop et Mamadou Sow de l'ONAS pour leur disponibilité sur le travail de terrain qu'ils ont accompli avec diligence.

Je remercie Moussa Mbaye, doctorant en géographie et Mouhamed Konaté de l'UNESCO pour leur disponibilité et la relecture de ce travail ainsi que Idrissa Guiro, doctorant en géographie pour sa disponibilité et son aide à la collecte des données.

Je remercie Adrien Coly, Chargé d'enseignement et Abdou Sène, Maître de conférences à l'UGB pour avoir manifesté un grand intérêt pour ce travail en s'investissant profondément dans sa réalisation. A Cheikh Mbow de l'Institut des Sciences de l'Environnement pour les images satellites, Ibrahima Diop du service de l'Hydraulique de Saint-Louis, Adama Cheïbani et Cheikh Tidiane Samb de la SOGED pour avoir bien voulu mettre à notre disposition les données hydrologiques. Mbacké Gueye du centre de documentation de l'OMVS de Saint-Louis pour avoir facilité l'accès à la production scientifique du centre.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude à Moustapha Dièye de l'ISRA qui a bien voulu effectuer l'analyse granulométrique et Martine Trautmann de l'EOST UMS 830 CNRS pour m'avoir aidé à traiter les données granulométriques. Je ne saurais oublier Odile Opériol, François Pesnaud pour leurs conseils, leurs disponibilités.

Cette thèse a bénéficié de l'appui financier de l'Agence Universitaire de la Francophonie. Que Madame Fabar Sané, Chargée de projet à l'AUF, trouve dans ce travail l'expression de toute ma gratitude.

Je remercie Ibrahima Sy pour m'avoir accueilli au début de mon séjour à Strasbourg.

Je remercie mon père Ismaïla, ma mère Madjiguène, ma tante Arame, mon frère Amadou, mes sœurs Gnagna, Thiané, Fambaye, toute ma famille et ma belle famille pour leur soutien et leurs encouragements précieux. Merci à Cheikh, pour ta patience, ta compréhension et ton soutien inestimable.

Que mes amis et toutes les personnes qui n'ont pas été nommément citées ici trouvent dans ce travail l'expression de toute ma reconnaissance et ma gratitude.

Résumé

La zone sahélienne est sujette à une forte variabilité hydroclimatique qui se traduit ces dernières années par un retour à des hivernages pluvieux. L'estuaire du fleuve Sénégal qui se trouve dans sa partie septentrionale subit les conséquences de ces fluctuations climatiques. En 2003, la crue du fleuve Sénégal qui s'annonçait précocement avait poussé les autorités sénégalaises à délocaliser l'embouchure du fleuve Sénégal à 25 km en amont. Cette décision prise dans l'urgence a entraîné de profondes modifications du comportement hydrologique et hydrodynamique de l'estuaire. L'objectif de ce travail est de mettre en évidence la relation conflictuelle de l'homme à l'environnement, notamment illustrer une approche de géographie globale qui se situe résolument à l'interface homme/nature. Il s'agit de montrer, d'une part, que la société engendre des vulnérabilités par ses différentes modes d'occupation du sol dans un espace qui est déjà fragilisé par ses conditions physiques. D'autre part, les différentes politiques visant à atténuer les risques naturels ont induit une vulnérabilité plus insidieuse du fait d'une absence de culture du risque perceptible dans les pays en voie de développement.

La thèse s'articule en trois étapes. La première consiste à montrer par une analyse du cadre phyique que l'estuaire est un espace soumis à des aléas (inondation, salinité) alors qu'il connaît une forte expansion urbaine et de façon paradoxale les activités agricoles s'y developpent. La deuxième partie s'intéresse au fonctionnement d'un estuaire fortement anthropisé suite à la gestion des aléas hydro-climatiques. A partir des enquêtes, de l'analyse diachronique des images satellites, des mesures topobathymétriques, de salinité, etc. la vulnérabilité du système socio-environnemental face aux modifications du milieu et l'accentuation d'une vulnérabilité en cas d'une élévation du niveau marin ont été mises en évidence dans la troisième partie de cette thèse.

Les résultats montrent que la sécheresse se poursuit au Sahel, les années humides de ces dernières années sont une anomalie détectée dans la séquence sèche de la variabilité climatique qui est de rigueur au Sahel. Le phénomène des inondations à Saint-Louis est plutôt provoqué par l'incurie urbaine. Les actions anthropiques qui sont de plus en plus prédominantes dans le milieu conduisent, le plus souvent, à la survenance des événements catastrophiques.

Mots clés : aléa, inondation, nouvelle embouchure, vulnérabilité, gestion, perception, estuaire, Sahel, système socio-environnemental, Senegal.

Summary

The Sahel is subject to high variability resulting hydroclimatic years by a return to rainy winters recently. The estuary of the Senegal River located in the northern part suffers the consequences of these climatic fluctuations. In 2003, the flooding of the Senegal River had precociously pushed the Senegalese authorities to relocate the mouth of the Senegal River 25 km upstream. This decision resulted the urgency of profound changes of the hydrological behavior and hydrodynamics of the estuary. The objective of this work is to highlight the conflictual relationship of man and environment, particularly illustrating a firm comprehensive approach to geography at the interface between man and nature. These show, first, that society creates vulnerabilities through its various modes of land in an area which is already weakened by its physical condition. Secondly, that the various policies to mitigate natural hazards have led a more potential vulnerability due to lack of awareness of risk perceived by the people in developing countries.

The thesis is divided into three stages. The first is to demonstrate a framework analysis physique that the estuary is an area subject to the hazards (flooding, salinity), while experiencing a rapid urban expansion and agricultural activities paradoxically developed there. The second part focuses on the functioning of an estuary due to the strong anthropic management of hydro-climatic hazards. From surveys, the diachronic analysis of satellite images, topobathymetric measures and salinity, show the vulnerability of socio-environmental challenge to environmental changes and the emphasis of vulnerability in the event of the rise in sea level have been highlighted in the third part of this thesis.

The results show that drought continues in the Sahel, wet years in recent years are an anomaly detected in the sequence of dry climate variability that is mandatory in the Sahel. Flood events in St. Louis are rather caused by the negligence urban people. Human actions that are increasingly occurred are the prevalences in the environment that lead, most often to the occurrence of catastrophic events.

Keywords: hazard, flood, new mouth, vulnerability, management, perception, estuary, Sahel, socio-environmental system, Senegal

Table des matières

Remerciements **1**

Résumé **3**

Summary **4**

Table des matières **5**

INTRODUCTION GENERALE **12**

PARTIE I : ANALYSE D'UNE VULNERABILITE SOCIO-ENVIRONNEMENTALE LIEE AUX CONDITIONS PHYSIQUES DU MILIEU **19**

Chapitre 1 : Eclairage conceptuel et méthodologie appliquée à l'analyse de la vulnérabilité **22**

1.1. Le système socio-environnemental 22

1.1.1. Les relations conflictuelles entre nature et société 23

1.1.2. Le système socio-environnemental, objet d'étude de la vulnérabilité 24

1.2. De la notion de vulnérabilité 25

1.2.1. L'origine du vocable vulnérabilité 25

1.2.2. La vulnérabilité, un concept polysémique 26

1.2.3. L'estimation de la vulnérabilité 29

1.3. La méthodologie appliquée à l'analyse de la vulnérabilité 30

1.3.1. L'utilisation des systèmes d'information géographique et de la télédétection 32

1.3.2. L'analyse fréquentielle 33

1.3.3. La méthode de détection de rupture dans les séries chronologiques 33

1.3.4. Les enquêtes 33

1.3.4.1. Les informations à recueillir 34

1.3.4.2. Le choix des zones ciblées pour l'enquête 34

1.3.4.3. Les outils de collecte d'information 35

1.3.4.3.1. Le questionnaire 35

1.3.4.3.2. Les entretiens 35

1.3.4.3.3. L'observation directe 36

1.3.5. Les mesures de la salinité et de la brèche....36

Conclusion....37

Chapitre 2 : Les forçages internes de l'estuaire du fleuve Sénégal....38

2.1. Détermination des caractéristiques physiques....40

2.1.1. Les caractéristiques naturelles favorables au risque d'inondation et à la salinisation des terres....40

2.1.1.1. La classification supervisée....40

2.1.1.2. Aperçu géomorphologique....45

2.1.1.3. Les conditions édaphiques....47

2.2. Un climat caractérisé par deux saisons....48

2.2.1. Le cadre climatique et les facteurs de la morphogenèse....48

2.2.1.1. Les facteurs de la morphogenèse....49

2.2.1.1.1. La dynamique éolienne....49

a. La situation éolienne d'octobre à mai....49

b. La situation éolienne de juin à décembre....50

2.2.1.1.2. La pluviométrie....52

2.2.1.1.3. Les autres éléments du climat....55

2.2.1.1.3.1. Les températures moyennes mensuelles....56

2.2.1.1.3.2. La durée d'insolation....57

2.2.1.1.3.3. L'évaporation moyenne....57

2.2.1.1.3.4. L'humidité relative....58

2.3. Le climat à Saint-Louis....59

2.3.1. La période qui va de novembre à mai....59

2.3.2. La période qui va de juin à octobre....60

Conclusion....62

Chapitre 3 : De la dualité nature-société à la géographie des risques....63

3.1. L'occupation de l'estuaire du fleuve Sénégal....63

3.1.1. L'évolution exceptionnelle d'une zone à risque....64

3.1.2. L'aggravation des risques par l'urbanisation....72

3.1.3. La perception du risque 75

3.2. Le terroir villageois du Gandiolais 79

3.2.1. La population 80

3.2.1. L'environnement biophysique et socio-économique 81

3.2.1.1. Les aires protégées 82

3.2.1.1.1. Le Parc national de la Langue de Barbarie 82

3.2.1.1.2. La Réserve Spéciale de Faune de Gueumbeul (RSFG) 84

3.2.1.2. Les caractéristiques socio-économiques 86

3.2.1.2.1. Le maraîchage et le problème de sel 86

3.2.1.2.2. L'exploitation du sel 89

3.2.1.2.3. La pêche 90

Conclusion 91

PARTIE 2 : GESTION DES ALEAS HYDRO-CLIMATIQUES ET FONCTIONNEMENT D'UN ESTUAIRE FORTEMENT ANTHROPISE 92

Chapitre 4 : La gestion hydraulique du barrage de Diama et ses impacts sur l'hydrologie de l'estuaire 95

4.1. Procédures et méthodes de gestion du barrage de Diama 96

4.1.1. Sources des données hydrométriques et pluviométriques 97

4.1.2. Le réseau hydrométrique 97

4.1.3. Les manœuvres des vannes du barrage de Diama 98

4.1.3.1. Gestion des vannes en période d'étiage 100

4.1.3.2. Gestion des vannes en période de crue 100

4.2. L'évolution interannuelle des écoulements à la station de Bakel 101

4.3. Corrélation des modules mensuels entre Bakel et Diama 104

4.4. L'évolution interannuelle des débits évacués au barrage de Diama 106

4.5. Le laminage des débits de crue, une difficile mise en application du barrage de Diama 107

4.6. Les flux d'eau entrant dans l'estuaire 108

4.6.1. L'année hydrologique 1994-1995 110

4.6.2. L'année hydrologique 1995-1996 112

4.6.3. L'année hydrologique 1999-2000 113

4.6.4. L'année hydrologique 2003-2004 114

4.6.5. L'année hydrologique 2005-2006 114

4.6.6. L'année hydrologique 2006-2007 115

4.7. L'analyse fréquentielle des débits évacués par le barrage de Diama 116

4.7.1. Le calage du modèle fréquentiel 117

4.7.2. Les périodes de retour 120

Conclusion 121

Chapitre 5 : La gestion du risque d'inondation : l'ouverture d'une embouchure artificielle sur la Langue de Barbarie 122

5.1. Le contexte d'ouverture de la brèche 123

5.1.1. Caractérisation de la tendance des débits des stations de Manantali et Bakel 124

5.1.2. La situation hydrologique du fleuve Sénégal en 2003 129

5.2. Les fluctuations climatiques, des déterrminants dans la gestion des risques……...133

5.3. La coupure de la Langue de Barbarie 135

5.4. Le déplacement de l'embouchure vers le sud: facteur d'aggaravation des inondations……..139

5.5. Une évolution mal maîtrisée 141

5.5.1. L'évolution spatio-temporelle de la brèche 142

5.5.1.1. L'évolution en 2004 142

5.5.1.2. L'évolution en 2005 144

5.5.1.3. L'évolution en 2006 147

5.5.1.4. L'évolution en 2007 149

5.5.1.5. L'évolution en 2008 et 2009 151

5.5.2. Le colmatage de l'ancienne embouchure 154

5.6. Les études préalables à l'ouverture d'une embouchure artificielle 156

Conclusion 157

Chapitre 6 : La prédominance des influences marines suite à l'ouverture de la nouvelle embouchure 159

6.1. L'évolution actuelle de la marée 159

6.1.1. Le retrait des eaux en marée basse 162

6.1.2. Amplification de l'amplitude de marée 164

6.1.3. Etude des surcotes et décotes 166

6.1.4. La propagation de la marée 168

6.2. Le processus hydrodynamique de l'estuaire 171

Conclusion 176

PARTIE III : MODIFICATIONS DE L'EMBOUCHURE DU FLEUVE SENEGAL : IMPACTS SUR LA VULNERABILITE DU SYSTEME SOCIO-ENVIRONNEMENTAL 177

Chapitre 7 : Une évolution récente marquée par les modifications du milieu 179

7.1. La morphologie actuelle de la Langue de Barbarie 179

7.1.1. Les levés topographiques 179

7.1.2. Les caractères généraux des profils topographiques 181

7.1.3. Analyse granulométrique des sédiments 184

7.1.3.1. Méthode de traitement 184

7.1.3.2. Résultats 186

7.1.3.2.1. La taille moyenne 186

7.1.3.2.2. L'asymétrie 187

7.1.3.2.3. La normalité 187

7.1.3.2.4. Le triage 188

7.2. Les forçages météorologiques et océaniques 189

7.2.1. Le polygone des fréquences des vents 189

7.2.2. L'influence de la houle 190

7.2.2.1. La houle du NW 191

7.2.2.2. La houle du SW 191

7.2.3. Les vagues 191

7.3. L'île de Doun Baba Dièye et le quartier de Pikine menacés 192

7.4. Les impacts sur la végétation du cordon littoral et des écosystèmes estuariens 196

7.4.1. Dégradation de la végétation du cordon littoral 196

7.4.2. Effets sur les écosystèmes estuariens 198

7.4.2.1. Le secteur Diama- Djeuss 199

7.4.2.2 Le secteur du Gandiolais 200

7.4.2.3. La dégradation de la mangrove 201

7.4.2.4. Développement des espèces halophiles 204

7.4.3. Réduction de la surface de l'îlot aux oiseaux (Parc National de la Langue de Barbarie) 204

7.5. La gestion difficile du barrage de Diama 206

Conclusion 208

Chapitre 8 : La vulnérabilité des sociétés du bas estuaire face aux changements environnementaux : utilisation du concept DPSIR 209

8.1. Le modèle conceptuel DPSIR 209

8.1.1. La réduction du temps de séjour de l'eau douce (Driving forces) 211

8.1.2. Effets sur la qualité de la nappe dans le bas estuaire (pressions) 215

8.1.2.1. Le mode opératoire 216

8.1.2.2. La qualité des eaux souterraines (Etat) 216

8.1.2.2.1. Le taux de salinité 216

8.1.2.2.2. La conductivité 218

8.1.2.2.3. Le pH 219

8.1.3. Impacts des aménagements sur les activités socio-économiques (Impacts) 221

8.1.3.1. Difficulté d'approvisionnement en eau 222

8.1.3.2. Baisse des rendements horticoles 223

8.1.3.3. Modification du calendrier cultural 225

8.1.3.4. Le système de métayage 225

8.1.3.5. Le recours à la main d'œuvre 225

8.1.3.6. La baisse des revenus 226

8.1.3.7. Des effets mitigés pour la pêche 227

8.1.3.7.1. L'ouverture de la brèche, une aubaine pour les pêcheurs 227

8.1.3.7.2. Diminution des espèces halieutiques au niveau du fleuve 228

8.1.4. Stratégies d'adaptation face aux risques anthropiques (Réponses) 230

8.1.4.1. Les réponses institutionnelles 231

8.1.4.1.1. Le canal du Gandiolais 231
8.1.4.1.2. L'adduction en eau potable 233
8.1.4.2. Les réponses des populations 234
8.1.4.2.1. Changement de lieu d'activité 235
8.1.4.2.2. Les migrations 236
8.1.4. 3. Les mesures d'atténuation 240
8.1.4.4. Le schéma conceptuel DPSIR 242
Conclusion 244
Chapitre 9 : L'accentuation de la vulnérabilité en cas d'une élévation du niveau marin 245
9.1. Les scénarios des changements climatiques 245
9.2. Les tendances évolutives actuelles de la Langue de Barbarie 247
9.2.1. Les pressions sur le littoral 248
9.2.2. L'endommagement du système 250
9.2.3. Les enjeux socio-économiques 252
9.3. Les superficies perdues par une hausse du niveau de la mer 254
9.4. La prégnance d'une vulnérabilité 256
9.5. Discussion sur la gestion des risques naturels dans l'estuaire du fleuve Sénégal 263
Conclusion 265
CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE 267
Références bibliographiques 272
Table des illustrations 287
Liste des tableaux 292
Liste des sigles et abréviations 294
Liste des annexes 296

INTRODUCTION GENERALE

La vulnérabilité est un terme couramment usité pour définir une propension à subir des dommages, l'exposition à un danger, l'incapacité d'une société à faire face à un ensemble de risques découlant d'un aléa. Cette notion est un élément essentiel dans l'analyse des risques et des événements extrêmes d'origine naturelle. Elle émerge dans un contexte de globalisation des changements environnementaux (dégradation des ressources naturelles, changements climatiques, perturbations écologiques…) et de la tendance à une augmentation des catastrophes d'origine naturelle qui ont causé des dommages très importants. L'impact de ces modifications et de ces catastrophes se traduit généralement par une capacité de résilience faible de la société concernée, qui a du mal à résister, à s'adapter à un changement majeur. Ainsi la question de la vulnérabilité du système face aux risques naturels et aux changements globaux est devenue une préoccupation majeure pour l'ensemble de la communauté scientifique. A ce titre, de nombreux auteurs (D'Ercole, 1994 ; Blaikie et al. 1996 ; Adger, 1999 ; Dauphiné, 2003 ; Veyret, 2004 pour ne citer qu'eux) se sont intéressés à ces questions de vulnérabilité du fait notamment de sa prégnance sur le système socio-environnemental.

Les conséquences de ces catastrophes ont un caractère particulièrement grave dans les pays en développement, notamment lorsqu'ils se conjuguent à des modifications climatiques qui fragilisent encore un milieu sensible du fait de sa position latitudinale. Sur ce plan, la zone sahélienne représente un exemple significatif. Elle constitue une région soumise à des saisons très contrastées faisant alterner une saison sèche et une saison pluvieuse. Cette dernière se manifeste par son caractère incertain marqué le plus souvent par une pluviosité déficitaire. Ces précipitations sont tributaires de l'intensité de la mousson qui est par ailleurs marquée par une forte variabilité. Le Sahel a connu une période de déficit hydrique exceptionnel par sa durée et son intensité dans les années 70. Au cours de cette période, plus de 125 000 décès ont été enregistrés dans les Etats francophones d'Afrique (Dauphiné, 2003). A cela, s'ajoutent les famines répétées surtout dans la période 1972-1974. Une perte de 600 000 tonnes sur les récoltes de céréales a été enregistrée, soit un manque à gagner d'environ 15% sur le revenu annuel moyen. Le secteur de l'élevage a connu une perte de 80% du bétail (Guillaumie et al. 2005). La sécheresse a ainsi mis en danger la survie du système socio-environnemental et l'a soumis à des risques sévères qui ont été à l'origine de catastrophes très destructrices. Pour faire face à cet aléa, la maîtrise de l'eau apparaît comme une condition fondamentale de la réduction de la vulnérabilité du système. Ainsi la domestication de la nature est devenue un enjeu de taille pour les gouvernements de la région. Dans cette optique, la construction des barrages (Diama et Manantali) a été la solution adoptée au niveau du fleuve Sénégal pour assurer un développement durable et une autosuffisance alimentaire.

En revanche, ces dernières années, le Sahel est de plus en plus sujet à un retour à des hivernages pluvieux qui se traduisent par des précipitations abondantes favorisant une augmentation du débit du fleuve. L'abondance fluviale se manifeste par des débordements

qui se traduisent par des risques d'inondations. L'estuaire du Sénégal qui se trouve dans sa partie septentrionale subit les conséquences de ces fluctuations climatiques.

Les estuaires constituent des écosystèmes particulièrement sensibles aux variations des influences océaniques et fluviales et aux événements extrêmes. Ils sont menacés par des risques d'origine naturelle, à l'exemple des inondations, des tempêtes, des cyclones, des tsunamis. Malgré ces aspects, ces interfaces eaux marines-eaux fluviales constituent des espaces privilégiés pour les activités humaines (Paskoff, 1998). En effet, de nombreuses activités économiques s'y développent en particulier agricoles, touristiques et piscicoles. Outre leur rôle économique très fort, les espaces côtiers ont un rôle social très important. Les côtes sont, de ce fait, le théâtre d'interactions complexes entre société et environnement. Elles constituent un lieu et un objet d'enjeux culturels, économiques, sociaux et scientifiques (Baron-Yellès et al, 2002). Aussi, ils sont devenus des zones très convoitées et concentrent une population importante. Adger et al. (2005) estiment que le taux de la population mondiale vivant le long des littoraux atteindra plus de 50% d'ici 2030. Au niveau des pays de l'Afrique occidentale et centrale, plus particulièrement, la population vivant le long du littoral doublera pour atteindre 50 millions au cours des 25 prochaines années selon les prévisions du PNUE (2000). De son côté, le Sénégal dispose de 700 Km de côtes, concentrant plus de 50 % de la population et 85 % des industries et des services. La pêche et le tourisme sont les premières sources de revenus mais en même temps dépendent des ressources marines et côtières. En plus l'écosystème des « Niayes » qui borde la frange maritime, caractérisé par des zones dépressionnaires et des dunes constitue un facteur de productivité importante (Niang-Diop et al, 2002). Les espaces côtiers sont aujourd'hui de plus en plus menacés par les activités humaines qui contribuent à rompre les équilibres écologiques. C'est dans ce contexte qu'ont été adoptées des résolutions lors de la conférence de Rio en 1992. Le chapitre 17 de l'Agenda 21 fait du concept de Gestion Intégré des Zones Côtières (GIZC) la démarche qu'il convient de privilégier pour tendre vers le développement durable des zones côtières.

L'estuaire du fleuve Sénégal occupe une place stratégique dans le processus de développement des activités socio-économiques de la région de Saint-Louis. Sa position géographique lui confère un environnement propice pour le développement du maraîchage, de la pêche, de l'élevage, du tourisme, etc. Par ailleurs, les conditions physiques du milieu sont des facteurs contraignants pour un développement urbain. C'est une zone basse qui se particularise par l'omniprésence de l'eau. Les altitudes émergent à peine au dessus du niveau de la mer. Il apparaît comme un espace à risque où la conjonction de plusieurs facteurs peut produire des effets incommensurables. Malgré tous ces aspects qui ne se prêtent pas à une extension spatiale, l'estuaire connaît une évolution sans précédent au plan urbain. Il présente un caractère pluriel et complexe posant des problèmes dus à la superposition de phénomènes et de situations très différenciés. En outre, les populations ne laissent pas le temps aux autorités de réaliser des aménagements préalables et indispensables pour toute zone d'habitation, ce qui dénote une absence de perception du risque à habiter dans des zones non viabilisées. La représentation cognitive de l'aléa reste

une donnée non intégrée par la société. Incontestablement l'une des évolutions les plus marquantes au niveau de l'estuaire est l'urbanisation caractérisée « d'incontrôlée, d'anarchique » qui, jointe le plus souvent à la croissance démographique, est considérée comme un facteur de risque. De même, les méthodes de gestion des risques mettent en évidence une méconnaissance approfondie de la perception de l'environnement. Le phénomène des inondations à Saint-Louis date de l'époque coloniale. Déjà à cette époque, des aménagements avaient été effectués (quais) mais cela n'a pas permis de juguler le problème. Malgré la baisse des écoulements sur le fleuve Sénégal, ces inondations perdurent. D'autres causes sont également responsables de cette situation notamment l'occupation incontrôlée des zones non ædificandi par les populations qui cause d'énormes difficultés aux occupants des lieux, en période de crue. Face à cette situation, les différentes mesures tendant à pallier les problèmes et à prévenir certains risques permanents n'ont été mis au point que tardivement, dans les années 90.

Cette absence de prévention des risques conduit le plus souvent à des actions irréversibles. Dans cette perspective, en 2003, l'ampleur que devait connaître le phénomène des inondations dans l'estuaire a incité les autorités sénégalaises à prendre des mesures pour la limiter. Ils ont délocalisé l'embouchure du fleuve Sénégal à 25 km à l'amont pour évacuer les eaux de crue en mer. Cette gestion des risques a produit un faisceau de profondes modifications qui ont entraîné des dysfonctionnements :

- perturbation des échanges des eaux fluviales et des eaux marines ;
- dégradation des écosystèmes estuariens ;
- impacts socio-économiques dont la manifestation la plus évidente est la précarité du cadre de vie dans le bas estuaire.

Ces dysfonctionnements sont la conséquence d'une tentative de réduction de la vulnérabilité par des aménagements ignorant une norme élémentaire, à savoir les études d'impact. Cette limite a contribué à introduire une vulnérabilité plus insidieuse.

La perception du risque dans les différentes politiques de gestion relève d'un grand intérêt surtout dans un contexte marqué par une augmentation du nombre des catastrophes surtout hydro-climatiques (comme les sécheresses, les tempêtes et les inondations). D'après le PNUE (2002) durant les années 90, ces catastrophes ont été à l'origine de plus de 90 % des décès. Plus de la moitié de toutes les catastrophes signalées ont eu lieu dans des pays ayant atteint un niveau moyen de développement humain. Il est encore plus urgent dans les pays en développement de définir des politiques ciblées qui prennent en compte la dimension socio-environnementale dans son ensemble pour faire face aux différents aléas.

Ce travail consiste à montrer, d'une part, que la vulnérabilité du système socio-environnemental est en forte mutation qui va dans le sens d'une exacerbation. Cette dynamique est la conséquence d'une forte expansion urbaine anarchique. D'autre part, les

différentes politiques visant à atténuer les risques naturels ont induit une vulnérabilité plus insidieuse du fait d'une absence de culture du risque perceptible dans les pays en voie de développement.

Une telle étude se justifie par l'actualité du thème abordé. La vulnérabilité du système socio-environnemental, malgré les diverses politiques qui visent à la réduire, ne cesse de s'accroître. Elle fait actuellement l'objet de plusieurs études notamment :

- celles qui portent sur la sensibilité (marginalisation, pauvreté, sécurité alimentaire…) face à des événements déstabilisants (Adger 1999, 2006, Cutter 1996, Cutter et al. 2003) ;

- celles des sciences du risque qui considèrent la vulnérabilité en termes de capacité d'endommagement ou d'ampleur potentielle de dégâts, en fonction de la fréquence d'occurrence d'un aléa (Dauphiné 2003, Pielke et al. 2007) ;

- celles de la faible résilience aux changements globaux en l'occurrence les impacts des changements climatiques (Brooks et al. 2005).

Par ailleurs, la diversité des études réalisées sur le fleuve Sénégal montre l'intérêt manifeste que ce cours d'eau suscite auprès des chercheurs. De nombreux auteurs, en l'occurrence, Rochette (1964), Michel (1973), Sow (1984) et Kane (1985) ont fait le point sur la connaissance du bassin du fleuve Sénégal. Ils ont étudié les mécanismes de l'écoulement, les aspects géomorphologiques, des conditions morphoclimatiques, en somme des caractéristiques générales du fleuve. L'étude de l'évolution de l'espace à la suite des aménagements a également fait l'objet de nombreuses recherches. Parmi les travaux qui ont marqué notre réflexion, nous pouvons citer, entre autres, les travaux du Projet Campus 1989-1992 de Michel et al (1993) qui ont effectué une étude sur les modifications hydrodynamiques et sédimentologiques de l'après barrages au niveau de la vallée du fleuve Sénégal. La thèse de Kane (1997) analyse les conséquences des aménagements sur le fleuve Sénégal en mettant l'accent sur les modifications hydrologiques, morphologiques, géochimiques et sédimentologiques.

In fine, les recherches menées dans la zone du fleuve Sénégal sont nombreuses et traitent généralement des aspects physiques du bassin du fleuve, des modifications du milieu suite à la construction des barrages de Diama et Manantali. En ce qui concerne la vulnérabilité, les axes de recherche développés sont relatifs à l'étude des facteurs internes qui font qu'une société reste vulnérable, à l'endommagement du système par un aléa, à l'incapacité d'une société à faire face aux perturbations. Peu de travaux ont été consacrés aux effets pervers induits par la gestion du risque encore moins en domaine sahélien. La thèse se propose de lever cette lacune en analysant une augmentation de la vulnérabilité du système socio-environnemental du fait d'un manque de culture du risque et d'une gestion qui n'est pas pensée pour le long terme. L'objectif est de mettre en évidence la relation conflictuelle de

l'homme à l'environnement, notamment illustrer une approche de géographie globale qui se situe résolument à l'interface homme/nature.

Pour atteindre les objectifs assignés à ce travail, nous avons considéré deux entités significatives de l'estuaire du fleuve Sénégal à savoir la ville de Saint-Louis et le terroir villageois du Gandiolais. Combinant un milieu urbain et un milieu rural, une forte pression démographique, des aménagements hydrauliques de grande envergure, une relative fragilité des conditions environnementales associées à une forte incertitude de l'évolution climatique, la région étudiée représente un véritable laboratoire de terrain, représentatif de nombreux secteurs analogues dans le monde. Dans ce milieu, la ressource en eau présente un enjeu considérable. Elle constitue un facteur de développement socio-économique (pêche, maraîchage) mais également une contrainte majeure pour la survie des populations. Aussi, le souci majeur des autorités est la protection des enjeux urbains et humains au sein même de la ville. Le secteur rural n'est pas généralement comme un enjeu dans les différentes politiques de gestion des inondations. Cette marginalisation a entraîné une vulnérabilisation du système socio-environnemental. Pour autant, la connaissance et la perception du risque joue un rôle fondamental dans les politiques de prévention des aléas naturels.

Cette thèse s'articule autour de trois parties comportant 9 chapitres.

La première consiste à analyser une vulnérabilité liée aux conditions physiques du milieu. Nous allons d'abord mettre l'accent, dans le premier chapitre, sur la précision de la terminologie utilisée et sur la méthodologie que nous avons adoptée pour l'analyse de la vulnérabilité socio-environnementale. Dans le deuxième chapitre, nous allons montrer que les caractéristiques naturelles du site sont favorables à l'occurrence des aléas naturels (risque d'inondation, salinité), c'est dans cette optique que nous considérons qu'elles constituent des forçages internes. La compréhension de leurs origines permet de préciser la fragilité du milieu. Le troisième chapitre est axé sur la dualité nature - société. L'intérêt de cette analyse est de montrer que les différentes méthodes d'occupation du sol se traduisent par une vulnérabilité en forte mutation qui s'intensifie.

La deuxième partie s'intéresse au fonctionnement d'un estuaire fortement anthropisé suite à la gestion des aléas hydroclimatiques. Le chapitre 4 présente la gestion hydraulique du barrage de Diama qui conditionne les écoulements au niveau de l'estuaire. Le chapitre 5 est consacré à l'ouverture de la nouvelle embouchure du fleuve Sénégal. Il montre d'une part que le contexte climatique de 2003 qui a généré une crue importante est une anomalie détectée dans la séquence sèche de la variabilité climatique qui est de rigueur au Sahel. Il étudie d'autre part, l'évolution rapide de cette ouverture qui constitue actuellement l'embouchure du fleuve Sénégal. Le chapitre 6 met en évidence la prédominance des influences marines suite à cette délocalisation de l'embouchure.

La troisième partie met en exergue la vulnérabilité du système socio-environnemental face aux modifications du milieu et l'évolution de manière paroxystique de cette vulnérabilité dans le cas d'une élévation du niveau marin. Les modifications de l'estuaire consécutives à la

mise en eau du barrage ayant fait l'objet de nombreux travaux, nous focalisons la majeure partie de notre réflexion sur la situation qui prévaut actuellement au niveau de l'estuaire. Toutefois, nous mettrons en évidence les bouleversements les plus marquants de la mise en eau du barrage de Diama. Le chapitre 7 étudie l'évolution récente du milieu qui est fortement marqué par les actions anthropiques. Le chapitre 8 aborde la vulnérabilité du système socio-environnemental face aux changements environnementaux. Cette analyse s'appuie sur l'utilisation du concept DPSIR qui signifie littéralement **D**riving forces **P**ressures- **S**tate-**I**mpacts- **R**esponses (Forces motrices- Pressions- Etat- Impact- Réactions). Il permet d'appréhender les forces motrices, les pressions, l'état de l'environnement, les impacts socio-économiques et écologiques et de proposer des stratégies d'adaptation. Le chapitre 9 aborde l'accentuation d'une vulnérabilité dans une perspective d'élévation du niveau de la mer.

PARTIE I : ANALYSE D'UNE VULNERABILITE SOCIO-ENVIRONNEMENTALE LIEE AUX CONDITIONS PHYSIQUES DU MILIEU

Les dangers qui peuvent affecter le système socio-environnemental sont multiples et variés. Ils peuvent être naturels ou anthropiques. Les conditions physiques du milieu qui favorisent des aléas naturels sont des facteurs qui contribuent à rendre vulnérable la population qui s'est installée dans des zones à risque. En l'occurrence, la présence humaine dans des zones côtières génère des risques. Le plus souvent l'homme joue un rôle statique, loin de provoquer l'aléa il n'est que victime inconsciemment du risque induit (Giret, 2004). Toutefois, il peut contribuer à l'accentuer indirectement par une occupation anarchique de l'espace. Jean Jacques Rousseau cité par Lefèvre et Schneider (2002) fait remarquer que les catastrophes ne sont pas que le fait de la nature, mais que l'homme y contribue en s'exposant aux risques naturels par des constructions inadaptées et en occupant des lieux fortement exposés. Or, les événements extrêmes tels les orages, les tsunamis, les tremblements de terre, les inondations sont plus enregistrées dans les zones côtières (Cooper, 2002). A ce titre, Dauphiné (2005) estime que plus de 75% des désastres sont localisés sur le littoral. Les modifications du milieu, la croissance démographique, la mauvaise gestion des ressources sont parmi les multiples causes qui sont de nature à aggraver les risques.

Il s'agit d'un processus très rarement réversible dont les causes premières sont à chercher dans l'attirance pour les territoires fertiles ou stratégiques (Léone et Vinet, 2006). Les littoraux offrent beaucoup de possibilités dans divers domaines et sont devenus des milieux très convoités. De l'industrie lourde, de la construction navale, des activités portuaires, des activités de pêche à l'industrie du tourisme, ils sont devenus des lieux privilégiés pour un développement socio-économique très important. Selon Costanza et al. (1997), les écosystèmes côtiers contribuent à plus de 77% de la valeur économique des biens et des services dans le monde. De nombreuses villes du littoral se sont développées grâce notamment à ces opportunités économiques. Subséquemment, le développement des activités a entraîné un surcroît de la population dans ces espaces. Plus de 2 milliards de personnes se concentrent au niveau des zones côtières, ce qui représente 41% de la population mondiale. De même, plus de 50% des pays côtiers ont plus de 80% de leur population totale qui vit à moins de 100 km de la côte. Vingt et une des trente trois mégalopoles du monde se trouvent également au niveau des côtes (Martinez et al. 2007). Ce constat montre l'attrait qu'exercent les littoraux en raison des énormes potentialités qui y existent. Par ailleurs, ils sont très sensibles à l'intervention humaine qui bouleverse très vite l'équilibre de l'écosystème.

L'estuaire du fleuve Sénégal constitue la partie terminale du fleuve et se situe en domaine sahélien. C'est un milieu complexe caractérisé par le jeu de la dynamique marine et fluviale. Il est soumis à l'influence de facteurs hydrologiques particuliers, notamment le mélange des eaux douces et salées. Il reste aussi un milieu à la fois extrêmement fragile et très convoitées par les acteurs économiques. Toutefois, il est menacé par des aléas naturels à l'exemple des inondations récurrentes. Cette situation découle des conditions physiques du milieu. Le risque reste ainsi permanent, pouvant être accentué par la présence humaine et

ses multiples actions sur le milieu. L'objet de cette première partie est de s'intéresser dans un premier temps à la précision de la terminologie utilisée. Nous ferons le point sur la vulnérabilité et les systèmes socio-environnementaux et nous présenterons la méthodologie appliquée à l'analyse de la vulnérabilité. Dans le deuxième chapitre, nous allons montrer que les caractéristiques physiques de l'estuaire du fleuve Sénégal constituent des facteurs de vulnérabilité. Le troisième chapitre est axé sur la dualité nature - société à la géographie des risques.

Chapitre 1 : Eclairage conceptuel et méthodologie appliquée à l'analyse de la vulnérabilité

Vu son caractère pluridisciplinaire, sa complexité et faute de théories précises, la vulnérabilité est appréhendée à partir de définitions assez contradictoires. De nombreux chercheurs ont proposé des définitions découlant naturellement de leur champ disciplinaire respectif. Malgré cette absence de consensus dans l'éclairage du concept, il reste entendu que le système socio-environnemental ou le couple homme-environnement constitue le domaine dans lequel il s'applique en géographie. La définition de ces concepts nous paraît fondamentale dans la mesure où elle permet de mettre en évidence le contexte dans lequel s'inscrit notre travail. A partir de l'analyse conceptuelle, nous présenterons une méthode appliquée à l'analyse de la vulnérabilité.

1.1. Le système socio-environnemental

Le système socio-environnemental a été appréhendé comme un point de départ dans le débat sur le développement durable (Musters et al. 1998). Son postulat cherche à comprendre les interactions entre nature et société (Kates et al. 2001). Ces réflexions font suite aux perturbations constatées sur le système et contribuent actuellement à alimenter le débat sur les relations entre nature et société. La société humaine affecte l'environnement, par ses diverses interventions, mais il se trouve qu'elle est aussi vulnérable à ces modifications. Pourtant, l'homme s'intègre dans les écosystèmes comme tout être vivant et, ce faisant, entre dans le jeu d'interactions qui caractérise tout écosystème. Mais, vu sous cet angle, on peut légitimement considérer l'impact humain sur les autres êtres vivants, sur les sols, sur les eaux, sur l'atmosphère, etc. comme des phénomènes naturels. Or cette approche ne permet guère d'étudier efficacement l'impact humain sur les écosystèmes (Tricart, 1978). D'ailleurs, jusque dans les années 1970, le paradigme dominant la recherche sur les catastrophes dites « naturelles » reconnaissait implicitement ou explicitement la responsabilité de la nature et de ses aléas dans l'occurrence et la croissance du nombre de désastres (Gaillard et al. 2008). Toutefois, s'il est vrai que certaines catastrophes sont qualifiées de naturelles comme le séisme d'octobre 2005 au Cachemire, le cyclone Katrina, le tsunami de décembre 2004 dans l'océan indien, la canicule européenne de l'été 2003, les tempêtes de 1999, les crues et les inondations dont celles du delta du Gange, les éruptions volcaniques, etc. d'autres sont directement liées aux activités humaines et amènent à douter de la notion même de progrès scientifique : Bhopal, Seveso, Tchernobyl, la catastrophe de l'usine AZF de Toulouse en 2001, les marées noires répétées de l'Alaska et de la Bretagne (Décamps et Mathieu, 2005). De fait, la nature n'est pas réductible à la détermination causale des catastrophes. La dimension humaine est également source de stigmate sur l'environnement et elle joue un important rôle dans la genèse des catastrophes.

La domestication et la mise en valeur des écosystèmes contribuent inexorablement à façonner la culture, l'organisation sociale, l'image d'un territoire, bref, la nature. Les écosystèmes résultant de ce processus de transformation s'appuient sur un contexte géologique et biologique qui a été lentement domestiqué puis artificialisé pour l'adapter aux besoins multiples de sociétés variées (Richard et al. 2008). De la sorte, la société reste largement dépendante de cette nature qu'elle transforme mais aussi qu'elle subit. Dans cette perspective, nous proposons d'analyser plus particulièrement l'homme comme faisant partie de la nature et les rapports conflictuels qu'il entretient à l'environnement.

1.1.1. Les relations conflictuelles entre nature et société

Les relations entre nature et société ont connu depuis plusieurs décennies de profonds bouleversements suite aux effets pervers produits par l'homme sur le milieu. Les causes de ces conflits sont à rechercher selon Van der Leew (2001) dans une opposition entre nature et société. Cette dernière est placée en juxtaposition comme si elle agissait en position de spectateur, ce qui constitue un paradoxe d'autant plus que l'homme fait partie intégrante de la nature. Pendant longtemps, le système socio-environnemental était conçu selon une approche fragmentaire c'est-à-dire basée sur des approches sélectives où l'on essaie de montrer que l'homme est capable de dominer la nature. Or le système socio-environnemental reflète l'action de l'homme et des structures sociales qui sont intégrées à la nature, leur dissociation parait donc arbitraire (Adger, 2006). A cet égard, Veyret et Pech (1993) soulignent que l'école géographique allemande de Ratzel a développé une géographie intégrant l'homme dans la nature, une « anthropogéographie » pour montrer que l'homme est étroitement lié au sol sur lequel il vit. Par ailleurs, la distinction arbitraire entre nature et société a conduit à de multiples perturbations dont on commence à mesurer les effets, à différentes échelles spatio-temporelles. En effet, l'homme a entretenu un rapport conflictuel à l'environnement, agissant au gré de ses besoins tout en subissant en même temps les effets pervers de la dégradation de ce dernier. Mais c'est seulement dans les années 1970 qu'une réflexion morale sur les rapports de l'homme à son environnement naturel a surgi principalement aux Etats-Unis, en Australie, en Allemagne et dans les pays scandinaves (Descola, 2005).

Cette prise de conscience des relations discordantes entre société et nature a donné lieu à une floraison de publications. Son acuité en fait un sujet d'intenses débats, et d'une abondante littérature, riche en conceptualisation et en exemples concrets. Cette nouvelle vision est d'ailleurs à l'origine de l'émergence du concept du développement durable. Son principal objet est l'intégration de l'homme dans le système qu'il habite (Mancebo, 2008). Aussi les nombreuses études (Robic et al. 1992 ; Musters et al. 1998 ; Van der Leew, 2001 ; Adger, 2006, etc.) cherchent à replacer l'homme dans un système auquel il n'était véritablement pas intégré.

Cependant, malgré les efforts consentis par la communauté internationale (Conférence des Nations Unies sur l'environnement en 1972, Sommet de Rio en 1992, Sommet de la terre à Johannesburg en 2002), l'homme continue d'exercer d'énormes pressions sur l'environnement. Selon le PNUE (2002) les 30 dernières années ont été marquées par un immense changement à la fois des conditions d'existence des hommes et de l'état de l'environnement. L'accroissement de la population a été sans précédent, l'environnement a été lourdement sollicité pour répondre aux besoins humains les plus divers et, à maints égards, l'état de l'environnement est actuellement bien plus précaire, plus dégradé qu'en 1972. Cette situation menace gravement le développement durable et se traduit inexorablement par une société qui reste toujours dans un état de vulnérabilité.

Dans cette même logique, Luginbuhl (1992) affirme que cette nouvelle compréhension d'un environnement planétaire se nourrit des divers événements en particulier des catastrophes qui se produisent à la surface de la terre qui renforcent le sentiment du risque encouru par la communauté dans son ensemble. Les perturbations qui sont enregistrées dans le monde ont fini par mettre en évidence les limites des actions humaines sur les écosystèmes. Les changements climatiques demeurent incontestablement l'une des conséquences les plus manifestes des actions humaines sur l'environnement. Fraser et al. (2003) remarquent que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (2001) reconnaît que l'activité humaine est la principale cause du changement climatique. Walker (1997) soutient qu'elle joue un rôle important impactant sur les écosystèmes de la planète. Les changements environnementaux et la mobilité des conséquences des accidents de l'environnement rendent le milieu fragile. Tout événement écologique produit dans un écosystème déterminé entraîne des incidences sur un écosystème voisin et l'ensemble du système est soumis inéluctablement au risque (Luginbuhl, 1992). Cette intervention de l'homme renseigne sur le fait que le milieu réagit continuellement et souvent de manière négative aux actions anthropiques.

1.1.2. Le système socio-environnemental, objet d'étude de la vulnérabilité

La compréhension des mécanismes et des interactions du système socio-environnemental constitue un objet d'étude de la vulnérabilité. Bien qu'il n'y ait pas de consensus dans l'utilisation de terminologie de vulnérabilité, il reste évident que les diverses approches de la vulnérabilité étudient essentiellement les relations complexes du système socio-environnemental (Eakin et Luers, 2006). Ce dernier est fragilisé par l'âpreté et la dureté des techniques, par le gigantisme des moyens employés par l'homme pour modifier la nature ou exploiter les ressources (Luginbuhl (1992). La société humaine est, de fait, à la base des changements environnementaux, alors qu'elle est vulnérable à toute sorte de modifications. L'environnement impose ainsi des limites aux activités humaines se traduisant par des

perturbations récurrentes. L'imbrication de ces chaînes de causalité tend à renforcer les risques et augmente du coup le degré de vulnérabilité du système.

1.2. De la notion de vulnérabilité

1.2.1. L'origine du vocable vulnérabilité

Étymologiquement, la vulnérabilité désigne la blessure. Par extension, est vulnérable celui qui est sensible aux perturbations. L'émergence du concept est récente et a donné lieu à de nombreuses publications (Blaikie et al. 1994 ; D'Ercole, 1994 ; Cutter, 1996 ; Adger, 1999, 2006 ; Brooks, 2003 ; etc.). Léone et Vinet (2006) ont répertorié près de 250 références qui ne traitent exclusivement que de la vulnérabilité liée à des phénomènes naturels. Vu l'ampleur des catastrophes d'origine naturelle, elle est devenue un objet d'étude qui suscite de multiples interrogations sur les relations entre nature et société. L'articulation entre les catastrophes et les rapports entre nature et société découle d'un système de causalité qui nous amène à nous poser des questions à savoir : qui est vulnérable ? Comment devient-on vulnérable ?

L'utilisation de la "vulnérabilité" dans la géographie découle des problèmes de risques naturels. Mais ce terme est désormais un concept central dans de nombreux domaines tels que l'écologie, la santé publique, la pauvreté, le développement durable, la famine, les changements environnementaux et les impacts climatiques (Füssel, 2007). Selon Veyret et Reghezza (2005), c'est à partir des années 1970 que le terme est employé pour désigner le degré d'endommagement des enjeux. L'emploi du mot fait suite au constat par G. F. White (1945), chef de file de l'école géographique de Chicago, de l'augmentation du nombre et de la gravité des catastrophes depuis le début du XX^{e} siècle. D'ailleurs, Dubois-Maury et Chaline (2004) estiment même que le nombre des catastrophes naturelles, entre 1970 et 2003, s'est accéléré à la fin des années 1990, avec une répétition d'événements extrêmes, tant météorologiques que technologiques dans le monde. Chaque année, parmi les 180 catastrophes urbaines qui se produisent, 66% relèvent de risques naturels, parmi lesquels s'imposent inondations, tempêtes et séismes. Les 44% relèvent de risques technologiques, notamment les explosions et les grands incendies. Les catastrophes d'origine naturelle sont les plus meurtrières du fait de l'exposition des sociétés dans des zones à risque. Nous pouvons citer en exemple le tremblement de terre survenu en Haïti le 12 janvier 2010 qui a enregistré beaucoup de dégâts et un bilan humain très important. Même si Dauphiné (2003) souligne qu'il est rare qu'un séisme provoque plus de 100 000 décès, cette catastrophe a fait plus de 222 500 morts et plus d'un million de sans-abri[1]. Il faut dire que ce pays est le plus

[1] http://www.lemonde.fr

pauvre d'Amérique et est particulièrement vulnérable aux tremblements de terre dont celui enregistré récemment se révèle le plus puissant[2]. Ainsi, nous pouvons dire qu'en plus de l'exposition, la pauvreté est un facteur de vulnérabilité. C'est dans ce contexte que l'école géographique cité par Veyret et Reghezza (2005) estime que les causes des catastrophes naturelles sont plutôt à chercher dans l'incapacité des sociétés à y faire face. Aussi, la fragilité du système devant la multiplicité des dangers auxquels il est exposé commence à être prise en considération. Cette origine du concept de vulnérabilité a évolué et donné lieu à une multitude de définitions.

1.2.2. La vulnérabilité, un concept polysémique

S'il y a un phénomène sur lequel il est difficile pour les chercheurs de trouver un consensus c'est bien celui de la vulnérabilité à cause de sa complexité et du caractère récent des études qui lui sont consacrées. Comme nous l'avons évoqué précédemment, c'est en 1970 que la géographie commence à s'intéresser à ce vocable bien qu'il y ait eu des catastrophes qui se sont produits des siècles auparavant, comme le désastre de Lisbonne de 1755[3], pour ne citer que celui-là. Loin d'être l'apanage de la géographie qui est pourtant la première à introduire cette notion pour mettre à plat la fragilité de la société, la vulnérabilité est un concept flou utilisé par de nombreuses disciplines (sociologie, économie…). Fabiani et Theys (1987) cités par Reghezza (2006) notent que « le mot souffre d'un trop-plein sémantique puisqu'il évoque aussi bien la dépendance ou la fragilité, la centralité, l'absence de régulation efficaces, le gigantisme ou la faible résilience». Gallopin (2006) estime que cette pluralité de définitions peut quelquefois constituer une entrave à la compréhension et à la communication à travers les disciplines. Ceci peut aussi être un argument dans le cadre de la recherche internationale sur le changement global, où la compréhension de la dynamique implique nécessairement la considération des composantes tant sociales que biophysiques. Selon lui, la vulnérabilité est généralement considérée comme étant spécifique à des perturbations qui affectent le système.

D'après Veyret et Reghezza (2005), la vulnérabilité désigne à la fois les dommages et la possibilité de subir ces dommages. La première approche mesure l'endommagement potentiel des éléments exposés à un aléa et la seconde cherche à déterminer les conditions de l'endommagement et par extension la capacité de réponse de l'objet menacé. C'est dans cette perceptive que Eakin et Luers (2006) ; Merz et al. (2010) soulignent que la vulnérabilité

[2] Haïti repose sur la plaque des Caraïbes qui est à la frontière de plusieurs plaques tectoniques. La plaque des Caraïbes se déplace vers l'Est par rapport à la plaque d'Amérique du Nord. Le 12 Janvier 2010, le mouvement entre ces deux plaques a été libéré d'un coup produisant une très forte secousse.

[3] Un tremblement de terre qui a fait plus de 100 000 victimes

désigne à la fois l'exposition, la sensibilité d'un système et la capacité à faire face aux perturbations.

Selon D'Ercole (1994), la vulnérabilité traduit la propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique. D'après Adger (2006) le concept de vulnérabilité est un outil analytique pour décrire les états de sensibilité, de nuisance, d'impuissance et de marginalité du système socio-environnemental mais doit constituer également un guide pour l'analyse normative des actions à mener pour augmenter le bien-être par la réduction du risque. Selon Berkes (2007), la vulnérabilité ne traduit pas seulement l'exposition à des aléas, il réside aussi dans la résilience du système qui est en danger. La résilience représente la capacité de réponse d'un système à des perturbations récurrentes, telles que les catastrophes naturelles, afin de conserver l'essentiel des structures, des processus et des rétroactions. La résilience est importante pour la compréhension de la vulnérabilité pour les raisons suivantes :

- elle permet d'évaluer globalement les risques socio-environnementaux ;
- elle met l'accent sur la capacité de réponse à la perturbation ou à l'adaptation du système ;
- elle aide à explorer les options politiques pour faire face à l'incertitude et aux futurs changements.

Au total, il est aisé de constater que la notion de vulnérabilité a un caractère équivoque et ambigu en raison de sa relativité dans le temps et dans l'espace. Tantôt elle fait référence aux aspects quantitatifs (mesure) tantôt à des critères qualitatifs (sensibilité, impuissance, exposition…) témoignant en conséquence de la difficulté de l'appréhender dans sa globalité. Cependant ces différentes définitions nous permettent de constater en définitive qu'il est possible de dégager plusieurs approches de la vulnérabilité qui sont schématisées sur la figure 1.1.

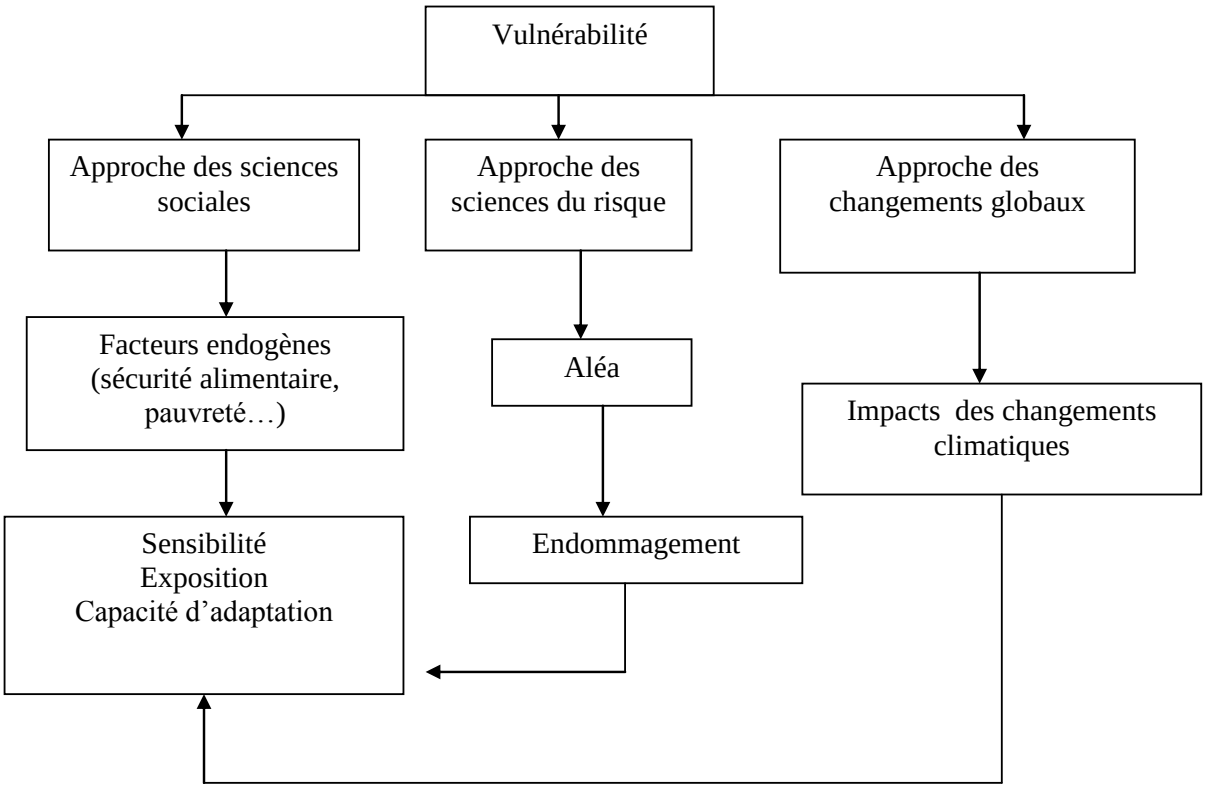


Figure 1.1: Les différentes approches de la vulnérabilité

La figure 1.1 montre que toutes les approches de la vulnérabilité font référence à la sensibilité, à l'exposition, à la capacité d'adaptation du système. La vulnérabilité est conçue comme la résultante d'un faisceau de crises : environnementale, sociale, économique, etc. C'est dans cette optique que Eakin et Luers (2006) soulignent que les diverses approches de la vulnérabilité peuvent ainsi être complémentaires. Elles sont toutes nécessaires pour aborder la complexité du système socio-environnemental.

Au demeurant, il est également possible de constater que les définitions de la vulnérabilité font référence à une perturbation du système socio-environnemental. Elle est perçue comme un stigmate qui accompagne la pression de l'homme sur le milieu. Car, au delà de ces différentes approches, d'autres facteurs peuvent entrer en jeu dans la définition de la vulnérabilité. Nous considérons que les caractéristiques physiques d'un milieu, la nature du site, la situation géographique sont autant de facteurs qui contribuent à l'accroissement de la vulnérabilité des sociétés qui se sont implantées dans des zones à risque. Ainsi, les sociétés, par leur comportement, peuvent aggraver l'intensité ou la fréquence de certains phénomènes et l'étendue de leurs effets. C'est dans cette perspective que D'Ercole et al. (2009) soulignent que la vulnérabilité est également la propension de la société à engendrer les dommages, à les amplifier, à en faire les vecteurs de nouvelles vulnérabilités.

1.2.3. L'estimation de la vulnérabilité

L'estimation de la vulnérabilité permet de mesurer la gravité des menaces potentielles et le niveau de vulnérabilité du système socio-environnemental. Mais l'ambiguïté du mot et les difficultés d'élaborer une définition acceptée par tous font que son estimation est problématique. Pour chaque type d'approche, des indicateurs sont spécifiés pour estimer la vulnérabilité. D'une manière générale, les déterminants de la vulnérabilité sont aussi nombreux et ramifiés. Eakin et Luers (2006) et Thomala et al. (2006) en ont donné une liste non exhaustive :

- la densité et l'accroissement de la population,
- l'urbanisation anarchique,
- l'utilisation inappropriée des terres,
- la mauvaise gestion de l'environnement et la perte de la biodiversité,
- la perte de rendement,
- l'injustice sociale,
- la pauvreté,
- la marginalisation,
- …

Cette liste montre les différentes interactions du système socio-environnemental particulièrement dans les pays en développement. C'est au niveau de ces secteurs, par exemple, que beaucoup de personnes pauvres et marginalisées sont dépendantes des écosystèmes qui constituent leurs moyens de subsistance et sont donc particulièrement vulnérables aux changements environnementaux et aux facteurs qui peuvent limiter leur accès aux ressources. Cette approche de la vulnérabilité restrictive peut masquer des réalités beaucoup plus complexes relatives à la dynamique et aux synergies qui peuvent s'instaurer.

Par ailleurs, Brooks et al. (2005) ont développé une méthodologie basée sur des indices pour estimer la vulnérabilité des populations de l'Afrique subsaharienne aux changements climatiques. Ces indices sont basés sur le système sanitaire, la gouvernance et l'éducation. Toutefois, ces indices suscitent de nombreuses interrogations quant à leur représentativité. Elles sont relatives à cette zone et ne sont pas transposables dans d'autres milieux. Il est même probable qu'une vulnérabilité considérée comme étant mineure dans un contexte donné peut se révéler rapidement préoccupante dans un contexte quelque peu différent. Par exemple, Belliveau et al. (2006) montrent que les processus d'adaptation sont susceptibles de générer des vulnérabilités induites produisant des situations parfois plus graves que le simple état initial. En étudiant l'évolution de la viticulture d'une région canadienne, ces auteurs notent que la lutte contre la concurrence française a conduit les producteurs à introduire de nouvelles variétés de vignes qui se trouvent être à présent beaucoup plus sensibles aux changements climatiques : ainsi en réduisant une vulnérabilité liée au marché économique, on a généré une nouvelle vulnérabilité de type climatique.

Il peut arriver également que dans un même contexte géographique, une vulnérabilité considérée comme étant majeure dans le secteur urbain peut se révéler bénéfique pour le secteur rural. Dans l'estuaire du fleuve Sénégal, par exemple, les crues du fleuve qui se traduisent par des inondations fragilisent les populations de la ville de Saint-Louis alors qu'elles constituent une aubaine pour les populations du bas estuaire dans la mesure où elles sont favorables à l'enrichissement du sol et constituent, de ce fait, une opportunité pour le développement du maraîchage. Cet aléa aura donc des répercussions positives sur les rendements et sur les revenus des populations. C'est plutôt une absence de crue qui fragiliserait le système socio-environnemental du bas estuaire.

Il est possible de déterminer l'exposition des populations vulnérables, les menaces qui pèsent sur leur bien-être et l'ampleur de leur vulnérabilité, les risques pesant sur la capacité de l'environnement et proposer des mesures préventives qui peuvent être prises pour améliorer l'état de l'environnement et réduire les conséquences négatives de l'action des hommes sur l'environnement (PNUE, 2002). Aussi avons-nous adopté une méthode qui s'appuie sur l'ensemble de ces facteurs pour analyser la vulnérabilité socio-environnementale de l'estuaire du fleuve Sénégal.

1.3. La méthodologie appliquée à l'analyse de la vulnérabilité

Cette section présente la démarche que nous avons adoptée pour appréhender la vulnérabilité du système socio-environnemental en domaine sahélien plus particulièrement dans l'estuaire du fleuve Sénégal. La démarche adoptée sert de fil conducteur au déroulement de notre travail. Vu qu'aucune méthode n'a fait l'objet de consensus, nous avons proposé une méthodologie qui s'appuie sur plusieurs outils (figure 1.2).

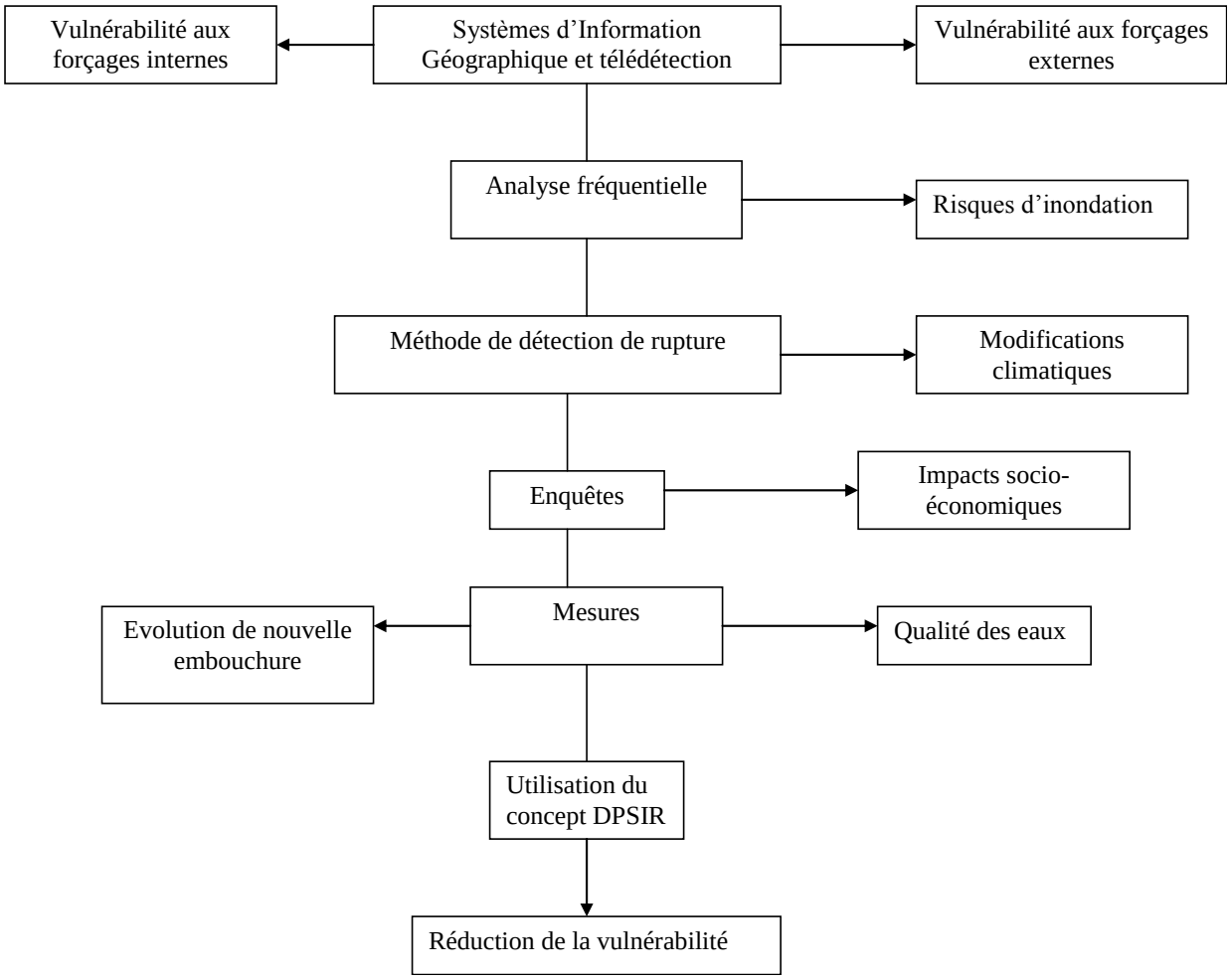


Fig.1.2 : Méthode d'analyse de la vulnérabilité du système socio-environnemental

La figure 1.2 montre les différents outils pour analyser une vulnérabilité du système socio-environnemental. Ces outils permettent de mettre en évidence :

- les vulnérabilités aux forçages internes et externes ;
- les risques d'inondation en fonction des événements extrêmes hydrologiques ;
- les éventuelles modifications climatiques ;
- la qualité des eaux et de l'évolution de la nouvelle embouchure ;
- les impacts socio-économiques.

En fonction des modifications du système, nous avons proposé des stratégies d'adaptation en utilisant le concept DPSIR qui signifie littéralement **D**riving forces- **P**ressures- **S**tate-

Impacts- **R**esponses (Forces motrices- Pressions- Etat- Impact- Réactions). L'approche DPSIR est généralement utilisée pour faire des projections dans l'optique de mettre à plat les différentes politiques de gestion proposées pour l'amélioration de la situation actuelle et la réalisation du développement durable dans la zone côtière (Karageorgis et al. 2006). Ce modèle permet d'analyser les interactions entre les activités humaines et l'environnement. Il s'articule selon les cinq éléments du DPSIR qui sont reliés par des liens de causalité : une activité humaine (force motrice) provoque une pression sur l'environnement qui se traduit par une modification de l'environnement qui peut avoir un impact sur l'homme. Celui-ci réagit par des mesures d'adaptation (réponse).

1.3.1. L'utilisation des systèmes d'information géographique et de la télédétection

Nous avons opté pour une méthodologie basée sur l'utilisation d'outils appropriés tels les systèmes d'information géographique (SIG) et la télédétection pour mettre en évidence la vulnérabilité interne et externe du système socio-environnemental aux aléas naturels. Cette étude s'est appuyée sur un ensemble de données (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 : Les données utilisées pour le traitement cartographique

Types de données	Dates	Sources
Carte topographique de Saint-louis au 1/50 000e	1989	DTGC
Modèle numérique de terrain		Base de données SIG du Laboratoire de Morphologie et d'hydrologie du département de géographie (UCAD)
Images Landsat	1979, 1999, 2002, 2003, 2004, 2007	USGS Data Base Data Copied from WARN secretariat LERG-ISE-UCAD

Nous avons utilisé les logiciels Arcview, Arcgis et Envi pour faire le traitement cartographique. La carte topographique de Saint-Louis nous a permis d'acquérir des couches vectorielles (fleuve, cuvettes, végétation, etc.). Le modèle numérique de terrain met en évidence les basses altitudes de la ville de Saint-Louis et permet d'identifier les zones les plus sensibles aux inondations, etc. Les images Landsat ont été utilisées pour :

- classifier les différentes unités géomorphologiques de l'estuaire ;
- représenter les zones inondées après l'amélioration de la qualité géométrique de l'image par fusion ;
- réaliser la cartographie de l'évolution des écosystèmes estuariens depuis les aménagements, etc.

En somme, les techniques d'analyses spatiales proposées par les différents logiciels du Système d'Information Géographique (SIG) permettent de mieux appréhender la vulnérabilité du système.

1.3.2. L'analyse fréquentielle

Comme la gestion hydraulique du barrage Diama conditionne les écoulements au niveau de l'estuaire, nous avons privilégié l'approche fréquentielle pour déterminer le risque associé aux événements hydrologiques extrêmes. Bien que le régime soit maîtrisé, les lâchers au niveau du barrage dépendent de la situation hydrologique de la station de Bakel qui détermine l'essentiel des écoulements dans la vallée du fleuve Sénégal. Cette méthode statistique consiste à étudier des événements historiques afin d'en évaluer les probabilités d'apparition future.

1.3.3. La méthode de détection de rupture dans les séries chronologiques

La compréhension des variations hydro-climatiques nécessite une approche globale sur la question. Nous n'avons pas la prétention de traiter toutes les interactions concernant la variabilité climatique ainsi que leurs incidences sur la ressource en eau. Notre objectif est de détecter une éventuelle rupture en 2003 qui est caractérisée par une crue précoce par rapport aux autres années hydrologiques et qui expliquerait par ailleurs l'ouverture de la nouvelle embouchure. L'approche par la méthode de détection de rupture permet de déceler des modifications dans la série chronologique et de caractériser la tendance climatique.

1.3.4. Les enquêtes

L'ouverture de la nouvelle embouchure par les autorités sénégalaises dans le but de protéger la population de Saint-Louis des inondations s'est accompagnée des modifications

importantes dans le bas estuaire. Dans l'optique de mieux appréhender les impacts des aménagements sur les activités socio-économiques, nous avons effectué des enquêtes dans le bas estuaire. Tenant compte de la nature des informations à collecter, nous avons mené des enquêtes sur des activités de maraîchage et de pêche.

Pour chaque secteur d'activité, nous avons déterminé des critères pour mener nos enquêtes. Nous avons effectué un échantillonnage de 5% de la population totale des maraîchers, soit 243 personnes. Le choix de ces populations ciblées pour l'enquête a tenu compte de l'âge (pour avoir une analyse dans le temps de l'évolution du maraîchage dans la zone suivant la mise en œuvre des aménagements), de la propriété (pour savoir si les champs sont exploités par les propriétaires ou s'ils recourent à la main-d'œuvre). Dans la mesure où nous avons privilégié la méthode participative pour avoir des informations qualitatives et une approche globale et diversifiée sur la question, nous n'avons pas effectivement interrogé tout cet échantillon. Un effet de saturation est apparu au bout de 100 personnes interrogées.

La même logique a été adoptée pour les enquêtes sur la pêche. La taille de la population étant élevée, nous avons mené des enquêtes dans les zones de Guet Ndar et du Gandiolais jusqu'à saturation, soit respectivement 200 et 50 personnes.

1.3.4.1. Les informations à recueillir

Notre objectif est de collecter des données quantitatives et qualitatives sur les modifications des activités socio-économiques à savoir le maraîchage et la pêche depuis l'ouverture de la nouvelle embouchure et notamment de la mise en eau du barrage de Diama. Les informations pertinentes à rechercher sont donc relatives :

- au système d'approvisionnement en eau (pour le secteur du Gandiolais) ;
- au système de production ;
- aux modifications intervenues sur les activités de maraîchage et de pêche ;
- aux impacts sur les conditions de vie des populations ;
- à la rentabilité des activités suite aux aménagements.

1.3.4.2. Le choix des zones ciblées pour l'enquête

La zone du Gandiolais est réputée par son fort potentiel agricole. La principale activité demeure le maraîchage suivi de la pêche. Nous avons ciblé treize villages situés sur le

littoral et l'intérieur des terres. Le choix de ces sites est guidé par le besoin de déterminer l'évolution du biseau salé au niveau des terres cultivables afin de mieux cerner les impacts directs sur les activités socio-économiques. Nous avons d'abord procédé à une typologie de l'espace pour mieux cerner l'activité dominante de chaque localité ciblée.

Pour le secteur de la pêche, le quartier de Guet Ndar sur la Langue de Barbarie habité en très grande majorité par des pêcheurs a constitué la population-mère pour l'élaboration du questionnaire. Les localités du Gandiolais à savoir Ndièbene Gandiol, Pilote, Mouit, Ndiol, Tassinère, Mboumbaye ont été visitées pour également recueillir des informations sur les impacts des aménagements (en annexe 1, la carte des localités ciblées pour l'enquête).

1.3.4.3. Les outils de collecte d'information

Dans la perspective de recueillir des informations pertinentes sur les unités d'enquête, nous avons utilisé trois outils : le questionnaire, le guide d'entretien et l'observation directe sur le terrain.

1.3.4.3.1. Le questionnaire

Les questions posées visaient à identifier les ressources en eau disponible, les sources d'approvisionnement en eau des populations enquêtées, le type d'utilisation et les problèmes liés à l'approvisionnement en eau douce. Les modifications intervenues sur les activités depuis les aménagements ont également été abordées dans le questionnaire (annexe 2). Le but était d'apprécier les effets de la salinisation sur les activités et les impacts sur les conditions de vie des populations. Les mêmes questions sur les modifications ont concerné le secteur de la pêche.

1.3.4.3.2. Les entretiens

Les entretiens ont été complémentaires des données recueillies avec les questionnaires. En effet, ils ont permis de compléter certaines informations recueillies avec les outils quantitatifs et de révéler des informations que nous n'avions pas pu obtenir. Ils ont été conduits auprès des chefs de village et de certains propriétaires terriens. Des entretiens semi directifs auprès des agents du DRDR et de l'ANCAR qui interviennent dans la zone ont constitué une étape de validation des informations collectées.

1.3.4.3.3. L’observation directe

Cette méthode a permis d’observer en temps réel l’environnement physique et social de la zone d’étude. Elle a été utilisée pour mieux cerner la situation afin d’en extraire des renseignements pertinents. Pour notre cas, elle a constitué un premier niveau d'approche du problème à étudier dans la mesure où elle permet le contact direct avec l'objet à analyser. Elle nous a permis d'observer directement les techniques d’irrigation, d’estimer le temps d’arrosage des plants de culture, d’identifier le nombre de champs abandonnés du fait de la salinisation de la nappe…

1.3.5. Les mesures de la salinité et de la brèche

A la suite des enquêtes, nous avons effectué des mesures de salinité. Ces dernières concernent les paramètres qualitatifs des eaux souterraines qui sont utilisées pour le maraîchage. Ils concernent la conductivité, le PH, la salinité, la température. Un transect a été effectué dans le Gandiolais, à partir du littoral vers l’intérieur des terres.

Depuis son ouverture, un suivi régulier de la nouvelle embouchure est effectué pour apprécier son évolution. Les relevés au GPS sont effectués en tenant compte de la saison et des heures de marée. En saison sèche, l’évolution de la brèche est dépendante des facteurs océanographiques qui contribuent au façonnement du littoral. En saison pluvieuse, une crue importante peut contribuer à son élargissement.

La profondeur du chenal fluvial a beaucoup évolué depuis l’ouverture de la brèche. Ainsi, nous avons effectué un relevé topobathymétrique à partir du pont Faidherbe jusqu’à la nouvelle embouchure à l’aide d’un bateau muni d’un échosondeur. Cette étude des fonds par sondage a permis d’apprécier la profondeur du chenal fluvial.

Conclusion

L'analyse conceptuelle met en évidence une absence de consensus sur la définition de la vulnérabilité qui est appréhendée différemment selon les approches. Mais ces dernières font toutes référence à la sensibilité, à l'exposition et la résilience. La vulnérabilité peut être appréhendée dans un sens large et le système socio-environnemental est son cadre d'application. Nous avons mis en place un ensemble de procédés alliant une démarche et des outils pour mettre en exergue la vulnérabilité socio-environnementale de l'estuaire et obtenir des informations qualitatives et quantitatives sur les modifications du milieu. Le chapitre qui suit aborde les forçages internes au niveau de l'estuaire.

Chapitre 2 : Les forçages internes de l'estuaire du fleuve Sénégal

L'estuaire du fleuve Sénégal (fig.2.1) est considéré comme une zone instable en raison de sa morphologie, des conditions climatiques et hydrodynamiques qui y prévalent. C'est un milieu qui est animé par une forte dynamique tant sur le plan environnemental que social. Il représente un espace complexe caractérisé par le jeu de la dynamique marine et fluviale qui participe inexorablement à son évolution. En particulier, les conditions physiques du milieu sont largement influencées par l'histoire géologique qui met en évidence un milieu caractérisé une dynamique marine importante. Ces mêmes caractères géologiques sont également déterminés par les oscillations climatiques et l'évolution hydrologique du fleuve Sénégal. Les facteurs précités participent au façonnement biophysique de l'écosystème.

Le chapitre précédent a permis d'exposer les explications terminologiques des notions de vulnérabilité et de système socio-environnemental. Nous allons nous intéresser à présent à la compréhension des processus physiques à l'origine de la vulnérabilité du système socio-environnemental dans l'estuaire du fleuve Sénégal. Ce chapitre met en évidence les caractéristiques naturelles du site qui sont favorables à l'occurrence des aléas naturels (risque d'inondation, salinisation des terres), c'est dans cette optique que nous considérons qu'elles constituent des forçages internes. La compréhension de leurs origines permettra de préciser la fragilité du milieu.

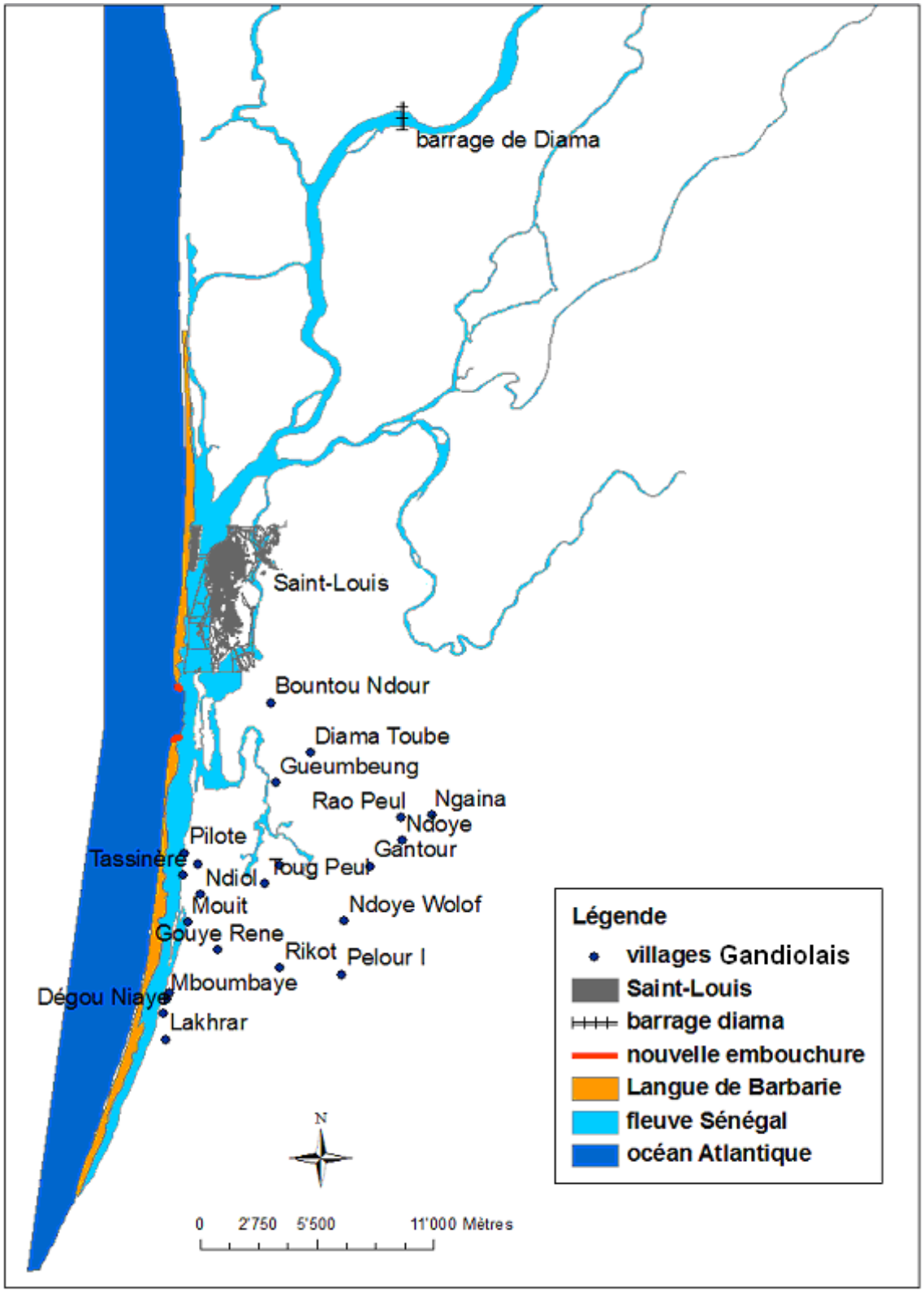


Fig. 2.1 : L'estuaire du fleuve Sénégal

2.1. Détermination des caractéristiques physiques

Les événements extrêmes sont caractérisés par la nature du site et la situation géographique. Ceux-ci constituent des éléments fondamentaux pour comprendre les origines du danger (Veyret et al. 2004). Dans sa configuration, l'estuaire du fleuve Sénégal offre l'exemple d'un site confronté à des aléas naturels en l'occurrence les risques d'inondation mais également à la salinisation des terres qui font suite à ces caractères naturels.

Nous avons en fonction du site déterminé un certain nombre d'indicateurs qui constituent les éléments de base pour analyser la vulnérabilité du milieu et qui permettra de définir la zone d'étude. Il s'agit de prendre en compte les forçages internes qui constituent une vulnérabilité physique qui fait que le système est exposé aux aléas hydro-climatiques. Ceux-ci permettent de mieux comprendre les origines du danger et leurs conséquences sur le système. Nous avons choisi d'utiliser comme indicateurs de vulnérabilité, ce qui suit :

- les héritages géomorphologiques ;
- les conditions édaphiques ;
- le contexte climatique.

2.1.1. Les caractéristiques naturelles favorables au risque d'inondation et à la salinisation des terres

Les données physiques (géomorphologie, conditions édaphiques, climat, etc.) constituent de véritables contraintes pour le système socio-environnemental. L'estuaire du Sénégal est un domaine complexe qui mérite d'être défini afin de mieux appréhender l'origine des risques naturels. Dans ce contexte, nous avons utilisé la classification supervisée pour mettre en évidence les différentes unités géomorphologiques de la zone.

2.1.1.1. La classification supervisée

La classification supervisée avec le maximum de vraisemblance est une méthode d'identification des différentes unités qui composent le milieu. Nous avons choisi neuf échantillons représentant les groupes d'objets en fonction des réponses spectrales pour faire ressortir les principales unités géomorphologiques de l'estuaire du fleuve Sénégal sur

l'image Landsat du 21 juin 2002. Ces unités ont été également caractérisées en utilisant les informations extraites de la documentation et des observations sur le terrain. La précision de la classification est représentée par la matrice de confusion. Celle-ci permet de voir :

- combien de pixels sont restés dans leurs classes initiales (pixels bien classés) ;
- combien de pixels ont migré vers d'autres classes (erreur d'omission) ;
- combien de pixels ont été récupérés par les classes (erreur de commission).

Cette matrice de confusion présente en ligne, les différentes classes thématiques définies par échantillonnage (image référence) et en colonnes les résultats après classification (image classée) (tableau 2.1).

Tableau 2.1: Matrice de confusion de l'image Landsat du 21 juin 2002

Classification										
Référence	vasières	eaux fluv.	eaux mar.	Mélange EF/EM	Mangrove	Dunes blanches	Dunes rouges	terrasses	dunes jaunes	Total
vasières	28	0	0	0	0	0	0	0	1	29
eaux fluviales	0	28	0	0	0	0	0	0	0	28
Eaux marines	0	0	28	0	0	0	0	0	0	28
Mélange EF/EM	0	0	0	23	0	0	0	0	0	23
mangrove	0	0	0	0	28	0	0	0	0	28
Dunes blanches	0	0	0	0	0	24	0	0	0	24
Dunes rouges	0	0	0	0	0	0	33	0	2	35
terrasses	0	0	0	0	0	0	1	33	1	35
dunes jaunes	0	0	0	0	0	0	0	0	30	30
Total	28	28	28	23	28	24	34	33	34	260
Précision globale	98.0769 %									
Coefficient kappa	0.9783 %									

Classification										
Référence	vasières	eaux fluv.	eaux marines	Mélange EF/EM	Mangrove	dunes blanches	dunes rouges	terrasses	dunes jaunes	Total
vasières	100	0	0	0	0	0	0	0	2.94	11.15
eaux fluviales	0	100	0	0	0	0	0	0	0	10.77
eaux marines	0	0	100	0	0	0	0	0	0	10.77
Mélange EF/EM	0	0	0	100	0	0	0	0	0	8.85
mangrove	0	0	0	0	100	0	0	0	0	10.77
dunes blanches	0	0	0	0	0	100	0	0	0	9.23
dunes rouges	0	0	0	0	0	0	97.06	0	5.88	13.46
terrasses	0	0	0	0	0	0	2.94	100	2.94	13.46
dunes jaunes	0	0	0	0	0	0	0	0	88.24	11.54
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Au vu du tableau, les résultats de la classification sont satisfaisants. Nous avons obtenu 100% au niveau des différents thèmes classifiés. La figure 2.2 montre les différentes unités géomorphologiques de l'estuaire. Celles-ci sont principalement constituées de formations dépressionnaires, en l'occurrence les zones de vasières auxquelles succèdent des formations dunaires.

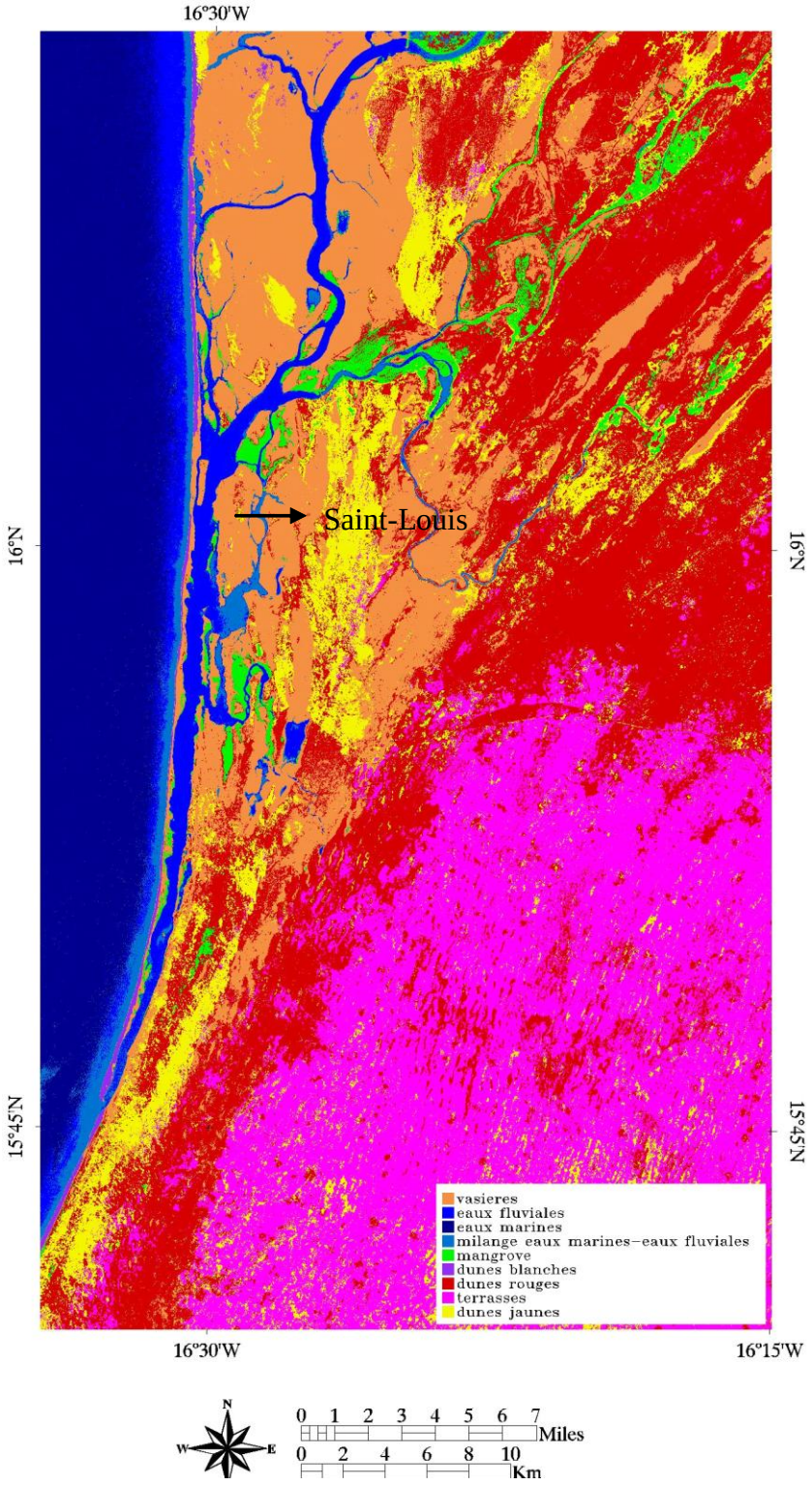


Fig. 2.2 : Les unités géomorphologiques de l'estuaire

2.1.1.2. Aperçu géomorphologique

L'estuaire du Sénégal s'est développé en aval de la vaste plaine sénégalo-mauritanienne où le relief du bassin inférieur s'aplanit très nettement. Les différentes unités sont le résultat du processus de transgression et de régression marine. Le tableau 2.2 représente le pourcentage correspondant aux principales unités identifiées dans la zone.

Tableau 2.2 : Pourcentage correspondant aux principales unités géomorphologiques

Unités	(%)
vasières	11,15
eaux fluviales	10,77
eaux marines	10,77
mélange eaux fluviales – eaux marines	8,85
mangrove	10,77
dunes blanches	9,23
dunes rouges	13,46
dunes jaunes	11,54
terrasses	13,46
Total	100

Les travaux de Tricart (1961), Michel et al. (1967) ont passé en revue les différentes unités géomorphologiques du delta du Sénégal. Pour ce qui concerne les dunes, elles sont édifiées au maximum de l'aridité et d'une importante régression marine (15000 à 20000 ans BP) où le fleuve a été barré à cause notamment de son étendue sur toute la région du delta. Leur origine daterait de l'Ogolien, ce qui leur vaut le nom de dunes ogoliennes. Elles sont constituées de sols ferrugineux tropicaux communément appelé sols dior. Ces formations sont fixées par une végétation composée d'*Acacia albida*, *Euphorbia balsamifera*, *Combretum glutinosum*.

En faveur de l'action éolienne durant la période post Nouakchottienne, avec le retrait de la mer Ouljienne, les dunes jaunes qui se sont formées diffèrent des dunes rouges. Elles se caractérisent par leur isolement, leur altitude dépasse rarement 5 à 6 m. Du point de vue pédologique, le sol est mince et peu évolué. L'horizon superficiel diffère des horizons profonds par une faible proportion d'humus et une abondance plus grande d'éléments fins (Tricart, 1961). Les dunes jaunes sont colonisées par les espèces végétales : *Acacia seyal*, *Acacia radiana, Euphorbia balsamifera, Prosopis juliflora, Maytenus senegalensis*. Ces

dunes peuvent servir de support aux établissements humains, d'ailleurs, les villages de Mboumbaye et Mouit dans le bas estuaire sont localisés au niveau de ces unités.

Le système des dunes blanches a été mis en place par le courant de dérive du Subactuel à l'actuel (1800 ans BP - 400 ans BP), période marquée par la recrudescence des actions éoliennes. Ce système se différencie des dunes jaunes par la blancheur du matériel qui contient des débris de coquilles brisées et par leur forme parabolique orientée nord-ouest. Les dunes blanches sont stabilisées par les opérations de reboisement de l'espèce *Casuarina equisetifolia* qui sert également de brise vent, ce qui permet de stabiliser le revers du cordon. Le sol est minéral brut non climatique puisqu'il n'y a pas un épisode morphoclimatique humide qui aurait permis l'évolution et la différenciation du profil pédologique en horizon distinct.

Des dépressions, appelés « ndioukis » selon la terminologie locale, assurent la transition entre le système de dunes blanches et les dunes jaunes semi-fixées Ils fonctionnent comme des bas fonds. Les « ndioukis » ont un sol hydromorphe organique contenant en certains endroits des matières organiques en faible teneur. Dans ces dépressions, la nappe phréatique est proche de la surface (3 à 4 m); elles constituent par ailleurs des zones où le maraîchage peut se développer.

Au maximum de la transgression nouakchottienne, les houles venant du nord-ouest ont arasé progressivement les dunes rouges (Michel et al. 1967). Le sable a été repris, brassé par la mer puis déposé sous forme de terrasses. Ces terrasses sont de deux types :

- la terrasse azoïque : elle occupe une place importante dans le modelé de la partie sud-ouest du delta. C'est une formation de sable fin, d'argile et de limon ; le sol est hydromorphe, salé à sulfaté acide ;
- la terrasse fossilifère : elle surplombe des marigots. Le matériel est constitué d'une association de sable légèrement argileux, par endroits et de vase assez épais.

Ces unités géomorphologiques peuvent être également retrouvées sous forme d'amas de coquilles dans le bas estuaire. Elles supportent une végétation de steppes à halophytes dominée par *Acacia Seyal* et *Tamarix senegalensis*.

Les vasières se développent au niveau des chenaux du fleuve et constituent des zones de fluctuation de la marée. Elles représentent une unité géomorphologique importante au niveau de Saint-Louis (fig. 2.2). La présence de ces unités s'explique par les conditions hydrodynamiques calmes qui prévalaient pendant la période lagunaire post-nouakchottienne. Ceci a permis la décantation fine des argiles et des limons. Il s'ensuivit une sédimentation qui a conduit à une écologie de vasières colonisées par la mangrove au niveau de la séquence vasière basse avec *Rhizophora*, et au niveau de la vasière haute

avec *Avicennia*. Ces unités sont essentiellement composées de vase et sable fins. Elles se caractérisent par des terrains bas dominés par une absence de pente. En saison non pluvieuse, les chenaux sont remontés par la marée et la submersion est biquotidienne en fonction de l'amplitude de marée. En saison pluvieuse, la crue submerge les vasières (Ndiaye, 1975). Par ailleurs, deux types de vasières sont distinctes au niveau de l'estuaire : les vasières recouvertes par la végétation herbacée appelée « schorre » et celles nues à efflorescence saline connues sous le nom de « tanne ».

Les tannes sont des terrains dénudés à efflorescences salines. Ces unités correspondent aux terrains inondés par les eaux du fleuve pendant la saison pluvieuse laissant de larges plages nues après leur retrait. Ces unités s'étendent dans le bas estuaire et à l'est de Saint-Louis. Elles sont caractérisées par des sédiments sablo-limoneux, une forte salinité qui provient de la pénétration des eaux marines.

Le schorre se présente sous forme de surfaces basses subhorizontales. Il est régulièrement inondé par la marée et la crue selon qu'il se trouve sur le littoral ou abrité au niveau des estuaires. La surface du schorre dispose d'un réseau de chenaux plus ou moins dense. L'unité se compose d'une végétation halophyte qui supporte des inondations périodiques et une salure variable. Le schorre se distingue également dans le bas estuaire.

C'est dans ce contexte paléogéographique hérité du Quaternaire récent principalement qu'a eu lieu la mise en place des différentes unités géomorphologiques de l'estuaire. Elles se caractérisent principalement par des formations basses.

2.1.1.3. Les conditions édaphiques

Les types de sols en zone estuarienne sont caractéristiques du milieu où interagissent différents facteurs bioclimatiques. Michel (1973) affirme, à cet effet, que les sols représentent les transformations de la partie superficielle de la lithosphère, surtout sous l'influence du milieu bioclimatique. La pédogénèse ne s'exerce que rarement aux dépens de la roche mère. Le plus souvent, les sols s'élaborent dans les formations superficielles, constituées soit d'altérites de roche in situ, soit d'éléments déplacés au préalable tels que les apports éoliens et les dépôts marins récents. Dans ces milieux semi-arides, caractérisés par un régime climatique contrasté où la pluviométrie est concentrée sur trois à quatre mois de l'année, les sols sont de plus en plus soumis à l'influence marine qui contribue à leur salinisation.

Les sols de l'estuaire du fleuve Sénégal sont caractérisés par la présence de sel mais aussi une grande hétérogénéité spatiale due à plusieurs raisons dont les principales tiennent à l'histoire géologique de la région. Les sols de l'estuaire du fleuve Sénégal sont le résultat du rocessus de transgression et de régression marine. La salinisation des sols s'explique par

l'effet combiné des apports de sels par les eaux de surface et des remontées capillaires à partir d'une nappe fortement minéralisée (Kane, 1997). Toutefois, depuis les aménagements au niveau de la partie terminale du fleuve Sénégal, les modifications ne manquent pas de se produire. La mise en eau du barrage qui conditionne le régime hydrologique du fleuve joue un rôle non négligeable dans l'évolution des sols. A la suite de la modification de l'équilibre fragile des eaux marines et eaux douces fluviales, il y a un risque d'évolution des sols par tannification du milieu. Ceci se manifesterait par un assèchement relatif du sol, une salinisation par augmentation de la concentration saline en régime d'évaporation intense et une évolution depuis un sol sulfaté acide jeune vers un sol évolué à horizon salé et alcalin de surface sur horizon intermédiaire fortement acide (Kane, 1997). Le barrage de Diama a entraîné la dégradation des sols avec le développement des « tannes ». La mangrove est aujourd'hui fortement dégradée et est à l'état de relique, nous analysons dans le chapitre 7 de la troisième partie l'évolution de la mangrove suite la mise en service de l'ouvrage de Diama et de l'ouverture de la nouvelle embouchure.

2.2. Un climat caractérisé par deux saisons

Leroux (1983) a passé en revue les mécanismes généraux du climat de l'Afrique tropicale, qui considère que différents facteurs sont susceptibles d'influencer le climat. Il a ainsi subdivisé l'Afrique tropicale en plusieurs domaines et régions climatiques. Le nord-ouest du Sénégal est classé dans le domaine de l'alizé maritime, type boréal. Cette classification est fonction de la situation du Sénégal, qui est largement ouvert sur l'Océan Atlantique, où la circulation des eaux marines obéit à l'impulsion des centres d'action tels que l'anticyclone des Açores. L'estuaire du Sénégal étant une zone de contact entre l'océan Atlantique et le fleuve, appartient au domaine climatique subcanarien fortement influencé par l'océan Atlantique. Il est soumis à l'influence des alizés maritimes venant de l'anticyclone des Açores, ce qui lui confère un climat doux par rapport au reste du pays.

2.2.1. Le cadre climatique et les facteurs de la morphogenèse

Le littoral ouest africain est caractérisé par de fortes variations climatiques liées à l'influence de trois masses d'air : deux d'origine boréale et une troisième australe :

- l'anticyclone des Açores, dont la présence se traduit par la permanence des vents d'alizé; il apporte un vent frais et humide ;

- l'anticyclone de Sainte-Hélène qui apporte les vents austraux, la mousson, le vent est chaud et humide ;

- l'anticyclone magrébine qui est la branche la plus méridionale du flux issu de l'agglutination "saharo-méditerranéenne". Il devient chaud et sec entretient sur son passage de forts taux d'évaporation et des températures élevées.

Le climat de la zone est sous l'influence directe de l'alizé maritime issu de l'anticyclone des Açores.

2.2.1.1. Les facteurs de la morphogenèse

Le vent, la pluviométrie et les autres éléments du climat sont les principaux facteurs qui interagissent dans le façonnement du littoral. Ils interviennent dans l'évolution des formes et par la suite, les facteurs hydrodynamiques demeurent essentiels dans la mise en place et l'évolution des sédiments. Afin de caractériser, le climat au niveau de l'estuaire, nous avons pris les données météologiques de la station de Saint-Louis qui dispose d'une longue série d'enregistrements.

2.2.1.1.1. La dynamique éolienne

La circulation éolienne est analysée à partir des directions moyennes mensuelles du vent sur la période de 1951-2006 (fig. 2.3). Huit directions (Nord, Nord-Est, Est, Sud-Est, Sud, Sud-ouest, Ouest, Nord-ouest) sont retenues pour l'analyse des fréquences qui montre la prédominance de deux quadrants durant l'année :

- les flux du quadrant N à E (Nord à Nord-Est) qui dominent la circulation d'octobre à mai, soit 8 mois ;
- les flux du quadrant Nord à Nord Ouest prennent le relais à partir de juin et dominent la circulation le reste de l'année, soit 4 mois.

a. La situation éolienne d'octobre à mai

Durant cette longue période de 8 mois, les vents dominants sont de quadrant N à E. Le secteur N présent toute l'année, domine fortement en fréquence durant ces 8 mois, sauf au mois de décembre où c'est la composante NE qui domine faiblement avec 45% des

fréquences, contre tout de même 44% pour le secteur N durant ce mois de décembre. Excepté ce mois, le secteur N domine nettement la circulation avec une fréquence maximale en mars : 84% et la plus faible en octobre et mai : 62%. Pour toute la période, le secteur N est suivie de la composante NE qui atteint son maximum en décembre.

La période enregistre aussi la présence d'un vent de secteur E présent durant 3 mois et très faiblement représenté : 11% en décembre, 12% en janvier et 5% en février. Un secteur SE, très faible : 4% se signale en novembre.

En mars, avril et mai des flux du quadrant W à N se signalent. Ils sont de NW en mars (4%), en avril (11%) et en mai 18% ; il s'y ajoute un faible secteur W (2%).

b. La situation éolienne de juin à septembre

Durant cette courte période de 4 mois, les flux sont exclusivement du quadrant W à N, marquant ainsi la domination des vents d'Ouest. Dès le mois de juin les secteurs W et NW à égalité de fréquence (31%) dominent la circulation. Le secteur W domine en fréquence tous les autres secteurs, il se renforce en juillet (51%), diminue légèrement en août avec 47% pour se ramener à 42% en septembre et 9% en octobre qui marque la domination des flux d'Est. Le secteur W est toujours suivi en fréquence du secteur NW qui enregistre les fréquences respectives suivantes de juin à septembre : 31%, 27%, 31% et 24%.

