

PAS-PNA

SENEGAL

**Evaluation de la vulnérabilité du secteur ressources  
en eau à la variabilité et aux changements  
climatiques dans la région de Fatick**

Secteur : Ressources en Eau

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  
Léopold Sédar Senghor  
Ministère de l'Environnement et du  
Développement Durable  
(MEDD)



En coopération avec :

**CLIMATE  
ANALYTICS**

## AUTEURS

Alousseynou Bah

Ibrahima Camara

Méline Noblet

Avec la contribution des membres du consortium de recherche du secteur des ressources en eau.  
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 :

BAH A., CAMARA I., NOBLET M., 2019. Evaluation de la vulnérabilité du secteur ressources en eau 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 menacées. 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 les ressources en eau pour la région de Fatick et d'identifier les options d'adaptations adéquates aux horizons 2035 et 2050.

L'approche méthodologique pour cette étude de vulnérabilité du secteur des ressources en eau, consiste à évaluer la vulnérabilité physique des ressources en eau, évaluer la vulnérabilité des populations en relation avec les principaux facteurs socioéconomiques et enfin combiner les principales informations physiques et humaines. Deux étapes ont été suivies. La première consistait à la collecte d'informations pour mettre en évidence les facteurs environnementaux, socio-économiques et institutionnels susceptibles de caractériser l'état de sensibilité et de résilience de la population face à la variabilité et aux changements climatiques. La seconde était axée sur le traitement des informations essentielles pour la vulnérabilité, basé sur le croisement à l'aide de techniques d'analyse statistique pour la définition des indicateurs. La vulnérabilité des ressources en eau a été mise en évidence par département, par arrondissement et par commune, en utilisant des méthodes de corrélation et des systèmes d'information géographique.

Les résultats montrent que les vecteurs majeurs de changement dans la région sont la pluviométrie et la salinisation des eaux et des sols. La période de sécheresse (1968-1998) est marquée par une baisse des écoulements de l'ordre de 37% et une baisse des réserves renouvelables de l'ordre de 23 Mm<sup>3</sup>/an. Cependant depuis 2000, une lente reconstitution des écoulements de l'ordre de +8% par rapport à la période de sécheresse et une remontée du niveau de la nappe du Continental Terminal (CT) de plus de 10 m, corrélées avec le retour des précipitations sont notées dans la région. La qualité des ressources en eau est fortement affectée par le processus de salinisation que connaît la région depuis le début des années 1970. Le taux de couverture des besoins en eau est moyen de l'ordre de 41% et les capacités d'adaptation basées sur le transfert, la recherche d'eau douce à l'aide de charretiers et achat d'eau filtrée et/ou minéralisée sont des moyens à améliorer. L'évaluation de la sensibilité des ressources en eau montre que le département de Fatick est plus vulnérable que le département de Foundiougne vis-à-vis de la variabilité climatique.

Les résultats sur les impacts des changements climatiques futurs montrent pour les eaux de surface, une baisse des apports continentaux de l'ordre de 9% à l'horizon 2035 qui va s'accroître à l'horizon 2050 de l'ordre de -14% selon les prévisions du scénario RCP4.5 et une augmentation de la salinité sous l'effet combiné de l'évaporation +1.4 °C, du déficit d'écoulement -14% ainsi que la remontée marine de 50 cm/an, de l'expansion du fleuve Saloum et de l'augmentation des surfaces salées à l'horizon 2050.

Pour les eaux souterraines, les résultats montrent une baisse des réserves renouvelables de l'ordre de 136 Mm<sup>3</sup>/an à l'horizon 2035 qui va s'accroître à l'horizon 2050 de 156 Mm<sup>3</sup>/an selon les prévisions

du scénario RCP4.5 et une baisse plus importante de l'ordre de 179 Mm<sup>3</sup>/an à l'horizon 2050 selon les prévisions du scénario RCP8.5 par rapport à la période 1976-2005. De façon antagoniste, la demande en eau va connaître une hausse de plus de 15 Mm<sup>3</sup>/an à l'horizon 2035 sur tous les secteurs qui va augmenter à plus de 40 Mm<sup>3</sup>/an à l'horizon 2050 par rapport à l'année 2017. La baisse des réserves renouvelables et la tendance à la surexploitation pour satisfaire la demande en eau peuvent contribuer à une dégradation irréversible de la qualité de la ressource par appel d'eau salée marine et fluviale à l'horizon 2050. Les options d'adaptation envisagées basées sur le transfert vont réduire la vulnérabilité des populations de l'ordre de 45% à l'horizon 2035.

Cette première étude de vulnérabilité climatique des ressources en eau réalisée dans un contexte local a permis de développer un guide qui sert de schéma directeur pour les prochaines études. Malgré les difficultés dues au manque de couverture spatiale et temporelle des données, elle a permis de mettre en exergue les impacts de la variabilité et des changements climatiques sur les ressources en eau et la faiblesse des capacités d'adaptation des populations dans cette région du Sénégal.

**Mots clés :** Delta du Saloum/région de Fatick, variabilité climatique, changements climatiques, réserves renouvelables, demande en eau, dégradation de la qualité, capacités d'adaptation et options d'adaptation

## Table des matières

Résumé .....	1
Liste des Figures.....	5
Liste des Tableaux.....	8
Liste des acronymes .....	10
<b>1 Contexte.....</b>	<b>11</b>
<b>2 Périmètre de l'étude de vulnérabilité .....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Zone d'étude : le Delta du Saloum/région de Fatick .....</b>	<b>14</b>
2.1.1 Position géographique .....	14
2.1.2 Climat .....	14
2.1.3 Situation sociodémographique .....	14
2.1.4 Situation socio-économique .....	17
<b>2.2 Zones d'étude spécifique.....</b>	<b>18</b>
<b>3 Approche générale d'évaluation de la vulnérabilité .....</b>	<b>20</b>
<b>4 Étude de la vulnérabilité actuelle pour le secteur des ressources en eau.....</b>	<b>22</b>
<b>4.1 Approche méthodologique.....</b>	<b>22</b>
4.1.1 Acquisition des données .....	23
4.1.2 Collecte des données à la DGPRES, au Laboratoire d'hydrologie et d'hydrochimie de l'UCAD.....	26
4.1.3 Approche méthodologique de traitement des données .....	27
<b>4.2 Résultats .....</b>	<b>32</b>
4.2.1 Profil socio-écologique de la zone d'étude .....	32
4.2.2 Exposition .....	35
4.2.3 Sensibilité .....	41
4.2.4 Capacité d'adaptation .....	75
4.2.5 Synthèse de l'évaluation de la vulnérabilité actuelle .....	76
<b>5 Évaluation de la vulnérabilité future .....</b>	<b>79</b>
<b>5.1 Approche méthodologique.....</b>	<b>79</b>
5.1.1 Acquisition des données .....	79
5.1.2 Traitement des indicateurs .....	80
5.1.3 Traitement capacité adaptation .....	88
5.1.4 Limites de la méthodologie.....	88
<b>5.2 Résultats .....</b>	<b>88</b>
5.2.1 Exposition.....	88
5.2.2 Sensibilité .....	91
5.2.3 Capacité d'adaptation .....	102
5.2.4 Synthèse de l'évaluation de la vulnérabilité future .....	109
<b>6 Synthèse des vulnérabilités actuelles et futures.....</b>	<b>111</b>
<b>7 Identification des options d'adaptation .....</b>	<b>113</b>
<b>7.1 Options d'adaptation identifiées lors de l'atelier participatif de Fatick .....</b>	<b>113</b>
<b>7.2 Options préconisées par l'étude de vulnérabilité du PAS-PNA .....</b>	<b>114</b>

7.2.1	Options d'adaptation au niveau institutionnel .....	114
7.2.2	Options d'adaptation au niveau individuel/communautaire .....	114
<b>8</b>	<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>116</b>
<b>9</b>	<b>Références.....</b>	<b>117</b>
<b>10</b>	<b>Annexe .....</b>	<b>120</b>

## Liste des Figures

<b>Figure 1:</b> Localisation de la région de Fatick (source : gouvernement du Sénégal).....	14
<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).....	15
<b>Figure 3 :</b> Évolution 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).....	16
<b>Figure 4 :</b> Principales activités dans la région de Fatick. Source : PAS-PNA à partir des données de SES Fatick 2014.....	17
<b>Figure 5 :</b> Évolution 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.....	18
<b>Figure 6:</b> Localisation des sites d'étude à l'intérieur de la région de Fatick (source : A. Seck, UCAD)	19
<b>Figure 7:</b> Approche combinée locale et globale pour gérer les impacts des changements climatiques (adapté de Dessai and Hulme (2004)) .....	20
<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) .....	21
<b>Figure 9:</b> Chaîne d'impacts selon l'AR4 du GIEC (Climate Analytics) .....	22
<b>Figure 10:</b> Schéma conceptuel pour la caractérisation de la vulnérabilité climatique actuelle du secteur des ressources en eau (Fussel & Klein, 2002, modifié) .....	23
<b>Figure 11:</b> Stations pluviométriques et zones d'influence .....	28
<b>Figure 12:</b> Carte des points d'eau visités en mai 2018.....	30
<b>Figure 13:</b> Carte de l'occupation du sol ( <a href="http://2016africallandcover20m.esrin.esa.int/download">http://2016africallandcover20m.esrin.esa.int/download</a> ) ..	33
<b>Figure 14:</b> Superficie des terres salées dans la zone du projet ( <a href="ftp://ftp.soilgrids.org/data/recent/">ftp://ftp.soilgrids.org/data/recent/</a> )	34
<b>Figure 15:</b> Lithologie de l'aquifère du Continental Terminal (Dieng, 2017).....	35
<b>Figure 16:</b> Variations interannuelles de la pluviométrie aux stations de Fatick (zone nord), Foundiougne (zone centre), Sokone (zone sud) et Toubacouta (zone sud) entre 1950 et 2017 (Source : ANACIM) .....	36
<b>Figure 17:</b> Pluviométrie moyenne annuelle pendant la période 1961-1990 dans la zone (Source: ANACIM) .....	37
<b>Figure 18:</b> Précipitations moyennes mensuelles totales (JJASO) sur la période 1970-1999 (source: ANACIM) .....	38
<b>Figure 19:</b> Indices de pluies standardisées Fatick, Foundiougne, Sokone et Toubacouta (source : ANACIM) .....	40
<b>Figure 20:</b> Délimitation des bassins versants et du réseau hydrographique .....	43
<b>Figure 21:</b> Cumul annuel des précipitations dans les bassins versants.....	44
<b>Figure 22:</b> Volumes d'eau précipités suivant les bassins versants pour la période 1950-2016.....	45
<b>Figure 23:</b> Volumes d'eau écoulés (m3) dans les bassins versants de 1950 à 2016 .....	46
<b>Figure 24:</b> Inondation dans le fleuve Saloum en septembre 2005 ( <a href="http://sertit.u-strasbg.fr/">http://sertit.u-strasbg.fr/</a> ) .....	48
<b>Figure 25:</b> Profondeur de l'eau par rapport au sol mesurée en mai 2018.....	53
<b>Figure 26:</b> Piézométrie de la nappe du CT mesurée en Mai 2018 .....	54
<b>Figure 27:</b> Piézométrie de la nappe du CT en avril 2000 (Faye et al., 2003) .....	55
<b>Figure 28:</b> Coupe N-S montrant la variation de l'épaisseur utile de la nappe du CT .....	56

<b>Figure 29:</b> Coupe SW-NE montrant la salinité des eaux de la nappe du CT à Fatick.....	57
<b>Figure 30:</b> Spatialisation des faciès chimiques dans la zone du projet .....	58
<b>Figure 31:</b> Teneurs en nitrates dans la nappe du CT en avril 2017 .....	59
<b>Figure 32:</b> Salinité du fleuve Saloum à Kaolack (Dieng, 2017) modifiée de (1927-2016) .....	60
<b>Figure 33:</b> Gradient de salinité (g/l) le long des estuaires du Sine Saloum (□) et de la Gambie (o) (Dieng, 2017) .....	61
<b>Figure 34:</b> Salinité des eaux souterraines de la nappe du CT en Mai 2018.....	62
<b>Figure 35:</b> Salinité des eaux de la nappe du CT à Niakhar (Descroix, et al., 2017) .....	62
<b>Figure 36:</b> Taux de salinité des ressources en eau dans le Saloum (Bouaita, et al., 2017) .....	63
<b>Figure 37:</b> Conductivité électrique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de la nappe du CT en avril 2000 (Faye S. , 2005) .....	63
<b>Figure 38:</b> Évolution des teneurs en chlorures en fonction de la profondeur (Dieng, 2017) .....	64
<b>Figure 39:</b> Faciès des eaux de la nappe du CT dans le diagramme de Wilcox en avril 2017.....	65
<b>Figure 40:</b> Typologie des eaux du CT et salinité des terres dans la zone .....	66
<b>Figure 41:</b> Echelle réhabilitée de Néma Nding et échelle de Néma Ba (élément 0-1m et 1-2 m) (DGPPE, 2014) .....	67
<b>Figure 42:</b> Stations hydrométriques de Nema Ba et Nema Nding (Photo, 16/05/18).....	67
<b>Figure 43:</b> Évolution des forages dans la zone (Source : DGPPE).....	68
<b>Figure 44:</b> État des forages et piézomètres dans la zone en 2018 (Source DGPPE) .....	69
<b>Figure 45:</b> Volumes de pompages journaliers de la nappe du CT dans le Saloum pour la période 1970-2012 (Dieng, 2017).....	72
<b>Figure 46:</b> Distribution des surfaces irrigables dans la zone ( <a href="ftp://ftp.soilgrids.org/data/recent/">ftp://ftp.soilgrids.org/data/recent/</a> ) ....	83
<b>Figure 47:</b> Carte d'occupation du sol croisée à l'ICV à l'horizon 2050 (Sadio et al, 2018) .....	85
<b>Figure 48:</b> Distribution des terres salées dans la zone du projet ( <a href="ftp://ftp.soilgrids.org/data/recent/">ftp://ftp.soilgrids.org/data/recent/</a> ) .....	87
<b>Figure 49 :</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 .....	89
<b>Figure 50:</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. ....	90
<b>Figure 51:</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. ....	91
<b>Figure 52:</b> Évolution temporelle des précipitations et de l'ETP à Fatick pour le scénario RCP4.5 .....	91
<b>Figure 53:</b> Évolution temporelle des précipitations et de l'ETP à Toubacouta pour le scénario RCP4.5 .....	92
<b>Figure 54:</b> Contexte actuel des ressources en eau dans la région .....	94
<b>Figure 55:</b> Évolution des précipitations, de l'ETP et des besoins en eau à l'horizon 2050 .....	99
<b>Figure 56:</b> Salinité de la nappe du CT à l'état actuel (Mai 2018) et à l'horizon 2050 .....	101
<b>Figure 57:</b> Distribution des valeurs de Conductivité électrique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) mesurées en Juin 2016 (DGPPE, 2016) .....	104
<b>Figure 58:</b> Localisation des trois champs captant à tester et les volumes d'eau simulés (DGPPE, 2016) .....	105

**Figure 59:** Proposition d'implantation d'ouvrages de suivi de la nappe à proximité des nouveaux champs captant (DGPRE, 2016) ..... 108

## Liste des Tableaux

<b>Tableau 1</b> : Évolution du nombre de structures sanitaires dans la région de Fatick .....	16
<b>Tableau 2</b> : Localisation des stations météorologiques et pourcentage de données manquantes (Source : ANACIM) .....	24
<b>Tableau 3</b> : Paramètres climatiques des sorties de CMIP5 pour la période 1950-2005 (Données corrigées et désagrégées à 50km) .....	25
<b>Tableau 4</b> : Données d'entrées et de sorties des macros utilisées .....	25
<b>Tableau 5</b> : Hypothèses considérées pour la macro ESPERE.....	26
<b>Tableau 6</b> : Tableau récapitulatif des données collectées .....	27
<b>Tableau 7</b> : Consommation d'eau moyenne journalière des différents types animaux.....	31
<b>Tableau 8</b> : Température (en °C) moyenne mensuelle maximale (Tmax), minimale (Tmin) et moyenne (Tmoy) à Fatick sur la période 1991-2017 (Source : ANACIM) .....	38
<b>Tableau 9</b> : Caractéristiques morphométriques des bassins versants.....	42
<b>Tableau 10</b> : Statistique descriptive du volume d'eau précipité dans les bassins versants ( $10^9 \text{ m}^3$ ) ...	44
<b>Tableau 11</b> : Statistique descriptive des volumes d'eau écoulés dans les bassins versants ( $\text{m}^3$ ) 1950-2016 .....	46
<b>Tableau 12</b> : Modules fréquentiels, volumes des apports et coefficient d'irrégularité à Médina Djikoye (Mendy, 2010).....	47
<b>Tableau 13</b> : Modules fréquentiels et volumes écoulés à Néma Ba (Mendy, 2010) .....	47
<b>Tableau 14</b> : Moyenne annuelle des paramètres climatiques sur la période 1976-2005 par rapport à la période de référence 1961-1990 à Fatick.....	49
<b>Tableau 15</b> : Moyenne annuelle des paramètres climatiques sur la période 1976-2005 par rapport à la période de référence 1961-1990 à Toubacouta.....	49
<b>Tableau 16</b> : Bilan hydrique mensuel détaillé par décennie de 1961-70 à 2001-2010 (DGPRES, 2016) 50	
<b>Tableau 17</b> : Physico-chimie des ressources en eau en mai 2018 .....	58
<b>Tableau 18</b> : État des points d'eau captant la nappe du CT en 2018 (Source: DGPRES) .....	68
<b>Tableau 19</b> : Nombre de personnes par équivalent point d'eau .....	70
<b>Tableau 20</b> : Prélèvements moyens annuels des eaux de la nappe du CT en 2016 et 2017 .....	71
<b>Tableau 21</b> : Accessibilité des ressources en eau dans la région .....	73
<b>Tableau 22</b> : Besoins domestiques en eau en 2017 ( $\text{m}^3/\text{j}$ ).....	74
<b>Tableau 23</b> : Besoins en eau du cheptel en 2017 en ( $\text{m}^3/\text{j}$ ) .....	75
<b>Tableau 24</b> : Modèles climatiques et Résolution spatio-temporelle pour la période 2006-2050 .....	80
<b>Tableau 25</b> : Données d'entrées et de sorties des macros utilisées .....	81
<b>Tableau 26</b> : Hypothèses considérées pour la macro ESPERE.....	81
<b>Tableau 27</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 .....	89
<b>Tableau 28</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. ....	90
<b>Tableau 29</b> : Tendances évolutives des volumes d'eau écoulés dans la région à l'horizon 2050 .....	92
<b>Tableau 30</b> : Moyenne annuelle des paramètres hydro-climatiques sur les horizons 2035 et 2050 par rapport à la période de référence 1976-2005 à Fatick pour le RCP4.5 .....	95
<b>Tableau 31</b> : Moyenne annuelle des paramètres hydro-climatiques sur les horizons 2035 et 2050 par rapport à la période de référence 1976-2005 à Toubacouta pour le RCP4.5 .....	96

<b>Tableau 32:</b> Moyenne annuelle des paramètres hydro-climatiques sur les horizons 2035 et 2050 par rapport à la période de référence 1976-2005 à Fatick pour le RCP8.5 .....	96
<b>Tableau 33:</b> Moyenne annuelle des paramètres hydro-climatiques sur les horizons 2035 et 2050 par rapport à la période de référence 1976-2005 à Toubacouta pour le RCP8.5 .....	97
<b>Tableau 34:</b> Estimation des besoins en eau par secteur .....	98
<b>Tableau 35:</b> Tendances évolutives des besoins en eau à l'horizon 2050 .....	98
<b>Tableau 36:</b> Récapitulatif des débits d'eau des sorties des modèles à l'état actuel (2012) et à l'horizon 2050 en m <sup>3</sup> /s (Dieng, 2017) .....	102
<b>Tableau 37:</b> Forages et débits unitaires dans les champs captant choisis (DGPRES, 2016) .....	106
<b>Tableau 38:</b> Chaîne d'impact de la vulnérabilité future des ressources en eau .....	110
<b>Tableau 39:</b> Synthèse des enjeux liés à la variabilité saisonnière, annuelle et interannuelle du climat .....	112
<b>Tableau 40:</b> Deux scénarios retenus pour le secteur des ressources en eau .....	113
<b>Tableau 41:</b> Options d'adaptation prioritaires identifiées.....	113

## Liste des acronymes

Sigles	Définitions
AEP	Approvisionnement en Eau Potable
ANACIM	Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie du Sénégal
ANSD	Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie
ARD	Agence Régionale de Développement
ASUFOR	Association des Usagers des Forages
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project phase 5
CSE	Centre de Suivi Ecologique
DGPRES	Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau
DHR	Direction Hydraulique Régionale
DTGC	Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques
ESPERE	Estimation de la Pluie Efficace et de la Recharge Efficace
ETR	Evapotranspiration réelle
ETP Moy	Evapotranspiration potentielle moyenne
FAO	Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
ICV	Indice Côtier de Vulnérabilité
IRD	Institut de Recherche pour le Développement
JJASO	Juin Juillet Août Septembre Octobre
OFOR	Office des Forages Ruraux
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
Mm <sup>3</sup>	Millions de mètre cube
Moy. An	Moyenne annuelle
P eff	Pluie efficace
P Moy	Pluie moyenne
PE	Évapotranspiration potentielle
PEPAM	Programme d'Eau Potable et d'Assainissement du Millénaire
RCP	Representative Concentration Pathway
RFU	Reserve Facilement Utilisable
SREL	Service Régional de l'Élevage
UCAD	Université Cheikh Anta Diop

## 1 Contexte

Selon le dernier rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC), l'essentiel de l'accroissement observé de la température moyenne globale depuis le milieu du 20<sup>ème</sup> 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, en plus de la 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).

