

PAS-PNA

SENEGAL

**Evaluation de la vulnérabilité du secteur de la zone  
côtière à la variabilité et aux changements  
climatiques dans la région de Fatick**

Secteur : Zone Côtière


Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation.

Janvier 2019

Mis en oeuvre par :

**giz** Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Mandaté par :

 Ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la Nature  
et de la Sécurité nucléaire

de la République fédérale d'Allemagne

Sous la tutelle de :

  
République du Sénégal  
Union pour le Développement  
et la Prospérité  
Ministère de l'Environnement et du  
Développement Durable  
(MEECD)



En coopération avec :

CLIMATE  
ANALYTICS

## AUTEURS

Mamadou Sadio	Aïchetou Seck
Ibrahima Camara	Méline Noblet

Avec la contribution des membres du consortium de recherche du secteur de la zone côtière.  
Avec la participation de Sokhna Diarra Mboup.

Remerciements à l'équipe de recherche de AMMA2050 pour sa contribution et la mise à disposition des données ainsi que l'ensemble des membres du consortium qui ont facilité la mise à disposition des données nécessaires à l'étude.

Cette publication a été développée dans le cadre de la Composante 2, Activité II.3 du Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne (PAS-PNA).

Cette publication peut être reproduite en tout ou partie, sous quelque forme que ce soit, à des fins pédagogiques et non lucratives, sur autorisation spéciale de Climate Analytics, à condition que sa source soit mentionnée et référencée.

Cette publication ne peut être revendue ou utilisée à des fins commerciales sans autorisation écrite préalable de Climate Analytics.

Nous regrettons toutes erreurs ou omissions qui auraient été commises involontairement.

Ce document peut être cité sous le titre :

SADIO M., SECK A., NOBLET M., CAMARA I., 2019. Evaluation de la vulnérabilité du secteur de la zone côtière à la variabilité et aux changements climatiques dans la région de Fatick. Report produced under the project "Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne", Climate Analytics gGmbH, Berlin.

Une copie numérique de ce rapport est disponible en ligne sur :  
[www.climateanalytics.org/publications](http://www.climateanalytics.org/publications).

Cette étude est financée dans le cadre du Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne, relevant de l'Initiative Internationale pour le Climat (IKI) soutenue par le Ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la Nature et de la Sécurité Nucléaire (BMU) en vertu d'une décision du Parlement de la République fédérale d'Allemagne, et mis en oeuvre par Climate Analytics et la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

## Résumé

Les effets des changements climatiques sont parmi les défis actuels auxquels l'humanité doit faire face. L'Afrique de l'Ouest, l'une des régions les plus affectées et particulièrement la zone du Sahel, expérimente déjà un réchauffement des températures de 2°C depuis 1950, une forte variabilité des précipitations et une intensification des phénomènes extrêmes. Ainsi, les secteurs clés de l'économie et du développement notamment l'agriculture, l'environnement, les ressources en eau, sont menacés. Depuis 2015, le Sénégal s'est engagé dans le processus de réalisation de son Plan National d'Adaptation (PNA) et bénéficie pour la période 2016-2019 du Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation (PAS-PNA). Dans le cadre de la composante 2 du PAS-PNA, des études de vulnérabilité sont menées avec pour objectif d'évaluer la vulnérabilité actuelle et future de différents secteurs d'activités dont la zone côtière pour la région de Fatick et d'identifier les options d'adaptations adéquates aux horizons 2035 et 2050.

L'étude de vulnérabilité de la zone côtière s'appuie sur une démarche participative ainsi que sur le calcul de l'Indice Côtier de Vulnérabilité (ICV) de Thieler et Hammar-Klose (1999) qui prend en compte les variables suivantes : la géomorphologie ; l'érosion/accrétion de la ligne du rivage ; la pente de la côte ; la remontée relative du niveau de la mer ; la hauteur moyenne des houles ; l'amplitude moyenne de la marée.

L'évaluation de la vulnérabilité actuelle montre que le littoral du Delta du Saloum est particulièrement sensible aux aléas climatiques et aux phénomènes naturels telle que l'érosion. Un événement extrême majeur est venu perturber cet écosystème en 1987 de manière permanente. La brèche, ainsi provoquée par cette tempête, s'est élargie au fil du temps et vient maintenant exposer les villages des îles aux assauts de l'océan et notamment au phénomène d'érosion.

Les résultats de la vulnérabilité future font état d'une accélération attendue de l'élévation du niveau de la mer aux horizons 2035 et 2050 (environ 50 cm en 2050), le littoral sera plus exposé aux risques d'événements extrêmes météo-marins, aux submersions marines, à l'érosion et aux destructions d'infrastructures. A l'horizon 2050, le taux moyen d'érosion dans la zone sera de 8,65 m par an. Le calcul de l'ICV indique que le littoral du Delta du Saloum sera globalement très vulnérable en particulier pour la zone située entre Ngalou Sessene à le Sud de Niodior qui se trouvent être des zones habitées. Par conséquent, la région de Fatick pourrait voir sa sensibilité aux changements climatiques s'accroître avec l'intensification des aléas climatiques ; l'exacerbation du recul du trait de côte et des phénomènes d'inondation en lien avec l'élévation du niveau marin ; la destruction des infrastructures socio-économiques et la perte d'établissements humains. Les options d'adaptation adéquates identifiées mettent l'accent sur l'adoption de méthodes douces comme le repli stratégique ou la relocalisation des biens et des établissements humains, la recharge artificielle des plages, ou la fixation des dunes. Les solutions rigides comme la construction d'ouvrages de protection bien qu'étant envisageables doivent être cependant davantage étudiées en tenant compte d'un certain nombre de paramètres comme la sensibilité du site, le coût, l'impact sur la dynamique du littoral et sa durabilité face aux impacts futurs des changements climatiques.

## Table des matières

<b>Résumé .....</b>	<b>1</b>
<b>Liste des acronymes .....</b>	<b>4</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>5</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>8</b>
<b>1 Contexte .....</b>	<b>9</b>
<b>2 Périmètre de l'étude de vulnérabilité .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 Zone d'étude : le Delta du Saloum/région de Fatick .....</b>	<b>11</b>
2.1.1 Position géographique .....	11
2.1.2 Climat.....	12
2.1.3 Situation sociodémographique .....	12
2.1.4 Situation socio-économique .....	14
2.1.5 Zones d'étude spécifique .....	16
<b>3 Approche générale d'évaluation de la vulnérabilité.....</b>	<b>17</b>
<b>4 Etude de vulnérabilité actuelle .....</b>	<b>20</b>
<b>4.1 Méthodologie .....</b>	<b>20</b>
4.1.1 Constitution de la base de données .....	21
4.1.2 Classement des données .....	27
4.1.3 Calcul de l'indice.....	28
4.1.4 Méthodologie pour l'analyse des perceptions sociales des communautés côtières.....	29
<b>4.2 Résultats .....</b>	<b>29</b>
4.2.1 Profil socio-écologique de la zone d'étude .....	29
4.2.2 Exposition.....	30
4.2.3 Sensibilité.....	31
4.2.4 Évaluation de la capacité d'adaptation.....	69
4.2.5 Synthèse de l'évaluation de la vulnérabilité actuelle .....	72
<b>5 Etude la vulnérabilité future .....</b>	<b>73</b>
<b>5.1 Méthodologie .....</b>	<b>73</b>
5.1.1 Évaluation de l'érosion côtière.....	74
5.1.2 Évaluation du niveau d'inondation.....	74
5.1.3 Estimation des zones à risque de submersion marine et impacts socio-économiques .....	75
5.1.4 Les variables adaptées au calcul de l'ICV pour le futur .....	75
5.1.5 L'indice côtier de vulnérabilité (ICV).....	75
<b>5.2 Résultats .....</b>	<b>76</b>
5.2.1 Exposition.....	76
5.2.2 Sensibilité.....	79
5.2.3 Capacité d'adaptation.....	88
5.2.4 Synthèse de l'évaluation de la vulnérabilité future .....	90
<b>6 Identification des options d'adaptation .....</b>	<b>93</b>
<b>6.1 Synthèse des options d'adaptation identifiées dans la région de Fatick .....</b>	<b>93</b>

<b>6.2</b>	<b>Options d'adaptation préconisées par l'étude de vulnérabilité du PAS-PNA .....</b>	<b>95</b>
<b>7</b>	<b><i>Conclusion et recommandations</i>.....</b>	<b>100</b>
<b>8</b>	<b><i>Références</i> .....</b>	<b>101</b>
<b>9</b>	<b><i>Annexes</i> .....</b>	<b>109</b>

## Liste des acronymes

ANSD : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie  
CNES : Centre National d'Etudes Spatiales  
CPDN : Contribution Prévue Déterminée au niveau National  
CVI : Coastal Vulnerability Index  
DGPS : Differential Global Positioning System  
DSAS : Digital Shoreline Analysis  
ENM : Elévation du Niveau Marin  
EPEEC : Equipe Pluridisciplinaire d'Etude des Ecosystèmes Côtiers  
FIOD : Fédération Inter-villageoise des Organisations pour le Développement durable  
GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat  
ICV : Indice Côtier de Vulnérabilité  
IGN : Institut Géographique National  
LRR : Linear Regression Rate  
MHWL : Mean High Water Level  
MNT : Modèle Numérique de Terrain  
MRI-CGCM3 : Meteorological Research Institute Coupled Global Climate Model Version Three  
OMD : Objectifs du Millénaire pour le Développement  
ONG : Organisation Non Gouvernementale  
PAGERNA : Projet Autopromotion et Gestion des Ressources Naturelles au Sine Saloum  
PAS : Projet d'Appui Scientifique  
PMA : Pays les Moins Avancés  
PNA : Plans Nationaux d'Adaptation  
RBDS : Réserve de Biosphère du Delta du Saloum  
RCP : Representative Concentration Pathway  
RGPHAE : Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage  
RMS : Root Mean Square  
RVB : Rouge Vert Bleu  
SIG : Système d'Information Géographique  
SOGREAH : Société Grenobloise d'Etudes et d'Applications Hydrauliques  
UHSLC : University of Hawaii, Sea Level Center  
UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature  
USGS : United States Geological Survey  
UTM : Universal Transverse Mercator  
WAAME : West African Association for Marine Environment  
WGS : World Geodetic System

## Liste des figures

<b>Figure 1</b> : Localisation de la région de Fatick (source : gouvernement du Sénégal).....	11
<b>Figure 2</b> : Taux de croissance de la population et de la densité de la région de Fatick de 2005 à 2014 (en %). Source : PAS-PNA à partir des données de SES Fatick 2005-2006-2007-2008-2010-2011-2012-2013-2014 .....	12
<b>Figure 3</b> : Evolution du taux brut de scolarisation en élémentaire dans la région de Fatick de 2005 à 2014. Source : PAS-PNA à partir des données de SES Fatick 2005-2006-2007-2008-2010-2011-2012-2013-2014 .....	13
<b>Figure 4</b> : Principales activités dans la région de Fatick. Source : PAS-PNA à partir des données de SES Fatick 2014 .....	15
<b>Figure 5</b> : Evolution de l'incidence de la pauvreté dans la région de Fatick de 1992 à 2011. Source : PAS-PNA à partir des données de SES Fatick 2005 et ESPS II .....	16
<b>Figure 6</b> : Localisation des sites d'étude à l'intérieur de la région de Fatick (source : A. Seck, UCAD)	17
<b>Figure 7</b> : Approche combinée locale et globale pour gérer les impacts des changements climatiques (adapté de Dessai and Hulme (2004)).....	18
<b>Figure 8</b> : Déterminants actuels et futurs de la vulnérabilité à la variabilité climatique et aux changements climatiques (traduit (traduction libre de CA) de Assessing Adaptation Knowledge in Europe: Vulnerability to Climate Change, 2017) .....	19
<b>Figure 9</b> : Chaîne d'impacts selon AR4 du GIEC (Climate Analytics).....	20
<b>Figure 10</b> : Maillage adopté.....	24
<b>Figure 11</b> : Présentation des segments côtiers .....	32
<b>Figure 12</b> : Dynamique de la ligne du rivage avant l'ouverture de la brèche (de 1954 à 1987).....	34
<b>Figure 13</b> : Dynamique de la ligne du rivage après l'ouverture de la brèche (de 1987 à 2018).....	35
<b>Figure 14</b> : Dynamique de la ligne du rivage sur l'ensemble de la période (de 1954 à 2018).....	36
<b>Figure 15</b> : Elargissement de la brèche entre 1987 et 2018.....	36
<b>Figure 16</b> : Analyse surfacique entre 1954 et 1987 .....	37
<b>Figure 17</b> : Analyse surfacique entre 1987 et 2018 .....	38
<b>Figure 18</b> : Topo-bathymétrie côtière de la pointe Djiffère .....	39
<b>Figure 19</b> : Topo-bathymétrie côtière du Nord de Djiffère .....	40
<b>Figure 20</b> : Topo-bathymétrie côtière de Diakhanor .....	40
<b>Figure 21</b> : Topo-bathymétrie côtière de Plamarin .....	41
<b>Figure 22</b> : Topo-bathymétrie côtière de Nguedj .....	42
<b>Figure 23</b> : Topo-bathymétrie côtière de Ngalou Sessene .....	42
<b>Figure 24</b> : Topo-bathymétrie côtière de Ngalou Sam Sam .....	43
<b>Figure 25</b> : Topo-bathymétrie côtière du sous-segment 1 au droit de Niodior .....	43
<b>Figure 26</b> : Topo-bathymétrie côtière du sous-segment 2 au droit de Niodior .....	44
<b>Figure 27</b> : Topo-bathymétrie côtière du sous-segment 3 au droit de Niodior .....	45
<b>Figure 28</b> : Topo-bathymétrie côtière du sous-segment 4 au droit de Niodior .....	45
<b>Figure 29</b> : Topo-bathymétrie côtière du sous-segment 5 au droit de Niodior .....	46
<b>Figure 30</b> : Pente côtière sur la pointe Pointe Djiffère .....	47
<b>Figure 31</b> : Pente côtière à Diakhanor .....	47
<b>Figure 32</b> : Pente côtière à Palmarin.....	48
<b>Figure 33</b> : Pente côtière à Nguedj .....	49
<b>Figure 34</b> : Pente côtière à Ngalou Sessene .....	49

<b>Figure 35</b> : Pente côtière Ngalou Sam Sam .....	50
<b>Figure 36</b> : Pente côtière du sous-segment 1 au droit de Niodior.....	51
<b>Figure 37</b> : Pente côtière du sous-segment 2 au droit de Niodior.....	51
<b>Figure 38</b> : Pente côtière du sous-segment 3 au droit de Niodior.....	52
<b>Figure 39</b> : Pente côtière du sous-segment 4 au droit de Niodior.....	53
<b>Figure 40</b> : Pente côtière du sous-segment 5 au droit de Niodior.....	53
<b>Figure 41</b> : Pente côtière du sous-segment 1 au droit de l'île Guior .....	54
<b>Figure 42</b> : Remontée relative du niveau de la mer à partir des données marégraphiques de la station de Dakar (de 1996 à 2017) .....	55
<b>Figure 43</b> : Remontée relative du niveau de la mer à partir de données altimétriques (de 1993 à 2016) .....	55
<b>Figure 44</b> : Hauteurs significatives moyennes de la houle entre 2010 et 2015 .....	56
<b>Figure 45</b> : Indice côtier de vulnérabilité du littoral du delta du Saloum .....	58
<b>Figure 46</b> : Linéaire côtier dans chaque catégorie de vulnérabilité .....	59
<b>Figure 47</b> : Pourcentage de linéaire côtier dans chaque catégorie de vulnérabilité .....	59
<b>Figure 48</b> : Etat de la mangrove en 1965 (Sow, 2018) .....	62
<b>Figure 49</b> : Etat de la mangrove en 2017 (Sow, 2018) .....	62
<b>Figure 50</b> : Taux de salinité des eaux de surface dans le delta du Sine-Saloum.....	63
<b>Figure 51</b> : Dynamique de la mangrove entre 1965 et 2017 (Sow, 2018) .....	64
<b>Figure 52</b> : Occupation du sol et exposition.....	65
<b>Figure 53</b> : Chaîne d'impacts vulnérabilité actuelle.....	72
<b>Figure 54</b> : Évolution de l'indice de pluie standardisé de l'historique (noire), de l'observation (magenta), du scénario rcp4.5 (bleue) et du scénario rcp8.5 (rouge). Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles cmip5.....	77
<b>Figure 55</b> : Evolution de la moyenne mobile sur 5ans du début de la saison des pluies et de la longueur de la saison des pluies de l'historique (noire), du scénario rcp4.5 (bleue) et du scénario rcp8.5 (rouge). Le trait noir oblique montre la tendance de l'historique. Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles cmip5 du tableau 1. ....	77
<b>Figure 56</b> : Évolution de la moyenne mobile sur 5ans de la température maximale de l'historique (noire), du scénario rcp4.5 (bleue) et du scénario rcp8.5 (rouge). Le trait noir fin horizontal donne la valeur de la température maximale de la période de référence. Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles.....	78
<b>Figure 57</b> : ICV horizon 2035 scénario RCP4.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 25 cm .....	79
<b>Figure 58</b> : ICV horizon 2050 scénario RCP4.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 50 cm.....	81
<b>Figure 59</b> : ICV horizon 2050 scénario de Hs maximale de houles + ENM de 50 cm.....	82
<b>Figure 60</b> : Croisement de l'ICV scénario RCP4.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 25 cm et de la carte d'occupation du sol .....	83
<b>Figure 61</b> : Croisement de l'ICV scénario RCP4.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 50 cm et de la carte d'occupation du sol .....	84
<b>Figure 62</b> : Croisement de l'ICV scénario de Hs maximale de houle + ENM de 50 cm et de la carte d'occupation du .....	85
<b>Figure 63</b> : Recul de la ligne du rivage dû à l'élévation du niveau marin aux l'horizon 2050 .....	86
<b>Figure 64</b> : Chaîne d'impact.....	92
<b>Figure 65</b> : Options d'adaptation à l'horizon 2035(scénarios RCP4.5 et RCP8.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 25 cm).....	97



**Figure 66:** Option d'adaptation à l'horizon 2050 (scénarios RCP4.5 et RCP8.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 50 cm)..... 98

**Figure 67:** Options d'adaptation à l'horizon 20150 (scénario Hs maximale + ENM de 50 cm) ..... 99

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1</b> : Evolution du nombre de structures sanitaires dans la région de Fatick.....	13
<b>Tableau 2</b> : Incertitude sur le taux d'évolution de la ligne du rivage (en mètre).....	23
<b>Tableau 3</b> : Les Cinq niveaux des six variables de la classification côtière faite par l'USGS sur la côte Atlantique des Etas-Unis (Thieler et Hammar-Klose, 2000a) .....	28
<b>Tableau 4</b> : Echelle de classification de la variable Géomorphologie (THIELER and HAMMAR-KLOSE, 2000a) .....	33
<b>Tableau 5</b> : Classement de l'Indice Côtier de Vulnérabilité en fonction des segments.....	57
<b>Tableau 6</b> : Variables adaptée au calcul de l'ICV pour le futur .....	75
<b>Tableau 7</b> : Changement absolu moyen du cumul pluviométrique, du début et de la longueur de la saison des pluies pour les horizons 2035 et 2050 des deux scénarios (rcp4.5 et rcp8.5). Les valeurs entre parenthèses indiquent le nombre de simulations ayant entraîné le changement .....	76
<b>Tableau 8</b> : Changement absolu moyen des températures maximales et minimales pour les horizons 2035 et 2050 des deux scénarios (rcp4.5 et rcp8.5). Toutes les simulations montrent une augmentation. ....	78
<b>Tableau 9</b> : Synthèse des mesures d'adaptation identifiées dans le Delta du Saloum .....	93
<b>Tableau 10</b> : Options d'adaptation en fonction des vulnérabilités.....	95

## 1 Contexte

Selon le dernier rapport du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), l'essentiel de l'accroissement de la température moyenne globale observé depuis le milieu du 20ème siècle est très probablement dû à l'augmentation observée des concentrations de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique (GIEC, 2014). Toutes les projections futures du climat global (futur proche et lointain) prévoient une intensification du réchauffement moyen, une variabilité des précipitations et aussi une plus grande fréquence et une intensification des phénomènes extrêmes (GIEC, 2014).

Les impacts de cette variabilité climatique varient d'une région du globe à une autre avec des conséquences socio-économiques particulièrement importantes dans les pays en développement (Sultan, 2015). En Afrique, une augmentation de la magnitude et de la fréquence des événements extrêmes est anticipée (Nangombe, 2018). Parmi les zones les plus affectées figure l'Afrique de l'Ouest (Dilley et al., 2005 ; GIEC, 2014), où les secteurs clés de développement des pays sahéliens, notamment l'environnement, l'agriculture et les ressources en eau sont considérés comme particulièrement vulnérables aux changements climatiques qui vont s'accompagner de nouveaux régimes de pluies (Salack, 2016). Le faux départ et l'arrêt précoce de la saison des pluies, l'intensification de la fréquence des averses quotidiennes, l'augmentation du nombre de nuits et de journées chaudes ainsi qu'une tendance à la baisse dans la variation de la température journalière menacent la sécurité alimentaire dans la région (Salack, 2016).

L'année 2017 a été la troisième année la plus chaude jamais enregistrée sur les terres continentales africaines depuis 1950, après 2010 (année la plus chaude) et 2016 (2ème année la plus chaude) (ACMAD, 2017). Au cours des neuf premiers mois de 2017, la température moyenne sur le continent était supérieure de 1.20°C à la moyenne de 1961-1990 (en comparaison, la température était de 1.41°C supérieure à la moyenne en 2010 et de 1.26°C en 2016) (ACMAD, 2017). L'Afrique de l'Ouest expérimente déjà un réchauffement des températures de 1°C depuis 1950 (Morice et al, 2012). Dans le cas du Sahel, le réchauffement moyen depuis 1950 est encore plus élevé pendant la saison du printemps (plus de 2°C) (Guichard et al, 2015 ; Barbier, 2018).

Pour le futur, le réchauffement des températures pour l'Afrique de l'Ouest est estimé à 3°C dans le cadre du scénario RCP4.5 et à 6°C dans le cadre du scénario RCP8.5 à l'horizon 2100. Cela représente un réchauffement 10% à 60% supérieur au réchauffement global moyen de la planète (Deme et al, 2015). Durant ces dernières années, le continent a expérimenté des vagues de chaleur plus longues et plus intenses que durant les deux dernières décennies du 20ème siècle (Russo, 2016). Par ailleurs, 50% des projections climatiques régionales suggèrent que ces vagues de chaleur, qui sont inhabituelles dans les conditions climatiques actuelles, seront plus régulières d'ici à 2040 voire plus sévères sous le scénario RCP8.5 (Russo, 2016). Concernant les précipitations, de nombreuses incertitudes subsistent pour la région. Toutefois, une diminution des précipitations est attendue dans le Sahel ouest tandis que le Sahel est devrait connaître une augmentation des précipitations (Deme et al. 2015).

Au Sénégal, les impacts du réchauffement climatique global présentent des risques sérieux pour l'agriculture (qui est principalement pluviale), pour les ressources en eau et pour les zones côtières qui sont déjà fragiles. Ces trois secteurs occupent une place importante dans l'économie nationale du pays et leur sensibilité aux impacts des changements climatiques risque de remettre en question les objectifs du Plan Sénégal Emergent (CPDN, 2015).

Le Sénégal s'est engagé depuis 2015 dans le processus de réalisation de son Plan National d'Adaptation (PNA) et bénéficie pour la période 2016-2019 du Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans

Nationaux d'Adaptation (PAS-PNA) financé par le Ministère fédéral allemand de l'Environnement, de la Protection de la Nature et la Sûreté Nucléaire (BMU), et mis en œuvre par la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) en collaboration avec Climate Analytics. Selon les Directives techniques du Groupe d'experts des pays les moins avancés (PMA), le processus PNA doit dorénavant reposer sur des connaissances scientifiques solides (CCNUCC, 2012).

La composante 2 du PAS-PNA envisage de répondre à ce défi par le renforcement des capacités scientifiques pour la planification et la programmation de mesures d'adaptation. Plus spécifiquement, il s'agit de réaliser trois études de vulnérabilité, soit une étude pour chaque secteur identifié : agriculture, ressources en eau et zones côtières dans une démarche de renforcement de la capacité.

#### ***Encadré 1 : Le processus de renforcement de capacité scientifique du PAS-PNA***

Le renforcement des capacités scientifiques du PAS-PNA s'articule autour de la réalisation des trois études de vulnérabilité approfondies et l'identification des options d'adaptation. Ces études se sont appuyées sur une méthodologie robuste et éprouvée d'analyse de vulnérabilité (voir partie 3).

Le renforcement des capacités scientifiques se matérialise à travers la mise en place de trois consortia de recherche (un consortium par secteur) et d'un comité de suivi des études. Chaque consortium regroupe l'ensemble des structures scientifiques pertinentes pour le secteur (environ 12 structures par secteur-voir liste en annexe) et est accompagné du comité de suivi comprenant les décideurs politiques et fonctionnaires (ministère sectoriel concerné, etc.), les collectivités locales, la société civile et le secteur privé.

De manière concrète, l'étude de vulnérabilité pour chaque secteur a été menée par un jeune chercheur (post-doc) qui a bénéficié de l'appui des membres du consortium et de l'équipe de Climate Analytics. Ainsi, le renforcement de capacités scientifiques a permis à au moins 4 jeunes chercheurs d'acquérir chacun une expertise pointue en matière d'analyse de vulnérabilité climatique dans son domaine, qu'il pourra ensuite reproduire dans le cadre d'études ultérieures. Plus largement, le processus a bénéficié à l'ensemble des membres des consortia et du comité de suivi.

La présente étude porte sur le secteur de la zone côtière et a pour objectif général de mesurer la vulnérabilité aux changements climatiques de la zone du delta du Saloum/région de Fatick, et d'identifier des options d'adaptation pertinentes. Il s'agit d'analyser à la fois la vulnérabilité actuelle et la vulnérabilité future.

Cette étude de vulnérabilité a pour objectifs spécifiques de :

- Identifier les facteurs qui rendent actuellement la zone côtière vulnérable à la variabilité climatique et aux événements extrêmes (sécheresse, tempêtes, etc.). Par ailleurs, l'exposition, la vulnérabilité biophysique, la sensibilité du contexte socio-économique (pauvreté, accès aux marchés, niveau d'éducation, etc.) et la capacité d'adaptation seront prises en compte.
- Identifier les potentiels impacts futurs des changements climatiques (élévation du niveau marin, augmentation des températures, changement dans l'intensité de la houle, etc.) sur la dynamique du système côtier et les ressources côtières ainsi que sur la population qui en dépend. Il s'agit de regarder les impacts biophysiques et de les combiner avec des projections

des paramètres socio-économiques (taux de croissance de la population, stratégie de développement, évolution de la pauvreté, évolution du niveau d'éducation, etc.).

- Identifier les options d'adaptation qui puissent rendre les zones côtières et la population qui en dépend plus résilientes aux impacts des changements climatiques projetés, soit par une réduction de la vulnérabilité structurelle (réduire la pauvreté, augmenter l'accès au marché, diversification des sources de revenus, élever le niveau d'éducation, etc.) ou par une réduction de l'exposition biophysique aux impacts projetés (ex : stratégie de retrait, renforcer la protection naturelle de la côte : plantation de mangroves, etc.), ou par une combinaison des deux.

## 2 Périmètre de l'étude de vulnérabilité

### 2.1 Zone d'étude : le Delta du Saloum/région de Fatick

#### 2.1.1 Position géographique

La région de Fatick (Fig.1) se trouve dans le bassin arachidier qui constitue la première région agricole du Sénégal (MEDD, 2016). Elle est limitée à l'Est par la région de Kaolack, à l'Ouest par l'Océan Atlantique, au Nord par la région de Diourbel, au Nord-Ouest par la région de Thiès, et au Sud par la Gambie. La région compte trois départements : Fatick, Gossas et Foundiougne. La présente étude va se concentrer uniquement sur les départements de Fatick et Foundiougne.

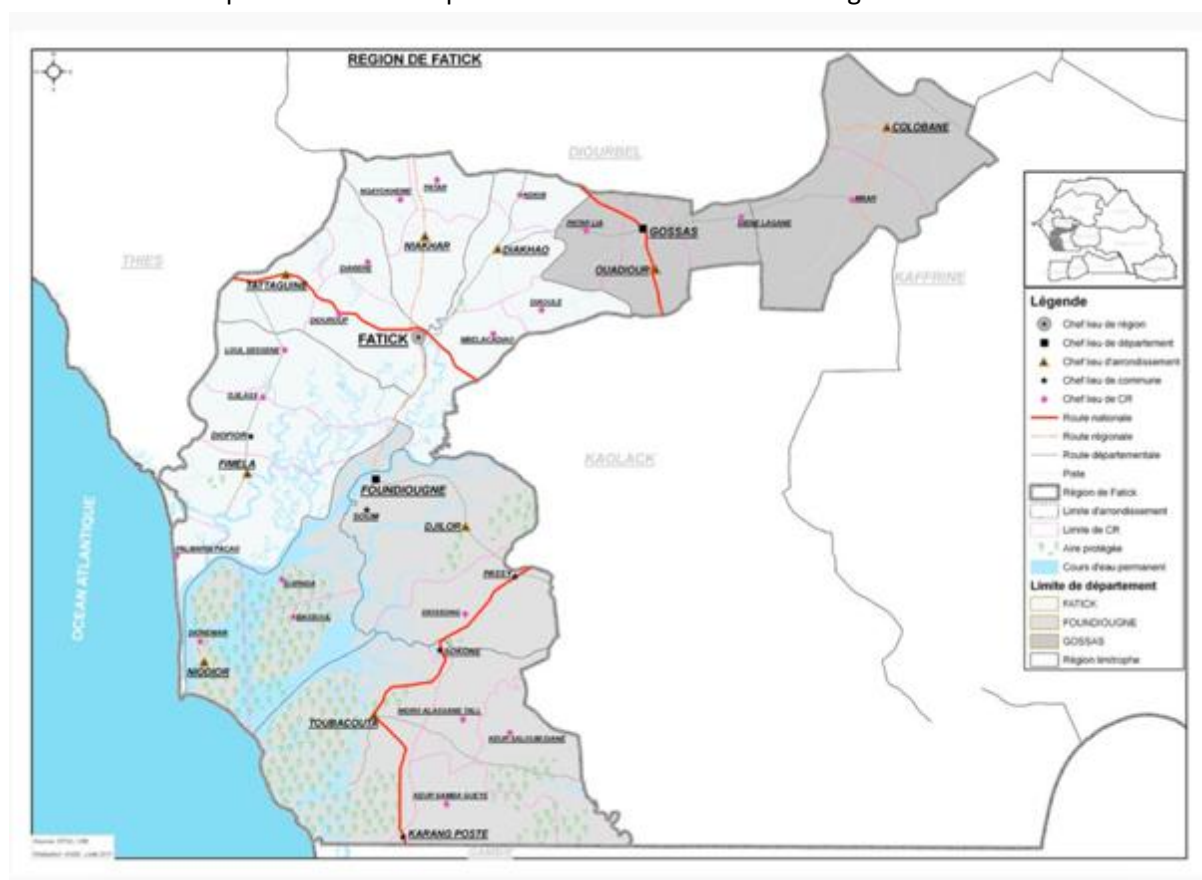


Figure 1 : Localisation de la région de Fatick (source : gouvernement du Sénégal)

### 2.1.2 Climat

Le climat est de type soudano-sahélien. La région présente une forte hétérogénéité qui peut être résumée en une opposition Nord/Sud : au Nord, une pluviométrie moyenne de 520 mm dans le département de Fatick avec une saison des pluies plus courte, et au Sud une pluviométrie moyenne de 680 mm notamment dans le département de Foundiougne (Bodian, 2014).

### 2.1.3 Situation sociodémographique

La région de Fatick est issue du royaume du Sine-Saloum délimité entre la Gambie au Sud et par les régions naturelles du Cayor, du Baol et Djolof au Nord. Anciennement occupé par l'ethnie Sérère, cet espace est rapidement devenu au fil de diverses vagues migratoires un pôle d'accueil et de refuge pour de nombreux groupes de migrants (Peuls, Socé, Wolof, Mandingue, Bambara) entraînant ainsi une grande diversité ethnique et faisant de cette région un territoire carrefour (Schéma directeur d'aménagement et de développement du pôle territoire Sine-Saloum, 2017). La colonisation va par la suite entraîner de sensibles modifications dans la répartition de la population avec notamment la mise en place de quelques entités économiques et d'infrastructures (routes, voies ferrée, développement de la culture arachidière) et ainsi donner les prémices de la configuration géographique actuelle (Schéma directeur d'aménagement et de développement du pôle territoire Sine-Saloum, 2017).

Depuis la création de la région en 1984, la population de Fatick a connu une croissance lente passant de 509 702 habitants en 1988 à 615 558 habitants en 2002 (taux de croissance moyen annuel de 1,4%). Selon les résultats du Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de de l'Elevage (RGPHAE), réalisé en 2013, la population de Fatick s'établit à 714 389 habitants, soit 5,3% de la population nationale. Entre 2002 et 2013, le taux d'accroissement moyen annuel est estimé à 1,3%. Si ce rythme de croissance démographique se maintient, la population de Fatick doublera d'ici 2051 (ANSD, 2013). La densité de la région devient ainsi plus importante en raison de 110 habitants au km<sup>2</sup> en 2014 contre 87 habitants au km<sup>2</sup> en 2005.

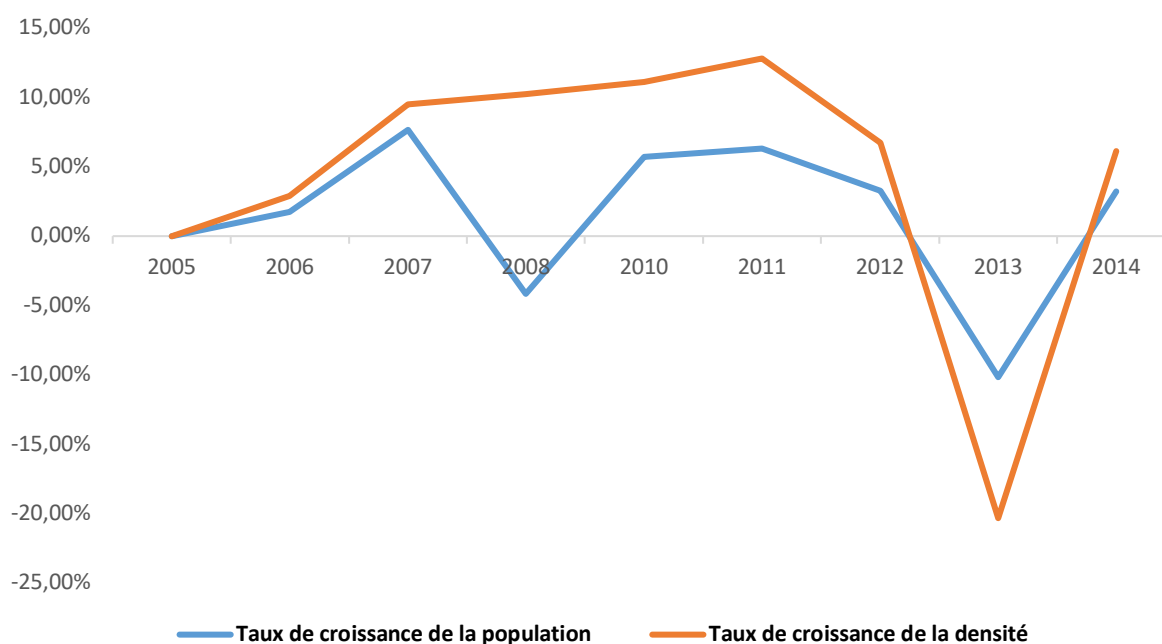


Figure 2 : Taux de croissance de la population et de la densité de la région de Fatick de 2005 à 2014 (en %). Source : PAS-PNA à partir des données de SES Fatick 2005-2006-2007-2008-2010-2011-2012-2013-2014

La région de Fatick est marquée par de très fortes disparités sur le plan social. Ainsi, en dépit de la politique d’alphabétisation et des progrès enregistrés ces dernières années sur le plan national, le taux d’analphabétisme dans la région demeure assez important avec un taux de 51,1% (RGPHAE de 2013). Il est plus élevé chez les femmes (58,3%) que chez les hommes (43,4%).

La population de la région de Fatick est essentiellement jeune ; plus de la moitié a moins de 15 ans (SES Fatick, 2014). Toutefois, à cause d’une insuffisance des infrastructures socio-éducatives, sa jeunesse rencontrait une difficulté d’accès à l’éducation dans le passé qui s’est nettement réduite entre 2005 et 2010. Le taux brut de scolarisation est de 70,10 % en 2004 contre 79,90 % pour le niveau national (Situation économique et sociale de la région de Fatick, 2004). Ce taux devient relativement plus faible entre 2010 et 2012, puis en 2014 (figure 2). Le taux brut de scolarisation suit, ainsi, une évolution très erratique dans cette région. En plus, la résistance à la scolarisation demeure un problème majeur. En effet, malgré un taux brut de scolarisation très élevé à l’élémentaire, celui-ci reste encore très faible en cycle secondaire avec un taux de 35% en 2014. Étant donné que l’enseignement secondaire est le niveau qui contribue le plus à la qualification des apprenants, ce manque d’études poussées se traduirait sans doute par une insuffisance du capital humain nécessaire au développement économique de la région. Ce manque de qualification justifierait en partie le taux de chômage élevé dans la région qui s’élève à 28,5% en 2014 (SES Fatick 2014).

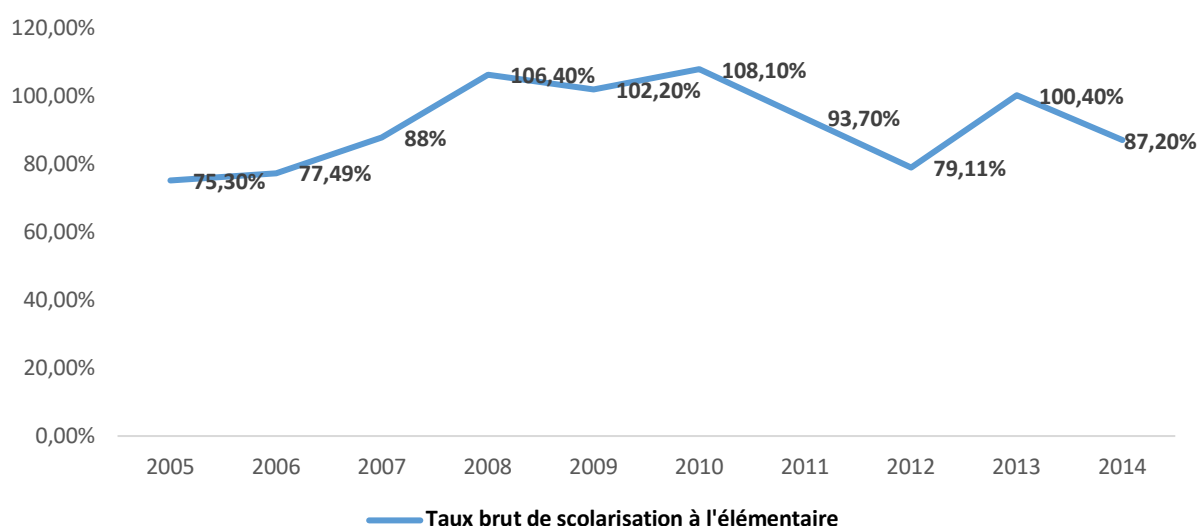


Figure 3 : Evolution du taux brut de scolarisation en élémentaire dans la région de Fatick de 2005 à 2014. Source : PAS-PNA à partir des données de SES Fatick 2005-2006-2007-2008-2010-2011-2012-2013-2014

A l’instar du système éducatif, le secteur de la santé rencontre plusieurs difficultés à assurer à la population un accès aux structures sanitaires et à un service de qualité. La région ne dispose que d’un seul hôpital fonctionnel depuis décembre 2013. Malgré une évolution du nombre de centres de santé et de postes de santé, les normes de l’OMS sont loin d’être respectées.

Tableau 1 : Evolution du nombre de structures sanitaires dans la région de Fatick

Structures sanitaires	2005	2006	2007	2008	2009	2010-2011	2013	2014

<b>Centres de santé</b>	3	6	6	7	6	7	7	7
<b>Postes de santé</b>	81	84	82	84	75	89	89	90
<b>Cases de santé</b>	258	289	296	265	198	219	219	152

Source : PAS-PNA à partir des données de SES Fatick 2005-2006-2007-2008-2010-2011-2012-2013-2014

L'approvisionnement en eau pour la population est problématique. Avec les Objectifs du Millénaire (OMD), les politiques hydrauliques ont initié divers programmes pour assurer une couverture en eau correcte en milieu urbain et en milieu rural en vue de réduire de moitié le pourcentage de la population n'ayant pas accès à un approvisionnement en eau potable et à un assainissement. Cependant, dans la région de Fatick les résultats restent très mitigés. Dans beaucoup de zones, tant rurales qu'urbaines, l'eau n'est pas fournie en quantité suffisante. De plus, la présence de sel et le fluor dans les nappes souterraines variant selon la zone et la profondeur du lieu de captage joue pour beaucoup sur la qualité de l'eau. Le déficit d'investissement dans la création et la pérennité des ouvrages hydrauliques fait que le nombre de forages et de puits est insuffisant et mal réparti dans la région.

#### 2.1.4 Situation socio-économique

L'économie de Fatick est essentiellement dominée par l'agriculture, l'élevage et la pêche. L'agriculture est la principale activité économique de la région de Fatick (50% de la superficie régionale) et emploie près de 90% de la population active. Le secteur agricole se caractérise par des systèmes de production de type extensif dominés par les cultures vivrières (mil, riz, maïs et niébé) et celles dites de rentes (arachide, sésame, pastèque, cultures maraîchères et fruitières). Selon l'ANSD, (2014), 57 568 ménages pratiquent l'agriculture au sens large dans la région de Fatick dont 88% en zone rurale. La grande culture reste majoritairement l'agriculture pluviale pratiquée par 75% des ménages (43 253 ménages). Dans la grande majorité, les producteurs agricoles sont de petits exploitants qui cultivent la terre sur des régimes fonciers traditionnels et pratiquent des assolements traditionnels (rotation culturale). La plupart d'entre eux combinent cultures de rente et cultures vivrières de subsistance, tout en possédant quelques animaux, en élevage extensif et, dans de plus rares cas, intensifs associés aux cultures. On observe également une diversification des pratiques culturales avec l'introduction du sésame, des cultures maraîchères et fruitières. Cependant, le secteur est confronté à des fortes menaces avec la dégradation des terres dont une bonne partie est salée et subit un processus d'acidification faisant évoluer les sols vers des formations en tannes. Elles deviennent par conséquent impropres à la culture. Ces terres dégradées qui représentent 27% de la superficie régionale, constituent une contrainte majeure pour le développement de ce secteur. L'élevage de type sylvo-pastoral est, pour sa part, pratiqué par 67,6% des ménages au niveau régional contre 28,2% des ménages au niveau national. Néanmoins, la réduction de l'espace pastoral due à la progression des terres salées reste un handicap notoire pour le développement de ce secteur (ANSD/SRSD Fatick, 2013).



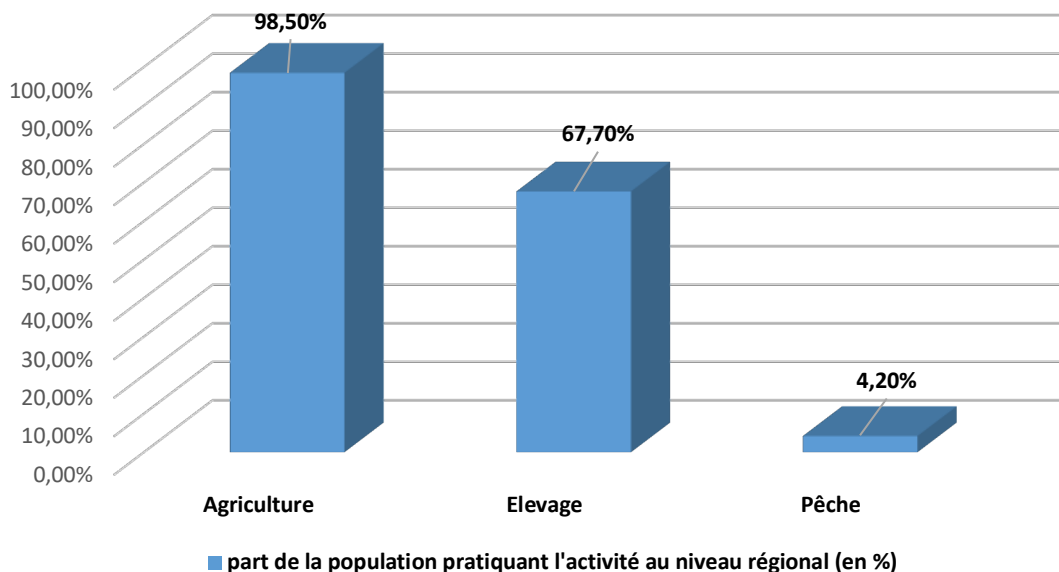


Figure 4 : Principales activités dans la région de Fatick. Source : PAS-PNA à partir des données de SES Fatick 2014

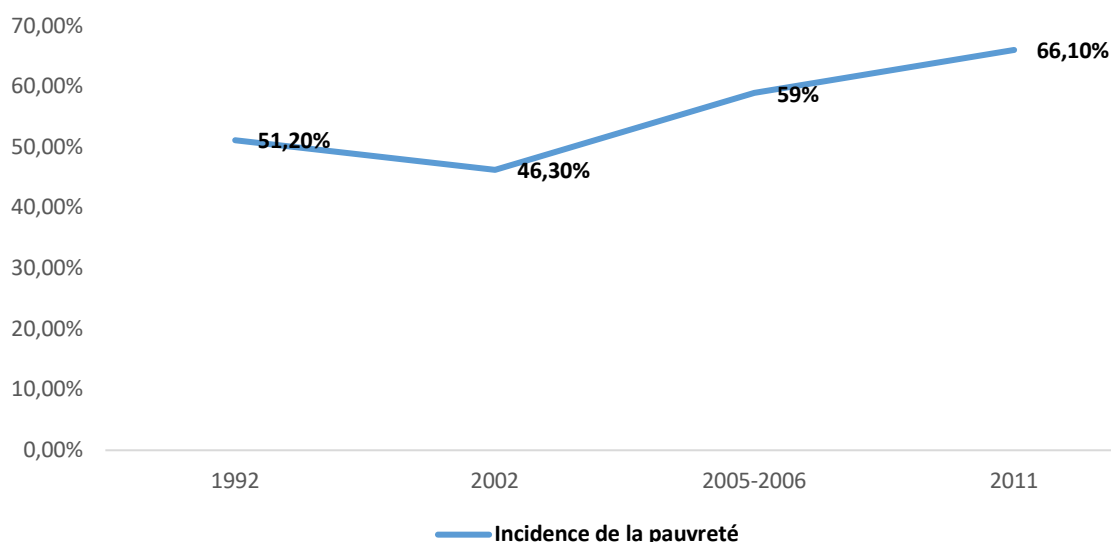
L'activité de pêche est aussi assez présente à Fatick où l'on observe une diversité écologique importante (poissons, crustacés et mollusques). Mobilisant près de 4,2% des ménages au niveau régional contre 1,0% des ménages au niveau national, elle est très dynamique dans la « Réserve de la Biosphère du Delta du Saloum ». Elle est pratiquée à la fois sur la façade maritime et dans la zone fluvio-lagunaire avec une large zone deltaïque présentant un front d'environ 70 km. Les activités de pêche et d'agriculture concentrent l'essentiel des rares entreprises de transformation, la région n'abritant aucune entreprise industrielle d'envergure (ANSD/SRSD Fatick, 2004). Par ailleurs, le niveau d'enclavement très important de la région est un lourd handicap pour son développement économique. En effet, toutes les routes reliant les départements au chef-lieu de région sont extrêmement défectueuses.

Toutefois, un autre secteur prometteur pour la région demeure le tourisme qui recèle d'énormes potentialités et occupe une place de choix dans le tissu économique de la région. Il offre une gamme assez riche de sites touristiques constitués par les nombreux cours d'eaux et bolongs, les îles du Saloum et le Parc National du Delta du Saloum.

Enfin, Fatick est l'une des régions du Sénégal dans laquelle la pauvreté est plus répandue. L'incidence de la pauvreté<sup>1</sup> dans la région est de 51,2% en 1992 (Enquête sur les priorités) contre 66,1% en 2011 (ESPS II). Quant à la sévérité de la pauvreté<sup>2</sup>, elle est de 10,9% en 2011(ESPS II).

<sup>1</sup> L'incidence de la pauvreté est la part de la population ou des ménages qui vit en état de pauvreté.

<sup>2</sup> La sévérité de la pauvreté mesure la part de la population en situation d'extrême pauvreté.



**Figure 5 :** Evolution de l'incidence de la pauvreté dans la région de Fatick de 1992 à 2011. Source : PAS-PNA à partir des données de SES Fatick 2005 et ESPS II

### 2.1.5 Zones d'étude spécifique

Trois sites sont couverts par les études de vulnérabilité sectorielles réalisées dans la région : Niakhar, Toubacouta et Dionewar. Ces sites sont représentatifs des problématiques observées dans la région de Fatick. En effet, la réalisation des études de vulnérabilité vise une approche de gestion intégrée ; toutefois, les zones choisies présentent des dynamiques propres. Les zones de Niakhar et de Toubacouta serviront de cas d'étude pour l'agriculture et la ressources en eau tandis que la zone de Dionewar apportera une meilleure compréhension des problématiques liées à l'eau et surtout à l'évolution des dynamiques côtières.