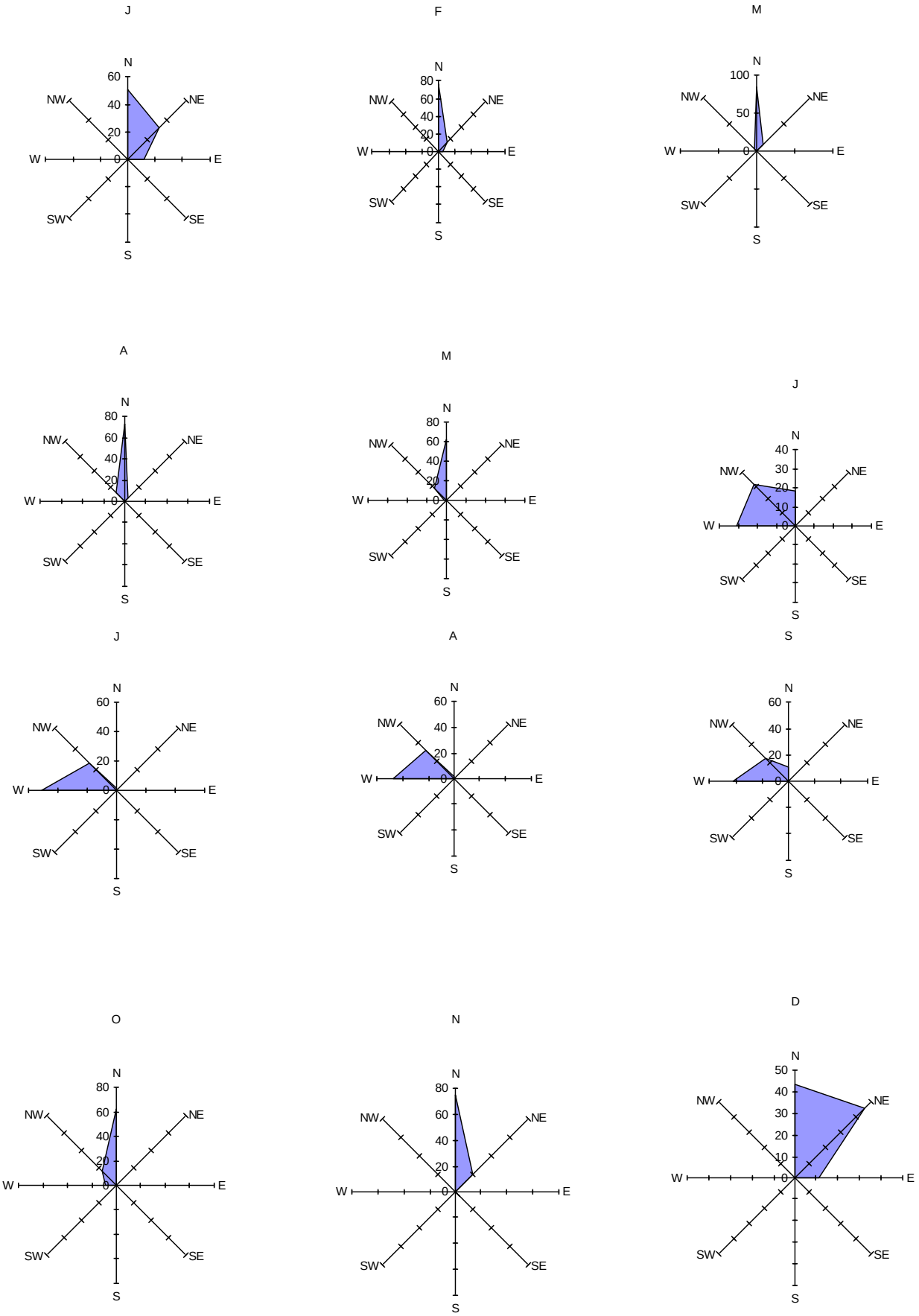


Fig. 2.3 : Direction moyenne des vents à la station de Saint-Louis (1951-2006)

Ces vents ont des vitesses variables durant l'année éolienne, vitesses toujours supérieures à 3,5 m/s (tableau 2.3). Les vitesses les plus élevées sont notées en mars, avril avec le maximum et en mai ; mois durant lesquels la vitesse des flux atteint et dépasse 5 m/s. Les autres mois ont des vitesses de flux moins importantes quoique toujours supérieures à 3,5 m/s, ce qui est tout de même élevé. La moyenne annuelle est de 4 m/s.

Tableau 2.3 : Les vitesses moyennes du vent à la station de Saint-Louis (1951-2006)

Descripteurs	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jlt.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	AN
Vitesse en m/s	4	4,4	5	5,4	5,1	4,8	4,5	3,9	3,5	3,5	3,5	3,7	4

La zone du littoral enregistre habituellement les vitesses les plus élevées par rapport aux autres régions avoisinantes du fait de la forte influence des alizés. Ces vitesses élevées sont concentrées durant la période non pluvieuse, période pendant laquelle les facteurs hydrodynamiques sont prédominants sur le littoral.

2.2.1.1.2. La pluviométrie

L'essentiel des précipitations dans la zone de Saint-Louis arrivent, concentrées sur quatre mois, de juillet à octobre. Le renforcement de l'alizé de Nord-Ouest (durant cette période) freine très souvent la remontée de l'Equateur Météorologique, l'épaisseur de la mousson étant ainsi limitée, ce qui explique dans la plupart des cas les retards observés pour le démarrage de la saison pluvieuse et la faiblesse des pluies. La distribution de ces précipitations dans le temps et dans l'espace est étroitement liée à la pénétration de la mousson, au comportement des lignes de grains et par conséquent reste tributaire de l'ensemble du système climatique ouest africain (Sarr, 1995). Les précipitations en Afrique occidentale sont liées à trois conditions principales (Leroux, 1970) :

- le potentiel hygrométrique de la masse d'air (qui est en même temps un potentiel énergétique) ;
- l'intervention d'un facteur déclenchant l'ascendance de la masse d'air ;
- une structure verticale de l'Equateur Météorologique favorable à cette ascendance (absence de cisaillement et de subsidence).

Le littoral saint-louisien est en grande partie sous la dominance du flux d'alizé issu de l'anticyclone des Açores. Les pluies qui sont reçues pour l'essentiel sont dues aux lignes de grains aux ondes de l'Est qui peuvent apporter en moyenne plus de 80 % des précipitations dans les régions sahéliennes. Ces précipitations sont de type orageux et les lignes de grains prennent naissance dans la zone du Lac Tchad et celle située à l'ouest de la boucle du Niger (Kane, 1985).

L'évolution mensuelle des précipitations (fig.2.4) montre une répartition très inégale de la pluie, avec le maximum qui se situe au mois d'août, suivi du mois de septembre, ensuite du mois de juillet et enfin d'octobre. Les précipitations journalières peuvent atteindre des valeurs élevées. Le mois de septembre 1987 a enregistré une pluie journalière de 146 mm, ce qui est le maximum journalier de la période de 1961 à 2006.

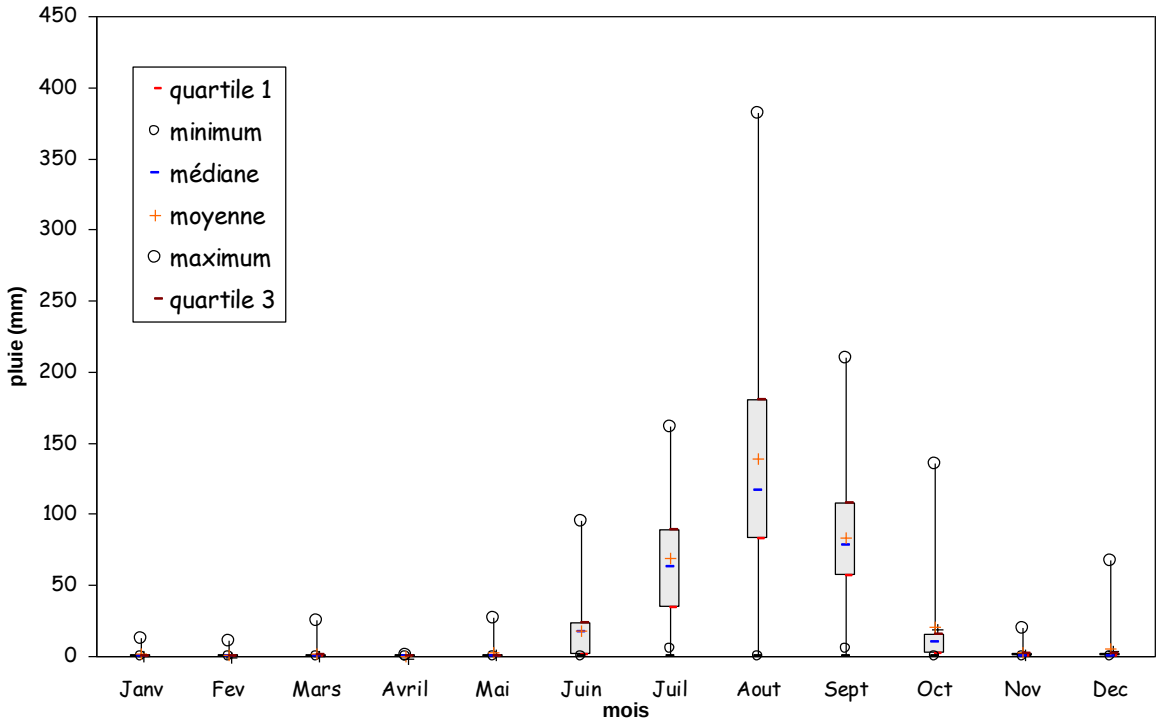


Fig. 2.4 : Evolution inter mensuelle de la pluviométrie à Saint-Louis (1892-2006)

La figure 2.5 montre que des années déficitaires alternent avec des années excédentaires. Ces fluctuations sont liées à la dynamique de la mousson africaine qui est marquée par une très forte variabilité. Durant la période qui va de 1892 à 1930, la pluviométrie est relativement excédentaire avec le total le plus élevé qui est noté en 1928, année d'une bonne pluviométrie avec un cumul de 1139 mm répartie sur quatre mois. Les années humides de la période sont 1912 (674,9 mm), 1918 (663,5 mm), 1919 (604 mm), 1922 (769,5 mm), 1927 (685,8 mm), et 1930 (689,9 mm). L'indice pluviométrique de cette période est de 2% à 5%. Toutefois, nous avons noté des années intermédiaires où la quantité de

pluie est inférieure à 200 mm, 1894 (169,3 mm), 1913 (150 mm), 1914 (143,7 mm), 1931 (164,3 mm) et 1942 (173,5 mm).

A partir des années 70, l'évolution est caractérisée par une baisse constante des précipitations avec des indices pluviométriques très faibles allant de 0 à -1%. Cette période coïncide avec les années de sécheresse au Sahel, sécheresse marquée par son intensité et sa durée. Les précipitations sont inégalement réparties dans le temps, un important déficit a été observé pendant les années 1972 (152 mm), 1977 (102,3 mm), 1983 (99,7 mm), 1984 (109 mm), 1990 (191 mm), 1992 (50,5 mm). Nous verrons dans le chapitre qui suit que cette péjoration climatique avait négativement influé le comportement des habitants de la ville de Saint-Louis qui n'ont pas hésité à s'installer au niveau des anciens lits du fleuve. Une accalmie est notée durant les années 1993 (239 mm), 1996 (171 mm), 1997 (220 mm) et 2002 (228 mm). La quantité maximale a été recueillie en 2000, qui a été une saison, relativement, pluvieuse avec 448 mm de pluie.

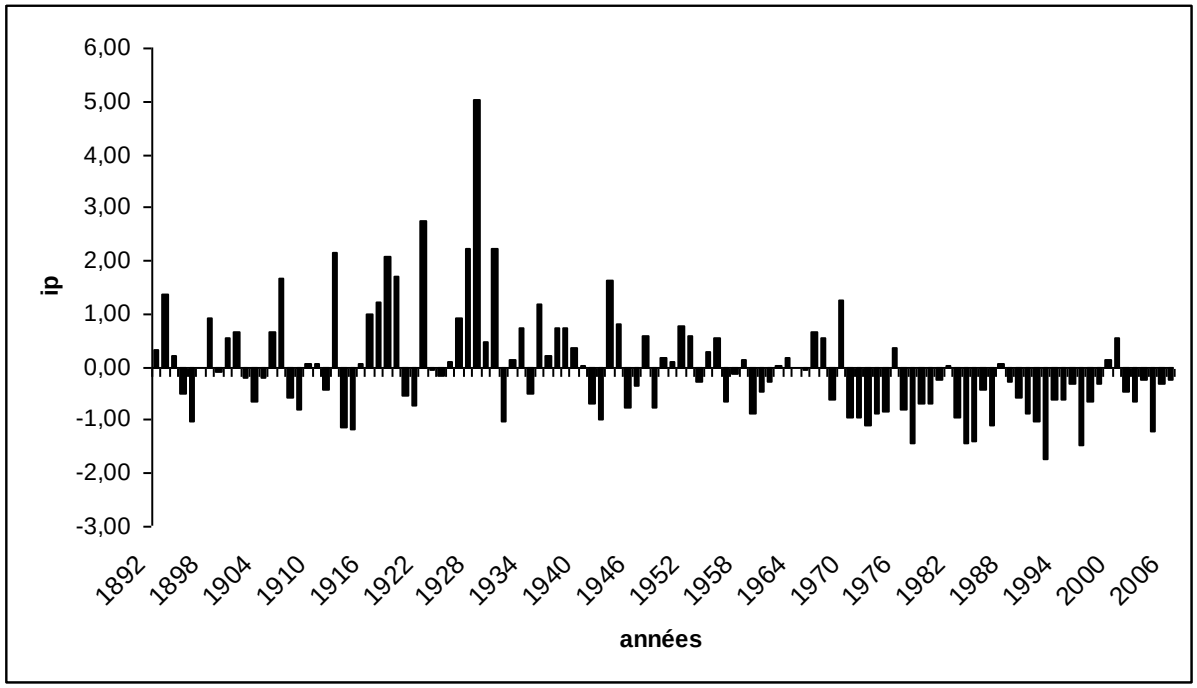


Fig. 2.5 : Indice pluviométrique de la station de Saint-Louis (1892-2006)

Dans le Sahel, l'agriculture est fortement tributaire des caractéristiques saisonnières des précipitations à savoir la durée de la saison des pluies, la quantité des précipitations saisonnières et la distribution des précipitations intrasaisonnière (Sultan et Janicot, 2003). Elles ne sont concentrées que sur quatre mois. Cette répartition mensuelle limite la recharge des nappes dont les populations du Gandiolais sont largement dépendantes pour pratiquer l'activité maraîchère.

2.2.1.1.3. Les autres éléments du climat

L'analyse porte sur les valeurs moyennes mensuelles des températures, de l'insolation, de l'évaporation et de l'humidité relative (tableau 2.4).

Tableau 2.4 : Les données moyennes des différents éléments du climat à la station de Saint-Louis

Descripteurs	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Vents d'Est	Vent d'Ouest	TX	TN	TM	Am	Ins	Ev	UX	UN	UM	Pmm
Janvier	51	33	12						96		30,0	15,6	22,8	14,4	7,3	206	75	26	51	1,0
Février	76	15	5						96		31,3	16,6	24,0	14,7	8,1	191	79	28	53	0,9
Mars	84	11						4	95	4	31,7	17,4	24,5	14,3	8,8	197	84	33	59	0,1
Avril	73	4						11	76	11	30,5	17,9	24,2	12,5	9,4	157	88	43	65	0,1
Mai	62						2	18	62	20	29,4	19,5	24,4	9,9	8,8	132	90	52	71	0,3
Juin	18						31	31	18	62	30,0	22,6	26,3	7,4	7,2	108	92	61	77	7,3
Juillet	2						51	27	2	78	30,5	24,5	27,5	6,0	7,3	104	91	67	79	43,7
Août	2						47	31	2	78	31,3	24,9	28,1	6,4	7,5	95	92	68	80	97,6
Septembre	11						42	24	11	66	32,2	25,1	28,6	7,1	7,4	92	94	65	80	90,5
Octobre	62						9	16	62	25	33,2	23,7	28,5	9,5	8,1	127	92	50	71	22,9
Novembre	75	18		4					97		33,0	20,1	26,5	12,8	7,9	165	85	35	60	0,5
Décembre	44	45	11						100		30,8	16,9	23,8	13,8	7,1	201	78	28	53	1,2
Année											31,1	20,4	25,8	10,7	7,9	148	86,8	46,2	66,5	22,2

(TX : température maximale, TN : température minimale, TM : température moyenne, Am : amplitude, Ins : insolation, Ev : évaporation, UX : humidité relative maximale, UN : humidité relative minimale, UM : humidité relative moyenne, Pmm : précipitation en mm)

2.2.1.1.3.1. Les températures moyennes mensuelles

L'évolution des températures (fig.2.6) moyennes maximales (TX) est bimodale avec un maximum principal en octobre : 33,2 °C et un maximum secondaire en mars : 31,7 °C. Les minima sont de mai pour le principal et de janvier pour le secondaire. La moyenne annuelle des TX est 31,2 °C.

Les températures moyennes minimales (TN) ont, à la différence des TX, une évolution unimodale avec un maximum de 25,1 °C noté en septembre et un minimum de 15,6 °C en janvier. La moyenne annuelle est de 20,4 °C

Les températures moyennes (TM) ont comme la TX une évolution bimodale. Le maximum principal est noté comme pour la TN en septembre avec 28,6 °C ; alors que le maximum secondaire est de mars (comme pour la TX) avec 24,5 °C. Le minimum principal est de janvier (22,8 °C, mois où se situent tous les minima des températures) ; et le secondaire du mois d'avril (24,2 °C, un mois après le maximum secondaire). La moyenne annuelle des TM est 25,8 °C.

L'amplitude thermique diurne enregistre ses valeurs les plus faibles durant les mois de mai et octobre, période où se situe le minimum : 6 °C, en juillet. Le reste de l'année connaît des valeurs plus élevées avec un maximum en février 14,7 °C, l'évolution est unimodale. L'amplitude thermique annuelle est 5,7 °C.

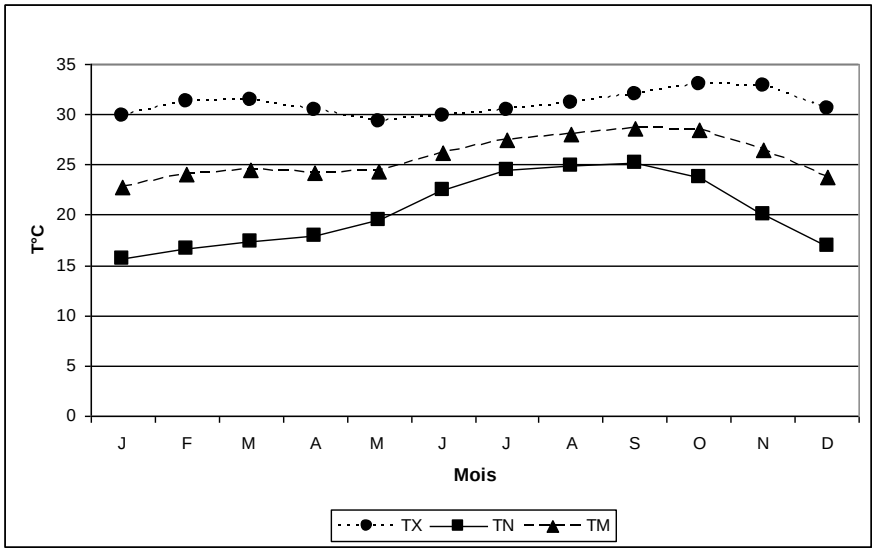


Fig. 2.6 : Evolution des températures moyennes mensuelles à la station de Saint-Louis (1951-2006)

2.2.1.1.3.2. La durée d'insolation

La durée moyenne journalière de l'insolation au niveau de la station de Saint-Louis n'atteint pas 10 heures, mais elle est toujours supérieure à 7 heures (fig.2.7). Les mois les plus ensoleillés sont mars, avril, mai, avec un maximum en avril : 9,4 heures. Le minimum intervient en décembre : 7,1 heures. La moyenne annuelle est de 7,9 heures. La chute de l'insolation durant la période pluvieuse (de juillet à octobre) est liée à la forte nébulosité.

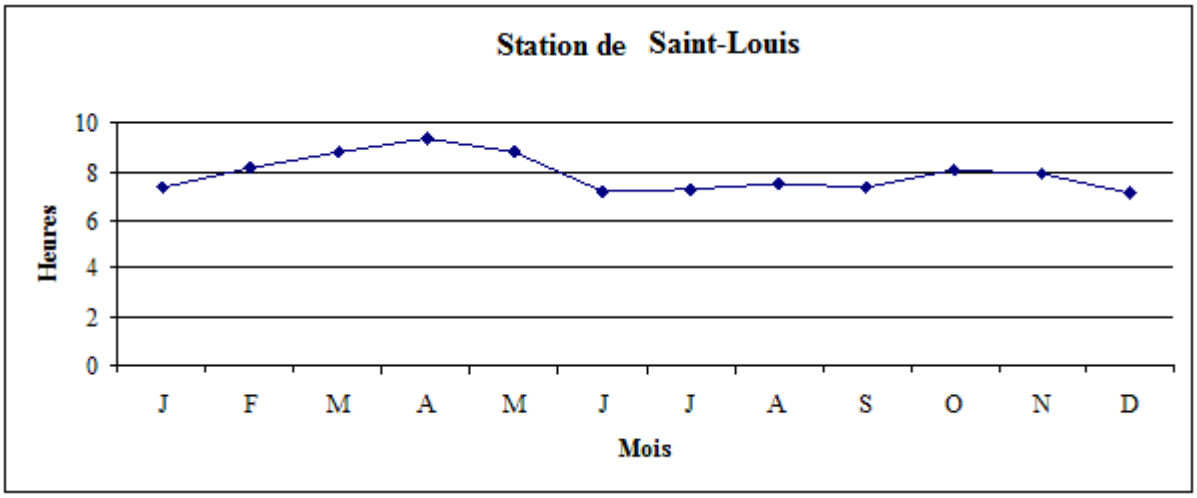


Fig. 2.7 : L'insolation moyenne mensuelle en heures à Saint-Louis (1951-2006)

2.2.1.1.3.3. L'évaporation moyenne

L'évaporation Piche est analysée à partir des données de la période 1951 à 2003 (fig.2.8). Les mois de décembre à janvier ont des valeurs moyennes mensuelles pour l'évaporation qui dépasse 200 mm. Le maximum est enregistré en janvier avec 206 mm. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées en août et septembre avec respectivement 95 et 92 mm, la demande évaporante peut être diminuée par l'humidité relative. Le reste de l'année connaît des valeurs élevées toujours supérieures à 100 mm, la forte insolation observée durant cette période accroît sensiblement la capacité évaporante de l'atmosphère.

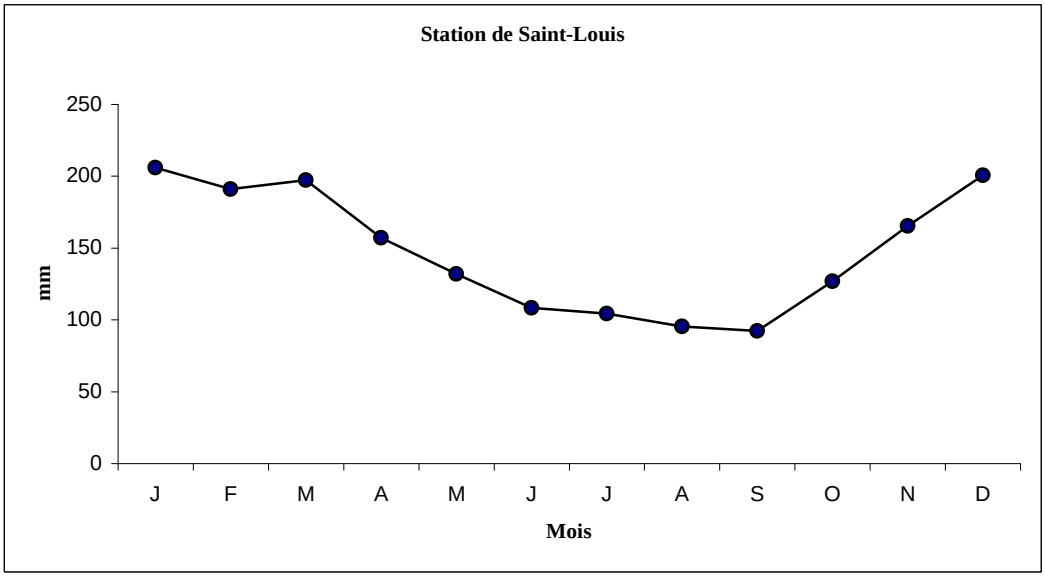


Fig. 2.8 : Evolution moyenne mensuelle de l'évaporation en mm à Saint-Louis

L'évaporation joue un rôle très important dans la morphogénèse (dessiccation des argiles par exemple) et surtout dans le régime hydrologique du fleuve dans la mesure où elle peut constituer un facteur limitant au soutien du débit en période non pluvieuse.

2.2.1.1.3.4. L'humidité relative

Les valeurs maximales (UX) sont élevées, toujours supérieures à 75%. La période qui va de mai au mois d'octobre a des valeurs qui dépassent 90%. L'humidité relative minimale (UN), connaît ses valeurs les plus faibles entre novembre et avril (moins de 50%). Le reste de l'année, elle dépasse 50%. L'humidité relative moyenne (UM) a des valeurs qui sont, durant toute l'année, supérieures à 51% (fig.2.9). L'humidité relative est importante à la station de Saint-Louis, du fait de sa situation géographique.

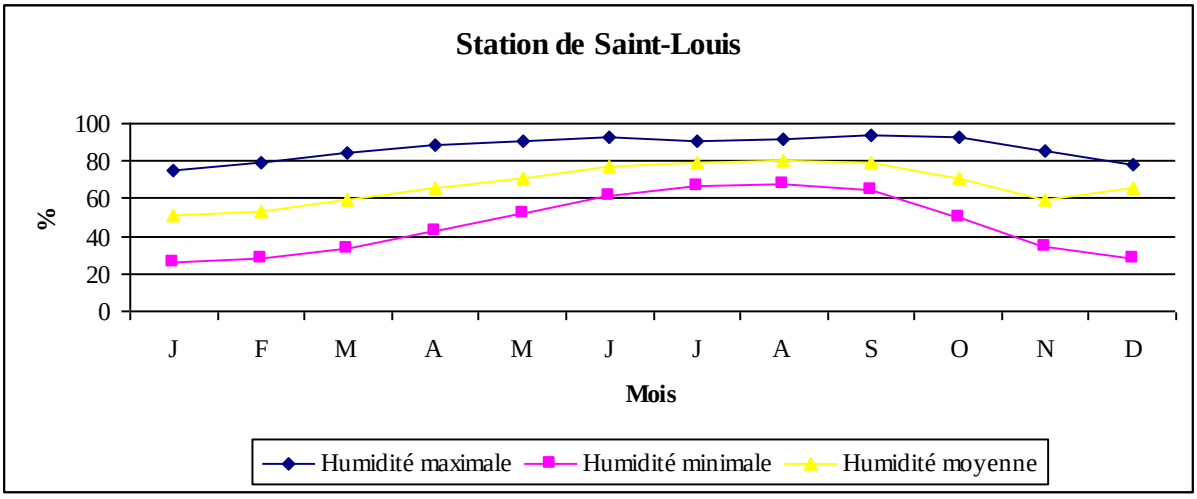


Fig. 2.9 : L'humidité relative moyenne mensuelle à Saint-Louis (1951-2006)

2.3. Le climat à Saint-Louis

L'analyse intégrée des différents éléments du climat (fig.2.10) en rapport avec la situation littorale de la station de Saint-Louis permet de comprendre l'évolution des différents paramètres climatiques. C'est l'alternance de la circulation d'alizés et d'une circulation de mousson qui est à l'origine du découpage de l'année en deux saisons (Sall, 1982).

2.3.1. La période qui va de novembre à mai

Cette période voit la domination des flux du quadrant N à E ; avec un secteur N dominant tous les autres secteurs ; avec tout de même la présence de flux du quadrant W à N et dans ce quadrant, le secteur NW domine en fréquence les autres secteurs. Cette période enregistre le maximum secondaire des TM et les deux minima (principal et secondaire des TM, respectivement en janvier et en avril). L'amplitude thermique diurne y connaît ses valeurs les plus importantes, montrant une nette différence entre les températures du jour et celles de la nuit.

L'évaporation connaît ses valeurs les plus élevées alors que l'humidité relative y enregistre ses valeurs moyennes les plus faibles. Cette période n'enregistre que de faibles valeurs de pluie pour un total de 4,1 mm soit 1,5% du total annuel qui est de 266,1 mm.

C'est la saison non pluvieuse marquée surtout par la présence de flux d'alizés avec des vitesses relativement élevées. On peut retenir 3 types d'alizés :

- alizé maritime de secteur NW présent pratiquement toute l'année ;
- alizé maritime faiblement continentalisé de N et même de NE ;
- alizé continental ou harmattan de secteur E et rarement ou faiblement présent.

La présence de ces variantes du flux d'alizé s'explique par la situation littorale de la station, situation qui favorise la présence marquée des alizés issus de l'océan, donc humide, humidité entretenue pratiquement toute l'année. Cela favorise un important écran nuageux sur la côte qui réduit la durée de l'insolation.

L'importance de la présence de plan d'eau libre (océan, fleuve et tributaires) entretient des valeurs élevées pour l'évaporation durant cette période. Les températures restent relativement douces du fait des influences maritimes, et les rares pluies[4] sont dues à des invasions d'air polaire.

2.3.2. La période qui va de juin à octobre

Durant cette période, les flux dominants sont essentiellement de deux secteurs : du secteur W qui domine nettement suivi du secteur NW. On note toujours la présence de flux de N mais très faibles. Ces flux sont plus chauds relativement à la première période. La TX y connaît son maximum principal en octobre avec 33,2°C. Il en est de même pour la TN avec 25,1°C en septembre et aussi pour la TM avec 28,7°C. L'amplitude diurne enregistre ses valeurs les plus faibles qui témoignent des écarts faibles entre les températures du jour et celles de la nuit. Ces flux sont aussi plus humides, les valeurs de UX dépassent 90%, celles de UN dépassent 50% et la moyenne UM se situe entre 71 et 80%.

Ce flux chaud et humide est la mousson qui donne la pluie et 99% du total de pluie sont reçus durant cette période. C'est la saison pluvieuse et la chute des pluies réduit les valeurs d'évaporation.

Ces deux périodes se différencient surtout par les totaux de pluie reçus. L'évolution de la pluviométrie montre un début centré en juin avec 7,3 mm. Le maximum est d'aout avec 97,6 mm et octobre marque la fin de la saison avec 22,9 mm. Le total annuel de 266,1 mm montre qu'il s'agit d'un régime de type sahélien. Le climat en revanche bénéficie de la présence des flux d'alizés frais et humides du fait de la situation littorale de la station.

[4] Ce sont des pluies hors saison appelées localement pluie de « heug »

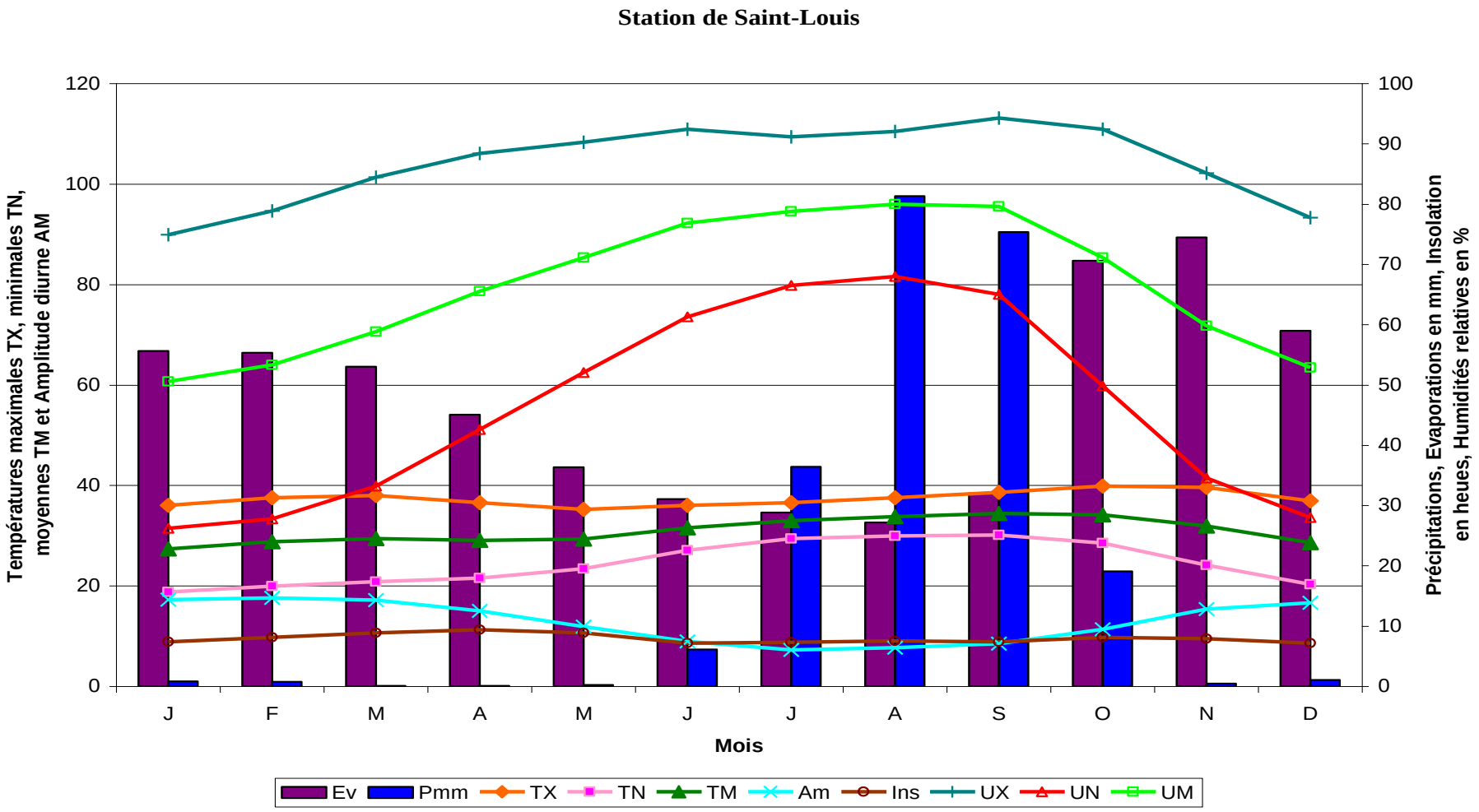


Fig. 2.10 : Evolution comparée des éléments du climat à Saint-Louis

L'estuaire se trouve dans la partie septentrionale du Sahel où la variabilité climatique est de règle sur l'ensemble de la zone. Le climat se caractérise par une longue saison sèche (8 mois) et une saison pluvieuse d'une durée de 4 mois qui peut même se traduire par un déficit ou excédent pluviométrique. L'estuaire subit les conséquences de ces fluctuations climatiques. Cette variabilité climatique est un phénomène omniprésent dans la zone sahélienne qui accentue la vulnérabilité du système socio-environnemental.

Les facteurs climatiques ont largement influencé la morphologie de l'estuaire avec la mise en place des différentes unités géomorphologiques. Ils constituent aussi des déterminants essentiels dans l'évolution des formations littorales.

Conclusion

La synergie des facteurs géoclimatiques et géomorphologiques peut produire des catastrophes naturelles (Dauphiné, 2005). L'analyse du cadre physique montre que l'estuaire s'est formé dans une zone basse principalement où alternent les formations dunaires. C'est dans ce contexte géomorphologique que la ville s'est développée. De même, les facteurs géomorphologiques et climatiques sont favorables à la salinisation des terres par les phénomènes d'intrusion marine et d'évaporation.

Après avoir défini le contexte dans lequel l'estuaire du fleuve Sénégal a été mis en place, nous allons montrer, dans le troisième chapitre, comment les facteurs naturels du site peuvent contribuer à accroître la vulnérabilité des sociétés urbaines à travers l'exemple de la ville de Saint-Louis et comment les populations du bas estuaire ont pu s'adapter à un aléa naturel.

Chapitre 3 : De la dualité nature-société à la géographie des risques

Le risque reflète le rapport entre nature et société mais le concept est polysémique comme celui de la vulnérabilité. Les définitions diffèrent en fonction des approches et des intérêts. C'est dans ce contexte que Beck (2001) remarque qu' « on observe un phénomène de pluralisation conflictuelle et une multiplication des définitions des risques liés à la civilisation. On aboutit en quelque sorte à une surproduction de risques qui, tantôt se relativisent, tantôt se complètent, tantôt l'un l'emporte sur l'autre à tour de rôle ». Le risque est communément admis comme étant le produit d'un aléa et de la vulnérabilité ; de ce fait, il relève du domaine de la probabilité et non d'une certitude.

Sierra Alexis cité par D'Ercole et al. (2009) en analysant les villes de Quito et Lima pose l'hypothèse d'après laquelle le risque est une représentation sociale, déterminé par l'existence d'enjeux répartis sur le territoire urbain et qui peuvent être perdus en fonction de leur vulnérabilité. En d'autres termes, la vulnérabilité des enjeux accroît le risque sur le territoire urbain. Pigeon (2005) ressort la dualité nature - société et précise également que la géographie des risques est d'office amenée à préciser les relations entre la nature et les sociétés humaines. Nous allons nous intéresser plus particulièrement à cette dernière approche. Aussi, la conception géographique du risque s'imbrique-t-elle sous ce rapport entre homme capable de transformer le milieu et la capacité de réponse ou de sa résilience.

Ce rapport conflictuel de l'homme à l'environnement est particulièrement marquant dans les milieux qui sont caractéristiques d'une fragilité naturelle, notamment les milieux côtiers. En se fondant sur les caractéristiques physiques de l'espace estuarien analysées dans le chapitre précédent, il s'agit essentiellement de montrer l'évolution spatiale urbaine, l'exposition des populations de la ville de Saint-Louis aux menaces naturelles et comment les sociétés du bas estuaire ont pu s'adapter à un aléa naturel.

3.1. L'occupation de l'estuaire du fleuve Sénégal

Les importantes potentialités économiques, les facteurs liés à l'histoire coloniale et aux aléas climatiques sont à l'origine d'une occupation non maîtrisée de l'espace en milieu urbain et périurbain de la zone estuarienne du Sénégal. L'augmentation de la population, dans ces zones marquées par leur fragilité, favorise les risques naturels. En particulier, du fait de sa situation géographique, l'estuaire du fleuve Sénégal enregistre périodiquement des inondations et son histoire géologique ne constitue pas un facteur propice pour le développement de certaines activités agricoles notamment le maraîchage. Malgré ces contraintes, il connaît une évolution sans précédent.

3.1.1. L'évolution exceptionnelle d'une zone à risque

Nous avons retenu la ville de Saint-Louis pour mieux identifier spatialement les zones les plus à risques pour les populations riveraines lors des fortes crues ou d'inondations majeures. Par sa configuration, elle est constituée de trois entités :

- l'île est un fragment de cordon littoral qui s'étire sur une longueur de 2,5 km et a une largeur moyenne de 200 m. Son relief est très bas et se trouve légèrement au-dessus du niveau de la mer, elle est entourée de part et d'autre des deux bras du fleuve Sénégal. Elle concentre 7% de la population totale de la ville ;

- la Langue de Barbarie est une flèche littorale sableuse orientée nord-sud qui s'étire sur une longueur de 25 km et sa largeur est très variable, plus large au nord, elle s'amincit vers le sud, 300 à 200 m. Elle est située à l'ouest de l'île et sépare le fleuve de l'océan. Elle compte 24% de la population. Cette flèche littorale de sable fin blanc est le résultat d'un long processus alternatif d'engraissement et de démaigrissement de la plage à la faveur de la dérive littorale. C'est l'extrémité sud de la Langue de Barbarie qui détermine la position de l'embouchure du fleuve qui a fréquemment migré vers le sud, entraînant dans sa progression la flèche littorale de la Langue de Barbarie qui ne s'est ni élargie, ni surélevée depuis son origine (Gac et al 1982, Kane, 1985). Sall (1982) distingue trois segments bien individualisés (fig.3.1), dans le sens longitudinal de la Langue de Barbarie :

- un segment proximal qui s'étend depuis la racine de la flèche à quelques 3 km de Saint-Louis jusqu'à l'hydrobase, le cordon y présente sa plus grande largeur ;
- un segment médian, de l'hydrobase à la hauteur de Tassinère, la flèche y enregistre ses hauteurs maximales (7 m) et ses plus forts contrastes topographiques en raison d'un important développement des dunes bordières ;
- un segment distal, de Tassinère à l'extrémité de la flèche. Les hauteurs y sont faibles (rarement plus de 2 m) ; la végétation est peu fournie et la déflation éolienne très active.

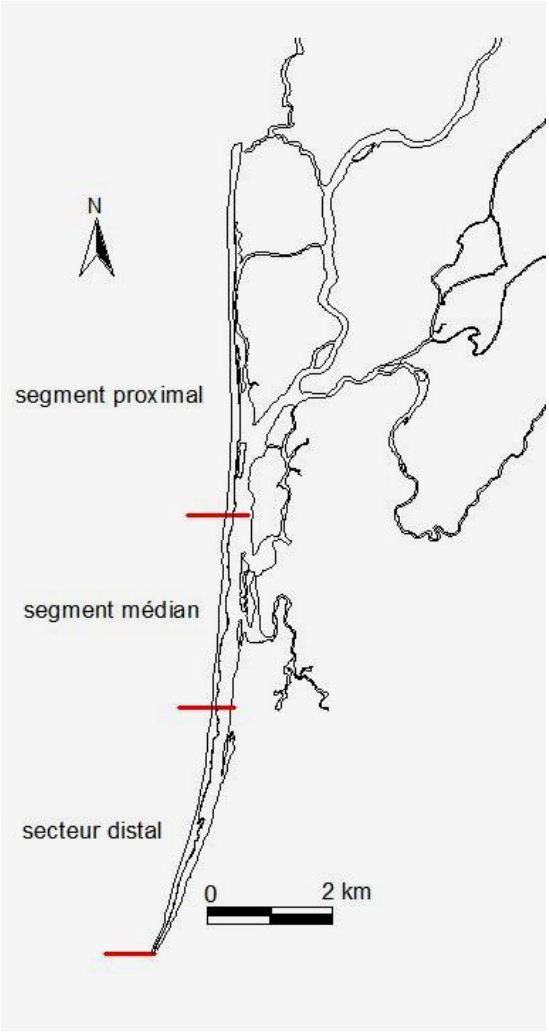


Fig.3.1 : Les segments de la Langue de Barbarie

Caractérisée par une forte tendance évolutive, la Langue de Barbarie est une flèche littorale sableuse fragile et instable et peut présenter des points de faiblesse dus à l'érosion éolienne ou hydrique.

- le faubourg de Sor est une zone dépressionnaire constituée d'anciens marécages. Il est limité à l'ouest par le fleuve Sénégal, au nord, à l'est et au sud par des marigots. Cette entité édifiée sur des vasières est la partie la plus sensible aux crues du fleuve alors qu'elle représente 69% de la population totale.

La ville de Saint-Louis se trouve dans un site amphibie caractérisé par des vasières et les cordons littoraux. Ces derniers ont des altitudes comprises entre 4 et 7 m et se localisent au niveau de la Langue de Barbarie. Au niveau des vasières qui se trouvent dans le faubourg de Sor, s'individualisent des zones basses, des cuvettes constituées de matériaux fins (argileux). Les zones basses représentent 53% dont 17% ont des altitudes situées entre -1

et 0 m et 36% émergent à peine au dessus du niveau de la mer soit entre 0 et 3 m (fig.3.2). Elles correspondent, en fait, au lit majeur du fleuve qui est localisé au niveau du faubourg de Sor. Les pentes sont également très faibles, elles sont comprises entre 0 et 9% (fig.3.3). Au niveau du faubourg de Sor, les pentes sont pratiquement nulles, elles varient entre 0 et 2%. Aussi, à cet endroit, les variations du niveau d'eau seront faibles en cas d'inondation et entraîneront une variation plus importante de l'étendue des eaux.

Ces basses altitudes et la faiblesse des pentes sont des éléments physiques qui conditionnent dans une large mesure le comportement des eaux dans la ville. La ville de Saint-Louis apparaît comme un espace à risque où des aléas très divers peuvent entraîner des dégâts importants. Son occupation fait de ces espaces des zones vulnérables pour les populations riveraines qui s'y trouvent. C'est dans cette optique que Léone et Vinet, (2006) soulignent que l'exposition des populations dans ces zones est la coïncidence spatiale entre les enjeux et l'aléa, d'où la notion de zone à risque.

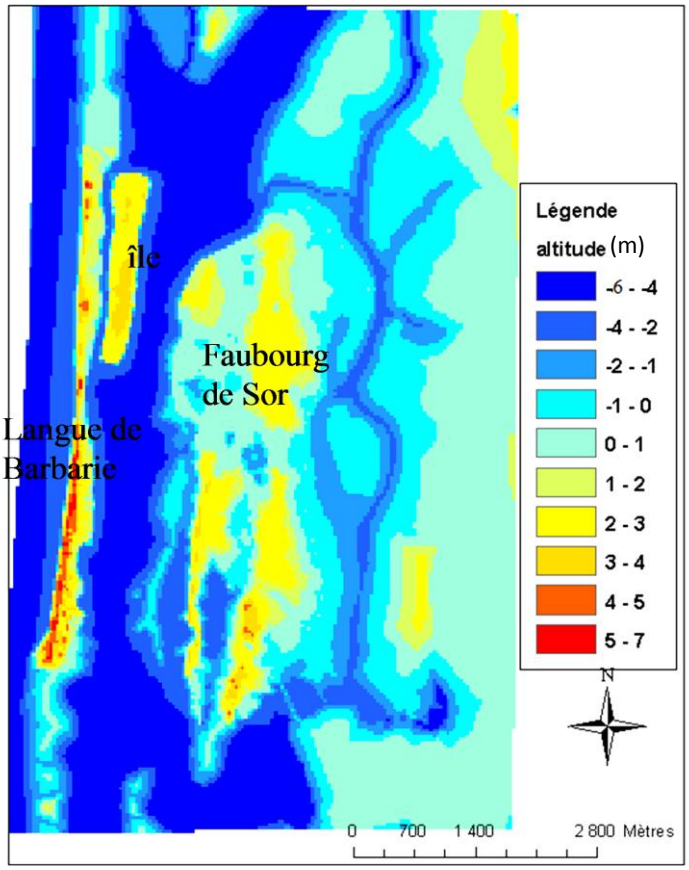


Fig.3.2 : Le modèle numérique de terrain de la ville de Saint-Louis

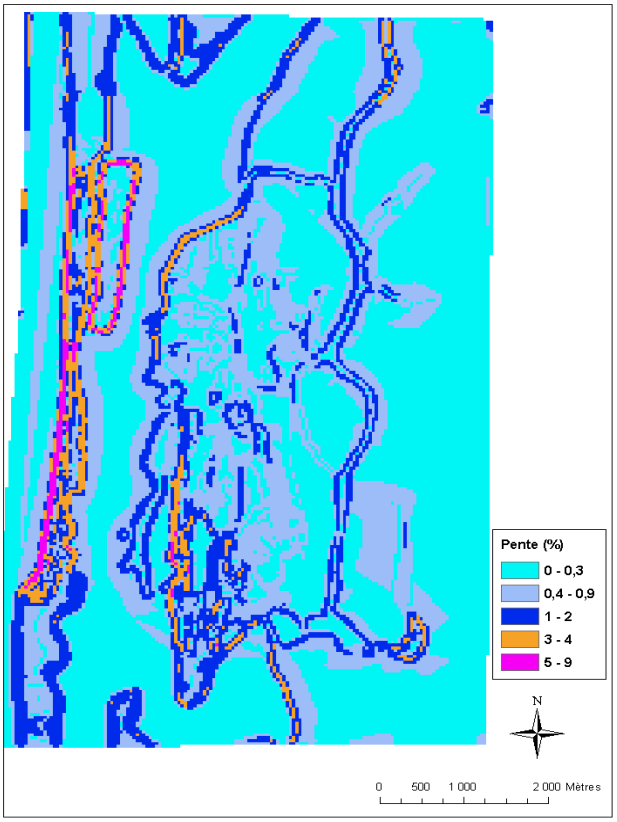


Fig. 3.3 : Le niveau des pentes

Nous avons échantillonné cinq quartiers (fig.3.4) représentatifs qui connaissent, presque chaque année, des inondations pour analyser la composition granulométrique du sol. La procédure consiste à un prélèvement du sol au niveau de l'horizon superficiel qui correspond au chiffre 1 noté au niveau de la légende du triangle de texture et à une profondeur de 50 cm (2). Après séchage des échantillons, ils ont été tamisés à une maille de 2 mm. Nous avons procédé à une destruction de la matière organique avec l'utilisation de l'eau oxygénée. Après cette étape les échantillons ont été placés sur plaque chauffante puis à l'étuve (105°C) pour favoriser leur déshydratation. Par la suite, ils ont été repris dans les allonges de sédimentation et nous y avons ajouté un produit (hexamétaphosphate de sodium (40 g/l) pour disperser les argiles et 450 ml d'eau distillée. L'échantillon est placé sous l'agitateur rotatif pour une durée de 3 heures. Avec la pipette Robinson un prélèvement de 10 ml de suspension d'argile et de limon est effectué. Ce volume est placé sous une boîte de pétri et mis à l'étuve à 105°C pour une durée d'une heure et a été ensuite pesé pour déterminer la fraction en argile et en limon.

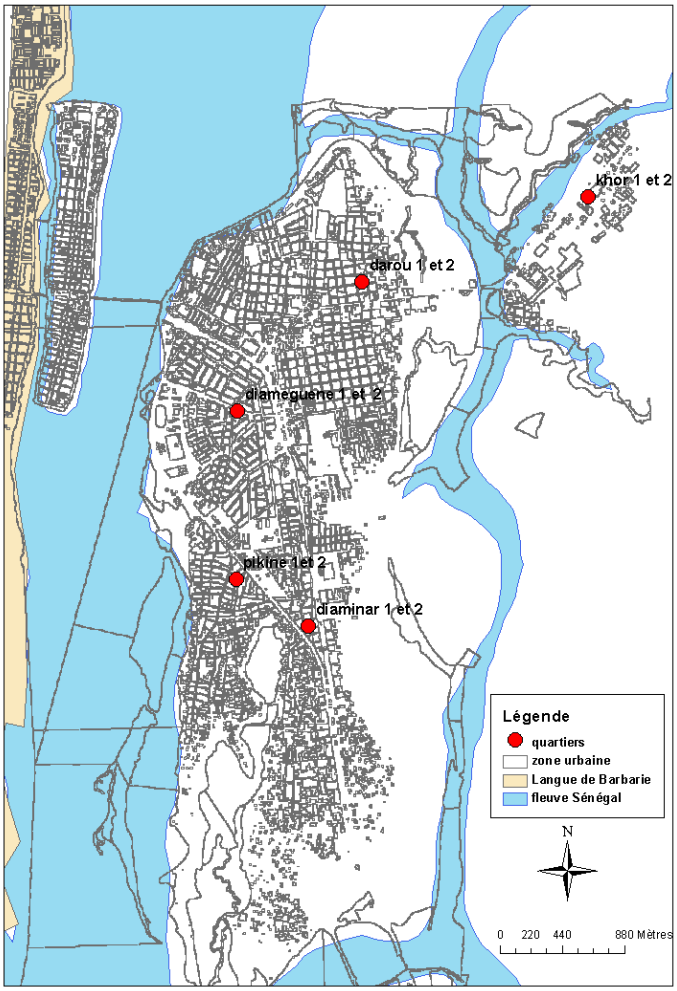


Fig. 3.4 : Localisation des quartiers pour l'échantillonnage granulométrique des sols

Dans les quartiers de Pikine, Diameguène et Diaminar au niveau de l'horizon superficiel les limons représentent respectivement 3%, 1% et 8% ; les argiles 6%, 6% et 17% et le sable 91%, 93% et 83%. Sur une profondeur de 50 cm, les limons sont respectivement de 2%, 2% et 5%, les argiles 8%, 6% et 10% et le sable 90%, 90% et 85%. Les taux de limon et d'argile sont beaucoup plus importants dans les quartiers de Darou et de Khor. Pour le premier c'est au niveau de l'horizon superficiel que nous retrouvons les taux de 34% et 21%, le sable est à 45%. Alors que pour le second c'est sur une profondeur de 50 cm que les limons représentent 11%, les argiles 17% et le sable 72% (fig.3.5). Au total, cette composition granulométrique est essentiellemement constitué de sable qui représente un taux moyen de 80%. Dans cette perspective, des problèmes d'infiltration ne devraient pas se poser en période pluvieuse. Toutefois durant cette période, la nappe est affleurante, le sol reste saturé, ce qui favorise une stagnation des eaux. D'ailleurs, lors de nos échantillonnages, nous avons remarqué que la nappe était à fleur de sol au niveau du quartier de Darou.

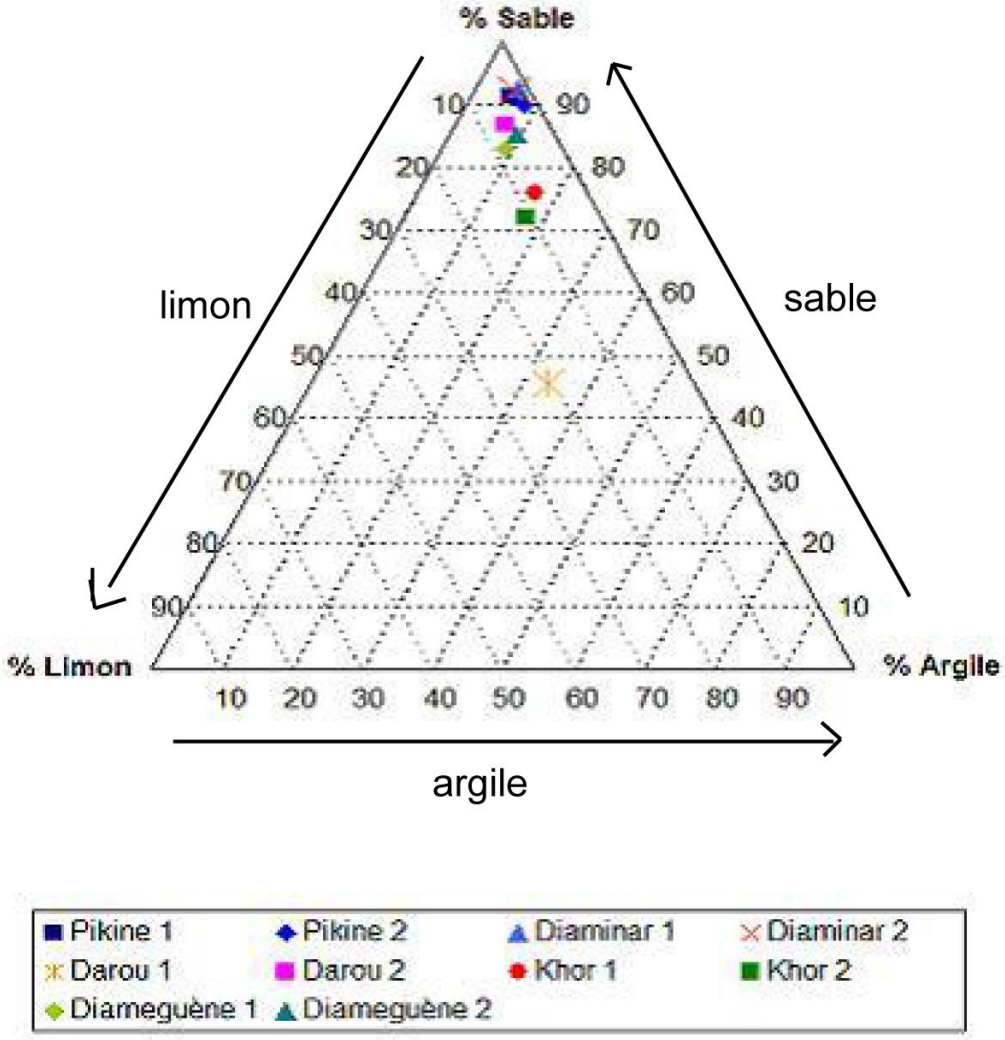


Fig. 3.5 : Composition granulométrique des zones inondables de Saint-Louis

De plus, le fait que les vasières se soient originellement édifiées en milieu marin a produit une incorporation du sel en leur sein. Dans ces conditions, les vasières ne sont pas aptes à supporter des édifications sans un aménagement adapté de l'espace. Malgré toutes ces contraintes, la ville connaît de vastes zones d'habitation, anarchiquement occupées, inondables et insalubres. L'histoire nous apprend que l'île qui constitue le noyau central de la ville avait favorisé l'implantation des européens en 1659 vu que le site était plus apte à l'habitat, les altitudes sont comprises entre 2 et 3 m. L'île occupée précédemment vers 1638, qui se trouve à 5 km au sud de Saint-Louis, était caractérisée par la médiocrité du site et exposée à des inondations périodiques. L'île de Saint-Louis fut donc un lieu propice pour l'établissement des comptoirs européens et jouera un rôle essentiel dans la colonisation française de l'arrière-pays. Plus proche de l'océan et mieux protégée des crues, l'île constituait donc un site stratégique quasi imprenable à cause de sa position géographique et offrait tous les avantages sécuritaires pour l'implantation des premiers occupants. Cependant, cet atout premier n'a pas longtemps prévalu puisque les effets pervers produits

par la croissance urbaine sur des zones non aedificandi ont contribué à détériorer le système socio-environnemental avec comme conséquence une dégradation de l'environnement et une urbanisation non contrôlée. La superficie de la ville est ainsi passée de 1500 ha à 4580 ha entre 1962 et 1968. L'extension du bâti (fig. 3.6) dans les zones inondables du faubourg de Sor qui compte une superficie d'environ 1120 ha a manifestement débuté depuis le début du XIXe siècle mais le récent étalement urbain au niveau de cette entité est consécutif à la sécheresse survenue au Sahel dans les années 70.

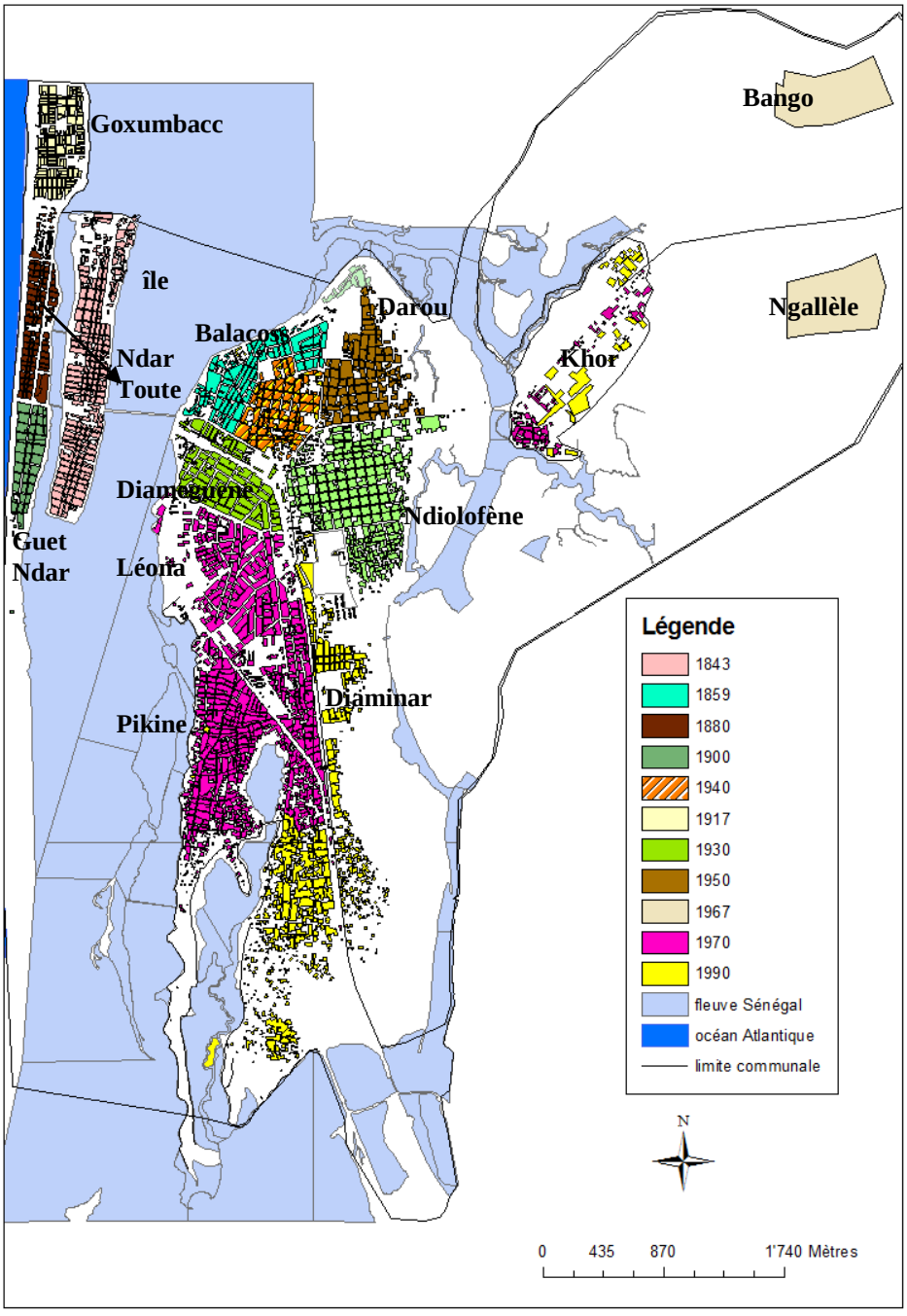


Fig.3.6 : Evolution spatiale de la ville de Saint-Louis

La baisse de la pluviométrie au cours cette période et l'effet de cumul de cette succession sans répit d'années à faible écoulement se sont traduits par un abaissement important du niveau des nappes souterraines, avec en corollaire une phase d'épuisement du fleuve dans l'ensemble de la vallée et un assèchement de nombreux points d'eau (Kane, 1997). Cette péjoration climatique a influencé négativement le comportement des populations en matière d'occupation de l'espace. D'une part, l'exode rural conséquence de cette sécheresse a entraîné un accroissement de la population (fig.3.7) et, d'autre part, a favorisé l'occupation spontanée et anarchique de toutes les zones marécageuses asséchées qui représentent environ plus de 500 ha.

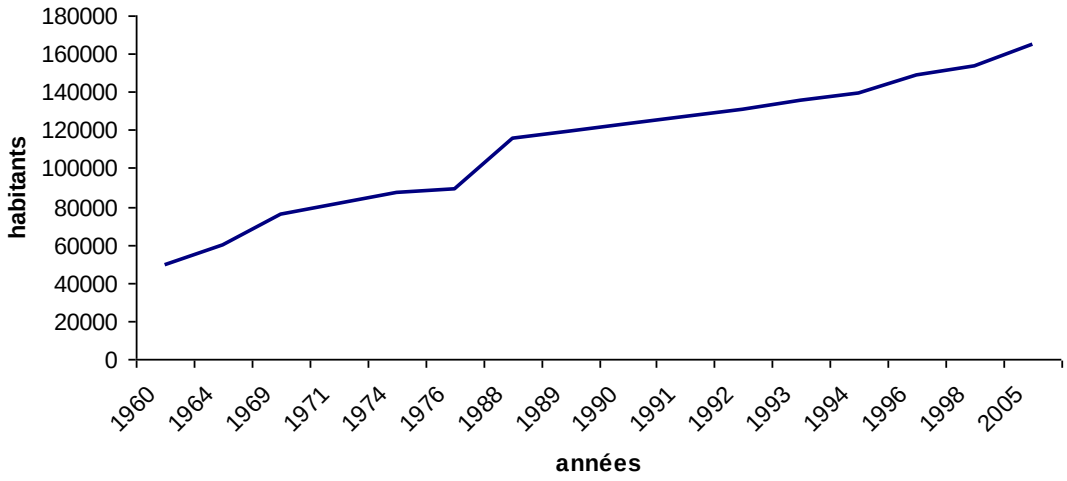


Fig. 3.7 : Evolution de la population de Saint-Louis (1960-2004)

Lors du dernier recensement général de la population en 2004, la ville de Saint-Louis comptait plus de 165 000 habitants. Cette croissance démographique est mal articulée aux réalités du site. Malgré une baisse des niveaux du fleuve qui sont passés de 210 cm entre 1964 et 1969 à 90 cm en moyenne entre 1992 et 2007, les inondations sont de plus en plus fréquentes (1994, 1998, 1999, 2003) à Saint-Louis.

L'inconscience face au risque avec l'occupation des espaces non aedificandi, en l'occurrence les lits majeurs du fleuve et les zones marécages suite à la longue durée de la sécheresse (1970-1990), favorisent les risques d'inondation. Les constructions dans les lits majeurs des cours d'eau retardent l'écoulement des crues et contribuent ainsi à surélever les cotes maximales atteintes (Pigeon, 1994). Dans la même perspective, Schanze et al. (2004) soulignent que les dommages par les risques d'inondation dépendent de la vulnérabilité des éléments exposés surtout s'ils sont installés au niveau des réceptacles des eaux. En 1994, où la ville a enregistré une inondation, plus de 120 000 personnes se sont retrouvées sans toit dans la région, en proie à des problèmes sanitaires et à l'inondation des terres cultivables selon l'Organisation Météorologie Mondiale cité par Kane (1997). Ainsi, Saint-

Louis présente un caractère pluriel et complexe posant des problèmes dus à la superposition de phénomènes et de situations très différenciés. La ville apparaît comme un espace à haut risque naturel où la conjonction de plusieurs facteurs peut produire des effets incommensurables.

3.1.2. L'aggravation des risques par l'urbanisation

Comme beaucoup de villes des pays en développement, à l'exemple de Manille, Caire, entre autres, Saint-Louis est aussi confrontée à un processus d'urbanisation spontanée. Les populations anticipent généralement sur l'occupation des terres. Elles ne laissent pas le temps aux autorités de réaliser des aménagements adaptés au site, ce qui dénote d'une méconnaissance du risque à habiter dans des zones non viabilisées. Cette situation complique davantage le travail des aménageurs et conduit très souvent les autorités à des restructurations.

L'urbanisation de Saint-Louis s'est traduite par une disparition totale des zones marécageuses, soit plus de 900 ha, qui constituaient le réceptacle des eaux. Ces facteurs accroissent les risques d'inondation car le fleuve qui se trouve rétréci, déborde plus facilement. L'accumulation des hommes et des activités sur des espaces fragiles, fait de ces milieux des lieux éminemment vulnérables à tout agent perturbateur, qu'il soit exogène ou endogène, naturel ou technique (Dubois-Maury et Chaline, 2004). La ville apparaît vulnérable et soumise au choc d'événements dévastateurs les uns imprévisibles, les autres difficilement maîtrisables.

La ville de Saint-Louis est soumise à des inondations aussi bien fluviales que pluviales en période d'hivernage. Les caractéristiques naturelles du site anlysées dans le précédent chapitre laissent entrevoir un certain nombre de contraintes. La ville, surtout au niveau du faubourg de Sor, s'est développée sur une zone dépressionnaire, ce qui fait qu'elle constitue une vaste zone de stagnation des eaux. Cette situation est également accentuée par un réseau d'assainissement vétuste et insuffisant. C'est un réseau unitaire, composé de cinq stations de pompage, qui collectent les eaux usées et pluviales. L'inconvénient de ce système, c'est qu'il peut avoir des effets de retour et de débordement des eaux. De plus, le comportement des poplulations démontre une méconnaissance des risques, les canniveaux qui ont pour rôle de drainer les eaux pluviales vers les stations sont obstrués par les ordures ménagères (photo 3.1). Cette situation a pour conséquence inéluctable d'augmenter les risques d'inondation et la durée de stagnation des eaux, vu que le sol reste saturé. L'aggravation de l'aléa découle évidemment de la négligence et de l'imprudence des populations. Bien qu'habitués à des inondations récurrentes, le coefficient d'aggravation de l'aléa pouvait être modulé par la capacité des territoires urbanisés à réagir, à en absorber le

choc ou atténuer les effets par des comportements citoyens (Dubois-Maury et Chaline, 2004).

Photo 3.1 : Colmatage d'un caniveau par les ordures ménagères

Les inondations pluviales se produisent généralement avec des valeurs journalières de moins de 90 mm de pluie. En 2005, par exemple dans la nuit du 15 au 16 juillet, cette hauteur de pluie est tombée dans la ville et des inondations ont été notées sur tous les points bas (photo 3.2).

Photo 3.2 : Inondation dans les quartiers de Diaminar et Balcoss (2005)

En période de crue, quand le fleuve atteint la cote d'alerte 1,75 m, la ville est sous les eaux. Dans certaines zones (Pikine, Khor, Diaminar, Darou), les inondations se produisent à une cote de 1,20 m. La durée de la stagnation peut être longue de plus d'un mois comme ce fut le cas en 1999. Celle-ci est durement ressentie par les populations car les sinistrés sont le plus souvent obligés de quitter leur domicile familial pour être logés dans les établissements

scolaires. Selon Adger (2006) et Kasperson (2005) cité par Gallopin (2006) l'exposition et la durée d'une catastrophe constituent de véritables marqueurs de la vulnérabilité du système.

Nous avons utilisé deux images du satellite Landsat 7 ETM+ pour caractériser les inondations, la durée de stagnation des eaux. Ces images ont les caractéristiques suivantes :

- l'image Landsat 7 ETM+ du 3 octobre 1999 (prise en période pluvieuse), avec une résolution de 30 m ;

- l'image Landsat 7 ETM+ du 4 novembre 1999 (prise en période non pluvieuse), avec une résolution de 28,5 m.

Le traitement des images satellites comprend plusieurs étapes :

- l'amélioration de la qualité géométrique de l'image par fusion : cette étape est appliquée à l'image Landsat ETM+ du 4 novembre 1999 qui dispose de huit bandes. Elle consiste à intégrer l'information du canal panchromatique de résolution de 14,25 m (bande 8) dans les six canaux multispectraux (bandes 1, 2, 3, 4, 5, 7) de résolution 28,5 m pour former une image à six canaux avec une résolution 14,25 m par la méthode de la transformation Gram-Schmidt avec le logiciel Envi. L'objectif de cette fusion est d'obtenir une image ayant les qualités spatiales du canal panchromatique et spectrales des canaux multispectraux.

- La représentation des zones inondées : nous avons utilisé l'histogramme des fréquences qui représente la distribution des valeurs de l'image. Afin de faire ressortir les zones inondées, nous avons fait le choix d'utiliser les bandes du Proche Infra Rouge (PIR) et le Moyen Infra Rouge (MIR) pour l'image de novembre 1999 et les trois bandes (1, 2,3) de l'image d'octobre 1999. Ce choix se justifie par le fait que l'eau absorbe complètement le rayonnement dans ces bandes.

Nous avons ensuite exporté les images dans le logiciel Arcgis pour calculer la superficie inondée. La méthode a consisté à digitaliser la classe eau et ensuite à la superposer avec le fichier shape du fleuve avec l'outil Union. En session de mise à jour, nous avons supprimé le fichier shape fleuve pour que le logiciel ne prenne en compte que la superficie inondée. Elle correspond à 12 000 ha pour l'image d'octobre et 11 000 ha pour celle de novembre. Les figures 3.8 A et B représentent les zones inondées durant la crue de 1999.

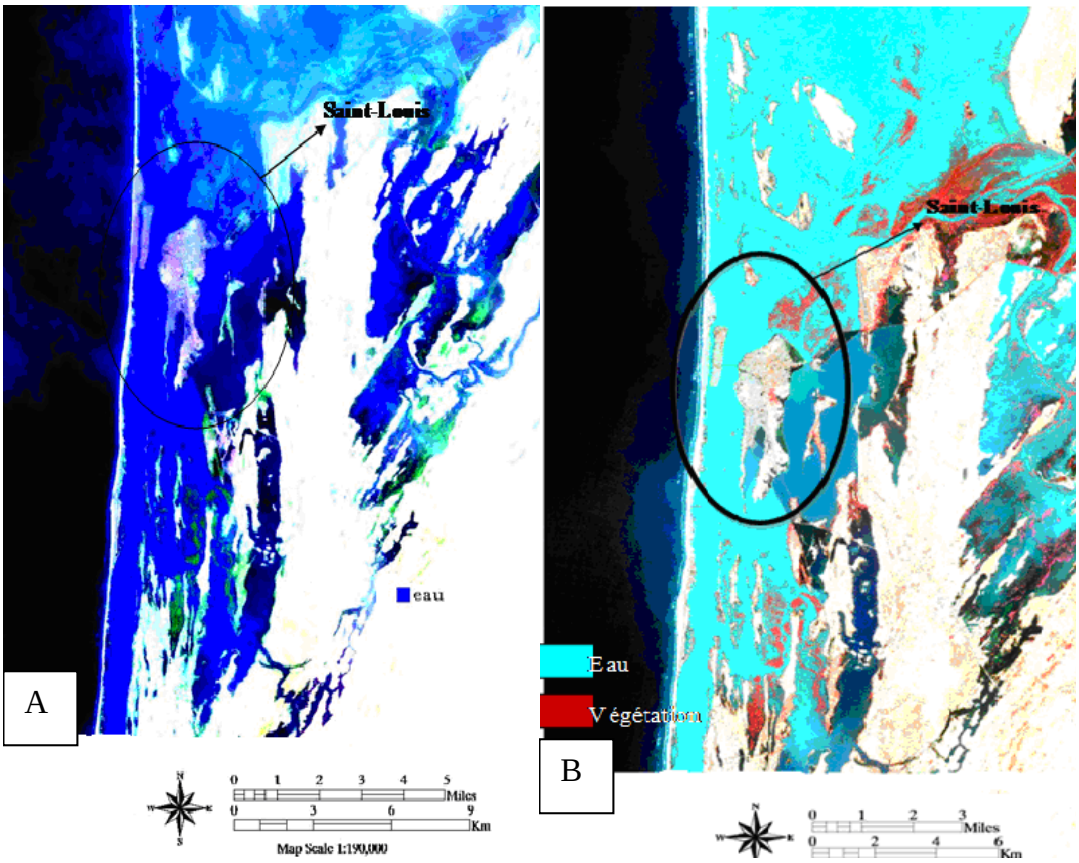


Fig. 3.8 : A : Inondation de la ville de Saint-Louis (Landsat TM 3 octobre 1999) superficie inondée : 12000 ha

B : Image Landsat TM 4 novembre1999, superficie inondée : 11000 ha

Les inondations de 1999 n'ont pas seulement concerné la ville de Saint-Louis ; de nombreux villages et des infrastructures pour l'irrigation ont été détruits dans le delta. Cette année hydrologique a été marquée par un débit de pointe de l'ordre de 4440 m^3/s à la station de Bakel qui contrôle les écoulements dans la vallée du Sénégal. Nous verrons dans le chapitre qui suit la gestion hydraulique du barrage de Diama en fonction des apports de la station de Bakel.

3.1.3. La perception du risque

La non prise en compte du facteur risque naturel ou la faute de mémoire des événements du passé est manifeste au niveau des sociétés et plus particulièrement celles des pays en développement. Sous la coupole de l'ignorance, les actions entreprises avant la construction

dans les zones basses consistent à remblayer avec les ordures ménagères qui contiennent des éléments non biodégradables. Ces pratiques sont néfastes pour l'environnement en favorisant l'imperméabilité des sols par la présence des déchets non biodégradables tels que le verre, le fer et les plastiques et augmentent, du coup, les risques d'inondation. Par manque de moyens, les déchets urbains constituent les seules alternatives que les populations puissent trouver pour occuper l'espace. Il existe une relation directe entre le manque de moyens pour des aménagements adéquats et le degré d'exposition aux dangers (Carreno, 1994). Les comportements de la population montrent qu'elles n'ont pas une connaissance approfondie de la perception de leur environnement.

La diversité des points de vue relatifs à un risque ne dépend pas seulement du niveau de compétence technique et ne se limite pas à une opposition entre l'expert et le profane. Les opinions et les attitudes à l'égard des risques dépendent aussi des valeurs auxquelles nous croyons (Peretti-Watel, 2000). S'il est communément admis, comme le souligne Anctil (2008), que le laisser-faire de certains gestionnaires pousse les plus démunis à s'établir dans les zones à hauts risques naturels, ceci n'est pas valable pour la ville de Saint-Louis dans la mesure où les autorités de l'époque coloniale ont essayé de gagner de l'espace sur le fleuve par des opérations de remblais, au niveau de la Langue de Barbarie pour pallier la forte croissance démographique (Mbaye et Sagna, 2006). De même, la ville est caractérisée par une absence de ségrégation sociale et spatiale. Certaines populations, parmi les plus aisées habitent dans des zones inondables, à l'exemple des quartiers de Pikine et Khor situés respectivement au sud et au nord est du faubourg de Sor qui enregistrent presque chaque année des inondations.

La représentation cognitive de l'aléa reste une donnée non intégrée par la société. La ville est confrontée à des inondations récurrentes depuis le XIXe siècle. Les grandes crues répertoriées par Kane (1997) durant cette période et du XXe siècle sont celles de 1854, 1855, 1858, 1866, 1871, 1890, 1906, 1922, 1924, 1935, 1936, 1950. Il faudra attendre le début du vingtième siècle sous l'impulsion des gouverneurs Valière, Protêt puis Faidherbe, pour doter Saint-Louis de quais modernes (Dia, 1999 cité par Kane, 2002). Mais la hauteur de ces quais est incapable de contenir la crue moyenne. La ville a toujours tenté de résister aux inondations par la mise en place de digues constituées par des sacs de sable qui entourent les quartiers riverains et dont l'efficacité est contestée. Ils sont parfois accompagnés de motopompes qui évacuent les eaux au niveau du fleuve. Néanmoins, ces actions de lutte semblent pour le moins inefficaces vu la durée de stagnation des eaux au niveau des quartiers. C'est dans ce contexte que Nicholls (2004) souligne qu'à cause de l'insuffisance des moyens de protection, les populations exposées sont le plus souvent soumises à des perturbations d'ordre social. Celles-ci sont liées au déplacement des populations dans des zones de recasement, ce qui peut créer des ruptures au niveau des liens sociaux. De même les autorités n'ont pas pris les mesures compensatoires pour remédier à ce phénomène. Il a fallu attendre les crues catastrophiques de 1994 et celles de 1999 pour que l'on sente l'urgence de mettre en place des stratégies de lutte et de protection contre les inondations. Ceci s'est traduit par la mise en place des digues qui ceinturent les

quartiers de Darou, Ndiolofène, Medina Course, Pikine, le relèvement des quais dans certaines parties de l'île et de Sor (fig.3.9) et la création d'une commission de lutte contre les inondations en 1999. Avec le relèvement des quais, la cote d'alerte est ainsi passée de 1,95 m à 1,75 m.

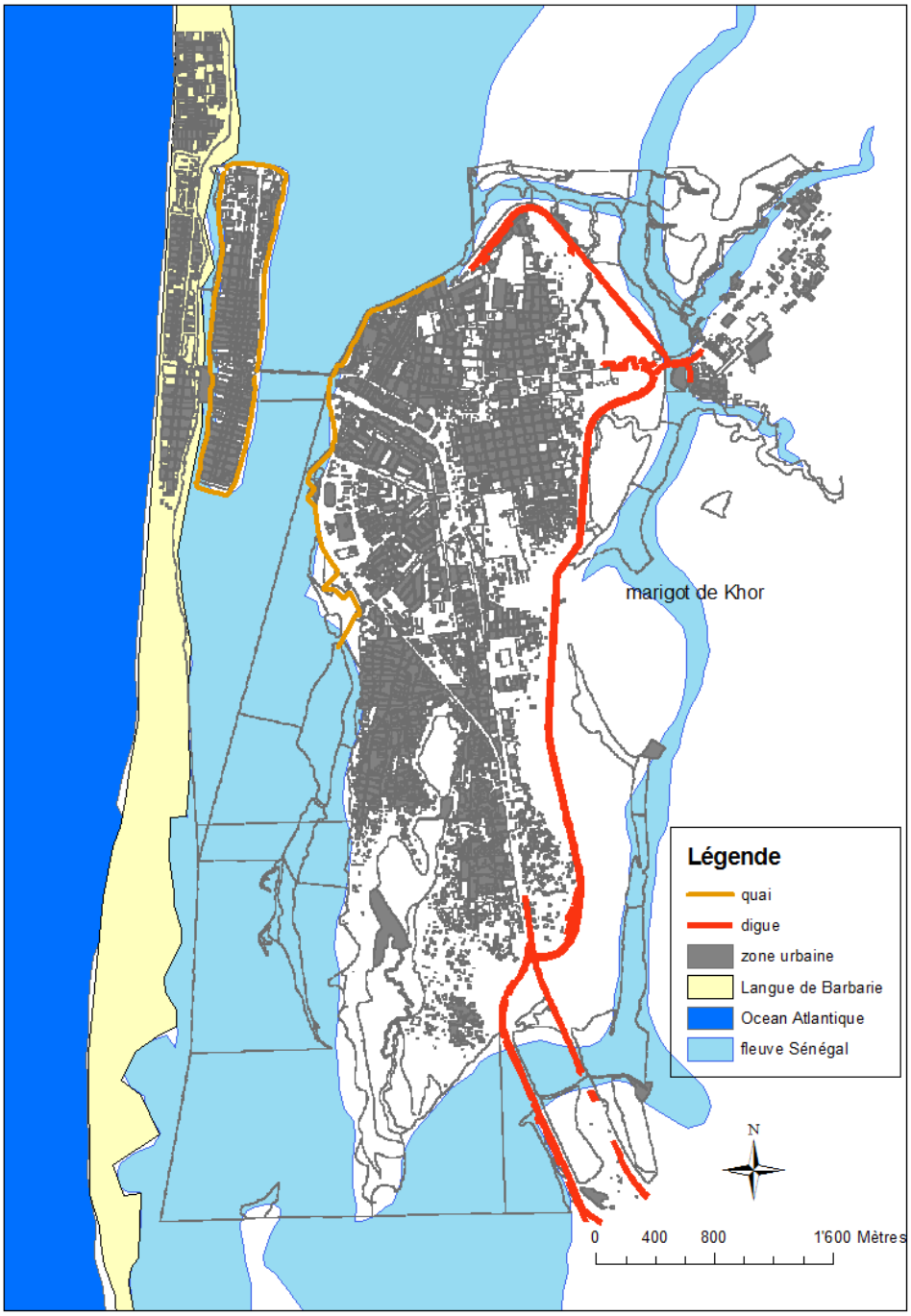


Fig. 3.9 : Les digues et quais de Saint-Louis

La digue a une hauteur moyenne de 1,87 m, elle est composée de latérite dont les abords sont couverts de perrés (photo 3.3). Malgré cet aménagement la zone est sujette à des inondations récurrentes à cause de la remontée de nappe.

Photo 3.3 : Une partie de la digue entourant le marigot de Khor jouxtant le quartier de Médina Course

Les méthodes de gestion des catastrophes mettent en évidence une méconnaissance approfondie de la perception de l'environnement. L'acceptabilité du facteur aléa est liée à sa perception. La non perception de leur propre vulnérabilité par des populations exposées à des risques naturels est elle-même un facteur de vulnérabilité qui va contrarier la mise en place de mesures de préventions (Leone et Vinet, 2006). D'une manière générale, dans les pays en développement, plusieurs facteurs expliquent cette non prise en compte du risque, il s'agit notamment :

- des facteurs culturels, en l'occurrence certaines croyances liées à la tradition (au Sénégal, une certaine croyance fataliste voudrait que tout événement relève de la volonté divine) ;
- de la pauvreté ;
- des facteurs politiques notamment le manque de gestion et de planification.

Les facteurs sociaux, culturels et politiques amplifient les risques et peuvent produire des effets dominos (Slovic, 2000). En effet, cette absence de prévention des risques et de stratégies d'adaptation inefficace conduisent le plus souvent à des actions irréversibles. Malgré les mesures structurelles pour protéger Saint-Louis des eaux, les inondations perdurent dans la cité. Dans cette optique, les autorités sénégalaises ont ouvert une brèche sur la Langue de Barbarie afin de rapprocher l'embouchure du fleuve Sénégal en 2003, à 7 km de la ville, pour évacuer les eaux de crue en mer. Cette ouverture est à l'origine d'une vulnérabilité plus insidieuse du système socio-environnemental. Nous aborderons cet aspect dans la deuxième partie.

Après avoir montré en quoi la ville de Saint-Louis constitue un milieu vulnérable du fait de l'occupation des espaces non aedificandi et de la non prise en compte du facteur risque, nous allons à présent analyser le terroir villageois du Gandiolais du point de vue de ses potentialités et de ses contraintes. En même temps, ce milieu recèle une diversité biologique grâce à l'influence de ces facteurs hydrologiques particuliers et offrent notamment de nombreuses potentialités agricoles et piscicoles que la société humaine du bas estuaire a su mettre en valeur.

3.2. Le terroir villageois du Gandiolais

Milieu de transition entre le domaine des Niayes et l'estuaire du fleuve Sénégal, le Gandiolais est situé à 15 km au sud de la ville de Saint-Louis. Il est limité à l'ouest par l'océan Atlantique, au Sud par le département de Louga et à l'Est par la route nationale 2. La position stratégique du Gandiolais par rapport à la ville de Saint Louis fait d'elle son hinterland immédiat et entretient, de ce fait, avec elle d'importants rapports d'échanges dans les domaines d'approvisionnement en intrants et d'espace de commercialisation de la production, etc. (DLC/PNIR/cabinet EDUR, 2002). La région des Niayes dans le littoral nord du Sénégal, est un écosystème particulier du fait de sa position géographique qui lui confère un climat particulier par rapport au reste du pays. Avec le temps et l'assèchement du climat, à l'instar de tout le Sahel, les conditions de vie sont devenues plus austères. Cela a entraîné l'afflux des populations des provinces voisines en crise (sécheresse, famine, maladies etc.). Elles étaient attirées par les possibilités agro-pastorales et halieutiques qu'offrait le milieu (ENDA, 1999). La région des Niayes est caractérisée par des dunes et des dépressions souvent inondées par l'affleurement de la nappe phréatique (fig. 3.10).

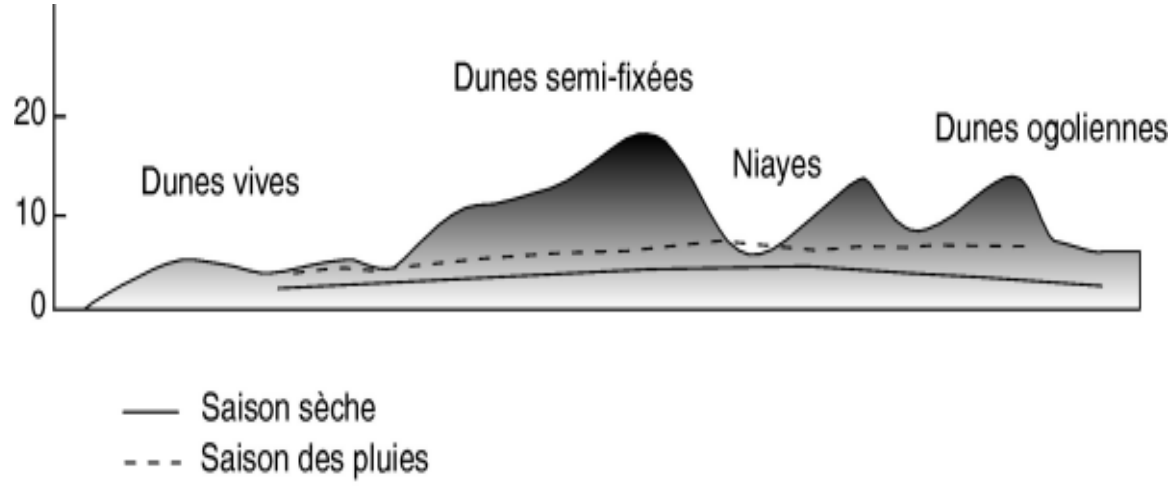


Fig. 3.10 : Niveau de fluctuation de la nappe phréatique suivant les saisons dans les Niayes
Source : www.crdi.sn

Le modelé de la zone des Niayes constitue dans l'ensemble une vaste plaine à dominante sableuse fortement accidentée du fait de la présence de ces systèmes dunaires orientés NE-SW. Ce sont essentiellement les dunes littorales vives, les dunes littorales semi-fixées et les dunes rouges fixées avec une hauteur qui s'amenuise d'Ouest en Est. Cette vaste plaine, qui s'étend sur la presque totalité de la zone des Niayes, appartient au bassin sédimentaire du Secondaire et du Tertiaire. Le Gandiolais est donc marqué par cette trilogie de systèmes dunaires, ogoliens et littoraux auxquels succèdent des dépressions inondées en période pluvieuse. Les attraits physiques du milieu font du Gandiolais une zone favorable pour le développement des certaines activités (maraîchage, pêche, exploitation de sel, …). Du fait de ces nombreuses potentialités, le Gandiolais a connu de grands foyers de peuplements.

3.2.1. La population

Le secteur du Gandiolais qui correspond à la communauté rurale de Gandon est érigé en communauté rurale par la loi n° 2008-14 du 18 mars 2008 dans le cadre de la politique de décentralisation du Sénégal. La communauté rurale de Ndièbène Gandiol en l'occurrence le Gandiolais passe, de ce fait, de 18 villages à 27 villages avec une population totale de 18000 habitants. La figure 3.11 présente la répartition de la popluation ddans le Gandiolais.

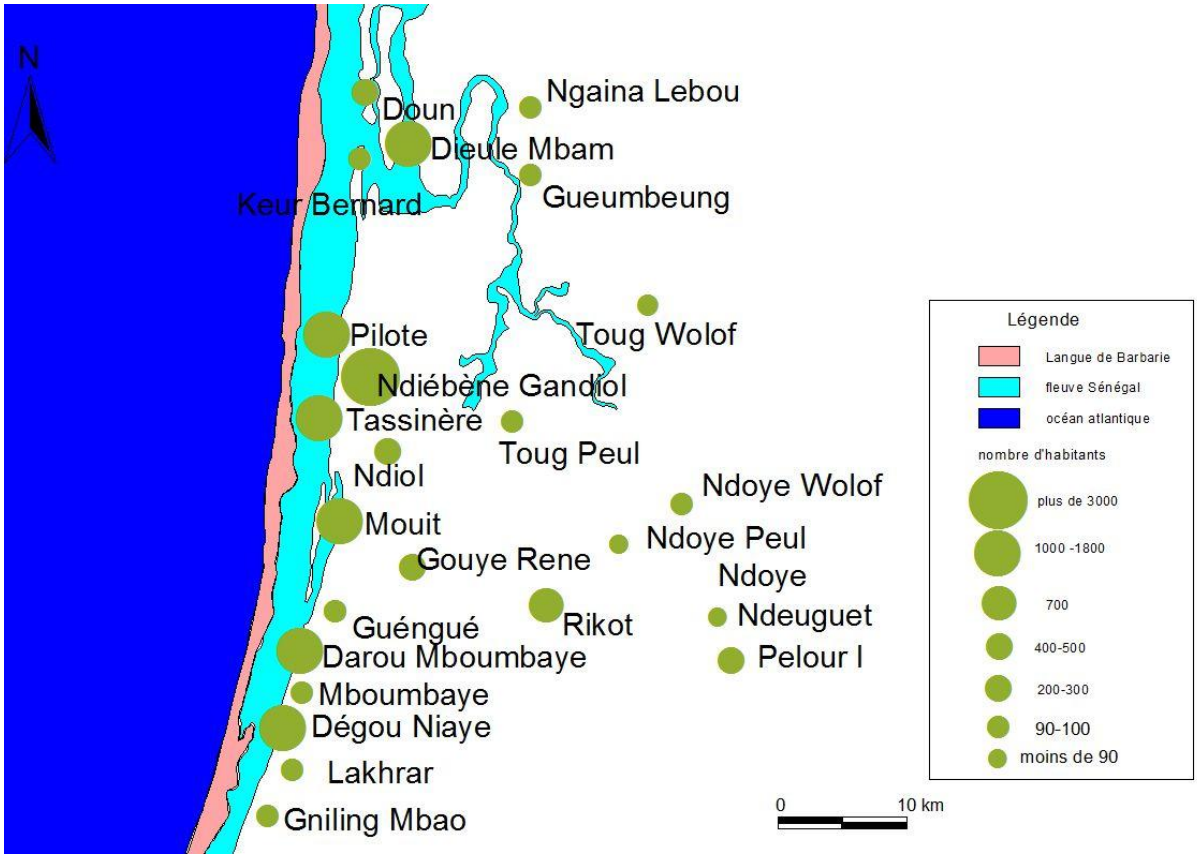


Fig. 3.11 : Répartition de la population du Gandiolais

La population est relativement âgée dans l'ensemble, les jeunes actifs partent le plus souvent travailler dans d'autres régions plus porteuses d'emplois, concernant notamment les activités halieutiques à Kayar, en Casamance ou dans la sous région. La population jeune restante s'organise en GIE (Groupement d'Intérêt Economique), notamment pour les besoins des réserves naturelles (écoguides, écogardes, création de pépinières de reboisement, nettoyage des sites, etc.) qui permettent des emplois directs et indirects, et aussi une approche participative (Jacoutot, 2006).

3.2.1. L'environnement biophysique et socio-économique

Lieux de contact dynamique dans lesquels abondent des éléments nutritifs, les estuaires sont des espaces très favorables à la vie végétale et animale. De nombreuses espèces d'oiseaux et surtout de poissons s'y reproduisent (Paskoff, 1998). Grâce à la richesse de cet écosystème et à la permanence des plans d'eau, les réserves et parcs se sont développés au niveau du bas estuaire. Toutefois, l'influence des eaux marines constitue des contraintes pour le développement de l'horticulture. Ainsi, après avoir fait un état des lieux des

opportunités qu'offre le site de l'estuaire du fleuve Sénégal, nous allons analyser les contraintes pour le développement du maraîchage.

3.2.1.1. Les aires protégées

Le Gandiolais dispose d'une richesse végétale et faunique avec la présence d'aires protégées telles le Parc National de la Langue de Barbarie (PNLB) et la Réserve Spéciale de Faune de Gueumbeul (RSFG). Cette dernière, créée en 1983, a été classée par la convention Ramsar (convention internationale qui protège les écosystèmes de zones humides et signée par 150 pays) en 1986.

3.2.1.1.1. Le Parc national de la Langue de Barbarie

Créé en 1976, le PNLB est le principal site de nidification des oiseaux d'eau. Il est essentiellement constitué d'une étroite bande de sable, variant en fonction des déplacements de l'embouchure, de deux plans d'eau le Lawmar et le Ndoutti alimentés par le fleuve, et de l'îlot aux oiseaux (fig.3.12). Le parc qui joue un grand rôle dans la protection de milliers oiseaux nicheurs, constitue le lieu de fraie de poissons et des crevettes et également un lieu privilégié pour la ponte de nombreuses tortues marines notamment la tortue verte (*Chelonias mydas)*, la tortue caouanne (*Caretta caretta*) et la tortue luth (*Dermochelys coriacea*).

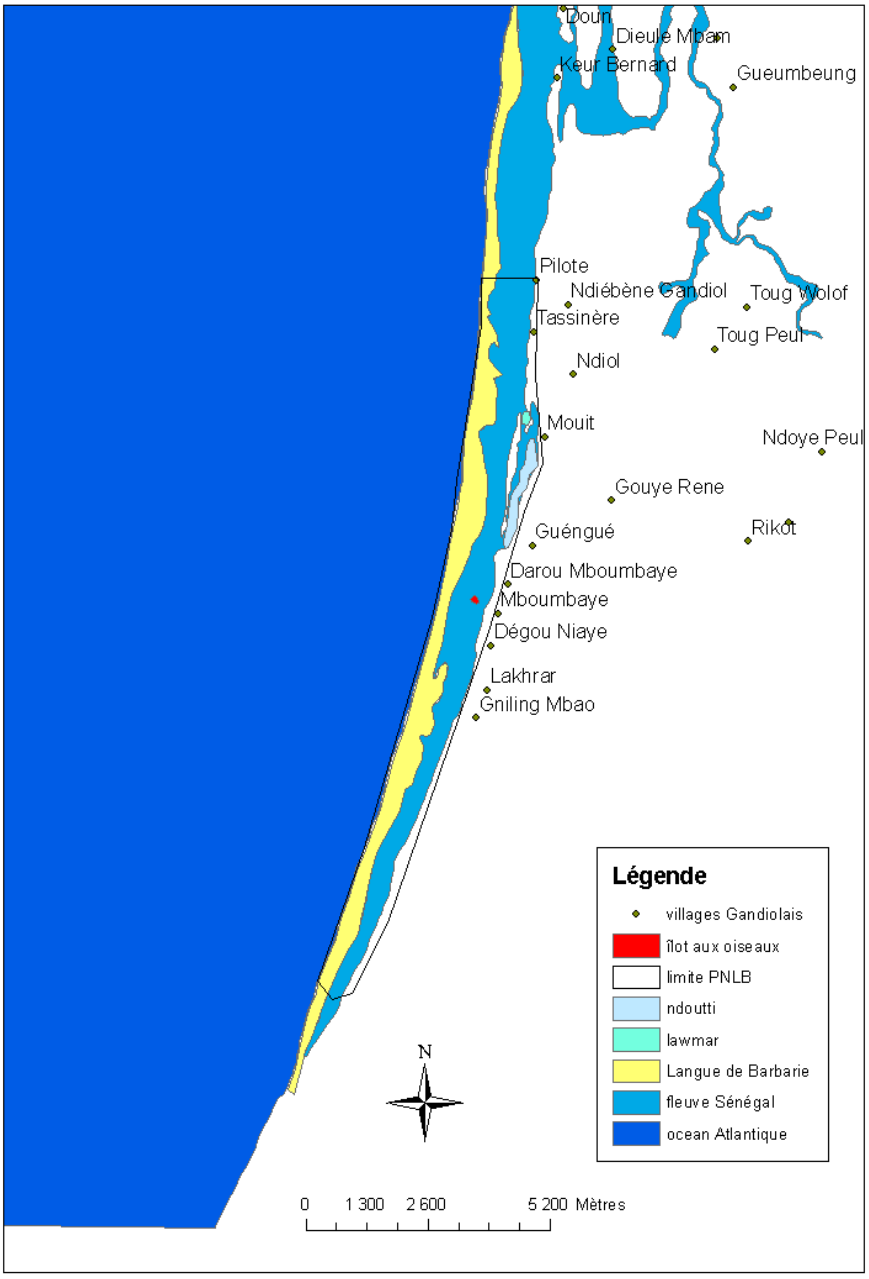


Fig. 3.12 : le Parc National de la Langue de Barbarie

Le PNLB couvre une superficie de 2000 ha mais avec la dynamique de la Langue de Barbarie avec son allongement progressif vers le sud et les fréquentes ruptures du cordon justifient des limites imprécises. En effet, dans le décret de création du parc, il est spécifié que l'embouchure du fleuve Sénégal est incluse dans le parc. De même, l'îlot aux oiseaux est la conséquence de la forte dynamique de l'estuaire du fleuve et du déplacement continuel de l'embouchure. C'est en effet à la suite de la création d'un nouveau point de communication entre le fleuve et la mer que se serait formé l'îlot. Cette partie de terre émergée a représenté jusqu'à plus de 2 ha de superficie. Portion isolée de cordon dunaire, il se compose essentiellement d'un sol sableux de couleur blanche, de nature semblable à

celle de la Langue de Barbarie (Kandji, 2003). Le milieu a beaucoup évolué ces dernières décennies du fait des actions anthropiques.

3.2.1.1.2. La Réserve Spéciale de Faune de Gueumbeul (RSFG)

La RSFG créée par décret n° 83550 du 30 mai 1983 est située à environ sept kilomètres au sud de la ville de Saint-Louis et couvre une surface de 720 hectares. Elle est constituée d'une cuvette de huit kilomètres de long sur une largeur de huit cent (800) mètres, soit les 2/3 de la RSFB (fig.3.13). Les objectifs qui ont motivé la création de la réserve sont de :

- maintenir le fonctionnement de la cuvette de Gueumbeul pour son importance ornithologique ;
- reconstituer la végétation sahélienne par la mise en défens ;
- restaurer la faune sahélienne menacée de disparition.

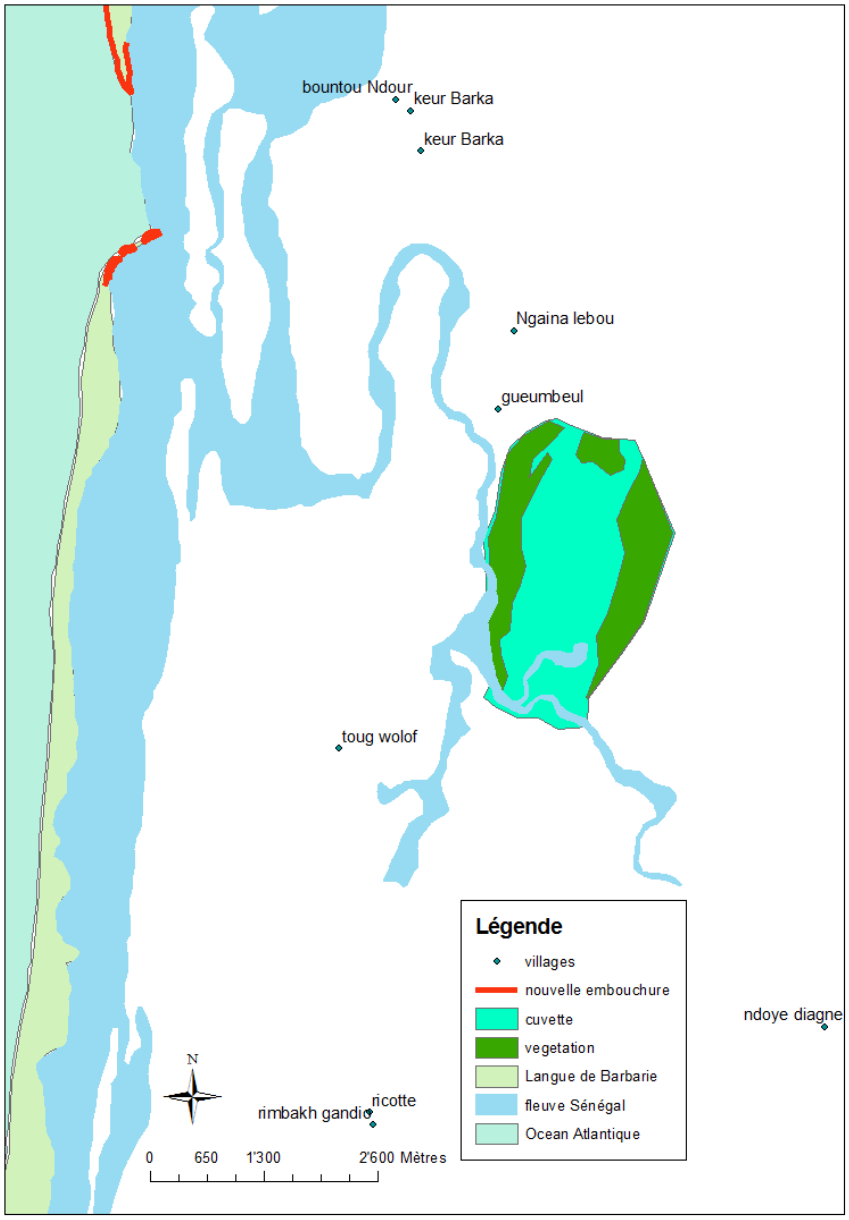


Fig. 3.13 : La Réserve Spéciale de Faune de Gueumbeul

Elle présente une biodiversité importante avec une flore sahélienne et une faune très diversifiée. Sa population est composée de gazelles (*gazelle dama mhorr*), d'oryx (oryx algazelle), de tortues terrestres (tortue sulcata) auxquelles s'ajoutent d'autres espèces de mammifères et d'oiseaux. La cuvette de Gueumbeul est un lieu où de nombreux oiseaux ont pris refuge parmi lesquels des migrateurs venus d'autres horizons. La RSFG est une vaste plaine essentiellement constituée de systèmes dunaires fixés par la végétation, des dunes rouges et des dunes jaunes. L'importance de cette diversité biologique fait de cette réserve une niche écologique et économique avérée. Elle est classée comme site Ramsar d'importance internationale depuis le 29 décembre 1986 et comme noyau central de la réserve de biosphère transfrontalière du delta du fleuve Sénégal en 2005.