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 (2<sup>ème</sup> 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 20<sup>ème</sup> 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 ainsi que les zones côtières qui sont déjà fragiles. Ces trois secteurs occupent une place importante dans l'économie nationale 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 Sécurité 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 des ressources en eau et a pour objectif général de mesurer la vulnérabilité aux changements climatiques de la zone du Delta du Saloum/région de Fatick pour ce secteur 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 le secteur vulnérable aux variabilités climatiques et aux événements extrêmes. Il va s'agir d'évaluer les impacts biophysiques (ex : effet sur la qualité et quantité de l'eau) et les effets sur les secteurs et utilisateurs qui en dépendent (ex : population, agriculture, écosystèmes (parcs naturels)). L'exposition et la vulnérabilité biophysique ainsi que la sensibilité du contexte socio-économique seront prises en compte.
- Identifier les potentiels impacts futurs des changements climatiques (augmentation des températures, changement dans la distribution de la pluviométrie, etc.) sur les ressources en eau et les secteurs/utilisateurs qui en dépendent. Il s'agit de nouveau 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 ressources en eau et les secteurs/utilisateurs qui en dépendent plus résilientes aux impacts des changements climatiques projetés, soit par une réduction de la vulnérabilité structurelle (réduire la vulnérabilité de l'accès à l'eau, diversification des sources de revenus, élever le niveau d'éducation, etc.), soit par une réduction de l'exposition biophysique aux impacts projetés (e.g. gestion intégrée des ressources en eau), ou soit 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, au Sud par la Gambie. La région compte trois départements (Fatick, Gossas, Foundiougne). La présente étude va se concentrer uniquement sur les départements de Fatick et Foundiougne.

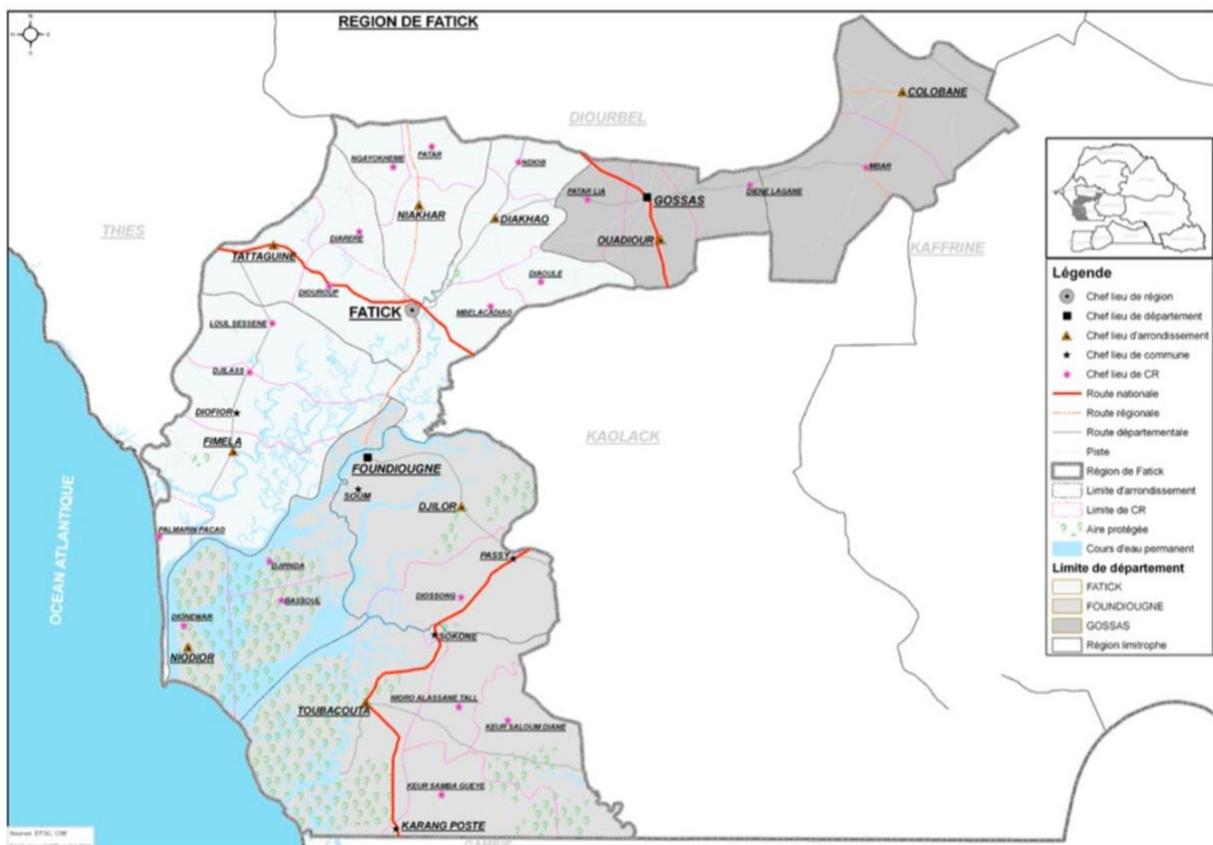


Figure 1: Localisation de la région de Fatick (source : gouvernement du Sénégal)

#### 2.1.2 Climat

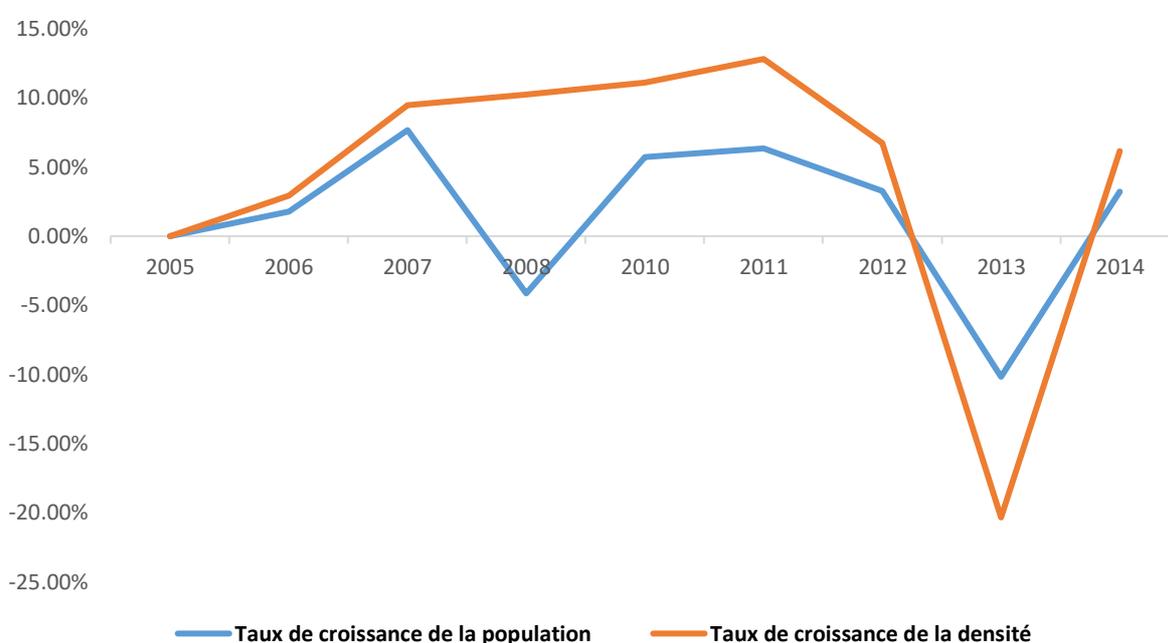
Le climat est de type soudano-sahélien. La région présente une forte hétérogénéité qui peut être résumée en une opposition Nord/Sud : au Nord, une pluviométrie moyenne de 520 mm dans le département de Fatick avec une saison des pluies plus courte et au Sud une pluviométrie moyenne de 680 mm notamment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

#### 2.1.3 Situation sociodémographique

La région de Fatick est issue du royaume du Sine-Saloum délimitée par la Gambie au Sud et par les régions naturelles du Cayor, du Baol et Djolofau 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<sup>1</sup>. 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 ferrées, développement de la culture arachidière) et ainsi donner les prémices de la configuration géographique actuelle<sup>2</sup>.

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 d'accroissance 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'Élevage (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)

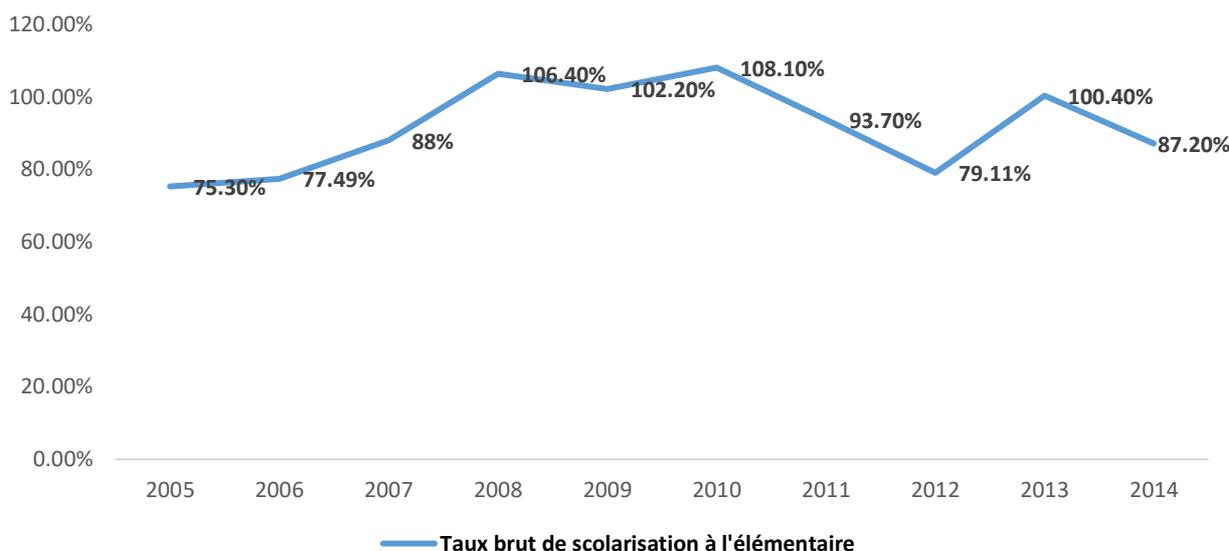
La région de Fatick est marquée par de très fortes disparités sur le plan social. Ainsi, en dépit de la politique d'alphabétisation et des progrès enregistrés ces dernières années sur le plan national, le taux d'analphabétisme dans la région demeure assez important avec un taux de 51,1% (RGPHAE de 2013). 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

<sup>1</sup>in Schéma directeur d'aménagement et de développement du pôle territoire Sine-Saloum (2017)

<sup>2</sup>idem

national (Situation économique et sociale de la région de Fatick, 2004). Ce taux devient relativement plus faible entre 2010 et 2012 et en 2014 (Figure 3). 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 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 traduit 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 :** Évolution 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 :** Évolution du nombre de structures sanitaires dans la région de Fatick

Structures sanitaires	2005	2006	2007	2008	2009	2010 - 2011	2013	2014
Centres de santé	3	6	6	7	6	7	7	7
Postes de santé	81	84	82	84	75	89	89	90
Cases de santé	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 de 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), 57568 ménages pratiquent l'agriculture au sens large dans la région de Fatick dont 88% en zone rurale. Le type de culture majoritaire reste l'agriculture pluviale, qui est pratiquée par 75% des ménages (43253 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, en élevages 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 qui fait 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).

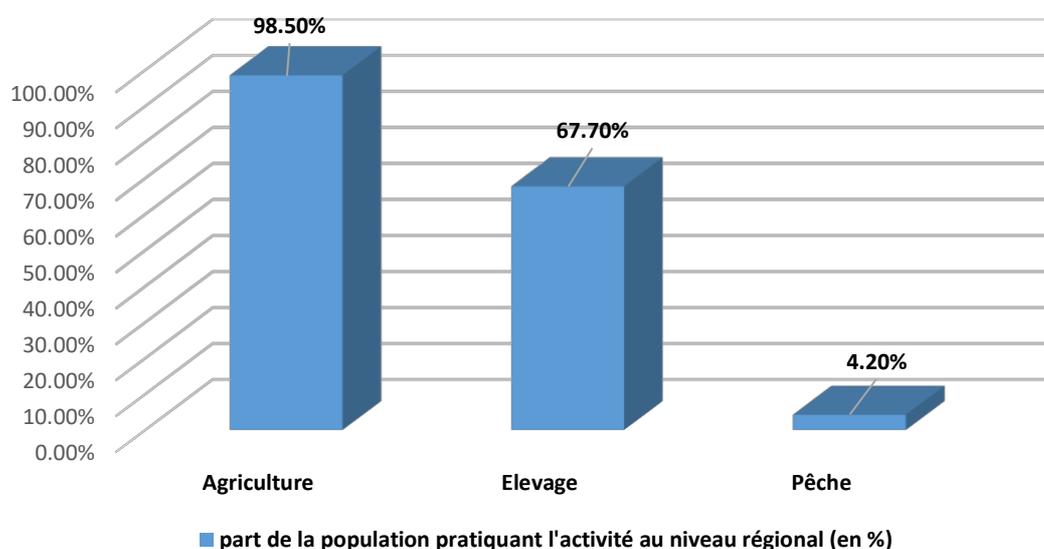
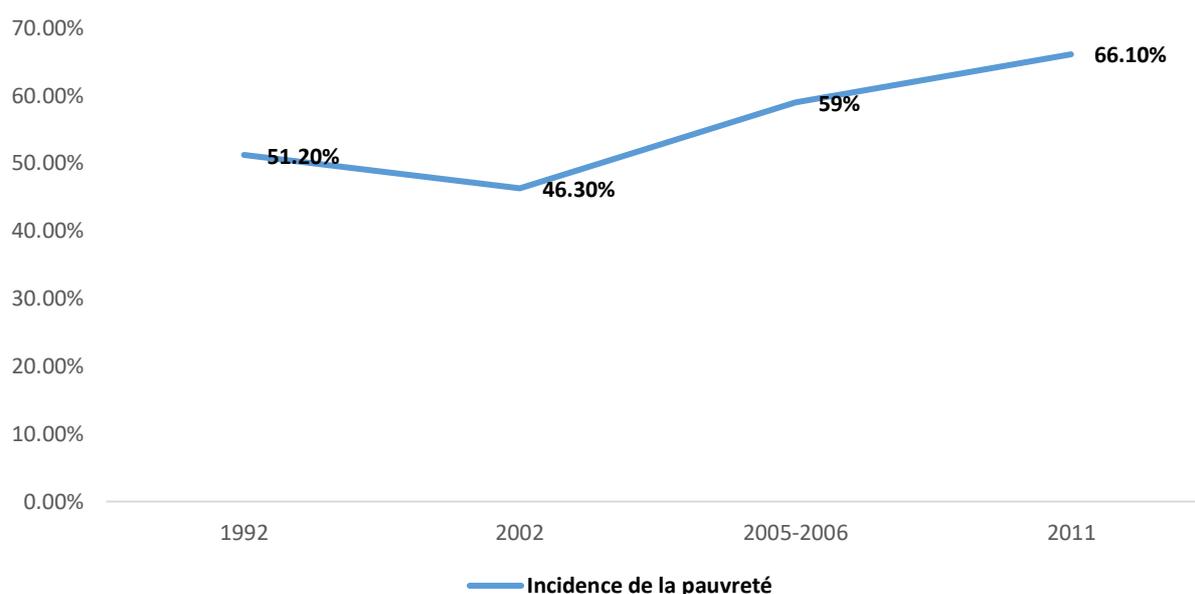


Figure 4 : Principales activités dans la région de Fatick. Source : PAS-PNA à partir des données de SES Fatick 2014

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 régional 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 la plus répandue. L'incidence de la pauvreté<sup>3</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>4</sup>, elle est de 10,9% en 2011 (ESPS II).



*Figure 5 : Évolution 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*

## 2.2 Zones d'étude spécifique

Trois sites sont couverts par les études de vulnérabilité sectorielles réalisées dans la région en particulier pour la réalisation des enquêtes de terrain : 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

<sup>3</sup> L'incidence de la pauvreté est la part de la population ou des ménages qui vit en état de pauvreté.

<sup>4</sup> La sévérité de la pauvreté mesure la part de la population en situation d'extrême pauvreté.

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 de cinq hameaux : SobMaack, Pine Niokhor, Toka Sone, NgolgameetNgaraf. Il se trouve dans la zone semi-aride caractéristique de la bande sahélo-saharienne marqué par les sécheresses des années 1970 (Descroix et al., 2015). Le village de Toubacouta, moins peuplé (2554 habitants), est composé de Toubacouta et de trois hameaux : 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.

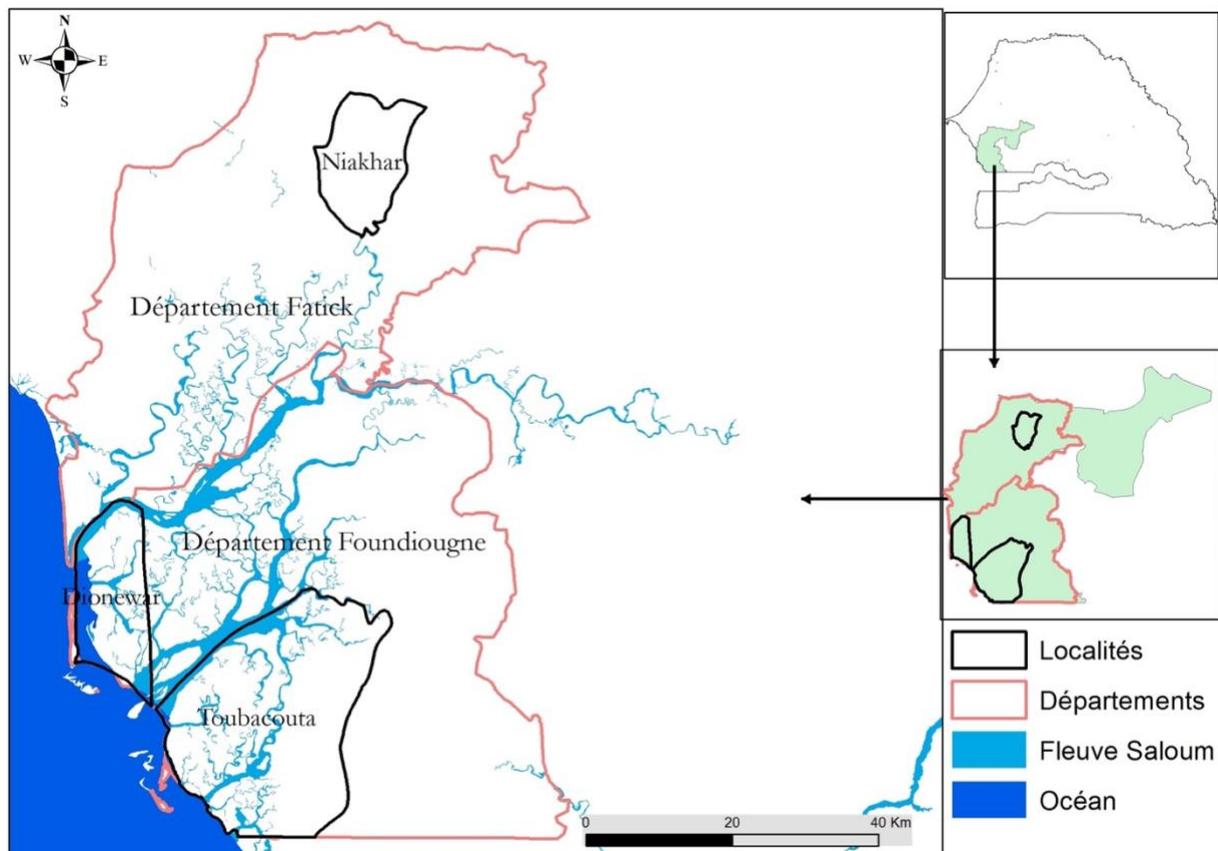


Figure 6: Localisation des sites d'étude à l'intérieur de la région de Fatick (source : A. Seck, UCAD)

### 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 les 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 ce type d'approche 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. Elle sera surtout appliquée à l'étude des vulnérabilités passée et actuelle (Figure 7).
- 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 et des méthodes de corrélation par tendance. 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. Elle permettra de prendre en compte l'ensemble des interactions au sein du système étudié et de rendre compte de l'ensemble des enjeux à l'œuvre dans la zone étudiée ainsi que des différentes vulnérabilités.