Sur la base des caractéristiques agro-climatiques contrastées et symptomatiques de l'hétérogénéité des conditions dans le bassin arachidier, les deux sites de Niakhar (Département de Fatick) et Toubacouta (Département de Foundiougne) ont été choisis pour abriter l'étude de vulnérabilité du secteur agricole dans la zone. Le village de Niakhar, avec 4641 habitants, est composé de Niakhar et cinq hameaux : Sob Maack, Pine Niokhor, Toka Sone, Ngolgane and Ngaraf. Il se trouve dans la zone semi-aride caractéristique de la bande sahélo-saharienne marquée par les sécheresses des années 1970 (Descroix et al., 2015). Le village de Toubacouta, moins peuplé avec 2554 habitants, est composé de Toubacouta et trois hameaux que sont Blouf, Keur Diamba et Medina Baka Sarr (Per. Com Autorité locale). Bien que l'environnement se soit dégradé ces dernières années, cette zone du delta du Saloum caractérisée par un climat soudano-sahélien est une zone encore propice pour l'agriculture.

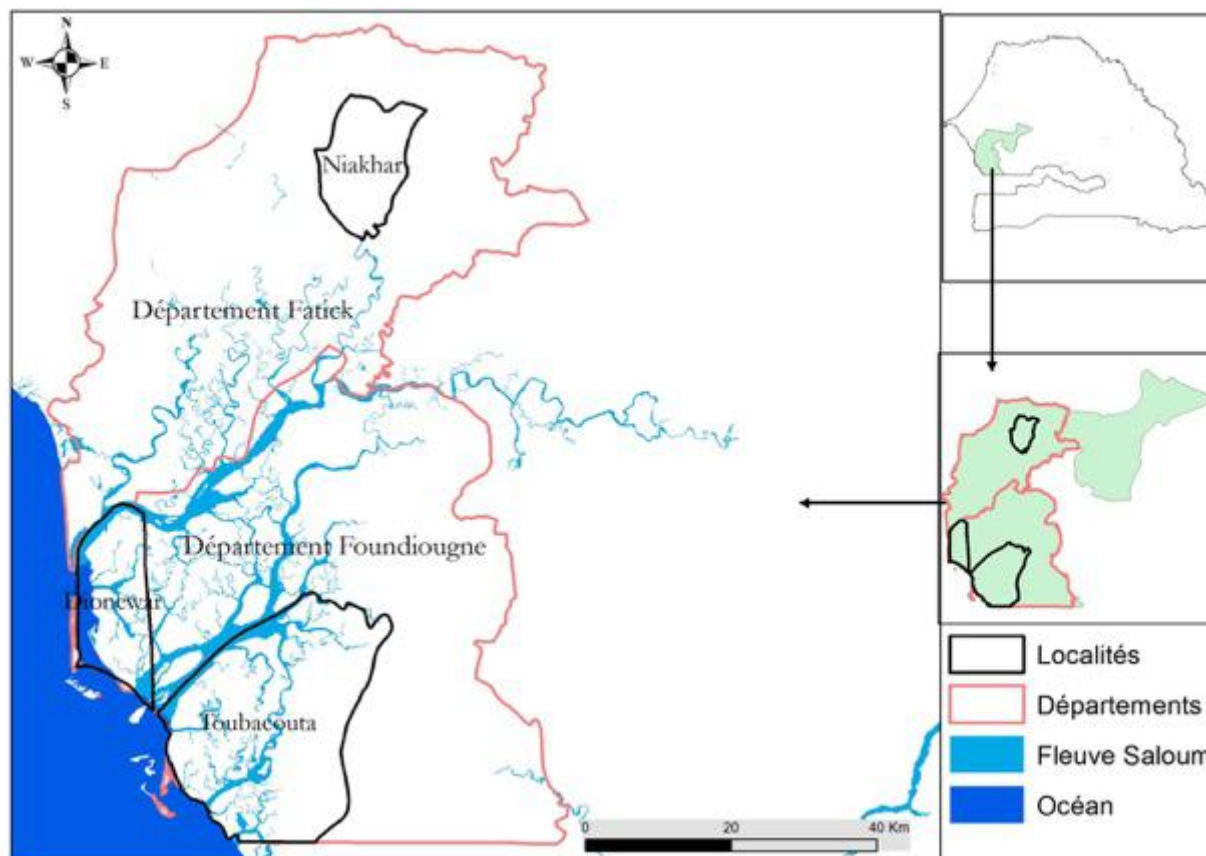


Figure 6 : Localisation des sites d'étude à l'intérieur de la région de Fatiek (source : A. Seck, UCAD)

### 3 Approche générale d'évaluation de la vulnérabilité

Dans le cadre de ce projet, les études de vulnérabilité sectorielles sont développées à travers une approche intégrée. Autrement dit, elles vont être réalisées en interaction les unes avec les autres et permettre de travailler sur les synergies entre les secteurs. Par ailleurs, compte tenu de l'objectif général des études de vulnérabilité, il est approprié de combiner à la fois l'approche participative et une approche basée sur les données et résultats issus des travaux menés à l'échelle internationale sur la modélisation du climat futur et de ses impacts (Figure 7). Les conditions sont réunies pour appliquer ces types d'approches car des partenariats directs sont mis en place à travers les consortia, entre les parties prenantes et les scientifiques (Mastrandrea et al., 2010).

L'approche participative va reposer sur l'implication des communautés locales à travers l'application d'une méthodologie principalement qualitative et sera surtout appliquée à l'étude de la vulnérabilité passée et actuelle (Figure 8).

L'approche basée sur la modélisation climatique globale va servir dans un premier temps à évaluer les impacts futurs des changements climatiques en se concentrant sur les effets biophysiques (Figure 7). Cette étape repose sur l'utilisation des modèles climatiques (globaux ou régionaux) et des modèles de simulation des impacts. Dans un deuxième temps, il sera possible d'impliquer les différents acteurs afin d'élaborer des scénarios participatifs de développement socio-économique pour la région et de les confronter aux impacts biophysiques futurs des changements climatiques issus des modélisations. Ainsi, les parties prenantes pourront fournir des retours sur les données générées par les modèles, basés sur leur réalité vécue et leur vision du futur (Schröter, et al., 2005). Enfin, en combinant ces résultats, ils pourront identifier des options d'adaptation.

Enfin, une approche systémique sera également appliquée, permettant de prendre en compte l'ensemble des interactions au sein du système étudié et rendre compte de l'ensemble des enjeux à l'œuvre dans la zone étudiée et des différentes vulnérabilités.

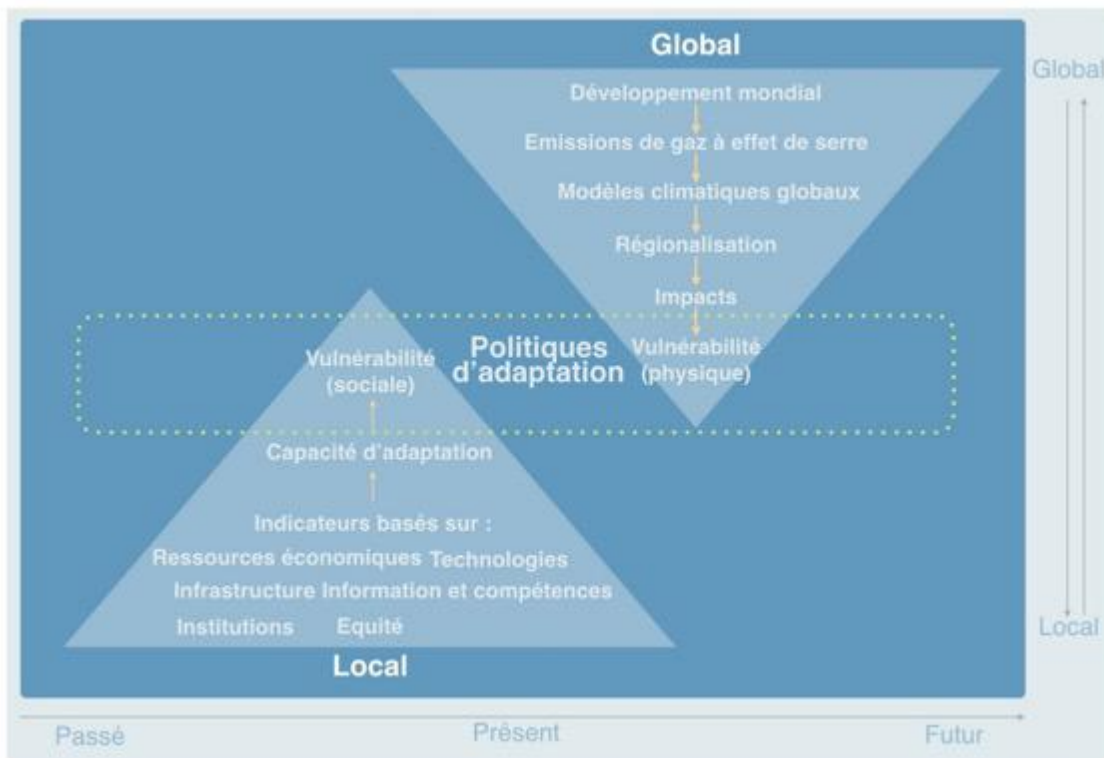


Figure 7 : Approche combinée locale et globale pour gérer les impacts des changements climatiques (adapté de Dessai and Hulme (2004))

	Facteurs biophysiques	Facteurs Sociaux	
<b>Situation Actuelle</b>	Variabilité Climatique Topographie Utilisation des terres Protection Ages des infrastructures	Santé Technologie Réglementation Capital Social Education	Vulnérabilité à la variabilité climatique
	+	+	
	1	2	
<b>Changement futur</b>	Changement au niveau des: Températures Précipitations Evapotranspiration Vent Humidité  Elevation du niveau marin	Croissance Démographique Croissance économique Changement dans le système de valeurs Changement dans le système de gouvernance Nouvelles décisions politiques	Vulnérabilité aux changements climatiques
	+	+	
	3	4	

**Figure 8 :** Déterminants actuels et futurs de la vulnérabilité à la variabilité climatique et aux changements climatiques

### Encadré 2 : Définitions

**Adaptation** : ajustement des systèmes naturels et humains en réponse aux stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques (GIEC, 2001).

La vulnérabilité et ses composantes :

- **Vulnérabilité** : degré de capacité d'un système de faire face ou non aux effets néfastes du changement climatique (y compris la variabilité climatique et les extrêmes). La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur et du rythme de l'évolution climatique, des variations auxquelles le système est exposé, de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation (GIEC, 2007).
- **Exposition** : la nature et le degré auxquels un système est exposé à des variations et ou des aléas climatiques importants (McCarthy et al., 2001).
- **Sensibilité** : le degré auquel un système est affecté ou modifié de manière négative ou bénéfique, par des stimuli liés au climat. L'effet peut être direct (par exemple, une modification du rendement des cultures en réponse à une de la variabilité de la température) ou indirect (par exemple, des dommages causés par une augmentation de la fréquence des inondations côtières dues à l'élévation du niveau de mer) (McCarthy et al., 2001).
- **Capacité d'adaptation** : capacité d'un système à s'adapter au changement climatique - y compris la variabilité et les phénomènes climatiques extrêmes - à modérer les dommages potentiels, à tirer parti des possibilités offertes ou à faire face aux conséquences (McCarthy et al., 2001).

*(traduit (traduction libre de CA) de Assessing Adaptation Knowledge in Europe: Vulnerability to Climate Change, 2017)*

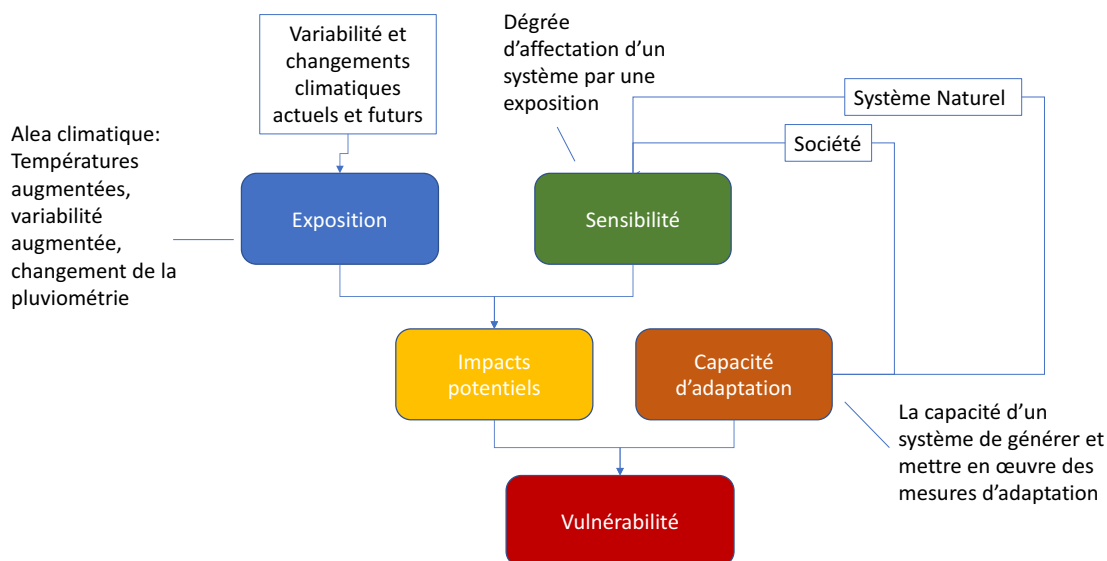


Figure 9 : Chaîne d'impacts selon AR4 du GIEC (Climate Analytics)

## 4 Etude de vulnérabilité actuelle

### 4.1 Méthodologie

Depuis le début des années 1990, l'évaluation de la vulnérabilité côtière est devenue une étape essentielle dans l'identification des impacts des changements climatiques et l'aménagement des zones côtières (Yates-Michelin et Bulteau, 2011). Le GIEC (1991) recommande ainsi de procéder à une étude des facteurs de vulnérabilité en préalable à la définition de mesures d'adaptation, qui viseront donc à réduire les facteurs principaux de la vulnérabilité à l'échelle spatiale la plus appropriée.

La vulnérabilité aux changements climatiques est considérée comme dynamique et varie selon les échelles spatiales et temporelles, dépendant également de divers facteurs géographiques, démographiques, économiques, sociaux, institutionnels, de gouvernance et d'environnement (GIEC, 2012). Par conséquent, dans le contexte de la réduction et de l'atténuation des risques de catastrophe, l'évaluation de la vulnérabilité est considérée comme une tâche préalable qui peut améliorer la résilience d'une communauté, d'une société ou d'une nation (Ashraful et al., 2016). L'évaluation de la vulnérabilité des régions côtières comprend deux approches principales :

une première prenant en compte les variables physiques pour évaluer la vulnérabilité locale d'une côte particulière (Gornitz, 1990, Gornitz et al., 1994, Shaw et al., 1998, Thieler et Hammar-Klose, 1999, Pendleton et al., 2004, Doukakis, 2005, Hegde et Reju, 2007, Nageswara Rao et al., 2008, Yin et al., 2012, Kumar et Kunte, 2012, Bagdanaviciute et al., 2015) ;

et une seconde qui prend en compte des variables socioéconomiques telles que la densité de la population et des paramètres physiques pour estimer la vulnérabilité socioéconomique d'une côte particulière (Boruff et al., 2005, Szlafsztein et Sterr, 2007, Devoy, 2008, Murali et al., 2013, Kunte et al. al., 2014, Mahapatra et al., 2015).

L'Indice Côtier de Vulnérabilité (ICV) Physique, ou *Coastal Vulnerability Index (CVI)*, a été proposé par Gornitz (1990, 1991) pour évaluer la vulnérabilité côtière due à l'élévation du niveau de la mer sur la

côte est des États-Unis. Il s'agit d'une approche numérique pour classer les segments d'un littoral en termes de dommages potentiels causés par les changements climatiques, et dont les résultats sont communiqués par des cartes et des statistiques. Les travaux ultérieurs, notamment Thieler (2000), Thieler et Hammar-Klose (1999) et Pendleton et al. (2004) utilisent le même principe dans leur calcul de l'ICV pour estimer la menace d'élévation du niveau de la mer dans l'Atlantique, au Golfe du Mexique et sur les côtes du Pacifique.

L'ICV combine ainsi la sensibilité du système côtier avec sa capacité naturelle à s'adapter à des conditions environnementales changeantes, ce qui donne une mesure quantitative de la vulnérabilité naturelle du littoral aux effets de l'élévation du niveau de la mer (Klein et Nicholls, 1999 ; Pendleton et al., 2010).

Dans l'optique de calculer l'ICV physique du littoral du delta du Saloum, la méthode de Thieler et Hammar-Klose (1999 ; 2000a ; 2000b) est choisie. Cette méthode, également utilisée par Hammar-Klose et Thieler (2001), prend en compte :

- a. la géomorphologie ;
- b. l'érosion/accrétion de la ligne du rivage ;
- c. la pente de la côte ;
- d. la remontée relative du niveau de la mer ;
- e. la hauteur moyenne des houles ;
- f. l'amplitude moyenne de la marée.

Elle permet d'estimer quantitativement l'indice côtier de vulnérabilité physique par la formule suivante :

$$ICV = \sqrt{(a \times b \times c \times d \times e \times f) / 6},$$

avec *a*, *b*, *c*, *d*, *e* et *f* représentant l'indice des 6 facteurs ou variables de vulnérabilité pris en compte (tableau 3).

Les variables géologiques, notamment la géomorphologie, le taux de changement historique du rivage et la pente côtière, expliquent la résistance relative du littoral à l'érosion, la tendance à long terme d'érosion/accrétion et la vulnérabilité aux inondations. Les variables du processus physique, notamment l'évolution du niveau de la mer, la hauteur moyenne des houles et l'amplitude des marées, contribuent toutes aux risques d'inondation d'un segment particulier du littoral sur des échelles de temps allant de quelques heures à plusieurs siècles (Pendleton et al., 2010).

Un indice (très bas, bas, modéré, élevé et très élevé) est attribué à chaque segment du littoral par analyse des statistiques de distribution de l'ICV, avec des divisions par quantiles et une vérification visuelle.

#### 4.1.1 Constitution de la base de données

Afin de développer une base de données pour l'évaluation de la vulnérabilité du site d'étude, les données relatives à chacune des six variables ont été recueillies.



#### 4.1.1.1 Détermination des 6 facteurs ou variables a, b, c, d, e et f constituant la formule

##### 4.1.1.1.1 Variables géologiques

###### a. Variable a: géomorphologie

La détermination de cette variable (ou facteur) est effectuée en se basant sur l'échelle de classification de la variable géomorphologique établie par Thieler et Hammar-Klose (2000a), sur la côte atlantique des États-Unis (tableau 3).

###### b. Variable b : érosion/accrétion de la ligne du rivage

La caractérisation de cette variable repose sur une approche par télédétection, système d'information géographique (SIG) et analyse statistique, à partir du logiciel SIG *ArcGIS* et de l'application du logiciel *Digital Shoreline Analysis (DSAS)*, avec un matériel essentiellement composé de photographies aériennes verticales, d'une photographie satellitaire *Corona* et d'images satellitaires *LANDSAT*.

Ainsi, après la production de bandes composites, l'exécution de compositions colorées RVB (Rouge Vert Bleu), le rehaussement de la dynamique et la vérification géométrique des images satellitaires *LANDSAT*, la photographie aérienne et la photographie satellitaire *Corona* ont été géo-référencées. Les lignes de rivage instantanées ont, par la suite, été extraites par digitalisation à partir du logiciel SIG *ArcGIS*. Il s'en est suivi une analyse statistique de la dynamique de la ligne du rivage par le truchement du *DSAS* (version 4.3), avec comme méthode de calcul la *LRR (Linear Regression Rate)*.

Les sources d'erreurs potentielles prises en compte dans l'analyse sont au nombre de trois (3) :

- l'erreur de géo-référencement (erreur *RMS Root Mean Square Error*) nommée  $E_G$ ;
- l'erreur résultant de la digitalisation (numérisation) des lignes de rivage ( $E_N$ ) ;
- et l'erreur en rapport avec l'oscillation de la marée ( $E_D$ ).

L'erreur  $E_G$  relative au géo-référencement de la photographie aérienne IGN 1954 et de la photographie satellitaire *Corona* est automatiquement calculée par le logiciel *ArcGIS* qui a permis cette correction. Elle reste ainsi égale à 1 m.

Pour sa part, la détermination de la marge d'erreur  $E_N$  résultant de la numérisation a impliqué le choix d'une ligne de rivage pour chaque résolution spatiale. Ces lignes de rivage choisies sont par la suite digitalisées cinq fois chacune en quelques jours d'intervalle, suivant les recommandations de Coyne et al. (1999) et Fletcher et al. (2003). Cette répétition a permis le calcul de la moyenne des écarts de positionnement de chaque ligne de rivage, ainsi que l'écart-type de ces écarts, à l'instar de Faye (2010), Ford (2011 ; 2013) et Sadio (2017). L'erreur découlant de la digitalisation de chaque ligne de rivage est obtenue en additionnant la moyenne des écarts à 2 écarts-types de ces écarts et à la taille du pixel :  $E_N = \text{moyenne} + 2 \text{ écarts-types} + \text{taille pixel}$  (Moore et Griggs, 2002).

Enfin, l'erreur  $E_D$  relative à la marée est déterminée à partir de la formule développée par Allan et al. (2003), qui permet de calculer géométriquement le facteur  $D$  représentant la variabilité horizontale dans la position de la ligne du rivage, et consécutive à une certaine hauteur de marée ( $M$ ) sur un profil de plage avec une certaine pente ( $\tan\theta$ ) (Allan et al., 2003), selon l'équation 1 :



$$\text{Équation 1 : } D_{HWL} = M / \tan\theta$$

Cette formule appliquée à l'origine dans un contexte de ligne des hautes eaux (*HWL = high water line*) est déjà adaptée par Sadio (2017) sur l'ensemble du littoral du Sénégal. En utilisant cette formule à des lignes instantanées de rivage (*water line, swash line, swash terminus*),  $D_{HWL}$  devient  $D_W$ ; la formule d'Allan et al. (2003) devient :  $D_W = M / \tan\theta$  (Sadio, 2017).

Pour  $M$ , l'amplitude de la marée à la station de Dakar est prise en compte, à défaut de données marégraphiques coïncidant avec les dates de prises de vue.  $M$  est donc égal à 0,11 m. En ce qui concerne  $\tan\theta$ , la moyenne de la pente mesurée sur le terrain a été choisie (6,39 %).

L'incertitude totale sur la position de la ligne du rivage sur une photographie (EP) est estimée selon Coyne et al. (1999) et Fletcher et al. (2003) comme étant la somme quadratique de chaque composante (géo-référencement, numérisation et oscillation de la marée), comme le traduit l'équation 2 :

$$\text{Equation 2 : } E_P = \sqrt{E_G^2 + E_N^2 + E_D^2}$$

Les erreurs déterminées grâce à l'équation 2 correspondent à une image individuelle. Lorsque ce sont deux positions d'une ligne de rivage extraites de deux photographies distinctes (P1 et P2) qui sont comparées, l'erreur devient cumulative (Anders et Byrnes, 1991). Par conséquent, l'incertitude totale pour un taux donné de changement de la ligne du rivage estimé entre deux positions de la ligne du rivage devrait être calculée en prenant en compte à la fois les erreurs individuelles, et à la fois les erreurs correspondant à l'intervalle de temps entre les deux photographies, de façon à annualiser l'erreur totale (Fletcher *et al.*, 2003 ; Morton *et al.*, 2004), selon l'équation 3 :

$$\text{Equation 3 : } E_{TAUX} = \sqrt{E_{P1}^2 + E_{P2}^2} / T$$

où  $T$  est le laps de temps (en années) entre les deux photographies d'où les lignes de rivage sont extraites.

L'erreur totale potentielle sur le taux d'évolution est ainsi obtenue en résolvant l'équation 3 (tableau 3).

**Tableau 2 : Incertitude sur le taux d'évolution de la ligne du rivage (en mètre)**

Période	Erreur totale (m)	Erreur annuelle (m)
1954-1987	17	0,5
1987-2018	32,5	0,5
1954-2018	25,6	0,8

Par ailleurs, une analyse surfacique a été déroulée, pour compléter celle métrique proposée ci-dessus. Reposant sur l'union de polygones des classes d'entité, elle a permis de voir les surfaces en érosion et celles en accrétion.

c. Variable c : pente côtière

L'estimation de la pente côtière a impliqué des levés topo-bathymétriques au moyen d'un *Differential Global Positioning System (DGPS) NAVCOM technology*, doté d'une base permanente au Centre de suivi écologique (CSE) et de deux récepteurs SF-3040.

Les mesures sont effectuées sur la plage de la flèche littorale de Sangomar, depuis Ngalou en passant par Palmarin, Diakhanor, Djiffer, jusqu'à la pointe de Sangomar en projection sur Dionewar et Niodior, deux îles en projection. Un linéaire d'environ 30 km a ainsi été levé, avec un maillage de plus ou moins 10 m *cross-shore* (sens transversal), et 25 à 40 m *longshore* (sens longitudinal), selon la nature du relief (figure 10).

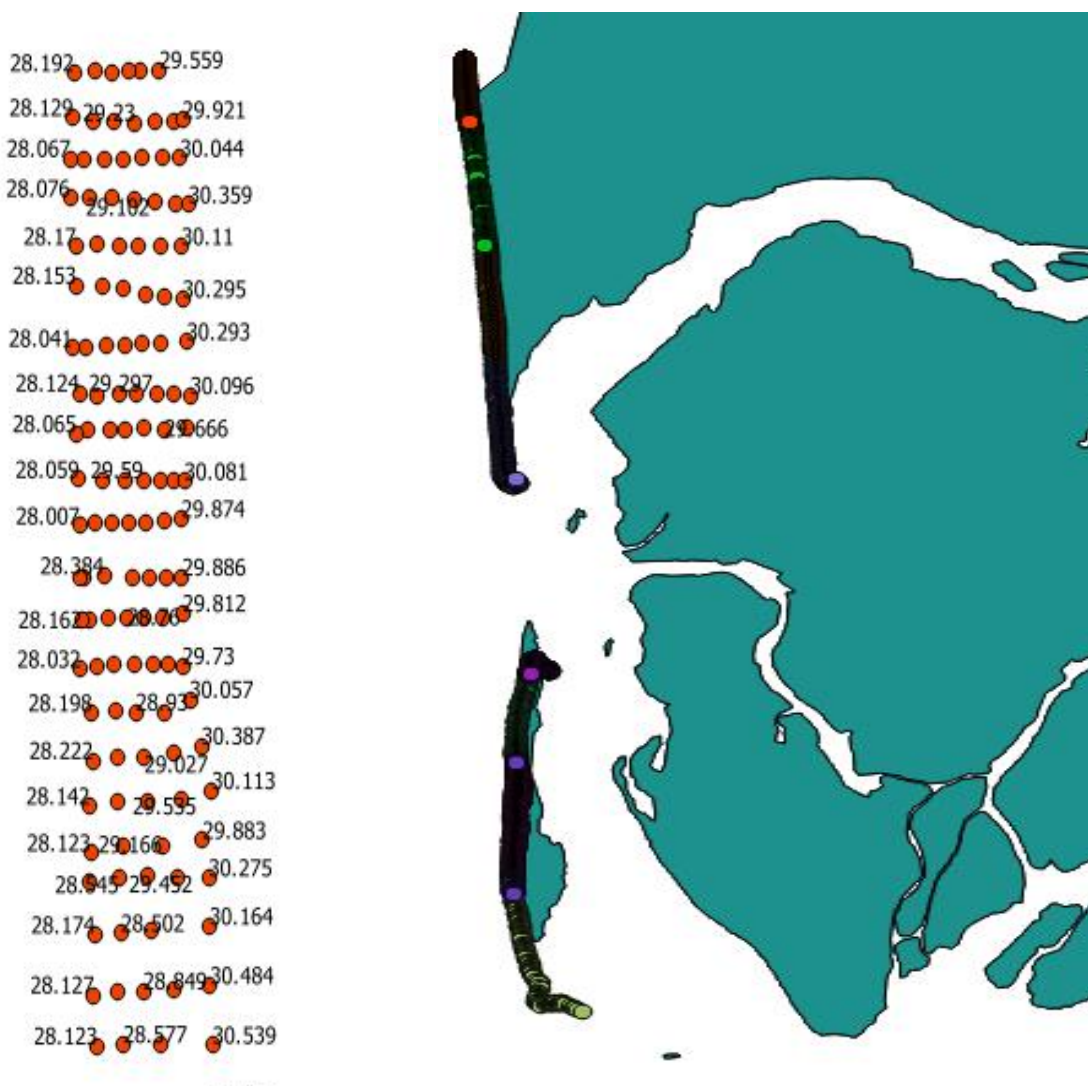


Figure 10 : Maillage adopté

Les levés ont porté à la fois sur la plage immergée et celle émergée, en s'appliquant autant que possible à la plage sous-marine qu'à la zone dunaire, afin de caractériser la pente la plus typique possible de la zone côtière (photo 1).



Photo 1 : Levés topo-bathymétriques

Par ailleurs, les levés ont été effectués en marée basse et ont nécessité une semaine de travail. Afin d'obtenir une grande précision planimétrique et altimétrique, les levés sont réalisés en mode cinématique. A la fin de chaque levé, les données sont enregistrées dans une tablette (dotée d'une carte mémoire), et transférées, par la suite, par l'intermédiaire du logiciel de synchronisation *ActiveSync* vers un ordinateur, où elles ont subi un post traitement avant d'être exportées avec leurs coordonnées x, y et z précises, en format texte (fichier .txt), pour une utilisation dans un SIG.

Les points sont projetés en *UTM (Universal Transverse Mercator)* Nord, Zone 28, associées au système *WGS 84 (World Geodetic System 1984)*, agrégé à l'ellipsoïde de référence *WGS 84*, avec comme référence locale la station RRS2 (Réseau de Référence du Sénégal du Deuxième Ordre) de Niodior R119, à laquelle était rattachée la station de base du *DGPS*.

#### c1. Traitement des données à partir du logiciel ArcGIS

Les données sont traitées sous le SIG *ArcGIS* impliquant la production d'un modèle numérique de terrain (MNT), le traçage de transects sur la plage, la représentation graphique de leur profil et la production de la carte des pentes.

## c2. Production du modèle numérique de terrain (MNT)

Après importation des données .txt, spécification des champs pour les coordonnées X, Y et Z, et détermination du système de projection, une couche du semis de point est générée, exportée en fichier de forme (.shp), et ajoutée comme nouvelle couche. A partir de ce shape-file, un Modèle Numérique de Terrain (MNT) d'une résolution centimétrique est produit, par l'interpolation *Topo to Raster* (Topo vers raster).

Cette méthode de production de MNT hydrologiquement corrects repose sur le programme ANUDEM mise en place par Hutchinson (1988, 1989, 1996), Hutchinson et Dowling (1991), Hutchinson et Gallant (2000) et Hutchinson et al. (2011). Basée sur une technique d'interpolation de différence finie itérative, elle a été perfectionnée dans le but d'assurer la performance des calculs des méthodes d'interpolation locales, telle que la méthode de pondération par l'inverse de la distance (*Inverse Distance Weighted*, IDW), sans fausser la continuité de la surface des méthodes d'interpolation globales, comme la méthode de *krigeage* ou de *spline*. Elle tient compte des courbes de niveau, du réseau hydrographique, des dépressions fermées et des ruptures de pente (Piccini et Landelli, 2011). De plus, elle a été utilisée avec succès sur le système flèche-embouchure de Joal (Sadio, 2017), avec des résultats jugés beaucoup plus détaillés et réalistes.

## c3. Evaluation des MNT

Le MNT généré a été évalué, afin de s'assurer de sa validité (conformité, exactitude). Cette évaluation consiste en une superposition différentielle de la hauteur (Z) de la classe d'entités du semis de points DGPS et de celle du MNT résultant (Sadio, 2017). Les écarts entre les altitudes des points en entrée et les surfaces en sortie étant insignifiants, l'interpolation a donc été validée.

## c4. Production de la carte des pentes

Afin d'identifier le gradient ou taux de changement maximal de la valeur Z de chaque cellule de la surface de trame, une carte de pente est générée à partir du MNT. Cette opération a permis de déterminer les valeurs exactes des pentes de plage, paramètre à introduire dans la formule de calcul de l'ICV. La carte des pentes a permis, par ailleurs, de savoir si les plages sont réfléchissantes ou dissipatives (Sadio, 2017). Ces pentes sont exprimées en pourcentage.

### 4.1.1.1.2 Variables de processus physiques

Ces variables concernent principalement :

#### d. Variable d : remontée relative du niveau de la mer

La remontée relative du niveau marin est estimée d'une part à partir de l'analyse des données du marégraphe de Dakar, et d'autre part à partir des données d'altimétrie spatiale.

- Analyse des données du marégraphe de Dakar

Le calcul de ce facteur est, en premier lieu, basé sur le traitement de données horaires de qualité *Fast Delivery* du marégraphe de Dakar fournies par le site du *University of Hawaii Sea Level Center* (UHSLC),

à travers sa station 223. Ce traitement à partir du logiciel Microsoft Excel a consisté à un calcul de la moyenne journalière, puis annuelle, avant la détermination d'une tendance. L'estimation de cette tendance est faite à partir de la technique statistique de l'ajustement d'une droite, voire d'un polynôme, par la méthode des moindres carrés, ou régression linéaire (Gouriou, 2012 ; Pouvreau, 2008 ; Woppelmann, 1997). Cette méthode, plus simple à mettre en œuvre, s'applique à tous les enregistrements, même en présence de lacunes (Woppelmann, 1997). Selon Pouvreau (2008), la régression linéaire applique une fonction  $f(x_i, \theta)$  telle que :  $y_i = a + bx_i$  pour ajuster la droite aux données, les coefficients de régression  $a$  (interception) et  $b$  (pente) étant déterminés afin de réduire au minimum la différence au carré entre les données produites par l'équation et les mesures originales. L'analyse des données marégraphiques ne couvrant qu'une période de 22 années, d'autres données, notamment celles de télédétection (altimétrie spatiale) sont par conséquent utilisées.

- Analyse des données d'altimétrie spatiale

Les données altimétriques utilisées ont été produits par Ssalto / Duacs et distribuées par Aviso, avec le soutien de CNES<sup>3</sup>. Après téléchargement, elles ont été traitées sous le logiciel Matlab, qui a permis d'extraire la zone d'étude, d'organiser les données, de faire des calculs de moyenne à l'échelle annuelle et des jointures de tables ou concaténations. Les produits ont ensuite été post-traités sous Excel. Ce logiciel a permis de générer un graphique, d'y adjoindre une courbe de tendance linéaire et d'afficher l'équation sur le graphique. Ces produits d'altimétrie spatiale couvrent une période de 24 années. Ils sont donc beaucoup plus robustes, et sont utilisés dans le calcul de l'ICV.

*e. Variable e : hauteur moyenne des houles*

L'appréciation de cette variable a impliqué une analyse statique des hauteurs significatives ( $H_s$ ) de houle *Wavewatch3*, entre 2010 et 2015, à partir du logiciel *Microsoft Excel*. Cette analyse consiste à calculer la moyenne des différentes  $H_s$ .

*f. Variable f : amplitude moyenne de la marée*

L'estimation de ce dernier facteur est basée sur la mesure de l'écart entre les hauteurs extrêmes (minimale et maximale) de moyennes annuelles de marée, à partir des données *Fast Delivery* du marégraphe de Dakar fournies d'une part par l'*UHSLC*, et d'autre part par les données d'altimétrie spatiale. Cette dernière sera utilisée dans l'estimation de l'ICV, parce qu'elle est plus significative (elle couvre 24 années continues contrairement aux données du marégraphe qui couvrent 22 années non continues).

#### 4.1.2 Classement des données

Le tableau 2 résume les six variables physiques utilisées ici : 1) géomorphologie, 2) pente côtière, 3) taux d'élévation relative du niveau de la mer (mm/an), 4) taux d'érosion et d'accrétion du littoral (m/an), 5) amplitude moyenne des marées (m) et 6) hauteur moyenne des houles (m). Chaque variable

---

<sup>3</sup> <http://www.aviso.altimetry.fr/>.

se voit attribuer une valeur de vulnérabilité relative basée sur l'ampleur potentielle de sa contribution aux changements physiques sur la côte à mesure que le niveau de la mer augmente.

**Tableau 3 :** Les Cinq niveaux des six variables de la classification côtière faite par l'USGS sur la côte Atlantique des Etas-Unis (Thieler et Hammar-Klose, 2000a)

Variables	Classement de l'indice côtier de vulnérabilité (ICV)				
	Très bas	Bas	Modéré	Elevé	Très élevé
	1	2	3	4	5
<b>Géomorphologie</b>	Côtes rocheuses, côtes escarpées, Fjords, Fiards	Falaises moyennes, côtes dentelées	Falaises basses, dépôts glaciaires, plaines alluviales	Plages de galets, estuaire, lagune	Plages de barrières, plages de sable, marais salants, vasières, deltas, mangrove, récifs coralliens
<b>Pente côtière (%)</b>	> 1,20	1,20 - 0,90	0,90 - 0,60	0,60 - 0,30	< 0,30
<b>Changement relatif du niveau de la mer (mm/an)</b>	< 1,8	1,8 - 2,5	2,5 - 3,0	3,0 - 3,4	> 3,4
<b>Erosion/ accrétion de la ligne du rivage (m/an)</b>	> 2,0	1,0 - 2,0	-1,0 - +1,0	-1,1 - -2,0	< - 2,0
<b>Amplitude moyenne de la marée (m)</b>	> 6,0	4,0 - 6,0	2,0 - 4,0	1,0 - 2,0	< 1,0
<b>Hauteur moyenne des houles (m)</b>	< 0,55	0,55 - 0,85	0,85 - 1,05	1,05 - 1,25	> 1,25

Les six variables sont classées sur une échelle linéaire de 1 à 5 par ordre de vulnérabilité croissante due à l'élévation du niveau de la mer. Elles comportent des informations quantitatives et qualitatives. Les variables quantitatives se voient attribuer un classement de vulnérabilité basé sur leurs valeurs réelles, alors que la variable de géomorphologie non numérique est classée qualitativement en fonction de la susceptibilité relative d'un relief donné au changement physique (Thieler et Hammar-Klose, 2000b).

La variable géomorphologique exprime l'érodibilité relative de différents types de relief (tableau 3). La pente côtière permet d'évaluer non seulement le risque relatif d'inondation, mais aussi la rapidité potentielle du recul du littoral, car les régions côtières en pente douce sont susceptibles de reculer plus rapidement que les régions plus escarpées (Pilkey et Davis, 1987). La variable de changement relatif du niveau de la mer est dérivée de l'augmentation ou de la diminution de l'altitude moyenne annuelle de l'eau, mesurée dans les stations de marégraphes situées le long de la côte, et/ou évaluée par des satellites d'altimétrie spatiale. La hauteur moyenne significative des houles est utilisée ici comme indicateur indirect de l'énergie des houles qui détermine le bilan sédimentaire côtier (Thieler et Hammar-Klose, 2000b). L'énergie des houles est directement liée au carré de la hauteur des houles. Ainsi, la capacité à mobiliser et à transporter le matériel de plage est fonction de la hauteur des houles. L'amplitude des marées est liée aux risques d'inondation permanente et épisodique.

#### 4.1.3 Calcul de l'indice

L'Indice Côtier de Vulnérabilité calculé dans cette étude est identique à celui utilisé dans Thieler et Hammar-Klose (1999) et est similaire à celui de Gornitz et al. (1994), ainsi qu'à l'indice de sensibilité utilisé par Shaw et al. (1998). Une fois que chaque section de côte s'est vue attribuer une valeur classée pour chaque variable de données spécifique, l'ICV est calculé comme étant la racine carrée du produit



des variables classées divisée par le nombre total de variables. L'indice permet donc de relier de manière quantifiable les six variables physiques qui expriment la vulnérabilité relative de la côte aux changements physiques dus à l'élévation du niveau de la mer.

Les données pour chacune des six variables (géomorphologie, changement de rivage, pente côtière, élévation relative du niveau de la mer, hauteur de houle significative et amplitude des marées) ont été reliées au rivage en utilisant une grille de 1 km. Les données se sont ensuite vues attribuer une valeur de vulnérabilité relative comprise entre 1 et 5 (1 représente une vulnérabilité très faible, 5 une vulnérabilité très élevée) en fonction de l'ampleur potentielle de sa contribution aux changements physiques sur la côte lorsque le niveau de la mer monte (Tableau 3).

#### 4.1.4 Méthodologie pour l'analyse des perceptions sociales des communautés côtières

La démarche méthodologique s'est principalement appuyée sur une revue documentaire en particulier des enquêtes qualitatives déjà effectuées dans la région précédemment. Ces enquêtes interrogeaient les personnes enquêtées sur les aléas et changements environnementaux auxquels elles ont déjà fait face ou observé par le passé (analyse des perceptions sociales).

Cette approche a permis d'intégrer divers thèmes relatifs aux perceptions des communautés locales sur :

- les événements extrêmes et leur conséquences ;
- les phénomènes d'érosion et d'inondation,
- la température de l'air et de l'eau (océan)
- et l'état des ressources naturelles.

## 4.2 Résultats

### 4.2.1 Profil socio-écologique de la zone d'étude

Couvrant une superficie de 500000 ha soit 2,5% du territoire national, le Delta du Saloum est un milieu très riche et diversifié (O. Sarr, 2005). Il englobe trois domaines bien distincts : maritime, estuarien et continental.

Sur la partie continentale, le domaine présente sur près de 80000 ha différentes formations paysagères. Dans la zone basse, on note des formations de mangroves et de surfaces salées communément appelées « tannes » tandis que sur la zone haute on observe une alternance de forêts, de savanes arborées ainsi que des zones de cultures et d'habitations. Le domaine estuarien présente une succession de mangroves, de vasières, de banc de sables, des terres salées intertidales, des îlots sableux et d'herbiers marins (Kane et al, 2016). Dans cette partie se localisent les trois grands groupes d'îles séparées par les bras de mer du Saloum, du Diomboss et du Bandiala :

- Au nord les îles Bétenty et les îles du Gandoul avec des villages importants comme Dionewar, Niodior, Bassoul ou encore Djirnda
- Au sud les îles Fathala

La partie estuarienne du Delta du Saloum se caractérise aussi par sa grande diversité biologique. En termes de ressources faunistiques, on répertorie tant des poissons, crustacés, mollusques, que des mammifères marins et oiseaux migrateurs (sternes royales, cormorans, aigrettes, etc.).

Le domaine maritime est marqué par la richesse de ses écosystèmes marins qui assurent la présence d'une avifaune (notamment dans les îles Bœufs, les îlots aux oiseaux), d'animaux marins (cétacés, poissons et crustacés, etc.) (O. Sarr, 2005).

Ainsi sa richesse écologique fait du Delta du Saloum une aire du patrimoine écologique mondial. En effet, de nombreuses aires protégées et réserves y sont répertoriées avec divers statuts dont :

- Le parc national du Delta du Saloum (PNDS) créé en 1976 ; il fait partie de la première génération d'aires protégées mis en place au Sénégal et couvre une superficie de 76000 ha où l'exploitation des ressources est strictement interdite
- La Réserve de Biosphère du Delta du Saloum créée en 1980 d'une superficie de 334000 ha. englobant aussi le PNDS, elle bénéficie du titre de site Ramsar depuis 1984 et est reconnue patrimoine mondial de l'UNESCO en 2011
- L'aire marine protégée communautaire du Bamboung, créée 2002 elle est officiellement reconnue en 2004 et se distingue par sa gestion participative et son objectif de restaurer les ressources halieutiques fortement exploitées<sup>4</sup>.

La mise en place de ces aires protégées ainsi que la présence d'amas coquilliers millénaires ; dont les 218 amas coquilliers, parfois plusieurs centaines de mètres de long, sur lesquels on trouve plusieurs centaines de tumulus funéraires<sup>5</sup>; font du Delta du Saloum un espace d'attraction touristique mais aussi de conservation. Une situation que justifie l'importante dégradation des écosystèmes marins et côtiers notamment la mangrove suite aux aléas climatiques des années de sécheresse mais aussi en raison de la forte pression démographique. En effet, les populations, essentiellement composées de Sérères Niominkas et de Socés, sont très dépendantes des ressources naturelles en présence. La pêche et la cueillette de mollusques sont les activités dominantes avec une claire répartition des tâches, la pêche étant le domaine exclusif des hommes tandis que les femmes s'activent dans la transformation (séchage et fumage). L'agriculture est aussi pratiquée et joue considérablement dans l'économie et l'alimentation (maïs, niébé, mil..).

Toutefois, l'équilibre économique de la région est précaire en raison de l'accroissement démographique, de l'urbanisation et de la variabilité climatique qui sont autant de facteurs qui pèsent sur la pérennité des ressources naturelles, du cadre de vie (érosion et recul du trait de côte, manque d'assainissement, problèmes d'accès à l'eau) et réorganise négativement la dynamique de la région avec l'augmentation des flux migratoires vers les villes et régions périphériques.

#### 4.2.2 Exposition

Du point de vue géomorphologique, le littoral sénégalais est dominé par des sédiments meubles dans une proportion de 92% pour 8% de façades rocheuses (Diaw, 1997). Pour sa part, la frange côtière de la région de Fatick est grandement dominée par un profil de delta et estuaire à mangroves qui fait la caractéristique de l'embouchure du fleuve Sine-Saloum. Par ailleurs, ce littoral s'avère exposé à des aléas climatiques majeurs, comme les tempêtes (Bâ et Diouf, 1996; Barousseau, 1993; Diara, 1999; Diaw *et al.*, 1990 ; Diaw, 1997 ; Thomas et Diaw, 1998; Nardari, 1993, *in* Bouchet, 1998). Ces extrêmes

---

<sup>4</sup> in Schéma directeur d'aménagement et de développement du pôle territoire Sine-Saloum (2017)

<sup>5</sup> Université de Moncton, 2016, Adaptation aux changements climatiques des communautés du Nouveau Brunswick: Étude de cas sur le Saloum [http://www8.umoncton.ca/umcm-climat/uved/grain/4\\_7\\_2\\_le\\_delta\\_du\\_saloum\\_au\\_senegal/page:15](http://www8.umoncton.ca/umcm-climat/uved/grain/4_7_2_le_delta_du_saloum_au_senegal/page:15)



aboutissent à des débordements (franchissements) des dunes littorales provoquant des ruptures de la flèche sableuse de Sangomar avec des conséquences notables sur les établissements humains, les structures socio-économiques ainsi que sur l'écologie des villages de la région. Divers travaux scientifiques menés dans la zone (Mage, 1863 ; Minot, 1934 ; Tromeur, 1939 ; Le Fur, 1950 ; Diaw *et al.*, 1990 et Diaw, 1997) indiquent que la flèche de Sangomar a subi plusieurs ruptures historiques, dont les plus significatives restent celles de 1860, 1928, 1952 et 1954. Celles-ci sont toutes signalées au même endroit, à savoir sur le Lagoba, également appelé Diokhane. Cependant, la dernière rupture en date, celle du 27 février 1987 fut sans doute la plus marquante résultant d'une conjonction météorologique exceptionnelle (Diaw *et al.*, 1990 ; Diaw, 1997 ; Thomas et Diaw, 1998 ; Bouchet, 1998), caractérisée par :

- une tempête provoquée par une dépression barométrique de 970 hectopascals au large ;
- des houles de forte amplitude (de 2,5 à 3,5 m) ;
- des marées de vives eaux atteignant 1,71 m à Dakar et 1,95 m à Banjul ;
- des vents de force 7 (coup de vent).

Il apparaît que cette partie du littoral sud du Sénégal est fortement exposée aux aléas climatiques. A titre d'exemple, l'ouragan Cindy qui s'est déclenché le 18 août 1999 avait provoqué d'énormes dégâts sur le littoral. Ainsi, 108 victimes ont été comptés, dont 37 à Fatick, notamment des pêcheurs de Foundiougne, Dionewar et Niodior. Des pertes matérielles ont aussi été enregistrées avec des dizaines de pirogues endommagées et des dégâts d'un montant de 68, 8317 millions de Francs CFA (Ministère de l'Intérieure du Sénégal ; Sagna, 2003).

#### 4.2.3 Sensibilité

Avant la présentation de l'ICV, l'indice des 6 facteurs ou variables de vulnérabilité pris en compte (la géomorphologie, l'érosion/ accrétion de la ligne du rivage, la pente de la côte, la remontée relative du niveau de la mer, la hauteur moyenne des houles et l'amplitude moyenne de la marée) est tout d'abord étudié, comme le recommande le GIEC (1991). Cette étude est déroulée en fonction des segments côtiers et permettra de mieux voir la sensibilité de la zone d'étude. Ainsi quatre segments sont délimités sur la côte amont-dérive, d'une part, et trois autres segments sur la côte aval-dérive (figure 11).