Toutes ces potentialités conjuguées font du Gandiolais un véritable pôle d'attraction de toutes les populations en quête de meilleures conditions d'existence. Ces importantes réserves naturelles constituent également des sites touristiques et culturels susceptibles de servir de leviers de promotion touristique, tourisme culturel et écologique.

3.2.1.2. Les caractéristiques socio-économiques

L'estuaire du fleuve Sénégal dispose de nombreuses potentialités aussi bien agronomiques que piscicoles. Sa position géographique lui confère un environnement propice pour le développement du maraîchage, de la pêche, de l'exploitation du sel, etc. Toutefois l'écosystème du Gandiolais soumis à une influence directe des eaux marines peut présenter de réelles contraintes pour le développement des activités agricoles. Malgré cet aspect, les populations ont su mettre en valeur les terres.

3.2.1.2.1. Le maraîchage et le problème de sel

Le maraîchage est l'activité dominante du Gandiolais et est pratiqué par plus de 50% de la population. La présence de plusieurs cuvettes et l'alimentation des Niayes par la nappe phréatique affleurante ont favorisé le développement de cette activité. Les dépressions fonctionnent comme des bas fonds et assurent la transition entre le système de dunes blanches et les dunes jaunes semi fixées. De même qu'au niveau des cordons dunaires, les lentilles d'eau douce surmontent la nappe salée (Mietton et al 2007). Les sols sont riches en humus et sont très fertiles D'après des maraîchers, avant les aménagements, la nappe phréatique était affleurante à subaffleurante et les céanes (puits d'une profondeur d'environ 1 à 2 m), qui se trouvent dans la zone, témoignaient de la présence d'une eau douce. Cette eau était d'ailleurs utilisée comme boisson mais également pour les besoins domestiques et agricoles.

Le maraîchage se pratiquait durant les deux saisons (pluvieuse et non pluvieuse) avec des variétés de culture différentes (tableau 3.1).

Tableau : 3.1. Les variétés de culture

Cultures en saison non pluvieuse	Cultures en saison pluvieuse
choux	arachide
tomate	cornille
oignons	oseille de guinée
patate	maïs
piment	melon
carotte	manioc
gombo	pastèque
	mil

En saison pluvieuse les maraîchers arrivaient non seulement à cultiver différentes variétés mais également la nappe était suffisamment rechargée par les crues du fleuve, ce qui leur permettait de continuer leur activité en saison non pluvieuse. La culture de l'oignon qui est dominante est effectuée durant cette saison. Deux variétés sont pratiquées avec deux récoltes possibles. D'octobre à décembre, c'est la variété « violette de galmi » qui est pratiquée et de janvier à février, le « ngagne mbay ». D'autres maraîchers faisaient jusqu'à 3 campagnes de cultures, soit les deux précédemment citées et une troisième campagne consacrée à la variété «rouge espagnol» qui est mieux adaptée en saison pluvieuse. Aujourd'hui la diversification et l'étalement des cultures autres que l'oignon sont rendus pratiquement impraticables à cause de la salinisation des terres.

L'irrigation pour le maraîchage dans le Gandiolais utilise comme ressource en eau la nappe des sables du Quaternaire et du Continental terminal. La technique d'exhaure est rudimentaire, elle se fait de façon manuelle à l'aide de seaux à partir des puits.

Par ailleurs, l'histoire géologique de la région met en évidence l'incorporation du sel au niveau des nappes souterraines au cours de la transgression du Nouakchottien. L'eau de mer retenue dans les dépôts marins anciens ou récents n'a pu être évacuée et remplacée par de l'eau douce en raison de l'absence de relief d'une part, et de la péjoration climatique, d'autre part.

Nous avons appliqué la même méthode que nous avons utilisée pour la représentation des surfaces inondées pour mettre en évidence l'importance de la salinité dans le bas estuaire (fig.3.14). Nous avons utilisé les bandes du domaine du visible, les canaux 1, 2, 3 de l'image Landsat 7 ETM du 21 juin 2002. Sur ces bandes, les zones salées réfléchissent fortement le rayonnement appartenant au domaine du visible.

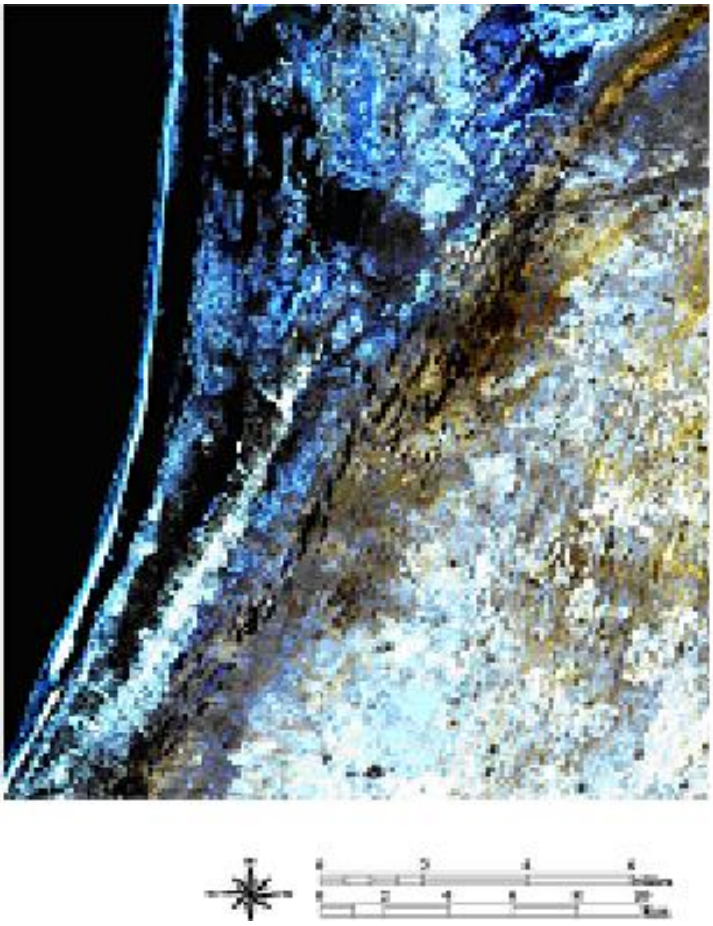


Fig. 3.14 : Zones salées dans le Gandiolais (la couleur blanche représente les zones salées, image Landsat du 21/06/2002)

La figure 3.14 montre cette forte présence du sel dans le milieu. Malgré ces contraintes, les populations ont su mettre en valeur les terres et le maraîchage se pratiquait de façon intensive ce qui permettait deux campagnes par an, au cours desquelles pratiquement toutes les cultures peuvent être conduites. Le Gandiolais assurait, de fait, jusqu'en 1990 plus de 60 % de la production nationale (Pagès, 1995). De même, durant la période coloniale, la production maraîchère était abondante et diversifiée. Les produits étaient écoulés vers les marchés de la capitale avec une clientèle spécialement européenne (Bonnardel, 1992). Les débordements fluviaux constituent un aléa majeur pour les habitants de la ville de Saint-Louis mais sont appréciés de façon positive dans le Gandiolais du fait notamment qu'ls permettent une recharge suffisante des nappes et un lessivage des sols. De plus, les limons transportés par la crue sont un facteur enrichissant des sols. C'est dans ce contexte que Dauphiné (2005) souligne qu'il existe des écarts entre le risque potentiel et le risque perçu dus à la culture des populations mais également de leurs interêts. Du fait de la recrudescence des inondations, les populations de la ville de Saint-Louis en sont arrivées à redouter les crues du fleuve et les précipitations. Quant aux populations du Gandiolais, elles ont pu non seulement s'adapter aux contraintes naturelles mais ont pu transformer un aléa

en ressource. Les sols salés qui sont inaptes à l'agriculture constituent des zones d'extraction du sel.

3.2.1.2.2. L'exploitation du sel

Les anciennes lagunes du Nouackchottien fonctionnent comme des marais salants (photo 3.4) et cela est favorisé par une évaporation qui provoque une cristallisation et une concentration du sel, qui se présente sous forme d'une fine pellicule. D'après Tricart (1961), c'est à partir de janvier-février que le phénomène se produit ; les cuvettes sont barrées par des seuils à l'aval et ne peuvent se vidanger complètement lors de la décrue. Une partie des eaux très salées qui ont commencé à s'y rassembler lors des premières pluies d'hivernage y est restée prisonnière. L'évaporation en concentre rapidement le sel, donnant à ces cuvettes la dynamique propre des sebkhas. Lorsque la crue de l'année précédente a été particulièrement forte, l'évaporation se produit plus lentement et l'assèchement des sebkhas est plus tardif.

L'aléa salinité constitue une contrainte que les hommes ont cherché à dépasser par une mise en valeur du sel. Ce qui constitue une forme d'adaptation qui a transformé le risque en ressource (Veyret et al. 2004).

Photo 3.4 : Marais salants à Tassinère (Gandiolais)

Le sel a toujours été présent dans l'histoire des civilisations africaines où il y assure des fonctions sociales, alimentaires et économiques importantes. En Afrique, le sel fut pendant longtemps l'objet d'un commerce intense entre les régions productrices et celles qui en étaient dépourvues. Durant la période coloniale, les traitants maliens échangeaient le sel

contre le mil et du bois de chauffe. Dans la zone du Gandiolais, la récolte de sel remonte aussi très loin dans l'histoire. Le trafic, par voies routières et fluviales, permettait le troc entre le sel du Gandiol et les produits agricoles du Walo et du Fouta (sorgho, riz). Le développement du commerce du sel suscita l'intérêt de l'administration coloniale qui instaura un impôt spécifique à l'exploitation du sel. Dans le souci de contrôler les ressources naturelles du terroir, les anciens dignitaires de la zone payaient annuellement cet impôt pour acquérir un droit de propriété sur les sites d'exploitation (ANCAR, 2005). Ceci est toujours en vigueur et les populations s'organisent à l'aide de ces cotisations pour payer les taxes. L'exploitation du sel dans le Gandiolais concerne les villages de Ndiébène Gandiol, Gueumbeul, Tassinère, Mouit. Elle intéresse principalement une couche sociale généralement défavorisée, à savoir les femmes. Elle mobilise également les jeunes et les anciens. Son développement contribuera par conséquent à réduire la pauvreté dans ce milieu à travers la création d'emplois et de richesses réparties entre les couches sociales de la communauté.

Par ailleurs, le diagnostic établi sur la situation écologique dans la zone prouve le niveau de dégradation très avancé de l'environnement au point de compromettre toute initiative de relance dans ce domaine. Sur le plan de l'environnement, aucune action n'est menée sur le bassin versant pour stabiliser le sol et limiter l'ensablement du lit de la vallée. Sur le plan économique, l'impact de l'exploitation du sel sur les revenus des populations est réel mais les niveaux de performance sont encore largement en deçà des possibilités de la zone (ADVT, 2007).

3.2.1.2.3. La pêche

Les côtes sénégalaises sont réputées très riches en ressources halieutiques en raison des facteurs hydrodynamiques, climatiques et géomorphologiques (upwelling et pilling up côtiers, des températures et une insolation adéquates, des apports terrigènes par les cours d'eau, etc.). Avec un potentiel annuel de l'ordre de 550 000 tonnes, le Sénégal, caractérisé par l'existence de conditions naturelles exceptionnelles et de communautés résolument tournées vers la pêche, apparaît comme un des tous premiers pays de pêche de l'Afrique intertropicale (GIRMAC, 2004).

L'estuaire occupe ainsi une place stratégique dans le processus de développement économique du Sénégal avec le centre de pêche de Saint-Louis qui occupe actuellement la troisième place après celui de Mbour et de Joal.

Le secteur emploie 16000 pêcheurs avec un parc d'embarcation de 3000 pirogues motorisées dont 150 pour le Gandiolais (soit environ 450 pêcheurs). Deux types de pêche se pratiquent au niveau de l'estuaire, la pêche maritime et la pêche continentale. La première est essentiellement pratiquée par les populations de la Langue de Barbarie et la seconde par

les populations du Gandiolais. Les débarquements annuels se chiffrent à plus de 35000 tonnes de poissons en moyenne. La pêche continentale pratiquée par les populations du Gandiolais représente 2% des débarquements hors sardinelles (DLC/PNIR/cabinet EDUR, 2002). Nous verrons dans le chapitre 8 que la modification de la dynamique hydrologique consécutive aux aménagements a eu des effets considérables sur la biodiversité de l'estuaire.

Conclusion

L'analyse du contexte urbain de Saint-Louis et périurbain du Gandiolais a permis de mettre en exergue d'une part, les vulnérabilités socio-environnementales et, d'autre part, les potentialités du site. Cette approche a aussi permis d'avoir une meilleure perception de la dynamique spatio-temporelle de l'espace. L'estuaire du fleuve Sénégal reste un milieu naturellement fragile à cause notamment de sa configuration et de ses héritages géomorphologiques. La pression de l'homme sur le milieu ne fait qu'accentuer cette vulnérabilité. Nous assistons à une sorte de vulnérabilité réciproquement entretenue entre l'homme et le milieu. Dans un tel contexte, la société affiche une indéniable vulnérabilité qui est le produit de processus à la fois endogènes et exogènes. En même temps, depuis ces dernières années, le milieu évolue sous une pression croissante de l'homme qui cherche toujours à dominer la nature. Ces différentes modifications ont eu des impacts sur le fonctionnement de l'estuaire. Nous analysons dans la deuxième partie la gestion des aléas hydro-climatiques et le fonctionnement d'un estuaire fortement anthropisé.

PARTIE 2 : GESTION DES ALEAS HYDRO-CLIMATIQUES ET FONCTIONNEMENT D'UN ESTUAIRE FORTEMENT ANTHROPISE

Le fleuve Sénégal connaît une longue tradition d'aménagement qui s'est accentuée ces dernières années en raison d'une variabilité hydro-climatique importante. Cette dernière se traduit par un déficit hydrique persistant qui a été enregistré au cours des années 70 mais également un retour à des hivernages pluvieux qui semble s'amorcer ces dernières années.

La sécheresse a considérablement réduit les écoulements fluviaux et a rendu le système socio-environnemental plus vulnérable aux nouvelles conditions hydro-climatiques. L'impact de cet aléa climatique a concerné les régions sahéliennes qui ont enregistré des dégâts importants. L'importance de l'endommagement est en rapport avec la forte sensibilité du système socio-environnemental qui n'a pu s'adapter très tôt à cet événement climatique. Aussi des stratégies d'adaptation ont été développées en vue de réduire cette vulnérabilité. Ceci s'est matérialisé par les aménagements de grande envergure à savoir le barrage de Diama sur le cours inférieur du fleuve Sénégal et le barrage de Manantali sur un de ces affluents, le Bafing. De nombreux auteurs à l'exemple de Rochette (1964) et Bethemont (2002) soulignent que le fleuve Sénégal présente un contexte idéal pour tout aménageur. Barrer le fleuve au niveau de son cours inférieur et à partir d'un de ses affluents « a été conçu comme la seule parade possible face à la conjoncture économique et climatique qui déstructure l'espace de la vallée depuis plusieurs décennies » (Diakhaté, 1986). Ainsi, comme le note Cecchi (1992), la gestion de l'hydrologie du fleuve a rendu le système socio-environnemental moins dépendant des interfaces atmosphériques et océaniques.

Toutefois, l'amélioration des conditions de vie des populations associées à une forte adaptation à la sécheresse du fait de sa durée et de son intensité représente un risque majeur pour le système en cas d'un retour à des hivernages pluvieux. Depuis ces dernières années, le Sahel connaît des années humides qui se traduisent par une fréquence des inondations. L'ampleur qu'allait connaître le phénomène en 2003 a également incité les autorités sénégalaises à délocaliser l'embouchure à 25 km en amont de la ville de Saint-Louis.

In fine, ces aménagements s'inscrivent dans une logique de dépassement des événements extrêmes d'origine climatique. L'objectif majeur est de rendre les populations du bassin du fleuve Sénégal moins vulnérables aux aléas hydro-climatiques. Ils ont par ailleurs permis, d'une part, de satisfaire des besoins agricoles et hydro-électriques et, d'autre part, de résoudre les débordements fluviaux dans l'estuaire. Aussi, les nombreux travaux d'aménagement dont a fait l'objet le fleuve Sénégal participent inexorablement à son évolution et plus particulièrement dans sa partie estuarienne. Cette dernière est commandée d'une part, par la manipulation des vannes du barrage de Diama et d'autre part, par les facteurs hydrodynamiques au niveau de la nouvelle embouchure. D'une manière générale, le fonctionnement de l'estuaire est fortement influencé par le contexte climatique de type sahélien qui subit des modifications, conséquence d'une variabilité climatique liée à la dynamique de la mousson.

L’objet de cette deuxième partie est d’analyser le fonctionnement d’un estuaire suite à l’artificialisation du fleuve. Nous allons consacrer le premier chapitre à la gestion hydraulique du barrage de Diama et ses impacts sur l’hydrologie de l’estuaire. Le deuxième chapitre aborde l’ouverture de la nouvelle embouchure sur la Langue de Barbarie. Le troisième chapitre est consacré à la prédominance des influences marines suite à cette ouverture.

Chapitre 4 : La gestion hydraulique du barrage de Diama et ses impacts sur l'hydrologie de l'estuaire

Situé à 26 km, au nord de la ville de Saint-Louis, le barrage de Diama (photo 4.1) est conçu pour arrêter la remontée de la langue salée et grâce aux endiguements réalisés le long des deux rives, l'ouvrage crée un important réservoir d'eau douce de 250 millions de m^3 en période pluvieuse et un volume de 530 millions de m^3 en période non pluvieuse. Il constitue, de ce fait, après le lac de Guiers (680 millions de m^3) la plus grande réserve d'eau douce de la vallée du fleuve Sénégal (Faye, 1996). Il permet :

- l'irrigation de 120 000 ha dans sa zone d'influence, en combinaison avec la retenue de Manantali ;
- la satisfaction des besoins en eau de centres ruraux et urbains ;
- de protéger les prises d'eau d'irrigation et d'alimentation en eau existantes ou à réaliser à l'amont du barrage ;
- d'améliorer les conditions d'alimentation en eau des marigots et des dépressions liées au fleuve Sénégal, notamment le lac de Guiers, le lac Rkiz, la dépression de l'Aftout-Es-Sahel, le parc du Djoudj, le parc du Diawling, les défluents, en rive droite et en rive gauche, dans le delta et la basse vallée et de réduire les hauteurs de pompage dans la zone d'influence de la retenue du barrage (OMVS, 2003).

Photo 4.1 : Le barrage de Diama

La mise en eau du barrage de Diama a considérablement modifié le régime hydrologique du fleuve Sénégal, en aval de l'ouvrage. Les eaux douces sont stockées dans la retenue de Diama. Elles n'arrivent à Saint-Louis qu'à la faveur des lâchers qui sont plus fréquents

durant la saison pluvieuse. Par ailleurs, le principe de fonctionnement de cet ouvrage mobile est de se fermer en période d'étiage pour empêcher la remontée d'eau salée et de s'ouvrir en période de crue pour la laisser passer (OMVS, 2003). Le rôle du barrage de Diama dans la maîtrise des eaux du fleuve Sénégal est renforcé par le barrage de Manantali (fig.4.1).

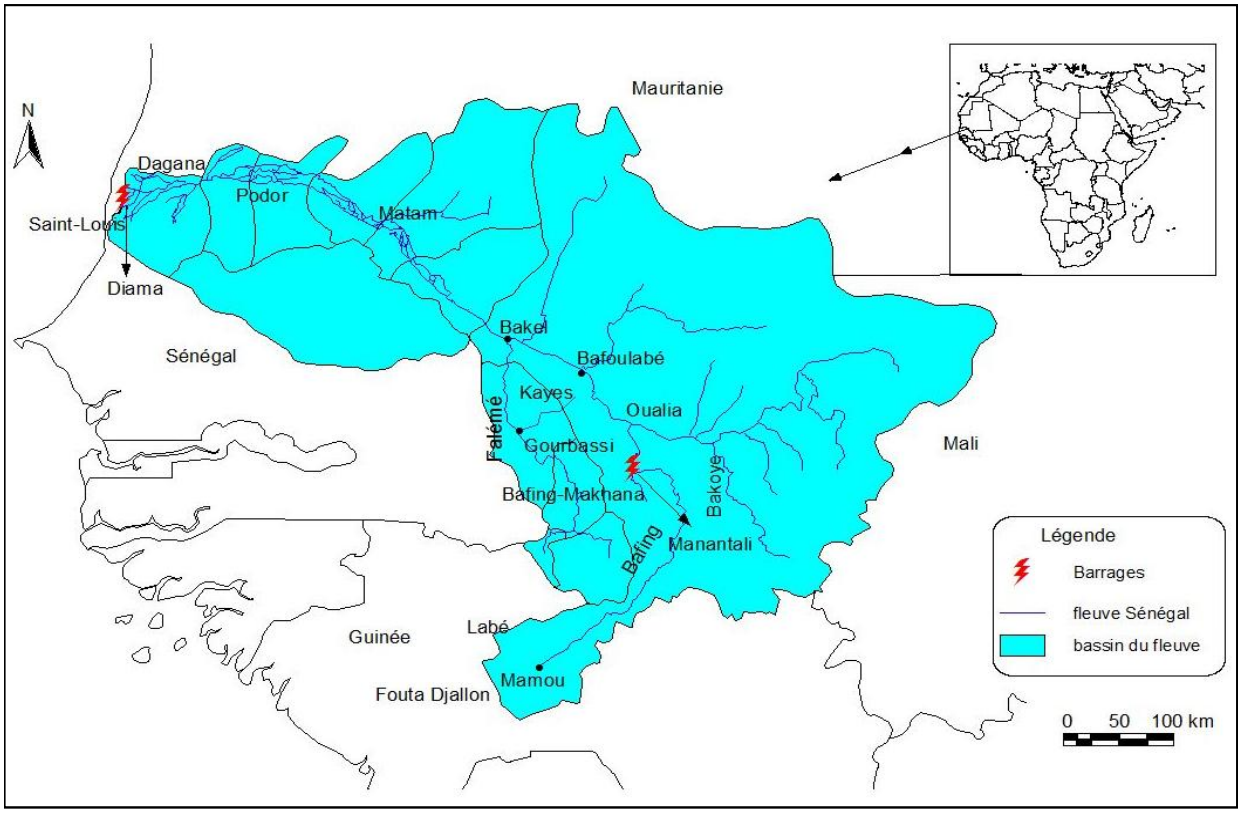


Fig. 4.1. Localisation des barrages sur le fleuve Sénégal

Il faut dire également que la réalisation du barrage de Diama a contribué à annuler tous les ouvrages de régulation installés à l'amont, dont l'objectif majeur était d'empêcher la remontée des eaux marines, à des fins agricoles.

4.1. Procédures et méthodes de gestion du barrage de Diama

En fonction des apports du haut bassin du fleuve Sénégal dont le delta est totalement sous sa dépendance puisque 100% des débits proviennent de cette zone (Diop, 2004), les vannes du barrage de Diama sont ouvertes pour évacuer le surplus fluvial vers l'estuaire. Lors de la fermeture des vannes, les eaux marines prédominent en aval. Les eaux en amont du barrage restent douces toute l'année puisque l'ouvrage a pour principal objectif d'empêcher

l'eau de mer de pénétrer dans la vallée. Le barrage de Diama bloque, de ce fait, la courbe de remous des eaux marines qui ne se font sentir que dans le bief aval de l'ouvrage.

4.1.1. Sources des données hydrométriques et pluviométriques

Les données relatives au débit proviennent de la banque de données de la Société de Gestion et d'Exploitation de Diama (SOGED) pour toute la période allant de 1986 à 2008. Les écoulements sont déterminés par les formules statistiques utilisées par les gestionnaires du barrage. Grâce à ces formules, les débits sont déterminés en fonction de l'ouverture de la vanne et de la charge amont. Contrairement à la période d'avant barrage où les débits étaient estimés dans le bief à partir des écoulements de la station de Dagana, les quantités d'eau entrant vers l'embouchure sont désormais connues par les calculs effectués grâce aux abaques du barrage (Kane, 2005). Les données de base sont de type journalier. Les observations recueillies portent sur 22 années. Les hauteurs d'eau des différentes stations proviennent de la banque de données Hydraccees, un logiciel de traitement de données hydrologiques conçu et développé par Philippe Vauchel, ingénieur de recherche à l'IRD. Les données climatiques relatives à la pluviométrie sont recueillies auprès de l'Agence Nationale de la Météorologie du Sénégal (ANAMS). Ces données sont nécessaires dans la caractérisation des conditions hydrologiques de la zone.

4.1.2. Le réseau hydrométrique[5]

Le régime du fleuve Sénégal dans sa partie estuarienne est contrôlé par trois stations hydrométriques (fig.4.2). Ces dernières sont équipées d'échelles limnimétriques qui sont calées en fonction du zéro de l'échelle. L'échelle limnimétrique de la station de Diama aval est calée à -0,10 m. La station de Saint-Louis a connu plusieurs modifications en fonction de la position de l'échelle. Le zéro correspondait au niveau des marées les plus basses à St-Louis. Il est actuellement calé à -0,53 m. L'échelle de la station de Gandiol est situé à environ 6 km de la nouvelle embouchure, elle est calée à -0,48 m IGN. Mais l'appareil n'est plus fonctionnel depuis 2003.

[5] ne concerne que les hauteurs d'eau

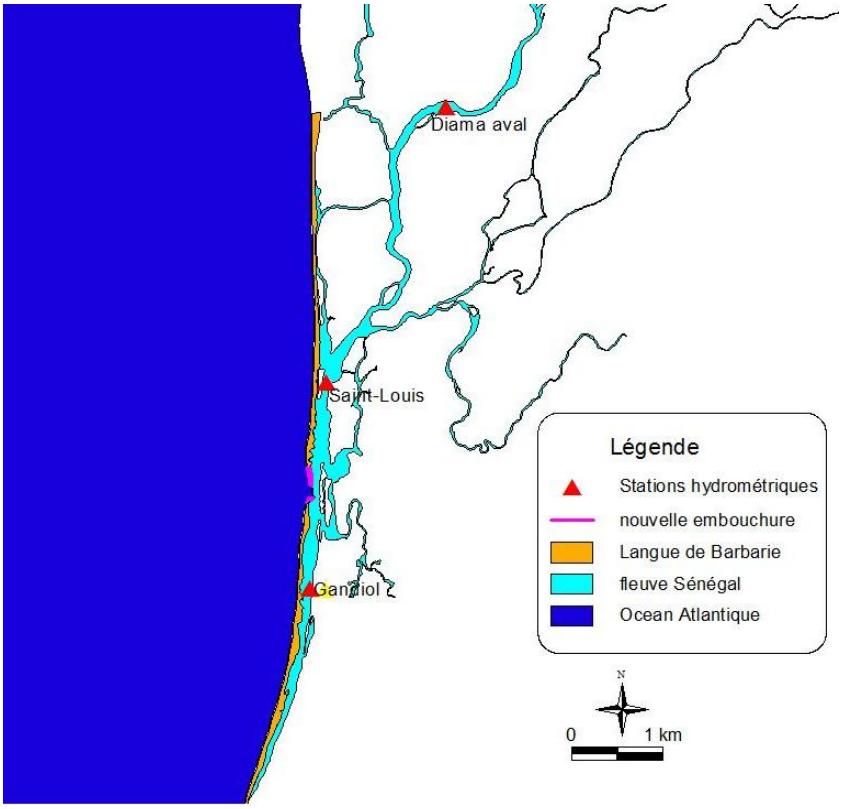


Fig.4.2 : Les stations hydrométriques de l'estuaire

4.1.3. Les manœuvres des vannes du barrage de Diama

Grâce à un système de vannes, le barrage de Diama conditionne l'écoulement des eaux du fleuve vers la mer. En fonction de la situation hydrologique et des besoins de gestion de l'ouvrage, les vannes sont manipulées à différents niveaux, pour évacuer les eaux en excès vers l'estuaire. Cependant les ouvertures dissymétriques des vannes sont proscrites car elles sont préjudiciables à la sécurité de l'ouvrage. D'après l'étude de Coyne et Bellier (1987) l'ouverture inégale des vannes entraîne des concentrations de débit et par conséquent d'énergie. Cette situation peut être à l'origine des désorganisations dans les protections en enrochements et l'apparition de courant de retour qui ramènent des matériaux sur le radier des passes fermées et qui, tournant sur le béton, entraînent des érosions importantes. Par ailleurs, les débits sortant de ces vannes sont calculés à partir des équations mathématiques qui sont relatives chacune à un régime d'écoulement. Les gestionnaires du barrage doivent les utiliser afin d'atteindre les objectifs de gestion, en l'occurrence le maintien du plan d'eau amont le plus longtemps possible durant la période de décrue. Ce maintien doit se faire en respectant une importante règle imposée par le constructeur du barrage qui limite la dissipation d'énergie à 1000 m^3/s sous 1 m de chute soit :

$Q * H \leq 1000\ m^4/s$ où Q représente le débit et H la chute (Coyne et Bellier, 1987)

Les formules statistiques établies par IRD-OMVS (2001) sont les suivantes :

Dans le cas où les vannes sont noyées, le régime est établi ou transitoire, la formule utilisée est :

$Q1= 1,0566*E*N*L*(2*g*(Hm-Hv))^{0,3761}$

Dans le cas où les vannes sont effacées, elles sont hors d'eau, le régime est établi, la différence de niveau entre amont et l'aval est inférieure à 20 cm, la formule utilisée est la suivante :

$Q2= 9,494*N*L*(Hm-0,01)^{0,8293}$

Si les vannes sont effacées, le régime est transitoire, la différence de niveau entre amont et aval est supérieure à 20 cm, le débit est calculé à l'aide de la formule suivante :

$Q3= 1,1607*N*L*(Hv + 8,97)*(2*g*(Hm - Hv))^{0,4053}$

Signification des paramètres

E (m) : ouverte verticale des vannes

N : nombre de vannes ouvertes

L (m) : largeur des vannes, égale à 20 m

g (m/s2) : accélération de la pesanteur (9,81)

Hm (m) : côte à l'amont du barrage

Hv (m) : côte à l'aval du barrage

Q1, Q2, Q3 (m3/s) : débit sortant du barrage

Le barrage compte 7 vannes (N) et 23 paliers. Pendant la crue les vannes sont ouvertes de façon symétrique à différents paliers qui correspond à E (m) qui est l'ouverture verticale des vannes. Les différences de niveau sont calculées par Hm (hauteur en amont) et Hv (hauteur en aval). C'est en fonction de ces paramètres que le débit Q (évacué en direction de l'estuaire) est calculé. Chaque enregistrement renseigne sur le nombre de vannes ouvertes, le degré d'ouverture et le niveau du plan d'eau amont et aval, la date et l'heure d'enregistrement. Pour presque toutes les années hydrologiques, la formule Q1 a été utilisée. Les années où la formule Q2 est utilisée correspondent à une crue importante où les vannes sont complètement ouvertes, comme c'est le cas en 1999 et 2003.

4.1.3.1. Gestion des vannes en période d'étiage

D'après l'IRD- OMVS (2004), l'objectif de gestion consiste à maintenir le niveau élevé dans la retenue. Dans ce contexte, l'ouverture des vannes reste réduite compte tenu de la faiblesse des débits qui arrivent en amont. Le régime du fleuve Sénégal étant caractérisé par une irrégularité interannuelle, l'essentiel des apports se concentre en période pluvieuse, de ce fait la fermeture totale des vannes est même fréquente pour stocker en amont de l'ouvrage un volume important afin d'atteindre les objectifs qui sont assignés à l'ouvrage. Toutefois, le gestionnaire du barrage doit ouvrir les vannes s'il constate une tendance au dépassement du niveau amont et la diminuer dans le cas inverse. Aucun problème ne se pose pour la dissipation d'énergie à l'aval du barrage pendant l'étiage (OMVS, 2003). Selon Lamagat (2007), le barrage de Diama est soumis à une contrainte de gestion dictée par le constructeur, qui vise à garantir la sécurité de l'ouvrage en évitant tout risque de déstabilisation par excès d'énergie dissipée dans l'écoulement. Le maintien du produit du débit en deçà de 1000 m^4/s rend nécessaire un "effacement" partiel du barrage par ouverture de ses vannes lors du passage de la crue, ce qui entraîne un abaissement sensible du niveau amont.

4.1.3.2. Gestion des vannes en période de crue

En période de crue, l'abaissement du niveau amont est fonction de la cote atteinte à la station de Bakel en début de crue. Dans cette optique, le plan d'eau en amont du barrage de Diama est maintenu à la cote 1,55 m tant que la cote à Bakel n'a pas dépassé 4,65 m. Si cette cote est dépassée, le plan d'eau est abaissée jusqu'à la cote 1,50 m. Selon les années, l'abaissement du niveau amont en fonction de l'arrivée de la crue peut débuter entre début juillet et mi août (IRD-OMVS, 2001). L'ouverture des vannes peut être augmentée comme en étiage pour limiter la tendance au dépassement du niveau amont. Cette procédure permet de maintenir le plan d'eau à la cote désirée tant que le débit moyen à évacuer reste inférieur à environ 1850 m^3/s. Au delà, les vannes sont complètement effacées et le niveau évolue au dessus de 1,50 m en fonction du débit, tant que celui-ci reste supérieur à 1850 m^3/s. Pour maintenir un niveau amont constant en période de crue, il faut pouvoir utiliser toute la gamme des paliers de réglage pour compenser l'amplitude de variation des débits arrivant de l'amont. Une cote amont de 1,50 m permet d'utiliser tous les paliers avec très peu de risque d'affouillement (dissipation suffisante de l'énergie des écoulements) en pied d'ouvrage en régime d'écoulement établi. La seule précaution à prendre consiste donc à effectuer des augmentations d'ouvertures progressives pour éviter un risque trop important en régime transitoire (OMVS, 2003). En fin de crue, l'objectif est de rehausser le niveau amont tout en respectant la limite admise pour la dissipation d'énergie (1000 m^4/s).

La gestion du barrage en période d'étiage comme en période de crue doit respecter la limite de la dissipation d'énergie à 1000 m^4/s afin de garantir la sécurité de l'ouvrage. Par ailleurs, étant donné que la station de Bakel constitue la zone d'alimentation de la vallée puisqu'elle détermine l'essentiel des écoulements, nous allons, dans un premier temps, analyser l'évolution des écoulements à cette station avant d'analyser celle du barrage de Diama.

4.2. L'évolution interannuelle des écoulements à la station de Bakel

Les écoulements du fleuve Sénégal sont marqués par leur forte variabilité interannuelle. Avant la mise en service du barrage de Manantali (dont le rôle est d'écrêter les crues et de soutenir le débit d'étiage) ils connaissaient des irrégularités énormes car étant caractérisés par leur intermittence et leur forte hétérogénéité spatio-temporelle. La mise en service du barrage de Manantali en 1988 a partiellement régularisé l'écoulement puisqu'il contrôle environ 50% des apports en amont de la station de Bakel. La figure 4. 3.montre l'évolution des écoulements de la station de Bakel pour la période hydrologique 1903-2008.

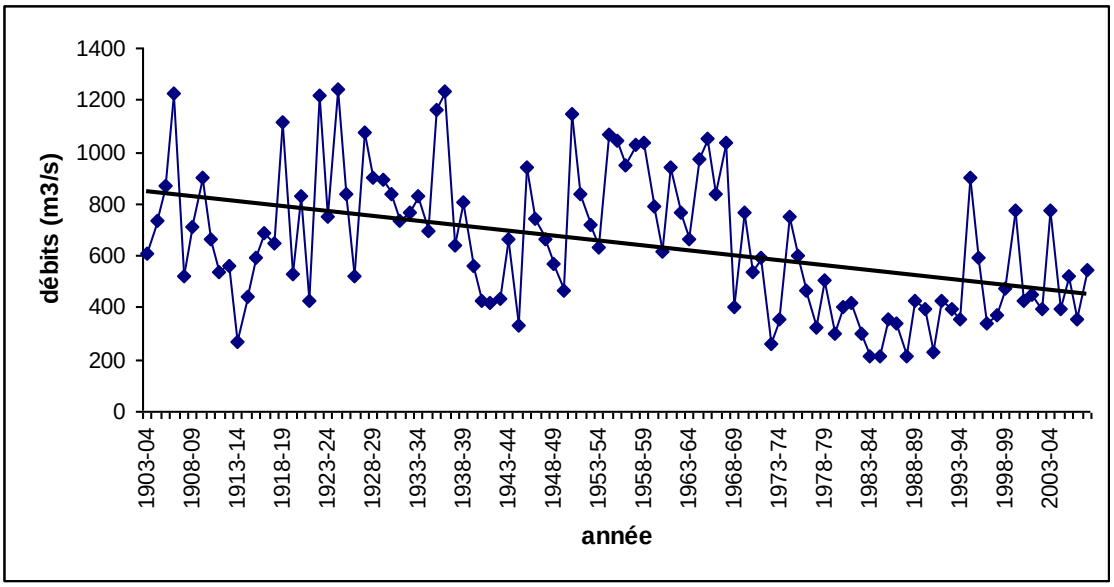


Fig. 4.3 : Evolution des débits de la station de Bakel (1903-2008)

L'allure générale de la courbe présente une succession de pics qui expriment la très forte variabilité interannuelle des écoulements. Depuis les années 70, les écoulements sont devenus moins importants. Il apparaît clairement un déficit des apports : la valeur du module des débits à Bakel de la période 1903-1970 est de 700 m^3/s, bien supérieure à la valeur moyenne des modules de la période 1970-1990 qui est de 400 m^3/s. Cette nette baisse du module témoigne des changements des conditions climatiques du bassin du fleuve Sénégal au cours du siècle. Les écoulements semblent connaître une reprise ces dernières années,

même si ce n'est pas très significatif, avec une moyenne qui passe à 480 m^3/s sur la période 1990-2008.

L'analyse des principales caractéristiques de ces années hydrologiques permettra de mieux cerner la variabilité de l'écoulement. Cette analyse se fera à partir de la répartition mensuelle des débits qui est souvent utilisée pour classifier le régime d'écoulement d'un cours d'eau (Musy et Higy, 2004). Le tableau 4.1 récapitule les principales caractéristiques des années hydrologiques 1903 - 2008.

Tableau 4.1 : Caractéristiques de la période 1903-2008 de la station de Bakel

Paramètres	M	J	Jt	At	S	O	N	D	J	F	M	A	AN
Q	32	110	519	1935	2839	1349	486	223	129	84	61	41	653
E.T	57	79	221	990	1352	774	261	146	77	47	58	61	269
C.V	1,80	0,72	0,43	0,51	0,48	0,57	0,54	0,65	0,60	0,56	0,95	1,50	0,41
C.M.D	0,05	0,17	0,80	2,97	4,36	2,07	0,75	0,34	0,20	0,13	0,09	0,06	

Q : débit moyen mensuel (m^3/s)
E.T : écart type
CV : coefficient de variation (E.T/Q)
CMD : coefficient mensuel de débit

Le débit moyen maximal s'élève à 2839 m^3/s et le débit minimal à 32 m^3/s enregistré respectivement en septembre et mai. Le débit maximal enregistré en septembre reste toujours décalé d'un mois par rapport au maximum pluviométrique qui intervient au mois d'août (fig.4.4).

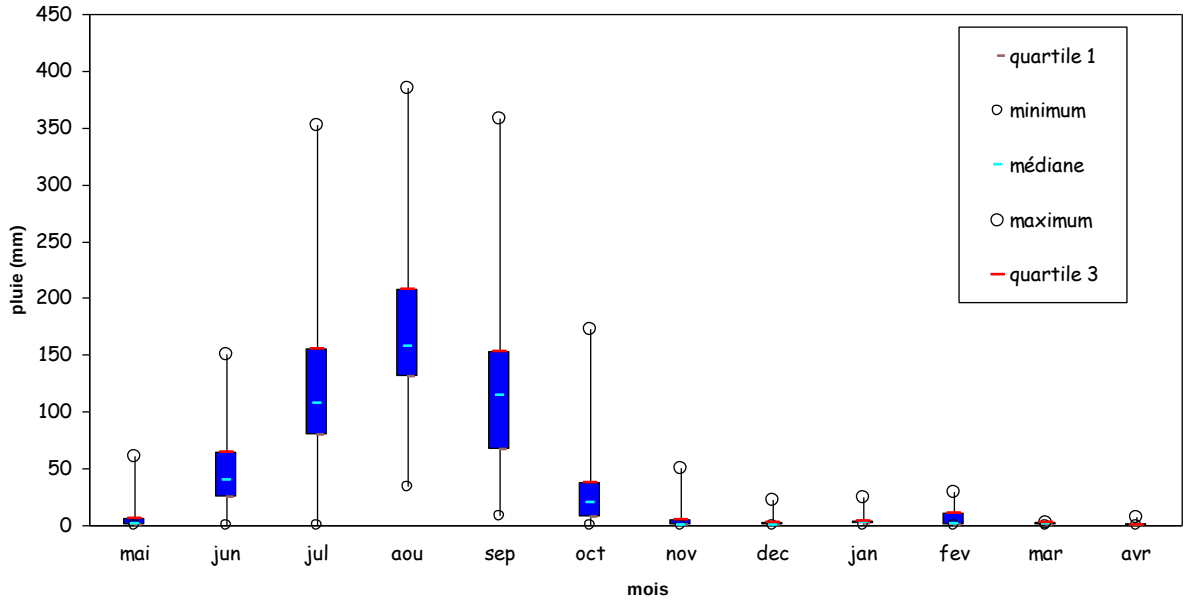


Fig. 4.4 : Pluies mensuelles de la station de Bakel (1922-2006)

Les débits élevés des mois d'août, de septembre et d'octobre correspondent aux pointes de crue. L'augementation des débits s'observe à partir du mois de juillet mais ne devient vraiment significative qu'au mois de septembre. En juillet le module passe de 519 m^3/s à 1935 m^3/s en août, soit une augmentation de 1416 m^3/s. Le mois de septembre connaît la plus forte valeur, soit un accroissement de 904 m^3/s. En octobre le débit commence à diminuer et le module décroît sensiblement, il passe de 2839 m^3/s à 1349 m^3/s soit une baisse de 1490 m^3/s. La période de concentration de l'écoulement s'étale donc de juillet à octobre avec plus de 75% du volume total annuel écoulé.

Les coefficients de variation montrent les fortes fluctuations durant toute l'année hydrologique. La hausse du coefficient (1.8) en mai avec 32 m^3/s de débit en moyenne s'explique par le fait qu'elle coïncide avec la période où l'écoulement commence à baisser du fait de la faiblesse des apports du haut bassin. Les forts débits enregistrés en août et septembre peuvent suffisamment alimenter la vallée. Cette situation influe fortement sur les débits évacués à la station de Diama au niveau de l'estuaire. Dans ces conditions il se produit très rapidement un écoulement important en direction de l'estuaire.

Nous avons déterminé la période des hautes eaux à partir du coefficient mensuel de débit qui représente la répartition des débits au cours de la période 1903-2008. Le coefficient mensuel de débit, très utilisé dans l'analyse des régimes hydrologiques, correspond au rapport entre le débit mensuel et le débit annuel. Les mois qui ont enregistré un coefficient mensuel de débit supérieur à 1 correspondent aux périodes des hautes eaux qui durent trois mois (août, septembre, octobre). Les mois où le CMD est inférieur à 1 correspondent aux basses eaux et durent neuf mois.

A partir de ces variations, nous avons tracé l'hydrogramme annuel de la station de Bakel (fig. 4.5). Il est unimodal avec un pic de crue centré en septembre et une longue période de basses eaux qui s'étalent de novembre à juin.

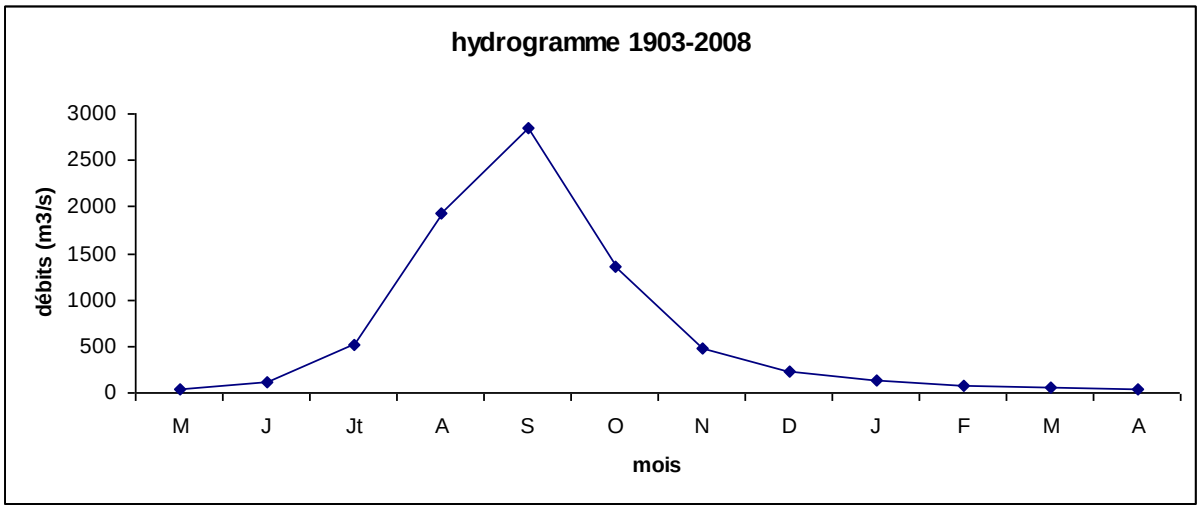


Fig. 4.5 : Hydrogramme annuel du Sénégal à Bakel (1903-2008)

Au total, la forte variabilité interannuelle est caractérisée par une période de crue qui s'étale de juillet à octobre suivie d'une période de basses eaux de novembre à juin avec un débit moyen de 146 m^3/s.

4.3. Corrélation des modules mensuels entre Bakel et Diama

Un ajustement a été effectué entre les débits de la station de Bakel et du barrage de Diama. L'objectif est de montrer que les lâchers de l'ouvrage dépendent des débits enregistrés à la station de Bakel. La figure 4.6 montre qu'il existe une forte corrélation entre les modules des deux stations, le coefficient de détermination, R^2, est égal à 0,96 (fig.4.6).

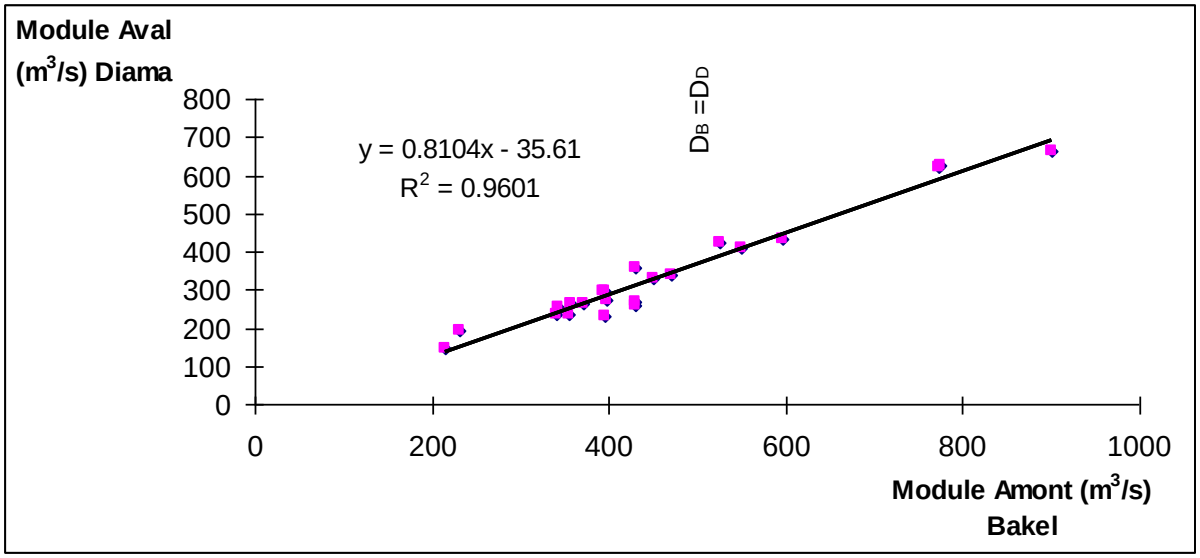


Fig. 4.6 : Relation entre les débits de la station de Bakel et du barrage de Diama (1986-2008)

D'un autre côté, bien que la distance entre Bakel et le barrage de Diama soit importante, environ 600 km, et qu'il existe des canaux d'irrigation dans la zone du delta, en plus des pertes par évaporation et par infiltration, il y a un déficit de 27 % en moyenne entre les débits des deux stations (fig.4.7).

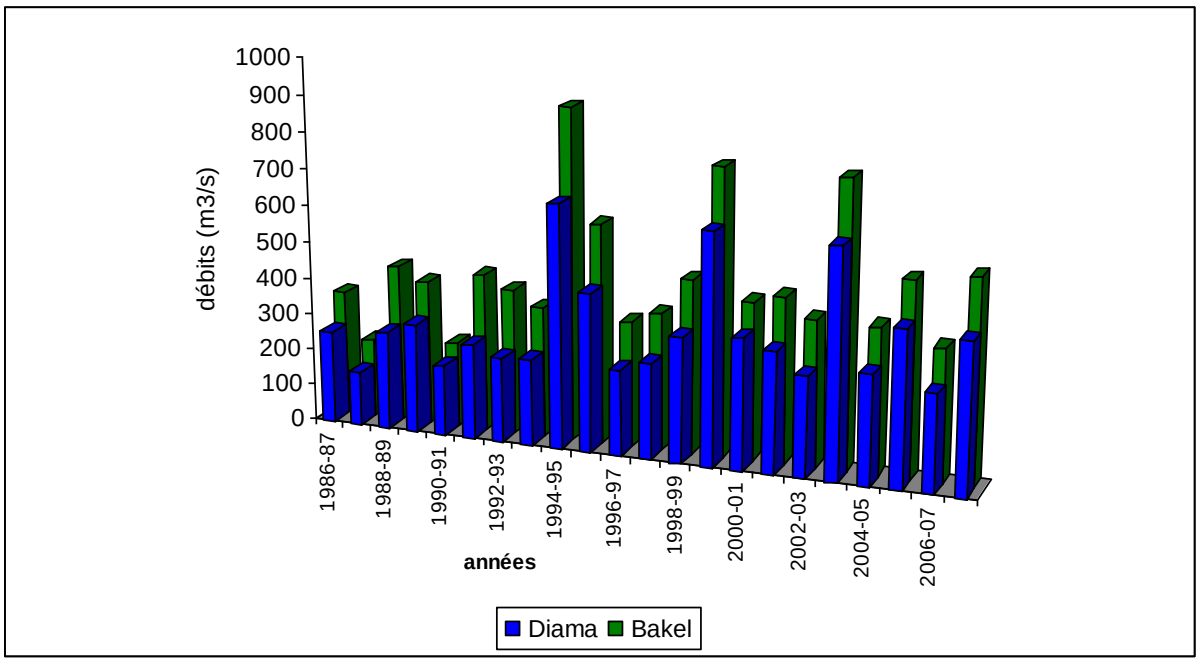


Fig. 4.7 : Comparaison des écoulements à Bakel et Diama

Toutefois, contrairement à Bakel, c'est en octobre que le débit maximum est enregistré à Diama. Ce retard découle de la durée de propagation de la crue entre les deux stations, elle est d'environ un mois. Les valeurs maximales des débits sont enregistrées en août, septembre, octobre et novembre. De même, bien que la crue se termine à la station de Bakel à la fin du mois d'octobre, le barrage de Diama continue d'effectuer des lâchers importants jusqu'en novembre. Quant aux valeurs minimales, elles sont concentrées en janvier, février, mars, avril mai, juin et juillet (fig. 4.8).

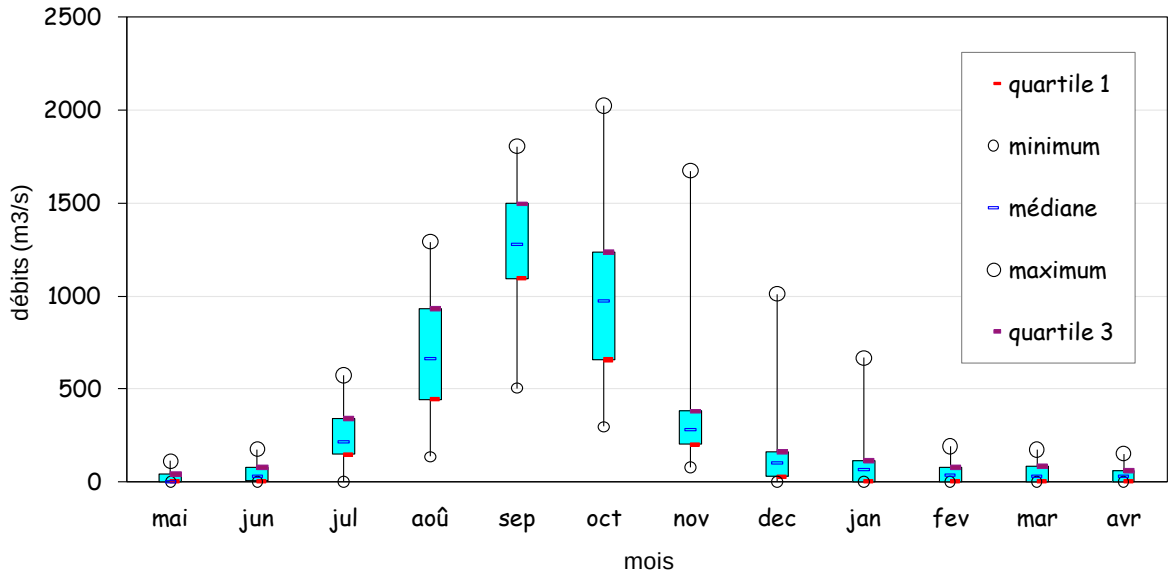


Fig. 4.8 : Débits moyens mensuels évacués au barrage de Diama (1986-2008)

4.4. L'évolution interannuelle des débits évacués au barrage de Diama

Les lâchers du barrage de Diama ont commencé à être effectifs à la date du 29 juillet 1986. Un débit moyen annuel de 255 m^3/s est évacué dans la partie aval du barrage durant cette période. Depuis cette date, le barrage de Diama contrôle l'essentiel des entrées au niveau de l'estuaire. Le tableau 4.2 présente les caractéristiques de la station de Diama pour la période 1986-2008.

Tableau 4.2 : Caractéristiques de la période 1986-2008 de la station de Diama

Paramètres	M	J	Jt	A	S	O	N	D	J	F	M	A	An
Q	30	52	249	678	1241	1023	418	158	93	47	48	40	340
E.T	40	56	154	278	346	470	380	218	148	54	51	46	187
C.V	1,31	1,08	0,62	0,41	0,28	0,46	0,91	1,37	1,59	1,16	1,08	1,16	1
C.M.D	0,08	0,13	0,62	1,70	3,10	2,56	1,05	0,40	0,23	0,12	0,12	0,10	

Comme pour la station de Bakel, le débit moyen maximal (1241 m^3/s) et le débit minimal (30 m^3/s) de Diama sont enregistrés respectivement en septembre et mai. D'une manière générale les deux stations ont les mêmes caractérisques hydrologiques.

Par ailleurs, nous avons déterminé les années excédentaires et déficitaires de la période allant de 1986 à 2008 de la station de Diama (fig. 4.9).

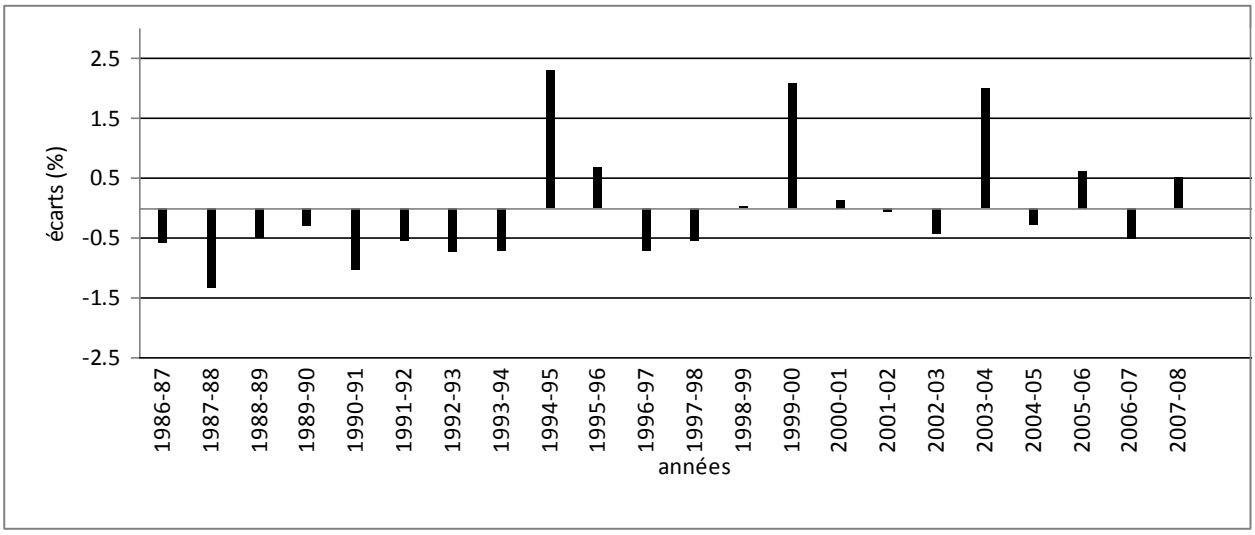


Fig. 4.9 : Indice hydrologique de la station de Diama (1986-2008)

Les seuils à partir desquels les lâchers sont considérés comme déficitaires varient entre -0,02% et -1,3%. Ces écarts sont enregistrés durant les années hydrologiques 1986-1987, 1987-1988, 1988-1989, 1989-1990, 1990-1991, 1991-1992, 1992-1993, 1993-1994, 1996-1997, 1997-1998, 2001-2002, 2002-2003, 2004-2005 et 2006-2007. L'écoulement moyen mensuel du barrage vers l'estuaire varie de 4 milliards à 11 milliards de m^3. L'année hydrologique la plus déficitaire est celle de 1987-1988 qui correspond à la mise en service du barrage de Manantali, le volume écoulé est de 4 663 630 690 m^3. Le débit n'était évacué que sur une période de 5 mois étant donné que les gestionnaires du barrage devaient procéder aussi au remplissage de son lac de retenue. Les plus forts débits évacués par le barrage sont enregistrés en 1994-1995, 1995-1996, 1998-1999, 1999-2000, 2000-2001, 2003-2004, 2005-2006 et 2007-2008. Mais les années hydrologiques les plus significatives sont celles de 1994-1995, 1999-2000, 2003-2004. Durant ces années, le barrage a évacué des volumes qui avoisinent ou atteignent 20 milliards de m^3 d'eau. C'est le cas notamment en 1994-1995 où l'estuaire a enregistré des lâchers annuels de l'ordre de 20 991 161 722 m^3. Ces lâchers en direction de l'estuaire ont contribué au rehaussement du cours d'eau entraînant ainsi l'inondation du lit majeur et des dépressions voisines.

4.5. Le laminage des débits de crue, une difficile mise en application du barrage de Diama

L'objectif premier d'un barrage de régulation est d'écrêter les crues et de laisser s'écouler, en aval, un débit aussi régulier que possible. Le barrage de régulation est donc conçu pour développer au maximum l'effet de laminage des crues (Martin, 1991). Toutefois celui de Diama a une faible capacité pour laminer une pointe de crue dans le but de protéger la ville de Saint-Louis contre les inondations. Toute tentative de laminage est inefficace (faible diminution du débit lâché, pendant un temps court) et dangereuse, du fait qu'il se traduit par un rehaussement rapide du plan d'eau amont et de la courbe de remous, pouvant entraîner un risque de submersion des digues (IRD-OMVS, 2001). Dans un tel contexte, le surplus d'eau est évacué en direction de l'estuaire et les plaines d'inondation en amont ne sont plus submergées. Ceci est renforcé par les endiguements qui sont construits en amont du barrage. En effet, sans ces endiguements le barrage de Diama serait réduit à sa fonction principale qui est d'arrêter la remontée de l'eau de mer vers l'amont pendant la période d'étiage (OMVS, 2003). Les endiguements permettent :

- la protection du delta contre les inondations ;
- le remplissage des lacs de R'kiz et de Guiers ;
- le bon fonctionnement gravitaire et une économie substantielle d'énergie de pompage des ouvrages de restitutions ;

- une irrigation des terres de culture de l'ordre de 120000 ha complémentaire aux 255000 ha irrigable du fait de la retenue de Manantali soit une irrigation totale possible de 375000 ha.

Toutefois ces aménagements hydro-agricoles de grande envergure, se traduisent par des modifications radicales du fonctionnement naturel du fleuve. La diminution de la plaine inondable dans le Delta, la sursalinisation de certaines dépressions (Noar, Ndiael, etc.), les risques de pollution toxique et les risques épidémiologiques sont les conséquences induites par les bouleversements hydrologiques et les modifications qualitatives du milieu fluvial (Mietton et Humbert, 1994 ; Humbert et al. 1995 ; Kane, 1997 ; Diop, 2004). De même, le barrage de Diama ne pouvant pas contenir le surplus fluvial en période de crue, les débits sont évacués dans la partie aval de l'ouvrage.

4.6. Les flux d'eau entrant dans l'estuaire

Les débits évacués par le barrage de Diama, depuis 1986, permettent de déterminer les écoulements mensuels et annuels au niveau de l'estuaire. Ainsi deux périodes peuvent être décrites :

- une période de 4 mois (juillet, août, septembre, octobre) au cours de laquelle l'estuaire est envahi par les eaux de crue ;
- une période longue de 8 mois pendant laquelle l'estuaire est soumis à une influence marine.

Toutefois dans le but d'assurer les consignes de gestion de l'ouvrage, des lâchers sporadiques sont effectués par les gestionnaires de l'ouvrage pour garantir sa sécurité et par ailleurs respecter l'énergie de dissipation. Les ouvertures de vannes sont liées au soutien de crue du barrage de Manantali qui nécessite à certains moments des lâchers très importants, à la fois pris sur la réserve d'eau destinée aux autres besoins, et supérieurs à la débitance des turbines (Bader, 1997). De plus, depuis 2002, avec la mise en service de la centrale hydroélectrique du barrage de Manantali, les vannes du barrage de Diama sont régulièrement ouvertes pour éviter la submersion au niveau des endiguements.

Pour une analyse plus fine des fluctuations des valeurs autour du module moyen, nous avons calculé la moyenne des débits hebdomadaires de la période observée. Nous avons réparti les semaines en fonction de l'année hydrologique qui commence à partir du mois de mai au niveau du fleuve Sénégal. Le 1er mai étant inclus dans la semaine du 17, nous avons considéré l'année hydrologique à partir du 6 mai. La figure 4.10 montre l'évolution

hebdomadaire des débits sur la période des 22 années. Il s'agit d'une boîte à moustache pour laquelle nous retenons les variations suivantes :

- l'augmentation des débits se concentre en 13 semaines, de la 34ème à la 47ème semaine avec une fréquence des lâchers de plus de 1500 m^3/s. Sur cette période, cinq semaines ont enregistré des débits maxima de 2000 m^3/s. Ces débits interviennent entre la 40ème et la 44ème semaine soit du 7 octobre au 4 novembre ;

- la décroissance s'effectue en 39 semaines où les débits sont très faibles, de l'ordre de 113 m^3/s enregistré à la 22ème semaine. Ces semaines enregistrent également des débits nuls.

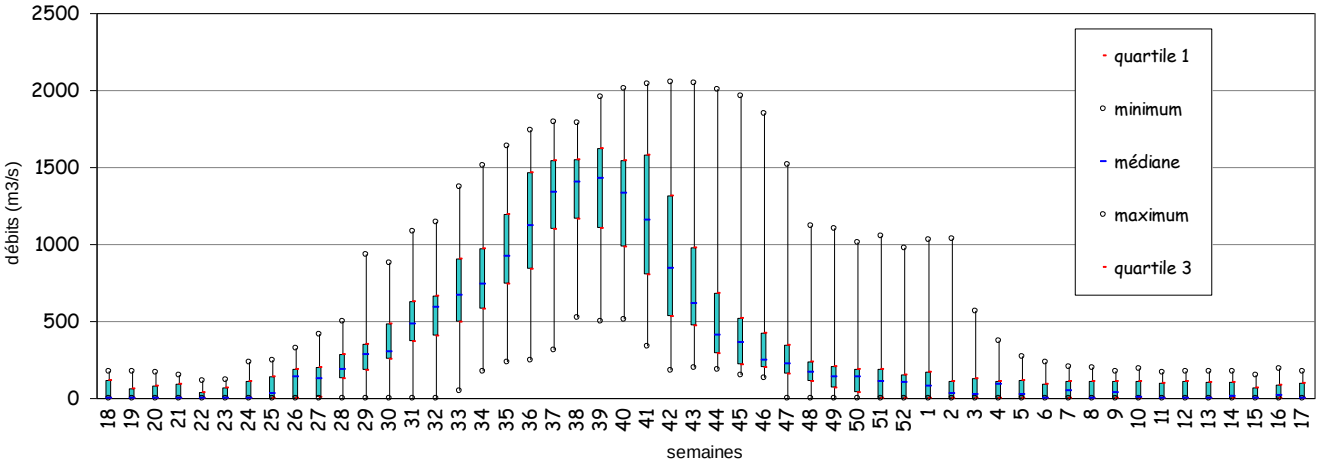


Fig. 4.10 : Lâchers hebdomadaires de la station de Diama (1986-2008)

Les débits qui transitent en aval du barrage déterminent le niveau de la cote des stations de l'estuaire. L'analyse de la variation des hauteurs d'eau en fonction des débits est un élément essentiel pour la compréhension du fonctionnement hydrologique de l'estuaire. Aussi, nous avons fait le choix d'analyser les années 1994-1995, 1995-1996, 1999-2000, 2003-2004, 2005-2006 et 2006-2007 qui sont considérées comme excédentaires et plus significatives par rapport aux autres années hydrologiques (1998-1999 ; 2000-2001). Les débits de ces années ont fait monter le niveau du plan d'eau aux stations de Diama aval, St-Louis et Gandiol. Les hauteurs d'eau sont données par rapport aux zéros des échelles limnigraphiques des différentes stations. Par ailleurs, pour la station de Gandiol, nous ne disposons que des hauteurs d'eau de la période 1994-1995 et 1995-1996.

4.6.1. L'année hydrologique 1994-1995

C'est pendant la deuxième décade du mois de mai, sur une période de 8 jours, que les débits ont commencé à être évacués au niveau de l'estuaire, le volume entrant durant cette période correspond à 108 086 400 m^3. Les débits ont été évacués sur toute la période de l'année à l'exception du mois d'avril. Le maximum d'écoulement a été observé durant les mois de septembre et d'octobre où ont été enregistrés respectivement 172 972 800 m^3 et 181 008 000 m^3, soit des débits de 2002 m^3/s et 2095 m^3/s. Egalement, c'est en 1994 que le barrage de Manantali connut son premier lâcher important depuis sa mise en service (1988). Cependant, il semble bien que les gestionnaires de Diama n'aient pas anticipé cette onde de crue exceptionnelle. Conformément à leurs consignes, qui étaient de minimiser les frais de pompage de l'agriculture irriguée, ils avaient pour habitude de garder le niveau de la retenue au plus haut. De plus, la pointe de crue coïncida avec une pluie torrentielle sur le bas-delta (181 millimètres en 12 heures). A la suite de la montée des eaux dans la retenue, les gestionnaires procédèrent à un lâcher d'urgence, dont la vague inonda la ville de Saint-Louis (Hamerlynck et Duvail, 2003). La figure 4.11 montre l'évolution des hauteurs d'eau dans les différentes stations de l'estuaire en fonction des lâchers au barrage de Diama pour la période 1994-1995. Comme le montre la courbe d'évolution, il apparaît clairement que les débits influent de façon significative sur les hauteurs d'eau.

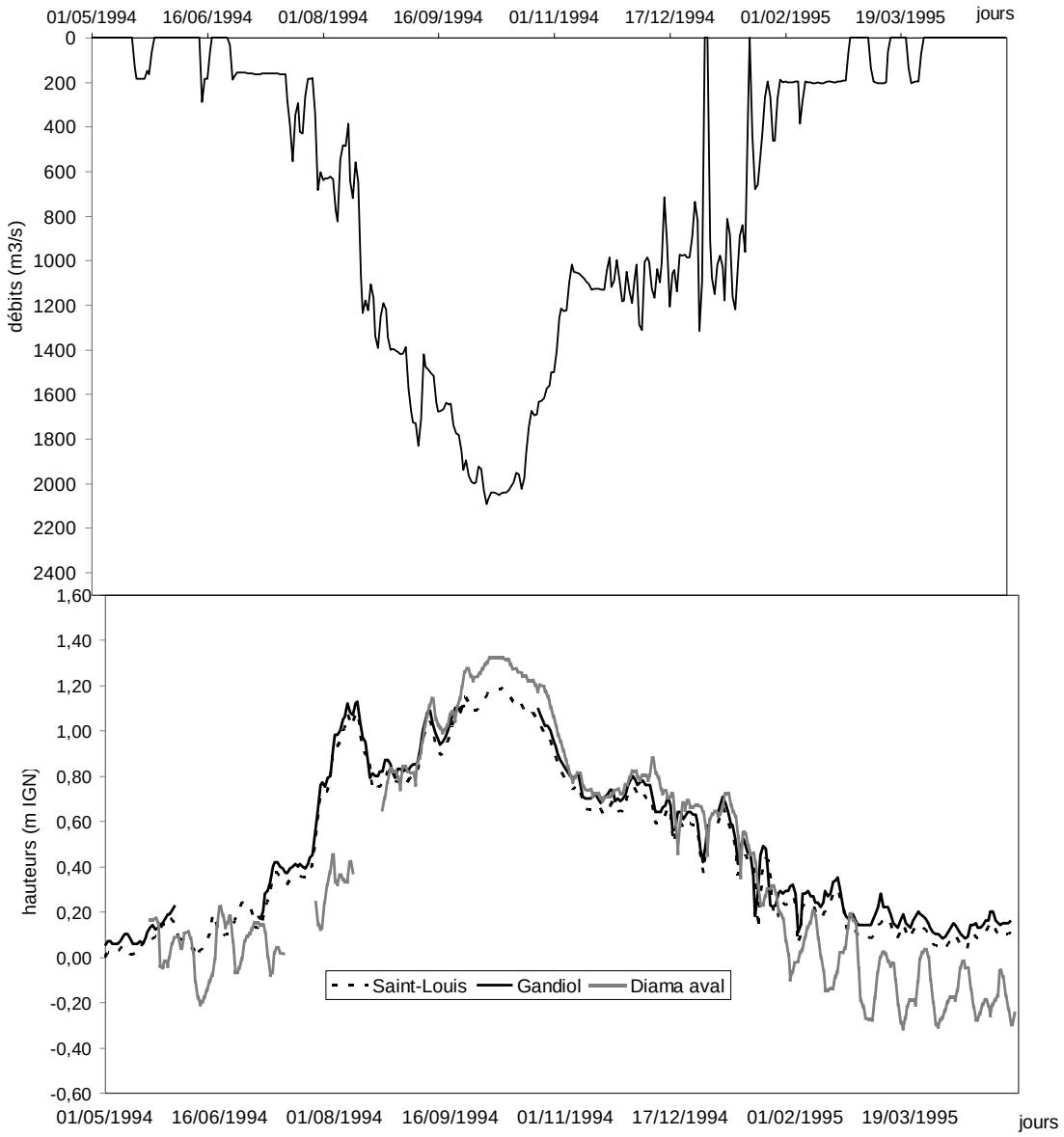


Fig. 4.11 : Les débits lâchés à Diama et les hauteurs d'eau des stations de l'estuaire (1994-1995)

Les hauteurs d'eau de Diama aval, Saint-Louis et Gandiol varient suivant le débit évacué par le barrage. Elles sont maximales au mois d'octobre avec respectivement 1,32 m IGN ; 1,19 m IGN et 1,13 m IGN. C'est un écoulement qui est quasi permanent pendant toute la période de crue et qui commence à être irrégulier après le mois de novembre. Les hauteurs minimales sont enregistrées en mai avec -0,3 m IGN ; 0,01 m IGN et 0,05 m IGN. Les cotes à Saint-Louis et à Gandiol n'ont pas un écart significatif du fait de l'absence de perte de charge entre les deux stations. Par ailleurs quand le débit évacué par Diama avoisine ou est supérieur à 2000 m^3/s, il y a risque d'inondation dans la ville de Saint-Louis et ses environs.

4.6.2. L'année hydrologique 1995-1996

Les lâchers ont commencé à être effectués à partir du 11 mai sur une période de cinq jours. Ils reprennent le 15 juin de façon irrégulière jusqu'au 13 juillet, date à laquelle ils se font de manière continue jusqu'à la fin de l'année hydrologique. Toutefois nous avons noté 18 jours pendant lesquels les vannes ont été fermées en décembre, janvier, février et avril. L'ouverture des vannes a commencé à être significative quand elle a atteint le palier 21 et ceci a duré 36 jours à compter du 14 septembre au 19 octobre. Un cumul de 13 730 603 052 m^3 s'est concentré dans l'estuaire. La figure 4.12 montre des courbes d'évolution univoques entre les débits et les hauteurs d'eau.

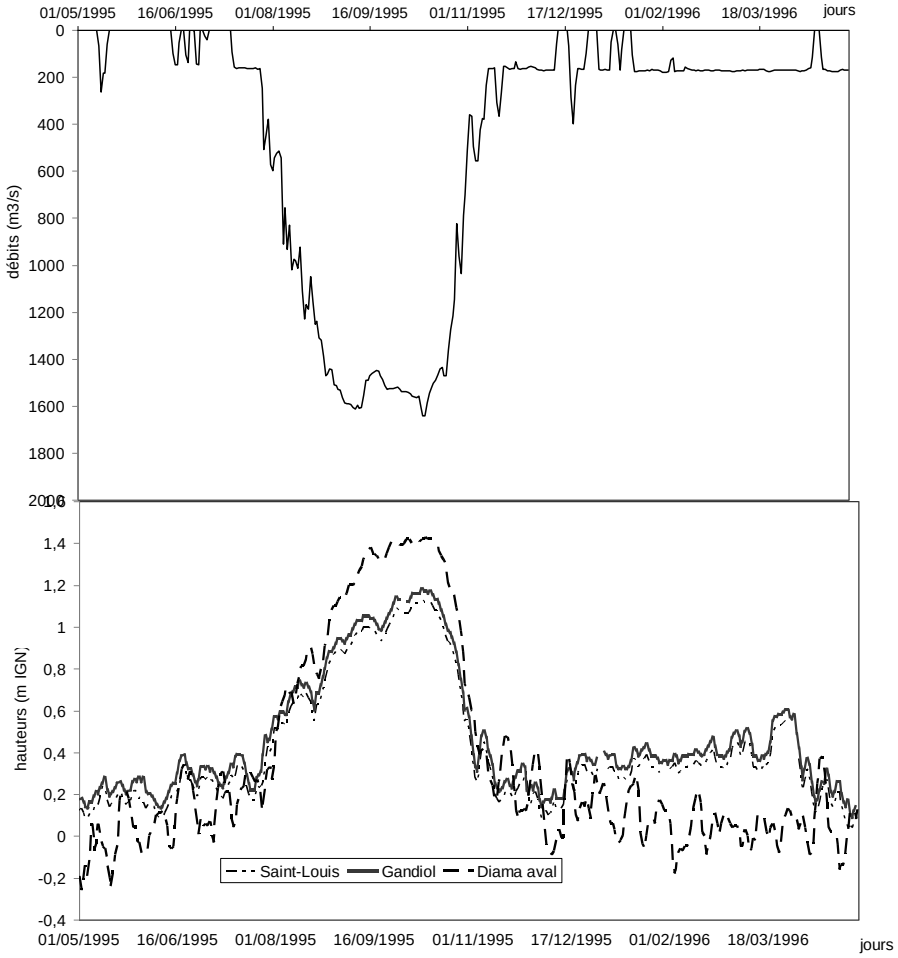


Fig. 4.12 : Evolution des débits évacués par le barrage et des hauteurs d'eau dans l'estuaire (1995-1996)

4.6.3. L'année hydrologique 1999-2000

Les débits sont évacués pratiquement toute l'année à l'exception des mois de mai et d'avril. Le volume total écoulé à l'aval du barrage correspond à 19 914 305 063 m^3. Cette année, la crue était très importante, soit un débit maximum de 2072 m^3/s enregistré le 12 octobre 1999. Les vannes ont été ouvertes au palier 22 (niveau maximum) à partir du 22 août jusqu'au 17 novembre 1999. L'effacement de toutes les vannes était nécessaire, ainsi la formule Qs a été utilisée pour calculer le débit durant les mois de septembre et novembre, sur la période du 22 au 11.

$Qs = Ks* E * N*L * (2*g* (Hm-Hv)^{0.5}$

Ks : coefficient de débit fixé à 0.85

E (m) : ouverture verticale des vannes

N : nombre de vannes ouvertes

L (m) : largeur des vannes, égale à 20 m

g (m/s^2) : accélérateur de la pesanteur

Hm (m) : cote à l'amont du barrage

Hv (m) : cote à l'aval du barrage

Cette formule peut être établie à partir de la relation de Bernoulli en négligeant les pertes de charge, pour l'écoulement au travers de vannes complètement noyées. Cependant elle est utilisée indifféremment pour certains cas où les vannes sont complètement effacées. Dans ce cas, l'utilisation de cette formule sous-estime de façon importante les débits. Dans ces conditions d'écoulement, les débits évacués par le barrage ne dépendront que du niveau du plan à l'amont de l'ouvrage et des conditions imposées par l'onde de marée (IRD-OMVS, 2001). La figure 4.13 montre que les débits sont plus importants quand le niveau du plan d'eau en amont s'abaisse. Ce processus aboutit inévitablement à un rehaussement du plan d'eau à la cote de 1.65 m IGN, soit 2.10 m lu à l'échelle, à la station de Saint-Louis, ce qui dépasse largement la cote d'alerte, qui est de 1.75 m. Au même moment, à l'aval de Diama, la même cote a été observée, ce qui montre bien que la courbe de remous engendrée par le seuil de l'embouchure remontait à ce moment-là jusqu'au barrage (Lamagat, 2000). La pointe de crue a été enregistrée en septembre, octobre et novembre avec des débits de 1973 m^3/s, 2072 m^3/s et 2012 m^3/s qui correspondent respectivement à des volumes de 170 467200 m3, 179 020 800m^3 et 173 836 800 m^3. Ce qui contribue à la montée des eaux dans l'estuaire et par conséquent favorise les risques d'inondation.

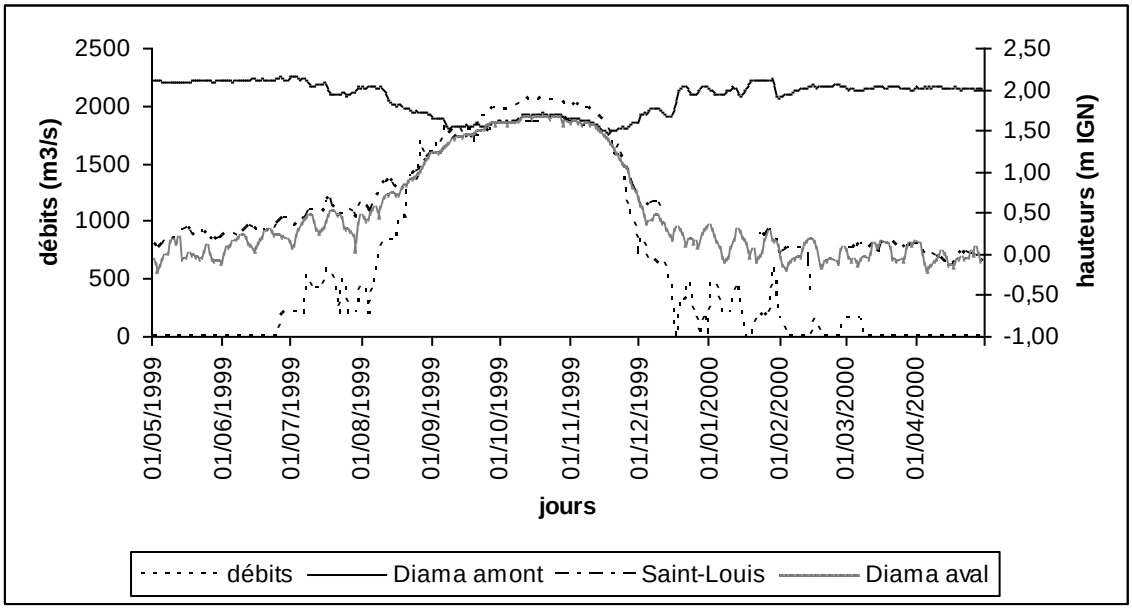


Fig. 4.13 : Débits évacués en fonction de la cote amont du barrage (1999-2000)

4.6.4. L'année hydrologique 2003-2004

Les débits ont été évacués sur une période de 304 jours. Au mois d'août ils étaient supérieurs à 1000 m^3/s, notons aussi que durant le mois de juillet entre le 18 et le 19 plus de 1000m^3/s ont été évacués. Pendant tout le mois de septembre les débits évacués avoisinaient plus de 1500 m^3/s. Ces lâchers au niveau de l'estuaire ont entraîné le rehaussement du cours d'eau qui est passé à une cote supérieure à la cote d'alerte. Cette situation a pour conséquence des débordements au niveau de la ville. Pour éviter une catastrophe, une brèche a été ouverte sur la Langue de Barbarie. Nous développerons en détail la situation hydrologique de 2003-2004 et l'ouverture de la brèche dans le chapitre suivant.

4.6.5. L'année hydrologique 2005-2006

Le barrage n'a été fermé que sur une durée de 31 jours. Le débit maximum évacué est de 1463 m^3/s enregistré le 19 septembre. En revanche, les hauteurs d'eau maxima en aval de 0,85 m IGN (Diama aval) et 0.49 m IGN (Saint-Louis) sont enregistrées respectivement le15 et 16 octobre (fig.4.14) où le débit évacué était de 1323 m^3/s en moyenne. Ce qui signifie que les plus forts débits ne traduisent pas forcément les cotes les plus importantes. Il faut dire qu'avec la délocalisation de l'embouchure à 7 km de la ville de Saint-Louis, les

conditions d'écoulement dans l'estuaire ont été modifiées. Nous aborderons l'influence marine dans le chapitre 6.

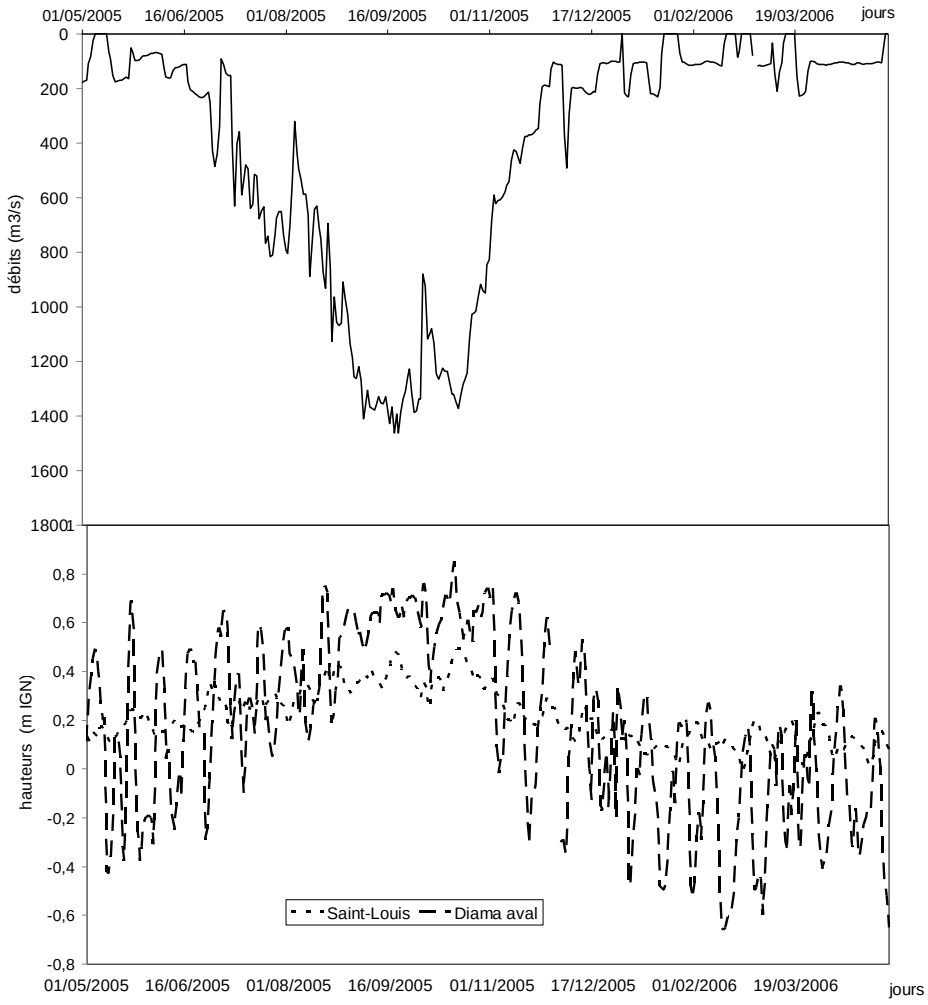


Fig. 4.14 : Evolution des débits évacués par le barrage et des hauteurs d'eau à Diama aval et Saint-Louis (2005-2006)

4.6.6. L'année hydrologique 2006-2007

Un volume de 8 380 142 374 m^3 est évacué par le barrage, volume nettement inférieur par rapport aux années hydrologiques analysées ci-dessus. Le débit maximum est de 920 m^3/s enregistré le 28 août. Comme pour l'année précédente, nous avons noté un décalage très important entre le débit max et les hauteurs max en aval pour les mêmes raisons que nous avons évoquées plus haut. Les cotes maximales sont enregistrées le 4 et 7 octobre au niveau de Diama aval et Saint-Louis avec respectivement 0.79 et 0.38 m IGN (fig.4.15).

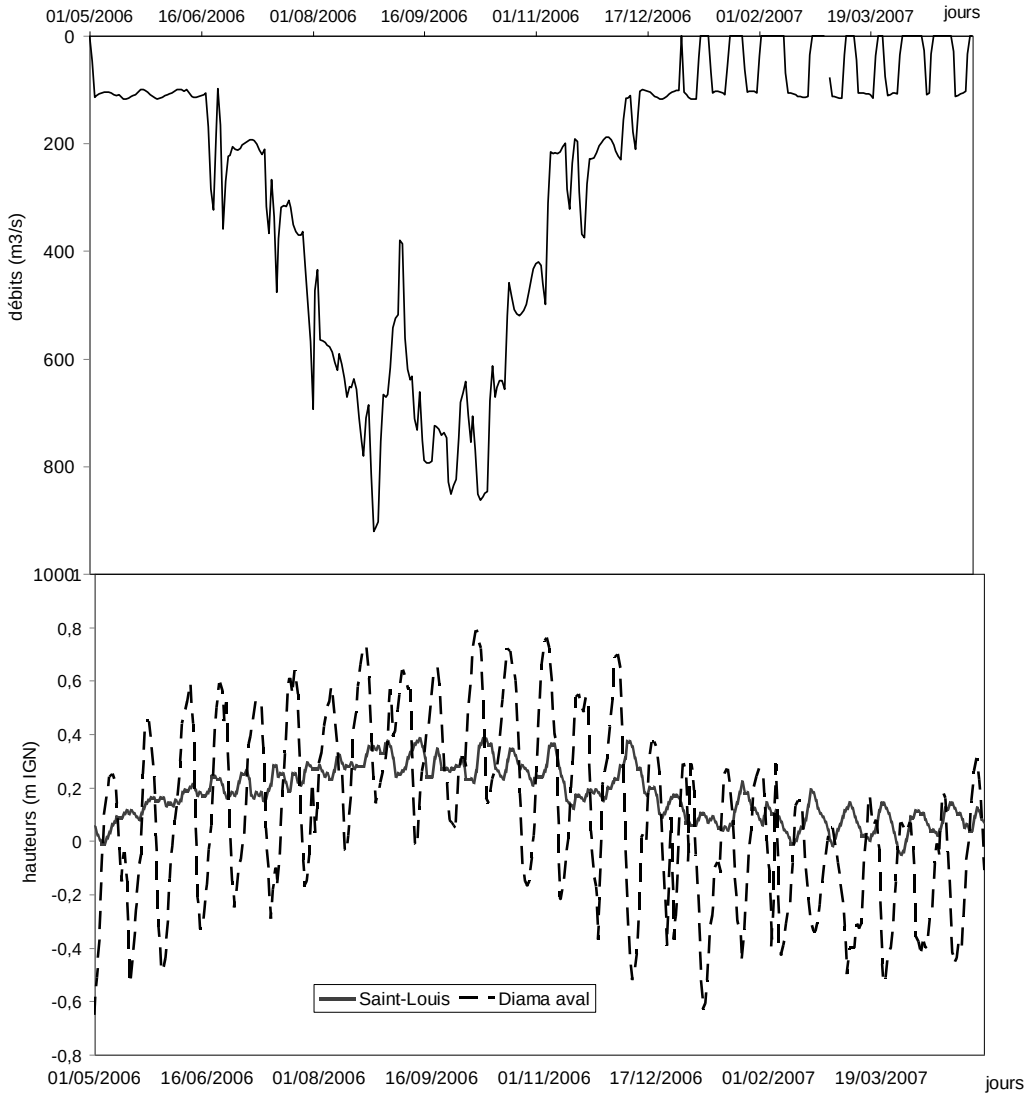


Fig. 4.15 : Evolution des débits évacués par le barrage et des hauteurs d'eau à Diama aval et Saint-Louis (2006-2007)

4.7. L'analyse fréquentielle des débits évacués par le barrage de Diama

L'analyse fréquentielle univariée est l'approche que privilégient généralement les hydrologues pour analyser le risque associé aux événements hydrologiques extrêmes. Cette méthode statistique consiste à étudier des événements historiques afin d'en évaluer les probabilités d'apparition future. Cette approche prévisionnelle revêt une importance capitale pour l'annonce de crues et de la gestion des risques naturels tels que les inondations (Meylan et al. 2008). Bien que le régime du fleuve soit maîtrisé, des lâchers maxima s'effectuent pratiquement chaque année, en période pluvieuse. Comme nous l'avons évoqué plus haut, la gestion du barrage est dépendante des apports de Bakel dont l'hydrologie est

sous la dépendance de la pluviométrie dans le haut bassin et partiellement de la gestion du barrage de Manantali. C'est dans cette optique que nous avons envisagé d'effectuer une analyse fréquentielle des débits évacués par le barrage de Diama. L'objectif est de déterminer les probabilités d'apparition future des débits maxima. L'échantillon des débits de crue sur lequel les statistiques doivent être effectuées peut être construit en sélectionnant le maximum de chacune des périodes d'observation (Lang et Lavabre, 2007). Sur cette base, le modèle fréquentiel est réalisé à partir des débits maxima annuels de la série de données de 1986 à 2008 (tableau 4.3).

Tableau 4.3 : Les débits maxima évacués par le barrage de Diama (1986-2008)

Année hydrologique	Débits maxima
1986-1987	1625
1987-1988	1235
1988-1989	1562
1989-1990	1458
1990-1991	766
1991-1992	1302
1992-1993	1368
1993-1994	1476
1994-1995	2095
1995-1996	1642
1996-1997	1419
1997-1998	1664
1998-1999	1818
1999-2000	2072
2000-2001	1680
2001-2002	1592
2002-2003	1408
2003-2004	2067
2004-2005	1250
2005-2006	1463
2006-2007	920
2007-2008	1934

4.7.1. Le calage du modèle fréquentiel

L'ajustement de la série est rendu aisé avec l'utilisation du programme d'ajustement de Safarhy (Lubes et al. 2002). Ce dernier est un logiciel de calculs statistiques et d'analyse fréquentielle, adapté à l'évaluation du risque hydrologique. Il a l'avantage de proposer une table de conseils orientant l'utilisateur dans son choix de distribution théorique pour un ajustement (Lang et Lavabre, 2007). Il donne les paramètres d'ajustement qui permettent de choisir la meilleure loi de distribution. Nous avons d'abord effectué une analyse exploratoire pour mesurer la variabilité des débits lâchés par le barrage de Diama. Ces mesures sont effectuées par le logiciel Safarhy à partir de paramètres statistiques que sont les moyennes,

l'écart-type, le minimum, le maximum, la médiane et le coefficient de variation des débits de la période observée (tableau 4.4).

Tableau 4.4 : Caractéristiques de l'échantillon

Statistique	Valeur
Effectifs	22
Minimum	766
Moyenne arithmétique	1537,09
Moyenne harmonique	1450,91
Moyenne géométrique	1496,74
Médiane	1519
Ecart type	341,74
Coefficient de variation	0,22
Maximum	2095

Le faible coefficient de variation montre que les lâchers sont très importants au niveau de l'estuaire et que ceux-ci ont une grande influence sur son régime. Egalement, le faible écart entre la médiane et les moyennes de la série montre que la loi normale est la mieux adaptée pour l'ajustement de l'échantillon. D'ailleurs cette loi est conseillée par le logiciel Safarhy. Notons également qu'une autre loi, en l'occurrence, la loi Racine Carrée Normale est recommandée. Mais nous avons fait le choix d'utiliser la loi normale. Son expression mathématique est la suivante :

$$n(x) = \frac{n}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

μ : est la moyenne
σ : L'écart type
n : le nombre total d'individus dans l'échantillon
n (x) : le nombre d'individus pour lesquels la grandeur analysée a la valeur x

Le choix de cette loi est aussi guidé par les résultats des tests d'adéquation qui permettent de choisir le modèle fréquentiel approprié. Les deux lois (normale et racine carrée normale) sont acceptées. Mais la meilleure est celle qui présente la plus faible valeur du Khi2. Elle est de 0.18 pour la loi normale et 0.91 pour la loi racine carrée. En outre, la loi de Gumbel est l'exemple le plus courant de modèle fréquentiel utilisé en hydrologie pour les extrêmes (Meylan et al. 2008). Cependant il n'a pas été recommandé par le logiciel Safarhy pour cette

étude. Cette situation peut s'expliquer par la faiblesse de l'échantillon et par l'artificialisation des débits. Bien que la loi de Gauss ne soit pas adaptée pour les valeurs extrêmes, cette loi s'applique pour les débits maxima du fleuve Sénégal, l'étude statistique menée par Rochette (1974) était basée sur l'utilisation de cette loi pour les stations du haut bassin (Gouina, Kayes, Kidira) et de la vallée du fleuve Sénégal (Bakel, Matam). La figure 4.16 montre les valeurs, la droite d'ajustement théorique et les droites d'intervalle de confiance à 95%.

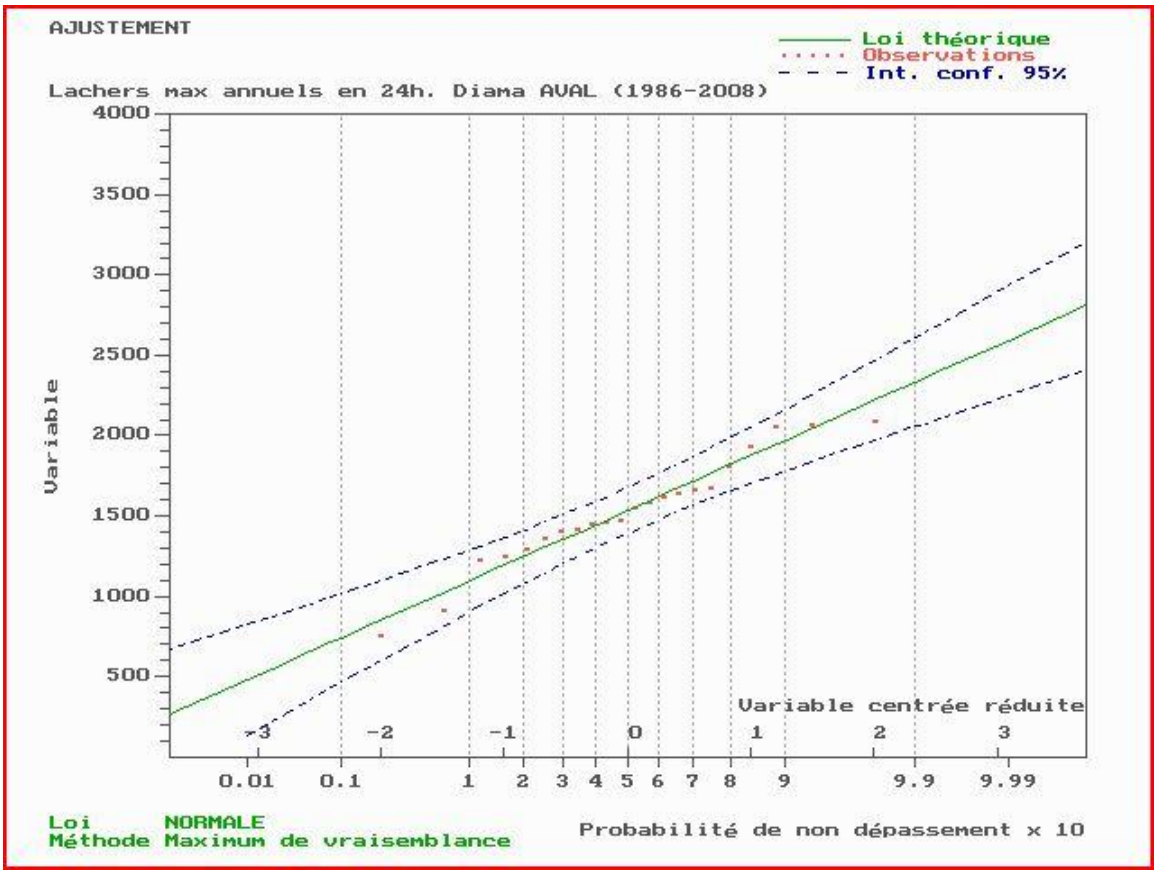


Fig. 4.16: Distribution des débits maxima en fonction de l'ajustement à la loi normale

Nous remarquons la bonne adéquation de la distribution de fréquence de l'échantillon à la loi normale. L'ajustement est satisfaisant, l'intervalle de confiance pour l'échantillon au seuil de 95% contient les vraies valeurs. Nous observons cependant que les fortes valeurs en période de saison humide s'écartent de la courbe. Ces valeurs peuvent être considérées comme des fausses crues ou faux maxi qui peuvent être atteints au lendemain d'une crue importante, elles représentent la coalescence des flots. Les faibles valeurs qui s'écartent de la courbe correspondent aux débits maxima qui sont évacués en période de faible crue, elles sont comprises entre 600 et 800 m^3/s.

4.7.2. Les périodes de retour

La période de retour $T\chi$ (χ_p) correspond à l'intervalle de temps moyen séparant deux années successives, où le maximum annuel est supérieur à la valeur de référence χp. L'indice χ est relatif au mode d'échantillonnage par la valeur maximale annuelle. La période $T\chi$ est liée à la probabilité au non dépassement p par la relation :

$$p = 1 - \frac{1}{Tx\,(x_p)}$$ (Lang et Lavabre, 2007).

La détermination de la période de retour des débits maxima évacués par le barrage de Diama est une information utile pour mieux appréhender le caractère exceptionnel ou non d'un événement. Comme la taille de l'échantillon est faible (22 ans), nous n'avons pris en compte que les valeurs récurrentielles sur une période de 50 ans. Certes, les longues séries sont celles qui permettent le mieux de mettre à l'épreuve les modèles, car on y trouve davantage d'événements rares dont la probabilité d'apparition est faible (Bendjoudi et Hubert, 1998). Mais nous ne disposons pour cette étude que des débits au pas de temps journalier depuis le début de l'exploitation du barrage (1986) à 2008.

L'approche stochastique montre que la durée de retour des débits de 1500 m^3/s est biannuelle. D'après les jaugeages qui ont été effectués par l'IRD en 1999, un débit de 2000 m^3/s correspond à une hauteur de 1,95 m, ce qui dépasse la cote d'alerte qui est de 1,75 m. Ce dernier correspond à un débit de 1689 m^3/s. Aussi, nous considérons comme seuil critique un débit de plus de 1600 m^3/s pour que des inondations se produisent. Ce débit est de fréquence triennale (tableau 4.5).

Tableau 4.5 : Durée de retour des débits évacués par le barrage de Diama

Débits (m^3/s)	période de retour (an)
1542	2
1686	3
1824	5
1970	10
2092	20
2155	30
2197	40
2228	50

La fréquence des inondations dans l'estuaire est donc relativement élevée. Elles se produisent pratiquement tous les trois ans. Les débits qui avoisinent les 2000 m^3/s correspondant aux fortes crues sont de fréquence quinquennale, décennale, bi décennale, tri-decennale, quadri-decennale et cinquantennale. Ils sont respectivement de 1824, 1970, 2097, 2155 et 2228 m^3/s. En effet, depuis les années 90, les inondations les plus importantes se sont produites en 1994, en 1999 et en 2003. Il faut dire que depuis ces dernières années le Sahel est devenu beaucoup plus humide que les années précédentes (1970-1990).