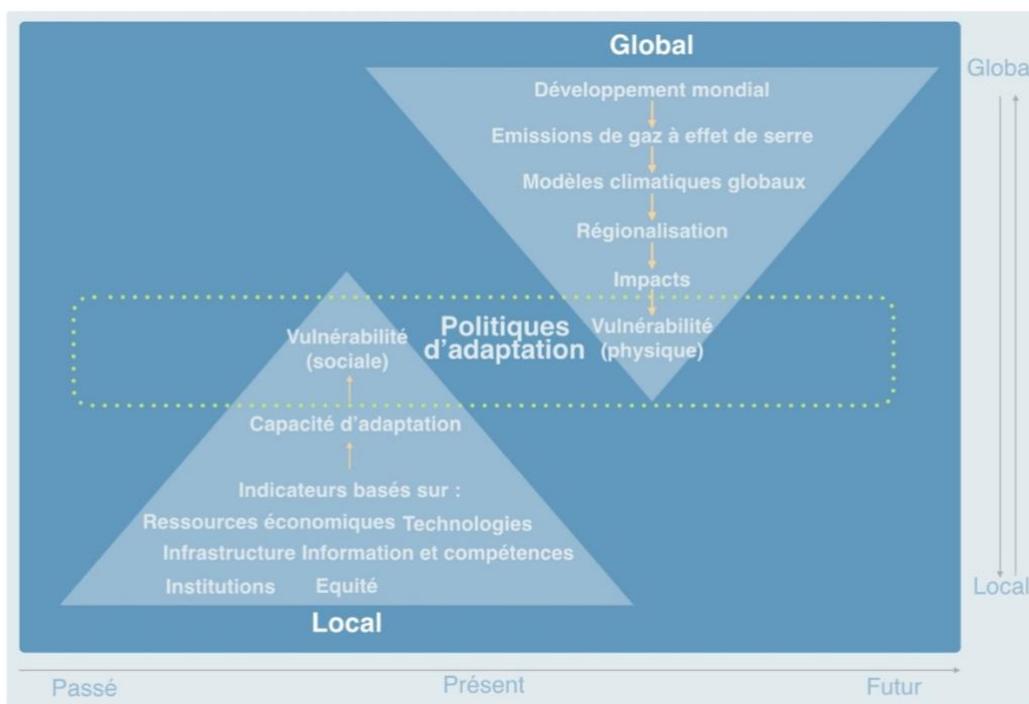


Figure 7: Approche combinée locale et globale pour gérer les impacts des changements climatiques (adapté de Dessai and Hulme (2004))

## 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).

	Facteurs biophysiques		Facteurs Sociaux	
<b>Situation Actuelle</b>	Variabilité Climatique Topographie Utilisation des terres Protection Ages des infrastructures	+	Santé Technologie Réglementation Capital Social Education	= <b>Vulnérabilité à la variabilité climatique</b>
		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	= <b>Vulnérabilité aux changements climatiques</b>
		3	4	

Figure 8: 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)

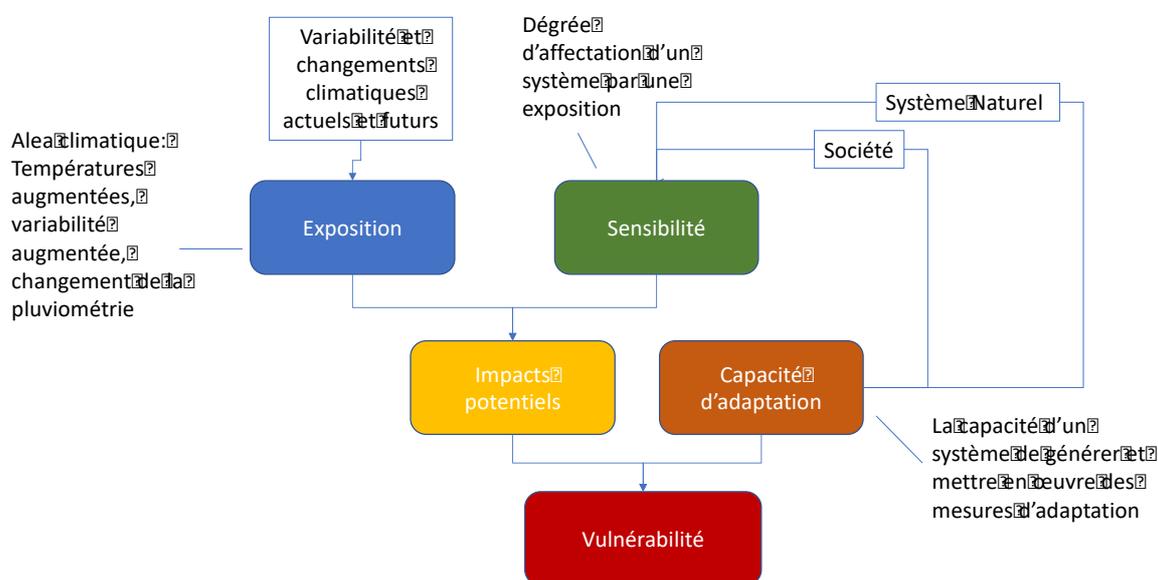


Figure 9: Chaîne d'impacts selon l'AR4 du GIEC (Climate Analytics)

## 4 Étude de la vulnérabilité actuelle pour le secteur des ressources en eau

### 4.1 Approche méthodologique

L'approche méthodologique utilisée pour analyser, interpréter et enfin combiner les données de différentes sources pour en sortir l'information recherchée repose sur trois grandes étapes :

- Évaluer la vulnérabilité physique liée à la variabilité climatique et aux modifications entraînées sur la disponibilité et la qualité des ressources en eau;
- Évaluer la vulnérabilité des populations en relation avec les principaux facteurs socio-économiques. Ces derniers permettent de mesurer les capacités d'adaptation des populations face à la variabilité du régime climatique ;
- Combiner les principales informations physiques et humaines devant servir au développement des indicateurs de vulnérabilité des populations face à la variabilité climatique.

Cette approche se base sur l'exploitation des données climatiques, hydrologiques et hydrogéologiques et sur la caractérisation des impacts potentiels de la variation du régime climatique sur les ressources en eau.

Elle nécessite un travail préalable qui consiste à collecter et à analyser les données disponibles sur le climat et sur les ressources en eau, permettant ainsi d'identifier les principaux facteurs qui caractérisent la vulnérabilité climatique des ressources en eau dans la région. La démarche générale est présentée dans le schéma méthodologique suivant (Figure 10) et sera détaillée dans la partie traitement des données.

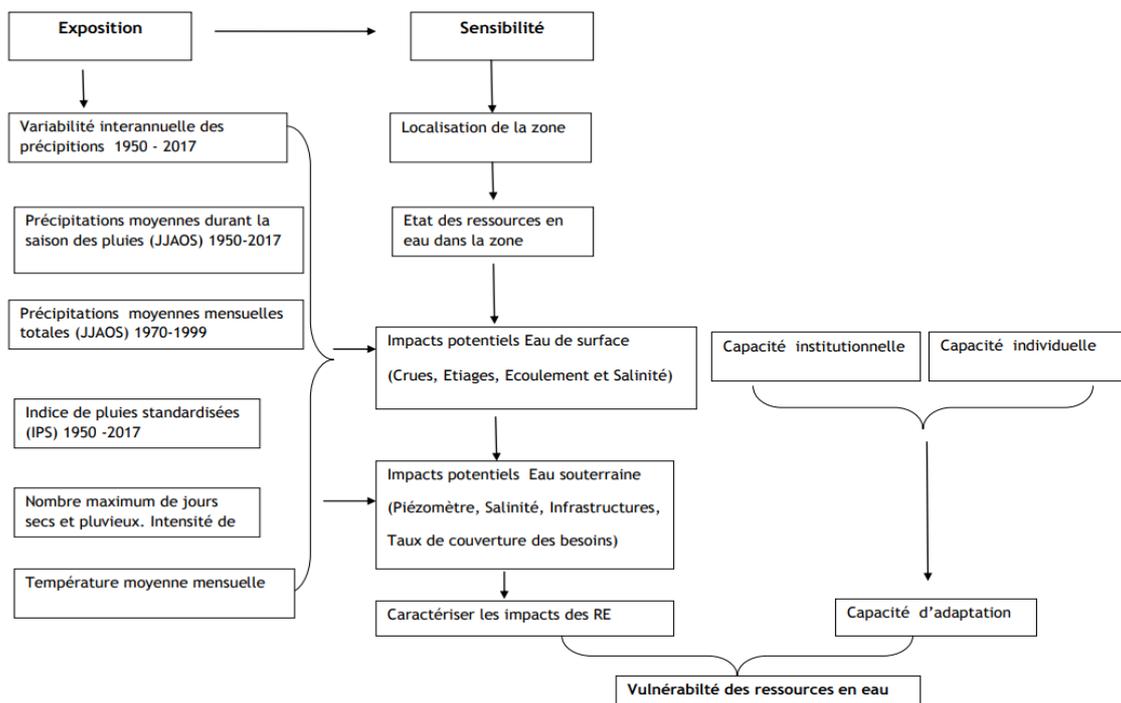


Figure 10: Schéma conceptuel pour la caractérisation de la vulnérabilité climatique actuelle du secteur des ressources en eau (Fussel & Klein, 2002, modifié)

#### 4.1.1 Acquisition des données

L'acquisition des données s'est basée sur trois types d'approches : la recherche documentaire, l'analyse et l'interprétation des images satellitaires et l'enquête de terrain.

Une campagne de terrain a été réalisée au mois de mai 2018 dans la région de Fatick pour dresser un inventaire exhaustif des informations disponibles et pour collecter des données de mesure sur les ressources en eau. Ces informations et les données déjà disponibles ont été obtenues grâce aux services de documentation et de recherche : ANACIM, DGPRE, ARD, DHR/Fatick.

##### 4.1.1.1 Collecte des données observées par l'ANACIM et des données simulées par les modèles CMIP5

Les données collectées portent essentiellement sur les paramètres climatiques mensuels (pluviométrie, température, humidité relative, évaporation et insolation) (Tableau 2) et des rapports d'études sur le climat réalisées à l'échelle nationale.

**Tableau 2:** Localisation des stations météorologiques et pourcentage de données manquantes (Source : ANACIM)

Stations	Altitude (m)	X (UTM)	Y (UTM)	Paramètres climatiques	Période	Données Manquantes (%)
Fatick	17	358713	1582410	Précipitations mensuelles	1950-2017	0
				Température	1991-2017	0
				Humidité relative	1991-2017	0
				Evaporation	1991-2017	10
				Insolation	1991-2017	15
Toubacouta	22	341145	1523894	Précipitations mensuelles	1950-2017	0
Sokone	12	351800	1535632	Précipitations mensuelles	1963-2013	0
Foundiougne	10	342099	1561817	Précipitations mensuelles	1950-2017	0

Les données de sortie des modèles climatiques globaux de CMIP5 (obtenues grâce à la collaboration entre AMMA2050 et PAS-PNA et les travaux menés par le spécialiste en climatologie du PAS-PNA) portent essentiellement sur les paramètres climatiques journaliers sur la période 1950-2005 (précipitations, température, humidité spécifique, radiation globale).

Ces données ont été utilisées pour le calcul du bilan hydrique à partir de la macro ESPERE<sup>5</sup> développée par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM, 2015), avec comme données d'entrées les précipitations journalières, la température journalière et l'évapotranspiration journalière. Cette dernière est obtenue par calcul à partir de la macro PE<sup>6</sup> développée par Oudin et *al.*, (2005) et un facteur de correction de 0.408 nécessaire a été appliqué (Ndiaye et *al.*, 2017). Les résultats fournis par la méthode de (Turc, 1954) jugés plus représentatifs dans la région (Diouf et *al.*, 2016) ont été considérés pour l'interprétation de la pluie efficace, des volumes d'eau infiltrés et de la recharge.

$$R = P - \frac{P}{\sqrt{0,9 + P^2/L^2}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05(T)^2$$

P et T : pluie (en mm) et température (en °C) moyenne annuelle  
R : Peff moyenne annuelle (mm/an)

<sup>5</sup> macro ESPERE est une feuille de calcul Microsoft Excel© permettant de mettre en œuvre rapidement et simultanément une dizaine de méthodes d'estimation de la recharge ou de la pluie efficace.

<sup>6</sup> macro PE est une feuille de calcul Microsoft Excel© permettant de calculer l'évapotranspiration.

**Tableau 3:** Paramètres climatiques des sorties de CMIP5 pour la période 1950-2005 (Données corrigées et désagrégées à 50km)

Nom	Résolution temporelle	Résolution spatiale (lon x lat)
ACCESS1-0	Journalière	50kmx50km
ACCESS1-3	-	-
CMCC-CM	-	-
CMCC-CMS	-	-
MIROC-ESM	-	-
MIROC-ESM-CHEM	-	-
MRI-CGCM3	-	-
MPI-ESM-LR	-	-
MPI-ESM-MR	-	-
bcc-csm1-1	-	-
bcc-csm1-1-m	-	-
BNU-ESM	-	-
GFDL-ESM2M	-	-
GFDL-ESM2G	-	-
GFDL-CM3	-	-
nmcm4	-	-
IPSL-CM5A-LR	-	-
IPSL-CM5A-MR	-	-
IPSL-CM5B-LR	-	-
MIROC5	-	-
NorESM1-M	-	-
HadGEM2-AO	-	-
HadGEM2-CC	-	-
HadGEM2-ES	Journalière	50kmx50km

**Tableau 4:** Données d'entrées et de sorties des macros utilisées

Macros	Données d'entrées	Données de sorties	Source
PE	Temperature (T); Wind Speed (U); Insolation/Radiation (D); Relative Humidity (RH); Extraterrestrial radiation (Re) (depending on the latitude and Julian day).	ETP	Oudin et al. (2005)
ESPERE Version 1.5	Précipitations journalières ; ETP journalière et la Température moyenne journalière	Pluie efficace ; Volume d'eau infiltré annuel et Recharge annuelle	(BRGM, 2015)

Pour aboutir aux résultats escomptés, des hypothèses ont été considérées suivant les caractéristiques géo-lithologiques. La région est caractérisée par une alternance de sables et d'argiles parfois latéritiques qui repose sur un substratum argileux compact (Dieng, 2017).

Ainsi, les principes suivants ont été considérés :

**Tableau 5 : Hypothèses considérées pour la macro ESPERE**

<b>Rappel des PARAMETRES</b>		
SURFACE de la Zone (en Km <sup>2</sup> )		
Méthode Turc		5594
Réserve Utile Maximale (mm)		175
Coefficient infiltration ( <i>Transforme Pluie efficace en Recharge</i> )		
Méthode Turc		1
Porosité efficace		
WTF		0.15

#### 4.1.2 Collecte des données à la DGPRES, au Laboratoire d'hydrologie et d'hydrochimie de l'UCAD

La collecte de données à la DGPRES a été facilitée par la disponibilité des bases de données PROGRES et CHRONO ainsi que l'apport considérable des agents dans les différents services et les membres du consortium « ressources en eau ».

Les données collectées portent essentiellement sur des séries chronologiques de débits et des hauteurs d'eau, notamment pour les bassins de la Nema et du Djikoye. Elles contiennent aussi des séries chronologiques sur la piézométrie et la qualité des eaux souterraines du CT obtenues à partir des suivis périodiques des ouvrages hydrauliques dans la zone (forages, puits et piézomètres).

Les informations collectées au Laboratoire d'hydrologie et d'hydrochimie et à l'IRD concernent essentiellement des données de qualité physico-chimique (ions majeurs et mineurs) et de salinité de la nappe du CT dans la zone d'intervention.

En parallèle, des données socio-économiques disponibles concernant l'élevage et la démographie ont été collectées à partir des différents services de gestion et de planification, notamment le Service Régional de l'Élevage de Fatick (SREL/Fatick), l'Agence Régionale de Développement (ARD) et l'Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD).

Cette collecte a été complétée par une recherche bibliographique sur le terrain et sur le web. Les rapports et les documents existants sur la région ont été exploités par les post-doctorants en sciences économiques et sociales chargés des enquêtes. Ainsi, une base de données a été constituée pour dresser le portrait climatique et le portrait des ressources en eau dans la zone, permettant ainsi de mieux comprendre les facteurs fondamentaux qui gouvernent la vulnérabilité de ce secteur face à variabilité climatique.

##### 4.1.2.1 Campagne de mesure

La collecte des données au niveau des structures partenaires a été complétée par une campagne de terrain. Les investigations hydrogéologiques ont été effectuées en mai 2018 ; elles concernent 284 points d'eau dont 27 forages (7 captant la nappe du Maastrichtien et 20 captant la nappe du CT), 8 piézomètres et 249 puits captant la nappe du CT (Figure 12).

Les données recueillies sont relatives aux enquêtes de pompages annuels de 2016 et 2017 pour l'ensemble des forages captant la nappe du CT dans la zone du projet. De plus, des mesures *in situ* (de coordonnées géographiques X et Y en UTM) ont été réalisées, comme la mesure du niveau statique par rapport au sol, du pH, de la conductivité électrique, de l'O<sub>2</sub> dissous et de la température. En

parallèle, la conductivité électrique de l'eau du fleuve Saloum a été mesurée sur deux sites, à Fatick et à Foundiougne. Enfin les infrastructures de suivi de la ressource (stations de mesure) ont été visitées pour voir leur état de fonctionnalité (Tableau 6).

*Tableau 6: Tableau récapitulatif des données collectées*

Informations	Echelle spatiale	Echelle temporelle	Source des données
<b>Hydrogéologie</b> Niveau statique Qualité de l'eau de la nappe du CT Inventaire des points d'eau Paramètres hydrauliques	Zone du projet	Suivi irrégulier	DGPPE
	Zone du projet	Suivi irrégulier	DGPPE
	Zone du projet	2018	DGPPE Campagne de terrain
	Zone du projet	2017	DGPPE
<b>Hydrologie</b> Débits quotients Salinité du fleuve Saloum	Stations hydrométriques (Nema Ba et Djikoye)	1976-1993 (Djikoye) 1976-1983 (Nema Ba)	DGPPE
	Kaolack	1927 - 2013	(Dieng, 2017)
<b>Occupation du sol</b> Cartes administratives, hydrographique et hydrogéologique Image MNT Inondations Démographie	Zone du projet	2017	DTGC DGPPE
		Résolution 30 m Image du 05 Septembre 2005	USGS <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> <a href="http://2016africalandcover20m.esrin.esa.int/download">http://2016africalandcover20m.esrin.esa.int/download</a> <a href="http://sertit.u-strasbg.fr/">http://sertit.u-strasbg.fr/</a>
		2015-2017	ANSD
<b>Elevage</b>	Zone du projet	2017	SREL/Fatick

#### 4.1.3 Approche méthodologique de traitement des données

Pour bien étudier la variabilité climatique dans la zone, nous avons exploité les données climatiques, hydrogéologiques et hydrologiques afin d'identifier les conséquences physiques de cette variabilité. En parallèle, pour se renseigner sur les conditions de vie des populations, des données socio-économiques ont été exploitées.

Plusieurs méthodes ont été utilisées pour l'analyse des données dont : les techniques d'analyses statistiques et les outils géomatiques pour la structuration, la gestion et l'analyse spatio-temporelle des données.

##### 4.1.3.1 Traitement des indicateurs climatiques

Les séries temporelles des données climatiques ont été fournies par l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM). Le réseau d'observation est composé de 4 stations, comportant 3 postes pluviométriques et 1 station synoptique (Figure 11). La station synoptique de Fatick a été retenue comme station de référence, car elle fournit l'ensemble des paramètres (humidité relative, insolation, évaporation et température).