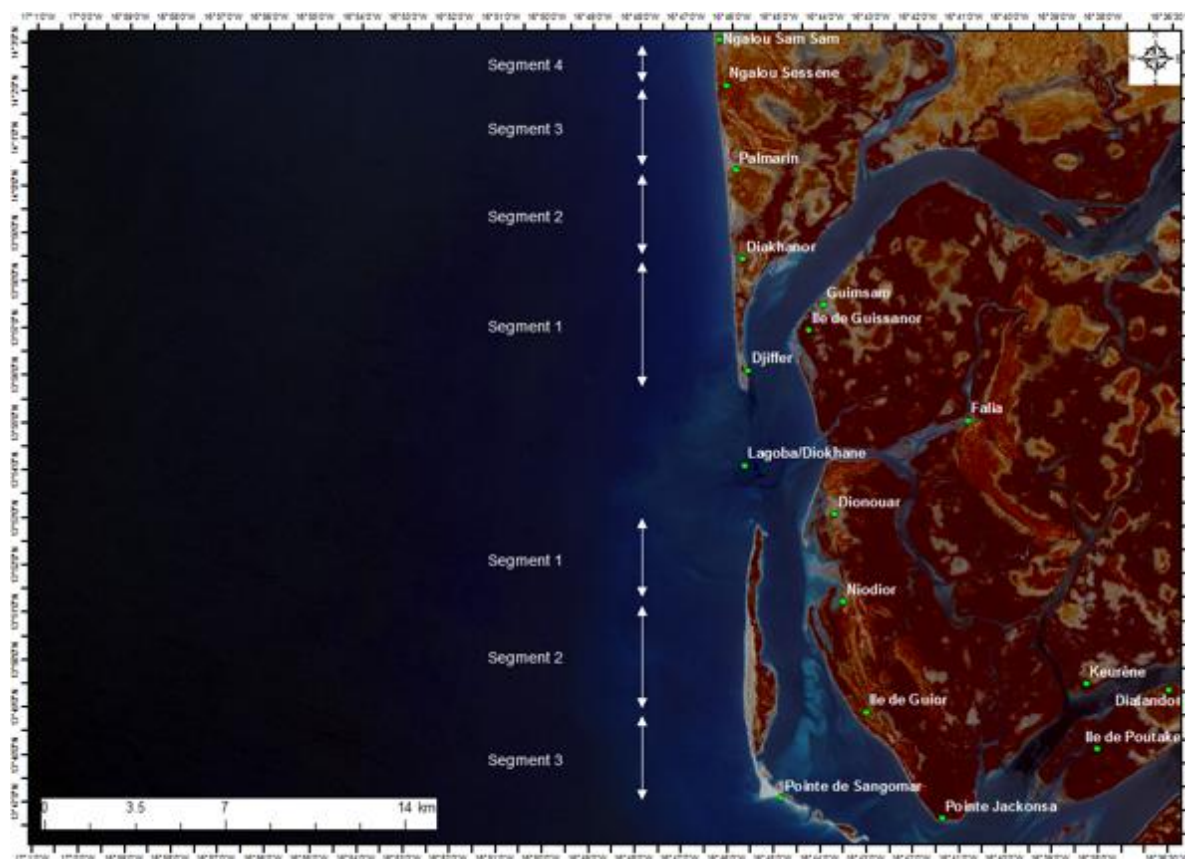


Figure 11: Présentation des segments côtiers

Sur la côte amont-dérive, les segments identifiés sont répartis comme suit:

- segment 1 allant de Djiffère à Diakhanor ;
- segment 2 allant de Diakhanor à Palmarin ;
- segment 3 allant de Palmarin à Ngalou Sessene ;
- segment 4 allant de Ngalou Sessene à Ngalou Sam Sam.

Sur la côte aval-dérive, les segments suivants sont considérés :

- segment 1 : de Dionewar à Niodior ;
- segment 2 : de Niodior à île de Guior ;
- segment 3 : de l'île de Guior à la pointe de Sangomar.

C'est en fonction de ces segments que sera présenté l'indice des 6 facteurs ou variables de vulnérabilité. En fonction de sa longueur, un segment peut contenir plusieurs sous-segments.

#### 4.2.3.1 Aspects biophysiques : évaluation de l'ICV

Les variables de l'ICV montrent plusieurs échelles spatiales de variabilité.

##### a. La géomorphologie

La géomorphologie est à vulnérabilité très élevée sur toute la zone d'étude. Ce facteur traduisant la résistance relative des différents types de relief vis-à-vis de l'érosion est déterminé sur la base de l'échelle de classification de la variable géomorphologique établie par Thieler et Hammar-Klose (2000a), où il correspond à la 5<sup>ème</sup> classe (tableau 4).

Tableau 4 : Echelle de classification de la variable Géomorphologie (THIELER and HAMMAR-KLOSE, 2000a)

		Classement de l'indice côtier de vulnérabilité (ICV)				
		Très bas	Bas	Modéré	Elevé	Très élevé
Variables		1	2	3	4	5
<b>Géomorphologie</b>		Côtes rocheuses, côtes escarpées, Fjords, Fiards	Falaises moyennes, côtes dentelées	Falaises basses, dépôts glaciaires, plaines alluviales	Plages de galets, estuaire, lagune	Plages de barrières, plages de sable, marais salants, vasières, deltas, mangrove, récifs coralliens

Ce classement révèle que du point de vue géomorphologique, la zone d'étude a une sensibilité très élevée, avec donc un risque très élevé d'érosion. L'embouchure du Saloum est en effet déviée par la flèche littorale de Sangomar sur plusieurs kilomètres, vers le Sud (sens de la dérive littorale), avec un chenal dont la longueur augmente, à mesure que s'allonge la flèche littorale. Cette flèche qui joue un rôle fondamental dans la stabilisation de l'embouchure et l'ensemble du littoral du Saloum, abrite un chapelet de villages en son sein, notamment Ngalou Sam Sam, Ngalou Sessene, Palmarin, Diakhanor et Djiffère. Elle protège également des villages insulaires (Guimsam, Guissanor, Dionewar, Niodior et Guior) contre l'énergie de la houle. Cependant, cette barrière est souvent rompue par l'ouverture de brèches à la latitude du village de Lagoba, ce qui amenuise considérablement son rôle de rempart et expose du coup les villages jadis abrités et protégés aux assauts de la houle. Par ailleurs, ce système flèche-embouchure est aussi constitué de plages sableuses, qui sont également soumises à l'érosion.

**b. L'érosion/ accrétion de la ligne du rivage**

Du fait de la survenue d'une brèche sur la flèche sableuse en 1987, la variable érosion/ accrétion de la ligne du rivage est analysée en deux temps : avant et après cet événement majeur. Elle est ensuite étudiée sur une période synthétisant les deux phases (avant et après). Ainsi, sur la période allant de 1954 jusqu'en 1987 (janvier) l'analyse montre un recul de la ligne du rivage depuis Ngalou Sessene jusqu'à la latitude de Niodior, avec un taux variant entre - 0,65 et - 4,59 m/an (figure 12).

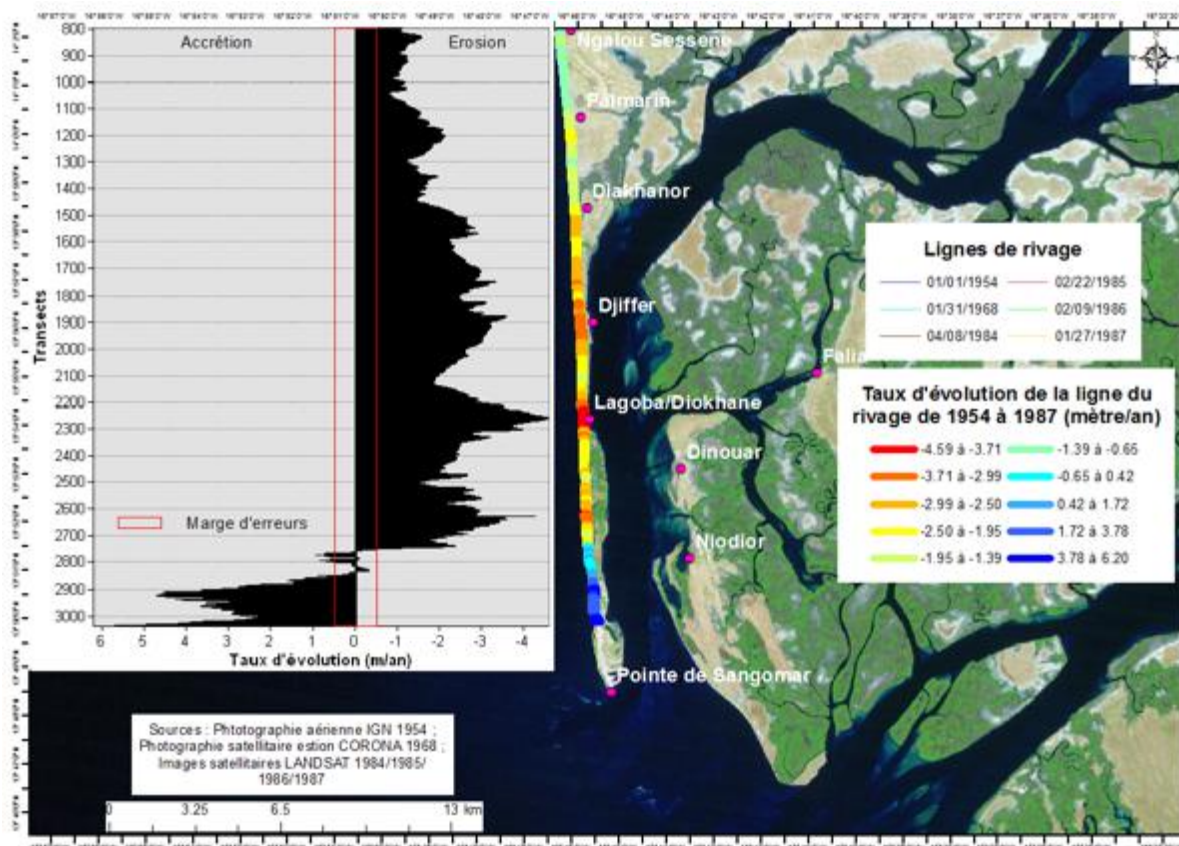


Figure 12 : Dynamique de la ligne du rivage avant l'ouverture de la brèche (de 1954 à 1987)

Cette érosion estimée à -1,13 m/an à Ngalou Sessene, devient de plus en plus forte à mesure que l'on évolue vers le Sud, et s'élève ainsi à - 1,47 m/an à Palmarin, alors qu'à Diakhanor elle est de -2,13 m/an et - 3,43 m/an à Djiffère. Le taux d'érosion maximal est atteint à Lagoba, avec - 4,59 m/an. Par contre au Sud de la latitude de Niodior, il s'opère une accrétion progressive qui atteint un taux maximum de 6,20 m/an.

Toutefois la dynamique du segment de la flèche littorale connexe au village de Lagoba va connaître une brutale évolution. En effet, déjà fortement fragilisé par l'érosion, il sera brusquement frappé et rompu par un événement météo-marin extrême. Le 27 février 1987, une rupture survient sur la flèche sableuse, à Lagoba, lors d'une tempête accompagnée par de fortes houles de Nord-Ouest (DIAW *et al.*, 1990 ; DIAW, 1997 ; THOMAS et DIAW, 1988). Cette brèche va entraîner des répercussions notables sur la dynamique littorale. Ainsi, sur la période suivant cette rupture, notamment d'avril 1987 à 2018, le littoral affiche une tendance à l'érosion depuis Ngalou Sessene jusqu'aux abords de Niodior, à partir d'où une accrétion se manifeste notamment vers la pointe Sangomar (figure 13).



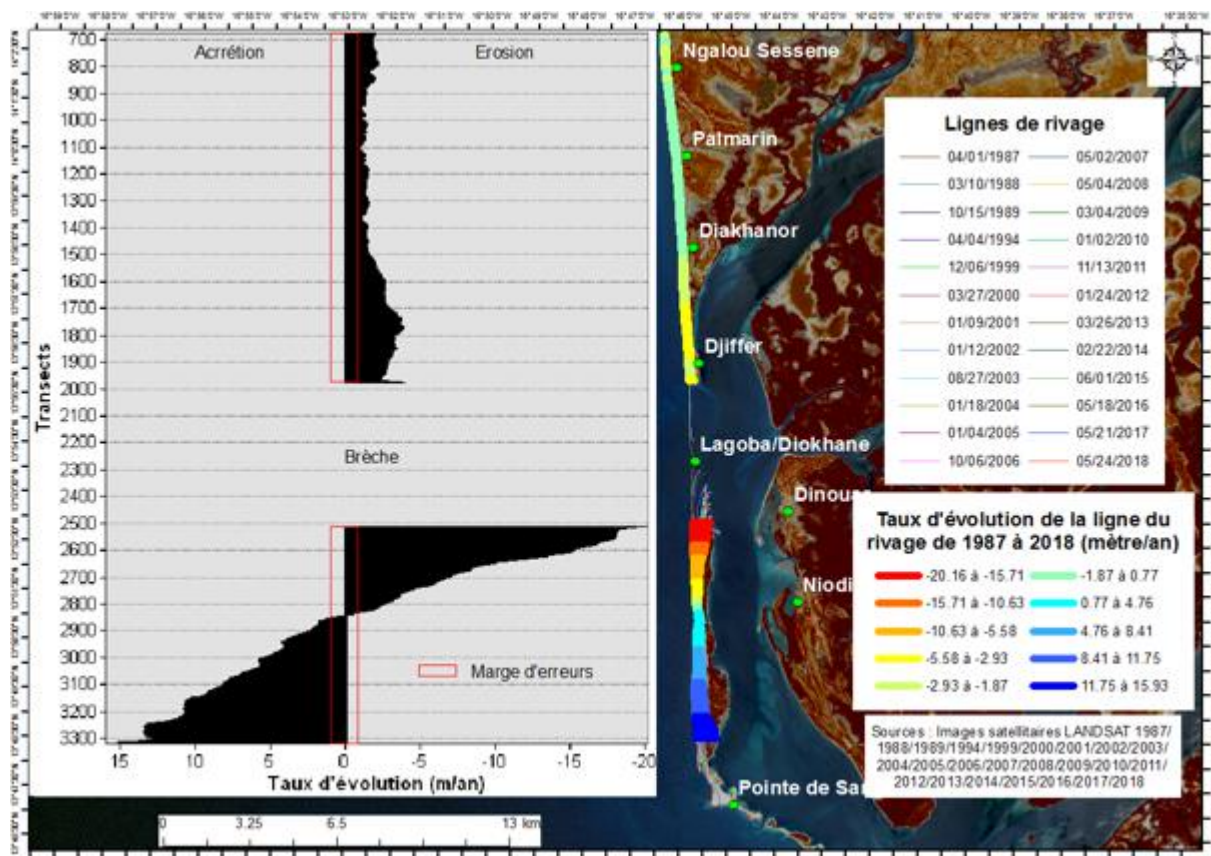


Figure 13 : Dynamique de la ligne du rivage après l'ouverture de la brèche (de 1987 à 2018)

Sur la côte amont-dérive, le recul de la ligne du rivage s'intensifie globalement du Nord au Sud, passant de - 2,07 m/an à Ngalou Sessene, contre - 1,07 m/an à Palmarin, - 1,21 m/an à Diakhanor et -2,37 m/an à Djiffère. Le recul du littoral atteint son plus fort taux au début de la côte aval-dérive, au Sud de la brèche, avec un maximum de - 20,16 m/an. Cependant, cette érosion s'atténue ensuite progressivement comme signalé plus haut à hauteur de Niodior.

A partir de ces deux périodes d'analyse (avant et après l'ouverture de brèche), une troisième analyse englobant les deux précédentes est effectuée. Sur la période 1954 à 2018, la dynamique de la ligne du rivage montre une érosion assez importante, de Ngalou Sessene jusqu'à Djiffère, sur la côte amont-dérive, avec des taux de -0,58 à -6,79 m/an (figure 14).

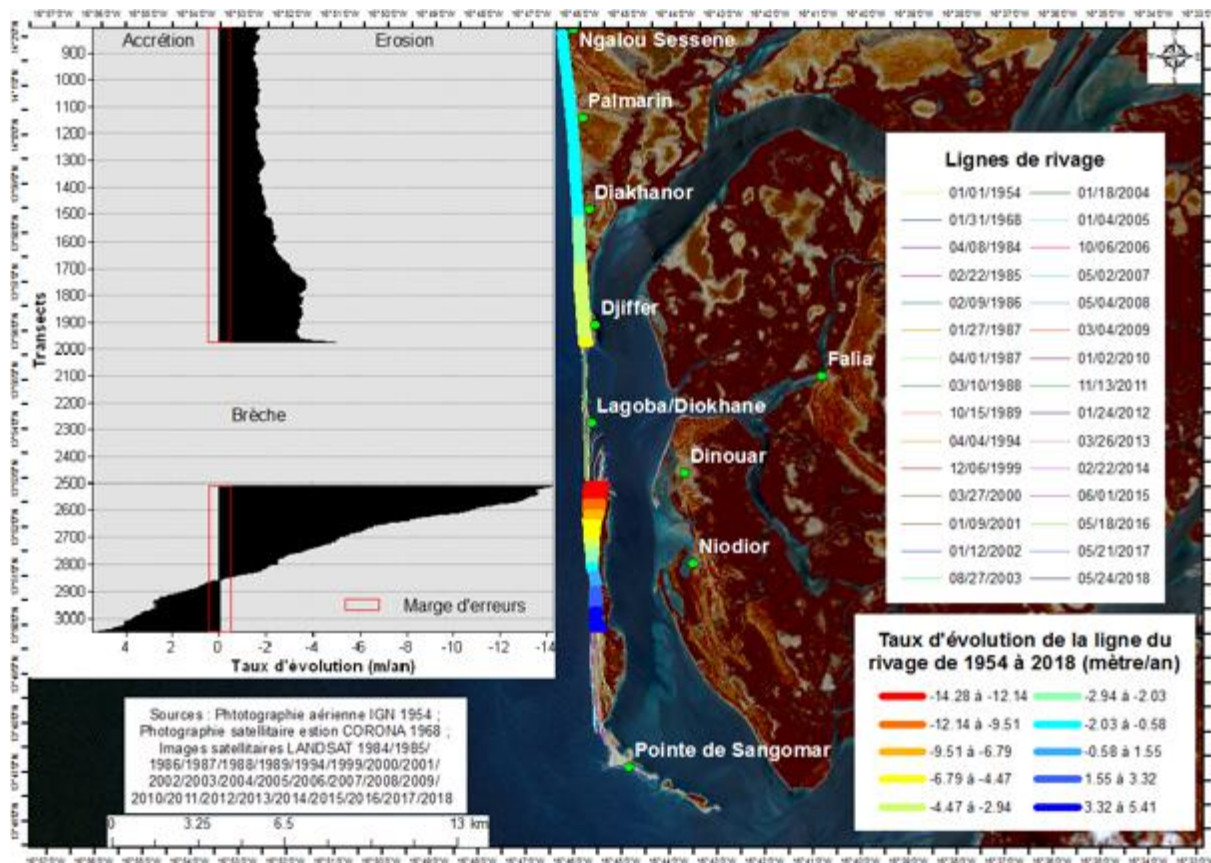


Figure 14 : Dynamique de la ligne du rivage sur l'ensemble de la période (de 1954 à 2018)

Alors qu’au Sud de la brèche, en côte aval-dérive, le recul de la ligne du rivage est beaucoup plus important et atteint un taux maximal de -14,28 m/an. Néanmoins, on constate une diminution progressive de ce taux jusqu’au Sud de Niodior, à partir d’où s’observe une accrétion qui atteint au maximum 5,41 m/an.

Conjointement, l’élargissement de la brèche devient progressivement au fil des années, la nouvelle embouchure du fleuve Saloum (figure 15).

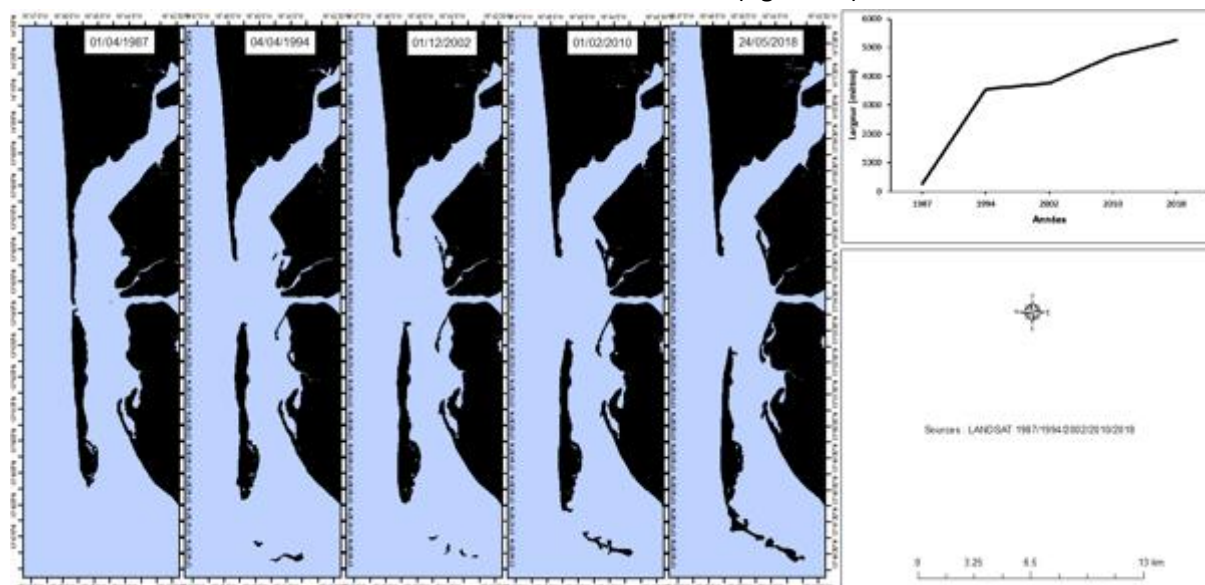


Figure 15 : Élargissement de la brèche entre 1987 et 2018



Avec une largeur de 277,81 m, juste un mois après la rupture, la brèche s'agrandit constamment pour atteindre 5,25 km en 2018. Cet élargissement expose davantage les villages d'arrière-côte aux effets de la houle et à des submersions marines. De plus, des modifications apparaissent sur l'ancienne embouchure sur Saloum.

Une analyse surfacique a simultanément été menée afin de compenser les limites de l'analyse métrique. Elle a permis de faire un bilan en termes de surfaces en érosion et en accrétion. Ainsi, sur la période précédant l'ouverture de la brèche, c'est-à-dire entre 1954 et 1987, la quantité des surfaces en érosion était déjà supérieure à celles en accrétion (figure 16).

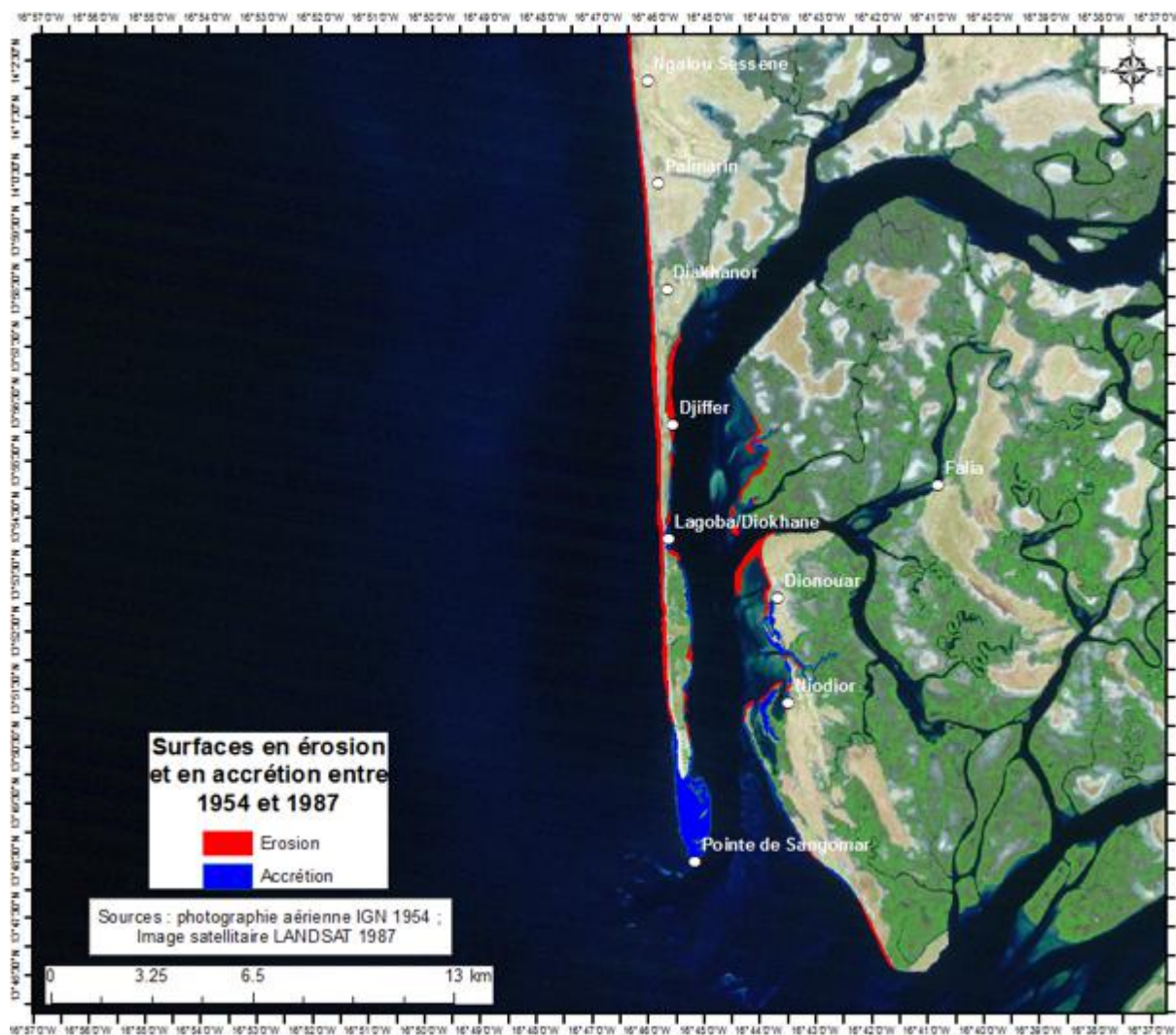


Figure 16 : Analyse surfacique entre 1954 et 1987

Le total de surfaces en érosion est de - 3 111 131,88 m<sup>2</sup>, alors que celui de surfaces en accrétion n'est que de 2 286 958,36 m<sup>2</sup>. Le bilan sédimentaire se révèle donc négatif avec un déficit de 824 173.52 m<sup>2</sup> en 33 ans.

La dynamique se poursuit et la période suivant la rupture de la flèche (de 1987 à 2018) fait également apparaître une quantité de surfaces en érosion beaucoup plus importante que celle en accrétion (figure 17).

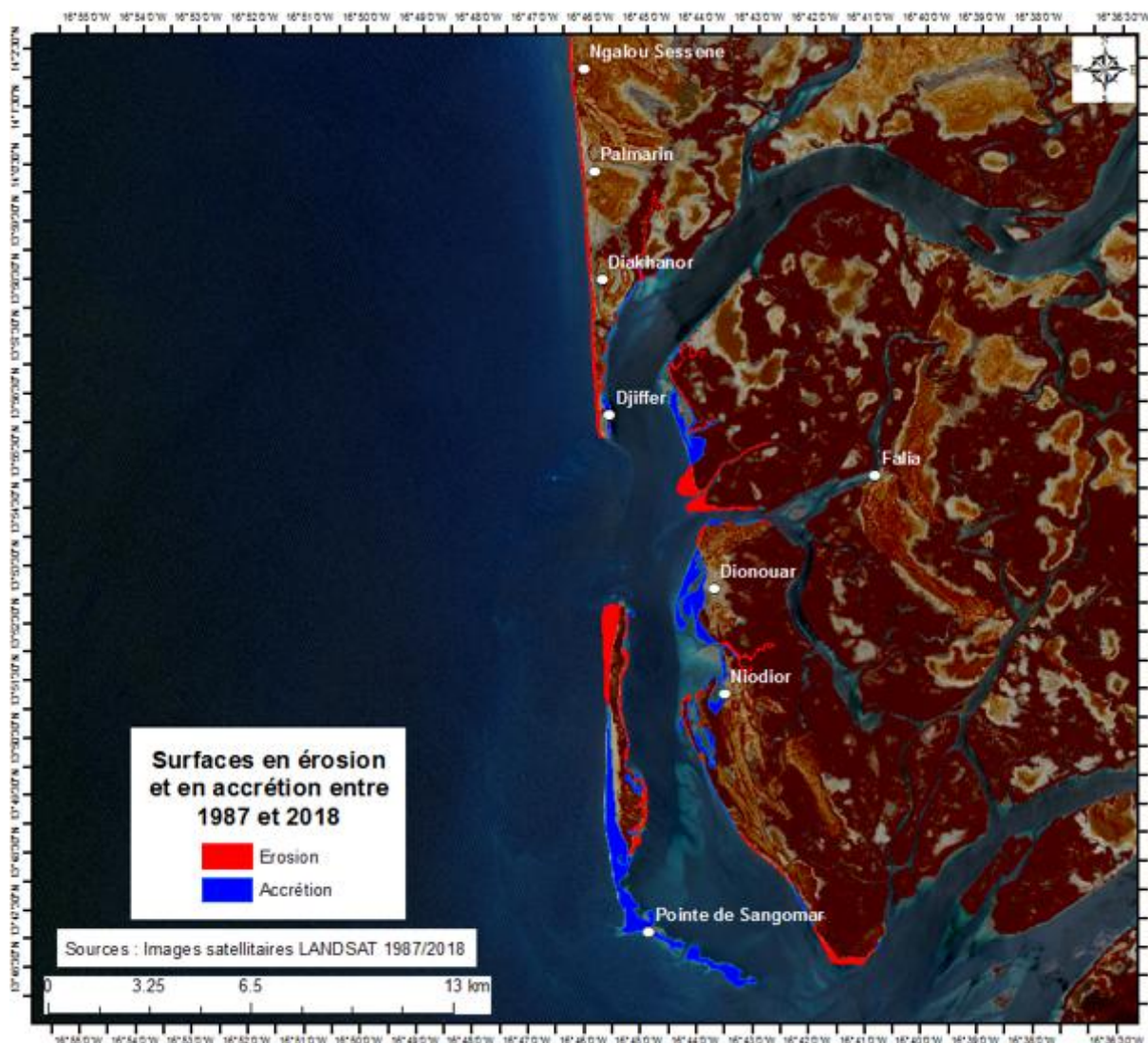


Figure 17 : Analyse surfacique entre 1987 et 2018

La somme de surface en érosion s'élève à - 6 084 252,61 m<sup>2</sup>, alors que le montant de surfaces en accrétion atteint seulement 2 480 813,48 m<sup>2</sup>. Cela donne un bilan sédimentaire déficitaire de -3 603 439,13 m<sup>2</sup>. En une trentaine d'années, le déficit sédimentaire ainsi largement quadruplé et traduit l'importance de l'érosion dans la zone d'étude.

### c. La pente de la côte

Avant d'aborder la pente côtière, une analyse de la topo-bathymétrie est d'abord présentée.

#### c.1. La topo-bathymétrie côtière

L'étude de la topo-bathymétrie côtière affiche des altitudes culminant à 5,22 m et des profondeurs atteignant à peine -1,50 m. Plus la topographie du segment côtier est élevé, moins celui-ci est vulnérable. Sur la côte amont-dérive, la pointe de Djiffère montre une plage à morphologie assez homogène avec des dunes atteignant au maximum 2,70 m et une profondeur maximale de -1,26 m



(figure 18). La pointe culmine à une altitude de 1,54 m et la majeure partie de la zone levée se situe entre -1,11m et 1,26 m.



Figure 18 : Topo-bathymétrie côtière de la pointe Djiffère

Par contre, sur l'extrémité de Nord de Djiffère toujours, la morphologie côtière reste régulière, avec une zone dunaire de 3,17 m et profondeur maximale de -0,78 m (figure 19). La majeure partie de ce linéaire littoral est comprise entre -0,32 et 2,85 m.

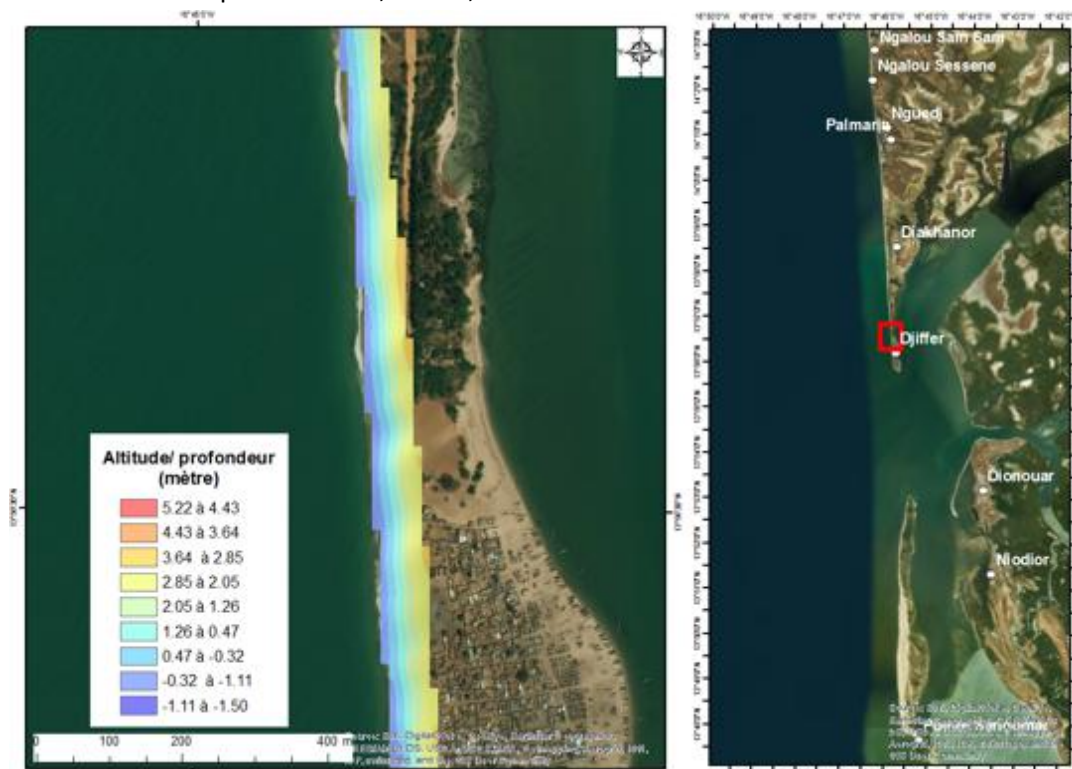


Figure 19 : Topo-bathymétrie côtière du Nord de Djiffère

A Diakhanor, la côte ressort une morphologie majoritairement comprise entre -0,32 et 2,85 m (figure 20).



Figure 20 : Topo-bathymétrie côtière de Diakhanor

Ce linéaire est coiffé par une dune de 2,96 m et des fonds d'à peine -0,08 m, en plage immergée. A la suite au niveau du village de Palmarin, la morphologie côtière montre une évolution assez irrégulière et affiche une plage majoritairement comprise entre -0,05 et 2,5 m (figure 21).

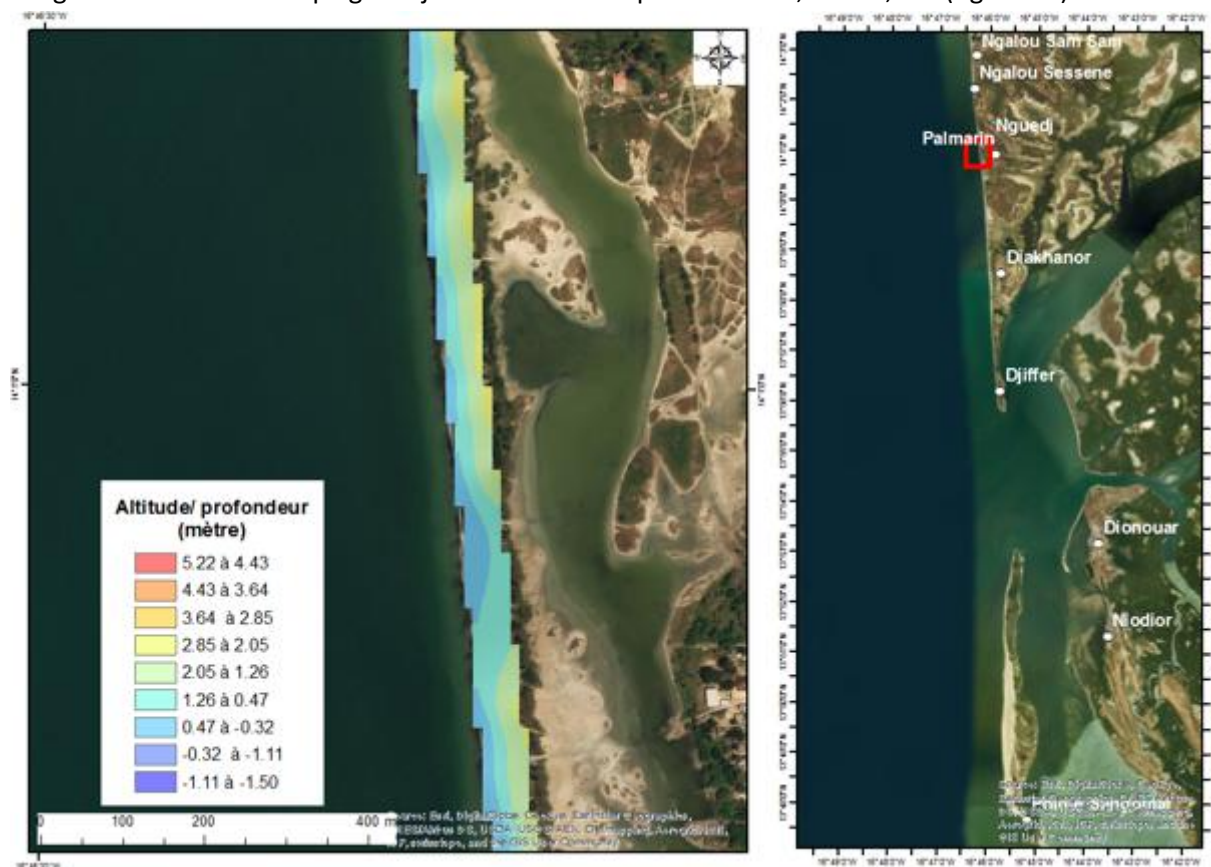


Figure 21 : Topo-bathymétrie côtière de Plamarin

Cependant, ce segment littoral atteint son point le plus haut sur une dune de 2,38 m, alors que la plage immergée atteinte est à peine de -0,02 m.

A Nguedj, la morphologie côtière est assez régulière au début et s'avère moins régulière à la fin, vers le Nord notamment (figure 22). Ainsi, l'altitude maximale s'élève à 3 m, au sommet d'une dune, la profondeur maximale atteinte étant de -0,25 m. Globalement, la plage est comprise entre 0,47 et 2,85 m.



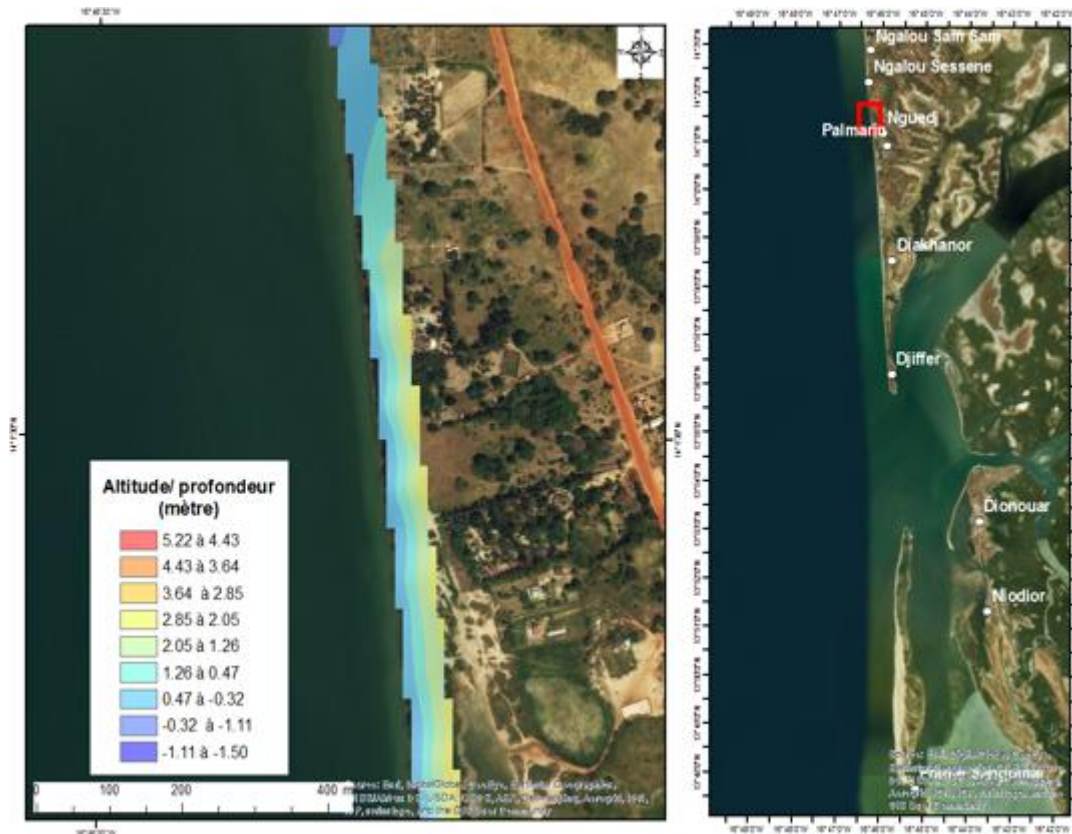


Figure 22 : Topo-bathymétrie côtière de Nguedj

A Ngalou Sessene, la zone côtière laisse apparaître une morphologie assez simple comprise majoritairement entre -0,11 et 1,26 m (figure 23).

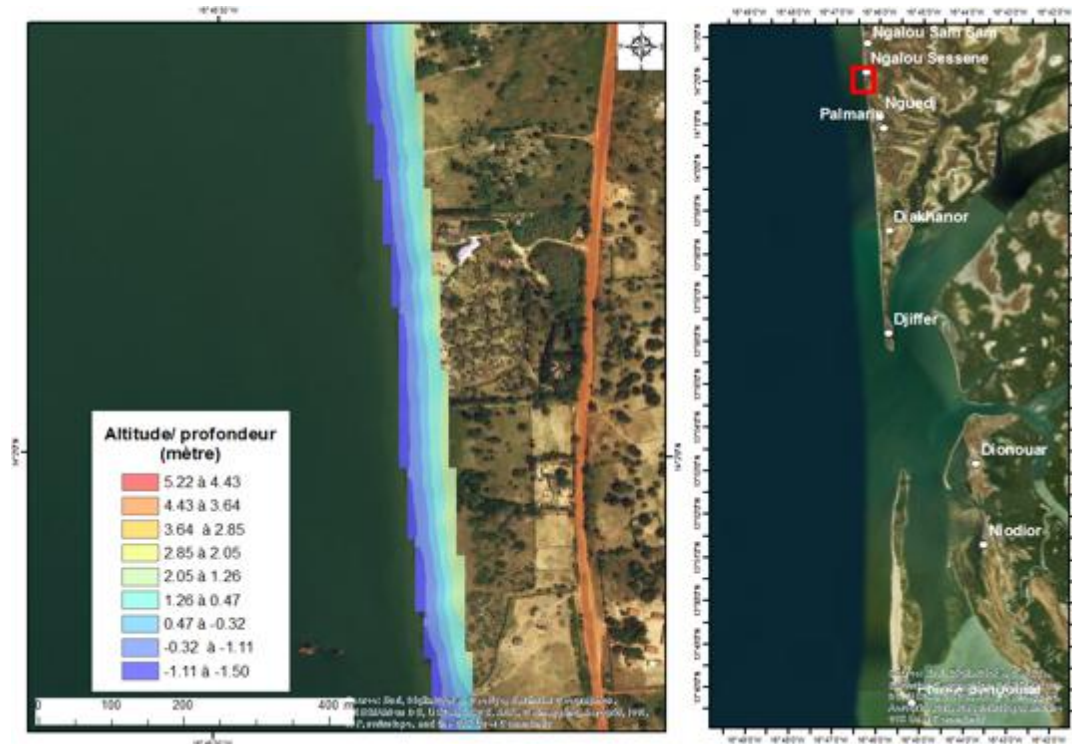


Figure 23 : Topo-bathymétrie côtière de Ngalou Sessene

Ici la zone dunaire culmine à 1,88 m avec une plage sous-marine de -1,5 m.

Au niveau de Ngalou Sam Sam, la côte laisse voir une morphologie assez homogène, avec une zone dunaire culminant à 2,38 m, et une plage immergée d'une profondeur maximale de -1,50 m (figure 24). De plus, la morphologie côtière est assez homogène, variant entre -0,11 et 2,05 m.

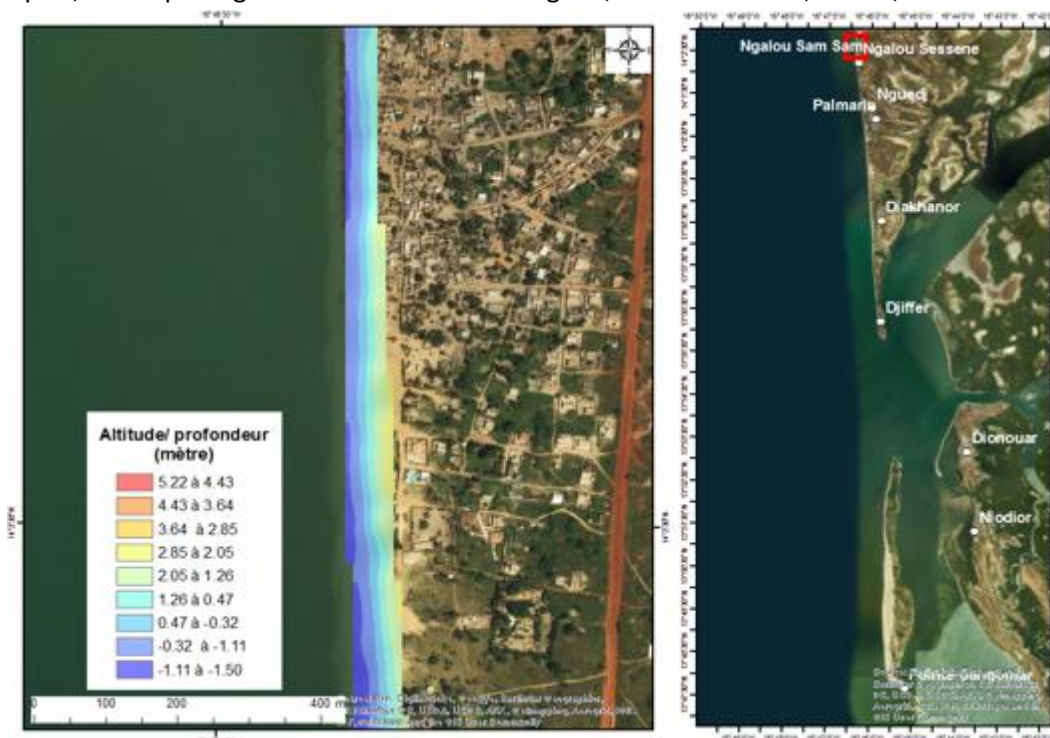


Figure 24 : Topo-bathymétrie côtière de Ngalou Sam Sam

Sur la côte aval-dérive, l'analyse de la topo-bathymétrie indique que la morphologie côtière au droit de Niodior est irrégulière et varie globalement entre -0,32 et 2,85 m (figure 25).

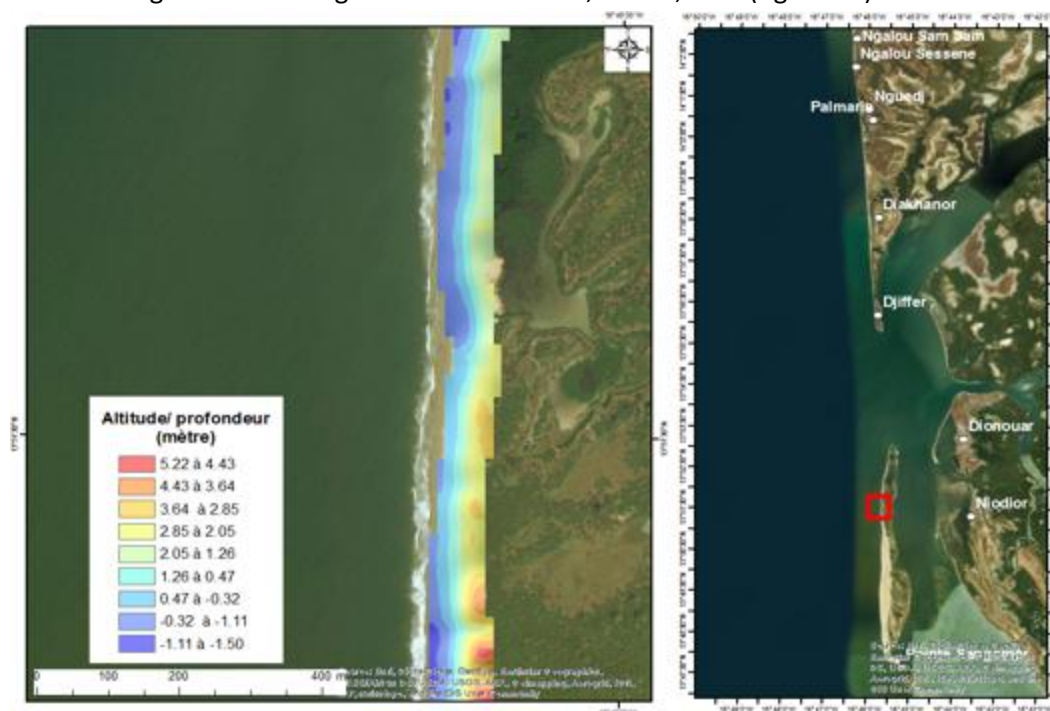


Figure 25 : Topo-bathymétrie côtière du sous-segment 1 au droit de Niodior

Ce linéaire est coiffé par de vastes dunes dont la plus importante s'élève à 5 m. La profondeur maximale atteinte sur la plage immergée est de -1,48 m. Par ailleurs, juste au sud de Niodior, la côte est très basse. Quelques dunes atteignant à peine 1,5 m, la profondeur maximale de la plage sous-marine étant de -1,50 m (figure 26). La plupart des éléments morphologiques de ce segment se trouvent entre -1,11 et 1,26 m.