Nous avons vu précédemment que lorsque les débits transitent à Diama les cotes augmentent au niveau des stations de l'estuaire. Un stockage apparaît entre Diama et la mer, d'où les inondations enregistrées à Saint Louis. Quoique le barrage de Diama n'ait pas pour vocation de laminer les crues du fleuve, il apparaît clairement qu'il n'a aucune influence sur les inondations. Bien souvent, les aménagements, quelle que soit leur importance dans les bassins versants ont été accusés d'aggraver fortement les crues (Ghio, 1995). Mais le fleuve fonctionne en période de crue à l'état naturel avec l'effacement du barrage. Il peut même arriver qu'il ne soit pas complètement effacé comme en 1994 où le nombre maximum de palier ouvert n'a pas excédé 15 alors que la limite maximale est de 23. Les inondations de Saint-Louis sont plutôt provoquées par l'incurie urbaine. Nous avons vu dans le chapitre précédent que les populations ont occupé le lit majeur du fleuve avec un système de remblai qui favorise les risques de submersion en période pluvieuse.

Conclusion

Les débits évacués par le barrage de Diams dépendent de la situation hydrologique de la station de Bakel qui conditionne l'essentiel des écoulements dans la vallée. Les lâchers du barrage se traduisent par un rehaussement du plan d'eau au niveau des stations de l'estuaire. Toutefois, les inondations à Saint-Louis ne sont pas provoquées par le barrage mais plutôt par l'urbanisation anarchique. L'analyse des années hydrologiques 2005-2006 et 2006-2007 montre que la relation entre les débits et les hauteurs d'eau n'est pas univoque. Cette situation est consécutive au rapprochement de l'embouchure à 7 km de la ville de Saint-Louis. Le chapitre qui suit aborde l'ouverture de la nouvelle embouchure.

Chapitre 5 : La gestion du risque d'inondation : l'ouverture d'une embouchure artificielle sur la Langue de Barbarie

Le phénomène des inondations représente la menace la plus importante au niveau des villes côtières. La plupart des agglomérations urbaines sont situées sur ces espaces alors que l'occupation de ces milieux caractérisés par leur fragilité expose les populations qui y vivent aux impacts des événements extrêmes tels les orages, les ouragans, les inondations, les tsunamis etc. (Bogradi, 2004). Pour les agglomérations situées au niveau des estuaires, à la menace de la mer peut s'ajouter, par coïncidence météorologique, celle des crues du bassin fluvial (Chaline et Dubois-Maury, 1994). Ces dernières années, la zone sahélienne est plutôt marquée par une variabilité hydro-climatique assez notable. Parmi les conséquences les plus remarquables de ces fluctuations climatiques figurent un retour à des précipitations plus abondantes à partir de la fin des années 1990 (Mbaye et al. 2009). Ce retour à des conditions climatiques plus humides se traduit par des inondations récurrentes. La ville de Saint-Louis qui se trouve dans sa partie septentrionale n'échappe pas à la furie des eaux. Le phénomène pose avec acuité, en période pluvieuse, le déplacement des populations dans des zones de recasement, d'énormes difficultés de circulation des personnes et des biens. Cette fragilisation du système socio-économique face aux menaces d'inondation a poussé les autorités sénégalaises à rapprocher l'embouchure de la ville de Saint-Louis en 2003 pour une évacuation rapide des eaux en excès vers la mer. En outre, les profondeurs du bief fluvial ainsi que la largeur de la section mouillée diminuent au fur et à mesure que l'on s'approche de l'embouchure, ce qui contribue à freiner l'écoulement naturel des eaux fluviales de crue vers la mer. Les eaux océaniques qui envahissent le bief fluvial par les phénomènes de marée sont aussi piégées dans l'estuaire qui, du fait de "l'étroitesse" de l'embouchure a du mal à se vidanger (Dia, 2000). Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 3 de la première partie, les populations ont occupé le lit majeur du fleuve suite aux années sèches, en conséquence, en cas d'une crue importante, de nombreux quartiers sont sous les eaux.

Par ailleurs, s'il est vrai que les Etats africains n'ont pas les moyens financiers d'équiper leurs fleuves pour réduire les effets des inondations (Dauphiné (2003), ils arrivent souvent à trouver des stratégies pour atténuer ces risques même si ces actions semblent dérisoires. De nombreux auteurs ont montré que les catastrophes naturelles sont en fait bien souvent des événements socialement construits (par ex. Oliver-Smith 1994, Comfort et al. 1999, Mileti 1999, …) qui ne font que révéler une incapacité à anticiper ou gérer un événement survenant en-dehors des normes habituelles. La réponse des sociétés, parfois hâtive, face à cette situation est très souvent destinée à masquer cette incapacité à gérer des évènements extrêmes.

Ce chapitre montre d'une part que le contexte climatique de 2003 qui a généré une crue importante est une anomalie détectée dans la séquence sèche de la variabilité climatique qui

est de rigueur au Sahel. Il étudie d'autre part, l'évolution rapide de cette ouverture qui constitue actuellement l'embouchure du fleuve Sénégal.

5.1. Le contexte d'ouverture de la brèche

Les précipitations reçues par le bassin versant et sa réponse hydrologique se traduisent par une variation temporelle de débit. Dans le bassin du fleuve Sénégal, cette réponse s'est traduite par une crue précoce en 2003 par rapport aux années hydrologiques précédentes. La crue qui est généralement observée au mois de septembre à la station de Bakel est arrivée le 10 août. Cette précocité de la crue pourrait provenir des pluies exceptionnellement importantes enregistrées durant les mois de mai, juin et juillet, soit 837 mm, dans le haut bassin au niveau de la station de Mamou. Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, le régime hydrologique à la station de Bakel est tributaire de la pluviométrie dans le haut bassin mais aussi des options de gestion du barrage de Manantali sur le Bafing. C'est le seul affluent qui est maîtrisé et il contrôle la majeure partie de l'écoulement du Sénégal, entre 40 et 60% des apports (Bader et al. 2003). Le reste est assuré par l'écoulement des affluents non régulés en l'occurrence la Falémé, le Bakoye et les autres affluents. Toutefois la gestion hydraulique de l'ouvrage de Manantali est soumise à des demandes relativement contradictoires (Mietton et al, 2007). Cette contradiction réside dans la satisfaction des objectifs qui lui sont assignés. Le barrage de Manantali est destiné à produire de l'énergie et à réguler les débits (soutien d'étiage pour l'agriculture irriguée et la navigation), laminage des fortes crues, soutien des faibles crues destiné à garantir une inondation suffisante du lit majeur pour la pratique des cultures de décrue. Selon le débit des affluents non contrôlés (Bakoye, Falémé), les débits à lâcher de Manantali peuvent dépasser largement la capacité des turbines et représenter un déstockage important, ce qui pénalise à la fois la production d'énergie et la capacité de soutien d'étiage de l'ouvrage (Bader el al. 2003). Dans ce dernier cas, le volume d'eau lâché par le barrage arrivant au niveau de la station de Bakel et les écoulements des affluents qui ne sont pas contrôlés peuvent inonder la vallée. On peut se poser la question de savoir si tel était le cas en 2003. L'analyse statistique des débits par la procédure de détection de rupture des séries chronologiques des stations de Manantali et de Bakel peut nous aider à répondre à cette question.

5.1.1. Caractérisation de la tendance des débits des stations de Manantali et Bakel

Diverses études (Paturel et al. 1996 ; Lubès-Neil et al, 1998 ; Servat et al. 1999) ont utilisé les méthodes des tests de détection de rupture pour étudier la variabilité climatique en Afrique de l'ouest afin de faire ressortir la tendance à la baisse des précipitations constatées dans la zone sahélienne depuis les années 70. Récemment Hubert et al (2007), Sambou et al. (2009) se sont appuyés sur ces mêmes méthodes dans le but d'apporter d'une part, des éléments de réponse sur la continuité de la sécheresse et d'autre part, les modifications du régime hydrologique du fleuve Sénégal en amont de la station de Bakel suite à la mise en service du barrage de Manantali. Ces études sont basées respectivement sur les débits de la station de Bakel de 1903 à 2003 et sur les données des stations de Bafing-Makhana, de Kayes et Bakel pour la période allant de 1961 à 2006. L'analyse statistique de séries chronologiques des données qu'elles soient hydrologiques ou météorologiques est un des outils d'identification de variations climatiques. C'est dans ce contexte que nous l'avons privilégiée afin de détecter une éventuelle rupture pour l'année hydrologique 2003 qui est caractérisée par une crue précoce et qui a par ailleurs, poussé les autorités sénégalaises à ouvrir une brèche sur la Langue de Barbarie. L'analyse se fonde sur les données hydrologiques de 1903 à 2007 pour la station de Bakel et de 1987 à 2007 pour la station de Manantali. Bien que la série ne soit pas longue pour cette dernière, nous avons jugé nécessaire de la prendre en compte afin de détecter une éventuelle rupture en 2003. L'examen des séries porte sur les débits maxima annuels des deux stations. L'intérêt principal est d'évaluer la signification des tendances qui seront détectées. Celle-ci nous permettra de voir si ces non-stationnarités locales sont dues au hasard ou à un réel changement d'origine climatique (Pujol et al. 2007). Les procédures concernées sont la procédure de segmentation d'Hubert, le test de Buishand et ellipse de Bois et le test de Pettit. Tous ces tests sont intégrés au logiciel Khronostat, développé par l'IRD.

La taille de l'échantillon de la série de la station de Manantali n'est pas suffisamment longue (20 valeurs) pour tenir compte des modifications dans la série. Mais la segmentation de Hubert, avec comme niveau de signification 1% du test de Scheffe, a mis en évidence une rupture négative à partir de 2004. Aucune rupture n'a été détectée en 2003. La procédure de segmentation de Hubert détermine si une série chronologique est stationnaire. Au cas où elle ne l'est pas, elle la découpe en autant de sous séries homogènes que possible (Hubert et al.2007). Elle partitionne la série en deux sous-séries : 1987-2003 et 2004-2007 qui ont enregistré respectivement des débits moyens de 1619 m^3/s et 358 m^3/s (fig.5.1).

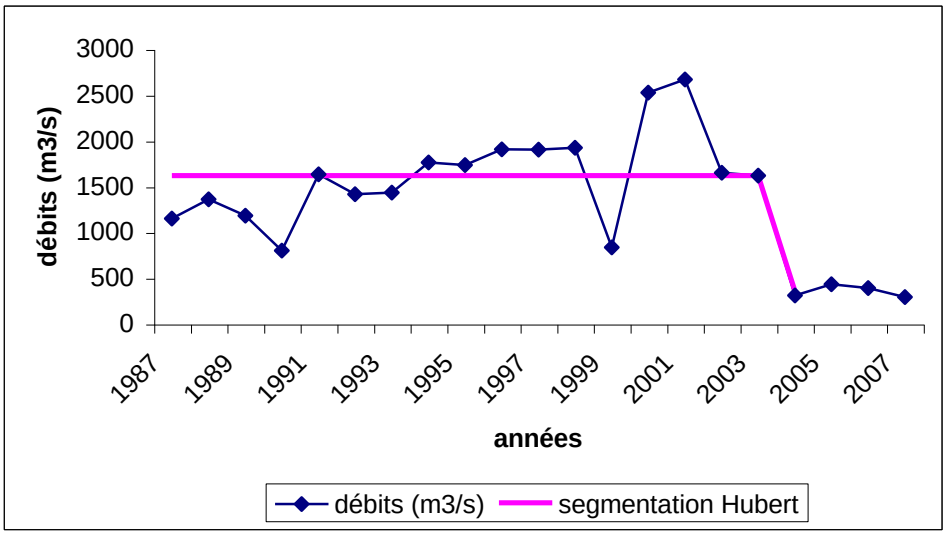


fig.5.1 : Evolution des débits du barrage de Manantali par la procédure de segmentation de Hubert (1987-2007)

Le test de Buishand (1982, 1984) est basé sur la somme des écarts à la moyenne. Pour la position du point de rupture *t*, la statistique *U* de Buishand est définie par Paturel et al. (1996) et Servat et al. (1999) :

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} Sk/D\chi}{N(N+1)} \qquad \text{où} \qquad S_k = \sum_{i=1}^{k} (x_i - \bar{x})$$

Pour k = 1, …, N et Dχ désigne l'écart type de la série

En cas de rejet de l'hypothèse nulle (absence de rupture), le test ne propose aucune estimation de la date de rupture. Outre cette procédure, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser l'homogénéité de la série de (xi) (Paturel et al. 1996 ; Servat et al. 1999). Cette méthode du cumul des résidus élaborée par Bois (1971) permet de déceler des points aberrants ainsi que des périodes hétérogènes provenant soit des erreurs de mesures, soit de changements d'appareillage ou de phénomène naturels. « Le tracé du cumul des résidus est une courbe partant de (0,0) aboutissant à (n, 0) où chaque valeur ajoutée de Z correspond au résidu de l'observation correspondante :

$Z_k = Z_k\text{-}1 + e_k$

Si les séries sont homogènes et si les observations sont indépendantes, le tracé de Zk en fonction de k va donner une courbe oscillant autour de l'axe des abscisses » (Bois, 1986).

Le test de Buishand et ellipse de Bois fait ressortir une hypothèse nulle qui est rejetée au seuil de 90%. En revanche, l'absence de rupture est acceptée au seuil de 95 et 99%. La statistique *U* est marquée par une hétérogénéité, elle est plutôt négative de 1986 à 1994 et plutôt positive de 1996 à 2007. La figure 5.2 montre cette hétérogénéité. La série n'est pas stationnaire. Sous l'hypothèse de stationnarité, elle doit être proche de zéro sans atteindre les grandes valeurs (Lang et Lavabre, 2007).

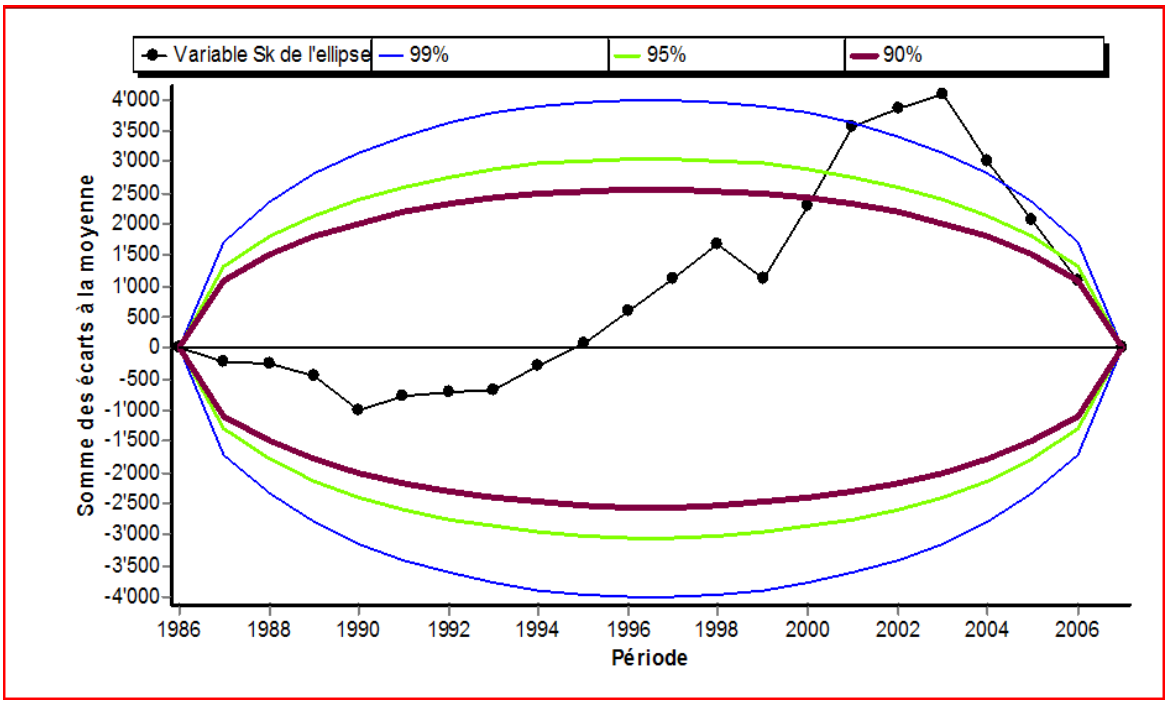


Fig.5.2 : Ellipse de contrôle de Manantali (1987-2007)

Le test de Pettitt (1979) est non paramétrique et dérive du test de Mann-Whitney. Il consiste à découper la série principale de N éléments en deux sous séries à chaque instant t compris entre 1et N-1. La série principale présente une rupture à l'instant t si les deux sous séries ont des distributions différentes.

Le test de Pettitt n'a détecté aucune rupture, l'hypothèse nulle (absence de rupture) est acceptée au seuil de confiance de 90, 95 et 99%. Quoique cette méthode ne soit pas adaptée à la recherche de plusieurs ruptures dans une même série (Servat et al. 1999), elle est plus sensible à un changement de moyenne (Lubès-Neil et al. 1998). Seulement, ce dernier n'a pas été détecté, cela peut s'expliquer par la taille de l'échantillon qui est assez faible.

En revanche, pour la station de Bakel, le test de Pettitt indique que l'hypothèse nulle est rejetée aux seuils de confiance de 90, 95 et 99%. Il situe la rupture en 1967 avec comme probabilité de dépassement de la valeur critique de $1.16E^{-8}$. D'après Sambou et al. (2009) cette rupture correspond au changement climatique dont l'ampleur semble masquer l'effet pourtant réel du fonctionnement du barrage sur le régime hydrologique. Mais nous parlerons plutôt de variabilité climatique liée à la dynamique de la mousson africaine qui se caractérise par des perturbations climatiques (sécheresse, inondation…) dans le temps et dans l'espace. Cependant, il est toutefois difficile d'évaluer cette variabilité bien que l'un de ses facteurs climatiques dominant qui est la Mousson de l'Afrique de l'Ouest soit connu. La raison est due aux interactions complexes entre l'atmosphère, la biosphère et l'hydrosphère qui semblent contrôler la dynamique de la Mousson Africaine et le cycle de vie des systèmes pluviométriques (AMMA, 2002). D'ailleurs, le climat ouest africain fait actuellement l'objet d'études approfondies, notamment dans le cadre du Programme AMMA avec l'espoir de lever les incertitudes sur le lien entre la mousson et le climat à l'échelle globale, et sur les impacts de la variabilité climatique sur les sociétés locales (Hamndou et Desjardins, 2008).

L'hypothèse nulle est rejetée aux seuils de confiance de 90, 95 et 99% pour le test paramétrique de Buishand et l'ellipse de bois. La série est considérée comme non stationnaire, la somme des écarts à la moyenne fluctue au dessus de zéro. Aucune rupture n'est détectée par le test (fig.5.3).

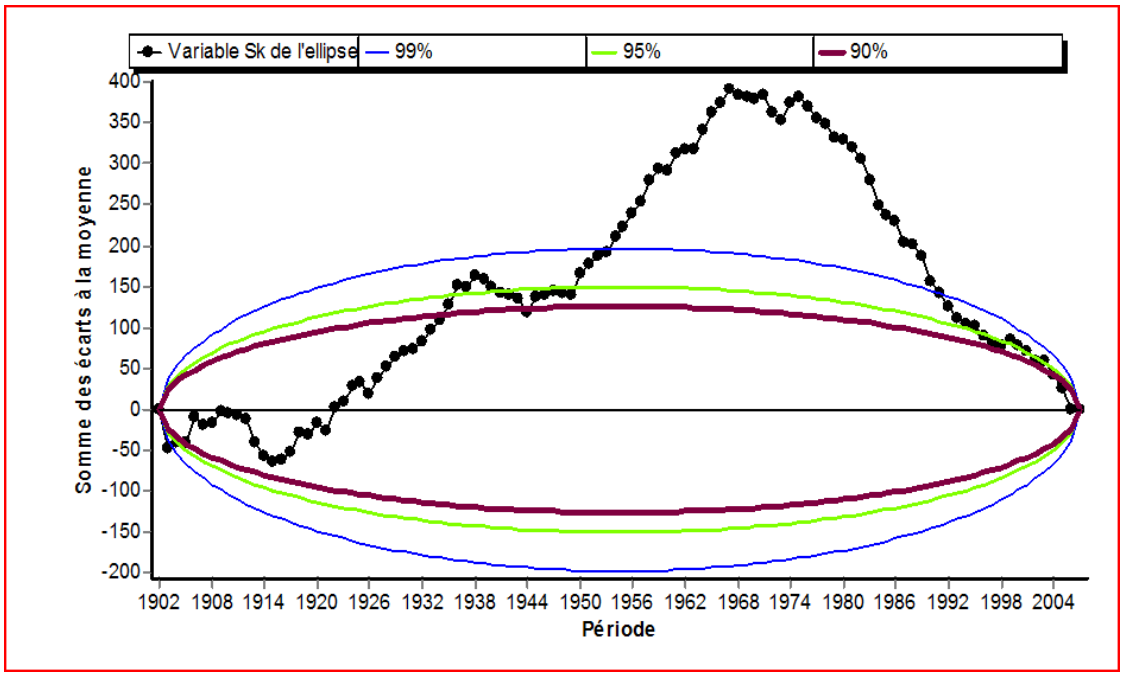


Fig.5.3 : Ellipse de contrôle de la station de Bakel (1903-2007)

La segmentation de Hubert, avec un niveau du test de signification de Scheffé de 1%, met en évidence deux périodes significatives de 1903 à 1967 et 1968 à 2007 qui enregistrent respectivement des moyennes de 776 m^3/s et 448 m^3/s (fig.5.4).

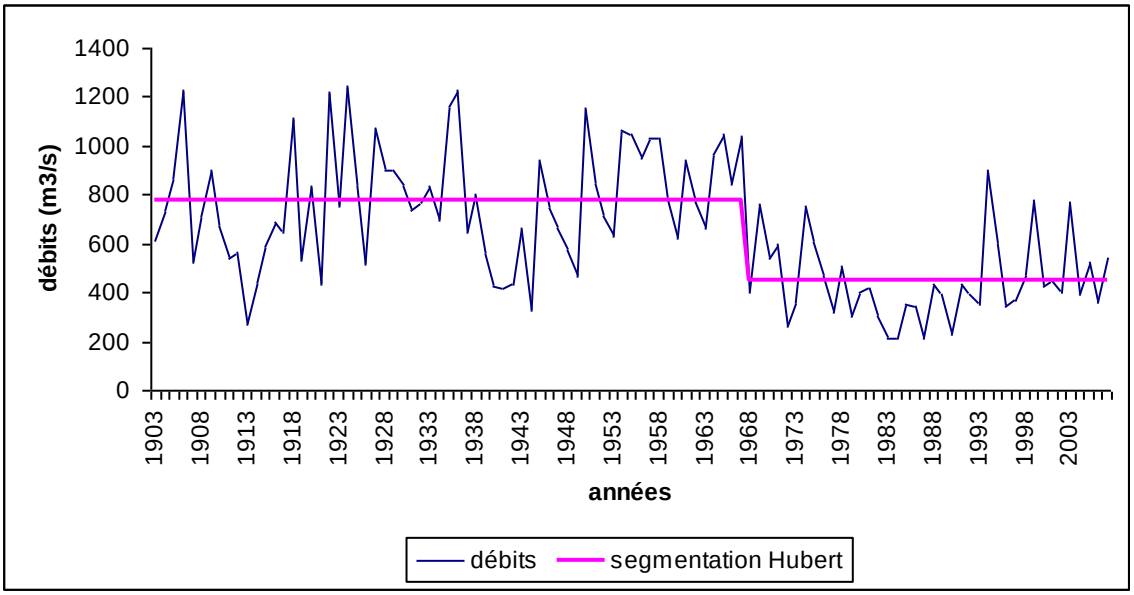


Fig.5.4 : Evolution des débits de la station de Bakel par la procédure de segmentation de Hubert (1903-2007)

Toutefois Hubert et al. (1998) ont détecté pour la période de 1903 à 1993 quatre périodes de rupture dont deux positives (1921-1922 ; 1949-1950) et deux négatives (1936-1937 ; 1967-1968). L'application de la procédure de segmentation effectuée par Hubert et al. (2007) à la série 1904–2003 confirme ces mêmes résultats. Il est assez remarquable de voir sur la fig.5.4 que les débits sont caractérisés par une forte variabilité interannuelle. Tenant compte de cette situation la segmentation effectuée par Hubert et al. (1998, 2007) a découpé la série en autant de sous séries homogènes. Alors que la segmentation que nous avons effectuée a détecté les grands changements de la moyenne qui sont provoqués par la sécheresse. La non-conformité des résultats peut s'expliquer par l'approche différentielle. Ils ont considéré les débits moyens annuels afin de caractériser la sécheresse alors que nous avons mis l'accent sur les débits maxima annuels pour voir s'il y a un changement dans la série qui serait provoquée par les actions anthropiques (barrage de Manantali) mais aussi s'il y a une rupture pour l'année 2003. Toutefois les tests (Hubert et al. et les nôtres) n'ont détecté aucune rupture durant les années 90 qui sont pourtant marquées par une hausse du débit. Quoique la figure 5.4 montre une certaine remontée des débits à partir des années 1990 elle ne se traduit pas dans les résultats de la segmentation (Hubert et al. 2009). Par conséquent, même si les débits à Bakel ont été significatifs durant cette période, ils ne sont pas aussi importants que ceux des années avant 1970.

Au total, l'analyse statistique montre qu'aucune rupture n'est détectée pour l'année 2003 au niveau des deux stations. L'importance de la crue de 2003 est-elle le résultat de la combinaison d'autres facteurs qui entrent en jeu favorisant le risque d'inondation dans la

zone du delta ? Une analyse plus détaillée de la situation hydrologique du fleuve durant cette période nous permettra de donner des éléments explicatifs.

5.1.2. La situation hydrologique du fleuve Sénégal en 2003

En 2003, la cote maximale en période de crue de 208.07 m était atteinte au niveau du barrage de Manantali le 17 septembre. Mais le remplissage de la réserve s'est poursuivi jusqu'à la date du 25 décembre 2003 (fig.5.5). A partir de cette date, le volume stocké a connu une baisse de l'ordre de 1 milliard de m^3 et le réservoir avait une cote de 207 m. Lorsque la retenue du barrage dépasse la cote 208.05 m, cette situation impose un déversement par les vannes de surface destiné à éviter la submersion de ces dernières (OMVS, 2003). Cette cote constitue la limite maximale du lac permettant de conserver les vannes secteur de déversoir fermées (Bader, 1997). Dès lors nous pouvons affirmer que le barrage de Manantali a permis un laminage positif de la crue puisque des débits de plus 1000 m^3/s n'ont été lâchés que sur une période de neuf jours à compter du 18 au 26 septembre. Les débits enregistrés en aval du barrage sont restés bien inférieurs à 900 m^3/s durant le mois d'octobre sauf pour la période du 5 au 8 octobre.

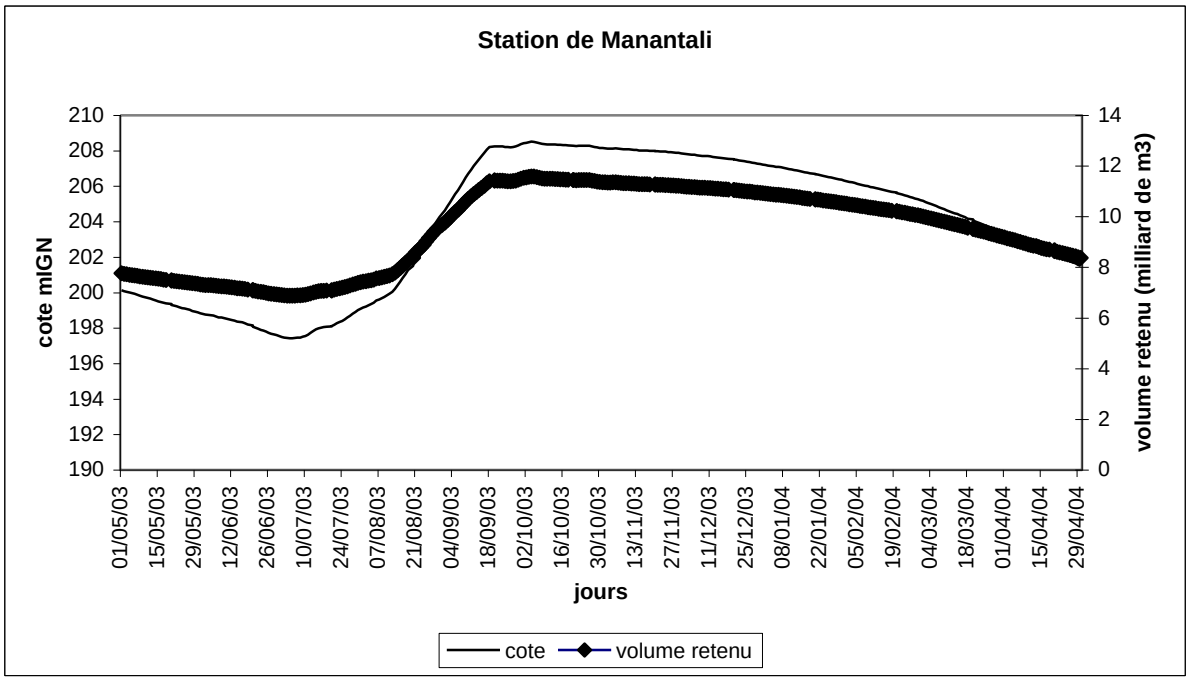


Fig.5.5 : Cotes et volumes journaliers enregistrés au barrage de Manantali (2003-2004)

Pourtant l'ouvrage a pour autre rôle de soutenir des crues qui permettent une inondation du lit majeur dans la vallée pour la pratique des cultures traditionnelles de décrue. Le 20 août, le plan d'eau était à 201,67 m, soit un volume de l'ordre de 8 milliards de m^3 et une surface de

retenue de 424 km^2. Lorsque la retenue est pleine, elle atteint une surface de l'ordre de 500 km^2, le barrage devait donc poursuivre le remplissage de son réservoir pour les besoins de turbinage. Ainsi le barrage, en assurant cette fonction, a par ailleurs permis de laminer des crues et nous convenons avec Altinbilek (2002) que ces ouvrages constituent des éléments essentiels pour la maîtrise des crues.

Par ailleurs, la station de Bakel avait déjà enregistré un débit de plus de 2800 m^3/s à la date du 09 août 2003, alors que le minimum nécessaire pour produire une crue selon Adams (2000) est de l'ordre de 2500 m^3/s. A la même période, le barrage de Manantali n'avait évacué qu'un débit de 200 m^3/s. Le barrage n'ayant pas réalisé de soutien de crue, les débits lâchés n'étaient pas significatifs. En cas de faible hydraulicité, le soutien de crue peut également nécessiter des débits lâchés trop forts pour être totalement turbinés (Lamagat et Bader, 2003). Tel n'était pas le cas en 2003 où la station de Bakel a enregistré des débits importants, raison pour laquelle le barrage de Manantali n'a pas effectué de lâchers importants afin d'éviter la submersion de la partie aval de l'ouvrage (Kane et al. 2010). En conséquence la crue de 2003 peut être qualifiée de naturelle puisqu'elle pourrait provenir d'une part des deux affluents non régularisés (Falémé et Bakoye) du fleuve et des précipitations importantes enregistrées à la station de Bakel.

La Falémé à Kidira et le Bakoye à Oualia ont enregistré des débits de plus 1000 m^3/s à partir du mois d'août (fig.5.6). Malgré les légères fluctuations, l'écoulement était important, le maximum journalier a été de 1400 m^3/s à la date du 09 septembre à la station de Kidira.

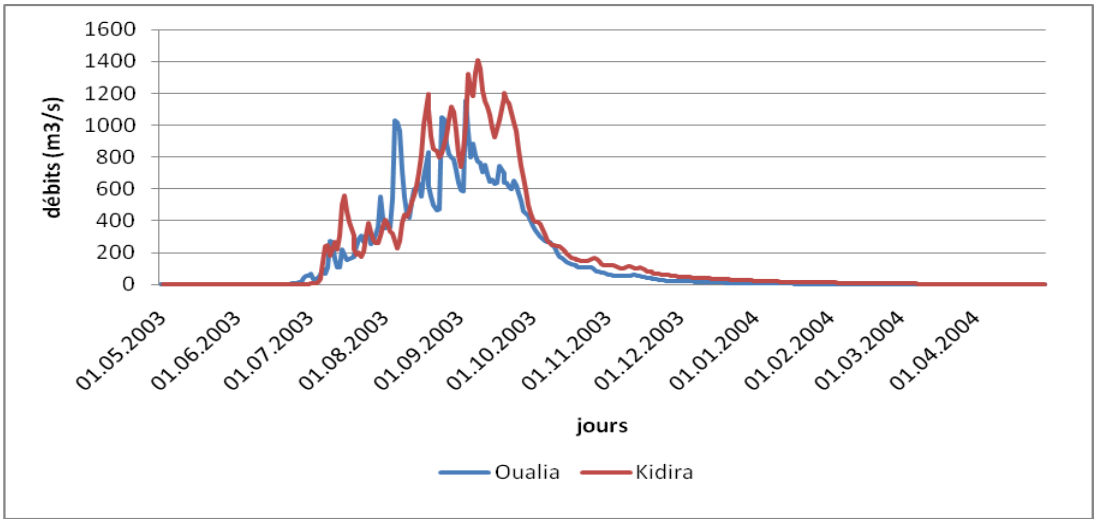


Fig.5.6 : Débits enregistrés au niveau des affluents non contrôlés (Falémé et Bakoye)

De surcroît, les précipitations enregistrées à la station de Bakel ont contribué de façon significative à amplifier la crue de cette année. Le mois d'août a enregistré un cumul de 360 mm de pluie, le débit de pointe à Bakel atteint plus de 3600 m^3/s enregistré à la première onde crue. Le nombre de jours de pluie annuel est de 51 pour cette année, ce qui était

largement supérieur aux années précédentes où il n'a plu que sur 29 jours pour 2002. La figure (5.7) montre que les quantités d'eau précipitée enregistrés à Bakel ont contribué à l'augmentation du débit.

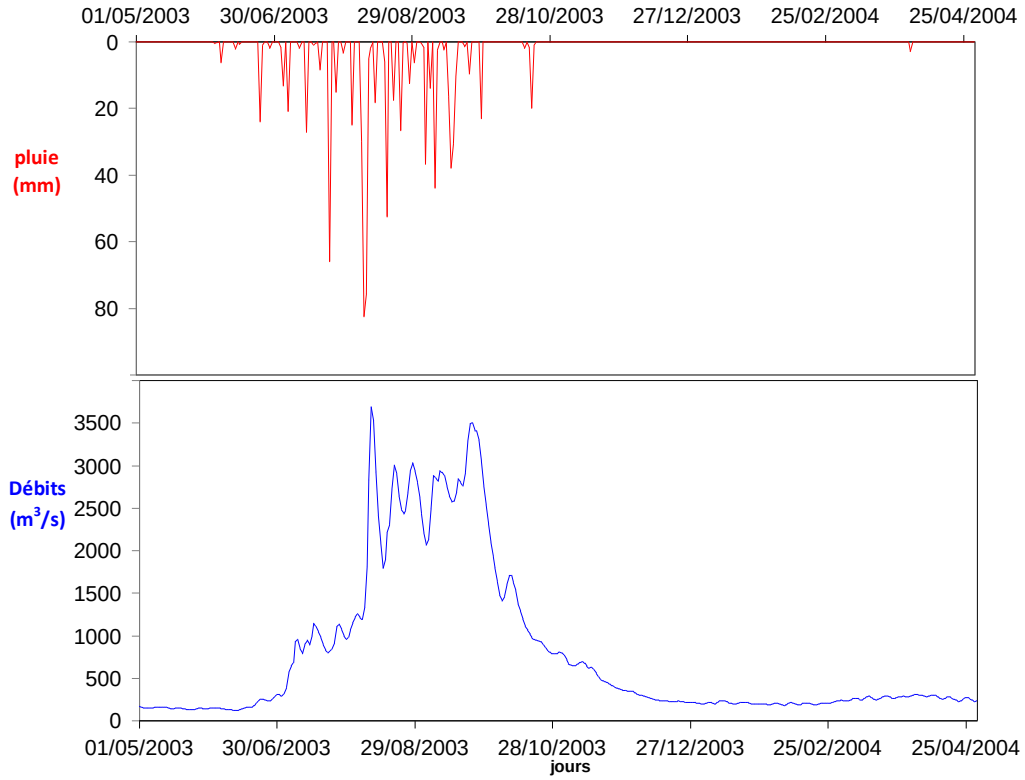


Fig. 5.7 : Crue à la station de Bakel (2003-2004)

La situation hydrologique du fleuve en 2003 favorise l'apparition de cinq ondes de crue à la station de Bakel :

- première crue : 10 août avec 3692 m^3/s ;
- deuxième crue : 20 août avec 3008 m^3/s ;
- troisième crue : 28 août avec 3036 m^3/s ;
- quatrième crue : 10 septembre avec 2920 m^3/s ;
- cinquième crue : 23 septembre avec 3504 m^3/s.

Comparativement aux années précédentes, la situation hydrologique a été jugée excédentaire. Le débit moyen mensuel est de 2300 m^3/s en août et 2800 m^3/s en septembre contre 956 m^3/s et 1571 m^3/s en 2002. En 1999, par exemple où la situation hydrologique a été caractérisée par une crue importante, la cote à Bakel avait atteint 10,91 m enregistrée le 30 août alors qu'elle était de 10,22m le 11 août 2003. Aussi, les ondes de crue étaient au nombre de trois enregistrées en août, septembre et octobre, ce qui est nettement inférieur à celles observées en 2003.

Le niveau du fleuve à la station de Bakel a influé sur les différentes stations au niveau de la vallée, en amont du barrage de Diama (Matam, Podor, Dagana) où nous avons observé une tendance à la hausse (fig.5.8), à partir du mois d'août. Mais les hauteurs maximales sont enregistrées en septembre (Matam) et octobre (Podor et Dagana) avec des valeurs respectives de 837, 575 et 380 cm.

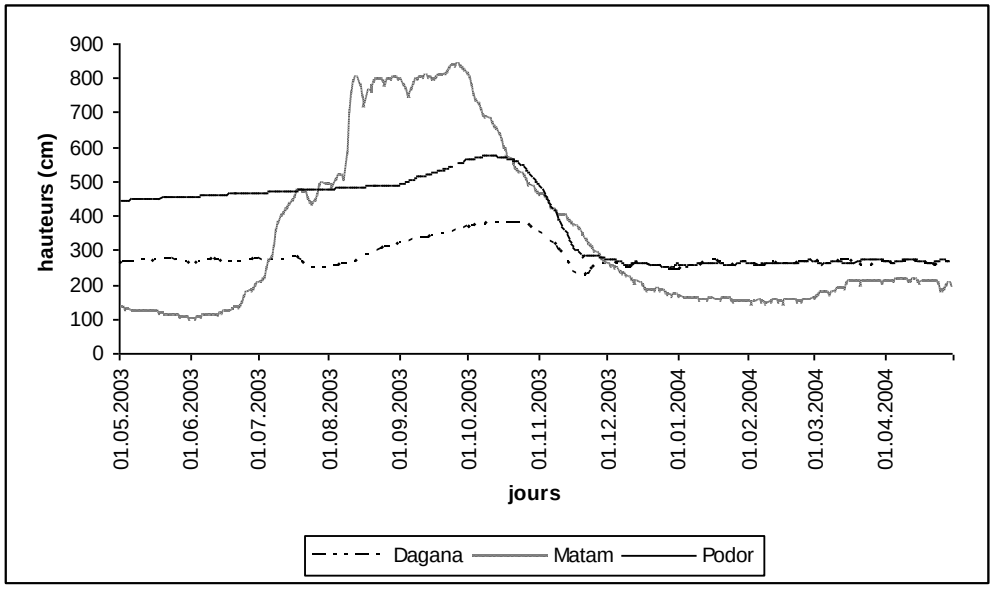


Fig.5.8 : Hauteurs d'eau enregistrées dans la vallée

Consécutivement à cette situation, le débit évacué par le barrage de Diama était supérieur à 1500 m^3/s dès le mois de septembre, le maximum a été observé le 30 avec 1973 m^3/s. A partir du 9 octobre, les débits étaient supérieurs à 2000 m^3/s excepté le 31 où le débit est égal à 1998 m^3/s. Le barrage de Diama est ainsi soumis dans son fonctionnement à des crues non laminées par le barrage de Manantali du fait notamment des écoulements de la Falémé et du Baoulé qui lui échappent (Mietton et al. 2007).

A l'instar des aménagements, les précipitations abondantes de ces dernières années ont beaucoup contribué à améliorer les débits au niveau du fleuve Sénégal. C'est dans cette optique que Sène et Ozer (2002) soulignent que l'espoir de retrouver un Sahel reverdi semble renaître avec le regain des activités pluvieuses et des cumuls pluviométriques supérieurs à la normale des années 1961-1990. Toutefois peut-on parler d'un retour à la normale, avec ces quelques années pluvieuses ou n'est-ce qu'une anomalie dans la continuité de la phase sèche ?

5.2. Les fluctuations climatiques, des déterminants dans la gestion des risques

De nombreuses études récentes ont montré que la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest se traduit par une baisse des précipitations. C'est le cas notamment de l'étude de Lebel et Ali (2009), Mahé et Paturel (2009) qui ont démontré que dans la zone sahélienne de l'Afrique de l'Ouest les conditions sèches sont toujours de rigueur. Ces derniers auteurs soulignent que les pluies ont effectivement augmenté au Sahel depuis la fin des années 1990, mais leur moyenne annuelle reste aussi basse que durant la sécheresse des années 1970. Toutefois, pour la station de Bakel la variabilité pluviométrique se traduit par une tendance à la hausse (fig. 5.9). Le maximum pluviométrique a été enregistré durant la période récente avec 811 mm en 2003.

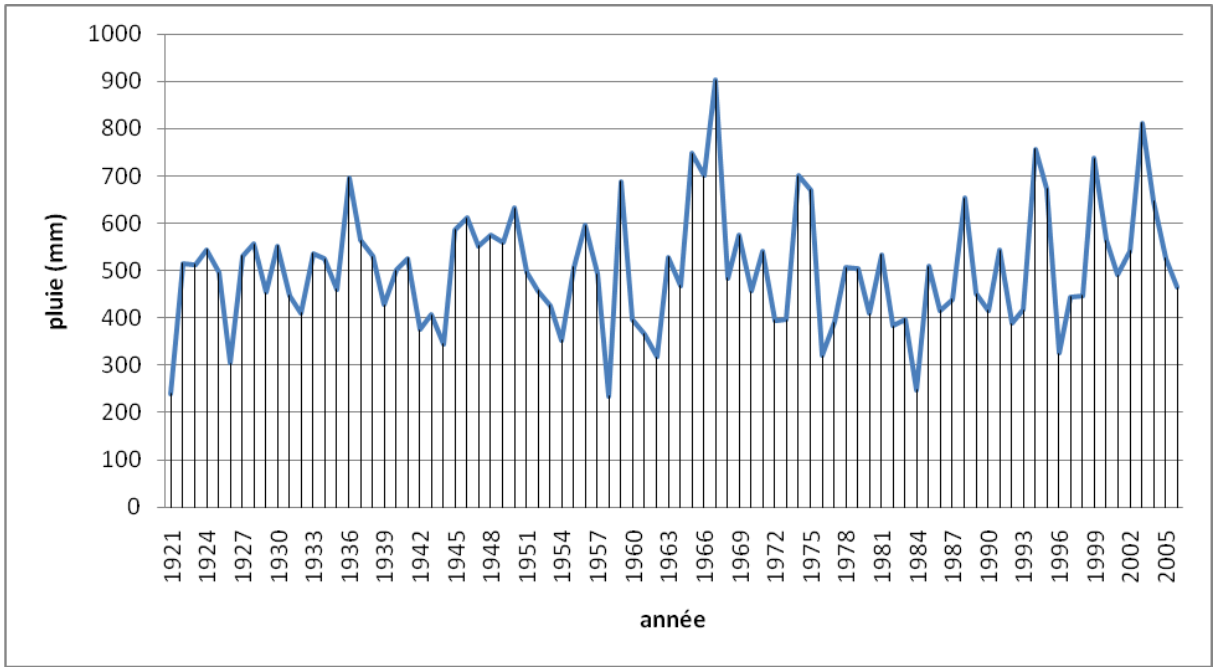


Fig. 5.9 : Evolution inetrannuelle de la pluviométrie de la station de Bakel (1921-2006)

La durée de la sécheresse a poussé le système à s'adapter face à l'aléa. Ainsi toute perturbation climatique a pour effet d'exacerber une vulnérabilité. Mais la plupart des modèles réalisés dans la zone sahélienne prévoient que la région sera plus sèche au cours du 21ème siècle (Kandji et al, 2006). C'est ce qu'a démontré Hunt (2000) qui a simulé une extension de la sécheresse qui prévaut au Sahel depuis ces dernières décennies. De même les anomalies reproduites par les précipitations du Sahel sont semblables à celles observées dans les années 1970. En particulier, les périodes sèches et humides de longueur décadaire débutant dans les années 50 ont été reproduites par le modèle. La variabilité des précipitations dans les régions ouest-africaines du Sahel et du Soudan montre une faible évolution de la pluviométrie (Nicholson, 2000). Dans cette perspective, nous pouvons

affirmer que les précipitations de 2003 qui ont généré une crue importante peuvent être considérées comme une anomalie détectée dans la séquence sèche de la variabilité climatique qui est de rigueur au Sahel[6]. Cette hypothèse est confirmée par Dai et al (2004) qui stipulent que la pluviométrie du Sahel a effectivement connu une certaine reprise en 2003, même si la sécheresse n'est pas terminée dans la région. Les oscillations climatiques semblent être plus fréquentes et extrêmes après la fin des années 1980 que précédemment.

Si la vulnérabilité est considérée comme un facteur permettant de comprendre que les personnes ayant le même niveau d'exposition physique aux aléas naturels sont plus ou moins menacées (Peduzzi, 2006) la variabilité climatique semble être un cas assez illustratif de vulnérabilité socio-environnementale. Les perturbations météorologiques se traduisent le plus souvent par une vulnérabilité de la société qui ne prend pas toujours en compte le facteur risque. Ce dernier est appréhendé comme se rapportant aux catastrophes liées au climat, déclenchées par les aléas climatiques ou météorologiques (tempêtes, sécheresses, précipitations extrêmes, etc.) mais médiatisé par la sensibilité ou la vulnérabilité des systèmes exposés (Brooks et al. 2005). Aussi, les catastrophes causées par des conditions environnementales extrêmes se distinguent dans le temps et dans l'espace (à l'exception des catastrophes liées à la désertification) et présentent une situation où les effets immédiats ont tendance à dépasser les capacités de la population touchée et dans ce cas des interventions rapides sont nécessaires (Thomalla et al. 2006). Ainsi, face à une certaine gravité et une certaine récurrence des inondations dans la ville de Saint-Louis, l'ouverture de la Langue de Barbarie a été la seule alternative pour sauver Saint-Louis. Mietton et al. (2007) se sont posé la question de savoir si ce n'est pas la vulnérabilité des populations qui a changé plus que l'aléa hydrologique. Dans cette même optique, Ghio (1995) affirme que la gravité des aléas hydrologiques a été amplifiée par les activités humaines. Les conditions environnementales du système déterminent son degré d'exposition (Turner et al. 2003). Les populations de Saint-Louis ont contribué inconsciemment à amplifier les risques en occupant des zones inondables. Aussi les aléas qui agissent sur le système découlent des facteurs internes.

Aujourd'hui, de nombreuses sociétés sont encore mal préparées à faire face aux événements extrêmes (Thomalla et al. 2006). L'occurrence de ces derniers est de plus en plus déterminée par la coïncidence des événements hydro-climatiques tels que des précipitations et un environnement modifié par les activités humaines (Bogardi, 2004). Toutefois, pour réduire les effets dommageables des catastrophes, les ingénieurs proposent depuis plusieurs siècles une stratégie qui vise à améliorer la résistance d'un système socio-environnemental face à un aléa. Pour cela, ils établissent des prévisions de plus en plus

[6]Bien que le régime du fleuve Sénégal soit essentiellement déterminé par les précipitations dans le haut bassin, qui est par ailleurs caractérisé par le domaine guinéen, les précipitations à la station de Bakel (domaine sahélien) ont largement contribué au rehaussement du cours d'eau en 2003.

précises de l'aléa, puis ils persuadent les élus d'édifier un équipement de défense qui doit protéger la société contre l'effet déstabilisateur de l'aléa (Dauphiné et Provitolo, 2004). Ce qui n'est pas le cas pour la ville de Saint-Louis. Nous l'avons évoqué dans le chapitre 3, la perception du risque est une donnée non intégrée par la société, les mesures visant à atténuer les risques d'inondation n'ont été prises que dans les années 90 et leur inefficacité à pousser les autorités à abaisser le niveau du plan d'eau par une délocalisation de l'embouchure en 2003.

5.3. La coupure de la Langue de Barbarie

Les débits de plus de 1500 m^3/s évacués par le barrage de Diama en septembre 2003 ont inondé une partie de la ville de Saint-Louis. Le niveau du plan d'eau à Saint-Louis a atteint la cote d'alerte (1,75 m) dès le 1 septembre alors qu'à partir de 1,50 m tous les points bas de la ville sont inondés. Dans certains secteurs urbains, à la cote 1,20 m, les inondations se produisent comme c'est le cas en particulier de zones situées dans le sud de la ville (fig.5.10).

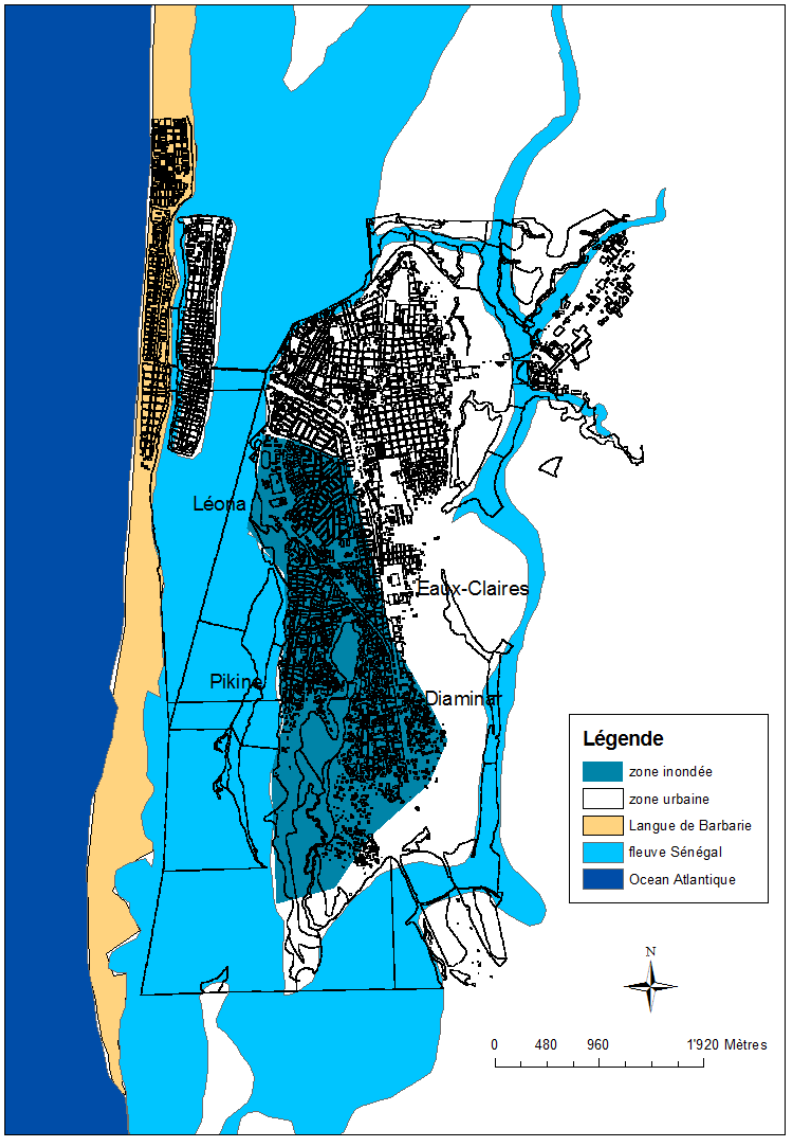


Fig. 5.10 : Quartiers inondés en septembre 2003

Ces quartiers qui comptent une population de plus de 50 000 habitants sur une population totale d'environ 174 000 habitants se sont retrouvés dans des situations précaires, suite à la première onde de crue évacuée par le barrage de Diama. Ces populations vivent l'inondation dans une angoisse permanente avec des difficultés de déplacement, les risques d'infections et de maladies et l'inconfort que représente le fait de vivre "les pieds dans l'eau".

Depuis la première décade du mois d'août, la montée progressive du niveau du plan d'eau a été effective au niveau des stations de Diama aval et de Saint-Louis (fig.5.11). Sur près d'une quarantaine de jours, entre mi-août et début octobre, la station de Saint-Louis a enregistré de hauteurs d'eau supérieures à 1 m. Cette situation commence à être préoccupante à la mi-septembre, période à partir de laquelle le niveau du fleuve est constamment resté entre les cotes 1.80 m et 1.95 m, soit 1.27 et 1.42 m IGN.

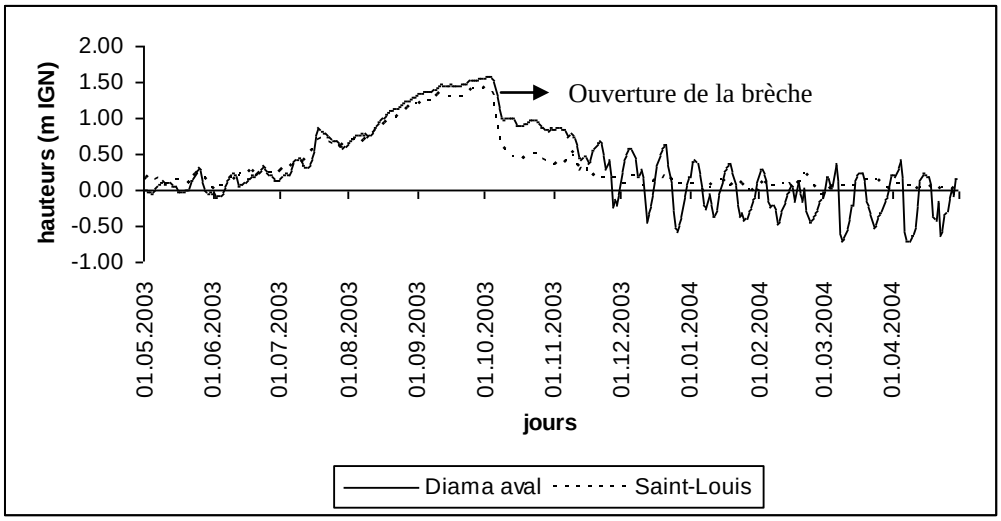


Fig.5.11 : Hauteurs d'eau des stations de Saint-Louis et Diama aval (2003-2004)

Le barrage de Diama devait encore effectuer d'autres lâchers en direction du bas estuaire suite aux autres ondes de crue qui devaient arriver au niveau de la station. Ces débits amplifieraient le niveau d'inondation de la ville déjà perceptible dans les quartiers sus mentionnés. Mietton al. (2007) remarquent que la crue de 2003 bien que majeure n'était pas exceptionnelle par rapport à 1999 et 1950. Les maximums limnimétriques enregistrés à Saint-Louis en 2003 (1.42 m IGN) ont été largement dépassées par ces années (respectivement 1.65 m IGN et 1.79 m IGN). L'extension de l'habitat dans les quartiers topographiquement bas (cf. chapitre 3) n'augmentent-elles pas les risques ? Nous répondrons par l'affirmative dans la même perspective que Schanze et al. (2004) qui soulignent que les dommages par les risques d'inondation dépendent de la vulnérabilité des éléments exposés surtout s'ils sont installés au niveau des réceptacles des eaux. La ville de Saint-Louis est ainsi fragilisée du fait de cette occupation anarchique liée à une croissance démographique très marquée. L'impact des inondations et le nombre de personnes touchées au niveau de ces zones peuvent augmenter en raison de l'ampleur de la catastrophe, du degré d'exposition des personnes qui seront touchées (Nicholls, 2004). Ces éléments ne font qu'exacerber une vulnérabilité déjà perceptible. Ainsi la ville de Saint-Louis ne se trouve pas à l'abri d'une grande crue. Nous convenons avec Ghio (1995) que ce sont les conséquences des crues qui sont aggravées par les actions de l'homme, du fait de la non prise en compte des risques d'inondation, beaucoup plus que leur fréquence et leur abondance qui dépendent des conditions climatiques. Les réponses apportées par la société ont consisté à réduire cet endommagement potentiel par un rapprochement de l'embouchure.

Dans la nuit du 03 au 04 octobre 2003, plus précisément de minuit à 08 heures du matin un canal de délestage de 100 m de long, 04 m de large et 1,5 m de profondeur est ouvert sur la Langue de Barbarie (photo 5.1) pour évacuer le surplus fluvial vers la mer. Au moment de la

coupure du cordon littoral, le débit de déversement du fleuve au niveau de Diama était de l'ordre de 1940 m^3/s et l'amplitude de la marée fluviale à Saint-Louis était de 0.01 m. Quant à la marée océanique, elle était à un niveau bas, soit une hauteur de 0,84 m enregistrée de 21 heures 24 à 04 heures 29. C'est à partir de cette heure que la marée a commencé à monter de l'ordre de 1,33 m. Pendant le passage du débit maximum à Diama, l'amplitude de la marée à Saint-Louis est faible ; elle représente environ 10% de l'amplitude de la marée observée dans l'océan. Vers la fin de la période des lâchers du barrage, l'amplitude de la marée augmente, elle est d'environ 35% de l'amplitude observée dans l'océan (PNUE/UCC-Water/SGPRE, 2002).

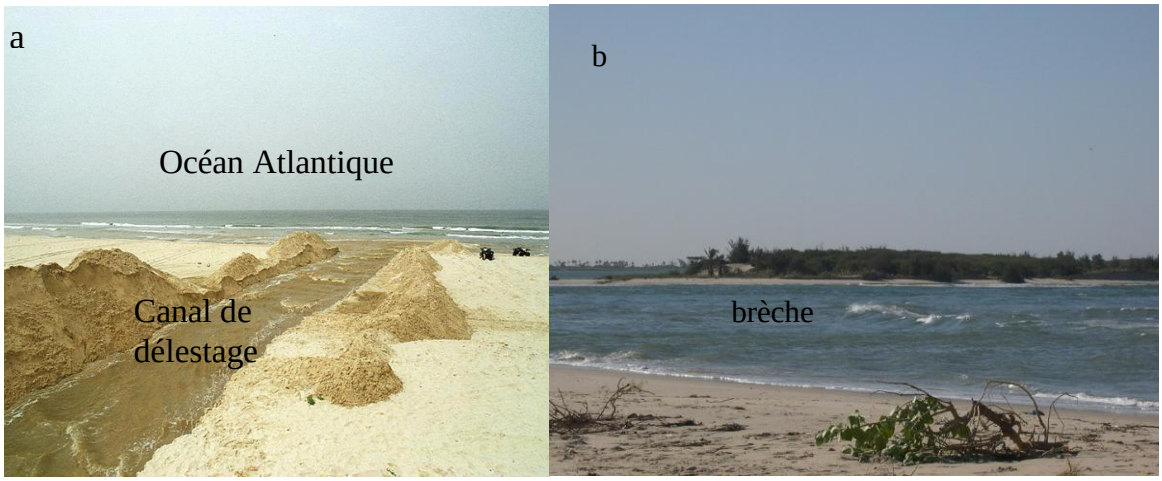


Photo 5.1 : Ouverture du canal de délestage a : 4 m de large 3 Octobre 2003 b : 604 m 18 janvier 2004 (DGPRE)

La brèche ainsi ouverte à environ 7 km de la ville de Saint-Louis a fait baisser le niveau du plan d'eau à la station de Saint-Louis de 1,95 m à 1 m en l'espace de 48 heures. Avec des débits journaliers supérieurs ou avoisinant les 2000 m^3/s évacués par le barrage de Diama, au cours du mois d'octobre 2003 la ville de Saint-Louis et ses environs n'ont plus connu d'inondation. L'ouverture de la Langue de Barbarie a, de ce fait, constitué une solution de taille pour résoudre les débordements fluviaux. Deux années suivant le creusement du canal de délestage, le niveau d'eau à Saint-Louis n'a pas dépassé 50 cm, bien que les débits évacués par le barrage de Diama n'aient pas changé par rapport aux années précédentes (Dumas et al. 2010). Par ailleurs, les inondations fluviales sont en partie consécutives à l'extension de la Langue de Barbarie vers le sud qui favorise une évacuation difficile des eaux de crue en mer.

5.4. Le déplacement de l'embouchure vers le sud : facteur d'aggravation des inondations

La position de plus en plus méridionale de la Langue de Barbarie est souvent évoquée pour expliquer les fréquentes inondations de la ville de Saint-Louis ces dernières années. L'embouchure du fleuve Sénégal est sujette à une évolution naturelle vers le sud. Les forts courants marins entraînent une sédimentation marine obligeant le fleuve à éroder la côte et occasionnant, de ce fait, l'allongement de la Langue de Barbarie. Elle est soumise à l'action de la houle marine, de la dérive littorale, les vagues, les marées et les courants qui commandent son évolution. De 1850 à nos jours, vingt ruptures d'inégale importance ont été enregistrées sur la Langue de Barbarie. Les plus notables ont eu lieu en 1894 et 1959, la plus récente est intervenue en 1973. Depuis cette date, le cordon littoral de la Langue de Barbarie a connu une certaine stabilité malgré de nombreuses zones de faiblesses susceptibles de rompre. Néanmoins depuis 1973, aucune rupture n'a été enregistrée. Cette situation découlerait entièrement ou en partie à l'artificialisation du régime du fleuve, notamment par la construction des deux grands barrages (Diama et Manantali) (Niang, 2002). A ce propos, Kane (1997) soulignait que depuis 1985, aucune rupture du cordon sableux par la dynamique fluviale ou marine n'a été enregistrée, même si l'extension méridienne et l'érosion sur les rivages internes et externes sont encore réelles (annexe 3 l'évolution de l'embouchure). Une stabilisation précaire est observée dans l'évolution du littoral sans que l'on ne sache si le cycle des ruptures va reprendre. Le fonctionnement du barrage de Diama se répercute sur l'évolution d'ensemble de l'estuaire. Gac et al. (1982) estiment que les possibilités de son extension sont limitées à 30 km, au-delà, elle devient vulnérable et se rompt sous la poussée fluviale. Cette limite maximale a été atteinte en 2002 cependant elle se dirigeait inexorablement vers Ndiayam empiétant largement dans la région de Louga. Au moment de l'ouverture de la brèche, elle avait même atteint 32 km en référence au point kilométrique du pont Faidherbe. L'éloignement de l'embouchure par rapport à la ville de Saint-Louis entraîne une faible vitesse d'écoulement de l'ordre de 0,4 m/s, soit une durée de 24 heures pour que les eaux de crue se propagent en mer. Cette perte de charge est à l'origine des débordements fluviaux au niveau des points bas. Dans le temps, le déplacement de l'embouchure vers le sud était accompagné du dragage du fleuve, mais celui-ci n'est plus effectué depuis la période coloniale, en conséquence, les sédiments s'accumulent aux extrémités de l'embouchure et les eaux de crue ont du mal à s'évacuer en mer.

Les travaux du projet Campus de Michel et al. (1993), de Kane (1997), de Barusseau et al. (1998) ont largement abordé les phénomènes de sédimentation dans l'estuaire du fleuve Sénégal et de l'extension de la Langue de Barbarie vers le sud. Cette extension vers le sud en fonction de la sédimentation contribue à piéger les eaux de crue au niveau du bas estuaire. Cette sédimentation au niveau des estuaires tropicaux est assurée par une combinaison de plusieurs facteurs tels les variations périodiques de la marée, le débit fluvial,

la salinité et les processus physico-chimiques (Capo et al. 2006). En période de crue, bien que le transport des sédiments soit plus élevé, il semble peu probable que des quantités énormes de sédiments se déposent. Les eaux douces rencontrant les eaux salées, les sédiments ont tendance à s'agglutiner (floculation) formant ainsi des particules plus grosses d'un diamètre moyen de 0,02 mm; les vitesses de précipitation sont alors 10 fois plus élevées. La conséquence de cette évolution est alors le rétrécissement de la largeur de chenaux. L'exemple souvent donné en référence est l'évolution du petit bras du fleuve Sénégal à Saint-Louis dont la largeur est passée de 365 m en 1749 à 94,5 m en 1976 à la suite d'un intense alluvionnement. L'exhaussement du lit du fleuve à cet endroit a été rapide, le fond n'est plus qu'à 5,50 m au maximum de la crue annuelle (Kane, 1997). La flèche sableuse est ainsi soumise à un intense alluvionnement qui fait que la profondeur du bief diminue considérablement, empêchant un déversement correct des eaux en mer et occasionnant des inondations à Saint-Louis (Dia, 2000).

D'autre part, les barrages réduisent les apports de sédiments provenant des fleuves à de nombreuses zones côtières (Kondolf, 1997). C'est le cas par exemple du barrage d'Assouan construit sur le Nil qui a arrêté la totalité de quelques 120 millions de tonne de charge solide que le fleuve transportait auparavant jusqu'à la Méditerranée (Paskoff, 1993). Néanmoins, par leurs effets de barrière, la faiblesse des écoulements favorise une forte sédimentation au niveau de l'embouchure et contribue ainsi à l'édification de la barre. Les cycles de marées maintiennent un important volume de sédiments en mouvement et les piégent dans l'estuaire (Hossain et al. 2001). Ce qui favorise d'ailleurs l'extension de la Langue de Barbarie vers le sud. Les mesures bathymétriques effectuées dans le cadre du programme GILIF (PNUE/UCC-Water/SGPRE, 2002) nous ont permis de réaliser la figure 5.12 avec le logiciel Surfer. Les profils bathymétriques montrent des fonds irréguliers avec des flancs généralement dissymétriques, phénomène qui s'accentue dans la zone d'embouchure. Les profils sont relativement symétriques et plus réguliers vers l'amont (PNUE/UCC-Water/SGPRE, 2002). La figure met en évidence le colmatage de l'embouchure du fait de la forte sédimentation. Etant soumis à l'action des courants marins, le chenal tend à devenir irrégulier, les fonds sont variables, ils peuvent parfois s'encaisser et atteindre une profondeur de 6 m ou 3 m. L'érosion du courant de jusant façonne des talus qui ceinturent les bas fonds. Sous l'action des courants marins, ces talus peuvent s'avancer progressivement, combler les bas fonds et participer au colmatage de l'embouchure. L'ensablement peut être assez rapide en raison du fort charriage de sable.

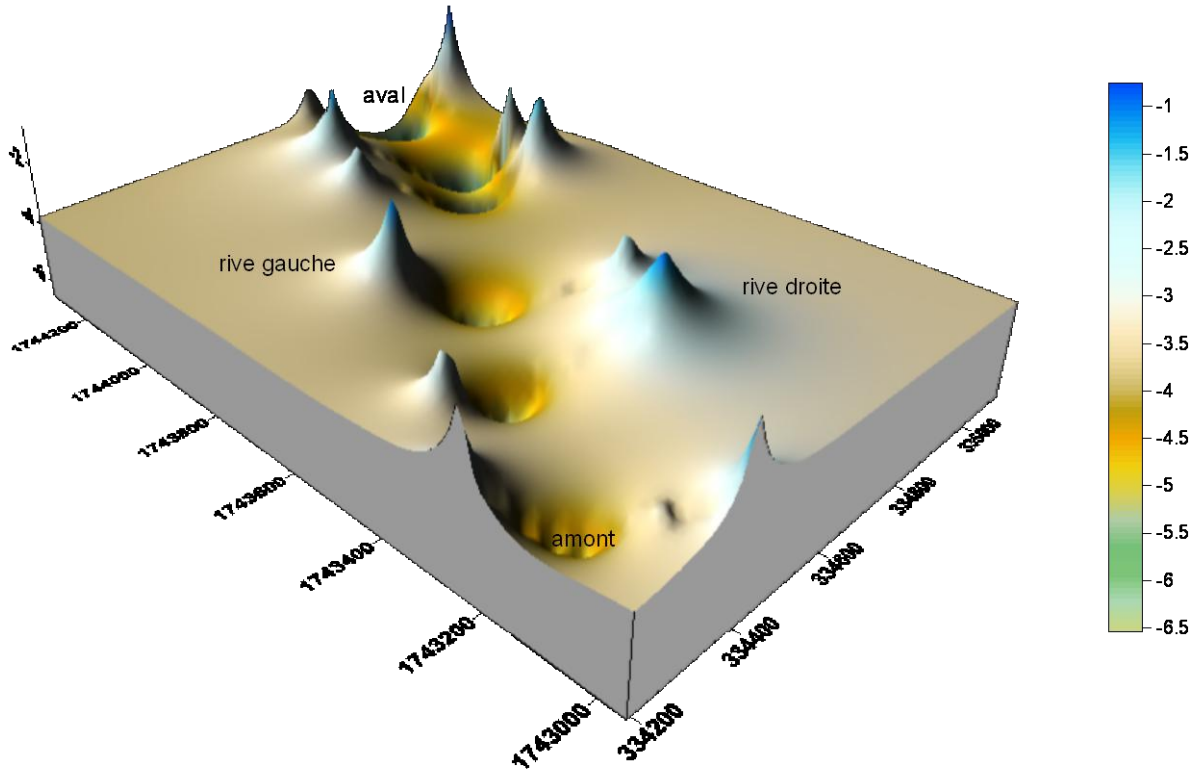


Fig.5.12 : Représentation tridimensionnelle de l'ancienne embouchure à la date du 28 décembre 2001

Il s'ensuit nécessairement une hausse notable du plan d'eau sur toute la zone estuarienne. En période de crue le fleuve a tendance à se déverser dans les zones riveraines à cause de ce phénomène, ce qui entraîne l'inondation des localités situées le long de son cours. De plus, le relèvement des quais dans certaines parties de l'île et du faubourg de Sor est insuffisant. Dans certaines zones de l'île, ils sont presque inexistants. Le relèvement du plan d'eau à Saint-Louis est aussi la conséquence de l'exhaussement probable du lit du fleuve avec notamment les ordures ménagères qui y sont déversées.

5.5. Une évolution mal maîtrisée

A partir des mesures au GPS que nous avons effectuées avec l'équipe du laboratoire de Morphologie et d'Hydrologie au niveau des deux rives du canal de délestage et des relevés bathymétriques, nous allons mettre en évidence l'évolution spatio-temporelle de la brèche. Cette approche diachronique nous permettra de mieux cerner les conditions de son évolution. L'élargissement de la brèche a été très rapide aux premiers jours de son ouverture, d'une largeur de quatre mètres, la brèche est passée à 200 m deux jours après son ouverture. Ce rapide élargissement s'explique par l'influence du barrage qui a évacué un débit de 1906 m^3/s. Le sédiment étant par ailleurs meuble (sable de dunes blanches), le

déblaiement devient important, il s'ensuit des phénomènes de sapement des berges. Le 24 octobre, la brèche s'agrandit encore et mesure 329 m avec un débit évacué de 1968 m^3/s à la station de Diama. En décembre 2003, bien que la crue du fleuve soit terminée, la largeur de la brèche est passée à 490 m. Le mois suivant elle s'élargit progressivement et atteint 605 m, elle passe à 775 m en mars 2004. Cet élargissement en période de décrue s'explique par les houles du nord-ouest et les forts courants marins qui prédominent durant cette période. Comme la Langue de Barbarie est un milieu instable du fait des processus hydrodynamiques qui ont une forte influence sur son évolution, la brèche n'a cessé de s'élargir et a aujourd'hui atteint des proportions alarmantes.

5.5.1. L'évolution spatio-temporelle de la brèche

Il s'agit d'établir une cartographie de l'évolution de la nouvelle embouchure. Cette approche multichronique nous permettra de mieux cerner les modifications hydrodynamiques et bathymétriques de cet aménagement.

5.5.1.1. L'évolution en 2004

Les relevés bathymétriques du 11 juin 2004 montrent que la profondeur initiale de 1,5 m a sensiblement augmenté et a atteint 7 m à certains endroits (Fig.5.13). La partie sud semble beaucoup plus profonde que la partie nord qui est plutôt marqué par un exhaussement du lit. Ces fonds irréguliers sont liés à la différence des zones à faible courant. La partie nord, est soumise à des phénomènes de sédimentation au niveau des extrémités de la brèche consécutive à l'action de la houle et son corollaire la dérive littorale. En revanche la partie sud connaît des phénomènes de sapement des berges dû à l'intensité des courants de marée.

La largeur passe à 830 m le 17 septembre 2004. Sur la figure 5.14, les profils représentent les contours nord et sud de la brèche. Cette extension du canal de délestage s'explique par les lâchers du barrage de Diama. Ce dernier a évacué des débits de plus de 1500 m^3/s à la même date.

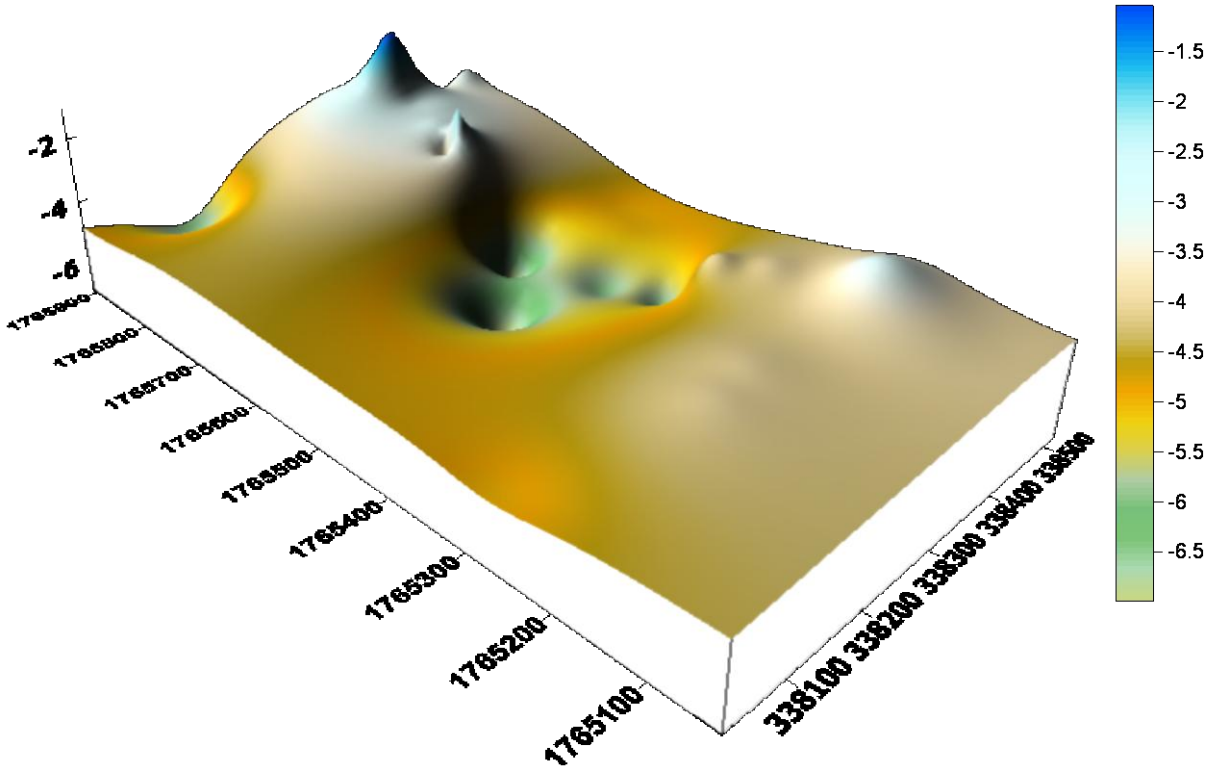


Fig.5.13 : Représentation tridimensionnelle du canal de délestage, 11-06-2004 (Source Diop I., Service de l'hydraulique de Saint-Louis)

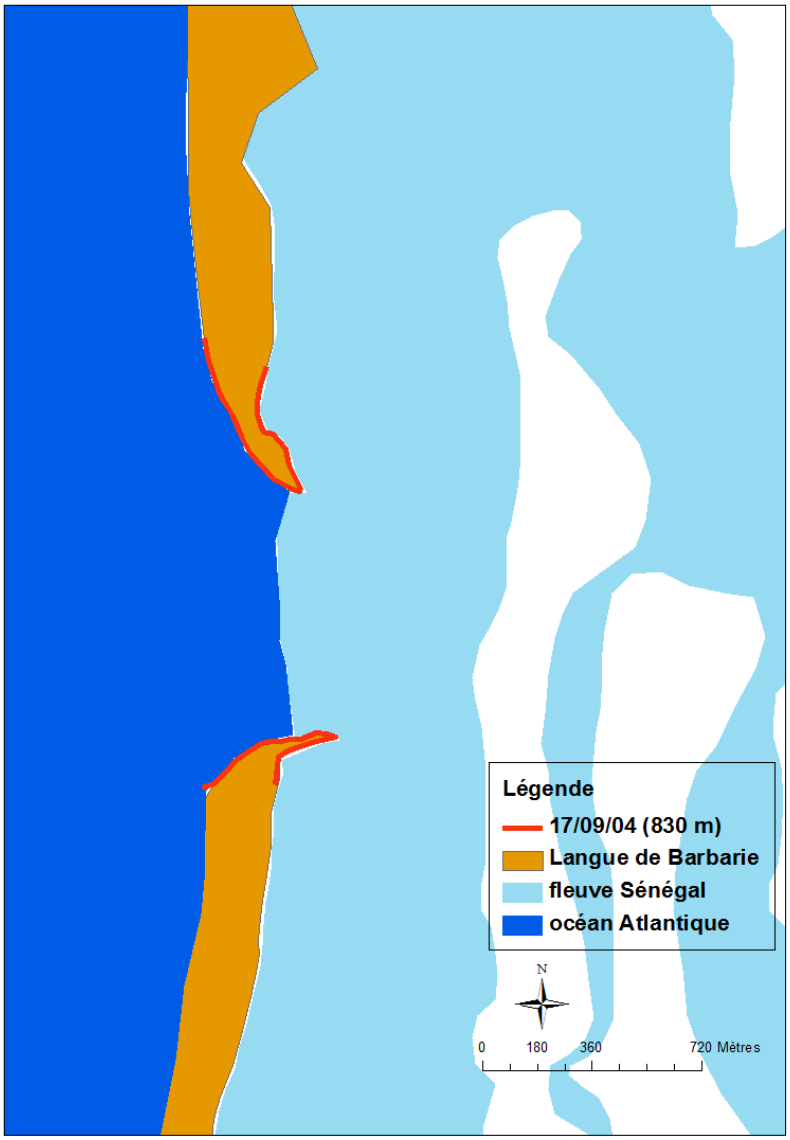


Fig.5.14 : Largeur de la brèche à la date du 17/09/2004

5.5.1.2. L'évolution en 2005

Le suivi mensuel (février, mars, mai, juin, juillet, août et octobre) de la brèche en 2005 montre une évolution en deux phases :

- la brèche s'élargit lors des crues en période pluvieuse (juillet-octobre) et des houles du nord ouest qui prédominent de novembre à mai. Durant cette dernière période les vents sont plus violents sur l'Atlantique et leur action sur le façonnement du littoral est important (Ndiaye, 1975). L'embouchure est donc soumise à un régime exclusivement marin sauf si le barrage évacue des débits. Sur la figure 5.15, les boîtes à moustaches montrent qu'effectivement le barrage a évacué des débits

durant la saison de décrue, ils varient entre 20 à 800 m^3/s, ce qui est relativement faible pour entraîner un élargissement de la brèche, ce sont plutôt les actions marines qui joueront un rôle essentiel ;

- elle se rétrécit progressivement avec la dérive littorale. Cette dernière, qui est la résultante de l'obliquité de la houle par rapport à la ligne de rivage transporte et dépose les sables sur les plages, l'évolution de la brèche connaît des périodes d'accélération et de ralentissement en étroite relation avec les phases d'engraissement et de démaigrissement de la plage (Gac et al. 1982).

Dans ce contexte, la largeur de la brèche a sensiblement augmenté entre février et mars 2005, elle est passée de 950 m à 1350 m. Toutefois au mois de mai 2005, elle se rétrécit de 270 m, soit une largeur de 1080 m. Ce rétrécissement s'explique par l'action de la houle et de la dérive littorale qui érode les dunes blanches de la Langue de Barbarie et les dépose au niveau des extrémités de la brèche. La partie sud a été plutôt érosive du fait du déferlement des vagues qui est beaucoup plus important au niveau de ce secteur.

Durant la période où les vannes du barrage sont presque constamment ouvertes, la brèche continue de s'élargir et atteint successivement : 1150 m en juin 2005, 1200 m en juillet, 1240 m en août et 1300 en octobre (fig.5.16). L'élargissement durant ces mois s'explique donc par les crues du fleuve Sénégal, où le barrage de Diama a évacué des débits de plus de 1500 m^3/s au courant du mois de septembre. Mais l'évolution est, tout de même, relativement stable.

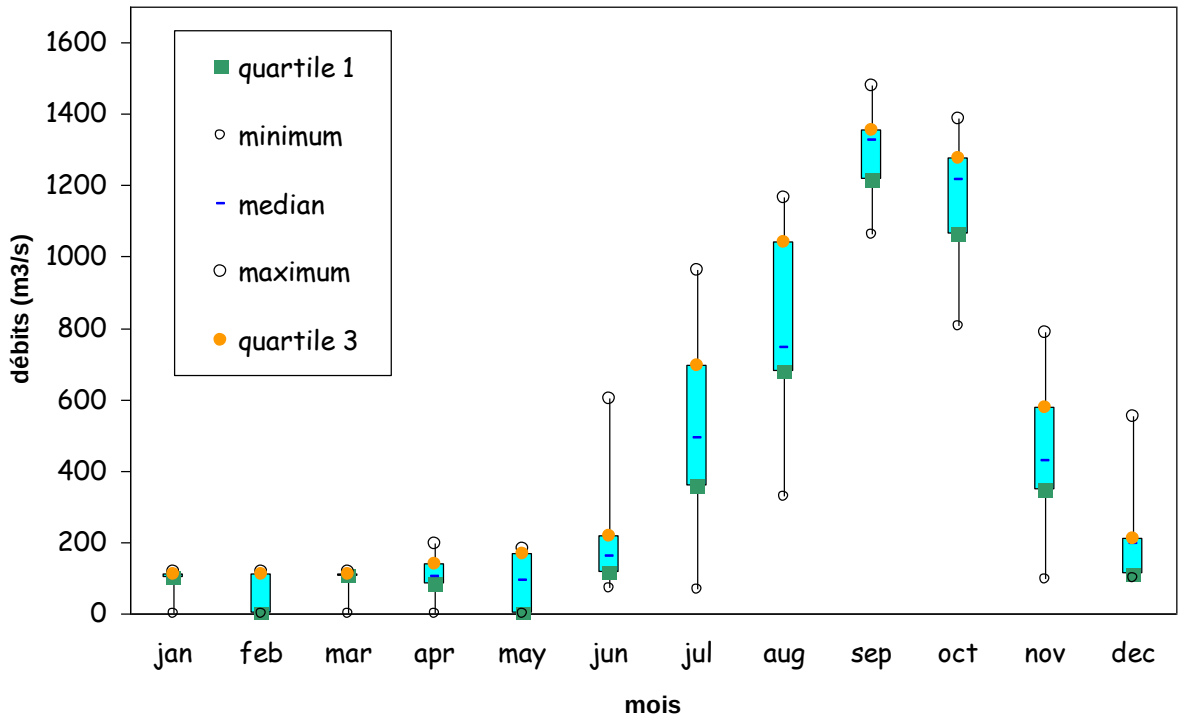


Fig.5.15 : Débits évacués par le barrage de Diama en 2005

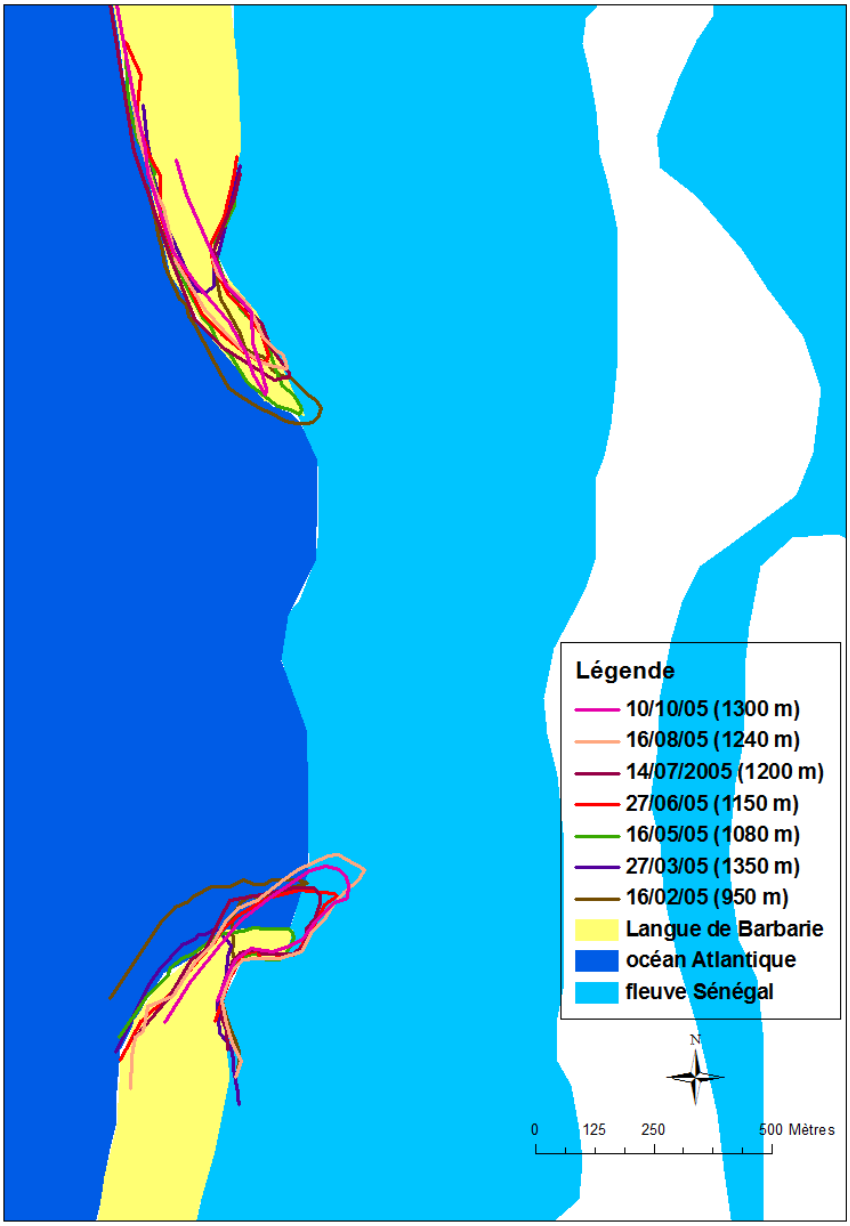


Fig. 5.16 : Evolution de la largeur de la brèche en 2005

Quoi qu'il en soit, les sables sont entraînés d'une façon générale vers le sud. Les mesures montrent des périodes d'accumulation et d'érosion; tout se passe comme si les dunes bordières se mobilisent et se déplacent dans le sens nord sud. Ces apports sont en fait les phases de l'allongement de la Langue de Barbarie vers le sud.

5.5.1.3. L'évolution en 2006

L'évolution au courant de l'année 2006 montre un élargissement exponentiel de la brèche qui est passé de 900 m en janvier à 1370 m en mars, soit une augmentation de 470 m sur une période de deux mois. Par contre, elle a très peu évolué en juillet et atteint 1500 m (fig.5.17), soit une augmentation de 130 m sur une période de trois mois. Cette faible évolution peut s'expliquer par le fait qu'en période pluvieuse, ce sont les houles du sud-ouest, beaucoup moins fortes, qui dominent. L'élargissement peut donc résulter des courants de flot du fait que les lâchers au niveau de la station de Diama durant cette période étaient très faibles, soit une moyenne annuelle de 281 m^3/s. En l'absence de crue, le transit sédimentaire devient important. Nous pouvons noter que quand la crue n'est pas importante, la marée joue le rôle essentiel dans l'élargissement de la brèche.

Les relevées bathymétriques du mois d'avril (fig.5.18) mettent en évidence des fonds irréguliers qui sont liés à la différence des vitesses de courant qui transitent au niveau de la brèche. La partie sud est beaucoup plus profonde que la partie nord, elle est descendue jusqu'à -7 m IGN. L'érosion générée par l'action de courants marins y est très active. Il est assez remarquable de voir que la partie nord connaît des phénomènes d'accumulation et d'érosion qui font que les profondeurs sont irrégulières, elles varient de -2 à -5 m IGN.

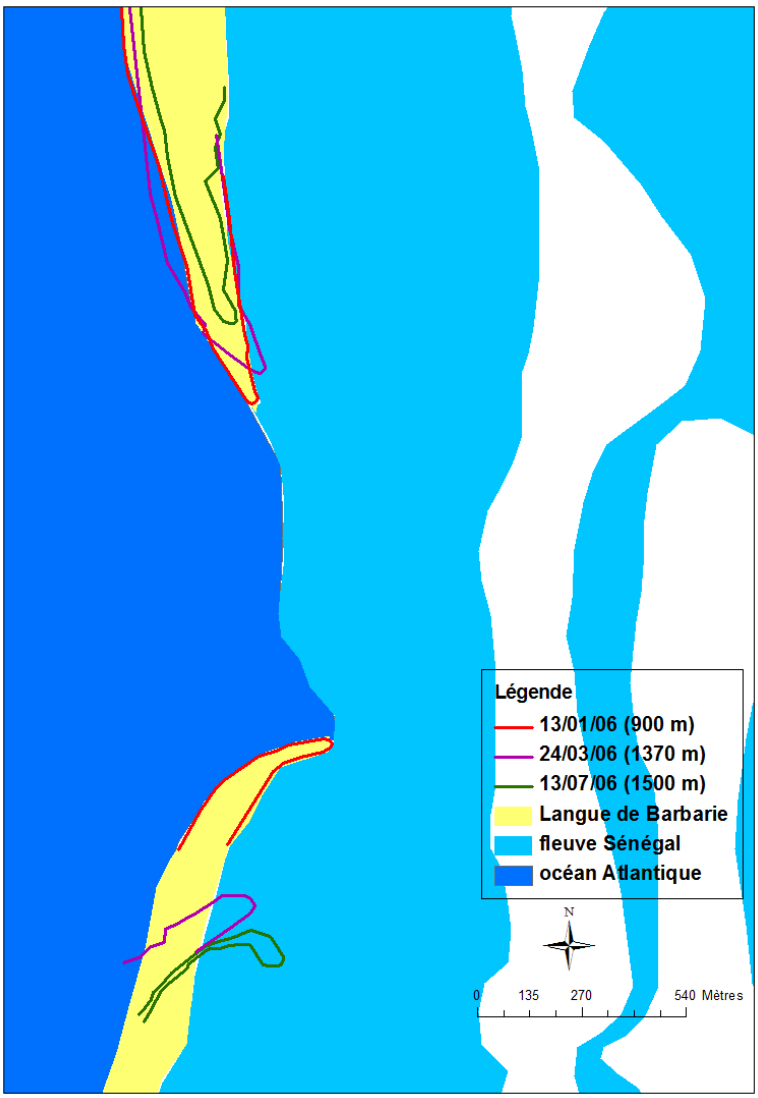


Fig.5.17 : Evolution de la largeur de la brèche en 2006

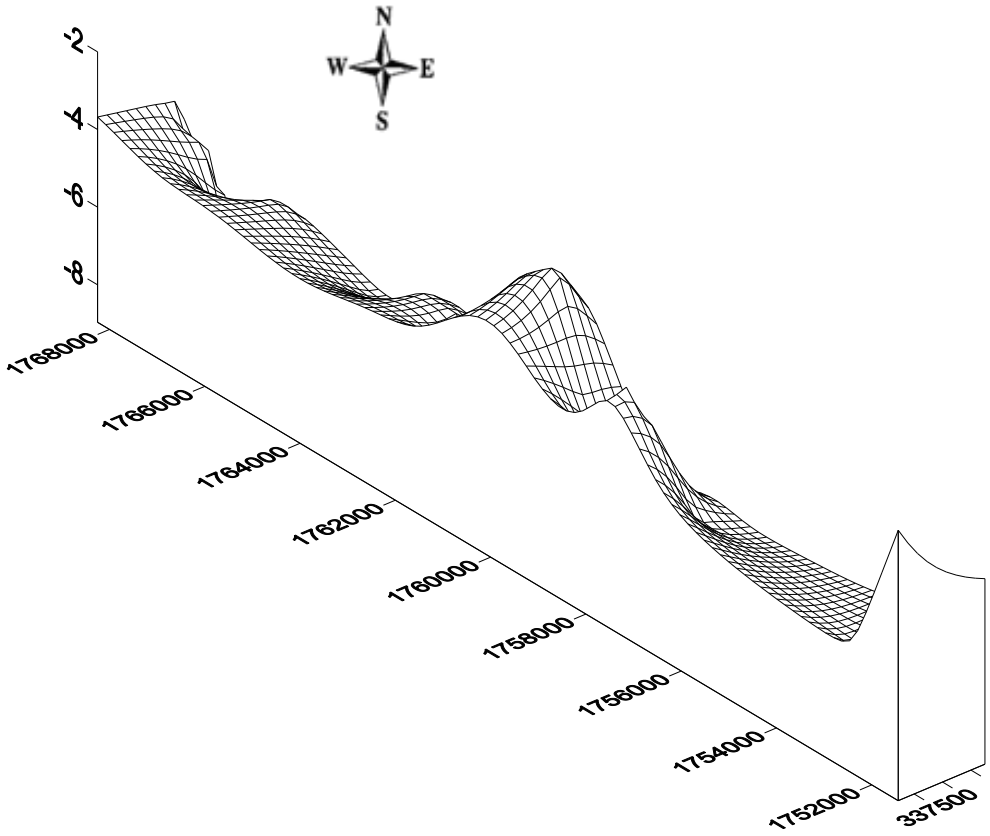


Fig. 5.18 : Profondeurs de la brèche à la date du 15 avril 2006 (Source : Diop I, Service de l'hydraulique de Saint-Louis)

5.5.1.4. L'évolution en 2007

En 2007, la largeur de la brèche est passée de 900 m en mai à 910 m en décembre (fig.5.19). Ces périodes coïncident avec la prédominance du vent qui est de quadrant NW (cf. chapitre 1 de la première partie), le sable est mobilisé et déposé au niveau du cordon littoral par les vents dominants. En se référant aux profils des rives nord et sud, l'érosion est importante sur la partie sud alors qu'au niveau de la partie nord on note une progradation d'environ 200 m vers le nord. Les courants de flot expliquent cette érosion de la pointe sud tandis que la mobilisation et le dépôt de sédiments sur le bord sud du cordon littoral sont résultants des forts courants marins. La dynamique marine est devenue nettement prédominante et, du coup, le rivage externe est plus sensible à l'érosion.

La figure 5.20 est assez illustrative, elle montre la faiblesse des profondeurs au niveau de la rive nord, elle varie entre -2 et -5 m. Cette zone où les courants marins sont moins forts connaît des phénomènes d'ensablement et de rehaussement. Du côté sud, les courants sont plus forts, la profondeur est donc plus importante, elle descend jusqu'à -11 m. En revanche,

le rivage externe est plus exhaussé en raison du charriage des sables qui sont assurés par les courants marins.

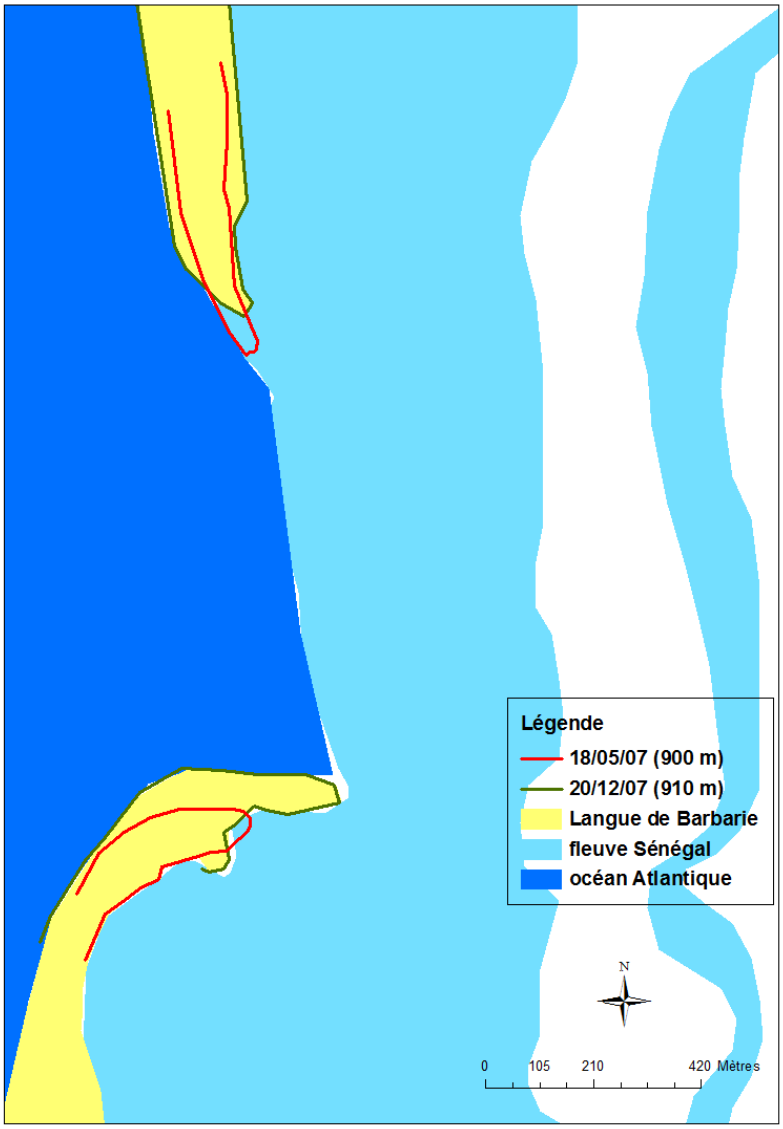


Fig.5.19 : Evolution de la brèche en 2007

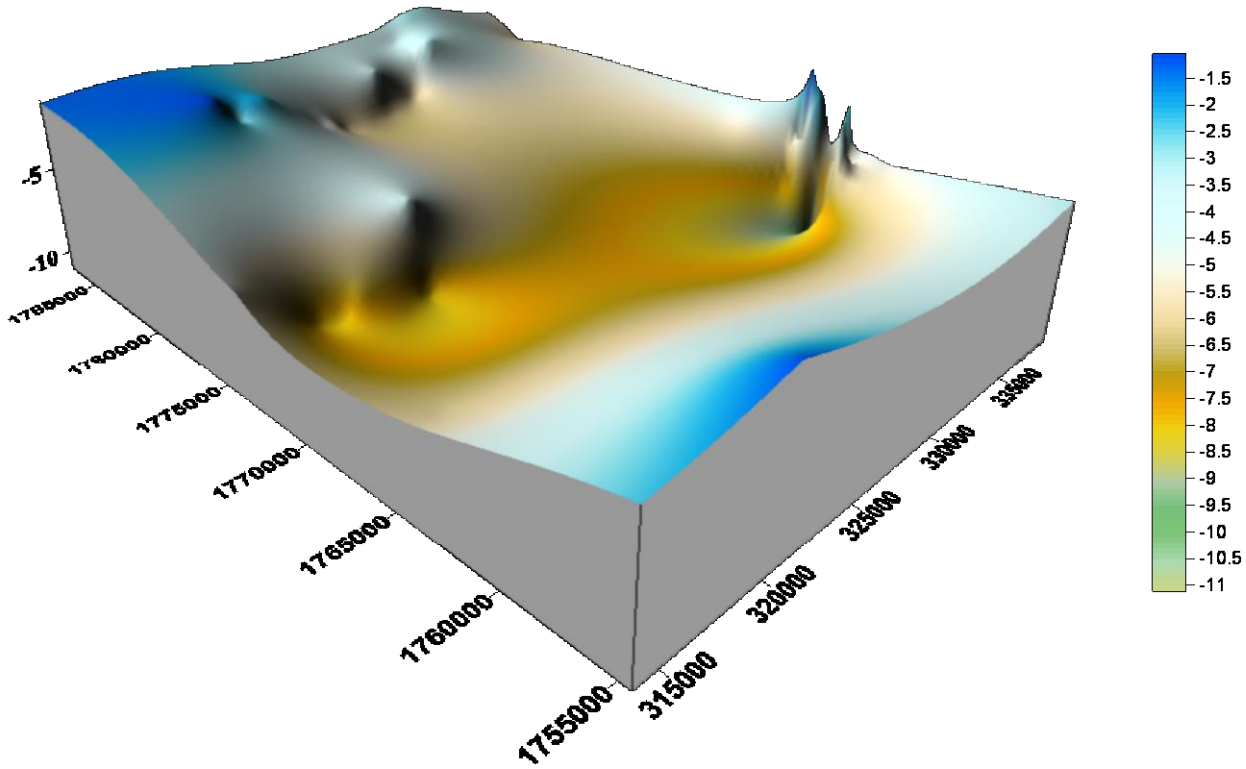


Fig.5.20 : Représentation tridimensionnelle de la brèche (juillet 2007)

5.5.1.5. L'évolution en 2008 et 2009

La nouvelle embouchure s'étale actuellement sur une largeur de 2700 m (mesure du 18 août 2009). Elle a enregistré un élargissement de 400 m entre cette date et le 17 février 2009 où elle mesurait 2300 m. En 2008 (18 juillet), la largeur était à 1700 m. La figure 5.21 montre que la brèche a tendance à s'accroître, par évolution régressive tant au nord qu'au sud. Toutes les mesures antérieures se sont retrouvées dans l'eau. Cette régression est due à une érosion côtière très active qui affecte différemment les deux berges de la nouvelle embouchure. La berge nord est soumise à une érosion consistant à un transfert latéral du sable de la Langue de Barbarie vers le chenal fluvial. La berge sud de la brèche tend à régresser vers la partie distale.