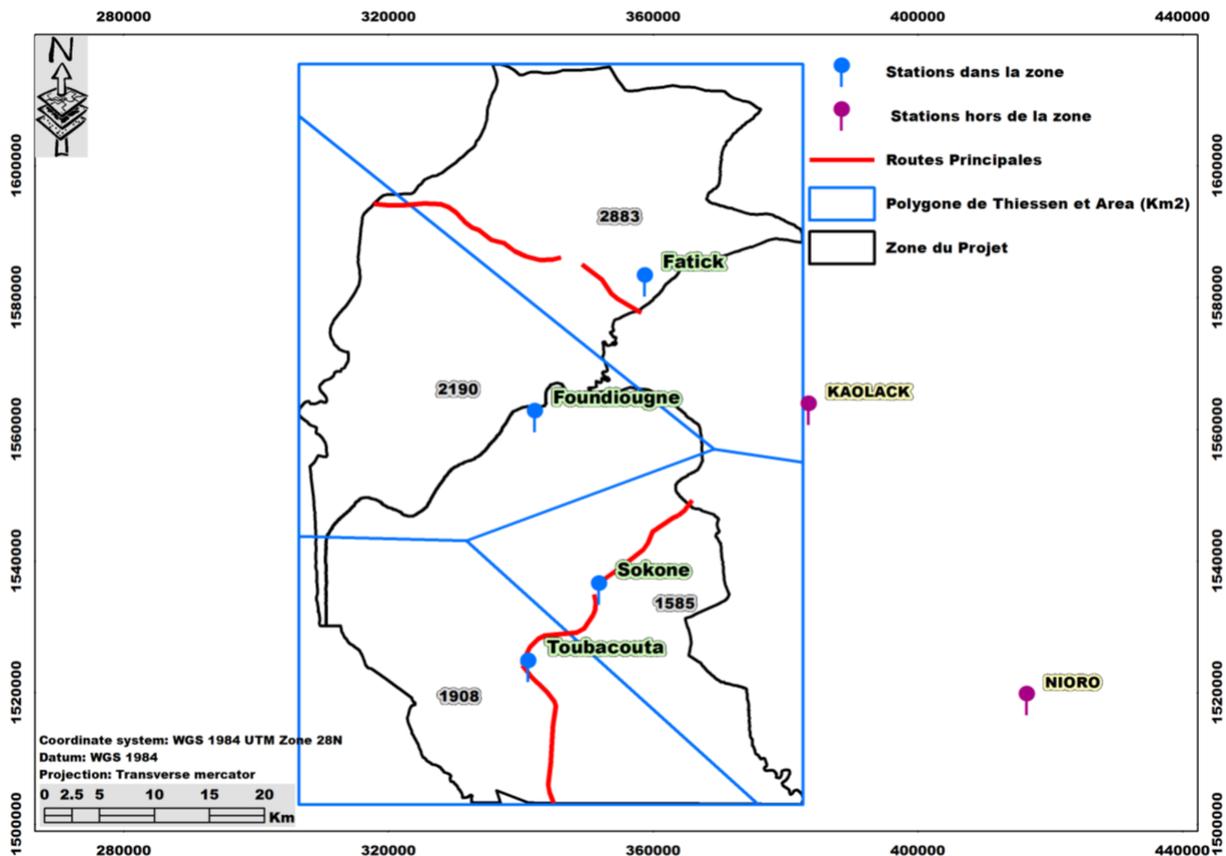


Figure 11: Stations pluviométriques et zones d'influence

Le suivi du régime pluviométrique est indispensable dans la région du Sahel. Il est fonction principale de la productivité alimentaire (Sarr et al, 2013) et conditionne dans une certaine mesure les disponibilités en eau (Bodian, 2014). De par son importance pour les populations et les écosystèmes, la plupart des travaux anciens et récents sur l'analyse de la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest se sont basés sur ce paramètre (Sircoulon, 1976 ; Bodian, 2011). Ces travaux ont permis d'évaluer les sécheresses successives au fur et à mesure dans le Sahel (Lienou, 2007).

Les séries temporelles des précipitations mensuelles sont permis de calculer les indicateurs climatiques suivants :

- Cumul interannuel des précipitations et les précipitations moyennes durant la saison des pluies (JJASO) ;
- Précipitations moyennes mensuelles totales (JJASO) durant la période 1970-1999 ;
- Indices de pluies standardisées (IPS) sur 12 mois et ;
- Évapotranspiration potentielle.

#### a. Indicateur cumul interannuel des précipitations

Le cumul interannuel des pluies par rapport à la période 1950-2017 a été calculé par la formule :

$$P_{\text{cumul}} = \sum P_i \quad (1)$$

Où

$P_{\text{cumul}}$  = Précipitations mensuelles cumulées (mm)

$P_i$  = Précipitations mensuelles (mm)

La variabilité des précipitations pendant la saison des pluies (JJASO) par rapport à la période 1950-2017 et pendant la période de sécheresse considérée 1970-1999 est calculée par la formule :

$$P_m (JJASO) = (\sum P_i (JJASO))/N \quad (2)$$

Où

$P_m (JJASO)$  = Précipitations moyennes durant la saison des pluies (mm)

$P_i (JJASO)$  = Précipitations moyennes mensuelles durant la saison des pluies (mm)

N= Nombre de mois de la saison des pluies considérée (JJASO)

### **b. Indices de pluies standardisées (IPS) sur 12 mois**

L'indice de pluies standardisées par rapport à la période 1950-2017 est calculé par la formule :

$$IPS_i = \frac{Ax - \overline{Ax}}{\sigma} \quad (3)$$

Où

x est la variable considérée

$Ax$  = moyenne de la variable à l'année considérée

$IPS_i$  = anomalie de l'année i

$\overline{Ax}$  = moyenne de l'indice calculée sur la période 1950-2017

$\sigma$  = écart-type interannuel sur la période 1950-2017

En plus de ces indicateurs, nous avons calculé la température moyenne mensuelle, l'humidité relative moyenne mensuelle et le déficit pluviométrique pour les années de référence.

#### *4.1.3.2 Traitement des indicateurs hydrologiques et hydrogéologiques*

Les données hydrogéologiques et hydrologiques utilisées dans cette étude proviennent essentiellement de la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en eau (DGPRE).

### **a. Indicateurs de crues, étiages et écoulement de base**

Pour les données de débits, les observations dans les stations de Nema Ba et du Djikoye ont débuté en 1976 et se sont arrêtées respectivement en 1983 et en 1993. Des lacunes ont été constatées sur les séries temporelles des débits quotidiens, et les données disponibles ne concernent que des périodes de sécheresse jugées non représentatives pour une analyse statistique de la sensibilité. Ainsi, pour caractériser la sensibilité des eaux de surface face à la variabilité climatique, la bibliographie existante, avec notamment les études de : Mendy, (2000); DGPRE, (2014) ; DGPRE, (2016) et Dieng, (2017) a été exploitée.

### **b. Indicateur de niveau piézométrique**

Pour caractériser la sensibilité des eaux souterraines de la nappe du CT face à la variabilité climatique, les données hydrodynamiques et de qualité de l'eau des bases de données PROGRES et CHRONO de la DGPRE en plus des données collectées sur le terrain ont été exploitées. Des lacunes ont été notées

sur les séries temporelles de suivi des piézomètres dues notamment à un suivi irrégulier de la ressource dans la région.

La profondeur de l'eau de la nappe du CT a été étudiée à partir des données de mesure du niveau statique par rapport au sol effectuées sur 277 ouvrages. La piézométrie de l'aquifère est obtenue par la différence entre les altitudes par rapport au 0 IGN et la profondeur de l'eau par rapport au sol mesurée.

Les côtes du toit et du mur de l'aquifère ont permis de restituer la géométrie de l'aquifère dans l'ensemble du domaine d'étude. La topographie de la région obtenue à partir d'un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 30m a permis de restituer le toit de l'aquifère du fait que ce dernier est un aquifère libre. En ce qui concerne la morphologie du substratum de l'aquifère, les données issues des logs de forages ont été exploitées. Les données du mur de la nappe du CT obtenues à partir des logs de forages captant le Maastrichtien ont permis de calculer l'épaisseur de l'aquifère dans toute la zone et en parallèle d'obtenir l'épaisseur utile par la différence entre l'épaisseur et la profondeur de l'eau par rapport au sol.

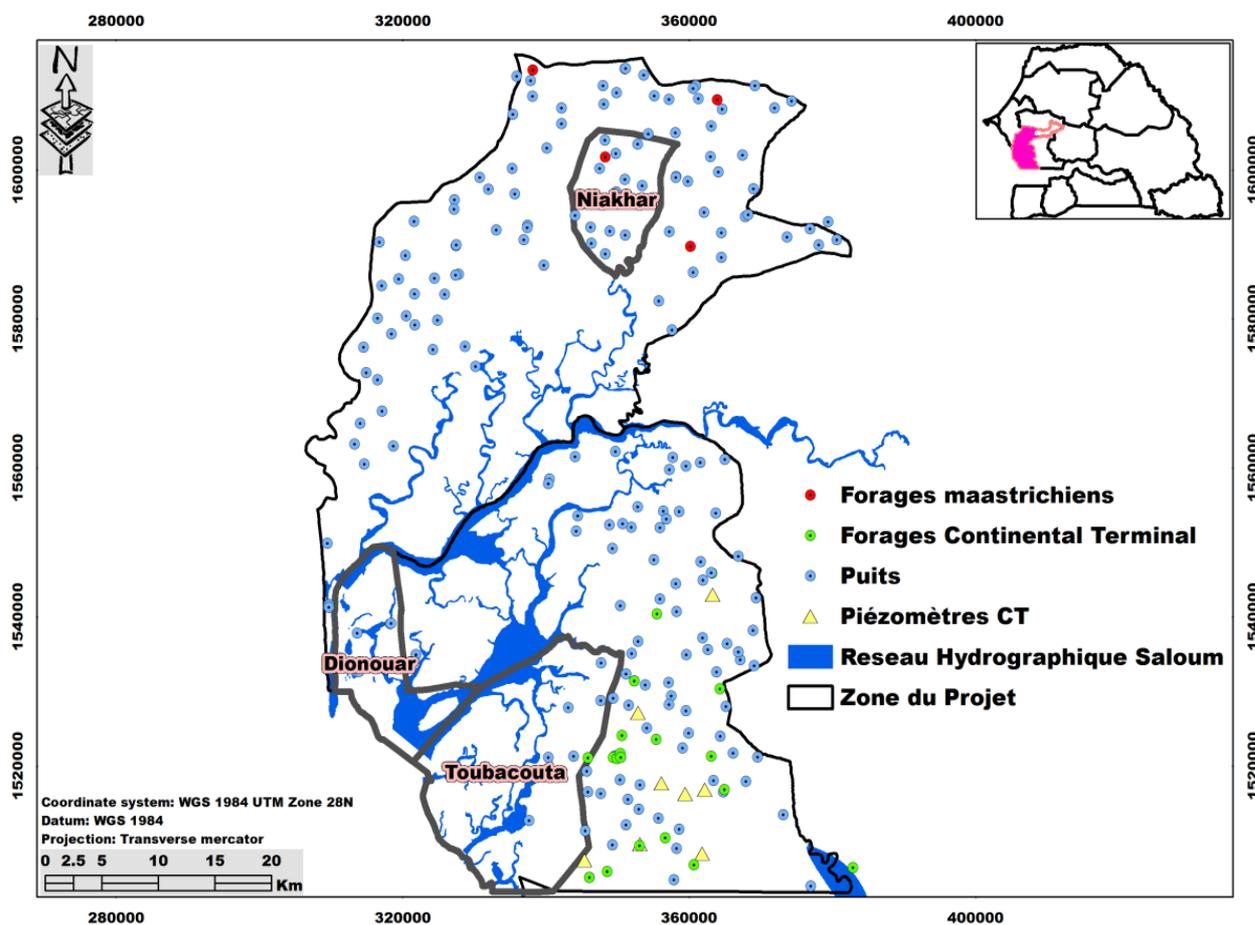


Figure 12: Carte des points d'eau visités en mai 2018

### c. Indicateur du taux de couverture des besoins en eau

L'évaluation des prélèvements d'eau a été faite uniquement sur les forages captant la nappe du CT à partir des données recueillies sur le terrain. Les données obtenues proviennent exclusivement des

relevés journaliers des débits pompés consignés dans un registre par l'opération de forage. Toutefois sur certains forages ce registre n'existe plus, dû essentiellement à des pannes de compteur. Nous avons recueilli les données de pompage mensuelles sur 2 ans (2016 et 2017) afin d'obtenir un volume moyen journalier qui reflète au mieux le rythme de pompage. Il faut préciser que les prélèvements au niveau des puits ont été négligés, vu que les forages desservent les villages et localités environnantes sur un réseau d'adduction pouvant atteindre 5 à 7 km de rayon. Il faut noter aussi que l'ensemble des forages captant la nappe du CT se situe dans le département de Foundiougne.

Les besoins domestiques actuels en eau (2017) de la population ont été calculés en prenant en compte la norme de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) de 35 l/habt/j (PEPAM, 2006), multipliés par 704 540 habitants (population en 2017 dans la zone du projet (ANSD, 2015)).

En parallèle, les besoins en eau du cheptel en 2017 ont été évalués en prenant en compte le type et le nombre d'animaux (bovins, asins, volailles, caprins, porcs, équins et ovins) et la consommation moyenne journalière par bête (l/j) (SREL, 2017) (Tableau 7).

*Tableau 7: Consommation d'eau moyenne journalière des différents types animaux*

Type d'animaux	Consommation d'eau moyenne (l/j)
<b>Bovins laitiers</b>	47.5
<b>Bovins de boucheries</b>	39.75
<b>Porcs</b>	13.75
<b>Chevaux</b>	32.66
<b>Caprins</b>	5
<b>Asins</b>	25
<b>Ovins</b>	7.16
<b>Volailles</b>	60 ml à 7jour à 380 ml à 56 jours (poulet)
	190 ml par jour (pondeuse)

#### **d. Indicateur de qualité des ressources en eau**

La vulnérabilité des ressources hydriques est liée à la quantité mais aussi à la qualité de l'eau. Pour étudier la qualité des ressources en eau, la salinité est choisie vue la situation géographique de la zone (zone côtière) où les ressources en eau sont constamment sous la menace de la salinisation des terres et l'intrusion d'eau salée marine et fluviatile (Bah, 2017).

L'indicateur de salinité a été calculé pour les eaux souterraines par la formule suivante :

$$S = ((0.72 * (CE - 3.06)) * (1 + 0.02 * (T - 25))) / 1000 \quad (4)$$

<http://www.jf-noblet.fr/spe2012/2-eau/acti1-sel.pdf>

Avec

S= Salinité (‰),

CE= Conductivité électrique (μS/cm)

T= Température de l'eau (°C)

Pour étudier la salinité du fleuve Saloum, nous avons exploité la bibliographie existante et principalement les travaux de Dieng, (2017) qui fournissent une série temporelle de salinité du fleuve de 1927-2013. Toutefois, les propriétés physico-chimiques de la nappe superficielle ont été analysées pour l'année 2017.

#### **e. Indicateur pour les ouvrages de captage**

Pour évaluer les infrastructures hydrauliques dans la zone, en plus de la base PROGRES de la DGPPE, nous avons visité sur le terrain les points d'eau pour prendre en compte les ouvrages récemment réalisés et voir leur état de fonctionnement (service, panne ou abandon). Les inventaires des points d'eau ont servi au calcul du nombre d'infrastructures hydrauliques par arrondissement. La norme de desserte standard est de 300 personnes par point d'eau (Mara, 2010). Celle-ci a été utilisée pour calculer le pourcentage de la population ayant accès à l'eau selon la formule suivante (PEPAM, 2006):

$$\text{Taux de couverture} = \text{Capacité maximale de production (en m}^3/\text{j)} / \text{Demande en eau (m}^3/\text{j)} \quad (5)$$

Le nombre de personnes par équivalent point d'eau a été obtenu en divisant l'effectif de la population totale par arrondissement par le nombre de forages existants dans l'arrondissement. La vulnérabilité des populations a été évaluée en comparant ces taux par rapport à la norme admise par (OMS, 2007), soit 1 000 m<sup>3</sup>/habt/an et la norme théorique de 300 habitants par point d'eau.

Le traitement de l'ensemble de ces données à l'aide des méthodes statistiques, ainsi que la combinaison et la superposition des différentes sources d'informations via les Systèmes d'Information Géographique (SIG) a permis d'obtenir des cartes de base pour l'analyse de la sensibilité.

## 4.2 Résultats

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

La zone du projet, qui s'étend sur une superficie d'environ 4 519 km<sup>2</sup>, se situe au Sud-ouest de la zone éco-géographique du bassin arachidier. Elle couvre les départements de Fatick et Foundiougne avec un total de 769 villages répartis sur 7 arrondissements et 23 communes dont Niakhar, Dionewar et Toubacouta. Elle se caractérise par une végétation naturelle, des terres cultivées, un réseau hydrographique dense et des zones urbanisées (Figure 13).

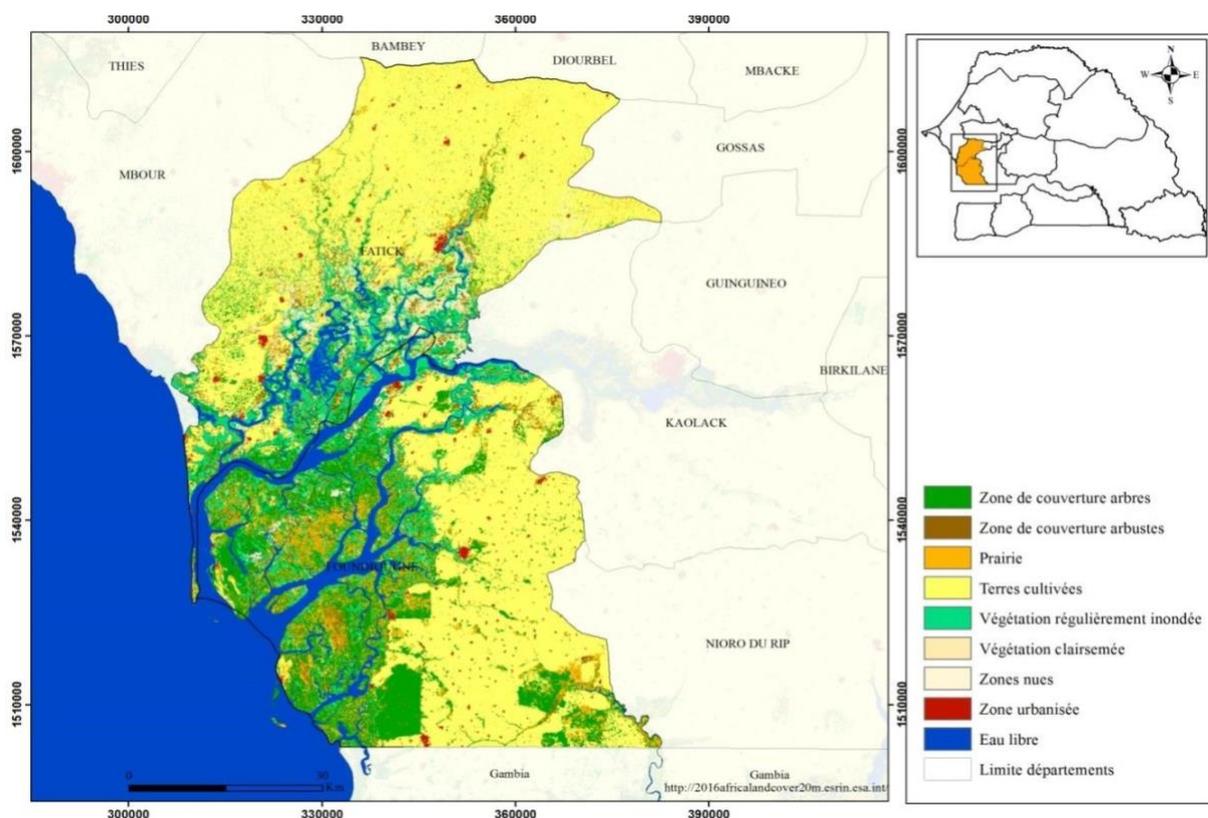


Figure 13: Carte de l'occupation du sol (<http://2016africalandcover20m.esrin.esa.int/download>)

La population totale dans la zone du projet est estimée à 618 674 habitants en 2013 (ANSD, 2013). Cette population majoritairement rurale pratique essentiellement l'agriculture pluviale (arachide, mil, maïs).

La superficie des terres salées est très importante dans la zone, environ 3 089 km<sup>2</sup> (Figure 14). Ces sels peuvent être lessivés et se retrouver dans la nappe. Ce phénomène de lessivage constitue un facteur aggravant de la dégradation de la qualité des ressources hydriques.