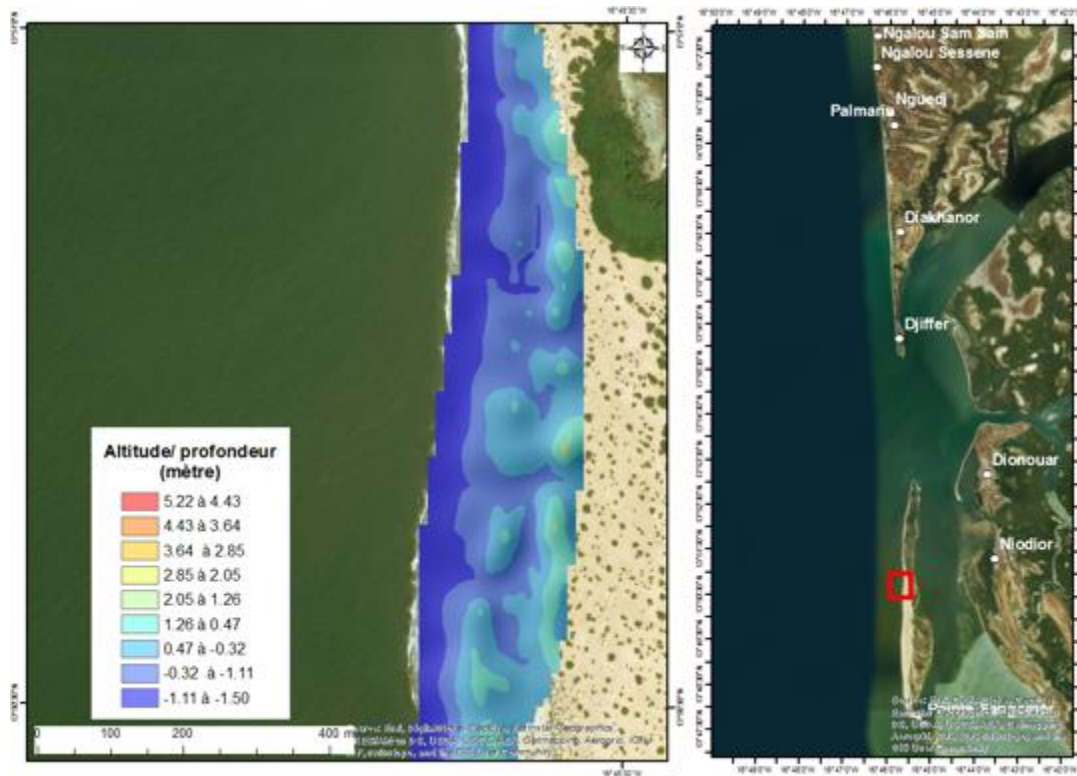


Figure 26 : Topo-bathymétrie côtière du sous-segment 2 au droit de Niodior



Le linéaire suivant affiche une morphologie semblable, avec néanmoins des dunes atteignant 2,15 m (figure 27). Ce segment côtier est cependant moins irrégulier que le précédent.

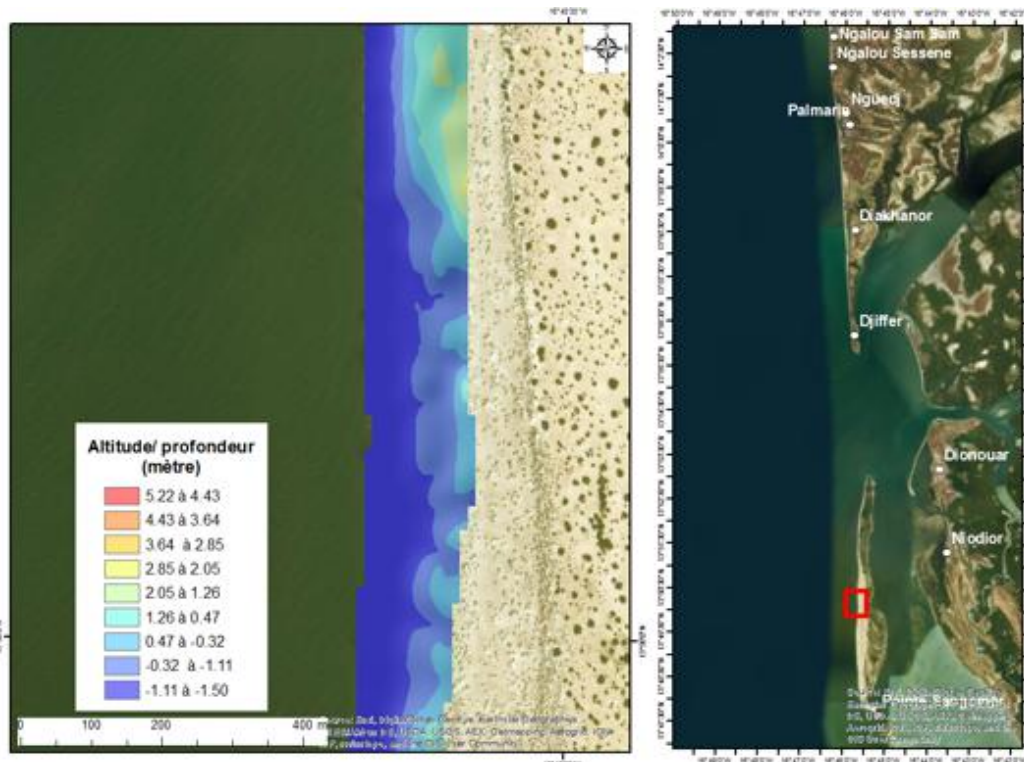


Figure 27 : Topo-bathymétrie côtière du sous-segment 3 au droit de Niodior

Toujours plus au sud, le linéaire suivant montre une zone côtière encore plus basse, la dune la plus haute atteignant seulement 1,45 m, la plage sous-marine étant quant à elle à -1,5 m, au maximum (figure 28).

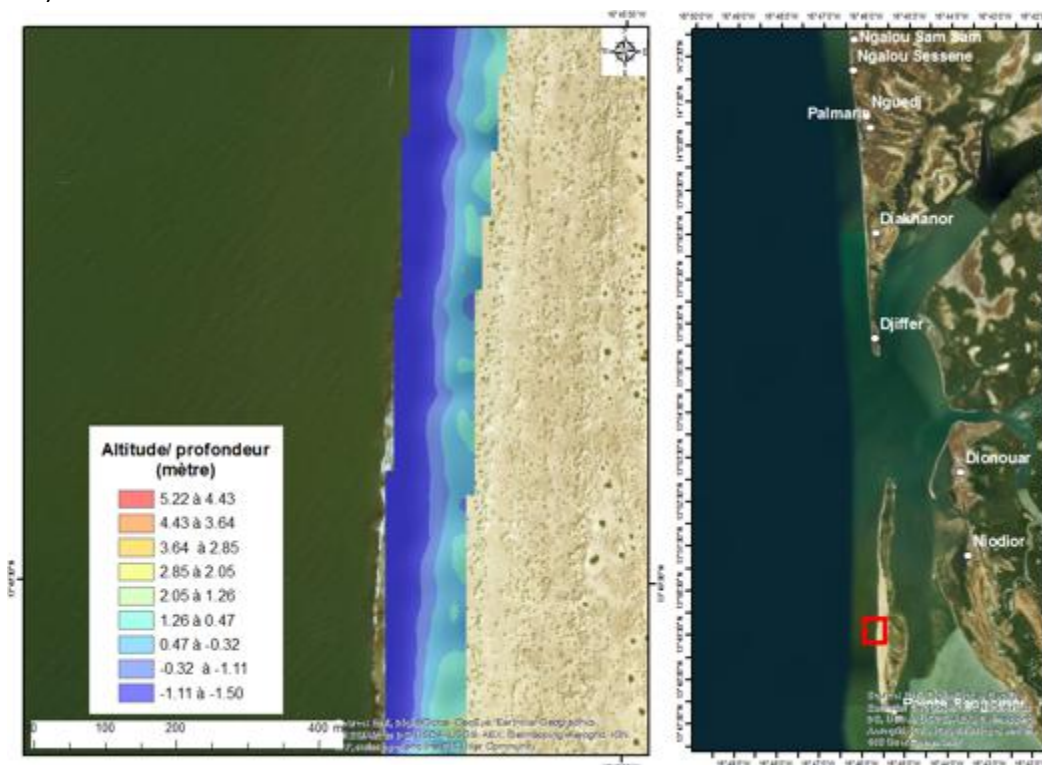


Figure 28 : Topo-bathymétrie côtière du sous-segment 4 au droit de Niodior



La plus grande partie de ce segment à la morphologie relativement régulière varie entre -1,11 et 0,47 m.

Par contre, le linéaire suivant révèle une côte parsemée de dunes, de plus en plus vaste vers le Sud (figure 29).

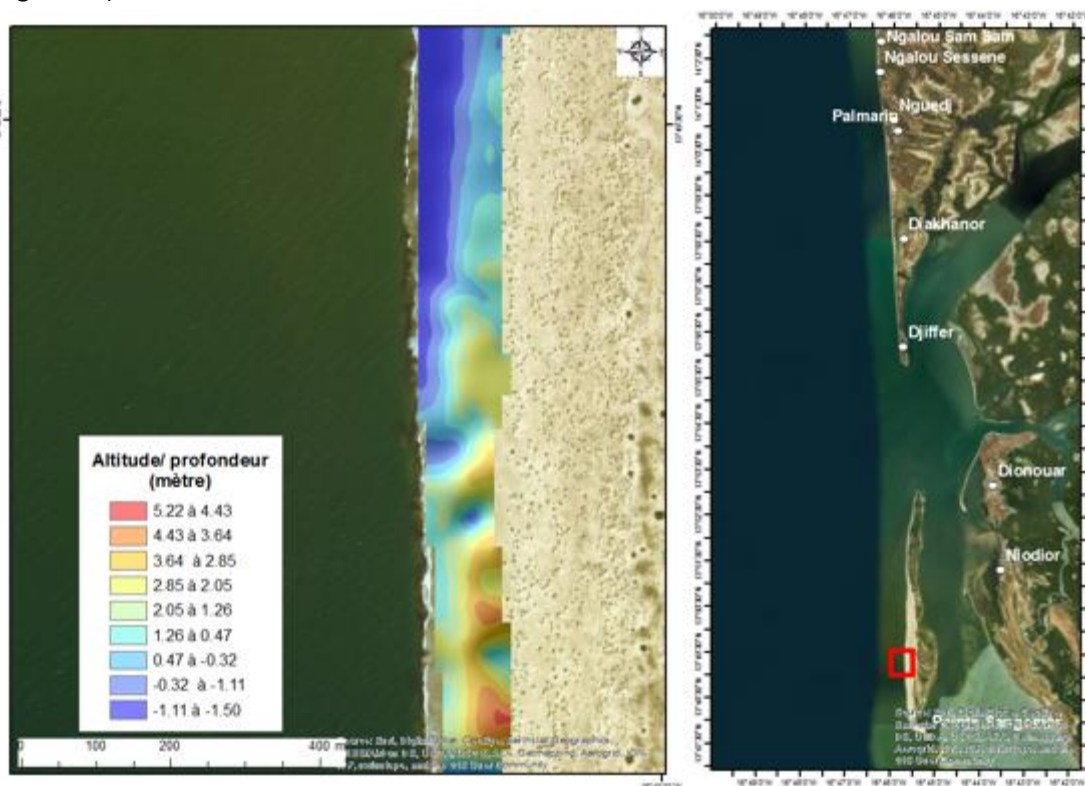


Figure 29 : Topo-bathymétrie côtière du sous-segment 5 au droit de Niodior

Les dunes sont plus hautes vers le Sud, où elles s'élèvent à 4,49 m. La morphologie reste irrégulière, sauf au Nord, où plus homogénéité est constatée.

### c.2. La pente côtière

La zone d'étude montre une pente atteignant 12,78%, au maximum. Les segments côtiers à pente raide sont moins vulnérables que ceux à pente douce (tableau 4). Cette pente varie en fonction du segment côtier. Ainsi, sur la côte amont-dérive, à Djiffère, la pente côtière est plus raide sur l'estran où elle atteint sa valeur maximale de 7,78 % (figure 30).

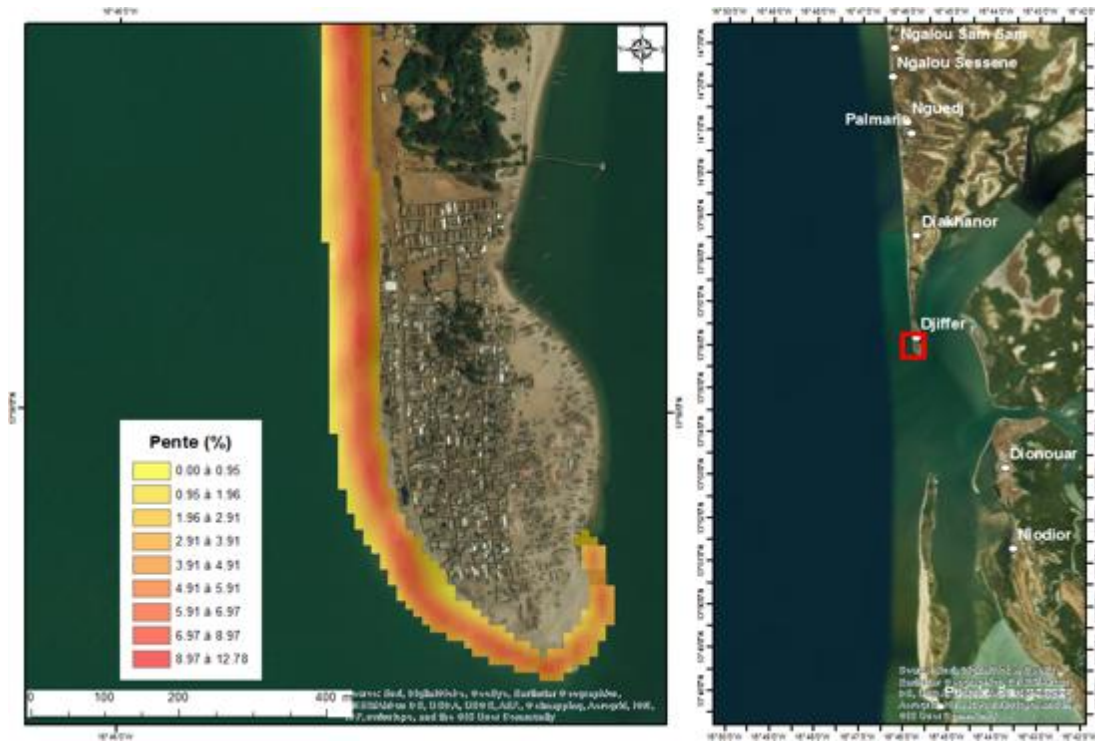


Figure 30 : Pente côtière sur la pointe Pointe Djiffère

Cette pente devient de plus en plus faible au fur et mesure que l'on se rapproche de la plage sous-marine (0,95 %) ou de la zone dunaire (0,16 %).

A Diakhanor, la pente côtière reste maximale sur l'estran. Elle s'y élève à 6,36 % (figure 31).

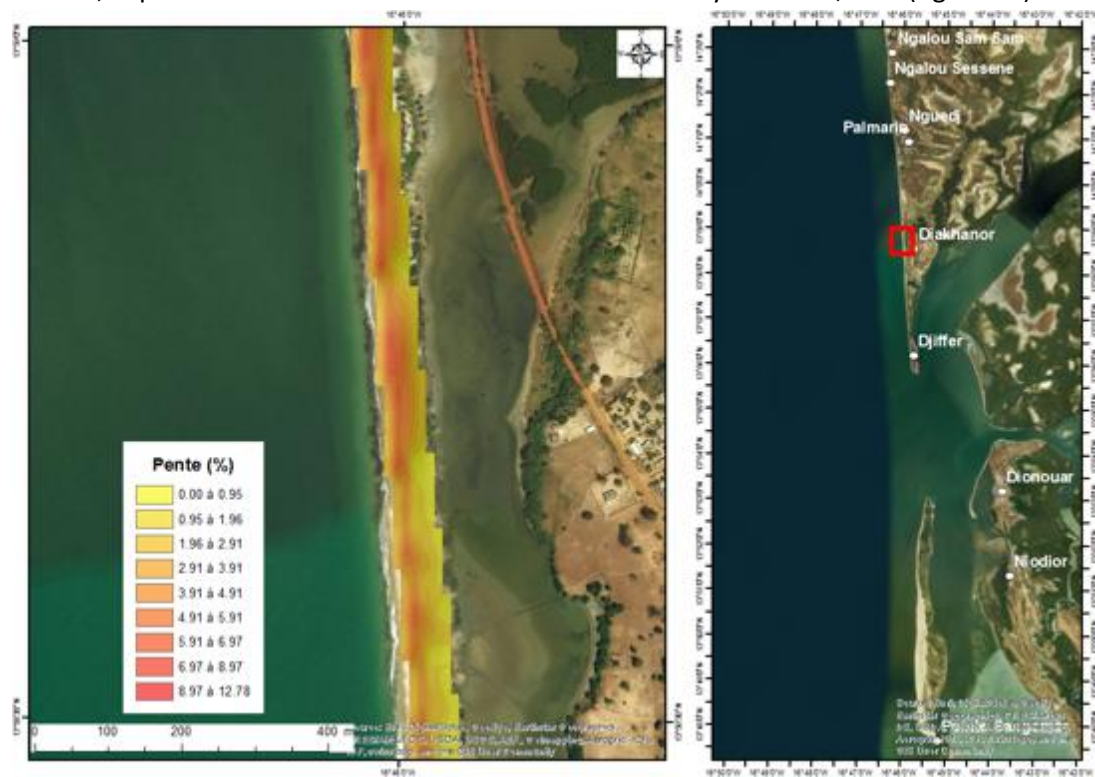


Figure 31 : Pente côtière à Diakhanor

Ce segment côtier affiche une pente plus douce sur la zone dunaire, où une valeur de 0,56 % est mesurée.

Au niveau de Palmarin, la pente s'avère plus escarpée sur la zone de marnage, avec 6,27 % (figure 32).

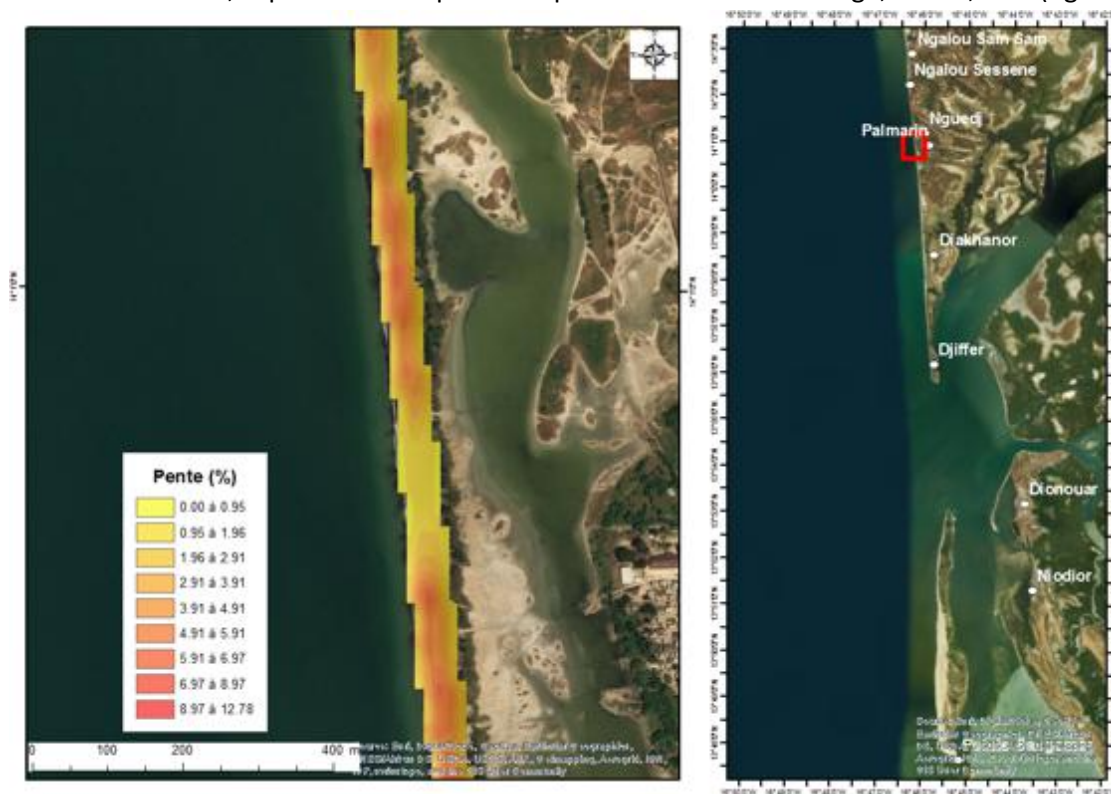


Figure 32 : Pente côtière à Palmarin

Ce linéaire côtier montre une faible pente sur la plage sous-marine (0,61 %). Paradoxalement, la pente atteint une valeur faible (1,39 %), sur la zone intertidale, où elle est pourtant maximale.

A Nguedj, la zone de marnage donne la pente la plus abrupte du segment, en particulier 7,24% (figure 33).



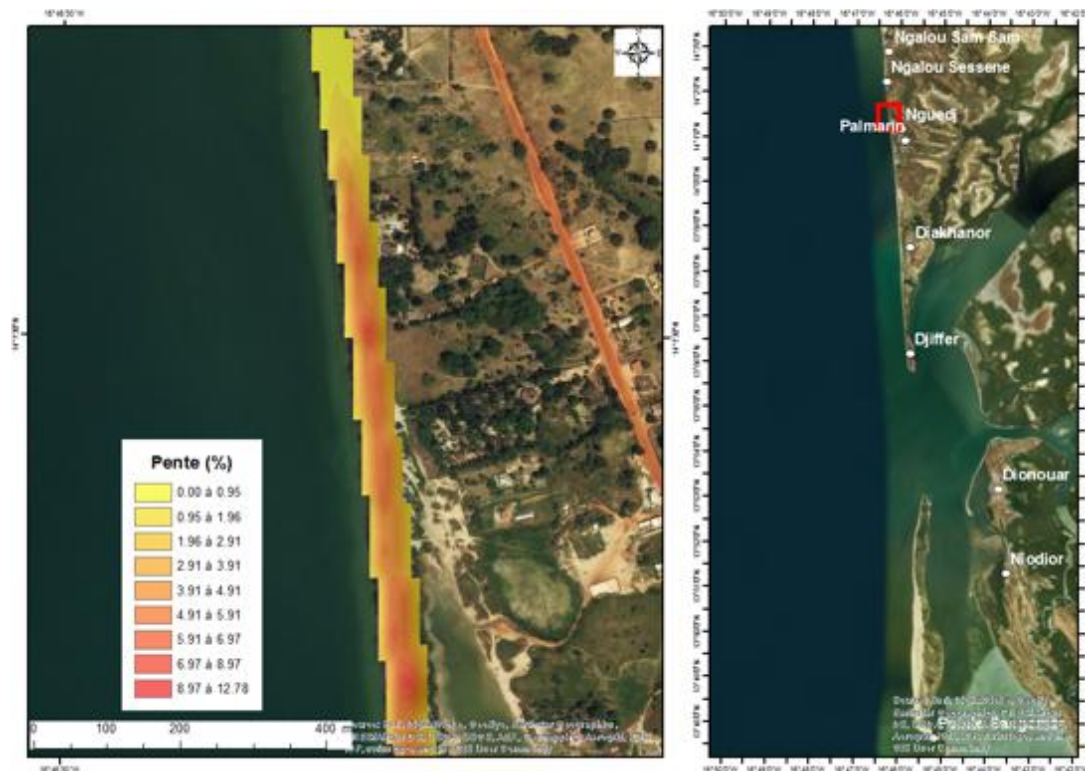


Figure 33 : Pente côtière à Nguedj

La plage immergée et la zone dunaire indiquent de plus douces pentes (0,41 %). Par ailleurs, l'estran montre une faible pente (0,88%) plus au Nord notamment.

A hauteur de Ngalou Sessene, la pente côtière est plus raide sur la zone de marnage. Elle est de 7,58 % (figure 34).

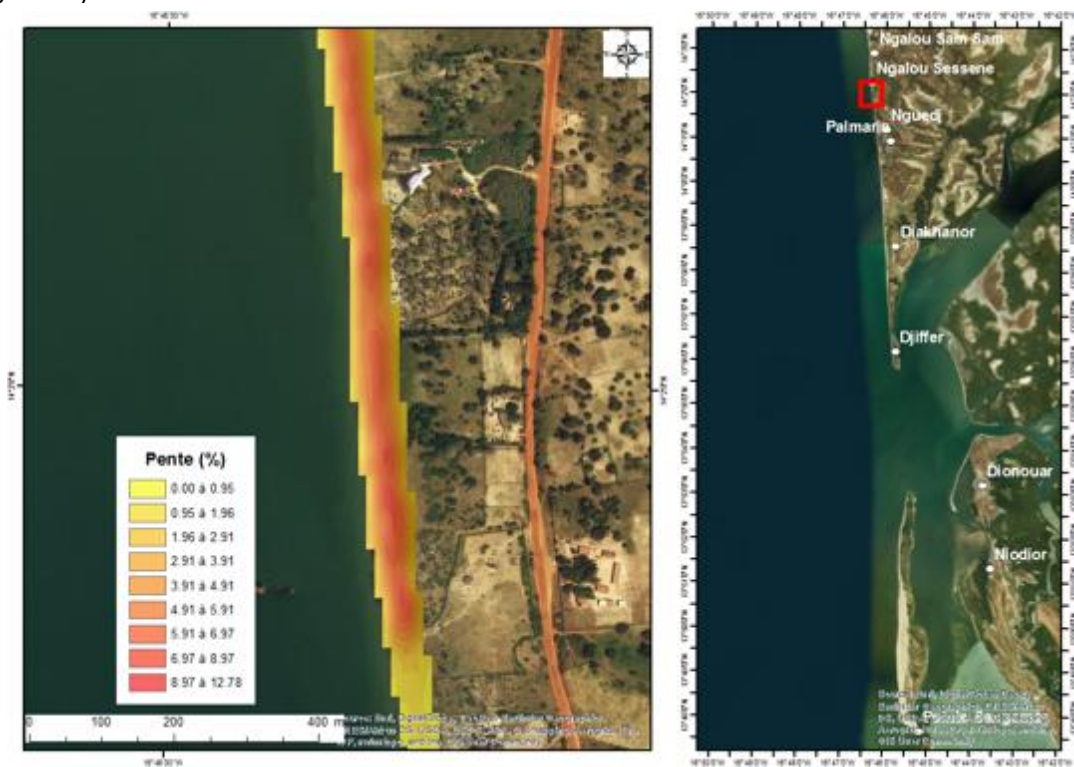


Figure 34 : Pente côtière à Ngalou Sessene

Cette pente devient plus faible sur la plage sous-marine et la zone dunaire, au Sud (0,47 %). la partie Sud est également marquée par un estran à pente faible (0,91 %).

A Ngalou Sam Sam, la pente côtière atteint son pic (8,82 %) toujours sur la zone de marnage, précisément au Nord (figure 35).

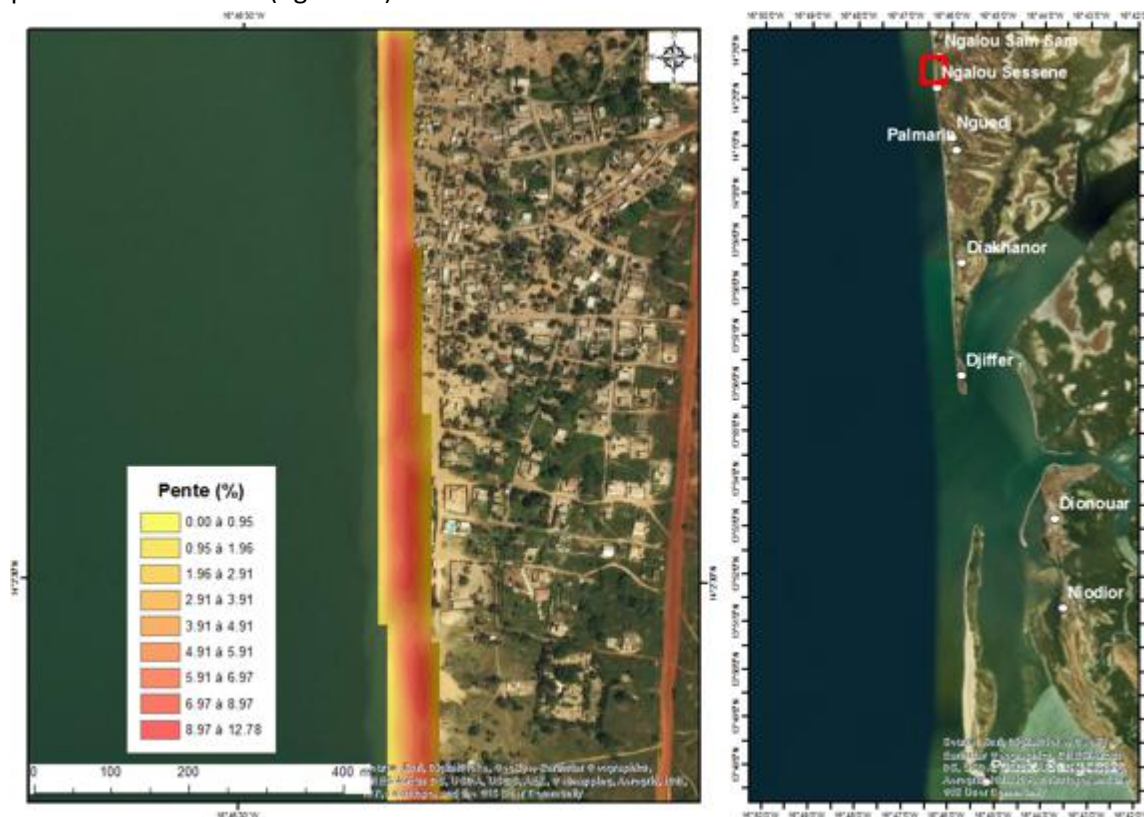


Figure 35 : Pente côtière Ngalou Sam Sam

La pente devient de moins en moins brusque à mesure que l'on se rapproche de la plage immergée, où elle devint plus douce (1,17 %).

Sur la côte aval-dérive, au droit de Niodior, on note que la pente côtière la plus escarpée est obtenue sur l'estran (9,34 %), particulièrement vers le Sud (figure 36).

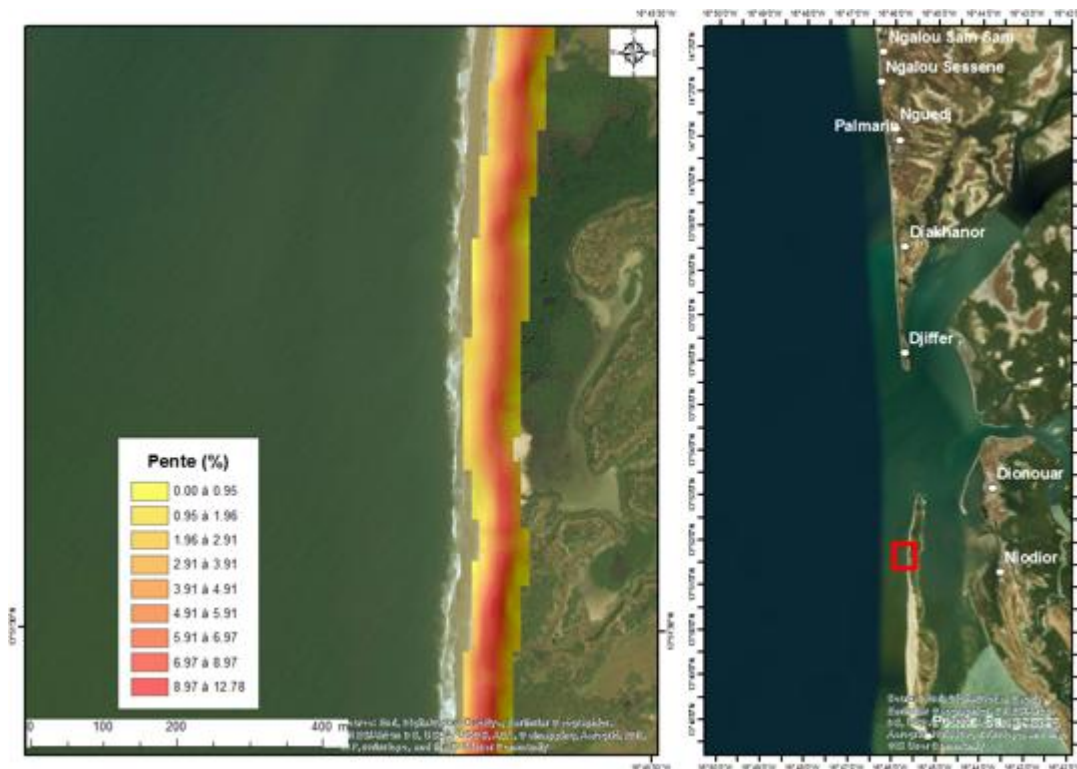


Figure 36 : Pente côtière du sous-segment 1 au droit de Niodior

La pente de s'adoucit progressivement de part et d'autre de l'estran, pour atteindre sa plus faible valeur sur la plage sous-marine (0,63), d'une part et sur la zone dunaire (0,16 %), de l'autre. Le segment suivant signale la pente la plus escarpée (12,78 %) sur la zone dunaire, notamment au Nord (figure 37).

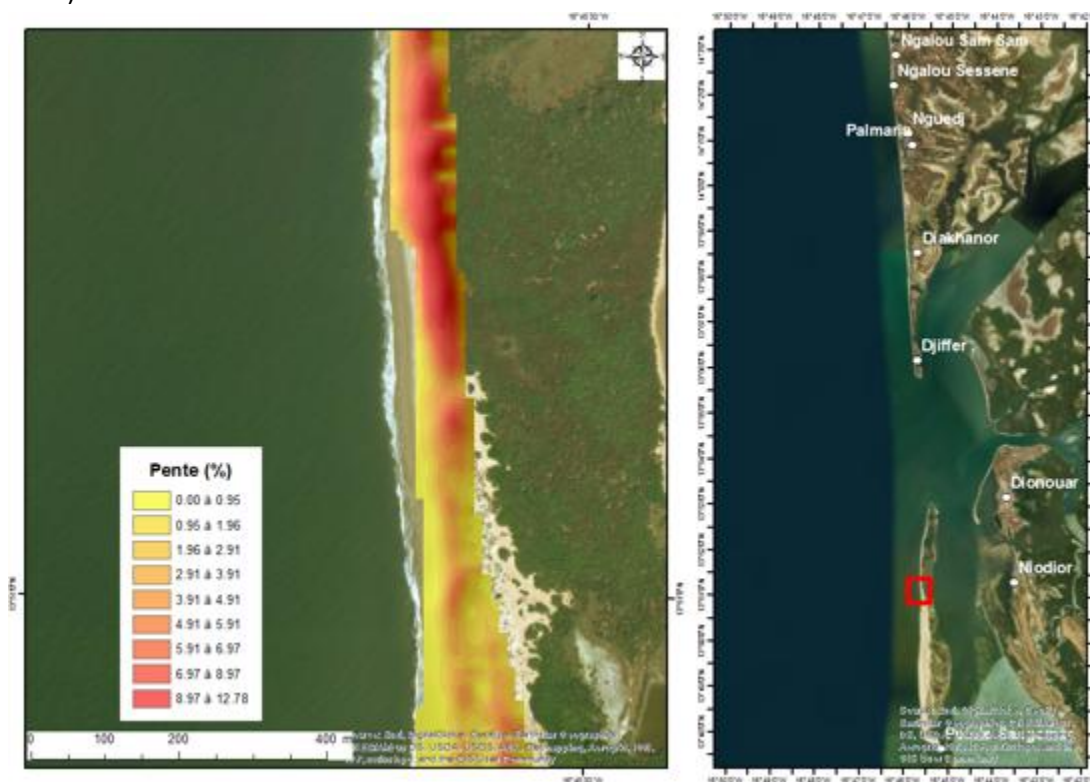


Figure 37 : Pente côtière du sous-segment 2 au droit de Niodior



La hauteur de la pente s'affaiblit au fur et à mesure que l'on se rapproche du Sud, où elle atteint sa plus faible valeur (0,02 %), en particulier sur la plage sous-marine. Par ailleurs, l'estran de cette partie Sud du segment est marqué par une pente moyenne (5,11 %).

Le segment suivant indique une zone de marnage avec une pente assez similaire (figure 38).

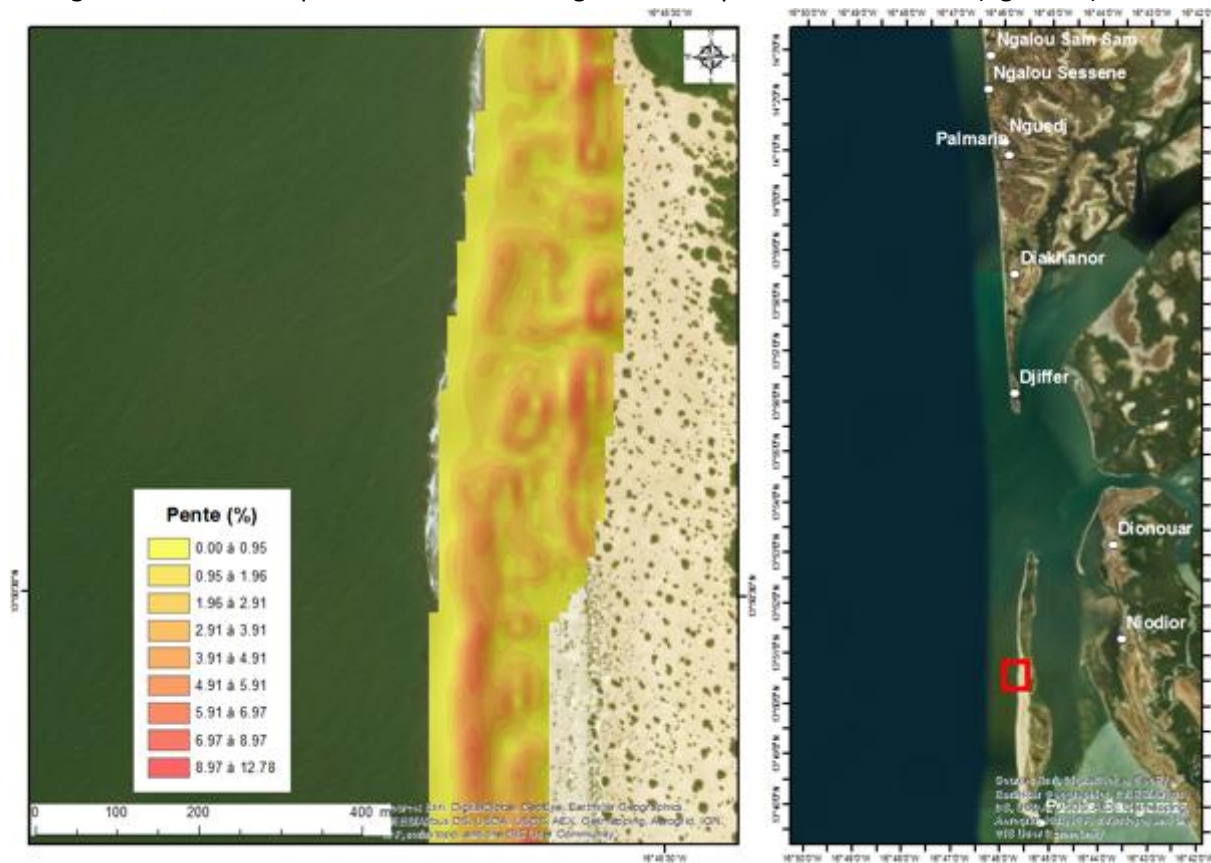


Figure 38 : Pente côtière du sous-segment 3 au droit de Niodior

Le linéaire donne une pente maximale (6,72 %) sur les dunes parsemées au Nord, l'estran affichant une pente de 5,61 %. La pente la plus douce (0,11 %) est mesurée sur la plage sous-marine.

Sur le segment côtier qui suit, à l'exception de la zone dunaire qui apparaît au Nord, où la pente est plus abrupte (6,66 %), celle-ci est moyenne sur le reste sue linéaire (figure 39). La pente la plus faible (0,02 %) est révélée par plage sous-marine.



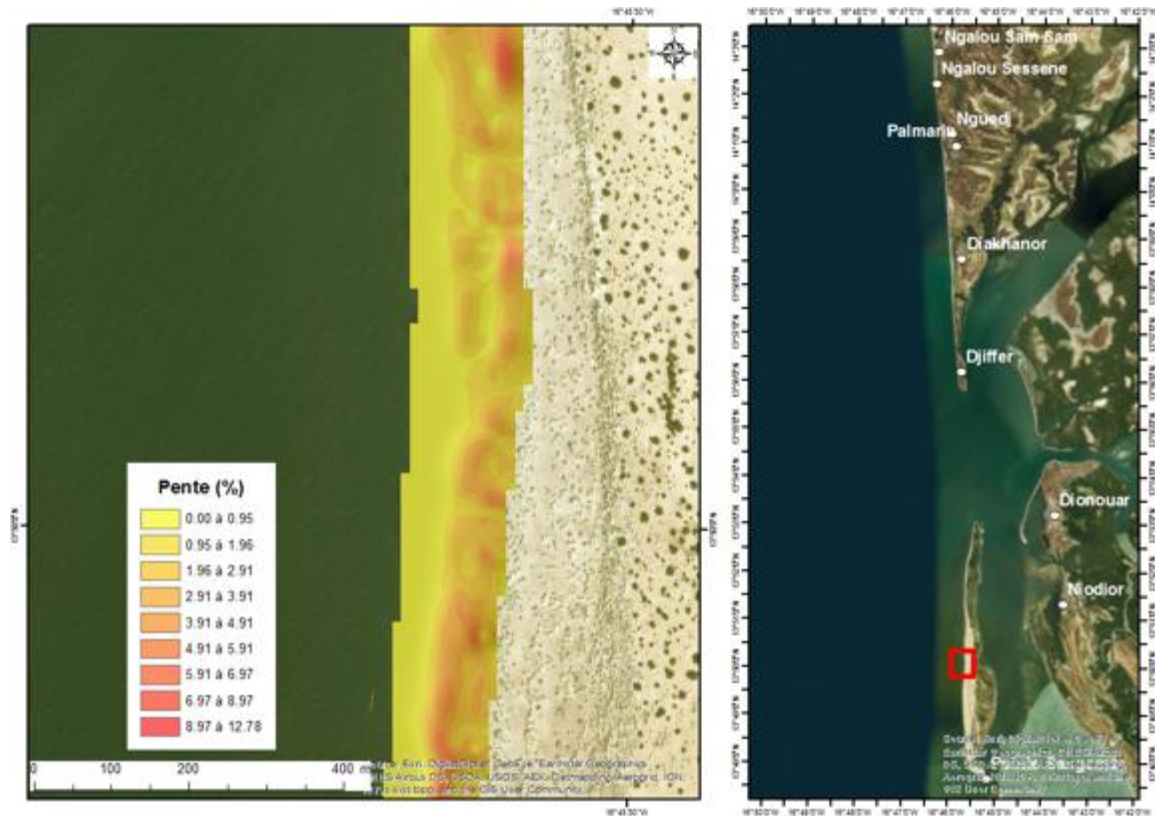


Figure 39 : Pente côtière du sous-segment 4 au droit de Niodior

Le segment côtier suivant indique une pente escarpée sur la ceinture édifiée par les dunes, où il atteint sa valeur maximale (8,30 %), au Sud (figure 40).

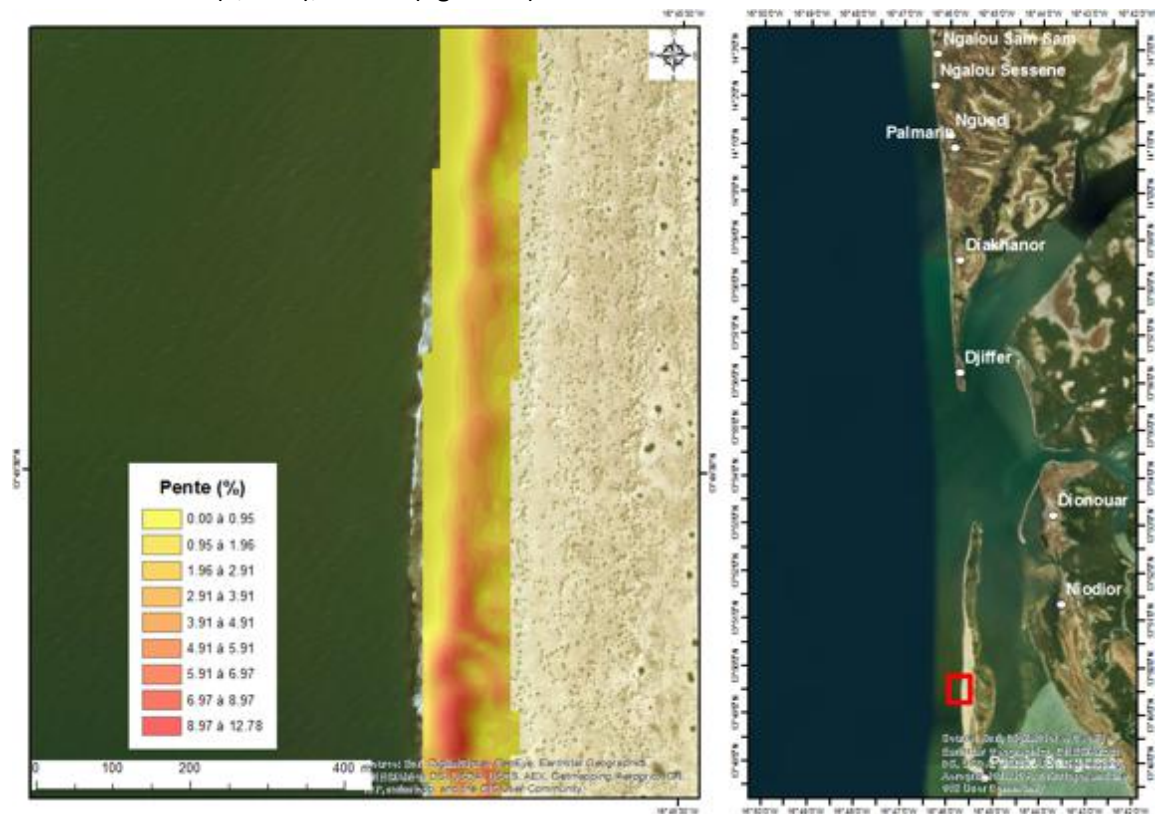


Figure 40 : Pente côtière du sous-segment 5 au droit de Niodior

La pente s'adoucit de part et d'autre de la zone dunaire, pour atteindre sa valeur minimale sur la plage sous-marine (0,02 %).

Le segment qui suit, est décoré par une série de dunes qui montre une pente raide dont le pic (11,54 %) est signalé par le col des dunes Sud (figure 41).

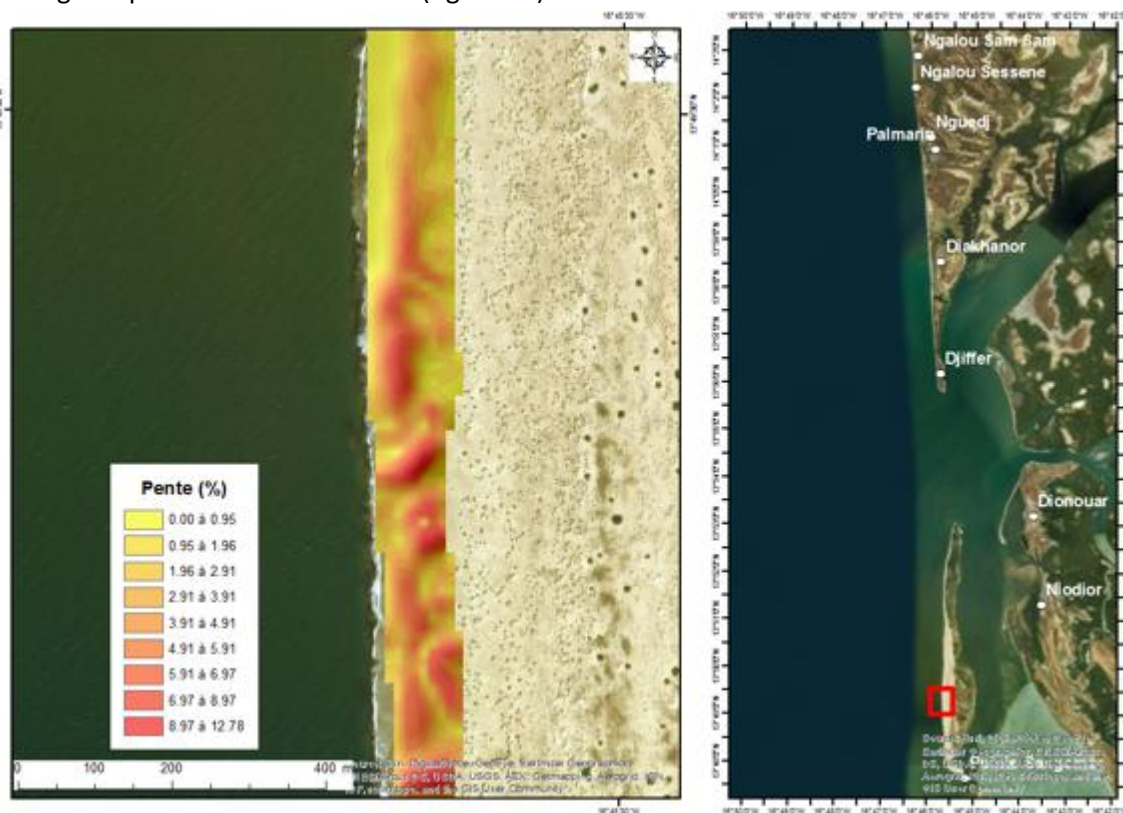


Figure 41: Pente côtière du sous-segment 1 au droit de l'île Guior

Ainsi, le linéaire montre un adoucissement de la pente vers le Nord, où la plage immergée affiche une pente de 0,05 %.