De surcroît, ces dernières mesures coïncident avec les deux saisons (sèche et hivernage). Les facteurs agissant ne peuvent qu'être favorables à un élargissement exponentiel de la brèche. Par exemple en juillet 2008, au moment où nous effectuons les mesures (de 11h à 16h), la marée océanique était haute de 1,57 m et le débit lâché par le barrage était de 708 m^3/s. En revanche, en août 2009, la marée océanique était basse : 0,78 m, le barrage a évacué un débit de 815 m^3/s. C'est donc le fleuve qui a rongé la côte en le détournant à

l'intérieur de sa courbe, ce qui est bien visible au niveau de la partie sud de la brèche (fig.5.21).

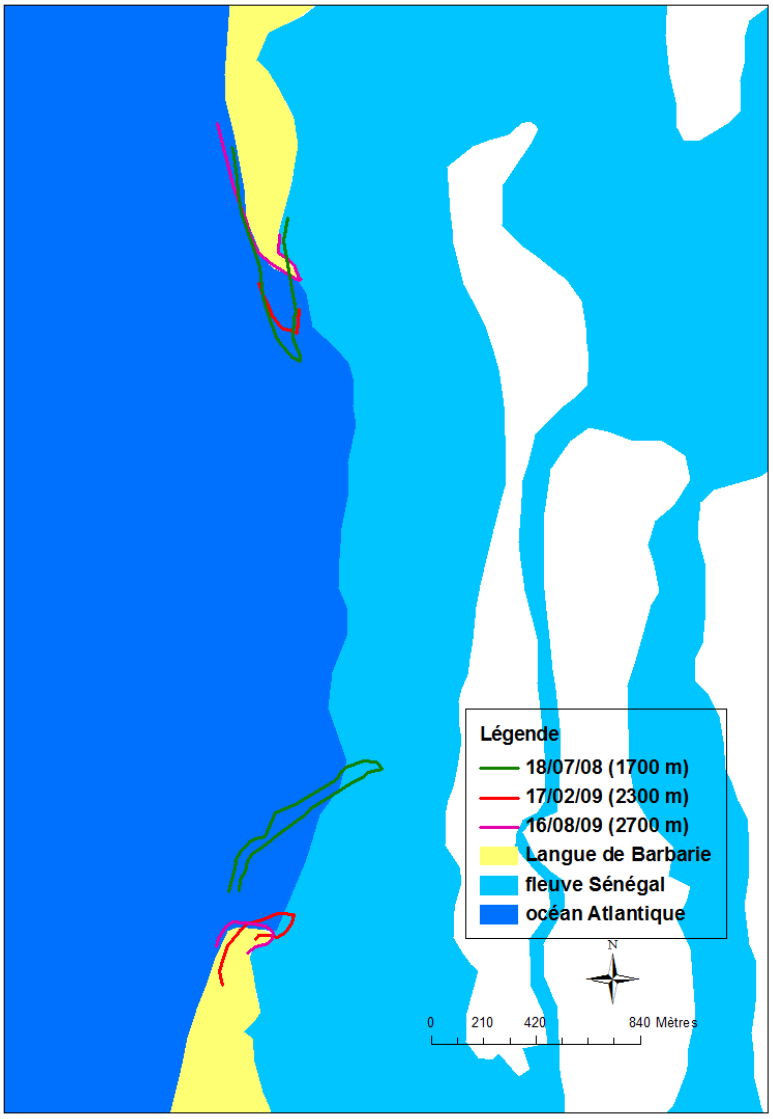


Fig.5.21 : Evolution de la nouvelle embouchure (2008-2009)

Sur l'ensemble des figures, il est assez remarquable d'observer l'extrémité de la partie sud de la brèche qui se recourbe vers l'intérieur du fleuve. Cette situation est le résultat de l'action conjuguée de la houle et des courants de flots qui érodent la rive orientale du fleuve.

Tableau 5.1. : Dynamique de la nouvelle embouchure

Date	Largeur (m)	évolution nord (m)	évolution sud (m)	Elargissement (m)
17/09/2004	830	accumulation : 138	érosion : 592	505
16/02/2005	950	accumulation : 80	érosion : 158	120
27/03/2005	1350	érosion : 365	érosion 240	400
16/05/2005	1080	accumulation : 320	accumulation : 140	- 270
27/06/2005	1150	érosion : 137	érosion 130	70
14/07/2005	1200	accumulation : 50	érosion : 30	50
16/08/2005	1240	érosion : 30	accumulation : 100	40
10/10/2005	1300	accumulation : 60	érosion : 42	60
13/01/2006	900	accumulation : 275	érosion : 82	- 400
24/03/2006	1370	érosion : 105	érosion : 459	470
13/07/2006	1500	érosion : 150	érosion : 170	130
18/05/2007	900	accumulation : 860	érosion : 150	- 600
20/12/2007	910	érosion : 86	accumulation : 210	10
18/07/2008	1700	érosion : 730	accumulation 85	790
16/02/2009	2300	érosion : 127	érosion : 680	600
16/08/2009	2700	érosion : 220	érosion : 112	400

Source : Travaux du Laboratoire de Morphologie et d'Hydrologie (UCAD) complétés par C. Kane

En complément à ce qui précède, le tableau 5.1 récapitule l'ensemble des mesures qui ont été effectuées durant la période 2004-2009. Nous avons mesuré, à partir d'une superposition des profils avec le logiciel de cartographie Arc View, l'évolution de la partie nord et celle de la partie sud de la brèche par rapport à chaque mesure précédente. Nous pouvons retenir que l'évolution générale de la brèche est étroitement liée aux conditions météorologiques et hydrologiques de la zone. La partie nord évolue par accumulation et érosion. Elle a connu 7 phases d'accumulation et 9 phases d'érosion. Le recul le plus important a été enregistré en 2008 avec 730 m au niveau de la partie nord.

La partie sud est plus soumise à une action érosive, sur l'ensemble des mesures, elle n'a connu que quatre phases d'accumulation qui coïncident au mois de mai, d'août, décembre et juillet. Ces accrétions de sable littoral peuvent s'expliquer par l'action de la dynamique

marine qui rend mobiles les sédiments sableux provenant de l'embouchure. De plus, la confrontation des eaux fluviales et maritimes crée une érosion aux environs immédiats de la brèche, ce qui contribue à son élargissement.

Si la vulnérabilité face aux risques d'inondations est réduite par de nouvelles techniques et une action administrative et politique (Dauphiné, 2003) divers faits marquants ont contribué à l'évolution du milieu. Les écoulements étant réduits entre la brèche et l'embouchure naturelle du fleuve à cause de la dérivation des eaux fluviales au niveau la nouvelle embouchure, le processus de colmatage de l'ancienne embouchure qui tendait irréversiblement à s'ensabler s'est accéléré.

5.5.2. Le colmatage de l'ancienne embouchure

L'ouverture artificielle a enclenché le processus de fermeture de l'ancienne embouchure qui peut être traversée à gué à marée basse (Kane A., 2005). Dix mois après le creusement du canal de délestage, l'ancienne embouchure s'est complètement fermée. Deux embouchures ont ainsi subsisté jusqu'à la date du 11 août 2004, l'une sur le segment médian et l'autre sur la partie distale de la Langue de Barbarie. Il est possible de voir sur la figure 5.22 que la pointe distale s'est accolée au continent, l'ancienne embouchure évolue actuellement en lagune.

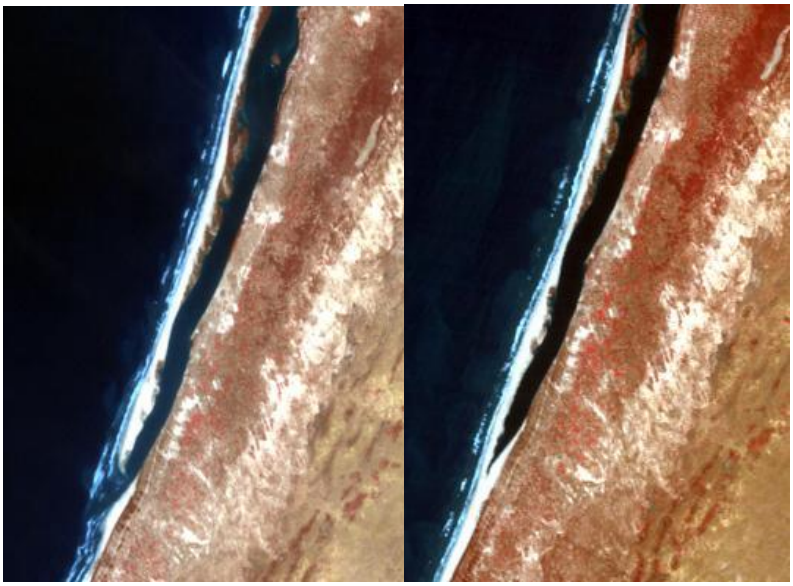


Fig. 5.22 : Colmatage de l'ancienne embouchure (Image Landsat 7 du 7 mars 2003 et image Landsat 5 du 03 février 2007)

De surcroît, le fleuve Sénégal s'est toujours terminé par une seule et unique embouchure, la coexistence de deux embouchures n'étant qu'éphémère. La dérivation des eaux au niveau de la brèche a entraîné un rétrécissement de l'ancienne embouchure qui était d'ailleurs en phase de colmatage, du fait de l'alimentation en sédiments par la dérive littorale. Les eaux fluviales n'arrivant plus à ce niveau, il en résulte une diminution du volume d'eau présent dans cette partie de l'estuaire. Le travail de terrain que nous avons effectué dans cette zone corrobore cette affirmation. D'après les mesures effectuées au GPS, le recul du trait de côte est estimé à plus de 230 m en août 2008. A la suite de ce processus de colmatage, nous assistons à un ensablement progressif du chenal fluvial par déstabilisation des dunes bordières. Le recul actuel du rivage montre que le processus dynamique de la côte résulte en général de l'action anthropique qui vient renforcer les processus naturels.

A la suite de cette évolution lagunaire, les échanges de sédiments entre la mer et l'ancienne embouchure se trouvent perturbés. Les levés topo-bathymétriques qui ont été effectués par l'équipe du laboratoire de Morphologie et d'Hydrologie de l'UCAD en 2005 précise également le colmatage de l'ancienne embouchure. Ces mesures sont réalisées à l'aide d'un géodimètre à rayon laser porté par un trépied placé au niveau de la borne repère. Celle-ci est installée à environ 200 m du chenal fluvial de l'ancienne embouchure. Trois profils y sont réalisés. Il est possible de distinguer sur la figure 5.23 que les profils ont des formes irrégulières et épousent tous la même allure. La distance et la dénivelée par rapport à la borne repère sont obtenues par lecture directe sur le géodimètre. Sur une distance d'à peu près 100 m, le chenal fluvial est à une profondeur de -1,5 m pour les profils 1 et 2 et -2,5 m pour le profil 3. Les profils sont encaissés à partir du point métrique 160, ils sont tous assimilables à un vallon avec des profondeurs de -3,5 m pour le profil 1, -4 m pour le profil 2 et -5 m pour le profil 3. Cet encaissement représente, au fait, le chenal fluvial de la lagune qui n'est pas très profonde à cause du processus de colmatage qui se poursuit. A partir du point métrique 300, cette élévation représente la distance qui sépare la lagune de la mer, elle est variable entre les trois profils. Le profil 1 représente la partie terminale de la lagune, le deuxième profil est situé à 65 m du premier et le troisième à 60 m du deuxième.

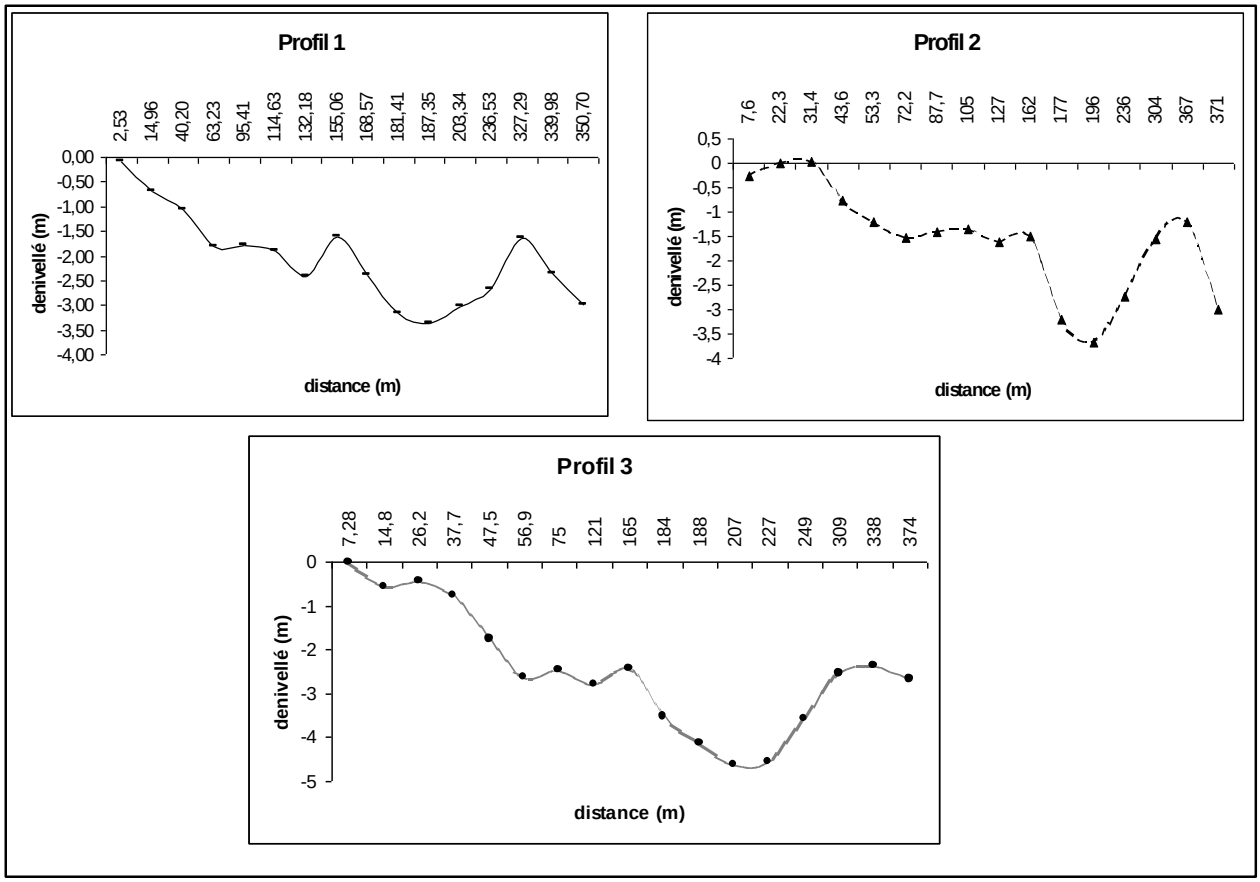


fig.5.23 : Profils transversaux de l'ancienne embouchure

La régression de la lagune vers le nord est un fait patent avec la forte évaporation qui sévit dans le milieu, elle a connu un recul de plus de 100 m entre mai 2005 et juillet 2006 (mesuré sur le terrain). Dans cette lagune peu profonde, les dunes bordières de la Langue de Barbarie sont suffisamment actives pour influer sur la sédimentation qui se poursuit au niveau du chenal fluvial accentué par l'évolution régressive du trait de côte.

Par ailleurs, il faut souligner que l'idée d'une ouverture artificielle sur la Langue de Barbarie n'est pas nouvelle, elle est vieille de plusieurs décennies. Plusieurs études l'avaient préconisée mais elle devait être suivie par des mesures d'accompagnement.

5.6. Les études préalables à l'ouverture d'une embouchure artificielle

Diverses études ont été consacrées à l'amélioration de l'embouchure, à la mise en place d'un port fluvio-maritime à Saint-Louis et la navigabilité du fleuve Sénégal. Les plus importantes selon OMVS et al. (1985) sont celles de Bezinker (1970), Sénégal Consult (1970), Norber Beyrard (1974). Toutes ces études avaient pour ambition de draguer

l'embouchure ou d'ouvrir une nouvelle embouchure sur la Langue de Barbarie. Les études les plus anciennes remontent au 19e siècle avec les projets de Bouquet de la Grye qui avait pour ambition de draguer le fleuve. Cette idée a tété reprise au 20e siècle par Blache qui en plus avait prévu la construction d'un ouvrage fixe sur la Langue de Barbarie. Les plus récentes études avant la réalisation de la brèche sont celles du COSEC et al. (2002) et du PNUE/UCC-Water/SGPRE (2002). La première était commanditée par l'OMVS pour la réalisation de la variante « rupture artificielle au sud de Saint-Louis» dans le cadre de l'accessibilité d'un port à Saint-Louis. La position de Saint-Louis au débouché du fleuve Sénégal en fait un point essentiel d'escales maritimes et fluviales pour les Etats membres de l'OMVS. C'est dans cette optique que l'OMVS avait prévu une percée sur la Langue de Barbarie bien avant l'ouverture de la brèche.

Le rapport du PNUE/UCC-Water/SGPRE (2002) avait préconisé une étude à plusieurs options pour une amélioration du chenal en vue de lutter contre les inondations à Saint-Louis. Chacune des options comporte certes des avantages mais aussi des inconvénients. Un dragage du chenal fluvial de Saint-Louis à l'embouchure permettrait de réduire la hauteur maximale de la crue à Saint-Louis ; l'ouverture d'une embouchure à 5.5 km au sud de Saint-Louis entraîne la plus grande réduction de la pointe de crue. Mais, ces deux options augmenteraient l'amplitude de la marée à Saint-Louis. Cependant, cette deuxième option devait être accompagnée de mesures complémentaires telles que la construction d'épis protecteurs au niveau de la brèche, ce qui n'a pas été réalisé pour le canal de délestage.

Le projet navigation constitue l'un des volets du vaste programme d'infrastructures de l'OMVS sur le fleuve Sénégal. La nouvelle embouchure constitue une impulsion au projet de navigation de cet organisme. Les études pour la faisabilité d'un port à Saint-Louis ont continué et il est également prévu dans le cadre de la réalisation du port fluvio-maritime un port de commerce, un port de pêche et un port de plaisance au niveau de l'estuaire. Les études d'avant-projet sommaire et de faisabilité sont terminées depuis décembre 2004 (pour la navigabilité) et depuis 2006 (pour le port fluviomaritime de Saint-Louis). L'ouverture de la brèche constitue donc une opportunité pour l'OMVS afin d'adapter le programme navigabilité du fleuve. Même si l'urgence a prévalu sur la mise en œuvre préalable d'une étude d'impact, la localisation de la nouvelle embouchure coïncide avec l'une des options de zones d'implantation du chenal de navigation OMVS préconisées dans les nombreuses études.

Conclusion

La prévention du risque d'inondation par une ouverture artificielle a constitué une solution de taille pour réduire la vulnérabilité des habitants de Saint-Louis. Cet aménagement hydraulique qui n'avait pour vocation première que de constituer une solution ponctuelle à une menace imminente sur la ville de Saint-Louis n'est pas pour autant exempt de complications. Hormis les problèmes liés à son élargissement, l'ancienne embouchure est colmatée du fait des apports des sédiments marins et par la dérivation des eaux vers le

canal. Les interventions sur des milieux aussi fragiles que l'estuaire du Fleuve Sénégal devraient être étudiées à l'avance, planifiées et intégrées dans le cadre d'un schéma cohérent d'aménagement et de gestion de cette partie du bassin fluvial.

Si l'ouverture de la brèche a contribué à résoudre les débordements fluviaux, les inondations pluviales perdurent toujours dans la localité saint-louisienne. La question de la pertinence d'une telle réalisation pour régler le phénomène des inondations reste posée. L'année suivant l'ouverture de la Langue de Barbarie, en 2004, aucune inondation ne s'est produite à Saint-Louis. Cette situation peut aussi s'expliquer par la faible pluviométrie enregistrée dans le haut bassin, principal facteur déterminant de la crue et notamment de la faiblesse des précipitations de la ville de Saint-Louis. En revanche, en 2005, par exemple, dans la nuit du 15 au 16 juillet, 90 mm de pluie sont tombés à Saint-Louis et des inondations ont été notées sur tous les points bas de la cité.

Le nom donné à cette ouverture « canal de délestage » par ces concepteurs dénote bien de l'objectif recherché, au début, qui était d'évacuer le trop plein du fleuve vers la mer. Cependant, ce premier qualificatif a vite évolué, à cause notamment des facteurs hydrodynamiques. Le canal de délestage s'est transformé en brèche (élargissement de plusieurs mètres) puis en nouvelle embouchure mesurant actuellement plus de deux kilomètres de large et les conséquences ont été plus désastreuses que le résultat escompté. Si les conditions physiques du milieu expliquent la grande fréquence des aléas (Dauphiné, 2005), les actions anthropiques conduisent, le plus souvent, à une incertitude de la survenance des événements catastrophiques. Dans un tel contexte, les effets dominos peuvent se déclencher, entraînant, du coup, une vulnérabilité croissante.

Chapitre 6 : La prédominance des influences marines suite à l'ouverture de la nouvelle embouchure

L'évolution hydrodynamique de l'estuaire est essentiellement marquée par les modifications intervenues après les aménagements sur le fleuve Sénégal. La nouvelle embouchure a engendré un nouveau processus d'évolution de l'estuaire. La partie terminale du fleuve est maintenant circonscrite entre le barrage de Diama et la nouvelle embouchure et entre cette dernière et l'ancienne embouchure qui évolue, désormais, en lagune. La brèche ouverte sur la Langue de Barbarie a très vite fonctionné comme une nouvelle embouchure et l'exacerbation des phénomènes marins est devenue plus importante.

Par ces interventions sur le milieu, l'homme aggrave ainsi des risques sur le système. Ces risques anthropiques peuvent constituer des facteurs aggravants et ont un rôle fondamental dans le processus évolutif du milieu (Veyret et Pech, 1993). Les modifications de l'estuaire ont conduit très vite à un dysfonctionnement dans les échanges entre la mer et le fleuve et dans la circulation des eaux. En période de hautes marées, on assiste à une importante remontée des eaux marines et inversement à une vidange de l'estuaire avec une importante évacuation des débits fluviaux en marées basses. Il faut reconnaître que ce phénomène n'était pas perceptible avant l'ouverture de la brèche en raison notamment de l'éloignement de l'embouchure. Par des interventions dont on a, en général, omis de prévoir sérieusement les effets induits, elles ont fréquemment contribué à déstabiliser des milieux caractérisés par des équilibres dynamiques précaires.

Les effets induits sont perceptibles avec un fonctionnement de plus en plus dépendant des fluctuations de la marée en période sèche comme en période de crue. Le milieu est caractérisé par une grande instabilité en raison des conditions hydrodynamiques qui y prévalent.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons plus particulièrement à l'exacerbation des influences marines suite à la délocalisation de l'embouchure.

6.1. L'évolution actuelle de la marée

La marée résulte de l'exercice, d'une part, de la force d'attraction et universelle de Newton des astres du système solaire qui varie dans le temps, et d'autre part, de la force centrifuge (en relation avec la rotation de la terre sur son orbite). Elle se manifeste par une oscillation de l'hydrosphère. Les phénomènes de la marée et de l'intrusion marine dans l'estuaire du fleuve Sénégal ont fait l'objet de plusieurs études parmi lesquelles nous pouvons citer celles de Rochette (1964, 1974), Kane (1985, 1997) et Cecchi (1992). Ces auteurs ont étudié,

d'une part, les caractéristiques relatives à la marée, à sa propagation dans le delta et, d'autre part, les modifications hydrodynamiques dans le contexte de l'après barrage. Nous présentons dans ce chapitre les conditions de la marée après l'ouverture de la nouvelle embouchure. Elle a beaucoup évolué du fait de la délocalisation de l'embouchure.

La marée est de type semi-diurne sur l'ensemble du littoral. D'une manière générale, les estuaires de la façade atlantique sont caractérisés par des marées semi-diurnes qui font qu'à deux reprises en 24 heures, une masse d'eau salée envahit l'embouchure du fleuve. Avec elle, pénètrent les sédiments balayés sur la plateforme continentale (Miossec, 1998). Les composantes semi-diurnes sont caractérisées par deux pleines mers et deux basses mers d'importance sensiblement égales observées par jour. Ce type de marée est prépondérant en Atlantique. La marée au niveau de l'estuaire du Sénégal se caractérise par une marée haute et une marée basse qui ont lieu à intervalles de 6 heures par jour. Elle est de type microtidal du fait de son faible marnage en vive-eau 1 m et 0,5 m en morte-eau (Barusseau et al. 1993). Actuellement, les fluctuations de la marée conditionnent le fonctionnement de l'estuaire.

La proximité de la nouvelle embouchure a modifié considérablement la marée qui se traduit par un rehaussement des marées hautes et un abaissement des marées basses. Ce marnage est ressenti tout au long de l'année, même pendant les hautes eaux d'hivernage, période pendant laquelle il n'apparaissait pas auparavant (Mietton et al. 2007). Cette prépondérance de la marée peut aussi s'expliquer par les mécanismes hydrodynamiques qui sont contrôlés par la géométrie de la zone côtière (Le Hir et al. 2001). A partir des mesures effectuées en 2004 par l'IRD (du barrage de Diama à Saint-Louis) et des mesures que nous avons effectuées en 2007 (de Saint-Louis à la nouvelle embouchure) nous avons représenté le profil bathymétrique de l'estuaire (fig.6.1). Elle montre des fonds irréguliers, les profondeurs décroissent de la nouvelle embouchure vers l'aval du barrage. Cette décroissance des profondeurs vers l'amont a tendance à amplifier l'onde de marée.

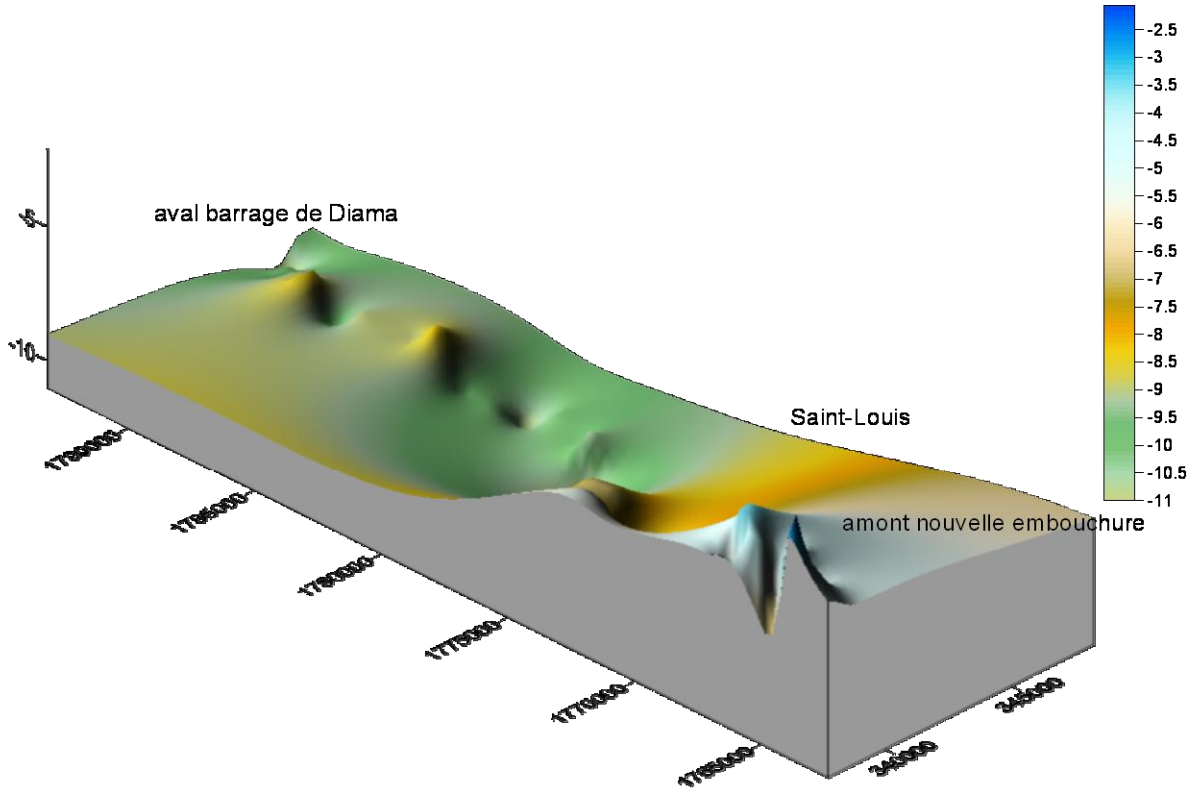


Fig. 6.1 : Profil bathymétrique de l'estuaire

La partie est affectée, en amont de l'embouchure, d'une remontée importante du fond (due à la sédimentation) sur environ 6 km. La profondeur est de - 6 m en moyenne à cet endroit alors qu'elle est de -9 m en moyenne sur les 26 km, à partir de Saint-Louis jusqu'au niveau du barrage de Diama. Ces cotes inférieures par rapport au niveau de la mer sont, entre autres, des facteurs déterminants de l'accentuation de l'hydrodynamisme actuel de l'estuaire.

Les profondeurs ont toujours été asymétriques sur le chenal fluvial. Les mesures bathymétriques qui ont été effectuées en 2001 par PNUE/UCC-Water/SGPRE (2002) attestent cette irrégularité :

« Les profondeurs maximales du chenal sont relativement faibles vers l'embouchure (environ 5 m) mais deviennent fortes en amont où elles atteignent 11,80 m à l'aval immédiat du barrage de Diama. En réalité, les profondeurs du chenal sont très variables dans le temps, en rapport avec l'instabilité des fonds due au déplacement fréquent de la barre sableuse. »

Mais du fait de l'éloignement de l'embouchure, les fluctuations de la marée n'étaient pas visibles, le fleuve fonctionnait comme une zone de stockage des eaux.

6.1.1. Le retrait des eaux en marée basse

Les mouvements très marqués des marées se traduisent par les modifications du niveau du fleuve. Les fluctuations de la marée conditionnent le régime hydrologique de l'estuaire si le courant fluvial est faible. De plus, les eaux ne peuvent se contenir sur une faible profondeur dont est caractérisé le tronçon qui va de la nouvelle embouchure à Saint-Louis. Par conséquent, l'eau du fleuve a tendance à se retirer et nous pouvons observer des niveaux d'eau très faibles sous le pont Faidherbe à Saint-Louis (photo 6.1), ce qui est assez inhabituel.

Ce phénomène est apparu un mois après l'ouverture de la brèche, à la date du 21 novembre 2003. Quoique le barrage de Diama ait lâché un débit de 509 m^3/s en direction de l'estuaire, celui-ci n'a pas pu amortir l'effet des marées. Il faut dire que cette période coïncide avec la fin de la crue et les débits évacués par le barrage de Diama diminuent sensiblement. Ils sont passés par exemple de 1078 m^3/s à la date du 18 novembre à 950 m^3/s à la date du 19 novembre. Les jours suivants, les débits sont restés aussi moyennement faibles de l'ordre de 490 m^3/s. Cette situation a rendu le fleuve plus soumis aux influences marines étant donné que l'embouchure a été délocalisée, à 25 km en amont. Avant l'ouverture du canal de délestage, l'amplitude de la marée était atténuée. Aujourd'hui l'atténuation a diminué du fait de la proximité de la mer et en saison sèche, le fleuve suit les fluctuations de la marée.

Egalement Kane (1997) souligne qu'à un débit de 600 m^3/s, l'intrusion marine ou les effets de la marée se font sentir sur tout le bief aval de l'ouvrage de Diama. La différence de densité entre l'eau marine et l'eau fluviale crée un gradient de pression qui pousse l'eau de mer vers l'amont (Le Hir et al. 2001). Dans ce contexte, les eaux estuariennes miment de façon synchrone celle de la dynamique marine. Ainsi, nous pouvons affirmer d'ores et déjà que si le barrage évacue des débits de plus de 1000 m^3/s, l'effet de la marée dans la partie aval du barrage peut être atténué. Cependant, un tel débit n'est évacué qu'en période de crue. Il peut également arriver que ce débit ne soit pas atteint, comme ce fut le cas pour l'année hydrologique 2006-2007. Dans un tel contexte, l'estuaire est sujet à une faiblesse d'écoulement des eaux vers la mer et, a priori, cette situation renforce la dynamique marine qui se traduit par un phénomène de déstockage des eaux estuariennes. Ceci a suscité beaucoup d'interrogations aussi bien chez les populations qu'au niveau des médias qui en ont fait un sujet de débats des jours durant.

Photo 6.1 : Retrait des eaux en marée basse (Kane A. décembre 2003)

C'est dans ce contexte que Niane et Sène (2004) affirment que la baisse inexorable du plan d'eau a provoqué l'étonnement, voire l'inquiétude de constater qu'en plein mois de novembre les eaux du fleuve Sénégal s'étaient retirées de plusieurs arches et des enfants jouaient en toute innocence et gaieté sur une bonne partie du lit du fleuve. Ce spectacle presque fantastique, du rarement vu selon les anciens, des piliers séculaires du pont Faidherbe à découvert (photo 6.1b), suscite aujourd'hui maintes supputations, inquiétudes et des conjectures allant d'un optimisme béat à un pessimisme apocalyptique. Une inquiétude est de plus en plus perceptible au niveau des populations, la peur que cette profanation de la nature ne conduise à une catastrophe. Cette inquiétude est permanente dans toutes les sociétés en particulier dans les sociétés africaines dans lesquelles, réminiscence du paganisme ancien, la nature est presque sacrée. Ainsi les habitants de la ville de Saint-Louis découvrent le mouvement désormais ample du balancement des marées à travers les changements brusques de niveau du fleuve Sénégal.

L'abaissement du niveau du fleuve dans l'estuaire demeure, entre autres, l'une des conséquences les plus manifestes du rapprochement de l'embouchure. Il est le résultat d'une plus grande capacité de l'estuaire à se vider par la nouvelle ouverture. Les marées avaient une faible influence du fait de l'éloignement de l'embouchure qui se trouvait à 32 km de la ville de Saint-Louis et notamment de son évolution vers une fermeture partielle, les mouvements de la marée n'étaient pas aussi visibles. D'ailleurs le niveau le plus bas du fleuve a été enregistré bien avant l'ouverture de la brèche, en période de fermeture des vannes, où la station de Saint-Louis enregistre une hauteur de - 0,14 m IGN à la date du 26 février 2003. Les changements de niveau les plus sensibles du fleuve Sénégal étaient liés à la période d'ouverture prolongée des vannes du barrage lors de la saison pluvieuse, avec des niveaux qui pouvaient atteindre plus de 1,42 m IGN, comme c'était le cas le 1 octobre 2003. Nous avons représenté sur figure 6.2 l'évolution des hauteurs d'eau de la station de Saint-Louis pour la période 2001-2007. Depuis 2003, ces hauteurs d'eau se traduisent par

une baisse considérable et le niveau d'avant brèche n'a toujours pas été atteint. Les niveaux les plus importants varient, actuellement, entre 0,6 et 0,52 m IGN.

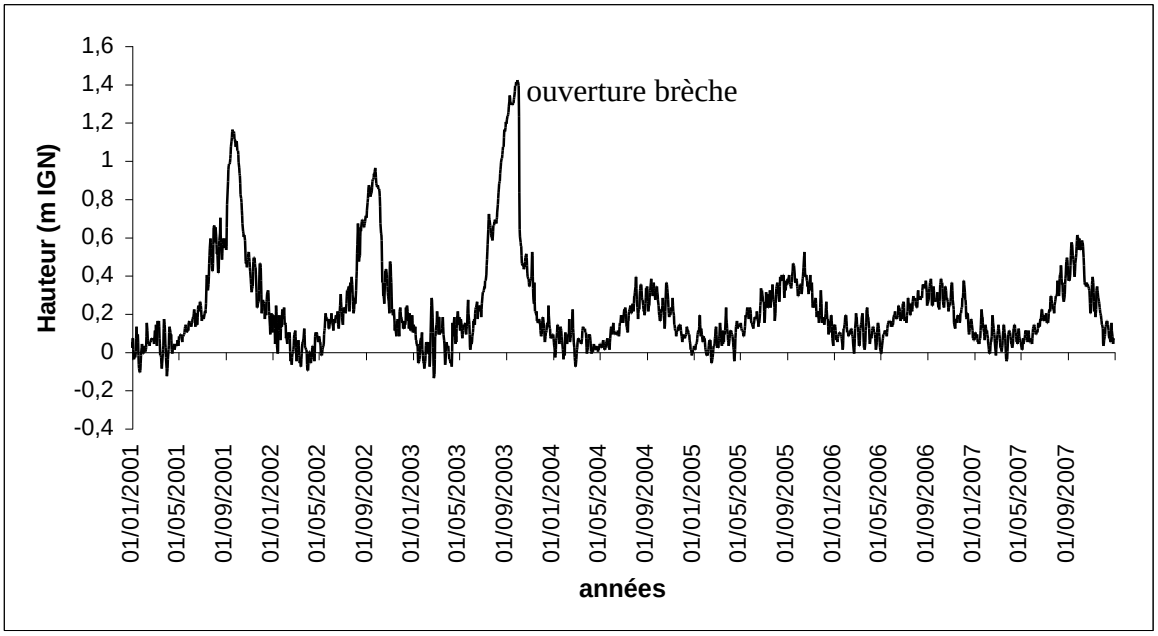


Fig. 6.2 : Evolution de la hauteur d'eau à la station de Saint-Louis (2001-2007)

En saison sèche, la hauteur d'eau dans l'estuaire dépend des fluctuations de la marée même en période d'ouverture des vannes du barrage de Diama et en marée basse le niveau du plan d'eau à Saint-Louis est proche de -0,04m IGN. La brèche a ainsi modifié les conditions d'écoulement d'une part en abaissant le niveau aval du barrage et d'autre part en rendant ce niveau beaucoup plus sensible à la marée (OMVS et al. 2005). Une embouchure plus proche du barrage de Diama facilite une évacuation rapide des eaux fluviales en mer et les amplitudes de marées sont devenues très marquées.

6.1.2. Amplification de l'amplitude de marée

Depuis octobre 2003, les flux et reflux sont devenus très marqués, l'amplitude de la marée s'en trouve fortement accentuée. La figure 6.3 montre un net accroissement du marnage avec des hauteurs plus importantes à partir du mois d'octobre 2003. Cette situation résulte de la proximité de la nouvelle embouchure qui rend presque instantanée l'effet des marées à Saint-Louis. Le niveau du fleuve monte et descend suivant les fluctuations du niveau de la mer. L'amplitude est passée en moyenne de 0,20 m IGN ente le 1 janvier 2002 et le 4 octobre 2003 à 0,63 m IGN entre le 5 octobre 2003 et le 30 juin 2006, l'amplitude maximale

atteint 0,96 m IGN. La marée qui était peu ressentie au niveau de Diama avant l'ouverture, est aujourd'hui observée tout au long de l'année.

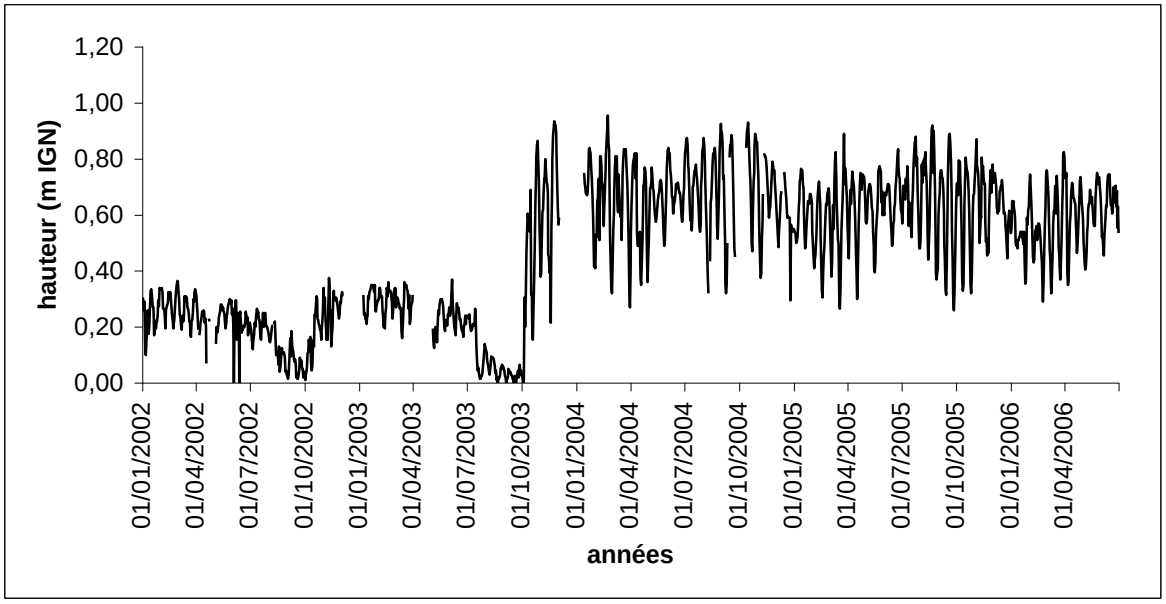


Fig. 6.3 : Evolution du marnage à la station de Saint-Louis (2002-2006)

L'amplitude de la marée était beaucoup plus faible avant l'ouverture de la brèche. Comme nous l'avons évoqué plus haut les fluctuations de la marée n'étaient pas visibles à cause de l'éloignement de l'embouchure qui favorisait par ailleurs une perte de charge. Cette situation facilitait l'épandage des eaux en période de crue dans l'estuaire et entraînait l'inondation des points bas.

Actuellement, le niveau du fleuve est d'autant plus bas que l'amplitude de la marée est forte. Quoique le barrage soit régulièrement ouvert depuis 2002, l'effet de la marée reste prépondérant. Il faut noter que cette différence entre la hauteur d'une pleine mer et de la basse mer dépend beaucoup de la configuration des estuaires. En conséquence elle est plus importante quand la marée doit pénétrer dans un estuaire où les altitudes sont en dessous du niveau de la mer.

Aussi la délocalisation de l'embouchure ne va t-elle pas amplifier les phénomènes de décotes et de surcotes qui peuvent contribuer d'une part, à renforcer le retrait des eaux en marée basse et d'autre part, occasionner des phénomènes de submersion marine.

6.1.3. Etude des surcotes et décotes

L'étude des surcotes et de décotes nous permet d'avoir une meilleure compréhension de l'accentuation de la dynamique marine au niveau de la station de Saint-Louis. Nous avons eu recours aux données marégraphiques sur support papier fournies directement par le marégraphe installé au niveau de la station de Saint-Louis, aux calculs de marée effectués par SHOM et aux débits évacués par le barrage de Diama pour la période 2002-2006. Les calculs de SHOM sont faits à l'aide de la méthode harmonique. Cette méthode est basée sur la décomposition de l'onde de marée enregistrée sur une longue période en une somme d'ondes élémentaires dont les périodes correspondent à des mouvements d'astres (Ghadri et al. 1992). Le but de cette étude est de définir les niveaux extrêmes de la marée en tenant compte de l'influence des débits évacués par le barrage.

Les phénomènes de surcote et de décotes sont provoqués par les conditions météorologiques. En l'occurrence, une dépression provoque un effet de surcote et un anticyclone provoque un effet de décote. Les surcotes de marée sont la conséquence des conditions météorologiques telles la pression atmosphérique, la direction du vent et son intensité, le coefficient de marée astronomique, la morphologie côtière. Elles sont autant de facteurs entrant en ligne de compte dans la formation de la surcote (Ghadri et al. 1992). Selon Frérot (1988) cité par Grovel et al. (1999) si H_{PMP} est le niveau de pleine mer lié à la marée astronomique prévue par la méthode harmonique et H_{PMm} est le niveau de pleine mer mesuré réellement, la surcote de pleine mer S_{PM} est définie comme suit :

$$S_{PM} = H_{PMm} - H_{PMP}$$

La surcote de basse mer est définie de façon analogue à partir des niveaux de basses mers prévus et observés. Les surcotes et décotes sont les différences entre la marée prédite et la hauteur d'eau observée. Les surcotes sont des différences positives (plus d'eau que prévu), les décotes des différences négatives (moins d'eau que prévu)[7]. Les surcotes et les décotes de la station de Saint-Louis sont appréhendées à partir de la différence entre les observations marégraphiques et le niveau de marée astronomique prédit par le SHOM.

La figure 6.4 montre l'évolution du niveau du fleuve en marée basse. Les décotes les plus faibles ont commencé à être enregistrées à partir du 21 novembre 2003, soit une hauteur de -0,21 m IGN. Une telle décote explique le retrait des eaux en marée basse. Par exemple, sur une période de 7 jours consécutifs en 2004 et en 2005, à la date du 23 au 29 janvier, les moyennes des décotes sont passées de -0,27 m IGN à -0,23 m IGN. Depuis l'année 2005, la

[7] http://www.shom.fr/

tendance générale des hauteurs des marées basses mesurées est plutôt à la hausse, elle est de l'ordre de -0,13 m IGN, en moyenne. Cette hausse peut s'expliquer d'une part, par l'élargissement de la nouvelle embouchure en période de décrue et d'autre part par les débits évacués par le barrage en période de crue. Une surcote en moyenne de 1,20 m IGN a été enregistrée sur une période de 53 jours (14 août au 5 octobre 2003). Cette hauteur d'eau est fortement influencée par les débits lâchés au niveau du barrage de Diama. Les facteurs météorologiques tels que les vents n'ont pas une incidence majeure puisque c'est durant ces mois que les vitesses sont moins importantes par rapport aux autres mois, elles sont de l'ordre de 3,60 m/s en moyenne. Ce qui laisse supposer qu'au niveau de l'estuaire du fleuve Sénégal, les débits importants lâchés au barrage de Diama entrent en ligne de compte dans la formation de surcotes. En revanche aucune surcote n'a été enregistrée depuis 2003, la pénétration de plus en plus importante de la marée dans l'estuaire se manifeste principalement par un abaissement des niveaux du plan d'eau.

La figure 6.5 montre les niveaux du fleuve en marée haute. Il est assez remarquable de voir que les niveaux du fleuve sont marqués par des décotes sur presque toute la période d'observation. C'est seulement durant les périodes du 18 au 22 septembre et du 02 au 05 octobre que la marée mesurée est sensiblement supérieure à la marée prévue, la différence n'est pas très significative, elle est respectivement de l'ordre de 0,09 m et 0,11 m en moyenne. Bien que les débits soient régulièrement évacués au droit du barrage de Diama, aucune surcote n'a été enregistrée.

Au vu de ces figures, l'allure générale des marées observées suit plutôt celle des débits. La marée fluviale est modifiée par rapport à la marée océanique du fait de l'influence fluviale. D'un autre côté, le référentiel altimétrique -0,53 m IGN de la station de Saint-Louis explique une différence de niveau de -0,43 m IGN en moyenne entre la marée prévue et celle observée. Les marées fluviales importantes sont enregistrées saisonnièrement, entre juillet et octobre, période pendant laquelle le barrage de Diama effectue plus de lâchers. Partant de ces constatations, il existe d'une part, une forte relation entre débit et niveau de la marée fluviale et d'autre part, la faiblesse des débits engendre des décotes.

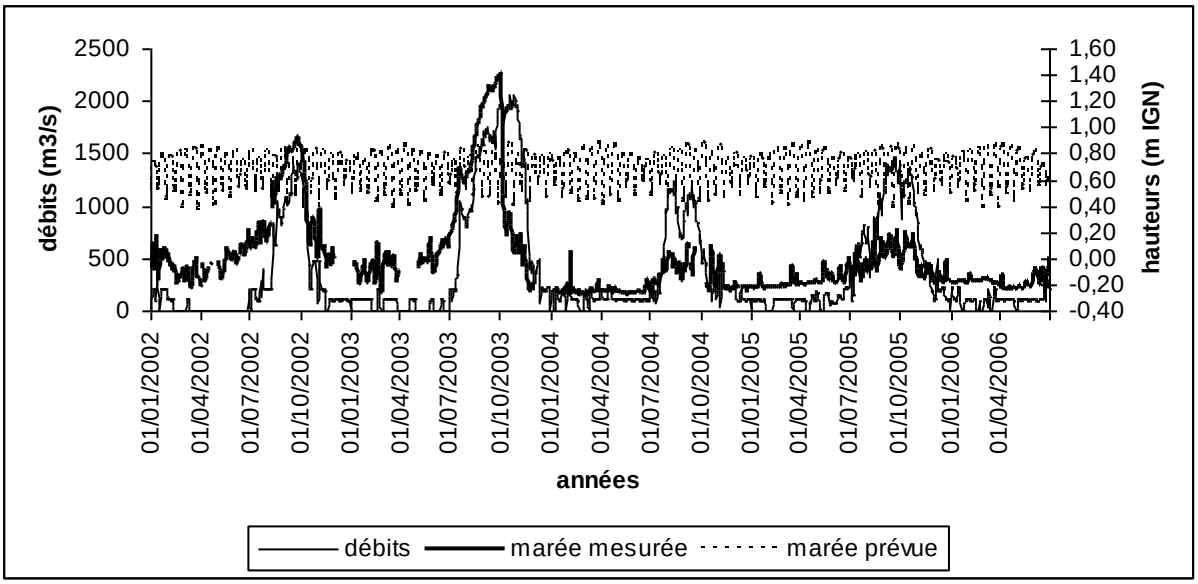


Fig. 6.4 : Le niveau du fleuve à la station de Saint-Louis en marée basse

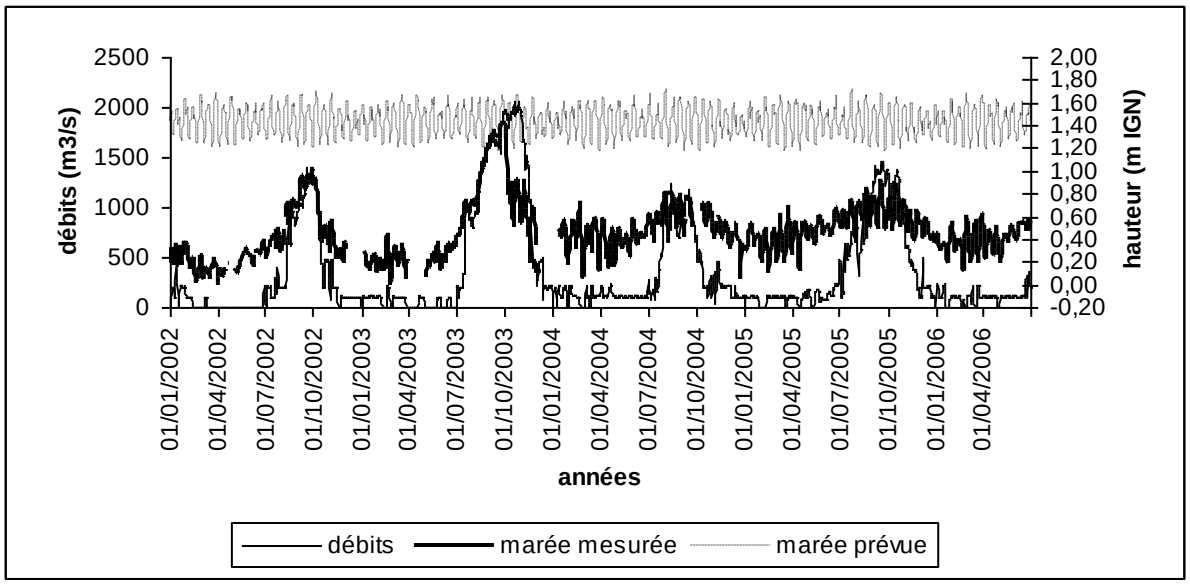


Fig.6.5 : Le niveau du fleuve à la station de Saint-Louis en marée haute

6.1.4. La propagation de la marée

La marée au niveau de l'estuaire du fleuve Sénégal résulte de la propagation de la marée océanique, mais cette propagation, en considérant une onde de marée d'amplitude donnée à l'embouchure, dépend du débit fluvial (Rochette, 1964). L'onde de marée qui se produit devant l'embouchure donne naissance à une onde dérivée qui se propage dans le fleuve

vers l'amont. Deux forces antagonistes majeures interviennent ainsi pour imposer le régime hydro-climatique saisonnier que l'on observe d'une part, les écoulements du fleuve, désormais maîtrisés par le barrage de Diama et d'autre part, la vigueur de la poussée océanique dont l'intrusion dans l'estuaire est facilitée par la morphologie du lit mineur qui se situe en contrebas de l'océan (Cecchi, 1992). A ce titre, l'analyse de la propagation de la marée de l'estuaire depuis son embouchure permet de mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique sur le tronçon aval du barrage de Diama. En outre, l'action de l'homme a modifié de façon considérable la propagation de la marée (Grovel et al. 1999) en réduisant la distance entre l'embouchure et le barrage de Diama. La réduction de la section d'écoulement affectera de manière sensible le processus de propagation des ondes de marées. Les marées y deviennent évidement prépondérantes.

Le calcul de propagation de la marée dans un estuaire, d'après Le Floch (1960) peut être abordé par la méthode des caractéristiques ou à l'étude du principal composant harmonique de la marée par l'utilisation directe des équations du mouvement. Dans l'un ou l'autre il faut assimiler l'estuaire à un canal de section rectangulaire dont la largeur et la cote de fond par rapport à un plan horizontal de référence sont facilement calculées. Ce qui n'est pas envisageable pour l'estuaire du Sénégal dans la mesure où l'allure du chenal fluvial est une forme en "V" aux pentes généralement irrégulières et dissymétriques (Kane, 1997). Le fond de l'estuaire, comme nous l'avons vu dans la figure 6.1 est irrégulier, caractérisé par un exhaussement vers l'embouchure. De surcroît, la méthode des caractéristiques perd une partie de son intérêt lorsqu'on envisage de calculer l'influence d'une modification des profondeurs (Lacombe, 1952 cité par Le Floch, 1960). La formule de Brunet-Moret (1970)[8] qui a été simplifiée par Kane (1985) devrait permettre de calculer la propagation de la marée et d'analyser son impact sur le phénomène de déstockage et stockage des eaux estuariennes. La formule de la vitesse de propagation théorique proposée par Kane (1985) est :

$$v = \sqrt{g(H)}$$

La vitesse de propagation n'est fonction que de la profondeur H.

[8] $V = \sqrt{g\,(H + h) - u}$

g est accélérateur de la pesanteur
H est la profondeur moyenne de la section (pour h=0)
h est la hauteur de l'onde de marée
u est vitesse moyenne dans la section du courant d'eau douce.

Cependant cette propagation est contrariée par le barrage qui constitue un obstacle et, de ce fait, la marée se dissipe dans l'estuaire. L'effet retour a une influence sur la propagation de la marée qui se fait sentir jusqu'au niveau de la nouvelle embouchure. La marée se manifeste comme une onde qui, en l'absence d'obstacles, prend la forme d'une onde progressive : la pleine mer ou la basse mer progresse à une vitesse V dépendant de la profondeur H selon la formule de Kane (1997). En présence d'un obstacle, la composante de l'onde marée donne naissance à une onde réfléchie qui, en interférant avec l'onde incidente, génère une onde stationnaire. Dans ce cas, le flot est le courant qui accompagne le montant, le jusant est le courant qui accompagne le perdant[9]. En outre, les ouvertures régulières du barrage de Diama contribuent à adoucir les eaux entre la nouvelle embouchure et l'ouvrage. La circulation estuarienne est, ainsi, constituée d'un écoulement en surface vers l'aval et d'un écoulement de fond vers l'amont. Les eaux douces plus légères ont tendance à rester en surface au dessus des eaux marines plus denses (Le Hir et al. 2001). Partant de ces constats, la formule de Brunet (1970) qui prend en compte les paramètres relatifs à la profondeur moyenne de la section, à la hauteur de l'onde de marée, à la vitesse dans la section semble être plus appropriée pour le calcul de la vitesse de propagation de la marée.

Pour ce calcul, nous avons considéré la période allant du 4 octobre (ouverture de la brèche) au 31 décembre 2007. Les débits qui transitent dans l'estuaire ne sont pas négligeables, ils correspondent en moyenne à 436 m^3/s. Pour le calcul de la vitesse moyenne dans la section du courant d'eau douce, nous avons découpé l'estuaire en deux tronçons pour tenir en compte de l'irrégularité des profondeurs et par ailleurs pour mieux appréhender les phénomènes de déstockage des eaux fluviales. A partir des mesures bathymétriques effectuées par l'IRD en 2004, nous avons calculé la superficie de chaque tronçon. Le premier tronçon concerne la zone située entre le barrage de Diama et la station de Saint-Louis, la vitesse y est de 0.03 m/s. Le deuxième tronçon va de cette station à la nouvelle embouchure, la vitesse y est de 0.08 m/s. Une variation des sections liée à la topographie du fond est susceptible de générer une variation inverse de vitesses (Le Hir et al. 2001). La remontée du fond entre les deux tronçons induit une baisse de la célérité. En appliquant la formule de Brunet-Moret, nous avons considéré la hauteur de la marée océanique, elle est de 1,43 m en marée haute et 0,63 m en marée basse en moyenne. L'onde de marée se déplace à une grande vitesse, la célérité de propagation est de 10 m/s en marée haute comme en marée basse entre Saint-Louis et le barrage de Diama. Les vitesses diminuent en fonction de la profondeur au fur et à mesure que l'on s'approche de l'embouchure. Elle descend sensiblement entre la nouvelle embouchure et la station où elle est de 9 m/s en marée haute et 8 m/s en marée basse. La vitesse de descente traduit la rapidité du processus de vidange des eaux fluviales en marée basse. La vitesse lors du montant

[9] http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/courant/courant2.htm

explique la prédominance de la marée en période d'ouverture des vannes du barrage. Les fluctuations semi-diurnes liées à la propagation des ondes de marée s'accompagnent de phénomènes de stockage et de déstockage (Kosuth et al. 2009) qui se traduisent par les variations des hauteurs d'eau au niveau de la station de Saint-Louis.

6.2. Le processus hydrodynamique de l'estuaire

Le fonctionnement hydrologique de l'estuaire dépendait jusqu'au 20ème siècle des facteurs naturels. Aujourd'hui, les actions anthropiques interviennent de plus en plus sur l'hydrologie de cette partie du fleuve limitant ainsi la dynamique océanique sur une distance moins importante qu'auparavant. La mise en eau du barrage de Diama, a introduit une nouvelle dynamique de la partie terminale du fleuve, qui fonctionne au gré des marées et de la gestion de l'ouvrage. Avant la mise en service du barrage de Diama, la remontée saline était sensible en période d'étiage jusqu'à Podor, à environ 300 km de l'embouchure. Le fleuve y alimentait de nombreuses zones d'inondation occupées par des vasières à mangrove. Le barrage de Diama a engendré un nouvel équilibre dans l'évolution de l'estuaire. Il a introduit une discontinuité dans le système estuarien en modifiant non seulement la qualité de l'eau mais aussi en accentuant une diminution des apports en éléments nutritifs amenés par les eaux continentales (Cecchi, 1992). Dans un tel contexte, l'ouvrage a installé dans le bas estuaire un régime commandé par la marée modifiant ainsi les modalités de submersion et d'immersion. L'artificialisation du régime de l'estuaire a contribué à réduire la période de transition au cours de laquelle s'effectuait le mélange des eaux douces et salées occasionnant aussi des modifications dans la morphologie actuelle du milieu. Le système hydrologique du Sénégal se trouve ainsi complètement bouleversé.

La nouvelle embouchure a créé un nouveau processus hydrodynamique de l'estuaire. Les modifications hydrodynamiques engendrées par la nouvelle embouchure se traduisent par un dysfonctionnement dans la circulation des eaux estuariennes. Cette dernière et les processus de mélange dépendent, d'une part, de l'influence continentale au travers des apports d'eau douce, et d'autre part, du jeu des marées et des influences atmosphériques. Le barrage constitue une rupture pour le régime du fleuve et modifie certains caractères physiques et hydrodynamiques des masses d'eau dans sa partie estuarienne (Kane, 1997). La délocalisation de l'embouchure a limité la dynamique du courant fluvial sur une distance qui est passée de 55 km (ancienne embouchure - barrage de Diama) à 33 km (entre la nouvelle embouchure et le barrage de Diama) et le fleuve est désormais plus soumis aux fluctuations des marées. En période de crue, ce phénomène s'estompe un peu avec l'augmentation du débit du fleuve. Ces apports d'eau douce ont une influence directe sur la salinité des eaux. Les contraintes de gestion du barrage imposent l'ouverture périodique des vannes pour réguler la côte en amont en période non pluvieuse. Ainsi, l'estuaire peut

recevoir les eaux douces évacuées par le barrage. Cette situation contribue à adoucir les eaux en aval du barrage. Nous verrons dans le chapitre qui suit que le taux de salinité a fortement baissé depuis 2003 à cause notamment de l'ouverture régulière des vannes du barrage de Diama. Toutefois au niveau du tronçon nouvelle embouchure - ancienne embouchure, le volume d'eau évaporé (plus de 2 millions de m^3) a influé sur la salinité jusqu'à produire un milieu sursalé. Ce phénomène résulte également du colmatage de l'ancienne embouchure. Il a réduit les échanges entre les eaux marines et fluviales et les circulations d'eau dans l'ancien bief.

De même, la baisse du niveau des hauteurs d'eau à la station de Saint-Louis se traduit par une réduction significative des superficies des zones inondées dans le bas estuaire. Elle était de plus de 9000 ha en 1999 où l'estuaire a connu une inondation importante. Ces superficies en eau représentaient une source importante pour l'alimentation en eau de la nappe du Gandiolais. Cette zone évolue actuellement en lagune et reste soumise à une forte évaporation.

Les eaux fluviales ont une plus grande capacité à se déverser en mer par cette nouvelle embouchure. L'hydrodynamisme de l'estuaire se caractérise ainsi par des variations du niveau d'eau à Saint-Louis qui sont quasiment dues aux marées semi-diurnes. À l'aval de la nouvelle embouchure, l'influence plus marquée des eaux saumâtres (réduction des apports d'eau douce) a contribué à une plus grande salinisation des eaux de surface, des nappes et des sols. La perturbation des échanges modifie de façon significative les mécanismes de salinisation de l'estuaire. Elle affecte l'ensemble des conditions environnementales de l'écosystème estuarien.

L'eau du fleuve se retire et se retrouve à des niveaux très bas en marée basse. La confrontation des eaux fluviales et marines crée une érosion aux environs immédiats de la nouvelle embouchure. L'influence de la marée sur le fleuve est devenue beaucoup plus importante. Et on peut convenir avec Dumas et Mietton (2006) que l'ouverture artificielle en 2003 modifie radicalement le contexte du bas delta et marque une nouvelle rupture.

La coupure de la Langue de Barbarie est considérée comme la principale réalisation ayant impliqué des modifications notables dans le fonctionnement hydrodynamique de l'estuaire. Il faut dire que l'étude de PNUE/UCC-Water/SGPRE (2002) avait prévu que le rapprochement de l'embouchure par rapport à la ville de Saint-Louis entraînerait la plus grande réduction de la pointe de crue et augmenterait aussi l'amplitude de la marée à Saint-Louis. De plus, la zone du Gandiolais ne connaîtrait plus beaucoup d'écoulements et ne dépendrait plus que des variations de la marée et des apports pluviométriques pour améliorer la qualité de ses eaux. Ainsi, la nappe de la zone est entrain de remonter en devenant de plus en plus salée, ce qui pose de graves problèmes d'alimentation en eau des populations de la zone. Des menaces pèsent également sur l'avenir de la culture maraîchère qui constitue avec la pêche, les principales activités des populations de la région. Il se trouve que la pluviométrie est très irrégulière dans la zone sahélienne, ce qui aura pour conséquence une absence de

recharge de la nappe alors que les populations de bas estuaire utilisent les eaux souterraines pour pratiquer le maraîchage. Les conséquences de ce nouveau processus hydrodynamique seront étudiées dans le chapitre qui suit.

Nous avons représenté sur la figure 6.6 le nouveau schéma hydraulique de l'estuaire.

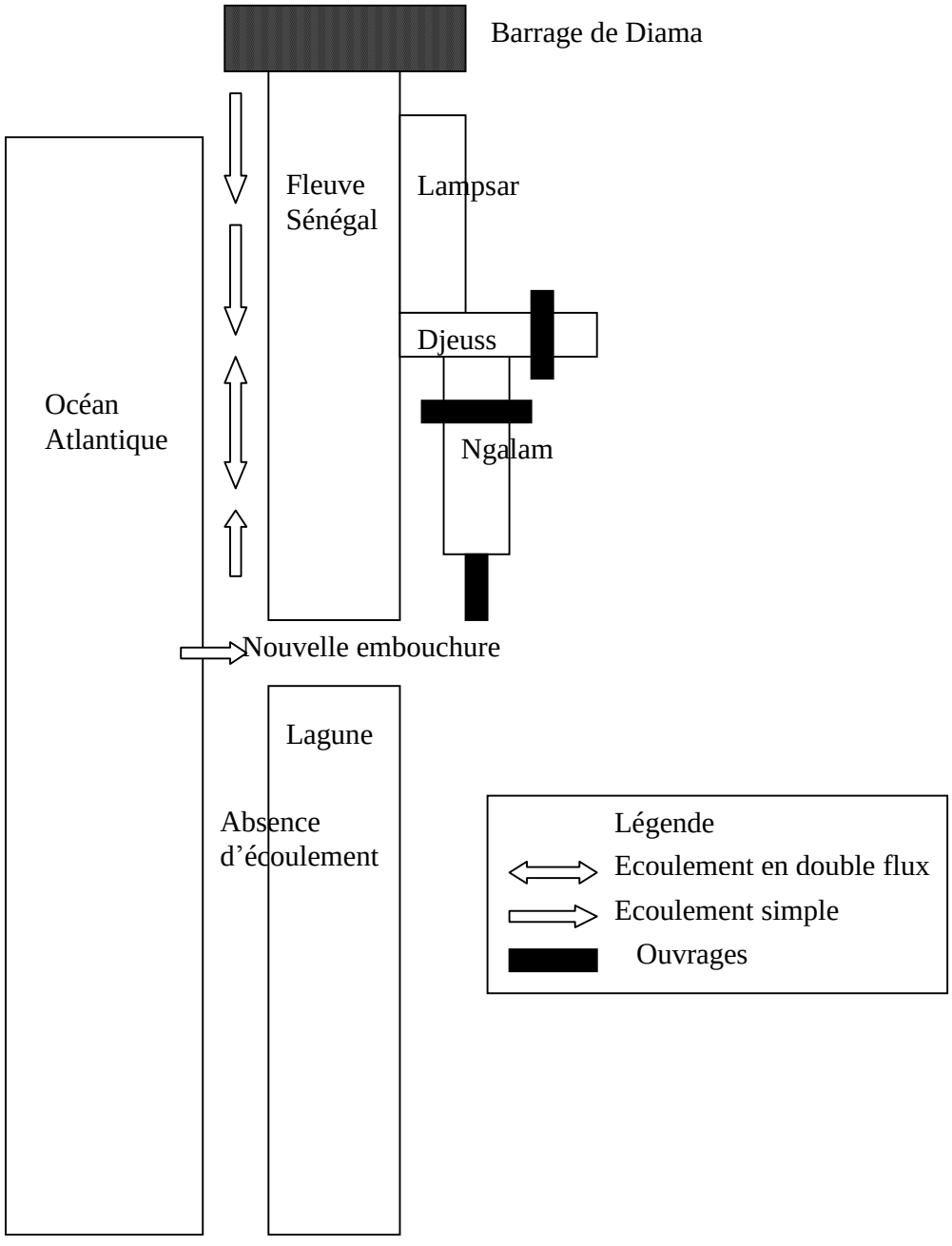


Fig. 6.6 : Schéma hydraulique de l'estuaire

Lorsque les vannes du barrage de Diama sont fermées, l'écoulement est simple, les marées entrant vont jusqu'au au barrage du fait de la faiblesse des profondeurs sur tout le bief. C'est

un domaine très dynamique où les eaux douces et marines se mélangent au rythme des marées (Bouvy et al. 2010). Les ouvrages intermédiaires empêchent les rentrées d'eau marines qui sont expulsées en aval. Les marigots de Ngalam, du Lampsar et du Djeuss délimitent la réserve d'eau douce de la ville de Saint-Louis qui s'étend dans le village de Bango. Le Ngalam constitue un bassin de stockage des eaux de la réserve jusqu'à l'ouvrage de Ndiawdoune qui sert à l'isolement de la réserve et au renouvellement périodique des eaux. L'ouvrage de Bango alimente la réserve d'eau douce à partir du fleuve Sénégal pendant la période de crue. L'ouvrage de Bountou Batt contrôle les variations de niveau de l'eau dans la cuvette de Gueumbeul. Toutefois, la position de la nouvelle embouchure par rapport à l'ouvrage (fig. 6.7) peut entraîner des phénomènes de tarissement de la cuvette à cause notamment de la dérivation des eaux fluviales au niveau de cette ouverture. Cette situation aura des conséquences sur l'avifaune puisqu'elle constitue un lieu de reproduction des espèces limicoles.

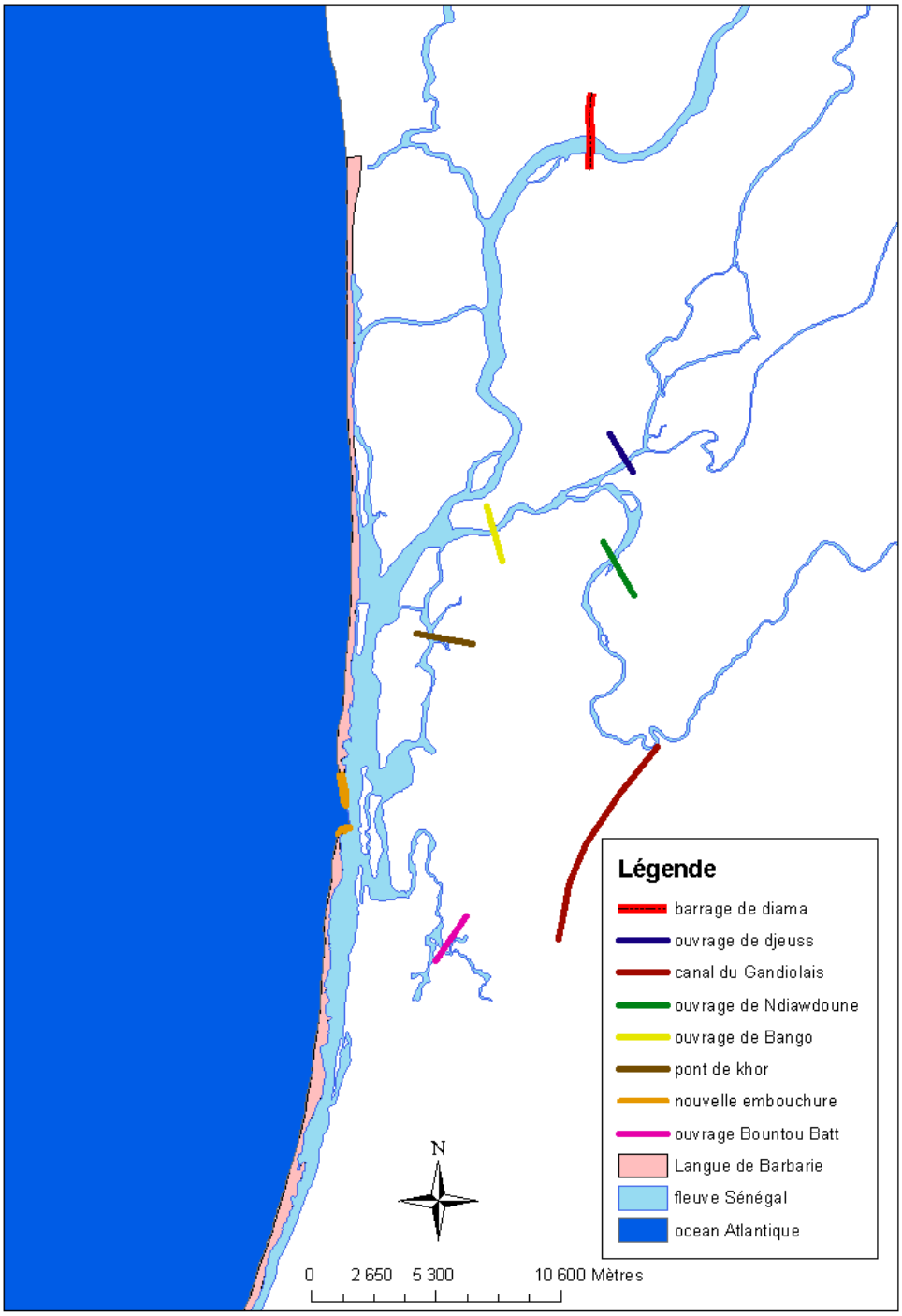


Fig.6.7 : Les aménagements dans l'estuaire

À l'inverse, en période d'ouverture des vannes, l'écoulement est en double flux, les eaux du fleuve s'écoulent vers la mer et les eaux marines vers l'aval de l'ouvrage. Cependant, une inconnue demeure, elle est relative aux processus des échanges entre nappe et fleuve sur le tronçon du barrage de Diama et de la nouvelle embouchure. Lacune de taille puisque ces échanges pourraient permettre d'estimer en moyenne le volume d'eau qui transite vers

l'embouchure en l'absence de jaugeage. Seule une modélisation du fonctionnement hydrodynamique devrait permettre de lever ces incertitudes.

Conclusion

L'estuaire évolue sous l'influence des actions anthropiques. Le rapprochement de l'embouchure a induit des modifications sur la dynamique fluvio-marine. La pénétration majorée de la marée a entraîné une amplification de celle-ci et génère un transit d'eau sur le bief aval du barrage. En fonction des courants de flot et de jusant, l'estuaire est marqué par une importante remontée de la marée et inversement à une vidange de l'estuaire avec une importante évacuation des eaux estuariennes. L'accentuation des facteurs hydrodynamiques est à l'origine du processus d'évolution rapide de la brèche. Le colmatage de l'ancienne embouchure n'est pas exempt de conséquences, l'absence d'écoulement sur ce bief signifie que l'évaporation y sera plus importante. Ce nouveau processus hydrodynamique aura des répercussions notables sur le système socio-environnemental qu'il y a lieu de présenter dans la troisième partie de ce travail.

PARTIE III : MODIFICATIONS DE L'EMBOUCHURE DU FLEUVE SENEGAL : IMPACTS SUR LA VULNERABILITE DU SYSTEME SOCIO-ENVIRONNEMENTAL

La réalisation de grands aménagements au niveau des fleuves s'accompagne très souvent d'effets plus ou moins néfastes liés à l'utilisation des ressources en eau et à la mise en valeur agricole des terres. Ces effets négatifs ont comme toile de fond le mode de gestion du milieu qui est sujet à de nombreuses failles (Kane et al. 2003). Outre ces problèmes de gestion, les aménagements au niveau des cours d'eau peuvent entraîner une accentuation de la salinité des eaux et poser en conséquence des problèmes d'approvisionnement en eau et une dégradation des écosystèmes. Les répercussions de ces aménagements sont beaucoup plus complexes dans les zones de contact fleuve-océan. Les estuaires constituent un écosystème particulièrement sensible aux variations mineures dues aux influences océaniques et fluviales. Aussi Lotze et al. (2007) remarquent que les pressions de l'homme sur le milieu estuarien et les espaces côtiers ont épuisé plus de 99% d'espèces autrefois importantes, détruit 96% des prairies sous-marines, des habitats des zones humides et dégradé la qualité des eaux. Ces perturbations induites constituent des exemples incontestés de l'action de l'homme sur le milieu.

La nouvelle embouchure du fleuve Sénégal est à l'origine d'importants dommages au niveau de l'estuaire. Cet aménagement n'a pas manqué de modifier le régime hydrologique de l'estuaire et a particulièrement engendré des modifications au niveau des écosystèmes estuariens et accentué la vulnérabilité des sociétés du bas estuaire dont les activités reposent essentiellement sur l'exploitation des ressources en eau. Les perturbations induites montrent que la fragilité du milieu et le contexte socio-économique ne sont pas considérés comme un enjeu de taille dans la gestion des risques d'inondation de la ville de Saint-Louis.

En outre, l'élévation du niveau moyen de la mer pourrait avoir d'importantes répercussions notamment sur les populations côtières, les écosystèmes côtiers alors que leur capacité d'adaptation est très faible (Tol et al. 2004). Il est évident que la survenance de cet événement climatique extrême renforcera la vulnérabilité du système socio-environnemental.

L'objet de cette troisième partie est de mettre en évidence les impacts de la délocalisation de l'embouchure sur le système socio-environnemental qui se traduisent par une vulnérabilisation progressive de la société. Le premier chapitre est consacré à l'évolution récente du milieu. Le deuxième chapitre aborde la vulnérabilité des sociétés du bas estuaire face aux modifications environnementales. Le troisième chapitre analyse l'accentuation d'une vulnérabilité du système dans une perspective d'élévation du niveau de la mer.

Chapitre 7 : Une évolution récente marquée par les modifications du milieu

La transformation de l'écosystème a augmenté l'ampleur de la dégradation des espaces côtiers, la perte de biodiversité et a réduit leur capacité de résilience écologique. Cela représente un danger potentiel pour une catastrophe, comme le démontre les impacts récents du tsunami asiatique en 2004 et de l'ouragan Katrina en 2005 qui ont été exacerbés par les pertes de mangroves et de zones humides (Lotze et al. 2007). La dynamique actuelle du milieu estuarien se traduit par des modifications directes et perverses qui affectent tout le système socio-environnemental. Il faut souligner que c'est le barrage de Diama qui a induit les premières modifications dans le bas estuaire, la nouvelle embouchure a amplifié le niveau de dégradation. Les perturbations actuelles du fonctionnement de l'estuaire s'expliquent par le fait que très vite la brèche a joué le rôle d'une nouvelle embouchure artificielle avec le colmatage de l'ancienne. Avec le changement de position de l'embouchure, le fleuve se vide de ses eaux et fonctionne désormais comme une lagune dans sa parie distale. De ce fait, l'amplification du marnage se traduit par une érosion des berges du fleuve, en marée haute et un dépérissement de certaines espèces végétales.

Nous analysons dans ce chapitre les modifications apportées par la nouvelle embouchure sur l'environnement estuarien, toutefois celles consécutives à la mise en eau du barrage seront partiellement abordées.

7.1. La morphologie actuelle de la Langue de Barbarie

La Langue de Barbarie subit les assauts d'une dynamique extrêmement active depuis l'ouverture de la brèche. En fonction des facteurs hydrodynamiques (houle, dérive littorale, vagues…) devenus plus intensifs en raison du rapprochement de l'embouchure, les phases d'érosion et d'accumulation sont devenus très marquées. Vu cette nouvelle donne, le suivi de l'évolution morphologique de la Langue de Barbarie au niveau de la brèche par un procédé de relevés topographiques était devenu nécessaire.

7.1.1. Les levés topographiques

Dans le cadre des travaux du projet Campus (1989-1992), un observatoire des côtes (ODC) a été installé sur la Langue de Barbarie pour suivre son évolution morphologique. La présente étude vise à appréhender les modifications morphologiques ayant affecté l'environnement sédimentaire du cordon littoral suite à l'ouverture de la nouvelle embouchure. Le suivi topographique s'appuie sur des bornes implantées au niveau de la

nouvelle embouchure qui servent de repère pour apprécier le recul des berges. Pour les opérations de levés topographiques, le géodimètre à rayon laser est placé au niveau de la borne. La distance et la dénivelée par rapport à la borne repère sont obtenues par lecture directe sur le géodimètre. L'appareil permet de définir par rapport à un autre repère fixe, un angle de profil qui sera rigoureusement le même durant toute la période de surveillance afin de permettre une comparaison des profils dans le temps. Les bornes sont représentées par un tube PVC de 60 cm environ enfoncée à 50 cm de profondeur et coulée dans du béton. Une tige en fer débordant de 5 à 10 cm est placée au centre du tube bétonné.

Sept bornes sont installées au niveau de la partie nord de la brèche. Seule une borne a disparu du fait de l'érosion côtière, les autres sont restées stables. Contrairement à la base nord, la partie sud a connu une érosion très active due à la dérive littorale. Deux repères installés antérieurement ont disparu, arrachés par la dérive littorale et le déferlement des vagues. L'érosion côtière est extrêmement active et déstabilise les dunes bordières, hautes de 5 à 7 mètres de hauteur. Cependant des profils ont été effectués au niveau de chaque partie de la brèche, la localisation de ces profils est représentée sur la figure 7.1. Des échantillons de sédiments sur les ruptures de pentes et les points remarquables des profils topographiques réalisés sont prélevés au cours de chaque campagne de mesure et ont fait l'objet d'une analyse granulométrique.

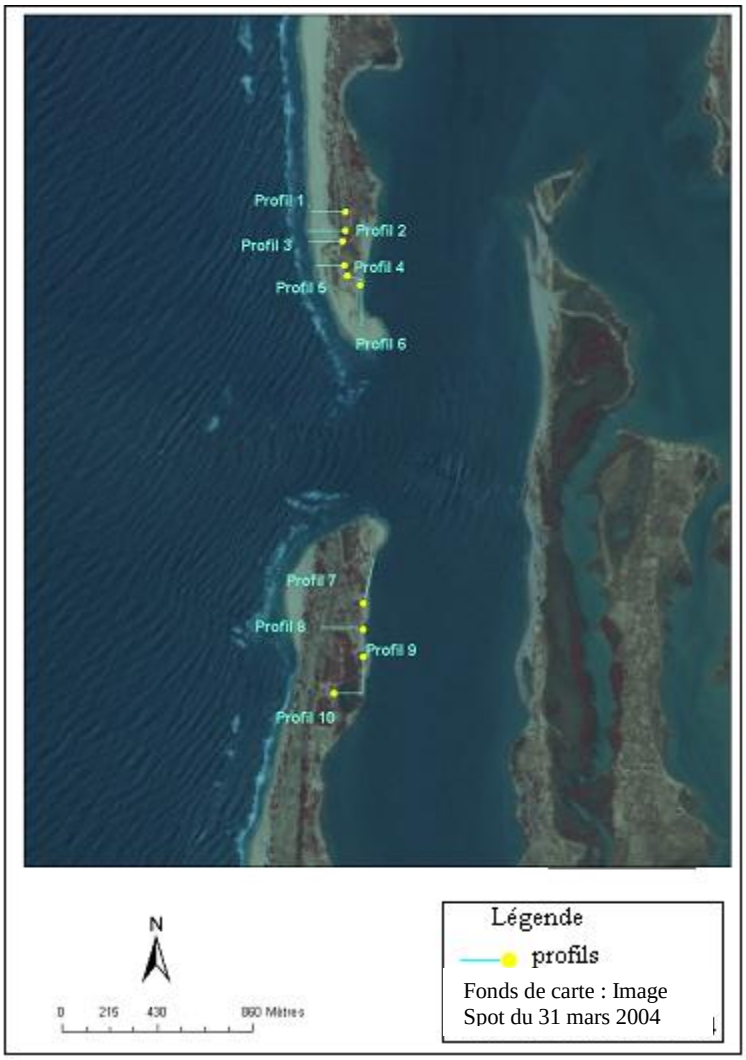


Fig. 7.1 : Localisation des profils topographiques

7.1.2. Les caractères généraux des profils topographiques

Les figures 7.2 et 7.3 montrent des phases d'érosion et d'engraissement de la plage au niveau de la partie nord et de la partie sud de la nouvelle embouchure entre les deux campagnes de mesures (mai et juillet 2005). Les profils sont réalisés du côté de la mer et du côté du fleuve afin d'évaluer le rivage le plus sensible aux phénomènes d'accrétion et de recul. Le volume sédimentaire accumulé (+) ou érodé (-) est calculé par la méthode planimétrique. Elle consiste à déterminer les surfaces d'accumulation ou d'érosion par superposition des profils dans un intervalle de temps séparant deux campagnes. Ce volume est exprimé ainsi en mètre cube par mètre linéaire de rive (Ndiaye, 2004). Ceci permet d'estimer la quantité nette de transit sédimentaire entre les deux campagnes de mesures.

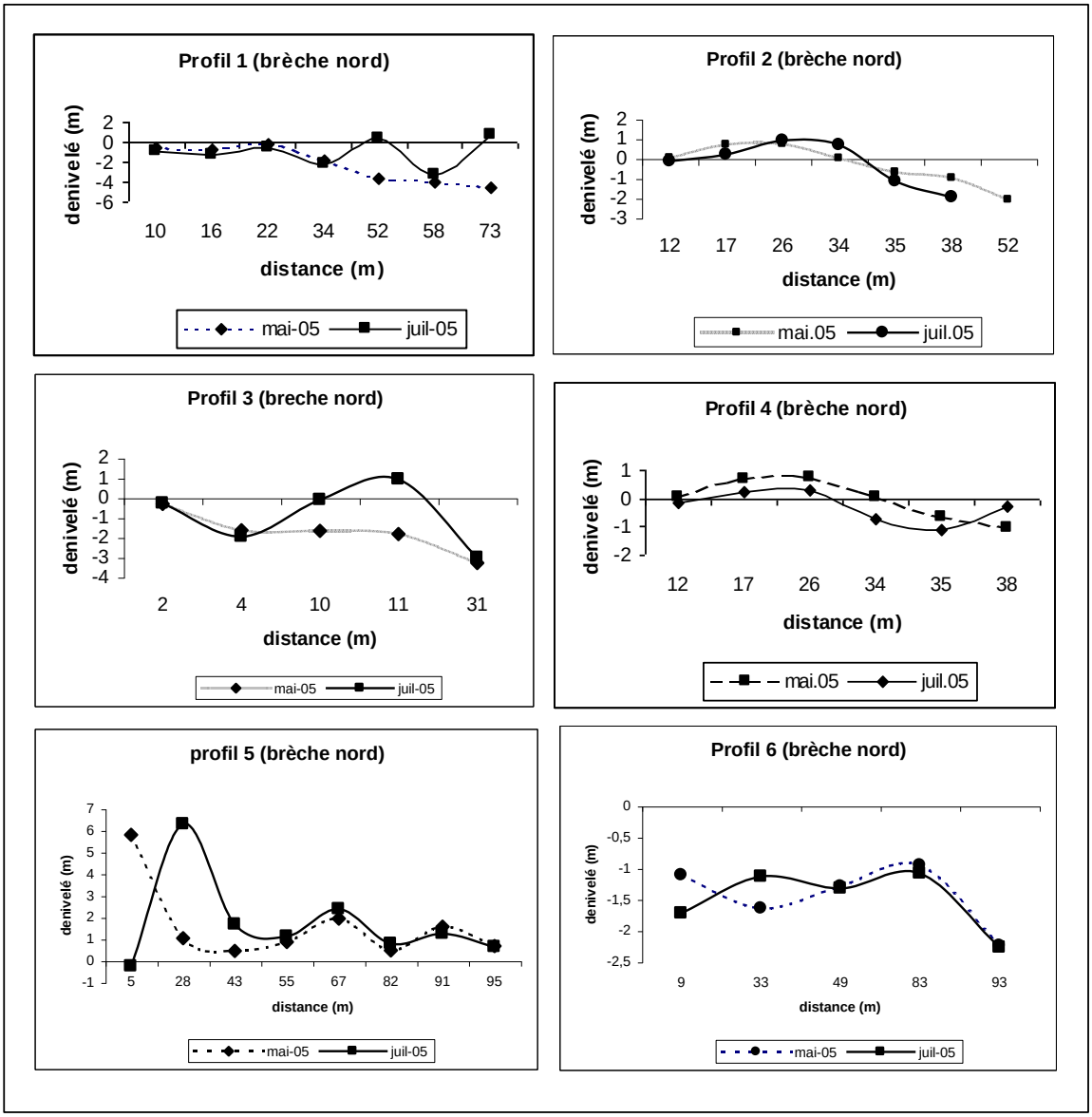


Fig.7.2 : Profils topographiques de la partie nord de la brèche

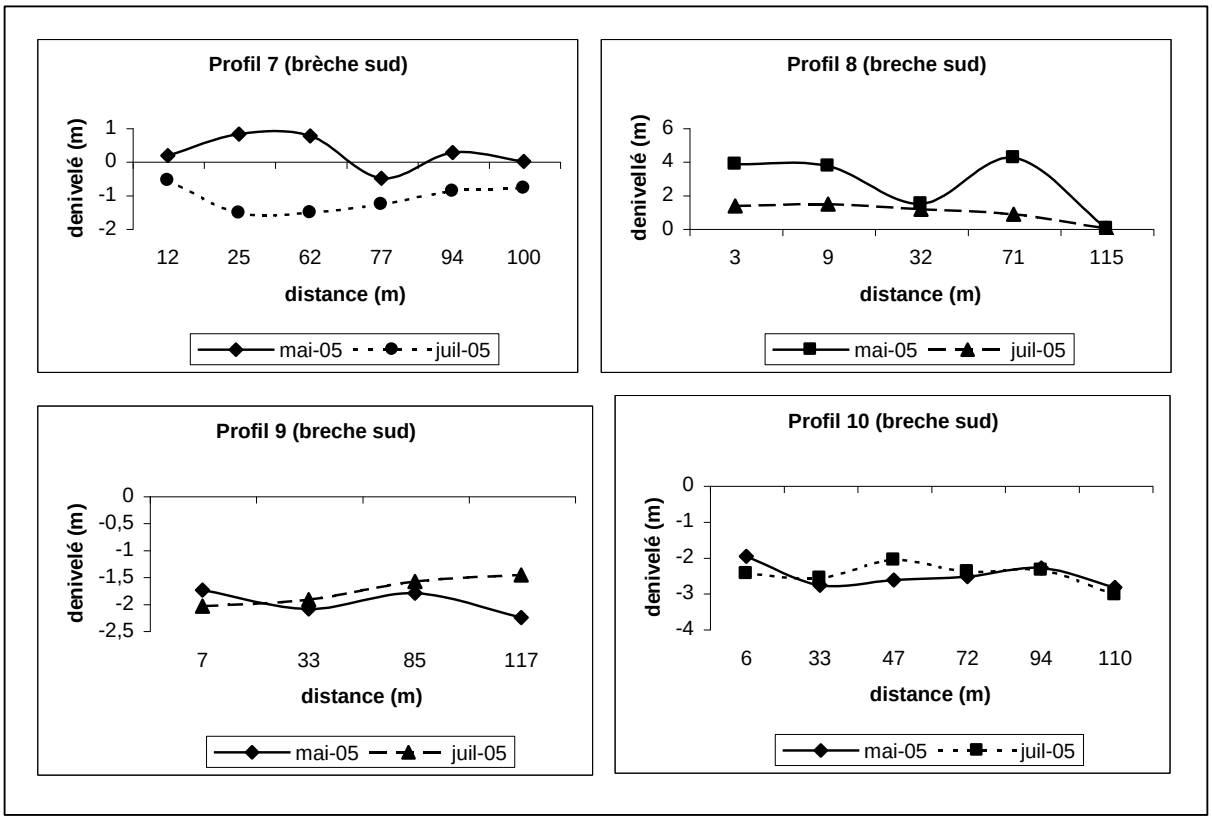


Fig. 7.3 : Profils topographiques de la partie sud de la brèche

Au niveau du premier profil, sur une distance d'environ 20 m l'érosion n'est pas très significative par rapport à la mesure du mois de mai, les profils sont plutôt stables. En revanche, à partir de ce point, se succèdent des phases d'accrétion et de recul de la basse plage, soit + 7,02 m^3 et - 23,64 m^3 de transit sédimentaire. Cette importante érosion entraîne une accentuation des pentes[10] des profils qui sont très fortes en juillet, soit 55%. De plus, la borne la plus proche de la brèche (300 m) installée lors de la première campagne de mesure s'est retrouvée à environ 200 m du rivage en juillet. Le deuxième profil montre une succession de phases d'érosion et d'accumulation qui ne sont pas très marquées. Au niveau du profil 3, la basse plage a accumulé un taux de + 19,71 m^3 de sédiments déposés sur les berges par la dérive littorale. Nous pouvons remarquer au niveau du profil 4 une érosion de - 4,02 m^3 sur une distance d'environ 24 m. Les profils 5 et 6 orientés du côté du fleuve montrent une accrétion et une avancée du rivage soit un taux de + 158 m^3 et + 65 m^3 sur plusieurs mètres du fait des sédiments qui sont transportés en direction du rivage. Le bilan

[10]Les pentes sont calculées selon la formule P (%) = (ΔH / ΔD) x 100, avec H = dénivelé (m) et D = distance (m).

sédimentaire global, positif, traduit une tendance générale à l'accrétion qui se manifeste par ailleurs par un allongement de la ligne de rivage avec des taux variables d'un profil à un autre.

La partie sud a connu une érosion très active due aux vagues qui sapent le cordon littoral. Le rivage de la brèche évolue comme une flèche qui s'incurve et s'enfonce progressivement dans le fleuve. Les profils 7 et 8 ont enregistré respectivement un recul de - 41 m^3 et - 112 m^3. Cependant une relative stabilité est notée au niveau des profils 9 et 10.

Au total, les profils topographiques de la Langue de Barbarie montrent un cordon littoral érodé sur plusieurs mètres, à proximité immédiate de la brèche. Des dunes entières ont disparu, sous les actions conjuguées de la mer et du vent, et leur sédiment dispersé dans le chenal fluvial contribuant ainsi à la baisse des profondeurs au niveau de la partie nord de la brèche. Les résultats des travaux du Projet Campus (1993) avaient montré un état d'accrétion au niveau de la partie sud de la Langue de Barbarie tandis qu'au niveau de la base serrée (face à Gandiol), la partie basse du profil transversal sous-marin montre un certain déséquilibre.

L'érosion se traduit aussi par un recul du rivage externe de la Langue de Barbarie alors que ce cordon littoral abrite le Parc National de la Langue de Barbarie (PNLB) au niveau du secteur distal. De surcroît, en face de la nouvelle embouchure, soit à 500 m, se trouve l'île de Doun Baba Dièye et à environ 2 km en amont le quartier de Pikine situé au sud de la ville de Saint-Louis. Si la première est aujourd'hui soumise à l'action des vagues alors qu'elle en était épargnée, le quartier de Pikine est, à ce jour, menacé dans son existence par l'évolution de la nouvelle embouchure. Dans un tel contexte, beaucoup de menaces pèsent sur le devenir de cette île, de l'îlot aux oiseaux du PNLB et du quartier de Pikine. Avant d'étudier les menaces qui pèsent sur ces espaces nous allons à présent analyser la composition granulométrique des sédiments. Elle permet de mieux comprendre la dynamique fluvio-marine au niveau du cordon littoral.

7.1.3. Analyse granulométrique des sédiments

Les sédiments prélevés au cours des campagnes de mesure ont fait l'objet d'un traitement pour faire ressortir la faction granulométrique.

7.1.3.1. Méthode de traitement

Les échantillons récoltés au niveau de la dune, de la berme et du jet de rive ont fait l'objet d'un lavage à l'aide d'un tamis de 50µm. Ce procédé a pour objectif de séparer la fraction

sableuse de la fraction fine. La fraction sableuse est ensuite trempée dans une solution de 50 ml H_2O et de 50 ml de HCL. Cette décalcification permet d'éliminer le calcaire et les débris coquilliers contenus dans l'échantillon. Après cette étape, les sédiments sont séchés à l'étuve à 100°C. Afin de caractériser la granulométrie, une colonne de 17 tamis de norme AFNOR allant de 2 mm à 0,05 mm a été utilisée. Chaque échantillon a fait l'objet d'un tamisage avec un poids maximum de 100 grammes pour une durée de 15 minutes. Les refus cumulés sont pesés et les valeurs obtenues sont reportées sur une fiche de tamisage. Ces valeurs sont ensuite converties en pourcentage nous permettant de tracer des courbes cumulatives sigmoïdes en coordonnées semi-logarithmiques (annexe 4). A partir de ces courbes granulométriques, nous avons pu définir un certain nombre de fractiles qui sont des diamètres de grains exprimés en unités Phi et correspondant à des pourcentages cumulatifs bien déterminés. Les paramètres de position ou de dispersion sont déterminés à partir des différents fractiles en utilisant les formules classiques de Folk et Ward (1957) tirées de l'article de Chevillon (1995)[11]. La notation φ est le logarithme de base 2 du diamètre de grain exprimé en millimètre. Le type de sable est déterminé en utilisant la classification de Wentworth.

La taille moyenne : $Mz = (\varphi\ 16 + \varphi\ 50 + \varphi\ 84) / 3$

3,98	3	2	1	0	-1	-2	-6	φ
vase	sable très fin	sable fin	sable moyen	sable grossier	sable très grossier	granule	gravier	galet
SG	STF	SF	SM	SG	STG	GN	GV	GT
0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	64	(mm)

L'asymétrie : $Ski = \{[(\varphi16+\varphi84) -2 (\varphi\ 50)] / 2(\varphi84 -\varphi16)\}+\{[(\varphi5+\varphi95)-2(\varphi50)]/2(\varphi95-\varphi5)\}$

-1	0,3	-0,1	0,1	0 ,3	1
Très négative	négative	symétrie	positive	Très positive	

[11] Texture, granulométrie et composition bioclastique des sédiments actuels de l'atoll d'Ouvéa (Iles Loyauté, Nouvelle- Calédonie)

La normalité ou indice de Kurtosis : Kg = (φ95-φ5)/ {2,44 (φ75 - φ25)}

0,67	0,9		1,11	1,5	3
Très peu accusée	Peu accusée	Moyennement accusée	accusée	Très accusée	Extrêmement accusée

Le triage : $\sigma_{i = \{}$φ84 - φ16) / 4} + {(φ95 - φ 5) / 6,6}

	0,5	1,1	1,5	2
Extrêmement bien trié	Très peu trié	Bien trié	Mal trié	Très mal trié

7.1.3.2. Résultats

7.1.3.2.1. La taille moyenne

Le tableau 7.1 montre que la taille moyenne des sédiments est constituée de deux types de texture. La première correspond aux sables fins (2 à 3 φ) que nous retrouvons au niveau de tous les profils situés au niveau de la dune. Mais la taille des grains est moyenne de la dune vers la berme et le jet de rive. Cette composition granulométrique croissante favorise le transport par suspension pour le sable fin et par saltation pour le sable moyen. Les sédiments fins sont transportés grâce à l'érosion et aux sapements latéraux en aval et sont déversés au niveau des extrémités de la brèche.

Tableau 7.1 : La taille moyenne des sédiments

Moyenne		Profils							
Position	mois	1	2	3	4	5	6	7	8
Dune	Mai	2.52	2.19	2.15	2.50	2.28	2.42	2.55	
	juillet	2.48	2.32	2.16	2.04	2.18	2.18	2.06	
berme	Mai		2.41	2.47	2.13			2.53	
	Juillet	1.83	2.50	2.32				2.36	
Jet de rive	Mai		2.42	1.75	2.02		1.98		2.40
	juillet		1.68	2.94	1.79		2.61		2.47

7.1.3.2.2. L'asymétrie

Au niveau du tableau 7.2 l'asymétrie est variable pour les sédiments prélevés en mai et en juillet. Toutefois, quelques échantillons présentent une symétrie granulométrique (-0,1 à 0,1φ), comme c'est le cas au niveau des profils 3 et 4 localisés au niveau de la dune. C'est seulement au niveau du jet de rive que l'asymétrie positive prédomine en mai mais elle s'estompe en juillet. De façon générale, nous remarquons un équilibre relatif entre les sédiments à asymétrie négative et les sédiments à asymétrie positive. Ces données reflètent un équilibre dans la production de matériel fin ou de matériel grossier (Chevillon, 1995).

Tableau 7.2 : Indice d'asymétrie des sédiments

Indice d'asymétrie		Profils							
Position	mois	1	2	3	4	5	6	7	8
Dune	Mai	-0.14	-0.17	-0.16	0.10	0.04	-0.11	0.10	
	juillet	0.002	0.50	-0.10	0.05	0.05	0.04	0.05	
berme	Mai		-0.02	0.10	-0.12			0.04	
	Juillet	0.08	-0.13	-0.28				-0.11	
Jet de rive	Mai		0.02	0.18	0.14		0.16		0.17
	juillet		-0.06	0.81	-0.01		0.13		0.11

7.1.3.2.3. La normalité

Au regard du tableau 7.3 la distribution est très accusée (plus de 1,5φ) au niveau du profil 3 de la dune en mai et juillet. Cette distribution s'estompe et devient peu accusée (0,67 à 0,9φ) à moyennement accusée (0,9 à 1,11φ) sur la majeure partie des profils à l'exception du profil 2 de la dune et du profil 3 du jet de rive de juillet où les échantillons présentent une distribution très peu accusée (inférieur à 0,67φ).

Tableau 7.3 : Indice de normalité des sédiments

Indice de normalité		Profils							
Position	mois	1	2	3	4	5	6	7	8
Dune	Mai	0.91	1.06	1.55	0.80	0.86	1.01	0.91	
	juillet	0.91	0.52	1.72	1.24	1.30	0.99	1.23	
berme	Mai		0.94	0.85	1.03			1.09	
	Juillet	0.91	0.72	0.88				0.94	
Jet de rive	Mai		0.95	1.14	1.08		1.00		1.01
	juillet		1.04	0.56	0.85		0.99		1.00

7.1.3.2.4. Le triage

Les valeurs du triage comprises entre 0,3 et 0,5 (tableau 7.4) sont extrêmement bien triées alors que celles qui sont comprises entre 0,5 et 0,8 sont très bien triées. Les sables fins extrêmement bien triés prédominent et ceci traduit la forte activité des agents morphodynamiques au niveau de la Langue de Barbarie.

Tableau 7.4 : Indice de triage des sédiments

Indice de triage		Profils							
Position	mois	1	2	3	4	5	6	7	8
Dune	Mai	0.4	0.4	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4	0.3
	juillet	0.3	0.3	0.6	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
berme	Mai		0.3	0.4	0.4	0.5	0.3		0.3
	Juillet	0.4	0.4	0.3		0.4	0.5		0.4
Jet de rive	Mai		0.3	0.8	0.4			0.4	
	juillet		0.3	0.7	0.3			0.3	

Les résultats apportés dans l'étude des indices statistiques des sédiments montrent que la Langue de Barbarie est une côte à sédiments meubles (sable fin et sable moyen). Cette composition granulométrique en fait un milieu fragile et très instable. La menace de rupture du cordon est donc permanente. Le volume total de sédiments déposés entre les deux campagnes de mesures correspond à 249 m^3 et celui érodé est estimé à 161 m^3. Les facteurs météorologiques et océaniques constituent les principaux agents de la dynamique

du système dunaire de la Langue de Barbarie. Ils sont les forçages à l'origine de l'érosion et de l'accrétion.