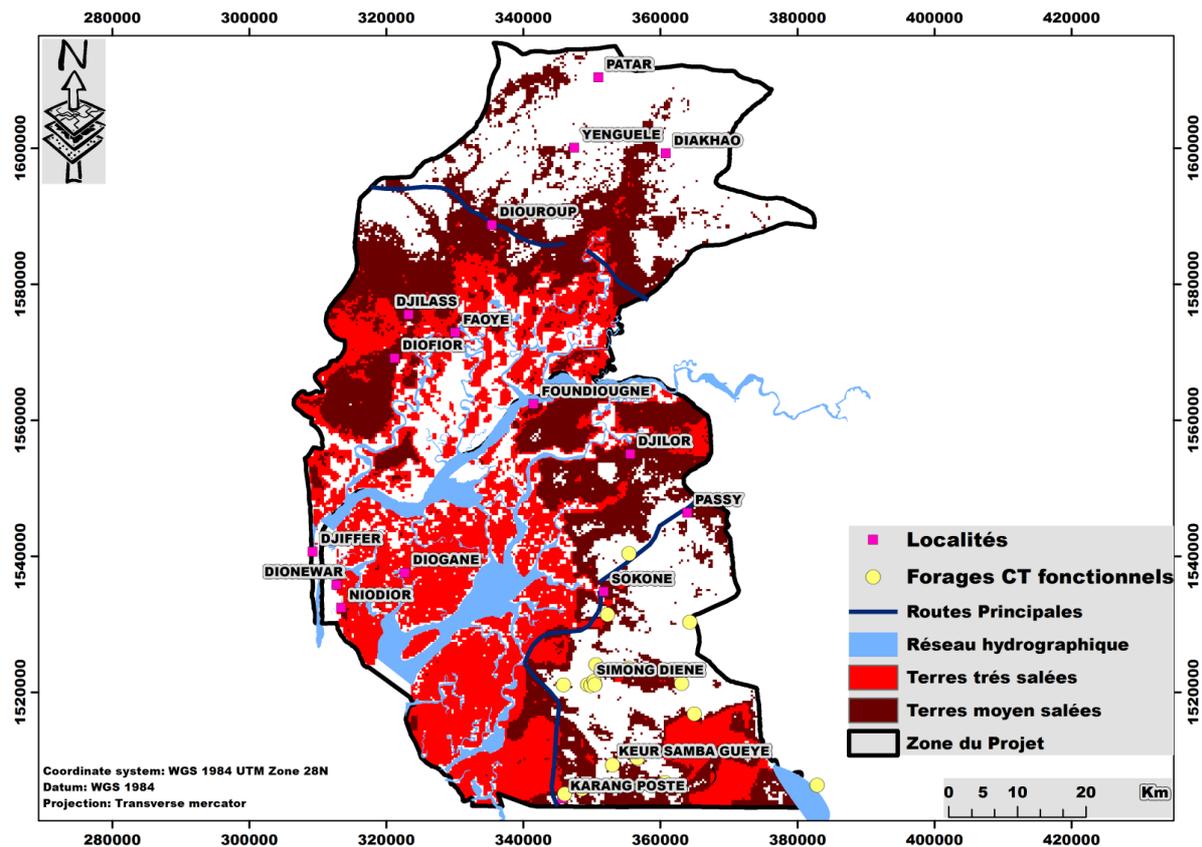


Figure 14: Superficie des terres salées dans la zone du projet (<ftp://ftp.soilgrids.org/data/recent/>)

Le système hydrologique est caractérisé par un réseau hydrographique dense constitué du fleuve et des cours d'eau pérennes et temporaires.

Le fleuve Saloum est caractérisé par deux bras que sont le Diomboss et le Bandiala. En aval du fleuve se trouve un grand estuaire occupé par de la mangrove, des prairies marécageuses et des vasières dénudées à sols salés appelés « tannes ». La salinité du fleuve croît graduellement de l'amont (36,7‰) vers l'aval (90‰) avec un maximum de (110‰) à Kaolack. Le réseau hydrographique de la zone est aussi constitué au Sud par les cours d'eau du Djikoye et de la Néma (DGPRE, 2016).

Les eaux souterraines alimentent la majeure partie de la population du pays à travers les forages et les puits en eau. Celles-ci sont stockées dans des réservoirs d'eau souterrains.

La lithologie de l'aquifère du CT varie d'une zone à une autre dans le bassin sénégalo-mauritanien. On observe la présence de sables et d'argiles au sud dans le Sine-Saloum (Faye A. , 1994 ; L'appartient, 1978) (Figure 15). Les paramètres hydrauliques varient dans la région la transmissivité est de  $1.10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s, la perméabilité élevée est due à la présence de sables moins argileux (Dieng, 2017).

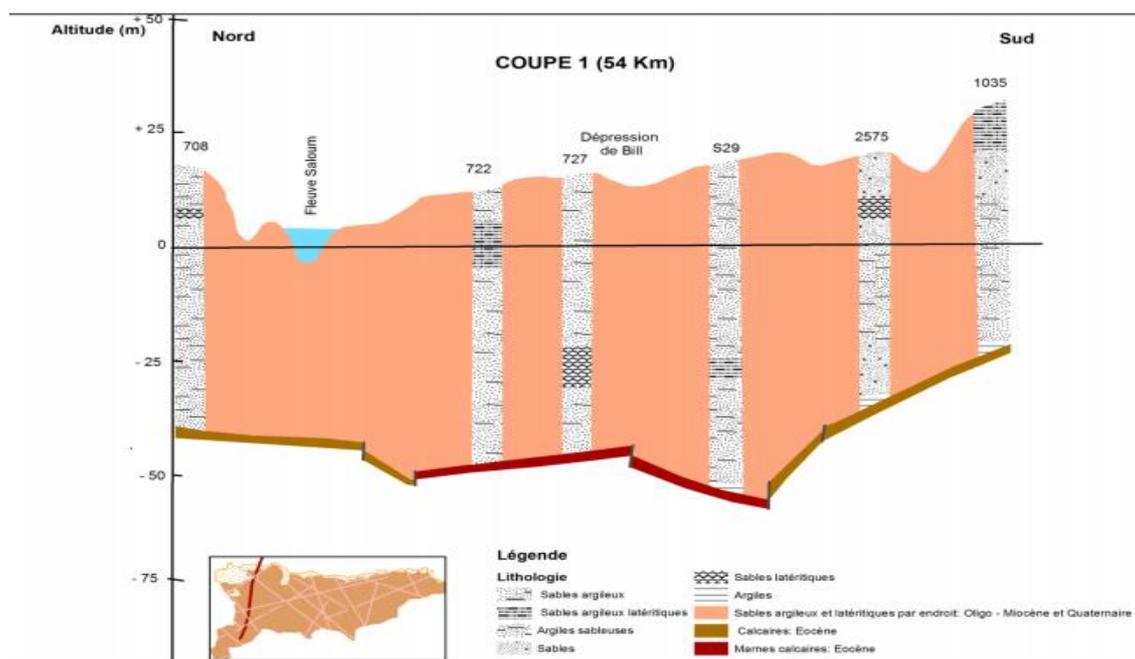


Figure 15: Lithologie de l'aquifère du Continental Terminal (Dieng, 2017)

#### 4.2.2 Exposition

L'exposition est la composante de base de l'étude de la vulnérabilité climatique (GIEC, 2014). Elle est appréciée par l'analyse des paramètres climatiques dans la région. Cette section présente les résultats d'analyses de l'évolution du régime pluviométrique, la distribution intra-saisonnière des précipitations, la variabilité interannuelle et intra-saisonnière, la tendance des indices de précipitations sur la période 1950-2017 sur l'ensemble de la région.

Ces indicateurs climatiques ont été utilisés par plusieurs auteurs pour caractériser la variabilité climatique actuelle et ses impacts sur les ressources en eau (ruissellement, infiltration, piézométrie, qualité etc.) (Sane et al., 2018; Bodian et al., 2016).

##### a. Indicateur du cumul interannuel des précipitations

Pour illustrer la variabilité interannuelle des précipitations par rapport à la période 1950-2017, quatre stations météorologiques ont été choisies. Il s'agit des stations de Fatick, Foundiougne, Sokone et Toubacouta qui sont bien réparties dans l'espace.

L'évolution des précipitations mensuelles cumulées fait ressortir trois périodes bien distinctes dans la région, caractérisant les grandes périodes climatiques qu'a connu le Sénégal (Figure 16) :

- Période humide 1950-1967 : correspondant à une phase globalement excédentaire,
- Période de sécheresse 1968-1998 : une période très déficitaire marquée correspondant à la phase de sécheresse qui a sévi dans toute l'Afrique subsaharienne,
- Période de retour des précipitations 1999–2017 : une reprise de la pluviométrie avec une forte variabilité interannuelle.

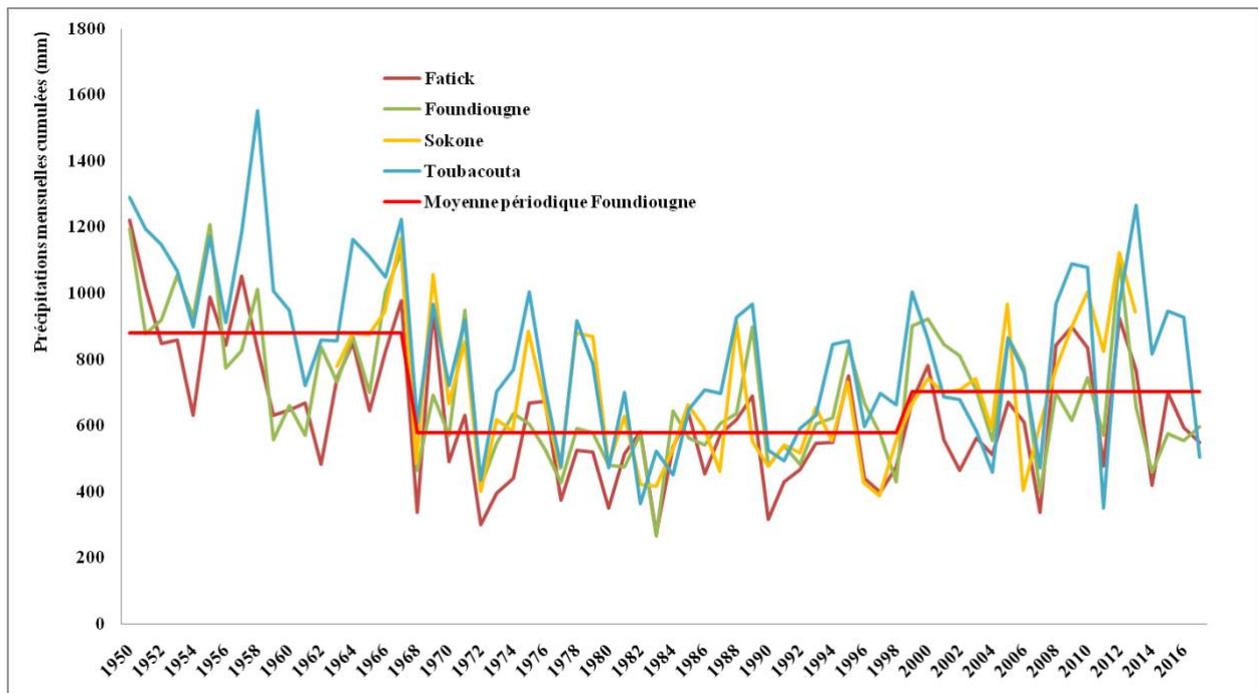


Figure 16: Variations interannuelles de la pluviométrie aux stations de Fatick (zone nord), Foundiougne (zone centre), Sokone (zone sud) et Toubacouta (zone sud) entre 1950 et 2017 (Source : ANACIM)

Le régime pluviométrique du Saloum est marqué par une forte variabilité spatiale et temporelle. La saison des pluies débute en juin et se termine en octobre, avec des pluies irrégulières suivies d'une longue saison sèche de novembre à mai, durant laquelle l'évaporation est très importante. Les précipitations diminuent du Sud vers le Nord. Elles sont respectivement égales en moyenne à 566 mm/an à Fatick et 766 mm/an à Toubacouta. La zone du projet est située entre deux zones climatiques : la zone nord soudanienne où les précipitations varient entre 550 et 650 mm/an (stations de Fatick, Foundiougne et Djilor) et la zone soudanienne où celles-ci varient entre 650 et 750 mm/an (stations de Sokone et Toubacouta) (Mara, 2010).

Dans la zone soudanienne, le cumul moyen annuel varie de 675 mm à la station de Sokone à plus de 760 mm à la station de Toubacouta. Il varie entre 500 mm et 650 mm dans les stations situées dans la zone nord soudanienne. Cela traduit une perte d'intensité de la mousson vers le nord, un phénomène commun très observé dans les régions tropicales.

Cette tendance est confirmée par de récentes études au Sénégal. Sagna et *al.*, (2016) ont trouvé pour la période 1940-2013 une pluviométrie moyenne annuelle de 638 mm à Fatick, 655 mm à Kaolack et 803 mm à Nioro.

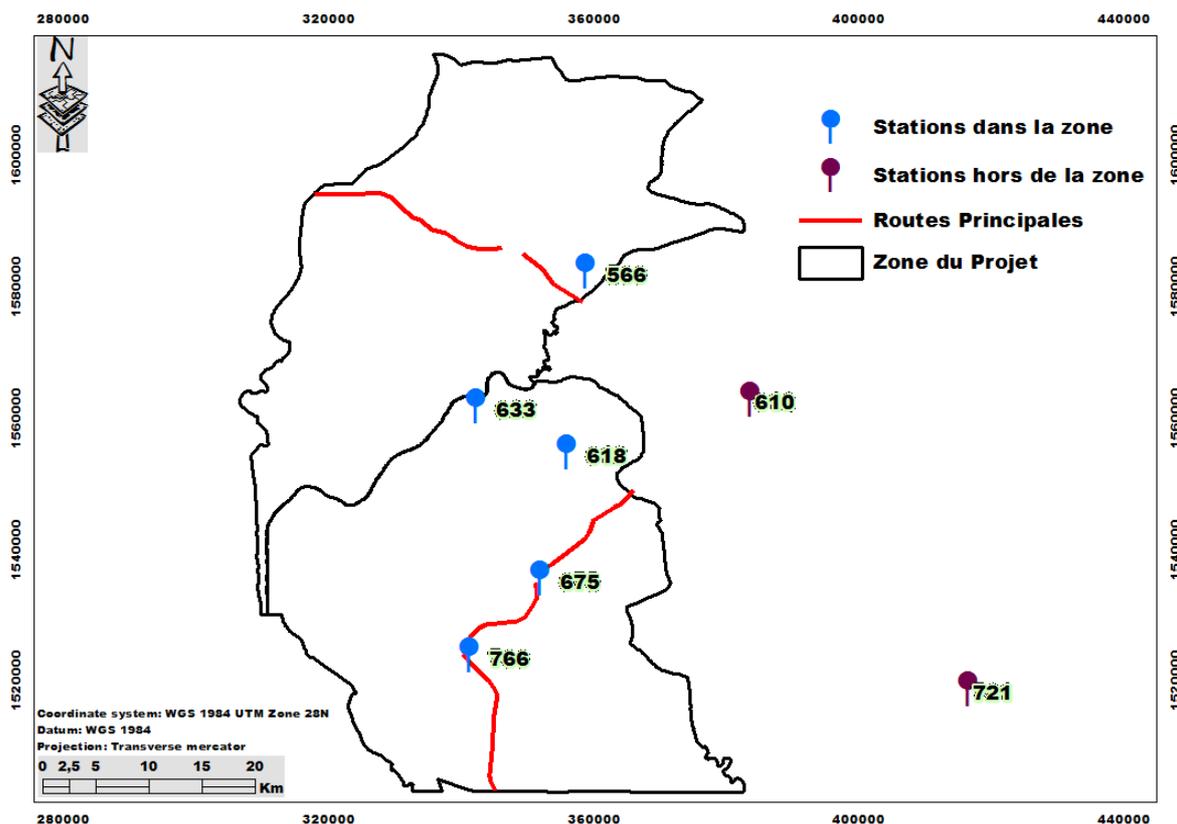


Figure 17: Pluviométrie moyenne annuelle pendant la période 1961-1990 dans la zone (Source: ANACIM)

En parallèle, les températures moyennes mensuelles montrent une variabilité durant la période 1991-2017. La température est élevée au cours de l'année avec une moyenne de 29°C, pouvant aller jusqu'à 39°C en avril, ce qui traduit la forte évapotranspiration dans le Saloum. Ce phénomène est régulier dans la zone ouest-africaine où les températures moyennes annuelles avoisinent les 29°C (Haziza, 2003).

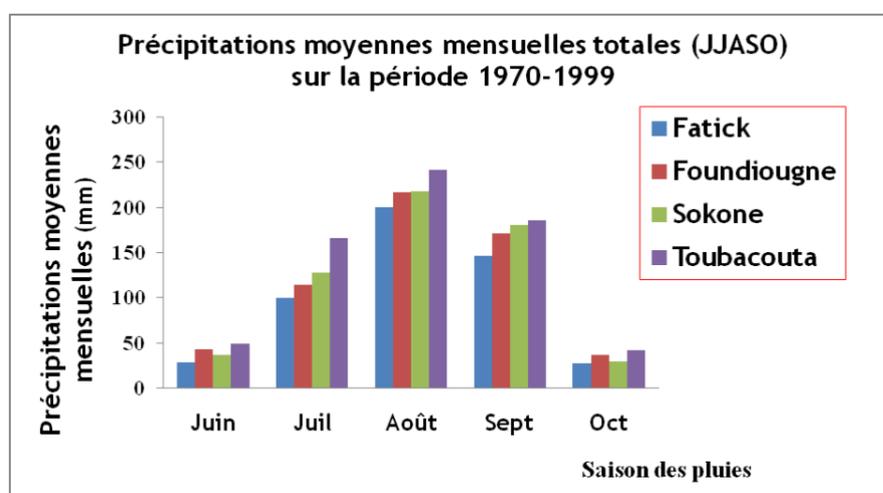
L'évapotranspiration élevée due à la longue saison sèche (novembre à mai) réduit considérablement la disponibilité des ressources en eau dans le Saloum (Tableau 8).

**Tableau 8:** Température (en °C) moyenne mensuelle maximale (Tmax), minimale (Tmin) et moyenne (Tmoy) à Fatick sur la période 1991-2017 (Source : ANACIM)

Mois	Tmax	Tmin	Tmoy
Janvier	34.1	16.8	25.5
Février	36.3	18.2	27.2
Mars	38.3	19.5	28.9
Avril	39.3	20.4	29.9
Mai	38.9	22.0	30.4
Juin	36.7	24.1	30.4
Juillet	34.4	24.9	29.6
Août	33.0	24.7	28.9
Septembre	33.1	24.5	28.8
Octobre	35.2	23.9	29.6
Novembre	36.7	20.2	28.5
Décembre	34.8	17.6	26.2
Moyenne annuelle	35.9	21.4	<b>29</b>

#### b. Précipitations moyennes mensuelles (JJASO) 1970–1999

La variation des précipitations mensuelles durant la période de sécheresse (1970–1999) montre une forte diminution de la pluviométrie durant cette période, atteignant jusqu'à 200 mm à Fatick et 250 mm à Toubacouta pendant le mois d'août. Cette forte diminution des précipitations a eu des conséquences sur la disponibilité et la qualité des ressources hydriques dans le Saloum (Figure18).



**Figure 18:** Précipitations moyennes mensuelles totales (JJASO) sur la période 1970-1999 (source: ANACIM)

### **c. Indices de Pluies Standardisées (IPS)**

L'IPS permet de synthétiser l'information et de visualiser l'évolution des anomalies des séries pluviométriques sur une longue période (Descroix, et al., 2015). Cet indice est calculé sur 12 mois et spatialisé pour les quatre stations météorologiques sur la période 1950–2017.

L'analyse des anomalies a montré que le régime des précipitations moyennes annuelles a subi une modification durant la période 1950-2017 sur l'ensemble de la zone. Les précipitations ont augmenté au cours de la période humide 1950-1968. Une première diminution des précipitations a été constatée à la fin des années 60, puis une baisse sévère des précipitations au cours des années 1982-1984, et un retour amorcé depuis les années 2000 aux valeurs normales par rapport à la période humide avant 1970 avec une forte variabilité plus marquée à Sokone et Toubacouta. Les décennies 1980-1989 et 1990-1999 ont été marquées par des sécheresses plus persistantes à Fatick (Figure 19).