#### **d. La remontée du niveau de la mer**

La remontée relative du niveau de la mer, d'abord examinée à partir des données marégraphiques de la station de Dakar, sur une période de 22 années, c'est à dire entre 1996 et 2017, atteste une remontée relative du niveau marin (figure 42).

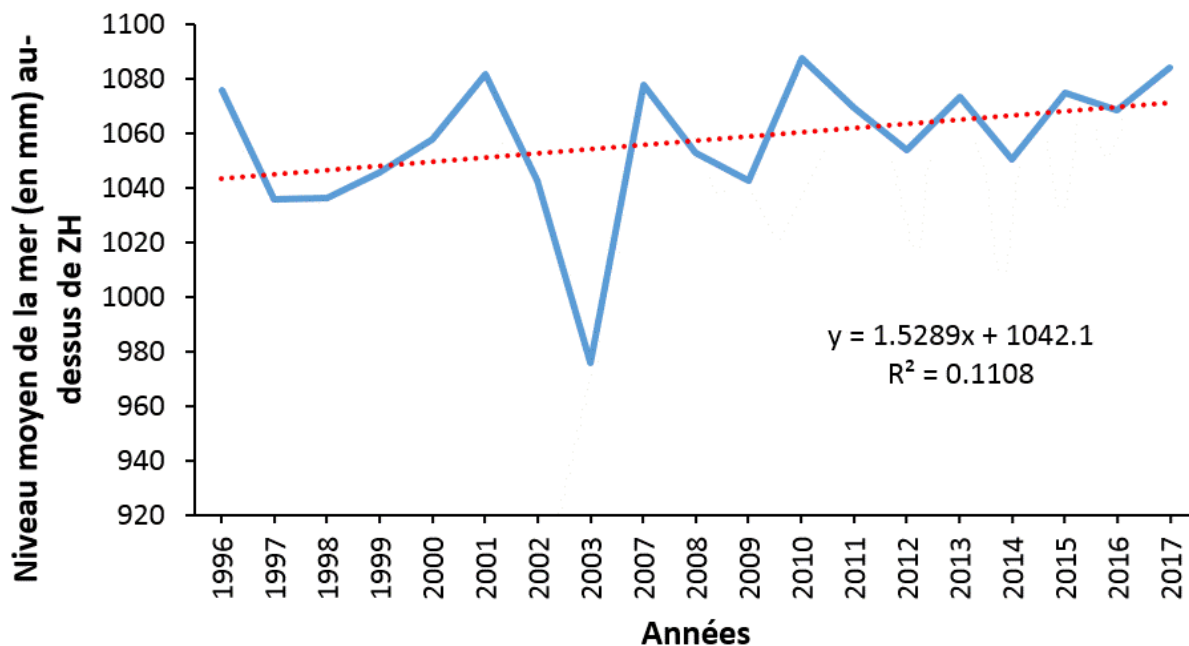


Figure 42 : Remontée relative du niveau de la mer à partir des données marégraphiques de la station de Dakar (de 1996 à 2017)

La remontée relative du niveau de la mer est de 1,53 mm/an, sur la période considérée. Cette tendance est logique au regard celle obtenue sur la période 1943-1965 (1,4 mm/an) par Elouard et *al.* (1977) et Emery et Aubrey (1991) et celle fournie sur l'intervalle 1902-2010 (1,41 mm/an) par Wöppelmann et *al.* (2008), avec le même type de données. Elle confirme une évolution progressive du niveau de la mer.

La remontée relative du niveau de la mer a également été étudiée à partir de données altimétriques produits par Ssalto / Duacs et distribués par Aviso, avec le soutien de Cnes. Ces produits d'altimétrie spatiale couvrent une période de 24 années (figure 43) ; elles sont donc beaucoup plus robustes.

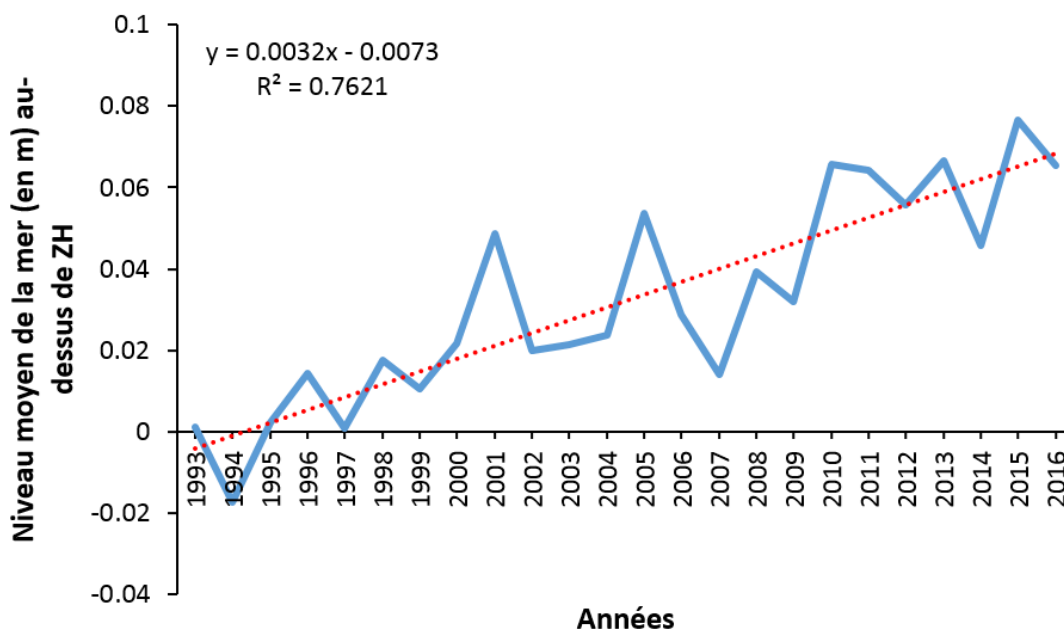


Figure 43 : Remontée relative du niveau de la mer à partir de données altimétriques (de 1993 à 2016)

Elles attestent une remontée du niveau de la mer de 3,2 mm/an. Cette tendance du niveau marin est double de celle fournie par le marégraphe de Dakar. En plus de la robustesse de ces données (plus grand nombre d'années couvertes et absence de lacunes), elles affichent un meilleur coefficient de représentation ( $R^2 = 0,76$ ) par rapport aux données *in situ*. En effet, les données du marégraphe de Dakar donnent un faible coefficient de représentation ( $R^2 = 0,11$ ). de plus elles couvrent une période moins importante et contiennent des lacunes sur l'intervalle 2003-2007. Ces aspects évoqués justifient le choix et l'utilisation de la tendance résultant des données d'altimétrie spatiale dans le calcul de l'ICV.

#### e. Hauteur moyenne des houles

La hauteur moyenne des houles est calculée par le truchement de données *WaveWatchIII* (figure 44).

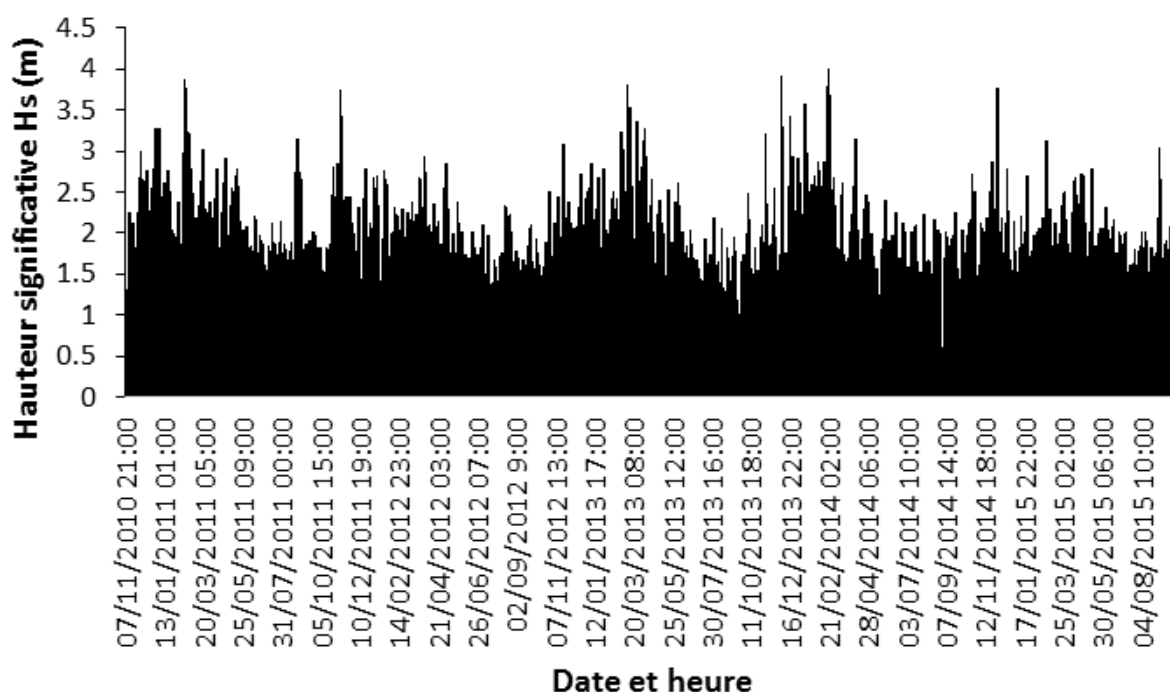


Figure 44 : Hauteurs significatives moyennes de la houle entre 2010 et 2015

Ces données *WWIII* révèlent des hauteurs significatives variant de 0,01 à 4 m sur la période allant de novembre 2010 à août 2015 (soit 5 ans), avec une moyenne de 1,74 m. Cette moyenne est révélatrice d'une vulnérabilité très élevée (tableau 3).

#### f. L'amplitude moyenne des marées

L'analyse de l'amplitude moyenne de la marée est obtenue à partir de deux sources. D'une part avec les données issues du marégraphe de Dakar et d'autre part à partir des données d'altimétrie spatiale. L'amplitude fournie par le marégraphe de Dakar est de 0,11 m, alors que celle indiquée par les altimètres spatiaux est de 0,09 m. Elles attestent toutes deux d'un niveau de vulnérabilité très élevée

(cf. tableau 3). Cependant, il est à signaler que l'amplitude obtenue à partir des produits d'altimétrie spatiale est celle utilisée dans la détermination de l'ICV car elle s'avère être la plus robuste.

#### 4.2.3.1.1 Analyse de l'indice côtier de vulnérabilité (ICV)

L'ensemble des variables (ou facteurs) de vulnérabilité étudiées ci-dessus a permis de déterminer l'indice côtier de vulnérabilité. Les valeurs calculées de l'ICV varient de 0,05 à 3,30. La valeur moyenne de l'ICV est de 0,50. Le mode est de 0,71, et la médiane, de 1,04. L'écart-type est de 1,98. Les 25<sup>e</sup>, 50<sup>e</sup> et 75<sup>e</sup> centiles sont respectivement de 0,09, 1,04 et 1,58.

A la suite, les scores de l'ICV sont divisés en catégories de vulnérabilité basse, modérée, élevée et très élevée, en fonction des intervalles de quartile. Il apparaît ainsi que :

- les valeurs CVI inférieures à 0,09 sont attribuées à la catégorie de vulnérabilité faible ;
- les valeurs comprises entre 0,09 et 1,04 sont considérées comme une vulnérabilité modérée. ;
- les valeurs de vulnérabilité élevées se situent entre 1,04 et 1,58 ;
- les valeurs de CVI supérieures à 1,58 sont classées comme une vulnérabilité très élevée.

Les zones localisées le long du littoral se voient attribuer un classement allant du très bas au très élevé sur la base de l'analyse des variables de processus physiques et géologiques qui contribuent au changement côtier comme indiqué dans le tableau ci-dessous :

*Tableau 5: Classement de l'Indice Côtier de Vulnérabilité en fonction des segments*

Segments côtiers	Indice Côtier de Vulnérabilité (ICV)	Classement de l'ICV
De Ngalou Sam Sam à Diakhanor	0,09 - 1,04	Modéré
De Diakhanor à Djiffère	1,04 - 1,58	Elevé
De Djiffère à Niodior	> 1,58	Très élevé
	1,04 - 1,58	Elevé
De Niodior à l'île de Guior	0,09 - 1,04	Modéré
De l'île de Guior à Pointe de Sangomar	< 0,09	Bas

Les zones à vulnérabilité très élevée se situent le long de la côte entre Djiffère et Niodior (figure 45). Cependant, on note des profils variés. Ainsi, ce linéaire est précédé par le segment joignant Djiffère à Diakhanor où le niveau de vulnérabilité peut être caractérisé de « vulnérabilité élevée ».

Plus au Nord, notamment de Diakhanor à Ngalou Sam Sam, le niveau de vulnérabilité peut être considéré comme « modérée », même si elle demeure élevée juste à l'entrée de Ngalou Sessene. sur la partie Sud, précisément à partir de la latitude de Niodior jusqu'à l'île de Guior, le littoral est segmenté par de courts tronçons de vulnérabilité qui oscillent entre élevée à modérée. Enfin du Sud de l'île de Guior, jusqu'à Pointe de Sangomar, le littoral affiche un indice de vulnérabilité bas (figure 45).



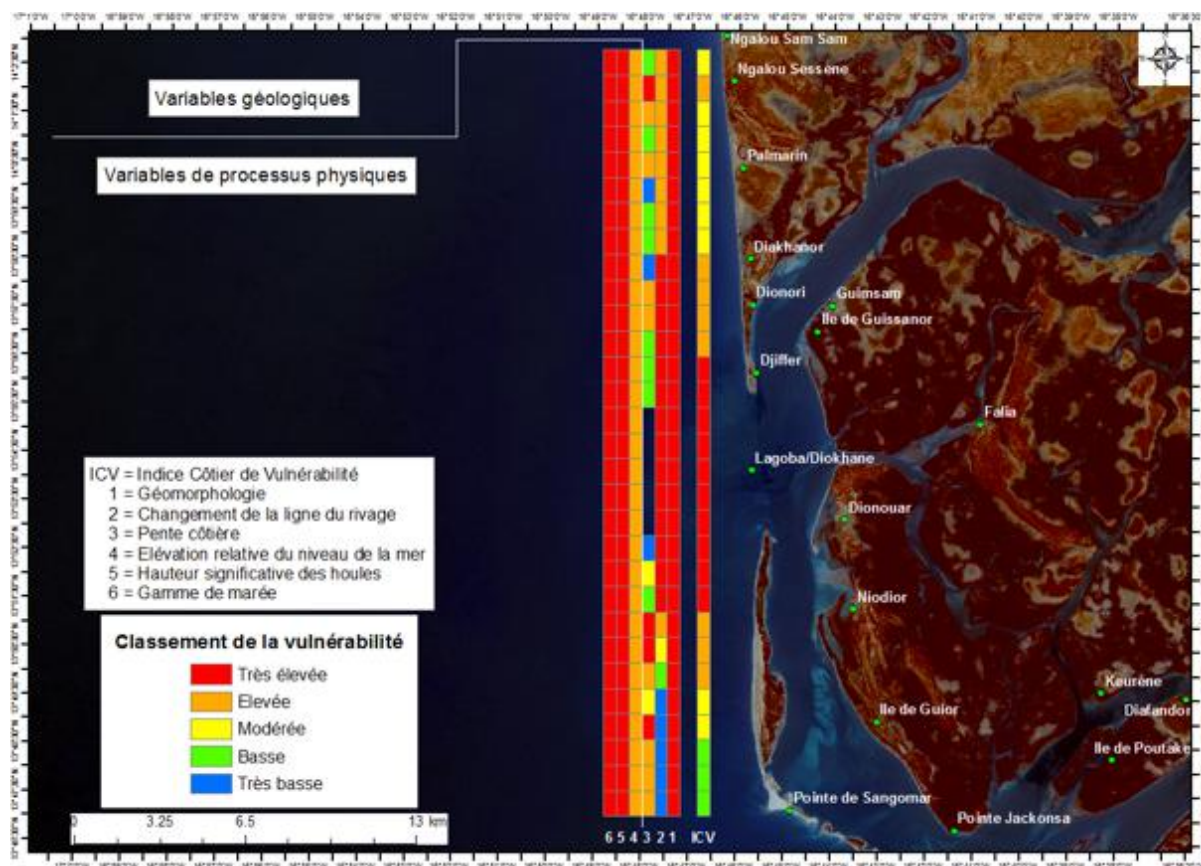


Figure 45: Indice côtier de vulnérabilité du littoral du delta du Saloum

La barre de couleur la plus à l'intérieur est l'indice de vulnérabilité du littoral (CVI). Les barres de couleur restantes sont séparées en variables géologiques (1-3) et variables de processus physiques (4-6). Le littoral à vulnérabilité très élevée se situe entre Diffère et Niodior. Le littoral à vulnérabilité élevée se concentre principalement au Sud de Ngalou Sessene, entre Diakhanor et Djiffère et sur la première moitié du segment Niodior-île de Guior. Le littoral à vulnérabilité modérée se trouve le long du complexe allant de Ngalou Sam Sam à Diakhanor, à l'exception du tronçon juste au Sud de Ngalou Sessene d'une part et sur la seconde moitié du segment Niodior-île de Guior. La partie de la côte peu vulnérable s'étend le long du linéaire allant du Sud de l'île de Guior jusqu'à la Pointe Sangomar.)

La figure 48 ci dessous montre un histogramme du littoral dans chaque catégorie de vulnérabilité sur un linéaire de 30km.

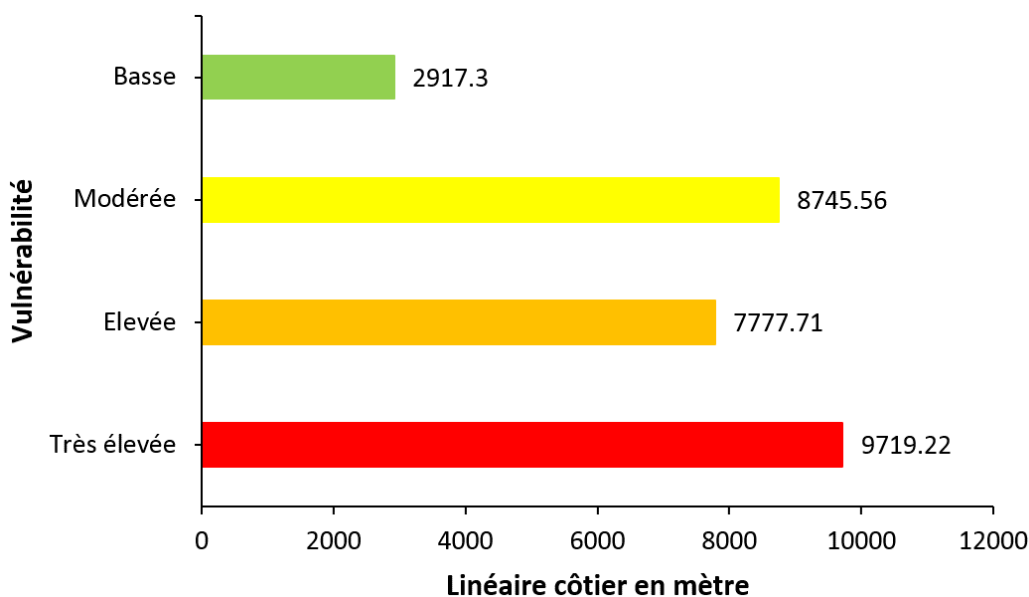


Figure 46: Linéaire côtier dans chaque catégorie de vulnérabilité

En termes de pourcentage cela revient à considérer, sur ce littoral :

- 10 % de côte est à vulnérabilité basse ;
- 29 % de côte est à vulnérabilité modérée ;
- 26 % de côte est à vulnérabilité élevée ;
- 33 % de côte est à vulnérabilité très élevée.

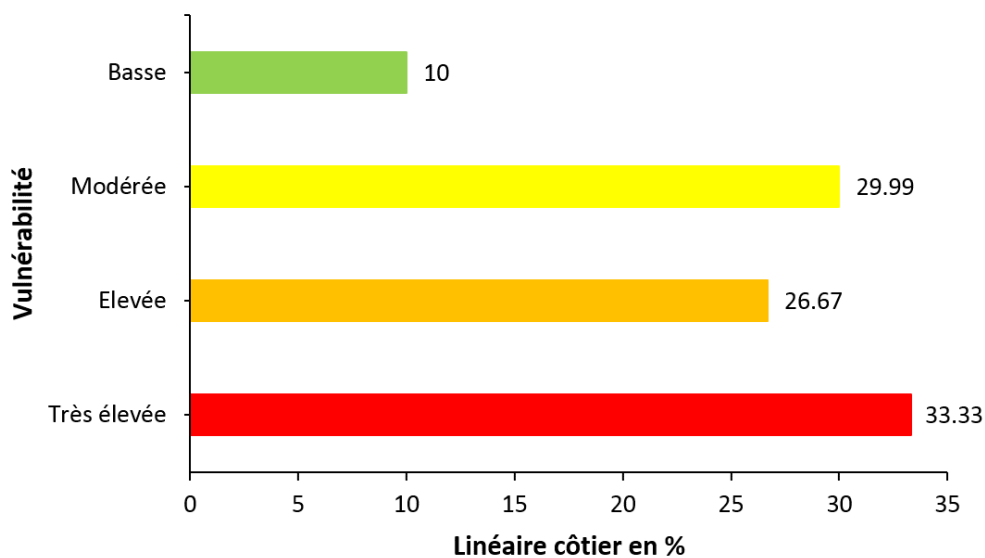


Figure 47: Pourcentage de linéaire côtier dans chaque catégorie de vulnérabilité

Ainsi, les données de l'ICV montrent une variabilité à plusieurs échelles spatiales. Cependant, les variables de processus physiques conservent la plus grande cohérence sur l'étendue du littoral (Figure 45). La valeur de la variable relative du niveau de la mer est constante pour la totalité de la zone d'étude. La vulnérabilité de la hauteur significative de la houle est très élevée sur l'ensemble du littoral, avec certainement une grande longueur du fetch. Le classement des marées est également très vulnérable sur l'ensemble du linéaire.



Les variables géologiques (en particulier l'érosion/ accrétion de la ligne du rivage et pente côtière), quant à elles, affichent la plus grande variabilité et ont donc le plus d'influence sur la valeur de l'ICV (Figure 47). La géomorphologie comprend une flèche sableuse (donc une barrière attachée) connectée à une embouchure souvent qualifiée de delta, avec de la mangrove, toutes très vulnérables.

La vulnérabilité due à l'érosion/ accrétion de la ligne du rivage le long du littoral varie de très faible à très élevée (Figure 18). Depuis Ngalou Sam Sam jusqu'à Diakhanor, le littoral montre une vulnérabilité élevée. De Diakhanor à la latitude de Niodior, la vulnérabilité augmente, et devient très élevée, en rapport avec les effets de la brèche. A partir de Niodior, la vulnérabilité diminue, passant d'élevée à modérée, puis basse, juste au Nord de l'île de Guior. De là jusqu'à la pointe de Sangomar, la vulnérabilité continue sa baisse, devenant ainsi très basse, en rapport avec l'accrétion qui se déroule sur cette partie distale de la flèche littorale. La pente côtière varie successivement d'une vulnérabilité très basse à une vulnérabilité très élevée, sur l'ensemble du littoral, en rapport avec la topobathymétrie côtière. Cette variation s'opère sur des linéaires de 1, 2, et 3 km.

En définitive, il y a quatre zones distinctes de vulnérabilité côtière sur le littoral, telles que déterminées par l'analyse ICV. La zone la plus sensible (vulnérable très élevée) se situe dans la partie médiane, notamment de Djiffère à Niodior. L'érosion/ accrétion de la ligne du rivage est la variable qui contrôle l'ICV ici, avec un très fort taux de recul de la ligne du rivage associés à un élargissement de la brèche du Laboba.

Les zones de vulnérabilité élevée sont réparties principalement au Sud de Ngalou Sessene, entre Diakhanor et Djiffère et sur la première moitié du segment Niodior-île de Guior. La vulnérabilité élevée y est due à la morphologie côtière, combinée à de faibles pentes côtières et à un fort taux de retrait de la ligne du rivage.

Le littoral de vulnérabilité modérée est concentré le long du complexe allant de Ngalou Sam Sam à Diakhanor, à l'exception du tronçon juste au Sud de Ngalou Sessene d'une part et sur la seconde moitié du segment Niodior-île de Guior. Ici l'ICV est principalement contrôlé par l'érosion/ accrétion de la ligne du rivage et la pente côtière.

Le littoral le moins vulnérable s'étend le long du linéaire allant du Sud de l'île de Guior jusqu'à la Pointe Sangomar, et la vulnérabilité est également contrôlée par l'érosion/ accrétion de la ligne du rivage, notamment l'accrétion qui se déroule depuis le Nord de l'île de Guior jusqu'à la pointe Sangomar.

Les variables les plus influentes dans l'ICV sont l'érosion/ accrétion de la ligne du rivage et la pente côtière ; par conséquent, elles peuvent être considérées comme les facteurs dominants qui vont contrôler l'évolution du littoral notamment à mesure que le niveau de la mer monte. La géomorphologie, la hauteur significative des houles et l'amplitude des marées ont, quant à elles, principalement des effets secondaires sur la variabilité spatiale de la valeur de l'ICV.

#### 4.2.3.2 Impacts potentiels sur le système socio-écologique

Le calcul de l'ICV démontre la sensibilité physique de la zone côtière de la région de Fatick. Cependant cette vulnérabilité n'est pas que physique, elle est affecte aussi le système socio-écologique. Dans cette partie, l'analyse portera aussi bien sur les impacts potentiels des changements climatiques sur l'écosystème de mangrove qui est illustratif de la région que sur la socio-économie.

#### 4.2.3.2.1 Impacts sur l'écosystème de mangrove

La mangrove du Sine Saloum se localise dans la zone intertropicale entre 12°30 nord et 16°30 nord de latitude et entre 11°30 ouest et 17°30 ouest de longitude. Elle est subdivisée en 3 grandes unités régulées autour de bolongs comme suit :

- Au nord du complexe estuarien, la mangrove est très dégradée et la hauteur des palétuviers est pratiquement inférieure à 4m (ISRA, 2005) ;
- Au centre entre le Diomboss et à l'est de Dionewar : elle constitue une végétation de palétuviers à l'aspect dégradé et dont la hauteur varie entre 2m à 8m, avec une prédominance des surfaces de tannes ;
- Au sud, la superficie de mangrove est beaucoup plus étendue. Les palétuviers d'une hauteur de 7m à 11m, notamment en bordure des chenaux de marées, occupent l'ensemble des bolongs (Barrusseau et al, 1986).

Cependant, au cours de ces dernières décennies, la mangrove est soumise à divers facteurs qui ont entraîné un recul de sa superficie. Le facteur anthropique est sans doute le plus significatif en raison des nombreux usages tirés de cet écosystème (défrichement de surfaces pour la riziculture, coupe de bois de chauffe, exploitation du sel, fumage du poisson).

Néanmoins, le facteur humain n'est pas le seul déterminant dans l'évolution de l'écosystème de mangrove. Ce dernier est sensible à la variabilité climatique et à la teneur de la salinité. Dans ses travaux, Sow (2018) montre que les zones de Fatick et de Foundiougne, à l'instar du reste du pays, connaissent une forte variabilité qui se traduit par une succession d'années humides et d'années sèches. Ainsi, la période 1950-1967 apparaît comme humide.

Néanmoins, à partir des années 1970 jusqu'en 1999, la zone plonge dans une longue série de déficit pluviométrique avec cependant quelques années excédentaires. A partir des années 2000, la pluviométrie semble revenir à la normale même si on note des anomalies pour quelques années comme se fut le cas en 2004, 2006, 2007 ou encore 2011.

Cette variabilité climatique un certain impact sur la mangrove notamment celle de la Réserve de Biosphère du Delta du Saloum (RBDS). Marius (1995) indique que la végétation de mangrove est particulièrement réactive aux variations du climat et son impact sur la salinité des eaux. Pour leur part, Dièye et al (2010) soulignent que bien que l'action anthropique joue un rôle de premier plan dans la dynamique de la mangrove, il est possible d'établir une relation variation climatique/ mangrove dans l'estuaire du Saloum avec deux phases évolutives :

- entre 1972 et 1986 : une régression des formations végétales qui fait suite aux années de sécheresse où l'espèce *Rizophora* sera peu à peu remplacée par l'*Avicennia* plus apte à résister aux nouvelles conditions écologiques ;
- Entre 1986 et 2010 une régénération de la mangrove, bien que lente, dans ses parties les plus touchées grâce à un retour à la normale de la pluviométrie.

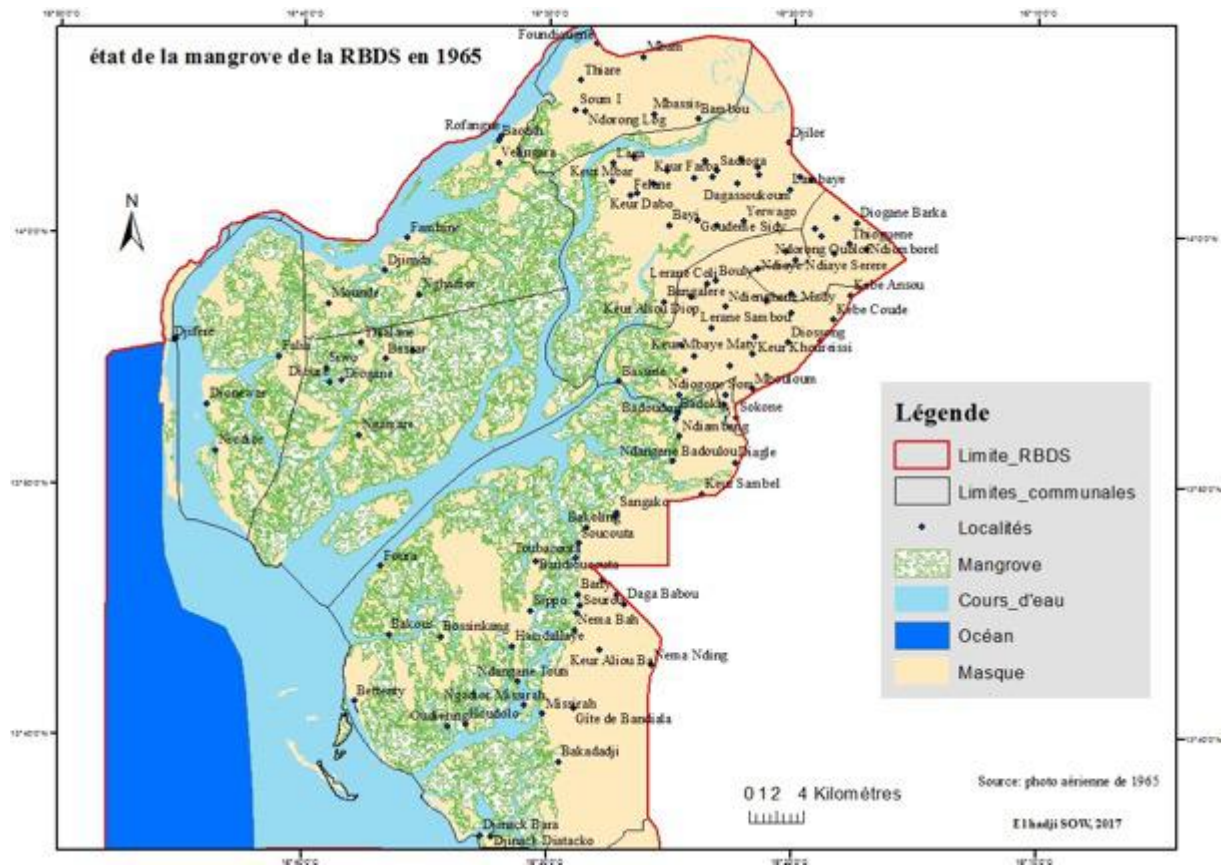


Figure 48 : Etat de la mangrove en 1965 (Sow, 2018)

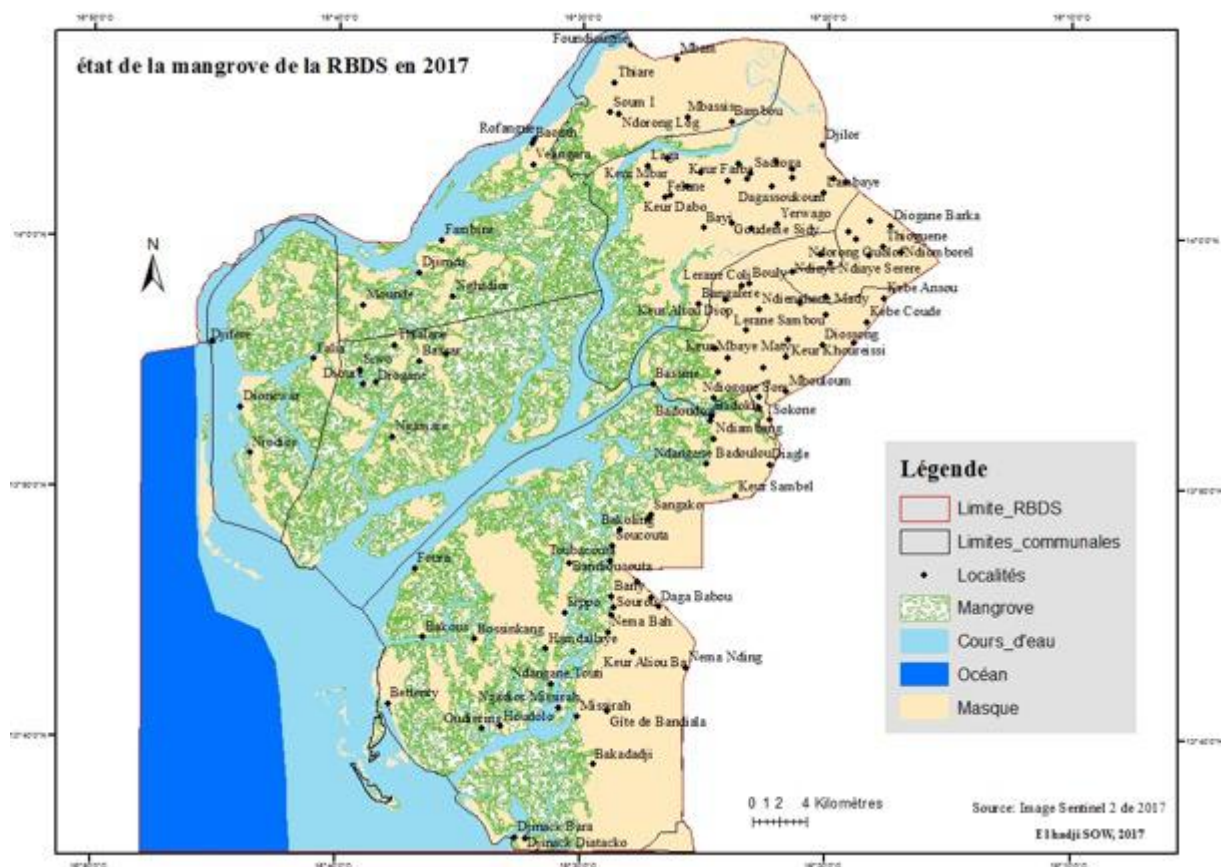


Figure 49 : Etat de la mangrove en 2017 (Sow, 2018)

Une relation est ainsi établie entre le déficit pluviométrique et la dégradation de la mangrove pour laquelle les apports d'eau douce conditionnent la salinité du milieu et par conséquent sa vitalité (Marius, 1985 ; Diop, 1990). Dacosta (1993) montre que sur trois décennies, l'estuaire du Saloum en raison de l'absence d'écoulements d'eau douce en saison des pluies et de la forte évaporation (moyenne annuelle de 2209mm à Kaolack) va connaître en amont une salinisation croissante<sup>6</sup> de ses eaux. Une situation qui entraîne un stress de la végétation de mangrove avec la salinisation des eaux et des sols qui évoluent vers une acidification en raison des variations hydro-climatique. De plus, la rupture de la brèche de Sangomar va modifier les conditions hydro-sédimentaires avec un important transit sableux au niveau des vasières et à hauteurs des villages de Niodior et Dionewar (Dièye et al, 2013).

La figure ci dessous indique le taux de salinité dans le delta du Sine-Saloum au niveau des bolongs ainsi celle des eaux continentales et le risque salin sur les mangroves

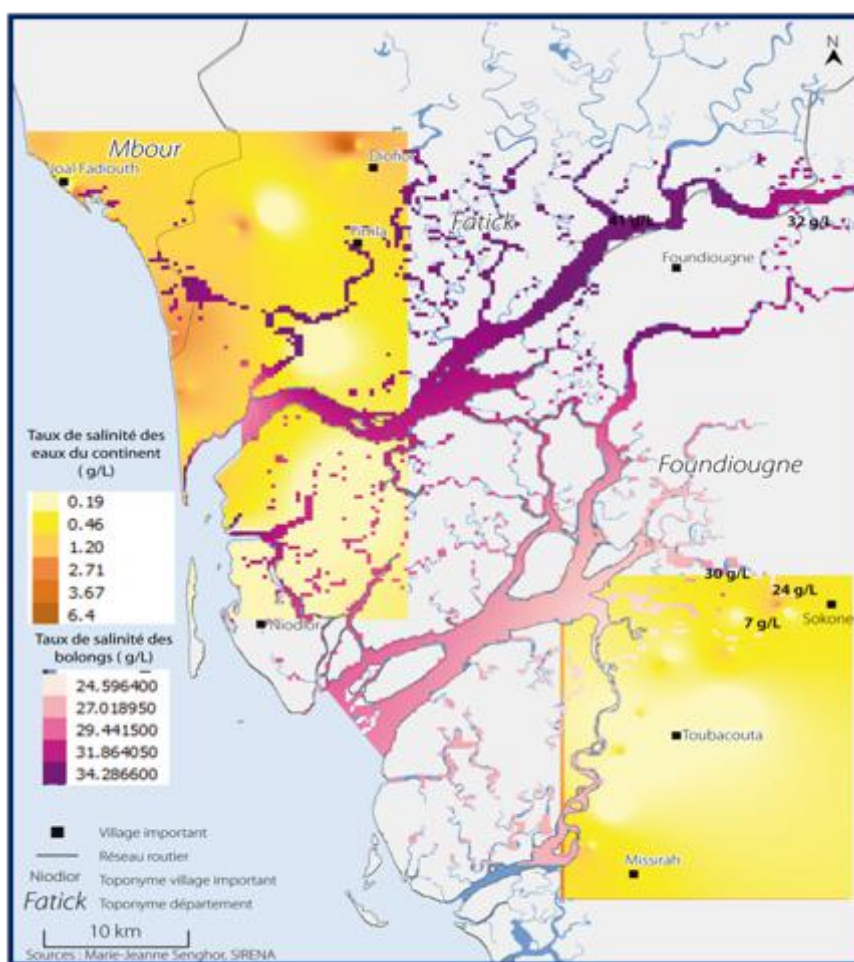


Figure 50 : Taux de salinité des eaux de surface dans le delta du Sine-Saloum

Ainsi, on observe des modifications non négligeables sur les forêts de mangrove avec un recul des superficies de Rhizophora au profit des tannes et une prédominance de l'espèce Avicennia plus

<sup>6</sup> Les taux de salinité peuvent atteindre 120‰ en fin de saison sèche dans la partie extrême amont du Saloum (Barusseau et al, 1985, 1986)



résistante au sel. Dans l'ensemble on note un rabougrissement de la végétation, une perturbation des phases phénologiques, une baisse de la productivité malacologique et faunistique.

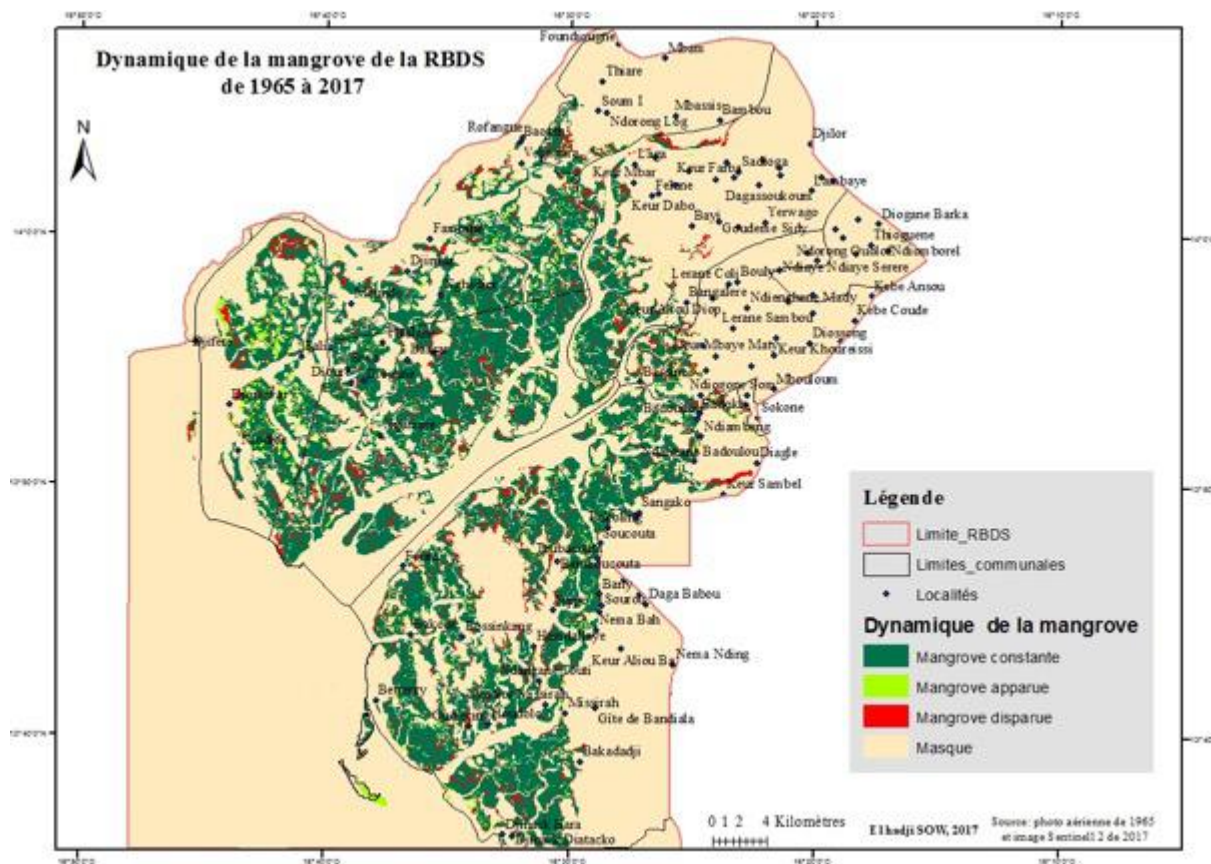


Figure 51 : Dynamique de la mangrove entre 1965 et 2017 (Sow, 2018)

#### 4.2.3.2.2 Impacts sur l'occupation du sol

La carte d'occupation du sol laisse voir une grande diversité avec la présence de zones d'arbres, des zones d'arbustes, de prairie, des terres cultivées, de végétation aquatique ou régulièrement inondée, etc.



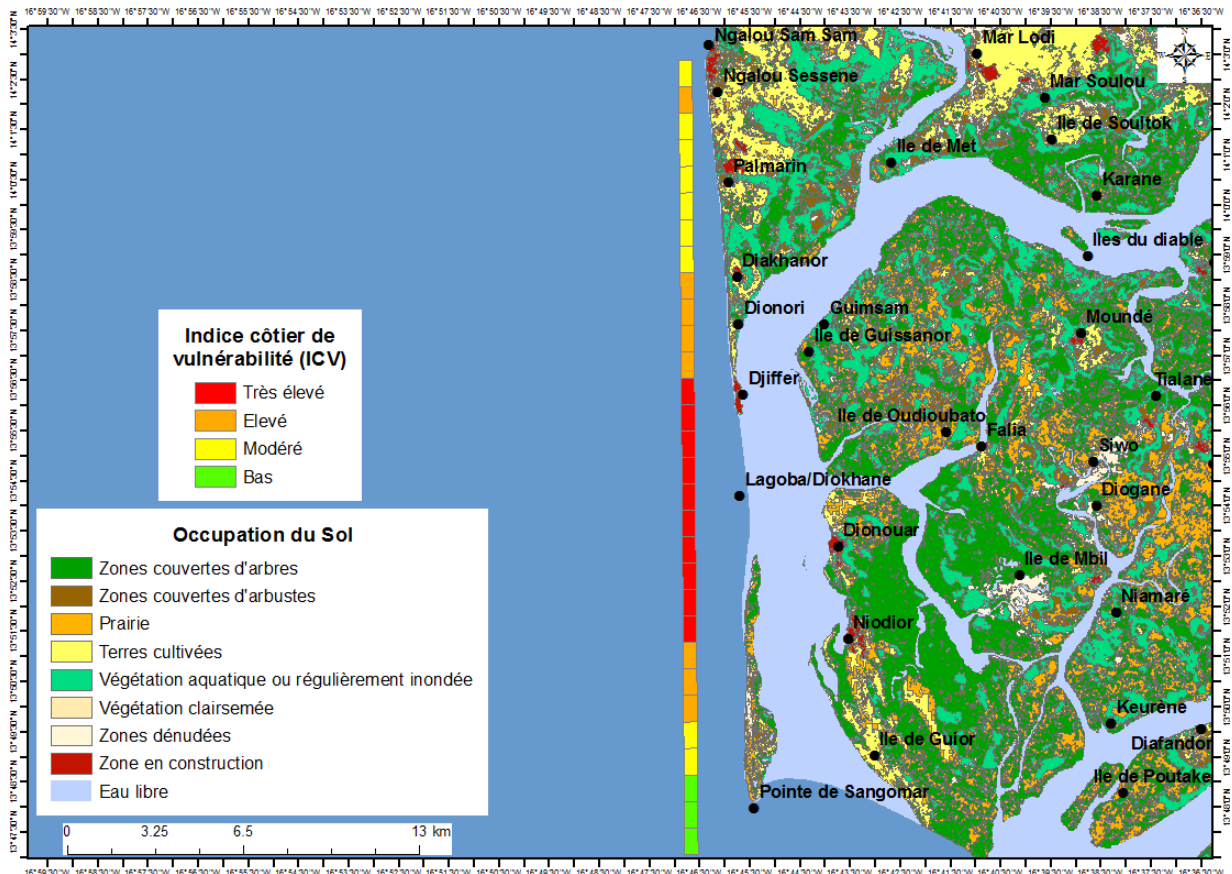


Figure 52: Occupation du sol et exposition

Cependant, en croisant cette occupation du sol à l'indice côtier de vulnérabilité, les résultats révèlent que ces espaces sont à la fois sujets au risque d'érosion et d'inondation marine, ce qui entrainerait une perte progressive des terres (espaces de cultures de mil, arachide) et des espaces naturels. Cette perte de terre par érosion et par salinisation des sols se répercutent sur les ressources naturelles comme le Détarium senegalense ou ditakh dont la production a baissé. De même des zones construction sont établies sur des sites de vulnérabilité élevée à très vulnérable. Au niveau infrastructurel, la route de Djiffère, principale voie bitumée, reste particulièrement menacée. Principale voie d'accès essentielle pour l'écoulement des produits halieutiques et pour l'économie, cette route, déjà menacée, risque d'être perdu d'ici quelques décennies. La perte de cet investissement récent plomberait à coup sûr l'économie de la région et contribuerait à renforcer son enclavement.

#### 4.2.3.2.3 Impacts sur le milieu socio-économique

La vulnérabilité très élevée de la variable géomorphologie montre que la zone d'étude est sujette à un risque tout aussi élevé, notamment en matière d'érosion. Ce recul du trait de côte expose ainsi une frange importante de la population. Ainsi les habitations situées sur les segments côtiers à pente douce à très douce (donc d'une vulnérabilité élevée à très élevée) risquent d'être soumises à l'érosion et à la submersion marine. Ainsi, le village de Ngalou Sam Sam, le Nord de Palmarin, le segment partant de ce même village jusqu'au centre de Diakhanor, le village de Djiffère, ainsi que le segment allant de la pointe Sud de brèche jusqu'à la latitude de Niodior, ayant une bordure atlantique à pente douce à très douce sont exposés à un risque élevé à très élevé de submersion par *overwash*. Ces villages sont aussi

soumis à un risque élevé à très élevé de destruction de leurs habitations par recul de la ligne du rivage relatif à la douceur leur pente.