7.2. Les forçages météorologiques et océaniques

Différents facteurs, en l'occurrence les vents, les vagues, la houle constituent des éléments déterminants dans la dynamique du littoral estuarien.

7.2.1. Le polygone des fréquences des vents

Le vent est l'agent principal de la dynamique du système dunaire de la Langue de Barbarie. Il est un facteur climatique important puisqu'il est le forçage à l'origine de la houle et des mers de vent. La situation éolienne a été déjà analysée dans le deuxième chapitre de la première partie pour déterminer le type de climat dans la zone estuarienne. Il s'agit à présent de déterminer les caractéristiques particulières de la fréquence et de l'intensité de l'érosion côtière en fonction du vent qui génère les vagues et les houles. Nous disposons pour cette étude des données anémométriques au pas de temps mensuel de 1951 à 2004 de la station de Saint-Louis. Nous avons considéré les maxima mensuels annuels pour constituer l'échantillon. La figure 7.4 représente l'histogramme de fréquence des vents.

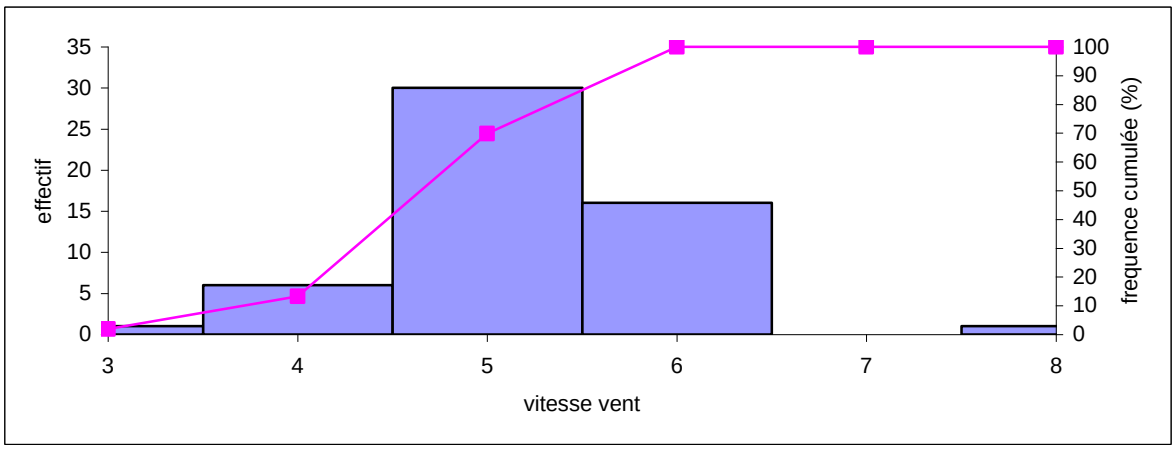


Fig. 7.4 : Histogramme de fréquences cumulées des maxima mensuels annuels des vents

A l'instar de Sall (1993), nous considérons les vitesses de vents de plus de 5 m/s comme les plus efficaces pour exercer une influence sur le littoral. Ces vitesses de vent sont plus fréquentes que celles qui sont faibles, 3 m/s. Elles sont apparues 30 fois alors que celles qui sont plus faibles une fois. Au total, les vitesses de vents maxima de plus de 5 m/s apparaissent 46 fois sur 54. Ce seuil critique se manifeste généralement durant les périodes

de mars, avril, mai (cf. chapitre 2). Du fait de leur intensité, ces vents soufflant pendant la saison sèche exercent une importante influence sur les facteurs océaniques (vague et houle). C'est effectivement pendant ces périodes que les conditions océaniques sont plus favorables à une érosion du cordon littoral.

Dans l'échelle de Beaufort, ces vitesses de vents de 18 km/h correspondant au degré 3 sont caractérisées par de petites vagues d'une hauteur de 60 cm. Mais elles jouent un rôle majeur dans la dynamique du littoral de la Langue de Barbarie. Selon Sall (1982), les vents soufflant sur la Langue de Barbarie sont caractérisés par une grande variabilité directionnelle et ont une forte incidence morphogénique sur la Langue de Barbarie. L'augmentation de la vitesse du vent implique une accentuation de l'énergie disponible pour la mer du vent c'est-à-dire la part de l'agitation qui est due au frottement du vent local sur l'eau, indépendamment de l'effet du champ de pression (Regnauld et al. 2004). Ces vitesses de vent efficaces engendrent les houles qui ont une efficience sur les phénomènes de transport de sédiment.

7.2.2. L'influence de la houle

La houle est engendrée par les tempêtes lointaines de l'Atlantique nord et sud et se manifeste par de grandes longueurs d'onde. Elle induit des phénomènes de dérive qui sape les falaises littorales. D'après Sall (1982), les côtes intertropicales sont soumises à un régime océanographique caractérisé par de fortes houles et beaucoup plus constantes que dans les autres latitudes. Dans ce contexte, Coleman et Wright (1975) cité par Kane et al. (2003) soulignent que la côte sénégalaise au large de l'embouchure du fleuve Sénégal est soumise à l'une des plus fortes agitations au monde. Les vagues frappant la côte du delta du Sénégal pendant trois heures représentent plus d'énergie que celles qui affectent les côtes du delta du Mississippi, en une année. La puissance de la houle y serait de l'ordre de $112{,}42.10^{7}$ ergs/sec, c'est-à-dire 550 fois plus importante qu'au Mississippi, 50 et 5 fois plus forte qu'aux embouchures respectives du Niger et du Nil. Ces fortes houles peuvent franchir le cordon littoral de la Langue de Barbarie et engendrent un processus d'érosion capable d'ouvrir une nouvelle communication avec la mer dans les sections les plus faibles. Elles ont une hauteur de 3 m mais leur probabilité décennale est estimée à 5 m et la probabilité centennale à 6,2 m (Kane, 1997). Deux types de houles dont les caractéristiques sont différentes selon leur origine et les saisons se manifestent alternativement dans la zone estuarienne du fleuve Sénégal, ce sont les houles de NW et les houles de SW.

7.2.2.1. La houle du NW

Elle prédomine sur le littoral pendant la saison non pluvieuse d'octobre à juin. Sa direction est extrêmement constante durant toute la saison avec quelques observations de direction N. L'amplitude de cette houle est généralement forte, les valeurs moyennes sont comprises entre 1 m et 1,6 m (OMVS, SOGREAH, 2006). Selon Guilcher (1954) cité par Kane (1997), la houle se propage à une vitesse de l'ordre de 22 m/s. Cette houle atteint la côte sous forme de trains de grande longueur d'onde (en moyenne de 190 à 300 mètres), avec des périodes oscillant de 11 à 15 secondes. La houle du NW induit le déplacement latéral d'importantes quantités de sable, assure également le transit et accumule les sédiments sur l'estran. Les mois de mars et d'avril correspondent à l'engraissement maximum de la plage.

7.2.2.2. La houle du SW

Les houles australes sont plus faibles que celles du NW. Elles sont prédominantes de juin à octobre et ont pour origine les grands vents d'ouest de l'Atlantique sud. Elles sont liées par leur direction et leur fréquence aux flux de mousson issus de l'Anticyclone de Sainte Hélène. Leur amplitude est moins importante que la houle du NW. Les valeurs moyennes sont comprises entre 0,8 et 1,2 m et leur période est plus courte, entre 5 et 10 s. Dans ce contexte, elles n'ont pas une grande influence sur l'évolution du littoral. Cette période de houle australe correspond au démaigrissement de la plage par suite de la diminution du transport de matériel sableux. Selon Kane (1985) la puissance de la houle à l'embouchure et la pente du talus continental favorisent une poussée océanique vigoureuse qui demeure fortement contrôlée par le régime des marées.

7.2.3. Les vagues

Elles sont engendrées par les vents soufflant sur la surface de la mer ; elles ont un caractère irrégulier tant en période qu'en hauteur (Barusseau et al. 1993). Elles peuvent franchir le cordon littoral de la Langue de Barbarie dans la région où elles émergent très peu au dessus des eaux et engendrent un processus d'érosion capable d'ouvrir une nouvelle communication avec la mer dans les sections les plus faibles. Elles déferlent quand la profondeur est égale ou inférieure à leur longueur d'onde. Les vagues qui déferlent se précipitent sur la plage jusqu'à sa limite la plus haute : c'est ce qu'on appelle le jet de rive. Le retour de ce déplacement d'onde est assimilé au jet de retour ou back-wash. Les directions des vagues ne sont pas toujours celles de la houle, elles sont plus obliques par rapport à la côte. L'obliquité sur le trait de côte semble responsable de croissants de plage et des bermes qui jalonnent l'estran (Kane, 1997). Le rôle des vagues est mineur par rapport à celui

de la houle mais en saison sèche, leur action renforce celui de la houle et de la dérive littorale. L'interférence de la houle et des vagues provoque une agitation de la mer.

7.3. L'île de Doun Baba Dièye et le quartier de Pikine menacés

Les zones côtières sont très vulnérables en raison des menaces d'érosion côtière qui seraient consécutives à une élévation du niveau de la mer, elle-même liée au changement climatique. Toutefois, dans un contexte d'artificialisation du milieu, ce sont les conséquences de l'ouverture de la brèche qui sont les plus perceptibles dans l'évolution de la Langue de Barbarie. L'érosion côtière est devenue beaucoup plus active avec le rapprochement de l'embouchure qui sape de façon constante le rivage. D'ailleurs tous les sites de mesures antérieures à 2008 sur la brèche se retrouvent actuellement dans l'eau. En même temps, ce recul permanent de la ligne de rivage fait peser de réelles menaces sur l'île de Doun Baba Dièye et le quartier de Pikine, à l'exemple de la flèche de Sangomar dans le delta du Saloum[12].

Par sa position par rapport à la nouvelle embouchure, le sort de l'île de Doun Baba Dièye (fig. 7.4) semble plus préoccupant, compte tenu de sa faible largeur et de son exposition directe à l'assaut des vagues (Bâ et al. 2007). Le site est un fragment du cordon littoral de la Langue de Barbarie qui abrite une végétation de mangrove et constitue un lieu privilégié pour le développement du maraîchage. Les moyens de subsistance étaient principalement constitués, avant l'ouverture de la brèche, de pêche et de maraîchage. Aujourd'hui, l'île est au bord de l'extinction à cause des effets néfastes de cette ouverture.

Elle peut subir des dommages importants en fonction de l'évolution de la nouvelle embouchure. L'île se trouve à 500 m de la brèche et cette dernière a connu un recul de 1600 m dans sa partie sud entre 2004 et 2009. Cet élargissement a des conséquences notables sur cet espace alors qu'il a longtemps été protégé des vagues par le cordon littoral de la Langue de Barbarie. La suppression de cet écran au niveau de la partie distale du cordon l'expose directement à l'assaut des vagues.

[12] En février 1987, au cours d'une tempête, une brèche se crée dans la partie la plus fragile de la flèche de Sangomar dans le delta du Saloum. Un an après la brèche mesure 1 km de large, près de 10 ans après elle est à environ 4 km. Ce phénomène d'érosion a entrainé sur son passage la destruction de campements et de divers bâtiments. Le village de Djiffère situé à 4 km au nord du premier point de rupture migre depuis maintenant 2 ans au rythme du recul de la ligne de rivage; l'usine de Djiffère (usine de conditionnement de poisson pour l'exportation) a sagement plié bagage au mois de mars 1996. Elle était en effet régulièrement envahie par la mer (Source : Les études pluridisciplinaires côtières au Sénégal. http://www.unesco.org/csi/act/other/project3.htm)

A partir des images Landsat 7 ETM du 04 mars 2003 et du 03 février 2007 nous avons représenté l'évolution de l'île de Doun Baba Dièye entre les deux dates (fig. 7.5). La superficie a régressé de 8% entre 2003 et 2007. Elle est passée de 257 ha à 236 ha. La figure 7.4 montre qu'au niveau de sa partie nord le rivage a reculé d'environ 230 m.

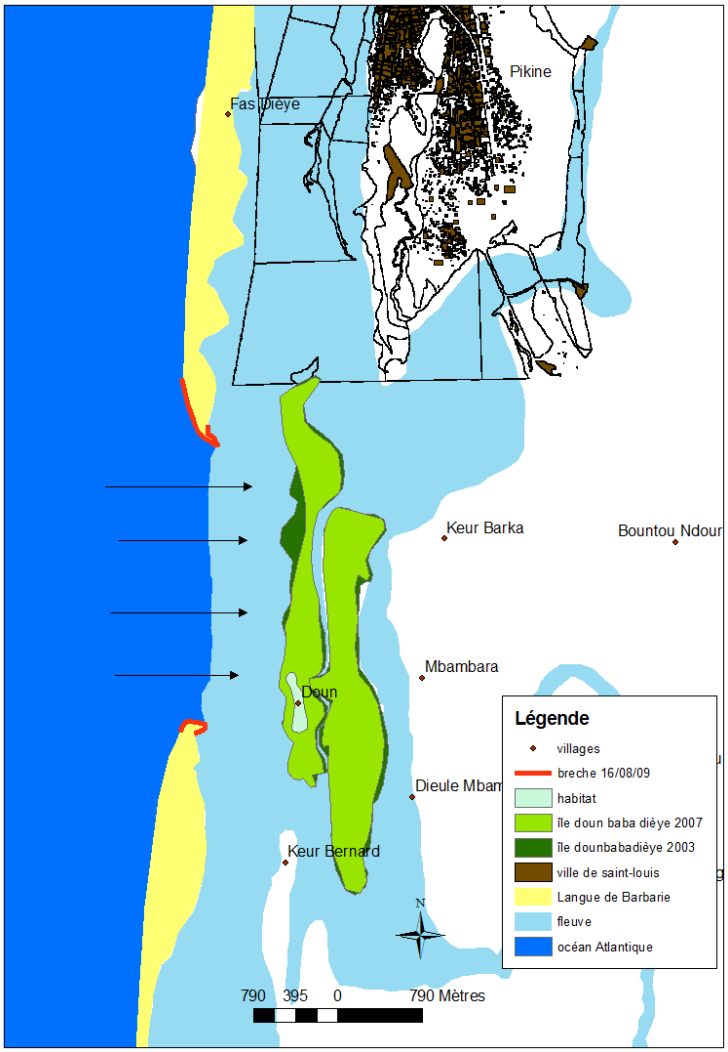


Fig. 7.5 : Evolution de l'île de Doun Baba Dièye entre 2003 et 2007

Les entretiens que nous avons effectués avec les populations de la zone confirment une accélération récente du phénomène. Trois habitations sont détruites dans la nuit du 16 au 17 février 2010 (photo 7.1) par l'intensité des vagues et six autres sont menacées de destruction. Plus de 11 familles sont concernées par ces dégâts. Le village de Doun Baba Dièye compte environ 600 habitants (2010) dont une trentaine de concessions avec plusieurs ménages dans une concession. Sur ce total, sept familles ont quitté l'île pour s'installer à Bountou Ndour, un village du Gandiolais situé à environ 3 km (fig.7.5). Le reste des sinistrés soit :

- ✓ deux familles comptant au total 22 personnes ;

- ✓ une famille de 7 personnes ;
- ✓ une famille de 6 personnes

ont toutes trouvé refuge dans des concessions voisines épargnées par les vagues.

Cette population est bien consciente du danger qui pèse sur leur environnement mais n'a pas les moyens d'aller vivre dans des lieux plus sûrs. De plus, les autorités bien que conscientes du problème, n'ont pas mis en place des mesures idoines pour les sortir de cette situation. Si Décamps (2007) avance que les groupes sociaux ne doivent pas rester passifs face aux perturbations et qu'ils doivent développer diverses stratégies pour augmenter les mécanismes de défense, les populations de Doun Baba Dièye n'ont déployé aucun moyen de défense pour se mettre à l'abri du danger. De fait, elles se mettent en position de vulnérabilité et vont encore subir des dommages en fonction de l'intensité de l'aléa.

Photo 7.1 : Maisons détruites par les vagues dans le village de Doun Baba Dièye[13]

L'insuffisance de moyens justifie ce manque de protection. Il faut dire que ces populations ont été les premières à subir les conséquences de la délocalisation de l'embouchure. La culture maraîchère était pratiquée de façon intensive pratiquement pendant toute l'année avec des variétés différentes en fonction des saisons[14]. L'intrusion marine a entraîné une salinisation des eaux de surface et de la nappe. Par conséquent, au niveau de la pêche

[13] http://www.villedesaintlouis.com/index.php

[14] Saison sèche : oignons, carottes, etc. ; saison pluvieuse : pastèque, melon, aubergine, gombo, Hibiscus sabdariffa

continentale qui est en majorité pratiquée par les populations du Gandiolais, les mises à terre ont connu une diminution importante (nous aborderons ce point dans le chapitre qui suit). Les champs ne sont cultivables qu'en période pluvieuse. Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 1, cette pluviométrie est marquée par une forte irrégularité. Il découle de cette situation une baisse des revenus et une limitation des capacités à faire face aux aléas.

En outre, Gaillard (2007) affirme que les victimes des évenements extrêmes sont vulnérables car elles sont marginalisées. Marginalisées géographiquement car elles habitent des secteurs menacés par des phénomènes naturels, marginalisées socialement car elles sont très souvent issues de groupes minoritaires, marginalisées économiquement parce qu'elles sont bien souvent pauvres, marginalisées politiquement car leur parole n'est pas reconnue sur la scène politique. C'est ce constat qui est bien réel au niveau des populations de Doun Baba Dièye. Les changements environnementaux ainsi que la dégradation croissante du milieu physique sont des phénomènes durement ressentis par les populations concernées, alors qu'elles ont une faible capacité de résilience.

L'absence d'aménagement suite à l'ouverture de la brèche pour prévenir et réduire la vulnérabilité du système socio-environnemental de l'île fait que la capacité du système à s'adapter à l'érosion côtière, à faire face aux conséquences est faible. De même, la pauvreté, l'incapacité des populations à faire face aux risques sont autant de facteurs substantiels qui concourent à augmenter la vulnérabilité du système. Depuis l'ouverture de la nouvelle embouchure (2003) le système n'a pas pu retrouver son état d'équilibre. A contrario, il est devenu plus vulnérable à tout agent perturbateur. Le danger est devenu permanent.

Le quartier de Pikine qui faisait partie des zones inondées durant l'hivernage 2003 et qui avait poussé les autorités sénégalaises à ouvrir la brèche n'est pas épargné par les risques de submersion. La figure 7.4 montre qu'il est à 2 km de la nouvelle embouchure et la dernière mesure effectuée en août 2009 montre plutôt une évolution régressive dans sa partie nord. Si la nouvelle embouchure connaît un recul de 700 m environ non seulement l'île de Doun baba Dièye connaîtra une perte surfacique de 17 ha de plus mais le quartier de Pikine sera aussi submergé. Dans cette perspective des solutions radicales et urgentes s'imposent avant que l'irréparable ne se produise.

La situation qui prévaut au niveau de l'île de Doun Baba Dièye et les risques de submersion du quartier de Pikine nous conduisent à discuter de la pertinence de l'ouverture de la nouvelle embouchure qui a trouvé sa justification dans une volonté de sauver la ville de Saint-Louis des inondations. En dépit des efforts réalisés pour sécuriser les zones inondables, le risque subsiste, les zones urbaines et périurbaines restent vulnérables. Pour minimiser une vulnérabilité, les autorités sénégalaises en ont introduit une autre beaucoup plus insidieuse. La connaissance des conditions morphologiques et sédimentaires reste une condition indispensable à toute entreprise d'aménagement de la côte (Paskoff, 1993). Or, pour le cas de la Langue de Barbarie, cela n'a pas été respecté. L'urgence a prévalu sur une

étude d'impact préalable à toute action d'aménagement. Ce qui démontre encore la méconnaissance et l'absence de perception des risques à effectuer un important aménagement dans un espace naturellement vulnérable sans évaluer les impacts sur l'environnement. Pour autant les rencontres des sommets internationaux en particulier la conférence des Nations Unies de Stockholm (1972), la mise en place de la Commission mondiale de l'environnement et le développement (1983), le Sommet de la Terre de Rio (1992), celui de Johannesbourg (2002) insistent sur la prise en compte des questions environnementales lors des aménagements (André et al. 2003). La non prise en compte des conditions morphologiques de la langue de Barbarie lors de l'ouverture de la brèche (action effectuée dans la précipitation) a conduit à la situation qui prévaut actuellement.

7.4. Les impacts sur la végétation du cordon littoral et des écosystèmes estuariens

7.4.1. Dégradation de la végétation du cordon littoral

La végétation au niveau du cordon littoral se caractérise par une zonation (fig.7.6) due aux taux de salinité des sols. Kane (1985) distingue :

- un étage infralittoral, en dessous du niveau des basses mers : c'est le domaine des algues ;
- la zone intertidale, représentant la zone de balancement des marées (estran), ne porte pas de végétation à proximité de l'océan ; la marée remontant le fleuve, une végétation spécifique colonise les abords du Sénégal ;
- les étages adlittoral, paralittoral et supralittoral avec des sols émergés incluent les vasières, les tannes, les dunes et la mangrove.

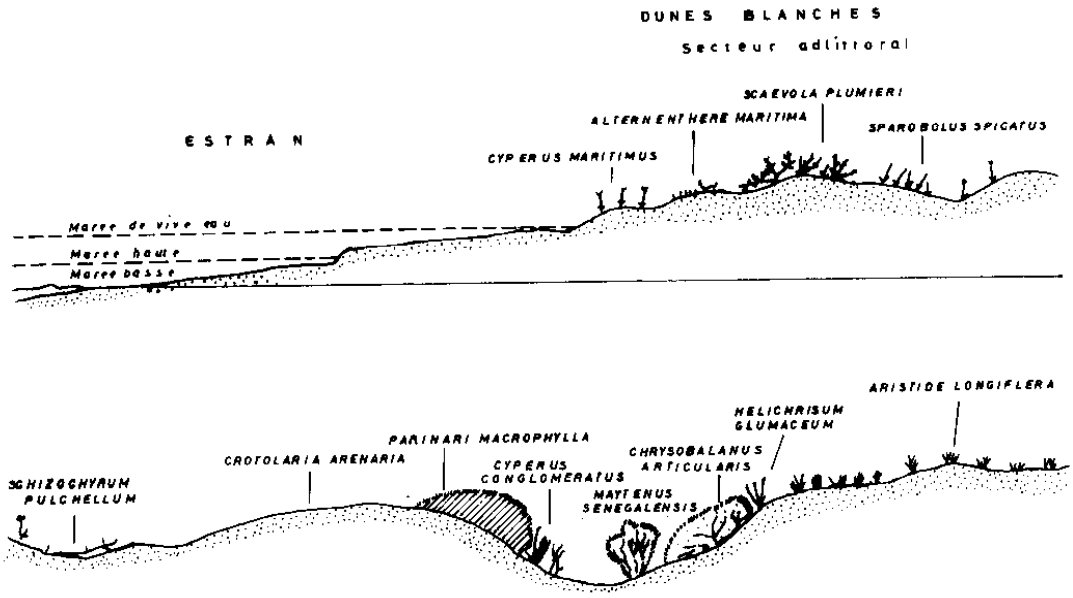


Fig.7.6 : Représentation schématique de la végétation des étages adlittoral et paralittoral des dunes littorales (D'après Michel, Naegele et Toupet tiré de Kane, 1997)

Les dunes blanches portent une végétation xérophile qui colonise les sables marins secs car non atteints par les marées. On trouve des touffes clairsemées d'*Ipomea spicatus,* des groupements de *Sporobolus spicatus, Scaevola plumieri* (plante crassulescente dont les racines maintiennent très bien le sable), *Cyperus maritimus* etc. A ces espèces qui constituent un groupement végétal pionnier dans la colonisation des sables littoraux, il faut ajouter deux espèces introduites : le cocotier (*Coco nucifera*) et le filao (*Casuarina equistefolia*). L'étage paralittoral constitue la zone de transition entre le littoral (dunes blanches) et les autres domaines phytogéographiques. La végétation steppique se compose d'halophytes et de psammophytes ; elle est représentée par des espèces assez touffues comme le groupement à *Aristida longiflora* et *Hyparrhenia dissoluta* ; ces plantes exercent un effet de frein à l'avancée des dunes. La strate arbustive comprend des figuiers de Barbarie (*Opuntia tuna*), une végétation d'euphorbes (*Euphorbia balsamifera*) et sur les sols salés, *Sesuvium portulacastrum, Philoxerus vermicularis.* La strate arborée est composée de ligneux : *Acacia adansonii* en est l'espèce la plus répandue. Dans les dépressions interdunaires, les espèces sont hygrophyles (Kane, 1997). L'érosion côtière au niveau de la brèche sape les berges et contribue à dégrader considérablement le cordon littoral de la langue qui perd sa végétation. Nos travaux de terrain nous ont permis de vérifier l'importance de cette érosion à proximité de l'embouchure. Les actions marines au niveau de la brèche ont ravagé toute la végétation fixée au niveau des dunes. Beaucoup d'arbres sont déracinés (photo 7.2), en l'occurrence la population de filaos (*Casuarina equisefolia*) mise en place au début des années 1900 et qui avait pour objectif de stabiliser le cordon littoral qui est très mouvant (Niang (2002) mais également *Cyperus maritenus, Sporobolus spicatus,*

Prosopis africana. Ce sont les vagues, en particulier, qui provoquent l'érosion des sédiments meubles qui tombent par paquets et entraînent les arbres au niveau de la mer.

Photo 7.2 : Destruction des arbres par l'érosion côtière

Cette perte progressive de la végétation rendra plus sensible les dunes bordières aux effets du vent qui entraînera la remobilisation du sable. Alors que les dunes bordières représentent la réserve en sable et constitue un élément essentiel de l'équilibre sédimentaire.

7.4.2. Effets sur les écosystèmes estuariens

Si la dégradation des paysages végétaux est corrélée à la dimension biogéographique de la sécheresse (Coly, 1996), les aménagements dans l'estuaire ont également contribué à modifier le couvert végétal. Dans un contexte de mutation rapide, l'évolution de l'espace estuarien est en déphasage avec le contexte naturel. Le paysage actuel reflète fortement l'empreinte de l'homme sur le milieu car les aménagements réalisés dans la partie terminale du fleuve Sénégal ont fortement perturbé le fonctionnement hydrologique naturel et pose avec acuité le problème de développement des espèces végétales de type halophyte modifiant de ce fait le paysage. De surcroît l'ouverture de la brèche a contribué à une détérioration de l'environnement avec l'apparition de nouvelles espèces végétales. Au paysage d'eau douce de céanes, se substitue un paysage marqué par des points d'eau salés, ensevelis ou asséchés et une végétation relictuelle. Les paysages se détériorent par altération ou par perte d'éléments biocénotiques, par des modifications physiques et chimiques, allant dans le sens d'une simplification des écosystèmes et d'une baisse de productivité (Gavaud, 1990). Afin d'identifier les différentes espèces végétales présentes

dans la zone, nous avons effectué des transects dans les secteurs Diama - Djeuss et au nord du Gandiolais (en annexe 5, la carte des transects).

7.4.2.1. Le secteur Diama- Djeuss

Le peuplement végétal se présente de façon très variée selon la dynamique fluvio-marine. Sur les figures 7.7 et 7.8 nous pouvons noter cette variation de la composition floristique qui peut être schématisée comme suit :

- à partir du barrage de Diama jusqu'à point kilométrique 17, les espèces dominantes sont constituées de *Tamarix senegalensis, Prosopis chilensis, Acacia radiana,* A*cacia seyal, Salvadoria persica, Balanites œgyptiaca, Euphorbia balsamifera, Tamarindus indica.* A 800 m, la prédominance du *Prosopis chilensis* change et la végétation est composée de *Salvadoria persica a*vec cependant quelques discontinuités. D'après les entretiens que nous avons effectués avec les populations de la zone, avant la mise en eau du barrage de Diama, l'espèce dominante était *Ziziphus mauritiana,* cette espèce est aujourd'hui presque inexistante dans le secteur.
- Dans la zone du Djeuss prédominent essentiellement *Typha australis, palétuvier* et par endroit *Acacia holosericea, parkinsonia*. La permanence de l'eau douce avec l'ouvrage vanné au niveau du Djeuss qui constitue la partie aval de la réserve d'eau douce pour l'approvisionnement en eau de la ville de Saint-Louis, a engendré de nouvelles conditions écologiques qui ont favorisé la prolifération de végétaux aquatiques envahissants (*Typha australis*) dans ce secteur.

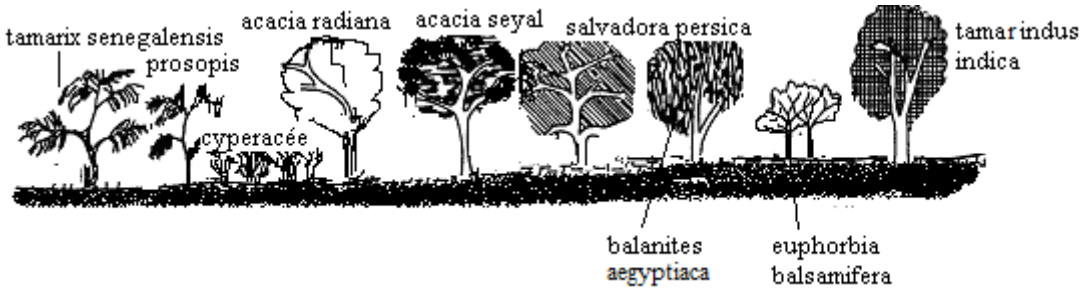


Fig.7.7 : Représentation schématique d'espèces végétales au niveau du secteur de Diama

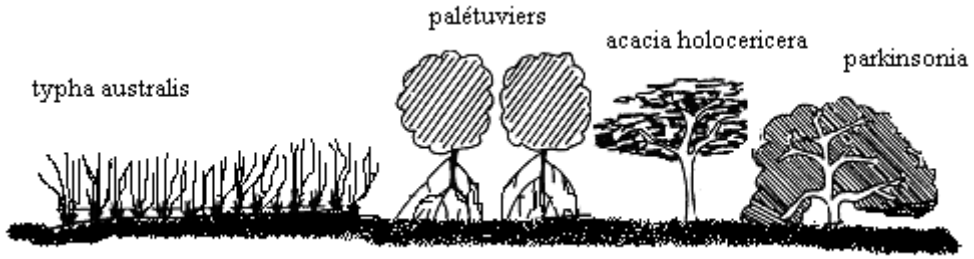


Fig.7.8 : Représentation schématique des espèces végétales au niveau du Djeuss

Le transect effectué par Naegele (1968, tiré de Kane, 1997) (fig. 7.9) entre Saint-Louis et Gandiol montre une végétation composée de mangrove qui comporte deux espèces végétales essentielles : *Rhizophora racemosa* et *Avicennia africana*. D'autres arbustes associés à la mangrove, mais beaucoup moins fréquents, sont aussi représentés : *Laguncularia racemosa* ou palétuvier noir. A la limite externe de la mangrove, se développe *Tamarix senegalensis* et quelques herbacées. Nous verrons dans les paragraphes qui suivent que la mangrove a connu une évolution sans précédent depuis la mise en eau du barrage de Diama.

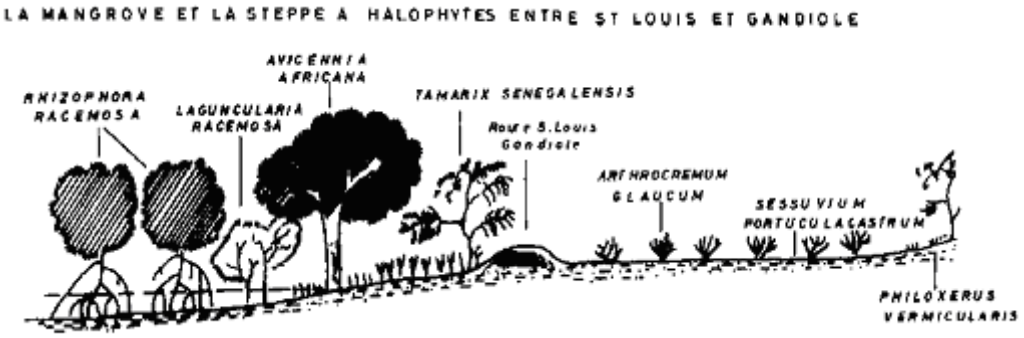


Fig. 7.9: Représentation schématique de la végétation dans le delta du Sénégal (d'après Naegele 1968, tiré de Kane, 1997)

7.4.2.2 Le secteur du Gandiolais

Le transect effectué, au départ du village de Mouit jusqu'au point kilométrique 1,90 montre un peuplement monospécifique d'*Acacia radiana* sur 100 m au niveau des formations dunaires. Par rapport aux espèces identifiées au niveau de Diama, *Acacia radiana* et

notamment S*alvadoria persica* que nous retrouvons au delà des 100 m sont plutôt rabougries alors qu'elles sont bien développées au niveau du secteur de Diama. Ces espèces sont en association avec *Balanites aegyptiaca.* A 50 m le peuplement est constitué d'*Adansonia digitata* avec toujours la prédominance d*'Acacia radiana.* C'est seulement à 70 m que le peuplement commence véritablement à changer avec *Ziziphus mauritiana, Lawsonia inermis, Euphorbia balsamifera, Prosopis chilensis et Cordylla pinnata.* Derrière les formations dunaires, nous retrouvons *Cocos nucifera* et une dépression qui constitue un milieu de transition entre les formations végétales. Nous avons aussi noté que les zones les plus salées sont dominées par C*ocos nucifera* qui périclite du fait de la sursalinisation. La cristallisation du sel est bien remarquable dans le secteur. L'anthropisation du milieu a souvent accéléré la dégradation du couvert végétal. D'après les entretiens que nous avons eus avec la population, la zone était colonisée d'arbres fruitiers tels *Mangifera indica, Diospyrosos dygina, Cararica papaya* avant la mise en eau du barrage de Diama, aujourd'hui ce sont les espèces halophytes qui y prédominent.

Par ailleurs, au sud de la ville de Saint-Louis, la végétation s'est modifiée de manière spectaculaire avec une réduction importante des zones à mangroves. Nous assistons à une extension importante des dépressions salées dépourvues de végétation, appelées tannes. Les apports d'eau douce y sont devenus insuffisants pour empêcher naturellement cette transformation.

7.4.2.3. La dégradation de la mangrove

Avec une pression croissante de l'homme sur le milieu, il est évident que d'importants habitats tels les zones humides seront détruites ou gravement diminuées. La mangrove de l'estuaire périclite à cause des modifications importantes du régime hydrologique qui n'ont pas tenu compte de la fragilité des écosystèmes côtiers. La mangrove du bas estuaire est composée de *Rhizophora* et d'*Avicenia* ; ces deux espèces ont des conditions d'adaptation particulières. D'après la synthèse de Kane (1997), la tolérance des mangroves à la salinité résulte de deux stratégies. L'espèce Rhizophora dispose d'une membrane située au niveau du système racinaire qui empêche l'absorption du sel ; mais uniquement le passage de l'eau et des éléments nutritifs. L'espèce *Avicennia* absorbe le sel dans le xylème et à travers les stomates, mais il est expulsé par la suite et se cristallise à la surface des feuilles. C'est plus le balancement périodique de la marée que la salinité de l'eau qui conditionne le développement de la mangrove et plus particulièrement de Rhizophora (Marius, 1985). Toutefois si le marnage quotidien est modifié par le régime hydrologique, l'espèce s'adapte aux nouvelles conditions ou périclite. Ainsi les variations de niveau d'eau, notamment liées aux aménagements peuvent provoquer une diminution des surfaces de ces écosystèmes.

L'analyse de l'évolution de la mangrove a nécessité l'utilisation des images Landsat ETM du 30 septembre 1979, du 4 mars 2003 et du 03 février 2007 (période comprise avant la mise en service du barrage de Diama, avant et après l'ouverture de la brèche). Par la télédétection nous avons, par l'interprétation des signatures spectrales, identifié la mangrove avec l'utilisation des bandes spectrales du Proche Infra Rouge, du Rouge et du Vert qui ressortent mieux la végétation. Cet exercice se base aussi sur une bonne connaissance du milieu. L'image est ensuite exportée et vectorisée sous le logiciel de cartographie Arcgis, où la carte est finalisée avec intégration des différentes couches vectorielles. Cette étape permet également de calculer les superficies entre les différentes périodes.

La superposition des étendues de mangrove (fig.7.10) montre que la superficie de la mangrove a connu une évolution sans précédent avec une réduction de 636 ha soit 59%, passant de 1086 ha en 1979 à 450 ha en 2003. Entre cette dernière date et 2007, elle a connu une diminution de 1%, soit une superficie qui passe à 445 ha. Nous avons observé sur le terrain, en septembre 2008, que la mangrove est très affectée par la baisse du plan d'eau, elle se trouve nettement réduite, donnant de plus en plus lieu à des tentatives de reboisement. La mise en eau du barrage semble marquer un arrêt dans la dynamique de *Rizophora* alors que vers l'arrière *Avicennia* semble conquérir des schorres à herbacées en voie de dégradation (Diop, 2004). Le temps de séjour de l'eau saumâtre à salée étant plus long avec la nouvelle embouchure perturbe l'équilibre eau douce/eau salée nécessaire au maintien de cet écosystème particulier.

L'évolution actuelle se caractérise par les risques d'une forte dégradation de l'écosystème mangrove, ce qui fait qu'avec le colmatage actuel de l'estuaire, l'extension des vasières à mangrove risque d'être compromise. Kane (1997) estime que la vitesse de colmatage des vasières à mangroves dépend des paramètres qui déterminent l'hydrologie de l'estuaire à savoir la durée des eaux douces dans l'estuaire (qui avant barrage était de 3 à 4 mois) ; de la qualité de la charge sédimentaire des eaux d'inondations et du mélange eau douce/eau salée favorisant les phénomènes de floculation et de dépôt.

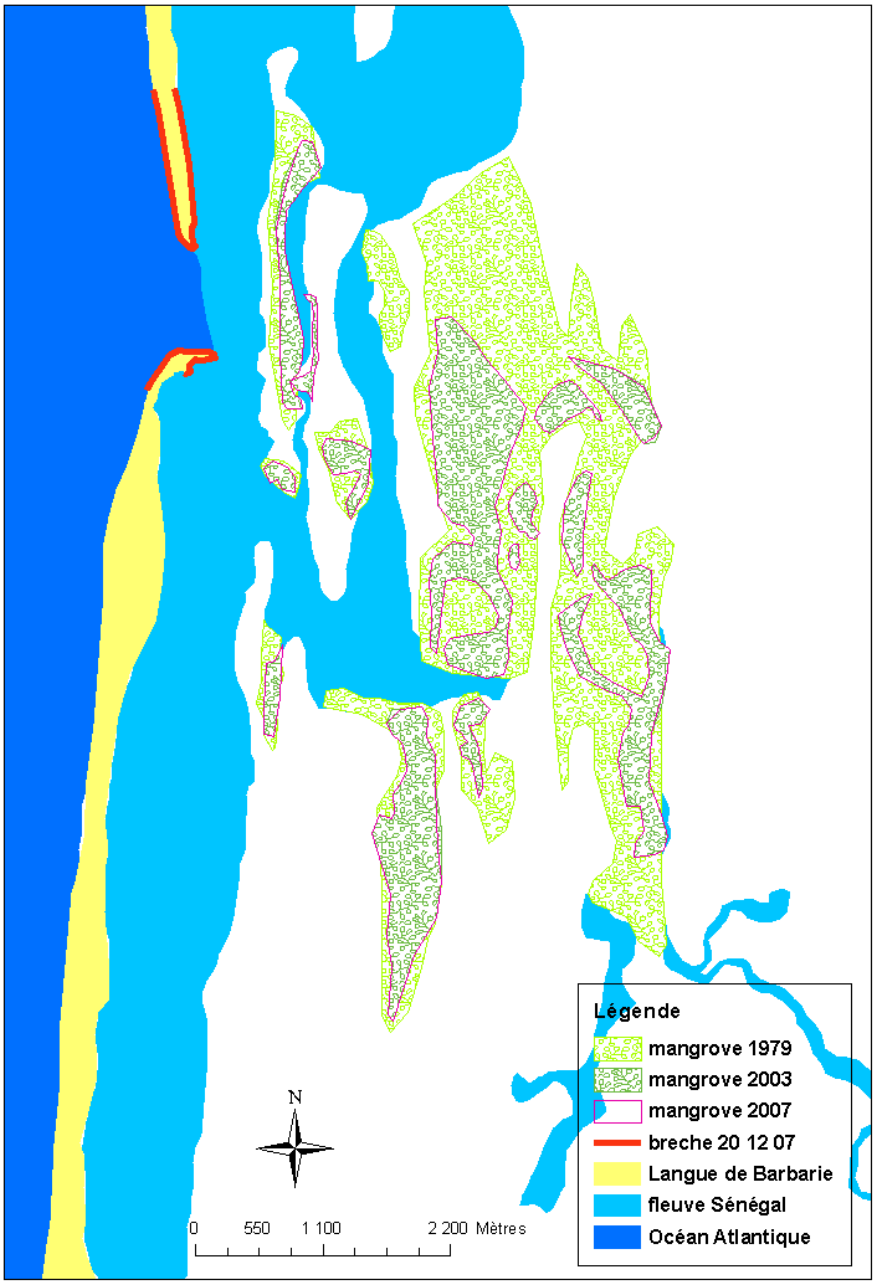


Fig. 7.10 : Evolution de la mangrove

La figure 7.7 montre que la mangrove est directement soumise à l'influence marine, ce qui ne favorise pas un renouvellement des eaux surtout au niveau de la partie lagunaire. La submersion de l'eau douce étant devenue rare, la dégradation du milieu va se poursuivre avec un accroissement de l'assèchement et de la salinisation. Les terrains à efflorescence saline vont évoluer en tanne et les espèces halophytes coloniseront davantage les terres du Gandiolais.

7.4.2.4. Développement des espèces halophiles

Certaines espèces qui résistent à la salinité se sont développées au niveau du bas estuaire. C'est le cas notamment du *Prosopis* et du figuier de barbarie (*Opuntia tuna).* Ce dernier colonise les terres du Gandiolais et constitue même une sorte d'enclos pour les champs horticoles. L*'Opuntia tuna* constitue une espèce envahissante et une ressource fourragère qui est connu par sa tolérance à la sécheresse et son adaptation aux conditions désertiques. Cette espèce peut être utilisée pour la protection des sols contre l'érosion côtière, de même la figue de Barbarie est un fruit de consommation appréciable et peut être une source de revenus pour les populations.

Nous avons observé sur le terrain l'apparition de nouvelles espèces végétales, confirmées par les entretiens avec les populations de la zone. Outre ces modifications sur les écosystèmes végétaux, le rapprochement de l'embouchure a eu des impacts sur l'îlot aux oiseaux du PNLB et sur la gestion du barrage de Diama.

7.4.3. Réduction de la surface de l'îlot aux oiseaux (Parc National de la Langue de Barbarie)

La nouvelle embouchure constitue une réelle menace pour l'environnement du PNLB. Nous l'avons déjà évoqué dans la première partie, le PNLB joue un rôle important pour la reproduction de plusieurs espèces d'oiseaux tels que les sternes, les mouettes, les goélands, les pélicans, les cormorans, etc. C'est également un lieu où abondent beaucoup d'espèces piscicoles (E*thmalosa, Mugil curema, Caranx crysos, Solea senegalensis*, etc.) dont les oiseaux se nourrissent. Les périphéries du PNLB constituaient également un lieu de pêche pour les habitants des villages environnants (Ndiol, Mouit, Tassinère, Ndiebene Gandiol, Mboumbaye, Gneling Mbao). Avec le rapprochement de l'embouchure, les limites du PNLB se trouvent dans la zone lagunaire du fleuve, l'évolution de l'îlot aux oiseaux est commandée par le fonctionnement des marées. Avec l'évolution morpho-sédimentaire actuelle de la Langue de Barbarie instaurée à la suite de l'ouverture de la brèche, la dynamique marine prédomine exclusivement au niveau du PNLB. Cette évolution se traduit essentiellement par une érosion des berges de l'îlot entraînant ainsi une réduction de sa surface. Nous avons mesuré la superficie à partir des mêmes images Landsat de 2003 et de 2007 que nous avons utilisés pour analyser l'évolution de la mangrove.

L'îlot a connu une réduction de sa surface de 0,4 ha, soit 20%, passant de 2 ha en 2003 à 1,6 ha en 2007 (fig.7.11). Les forts courants de marées ont érodé les berges de l'îlot et par conséquent diminué la superficie. En outre, il est submergé en marée haute causant la noyade des petits oiseaux et la perte des œufs des espèces limicoles. Les modifications morphologiques de la Langue de Barbarie ont des effets négatifs pour l'environnement de l'îlot et les oiseaux nicheurs. Nous avons noté une modification de la composition des peuplements botaniques de l'îlot, notamment la disparition des herbacées qui le fixaient. Si la

société n'a pas une capacité de résilience très forte, les espèces limicoles ont pu s'adapter très vite au nouveau contexte. Les oiseaux vont plutôt vers la partie sud de la nouvelle embouchure (photo7.3a). Par ailleurs, les gestionnaires du PNLB ont mis en place un endiguement constitué de sacs de sable autour de l'îlot pour stopper l'érosion. Toutefois ces digues sont en train d'être détruites par l'érosion marine (photo7.3b).

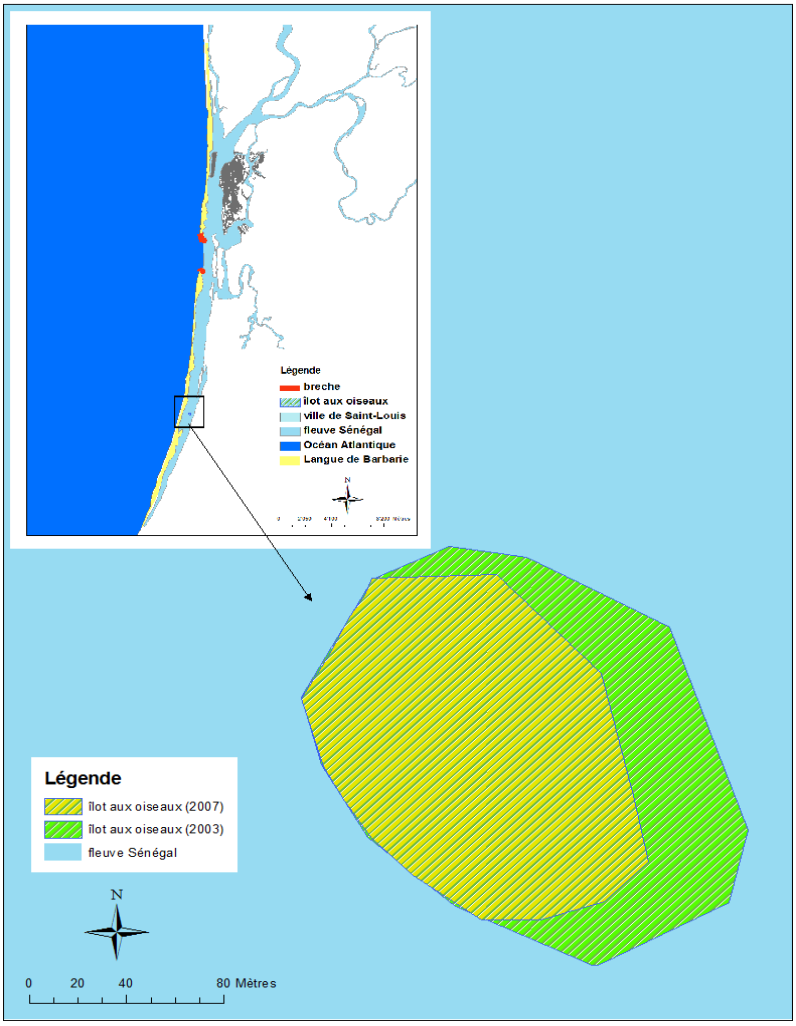


Fig.7.11 : Evolution de l'îlot aux oiseaux du Parc National de la Langue de Barbarie (2003-2007)

Photo 7.3 a : Nouveau site de prédilection des oiseaux du PNLB (C.Kane, 2008) b : Destruction des endiguements par la marée (PNBL, 2007)

La largeur actuelle de la nouvelle embouchure (plus de 2 km) et l'érosion de sa partie sud mettent en danger non seulement la fonction de l'îlot comme site de reproduction mais aussi à terme, son existence. Pourtant l'îlot représente le point touristique privilégié du PNLB, qui accueille plus de 3000 touristes par mois. Les recettes récoltées par le PNLB constituent une somme non négligeable soit environ 12 200 euros par an. L'activité touristique est aussi une source de revenus pour quelques villageois de Tassinière, Mouit ou Mboumbaye qui assurent le transport en pirogue et qui servent aussi de guide pour les visiteurs de l'îlot.

D'autre part, la brèche a posé d'autres problèmes de gestion du fleuve au niveau du barrage de Diama notamment à cause de la prédominance de la marée.

7.5. La gestion difficile du barrage de Diama

La baisse du niveau de plan d'eau au niveau de la station de Saint-Louis qui est consécutive à l'ouverture de la brèche a eu des impacts sur la gestion du barrage de Diama. La marée étant le principal facteur qui agit au niveau de la partie terminale du fleuve, le niveau du plan d'eau suit ses variations. Les hauteurs d'eau à l'aval du barrage étaient importantes du fait des ondes de crue alors que la partie aval connaît une baisse brutale du plan d'eau. Ce différentiel de hauteur peut être dangereux pour la sécurité du barrage qui risque de céder. Aussi, il était devenu difficile de maintenir en amont du barrage les hauteurs d'eau pour les besoins de l'irrigation et d'assurer en même temps la sécurité de l'édifice.

D'après OMVS et al. (2005) les règles de gestion en vigueur avant l'ouverture de la brèche se traduisent comme suit :

Tableau 7.5 : Règles de gestion du barrage avant l'ouverture de la brèche

Période	objectif	Niveau de la retenue
Etiage	Niveau élevé dans la retenue	+2,10 à +2,20 m IGN (depuis l'étiage 2001-2002
Début de crue	Maintien d'un niveau élevé le plus tard possible, puis abaissement préventif lorsque la crue arrive à Bakel	+2,10 à +2,20 m IGN puis abaissement à +1,50 m IGN
Période de crue	Niveau abaissé dans la retenue	+1,50 m IGN tant que les débits sont tels qu'il est nécessaire d'effacer entièrement les vannes
Fin de crue	Relèvement du niveau de la retenue le plus tôt possible	+1,50 m IGN puis relèvement à + 2,10 à +2,20 m IGN

La modification des niveaux d'eau à l'aval immédiat du barrage fait que l'abaissement du niveau de la retenue à + 1, 50 m en début de crue ne suffit plus à garantir le respect de la règle d'énergie à dissiper QH < à 1000 m^4/s. Afin de limiter le différentiel important entre l'amont et l'aval, les gestionnaires du barrage de Diama ont dû abaisser le niveau de la retenue à une côte moyenne de 1,20 m pendant la période d'hivernage de 2004. Les entretiens que nous avons effectués avec les agriculteurs en amont du barrage révèlent que l'eau était devenue insuffisante pour la pratique agricole depuis l'ouverture de la brèche. Pour autant, l'irrigation fait partie des objectifs majeurs de la mise en service du barrage de Diama. Face à un dilemme entre respecter des objectifs du barrage et garantir la sécurité de l'ouvrage, le choix a vite porté sur la deuxième option.

Le nouveau contexte a nécessité diverses études (IRD-OMVS, 2004 ; OMVS et al. 2005) commanditées par l'OMVS afin de réviser les règles de gestion du barrage. Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre 4, le respect de l'énergie de dissipation à 1000 m^4/s est une nécessité pour garantir la sécurité de l'ouvrage. Ces études ont permis d'avoir une gestion plus souple du barrage avec des côtes pouvant atteindre 1,50 m dans sa partie amont.

Conclusion

Les actions anthropiques sont aujourd'hui prépondérantes dans l'accélération des processus évolutifs de l'estuaire. Les modifications du système hydrologique ont des répercussions notables et induisent un bouleversement de l'équilibre de l'écosystème. La Langue de Barbarie est bien connue pour ses tendances évolutives, or cette connaissance doit constituer une démarche préalable à toute entreprise d'aménagement au niveau du cordon littoral. La permanence de l'eau de mer dans le bief aval du chenal fluvial, qui évolue désormais en lagune, aura des répercussions notables sur le système socio-environnemental. Cette situation augmentera la vulnérabilité des populations qui dépendent des ressources du fleuve pour mener leurs activités, ce point sera développé dans le chapitre qui suit.

Chapitre 8 : La vulnérabilité des sociétés du bas estuaire face aux changements environnementaux : utilisation du concept DPSIR

Nous avons vu dans le chapitre 3 que l'estuaire occupe une place importante dans le processus de développement des activités socio-économiques malgré ses héritages géomorphologiques qui devaient constituer une contrainte. Les populations ont su mettre en valeur les terres et gagnaient des revenus conséquents. L'objet de ce chapitre est de montrer que cette vulnérabilité naturelle du milieu est modifiée par l'ouverture de la nouvelle embouchure qui l'a accentuée. Les actions entreprises pour réduire des dommages causés par des aléas (sécheresse, inondation, etc.) peuvent avoir des conséquences qui ne sont pas toujours prévisibles (Blaikie et al. 1994). Les modifications consécutives à l'ouverture de la brèche affectent considérablement les ressources en eau. En particulier les pressions humaines sur les estuaires ont entraîné des changements importants qui affectent considérablement les ressources en eau, en particulier sa qualité et le biotope aquatique sur des échelles de temps plus long (Meybeck, 2004). Les effets induits laissent le système socio-environnemental dans une situation de vulnérabilité. Celle-ci se manifeste par une situation qui dépasse la capacité de résistance de la société.

Ce chapitre aborde les modifications socio-économiques, notamment pour le maraîchage et la pêche qui sont les activités dominantes dans la zone du Gandiolais et de la Langue de Barbarie. Les différentes réponses apportées par la société face aux menaces qui pèsent sur leur environnement nous permettront de proposer des mesures d'adaptation. L'analyse de la vulnérabilité du système socio-environnemental face aux changements environnementaux s'appuie sur l'utilisation du concept DPSIR qui signifie littéralement Driving forces Pressures-State- Impacts- Responses (Forces motrices- Pressions- Etat- Impact- Réactions).

8.1. Le modèle conceptuel DPSIR

Ce modèle est un outil interdisciplinaire développé par l'Agence européenne de l'environnement à partir d'un modèle initial de l'Organisation de Coopération et de Développement Economique, le modèle PER (Pressions - Etat - Réponses). Il prend en compte les liens de causalité entre l'homme et l'environnement. Ces liens se traduisent par une activité humaine qui provoque une pression sur l'environnement et qui se traduit par une modification de celui-ci. L'environnement modifié peut générer des conséquences sur le système socio-environnemental. La société, quant à elle, réagit par un ensemble de mesures visant à atténuer les impacts. La figure 8.1 illustre le modèle DPSIR. L'objectif du modèle est de montrer les relations multi-sectorielles et de mettre en évidence les modifications écosystémiques et socio-économiques (Elliot, 2002). Il est également utilisé comme un

modèle conceptuel par les chercheurs et décideurs politiques dans le cadre de la structuration et de la communication politique de la recherche sur l'environnement (Svarstad et al, 2008).

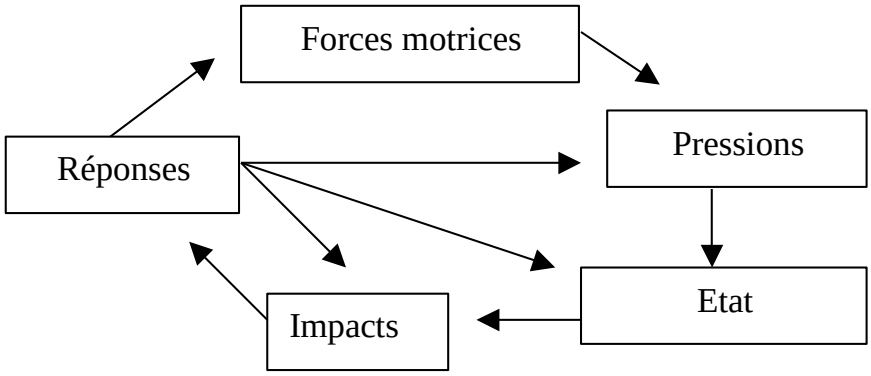


Fig. 8.1. Le cadre conceptuel DPSIR (Svarstad et al. 2008)

C'est dans ce contexte qu'il a été développé au niveau des zones deltaïques et côtières. Ce modèle a permis d'élaborer des stratégies pour contrôler les problèmes d'eutrophisation afin de les réduire au niveau du bassin du Pô, d'une part et d'autre part, d'estimer les pressions, les impacts socio-économiques et écologiques et de prédire les tendances futures dans l'évolution de l'environnement dans le Golfe de Thermaikos (Pirrone et al. 2005, Karageorgis et al. 2006). Les pressions humaines sur les systèmes continentaux aquatiques (rivières, lacs, zones humides, nappes souterraines, marais et estuaires) ont abouti à un ensemble de changements à l'échelle mondiale (Meybeck, 2004). L'approche DPSIR offre une meilleure représentation des différentes relations entre les causes, les conséquences et les réponses du système affecté.

Les modifications induites par l'aménagement ont manifestement accru les impacts environnementaux et la vulnérabilité du système par la perturbation de la circulation des eaux fluviales. Elles n'ont pas manqué de susciter des réponses de la part de la société. L'approche DPSIR prend en compte les conséquences des aménagements sur les aspects socio-économiques et notamment les stratégies d'adaptation qui ont été développées par les structures organisationnelles et la population concernée. Elle s'articule comme suit :

- la délocalisation de l'embouchure à 25 km en amont se traduit par une réduction du temps de séjour de l'eau douce étant donné que la partie située en aval de la nouvelle embouchure évolue en lagune. Cette dernière se situant dans la zone du Gandiolais, l'alimentation de la nappe est assurée par la lagune (Driving force) ;
- ces forces motrices exercent une pression sur l'environnement qui se traduit par une détérioration de la qualité des eaux souterraines (Pressure) ;

- ces eaux contaminées par le sel deviennent impropres au maraîchage et ont aussi entraîné la disparition de certaines espèces halieutiques (State) ;
- les impacts concernent la difficulté d'approvisionnement en eau, une baisse des rendements, perte de biodiversité… (Impacts) ;
- face à cette situation, des stratégies d'adaptation ont été développées par la société (Response).

La figure 8.2 représente les différentes interactions du modèle DPSIR appliquée aux modifications environnementales dans le bas estuaire.

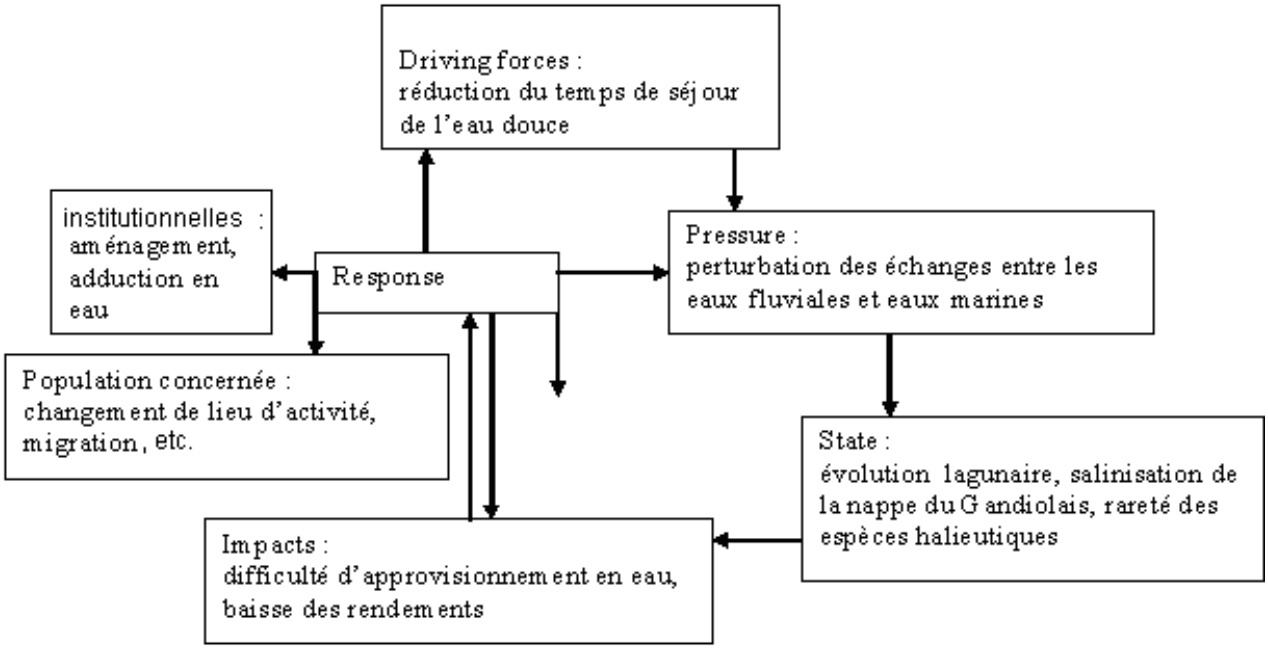


Fig. 8.2 : Le cadre conceptuel DPSIR appliqué aux modifications environnementales de l'estuaire

8.1.1. La réduction du temps de séjour de l'eau douce (Driving forces)

Le fonctionnement de l'estuaire étant sous l'influence du barrage de Diama, il est nécessaire d'analyser en premier lieu son impact sur le temps de séjour de l'eau douce avant d'appréhender la situation qui prévaut actuellement. En période de fermeture des vannes du barrage, la remontée marine est importante à cause de la baisse du plan d'eau au niveau de l'estuaire. Les entrées d'eaux marines entraînent l'augmentation de la salinité dans le bief. Les lâchers périodiques effectués pour des besoins de gestion du plan d'eau en amont du barrage entraînent une dilution des eaux. En période de crue, si le temps d'ouverture des vannes est prolongé, la langue salée est repoussée vers l'embouchure et les eaux estuaires

deviennent douces. De nombreux auteurs (Rochette, 1964 ; Kane, 1985, 1997 ; Gac et al. 1986) ont largement étudié l'évolution et les mécanismes de l'intrusion marine dans le delta du fleuve Sénégal. Notre analyse se base sur le nombre de jours de fermeture des vannes où aucun débit n'est évacué par le barrage et sur la position de l'embouchure pour la période 1986-2006 afin de déterminer l'évolution du temps de séjour des eaux au niveau du bas estuaire. Les données de salinité ont été fournies par le service de l'hydraulique de Saint-Louis. A partir des images Landsat de 1986, 1987, 1988, 1992, 2000, 2001, 2003 et 2006 nous avons mesuré la distance de l'embouchure par rapport au point kilométrique du pont Faidherbe qui est le point de référence. Les travaux de Kane (1997), Dia (2000) et Niang (2002) nous ont permis de compléter les autres années. Nous avons représenté sur les figures 8.3 et 8.4 le nombre de jours de fermeture du barrage de Diama et l'évolution de la salinité par rapport à la position de l'embouchure.

Nous considérons que tant que les vannes du barrage restent fermées, la qualité des eaux du fleuve est saumâtre ou salée à l'aval. Sur la figure 8.3, nous remarquons que le nombre de jours de fermeture des vannes est variable d'une année à l'autre. Pour l'année hydrologique 1986/1987, par exemple, les vannes ont été fermées sur une période de 243 jours, les eaux estuariennes n'ont été douces que sur une période de 122 jours. Les mesures de salinité de surface (fig.8.4) montrent des taux de plus de 40 g/l dépassant largement celui de la mer. Le séjour prolongé des eaux saumâtres entraîne une sursalinisation de l'estuaire (Kane, 1997). Cette sursalinisation est liée à la configuration du milieu qui se trouve nettement en contrebas de l'océan Atlantique (Gac et al. 1986), soit à -0,53 m, et à sa zone d'influence qui est moins élargie. Sur une distance de 47 km (barrage de Diama - ancienne embouchure) l'influence marine prédomine. Durant la période 1990 à 1992, les taux de salinité ont connu une baisse moyenne de l'ordre de 22 g/l. Le barrage est resté fermé sur une période 165 jours, l'embouchure était située à 28 km. Par contre, entre 1993 et 1997, le barrage est resté fermé, en moyenne, sur 146 jours, l'embouchure a connu une évolution régressive de - 2 km, ce qui a pour conséquence une augmentation du taux de salinité de 45 g/l enregistré à la date du 15 mars 1994. Les jours où le barrage est resté ouvert, les eaux estuariennes sont douces, les taux de salinité sont nuls et peuvent tomber jusqu'à 0,02 g/l (enregistré à la date du 17 septembre 1998). C'est en période non pluvieuse que le taux de salinité devient important dans l'estuaire, ce qui a pour effet la dégradation écosystèmes estuariens que nous avons analysés dans le chapitre précédent.

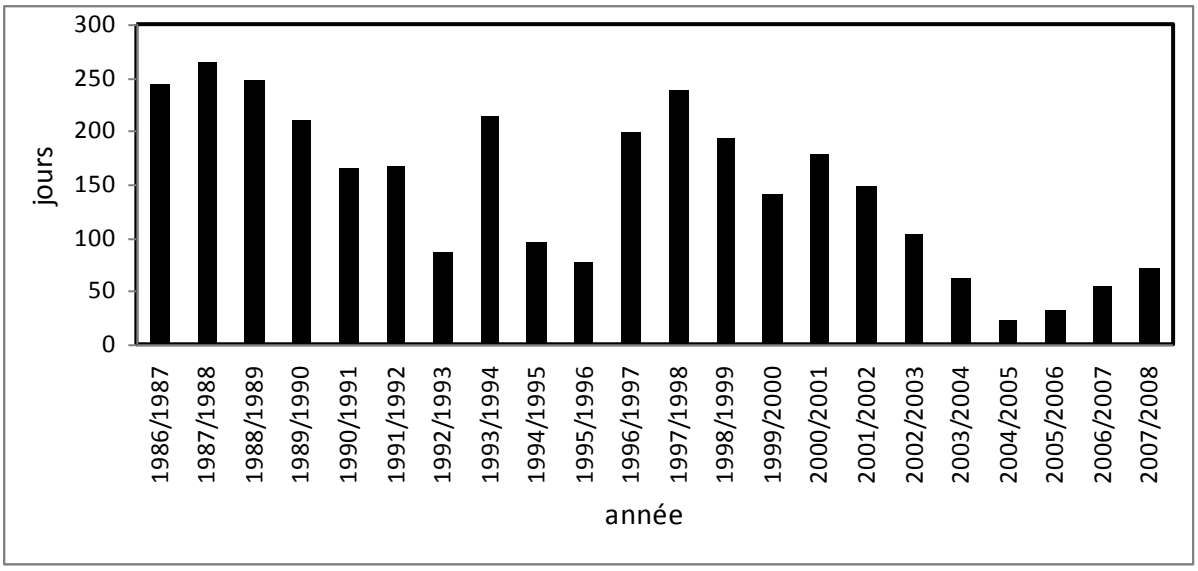


Fig. 8.3 : Nombre de jours de fermeture des vannes du barrage de Diama (1986-2008)

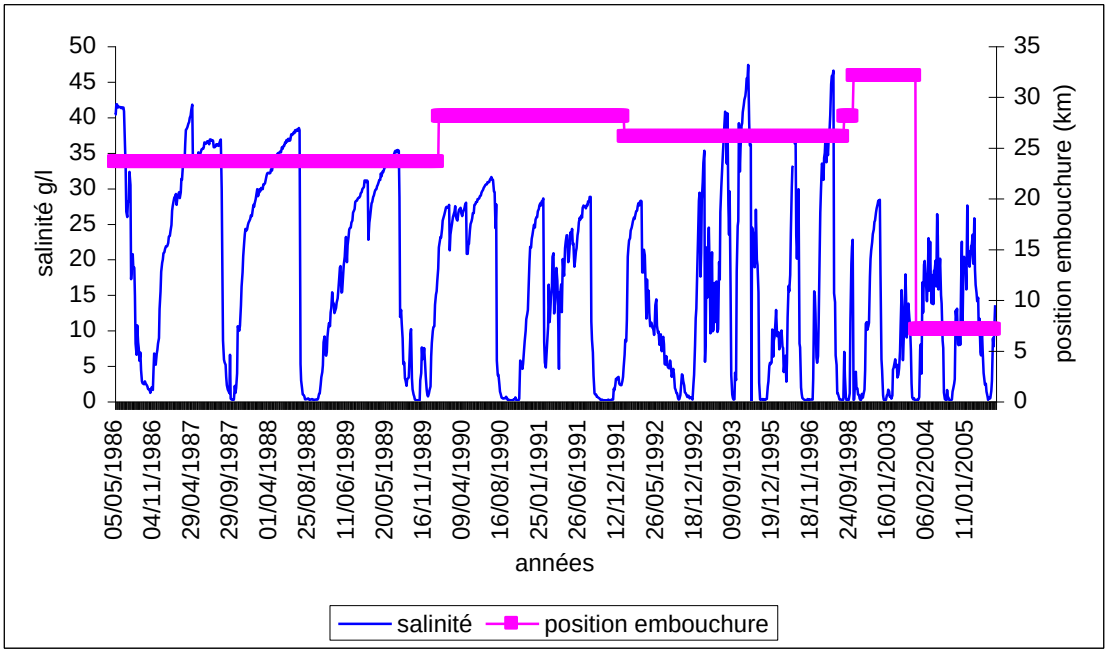


fig.8.4 : Évolution de la salinité des eaux du fleuve par rapport à la position de l'embouchure (1986-2006)

En revanche, depuis 2003, les vannes du barrage ne sont pas restées fermées sur plus de 100 jours. Cela est lié à la mise en service de la centrale hydroélectrique de Manantali depuis 2002. En raison du turbinage de la centrale, les gestionnaires du barrage de Diama effectuent plus de lâchers en direction de l'estuaire. Par conséquent, bien que la nouvelle embouchure soit plus proche de Saint-Louis, le taux de salinité de l'estuaire a

significativement diminué, soit de l'ordre de 14 g/l en moyenne. Les lâchers sont globalement positifs puisqu'ils permettent l'adoucissement des eaux en aval (Leroy, 2006). Toutefois, cette baisse du taux de salinité ne concerne que le tronçon situé entre le barrage et la nouvelle embouchure.

La qualité des eaux dans le bas estuaire reste proche de celle de la mer. D'après les mesures effectuées par Troussellier et al. (2004), sur plus de 12 km au sud de la ville de Saint-Louis, la salinité a atteint une valeur de 35 ‰. Cette partie du fleuve évoluant en lagune, les échanges entre les eaux marines et les eaux fluviales restent très limités. Les eaux fluviales ont tendance à rejoindre l'océan Atlantique par la nouvelle embouchure (fig.8.5).

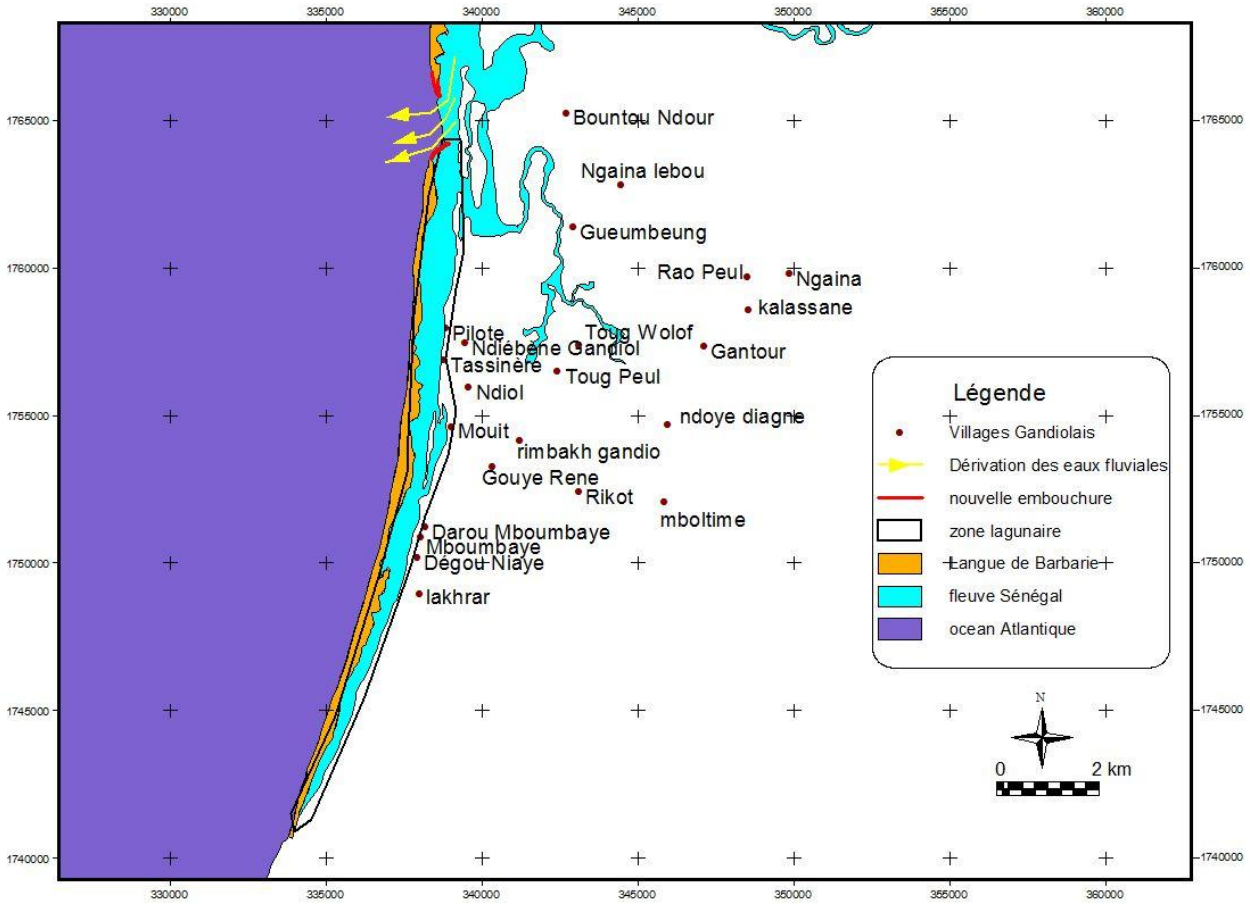


Fig.8.5 : Dérivation des eaux fluviales au niveau de la nouvelle embouchure

Plusieurs facteurs expliquent ce fort taux de salinisation. Etant donné qu'il n'y a plus d'écoulement entre l'ancienne embouchure et la nouvelle, l'irrégularité de la pluviométrie, l'amplification du marnage, l'évaporation participent de façon significative à la salinisation des eaux de surface et souterraines. En plus de tous ses facteurs, du fait de son histoire géologique l'estuaire est une zone qui est naturellement salée. De fait, la perturbation des

échanges entre eaux marines et eaux fluviales, la remontée de sel provenant des dépôts anciens renforceront certainement cette salinisation. A partir de la moyenne annuelle de l'évaporation de 2003 (167 mm), nous avons calculé le volume d'eau évaporé au niveau de la lagune, il correspond à plus de 2 millions de m^3. Cette forte évaporation explique la salinisation excessive de la zone lagunaire, ce qui aura des impacts sur la recharge de la nappe du bas estuaire.

8.1.2. Effets sur la qualité de la nappe dans le bas estuaire (pressions)

De nombreuses études ont été consacrées aux eaux souterraines dans la basse vallée du Sénégal. Kane (1997) a cité notamment Audibert (1970), Projet OMVS-USAID (1990), Thiebaux et al (1993) dans le cadre du projet EQUESEN et Carfantan (1996). Nous complétons cette liste avec les travaux de Fohlen et Puyoo (1984), et plus récemment Diallo (2005) qui ont étudié d'une part l'hydrogéologie de la région de Gandiol pour l'alimentation du maraîchage et d'autre part la baisse de la nappe dans la même zone. Ces dernières études ont montré que l'alimentation de l'aquifère du Gandiolais est assurée par infiltration directe à la saison des pluies et par les crues du fleuve. Or les conditions climatiques sont caractérisées par une précarité des pluies qui limite toute possibilité d'alimentation directe des nappes par cette dernière. A l'instar de tous les pays sahéliens, le Sénégal subit depuis plusieurs décennies, une baisse de sa pluviométrie. Cette dernière combinée aux actions anthropiques ont conduit à des changements au niveau de l'écosystème estuarien préjudiciable à la recharge de la nappe. De surcroît, le Gandiolais se situe dans la zone lagunaire (fig.8.5), le renouvellement des eaux est assuré par le fleuve qui est sous dominance marine durant toute l'année. Ainsi, par sa position géographique (milieu de transition entre la zone des Niayes et la zone estuarienne), le Gandiolais subit les conséquences d'un quelconque aménagement dans sa partie aval.

La perturbation de la recharge des nappes par le fleuve liée à la construction de barrages est perçue comme un problème majeur dans beaucoup de secteurs dans le monde. Par exemple au Maroc, les zones humides côtières de Moulouya ne reçoivent plus les crues des rivières qui assurent la recharge de la nappe phréatique utilisée pour l'irrigation suite à la construction du barrage Mouhamed V. Les eaux et les sols sont devenus de plus en plus salés et les terres cultivables sont abandonnées entraînant l'émigration des travailleurs agricoles (Arthurton et al. 2008). Dans l'estuaire de la Vilaine la mise en service du barrage d'Arzal a entraîné une limitation des échanges amont-aval au niveau de l'estuaire favorisant la prédominance des phénomènes hydrodynamiques d'origine marine (Taïbi et al. 2007). En l'absence d'effet de chasse provoqué par les eaux fluviales, notamment en période de hautes eaux, l'estuaire fonctionne alors comme une baie semi-fermée. La situation qui prévaut au niveau du bas estuaire est analogue à celui de Moulouya. Les eaux souterraines

contaminées par le biseau salé rendent impropre le maraîchage. La population de cette zone est fortement dépendante des eaux souterraines qui constituent leur système d'irrigation pour le maraîchage et leur source d'approvisionnement en eau surtout au niveau des villages (Doun Baba Dièye, Keur Bernard, Ndoye, etc.) qui ne sont pas desservis par l'Adduction en Eau Potable (AEP) de Ndiouck Sall qui se trouve dans la région de Louga, à environ 70 km de Gandiolais ou par le réseau de Saint-Louis. Le problème reste crucial, depuis l'ouverture de la nouvelle embouchure, la salinisation de la nappe a atteint des taux critiques entraînant une expansion des marais salants, une perte progressive des terres cultivables...

8.1.2.1. Le mode opératoire

Nous avons effectué des transects pour mettre en évidence la salinisation des eaux souterraines du Gandiolais. Ces transects ont été réalisés en prenant en compte, d'une part, les villages situés sur le littoral et d'autre part ceux qui sont à l'intérieur des terres. Les mesures sont effectuées sur une période de trois ans afin d'apprécier l'évolution des paramètres physiques des eaux. Elles ont permis d'apprécier le taux de salinité, le potentiel hydrogène (pH), la conductivité à l'aide d'un appareil multi-paramètres. La technique de mesure consiste d'abord à un étalonnage du matériel ; ensuite, nous avons procédé à une technique de puisage de l'eau au niveau des puits, l'eau prélevée est mesurée in situ.

8.1.2.2. La qualité des eaux souterraines (Etat)

Les paramètres physiques des eaux sont liés à sa composition minérale et organique. Leur concentration relative dans l'eau détermine sa qualité et par conséquence son type d'utilisation. Ils sont à ce titre considérés comme des indicateurs qualitatifs.

8.1.2.2.1. Le taux de salinité

Les mesures que nous avons effectuées montrent des taux de salinité variables au niveau des différents villages (tableau 8.1). La qualité des eaux des différents puits dépend d'un certain nombre de facteurs tels que l'emplacement des villages par rapport au fleuve. Les villages de Ngaina Lébou, Gueumbeul, Mouit, Mboumbaye (fig.8.5), situés au niveau du littoral, ont enregistré des taux de salinité très élevés en 2006 et 2007, soit plus de 36 et 46g/l pour la deuxième localité. En 2008 les mêmes puits étaient taris.

Les villages de Dégou Niayes et Lakhrar situés également sur le littoral ont des taux de salinité très faibles par rapport aux villages susmentionnés. Les taux varient respectivement

de 2,7 g/l à 1,5 g/l en 2007. Cet écart des taux de salinité pourrait être lié à l'existence d'une nappe d'eau douce au niveau des formations dunaires dont nous avons évoqué dans le chapitre 3. Mais le biseau salé commence à affecter cette nappe, les mesures de 2008 montrent des taux de 3,1 g/l et 1,8 g/l. En revanche, les villages situés à l'intérieur des terres connaissent des taux de salinité faibles par rapport aux zones précédentes, ils varient entre 0,1 g/l et 1,1 g/l. Cependant, les mesures de 2008 mettent en évidence une augmentation de salinité qui est de l'ordre de 1 g/l en moyenne, imputable à l'avancée du biseau salé. Bien que les mesures de 2007 et de 2008 soient effectuées au mois de juillet où la saison pluvieuse doit effectivement commencer, les sols n'ont pas été lessivés. Cette situation peut s'expliquer par un démarrage tardif de l'hivernage.

Tableau 8.1 : Evolution de la salinité des eaux souterraines (2006-2008)

Localités	salinité 2006 (g/l)	salinité 2007 (g/l)	salinité 2008 (g/l)
Ngaina lebou	18	25.7	puits tari
Gueumbeul	36.4	46.8	puits tari
Mouit	10.1	17.2	puits tari
Mboumbaye	6.3	14	puits tari
Rao Peul		0.9	1.2
Gantour		0.8	1.78
Ndoye Diagne	0		0.1
Mboltime	0	0.2	1.5
Dégou Niaye	1.4	2.7	3.1
Lakhrar		1.5	2.8
Gouye Réne		1.1	1.6
Rimbax	1.7	2.4	
Ricote		0.9	2.5
Bountou Ndour		1.5	
Kalassane			0.2

Bien que ces mesures soient ponctuelles, elles traduisent une avancée du biseau salé du littoral vers l'intérieur des terres.

8.1.2.2.2. La conductivité

La conductivité ou conductance spécifique est la mesure de l'aptitude d'une colonne d'eau à conduire un courant électrique. Pour un type d'eau donné, la conductivité augmente en fonction de la teneur en ions dissous, de la nature des sels dissous et lorsque les eaux se concentrent (Kane, 1997). La mesure de la conductivité permet d'évaluer approximativement la minéralisation globale de l'eau. Les valeurs de conductivité montrent une variation de la composition chimique des eaux, elles varient entre un minimum de 10 et un maximum de 73 ms/cm au niveau des mêmes villages (Ngaina Lébou, Gueumbeul, Mouit, Mboumbaye) qui ont enregistré des taux de salinité élevés en 2006 et 2007. Ces valeurs dénotent un niveau de minéralisation excessive des eaux. La conductivité mesurée au niveau des puits des villages de Rao Peul, Mboltime est moins élevée avec des valeurs respectives de 1,41 ms/cm (2007), 1,88 ms/cm (2008) 0,31 ms/cm (2007) et 2,34 ms/cm (2008). Cependant des exceptions peuvent exister au niveau d'un même secteur, seul le village de Ndoye Diagne situé à l'intérieur des terres connaît un niveau de minéralisation moyenne avec un taux de 0,16 ms/cm (tableau 8.2).

Tableau 8.2: Evolution de la conductivité (2006-2008)

Localités	conductivité 2006 (ms/cm)	conductivité 2007 (ms/cm)	conductivité 2008 (ms/cm)
Ngaina lebou	28,13	40,16	puis tari
Gueumbeul	56,88	73,13	puits tari
Mouit	15,78	26,88	puits tari
Mboumbaye	9,84	21,88	puits tari
Rao Peul		1,41	1,88
Gantour		1,25	2,78
Ndoye Diagne	0		0,16
Mboltime	0	0,31	2,34
Degou Niaye	2,19	4,22	4,84
Lakhrar		2,34	4,38
Gouye Reine		1,72	2,50
Rimbax	2,66	3,75	
Ricote		1,41	3,91
Bountou Ndour		2,34	
Kalassane			0,31

8.1.2.2.3. Le pH

Le pH ou potentiel hydrogène se définit comme le négatif du logarithme à base 10 de la concentration en ion hydrogène de l'eau. Il mesure la balance acide d'une solution sur une échelle logarithmique allant de 0 à 14 (de l'acide à l'alcalin), avec un niveau de neutralité correspondant au pH = 7. Le paramètre influençant le plus le pH est la concentration en anhydride carbonique qui est liée à la minéralisation totale. Le pH est une variable importante pour une analyse de l'eau car il influe sur les processus biologiques et chimiques dans l'eau. L'acidité des eaux se caractérise par des valeurs dont le pH est inférieur à 7. Les mesures de pH attestent d'une évolution des eaux souterraines vers une acidité au niveau des villages de Mboltime et Dégou Niayes avec des taux respectifs de 4,9 et 5,7 enregistré en 2008. Il faut dire que le milieu recèle du sel fossile et du fait de la nouvelle dynamique estuarienne avec la perturbation des échanges entre le fleuve et la mer, le pH évolue vers l'acidité. Les autres villages ont des pH basiques, les taux varient entre 8 et 9 (tableau 8.3).

Tableau 8.3 : Evolution du pH (2006-2008)

Localités	pH 2006	pH 2007	pH 2008
Ngaina lebou	9.22	7.4	puits tari
Gueumbeul	6.5	8.37	puits tari
Mouit	6.33	7.9	puits tari
Mboumbaye	7.67	7.75	puits tari
Rao Peul		7.9	8.68
Gantour		7.78	7.89
Ndoye Diagne	7.35		7.97
Mboltime	8.17	7.16	4.9
Dégou Niayes	8.1	8.67	5.67
Lakhrar		8.36	7.14
Gouye Reine		8.16	8.54
Rimbax	8.2	8.11	
Ricote		8.35	8.06
Bountou Ndour		8.01	
Kalassane			8.25

L'étude qualitative montre une évolution croissante des paramètres physiques des eaux dans le bas estuaire. A partir d'un modèle numérique de terrain, nous avons cartographié le niveau de vulnérabilité des différents secteurs à l'avancée du biseau salé (fig.8.6), nous avons dégagé les constats suivants :

- une vulnérabilité élevée est notée au niveau de secteurs où les altitudes sont comprises entre 0 et 5 m ;
- la vulnérabilité moyenne concerne les zones où les altitudes sont comprises entre 5 et 10 m ;
- les secteurs qui ont un niveau de vulnérabilité faible concernent les villages situés au niveau des formations dunaires, les altitudes sont comprises entre 10 et plus de 15 m

Les relevés piézométriques effectués par Diallo (2005) révèlent un niveau très bas de la nappe. Dans certains villages (Mboumbaye, Mouit, Lakhrar, Ricotte, Ndoye Diagne) le niveau piézométrique est situé en dessous du niveau de la mer, soit respectivement -5,20 m; -3,20 m ; -3,89 m ; -3,18 m et -1,32 m. Par rapport aux mesures de 1989 effectuées par GPF Horizon (1989), les niveaux piézométriques étaient compris entre -0,53 m et 1,19 m en basses eaux au niveau de Ricotte et Lakhrar. Cette baisse du niveau piezométrique est consécutive à l'artificialisation du fleuve (barrage, brèche) mais aussi à l'utilisation de la nappe. Lorsque la nappe libre est pompée, le prélèvement provoque une baisse du niveau piézométrique. Cette nappe arrivait à se recharger en fonction des apports pluviométriques et fluviaux (crue). L'eau souterraine s'écoulait vers le rivage où sa progression est limitée par l'intrusion marine. Le contact est marqué par un intermédiaire eau douce/eau salée dont la position est imposée par la différence de charge entre niveau piézométrique et niveau moyen de la mer (Fohlen et Puyoo, 1984). L'absence d'équilibre hydrostatique favorise une alimentation de la nappe par la mer par l'intermédiaire du fleuve, la différence de charge diminuant, l'eau salée pénètre progressivement à l'intérieur de l'aquifère.

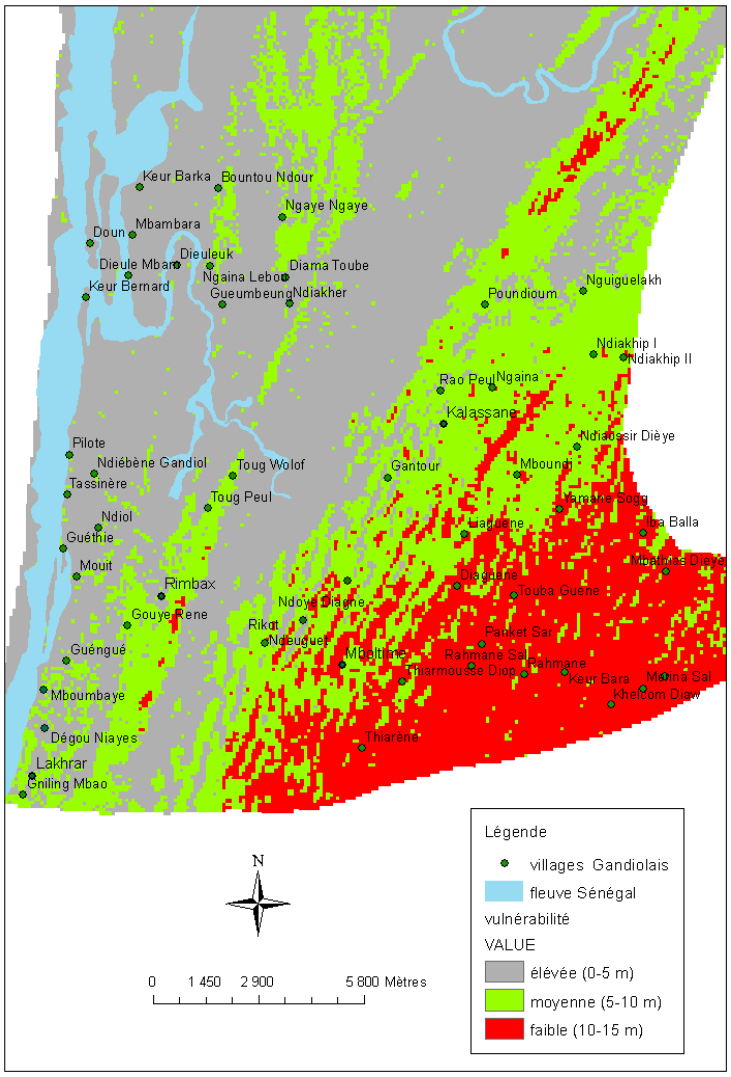


fig.8.6 : Niveau de vulnérabilité des villages du Gandiolais à l'avancée du biseau salé

8.1.3. Impacts des aménagements sur les activités socio-économiques (Impacts)

Tout le monde est vulnérable aux modifications de l'environnement, mais l'aptitude des hommes et des sociétés à s'adapter et à survivre à ces changements est très variable. Les habitants des pays en développement, en particulier des pays les moins avancés ont une capacité moindre à s'adapter au changement et sont donc plus vulnérables aux risques environnementaux et au changement qui interviennent dans leur espace (PNUE, 2002). Le système socio-environnemental du bas estuaire a vite réagi par rapport aux aménagements, surtout avec l'ouverture de la brèche. D'après les populations, les effets ont commencé à se faire sentir l'année suivant la coupure de la Langue de Barbarie. Cependant, dans certains villages comme Ndiébène Gandiol, Tassinère, Ndiol (fig.8.4) des problèmes de fertilité des

sols ont été déjà notés depuis la mise en eau du barrage de Diama. D'ailleurs les populations de ces villages ont leur champ au niveau des villages de Lakhrar, Gouye Reine, Rimbax, Rikot. Le maraîchage occupe une place importante dans les activités des populations de la zone. Dans certains cas, il est pratiqué comme complément de revenus, et est associé à d'autres activités telles que la pêche tandis que dans d'autres cas, elle constitue l'activité principale. Les enquêtes par questionnaire et les entretiens que nous avons effectués avec les maraîchers, les pêcheurs et les agents du DRDR et de l'ANCAR qui interviennent dans la zone nous permettent de mettre en évidence les impacts des aménagements sur les activités socio-économiques.

8.1.3.1. Difficulté d'approvisionnement en eau

Si la vulnérabilité est définie comme un état de nuisance, d'exposition aux tensions associées aux changements environnementaux et sociaux et à l'absence de capacité à s'adapter (Adger, 2006), les populations du Gandiolais se trouvent bien dans cette situation. L'approvisionnement en eau potable via le forage de Ndiock Sall, qui se trouve dans la région de Louga, est irrégulier. Il connaît une surexploitation avec un débit moyen de 86 m^3/heure et deux bassins au sol de 200 m^3, chacun alimentant plus d'une trentaine de villages localisés dans les zones de Rao, Gandon, et Gandiol, soit une population de 40852 d'habitants (DCL/PNIR/CABINET EDUR, 2002). Dans un tel contexte, le réseau peut être non fonctionnel en moyenne trois jours. Pour pallier cette situation, l'approvisionnement en eau par le camion citerne du service de l'hydraulique de Saint-Louis constitue la méthode la plus utilisée. Ce système d'approvisionnement est redevable de 51 euros pour 11 m^3 d'eau. Au niveau du village de Ngaina Lébou par exemple, les populations ont aménagé un réservoir pour stocker l'eau afin de le revendre aux usagers à raison de 0,091 euros la bassine. Les sommes récoltées vont servir au paiement d'autres approvisionnements en eau. La situation est plus difficile au niveau de l'île de Doun baba Dièye, qui se trouve actuellement en face de la nouvelle embouchure. Ils vont jusqu'à la ville de Saint-Louis par voie fluviale pour acheter l'eau (photo 8.1), soit une bouteille de 20 litres à 0,038 euros. Ce mode de transport nécessite pour chaque voyage une somme de 7 euros pour l'achat du carburant afin de faire fonctionner le moteur de la pinasse. La baisse de la nappe oblige ainsi les usagers à parcourir de longues distances (7 km) pour aller chercher l'eau directement au niveau des habitants qui en disposent.

Photo 8.1: Retour des habitants de l'île de Doun Baba Dièye après un approvisionnement en eau par voie fluviale (20/12/2007)

8.1.3.2. Baisse des rendements horticoles

L'eau d'irrigation contaminée par le sel s'accumule au niveau des racines des plantes. Les traces de sel après irrigation apparaissent sur le sol. Celles-ci s'accumulent et réduisent la fertilité du sol (Ayers et Westcot, 1976). Ainsi, les terres conquises par le sel sont progressivement abandonnées par les paysans. Nous en avons dénombré :

- 144 champs à Doun Baba Dièye
- 85 environ à Bountou Ndour
- 50 à Ricotte
- 30 à Rao peulh
- 10 à Mouit

Un champ couvre environ une superficie de 0,2 ha et un maraîcher pouvait posséder plus de 2 champs. Au niveau de Doun Baba Dièye 144 champs au total ne sont cultivables qu'en période pluvieuse alors que l'activité maraîchère était pratiquée de façon intensive durant les deux saisons (sèche et pluvieuse). D'une manière générale, la diminution des terres cultivables entraîne une baisse des rendements. D'après les enquêtes, avant l'ouverture de la brèche, ces derniers étaient, en moyenne, de 25 tonnes par ha ; aujourd'hui ils ne sont que de 20 tonnes pour certaines cultures. Le tableau 8.4 présente l'évolution des rendements moyens pour les différentes spéculations dans la zone du Gandiolais. De même, il faut maintenant une quantité de semences plus importante pour produire davantage, la production est passée, de ce fait, de 2 tonnes d'oignons pour 250 g de semence à 1 tonne pour la même quantité.

Tableau 8.4: Evolution des rendements par hectare des différentes variétés de culture (enquête 2008)

Variétés de culture	Rendement tonne/ha (situation actuelle)	Rendement tonne/ha (situation avant brèche)	Rendement tonne/ha (situation avant barrage)
oignons	20	25	35
tomate	15	20	30
carotte	15	25	35
chou	10	15	20
patate	8	12	15
pomme de terre	5	15	25
gombo	8	12	18
piment	5	8	15

Par ailleurs au niveau des villages situés à l'intérieur des terres, les exploitants augmentent les superficies cultivables pour augmenter la production (tableau 8.5). C'est le cas notamment des villages de Kalassane, Rao Peulh, Ndoye Diagne Ngaïna et Mboltime qui sont localisés au niveau de la figure 8.4.

Tableau 8.5: Estimation de la production

Variétés de culture	Campagne 2005-2006		Campagne 2006-2007		Estimation 2007-2008	
	superficie (ha)	quantité (kg)	superficie (ha)	quantité (kg)	superficie (ha)	quantité (kg)
oignons	185	740	205	820	220	880
choux	85	170	60	120	80	43
tomate	65	18	73	22	75	20
Gombo	38	200	30	155	25	125
carotte	15	70	19	80	25	100
navet	15	100	25	160	20	140
piment	12	7	15	8	12	6
Pomme de terre	20	-	10	-	-	-
total	445		449		467	

Source : UGPAR, 2007

8.1.3.3. Modification du calendrier cultural

Le maraîchage était pratiqué de façon intensive en saison sèche comme en saison pluvieuse. Les enquêtes ont également révélé que les années où l'estuaire a connu des inondations liées aux débordements du fleuve, comme par exemple en 1994, 1998, 1999, celles-ci représentaient certes un danger pour la ville de Saint-Louis mais constituaient un avantage pour les maraîchers. La crue du fleuve Sénégal entraîne globalement une augmentation du niveau maximum de l'eau dans le fleuve et par suite une augmentation de l'extension des zones inondées. Elles maintiennent la fertilité des sols en y déposant des couches de vase et en évacuant les sels qui sont accumulés dans les couches supérieures du sol. Les inondations étaient donc extrêmement bénéfiques car les plaines d'inondation ainsi créées constituaient les écosystèmes les plus productifs. De même, la migration de l'embouchure vers le sud était favorable dans la mesure où l'eau du fleuve avait du mal à s'évacuer en mer. Cette situation, en plus de l'influence marine qui était faible, permettait une recharge suffisante de la nappe. En conséquence, l'activité maraîchère pouvait s'étaler pratiquement durant toute l'année. En période pluvieuse, les variétés de culture concernent l'arachide, la pastèque, le mil, etc. Aujourd'hui les cultures s'effectuent à un pas de temps beaucoup plus réduit et s'étalent d'octobre à mars dans les zones qui ne sont pas encore affectée par la salinité (Kalassane, Rao Peulh, etc.). Certains maraîchers, environ 20%, préfèrent même attendre la saison pluvieuse, avec le lessivage des sols, pour pratiquer leur activité.

8.1.3.4. Le système de métayage

Ce système consiste en une location des terres de culture pour la pratique agricole. Cependant, au niveau du Gandiolais ce sont plutôt les puits qui font l'objet de métayage du fait de l'importance de l'exploitation de la nappe dans le système agricole. Les puits d'eau douce sont loués à raison de 30 euros par puits par année. Afin de respecter le compromis entre les deux parties, l'exploitant est obligé de louer un nombre maximum de puits pour maintenir la qualité des eaux souterraines et de ne pas surexploiter la nappe. Ce système coûte cher à l'exploitant dans la mesure où il fait le plus souvent recours à la main d'œuvre afin de faciliter l'exploitation de la nappe.

8.1.3.5. Le recours à la main d'œuvre

L'exhaure manuelle à l'aide de seaux est la principale technique d'exploitation de la nappe, celle-ci est rendue plus ardue en raison de sa baisse. Le temps d'arrosage est passé de 5 heures à 10 heures. Cette situation pousse les exploitants d'une part, à multiplier le nombre de puits au niveau des champs afin de ne pas très vite épuiser la nappe. Il faut au moins 3 puits pour exploiter 0,1 ha. Ainsi ce nombre est passé de 3 à plus de 5 pour une superficie

moyenne de 0,2 ha dans certains secteurs du Gandiolais, c'est-à-dire pour les producteurs qui ont les moyens. Le coût de forage élevé d'un puits qui est estimé entre 152 et 228 euros ne permet pas aux producteurs d'en disposer davantage. D'autre part, les maraîchers ont recours à la main d'œuvre pour exploiter leurs champs. Cette main d'œuvre est constituée de travailleurs temporaires qui viennent le plus souvent de la sous région (Guinée) et sont appelés localement « sourgas ». Le mode de paiement consiste à se partager la récolte à part égale après déduction des charges (intrants, semences) en fin de saison ou bien le propriétaire du champ leur achète toute la récolte. Les enquêtes révèlent que ce système a commencé à la suite des aménagements du fait de la baisse de la nappe. Le nombre de « sourgas » par champ peut varier de 1 à 10. L'augmentation du nombre de travailleurs saisonniers dans un champ occasionnera des dépenses exorbitantes pour le propriétaire qui doit les prendre en charge.

Dans cette optique, certains maraîchers au niveau du village de Kalassane et de Ndoye Diagne par exemple ont préféré mettre en place un système d'irrigation par pompage ou au goutte à goutte. Ces exploitants ont creusé jusqu'à une profondeur de plus de 11 m en vue de disposer d'une eau propice à leurs activités maraîchères.

8.1.3.6. La baisse des revenus

Il est évident que les perturbations induites au niveau de l'activité vont avoir des répercussions sur les revenus des producteurs et occasionneront un appauvrissement et des situations de précarité des populations rurales. Après avoir été pendant longtemps à l'origine de leur richesse, le maraîchage est en phase de déperdition. Avant les aménagements, les producteurs arrivaient à gagner jusqu'à plus de 1500 euros par campagne agricole, ce qui constituait une source de revenus importante si l'on sait le SMIC au Sénégal est de 84 euros. Aujourd'hui ils ne gagnent que 400 euros en moyenne. Toutefois du fait de la baisse de la production certains n'hésitent pas à augmenter les prix de vente : par exemple le kilogramme d'oignons est passé de 0,15 à 0,45 euros actuellement. Malgré tout, les revenus restent toujours en baisse, ce qui va contribuer à augmenter le degré de vulnérabilité des populations avec notamment un accès insuffisant aux services sociaux et un déficit de réponse aux besoins primaires. Pour certains individus, cette pauvreté se manifeste par le chômage. Pour vivre, ils comptent sur l'aide de leurs enfants émigrés.