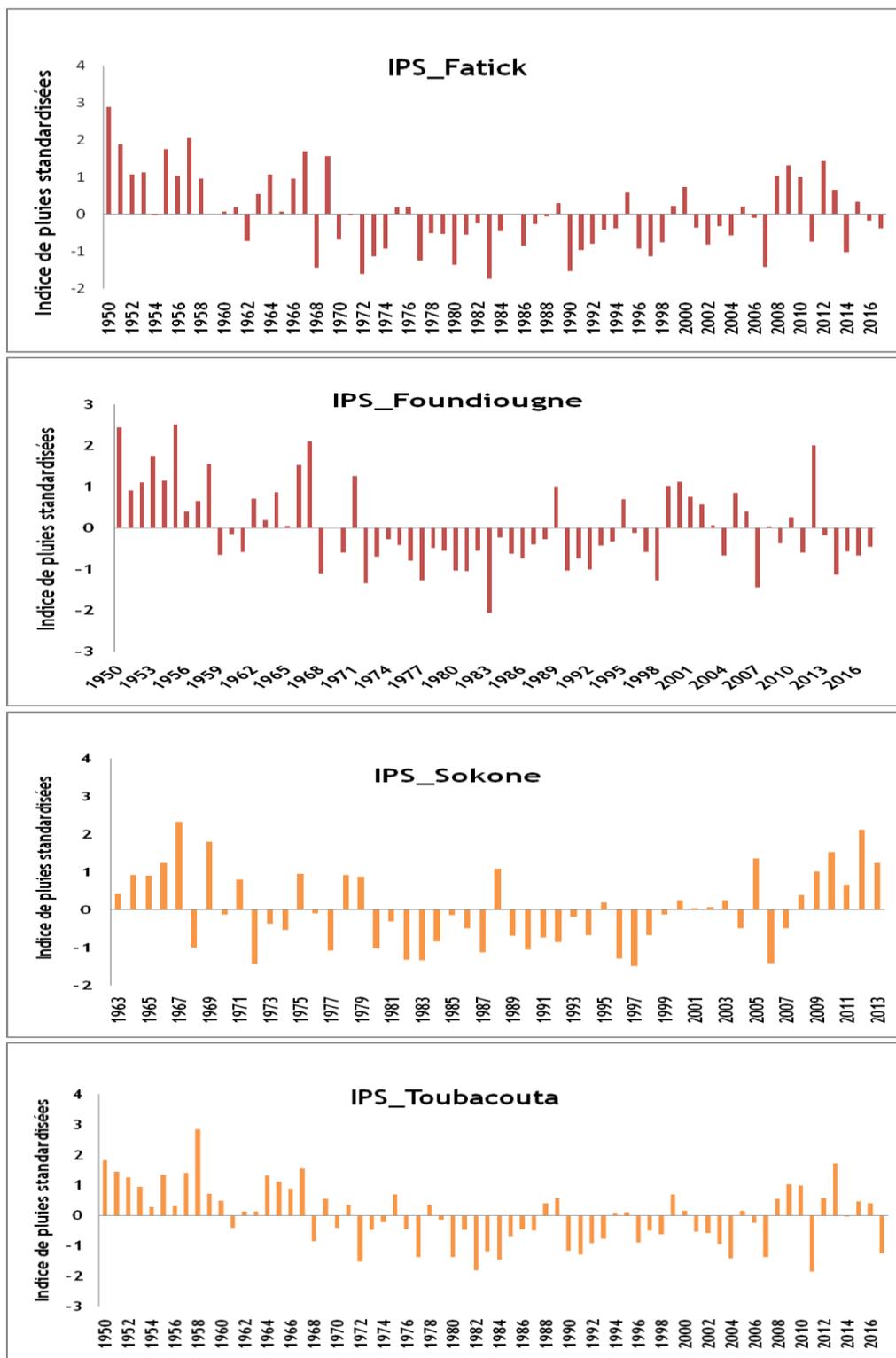


Figure 19: Indices de pluies standardisées Fatick, Foundiougne, Sokone et Toubacouta (source : ANACIM)

## Conclusion partielle

L'analyse des données de précipitations mensuelles dans la zone durant la période 1950-2017 a mis en exergue trois périodes bien distinctes: une période humide, de 1950 à 1968, au cours de laquelle les valeurs moyennes de la pluviométrie sont au-dessus de la normale climatique 1961-1990; une période sèche, de 1969 à 1999, pour laquelle la majorité des années sont déficitaires; et une période moyenne qualifiée de période de retour des pluies, de 1999 à 2017, dont les valeurs se rapprochent de la normale climatique 1961-1990. La distribution du cumul moyen mensuel des pluies est très variable au cours de la saison, le mois d'août étant le plus pluvieux. Une tendance à la hausse du pourcentage de jours consécutifs pluvieux s'observe depuis 2000 et devient plus marquée depuis 2006 dans la zone. Les précipitations mensuelles cumulées montrent une tendance à la hausse depuis 2005, mais pas de façon générale sur toute la zone.

La baisse de la pluviométrie durant la longue période de sécheresse allant jusqu'à 200 mm à Fatick et 250 mm à Toubacouta a été un évènement majeur qui a bouleversé l'équilibre hydro-climatique dans la région.

Ces variations temporelles et spatiales du régime des précipitations ont pu avoir un fort impact sur l'écoulement des eaux, la reconstitution des réserves d'eau de surface et la recharge des nappes. Il a aussi pu impacter l'approvisionnement en eau domestique et pour le bétail, la production agricole et l'environnement naturel et humain que nous allons évaluer dans le chapitre suivant à travers l'analyse de la sensibilité.

### 4.2.3 Sensibilité

La sensibilité est définie comme le degré d'affectation d'un système par une exposition. C'est-à-dire le point auquel les composantes d'un système ont susceptibles d'éprouver un ou des dommages en raison de l'exposition.

Pour étudier les impacts de la distribution saisonnière des précipitations et l'évolution interannuelle et intra-saisonnière sur les ressources en eau, des indicateurs de suivi ont été choisis suivant les caractéristiques hydrologique et hydrogéologique de la région.

Les indicateurs sont :

- La variation du niveau piézométrique (potentialités des réservoirs) ;
- La salinité de l'eau (qualité) ;
- Le taux de couverture en infrastructures hydrauliques ;
- Le taux de couverture des besoins en eau et quantité d'eau par habitant ;
- Les crues, les étiages et les écoulements de base.

#### 4.2.3.1 Évaluation de la sensibilité : eaux de surface

La sensibilité des ressources en eau de surface face à la variabilité du climat dans le Saloum est étudiée à partir des indicateurs de :

- Crues ;
- Étiages ;
- Écoulements de base.

Pour mieux évaluer ces indicateurs, nous allons traiter successivement :

- La morphométrie ;
- Le cumul pluviométrique ;
- Les volumes d'eau écoulés dans les bassins versants ;
- Les inondations ;
- Le bilan hydrique.

##### a. Morphométrie

La région compte plusieurs bassins versants de formes et de superficies différentes (Figure 20 et Tableau 9). La région du Sine-Saloum est considérée comme un vaste plateau tabulaire. Les altitudes sont relativement faibles. Elle se caractérise par un réseau hydrographique dense de larges vallées à très faibles pentes.

Les bassins versants sont de forme allongée avec un coefficient de compacité élevé ( $K_c > 1$ ).

Les superficies varient entre 50 et 13 000 km<sup>2</sup>. Le bassin de la Nema situé au Sud constitue le seul bassin pérenne dans la région.

Tableau 9: Caractéristiques morphométriques des bassins versants

Bassins Versants	Surface (km <sup>2</sup> )	Périmètre (km)	Kc	Longueur (km)	Largeur (km)	D (m)	IG (m/km)	Ds (m)
CarCar	7347	973.4	3.2	471.1	15.6	140	0.3	25.5
Saloum	13152	1390.0	3.4	675.5	19.5	63	0.1	10.7
Bandiala	215	147.8	2.8	70.9	3.0	54	0.8	11.2
Nema	50	30.92	1.22	10.22	4.9		3.19	
Diombos Centre	1605	380.9	2.7	181.6	8.8	51	0.3	11.3
Medina Djikoye	300	97.26	1.13	19.75	15.2		1.27	
Sine	9605	1110.4	3.2	537.3	17.9	69	0.1	12.6

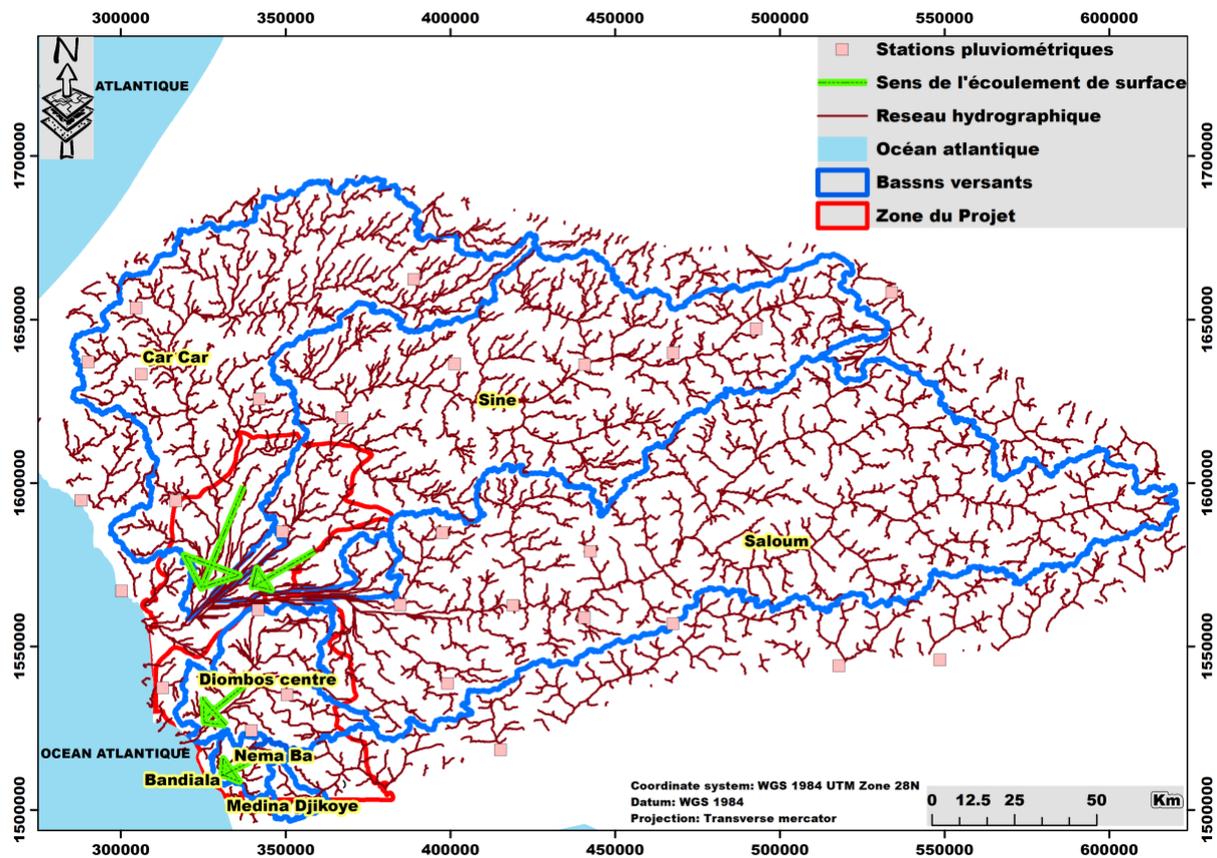


Figure 20: Délimitation des bassins versants et du réseau hydrographique

## b. Cumul pluviométrique

Les précipitations enregistrées à l'échelle des bassins versants sont un paramètre essentiel qui conditionne le cycle de l'eau (Mendy, 2010). La Figure 21 montre une variation interannuelle du cumul annuel des précipitations enregistré durant la période 1950- 2016. Les précipitations diminuent du Sud vers le Nord. Le déficit pluviométrique enregistré au niveau des bassins versants durant la période de sécheresse (1968-1998) a atteint son maximum en 1983 avec des précipitations annuelles de 246 mm, 251 mm, 322 mm, 416 mm et 518 mm respectivement dans les bassins versants du Sine, du Car Car, du Saloum, du Diombos Centre et du Bandiala. Depuis 2000, un retour des précipitations est noté sur l'ensemble des bassins.

Ces résultats ont permis de calculer les volumes d'eau précipités et écoulés à l'exutoire de chaque bassin et ainsi d'appréhender leur impact sur les écoulements et l'infiltration d'eau.

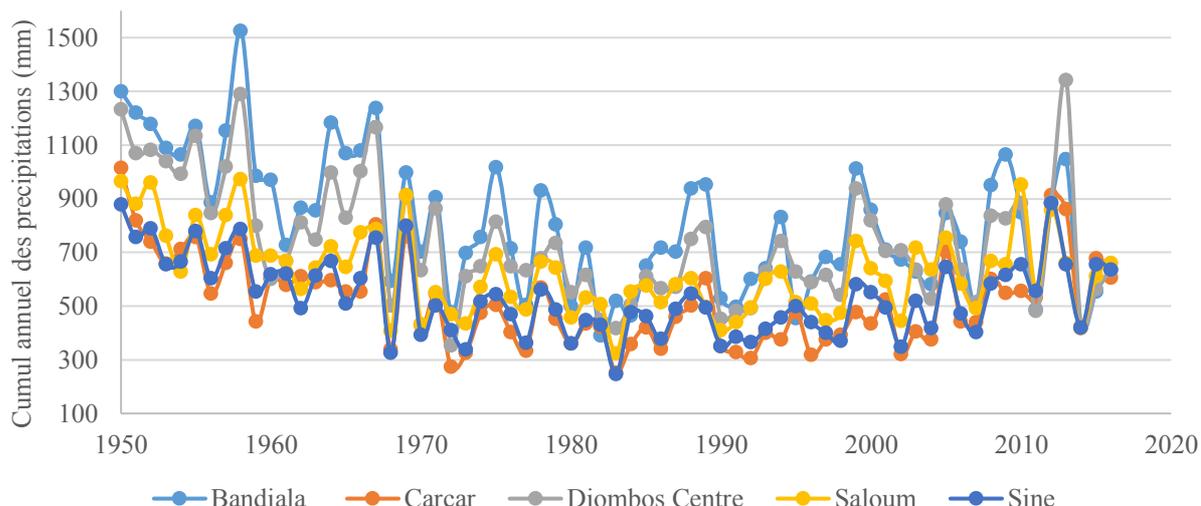


Figure 21: Cumul annuel des précipitations dans les bassins versants

### c. Volumes d'eau précipités

Les volumes précipités à l'échelle des bassins versants durant la période 1950-2016 varient entre  $0,1 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  dans le Bandiala et  $12,8 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  dans le Saloum. La moyenne pondérée du volume précipité varie suivant les bassins et est fonction de la surface des bassins. Elle est de l'ordre de  $0,2 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  dans le Bandiala et de  $8,1 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  dans le Saloum. Ces résultats montrent des disparités suivant les différentes périodes climatiques qu'a connus la région.

Tableau 10: Statistique descriptive du volume d'eau précipité dans les bassins versants ( $10^9 \text{ m}^3$ )

	Bandiala	Car Car	Diombos Centre	Saloum	Sine
<b>Moyenne</b>	0.2	3.7	1.2	8.1	5.1
<b>Ecart-type</b>	0.1	1.1	0.4	1.9	1.3
<b>Maximum</b>	0.3	6.7	2.2	12.8	8.5
<b>0.75</b>	0.2	4.4	1.4	9.1	5.9
<b>Médiane</b>	0.2	3.5	1.1	8.0	4.9
<b>0.25</b>	0.1	2.9	0.9	6.7	4.0
<b>Minimum</b>	0.1	1.8	0.6	4.2	2.4
<b>Coefficient de variation</b>	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3

La Figure 22 montre une forte baisse des volumes d'eau précipités durant la période de sécheresse. Cette baisse plus marquée dans les bassins de Bandiala et de Diombos Centre est la conséquence de la baisse continue des précipitations durant la période de sécheresse 1968-1998.

Les conséquences de cette diminution se font toujours ressentir aujourd'hui sur la disponibilité et la qualité des ressources hydriques. Elles se traduisent par une baisse drastique de la recharge de la nappe superficielle du CT, l'assèchement des cours d'eau, la dégradation de la qualité des terres et des ressources hydriques par la salinisation, et la baisse de la productivité agricole.

Ces résultats sont en accord avec les travaux de (Faye et Mendy, 2018) sur le bassin de la Gambie qui montrent une baisse de la disponibilité des eaux de surface en rapport à une variation interannuelle de la pluviométrie.

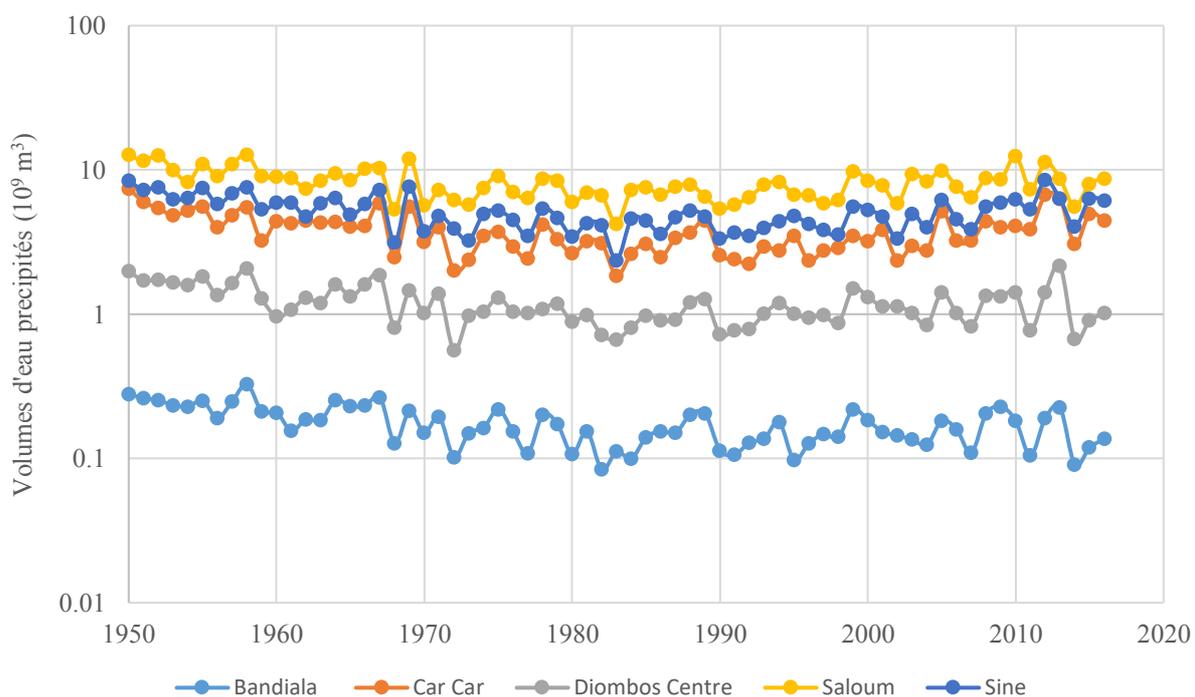


Figure 22: Volumes d'eau précipités suivant les bassins versants pour la période 1950-2016

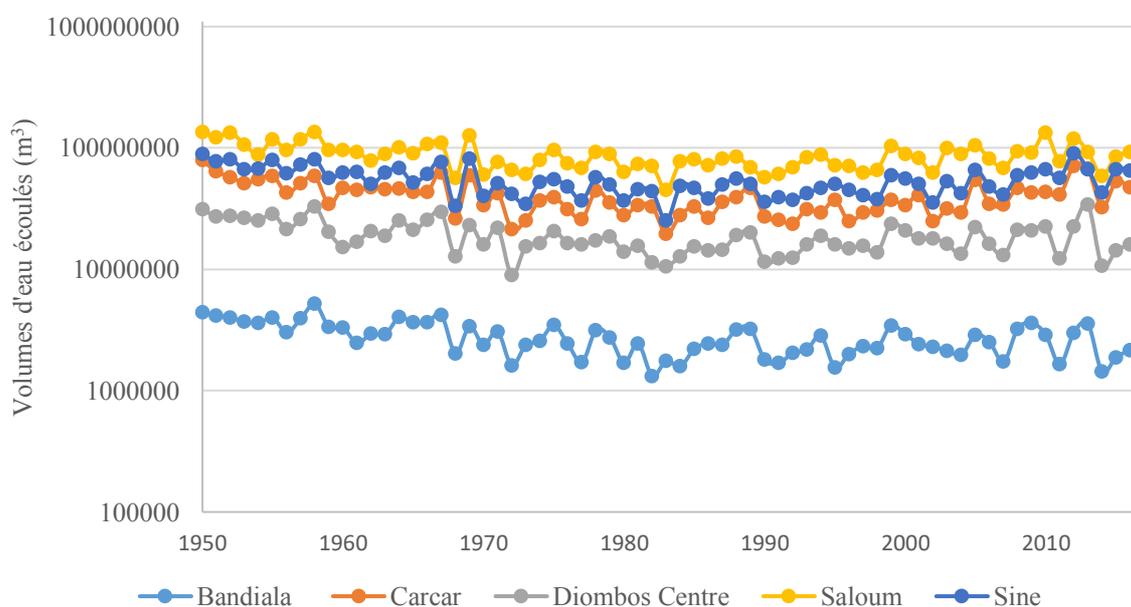
#### d. Volumes d'eau écoulés

Le Tableau 11 montre un faible volume d'eau écoulé dans le Bandiala avec une moyenne annuelle de 2 744 449 m<sup>3</sup>, qui va jusqu'à 86 977 203 m<sup>3</sup> en moyenne dans le Saloum sur la période 1950-2016.