Avec une vulnérabilité très élevée liée à la variable hauteur significative des houles et de la gamme de marée, et une vulnérabilité élevée relative à la variable élévation du niveau marin, l'ensemble des villages édifiés sur la côte, depuis Ngalou Sam Sam jusqu'à la pointe de Sangomar, ainsi que celles établis sur l'arrière côte, notamment les insulaires de Dionewar et Niodior qui de par leur exiguïté présentent des densités de l'ordre de 500 habitants/km<sup>2</sup>, sont exposés à des risques d'érosion, de submersion et de coup de vents violents.

Il faut souligner également les impacts sur les infrastructures et activités socio-économiques soit par érosion soit par submersion marine. Ce facteur est très connexe à la variable érosion/ accrétion de la ligne du rivage. Des destructions de maisons et d'infrastructures touristiques sont aussi notés sur le segment allant de Ngalou Sam Sam à Djiffère, où le risque lié à l'érosion passe de modéré à élevé. La variable érosion/ accrétion de la ligne du rivage entretenue par l'ouverture de la brèche de Sangomar, est à l'origine de graves dommages à Palmarin et à Djiffère, villages où l'on assiste à des déplacements de populations et à la perte de nombreux de campements et bâtiments. A titre d'exemple, l'usine de conditionnement de poisson de Djiffère a été fermée en 1996 entraînant un ralentissement de l'activité de pêche et à une perte d'emploi pour la zone. De plus, ce village, situé à 4 km au Nord du premier point de rupture, est de plus en plus menacé et les autorités envisagent l'évacuation de ses habitants en destination du nouveau port de Diakhanor (Veza, 2009).

Du point de vue économique, des risques importants pèsent sur les activités agricoles ainsi que sur la pêche et le tourisme qui sont les principales sources d'emploi de la région. En effet, on observe par exemple en raison de l'acidification des sols un abandon de la culture rizicole (Niang-Diop, 2005). Alors que pour les îles, l'ensablement des zones de navigation met à mal la pratique de la pêche.

En définitive, la vulnérabilité de la zone d'étude est réelle et est entretenue par divers facteurs tant anthropiques que physiques. Les résultats ici présentés le montrent clairement et l'identifient pour l'ensemble des segments, dont l'évolution montre des dynamiques bien distinctes. Toutefois, cette vulnérabilité doit aussi être appréhendé de manière plus globale et mis en relation avec ce qui se passe en amont. Ainsi par exemple, il est à signaler que le recul évoqué de la ligne du rivage est également connexe à des actions anthropiques sur le littoral, notamment avec l'installation des épis au niveau Saly et à Somone. Ces structures qui ne sont soumises pratiquement à aucune réglementation, bloquent le transit sédimentaire et empêchent l'alimentation du littoral plus en aval.

#### *4.2.3.3 Perceptions des communautés côtières par rapport aux changements environnementaux*

L'analyse climatique et biophysique a été complétée par une analyse qualitative des perceptions des populations par rapport aux aléas climatiques et aux changements environnementaux observés dans leur région dans le passé. Cette analyse se base à la fois sur les résultats d'une enquête qualitative menée sur la zone d'étude ainsi que sur une revue de la littérature.

Les communautés remarquent des changements par rapport aux températures de l'air et de l'eau, l'occurrence et l'intensité des vents violents, des houles. Leurs conséquences sont aussi bien identifiées : inondations, modifications paysagères et environnementales (dégradation de l'environnement marin, diminution de la hauteur des dunes, dégradation de la mangrove, etc.). La question de l'érosion et recul du ligne de rivage est très présente, notamment dans certains villages comme Ngalou Sam Sam, où les populations assistent à une perte de plage pouvant aller à des dizaines de mètres et donc d'une avancée de la mer (retrait du rivage).

#### 4.2.3.3.1 Sur les événements extrêmes passés et leurs conséquences

Dans la mémoire collective, la tempête de février 1987 a été particulièrement marquante et traumatisante pour les communautés côtières de la zone d'étude spécialement pour la commune de Palmarin qui a vu une partie de ses habitants se déplacer suite à cet événement climatique majeur. Le chef du village de Palmarin-Facao indiquait ceci lors de l'enquête de 2010 menée par l'équipe de l'UICN : « *Les anciens disent que le premier raz-de-marée a eu lieu en 1922, mais ça existait bien avant. Puis, il y a eu ceux de 1926, 1928 et 1987. Celui de 1987 m'a trouvé Dakar. Cela a été terrible.* ».

Le président de la Fédération des pêcheurs en 2010, habitant de Palmarin déclarait ceci à propos de la tempête de 1987 : « *Je me souviens parfaitement du raz-de-marée de 1987. Vers 17 : 00, l'océan a fait beaucoup de bruit. Le père Simonin a regardé le calendrier des marées, il a vu que ça pouvait être une grande marée. Il est parti avec son car pour prévenir le village et à évacuer tous les enfants. Les adultes y croyaient plus ou moins. Il a insisté. Quand la marée est venue, les vagues ont tout emporté : les cases, les lits, etc. à l'intérieur même du village, il y avait 1 m 20 d'eau. Il n'y a pas eu de pertes humaines, mais d'énormes dégâts matériels. L'État a pris des mesures pour la création et pour l'aménagement de parcelles que les gens ont dû aménager eux-mêmes.* »

Des habitants de Palmarin-Diakhanou interrogés en 2010 toujours par l'équipe de l'UICN témoignaient de la tempête de 1987 et de ses conséquences notamment sur le déplacement que cet événement a engendré : « *L'Etat nous a donné des parcelles vides, mais rien d'autre. On a dû recommencer à zéro. Au début, on a juste construit des pailotes. On a tenté de récupérer des toitures, les fenêtres, sur le site de l'ancien village. Nos nouvelles parcelles étaient dans la forêt, il a fallu débroussailler avant de pouvoir construire. Les habitants des autres villages de Palmarin nous portaient chaque soir du potage. On a tout perdu, nos greniers à mil, et toutes nos réserves.* ».

Enfin, les événements extrêmes dans cette zone ont d'autres conséquences notamment pour les moyens de production pour les pêcheurs avec les risques de naufrages, des pertes de filet, l'endommagement ou la perte des pirogues et l'usure plus rapide du matériel (Lacoste Bédard et al.).

#### 4.2.3.3.2 Sur l'érosion côtière : un problème chronique et ancien

Concernant le phénomène d'érosion, les enquêtés ont exprimé d'une manière ou d'une autre le fait que « *la mer avance de plus en plus* » (Noblet, 2015). Lors du travail de terrain mené en mai 2018, une personne très âgée vivant dans le village de Ngalou Sam Sam a expliqué que lorsqu'elle était jeune, elle allait courir (faire du sport) jusqu'à la plage, en invoquant que la plage se trouvait à une grande distance qui est aujourd'hui envahie par la mer. A Palmarin, le chef du village de Palmarin-Facao indiquait ceci lors d'une enquête menée en 2010 par une équipe de l'UICN : « *Je peux vous dire que le Palmarin d'aujourd'hui est le dernier village de ce qui existait avant, tous les autres villages de Palmarin 'dans le temps' se trouvent aujourd'hui bien au large de la côte. Avant, Facao (...) disposait d'une forêt et de champs ; il y avait le bois sacré. Les habitations étaient plus loin, aujourd'hui elles se trouveraient en pleine mer* ».

#### 4.2.3.3.3 Sur les inondations et leurs conséquences

Dans les îles du Saloum, les inondations sont fréquentes pendant la saison des pluies et engendrent des conséquences néfastes sur les infrastructures et sur les terres agricoles. Lors d'une enquête

effectuée dans le cadre d'un projet du CRDI en 2013<sup>7</sup> dans les îles de l'intérieur du Saloum, il est indiqué par les enquêtés les éléments suivants : « À Djirnda, on rapporte que les inondations sont plus importantes depuis 2000 car les précipitations sont devenues plus fréquentes. À Fayako, un répondant explique que « Les inondations constituent le plus gros problème rencontré durant l'hivernage. Chaque hivernage, cette maison là (ndlr une maison située à 50 m de la mer) est inondée chaque année à cause des fortes houles. Toutes les maisons de l'île ont migré vers les hauteurs ces 20 dernières années. L'eau détruit beaucoup de choses dans nos maisons. ». À Diogane, l'eau envahit chaque année l'ancien pont et les terres cultivées. » (Lacoste-Bédard et al, 2016).

Ces inondations engendrent des effets néfastes sur l'agriculture pratiquée sur certaines de ces îles. En effet, en plus du manque d'accès et de la perte de récoltes, les champs inondés par l'eau saumâtre deviennent salinisés et impropres aux cultures pratiquées (Lacoste-Bédard et al, 2016).

#### 4.2.3.3.4 Sur les températures de l'air et de l'eau (océan)

L'augmentation des températures de l'air est ressentie en particulier par les pêcheurs, l'un d'eux indique que : « Avant, tu portais cinq ou six boubous pour partir en mer, maintenant, il y a plus ce froid. ». Par ailleurs, concernant la température de l'eau, plusieurs enquêtés remarquent que « l'eau est devenue plus chaude » et qu'en lien avec l'augmentation des températures de l'eau « ces dernières années nous voyons pas mal de poissons qu'on ne connaissait pas avant ». Certains évoquent la disparition de certaines espèces de poisson sans vraiment pouvoir déterminer si elle est liée aux changements climatiques ou à la surexploitation de la ressource.

#### 4.2.3.3.5 Sur l'état des ressources naturelles

L'enquête effectuée dans le cadre du projet du CRDI en 2013 met en évidence les éléments suivants : « Les conditions changeantes, et surtout la salinité en augmentation affectent aussi les mangroves et certaines espèces halieutiques. Un répondant de Fayako mentionne que la crevette et d'autres espèces commencent à migrer à cause de la salinisation. À Djirnda, le Yaranka, une espèce présente lors de la saison des pluies a disparu en même temps que la mangrove, qui est son lieu de reproduction. À Diogane, selon les répondants, toutes les espèces auraient diminué et le Yakh et Seed disparu entièrement. Les espèces terrestres ne sont pas épargnées par les changements climatiques. À Fayako, les répondants notent la disparition de certains mammifères. À Diogane, la biche a disparu et les chacals et singes se font plus rares. Cela est attribué par les répondants aux changements présents, mais aussi à la sécheresse des années 1970. » (Lacoste-Bédard, 2016).

#### 4.2.3.3.6 Une conscience du risque pour l'avenir

Les personnes vivant à Palmarin et interviewées lors de l'enquête menée par l'équipe de l'UCIN faisaient part de leur inquiétude pour l'avenir et de leur conscience vive du risque pour leur communauté côtière : « Je me dis qu'un jour ou l'autre Palmarin n'existera plus. A Djifer, la mer a quasiment recouvert la route. Il est très difficile de faire quelque chose d'efficace. On a planté des filaos mais je ne crois pas que cette action seule puisse arrêter la mer » (habitante de Palmarin-2010). Le chef

---

<sup>7</sup> Université de Moncton, 2016, Adaptation aux changements climatiques des communautés du Nouveau Brunswick: Étude de cas sur le Saloum [http://www8.umoncton.ca/umcm-climat/uved/grain/4\\_7\\_2\\_le\\_delta\\_du\\_saloum\\_au\\_senegal/page:15](http://www8.umoncton.ca/umcm-climat/uved/grain/4_7_2_le_delta_du_saloum_au_senegal/page:15)

du village de Palmarin-Facao indiquait ceci lors de la même enquête : « *On souhaiterait que nos petits-enfants trouvent le même village qu'aujourd'hui, mais on n'en doute. Le village peut très bien disparaître. Si Palmarin se déplace, il n'y aura plus d'habitants dans cet environnement si particulier. Et puis, notre village sert de défense aux villages de l'intérieur, et aux îles du Saloum. Quant au déplacement, les villageois sont réticents. Si on me demande de déplacer mon village, je vous dis que moi qui suis chef, je serai le dernier à partir* ».

#### 4.2.4 Évaluation de la capacité d'adaptation

Le terme capacité d'adaptation se définit comme étant la capacité d'un système à modifier ses caractéristiques ou son comportement afin de mieux faire face aux effets des changements externes (Füssel & Klein, 2006). Cette étape évalue la capacité du système socio-écologique étudié à réagir et à s'adapter aux changements climatiques.

Il s'agit d'évaluer comment le système s'est adapté - ou s'adapte - aux variabilités et aux extrêmes climatiques passées et actuelles. La capacité d'adaptation existe à différentes échelles (famille, communauté, région et nation) et dépend de l'accès aux ressources (Easterling, et al., 2004, Adger et al., 2004, Wall et Marzall, 2006). Wall et Marzall (2006) distinguent cinq types de ressources pertinentes pour l'évaluation de la capacité d'adaptation aux changements climatiques : ressources sociales, humaines, institutionnelles, naturelles et économiques.

L'appréciation de la capacité d'adaptation dans la zone du projet tient compte des initiatives locales (collectives et/ou individuelles), des mesures institutionnelles ainsi que de l'action des ONG.

##### 4.2.4.1 Les mesures d'adaptation mises en œuvre au niveau local

Les mesures d'adaptation mises en place par les populations sont de divers ordre et portent tant sur la protection de leur milieu physique que sur les ressources naturelles (halieutiques, forestiers) qui sont sources de revenus pour les ménages.

###### 4.2.4.1.1 Les stratégies de sauvegarde environnementales

Face à l'érosion côtière et au risque d'inondation par submersion marine, les communautés côtières, notamment celles de Dionewar ont, avec l'appui de partenaires financiers (AFD, PNDL, FEM) mis en place des digues de protection (digue de Ndiar, digue de Ndioundiouré). Ces moyens d'endiguement sont réalisés avec des matériaux parfois sommaires (sable, coquillages) et permettent au village de faire face aux raz de marées mais aussi de protéger les terres de l'intrusion saline. A cet effet par exemple, une digue anti-sel a été construite en 2014 avec l'aide du PMF/FEM à Djimsane et a permis l'aménagement de parcelles rizicoles pour les femmes. Au niveau des habitations, les populations optent aussi très souvent pour des barrières de sacs de sable afin de protéger des inondations.

A Niodior, ces techniques de protection sont aussi présentes. Ainsi, des murs d'environ 1 m de hauteur ceinturent la totalité du linéaire de la berge. Ces structures de défense de différentes générations, très robustes (en dur, bétonné), observées sur le terrain, sont édifiées non seulement pour stopper l'envahissement par les crues du Saloum, mais aussi pour protéger l'île contre les courants de flots entrant par la brèche, et défendre le village contre une éventuelle submersion marine.



#### 4.2.4.1.2 Les stratégies de gestion des ressources naturelles

Les stratégies d'adaptation passent aussi par une meilleure organisation et une gestion rationnelle des ressources naturelles. En effet, certaines ressources forestières comme le *Saba senegalensis* ou mad , le *Landolphia heudelotii* ou *tol* qui sont des fruits locaux ou encore le *Cordyla pinnata* ou *dimb* un arbre autrefois prisé pour l'ébénisterie ont pratiquement disparu de la zone en raison des effets de la sécheresse corrélés à une utilisation incontrôlée.

Depuis quelques décennies, les populations des deux sites d'étude (Dionewar et Toubacouta) ont mis en place des unités de gestion locales (Commission Environnement et de Gestion des Ressources Naturelles-CEGRN, Fédération Locales des GIE-FELOGIE, Comité Local de Pêche Artisanale) afin de préserver la ressource tant forestière qu'halieutique (poissons, mollusques).

#### 4.2.4.1.3 Les stratégies migratoires

Les stratégies migratoires constituent aussi une ressource de taille dans l'économie des ménages. Elles sont diverses et concernent aussi bien la frange jeune qui se déploie vers les centres urbains. La migration féminine est très importante dans le delta du Saloum, où l'envoi des jeunes filles vers les villes (Kaolack, Dakar, Petite Côte) comme domestiques ou vendeuses permet de mobiliser des ressources additionnelles pour la cellule familiale (M. Fall, 2009). Cette pratique autrefois faite durant la saison sèche, tend à devenir permanente.

La migration est aussi une pratique courante chez les pêcheurs Niominkas qui se déplacent ainsi aussi bien à l'intérieur du pays que vers pays voisins (Gambie, Guinée-Bissau, Mauritanie).

#### 4.2.4.2 Les mesures institutionnelles

L'État, à travers ses structures déconcentrées, initie des actions afin d'assurer un cadre socio-économique. Ses mesures de gestion portent sur la mise en place de lois et codes permettant une cogestion avec les collectivités territoriales et les communautés locales. Ainsi la création de l'Aire Marine Protégée de Sangomar et des CLPA tendent à favoriser une gestion plus durable des ressources halieutiques et constituent des cadre de concertation. Les initiatives de l'État portent aussi sur l'accès à l'eau. En effet, avec la salinisation progressive des eaux souterraines par intrusion saline, des projets de transfert d'eau (projet Simon-Diène) sont mis en oeuvre. De plus, la structuration des usagers autour d'organe de gestion locale (ASUFOR) assurent un suivi des ouvrages hydrauliques au niveau rural.

En termes de protection côtière, l'État a, afin de protéger la route située à 300 m de la mer, construit un mur longitudinal en gabions de roches à Palmarin Ngalou.

#### 4.2.4.3 Les mesures issues des partenaires au développement

Il s'agit entre autres de reboisement de mangroves. Cette stratégie déclinée par diverses ONG a permis la récupération de superficies dégradées et le développement d'activités génératrices de revenus. Ainsi, avec l'appui technique et financier des ONG (WAAME, CAREM, FIOD, UICN, PAGERNA), des actions de reboisement ont été développées dans plusieurs villages et dans les îles du Saloum entre 1995 et 2002 (Faye, 2016):

l'ONG CAREM, appuyée par l'UICN, a planté entre 1995 et 2002 environ 1000 ha de mangrove et mobilisé 19 villages,

l'ONG WAAME a encadré 27 villages et planté 70 ha de 1998 à 2001,

la FIOD encourage les populations qui participent à l'effort de reboisement des mangroves en leur apportant une aide en nature. Le total des superficies plantées par les villages encadrés par la FIOD atteint 240 ha, entre 1998 à 2001 (Faye, 2016). Dans certains villages des îles du Saloum, pour mieux protéger les espèces végétales et favoriser leur développement, les populations associent les cultures et les arbres, cette stratégie est considérable dans la protection des espèces végétales.

Par ailleurs, pour combattre les effets combinés de la variabilité climatique au Saloum, l'Etat du Sénégal, appuyé par les ONG, a élaboré des stratégies de lutte contre l'érosion côtière et la salinisation dans les îles du Gandoul et le long des villages insulaires ou riverains des bolongs (Faye, 2016) à travers :

- la sensibilisation des populations sur la protection/conservation des écosystèmes de mangrove ;
- le reboisement de la mangrove sur 20 ha et l'introduction des plantes halophiles ;
- la plantation d'eucalyptus pour protéger les terroirs villageois ;
- la construction de digues de protection dans les villages ;
- la formation périodique de comités de plage sur leurs rôles et missions ; et
- l'activation de la procédure de reconnaissance juridique de comités de plage.

#### 4.2.5 Synthèse de l'évaluation de la vulnérabilité actuelle

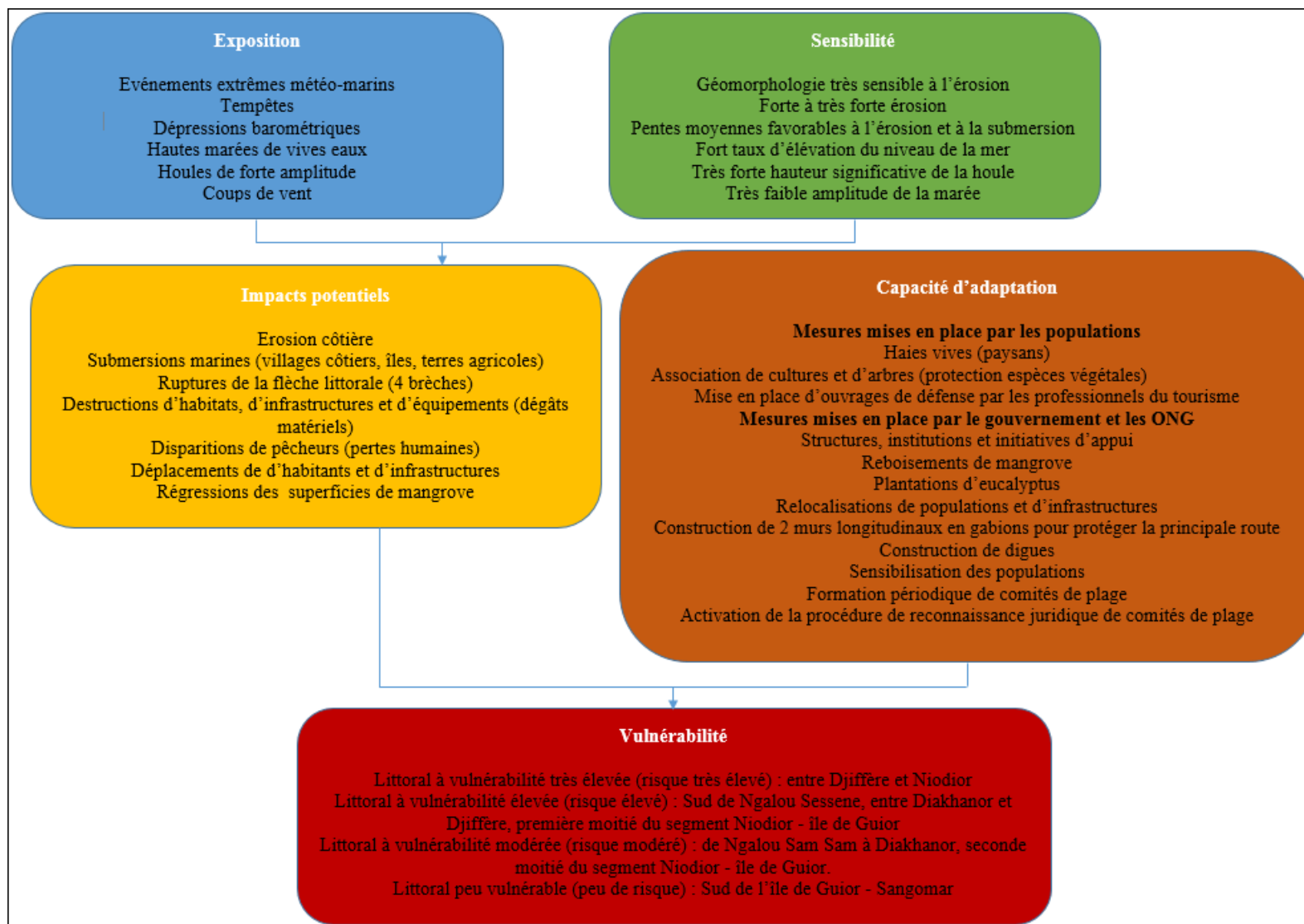


Figure 53 : Chaîne d'impacts vulnérabilité actuelle

## 5 Etude la vulnérabilité future

### 5.1 Méthodologie

Pour évaluer la vulnérabilité future, la même méthode utilisée pour l'évaluation de la vulnérabilité actuelle est exploitée c'est à dire celle de Thieler et Hammar-Klose (1999 ; 2000a ; 2000b). Pour rappel, cette méthode prend en compte 6 facteurs de vulnérabilité :

- a. la géomorphologie
- b. l'érosion/ accrétion de la ligne du rivage
- c. la pente côtière
- d. la remontée relative du niveau de la mer
- e. la hauteur moyenne des houles
- f. l'amplitude moyenne de la marée

Elle permet d'estimer quantitativement l'Index de Vulnérabilité physique par la formule suivante :

$$ICV = \sqrt{(a \times b \times c \times d \times e \times f) / 6},$$

avec  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  et  $f$  représentant l'indice des 6 facteurs ou variables de vulnérabilité pris en compte.

L'ICV permet de relier les six variables de manière quantifiable, exprimant la vulnérabilité relative de la côte aux changements physiques dus à l'élévation future du niveau de la mer (Hammar-Klose et al., 2003).

Dans cette étude, les variables géologiques, en particulier la géomorphologie, le taux de changement du rivage et la pente côtière, restent telles qu'elles sont dans l'évaluation de la vulnérabilité actuelle. Par contre, afin de prendre en compte l'impact des changements climatiques dans le futur, les variables de processus physiques, notamment l'élévation relative du niveau de la mer et la hauteur moyenne des houles, ont été adaptées. Ces variables devraient être mises en accord avec les projections climatiques à l'horizon 2035 et 2050, suivant les scénarios RCP 4,5 et 8,5. Toutefois, concernant la remontée relative du niveau de la mer, les projections à l'horizon 2035 sont rares. Mais, des projections à l'horizon 2030 et 2040 prévoient une élévation du niveau marin (ENM) comprise entre 0,2 m et 0,3 m (Jevrejeva et al., 2016). Tenant compte de ces projections, et sachant que l'étude menée par Egis International en 2013 portant sur la vulnérabilité côtière au Sénégal, a considéré une élévation du niveau marin de 20 cm à l'horizon 2030, une ENM de 0,25 m est prise en compte pour l'horizon 2035. En ce qui concerne l'horizon 2050, une élévation de 50 cm (GIEC, 2007) est retenue. En effet, L'Institut de Potsdam pour la Recherche sur l'Impact du Climat et Climate Analytics (PIK) (2013) attestent que l'élévation du niveau de la mer s'est produite plus rapidement que prévue et qu'une augmentation de 50 cm d'ici 2050 pourrait être inévitable en raison des émissions passées.

Il est très probable que le taux d'élévation du niveau mondial moyen de la mer au 21<sup>ème</sup> siècle dépassera le taux observé de 1971 à 2010 pour tous les scénarios de trajectoire de concentration représentative (RCP) en raison de l'augmentation du réchauffement de l'océan et de la perte de masse des glaciers et des inlandsis. Church et al. (2013) estiment, par ailleurs, que les changements

climatiques affecteront les extrêmes du niveau de la mer qui, sur la côte, se présentent principalement sous la forme de houles, d'ondes de tempête et de tsunamis.

Pour ce qui est de la variable hauteur moyenne des houles, des projections du Nouveau Modèle Climatique Mondial de l'Institut de Recherche Météorologique du Japon (MRI-CGCM3) sont d'abord utilisées. Elles couvrent deux périodes :

- une période 2026 - 2035, où la hauteur significative moyenne de houle  $H_s$  est de 1,62 m pour le scénario RCP 4.5, et 1,55 m pour le scénario RCP 8.5 ;
- une période 2026 - 2045, où la  $H_s$  est de 1,60 m pour le scénario RCP 4.5, et 1,56 m pour le scénario RCP8.5.

Les données de la période 1926-2035 sont utilisées sur l'horizon 2035, et celles de la période 2026-2046 sur l'horizon 2050. Cependant, les  $H_s$  projetées sont inférieures à la  $H_s$  moyenne utilisée pour l'évaluation de la vulnérabilité actuelle (1,74 m), alors que la côte ouest-africaine fait déjà face à des ondes de tempête avec des vents violents et une action des houles intenses entraînant une érosion côtière (Niang, 2012 ; Appeaning Addo, 2013). Cette faiblesse des  $H_s$  pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, justifie l'utilisation, sur l'horizon 2050, de la  $H_s$  maximale des données *Wavewatch3* pour la période 2010-2015. Cette  $H_s$  maximale est de 4m.

Après le calcul de l'ICV, les scores des différents scénarios sont divisés en catégories de vulnérabilité basse, modérée, élevée et très élevée, en fonction des intervalles de quartile obtenus lors de l'évaluation de la vulnérabilité actuelle. Cette option a ainsi permis une comparaison de la vulnérabilité actuelle à la vulnérabilité future.

### 5.1.1 Évaluation de l'érosion côtière

Pour estimer le recul du rivage dû à l'élévation du niveau de la mer, la loi de Bruun a été utilisée (Bruun, 1962, 1988) :

$$R = S * G * L / (b + h)$$

où R est le recul dû à l'élévation du niveau de la mer, S est l'élévation du niveau de la mer, G est la proportion de matériau érodé qui reste dans le profil actif, L est la largeur du profil actif, b est la hauteur de la dune et h est la profondeur de fermeture.

Cette règle de Bruun est la méthode la plus couramment appliquée (exemple : Niang-Diop, 1995 ; EUROSION, 2004 ; Cowell, 2006 ; Hinkel et Klein, 2009 ; Zang *et al.*, 2004, Niang *et al.*, 2005) pour évaluer le recul du rivage causé par l'élévation du niveau de la mer (Yates-Michelin *et al.*, 2011).

- La loi de Bruun est appliquée à partir de  $G = 1$  (quand les sédiments sont des sables (Niang *et al.*, 2005) ;  $h = 5,56$  m et  $L = 1831$ .

### 5.1.2 Évaluation du niveau d'inondation

L'une des premières conséquences de l'élévation du niveau de la mer est l'augmentation du risque d'inondation associé aux ondes de tempête dans les zones côtières basses. Nicholls *et al.* (1999) ont



défini la zone de risque comme étant la zone terrestre comprise entre la ligne du rivage et le niveau d'eau maximal prévu, qui peut être calculée à l'aide de l'équation de Hoozemans et al. (1993) :

$$Dft = MHW + S_t + W_f + P_f$$

où Dft est le niveau d'inondation, MHW le niveau moyen des hautes eaux,  $S_t$  l'élévation relative du niveau de la mer,  $W_f$  la hauteur des vagues de tempête et  $P_f$  l'élévation du niveau de la mer, en raison d'un abaissement de la pression atmosphérique.

- Le niveau moyen des hautes eaux (MHW) est obtenu à partir des données horaires du marégraphe de Dakar. Celles-ci sont fournies par le site de l'Université de Hawaï (*University of Hawaii Sea Level Center UHSLC*), à travers sa station 223. MHW est égale à 1,38 m à Dakar.
- L'élévation relative du niveau de la mer ( $S_t$ ) est de 25 cm (0,25 m) sur l'horizon 2035, et 50 cm (0,5 m) sur l'horizon 2050.
- La hauteur des houles de tempête ( $W_f$ ) atteint 6,2 m, avec une période de retour de 1/100 sur la zone d'étude (Dwars, Heederik et Verhey Ingenieurs conseils, 1979 ; SOGREAH Ingénieurs Conseils, 1981, Nardari, 1993, Gueye, 1997 ; Niang *et al.*, 2005).
- L'élévation du niveau de la mer due à un abaissement de la pression atmosphérique ( $P_f$ ) est négligeable au Sénégal (Niang *et al.*, 2005).

### 5.1.3 Estimation des zones à risque de submersion marine et impacts socio-économiques

Les zones à risque d'inondation sont comprises entre le zéro marin et le niveau d'inondation considéré. Afin d'identifier la typologie de ces zones, les superficies inondables ont été déterminées par extraction à partir d'un *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) 1-ARC, et par superposition des niveaux d'inondation obtenus sur la carte d'occupation du sol, à l'instar de Khouakhi *et al.*, (2012).

### 5.1.4 Les variables adaptées au calcul de l'ICV pour le futur

Élévation du niveau marin (ENM)	Horizon 2035		Horizon 2050	
	0,25 m (25 cm)		0,5 m (50 cm)	
Hauteur significative (Hs) moyenne des houles	<i>Scénario RCP4.5</i>	<i>Scénario RCP8.5</i>	<i>Scénario RCP4.5</i>	<i>Scénario RCP8.5</i>
	1,62 m	1,55 m	1,60 m	1,56 m
Hauteur significative (Hs) maximale des houles			4 m	

Tableau 6 : Variables adaptée au calcul de l'ICV pour le futur

### 5.1.5 L'indice côtier de vulnérabilité (ICV)

L'ICV est calculé sur les horizons 2035 et 2050. Sur l'horizon 2035, il prend en compte le scénario RCP4.5 et le scénario RCP8.5 de Hs moyenne de houles et une ENM de 25 cm.

Sur l'horizon 2050, l'ICV est calculé selon trois cas de figure :

- dans le premier cas, l'ICV considère le scénario RCP4.5 de Hs moyennes et une ENM de 50cm ;
- dans le deuxième cas l'ICV prend en compte le scénario RCP8.5 de Hs moyenne et une ENM de 50 cm ;

- et un troisième cas où, en plus de ces deux scénarios, il tient compte d'une H<sub>s</sub> maximale *WWIII* et d'une ENM de 50 cm.

## 5.2 Résultats

### 5.2.1 Exposition

L'évaluation de l'exposition future repose sur l'analyse des paramètres de température et de précipitation elle-même réalisée en se basant sur des indicateurs climatiques tels que le cumul pluviométrique, la longueur de la saison, les températures maximales et minimales

L'analyse des indices des précipitations au niveau de la région de Fatick montre que quelques soient l'horizon et le scénario, le cumul pluviométrique et la longueur de la saison pourraient diminuer (Tableau 1). Ces résultats sont en accord avec ceux de Deme et al., (2015). Cette diminution est plus importante à l'horizon 2050 et pour le scénario RCP 8.5, sauf pour la longueur de la saison à l'horizon 2035 ou le scénario RCP4.5 prévoit une baisse un peu plus importante que celle de RCP8.5.

Le cumul pluviométrique connaîtra une diminution plus importante pour le scénario RCP 8.5 que le RCP 4.5. A l'horizon 2050 la diminution sera plus importante pour le RCP 8.5 avec une valeur d'environ 24.21 mm par rapport au cumul pluviométrique de la saison de référence.

Pour le début de la saison des pluies, les scénarios prévoient des démarrages de plus en plus tardifs. A l'horizon 2035 les deux scénarios prévoient un changement presque identique alors qu'à l'horizon 2050 le RCP 8.5 projette un changement un peu plus important. A l'horizon 2035, un retard d'environ 4.5±3 jours sera observé alors qu'à l'horizon 2050 ce retard sur le démarrage de la saison pourrait s'accroître pour atteindre au moins 6,5±3,5 jours selon le rcp4.5. Ces changements ont été obtenus par au moins 2/3 (soit 66.66%) des modèles donc ils sont au moins probables sauf pour le cumul à l'horizon 2035 avec le scénario RCP4.5.

La longueur de la saison des pluies connaîtra une diminution plus importante pour le scénario RCP 4.5 que le RCP 8.5. A l'horizon 2050 la diminution sera plus importante pour le RCP 8.5 avec une valeur d'environ 13±7 jours par rapport à la longueur de la saison de référence (92 jours).

Indices Climatiques	Scénarios	Horizon 2035 (2006-2035)	Horizon 2050 (2036-2065)
Cumul pluviométrique	Rcp4.5	-9.40 (11)	-14.00 (16)
	Rcp8.5	-21.86 (17)	-24.21 (18)
Début de la saison des pluies	Rcp4.5	4.99±3.34 (22)	6.22±3.61 (20)
	Rcp8.5	4.30±3.56 (20)	8.70±4.99 (21)
Longueur de la saison des pluies	Rcp4.5	-8.33±4.46(18)	-11.56±7.11(20)
	Rcp8.5	-6.10±5.18 (15)	-14.99±7.77 (18)

**Tableau 7 :** Changement absolu moyen du cumul pluviométrique, du début et de la longueur de la saison des pluies pour les horizons 2035 et 2050 des deux scénarios (rcp4.5 et rcp8.5). Les valeurs entre parenthèses indiquent le nombre de simulations ayant entraîné le changement

L'évolution de l'indice de pluie standardisé (IPS) (figure 54), montre qu'entre les années 2020 à 2035 les précipitations pourraient être proches de la normale de référence. Par contre les années 2040 pourraient enregistrer des sécheresses modérément sèches. Au-delà de 2045 les projections montrent une recrudescence des événements de sécheresse qui pourraient être extrêmement sèche comme en

1983. Il faut noter aussi la forte variabilité interannuelle de l'IPS qui pourrait entraîner l'apparition d'années très humides à l'intérieur des périodes très à extrêmement sèches.

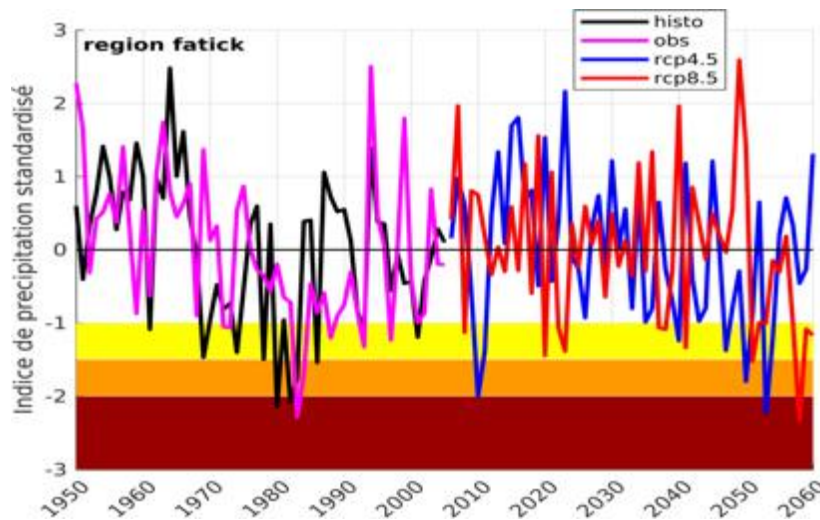


Figure 54 : Évolution de l'indice de pluie standardisé de l'historique (noire), de l'observation (magenta), du scénario rcp4.5 (bleue) et du scénario rcp8.5 (rouge). Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles cmip5

L'analyse de la variation temporelle, de 1950 à 2060, du Début de la Saison des Pluies (DSP) montre que de 1950 à 1995 le début de la saison était en avance par rapport au début de la période de référence sauf en 1983. Les projections montrent une forte variabilité plus marquée sur le scénario rcp4.5 (figure 55, courbe bleue) dans les trente (30) premières années de projection (2006-2035). Le reste de l'année la variabilité est plus importante avec le scénario rcp8.5 (figure 55 courbe rouge) avec un retard qui s'accroît entre 2035-2048 puis diminue jusqu'en 2060. Pour ce qui est de la LSP nous notons une forte variabilité dans les projections de 2006 à 2060 avec les deux scénarios (figure 55 courbes bleue et rouge). Cette variabilité est plus forte que celle observée sur le démarrage de l'historique. Ceci montre l'existence d'une forte variabilité sur la fin de la saison.

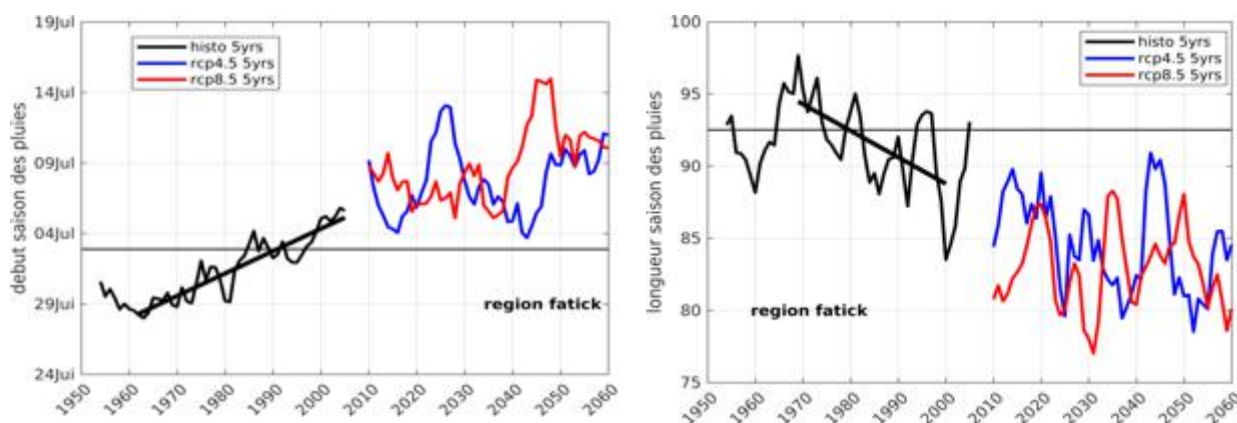


Figure 55: Evolution de la moyenne mobile sur 5 ans du début de la saison des pluies et de la longueur de la saison des pluies de l'historique (noire), du scénario rcp4.5 (bleue) et du scénario rcp8.5 (rouge). Le trait noir oblique montre la tendance de l'historique. Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles cmip5 du tableau 1.

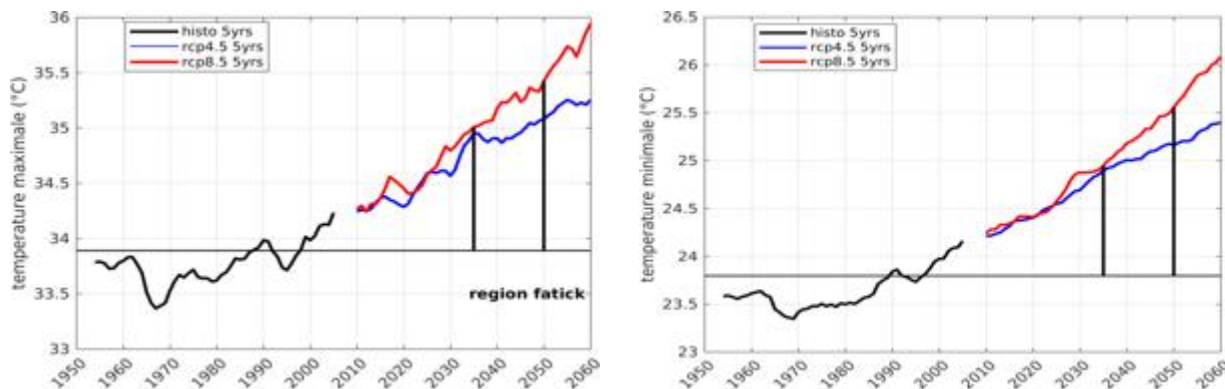
### 5.2.1.1 Les températures maximales et minimales

Aux horizons 2035 et 2050 les températures maximales et minimales pourraient connaître, quel que soit le scénario, une augmentation par rapport aux valeurs de la période de référence (1976-2005). L'augmentation est plus forte pour les températures minimales que maximales (tableau 9). Ce résultat est conforme avec celui de la Contribution Prévue Déterminée au niveau National (CPDN, 2015). A l'horizon 2035 la différence de changement entre les scénarios rcp4.5 et rcp8.5 est très faible (de l'ordre de 0.07°C). A l'horizon 2050 le changement induit avec le scénario rcp8.5 est plus important que celui de rcp4.5 de l'ordre de 0.5°C.

Indices Climatiques	Scénarios	Horizon 2035 (2006-2035)	Horizon 2050 (2036-2065)
Températures maximales	Rcp4.5	0.61±0.06	1.26±0.14
	Rcp8.5	0.69±0.08	1.78±0.17
Températures minimales	Rcp4.5	0.71±0.06	1.46±0.12
	Rcp8.5	0.77±0.08	1.99±0.16

**Tableau 8:** Changement absolu moyen des températures maximales et minimales pour les horizons 2035 et 2050 des deux scénarios (rcp4.5 et rcp8.5). Toutes les simulations montrent une augmentation.

L'analyse de l'évolution des températures maximales et minimales de 1950 à 2060 (figure 56) montre que de 1950 à environ 1997 les températures maximales et minimale sont inférieures à leurs valeurs de référence (figure 56). Les hausses, par rapport à la période de référence, commencent à partir de 1998. Jusqu'en 2035 les deux scénarios (figure 5, courbes bleue et rouge) sont proches entre eux d'où la faible différence obtenue dans le tableau 4 à l'horizon 2035.



**Figure 56:** Évolution de la moyenne mobile sur 5 ans de la température maximale de l'historique (noire), du scénario rcp4.5 (bleue) et du scénario rcp8.5 (rouge). Le trait noir fin horizontal donne la valeur de la température maximale de la période de référence. Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles.

Par ailleurs, concernant les aléas climatiques qui pourront venir impacter négativement la zone côtière, peu de données sont disponibles actuellement. Néanmoins, on assistera très certainement à une fréquence et une intensification des :

- événements extrêmes météo-marins ;
- tempêtes ;
- dépressions barométriques ;
- hautes marées de vives eaux ;

- des houles de très forte amplitude ;
- coups de vent (de force 7).

Enfin, il est également attendu que les températures océaniques augmentent dans le futur (Hansen et al., 2010; Gouretski et al., 2012; Nieves et al., 2015).

### 5.2.2 Sensibilité

L'indice de vulnérabilité côtière est évalué à l'horizon 2035 et à l'horizon 2050, en adaptant certaines variables de la méthode, notamment l'élévation relative du niveau de la mer et la hauteur significative moyenne des houles.

#### 5.2.2.1.1 L'indice côtier de vulnérabilité (ICV) à l'horizon 2035

- Scénario RCP4.5 de H<sub>s</sub> moyenne de houles + ENM de 25 cm

Les valeurs de l'ICV varient de 0,32 à 21,55. Ces scores ont été divisés en catégories de vulnérabilité basse, modérée, élevée et très élevée (figure 57), en fonction des intervalles de quartile de l'ICV de la vulnérabilité actuelle.

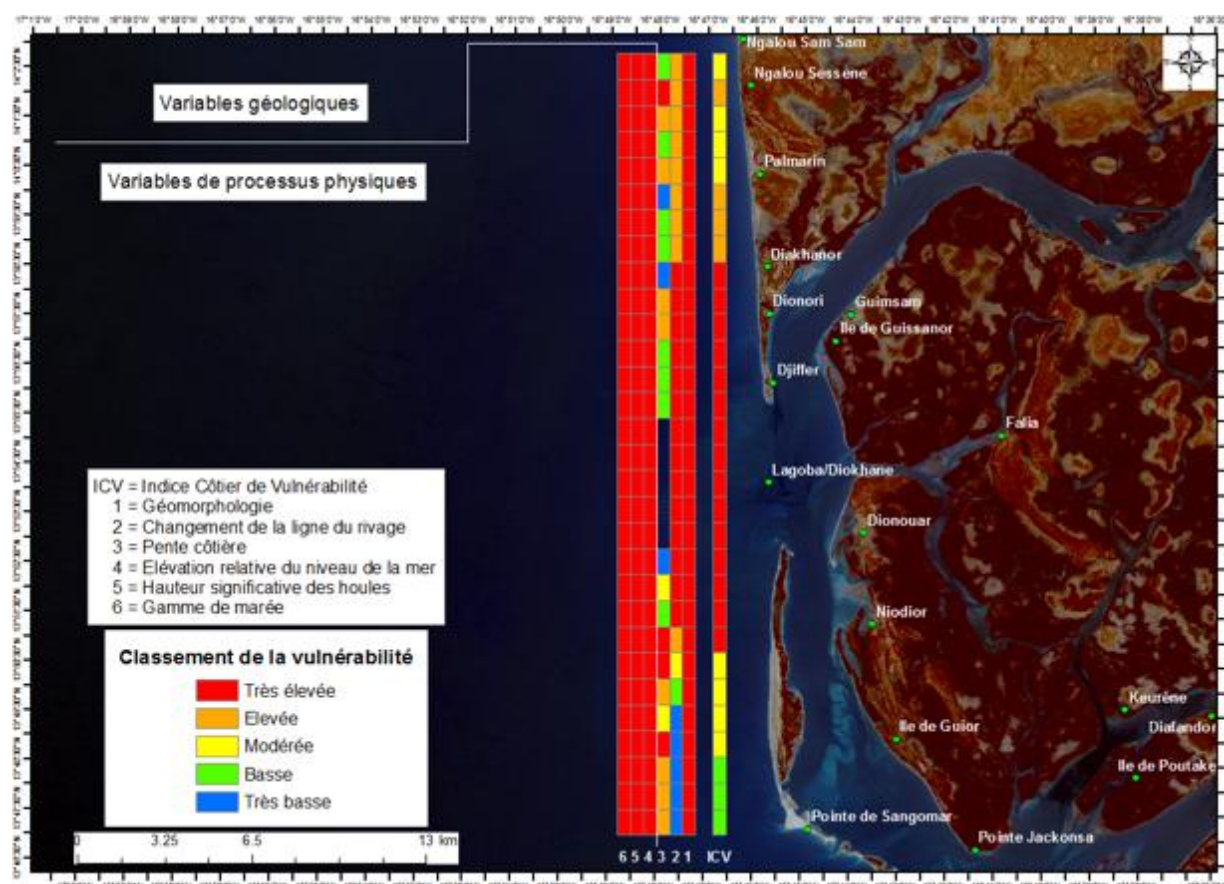


Figure 57 : ICV horizon 2035 scénario RCP4.5 de H<sub>s</sub> moyenne de houles + ENM de 25 cm

A l'horizon 2035, la vulnérabilité sur le littoral du delta du Saloum sera sous RCP4.5 :



- modérée de Ngalou Sam-Sam à Palmarin (à l'exception d'un linéaire de 1 km à Ngalou Sessene), et du Sud de Niodior au Sud de l'île de Guior ;
- élevée à Ngalou Sessene, et entre Palmarin et Diakhanor ;
- très élevée de Diakhanor au Sud de Niodior ;
- basse du Sud de l'île de Guior à la pointe de Sangomar.