8.1.3.7. Des effets mitigés pour la pêche

Dans une certaine mesure, la nouvelle embouchure a eu un impact positif sur la pêche maritime. Ainsi, entre 2001 et 2006, le tonnage est passé de 32000 tonnes à 51000 tonnes (tableau 8.6)

Tableau 8.6 : Evolution des mises à terre (2000-2006)

	Poisson		Crustacés		Mollusque		Total	
année	Tonne	Valeur (millions de FCFA)	Tonne	Valeur (millions de FCFA)	Tonne	Valeur (millions de FCFA)	Tonne	Valeur (Millions de FCFA)
2000	30476	5 985	33	185	39	62	30548	6 232
2001	32751	6 202	15	185	76	62	32842	6449
2002	-	-	-	-	-	-	-	-
2003	35 584	7 060	30	143	26	14	35 640	7 217
2004	53695	4 980	43	92	49	24	53788	5 096
2005	44500	5 619	76	125	37	15	44591	5 758
2006	51218	6 823	41	179	43	30	51302	7 031

Source : Service Régional des Pêches et de la Surveillance de Saint-Louis (2007)

Cette augmentation des mises à terre s'explique par des conditions de pêche qui sont sensiblement meilleures avec la nouvelle embouchure. En plus de l'économie sur le carburant, les débarquements sur la façade fluviale sont rendus plus aisés qu'en face de la mer. Les pêcheurs éprouvaient d'énormes difficultés pour accoster sur la plage à cause notamment des vagues. Désormais les débarquements sur la façade fluviale constituent un gain de temps et d'argent.

8.1.3.7.1. L'ouverture de la brèche, une aubaine pour les pêcheurs

Pour les pêcheurs qui pratiquent la pêche maritime (notamment ceux de Guet Ndar sur la Langue de Barbarie), l'ouverture de la brèche constitue une aubaine, ¡ls passent désormais par la nouvelle embouchure. Lorsque l'embouchure était à une trentaine de kilomètres de Saint-Louis, les pêcheurs passaient du côté de la mer. Sur un ensemble de 200 pêcheurs qui étaient ciblés pour l'enquête, 90% considèrent que le creusement de la Langue de Barbarie constitue un avantage pour le développement de leur activité. Le lieu de

débarquement est, de ce fait, passé du côté marin au coté fluvial. Ils font ainsi une économie d'environ 20 litres de carburant pour rejoindre la mer, ce qui constitue un avantage d'autant plus le prix du carburant a augmenté dernièrement. Egalement, les nouvelles conditions de navigation permettent aux pêcheurs d'user moins leur matériel de pêche (moteurs et pirogues) qu'auparavant. Le dimensionnement des pirogues est passé de 10 à 25 m augmentant leur capacité de tonnage qui a varié de 10 à 30 tonnes. Avant l'ouverture de la brèche, les pirogues de petites dimensions constituaient l'outil favori des pêcheurs puisqu'il fallait moins de personnes pour le pousser jusqu'en mer et les problèmes d'accostage ne se posait pas. Avec la grande pirogue, ils avaient du mal à l'accoster sur la plage et elle restait mouillée au large, ce qui limitait la durabilité du matériel.

Cependant, cette nouvelle voie de passage n'est pas sans conséquence. En période de forte houle, les hautes vagues provoquent souvent des accidents. Plus de 41 morts ont été enregistrés en 2006 et 37 morts en 2007, 18 pirogues ont chaviré en 2006 et 17 pirogues (de grande taille) en 2007. Pourtant les pêcheurs affirment que les accidents sont devenus moins nombreux depuis l'ouverture de la brèche. Aussi 90% des pêcheurs souhaitent la stabilisation et le dragage de la nouvelle embouchure afin d'éviter pareilles situations.

8.1.3.7.2. Diminution des espèces halieutiques au niveau du fleuve

Avant la mise en eau du barrage de Diama, le bas delta était colonisé par des espèces estuariennes à affinités marines et euryhalines. La population changeait radicalement lors des hautes eaux avec des espèces marines remplacées par les espèces d'eau douce et euryhalines. Le biseau salé qui pénétrait jusqu'à 120 km de l'embouchure créait un biotope favorable aux espèces d'eaux saumâtres (Diop et al. 2006 ; Magrin et Seck, 2009). Reizer et Lessent (1972) soulignent que les eaux saumâtres sont mieux pourvues en Na et CL mais aussi en SO_4 et Ca et sont par conséquent plus productives. En outre, la modification de la dynamique hydrologique consécutive aux aménagements se traduit par une perturbation des itinéraires empruntés par les poissons. Ces aménagements constituent une barrière physique qui bloque la migration des poissons et entraîne une perte d'habitat liée au rétrécissement de la zone estuarienne. D'autres secteurs dans le monde connaissent le même problème ; par exemple, en Égypte, le barrage d'Assouan a réduit la taille fertile du delta du Nil, sur 47 espèces de poissons exploitées commercialement, 30 ont économiquement ou biologiquement disparu (Diop et Rekacewicz (2003). L'estuaire du Sénégal, pour sa part, est devenu moins poissonneux. Plus d'une trentaine d'espèces (annexe 6) sont dénombrées par les pêcheurs mais beaucoup ont disparu ou sont devenuses rares. Nous avons évoqué plus haut que depuis 2003 les vannes du barrage de Diama sont constamment ouvertes, ce qui explique que les eaux au niveau du tronçon entre la nouvelle embouchure et le barrage restent saumâtres mais avec le retrait des eaux en marée basse, les espèces halieutiques suivent les variations de la marée et ne sont plus

présentes dans cette partie du fleuve. De surcroît, la lagune au niveau du tronçon nouvelle embouchure - ancienne embouchure ne constitue pas un lieu de reproduction des espèces halieutiques. Le tableau 8.7 présente les espèces qui sont devenus rares au niveau de l'estuaire.

Tableau 8.7 : Espèces rares ou en voie de disparition

Nom français	**Nom scientifique**
Capitaine	*Penttanemus*
Denté à long fil	*Dentex filosus*
Pagre à point bleu	*Pagrus erhenbergi*
Fausse morue	*Epinephelus goreensis*
Otolithe nain	*Pseudolithus*
plexiglas	*Galeoides decadactilus*
Poisson électrique	*Malalepteurusus electricus*
Mérou gris	*Epiniphelus caninus*
Liche amie	*Lichie amia*

Dans le Gandiolais, d'après les enquêtes, les quantités de mises à terre ont baissé, en moyenne, de 40 kg à 10 kg/jour par pêcheur. Bien que beaucoup d'espèces abondent au niveau de la nouvelle embouchure (tableau 8.8), leur temps de séjour dans la zone reste limité du fait des fluctuations marines.

Tableau 8.8 : Espaces abondantes au niveau de la brèche

Nom français	**Nom scientifique**
Sardinelle	*Sardinellea*
Carpe blanche	*Pomadasys spp*
Mulet	*Mugil cephalus*
Tilapie	*Tilapia spp*
Machoiron	*Arius SPP*
Petite carangue	*Chloroscombrus chrysurus*
Sole	*Cynoglossus senegalensis*

Les constats qui ressortent, au regard, de ces impacts socio-économiques sont que d'une part une pauvreté s'est installée au niveau du Gandiolais et d'autre part les populations de la Langue de Barbarie s'enrichissent avec les nouvelles conditions de pêche. En conséquence, de graves déséquilibres socio-économiques caractérisent les populations de l'estuaire et mettent à nu les défaillances dans la gestion des risques d'inondation de la ville de Saint-Louis.

8.1.4. Stratégies d'adaptation face aux risques anthropiques (Réponses)

Face aux menaces et enjeux qui font que le système socio-environnemental devient vulnérable, des stratégies de lutte sont développées par les institutions et les populations du Gandiolais. Selon Bethemont (2002), le problème fondamental des relations entre nature et société est que la nature a longtemps écrasé l'homme, avant que l'homme ne la domine et ne puisse la détruire, à lui maintenant de la ménager et de la protéger puisque la survie de la nature conditionne celle de l'humanité. La réponse aux perturbations ou la résilience sociale est définie comme la capacité des groupes et des individus à tolérer et à répondre aux perturbations environnementales et socio-économiques à travers des stratégies d'adaptation (Bradley et Grainger, 2004). Ces auteurs ont analysé comment deux ethnies (Wolof et Peulh) ont, de différente manière, pu s'adapter aux contraintes environnementales suite à la désertification dans le zone sylvopastorale du Sénégal. Si l'ethnie Peulh a une capacité de résistance sociale plus élevée, les wolofs, quant à eux, développent plutôt des types de réponses liées à un changement de lieu d'activité et ont recours à une aide extérieure. C'est dans cette perspective que Reghezza (2006) souligne que la capacité d'adaptation varie en fonction des facteurs sociaux et des représentations qui déterminent la capacité d'anticipation, la rapidité de la réaction, l'efficacité de la réponse.

Les stratégies d'adaptation aux modifications qu'elles soient naturelles ou anthropiques doivent être définies d'une façon à satisfaire aux six principes de la gestion de l'environnement :

- écologiquement durable ;
- techniquement possible (avec des méthodes et des équipements appropriés) ;
- économiquement viable (à moindre coût) ;
- socialement désirable (recherché par les sociétés) ;
- légalement admissible (conforme à la législation nationale et internationale) ;

- administrativement réalisable (effectuée par des structures étatiques et institutionnelles) (Elliot, 2002).

Ces principes intègrent la notion du développement durable qui doit être le soubassement de toutes formes de résilience des sociétés.

8.1.4.1. Les réponses institutionnelles

L'Agence de Promotion du Réseau Hydrographique National (APRHN) et l'OMVS ont réalisé d'une part, le canal du Gandiolais et d'autre part, des travaux pour l'adduction en eau au niveau du village de Doun Baba Dièye.

Par ailleurs, l'OMVS a prévu de réaliser un port à l'emplacement actuel de la nouvelle embouchure en vue de développer la navigation sur le fleuve Sénégal entre l'Océan Atlantique et l'hinterland du fleuve jusqu'au Mali. Mais les études de faisabilité impliquent un certain nombre d'impacts. D'après OMVS-SOGREAH (2006) la plupart des impacts sont impossibles à atténuer avec des mesures économiquement réalisables. L'exigence d'un rétablissement du transit littoral par by-passing en théorie infini pour assurer la pérennité de l'ouverture représente un risque considérable et un poids très lourd pour les générations futures, ce qui amène à considérer ce scénario comme « menaçant » pour l'environnement.

8.1.4.1.1. Le canal du Gandiolais

C'est un projet qui a été initié bien avant l'ouverture de la brèche. Mais c'est seulement en 2004 que la réalisation a été effective. L'objectif principal est de permettre le transfert d'eau du marigot de Ngalam à la dépression du Gandiolais afin d'améliorer les conditions de remplissage de la dépression et d'augmenter la capacité de stockage des différentes unités hydrographiques du système. Ainsi le canal doit être en mesure de transférer un volume d'eau de 9 396 000 m^3 vers la vallée du Gandiolais pour une superficie irrigable de 1175 ha avec des besoins en eau qui sont estimés à 8000 m^3 à l'hectare pour la contre-saison froide (de décembre à mars) (Hydroconsult International, APRHN, 2004). Ce qui pourrait permettre aux maraîchers qui sont quotidiennement confrontés à la remontée du biseau salé, de cultiver dans de très bonnes conditions.

Le Ngalam est un défluent du Lampsar (fig. 8.6) qui est équipé d'un pont barrage qui comporte six passes de 1,50 m de large. Son radier est de +0,16 m IGN avec une côte maximale de retenue de plus de 1,80 m IGN. Avec l'ouvrage de Bango, ils permettent la

vidange et le lessivage de la réserve d'eau au début de la crue avant le remplissage, puis l'évacuation de l'eau salée résiduelle par l'effet de chasse des eaux douces venant du barrage de Makhana et de la réserve Gorom-Lampsar-Kassack (Kane, 1997). Cette eau qui arrive au niveau du Ngalam doit, en principe, permettre le remplissage du canal. Une fois rempli, les vannes de l'ouvrage terminal sont ouvertes pour permettre l'inondation de la dépression qui représente une ancienne vallée asséchée. Du coté ouest, l'alimentation de la dépression se fait en périodes de hautes eaux du fleuve. Ce sont les ouvrages Bountou Batt et Albar qui assurent les points de jonction entre le fleuve et la cuvette de Gueumbeul d'une part et la dépression de Rao Peulh d'autre part. L'ouverture des vannes de ces deux ponts s'opère en périodes de crue et leur fermeture aux moments de basses eaux du fleuve où le régime est sous la domination des eaux océaniques. La figure 8.7 représente le système hydraulique du canal du Gandiolais.

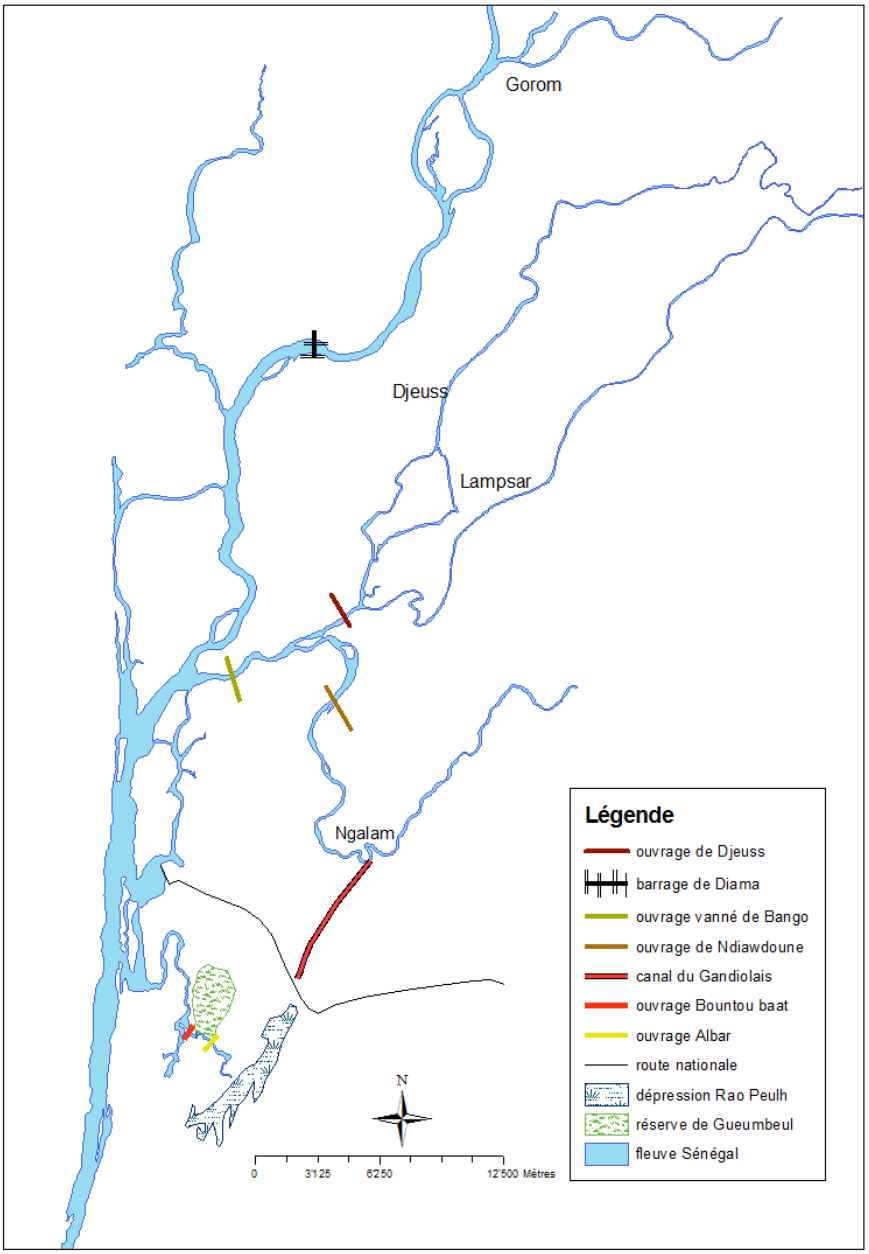


fig.8.7 : Le système hydraulique du canal du Gandiolais

Toutefois, le canal du Gandiolais ne joue pas encore son rôle. Le fleuve est marqué depuis 2004 par une baisse des écoulements, à la station de Bakel, alors que le remplissage du canal est très tributaire des crues du fleuve. Dans ce contexte, il peut même arriver qu'il soit à sec alors qu'il devait constituer une panacée aux effets pervers des aménagements.

8.1.4.1.2. L'adduction en eau potable

L'OMVS a réalisé des travaux pour l'adduction en eau potable dans le village de Doun Baba Dièye en 2008. Ces réalisations sont fonctionnelles depuis 2009 et comprennent trois bornes fontaines pour une population de plus 600 habitants. La gestion de ces points d'eau est

assurée par les villageois qui se sont organisés en équipe pour revendre l'eau aux usagers à raison de 0,038 euros la bassine. La somme collectée sert à payer la facture d'eau, le reste est d'une part, épargné au niveau d'une banque et d'autre part, partagé par l'équipe qui a assuré la gestion au cours du mois. En 2009, nous avons aussi constaté que les populations de Ngaina Lébou ont abandonné le réservoir d'eau qui était alimenté par le camion citerne de l'hydraulique de Saint-Louis, le village dispose désormais d'une borne fontaine qui dépend du réseau de Saint-Louis.

8.1.4.2. Les réponses des populations

Elles sont multiples (fig. 8.8) et concernent les migrations, le changement de lieu d'activité, la reconversion vers d'autres activités (commerce, artisanat…). Mais nous avons fait le choix d'analyser le changement de lieu d'activité bien qu'il ne représente que 14% des réponses des populations, et les migrations. Ce choix se justifie par le fait que l'immigration clandestine, la nouvelle zone de culture constituent des facteurs de risque.

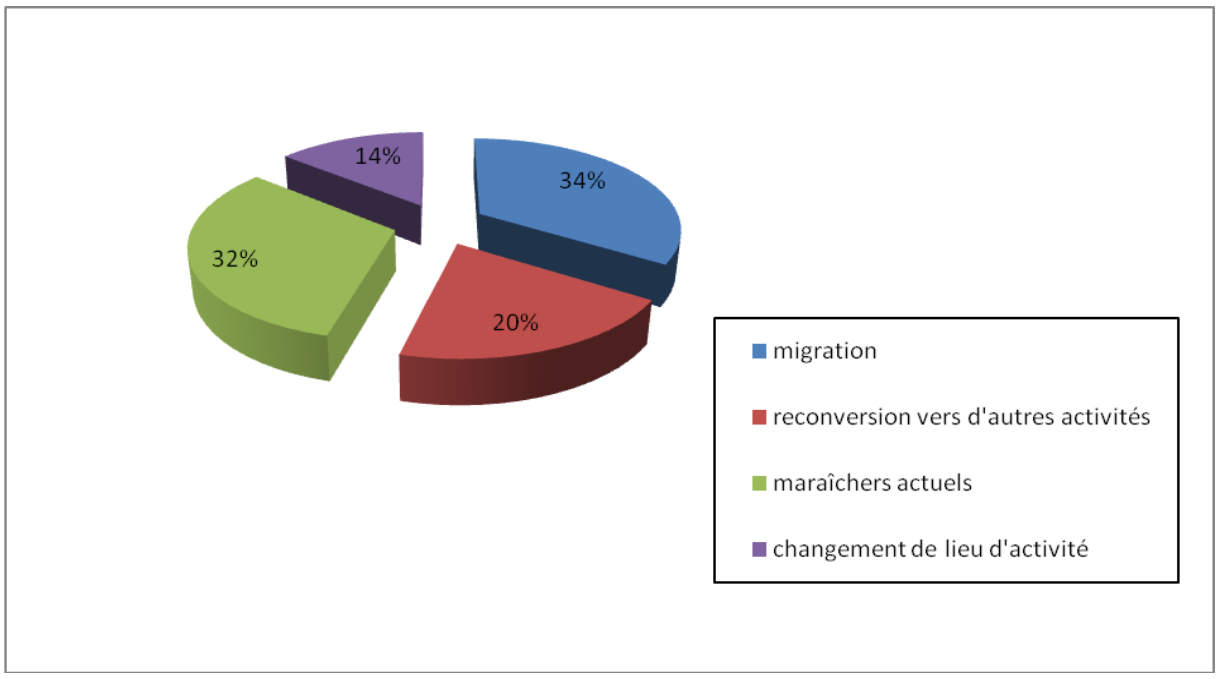


Fig. 8.8 : Les stratégies d'adaptation des populations

8.1.4.2.1. Changement de lieu d'activité

Les maraîchers du Gandiolais commencent à coloniser les terres au niveau de la station de lagunage des eaux usées de la ville de Saint-Louis pour pérenniser leur activité. Avec près d'une dizaine de champs avant l'ouverture de la brèche, la zone en compte actuellement plus de 140 ; toute l'étendue de la station (environ 6 ha) est ainsi occupée (Kane et al. Sous presse). Les sous produits du lagunage peuvent offrir des avantages multiples notamment la pérennité de l'activité, la richesse des nutriments, la garantie de revenus substantiels (Maiga et al. 2002). La station de lagunage de Saint-Louis est une succession de quatre bassins creusés à même le sol dont les eaux brutes arrivent sur une cascade en béton (photo 8.2).

Photo 8.2 : La station de lagunage de Saint-Louis: a : cascade en béton, b : bassin des eaux, c : bassin des eaux usées en culture (C. Kane, 2008)

Les eaux polluées, en sortie de lagunage, sont généralement de bonne qualité. Cependant, au niveau de la station de lagunage de Saint-Louis, les eaux à l'entrée de la station ont des charges polluantes en DBO_5 de 425 mg/l en avril 2008 pour une DCO de 842 mg/l. Les eaux à la sortie de l'exutoire enregistrent une DBO_5 de 60 mg/l pour un DCO de 210 mg/l (ONAS, 2008), ce qui dépasse de loin les recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) qui sont de 20 mg/l pour la DBO_5, 80 mg/l pour la DCO. Ces eaux alimentent la nappe et sont réutilisées pour les activités maraîchères. Ceci posera à terme un véritable problème de santé publique.

Nous sommes amenés à nous poser la question de savoir si la prise en compte du développement durable a été effective. Les réponses des populations sont souvent spontanées et n'intègrent aucunement cette notion de développement durable. Or, l'objet principal du développement durable est l'intégration de l'homme aux systèmes qu'il habite. Sa préoccupation majeure est de répondre à l'éternel problème de l'existence et de la survie. Les conditions de vie deviennent une préoccupation majeure dans le processus de développement (Mancebo, 2008). L'utilisation que les groupes humains font de leur

environnement constitue une préoccupation majeure pour les autorités sénégalaises. Ces dernières n'ont pas manqué de faire savoir aux maraîchers qui phagocytent ce nouvel espace les réels dangers de l'utilisation de ces eaux polluées. Mais les maraîchers, bien que conscients du problème, affirment ne pas avoir d'autres alternatives pour pallier l'avancée du biseau salé. Aucune mesure n'a été prise pour mettre à terme l'expansion de l'activité dans cette zone à risque.

8.1.4.2.2. Les migrations

Les migrations actuelles, qu'elles soient internes ou externes, d'une ampleur considérable, touchent particulièrement la population âgée entre 18 et 30 ans au niveau du Gandiolais. La baisse des rendements, le chômage, la pauvreté constituent des facteurs déterminants qui poussent les jeunes à chercher à partir même au péril de leur vie. Cette recherche de conditions de vie meilleure se traduit par un départ massif des maraîchers. Le nombre de départ par rapport aux maraîchers est représenté au niveau du tableau 8.9.

Tableau 8.9 : Nombre de migrants par rapport à la population des villages ciblés pour l'enquête

Localités	Population en 2007	Nombre de maraîchers	Exode rural	Emigration clandestine	Total	Taux par rapport au nombre de maraîchers (%)
Doun Baba Dièye	750	175	150	7	157	90
Gantour	1478	750	70	45	115	15
Gueumbeug	148	65	35	10	45	69
Gouye reine	523	400	50	35	85	21
Mouit	1803	1000	200	66	266	27
Dégou Niayes	1110	735	145	25	170	23
Mboltime	517	150	15	5	20	13
Ndoye Diagne	325	300	20	2	22	7
Lakhrar	218	100	27	12	39	39
Rao Peulh	1402	610	200	10	210	34
Ricotte	727	475	50	12	62	13
Toug Peulh	273	92	20	5	25	27
Total	9274	4852	982	234	1216	25

Les villages de Doun Baba Dièye et de Gueumbeug (fig. 8.9) ont enregistré le plus de départ par rapport aux autres villages, soit respectivement 90% et 69% des maraîchers. Nous avons évoqué dans le chapitre précédent que les habitants de la première localité ont été les premiers à être touchés par l'intrusion marine qui a rendu les terres impropres au maraîchage. Le départ massif des maraîchers peut gêner le processus de développement du terroir. Cela est d'autant plus marquant que ce sont les plus actifs qui tentent l'aventure. Cette migration est aussi à l'origine du dépeuplement de certaines localités. À Dégou Niayes, par exemple, la population est passée de 1110 habitants en 2007 à 940 habitants actuellement.

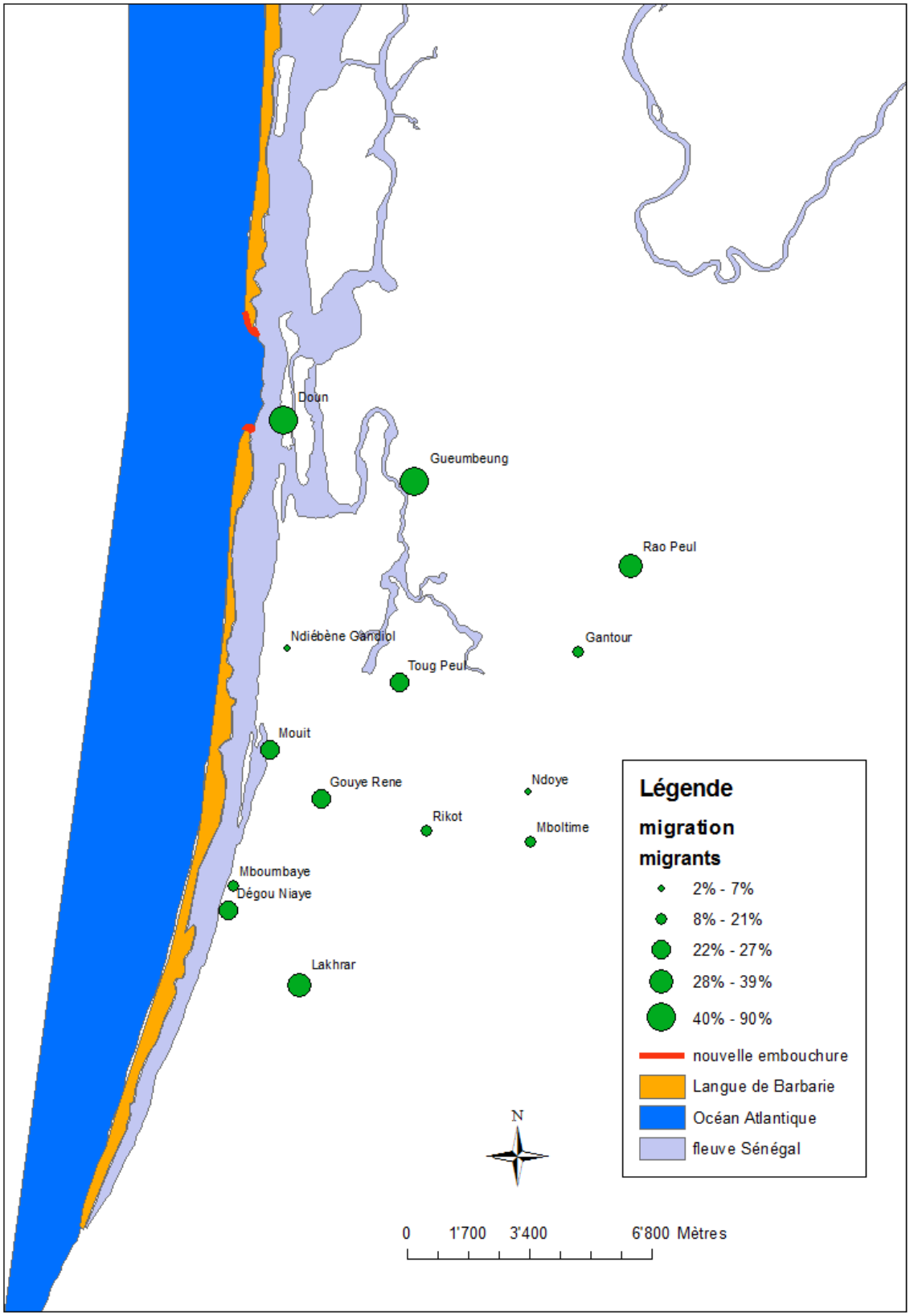


Fig. 8.9 : Répartition des migrants au niveau des différentes localités

La migration clandestine est un type d'exode à haut risque. Elle peut être qualifiée de migration de désespoir au regard des moyens utilisés. La traversée de l'océan Atlantique à bord d'embarcations fragiles est devenue un moyen privilégié pour les candidats à l'émigration pour rejoindre directement les côtes espagnoles. Beaucoup d'entre eux, malheureusement, restent au fond de l'océan (Ba et Ndiaye, 2008). En 2006, par exemple sur plus de 16 000 immigrés clandestins qui sont arrivés sur les côtes espagnoles, plus d'une centaine sont morts pendant la traversée. Beaucoup de ces candidats à l'exil sont sénégalais[15]. Ce qui est plus grave c'est qu'ils sont conscients des mauvaises conditions de voyage mais préfèrent malgré tout tenter l'aventure qui nécessite une somme d'environ 600 euros par personne. De même les parents encouragent leurs enfants à émigrer et participent même au financement du voyage. D'ailleurs, certains affirment que c'est seulement par manque de moyens qu'ils n'ont pas choisi l'émigration clandestine. L'Espagne constitue la destination privilégiée de la majeure partie des migrants du fait de la réussite sur le plan social des premiers émigrés. Ainsi, il constitue un espace dans lequel les migrants projettent leurs attentes qui consistent à acquérir de nouvelles sources de revenus. De ce fait, ce type de migration est en perpétuel renouvellement.

En plus de ce type de migration, d'autres par contre, soit 4% sur un ensemble de 5 villages de 6208 habitants ont fait le choix de pratiquer l'immigration saisonnière au niveau de la vallée du fleuve Sénégal. Elle concerne :

- 60 maraîchers dans le village de Ndiebene Gandiol ;
- 32 dans le village de Gouye Rene ;
- 75 dans le village de Gantour ;
- 45 dans le village de Ricotte ;
- 24 dans le village de Mboumbaye.

Ces maraîchers vont dans la vallée du Sénégal durant la période allant de septembre à février pour pratiquer leur activité. Ce type d'émigration est pratiqué par les exploitants qui ont les moyens d'honorer les charges. En effet, l'exploitation des terres dans cette zone est redevable d'une somme de plus de 1300 euros qui correspondent aux charges à l'ha (location du champ, système d'irrigation). En moyenne les producteurs exploitent entre 1 et 3 ha.

Pour le secteur de la pêche continentale, la baisse des mises à terre et la disparition de certaines espèces halieutiques se traduisent par un exode massif de 80 % des jeunes. Ces

[15] http://www.afrik.com/article10305.html

derniers habitaient au niveau des villages de Ndièbene Gandiol, Mouit, Ndiol, Tassinère, Mboumbaye. Dans ces localités le nombre de pêcheurs était estimé à plus de 450 pêcheurs au total. Ces pêcheurs ont choisi de pratiquer leurs activités dans les centres de pêche du Sénégal (Mbour, Joal, Casamance, Kayar) et de la sous région (Banjul, Mauritanie).

8.1.4. 3. Les mesures d'atténuation

Si un risque ne peut être réduit ou éliminé, il est sage de s'adapter à sa présence. Cette adaptation signifie à la fois des modifications physiques, des mesures techniques et une modification des comportements, des activités économiques et de l'organisation sociale, pour les rendre plus compatibles avec les situations ou menaces existantes ou nouvelles. Cette deuxième méthode suppose une capacité d'adaptation, et notamment l'aptitude à élaborer de nouvelles options et à les mettre en œuvre au profit des populations vulnérables (PNUE, 2002). Les stratégies d'adaptation qui sont retenues par l'ensemble des acteurs n'ont pas été avantageuses dans la mesure où elles ont contribué d'une part à dépeupler le Gandiolais et d'autre part en favorisant d'autres risques, qui cette fois-ci, sont sanitaires. Dans cette perspective, nous proposons des mesures d'atténuation qui prennent en compte les écosystèmes du Gandiolais tout en permettant le développement des systèmes de production. Les actions qui suivent peuvent se révéler particulièrement bénéfiques pour le système socio-environnemental et pourraient réduire sa vulnérabilité :

- Traiter au phosphate les sols qui n'ont pas une salinisation excessive. C'est une expérience qui a été mené par l'Institut National de Pédologie au niveau du Gandiolais et qui doit être développé ;

- une sensibilisation des populations sur la nécessité d'éviter l'irrigation excessive pouvant favoriser la salinisation des terres ; cette sensibilisation doit être accompagnée d'une formation des techniques d'irrigation plus adaptées ;

- développement des activités de reboisement avec des espèces fertilisantes (*Tetrapleura tetraptera*) qui permettront une régénération des sols, la fixation des dunes et la lutte contre l'érosion ;

- favoriser la culture d'aménagement du territoire au niveau du Gandiolais par une meilleure interaction entre décideurs locaux et populations locales ;

- une approche fondée sur une gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) limiterait les volumes d'eau perdus par évaporation au niveau de la lagune.

Le principe de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) est admis depuis la Conférence de Dublin (1992). Les effets induits par l'ouverture de la nouvelle embouchure

dans le bas estuaire restent un problème crucial, d'où l'urgence et la nécessité de promouvoir une approche dans la manière de gérer les ressources en eau. Cette gestion intégrée doit nécessairement passer par l'ouverture de l'ancienne embouchure qui permettrait de limiter les flux d'eau fluviale qui vont directement en mer et les volumes d'eau perdus par évaporation. La gestion intégrée des ressources en eau est un critère nécessaire du développement durable. Nous constatons une situation d'inéquité entre les populations urbaines de Saint-Louis et celles rurales du Gandiolais. Elle est le résultat de l'ouverture de la nouvelle embouchure. Le risque d'inondation fluviale a été jugulé au moyen d'une action qui a entraîné par ailleurs des perturbations dans le fonctionnement écologique du bas estuaire. Cette situation montre, s'il en était encore besoin, que le développement durable par la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), est une approche pertinente. La GIRE a, en effet, pour objet l'amélioration soutenue des conditions de vie de toutes les populations dans un environnement caractérisé par l'équité, la sécurité et la liberté de choix. Cette gestion exige l'intégration tant des systèmes naturels et humains que de l'aménagement des sols et de la gestion de l'eau (OMM, 2009).

La réouverture de l'ancienne embouchure semble plus opportune afin d'atténuer la situation qui prévaut actuellement au niveau du Gandiolais et de prévenir les risques de submersion de l'îlot aux oiseaux du PNLB, de l'île de Doun Baba Dièye et du quartier de Pikine au sud de la ville de Saint-Louis. Pour ce faire, il faudrait fermer la nouvelle embouchure afin de faciliter la dérivation des eaux sur l'ancienne embouchure. Toutefois est-il possible de fermer une embouchure qui a plus de 2 km de large. Ce serait une tâche difficile mais pas impossible. Comme la nouvelle embouchure suit une tendance à un déplacement du nord au sud, bien qu'elle ait connu ces dernières années une érosion significative de sa partie nord, accélérer le processus de sédimentation permettrait de réduire sa largeur.

Les facteurs hydrodynamiques sont les principaux agents qui façonnent le cordon littoral de la Langue de Barbarie et sont généralement prédominants durant la saison non pluvieuse, entre mars et mai. Les travaux doivent donc être opérés à la fin de la période de fortes houles et avant la saison pluvieuse c'est-à-dire entre mai et juin. On peut accélérer le processus de sédimentation par la mise en place de cordons d'enrochement qui sont moins coûteux et plus faciles à mettre en place. Ces ouvrages mettraient à l'abri l'île de Doun Baba Dièye et l'îlot aux oiseaux menacés de disparition. Toutefois l'inconvénient de ces ouvrages est qu'ils peuvent aussi accélérer l'érosion étant donné qu'ils empêchent l'échange sédimentaire entre l'estran et la dune et peuvent aussi modifier les processus hydrodynamiques. C'est pourquoi cette opération doit être effectuée en même temps que la réouverture de l'ancienne embouchure qui pourra accélérer le processus de colmatage de la nouvelle embouchure. La réouverture de l'ancienne embouchure doit être accompagnée d'un dragage régulier qui éviterait la formation de la barre et réduirait, du coup, les débordements fluviaux. En période de crue, les eaux rejoindront la mer par l'ancienne embouchure et en période non pluvieuse la dérive littorale va contribuer à l'engraissement de la nouvelle embouchure et favorisera son colmatage.

8.1.4.4. Le schéma conceptuel DPSIR

Le cadre conceptuel DPSIR que nous avons représenté sur la figure 8.2 ne traduit, en fait, que le rapport de cause à effet allant de la perturbation climatique à la faible résilience en passant par les différentes phases intermédiaires (accentuation d'une vulnérabilité, l'exposition aux risques). Partant des objectifs du DPSIR, nous avons représenté sur la figure 8.10 l'ensemble des interactions entre les éléments de vulnérabilité et les stratégies d'adaptation que nous avons proposées pour réduire la vulnérabilité du système socio-environnemental. Cette réduction vise la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE). Nous avons vu précédemment que les eaux se sont adoucies au niveau du tronçon barrage Diama - nouvelle embouchure du fait de l'ouverture régulière des vannes de l'ouvrage. La fermeture de la nouvelle embouchure permettra de prolonger cet adoucissement jusqu'au niveau de l'ancienne embouchure qui sera rouverte. Ce faisant, le système socio-environnemental pourra mieux s'adapter à ce contexte.

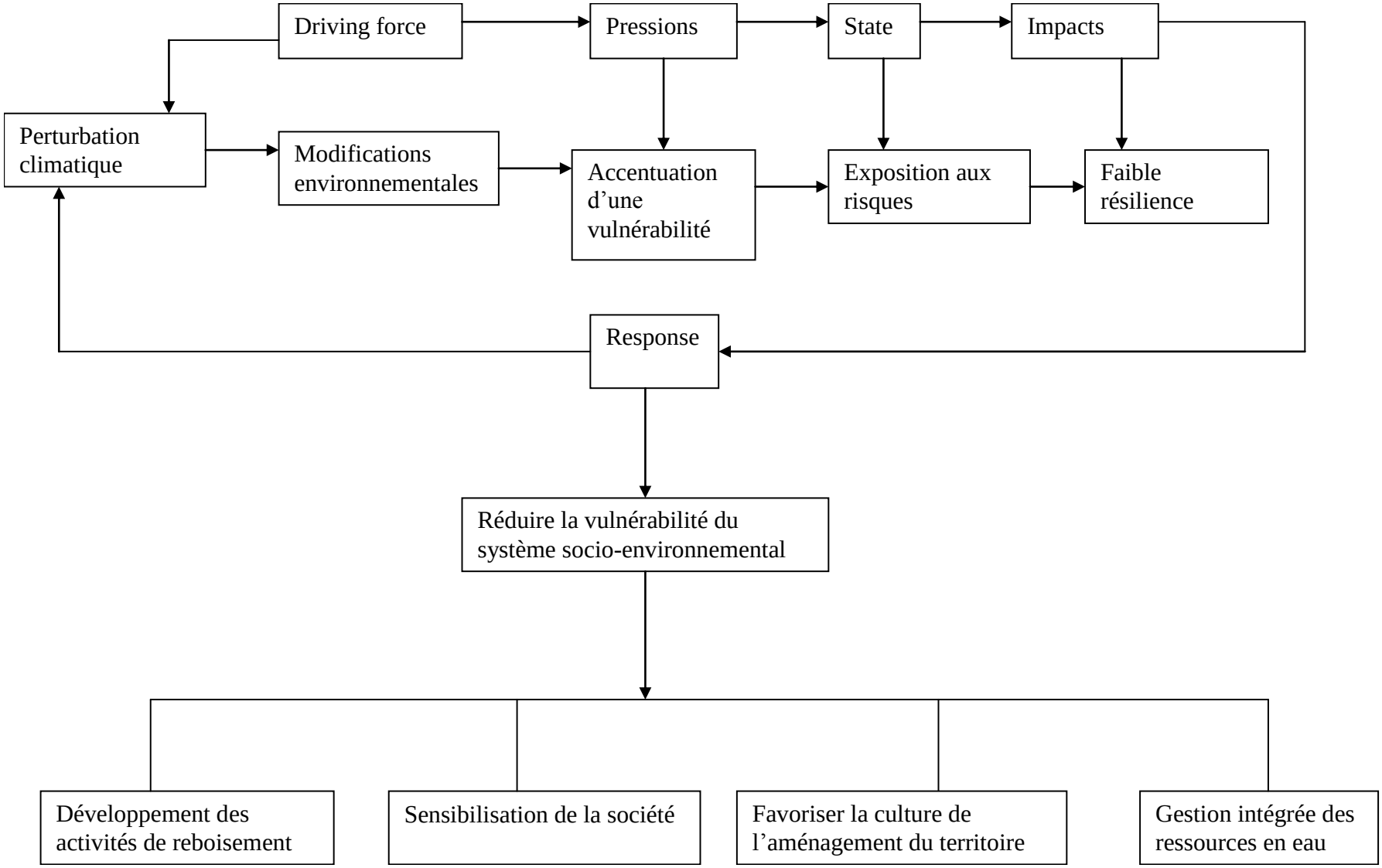


Fig. 8.10 : Modèle conceptuel DPSIR de l'estuaire du fleuve Sénégal

Conclusion

Le Gandiolais est caractérisé par un manque considérable de ressources en eau douce avec la salinisation qui s'est accentuée dans le bas estuaire rendant aléatoire les cultures maraîchères. L'avancée du biseau salé et les perturbations induites constituent une sérieuse menace pour le système socio-environnemental. Ces aménagements ont appauvri et contribué au déplacement des habitants du Gandiolais. Les diverses réponses apportées par les populations constituent des problèmes qui vont générer des perturbations à long terme et vont davantage accentuer leur niveau de vulnérabilité. L'application du concept DPSIR nous a permis de mettre en évidence toutes ces différentes interactions et de proposer des mesures d'atténuation afin de réduire la vulnérabilité et augmenter la capacité de résilience du système socio-environnemental. L'évolution des tendances futures de l'estuaire sera l'objet du chapitre qui suit.

Chapitre 9 : L'accentuation de la vulnérabilité en cas d'une élévation du niveau marin

Les changements climatiques et l'élévation du niveau de la mer entraîneront un accroissement des risques auxquels sont exposées les côtes. L'estuaire est soumis à une conjonction de plusieurs facteurs qui augmentent la vulnérabilité du système socio-environnemental. Suite aux assauts d'une dynamique extrêmement active au niveau de la nouvelle embouchure qui se traduit par les conséquences que nous avons décrites dans les chapitres précédents, la survenance d'un phénomène naturel ne fera que renforcer la fragilité du système.

Il est probable que cette hausse intensifiera les pressions environnementales et portera atteinte au développement durable. Elle se traduira par des risques de submersion et une plus grande pénétration de l'eau de mer alors que le bas estuaire connaît déjà des phénomènes de salinisation de la nappe du fait de la perturbation des échanges entre les eaux fluviales et les eaux marines suite à l'ouverture de la nouvelle embouchure. L'approche prospective des changements climatiques permet d'estimer l'évolution future du système socio-environnemental de l'estuaire du Sénégal.

Dans ce dernier chapitre, il s'agit de montrer que l'élévation du niveau marin provoque d'une manière paroxystique la vulnérabilité du système socio-environnemental. Après avoir présenté les différents scénarios des changements climatiques, nous aborderons les tendances évolutives actuelles de la Langue de Barbarie avant d'estimer les pertes de terre en cas d'une hausse du niveau de la mer.

9.1. Les scénarios des changements climatiques

Diverses études prospectives ont été effectuées sur l'augmentation globale du niveau moyen des mers. La plupart de ces études (Nicholls, 2004 ; Grinsted, 2009 entre autres) se sont basées sur les projections globales de l'IPCC. Dans cette perspective, nous retenons les études du GIEC (2002), de l'IPCC (2007) et notamment celle d'Ericson et al. (2006) qui ont estimé sur le plan sectoriel, la hausse du niveau de la mer pour 40 deltas dans le monde dont celui du Sénégal.

Les résultats du GIEC (2002) font état d'une élévation moyenne de la mer de l'ordre de 0,09 à 0,88 m entre 1990 et 2100. Les augmentations prévues pour les périodes 1990–2025 et 1990–2050 sont de l'ordre de 0,03 à 0,14 m et 0,05 à 0,32 m respectivement.

L'IPCC (2007) estime de façon globale que l'élévation du niveau de la mer devrait être de l'ordre de 0,18 à 0,38 m pour un scénario faible et 0,26 à 0,59 m pour un scénario élevé d'ici la fin du siècle, 2090-2099.

Ericson et al. (2006) ont appliqué une méthode d'estimation de l'élévation du niveau moyen des mers sur un échantillon de 40 deltas en se basant sur les données de sédiments fluviaux, les niveaux de subsidence naturels des deltas, les subsidences accélérées des eaux souterraines et sur l'élévation statique de la mer. Leurs prévisions sont de l'ordre de 0,5 à 12,5 mm par an avec une valeur moyenne de 3,9 mm par an et une médiane de 4 mm par an pour la période 2000-2050. La valeur octroyée pour le delta du Sénégal est de 3 à 5 mm par an.

En ce qui concerne les impacts prévus de l'augmentation du niveau moyen de la mer sur le système socio-environnemental, ils se révèlent catastrophiques. A l'horizon 2080, plusieurs millions de personnes subiront les conséquences des inondations. Dans le cas d'une hausse de 0,5 à 1 m, le nombre de personnes touchées augmenterait de 6 à 14 fois, à l'échelle mondiale. De même, environ 20 % des zones humides côtières pourraient disparaître (Nicholls, 2004). Les zones littorales, du fait de leur fragilité, sont particulièrement sensibles aux événements extrêmes. Incontestablement, l'élévation du niveau marin y aura des répercussions notables du fait de la pression croissante qu'exercent les activités humaines sur le milieu. Les impacts se traduisent par :

- une salinisation accentuée des sols et de l'eau
- une dégradation des écosystèmes
- une modification de la faune piscicole
- une accélération de l'érosion côtière
- une augmentation des événements extrêmes

D'une manière générale, le changement climatique conduit inévitablement à des modifications des écosystèmes qui peuvent se traduire par une perte de biodiversité. Les conséquences à long terme vont excéder celles des événements naturels catastrophiques. Dans les nombreuses publications sur les impacts de cet événement extrême, une vulnérabilité du système socio-environnemental est le plus souvent mise en évidence.

D'un autre côté, Dasgupta et al. (2009) soulignent que les impacts des changements climatiques se font déjà ressentir avec la multiplication et l'ampleur des cyclones et des inondations récurrentes dans le monde. La conjonction de ces différents phénomènes constitue une grave menace pour les pays à forte concentration de population et d'activité économique dans les régions côtières. De même, Robert (2004) a également mentionné que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a conclu que l'élévation du niveau moyen de la mer aura lieu au 21ème siècle et que cela pourrait avoir d'importantes répercussions sur les populations côtières et les écosystèmes côtiers.

Les impacts des changements climatiques seront bien plus catastrophiques en Afrique en raison de la faiblesse de son économie et de la croissance rapide de sa population dans les zones côtières (Nicholls et Cazenave, 2010). Egalement, son climat est très variable et cette variabilité se traduit par des phénomènes climatiques extrêmes à l'exemple des sécheresses et des inondations qui ont augmenté en fréquence au cours de ces dernières années. La zone sahélienne en raison d'une plus grande sensibilité des ressources en eau compte tenu du stress hydrique est l'une des régions les plus vulnérables alors qu'elle a une faible capacité pour réduire les effets négatifs. L'impact souvent désastreux de la variabilité climatique et des événements extrêmes au cours des trente dernières années est un exemple frappant et un signe avant-coureur de cette vulnérabilité (Niasse et Afoudou, 2003). De surcroît, plusieurs facteurs concourent à renforcer cette vulnérabilité à savoir la pauvreté, la mauvaise gouvernance, la faiblesse des institutions, etc.

9.2. Les tendances évolutives actuelles de la Langue de Barbarie

La Langue de Barbarie connaît actuellement des phénomènes d'érosion côtière particulièrement importants au niveau des quartiers de Guet Ndar, Ndar Toute et Goxumbacc. Ce phénomène émane, certes, des facteurs naturels mais aussi anthropiques. L'occupation du territoire et les prélèvements de sable contribuent à l'intensifier. Le sable entraîné par les vagues et les courants est naturellement remplacé par les sédiments provenant de l'érosion de bancs de sable marins. L'urbanisation des espaces côtiers entraîne une perturbation du transit sédimentaire naturel. De même, l'extraction de sable induit un déséquilibre des plages lorsque les apports sédimentaires deviennent insuffisants.

Il faut dire que l'érosion côtière ne constitue pas un phénomène nouveau dans la zone littorale, qui a connu, à différentes époques, des phénomènes érosifs marquants. De nombreux travaux (Guilcher, 1954 ; Sall, 1982 ; Niang-Diop, 1995 ; Kane, 1997) témoignent de l'évolution régressive de la Langue de Barbarie. A ce titre, Guilcher (1954) estime que la largeur de la Langue de Barbarie est passée de 295 m en 1856 à 170 m en 1926 au niveau du quartier de Ndar Toute. Tous les terrains lotis qui se situaient dans ce secteur se sont retrouvés sous les eaux. Sall (1982) se référant aux travaux antérieurs estime que les vitesses de recul du trait de côte sont de l'ordre de 1,6 à 2 m/an.

Depuis ces dernières années, cet aléa naturel ne cesse de prendre de l'ampleur. L'empreinte de l'homme sur le littoral semble avoir entraîné cette recrudescence. La Langue de Barbarie a connu d'importantes modifications liées à l'urbanisation et aux différentes pressions humaines. Ces interventions constituent des facteurs déterminants dans les processus évolutifs du milieu. Elles interfèrent avec les processus côtiers, notamment en réduisant les apports sédimentaires. Par ce fait, elles peuvent contribuer à accélérer l'érosion côtière qui devient un important facteur de risque. Nous mettons en évidence ici les facteurs d'origine anthropique.

9.2.1. Les pressions sur le littoral

Le cordon littoral de la langue de Barbarie connaît une forte urbanisation en dépit de ces possibilités d'extension qui sont très limitées (largeur comprise entre 300 et 200 m, en moyenne et une longueur de 25 km). D'après Faye (2010) la surface du bâti sur le cordon littoral est passée de 100 ha à 180 ha entre 1927 et 2005. Sur cet espace se retrouve aujourd'hui près du quart de la population de Saint-Louis, qui se répartissent dans trois grands quartiers populaires à savoir Guet Ndar, Ndar Toute et Goxumbacc. Elle constitue également un lieu privilégié pour le développement du tourisme. Son attrait résulte de sa situation géographique entre l'Océan Atlantique et le fleuve Sénégal avec une longue plage de sable fin. Cependant, les infrastructures hôtelières sont installées au niveau de la partie médiane de la Langue de Barbarie sur les dunes et consomment beaucoup d'espace. Ces dernières occupent, en moyenne, une superficie de 3 ha. Leur multiplication dans les années 1990 a induit des perturbations dans les échanges sédimentaires entre la dune bordière et l'estran. Ces établissements font face à la mer et empêchent ainsi l'alimentation du massif dunaire par les sédiments marins.

Mis à part cette urbanisation, le cordon littoral connaît des phénomènes d'extraction de sable qui concourent à déstabiliser le transit sédimentaire. Des quantités importantes de sable marin sont prélevées fragilisant le littoral et exacerbant, du coup, le processus d'érosion côtière. Ces prélèvements se pratiquent de façon anarchique. Ils sont généralement effectués en cachette à des heures matinales ou tardives, soit entre 6 heures et 8 heures du matin ou à la tombée de la nuit. Ce sont les charretiers qui opèrent dans ce secteur. Suivant les entretiens que nous avons effectués avec les populations, les prélèvements peuvent être estimés à 6 et 8 m^3 tous les trois jours par charrette. Ces pratiques persistent du fait du manque de surveillance des côtes. Les sédiments servent généralement de matériaux de construction ou de remblai en cas d'inondation.

Nous avons fait un transect nord-sud en partant du quartier de Goxumbacc au quartier de Guet Ndar pour mesurer le trait de côte. L'objectif est d'estimer la distance par rapport aux habitats. Ces mesures ont été effectuées en 2007 et 2008 en période de marée basse. Le trait de côte n'a pratiquement pas évolué entre les deux mesures, il est resté stable (fig.9.1). Il est à environ 50 m dans les quartiers de Goxumbacc et de Ndar Toute alors qu'il est à 70 m dans les quartiers de Guet Ndar. L'érosion dont témoigne le recul du rivage au niveau de Saint-Louis est plus sensible au nord qu'au sud de la Langue de Barbarie où sont notés des phénomènes de progradation ((Barusseau et al.1993). Mais ce qui est certain, c'est que la mer phagocyte de plus en plus la Langue de Barbarie. Les entretiens que nous avons eus avec les habitants confirment cette tendance au recul de la ligne de rivage. Selon eux, le trait de côte était à 100 m dans les années 70.

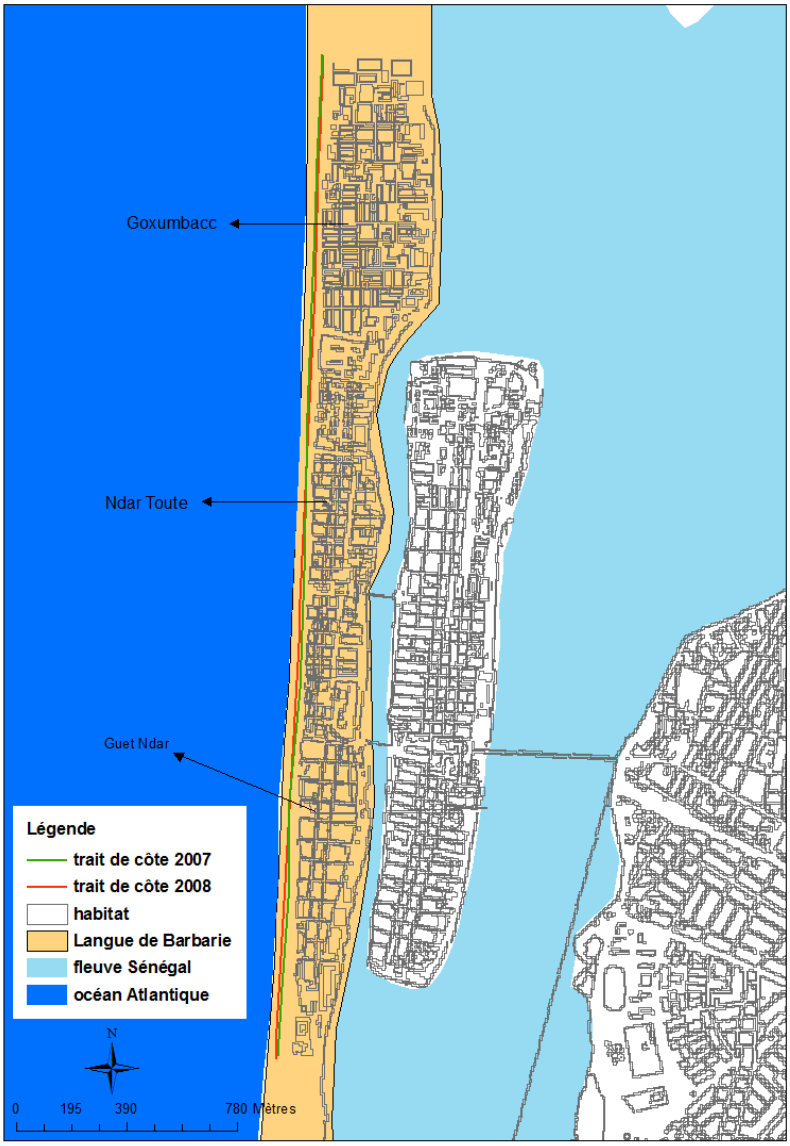


Fig. 9.1 : Evolution du trait de côte (2007-2008)

La Langue de Barbarie évolue par érosion et par sédimentation du fait des facteurs hydrodynamiques. Les vitesses de recul sont également irrégulières dans le temps et dans l'espace. Selon Faye (2010) les variations temporelles de la position de la ligne de pleines mers au niveau de la langue de Barbarie se caractérise par un faible taux d'évolution jusqu'en 1980 suivie d'une phase de progression (+2,25 m/an) de 1980 à 1995 et d'une forte érosion dans la période récente soit -5,6 m/an entre 1995 et 2005. Cette augmentation du taux est fortement influencée par l'ouverture de la nouvelle embouchure.

Le recul du trait de côte a une influence sur la fréquence de l'érosion côtière lors des tempêtes et des fortes marées. La photo 9.1 montre le niveau de la mer par rapport aux habitations. Il faut dire que cette zone était le lieu de débarquement des pêcheurs avant l'ouverture de la nouvelle embouchure, aujourd'hui il est plus soumis à l'action des vagues.

Photo 9.1 : Le niveau de la mer par rapport au quartier de Guet Ndar[16]

9.2.2. L'endommagement du système

L'érosion côtière est particulièrement destructrice et traumatisante pour les populations pourtant habituées à de tels événements. Déjà en 1921, un mur de protection avait été édifié sur le littoral au niveau des quartiers de Guet Ndar et Ndar-Toute pour lutter contre l'érosion et protéger les populations. Mais du fait de son intensité et de sa fréquence, cette structure s'est affaissée depuis 1978. Aujourd'hui, les populations restent sans protection majeure et sont exposées aux risques liés à l'eau de mer. Cette exposition est d'autant plus manifeste avec les habitats souvent sommaires, surtout au niveau du quartier de Guet Ndar, et des ruelles étroites (photo 9.2) qui font qu'en cas de danger, les populations auront du mal à évacuer les lieux.

[16] http://www.saintlouisdusenegal.com/ocean2010-02.php

Photo 9.2 : Une ruelle dans le quartier de Guet Ndar

De surcroît, l'océan ne rencontrant aucun obstacle sur son passage continue d'avancer, ce qui amplifie les dommages causés par l'aléa. Sur la photo 9.3 les toits arrachés, les maisons dévastées par la mer montrent l'ampleur de l'aléa et le danger qu'il représente.

Photo 9.3 : Maisons détruites par les vagues (Goxumbacc)

Bien qu'aucune perte humaine n'ait été enregistrée, les dégâts, en ce qui concerne les habitats, demeurent importants :

- 8 maisons ont été détruites en 2007 ;
- l'année suivante des dégâts très importants ont été enregistrés dans une dizaine de concessions ;

- en 2009, les vagues ont emporté 3 maisons;

- en 2010, plus de 20 maisons sont détruites et 52 familles ont été déplacées ou relogées dans des concessions voisines ou à l'intérieur de la ville.

D'après les entretiens que nous avons effectués avec les populations sinistrées, les pertes matérielles sont estimées à plus de 22 000 euros par chef de famille. D'une manière générale, les populations vivent dans l'angoisse permanente d'être surprises par les vagues. Elles en sont arrivées à rester sur le qui-vive et à surveiller la mer de peur que les déferlantes ne causent d'autres dégâts plus importants. D'ailleurs, pour éviter que ces vagues ne détruisent les matériaux de pêche, les pirogues sont parquées au niveau des ruelles à l'intérieur des quartiers. Il faut dire que ces populations entretiennent un lien très affectif avec le milieu. Au-delà de la possibilité qu'il leur offre d'être proches de la mer, leur lieu de travail, elles considèrent la Langue de Barbarie comme leur appartenant. C'est ce qui explique que cette zone reste assez spécifique à Saint-Louis, du point de vue de l'habitat, du mode d'occupation de l'espace et de la cohésion sociale.

9.2.3. Les enjeux socio-économiques

L'aléa constitue une sérieuse menace pour l'ensemble des activités économiques et également pour la survie de la population. La Langue de Barbarie joue un rôle majeur dans l'activité économique et dans l'attractivité touristique de la ville. La pêche y constitue l'un des plus importants secteurs économiques. Ceci est le fait de l'importance de la pêche maritime par rapport à la pêche continentale. Nous l'avons évoqué dans le chapitre précédent, l'ouverture de la nouvelle embouchure constitue une aubaine pour les pêcheurs qui pratiquent la pêche maritime. Les statistiques nationales sur la pêche en 2008 révèlent que 17,8% des mises à terre du Sénégal proviennent de la région de Saint-Louis. Ces chiffes attestent du poids de la pêche dans l'économie nationale et de la contribution de la région de Saint- Louis dans le secteur. Elle a généré en 2008 un chiffre d'affaires de 5,6 milliards de FCFA[17]. La pêche constitue, en outre, un important secteur pourvoyeur d'emplois et de revenus pour la population.

Pour ce qui concerne le tourisme, la ville de Saint-Louis est la troisième destination touristique du pays après Dakar et Thiès. Elle a acquis cette place grâce à plusieurs facteurs d'ordre naturel, culturel et historique (plage, parcs nationaux, patrimoine mondial de l'UNESCO). En 2002, le tourisme sur la Langue de Barbarie a généré plus de 1 900 000 euros. Il représente 23, 4 % des recettes de la région. En plus des emplois directs générés,

[17] Situation Economique et Sociale de la région de Saint-Louis, 2008

le tourisme contribue aussi à l'impulsion de multiples activités connexes : la pêche, l'élevage, l'agriculture, le transport, le commerce, l'artisanat. Sur la Langue de Barbarie, les réceptifs touristiques génèrent environ 127 emplois directs (Diop, 2004).

En dépit des enjeux importants, à la suite d'une imposante série de dommages matériels, mais aussi des impacts psychosociaux, avec notamment le traumatisme des populations et la forte médiatisation, des mesures de protection devaient s'avérer opportunes. En revanche, aucun dispositif de réduction et de prévention de catastrophes n'est déployé par les autorités malgré le danger. Face au laxisme de l'Etat et devant l'impuissance de l'institution municipale[18] à faire face au problème de l'érosion côtière à laquelle la Langue de Barbarie est confrontée, les populations tentent d'ériger des sacs de sable pour lutter contre l'aléa. Cependant, les stratégies de réponse pour minimiser les impacts négatifs de l'aléa augmentent les risques.

Les actions entreprises pour atténuer les dégâts consistent à prélever le sable de plage qui est mis en sacs (photo 9.4.a) et qui serviront de digues de protection. Mais ces solutions peuvent-elles freiner les vagues déferlantes ? La photo (9.4.b) montre l'inefficacité de ce système de protection. Ces digues sont emportées par les vagues en cas d'une marée montante. Faute de sensibilisation et d'explication sur les dangers de ces comportements, les populations utilisent généralement ces mêmes pratiques pour se protéger contre l'aléa. La capacité d'adaptation démontre leur vulnérabilité.

Photo 9.4 : a : Prélèvement du sable de plage pour la protection contre l'avancée de la mer[19] b : Inefficacité du système de projection

[18]La somme estimée par le maire de la ville pour protéger les populations est de plus de 25 millions d'euros pour un linéaire côtier de 17 km. Une telle somme ne peut être dépensée par la mairie qui a un budget de 3 millions d'euros.

[19] http://www.saintlouisdusenegal.com/ocean2010-03.php

Les plages sont aussi affectées par l'affaiblissement des réserves de sable. Dans une perspective d'élévation du niveau de la mer ne risque-t-on pas d'assister à l'anéantissement d'une bonne partie de la Langue de Barbarie ?

9.3. Les superficies perdues par une hausse du niveau de la mer

Comme les prévisions comportent une grande part d'incertitude, pour mieux appréhender les risques d'inondation, nous avons fait une simulation progressive par incrémentation de 10 cm en partant du niveau actuel de la mer (0 m) jusqu'à 1 m que nous considérons comme seuil critique. Nous avons pris en compte, d'une part, la ville de Saint-Louis et, d'autre part, le terroir villageois du Gandiolais. Les pertes ont été estimées en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT). La prise en compte de la nouvelle embouchure aurait été souhaitable mais seul un modèle hydrodynamique pourrait le prendre en charge. En revanche, Durand et al. (2010), à partir d'un modèle basé sur un algorithme récursif et sur les données fournies par le MNT, ont estimé l'augmentation du niveau du fleuve liée à une élévation du niveau marin au niveau de l'île.

La méthode que nous avons utilisée pour estimer les surfaces inondées par une hausse du niveau de la mer consiste à faire un reclassement des altitudes du MNT sous le logiciel Arcgis. Il s'agit, à partir des différentes classes d'altitudes de ne conserver que trois classes avec les valeurs minimales et maximales. Entre les trois valeurs, nous ajoutons le niveau actuel (0 m) et la hauteur estimée. Pour tenir en compte du niveau actuel nous avons procédé de la même manière en ne conservant que deux classes. Le logiciel calcule la zone inondée pour chaque hauteur d'eau spécifiée. Cette méthode a l'avantage d'identifier les zones les plus exposées à l'aléa.

La ville de Saint-Louis étant une zone de très faible altitude va être particulièrement sujette aux phénomènes de submersion marine. Les résultats montrent que pour une élévation de 10 cm, 144 ha seront inondés, soit 4% du territoire. Cette superficie inondée est estimée à partir de la surface exondée déduite de celle du plan d'eau (fleuve, océan, marigots) qui correspond à 2135 ha. La figure 9.2 montre une progression régulière des surfaces inondée. Au delà d'une hausse de 90 cm on passe à une superficie importante de 2370 ha qui correspond à une élévation de 1 m représentant 71% du territoire. Seulement 963 ha seront hors d'eau.

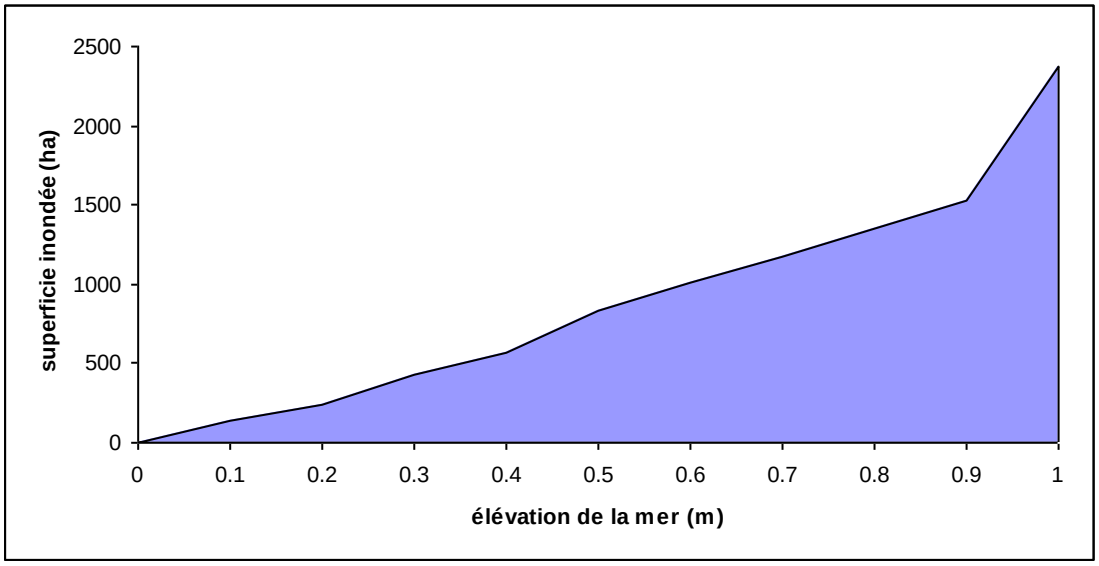


Fig.9.2 : Progression de la surface inondée en fonction du niveau d'élévation de la mer (Saint-Louis)

Au Niveau du Gandiolais les pertes surfaciques sont moins importantes. Pour une élevation de 10 cm, elles ne représentent que 198 ha soit 0,7% du territoire. La figure 9.3 montre une évolution régulière des surfaces inondées jusqu'à 90 cm. A partir de cette hauteur, l'augmentation des zones submergées devient considérable. Elle passe de 1997 ha à 7658 ha correspondant au seuil critique de 1 m, soit 29% de la zone.

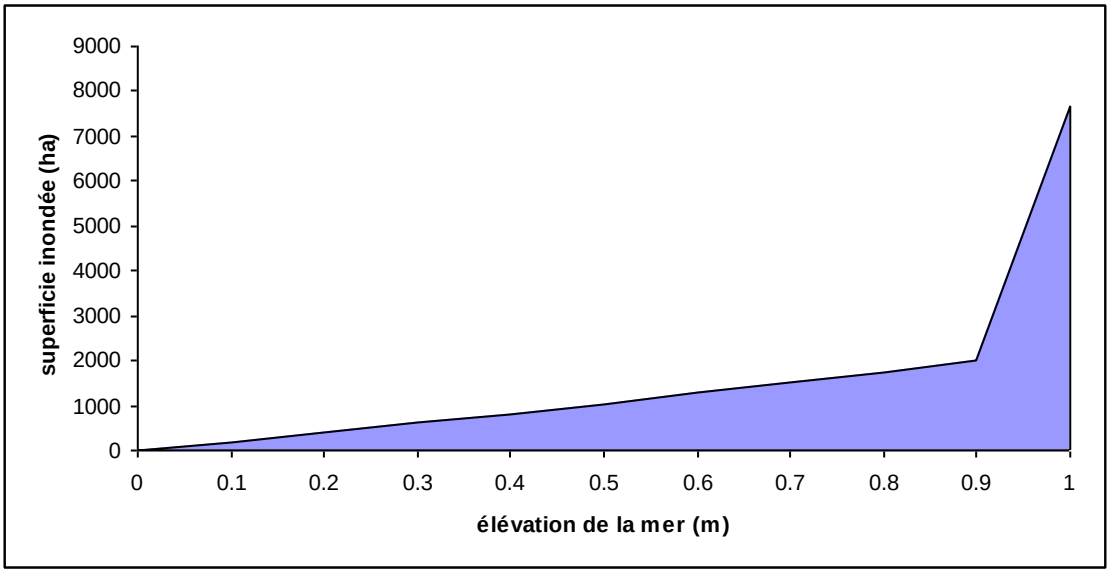


Fig. 9.3 : Progression de la surface inondée en fonction du niveau d'élévation de la mer (Gandiolais)

D'après les prévisions d'Ericson et al. (2006), l'élévation du niveau de la mer atteindrait une hauteur de 0,5 m dans un siècle. Les superficies inondées correspondraient alors respectivement à 836 ha et 1041 ha pour la ville de Saint-Louis et le Gandiolais.

9.4. La prégnance d'une vulnérabilité

L'élévation du niveau des mers pourrait sérieusement aggraver l'érosion, les inondations et les risques de salinisation, avec un risque accru pour le système socio-environnemental au niveau des basses terres côtières (Gornitz, 1991). En effet, les changements climatiques exerceront une pression supplémentaire dans la zone estuarienne qui connaît déjà des modifications notables consécutives aux actions humaines.

La figure 9.4 représente l'évolution probable des zones submergées de la ville de Saint-Louis en fonction des niveaux d'élévation de la mer. Nous remarquons que l'île et la Langue de Barbarie seront moins affectées que le faubourg de Sor. Les pertes surfaciques sont respectivement de 3 ha et 126 ha soit 4% du territoire à une hausse de 1 m. Pourtant, comme nous l'avons évoqué précédemment, la Langue de Barbarie connaît actuellement des phénomènes d'érosion côtière récurrents. Cette situation peut s'expliquer par l'importance des altitudes de plus de 6 m.

In fine, c'est surtout au niveau du faubourg de Sor que les risques d'inondation seront plus importants du fait des basses altitudes. La survenance d'événements extrêmes est de plus en plus déterminée par la coïncidence d'événements hydro-climatiques affectant un environnement modifié par les activités humaines (Bogardi, 2004). Cette entité, (nous l'avons évoqué dans le chapitre 3) connaît une occupation anarchique et les pratiques des populations en matière de construction ne font qu'amplifier les risques de submersion dans le cas d'une élévation du niveau marin. Ce qui démontre que la méconnaissance du risque constitue une source de vulnérabilité.

À une hauteur de submersion de 1 m, 71% de la ville seront sous les eaux. Toute la zone située à l'est de la ville sera particulièrement touchée (fig.9.4).

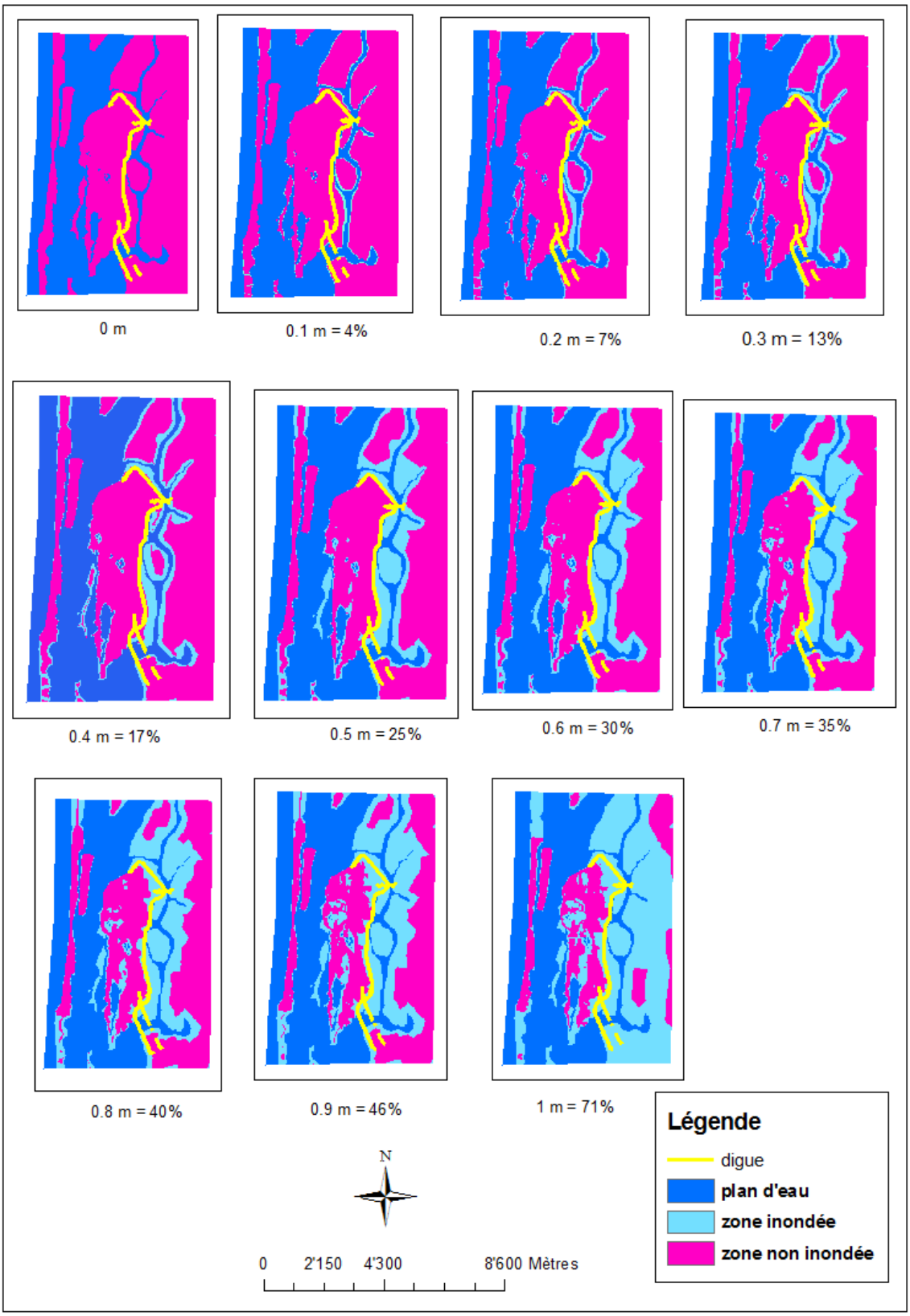


Fig.9.4 : Les zones inondées dans la ville de Saint-Louis en cas d'élévation du niveau de la mer

Nous avons représenté sur la figure 9.4 la digue qui ceinture le marigot de Khor jouxtant les quartiers de Pikine, Ndiolofène, Medina Course et qui n'a pas été prise en compte dans le MNT. Elle jouera son rôle à partir d'une hauteur de submersion de 80 cm (fig.9.4). La figure montre qu'à partir d'une hausse du niveau de la mer de 10 à 70 cm, la zone ceinturée par la digue ne connaît pas de submersion. Par contre le quartier de Khor situé à l'est de la digue sera complètement sous les eaux à une hauteur de 70 cm. Il compte une population de 4106 habitants lors du dernier recensement de 2004. Cette submersion constitue une sérieuse menace pour la ville de Saint-Louis étant donné que l'usine de traitement des eaux, le service des travaux publics, la principale caserne de la gendarmerie nationale sont localisés au niveau de ce quartier.

La figure 9.5 (a) montre la relation linéaire entre l'élévation du niveau de la mer (de 0 à 90 cm) et le taux de superficies de terres submergées. Au-delà de 90 cm, il y a un décrochement (b) qui s'explique par une submersion plus importante de la zone qui se trouve dans la partie Est de la ville.

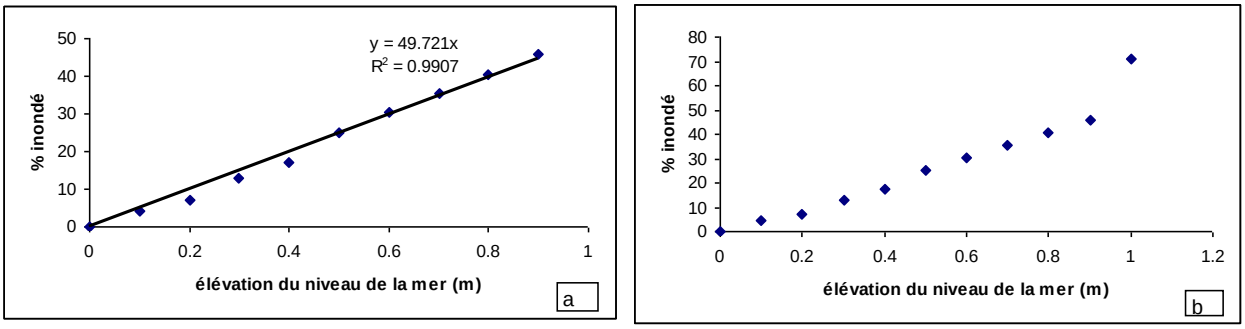


Fig. 9.5 : Relation entre terres submergées et élévation du niveau de la mer (Saint-Louis)

Dans cette zone, l'élévation du niveau de la mer va augmenter de façon considérable la remontée des eaux au niveau du marigot de Khor qui est ceinturé par la digue.

La hausse du niveau de la mer dans le secteur du Gandiolais inonderait une grande partie des terres de faible élévation, provoquant des dommages aux cultures maraîchères. Elle constitue une sérieuse menace pour le système socio-environnemental. Elle aura des conséquences importantes aussi bien sur le plan géomorphologique que socio-économique. En l'état actuel, la mangrove connaît une dégradation progressive suite à la mise en eau du barrage de Diama et de l'ouverture de la nouvelle embouchure. De même les surfaces de l'îlot aux oiseaux et de l'île de Doun Baba Dièye connaissent une réduction significative.

A une hausse de 10 cm, la superficie inondée ne représente que 0,7% soit 198 ha. C'est à partir d'une hauteur de submersion de 70 cm que l'île de Doun Baba Dièye dont la superficie a régressé de 8% entre 2003 et 2007 connaîtra une régression supplémentaire de 44 %, soit une superficie qui passera de 236 à 131 ha. Toutefois, vu la dynamique qui sévit sur cet

espace la superficie perdue sera beaucoup plus importante. Les populations de Doun Baba Dièye vivent déjà dans la hantise de voir le peu de terres restantes emportées par les fortes vagues au niveau de la nouvelle embouchure.

De même cette élévation du niveau marin provoquera une submersion de 19% de la mangrove et 50% de l'îlot aux oiseaux au niveau du Parc National de la langue de Barbarie. Ces mêmes modifications affecteront également la recharge de la nappe du Gandiolais qui se fera par l'intermédiaire des eaux marines favorisant ainsi la remontée du biseau salé.

L'augmentation du niveau de la mer à un seuil critique de 1 m submergera toute l'île de Doun Baba Dièye, la mangrove et les villages situés au nord du littoral. Ces derniers connaîtront une perte surfacique de plus de 3000 ha, soit 39% de la superficie totale inondée (7658 ha). La figure 9.6 représente l'évolution des zones inondées en fonction de l'élévation du niveau de la mer dans le Gandiolais.

Fig.9.6 : Les zones inondées dans le Gandiolais en cas d'élévation du niveau de la mer

Cette hausse du niveau marin se traduit par :

- une perte de terres cultivables ;
- une diminution de la productivité ;
- une baisse de rendement des activités de maraîchage ;
- une accentuation de la salinisation des eaux de surface, des aquifères et des sols ;
- une baisse généralisée de la fertilité des sols.

La figure 9.7 (a) montre la relation linéaire entre les terres submergées et l'élévation du niveau de la mer dans le Gandiolais. Comme celle de Saint-Louis, à une hausse de 1 m, il y a un décrochement (b) qui montre une submersion plus importante qui concerne comme nous l'avons évoqué plus haut la mangrove, l'île de Doun Baba Diagne et les villages situés au nord.

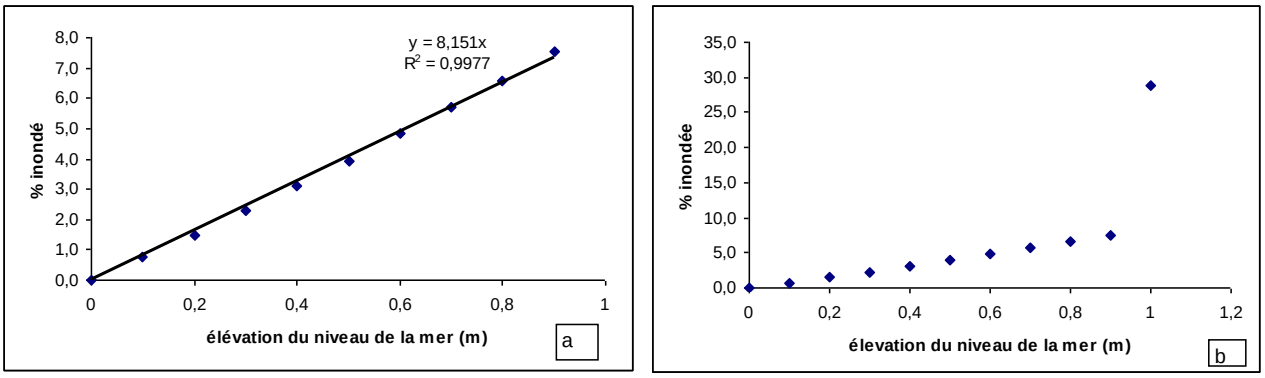


Fig. 9.7 : Relation entre terres submergées et élévation du niveau de la mer (Gandiolais)

Les estuaires sont le siège de fortes variations des conditions environnementales (débit, salinité…) et subissent des pressions anthropiques agissant sur la répartition des espèces halieutiques. La hausse du niveau marin devrait conduire à des modifications des peuplements ichthyologiques avec la disparition mais également l'apparition de certaines espèces qui résistent à la salinité.

En outre, les prévisions sur l'évolution du climat au Sahel sont favorables à une continuité de la sécheresse. Cette dernière pourrait aggraver les conséquences de l'élévation du niveau de la mer avec une diminution plus importante des précipitations. Cette situation devrait également se traduire par des modifications du fonctionnement hydrologique de l'estuaire. Toutefois, ces changements ne sont pas faciles à prédire compte tenu de l'artificialisation du cours d'eau et de la complexité du réseau hydrographique.

Bien que l'estuaire ne connaisse pas des phénomènes de surcotes, l'augmentation du niveau de la mer pourrait y avoir un impact avec l'influence des facteurs météorologiques. Si

un pic de tempête coïncide avec une marée haute, toutes les zones basses de l'estuaire seront submergées. Actuellement la pénétration de plus en plus importante de la marée dans l'estuaire se manifeste principalement par un abaissement des niveaux du plan d'eau mais une hausse du niveau de la mer entraînera des hauteurs beaucoup plus importantes. Nous avons représenté sur le tableau 9.1 l'évolution du niveau du fleuve à la station de Saint-Louis en fonction des estimations par rapport au zéro hydrographique (-0,53 m IGN).

Tableau 9.1 : Evolution du niveau fleuve à la station de Saint-Louis en fonction de l'élévation du niveau de la mer

élévation du niveau de la mer (m)	hauteur d'eau (m)
0	-0.53
0.1	-0.43
0.2	-0.33
0.3	-0.23
0.4	-0.13
0.5	-0.03
0.6	0.07
0.7	0.17
0.8	0.27
0.9	0.37
1	0.47

L'évolution future du système socio-environnemental au niveau des deux entités de l'estuaire montre que la vulnérabilité va s'aggraver. Elle représente une nouvelle source de stress. Par ailleurs la méthode adoptée comporte quelques limites. La Langue de Barbarie qui connaît actuellement des phénomènes d'érosion côtière, même si les altitudes sont plus importantes par rapport au reste de la ville, n'a pas enregistré des pertes surfaciques importantes. Bien qu'on n'ait pas utilisé la même méthode, les simulations de Durand et al (2010) qui sont basées sur les hauteurs d'eau potentielles en fin de saison des pluies, réalisées en fonction de plusieurs prévisions d'élévation du niveau marin, montrent qu'une hausse du niveau de la mer de 0,5 m suffirait pour que l'île soit inondée lors des plus hautes eaux annuelles, et qu'elle serait presque totalement submergée en cas d'une hausse de 1 m. Le problème réside dans la reclassification des altitudes, les valeurs minimales et maximales doivent être conservées pour prendre en compte l'évolution de l'espace en fonction des différentes estimations. Un modèle hydrodynamique devrait permettre de lever ces contraintes.

9.5. Discussion sur la gestion des risques naturels dans l'estuaire du fleuve Sénégal

Nous avons vu que les caractéristiques géomorphologiques de l'estuaire prédisposent le milieu à une accumulation des eaux en période d'hivernage. L'absence de planification a également aggravé les risques d'inondation, sans compter que les populations n'ont pas une culture du risque. De plus l'urbanisation anarchique qui accentue l'imperméabilité des sols ne s'accompagne pas généralement de système de drainage des eaux pluviales qui augmente par ailleurs la durée de stagnation des eaux au niveau des zones basses. Malgré la création de la commission de lutte contre les inondations à Saint-Louis qui met en place des mesures sécuritaires en période de pré-hivernage afin de limiter les dommages, la construction de digues et le relèvement des quais, le problème demeure. D'un autre côté l'érosion côtière au niveau de la Langue de Barbarie relève des pressions anthropiques et d'un manque d'assistance de la municipalité. Ces problèmes sont révélateurs de l'effort qui reste à fournir pour accroître la capacité de gestion urbaine de la municipalité. Cette dernière n'arrive pas encore à accroître la productivité urbaine par le développement des services urbains et des équipements collectifs. Les responsabilités dans la gestion des risques sont partagées entre les populations et les pouvoirs publics.

Un ensemble intégré de mesures est nécessaire pour résoudre les problèmes d'inondation et d'érosion côtière au niveau de l'estuaire. La gestion des risques naturels doit être un engagement de toutes les parties impliquées (la municipalité, les populations, les services techniques de l'Etat, …). Concrètement, il faudra que chaque acteur prenne ses responsabilités, l'Etat et la municipalité en premiers. Ces derniers doivent être les moteurs du processus de prise en charge des problèmes que connaît la zone estuarienne par la définition de plans de gestion qui intègrent, outre les mesures à prendre, les modalités de participation des autres acteurs concernés ainsi que les moyens de pérenniser les acquis. Une des premières actions devrait être la définition d'un plan d'urbanisation qui prenne en compte les spécificités du milieu. En zone inondable, l'urbanisation devrait être réduite autant que faire se peut (Ledoux, 2006) et s'il le faut même, il faudra déplacer des populations. Cela reste, bien sûr, une mesure extrême. Mais il est nécessaire que chacun comprenne que des solutions drastiques sont parfois nécessaires pour éviter que le même problème se reproduise infiniment et coûte chaque fois plus cher à la communauté en termes de perte matérielle et de moyens investis pour des résultats très mitigés. Ensuite, il faudra qu'une action de sensibilisation efficace soit conduite en direction des populations pour une explication des dangers liés aux aléas et à l'impact de leurs comportements sur l'écosystème. La meilleure manière de réussir cette sensibilisation reste, à notre avis, de faire de ces populations les acteurs même de préservation de leur écosystème. Il s'agit de développer chez ces populations la culture du risque.

Dans l'optique de la fermeture de la nouvelle embouchure telle que nous l'avons proposée dans le chapitre précédent, la lutte contre les inondations causées par les crues du fleuve Sénégal dans la ville Saint-Louis devrait également faire partie d'une gestion intégrée des ressources en eau (GIRE). Elle devrait être fondée sur une politique claire et objective étayée par une législation et une réglementation mais également mise en œuvre par des structures opérationnelles adaptées (bien organisées, personnels qualifiés suffisants, moyens techniques et financiers adéquats). La démarche devrait être ouverte, transparente, globale et communicante, comprendre la décentralisation de la prise de décisions et inclure la consultation du public et la participation des parties prenantes aux processus de planification et de mise en œuvre (OMM, 2009). Le scénario que nous proposons ne peut s'envisager que dans ce cadre. Tout d'abord il faut préciser le contexte dans lequel s'intègre le scénario que nous proposons :

- la ville de Saint-Louis est confrontée à deux types d'inondation que nous avons abordés dans les chapitres précédents :
    - ✓ une inondation pluviale pour laquelle nous avons formulé des propositions précédemment ;
    - ✓ une inondation fluviale qui intervient à 1,75 m de hauteur ou 1,20 m dans certains secteurs
- la complexité du réseau hydrographique estuarien anthropisé

La gestion des inondations doit renforcer les moyens d'existence des ruraux en maximisant l'utilisation des plaines inondables (Saalmueller, 2009). C'est dans ce contexte que nous proposons le scénario qui suit afin de lutter contre les inondations fluviales dans la ville de Saint-Louis.

Le canal du Gandiolais dont nous avons fait la description dans le chapitre précédent, et qui n'est pas encore fonctionnel, pourrait jouer un rôle décisif dans la gestion des crues dans la partie estuarienne.

Pour rappel le canal du Gandiolais est dimensionné pour transférer un volume de 9.396 000 m^3 vers la vallée du Gandiolais pour une superficie irrigable de 1175 ha. Le seuil critique pour qu'une inondation se produise à Saint-louis est un débit de plus de 1500 m^3/s évacué par le barrage de Diama. Or pour empêcher cette inondation et permettre en même temps la recharge des nappes du Gandiolais par la crue, il faudrait transférer un certain volume lâché par le barrage de Diama vers le Gandiolais via le canal du même nom. A l'état actuel ce volume ne peut être déterminé avec précision étant donné l'absence de jaugeage à cause du coin salé et d'une absence de modélisation hydrodynamique de l'estuaire.

Si le volume est inférieur ou égal à celui prévu par le canal du Gandiolais qui est de 9 396 000 m^3, alors on peut envisager d'adjoindre au canal la fonction de réguler les crues pour protéger Saint-Louis.

Par contre si le volume à transférer est supérieur à celui du canal, il faudrait envisager la possibilité de recalibrer ce dernier pour lui faire jouer cette nouvelle fonction.

Ce scénario comporte des avantages mais aussi des incertitudes :
Les avantages :

- préserver Saint-Louis contre les débordements fluviaux ;
- renforcer les objectifs du canal notamment celui qui vise à lutter contre la salinisation des terres du Gandiolais ;
- préserver les écosystèmes naturels.

Les incertitudes autour de la mise en œuvre du scénario sont relatives à :

- la faisabilité du redimensionnement du canal au cas où le volume à transférer est supérieur à celui du canal ;
- l'existence ou non d'une zone d'épandage dans la zone du Gandiolais suffisamment large pour accueillir le surplus d'eau au cas où le volume à transférer est supérieur à la capacité de la zone du canal.

Par ailleurs, du fait de leur faiblesse économique, les pays de la sous-région ont souvent des difficultés à mobiliser de façon isolée les ressources dont ils ont besoin pour développer, mettre en valeur leurs ressources et se prémunir contre les risques climatiques. Devant les perspectives d'amplification des perturbations climatiques, différentes initiatives sont en train d'être prises. Au niveau national, les Etats sont engagés dans des processus de formulation de mesures d'adaptation à court terme (avec les Plans d'Action Nationaux d'Adaptation) et à moyen et long terme (avec les Communications Nationales sur les Changements Climatiques). Au plan régional, avec la multiplication d'initiatives diverses telles le dialogue régional eau et changement climatique (animé par l'UICN, le CILSS et le GWP) ou l'initiative CILSS-CEA-ACMAD en cours visant l'élaboration d'un Plan d'Action Sous-Régional de Réduction de la Vulnérabilité de l'Afrique de l'Ouest au changement climatique ou encore l'initiative Banque Mondiale-UICN-CILSS-GWP de formulation d'une stratégie régionale d'adaptation au changement climatique en Afrique de l'Ouest avec un focus sur les bassins des fleuves Niger et Sénégal (Niasse, 2007). L'approche prospective de l'élévation du niveau de la mer contribue à mieux cerner la vulnérabilité du système. Ces facteurs externes sont des éléments essentiels pour une planification urgente, une réponse immédiate, la mise en œuvre de mesures d'atténuation à long terme pour prévenir les catastrophes, une approche qui peut s'avérer efficace pour réduire la vulnérabilité du système socio-environnemental.

Conclusion

La méthode adoptée a permis d'estimer les pertes surfaciques dans la ville de Saint-Louis et le terroir villageois du Gandiolais. Nous avons pu montrer la forte extension spatiale de la

submersion en faisant monter le niveau de la mer par une incrémentation de 10 cm. Toutefois, ces estimations doivent être considérées comme préliminaires dans la mesure où nous n'avons pas pris en compte la nouvelle embouchure. Seule un modèle hydrodynamique pourrait le prendre en compte. Les changements climatiques sont une menace qui pèse sur toute la planète; seule une réponse concertée entre les pays, les institutions, les secteurs pourra en venir à bout. Cette réponse doit comprendre des mesures d'adaptation pour renforcer la résilience des systèmes naturels et humains. Le Sénégal, à l'instar d'autres pays, a un rôle à jouer dans l'adaptation et la mitigation aux changements climatiques.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

En entreprenant cette recherche nous nous étions fixés comme ambition de contribuer à mettre en évidence les rapports conflictuels entre homme et nature dans un contexte de vulnérabilité du système socio-environnemental de l'estuaire du fleuve Sénégal. Etudier cette relation s'est révélée d'un intérêt certain dans la mesure où elle nous a permis d'analyser les différentes méthodes de gestion du risque qui, en définitive, renforcent la vulnérabilité du système socio-environnemental du fait notamment de l'absence de perception du risque.

Si les Etats riverains du fleuve ont su apporter les réponses réactives et spontanées à la sécheresse des années 70 pour atténuer la vulnérabilité des populations du bassin du fleuve aux aléas hydro-climatiques, l'urgence de la situation en 2003 a poussé l'Etat du Sénégal à prendre des mesures rapides sans consulter les autres Etats concernés. Pour autant, chaque pays s'est aussi engagé à obtenir l'accord préalable des autres avant d'entreprendre tout développement susceptible de modifier significativement l'hydrosystème et l'environnement du fleuve (OMVS et al. 2007). Il faut dire que l'ouverture du canal de délestage était envisagée comme une solution provisoire pour lutter contre des débordements fluviaux.

Etant donné qu'aucune méthode n'a fait l'objet d'un consensus pour estimer la vulnérabilité, nous avons proposé une méthodologie d'analyse de la vulnérabilité spécifique au contexte local qui s'est appuyée sur plusieurs outils en l'occurrence les SIG, la télédétection, la méthode de détection de rupture, l'analyse fréquentielle, les enquêtes et l'utilisation du concept DPSIR. Cette démarche s'appuie sur un ensemble d'éléments analytiques dont la combinaison permet de démêler les facteurs qui fragilisent le système. Elle a l'avantage :

- de mettre en évidence la vulnérabilité du milieu ;
- de mesurer les niveaux de vulnérabilité du système socio-environnemental à l'avancée du biseau salé ;
- d'étudier les modifications climatiques sur une série chronologique ;
- d'étudier l'occurrence des événements hydrologiques extrêmes
- de mettre en évidence les impacts des aménagements sur les activités socio-économiques ;
- d'identifier les zones les plus exposées à une hausse probable du niveau de la mer
- d'analyser les forces motrices, les pressions, l'état de l'environnement, les impacts socio-économiques et écologiques et de proposer des stratégies d'adaptation qui visent à améliorer la résilience du système socio-environnemental. Elles peuvent être développées par les structures étatiques, organisationnelles et par la population concernée.

De fait, même si la démarche est appliquée à un secteur spécifique caractérisé par une forte variabilité climatique, les différents outils peuvent être transposables dans différents domaines d'études abordant la question de la vulnérabilité, de la gestion des risques, etc.

L'étude a montré que l'estuaire du fleuve Sénégal apparaît, dans sa configuration, comme un milieu où les risques d'inondation sont inhérents à ses caractères naturels. C'est un milieu caractérisé par une forte vulnérabilité qui fait qu'il devient sensible à tout agent perturbateur qu'il soit endogène ou exogène. De même, les comportements des populations renforcent cette vulnérabilité. L'extension spatiale de la ville dans les zones inondables suite à la sécheresse des années 70 s'est accompagnée d'une réduction du champ d'expansion du fleuve qui fait que les inondations perdurent dans la cité. De surcroît, les autorités n'ont pas réussi à contrôler cette urbanisation, encore moins la devancer en faisant des aménagements dans les zones basses. Un retard dans la planification, l'absence d'anticipation et de manque de rigueur dans la gestion urbaine entraînent toujours une dynamique incontrôlable, faisant fi des normes urbaines les plus élémentaires. Cette absence de culture du risque tant au niveau institutionnel qu'à celui des individus dans ce milieu est un facteur aggravant dans la gestion des aléas hydro-climatiques. Elle a conduit à des actions irréversibles qui font que le système reste toujours dans une position de vulnérabilité. Même s'il y a un effort à réaliser au plan des aménagements structurels (digue, relèvement des quais), on constate un important déficit de gestion, de moyens. Le système d'assainissement est vétuste et obsolète, les plans d'occupation des sols sont pratiquement inexistants.

En outre, même si le contexte climatique est plus humide depuis les années 90, l'absence de rupture dans les séries chronologiques montre que la sécheresse à laquelle le Sahel est confronté depuis les années 70 se poursuit. Les séquences humides de ces dernières années ne sont en fait que des anomalies détectées dans cette séquence sèche de la variabilité climatique qui est de rigueur au Sahel. Les inondations fluviales se produisent au-delà d'un certain seuil (1600 m^3/s). Mais le risque augmente du fait de la vulnérabilité, conséquence d'un déficit de planification, d'aménagement et de gestion urbains. Aussi, même si le barrage de Diama n'a pas pour vocation de laminer les crues du fleuve, les inondations à Saint-Louis ne sont pas dues à cet ouvrage. Le fleuve fonctionne à l'état naturel en période de crue, il peut même arriver que le niveau maximum d'ouverture des paliers des vannes ne soit pas atteint, ce qui signifie que l'ouvrage arrive souvent à atténuer les risques d'inondation au niveau de l'estuaire.

La marginalisation du secteur périurbain dans la gestion des risques d'inondation de la ville de Saint-Louis est à l'origine d'importants dégâts dans le bas estuaire. La perturbation des échanges entre les eaux fluviales et marines et l'évolution lagunaire de l'ancienne embouchure ont entraîné une salinisation de la nappe, plus de 35 g/l dans certains secteurs du Gandiolais. Ce phénomène a favorisé une expansion des marais salants et un départ massif de la population. Bien que les mesures de salinité réalisées n'aient pas permis un suivi régulier, les données obtenues relèvent malgré tout, une réelle avancée du biseau salé du littoral vers l'intérieur des terres. Les contraintes environnementales telles que l'érosion, la baisse de fertilité des sols, la mortalité végétale et le déclin de l'économie des terroirs qui se révèlent au bout de quelques décennies de développement, participent à une tendance

qui s'explique logiquement par le manque de pertinence des choix d'aménagement qui sont opérés sans une bonne connaissance des dynamiques écologiques des environnements concernés (Diop et Konaté, 2007). Les politiques de gestion ne doivent pas occulter la fragilité du milieu estuarien. Les importantes potentialités du site constituent un moyen de subsistance pour les populations du Gandiolais d'une part et d'autre part font que le milieu est très favorable à la vie végétale et animale. La délocalisation de l'embouchure n'a pas été judicieuse et met en évidence une inadéquation entre la gestion des risques et les réalités socio-économiques.

Si les concepteurs de la brèche avaient eu une connaissance suffisante des conséquences néfastes de cette ouverture, ils auraient évidemment cherché d'autres moyens pour lutter contre les inondations de la ville de Saint-Louis. L'ouverture de la brèche a certes contribué à résoudre les débordements fluviaux mais les inondations pluviales perdurent dans la localité saint-louisienne. Aussi, la question de la pertinence d'une telle réalisation pour régler le phénomène des inondations reste-t-elle posée. Le rapprochement de l'embouchure a augmenté les risques de submersion alors que l'on sait que les risques liés à l'eau de mer sont parmi les plus meurtriers dans le monde (Reghauld et al. 2004). Aussi, l'importance des choix politiques peut avoir de lourdes conséquences irréversibles. Les actions anthropiques sont aujourd'hui prépondérantes dans l'accélération des processus d'évolution de l'estuaire.

L'approche prospective de l'élévation du niveau de la mer a surtout permis d'évaluer les superficies pouvant être submergées pour différentes hauteurs de niveau marin. Elles correspondent aux zones basses qui font l'objet d'une occupation anarchique. Ainsi la boucle de rétroaction positive entre les actions anthropiques et l'élévation du niveau marin aggrave d'une manière paroxystique la vulnérabilité du système socio-environnemental dans l'estuaire du fleuve Sénégal.

Ce travail se veut une contribution à la gestion des risques hydro-climatiques pour les différents acteurs en charge de la gestion des risques dans la zone estuarienne. Nous avons étudié les différentes interactions entre facteurs de risque et de vulnérabilité et créé un ensemble de données qui peut être intégré au sein d'un SIG, proposer un ensemble de mesures d'atténuation en vue d'augmenter la résilience du système socio-environnemental. La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) nous paraît être une approche pertinente pour inspirer des stratégies d'adaptation destinées à réduire la vulnérabilité du système.