*Tableau 11: Statistique descriptive des volumes d'eau écoulés dans les bassins versants (m3) 1950-2016*

	Bandiala	Car Car	Diombos Centre	Saloum	Sine
<b>Moyenne</b>	2744449.7	40311934.1	18760795.9	86977203.7	54478968.8
<b>Ecart-type</b>	852632.5	12903473.3	5715944.1	21271457.7	14605608.3
<b>Maximum</b>	5182834.5	78959689.3	34047673.2	135669496.9	89914149.4
<b>0.75</b>	3362725.0	46995735.4	22086211.4	96492507.3	63874580.0
<b>Médiane</b>	2570006.2	37166663.8	17169708.1	85074018.1	51834779.1
<b>0.25</b>	2084009.3	30811257.7	14692429.7	70832276.1	42610204.4
<b>Minimum</b>	1322387.5	19572469.8	8917187.3	44976857.2	25107948.4
<b>Coefficient de variation</b>	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3

La Figure 23 montre une augmentation des volumes d'eau écoulés depuis le début des années 2000 par rapport à la période de sécheresse au niveau des bassins versants du Saloum, du Sine et de Car Car. Cette augmentation est à mettre en lien avec la reprise des précipitations notée dans le Sahel depuis la fin des années 90. Cependant, des volumes d'eau importants sont perdus par écoulement vers l'océan atlantique et les zones de dépression et vers l'atmosphère par évapotranspiration.



*Figure 23: Volumes d'eau écoulés (m3) dans les bassins versants de 1950 à 2016*

Le Tableau 12 met en évidence les récurrences sèches et humides dans le Djikoye. Il montre qu'en année décennale (10 ans), les volumes d'eau écoulés sur le Djikoye en année humide ( $18.10^6 \text{ m}^3$ ) constituent plus du double qu'en année sèche ( $7.10^6 \text{ m}^3$ ) (Mendy, 2010). Cette contribution constitue un apport considérable en saison sèche pour la pratique de l'agriculture irriguée dans la zone sud. Cependant, en année décennale sèche (10 ans), les étiages peuvent atteindre  $0.22 \text{ m}^3/\text{s}$  correspondant à une baisse des apports continentaux.

*Tableau 12: Modules fréquentiels, volumes des apports et coefficient d'irrégularité à Médina Djikoye (Mendy, 2010)*

Médina Djikoye	Récurrences sèches					Média ne	Récurrences humides				
Fréquences	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99
Période de retour	100 ans	50 ans	20 ans	10 ans	5 ans	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Débit ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	0.12	0.14	0.18	0.22	0.27	0.39	0.52	0.6	0.66	0.75	0.8
Volumes d'eau écoulés ( $10^6 \text{ m}^3$ )	3.7	4.5	5.8	7	8.74	12.3	16.5	18.9	21	23.6	25.4
Indice $K_3= 2.68$ Indice d'irrégularité $R=4.12$											

Le même phénomène est observé dans le bassin de la Nema (Tableau 13). En effet, les écoulements sont très importants en période d'année humide allant jusqu'à  $53.10^6 \text{ m}^3$  en année décennale humide alors que les étiages peuvent atteindre  $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$  en année décennale sèche, traduisant une diminution des volumes d'eau écoulés dans le bassin.

*Tableau 13: Modules fréquentiels et volumes écoulés à Néma Ba (Mendy, 2010)*

Néma	Récurrences sèches					Média ne	Récurrences humides				
Fréquences	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.95	0.98	0.99
Période de retour	100 ans	50 ans	20 ans	10 ans	5 ans	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Débit( $\text{m}^3/\text{s}$ )	0.001	0.004	0.01	0.015	0.024	0.053	0.12	0.17	0.25	0.38	0.54
Volumes d'eau écoulés ( $10^6 \text{ m}^3$ )	3.16	6.31	6.32	4.73	3.78	3.35	17.7	53.33	155	613	1710

## e. Inondation dans la zone

La région est caractérisée par un réseau hydrographique dense avec le fleuve Saloum et ses nombreux bras et les nombreux cours d'eau. La géomorphologie de la zone ouest caractérisée par de faibles altitudes allant jusqu'à -8 m est favorable à des phénomènes de crues dévastatrices.

En 2005 la zone du Saloum a subi une importante inondation suite à une intense et longue mousson. Les villages proches du lit majeur du fleuve Saloum ont subi d'importants dégâts, notamment la destruction des habitations et des réserves agricoles poussant la population affectée à se déplacer, comme par exemple le cas du village de Goudem Sonar dans la commune de Djilor (Figure 24).

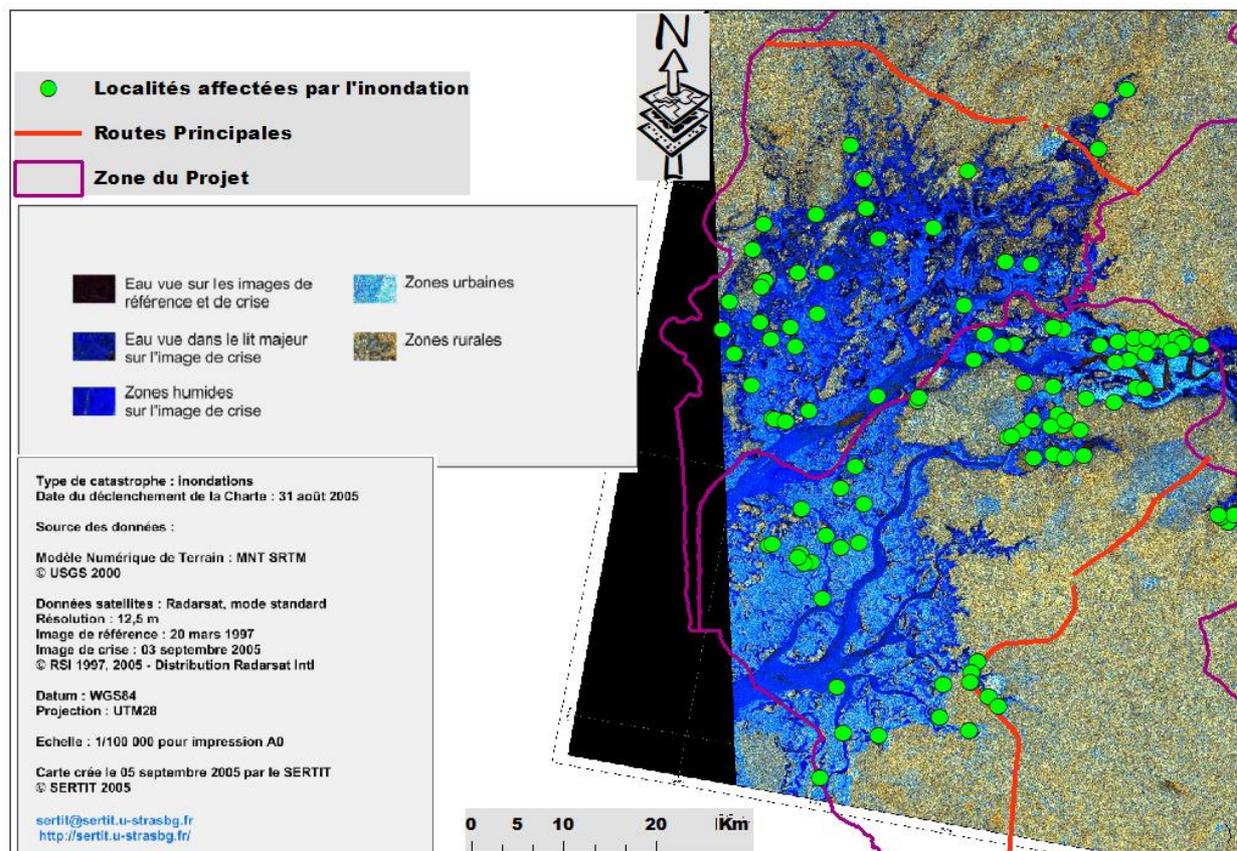


Figure 24: Inondation dans le fleuve Saloum en septembre 2005 (<http://sertit.u-strasbg.fr/>)

## f. Bilan hydrique

Le bilan hydrique est réalisé à l'échelle de la zone pour les périodes 1961-1990 et 1976-2005 pour évaluer l'impact relatif de la variabilité climatique sur le renouvellement du stock de la nappe du CT. Les tendances globales de la recharge et du volume d'eau infiltré ont été calculées pour les stations Fatick et Toubacouta.

- **Tendance climatique pour la moyenne annuelle 1976-2005 à Fatick**

Le Tableau 14 met en évidence la variation moyenne annuelle du stock de la nappe du CT en réponse à la variation des paramètres climatiques pour la période 1976-2005 par rapport à la normale climatique de référence 1961-1990. Les résultats montrent une tendance à la baisse du volume d'eau

infiltré (-23.5 mm<sup>3</sup>/an) et de la recharge (-5 mm/an). Cette baisse est la conséquence d'une augmentation de la température de +0.3°C et d'un déficit pluviométrique de -1.8% par rapport à la période de référence.

**Tableau 14:** Moyenne annuelle des paramètres climatiques sur la période 1976-2005 par rapport à la période de référence 1961-1990 à Fatick

Paramètres hydro-climatiques		Moyenne annuelle 1961-1990	Moyenne annuelle 1976-2005	Tendance
Température	°C	27.1	27.4	+0.3
Précipitations	mm	613	602	-1.8%
ETP	mm	699	705	+6
Recharge	mm	68	63	-5
Volume d'eau infiltré	mm <sup>3</sup>	310	286.5	-23.5

- **Tendance climatique pour la moyenne annuelle 1976-2005 à Toubacouta**

Le Tableau 15 montre la comparaison des moyennes annuelles de 1976-2005 par rapport à la période de référence 1961-1990. Les résultats montrent qu'une augmentation moyenne annuelle de +0.3°C et un déficit pluviométrique moyen annuel de -0.9% par rapport à la période de référence ont eu comme conséquences une baisse de la recharge de -5 mm/an et du volume infiltré de -22 mm<sup>3</sup>/an, ainsi qu'une augmentation de l'évapotranspiration de +6 mm/an pour la période 1976-2005. Sous l'effet de la variabilité des précipitations, le stock de la nappe du CT a fortement diminué dans le Saloum durant la période de sécheresse. Ainsi, de nombreux forages ont vu le jour durant cette période pour satisfaire la demande en eau.

**Tableau 15:** Moyenne annuelle des paramètres climatiques sur la période 1976-2005 par rapport à la période de référence 1961-1990 à Toubacouta

		Moyenne annuelle 1961-1990	Moyenne annuelle 1976-2005	Tendance
Température	°C	26.9	27.2	+0.3
Précipitations	mm	711	704	-0.9%
ETP	mm	694	700	+6
Recharge	mm	110	105	-5
Volume d'eau infiltré	mm <sup>3</sup>	497	475	-22

Un bilan décennal a été établi en prenant comme référentiel la station de Nioro du Rip pour sa position centrale dans la zone du Saloum. L'ETP de cette station et les pluies mensuelles moyennes calculées pour l'ensemble de la zone ont été considérées (DGP, 2016) (Tableau 16).

L'analyse montre une reconstitution de la réserve suite aux bonnes pluies des mois de juillet à septembre pour la décennie 1961-1970 environ 143.3 mm. Les décennies 1971-1980 et 1981-1990 sont marquées par une diminution des réserves allant jusqu'à 0.3 mm due à un fort déficit

pluviométrique. Depuis la période 1991-2000, on note une lente reconstitution des réserves des nappes avec 28.7 mm et 109.4 mm pour la dernière décennie 2001-2010 (DGPRES, 2016).

Tableau 16: Bilan hydrique mensuel détaillé par décennie de 1961-70 à 2001-2010 (DGPRES, 2016)

Bilan 1961-1970	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Moy. An.
P Moy 1961-1970	0.3	0.28	0	0.13	1.04	57.44	168.35	271.01	206.7	80.14	3.63	0.06	789.08
ETP Moy 1961-1970	163.3	170.3	218.1	222.6	218.6	182.0	148.4	136.6	137.8	145.0	155.8	156.2	2054.7
ETR (mm)	0.3	0.28	0	0.13	1.04	57.44	148.4	136.6	137.8	80.14	3.63	0.06	565.8
P-ETP (mm)	-163.0	-170.0	-218.1	-222.5	-217.6	-124.5	20.0	134.4	68.9	-64.9	-152.2	-156.2	-1265.6
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	20	100	100	35.1	0	0	0
Réserve (mm)	0	0	0	0	0	0	0	74.4	68.9	0	0	0	143.3
<b>Bilan 1971-1980</b>	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Moy. An.
P Moy 1971-1980	1.58	0	0.06	0	3.51	51.14	150.81	223.29	177.45	32.74	4.07	2.3	646.95
ETP Moy 1971-1980	160.0	169.7	204.6	215.3	217.6	180.4	150.5	139.5	142.4	156.2	163.4	157.5	2057.1
ETR (mm)	1.58	0	0.06	0	3.51	51.14	150.5	139.5	142.4	32.74	4.07	2.3	527.9
P-ETP (mm)	-158.5	-169.7	-204.5	-215.3	-214.1	-129.3	0.3	83.8	35.1	-123.5	-159.3	-155.2	-1410.2
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	0.3	84.0	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Réserve (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	19.1	0	0	0	19.1
<b>Bilan 1981-1990</b>	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Moy. An.
P Moy 1981-1990	0.3	1.29	0.05	0	1.79	50.81	136.49	224.65	148.83	41.15	0.31	1.14	606.81
ETP Moy 1981-1990	147.2	158.1	199.0	204.3	206.7	168.7	144.5	134.3	139.0	150.2	159.4	151.1	1962.4
ETR (mm)	0.3	1.29	0.05	0	1.79	50.81	136.49	134.3	139.0	41.15	0.31	1.14	506.6
P-ETP (mm)	-146.9	-156.9	-198.9	-204.3	-204.9	-117.8	-8.1	90.4	9.9	-109.0	-159.1	-150.0	-1355.6
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	0	90.4	100	0	0	0	0
Réserve (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0.3
<b>Bilan 1991-2000</b>	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Moy. An.
P Moy 1991-2000	0.05	1.02	0.02	0.01	3.79	36.27	146.03	237.28	156.35	57.63	1.31	0.6	640.36
ETP Moy 1991-2000	150.1	161.3	199.6	209.7	209.7	175.9	142.4	133.3	135.2	146.0	159.1	155.4	1977.7
ETR (mm)	0.05	1.02	0.02	0.01	3.79	36.27	142.4	133.3	135.2	57.63	1.31	0.6	511.6

P-ETP (mm)	-	-	-	-	-	-	-	3.7	103.9	21.1	-88.4	-	-	-
	150.1	160.3	199.6	209.7	205.9	139.6						157.8	154.8	1337.3
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	3.7	100.0	100	0	0	0	0	0
Réserve (mm)	0	0	0	0	0	0	0	7.6	21.1	0	0	0	0	28.7
<b>Bilan 2001-2010</b>	Janv.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept	Oct.	Nov.	Déc.	Moy. An.	
P Moy 2001-2010	1.64	0.61	0	0	0.76	57.12	150.82	250.28	222.13	42.83	1.16	0.63	727.98	
ETP Moy 2001-2010	160.3	162.6	211.4	214.1	216.7	166.8	143.7	137.4	132.8	148.4	163.3	161.5	2018.9	
ETR (mm)	1.64	0.61	0	0	0.76	57.12	143.7	137.4	132.8	42.83	1.16	0.63	518.6	
P-ETP (mm)	-	-	-	-	-	-	7.2	112.9	89.3	-	-	-	-	-
	158.7	162.0	211.4	214.1	215.9	109.6				105.5	162.2	160.9	1290.9	
RFU (mm)	0	0	0	0	0	0	7.2	100	100	0	0	0	0	0
Réserve (mm)	0	0	0	0	0	0	0	20.1	89.3	0	0	0	0	109.4

### Conclusion partielle

L'analyse des indicateurs de crues, étiages et écoulements avait pour objectif de comprendre les impacts potentiels de l'évolution temporelle des paramètres climatiques.

Les impacts relatifs à la variabilité climatique ont été évalués sur deux périodes climatiques, 1961-1990 et 1976-2005. Le bilan hydrologique annuel et l'évolution saisonnière des volumes d'eau écoulés à l'échelle des bassins versants ont été évalués dans un premier temps. Ensuite, l'analyse du bilan hydrique à l'échelle de la zone a permis d'évaluer la variation du stock de la nappe du CT pour la période 1976-2005.

Le bilan hydrique à l'échelle de la zone montre que la baisse du volume d'eau infiltré est due à la combinaison de différents facteurs climatiques (diminution des précipitations et augmentation de l'ETP).

En parallèle, le bilan hydrologique à l'échelle des bassins versants a montré que la variation des écoulements est expliquée en grande partie par la variation des précipitations. La période de sécheresse est marquée par une baisse des écoulements et on note une lente reconstitution des écoulements dans la région depuis 2000 corrélée avec le retour des précipitations. Ces importants volumes d'eau peuvent être récupérés et stockés dans des bassins de rétention pour valoriser l'activité agricole et l'irrigation dans la région.

La baisse des précipitations peut entraîner des étiages importants et l'augmentation des précipitations peut être à l'origine de crues dévastatrices, à l'instar des inondations de 2005, pouvant entraîner des dégâts matériels importants.

La disponibilité des ressources en eau de surface reste faible dans la zone. Ce constat s'explique d'une part par l'irrégularité du régime de distribution des pluies depuis les années 1970, et d'autre part par l'importante évapotranspiration qui entraîne une perte d'eau considérable. La qualité des eaux de surface est mauvaise dans la région, due essentiellement à la salinisation qui s'est accentuée pendant la période de sécheresse. Cette salinisation des eaux de surface freine considérablement le développement d'activités génératrices de revenus dans la région.

#### 4.2.3.2 *Évaluation de la sensibilité : eaux souterraines*

Les impacts potentiels de la variabilité climatique sur les eaux souterraines sont étudiés sur l'aquifère du CT. Celui-ci est directement influencé par la variabilité des précipitations. Il demeure la source principale (95 %) de l'approvisionnement en eau potable dans la région et sa qualité est constamment menacée par la salinité.

La sensibilité de la nappe du CT face à la variabilité du climat est évaluée par le suivi de ces indicateurs :

- Variation de la piézométrie ;
- Qualité ;
- Inventaire des ouvrages hydrauliques ;
- Taux de couverture des besoins en eau.

##### 4.2.3.2.1 *Variation de la piézométrie*

Pour évaluer cet indicateur, nous allons traiter successivement :

- a. Le niveau statique ;
- b. La morphologie de la piézométrie ;
- c. L'épaisseur de l'aquifère.

##### **a. Profondeur de l'eau**

Les niveaux statiques par rapport au sol mesurés en Mai 2018 varient de 1 à plus de 30 m. Les faibles profondeurs (<10m) sont localisées au Sud-ouest et dans la zone estuaire du fleuve Saloum. Les profondeurs sont également faibles le long des cours d'eau du Djikoye et de la Nema. En revanche, la nappe devient de plus en plus profonde au Nord, où elle est supérieure à 20 m de profondeur à Diakhao. Les profondeurs importantes rendent très difficile l'accès à l'eau dans ces zones (Figure 25).