Les variables géologiques, en particulier, l'érosion/ accréation de la ligne du rivage et la pente côtière montrent une plus grande variabilité ; ce qui signifie qu'elles sont déterminantes sur la valeur de l'ICV. Quant aux variables de processus physiques (élévation relative du niveau de la mer, hauteur significative de la houle, amplitude de la marée), elles restent homogènes sur l'ensemble du littoral, avec un très grand score pour l'ENM. Les quatre régions déterminées en fonction de la vulnérabilité du littoral sont donc influencées par l'érosion/accréation de la ligne du rivage et la pente côtière ; néanmoins, le facteur prépondérant dans leur catégorisation est l'ENM.

- **Scénario RCP8.5 de Hauteur moyenne de houles + ENM de 25 cm**

Dans ce scénario, les valeurs de l'ICV sont comprises entre de 0,31 et 21,08. La division de ces scores suivant les intervalles de quartile de l'ICV actuelle laisse apparaître des classes de vulnérabilité identiques aux catégories de vulnérabilité du scénario RCP4.5.

#### 5.2.2.1.2 L'indice côtier de vulnérabilité (ICV) à horizon 2050

- **Scénario RCP4.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 50 cm**

Les valeurs de l'ICV oscillent entre 0,03 et 22,08. Elles révèlent trois catégories de vulnérabilité, suivant les intervalles de quartile : une vulnérabilité basse, une vulnérabilité modérée et une vulnérabilité très élevée comme le montre la figure 58.

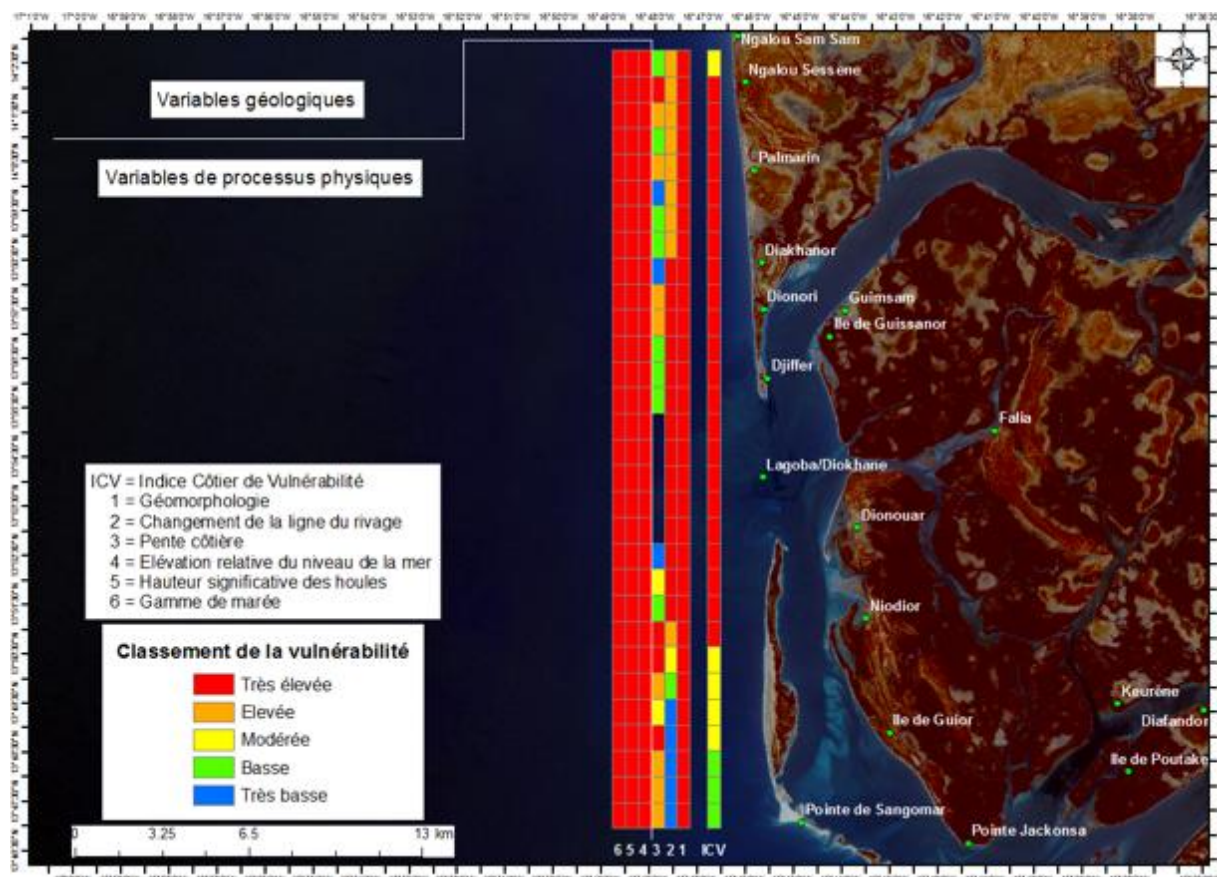


Figure 58 : ICV horizon 2050 scénario RCP4.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 50 cm

Ainsi, l'horizon 2050, le littoral sera soumis à trois classes de vulnérabilité :

- une vulnérabilité basse entre le Sud de l'île de Guior et la pointe de Sangomar.
- une vulnérabilité modérée à Ngalou Sam Sam et sur le linéaire allant du Sud de Niodior au Sud de l'île de Guior ;
- une vulnérabilité très élevée, de Ngalou Sessene à 1 km au Sud de Niodior ;

Les valeurs de l'ICV sont, évidemment, influencées par l'érosion/accrétion de la ligne du rivage et la pente côtière ; la variable prépondérante qui régit ici la vulnérabilité est l'ENM.

- **Scénario RCP8.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 50 cm**

L'ICV fluctue entre 0,33 et 21,80. Ces valeurs traduisent des classes de vulnérabilité similaires à celles du scénario RCP4.5.

- **Scénario Hs maximale + ENM de 50 cm**

Les valeurs de l'ICV varient entre 0,52 et 34,91. Ces scores montrent trois catégories de vulnérabilité (figure 59).

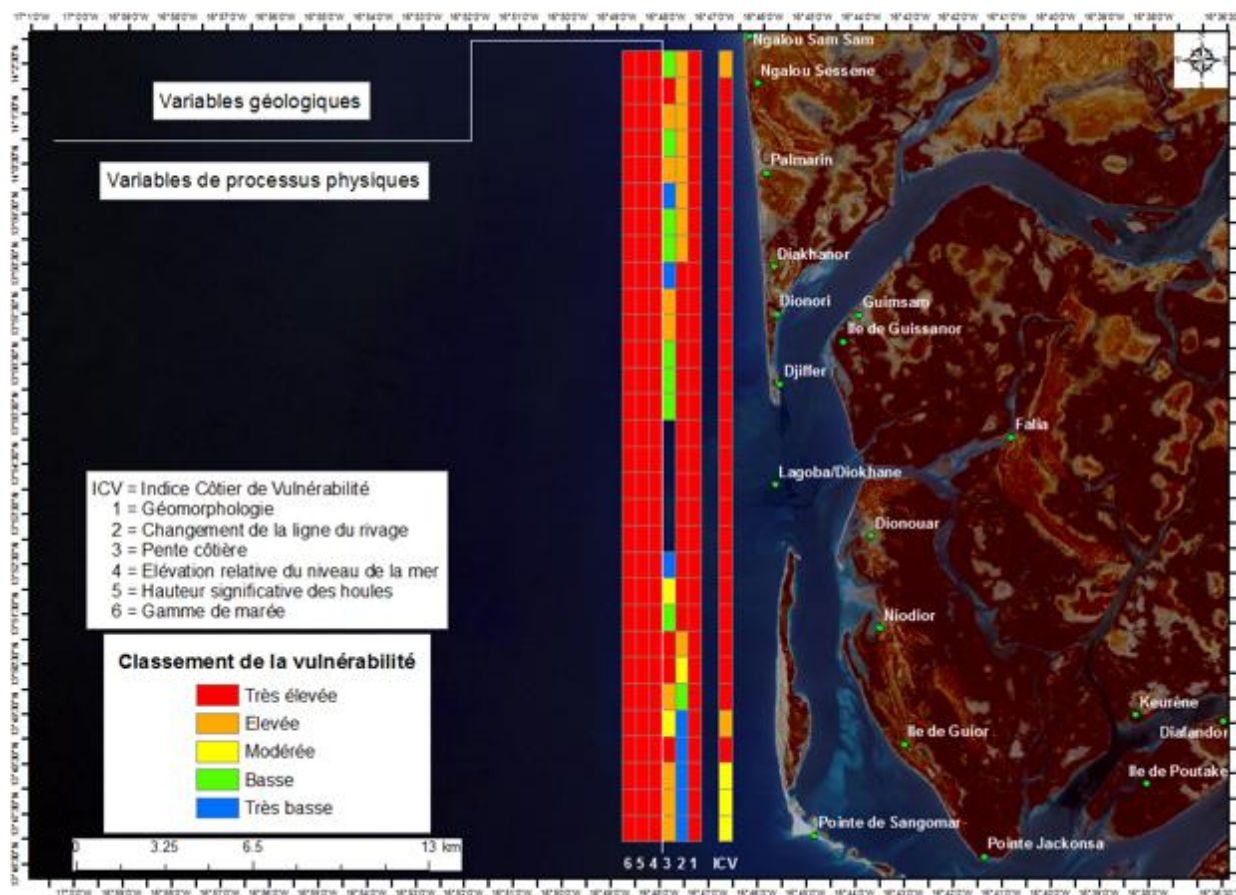


Figure 59 : ICV horizon 2050 scénario de Hs maximale de houles + ENM de 50 cm

Le littoral affichera trois classes de vulnérabilité :

- une vulnérabilité élevée de Ngalou Sam-Sam au Nord de Ngalou Sessene, ainsi que sur un segment d'un km au Nord de l'île de Guior ;
- une vulnérabilité très élevée de Ngalou Sessene jusqu'à un km au Sud de l'île de Guior ;
- une vulnérabilité modérée à partir du Sud de l'île de Guior jusqu'à la pointe de Sangomar.

La variable érosion/accrétion de la ligne du rivage et la pente côtière, est d'une grande variabilité. Elle a certainement une forte influence sur la valeur de l'ICV ; mais la magnitude de la remontée relative du niveau de la mer et de la Hs maximale sous WWIII (4 m) reste prépondérante. Elle fait ainsi disparaître la catégorie de vulnérabilité basse qui caractérisait le linéaire île de Guior-Pointe de Sangomar dans les deux précédents scénarios.

Afin de mieux analyser la sensibilité, l'ICV a été croisé à la carte d'occupation du sol.

### 5.2.2.2 Croisement de l'ICV et de la carte d'occupation du sol

#### 5.2.2.2.1 Croisement de l'ICV à horizon 2035 et de la carte d'occupation du sol

- **Croisement de l'ICV sous le scénario RCP4.5 de H<sub>s</sub> moyenne de houles + ENM de 25 cm et de la carte d'occupation du sol**

Le croisement de l'ICV sous le scénario RCP4.5 de H<sub>s</sub> moyenne de houles + ENM de 25 cm et de la carte d'occupation du sol montre que le littoral sera soumis à des catégories de sensibilité différentes. Le linéaire le plus sensible s'articulera autour de la brèche du Lagoba (figure 60).

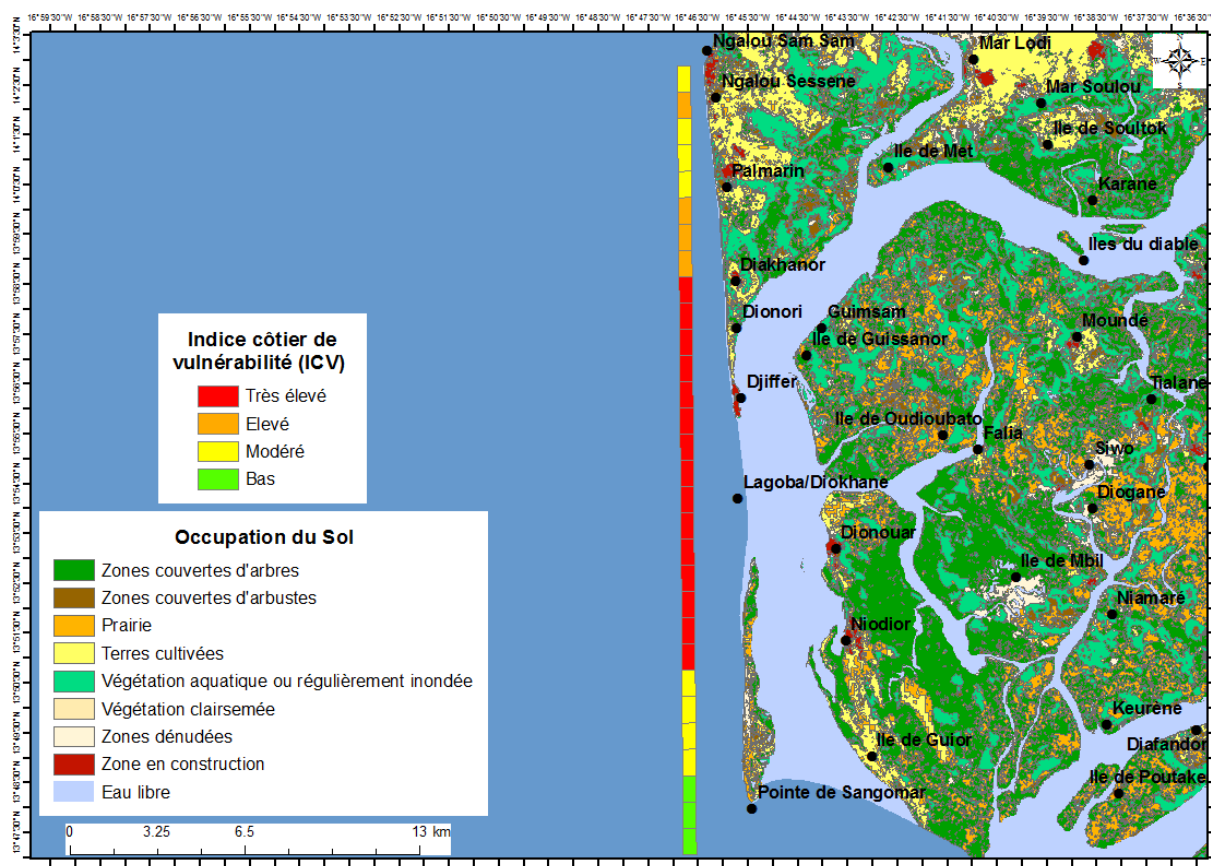


Figure 60 : Croisement de l'ICV scénario RCP4.5 de H<sub>s</sub> moyenne de houles + ENM de 25 cm et de la carte d'occupation du sol

Le constat est que les villages situés entre Diakhanor et l'île de Niodior seront exposés à un risque très élevé de phénomènes météo-marins extrêmes, notamment les tempêtes et les coups de vents. Ces événements auront des conséquences graves sur les établissements humains, les terres de cultures, les zones de prairie, etc. Ainsi, à Djiffère par exemple, la principale route sera sous forte menace de destruction. Par ailleurs, la sensibilité de cette zone diminuera au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la zone d'impact de la brèche.

- **Croisement de l'ICV scénario RCP8.5 de H<sub>s</sub> moyenne de houles + ENM de 25 cm et de la carte d'occupation du sol**



Ici, l'exposition au risque côtier sera identique au résultat issu du croisement de l'ICV sous le scénario RCP4.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 25 cm et de la carte d'occupation du sol, puisque l'ICV sur ces deux scénarios affiche des catégories de vulnérabilité semblables.

#### 5.2.2.2.2 Croisement de l'ICV à l'horizon 2050 et de la carte d'occupation du sol

- **Croisement de l'ICV scénario RCP4.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 50 cm et de la carte d'occupation du sol**

Dans ce scénario, l'ICV sous le scénario RCP4.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 50 cm est croisé à la carte d'occupation du sol. Ce croisement montre une très forte exposition (figure 61).

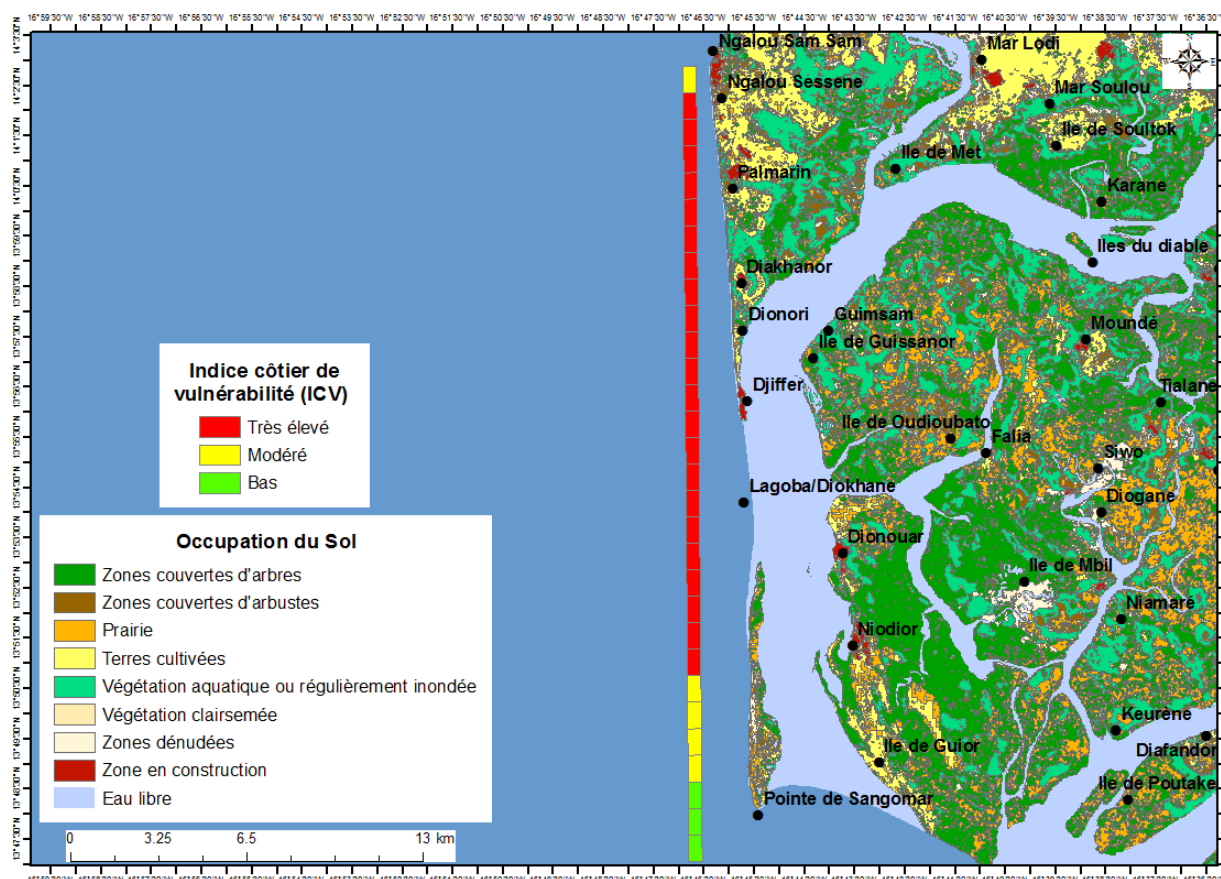


Figure 61 : Croisement de l'ICV scénario RCP4.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 50 cm et de la carte d'occupation du sol

Par conséquent, les villages de Ngalou Sessene, Palmarin, Diakhanor, Djiffère, et les îles Guissanor, Dionouar, Niodior seront très fortement sensibles à des risques d'événements extrêmes météo-marins (tempêtes et coups de vents). Il en résultera principalement : des submersions marines, une forte érosion côtière et des destructions au niveau les terres de culture, des infrastructures socio-économiques et des établissements humains. L'infrastructure la plus menacée restera la route de Djiffère.

- **Croisement de l'ICV scénario RCP8.5 de Hs moyenne + ENM de 50 cm et de la carte d'occupation du sol**



La sensibilité des villages de Ngalou Sessene, Palmarin, Diakhanor, Djiffère, et des îles Guissanor, Dionouar, Niodior au risque d'extrêmes météo-marins est ici identique au risque obtenu lors du croisement entre l'ICV du scénario RCP4.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 50 cm et l'occupation du sol.

- **Croisement de l'ICV scénario Hs 4m + ENM de 50 cm et de la carte d'occupation du Sol**

Lorsque l'ICV Hs 4m + ENM de 50 cm est croisé à l'occupation du sol, la sensibilité du littoral augmente très fortement (figure 62).

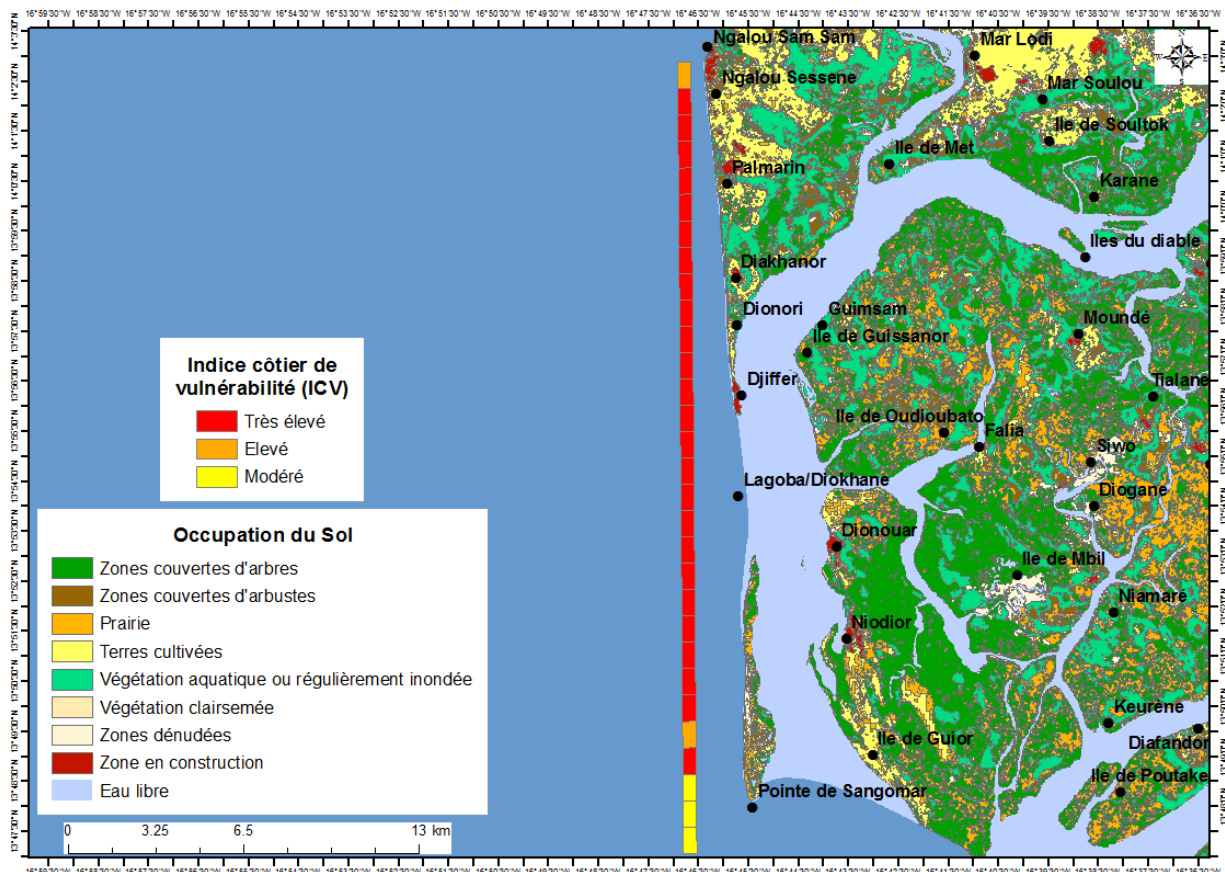


Figure 62 : Croisement de l'ICV scénario de Hs maximale de houle + ENM de 50 cm et de la carte d'occupation du

Avec une très forte élévation du niveau marin accompagnée d'une très forte Hs, la sensibilité du littoral deviendra très élevée sur tout le linéaire du littoral, à l'exception de Ngalou Sam Sam et du Nord de l'île de Guior où elle apparaît comme élevée, et de la pointe de Sangomar où elle deviendra modérée. Ainsi, au niveau des établissements humains y compris les infrastructures hôtelières et touristiques et surtout la route de Djiffère (levier économique essentiel) seront sous la menace d'une destruction voire d'une disparition. Il en sera de même pour les espaces dédiés aux cultures.

### 5.2.2.3 Le recul de la ligne du rivage dû à l'élévation du niveau marin aux horizons 2035 et 2050

Dans le cadre de cette étude, nous avons également tenté d'estimer la superficie susceptible d'être perdue par érosion côtière sous l'influence de l'élévation du niveau de la mer aux deux horizons de référence. Ainsi, nos calculs menés prévoient un recul de la ligne du rivage dû à l'ENM à l'horizon 2035 de l'ordre de 267,69 m, soit un recul de 15,75 m/an. A l'horizon 2050, ce recul sera de 268,08 m ; ce

qui équivaut à un taux annuel d'érosion de 8,65 m/an. La figure 63 indique les zones qui subiront une perte de plage et celles où une accrétion sera au contraire notée. Ainsi, pratiquement tout le linéaire de la frange littorale de la région de Fatick sera soumis au phénomène d'érosion, et il est probable que certaines franges littorales pourraient même disparaître ; notamment l'extrémité distale de la flèche de Sangomar. En effet, Niang et al., (2005) indiquaient qu'en cas d'élévation du niveau marin, cette partie serait la plus vulnérable à l'inondation ainsi induite, en raison principalement de la grande largeur du plateau continental mais aussi de la faible hauteur du cordon littoral.

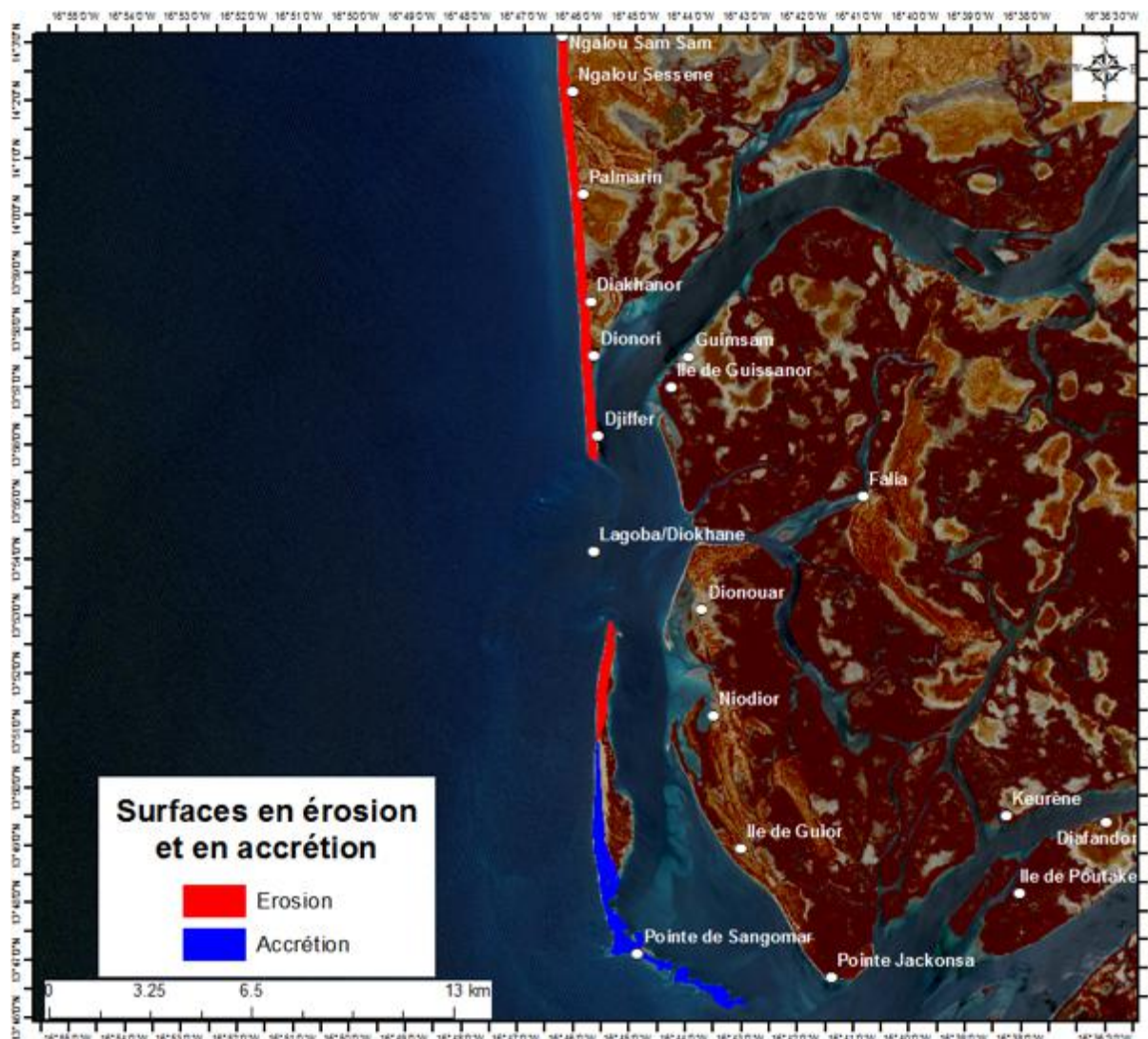


Figure 63 : Recul de la ligne du rivage dû à l'élévation du niveau marin aux l'horizon 2050

#### 5.2.2.4 Le niveau d'inondation

##### 5.2.2.4.1 Le niveau d'inondation à l'horizon 2035

###### a. Le niveau d'inondation minimum

Le niveau d'inondation minimum est estimé ici à 2,84 m. Il apparaît ainsi dans ce cas de figure que seules quelques surfaces situées sur le site de Ngalou Sam Sam et au niveau du segment le plus dunaire au Sud de la brèche pourraient ne pas être submergées. Par contre, il est probable que les houles de

tempête franchissent et submergent l'ensemble du linéaire. De même, les îles du Saloum, situées sur l'arrière-côte pourraient être menacées par les flux marins. Une superficie assez importante serait ainsi touchée et donc très probablement submergée. Toutefois, il est possible qu'à l'intérieur de la zone considérée comme inondée, des sites culminant à plus de 2,84 m seront épargnés de ce risque de submersion marine.

#### **b. Le niveau d'inondation maximum**

Les calculs menés montrent un niveau d'inondation maximum de 7,83 m avec de fortes houles de tempêtes qui pourraient déborder et submerger la flèche de Sangomar sur tout son linéaire. La zone sous risque de submersion marine sera importante et il est estimé que les endroits où l'altitude est supérieure au niveau d'inondation resteront préservés.

#### 5.2.2.4.2 Le niveau d'inondation à l'horizon 2050

##### **a. Le niveau d'inondation minimum**

A l'horizon 2050, le niveau d'inondation minimum serait de 3,08 m. En dehors de quelques surfaces à Ngalou Sam Sam et sur le segment au Sud de la brèche qui resteront épargnées, la flèche littorale pourrait bien être submergée dans son intégralité. Les flux marins inonderont par la suite les îles en arrière sous altitude inférieure au niveau d'inondation. La zone sous risque de submersion marine sera notamment assez importante avec cependant des endroits à altitude supérieure à 3,08 m qui pourraient ne pas être touchés.

##### **b. Le niveau d'inondation maximum**

Dans ce scénario, on estime que le niveau d'inondation maximum s'élèvera à 8,08 m. Les houles de tempête franchiront la flèche de Sangomar qui sera submergée dans son intégralité, alors que les flux marins envahiront également l'ensemble des villages de l'arrière-côte culminant à moins de 8,08 m. Ainsi, la zone sous risque de submersion marine sera très importante avec très peu de sites émergés. Les niveaux d'inondation obtenus sont supérieurs à ceux trouvés par Niang et al. (2005). Ces auteurs ont calculé, à l'horizon 2050 sur le Saloum, un niveau d'inondation minimum de 1,27 m et un niveau d'inondation maximum de 7,4 m. Cette différence est essentiellement liée au fait que les données utilisées dans ces deux travaux sont différentes, surtout en qui concerne le niveau moyen des hautes eaux (MHW) et les projections d'élévation relative du niveau marin (St). Par ailleurs, il apparaît que quel que soit le niveau d'inondation considéré pour cette étude, et en se conformant aux travaux de Niang et al., (2005), d'importantes surfaces sont à risque. Les auteurs avançaient déjà qu'avec 1 m d'inondation près de 896 km<sup>2</sup> soit 27% de la superficie du Delta du Saloum serait sous les eaux. Une superficie qui prend en compte les unités comme la mangrove, les tannes, les salins de Kaolack, les zones de forêts, de savanes, et autres terres mises en valeur. Bien que nous n'ayons pas calculé la superficie pour les niveaux d'inondation, on peut supposer que ce chiffre pourrait bien tripler avec 3 m d'inondation.

#### 5.2.2.5 *Impacts socio-économiques futurs des submersions marines sur la flèche littorale et les îles du Saloum*

Quel que soit l'horizon et le niveau, la submersion marine aura des impacts socio-économiques très notables. L'ampleur et la gravité de ces impacts dépendront du niveau d'inondation atteint. Ainsi, très certainement, le niveau d'inondation maximum à l'horizon 2050 aura des impacts socio-économiques potentiels plus importants, alors que le niveau d'inondation minimum à l'horizon 2035 sera très probablement de moindre impact.

Il n'en demeure pas moins que les impacts seront très diversifiés et toucheront aussi bien les établissements humains, les infrastructures que les activités économiques. Ainsi du point de vue infrastructurel, de forts risques pèsent sur les infrastructures touristiques, éducatives et sanitaires de la zone. De plus, on peut estimer que la majeure partie des grands axes routiers serait inondable ; alors que certains comme la route Samba Dia-Djiffère pourraient être détruits portant un coup à l'économie locale. Des problèmes de communication se poseront avec acuité pour des villes telles Fatick et Foundiougne (Niang et al, 2005). Cette situation exacerberait l'enclavement de la région et entraînerait une difficulté d'écoulement des produits (halieutiques, agricoles, et autres). Pour les activités économiques, on assistera à un recul de l'agriculture en raison de la destruction des champs de cultures et des récoltes ainsi que la pêche avec la perte de biodiversité et d'habitats marins. En effet, Niang et al (2005) indiquaient déjà comme zones affectées par les submersions marines : les aires humides, les zones de mangrove ce qui s'accompagnerait d'une perte de la diversité biologique. La vulnérabilité économique du delta du Saloum renforcera si rien n'est fait les migrations vers les régions périphériques, les centres urbains, voire vers les pays voisins (Gambie, Guinée Bissau, Sierra Léone) ou plus éloignés, des jeunes et des pêcheurs.

Par ailleurs sous les effets du recul de rivage et des submersions marines suite à l'élévation du niveau marin, on peut retenir que des risques pèseront plus fortement sur la qualité et la quantité des eaux. Selon Dennis et al (1995) et Niang et al (2000) l'évolution du niveau marin pourrait se traduire par une salinisation accrue des eaux de surface et des eaux souterraines, mettant ainsi en péril l'approvisionnement en eau des populations et du bétail mais aussi de l'agriculture.

Les établissements humains sont aussi très fortement concernés avec le démantèlement de la flèche littorale et un quasi-anéantissement de son effet brise-lames. Ce qui entraînera une exposition directe sur les îles Guimsam, Guissanor, Dionewar et Niodior et de leurs populations, mais aussi d'un nombre important de villages comme Djiffère et Palmarin.

#### 5.2.3 *Capacité d'adaptation*

Les services écosystémiques tirés de la zone côtière font de cet espace un pôle de concentration humaine et économique pour le pays. Les nombreuses sollicitations, très souvent incontrôlées, ont ainsi entraîné une rapide dégradation du milieu et de ses écosystèmes. Cependant soucieux d'inverser cette tendance et assurer un développement durable, l'Etat du Sénégal a mis en place d'importants programmes et projets de protection et de gestion du littoral parmi lesquels :

- les projets d'adaptation aux changements climatiques en Afrique : UNESCO/PNUD et INTAC/PNUD



- les projets UEMOA
- le projet de protection côtière financé par le Fonds d'adaptation (2010)
- le programme TACC qui a donné lieu entre autres au Plan Climat Territorial Intégré de la région de Fatick
- l'étude de vulnérabilité côtière (Banque Mondiale, 2013)
- le programme de Gestion intégrée des Zones Côtières (GIZC) (2013).

Ces projets déroulés, ont eu d'importants résultats en termes de connaissance des dynamiques physiques, socio-économiques et environnementales de la zone côtière ainsi qu'une amélioration des processus institutionnels et de gouvernance notamment face aux changements climatiques. En effet, le Sénégal s'est fortement investi dans la restructuration du cadre institutionnel et de gouvernance à travers l'élaboration de documents et stratégies de politiques climatiques pour une meilleure prise en charge de la question et définir ainsi des mesures d'adaptation durables. En ce sens, certains documents comme le Plan d'Action National pour l'Adaptation aux changements climatiques (PANA, 2006), les Deuxième et Troisième Communications Nationales (2010 et 2015) du Sénégal aux changements climatiques, la Contribution Prévue Déterminée Nationale du secteur de la Zone côtière (2017) ont identifié la vulnérabilité du littoral et exprimé les besoins d'adaptation urgents et prioritaires du pays. Ainsi par exemple, parmi les options d'adaptations identifiées on peut citer :

- l'adoption d'une loi littorale ;
- le renforcement des réglementations en vigueur ;
- les renforcement de capacités des acteurs ;
- la mise en place de digues en enrochement et de murs de protection contre l'érosion et l'intrusion saline ;
- le reboisement de filaos et de mangrove ;
- la gestion des ressources naturelles,
- etc.

Au niveau du Delta du Saloum, ces options sont très souvent conduites et mises en œuvre avec l'appui d'ONG (Caritas, Wetlands, UICN etc.) ou d'institutions nationales. Ainsi, le projet « Réduction de la vulnérabilité et renforcement de la résilience des communautés vulnérables dans les Iles du Saloum » financé par le Fond d'Adaptation et actuellement mis en œuvre par le CSE constitue un projet pilote d'envergure qui vise la réhabilitation des ouvrages de protection contre les inondations à Dionewar, ainsi que le développement d'activités aquacoles qui pourront contribuer significativement à l'amélioration des moyens de subsistance des populations de l'île. La Direction de l'environnement et des établissements classés (DEEC) prévoit également dans le cadre de son programme de GIZC l'élaboration de plans locaux de GIZC pour le Delta du Saloum (en attente de mise en œuvre).

Les populations bénéficient ainsi d'un encadrement pour davantage faire face aux impacts des changements climatiques (construction de digues et de murs de protection, reboisement, etc.) et à la dégradation des ressources naturelles à travers le développement d'activités génératrices de revenus, la mise en place d'AMP, restauration des forêts de mangroves etc. Par ailleurs, avec l'élaboration du Plan Climat Territorial Intégré de Fatick, les enjeux liés aux changements climatiques sont mieux identifiés. Toutes ces mesures initiées ont grandement participé à atténuer la vulnérabilité des communautés littorales et améliorer renforcer leurs capacités d'adaptation.

Il apparaît, toutefois, que les diverses mesures d'adaptation initiées pour contrer les effets négatifs de l'érosion côtière sont majoritairement des mesures de protection dites dures (digue, enrochement, brise-lames, champs d'épis, etc.) (Noblet et al, 2018). Or, ces ouvrages présentent des résultats



mitigés. D'une part, en raison du coût financier élevé (environ 16 millions US\$ depuis 2010 dédiés aux mesures de protection). D'autre part, en raison des caractéristiques des côtes sénégalaises qui sont basses et sableuses. Ainsi, ce type de protection lourde a tendance à renforcer le phénomène d'érosion des côtes et d'amplifier à long terme la vulnérabilité des communautés (Schéma directeur d'Afrique de l'Ouest, 2011 ; Banque Mondiale, 2013 ; Bernatchez, P., and C. Fraser, 2012). De plus, la majorité de ces ouvrages érigés il y a déjà plusieurs années ou décennies ne sont pas paramétrés pour faire face à l'impact réel des changements climatiques et par conséquent ne peuvent pas être considérés comme des options d'adaptation aux changements climatiques au sens strict (Noblet et al, 2018).

Il faut également rappeler que la zone d'étude a connu un épisode de relogement marquant lors de la tempête de 1987 pour la commune de Palmarin. Cette mesure mise en place par le gouvernement à l'époque venait répondre à une situation d'urgence, mais, ne fait pas pour le moment l'objet d'une réelle planification, malgré des risques importants pour les populations dans la zone d'étude mais aussi, dans d'autres zones au Sénégal (notamment à Saint Louis).

Or, l'analyse de la sensibilité future montre une exacerbation des impacts des changements climatiques aux horizons 2035 et 2050, avec notamment des épisodes de submersions marines plus importants que ce qui a été connu jusqu'ici dans la zone. Au regard des résultats de la sensibilité aux horizons 2035-2050 et des mesures d'adaptation mises en œuvre jusqu'à maintenant, on peut estimer que les capacités d'adaptation dans la zone d'étude ne sont actuellement pas suffisantes pour faire face aux impacts futurs. En effet, les impacts futurs des CC vont mettre en péril la survie des populations et de leur moyen de subsistances. Aussi, les résultats de cette étude appellent à une prise en charge efficiente des impacts des CC à travers la planification d'options d'adaptation concrètes et coordonnées, afin de préserver durablement la zone côtière et permettre aux communautés côtières d'y vivre en sécurité.

#### 5.2.4 Synthèse de l'évaluation de la vulnérabilité future

L'évaluation de la vulnérabilité actuelle a montré quatre zones de vulnérabilité :

- un littoral à vulnérabilité modérée qui se trouve le long du complexe Ngalou Sam Sam-Diakhanor, à l'exception du tronçon juste au Sud de Ngalou Sessene d'une part et sur la seconde moitié du segment Niodior - île de Guior d'autre part ;
- un littoral à vulnérabilité élevée qui se concentre principalement au Sud de Ngalou Sessene, de Diakhanor à Djiffère et sur la première moitié du segment Niodior - île de Guior ;
- un littoral à vulnérabilité très élevée se situe entre Diffère et Niodior ;
- un littoral à vulnérable basse qui s'étend le long du linéaire allant du Sud de l'île de Guior jusqu'à la Pointe de Sangomar.

Avec l'accélération de l'élévation du niveau de la mer à l'horizon 2035 et à l'horizon 2050, le littoral deviendra plus exposé aux risques d'événements extrêmes météo-marins, aux tempêtes et coups de vents, aux submersions marines, à l'érosion et aux destructions d'infrastructures.

Ainsi à l'horizon 2035, selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 de H<sub>s</sub> moyenne de houles et l'ENM de 25 cm, quatre classes de vulnérabilité seront observées sur le littoral :

- une vulnérabilité modérée de Ngalou Sam Sam à Palmarin, et du Sud de Niodior au Sud de l'île de Guior ;
- une vulnérabilité élevée à Ngalou Sessene, et entre Palmarin et Diakhanor ;
- une vulnérabilité très élevée de Diakhanor au Sud de Niodior ;
- une vulnérabilité basse du Sud de l'île de Guior à la pointe de Sangomar.

A l'horizon 2050, suivant les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 et l'ENM de 50 cm, le littoral sera soumis à trois catégories de vulnérabilité :

- une vulnérabilité modérée à Ngalou Sam Sam et sur le linéaire allant du Sud de Niodior au Sud de l'île de Guior ;
- une vulnérabilité très élevée, de Ngalou Sessene à un km au Sud de Niodior ;
- une vulnérabilité basse entre le Sud de l'île de Guior et la pointe de Sangomar.

Par ailleurs, avec une  $H_s$  de 4 m et une ENM de 50 cm, le littoral affichera également trois catégories de vulnérabilité, différentes des précédentes :

- une vulnérabilité élevée de Ngalou Sam Sam au Nord de Ngalou Sessene, ainsi qu'au Nord de l'île de Guior ;
- une vulnérabilité très élevée de Ngalou Sessene au Sud de l'île de Guior ;
- une vulnérabilité modérée à partir du Sud de l'île de Guior jusqu'à la pointe de Sangomar

5.2.4.1 Chaîne d'impact



Figure 64: Chaîne d'impact

## 6 Identification des options d'adaptation

Les effets potentiels et/ou avérés des changements climatiques sur les systèmes littoraux (événements extrêmes, élévation croissante du niveau des mers, érosion et submersions marines accentuées, etc.) interrogent de plus en plus les vulnérabilités et les capacités d'adaptation de ces systèmes (Nicholson-Cole et O'Riordan, 2009 ; Wong et al., 2014), dont l'une des spécificités tient à « la délicate rencontre entre la terre et la mer » (Grenelle de la mer). Rocle (2015) constate qu'au-delà des objectifs et des politiques d'atténuation, l'adaptation au changement climatique constitue désormais un autre programme normatif soutenu au niveau international, en particulier au travers de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCUNCC).

Dès le début des années 1990, le GIEC (1990) formule trois options pour l'adaptation en zones côtières qui sont encore aujourd'hui les références :

- la protection, qui renvoie à la construction de structures dures comme des digues, ainsi que des solutions souples telles que les dunes et la végétation, pour protéger la terre de la mer. Ces aménagements permettent le maintien de l'utilisation existante des terres ;
- l'accommodement (rehaussement ou recul des habitations), qui suppose que les gens continuent d'utiliser le terrain à risque, mais ne cherchent pas à empêcher la terre d'être inondée. Cette option comprend l'édification d'abris d'urgence pour se protéger en cas d'inondation, l'élévation de bâtiments sur pilotis, la conversion de l'agriculture à l'élevage de poissons, ou des cultures tolérantes aux inondations et au sel par exemple ;
- le retrait, aussi appelé repli stratégique ou « relocalisation des biens et des activités face aux risques littoraux » (MEDDE, 2012), consistant à déplacer et à relocaliser dans l'arrière-côte les biens et les activités soumis aux aléas météo-marins et aux risques associés. Le retrait implique qu'aucun effort n'est entrepris pour protéger la terre de l'avancée de la mer. Ce choix peut être motivé par le fait que des mesures de protection pourraient engendrer des impacts économiques ou environnementaux excessifs (Noblet et al, 2018).

### 6.1 Synthèse des options d'adaptation identifiées dans la région de Fatick

L'étude de vulnérabilité de la zone côtière de Fatick montre que la région subit une vulnérabilité réelle entretenue par les effets de la variabilité climatique et de l'action anthropique. Cette vulnérabilité va s'accroître dans le futur avec les effets des changements climatiques. Bien que des mesures d'adaptation sont de plus en plus mises en place, il se pose tout de même la résistance de ces mesures, tant institutionnelles qu'individuelles. Le tableau ci-dessous résume principalement les options identifiées dans le Plan d'Action National pour l'Adaptation aux changements climatiques (2006), dans la Deuxième Communication Nationale à la Convention Cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques (2010) et dans la CDN pour la zone côtière (2016) ainsi que des mesures reprises dans la littérature pour le Delta du Saloum.

*Tableau 9 : Synthèse des mesures d'adaptation identifiées dans le Delta du Saloum*

Mesures d'adaptation	Source documentaire
Relocalisations (déplacement du village de Palmarin, du campement de Djiffère) à cause des dégâts provoqués par	Plan d'Action National pour l'Adaptation aux changements climatiques (2006)

l'ouverture de la brèche du Lagoba sur la flèche de Sangomar, par des houles très fortes	
Construction d'un mur longitudinal en gabions de roches à Palmarin Ngalou pour protéger la route située à 300 m de la mer, construction d'un autre mur pour protéger la route aux environs de Djiffère	Deuxième communication nationale à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (2010)
Reboisement de 420 ha de <i>Rhizophora</i> entre 1995 et 2001 dans 49 villages de la Petite-Côte et du Delta du Saloum	Document de synthèse sur la zone côtière du Sénégal dans son volet Adaptation (2016)
Relogement des populations menacées ou affectées par l'érosion côtière et/ou les inondations : relogement des populations de Palmarin Diakhanor victimes de l'érosion côtière durant les années 1987,	Document de synthèse sur la zone côtière du Sénégal dans son volet Adaptation (2016)
Elaboration de stratégies de lutte contre l'érosion côtière et la salinisation dans les îles du Gandoul et le long des villages insulaires ou riverains des bolongs: sensibilisation des populations sur la protection/conservation des écosystèmes de mangrove, reboisement de la mangrove sur 20 ha et introduction des plantes halophiles, plantation d'eucalyptus pour protéger les terroirs villageois, construction de digues de protection dans les villages, formation périodique de comités de plage sur leurs rôles et missions, activation de la procédure de reconnaissance juridique de comités de plage, utilisation de haies vives par les paysans	Faye (2016)
Murs de protection entre Dionewar et les îles Bétenti, secteur situé à Niodior bénéficiant d'un mur de protection contre l'érosion, construction d'une digue	Faye (2016)
Plantation entre 1995 et 2002 d'environ 1000 ha de mangrove et mobilisation de 19 villages par l'ONG CAREM appuyée par l'UICN, encadrement de 27 villages et plantation de 70 ha entre 1998 et 2001 par l'ONG WAAME, encouragement (aide en nature) des populations qui participent à l'effort de reboisement des mangroves par la FIOD	Faye (2016)
Association des cultures et des arbres dans certains villages des îles du Saloum pour mieux protéger les espèces végétales et favoriser leur développement	Faye (2016)

Par ailleurs, afin de réduire la vulnérabilité de la région et appuyer les populations, des initiatives plus ciblées sont en cours de réalisation dans des localités très exposées. C'est le cas du projet mis en œuvre par le Centre de Suivi Écologique à Dionewar qui vise une approche intégrée à travers trois principales composantes déclinées en sous-activités :

- Composante 1 : renforcement de la résilience des secteurs productifs de l'île Dionewar
- Composante 2 : protection contre les inondations et la salinisation à Dionewar
- Composante 3 : planification stratégique et gestion des connaissances.