Les principales limites révélées par ce travail résident dans le fait qu'aucun des outils utilisés ne prend en compte la complexité au sens hydrodynamique du milieu estuarien notamment la modélisation des écoulements en 2D. En l'absence de jaugeage à cause du coin salé, en connaissant les débits entrants à partir du barrage de Diama, une modélisation hydrodynamique aurait permis d'estimer les flux d'eau sortants au niveau de l'embouchure, d'évaluer le débit stocké entre le barrage et l'embouchure et de quantifier le volume de sédiments déposé par le fleuve au niveau de la nouvelle embouchure.

Aussi cette étude sur la vulnérabilité du système socio-environnemental ne saurait se terminer par une note définitive. Elle constitue plutôt un tremplin vers des réflexions plus fécondes. En plus de ce qui est mentionné précédemment nous avons soulevé des questions relatives aux processus d'échange entre la nappe et le fleuve, à la prise en compte de la nouvelle embouchure dans l'approche prospective de l'élévation du niveau de la mer. Pour tenir en compte de la complexité de l'estuaire du fleuve Sénégal, les logiciels plus complexes (2D du type Mike 21) pourraient prendre en compte l'hydrodynamique de l'estuaire. Le scénario pour protéger Saint-Louis des inondations fluviales, propose une esquisse encore incomplète qui s'intègre dans la recherche de solutions pour la gestion intégrée des crues. Il devrait, dans une phase ultérieure, être complété par une étude plus approfondie pour sa validation et pour la faisabilité de sa mise en œuvre.

Références bibliographiques

Adams A. 2000 : Fleuve Sénégal: gestion de la crue et avenir de la vallée. Publ. IIED, 28 p

Adger W. N. 1999: Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam. *World Development*, 27 (2), pp. 249-269.

Adger W. N. 2006: Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16, pp. 268-281

Adger W.N., Hughes T.P., Folke C. et al. 2005: Social-ecological resilience to coastal disasters. *Science*, 309, pp 1036-1039

ADVT 2007 : Projet de valorisation du sel de Toubé, 26 p

Altinbilek D. 2002: The role of dams in development. *Water Science and Technology*, vol. 45 n° 8 pp 169-180

AMMA 2002 : La mousson ouest africaine et ses composantes, 69 p http://amma.mediasfrance.org/france/livre_blanc.pdf

ANCAR 2005 : Programme d'appui pour l'amélioration de la production de sel dans la communauté rurale de Gandon, 18 p

Anctil F., 2008 : L'eau et ses enjeux. Ed. De Boeck, 228 p

Andre P., Delisle C.E., Reveret J.P, 2003 : L'évaluation des impacts sur l'environnement. Processus, acteurs et pratique pour un développement durable. 2ème éd. Presses internationales Polytechnique, 519 p

Arthurton R., Le Tissier M., SnoussI M., and al., 2008: AfriCat LOICZ - Global Change Assessment and Synthesis of River Catchment - Coastal Sea Interactions and Human Dimensions in Africa, LOICZ Reports and Studies n°. 30, LOICZ IPO, Geesthacht, Germany 122 p

Ayers R.S and Westcot D.W. 1976: Water quality for agriculture. Irrigation and drainage paper, 29, FAO, Rome, 97 p

Ba C.O., Ndiaye A.I., 2008 : L'émigration clandestine sénégalaise. *Revue Asylon(s),* 3 Migrations et Sénégal., url de référence: http://www.reseau-terra.eu/article717.html

Bâ K., Wade S., Niang I., Trébossen H., Rudant J.P. 2007 : 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. *Revue Télédétection*, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 129-141

Bader J.C. 1997 : Le soutien de crue mobile dans le Fleuve Sénégal, à partir du barrage de Manantali. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 42(6), p 815-831

Bader J.C., Lamagat J.P., Guigen N., 2003 : Gestion du barrage de Manantali sur le fleuve Sénégal : analyse quantitative d'un conflit d'objectifs. *Hydrological Sciences Journal*, vol.48 (4) pp 525-538

Baron-Yelles N., Goeldner-Gianella L., Velut S., Ghirardi R., 2002 : Le littoral - Regards, pratiques et savoirs, Ed. Presses de l'Ecole normale supérieure, 384 p

Barusseau J.P., Descamps C., Diouf B., Kane A., Saos J.L., 1993 : Processus hydro et morphosédimentaires et stabilité de la façade du delta. In (MICHEL P., BARUSSEAU J.P., RICHARD J.-F., SALL M., Eds) L'après-barrage dans la vallée du Sénégal. Modifications hydro-dynamiques et sédimentologiques. Conséquences sur le milieu et les aménagements agricoles. Résultats des travaux du projet CAMPUS 1989-1992. Presses Universitaires de Perpignan, p. 83 - 99.

Barusseau. J. P., Ba M., Descamps C., Diop S., Diouf B., Kane A., Saos J. L. and Soumare A. 1998: Morphological and sedimentological changes in the river estuary after the construction of Diama dam. *Journal of African Earth Sciences*, vol. 26. n° 2, pp. 317-326

Beck U. 2001 : La Société du risque. Sur la voie d'une autre modernité Ed. Flammarion, 522 pages

Belliveau S., Smit B., Bradshaw B. 2006 : Multiple exposures and dynamic vulnerability : evidence from the grape industry in the Okanagan Valley, Canada. *Global Environmental Change*, 16, pp.364-378.

Bendjoudi H. et Hubert P. 1998 : A propos de la statistique des cumuls pluviométriques annuels. Faut-il en faire avec la normalité. *Revue des sciences de l'eau* n°4, p 617-630

Berkes F. 2007: Understanding uncertainty and reducing vulnerability: lessons from resilience thinking. *Nat Hazards*, 41, pp 283–295

Bethemont J. 2002 : Les grands fleuves, entre nature et société. 2ème édition A. Colin, 255 p

Blaikie P., Cannon T., Davis I., Wisner B., 1994: At risk: natural Hazards, People's Vulnerability, and disasters. Routledge, London, 284 p.

Bogardi J.J. 2004: Hazards, risks and vulnerabilities in a changing environment: the unexpected onslaught on human security? *Global Environmental Change*, 14 pp 361–365

Bois P. 1971 : Une méthode de contrôle de séries chronologiques utilisées en climatologie et en hydrologie. Publication du Laboratoire de Mécanique des Fluides : Université de Grenoble, 30 p

Bois P. 1986: Contrôle de séries chronologiques corrélées par étude du cumul des résidus de la corrélation. Deuxièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM, pp 89-100

Bonnardel R. 1992: Saint-Louis du Sénégal : mort ou naissance ? Ed. L'Harmattan, 423 p

Bouvy M., Arfi R., et al. 2010 : Estuarine microbial community characteristics as indicators of human-induced changes (Senegal River, West Africa). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 87 pp 573-582

Bradley D. and Grainger A. 2004: Social resilience as a controlling influence on desertification in Senegal. *Land degradation and development*, 15, pp 451-470

Brooks N. 2003: Vulnerability, risk and adaptation: a conceptual framework. Tyndall Centre for Climate Change Research, Working Paper 38, 16 p.

Brooks N., Adger W.N., Kelly P.M. 2005 : The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation. *Global Environmental Change*, 15, pp. 151-163.

Brunet-Moret 1970 : Etude hydrologique en Casamance. Rapp. Multigr. ORSTOM, Paris, 52 p

Buishand T.A., 1982: Some methods for testind the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, vol. 58, pp 11-27

Buishand T.A., 1984: Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, vol. 58, pp 51-69

Capo S., Sottolichio A., Brenon I., Castaing P., Ferry L. 2006: Morphology, hydrography and sediment dynamics in a mangrove estuary: The Konkoure Estuary, Guinea. *Marine Geology*, 230 pp 199–215

Carreno R., 1994 : Risques naturels et développement urbain dans la ville andine de Cusco, Pérou. In *Revue de géographie alpine*, 82, 4, pp 27-43

Cecchi P., 1992 : Phytoplancton et conditions de milieu dans l'estuaire du fleuve sénégal : Effets du barrage de Diama. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, 437 p

Chaline C., Dubois-Maury J., 1994 : La ville et ses dangers : prévention et gestion des risques naturels, sociaux et technologiques. Ed. Masson, 247 p

Chevillon C. 1995 : Texture, Granulométrie et composition bioclastique des sédiments actuels de l'atoll d'Ouvéa (Iles Loyauté, Nouvelle-Calédonie). In Richer de Forge B. (ed.), Les fonds meubles des lagons de Nouvelle-Calédonie (Sédimentologie, benthos). Etudes et Thèses, vol 2, ORSTOM, pp 7-43

Coly A., 1996 : Le système fluvio-lacustre du Guiers : étude hydrologique et gestion quantitative intégrée. Thèse de doctorat 3è cycle de Géographie, UCAD, 320 p + annexes.

Comfort L., Wisner B., Cutter S. and al. 1999: Reframing disaster policy: the global evolution of vulnerable communities. *Environmental Hazards*, 1, pp. 39-44.

Cooper J.A.G. 2002: The role of extreme floods in estuary-coastal behaviour: contrasts between river- and tide-dominated microtidal estuaries. *Sedimentary Geology*, 150, pp 123–137

COSEC, SOGREAH, AFID 2002 : Étude de l'accessibilité et de l'implantation du port de Saint-Louis. Rapport SOGREAH-ELC-712064 CR, 18 p,

Costanza R. d'Arge R., de Groot R. and al. 1997: The values of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, vol 387, pp 253-260

Coyne et Bellier, Sogreah, 1987. Consignes générales d'exploitation et d'entretien du barrage de Diama, 21 p

Cutter S.L., 1996: Vulnerability to environmental hazrds. *Progresse in Human Geography*, 20, 4, pp 529-539

Cutter S.L., Boruff B.R., Shirley W.L. 2003 : Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84, 2, pp. 242-261

Dai A., Lamb P. J., Trenberth K. E., Hulme M., Jones P.D., and Xie P. 2004: The recent Sahel drought is real. *International Journal of Climatology*, vol. 24, pp 1323–1331

Dasgupta S., Laplante B., Meisner C., Wheeler D., Yan J. 2009: The impact of sea level rise on developing countries: a comparative analysis. *Climatic Change*, 93, pp 379-388

Dauphine A. 2003 : Risques et catastrophes : observer, spatialiser, comprendre, gérer. Ed. Armand Colin, 288 p

Dauphine A., Provitolo D., 2004 : Résilience, risque et SIG. http://www.univ-mer.com/docs/doc-pdf/resilience.pdf

Dauphine A. 2005 : Risques et catastrophes. Observer, spatialiser, comprendre, gérer. Ed Armand Colin, 288 p

D'Ercole R. 1994 : Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologies, modes d'analyse. *Revue de Géographie Alpine*, 4, pp. 87-96.

D'Ercole R., Gluski P., Hardy S. et Sierra A., 2009 : Vulnérabilité dans les pays sud. Présentation du dossier. *Cybergeo : European Journal of Geography*, [En ligne], Dossiers, Vulnérabilités urbaines au sud. URL : http://cybergeo.revues.org/index22151.html

Decamps H. et Mathieu N. 2005 : Événements extrêmes : retours d'expérience. *Natures Sciences Sociétés*, 13, pp 369-370

Decamps H. 2007 : La vulnérabilité des systèmes socio-écologiques aux événements extrêmes : exposition, sensibilité, résilience. *Natures Sciences Sociétés*, 15, pp 48-52

Descola P. 2005 : Par-delà nature et culture. Ed. Gallimard, 623 p.

Dia A.M., 2000 : Ecoulement et inondations dans l'estuaire du fleuve Sénégal : le cas de la ville côtière de Saint-Louis, mémoire de DEA, Université Cheikh Anta Diop, 65p

Diakhaté M. 1986 : Le barrage de Diama : essai sur l'évaluation de ses impacts potentiels. *Revue de Géographie de Lyon*, vol.61, n°1, p 43-61

Diallo M., 2005. Etude de la baisse du niveau de la nappe dans les Niayes du Gandiolais. Mémoire de Maîtrise, Université G. Berger, U.F.R. Lettres et Sciences Humaines, section Géographie, 120 p.

Diop M. E. A., 2004 : Les enjeux du développement touristique sur la Langue de Barbarie : contribution à la réflexion d'une gestion intégrée de la flèche littorale. Mémoire de DEA, UCAD, 83 p

Diop M.D. 2004 : Zones humides du delta du fleuve Sénégal. Classification, valeurs et outils de gestion qualitative. Thèse de doctorat de 3ème cycle en Géographie physique, UCAD, 226 p

Diop M., Konate M., Fall O. et Mbengue Y. 2006: L'approche du Programme GIRMAC pour la Gestion de la biodiversité et des ressources environnementales transfrontières dans le contexte du delta du fleuve Sénégal. Projet de gestion des ressources en eau et de l'environnement du bassin du fleuve Sénégal (GEF/BFS). Rapport de synthèse du forum régional africain sur la contribution des projets FEM à la gestion des bassins transfrontaliers, cas du bassin du fleuve Sénégal, pp 55-70

Diop M., Konate M., 2007 : L'importance des zones humides pour la gestion intégrée des ressources naturelles : Cas du delta du Fleuve Sénégal. Bulletin d'information Diiso n°8, http://www.oceandocs.org/bitstream/1834/2358/1/diiso8p4-5.pdf

Diop S. et Rekacewicz 2004 : Atlas mondial de l'eau : une pénurie annoncée, nouvelle éd. Paris : Ed. Autrement, 63 p

DCL/PNIR/CABINET EDUR 2002 : Plan Local de Développement de la communauté rurale de Gandon (2002-2006), 75 p

Dubois-Maury J. et Chaline C., 2004 : Les risques urbains. 2ème édition A. Colin, Paris, 208 p

Dumas D., Mietton M., 2006 : Fonctionnement des hydrosystèmes et gestion de l'eau dans le bas delta du fleuve Sénégal. *Actes du Colloque international « Interactions nature et sociétés, analyses et modèles »* La Baule, 5 p

Dumas D., Mietton M., Hamerlynck O., and al., 2010: Large Dams and Uncertainties: The Case of the Senegal River (West Africa). *Society and Natural Resources*, 23, pp 1108 - 1122

Durand P., Anselme B., Thomas Y.F., 2010 : L'impact de l'ouverture de la brèche dans la langue de Barbarie à Saint-Louis du Sénégal en 2003 : un changement de nature de l'aléa inondation ? *Cybergeo : European Journal of Geograph,* Environnement, Nature, Paysage, document 496, http://cybergeo.revues.org/index23017.html

Eakin H., Luers A.L. 2006: Assessing the vulnerability of social-environmental systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 31, pp. 365-394.

Elliot M., 2002: The role of the DPSIR approach and conceptual models in marine environmental management: an example for offshore wind power. *Marine Pollution Bulletin*, 44, pp III–VII

ENDA 1999 : Le sol et les techniques de conservation de l'eau dans la région des Niayes (Sénégal). Environnement et développement Enda Tiers Monde, Dakar, 62 p

Ericson J.P., Vorosmarty C.J., Dingman L.W., Meybeck M. 2006: Effective sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications. *Global and Planetary Change*, 50, pp 63-82

Faye A., 1996 : Les critères de gestion optimum des ressources en eau dans le delta du fleuve Sénégal. Thèse de doctorat de 3ème cycle de Géographie, UCAD, 201 p + annexes.

Faye I.B.N., 2010 : Dynamique du trait de côte sur les littoraux sableux de la Mauritanie à la Guinée-Bissau (Afrique de l'Ouest) : Approches régionale et locale par photo-interprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes. Thèse de doctorat, Université Bretagne Occidentale, 321 p + annexes

Fohlen D. et Puyoo S., 1984 : Etude hydrogéologique de la région de Gandiole pour l'alimentation du maraîchage. BRGM, 30 p

Fraser E.D.G., Mabee W., Slaymaker O. 2003: Mutual vulnerability, mutual dependance. The reflexive relation between human society and the environment. *Global Environmental Change*, 13, pp 137-144

Füssel H.M. 2007: Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, 17, pp 155–167

Gac J.Y., Kane A., Monteillet J. 1982 : Migrations de l'embouchure du fleuve Sénégal depuis 1850. Cahier ORSTOM, Série. Géol. vol. XII, 1, pp. 73-74

Gac J.Y., Carn M., Saos J.L., 1986 : L'invasion marine dans la basse vallée du fleuve Sénégal. Période 1903-1980. *Rev. Hydrobiol. trop*., 19, 1, pp 3-17

Gaillard J.C., 2007 : De l'origine des catastrophes : phénomènes extrêmes ou âpreté du quotidien ? *Natures Sciences Sociétés,* 15, pp 44-47

Gaillard J. C., Liamzon C. C., Maceda E. A., 2008 : Catastrophes dites "naturelles" et développement. Réflexions sur l'origine des désastres aux philippines. *Revue Tiers monde*, n° 194, pp 371-390

Gallopin G.C., 2006 : Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*, 16, pp 293–303

Gavaud M. 1990 : Nature et localisation de la dégradation des sols au Sénégal. In Cahier Orstom, série Pédologie, vol. XXV, n°3, p 253-262

Ghadri H., Khalifa O.A., Grove A. 1992 : Etude des surcotes dues au vent. Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Ed. 2, Nantes, pp 68-77

Ghio M., 1995 : Les activités humaines augmentent-elles les crues ? In « *Annales de Géographie* » n°581-582, pp 119-147

GIEC 2002 : Les changements climatiques et la biodiversité. Document technique V du GIEC, 75 p

Giret A. 2004 : Le risque hydrologique. In L'information géographique, les risques, vol. 68, n°1, éd. A. Colin, pp14-26

GIRMAC, 2004 : Evaluation environnementale du programme GIRMAC. Volume 1: Impacts environnementaux et cadre de gestion environnementale, 130 p

Gornitz V., 1991: Global coastal hazards from future sea level rise. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology (*Global and Planetary Change Section*), 89, pp 379-398

GPF HORIZON 1990 : Rapport hydrogéologique et géophysique, 16 p

Grinsted A., Moore J. C. AND Jevrejeva S. 2009: Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100AD. Climate Dyamics. http://www.springerlink.com

Grovel A., Sanchez M., Ghadri H. Delanoë Y. 1999 : Modification de la marée par le creusement du chenal d'un estuaire. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57, 4, p 369-376

Guillaumie K., Hassoun C., Manero A. et al. 2005 : La sécheresse au Sahel : un exemple de changement climatique. Atelier Changement ENPC-Département VET, 40 p http://www.enpc.fr/fr/formations/ecole_virt/trav-eleves/cc/cc0405/sahel.pdf

Guilcher A. 1954 : Rapport sur une mission d'étude de la Langue de Barbarie et de l'embouchure du fleuve Sénégal. Mission d'Aménagement du Sénégal, bulletin n°1, 56 p

Hamerlynck O., Duvail S., 2003 : La restauration du delta du fleuve Sénégal en Mauritanie. Une application de l'approche écosystémique. Série bleue, UICN, 87 p

Hamndou D. A. et Desjardins M. R. 2008 : Variabilité climatique, désertification et biodiversité en Afrique : s'adapter, une approche intégrée. *Vertigo*, la revue électronique en sciences de l'environnement, Vol. 8 n° 1. URL : http://vertigo.revues.org/index5356.html.

Hossain S. Eyre B. and Mc Conchie D. 2001**:** Suspended Sediment Transport Dynamics in the Sub-tropical Micro-tidal Richmond River Estuary, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52**,** pp 529–541

Hubert P., Servat E., Paturel J.E., Kouame B. Bendjoudi H. Carbonnel J.P. Niel L.H. 1998 : La procédure de segmentation, dix ans après. *IAHS Publ*. n°252 pp 267-273

Hubert P., Bader J.C., Bendjoudi H., 2007: Un siècle de débits annuels du fleuve Sénégal. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 52, 1, pp 68-73

Humbert J., Mietton M. et Kane A. 1995 : L'après-barrages dans le delta du sénégal. Scénarios de remise en eau de la cuvette du Ndiael et impacts. *Sécheresse*, 2, 6, pp 207-214

Hunt B. G., 2000: Natural climatic variability and Sahelian rainfall trends. *Global and Planetary Change, 24*, pp 107-131

HYDROCONSULT International, APRHN 2004 : Projet de construction du Canal de Gandiolais. Etudes techniques complémentaires. Rapport, 21 p

IPCC 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report. http://www.ipcc-wg1.unibe.ch/publications/wg1-ar4/wg1-ar4.html

IRD- OMVS, 2001 : Manuel de gestion du barrage de Diama. Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs, 59 p

IRD- OMVS, 2004 : Manuel de gestion du barrage de Diama. Version révisée pour les conditions d'écoulement prévalant depuis octobre 2003 (ouverture de la brèche dans la langue de barbarie), 52 p

Jacoutot A. 2006 : Modifications environnementales et conséquences dans le bas-delta du fleuve Sénégal. Cas du Gandiolais et du Parc National du Diawling. Stage de recherche, Université Joseph Fourier, 174 p

Kandji A., 2003: Caractérisation des sites de reproduction des oiseaux d'eau dans la zone côtière ouest africaine : Etude de cas dans le Parc National de la Langue de Barbarie. Mémoire de DEA, UCAD, 66 p

Kandji S. T., Verchot L., Mackensen J. 2006: Climate Change and Variability in the Sahel Region: Impacts and Adaptation Strategies in the Agricultural Sector. Climate Variability and Climate Change in the Sahel Region. UNEP, World Agroforestry centre, 48 p

Kane A. 1985 - Le bassin du Sénégal à l'embouchure. Flux continentaux dissous et particulaires. Invasion marine dans la vallée du fleuve. Contribution à l'hydrologie fluviale en milieu tropical humide et à la dynamique estuarienne en domaine sahélien. Thèse doctorat 3ème cycle, Univ. Nancy II, 205 p.

Kane A. 1997 : L'après barrage dans la vallée du fleuve Sénégal Modification hydrologique, morphologiques, géochimiques et sédimentologiques. Conséquences sur le milieu naturel et les aménagements hydro-agricoles. Thèse de doctorat d'Etat de Géographie physique, UCAD, 551 p.

Kane A. 2002 : Crues et inondations dans la basse vallée du fleuve Sénégal. In « Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales » Eds scientifiques Orange D. et al., IRD, pp 197-208

Kane, A., Niang Diop I., Niang A. and Dia A.M., 2003: Coastal impacts of water abstraction and impoundment in Africa. Cas du bassin du fleuve Se´ne´gal. Report. LOICZ/START AfriCat Foundation Project, UCAD, 91 p

Kane A. 2005 : Régulation du fleuve Sénégal et flux de matières particulaire vers l'estuaire depuis la construction du barrage de Diama. *IAHS Sediment Budgets*, vol. 2, n°. 292, pp. 279–290.

Kane F. 2005 : Evolution récente de la langue de Barbarie (Saint-Louis du Sénégal) et ses impacts environnementaux et socio-économiques. Mémoire de maîtrise, Université de Paris Sorbonne (Paris IV), 183 p

Kane C., Humbert J., Kane A., (sous presse) : Modifications de l'embouchure du fleuve Sénégal : impacts sur la vulnérabilité des sociétés du bas estuaire. XIIème Journées de Géographie Tropicale, Bordeaux, 16-18 octobre 2008.

Kane C., Humbert J., Kane A., 2010: Responding to climate variability: the opening of an artificial mouth on the Senegal River. Soumis: *Regional Environemental Change*

Karageorgis A.P., Kapsimalis V., Kontogianni A., et al., 2006: Impact of 100-Year Human Interventions on the Deltaic Coastal Zone of the Inner Thermaikos Gulf (Greece): A DPSIR Framework Analysis. *Environmental Management,* 38, 2, pp. 304-315

Kates R.W. et al. 2001: Environment and development: sustainability science. *Science*, 292, 5517, pp 641-642.

Kondolf G.M. 1997: Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channels. *Environmental Management*, vol. 21, n°4, pp. 533–551

Kosuth P., Callède J., Laraque A., and al. 2009: Sea-tide effects on flows in the lower reaches of the Amazon River. *Hydrological Processes*, 23, pp 3141–3150

Lamagat J.P., 2000 : Inondation de la ville de Saint-Louis. Diagnostic. OMVS-IRD, 12 p

Lamagat J.P 2007 : Programme des risques : Optimisation de Gestion des Réservoirs. Projet POGR, 10 p http://www.g-eau.net

Lamagat J.P, Bader J.C., 2003 : Gestion intégrée des ressources en eau du bassin du Sénégal-Programme d'optimisation de la gestion des réservoirs, Actes de l'atelier du PCSI, Montpellier, 14 p

Lang M. et Lavabre J. et al. 2007 : Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations. Ed Quæ, 232 p

Lebel T., Ali A., 2009: Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990–2007). *Journal of Hydrology* 375 pp 52–64

Ledoux B., 2006: La gestion du risque inondation. Ed Tec et Doc, 770 p

Lefèvre C. et Schneider J.L. 2002 : Les risques naturels majeurs. Ed. Contemporary Publishing International GB Science Publisher, 306 p

Le Floch J. 1960 : Propagation de la marée dans un canal à variation de largeur exponentielle- Application à la Seine maritime. *Publication de l'Association internationale d'Hydrologie scientifique*, 51, pp 283-289

Le Hir P., Jacinto R.S. et al. 2001 : Courants, vagues et marées : les mouvements de l'eau. Programme scientifique Seine - Aval, 31 p

Leone F. et Vinet F., 2006 : La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques, p 9-25. In « La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques ». Sous la direction de Leone F., et Vinet F. Collection « Géorisques », n°1. Montpellier 3, 140 p

Leroux M., 1970 : La dynamique des précipitations an Afrique occidentale. Thèse de doctorat de 3ème cycle, Université de Dakar, 320 p

Leroux M., 1983 : Le climat de l'Afrique tropicale. Ed. Champion, 250 p

Leroy M. 2006: Gestion stratégique des écosystèmes du fleuve Sénégal- Actions et inactions publiques internationales. Ed. L'Harmattan, Paris, 623 p

Lotze H. K, Lenihan H. S. Bourque B.J., et al., 2007: Depletion, degradation, and recovery potential of estuaries and coastal seas. *Science*, vol. 312, pp 1806-1809

Lubès-Niel H., Masson J.M., PatureL J.E., Servat E., 1998 : Variabilité climatique et statistiques. 2tude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Rev. Des Sciences de l'Eau* (3) pp 383-408

Lubès H., Masson J.M, Raous P., Tapiau M., 2002 : Safarhy Logiciel de calculs statistiques et d'analyse fréquentielle adapté à l'évaluation du risque en hydrologie. Version 3.1, IRD, Université Montpellier II, 123 p

Luginbuhl Y. 1992 : Nature, paysage, environnement, obscurs objets du désir de totalité. In Du milieu à l'environnement. Pratiques et représentations du rapport homme/nature depuis le Renaissance. Sous la direction de Robic M.C., éd. Economia, pp 11-56

Magrin G., Seck S.M., 2009: La pêche continentale en sursis ? Observations sur les pêcheries en rive gauche de la vallée du Sénégal dans un contexte de décentralisation. *Géocarrefour*, vol 84, n° 1-2, pp 54-64

Mahé G., Paturel J.E., 2009: 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. C. R. *Geoscience*, 341, pp 538–546

Maiga A.H., Wethie J. Seid M. et al. 2002 : Variation des sous produits de l'épuration par lagunage en Afrique de l'Ouest et du centre : Analyse des pratiques dans six pays au

sud du Sahara. Présentation pour le 4ième congrès international Envirowater, Ouagadougou. 10 p.

Mancebo F. 2008 : Développement durable. Ed. Armand Colin, 125 p

Marius C., 1985 : Mangroves du Sénégal et de la Gambie : Ecologie - Pédologie Géochimie. Mise en valeur et aménagement. Collections Travaux et Documents, Orstom, 380 p.

Martin P. J. 1991 : Avantages et techniques du barrage de régulation. Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Ed. AUPELF-UREF John Libbey Eurotext, Paris, p 255-265

Martinez M. L, Intralawan A., Vázquez G. and al. 2007: The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological economics*, 63, pp 254 - 272

Mbaye M., Sagna P. 2006 : Analyse de la vulnérabilité des sociétés aux variations climatiques. L'exemple du faubourg de Sor à Saint-Louis (Sénégal). In Les risques liés au temps et au climat. Actes du Colloque d'Epernay. Ed. Beltrando G., Madelin M. et Quénol, pp 427-432

Mbaye M., Mahe G., Servat E., et al., 2009 : Ressources en eau et santé publique au Sahel : exemple de la propagation des maladies infectieuses à Saint-Louis (Sénégal). *Sécheresse*, vol. 20, n° 1, p 161-170

Merz B., Hall J., Disse M. and Schumann A., 2010: Fluvial flood risk management in a changing world. *Natural Hazards and Earth System Sciences,* 10, pp 509–527

Meybeck M. 2004: The global change of continental aquatic systems : dominant impacts of human activities. *Water Science and Technology*, vol. 49 n° 7, pp 73 – 83

Meylan P., Facre A.C., MUSY A., 2008: Hydrologie fréquentielle, une science prédictive. Ed. Presses polytechniques et universitaires romandes, 173 p

Michel P. Elouard P. et Faure H. (1967) : Nouvelles recherches sur le quaternaire récent de la région de Saint-Louis (Sénégal), rapport n°17, 27 p

Michel P., 1973 : Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : étude géomorphologique. Ed. ORSTOM, 2 tomes, 752 p

Michel P., Barusseau J.P., Richard J.F., Sall M.M., 1993 : L'après-barrages dans la vallée du Sénégal. Modifications hydrodynamiques et sédimentologiques. Conséquences sur le milieu et les maéngements hydrzo-agricoles. Résultats des travaux du Projet Campus 1989-1992. Ed. Presses universitaires de Perpignan, 152 p

Mietton M., Humbert J., 1994 : Dynamique du milieu naturel et transformations par l'homme dans le delta du fleuve Sénégal. La cuvette du Ndiaël hier, aujourd'hui et demain. In Enregistreurs et Indicateurs de l'Évolution de l'Environnement en Zone Tropicale. Collection Espaces tropicaux, n° 13, Presses Univ. de Bordeaux, pp 345-365

Mietton M., Dumas D., Hamerlynck O., and al., 2007 : Le delta du fleuve Sénégal : la gestion de l'eau dans l'incertitude chronique. In Incertitude et Environnement, la fin des certitudes scientifiques, sous la direction d'Allard P., Denis F. Picon B. éd. SEH Ecologie Humaine/Edisud, p 321-336

Mileti D.S. 1999: Disasters by design. A reassessment of Natural Hazards in the United States. Washington, D.C., Joseph Henry Press, 376 p.

Miossec A. 1998 : Les littoraux entre nature et aménagement, 2ème édition SEDES, 191 p

Musters C.J.M., Graaf H.J., and Ter Keurs W.J. 1998: Defining socio-environmental systems for sustainable deveolpment. *Ecological Economics*, 26, pp 243-258

Musy A. et Higy C., 2004 : Hydrologie, une science de la nature. Coll. Gérer l'environnement, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 314 p

Ndiaye A., 1975 : Le Gandiolais, l'estuaire du Sénégal, la Langue de Barbarie. Etude Géomorphologique. Travail d'études et de recherches, Université de Dakar, 88 p

Ndiaye A., 2004: Dynamique fluviale et évolution morphosédimentaire de l'estuaire du fleuve Sénégal après la mise en eau du barrage de Diama. Thèse de doctorat, UCAD, 149 p

Niang A., 2002 : Description des changements de paysage au niveau de la Langue de Barbarie, de l'estuaire et la zone côtière du Delta du fleuve Sénégal. Phase 2, volet 2, rapport GILIF, 36 p

Niang-Diop I., 1995 : Erosion côtière sur la Petite Côte du Sénégal à partir de l'exemple de Rufisque. Passé, présent, futur. Thèse de Doctorat de Géologie, Université d'Angers, 475 p.

Niang-Diop I., Dansokho M et al. 2002 : Senegal national report, phase 1: Integrated problem analysis, Global Environnemental Facility, 76 p

Niane M.T. Sene A., 2004: La langue de Barbarie, vers une disparition. http://www.senegalaisement.com/senegal/archives_bulletins.php Bull. n°58

Niasse M., Afoudou A., 2003: Water, climate change and desertification in West Africa: Regional strategy for preparedness and adaptation. http://www2.unitar.org/ccp/burkina/25-IUCN%20Regional%20Strategy%20en.pdf

Niasse M., 2007: Elements of a regional climate change adaptation strategy based on the risk-sharing approach- West Africa, 69 p

Nicholls R. J. 2004: Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: changes under the SRES climate and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14, pp 69–86

Nicholls R. and Cazenave A., 2010: Sea-Level Rise and Its Impact on Coastal Zones. *Science*, vol 328, pp 1517-1520

Nicholson S.E., 2000 : The nature of rainfall variability over Africa on time scales of decades to millenia. *Global and Planetary Change,* 26, pp 137-158

Oliver-Smith A. 1994: Peru's five hundred year earthquake: vulnerability in historical context. In Varley A. (Ed.) *" Disasters, development and environment",* Wiley, pp. 31-48.

OMM 2009 : Gestion intégrée des crues : document de fond. OMM n°1047, 27 p

OMVS 1986 : Etude des inondations du delta mauritanien en l'absence de digue rive droite. Rapport préliminaire, 12 p

OMVS 2003 : Etude de base pour la phase initiale de mise en place de l'observatoire de l'environnement, rapport technique, version finale provisoire V2.0, 295 p

OMVS, BBL-SW, ACDI, 1985 : Etudes des ports et escales du fleuve Sénégal. Port de Saint-Louis. Etudes hydrographiques et hydrauliques. Rapport n° 20, 149 p,

OMVS, COYNE et BELLIER 2005 : Etude d'évaluation des impacts de l'ouverture d'une embouchure artificielle à l'aval de Saint-Louis sur le barrage de Diama. Rapport final. 39 p

OMVS-SOGREAH 2006 : Accessibilité et implantation du port de Saint-Louis. Etude APS des ouvrages portuaires et d'accès de 1ère étape. Plan de suivi et de gestion environnementale. 46 p

OMVS, OMM, WHYCOS, 2007 : Renforcement des capacités nationales et régionales d'observation, transmission et traitement de données pour contribuer au développement durable du bassin du Fleuve Sénégal. Document de projet préliminaire, 49 p

ONAS 2008 : Rapport de mission station d'épuration de Saint-Louis. Bilan de pollution sur 6 heures, 5 p

Pagès J., 1995 : Les systèmes de culture maraîchers dans la vallée du fleuve Sénégal. Pratiques paysannes, évolution. In : Boivin P. (ed.), Dia I. (ed.), Lericollais A. (ed.), Poussin J. C. (ed.), Santoir C. (ed.), Seck S. M. (ed.). "Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal ». Paris, ORSTOM, p.171-187

Paskoff R., 1993 : La connaissance prospective du comportement évolutif du trait de côte : une donnée essentielle pour l'aménagement des espaces littoraux. Aménagement littoral et évolution des côtes : l'environnement des côtes marocaines en péril. Actes du symposium du Comité National de Géographie du Maroc et de la Commission de l'Environnement Côtier de l'Union de Géographie Internationale, pp 15-19

Paskoff R., 1998 : Les littoraux : Impact des aménagements sur leur évolution, 3e édition, Masson, Paris 260 p

Paturel J.E., Servat E., Kouame B., et al., 1996 : Procédures d'identification de « ruptures » dans des séries chronologiques – modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne. *IAHS* Publ., n°238, pp 99-109

Peduzzi P., 2006. The disaster risk index: overview of a quantitative approach. Birkmann, J. Ed., Measuring Vulnerability to Natural Hazards-Towards Disaster Resilient Societies. UNU-Press, pp 171-181

Peretti-Watel P. 2000 : Sociologie du risque. Ed. Armand Colin, 288 p

Pettitt A.N. 1979: A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, 28, n° 2, pp. 126-135

Pielke R.A., Adegoke J.O., Chase T.N., and al., 2007: A new paradigm for assessing the role of agriculture in the climate system and in climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 142, pp 234-254

Pigeon P. 1994 : Ville et environnement. Ed. Nathan, Collection Géographie d'aujourd'hui, 191 p

Pigeon P. 2005 : Géographie critique des risques. Ed. Economica, 217 p

Pirrone N., Trombino G., Cinnirella S. et al., 2005: The Driver-Pressure-State-Impact Response (DPSIR) approach for integrated catchment-coastal zone management: preliminary application to the Po catchment-Adriatic Sea coastal zone system. *Regional Environmental Change*, 5, pp 111–137

PNUE 2000 : L'avenir de l'environnement mondial : GEO-2000 : rapport du PNUE sur l'environnement Programme des Nations Unies pour l'environnement. Ed. De Boeck et Larcier, 398 p

PNUE 2002 : L'avenir de l'environnement mondial - Le passé, le présent et les perspectives d'avenir. Synthèse Géo 3, de Boeck, 16 p

PNUE/UCC-Water/SGPRE 2002: Vers une gestion intégrée du littoral et du bassin fluvial. Programme pilote du delta du fleuve Sénégal et de sa zone côtière, 115 p

Pujol N., Neppel L. and Sabatier R. 2007 : Regional tests for trend detection in maximum precipitation series in the French Mediterranean region. *Hydrological Sciences,* 52 pp 956-973

Reghezza M. 2006 : La vulnérabilité : un concept problématique. La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelle ; Analyses géographiques. Sous le direction de Léone F. et Vinet F. Publications de l'université Paul Valery - Montpellier III, Géorisques, pp 35-39

Regnauld H., Moy L.H., Musereau J., 2004: Risque littoral, évolution climatique et naturalité du dommage. In Les risques. L'information géographique, vol 68, éd. Armand Colin, pp 40-56

Reizier C., Lessent P., 1972 : Les pêches continentales du bas Sénégal. *Revue Bois et Forêts des Tropiques*, n°143, pp 3-21

Richard H., Badot P. M., Viel J. F. 2008: Artificialisation du vivant : histoire, processus et conséquences, http://www.cnrs.fr/inee/recherche/fichiers/ProspectiveRennes2009/Texte_ArtificialisationduVivant.pdf

Robic M.C. (sous la direction), BESSE J.M., LUGINBUHL Y., MARIGNIER M.V.O., TISSIER J.L. 1992 : Du milieu à l'environnement. Pratiques et représentations du rapport homme/nature depuis la Renaissance. Ed Economica, 343 p

Robert J. N., 2004: Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: changes under the SRES climate and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14, pp. 69-86

Rochette C. 1964 : Remontée des eaux marines dans le Sénégal. Rapport ORSTOM-MAS Dakar, 81 p

Rochette C. 1974 : Le bassin du fleuve Sénégal. Monographies Hydrologiques n° 1 ORSTOM Paris 325 p

Saalmueller J., 2009: Flood Management: Why it Matters for Development and Adaptation Policy. Water Front Magazine n°3-4, pp 14-15.

Sall M. 1982 : Dynamique et morphogenèse actuelles au Sénégal Occidental. Thèse de Doctorat d'Etat ès-Lettres, Université Louis Pasteur, Strasbourg 1, 604 p.

Sall M.M., 1993 : La dynamique éolienne. In L'après-barrages dans la vallée du Sénégal-Modifications hydrodynamiques et sédimentologiques : conséquences sur le milieu et les aménagements hydro-agricoles. Résultats des travaux du Projet-Campus 1989-1992. Collection Etudes, Presses Universitaires de Perpignan, pp 9-17

Sambou S., Diémé Y., Touré A.K. et al., 2009 : Effet du barrage de Manantali sur les modifications du régime hydrologique du fleuve Sénégal dans le bassin amont : une approche statistique. *Sécheresse*, 20, 1, pp

SARR B. 1995 : Climat et agriculture en Afrique tropicale : le cas de la riziculture dans les espaces aménagés du bassin du fleuve Sénégal. Thèse de doctorat de l'Université de Dijon, 360 p.

Schanze J., Zeman E., and Marsalek J. 2004: Flood Risk Management: Hazards, vulnerabilities and mitigation measures. IV Earth and Environmental Sciences, vol 67, Springer, 246 p

Scialabba, N. 1998: Integrated coastal area management and agriculture, forestry and fisheries. FAO Guidelines. Environment and Natural Resources Service, FAO, Rome. 256 p

Sene S. et Oser P. 2002 : Evolution pluviométrique et relation inondations-événements pluvieux au Sénégal. *Bull. de la Société géographique de Liège*, 42, pp 27-33

Servat E., Paturel J.E, Niel H.L. et al. 1999 : De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'ouest et Centrale non sahélienne. *Rev. Sciences de l'eau*, 12 (2) pp 363-387

Slovic P., 2000: The perception of risk. Ed. Earthscan, 473 p

Sow A.A. 1984 : Pluie et écoulement fluvial dans le bassin du fleuve Sénégal. Contribution à l'hydrologie fluviale en domaine tropical humide africain. Thèse de 3ème cycle, Université de Nancy II, 435 p.

Sultan B., Janicot S., 2003: The West African Monsoon Dynamics. Part II: The ''Preonset'' and ''Onset'' of the Summer Monsoon. *Journal of Climate*, 16, pp 3407-3427

Svarstad H., Petersen L. K., Rothman D., Siepel H., Waitzold F., 2008: Discursive biases of the environmental research framework DPSIR. *Land Use Policy*, 25, pp 116–125

Taïbi A. N., Barry M. E. H. Jolivel M., Ballouche A., Baba M. L. O. et Moguedet G. 2007: Enjeux et impacts des barrages de Diama (Mauritanie) et Arzal (France) : des contextes socio-économiques et environnementaux différents pour de mêmes conséquences. *Norois* n° 203 Mobilité, hydrologie, loisir et tourisme, espace urbain, pp 51-66

Thomalla F., Downing T., Siegfried S. E., Han G. and Rockström J. 2006: Reducing hazard vulnerability: towards a common approach between disaster risk reduction and climate adaptation. *Disasters*, 30 (1), pp 39−48

Tol R.S.J., Downing T. E., Kuik O. J.and Smith J. B. 2004: Distributional aspects of climate change impacts. *Global Environmental Change,* 14, pp 259–272

Tricart J. 1961 : Notice explicative de la carte géomorphologique du delta du Sénégal. Ed. Technip, Collection Mémoires du Bureau de recherches géologiques et minières, 139 p

Tricart J. 1978 : Géomorphologie applicable. Collection de géographie applicable, sous la direction de Beaujeu-Garnier, Ed Masson, 204 p

Troussellier M., Got P., Bouvy M., M'Boup M., Arfi R. And al. 2004: Water quality and health status of the Senegal River estuary. *Mar. Poll. Bull.*, 48, pp 852-862.

Turner B.L., Matson P., McCarthy J., and al., 2003: Illustrating the coupled human-environment system for vulnerability analysis: Three case studies. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 100, 14, pp 8080-8085

Van der Leeuw S.E. 2001: Vulnerability and the integrated study of socio-natural phenomena. *Update IHDP* n°2 http://www.ihdp.uni-bonn.de/html/publications/update/IHDPUpdate01_02.html

Veyret Y. et Pech P. 1993 : L'homme et l'environnement. Ed. Presses Universitaires de France. 423 p

Veyret Y. 2004 : Géographie des risques naturels en France. De l'aléa à la gestion. Ed. Hatier, Paris, 251 p

Veyret Y. (dir.) Beucher S., Reghezza M. 2004 : Les risques, éd Bréal, coll. Amphi Géographie, 205 p

Veyret Y. et Reghezza M. 2005 : Aléas et risques dans l'analyse géographique. Annales des mines, pp 61-69

Walker H., 1997. Man's impact on shorelines and nearshore environments. In: Goudie, A. (Ed.), The Human Impact Reader. *Blackwell*, Oxford, UK, pp. 4–19.

White G.F. 1945: Human Adjustment to Floods. Chicago, University of Chicago Press, 356 p

Table des illustrations

Liste des figures

Fig. 1.1: Les différentes approches de la vulnérabilité 28

Fig.1.2 : Méthode d'analyse de la vulnérabilité du système socio-environnemental.....31

Fig. 2.1 : L'estuaire du fleuve Sénégal.....39

Fig. 2.2 : Les unités géomorphologiques de l'estuaire 44

Fig. 2.3 : Direction moyenne des vents à la station de Saint-Louis (1951-2006).....51

Fig. 2.4 : Evolution inter mensuelle de la pluviométrie à Saint-Louis (1892-2006) 53

Fig. 2.5 : Indice pluviométrique de la station de Saint-Louis (1892-2006) 54

Fig. 2.6 : Evolution des températures moyennes mensuelles à la station de Saint-Louis (1951-2006).....56

Fig. 2.7 : L'insolation moyenne mensuelle en heures à Saint-Louis (1951-2006).....57

Fig. 2.8 : Evolution moyenne mensuelle de l'évaporation en mm à Saint-Louis.....58

Fig. 2.9 : L'humidité relative moyenne mensuelle à Saint-Louis (1951-2006).....59

Fig. 2.10 : Evolution comparée des éléments du climat à Saint-Louis 61

Fig.3.1 : Les segments de la Langue de Barbarie.....65

Fig.3.2 : Le modèle numérique de terrain de la ville de Saint-Louis.....66

Fig. 3.3 : Le niveau des pentes.....67

Fig. 3.4 : Localisation des quartiers pour l'échantillonnage granulométrique des sols.....68

Fig. 3.5 : Composition granulométrique des zones inondables de Saint-Louis.....69

Fig.3.6 : Evolution spatiale de la ville de Saint-Louis 70

Fig. 3.7 : Evolution de la population de Saint-Louis (1960-2004).....71

Fig. 3.8 : Inondation de la ville de Saint-Louis 75

Fig. 3.9 : Les digues et quais de Saint-Louis 77

Fig. 3.10 : Niveau de fluctuation de la nappe phréatique suivant les saisons dans les Niayes 79

Fig. 3.11 : Répartition de la population du Gandiolais.....81

Fig. 3.12 : le Parc National de la Langue de Barbarie.....83

Fig. 3.13 : La Réserve Spéciale de Faune de Gueumbeul.....85

Fig. 3.14 : Zones salées dans le Gandiolais 88

Fig. 4.1. Localisation des barrages sur le fleuve Sénégal 96

Fig.4.2 : Les stations hydrométriques de l'estuaire 98

Fig. 4.3 : Evolution des débits de la station de Bakel (1903-2008).....101

Fig. 4.4 : Pluies mensuelles de la station de Bakel (1922-2006).....102

Fig. 4.5 : Hydrogramme annuel du Sénégal à Bakel (1903-2008).....103

Fig. 4.6 : Relation entre les débits de la station de Bakel et du barrage de Diama (1986-2008).....104

Fig. 4.7 : Comparaison des écoulements à Bakel et Diama.....105

Fig. 4.8 : Débits moyens mensuels évacués au barrage de Diama (1986-2008) 105

Fig. 4.9 : Indice hydrologique de la station de Diama (1986-2008) 106

Fig. 4.10 : Lâchers hebdomadaires de la station de Diama (1986-2008) 109

Fig. 4.11 : Les débits lâchés à Diama et les hauteurs d'eau des stations de l'estuaire (1994-1995).....111

Fig. 4.12 : Evolution des débits évacués par le barrage et des hauteurs d'eau dans l'estuaire (1995-1996).....112

Fig. 4.13 : Débits évacués en fonction de la cote amont du barrage (1999-2000).....114

Fig. 4.14 : Evolution des débits évacués par le barrage et des hauteurs d'eau à Diama aval et Saint-Louis (2005-2006) 115

Fig. 4.15 : Evolution des débits évacués par le barrage et des hauteurs d'eau à Diama aval et Saint-Louis (2006-2007) 116

Fig. 4.16: Distribution des débits maxima en fonction de l'ajustement à la loi normale 119

fig.5.1 : Evolution des débits du barrage de Manantali par la procédure de segmentation de Hubert (1987-2007) 125

Fig.5.2 : Ellipse de contrôle de Manantali (1987-2007).....126

Fig.5.3 : Ellipse de contrôle de la station de Bakel (1903-2007) 127

Fig.5.4 : Evolution des débits de la station de Bakel par la procédure de segmentation de Hubert (1903-2007) 128

Fig.5.5 : Cotes et volumes journaliers enregistrés au barrage de Manantali (2003-2004)...129

Fig.5.6 : Débits enregistrés au niveau des affluents non contrôlés (Falémé et Bakoye).....130

Fig. 5.7 : Crue à la station de Bakel (2003-2004).....131

Fig.5.8 : Hauteurs d'eau enregistrées dans la vallée 132

Fig. 5.9 : Evolution interannuelle de la pluviométrie de la station de Bakel (1921-2006) 133

Fig. 5.10 : Quartiers inondés en septembre 2003 136

Fig.5.11 : Hauteurs d'eau des stations de Saint-Louis et Diama aval (2003-2004) 137

Fig.5.12 : Représentation tridimensionnelle de l'ancienne embouchure à la date du 28 décembre 2001 141

Fig.5.13 : Représentation tridimensionnelle du canal de délestage 143

Fig.5.14 : Largeur de la brèche à la date du 17/09/2004.....144

Fig.5.15 : Débits évacués par le barrage de Diama en 2005 145

Fig. 5.16 : Evolution de la largeur de la brèche en 2005 146

Fig.5.17 : Evolution de la largeur de la brèche en 2006 148

Fig. 5.18 : Profondeurs de la brèche à la date du 15 avril 2006 149

Fig.5.19 : Evolution de la brèche en 2007.....150

Fig.5.20 : Représentation tridimensionnelle de la brèche (juillet 2007) 151

Fig.5.21 : Evolution de la nouvelle embouchure (2008-2009) 152

Fig. 5.22 : Colmatage de l'ancienne embouchure 154

fig.5.23 : Profils transversaux de l'ancienne embouchure 156

Fig. 6.1 : Profil bathymétrique de l'estuaire.....161

Fig. 6.2 : Evolution de la hauteur d'eau à la station de Saint-Louis (2001-2007).....164

Fig. 6.3 : Evolution du marnage à la station de Saint-Louis (2002-2006) 165

Fig. 6.4 : Le niveau du fleuve à la station de Saint-Louis en marée basse.....168

Fig.6.5 : Le niveau du fleuve à la station de Saint-Louis en marée haute 168

Fig. 6.6 : Schéma hydraulique de l'estuaire 173

Fig.6.7 : Les aménagements dans l'estuaire 175

Fig. 7.1 : Localisation des profils topographiques 181

Fig.7.2 : Profils topographiques de la partie nord de la brèche 182

Fig. 7.3 : Profils topographiques de la partie sud de la brèche.....183

Fig. 7.4 : Histogramme de fréquences cumulées des maxima mensuels annuels des vents 189

Fig. 7.5 : Evolution de l'île de Doun Baba Dièye entre 2003 et 2007 193

Fig.7.6 : Représentation schématique de la végétation des étages adlittoral et paralittoral des dunes littorales 197

Fig.7.7 : Représentation schématique d'espèces végétales au niveau du secteur de Diama 199

Fig.7.8 : Représentation schématique des espèces végétales au niveau du Djeuss 200

Fig. 7.9: Représentation schématique de la végétation dans le delta du Sénégal.....200

Fig. 7.10 : Evolution de la mangrove 203

Fig.7.11 : Evolution de l'îlot aux oiseaux du Parc National de la Langue de Barbarie (2003-2007).....205

Fig. 8.1. Le cadre conceptuel DPSIR.....210

Fig. 8.2 : Le cadre conceptuel DPSIR appliqué aux modifications environnementales de l'estuaire.....211

Fig. 8.3 : Nombre de jours de fermeture des vannes du barrage de Diama (1986-2007)....213

fig.8.4 : Évolution de la salinité des eaux du fleuve par rapport à la position de l'embouchure (1986-2006).....213

Fig.8.5 : Dérivation des eaux fluviales au niveau de la nouvelle embouchure.....214

fig.8.6 : Niveau de vulnérabilité des villages du Gandiolais à l'avancée du biseau salé 221

fig.8.7 : Le système hydraulique du canal du Gandiolais 233

Fig. 8.8 : Les stratégies d'adaptation des populations 234

Fig. 8.9: Pourcentages de migrants au niveau des différentes localités……..……238

Fig. 8.10 : Modèle conceptuel DPSIR de l'estuaire du fleuve Sénégal.....243

Fig. 9.1 : Evolution du trait de côte (2007-2008) 249

Fig.9.2 : Progression de la surface inondée en fonction du niveau d'élévation de la mer (Saint-Louis).....255

Fig. 9.3 : Progression de la surface inondée en fonction du niveau d'élévation de la mer (Gandiolais).....255

Fig.9.4 : Les zones inondées dans la ville de Saint-Louis en cas d'élévation du niveau de la mer.....257

Fig. 9.5 : Relation entre terres submergées et élévation du niveau de la mer (Saint-Louis) 258

Fig.9.6 : Les zones inondées dans le Gandiolais en cas d'élévation du niveau de la mer...260

Fig. 9.7 : Relation entre terres submergées et élévation du niveau de la mer (Gandiolais) .261

Liste des photos

Photo 3.1 : Colmatage d'un canniveau par les ordures ménagères……..…….73

Photo 3.2 : Inondation dans les quartiers de Diaminar et de Balacoss en 2005……..…….73

Photo 3.3 : une partie de la digue entourant le marigot de Khor jouxtant la quartier de Medina Course……..…78

Photo 3.4 : Maris salants à Tassinère…….89

Photo 4.1 : Le barrage de Diama…….95

Photo 5.1 : Ouverture du canal de délestage……...138

Photo 6.1 : Retrait des eaux en marée basse……..……163

Photo 7.1 : Maisons détruites par les vagues dans le village de Doun Baba Dièye……..194

Photo 7.2 : Destruction des arbres par l'érosion côtière…….198

Photo 7.3 : a : Nouveau site de prédilection des oiseaux du PNLB ; b : destruction des endiguements par la marée…….206

Photo 8.1 : Retour des habitants de l'île de Doun baba Dièye après un approvionnement en eau par voie fluviale……..223

Photo 8.2 : La station de lagunage de Saint-Louis…….235

Photo 9.1 : Le niveau de la mer par rapport au quartier de Guet……..250

Photo 9.2 : Ruelle étroite dans le quartier de Guet Ndar…….251

Photo 9.3 : Maisons détruites par les vagues (Goxumbacc)……..…….251

Photo 9.4 : a : Prélévement de sable pour la protection contre l'avancée de la mer ; b : nefficacité du système de protection……..253

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Les données utilisées pour le traitement cartographique.....32

Tableau 2.1: Matrice de confusion de l'image Landsat du 21 juin 2002 .....42, 43

Tableau 2.2 : Pourcentage correspondant aux principales unités géomorphologiques.....45

Tableau 2.3 : Les vitesses moyennes du vent à la station de Saint-Louis (1951-2006) 52

Tableau 2.4 : Les données moyennes des différents éléments du climat à la station de Saint-Louis 55

Tableau : 3.1. Les variétés de culture.....87

Tableau 4.1 : Caractéristiques de la période 1903-2008 de la station de Bakel.....102

Tableau 4.2 : Caractéristiques de la période 1986-2008 de la station de Diama.....106

Tableau 4.3 : Les débits maxima évacués par le barrage de Diama (1986-2008).....117

Tableau 4.4 : Caractéristiques de l'échantillon.....118

Tableau 4.5 : Durée de retour des débits évacués par le barrage de Diama 120

Tableau 5.1. : Dynamique de la nouvelle embouchure 153

Tableau 7.1 : La taille moyenne des sédiments.....186

Tableau 7.2 : Indice d'asymétrie des sédiments 187

Tableau 7.3 : Indice de normalité des sédiments.....188

Tableau 7.4 : Indice de triage des sédiments 188

Tableau 7.5 : Règles de gestion du barrage avant l'ouverture de la brèche.....207

Tableau 8.1 : Evolution de la salinité des eaux souterraines (2006-2008) 217

Tableau 8.2: Evolution de la conductivité (2006-2008) 218

Tableau 8.3 : Evolution du PH (2006-2008).....219

Tableau 8.4: Evolution des rendements par hectare des différentes variétés de culture (enquête 2008).....224

Tableau 8.5: Estimation de la production.....224

Tableau 8.6 : Evolution des mises à terre (2000-2006).....227

Tableau 8.7 : Espèces rares ou en voie de disparition.....229

Tableau 8.8 : Espaces abondantes au niveau de la brèche.....229

Tableau 8.9 : Nombre de migrants par rapport à la population des villages ciblés pour l'enquête.....236

Tableau 9.1 : Evolution du niveau fleuve à la station de Saint-Louis en fonction de l'élévation du niveau de la mer.....262

Liste des sigles et abréviations

ADVT : Association de Développement de la Vallée de Toubé

AFNOR : Association Française de Normalisation

AMMA : Analyse Multidisciplinaire de la Mousson Africaine

ANAMS : Agence Nationale de la Météorologie du Sénégal

ANCAR : Agence Nationale de Conseil Agricole et Rural

APRHN : Agence de Promotion du Réseau Hydrographique National

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

COSEC : Conseil Sénégalais des Chargeurs

DGPRE : Direction de la Gestion et Planification des Ressources en Eau

DTGC : Direction des travaux géographiques et cartographiques

DRDR : Direction Régionale du Développement Rural

ETM : Enhanced Thematic Mapper

GIRMAC: Gestion Intégrée des Ressources Marines et Côtieres

GPS: Global Positioning System

ISRA : Institut Sénégalais de Recherche Agronome

OMVS : Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal

OMM : Organisation Météorologique Mondiale

UCAD : Université Cheikh Anta Diop

IGN : Institut de Géographie National

IRD : Institut de recherche pour le développement

PNLB : Parc National de la Langue de Barbarie

PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement

SIG : Système d'Information géographique

SGPRE : Société de Gestion et de Planification des Ressources en Eau

SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

SOGED : Société de Gestion et d'Exploitation de Diama

UNESCO: United Nations Educational Scientific and Cultural Organizational

UGPAR : Union des Groupements de Producteurs de l’Arrondissement de Rao-Ugoor

Liste des annexes

Annexe 1 : Carte des localités ciblés pour l'enquête

Annexe 2 : Questionnaires et guides d'entretien

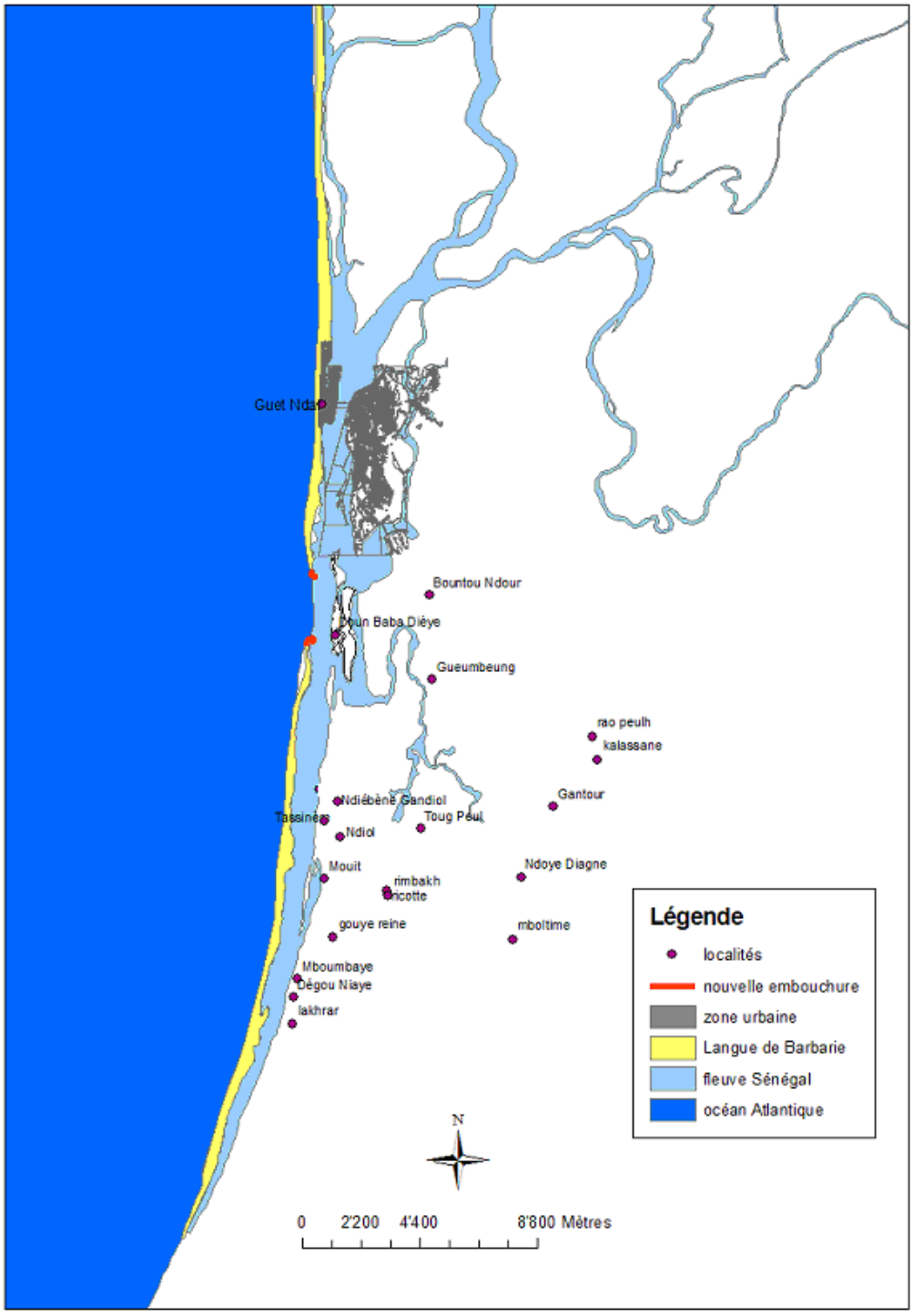
Annexe 3 : Evolution de l'embouchure du fleuve Sénégal depuis le XVIIème siècle

Annexe 4 : Courbes granulométriques

Annexe 5 : Carte des transects des espèces végétales

Annexe 6: Liste des noms d'espèces halieutiques présentes dans le fleuve avant les aménagements

Annexe 1 : Carte des localités ciblés pour l'enquête



Annexe 2

Questionnaire destiné aux maraîchers du Gandiolais

Identification

1- localité :
2- date de l'enquête :
3- nom et prénom :
4- sexe :
5- activité principale :
6- activité secondaire :
7- Age :

Approvisionnement en eau

8- quelle est votre principale source d'approvisionnement en eau ?

□ Camion citerne

□ Forage

□ Autres (Précisez)

9- y a t il des aménagements hydrauliques (liés à l'eau) dans la zone ?

□Oui

□Non

□ NSP

9bis- Si oui lesquels ?

10- quels sont les changements qui ont été observés depuis le barrage de Diama ?

---

10 bis- Depuis la brèche ?

Eaux souterraines

11**-** Quelle est la profondeur de la nappe ?

12- Quelle est la qualité des eaux des nappes ?

□ Douce

□ Saumâtre

□ Salée

13-Quelle utilisation faites-vous de l'eau des nappes ?

14-Avez-vous remarqué un tarissement des nappes ?

□ Oui

□ Non

□ NSP

15- Si oui, depuis quand ?

16- Si oui, en quelle période de l'année ?

□ Saison sèche

□ Saison des pluies

17- Si oui, quelles sont les conséquences sur le déroulement de vos activités ?

---

17 bis- quelle est la quantité d'eau utilisée par jour pour l'arrosage ?

Activités et modifications intervenues

18- quelle est la superficie totale de votre champ ?

---

18 bis- Principales variétés de cultures et rendements

Variétés de culture	Rendement /ha (situation actuelle)	Rendement/ ha (situation avant brèche)	Rendement/ha (situation avant barrage)

19-Votre activité est-elle rentable?

□ Oui

□ Non

20 -Si non, cela est-il lié aux aménagements (barrage, brèche) ?

21- Avez-vous changé ou diversifié vos activités ?

□ Oui

□ Non

21 bis- Si oui pourquoi ?

22- y a t il des champs qui ont été abandonnés à cause de la salinité ?

□ Oui

□ Non

22bis - Si oui, connaissez-vous le nombre ?

23- Avez-vous, parmi vos voisins ou parents qui ont migré depuis l'ouverture de la brèche ?

□ Oui

□ Non

24 - L'ouverture de la brèche vous est-elle bénéfique ?

□ Oui

□ Non

□ NSP

24 bis- Si oui comment ?

25- Pensez-vous que votre activité soit menacée ?

□ Oui

□ Non

25bis- A quelle échelle de temps ?

□ Long terme (plus de 5 ans)

□ Moyen terme (entre 1 et 3 ans)

□ Court terme (1 an)

26- A votre avis y a-t-il une ou des solutions ?

□ Oui

□ Non

□ NSP

27- Si oui, lesquelles ?

28- Avez-vous eu contact avec les autorités sur les éventuels problèmes qu'a engendrés la brèche ?

□ Oui

□ Non

29- Si oui quelles solutions ont été proposées ?

Revenus

30- A combien s'élèvent vos revenus ?

En saison sèche	En saison des pluies
□ Entre 10 000 et 50 000 FCFA	□ Entre 10 000 et 50 000 FCFA
□ Entre 50 000 et 100 000 FCFA	□ Entre 50 000 et 100 000 FCFA
□ Plus de 100 000 FCFA	□ Plus de 100 000 FCFA

31- Avez-vous d’autres sources de revenus ?

□ Oui

□ Non

32- Si oui, lesquelles ?

Questionnaire destiné aux pêcheurs

Identification

1- localité :
2- date de l'enquête :
3- nom et prénom :
4- sexe :
5- activité principale
6- Age :

Modifications intervenues depuis le barrage et la brèche

7- Avez-vous été amené à changer de pirogue suite à la brèche ?

□ Oui

□ Non

8- Depuis la mise en eau du barrage de Diama, qu'est-ce-que vous avez remarqué comme changement ?

8bis- Et depuis l'ouverture de la brèche ?

9- quel est votre avis sur les aménagements (barrage de Diama, brèche) qui sont intervenus sur le fleuve Sénégal ?

10- quel est le lieu de débarquement avant l'ouverture de la brèche ?

11- Le lieu de débarquement actuel ?

12- le changement du régime du fleuve influe t-il sur vos prises ?

□ Oui

□ Non

12bis-Si oui, comment ?

13- Quels sont les zones de pêche ?

□ Fleuve

□ Mer

□ Les deux

Identification des espèces capturées

14- Quelles espèces constituent en général vos prises ?

Aujourd'hui 2002 (avant brèche) (avant barrage)

15bis- Certaines espèces sont-elles devenues abondantes?

□ Oui

□ Non

16- Si oui, lesquelles ?

17-Quelle est la quantité moyenne de vos prises quotidiennes ?

Aujourd'hui 2002 (avant brèche) (avant barrage)

18 a- y a t il des espèces qui ont disparu ?

□ Oui

□ Non

18 b- Si oui lesquelles ?

18c- Espèces en diminution ?

□ Oui

□ Non

18d- Lesquelles ?

19- D'après vous, pourquoi cela s'est-il produit ?

20- Quand est-ce que cette situation s'est-elle produite ?

21-Est-ce-que vous êtes partis vers d'autres destinations depuis l'ouverture de la brèche ?

□ Oui

□ Non

21bis - Si oui, pourquoi ?

22- Avez-vous, parmi vos voisins ou parents qui sont partis ?

□ Oui

□ Non

23- Avez-vous changé ou diversifié vos activités ?

□ Oui

□ Non

23 bis- Si oui pourquoi ?

Revenus

24- Avez-vous d’autres sources de revenus ?

□ Oui

□ Non

26- Si oui, lesquelles ?

Guide d'entretien pour les chefs de village et les propriétaires terriens

1. Ouverture brèche et migration

- ✓ Combien de personnes ont quitté le village depuis l'ouverture de la brèche ?
- ✓ Quelle est la moyenne d'âge de ces personnes ?

2. Système d'exploitation des terres

- ✓ y a-t-il des propriétaires terriens qui font le métayage ?
- ✓ Qui s'occupe de l'exploitation de vos champs vous-même ou les travailleurs saisonniers ?
- ✓ Si ce sont les travailleurs saisonniers, pourquoi ce choix ?
- ✓ A combien s'élève la construction d'un puits ?

Guide d'entretien pour les agents du DRDR et de l'ANCAR

1. Les principales activités dans le Gandiolais

- ✓ Typologie par village

2. Le nombre de maraîchers dans les différentes localités

3. Salinité

- ✓ les zones qui sont affectées par la salinité
- ✓ les actions menées pour lutter contre la salinité

Annexe 3 : Evolution de l'embouchure du fleuve Sénégal (origine du PK0 fixé au Pont Faidherbe)

Année	Distance (Km)	Progression (Km)	Année	Distance (Km)	Progression (Km)	Année	Distance (Km)	Progression (Km)
1658	2.5	0.0	**1867**	16.0	8.0	**1960**	16.7	0.2
1692	20.0	17.5	**1870**	12.0	-4.0	**1960**	18.9	2.2
1707	4.5	-15.5	**1872**	12.4	0.4	**1962**	18.0	-0.9
1717	25.0	20.5	**1872**	10.3	-2.1	**1963**	17.7	-0.3
1720	21.0	-4.0	**1874**	11.5	1.2	**1966**	20.1	2.4
1726	10.0	-11.0	**1874**	13.0	1.5	**1967**	21.3	1.2
1727	3.5	-6.5	**1882**	17.0	4.0	**1968**	22.2	0.9
1738	12.0	8.5	**1883**	17.4	0.4	**1969**	22.5	0.3
1750	22.0	10.0	**1883**	14.0	-3.4	**1969**	22.8	0.3
1780	9.0	-13.0	**1884**	18.3	4.3	**1970**	20.0	-2.8
1790	4.5	-4.5	**1884**	14.4	-3.9	**1971**	24.3	4.3
1801	27.5	23.0	**1887**	12.1	-2.3	**1972**	25.4	1.1
1802	18.0	-9.5	**1889**	15.7	3.6	**1973**	15.0	-10.4
1802	19.0	1.0	**1894**	14.3	-1.4	**1977**	16.3	1.3
1810	6.0	-13.0	**1897**	12.8	-1.5	**1978**	19.6	3.3
1820	7.0	1.0	**1904**	18.3	5.5	**1980**	21.5	1.9
1824	15.0	8.0	**1905**	15.0	-3.3	**1981**	21.8	0.3
1825	14.4	-0.6	**1906**	15.7	0.7	**1983**	21.0	-0.8
1827	30.0	15.6	**1908**	16.5	0.8	**1986**	23.5	2.5
1840	20.0	-10.0	**1909**	20.0	3.5	**1989**	27.5	4.0
1843	17.0	-3.0	**1913**	20.0	0.0	**1990**	28.0	0.5
1846	9.0	-8.0	**1921**	16.0	-4.0	**1992**	25.8	-2.2
1849	16.5	7.5	**1923**	15.0	-1.0	**1998**	27.8	2.0
1849	3.4	-13.1	**1928**	24.2	9.2	**1999**	28.8	1.0
1851	27.5	24.1	**1928**	20.8	-3.4	**2002**	32.0	3.2
1854	4.5	-23.0	**1932**	23.4	2.6	**2003**	7	-25
1855	20.0	15.5	**1936**	15.7	-7.7			
1856	4.5	-15.5	**1936**	23.9	8.2			
1858	3.5	-1.0	**1948**	16.8	-7.1			
1860	5.0	1.5	**1950**	25.5	8.7			
1861	10.9	5.9	**1955**	25.5	0.0			
1862	8.5	-2.4	**1958**	27.0	1.5			
1863	2.5	-6.0	**1958**	27.0	0.0			
1864	6.0	3.5	**1959**	27.0	0.0			
1865	8.0	2.0	**1959**	16.5	-10.5			

Annexe 4 : Quelques courbes granulométriques (2005)

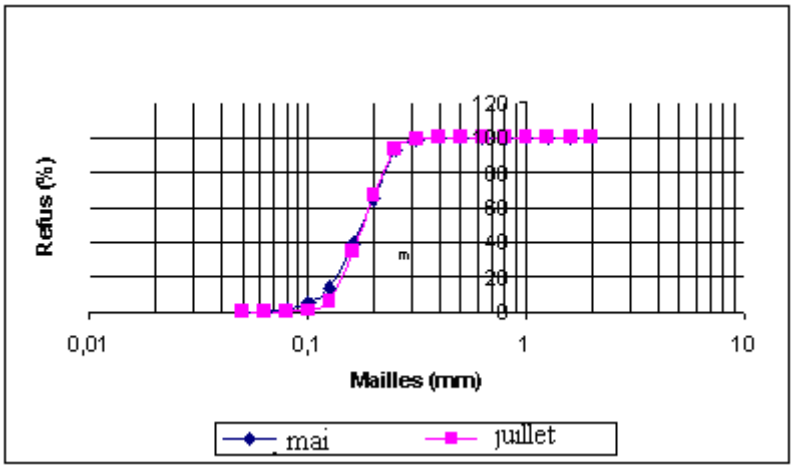


Figure 1: Courbes granulométriques de la dune du profil 1

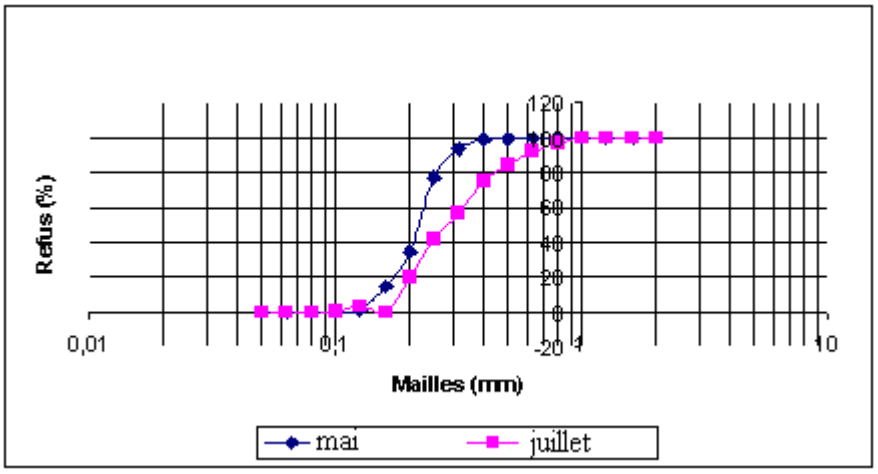


Figure 2: Courbes granulométriques de la berme du profil 1

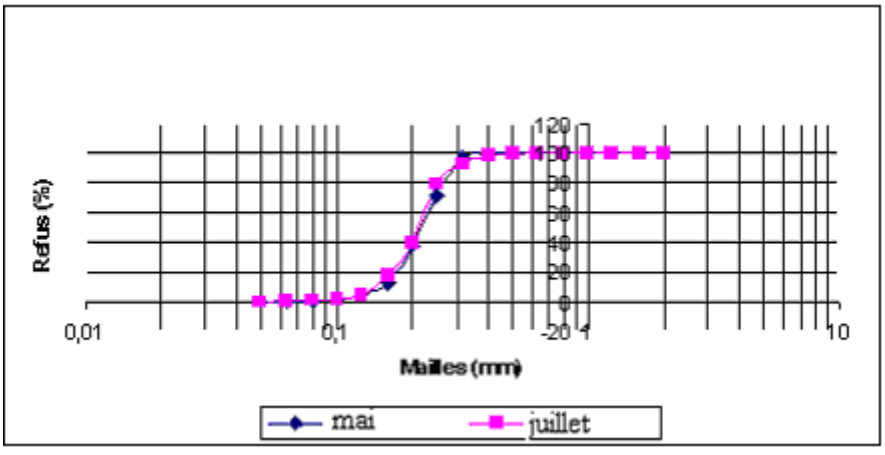


Figure 3: Courbes granulométriques de la dune du profil 2

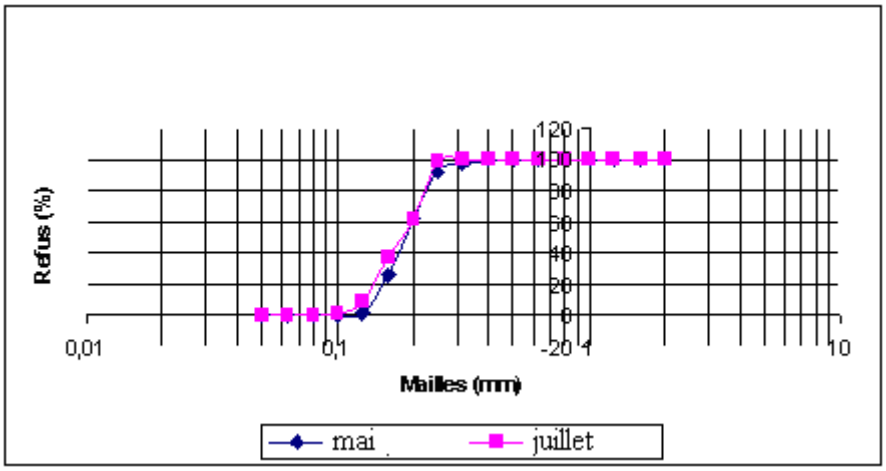


Figure 4: Courbes granulométriques de la berme du profil 2 (2006)

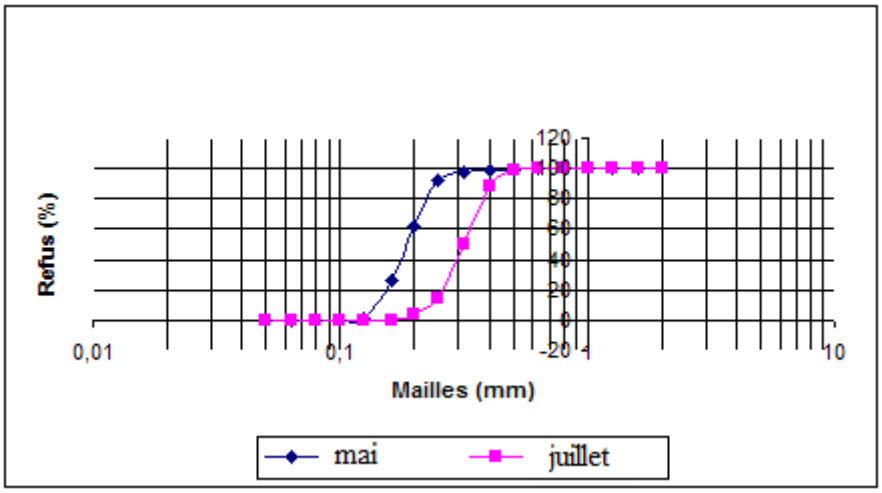


Figure 5: Courbes granulométriques du jet de rive du profil 2 (2006)

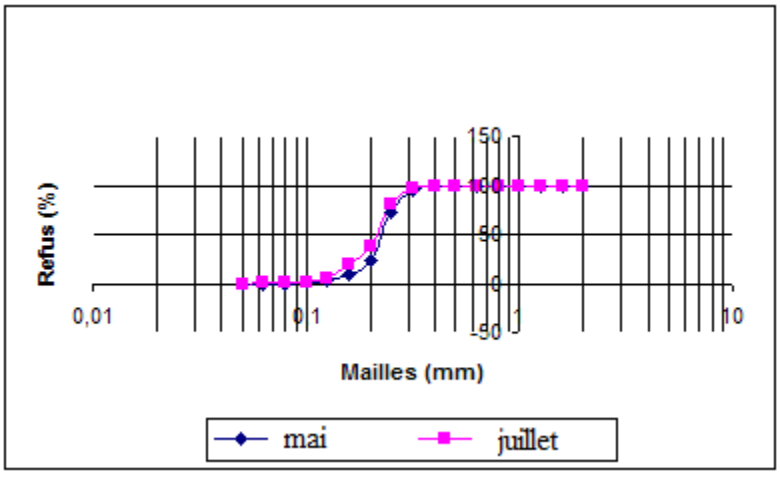


Figure 6: Courbes granulométriques de la dune du profil 3

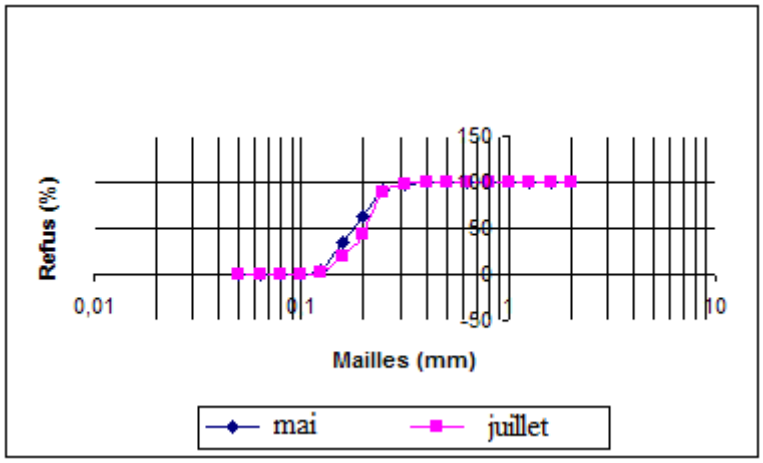


Figure 7: Courbes granulométriques de la berme du profil 3

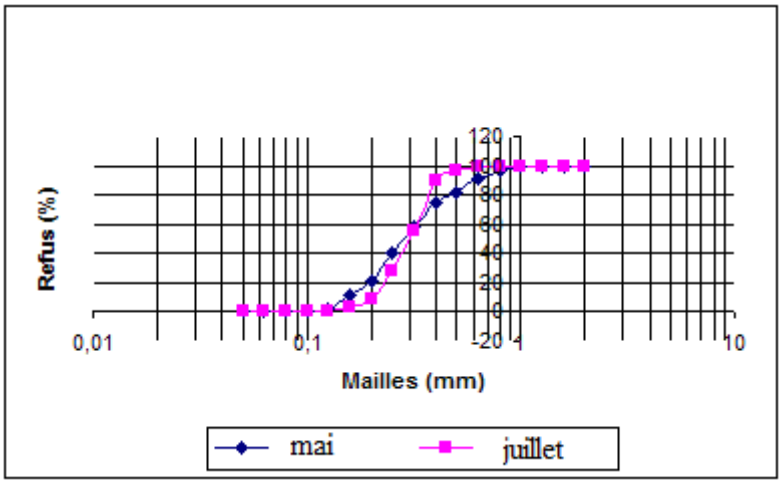


Figure 8 : Courbes granulométriques du jet de rive du profil 3

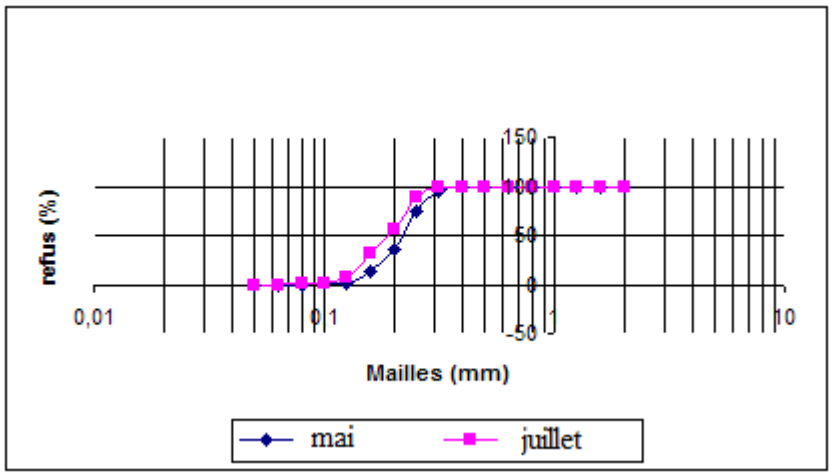


Figure 9 : Courbes granulométriques de dune du profil 4 (brèche nord)

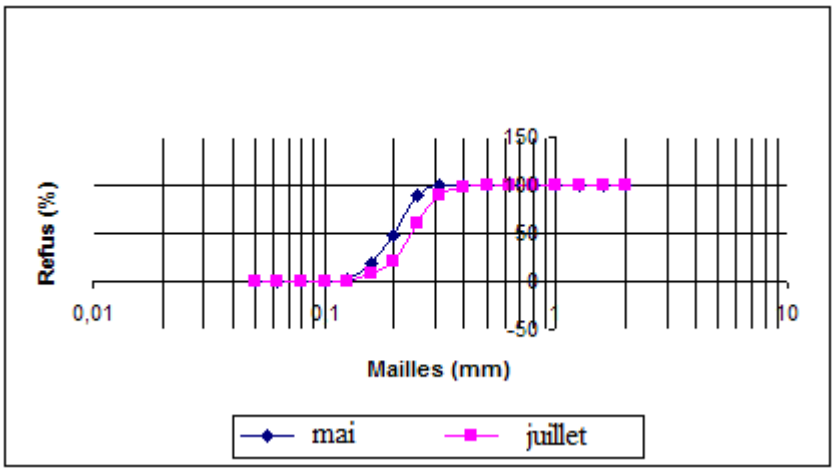


Figure 10 : Courbes granulométriques de la berme du profil 4

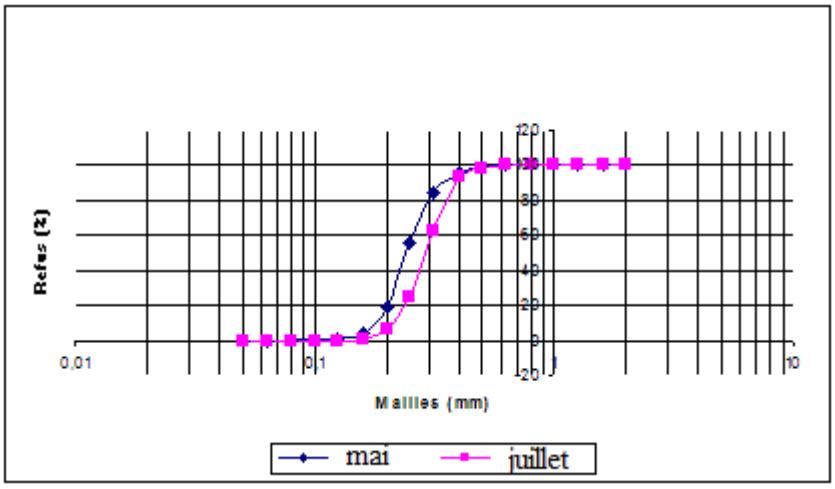


Figure 11: Courbes granulométriques du jet de rive du profil 4

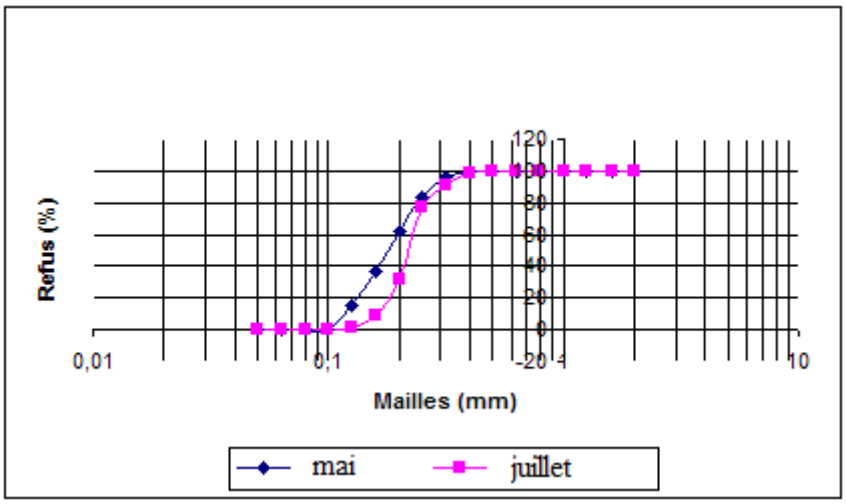


Figure 12 : Courbes granulométriques de la dune du profil 7 (brèche sud)

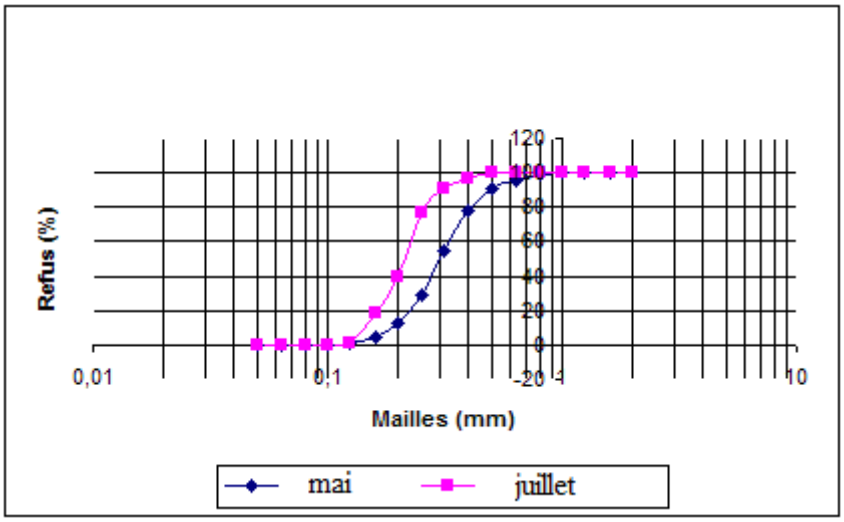


Figure 13 : Courbes granulométriques de la berme profil 7 (brèche sud)

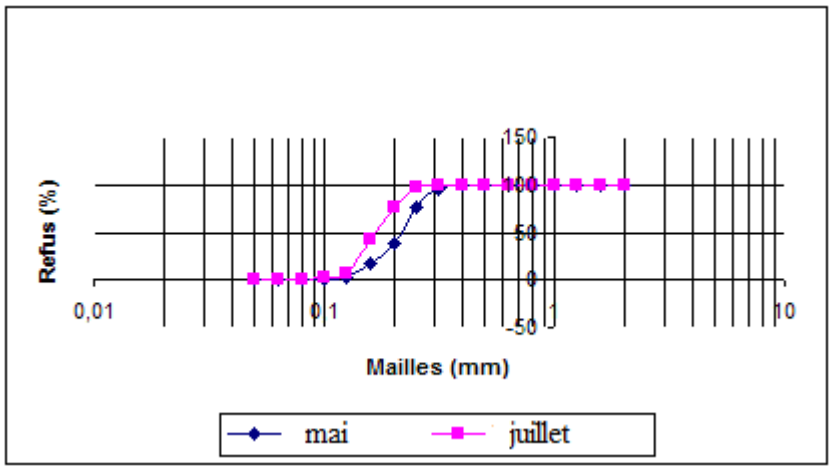


Figure 14 : Courbes granulométriques de la dune du profil 8 (brèche sud)

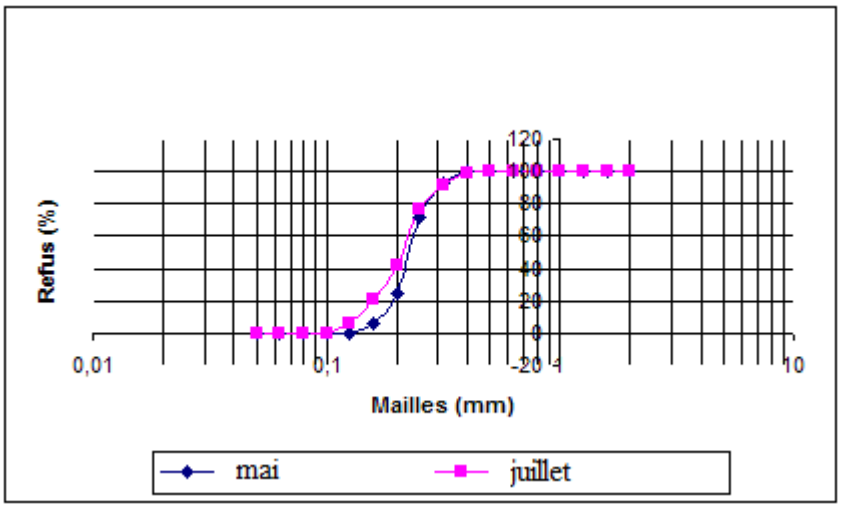


Figure 15 : Courbes granulométriques de la berme du profil 8 (brèche sud)

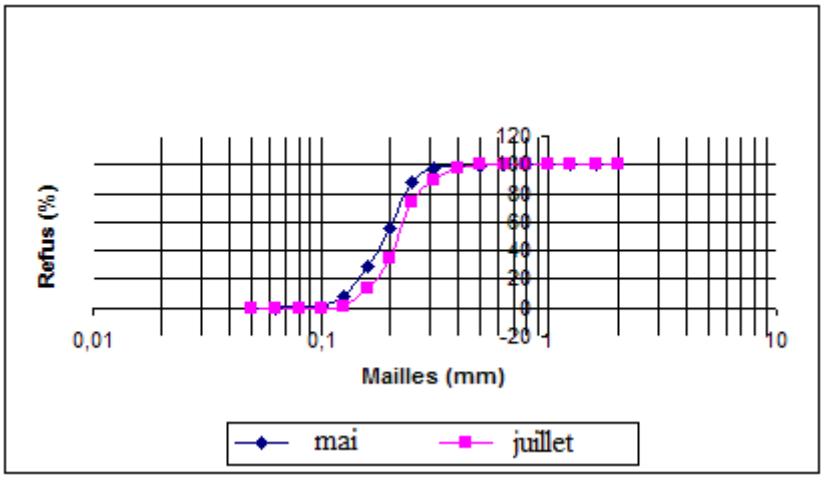


Figure 16 : Courbes granulométriques de la dune du profil 9 (brèche sud)

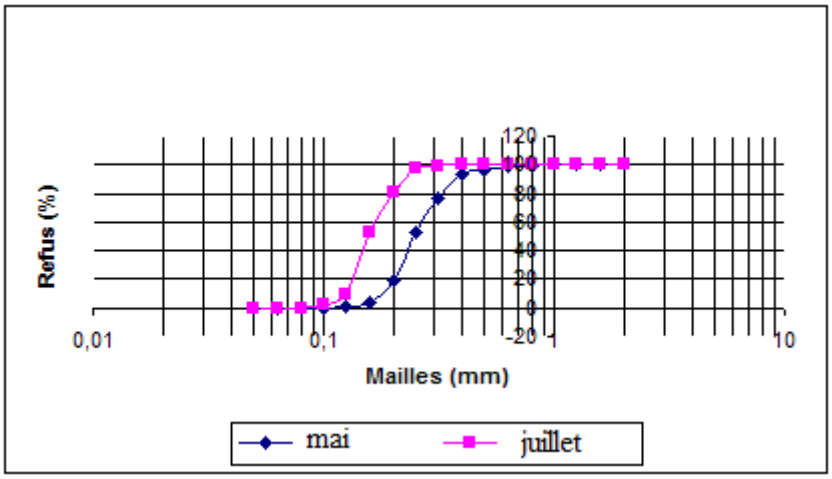


Figure 17 : Courbes granulométriques du jet de rive du profil 9 (brèche sud)

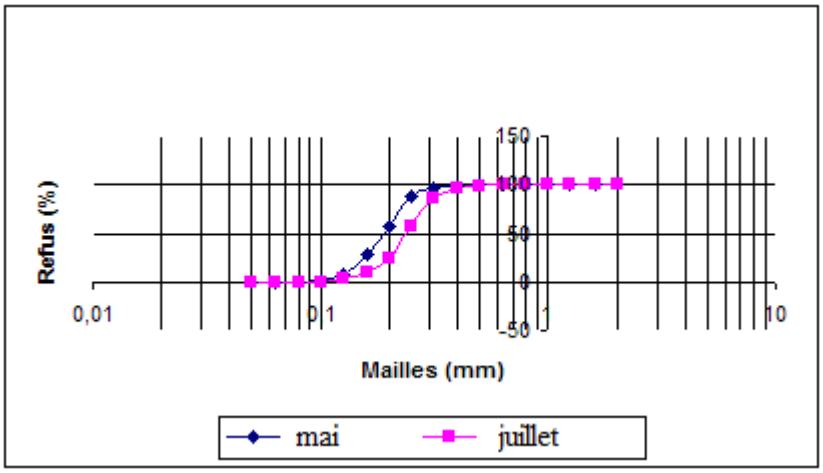


Figure 18 : Courbes granulométriques de la dune du profil 10 (brèche sud)

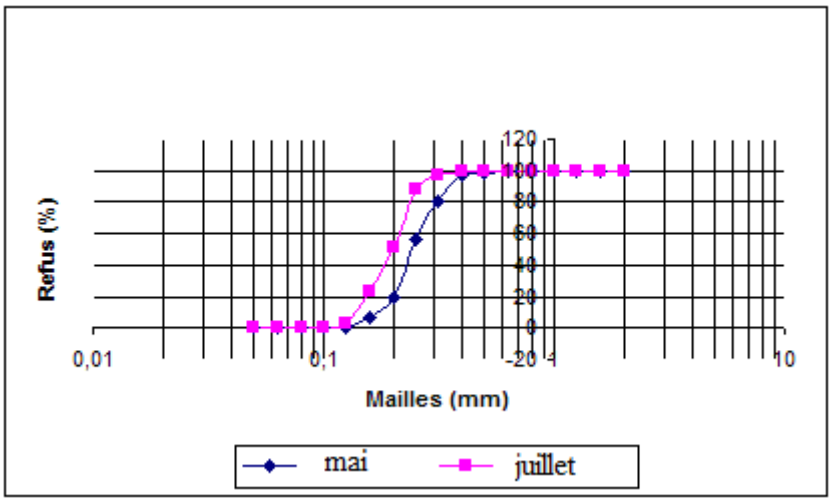
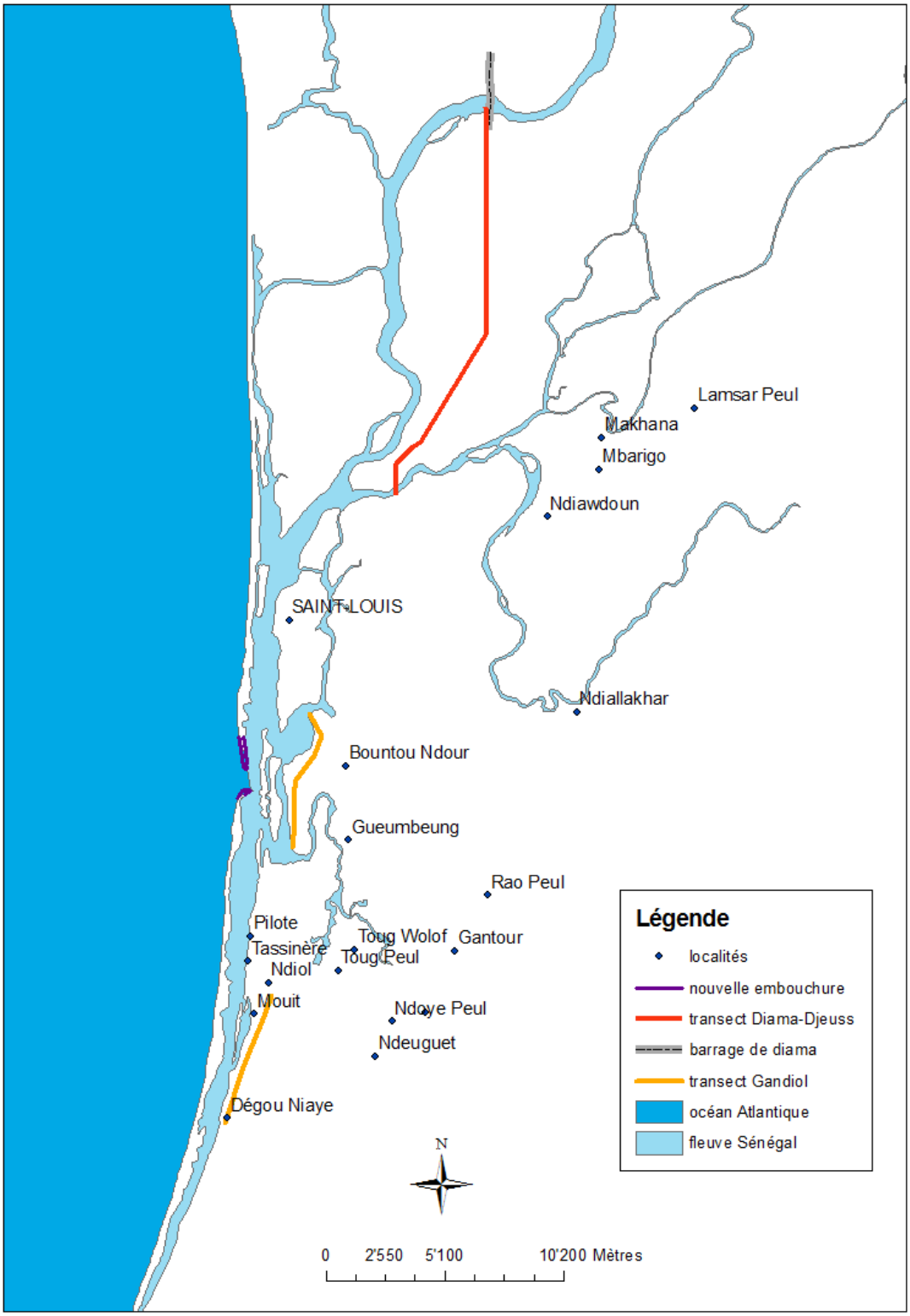


Figure 19 : Courbes granulométriques de la berme du profil 10 (brèche sud)

Annexe 5 : Carte des transects des espèces végétales



Annexe 6 : Liste des espèces halieutiques présentes dans le fleuve avant les aménagements

Nom scientifique	Nom français
Liza falcipinnis	Mulet
Etmalosa fimbriata	Etmaloes
Ctenopoma kingsleyae	
Spyrna piscatorum	
Penttanemus	Capitaine
Elops senegalensis	Elops du senegal
Pseudolithus typus	Otolithe nain
Rhinobatos rhinobatos	Raie guitare
Sardinella aurita	Sardinelle ronde
Sardinella maderensis	Sardinelle plate
Sarotherodon melanotheron	
Tilapia spp	Tilapia
Pomadasys jubelini	Sompatt
Cephalopholis taeniops	Mérou à points bleus
Sardinella	
Cynoglossus senegalensis	Sole
Epinephelus gigas	Merou medirerran
Arius latisculatus	Machoiron
Chrysichthys maurus	Poisson chat
Lichie amia	Liche amie
Brycinus nurse	
Trichurus lepturus	Ceinture
Caranx carangus	Grande carangue
Malalepteurusus electricus	Poisson electrique
Plexiglas	Galéoidès décadactilus
Epiniphelus caninus	Mérou gris
Epinephelus gigas	Mérou medirerran
Mormyrus hasselquistii	Mormure
Labeo senegalensis	
Decapterus ronchus	Chinchard jaune
Trachurus trecae	Chinchard noir
Citharinus citharus	Poisson disque
Diplodus Spp	Sar
Alestes dentex	Aleste
Clarias anguillaris	Silure
Fistularia tabbaccaria	Poisson trompette
Chloroscombrus chrysurus	Petite carangue