Les options d'adaptation mises en place par l'État et les organisations d'appui au développement sont de plus en plus internalisées par les populations et acteurs territoriaux qui à leur échelle tentent de les



adapter à leurs préoccupations. L'atelier participatif d'élaboration des scénarios et d'identification de mesures d'adaptation<sup>8</sup> organisé à Fatick par le PAS-PNA avec l'ensemble des acteurs locaux et nationaux a ressorti comme principales options prioritaires pour l'horizon 2050 :

- Construction des ouvrages de protection
- Reboisement/plantation (exemple mangrove)
- Développement des activités génératrices de revenus (AGR)
- Mise en place/renforcement des systèmes d'alertes précoces
- Sensibilisation sur les réglementations et les bonnes pratiques (pêche, activités sur la zone côtière, etc.)

Globalement, on constate que les mesures pour faire face aux effets des changements climatiques comportent toujours une mixité entre méthodes de protection dures et méthodes de protections douces, avec une prédominance pour la protection en dure (digues, murs de béton, etc.). Les options d'adaptation résultant de cet atelier de co-construction participative expriment certes les alternatives locales pour anticiper et atténuer les impacts des changements climatiques. Cependant, compte tenu de la nature amphibie du site, de l'ICV obtenue sur la période actuelle et les différents horizons futurs, ainsi que des niveaux d'inondations et du recul de la ligne du rivage dû à l'ENM, ces options sont à relativiser ; notamment la première option qui concerne la construction d'ouvrages de protection. Il sera difficile d'installer des ouvrages de défense à gabarit suffisant pour empêcher le franchissement de la flèche littorale et la submersion de l'arrière-côte, notamment des îles du Saloum. De plus la mise place d'ouvrages sur lesquels il n'y a pas de certitude de protection efficace contre l'érosion côtière et les submersions marines, peut générer des problèmes nouveaux qu'il est difficile de prévoir et de résoudre.

## 6.2 Options d'adaptation préconisées par l'étude de vulnérabilité du PAS-PNA

En se basant sur les vulnérabilités mises en évidence par cette étude, des options d'adaptation peuvent être préconisées :

*Tableau 10 : Options d'adaptation en fonction des vulnérabilités*

Options d'adaptation	Vulnérabilités
Recul (repli) stratégique ou relocalisation	Erosion/ submersion marine
Alimentation artificielle des plages en sédiment ou rechargement des plages	Erosion
Fixation (stabilisation) des dunes (couverts de débris végétaux, brise-vents, plantation de de filaos et d'espèces à racines fixatrices)	Erosion/submersion marine
Ouvrages en géotextiles	Erosion
Pieux hydrauliques	Erosion
Récifs artificiels	Erosion
Drainage de la plage	Erosion

<sup>8</sup> Cet atelier tenu du 27 au 29 novembre 2018 avait pour objectif principal de renforcer la consistance des options d'adaptation identifiées en combinant l'approche qualitative (sur base de la participatory scenario planning) et les options qui émergent des analyses de projections climatiques et socio-économiques.

By-passing	Erosion
Ajustement (rehausse des habitations)	Submersion marine
Reboisement de mangroves	Dégradation des mangroves (régression des surfaces de mangrove)
Dragage des chenaux	Ensablement des chenaux (difficultés de navigation (entrée et sortie des pirogues motorisées))
Repos biologique (périodes d'arrêt momentané de la pêche)	Baisse des ressources halieutiques
Mise en place/renforcement des systèmes d'alertes précoces	Insuffisance et carence de systèmes d'alertes précoces
Sensibilisation sur les réglementations et les bonnes pratiques (pêche, extraction sable, activités)	Pratiques inappropriées des habitants

Les options d'adaptation préconisées sont essentiellement des solutions ou techniques « douces » (souples) de protection de protection des côtes. Elles ont une approche plus environnementale, et sont donc différentes des méthodes « dures » ou « rigides ».

Ainsi en prenant en compte les caractéristiques énumérées plus haut ainsi que la sensibilité de la zone, il semble que le recul (repli) stratégique ou relocalisation est une réponse adaptée bien à l'érosion et à la submersion marine. Ce repli devrait s'opérer sur 267,69 m à l'horizon 2035 et sur 268,08 m à l'horizon 2050, conformément au recul de la ligne du rivage. Il convient cependant de se poser la question à savoir « Comment vont vivre les personnes déplacées ? » pour une relocalisation acceptée.

De plus toute une série de mesures peuvent être envisagées en complément. Parmi ces options on peut retenir l'alimentation artificielle des plages en sédiment ou rechargement des plages est aussi une bonne option à la lutte contre l'érosion côtière, car elle permet de rétablir un profil d'équilibre de la plage, la protection vis-à-vis des agents d'érosion telles que les houles de tempête (effet de « zone tampon »), le maintien d'estrans larges et donc la préservation des usages (débarquement des pirogues, activités de récréation, etc.) et des enjeux (ANCORIM, sans date). Par ailleurs, cette méthode n'a pas de conséquences néfastes pour les plages adjacentes, contrairement à d'autres méthodes, et peut les nourrir de manière indirecte par l'apport de sédiments. Le ré-ensablement autorise également le rehaussement de la pente de la plage, dans un but de prévention contre l'élévation du niveau de la mer. Son impact négatif sur le paysage reste nul.

La stabilisation des dunes par couverts de débris végétaux, brise-vents, plantation de de filaos et d'espèces à racines fixatrices pourra faire face à l'érosion et à la submersion marine (ANCORIM, sans date) :

- avec les couverts de débris végétaux, les couvertures de branchages réduisent fortement la vitesse du vent au niveau du sol, ce qui modère -ou supprime- l'érosion éolienne. Dans les zones de transit sableux, elles provoquent une accumulation, ce qui permet de combler des zones déprimées pour reconstituer des profils aérodynamiques. En outre, cet apport de matière organique favorise la

- reprise et le développement des communautés végétales. Les couvertures de branchages peuvent également avoir un effet dissuasif limitant la fréquentation et le piétinement ;
- la technique des brise-vents est bien adaptée pour combler des zones déficitaires en sédiment. Elle peut être associée à d'autres techniques, par exemple couvertures de branchages dans une zone déprimée, ou la plantation d'espèces comme, qui complète, et « naturalise » l'action des brise-vents ;
  - concernant les plantations, les végétaux utilisés permettent de fixer les sédiments à leurs racines, limitant ainsi la perte de sédiments provoquée par l'action du vent.

Les ouvrages en géotextiles, quant à eux, permettent de lutter contre l'érosion car ils sont réversibles et leur structure de dernière génération est perméable, souple, résistante aux UV et favorise l'installation de la végétation. Leur mise en place est rapide et moins onéreuse que des ouvrages lourds (en enrochements par exemple). En outre, ils perturbent peu l'écosystème littoral (ANCORIM, sans date). Le by-passing permet de rétablir la dynamique naturelle des sédiments. Il peut être facilement mis en oeuvre s'il est mécanique (par camion) et représente une solution intéressante de gestion à moyen terme (ANCORIM, sans date). Il permettrait de répondre au recul de la côte aval-dérive, juste au Sud de la brèche du Laboba. De plus, le dragage des chenaux de Dionewar et de Niodior ouvrira une meilleure navigation dans ces îles.

Les lieux d'emplacement de certaines options d'adaptation ont pu être indiqués (figure 65). Il apparaît alors qu'en fonction de l'horizon pris en compte et des scénarios développés dans I, la partie sensibilité future, l'envergure d'une option peut varier.

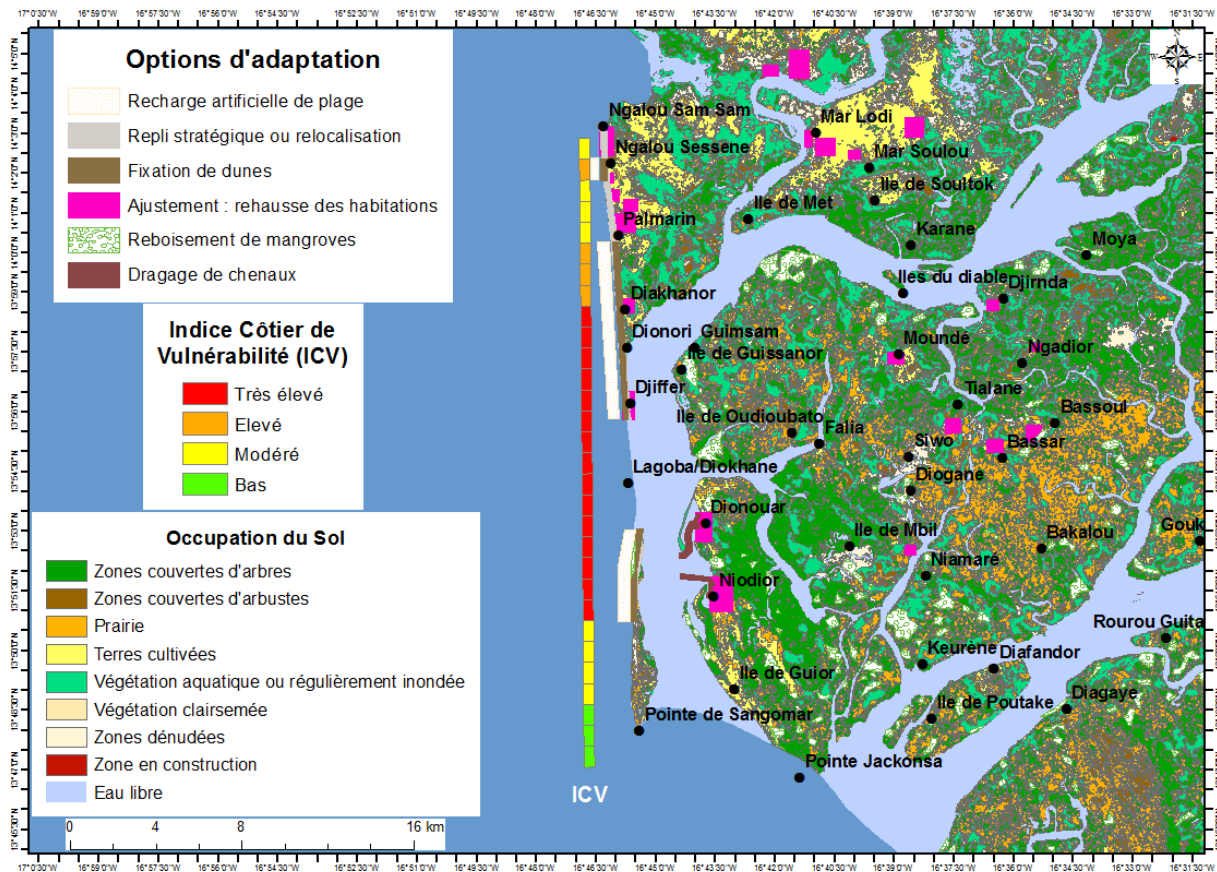
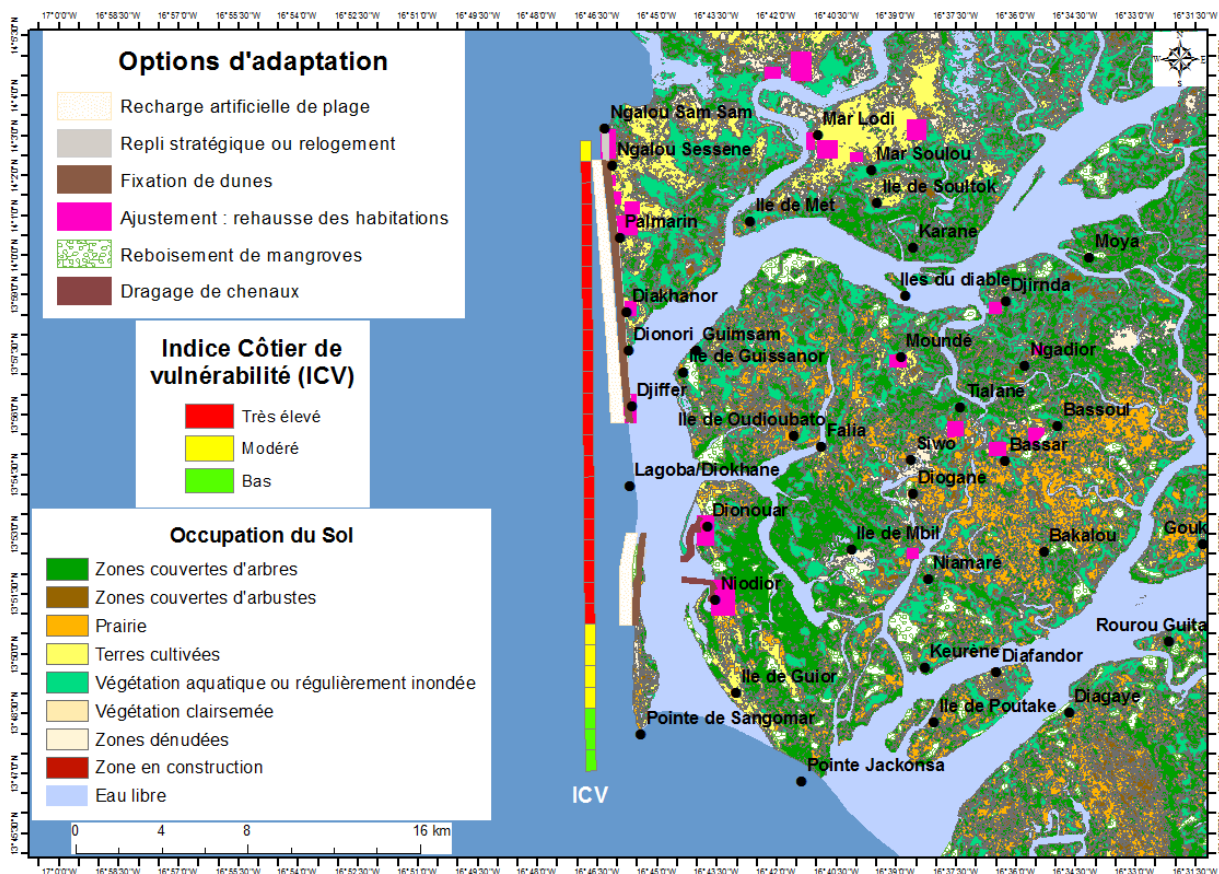


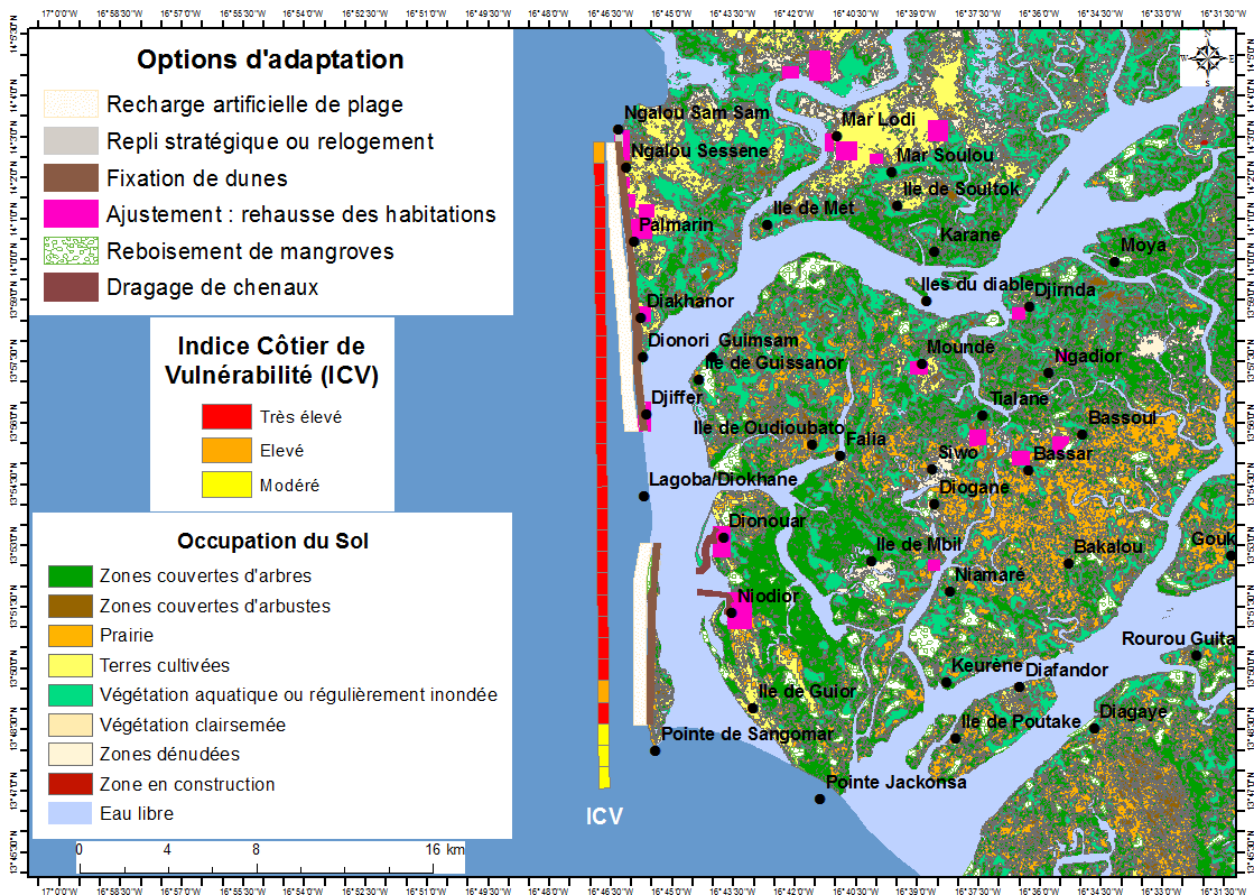
Figure 65 : Options d'adaptation à l'horizon 2035(scénarios RCP4.5 et RCP8.5 de Hs moyenne de houles + ENM de 25 cm)

A l'horizon 2050, le rechargement de plage, le repli stratégique et la stabilisation des dunes auront une plus grande envergure (figure 66).





Enfin, sur l'horizon 2050, l'étendue du rechargement de plage, du repli stratégique et de la stabilisation des dunes deviendra maximale compte tenu du scénario Hs maximale + ENM de 50 cm (figure 67).





## 7 Conclusion et recommandations

L'évaluation de la vulnérabilité actuelle montre que le littoral du Delta du Saloum est particulièrement sensible aux aléas climatiques et aux phénomènes naturels telle que l'érosion. Un événement extrême majeur est venu perturber cet écosystème en 1987 de manière permanente. La brèche, ainsi provoquée par cette tempête, s'est élargie au fil du temps et vient maintenant exposer les villages des îles aux assauts de l'océan et notamment au phénomène d'érosion. Les populations tentent avec l'aide de l'Etat de se protéger et de préserver leurs biens et activités économiques. Toutefois, ces actions seront-elles suffisantes pour faire face aux impacts futurs des changements climatiques ? En effet, l'analyse de la vulnérabilité future met en évidence qu'aux horizons 2035 et 2050, l'exposition du littoral du Delta du Saloum aux aléas climatiques sera plus forte, avec des épisodes de submersions marines qui seront très importants en termes d'amplitude notamment. Dans ce contexte, la vulnérabilité côtière va s'accroître davantage et il est nécessaire qu'une action planifiée et coordonnée d'adaptation soit mise en place tenant compte des impacts futurs.

Face aux vulnérabilités mises en évidence, des options d'adaptation sont préconisées, tout en tenant compte des alternatives locales, pour anticiper et atténuer les impacts du changement climatique. L'étude recommande de moins centrer les mesures d'adaptation sur la protection de type « dure », mais, plutôt d'opter pour des mesures diversifiées reposant sur la relocalisation des infrastructures humaines à risque, le rechargement artificiel des plages, le reboisement, etc.

Il convient néanmoins de renforcer les connaissances des chercheurs, afin d'affiner les études d'impact des changements climatiques. En effet, afin d'améliorer l'analyse des impacts futurs de l'élévation du niveau marin et produire des projections plus robustes, il est nécessaire de disposer de données bathymétriques, en réalisant par exemple un relevé LIDAR. Les changements climatiques vont aussi avoir des impacts sur : l'upwelling et donc potentiellement la ressource halieutique ; sur les houles et les vents et donc potentiellement renforcer l'érosion et dégrader les écosystèmes marins et côtiers ; sur la température des eaux océaniques et donc potentiellement la biodiversité marine et la distribution spatiale des ressources halieutiques ; sur l'acidification des océans qui devrait augmenter avec un potentiel impact sur la biodiversité et les écosystèmes côtiers en particulier les coquillages.

Pour autant les connaissances actuelles sur ces différents éléments sont encore trop insuffisantes pour pouvoir bien les prendre en compte dans les analyses de vulnérabilité et dans un deuxième temps dans la planification de l'adaptation.

## 8 Références

- Aalst, M., Van Adger, N., Arent, D., Barnett, J., Betts, R., Bilir, E., (2014). Climate Change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. *Assess. Rep.* 5, 1–76. doi: 10.1017/CBO9781107415379.
- ACMAD, (2017): The Climate in Africa (2017). Climate Change Assessment Preliminary Statement.
- Allan, J.C., Komar, P.D., and Priest, G.R., (2003). Shoreline variability on the high-energy Oregon coast and its usefulness in erosion-hazard assessments. *Journal of Coastal Research*, SI 38: 83-105.
- ANCORIM (sans date). Panorama des solutions douces de protection des côtes. *Réseau Atlantique pour la Prévention et la Gestion des Risques Littoraux*, 56 p.
- Anders, F.J. and Byrnes, M.R., (1991). Accuracy of shoreline change rates as determined from map and aerial photographs. *Shore and Beach*, vol. 59, n°1, p. 17 - 26.
- ANSD, (2013), Recensement Général de la Population de l'Habitat, de l'agriculture et de l'élevage (RGPHAE). République du Sénégal, Ministère de l'Économie, des Finances et du Plan, Dakar, rapport définitif, 413p.
- ANSD, (2014). Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Élevage (RGPHAE). République du Sénégal, Ministère de l'Économie, des Finances et du Plan, Dakar.
- ANSD, (2015), Banque de données des indicateurs sociaux du Sénégal. Rapport final, Ministère de l'Économie et des Finances, 296p.
- ANSD/SRSDF, (2013). Situation économique et sociale régionale. Rapport définitif, 116p, Dakar.
- ANSD/SRSDF, (2014). Situation économique et sociale régionale. Rapport définitif, 116p, Dakar.
- ANSD/SRSDF, (2015). Situation économique et sociale régionale. Rapport définitif, 115p, Dakar.
- Appeaning Addo, K., (2013). Assessing coastal vulnerability index to climate change: the case of Accra – Ghana. *Journal of Coastal Research*, 65, 1892-1897. Available at: 10.2112/si65-320.1.
- Artelia - Climat Energie et Stratys, (2012). Stratégie d'adaptation au changement climatique dans le Grand Ouest. *Document de synthèse REF : 1020265*. Sgar Pays De La Loire, 17 p.
- Alam, A., Tawale, N., Patel, A., Dibley, M., Jadhao, S., Raynes- Greenow, C. (2016). Household Air Pollution Intervention Implications: Findings from Qualitative Studies and a Field Trial of Clean Cookstoves in Two Rural Villages in India. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(9), 1-14
- Bagdanaviciute, I., Kelpsaite, L., Soomere, T., (2015). Multi-criteria evaluation approach to coastal vulnerability index development in micro-tidal low-lying areas. *Ocean. Coast. Manag.* 104, 124e135.
- Barusseau, J.P. Ba M., Diop S., (1993). Rythmes pluri-annuels d'évolution des lignes de rivage. Livret-guide de la Réunion internationale PICG 274, Dakar, 11-13pp.
- Barusseau, J., Bâ, D. M., & Diop, S. (1999). L'environnement physique. In: Rivières du sud Sociétés et Mangroves ouest-africaines, Cormier-Salem M.C., IRD Éditions, 33-62pp.
- Barusseau, P., Diop, S., Giresse, P., Monteillct, & Sao. (1989). Conséquences sédimentologiques de l'évolution climatique fin-Holocène dans le delta du Saloum. *Océanographie tropicale* 21 (1), 89-98pp.
- Barusseau, J. (1983). Analyse sédimentologique des fonds marins de la petite côte, (Sénégal). Rapport du programme « Environnement côtier » ISRA-CRODT, 65-83pp.
- Boruff, B.J., Emrich, C., Cutter, S.L., (2005). Erosion hazard vulnerability of US coastal counties. *J. Coast. Res.* 21, 932e942.

- Bouchet, L., (1998). *L'évolution morphodynamique de la pointe de Sangomar (Sénégal) et ses conséquences sur le milieu*. Mémoire de Maîtrise de Géographie. Université de Caen, 125 p.
- Boyce, D. G., Lewis, M. R., and Worm, B., (2010.) Global phytoplankton decline over the past century. *Nature*, 466, 591–596. doi: 10.1038/nature09268
- Bruun, P., (1962). Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterways and Harbors Division*, ASCE, New York 88, 117e130.
- Bruun, P., (1988). The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usages. *Journal of Coastal Research*, Charlottesville 4, 627e648.
- Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, (2013). Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Cowell, J.P., Thom, B.G., Jones, R.A., Everts, C.H. et Simanovic, D., (2006.) Management of uncertainty in predicting climate-change impacts on beaches. *Journal of Coastal Research*, 22(1), 232-245.
- Coyne, M.A., Fletcher, C.H. et Richmond, B.M., (1999). Mapping coastal erosion hazard areas in Hawaii: Observations and errors. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 28, p. 171 - 184.
- Deme, A., Gaye, A.T., Hourdin, F., (2015). Les projections du climat en Afrique de l'Ouest, Evidences et incertitudes. In *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* (Sultan B, Lalou R, Amadou Sanni M, Oumarou A et Soumaré M A eds.), IRD Editions, 61-87.
- De Noray-Dardenne M-L. (2010). Effets et perceptions de l'érosion côtière au Sénégal auprès de ceux qui la subissent. Cas de Rufisque, Saint-Louis-du-Sénégal, Petite Côte Nord et Palmarin, UICN.
- Dessai, S. and Hulme, M., (2004), "Does climate change adaptation policy need probabilities?", *Climate Policy*, 4, 107-128.
- Devoy, R.J., (2008). Coastal vulnerability and the implications of sea-level rise for Ireland. *J. Coast. Res.* 325e341.
- Dia, I. M. M., (2003). Elaboration et mise en oeuvre d'un plan de gestion intégrée - La Réserve de biosphère du delta du Saloum, Sénégal. UICN, Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni. xiv + 130 pp.
- Diara, M., (1999). *Formation et évolution fini-holocènes et dynamique actuelle du delta Saloum-Gambie (Sénégal-Afrique de l'Ouest) Géomorphologie, stratigraphie, sédimentologie et dynamique sédimentaire*. Thèse de Doctorat d'Océanologie - Géologie, Université de Perpignan, 153 p.
- Diaw, A.T., Diop, N. and Thomas, Y.F., (1990.) Rupture of the spit of Sangomar. Estuary of the Saalum, Senegal. *AIAA Series Progress*, Washington, pp.
- Diaw, A.T., (1997). *Evolution des milieux littoraux du Sénégal. Géomorphologie et Télédétection*. Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres, Université de Paris I / Panthéon - Sorbonne, Paris, 270 p.
- Dièye El H. B, Diaw A.T., Sané T, Ndour N. (2013). Dynamique de l'estuaire du Saloum (Sénégal) entre 1972 et 2010, *Cybergéo, European Journal of Geography, Environnement, nature, Paysage*, document 629

- Doukakis, E., (2005). Coastal vulnerability and risk parameters. *Eur. Water* 11/12, 3e7. Dube, S.K., Sinha, P.C., Roy, G.D., 1986. Numerical simulation of storm surges in Bangladesh using a bay-river coupled model. *Coast. Eng.* 10, 85e101.
- Dwars, Heederik et Verhey Ingenieurs Conseils, (1979). *Rapport sur l'étude de la protection du rivage de la Petite Côte*. Ministère Equipement, Rép.Sénégal, 92 p.,
- EGIS International, (2013). Etude économique et spatiale de la vulnérabilité et de l'adaptation des zones côtières aux changements climatiques au Sénégal. Phase 2 – Analyse spatiale de la vulnérabilité aux changements climatiques de la zone côtière du Sénégal. *GED00859R*. 290 p.
- Elouard P., Faure H., Hebrard L., (1977). Variation du niveau de la mer au cours des 15000 dernières années autour de la presqu'île du Cap-Vert (Dakar - Sénégal). *Bulletin de liaison, ASEQUA*, n° 50, p. 29 - 49.
- Emery, K. O. et Aubrey, D. G., (1991). *Sea Levels, Land Levels, and Tide Gauges*. xiv + 237 pp. Berlin, Heidelberg, New York, Paris, London, Tokyo, Hong Kong: *Springer-Verlag*. Price DM 118.00 (hard covers). ISBN 3 540 97449 0.
- European Commission DG CLIMA, (2017). *Assessing Adaptation Knowledge in Europe: Vulnerability to Climate Change, Final Report*, 86 p.
- EUROSION, (2004). Living with coastal erosion in Europe: sediment and space for sustainability. *Part III- Methodology for assessing regional indicators*, 42 p.
- Faye, G., (2016). *Impacts des modifications récentes des conditions climatiques et océanographiques dans l'estuaire du Saloum et ses régions de bordures (Sénégal)*. Thèse de Doctorat Spécialité : Géomorphologie littorale, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 589 p.
- 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 photointerprétation, traitement d'images et analyse de cartes anciennes*. Thèse de Doctorat de Géographie, Université de Bretagne Occidentale, Volume 1, 321 p.
- Fletcher, C.H., Rooney, J.J., Barbee, M., LIM, S.C. and Richmond, B., (2003). Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, Special Issue n°38, p. 106 - 124.
- Ford, M., (2011). Shoreline changes on an urban atoll in the Central Pacific Ocean: Majuro Atoll, Marshall Islands. *Journal of Coastal Research*, 28, 11–22.
- Ford, M., (2013). Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high resolution satellite images: Wotje Atoll, Marshall Islands. *Remote Sensing of Environment*, 135 130–140.
- GERAD, (2017). Schéma directeur d'aménagement et de développement du pôle territoire Sine-Saloum, Diagnostic territorial et propositions, Rapport final, 149p
- GIEC, (1991). The seven steps to the vulnerability assessment of coastal areas to sea-level rise – A common methodology, Intergovernmental panel on climate change, *response strategies working group*, Revision n° 1, 27 p.
- GIEC, (2001). Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability, *Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by J. J. McCarthy, O. F. Canziani, N. A. Leary, D. J. Dokken and K. S. White (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, USA, 2001. No. of pages: 1032. Price: £34.95, ISBN 0-521-01500-6 (paperback), ISBN 0-521-80768-9 (hardback).

- GIEC, (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. *Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. Genève, Suisse, 103 p.
- GIEC, (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.
- GIZ, (2014). A framework for climate change vulnerability assessment, 186 p.
- Gornitz, V.M., (1990). Vulnerability of the East Coast, USA to future sea level rise. *J. Coast. Res.* 9, 201e237.
- Gornitz, V.M., (1991). Global coastal hazards from future sea-level rise. *Global Planet Change* 89, 379e398.
- Gornitz, V.M., Daniels, R.C., White, T.W., and Birdwell, K.R., (1994). The development of a coastal risk assessment database: Vulnerability to sea-level rise in the U.S. southeast. *Journal of Coastal Research*, Special Issue No. 12, p. 327-338.
- Gouretski, V., Kennedy, J., Boyer, T., and Khl, A., (2012). Consistent near-surface ocean warming since 1900 in two largely independent observing networks. *Geophys. Res. Lett.* 39:L19606. doi: 10.1029/2012GL052975.
- Gouriou, T., (2012). *Evolution des composantes du niveau marin à partir d'observations de marégraphes effectuées depuis la fin du 18ème siècle en Charente-Maritime*. Thèse de doctorat, Université de La Rochelle, 580p.
- Gueye, K., (1997). *Conception d'un ouvrage de protection contre les inondations à Rufisque*. Thèse Docteur Ingénieurs, Dakar, 166 p.
- Guichard, F., Kergoat, L., Hourdin, F., Léauthaud, C., Barbier, J., Mougin E. et Diarra, B., (2015). Le réchauffement climatique observé depuis 1950 au Sahel. In *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest* (Sultan B, Lalou R, Amadou Sanni M, Oumarou A et Soumaré M A eds.), IRD Editions, 23-42.
- Hammar-Klose E.S., Pendleton, E.A., Thieler, E.R, Williams, S.J., (2003), Coastal Vulnerability Assessment of Cape Cod National Seashore (CACO) to Sea-Level Rise, *U.S. Geological Survey, Open file Report*, 02-233.
- Hammar-Klose, E.S. et Thieler, E.R., (2001). Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: A Preliminary Database for the U.S. Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico Coasts. *U.S. Geological Series, Digital Data Series*, DDS-68, 1 CD.r.
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M. et Lo, K., (2010). Global surface temperature change. *Rev. Geophys.* 48:RG4004. doi: 10.1029/2010RG000345
- Hegde, A.V., Reju, V.R., (2007). Development of coastal vulnerability index for Mangalore coast, India. *J. Coast. Res.* 23, 1106e1111.
- Hinkel, J. et Klein, R.J.T., (2009). Integrating knowledge to assess coastal vulnerability to sea-level rise: The development of the DIVA tool. *Global Environmental Change*, 19 384–395
- Hoozemans, F.M.J., Marchand, M., Pennekamp, H.A., (1993). Sea level rise. A global vulnerability assessment. *delft Hydraulics*, Delft/Rijkswaterstaat, The Hague, 184 pp.
- Hutchinson, M. F., 1988. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. *Essai présenté à la conférence Third International Symposium on Spatial Data Handling* de Sydney, en Australie.



- Hutchinson, M. F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106: 211–232.
- Hutchinson, M. F., (1996). A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. *Proceedings, Third International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis.
- Hutchinson, M. F. et Dowling, T. I., (1991). A continental hydrological assessment of a new grid-based digital elevation model of Australia. *Hydrological Processes* 5: 45–58.
- Hutchinson, M.F. et Gallant, J.C., (2000). Digital elevation models and representation of terrain shape. In: Wilson J.P. et Gallant J.C. (eds) *Terrain Analysis*. Wiley, New York, pp. 29-50.
- Hutchinson, M.F., Xu, T. et Stein, J.A., (2011). Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. *Geomorphometry*. In: HengeL, T., Evans, I.S., Wilson, J.P. and Gould, M., Redlands, California, USA. pp. 19-22.
- Islam, M.A., Md., Mitra, D., Dewan, A., Akhter, S., (2016). Coastal multi-hazard vulnerability assessment along the ganges deltaic coast of BangladesheA geospatial approach. *Ocean & Coastal Management*, 127.
- Jevrejevaa, S., Jacksona, L.P., Rivac, R.E.M., Grinstede, A., and Mooref, J.C., (2016). Coastal sea level rise with warming above 2 °C. 13342–13347 *PNAS*, vol. 113, no. 47.
- Khouakhi, A. Snoussi, M., Niazi, S. et Raji, O., (2012). Le Système d'Information Géographique (SIG) : un outil pour l'évaluation des terres à risque d'inondation côtière liée aux changements climatiques. Cas du littoral de Mohammedia. Travaux de l'Institut Scientifique Rabat. Géologie et Géographie physique. 1-8.
- Klein, R.J.T., Nicholls, R.J., (1999). Assessment of coastal vulnerability to climate change. *Ambio* 28, 182e187.
- Kumar, A.A., Kunte, P.D., (2012). Coastal vulnerability assessment for Chennai, east coast of India using geospatial techniques. *Nat. Hazards*, 64, 853e872.
- Kunte, P.D., Jauhari, N., Mehrotra, U., Kotha, M., Hursthouse, A.S., Gagnon, A.S., (2014). Multi-hazards coastal vulnerability assessment of Goa, India using geospatial techniques. *Ocean. Coast. Manag.* 95, 264e281.
- Lacoste-Bédard, É., Kane A., et Weissenberger S., (2016). Le Delta du Saloum au Sénégal, dans: *Adaptation aux changements climatiques en zone côtière*, Chouinard et Weissenberger (dir.) Université de Moncton, [En ligne] URL: [http://www8.umoncton.ca/umcm-climat/grain/4\\_7\\_2\\_le\\_delta\\_du\\_saloum\\_au\\_senegal](http://www8.umoncton.ca/umcm-climat/grain/4_7_2_le_delta_du_saloum_au_senegal), consulté le 30 novembre 2016.
- Le Fur, A., (1950). Mission hydrographique de la côte ouest africaine - Levés de l'entrée du Saloum», *Ann. Hydr.*, Paris, 5A, Tome 2, pp. 124-139.
- Mahapatra, M., Ramakrishnan, R., Rajawat, A.S., (2015). Coastal vulnerability assessment using analytical hierarchical process for South Gujarat coast, India. *Nat. Hazards*, 76, 139e159.
- Mage, E., (1963). Les rivières du Sine et Saloum. *Revue Maritime et Coloniale*, T. 7, Paris, pp. 673-679.
- Mastrandrea, M.D., Heller, N., Root, T. & Schneider, S.H., 2010. 'Bridging the gap: linking climate-impacts research with adaptation planning and man- agement', *Climatic Change*, Issue 100, pp. 87–101.
- McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J., White K.S., (2001) *Climate change 2001 : Impacts, adaptation and vulnerability*, Cambridge University Press, 913p
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE), (2012). *Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte. Vers la relocalisation des activités et des biens*,

[http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/12004\\_Strategie-gestion-trait-de-cote-2012\\_DEF\\_18-06-12\\_light.pdf](http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/12004_Strategie-gestion-trait-de-cote-2012_DEF_18-06-12_light.pdf).

Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, (2016), « Contributions Déterminées au niveau National (CDN) Document de synthèse sur la zone côtière du Sénégal dans son volet Adaptation, République du Sénégal

Minot A., (1934). Série de rapports avec plusieurs levés et planches cartographiques, Rapport Minot, *Multipagination*.

MoPE, (2017). Vulnerability and Risk Assessment Framework and Indicators for National Adaptation Plan (NAP) Formulation Process in Nepal. Ministry of Population and Environment (MoPE), Kathmandu.

Morice, C.P., Kennedy, J.J., Rayner, N.A. et Jones, P.D., (2012). Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set. *J.NGeophys. Res.*, 117, D08101,doi:10.1029/2011JD017187;  
<http://doi.wiley.com/10.1029/2011JD017187>

Morton, R.A., Miller, T.L. et Moore L.J., (2004). National assessment of shoreline change: Part 1. Historical shoreline changes and associated land loss along the U.S. Gulf of Mexico. *U.S. Geological Survey, Open-file report 2004-1043*, 42 p.

Murali, R.M., Ankita, M., Amrita, S., Vethamony, P., (2013). Coastal vulnerability assessment of Puducherry coast, India, using the analytical hierarchical process. *Natural Hazards. Earth System Science* 13, 3291e3311.

Nageswara Rao, K., Subraelu, P., Venkateswara, Rao T., Hema Malini, B., Ratheesh, R., Bhattacharya, S., Rajawat, A.S., Ajai, (2008). Sea level rise and coastal vulnerability: an assessment of Andhra Pradesh coast, India through remote sensing and GIS. *Journal of Coastal Conservation* 12, 195e207.

Nardari, B., (1993). Analyse de la houle sur les côtes du Sénégal. Application à la pointe de Sangomar. *Rapport de Stage UTIS, IRSA/ ORSTOM, Dakar*, 31 p.

Niang, I., Dansokho, M., Diaw, A.T., Diouf, P.S., Faye, S., Gueye, K., Guissé, A., Ly, I., Matty, F., Ndiaye, P., Sène, A., (2005). Etude de la vulnérabilité des côtes sénégalaises aux changements climatiques. Programme d'Assistance de Pays Bas, *Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature*, 133 p.

Niang, I., Dansokho, M., Faye, S., Gueye, K., Ndiaye P., (2010). Impacts of climate change on the Senegalese coastal zones: exemple of Cap Vert peninsula and Saloum estuary, *Global and Planetary Change*, Elsevier, pp 295-301

Niang, I., (2012). Coastal erosion and the adaptation to climate change in coastal West Africa. *Adaptation and Mitigation Strategies*, 249-250.

Nicholls R, Hoozemans F, Marchand M (1999) Increasing flood risk and wetland losses due to sea-level rise: regional and global analyses. *Global Environ. Change*, 9: S69-S87.

Nicholson-Cole, S., O'Riordan, T., (2009). Adaptive governance for a changing coastline: science, policy and public in search of a sustainable future, in Adger, N.W., Lorenzoni, I., O'Brien, K.L. (Eds), *Adapting to climate change. Thresholds, values, governance*, Cambridge, Cambridge University Press.

Nieves, V., Willis, J. K., and Patzert, W. C., (2015). Recent hiatus caused by decadal shift in Indo-Pacific heating. *Science* 349, 532–535. doi: 10.1126/science.aaa4521

Noble M., Faye A., Camara I., Seck A., Sadio M., Bah A., (2018). Etat des lieux des connaissances scientifiques sur les changements climatiques pour les secteurs des ressources en eau, de l'agriculture et de la zone côtière. Report produced under the PAS-PNA project. Climate Analytics GmbH, Berlin. 80 pages.

- Pendleton, E.A., Barras, J.A., Williams, S.J., and Twichell, D.C., (2010), Coastal Vulnerability Assessment of the Northern Gulf of Mexico to Sea-Level Rise and Coastal Change: *U.S. Geological Survey Open-File Report*, 2010-1146.
- Pouvreau, N., (2008). *Trois cents ans de mesures marégraphiques en France : outils, méthodes et tendances des composantes du niveau de la mer au port de Brest*. Thèse de doctorat. Université de La Rochelle, 474p.
- Rocle, N., (2015). Gouverner l'adaptation au changement climatique sur (et par) les territoires. L'exemple des littoraux aquitain et martiniquais, *Natures, Sciences, Sociétés*, 23, 3. 244-255. DOI 10.1051/nss/2015046
- Sadio, M., (2017). *Morphodynamique et aménagement des flèches littorales de la côte du Sénégal*. Thèse de Doctorat de Géographie Physique, Spécialité : Géomorphologie. Université Cheikh Anta Diop de Dakar et Aix - Marseille Université, 403 p.
- Schröter, D., Cramer, W., Leemans, R., Prentice, I. C., Araújo, M. B., Arnell, N. W., Bondeau, A., Bugmann, H., Carter, T. R., Gracia, C. A., De La Vega-Leinert, A. C., Erhard, M., Ewert, F., Glendining, M., House, J. I., Kankaanpää, S., Klein, R.J.T., Lavorel, S., Lindner, M., Metzger, M. J., Meyer, J., Mitchell, T.D., Reginster, I., Rounsevell, M., Sabaté, S., Sitch, S., Smith, B., Smith, J., Smith, P., Sykes, M. T., Thonicke, K., Thuiller, W., Tuck, G., Zaehle, S., Zierl, B., (2005). 'Ecosystem Service Supply and Vulnerability to Global Change in Europe', *Science*, 310(5752), pp. 1333–1337.
- Shaw, J., Taylor, R.B., Forbes, D.L., Ruz, M.-H., and Solomon, S., (1998). Sensitivity of the Canadian Coast to Sea-Level Rise, *Geological Survey of Canada Bulletin 505*, 114 p.
- SOGREAH Ingenieurs Conseils, (1981). Etude de la houle et du vent sur le site de Bargny (République du Sénégal). *MIFERSO*, Dakar, Rpt R.35 1160b, 34 p.
- Szlafsztein, C., Sterr, H., (2007). A GIS-based vulnerability assessment of coastal natural hazards, state of Par\_a, Brazil. *J. Coast Conserv.* 11, 53e66.
- The Potsdam Institute for Climate Impact Research and Climate Analytics, (2013). Turn Down the Heat: Climate Extremes, Regional Impacts, and the Case for Resilience. *Report for The World Bank*, 24 p.
- Thieler, E.R., (2000). National Assessment of Coastal Vulnerability to Future Sea-level Rise. *USGS Fact Sheet 076e00*, USA.
- Thieler, E.R., Hammer-Klose, E.S., (1999). National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-level Rise: Preliminary Results for the U.S. Atlantic Coast. *United States Geological Survey (USGS)*, Woods Hole, Massachusetts.
- Tromeur, J.Y., (1939). Mission hydrographique du Saloum. *Ann. Hydr.*, Paris, 3e série, Tome. XVI, pp. 5-33.
- Vézia, F., (2009). Sénégal : Sine-Saloum, la forêt de l'océan, *Editions de La Martinière*, Paris, p. 21 (ISBN 978-2732439655).
- Wong, p.p., Losada, i.j., Gattuso, j.-p., Hinkel, j., Khattabi, a., McInnes, k.l., Saito, y., Sallenger, A., (2014). Impacts, Adaptation and Vulnerability. *Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, pp. 361e409.
- Wöppelmann, G., (1997). *Rattachement géodésique des marégraphes dans un système de référence mondial par techniques de géodésie spatiale*. Thèse de doctorat. Observatoire de Paris, 263p.
- WWF and BMZ (2013). Etude de la vulnérabilité écologique et socio-économique de la mangrove, au Delta du Saloum et en Casamance, Rapport final, 65p
- Yates-Michelin, M. et Bulteau, T., (2011). CECILE : D1.1 : l'évolution pluri-décennale du trait de côte : synthèse bibliographique. *Rapport BRGM RP/50061-FR*, 104 p.

Yates Michelin, M., Le Cozannet, G., Krien, Y. et Lenôtre, N., (2011). Amélioration de la méthode RNACC : caractérisation des incertitudes relatives à la quantification des impacts de l'élévation du niveau marin. *Rapport final BRGM/RP 59405-FR*, 142 p.

Yin, J., Yin, Z., Wang, J., Xu, S., (2012). National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise for the Chinese coast. *J. Coast. Conserv.* 16, 123e133.

Zhang, K., Douglas, B., Leatherman, S., (2004). Global warming and coastal erosion. *Climatic Change*, 64, 41–58.

## 9 Annexes

<b>COMPOSITION Consortium Zones Côtières – Projet PAS-PNA</b>				
		<b>Structures</b>	<b>Personnes ressources</b>	<b>Domaines de compétences</b>
<b>Structures communes à tous les consortia</b>	1	<b>LPAO</b>	Saïdou Moustapha SALL	Modélisation climatique et impacts biophysiques / Génération des scénarios de changements climatiques
	2	<b>ANACIM</b>	Dr Ousmane Ndiaye Dr Youssouph Sané	Génération des scénarios de changements climatiques
	3	<b>EDEQUE</b>	Serigne Faye	Hydrogéologie, géologie, hydrologie, pertes de sols, LC/LU, Erosion, vulnérabilité du milieu physique
	4	<b>LARTES</b>	Abdou Salam Fall	Sciences sociales (qualitatif et quantitatif)
	5	<b>DEEC/DCC</b>	Madeleine Diouf Sarr	
	6	<b>DEEC/DGL</b>	Luc Malou	
<b>Structures spécifiques</b>	7	<b>Univ de Thiès (SET)</b>	Issa Sakho	Hydro-sédimentologie... Géologie et géomorphologie du
	8	<b>UCAD Département de géographie + IRD-labo LINUS</b>	Alioune Kane	Hydrologie, géographie du littoral, vulnérabilité côtière, socio-histoire des vulnérabilités côtières
	9	<b>UCAD Département de géologie</b>	Bachir Diouf Boubacar Fall	littoral érosion côtière Géologie et géomorphologie du littoral + vulnérabilité et adaptation aux CC
	10	<b>IRD (LMI Eclairs)</b>	Eric Machu	Océanographie, relation écosystèmes marins/environnement physico-chimique
	11	<b>CSE-MOLOA</b>	Moussa Sall	Suivi de l'évolution du trait de côte et des enjeux côtiers (dynamique de l'occupation du sol) : aménagements, infrastructures côtières, extension urbaine
	12	<b>IRD</b>	Patrice Brehmer	Océanographie biologique et Environnement marin
	13	<b>Univ Ziguinchor (UFR Science)</b>	Bamol SOW	Océanographie, hydrologie et climatologie régionale
	14	<b>UGB Géographie</b>	Boubou SY El hadje SOW	Géomorphologie, dynamique côtière, étude d'impacts Sociale et environnementale (EISE)
	15	<b>ISE</b>	Henry Mathieu Lo	





**Climate Analytics gGmbH**

Ritterstr. 3  
10969 Berlin  
Germany

T / +49 302 5922 9520  
E / [contact@climateanalytics.org](mailto:contact@climateanalytics.org)

**Climate Analytics Inc. New York**

115 E 23rd St, 3rd Floor, Office #319  
New York, NY, 10010  
USA

T / + 1 718 618 5847  
E / [info.ny@climateanalytics.org](mailto:info.ny@climateanalytics.org)

**Climate Analytics Lomé**

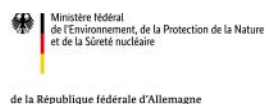
61, ru 195 Quartier Agbalépédogan  
s/c BP 81 555 Lomé  
Togo

T / +228 22 25 65 38 / 22 25 74 74  
E / [togooffice@climateanalytics.org](mailto:togooffice@climateanalytics.org)

Mis en oeuvre par :



Mandaté par :



Sous la tutelle de :



En coopération avec :