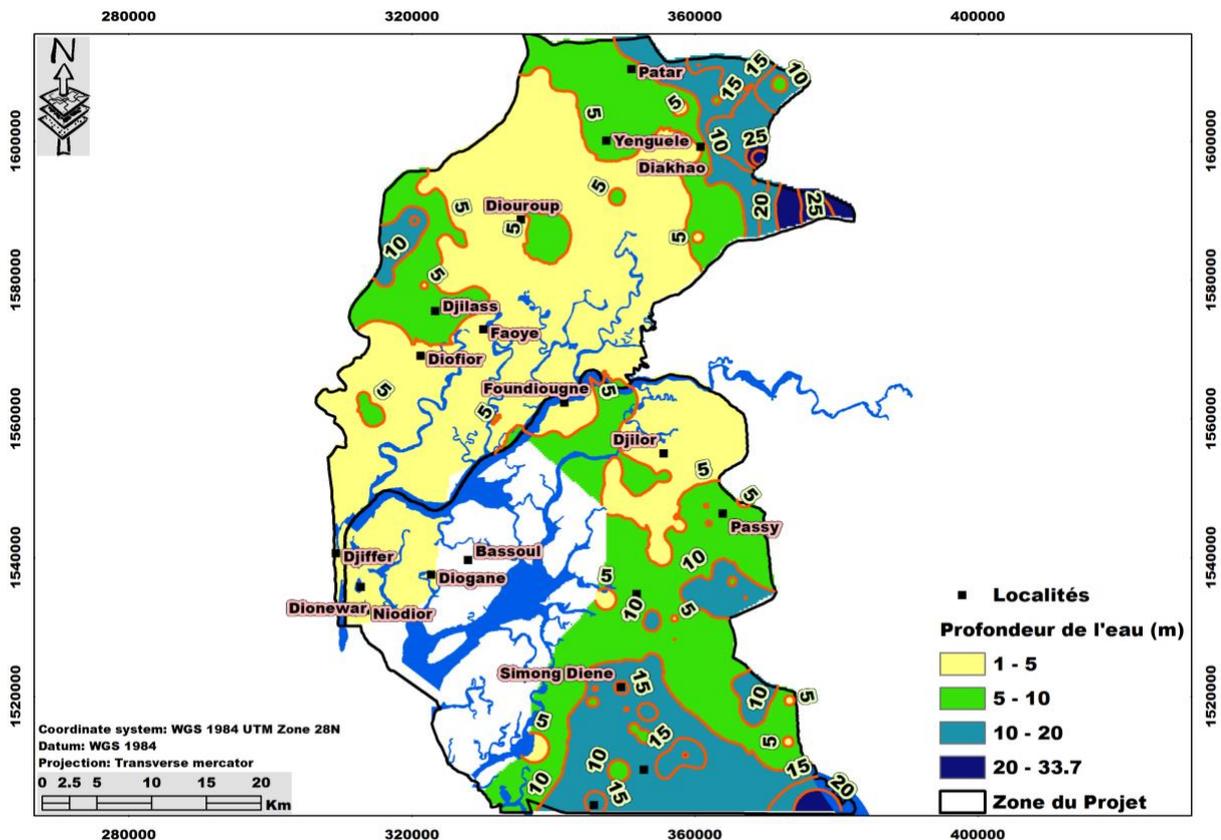


Figure 25: Profondeur de l'eau par rapport au sol mesurée en mai 2018

## b. Piézométrie

La piézométrie est obtenue par différence de la topographie de la région obtenue à partir d'un MNT corrigé et du niveau statique mesuré. L'aquifère du CT étant un aquifère libre, le toit de l'aquifère correspond à la topographie.

La piézométrie varie de +33 m au Sud à Keur Samba Gueye à -10 m au NE à Diakhao.

La restitution de la piézométrie a permis de définir la morphologie de l'écoulement souterrain qui est gouverné par un dôme piézométrique à +33 m dans la zone Sud à Keur Samba Gueye. Ce dôme contrôle l'écoulement global du système vers toutes les directions et assure un débit de base des bassins de la Nema et de Djikoye en période sèche. La piézométrie diminue jusqu'à -10 m par rapport au 0 IGN vers le Nord, traduisant le tarissement des puits remarqué au Nord qui réduit considérablement les potentialités de la nappe du CT (Figure 26).

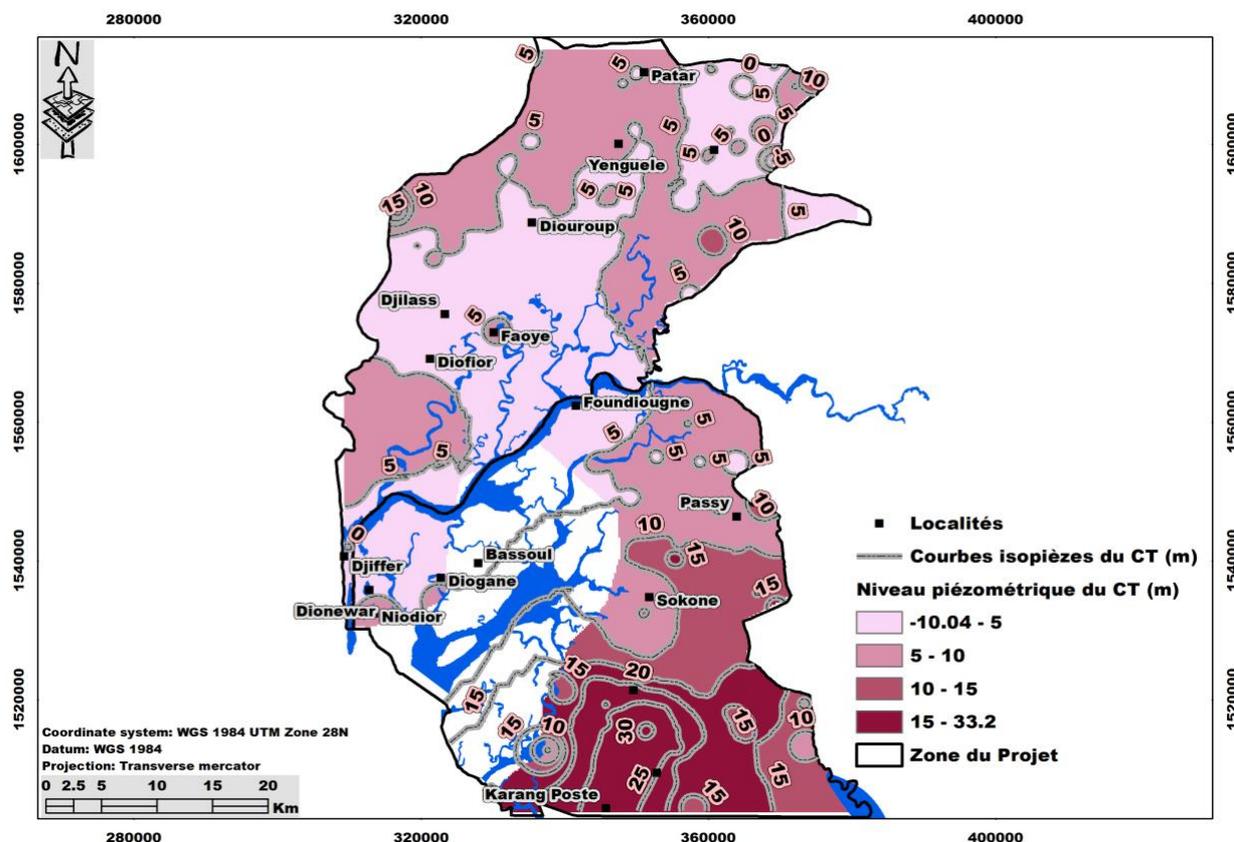


Figure 26: Piézométrie de la nappe du CT mesurée en Mai 2018

La piézométrie de la nappe du CT mesurée en 2000 met en évidence le dôme piézométrique sur l'axe Karang, Nioro Alassane Tall et Ndrané Escalé avec une altitude maximale de plus de 20 m et une zone plus basse parallèle au fleuve Saloum sur l'axe Djilor et Ndiamé avec des altitudes variant de 0 à -10 m (Faye et al, 2003).

La comparaison des piézométries mesurées en 2000 et en 2018 dans la zone du dôme montre une élévation du niveau de la nappe de plus de 10 m traduisant une augmentation du stock. Ceci s'expliquerait par le retour des précipitations dans la région depuis la dernière décennie.

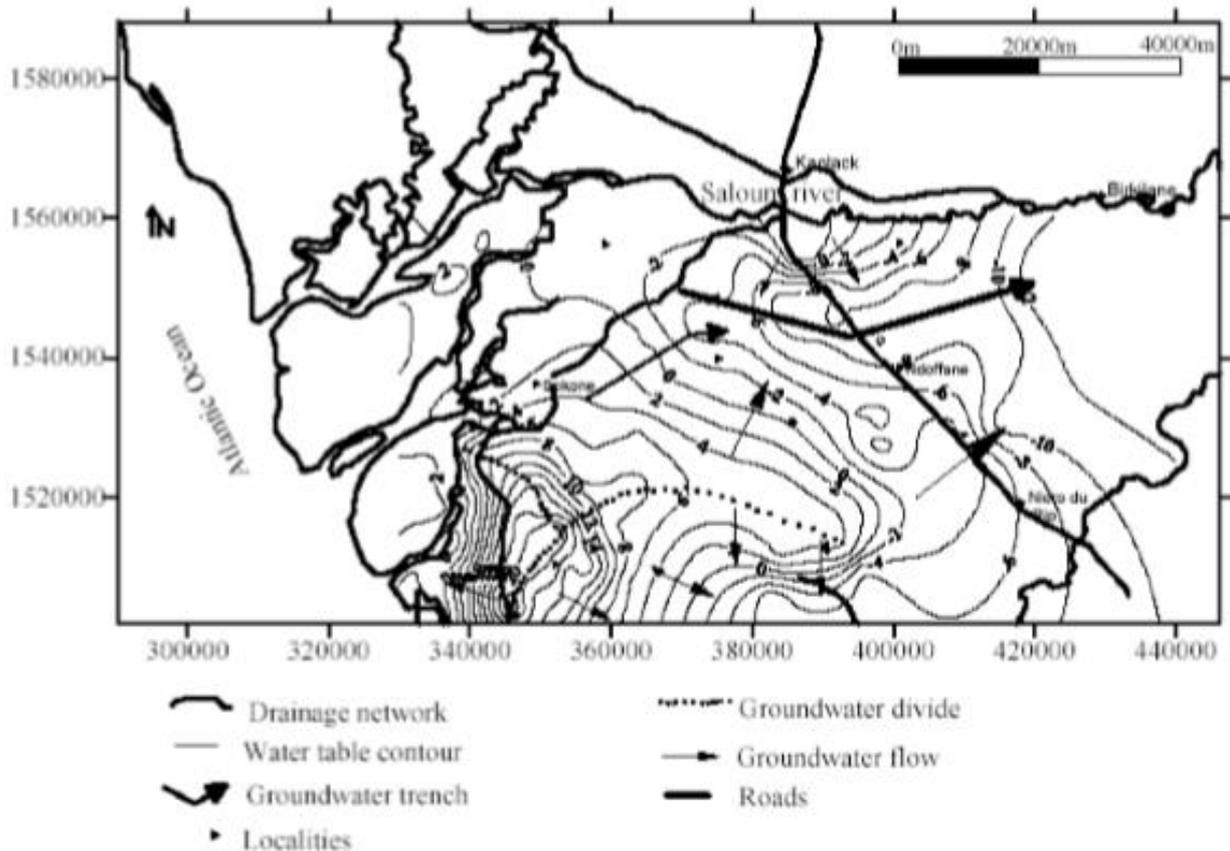


Figure 27: Piézométrie de la nappe du CT en avril 2000 (Faye et al., 2003)

### c. Épaisseur de l'aquifère

Les données du toit et du mur ainsi que la profondeur de l'eau ont été utilisées pour évaluer la puissance utile de l'aquifère dans la région.

Une coupe transversale orientée N-S sur 109 km a été réalisée. Elle traduit le fonctionnement du système aquifère partant de la zone de recharge (zone du dôme) à Patar Sine au Nord (Figure 28). La puissance utile de la nappe diminue vers le Nord, réduisant considérablement la disponibilité de la ressource dans cette zone. Le dôme piézométrique (+33 m) à Keur Samba Gueye contrôle l'écoulement global du système vers toutes les directions en fonction du régime pluviométrique. La qualité des eaux de la nappe du CT présente deux faciès : un faciès à eau douce qui occupe une bonne partie du département de Foundiougne et un faciès à eau salée localisé à Fatick.

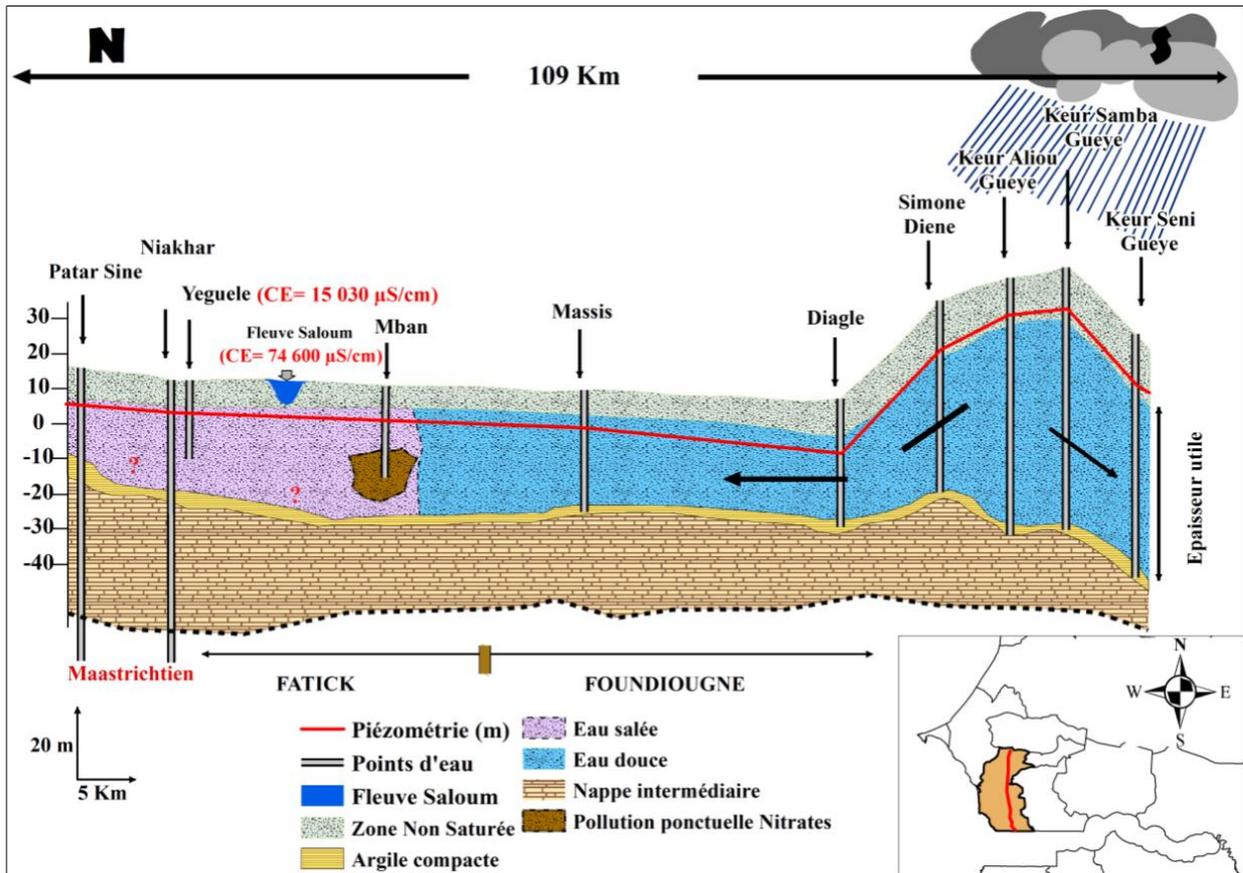


Figure 28: Coupe N-S montrant la variation de l'épaisseur utile de la nappe du CT

La coupe orientée SW-NE sur 60 km, allant de Diofor à Bacco montre une faible épaisseur utile du CT (-20 m), traduisant une faible disponibilité de la ressource (Figure 29). En plus de la rareté de la ressource, la qualité des eaux est mauvaise due à une présence de sels élevée traduite par une conductivité électrique très élevée allant jusqu'à 15 030  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à Yeguele qui rend l'eau impropre à la consommation humaine et à l'irrigation des cultures.

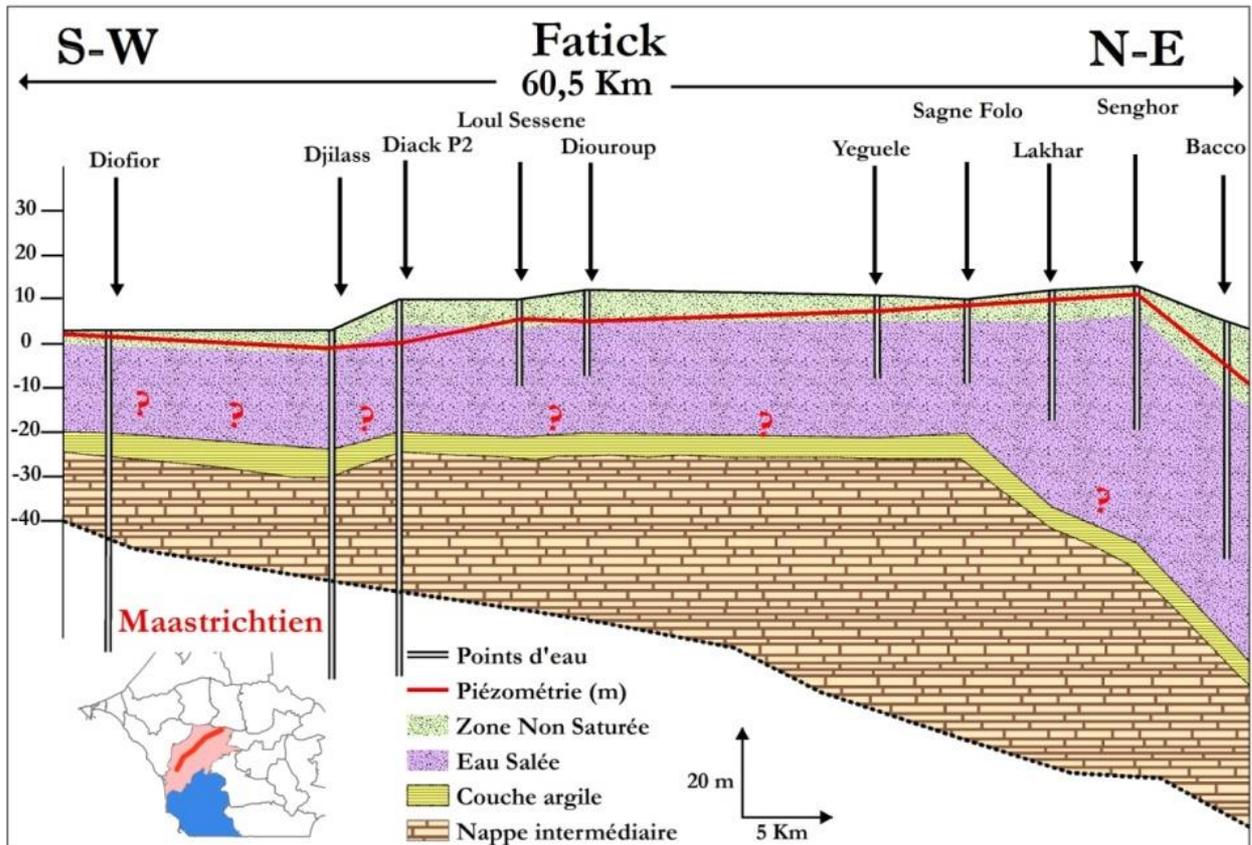


Figure 29: Coupe SW-NE montrant la salinité des eaux de la nappe du CT à Fatick

#### 4.2.3.2.2 Qualité

La vulnérabilité des ressources en eau se mesure par la disponibilité (quantité), mais aussi par la qualité. Cette section présente les résultats d'analyse de la qualité de l'eau de la nappe du CT réalisées par le Laboratoire d'hydrologie et d'hydrochimie de l'UCAD. Cependant, vu le caractère côtier de la zone, nous allons plus insister sur l'analyse de la salinité des ressources en eau. Les méthodes de caractérisation de la qualité de l'eau reposent sur la collecte et l'analyse en laboratoire des eaux souterraines pour déterminer les paramètres physiques et chimiques des eaux souterraines, permettant ainsi de classer l'échantillon dans un faciès chimique.

##### a. Caractéristiques physico-chimiques

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux ont été évaluées sur 269 forages et puits (ouvrages). Les paramètres *in situ* tels que le pH, la température et la conductivité électrique (CE) sont mesurés sur chaque ouvrage. Les paramètres physico-chimiques de la nappe du CT varient dans la région. Le pH varie de 4 à 9, avec une moyenne de 6.8 qui reflète l'acidité des eaux de la nappe. La conductivité électrique mesurée de la nappe varie de 0 à 15 030  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , et celle du fleuve Saloum varie de 74 600 à 160 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Les valeurs très élevées supérieures à 1 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  reflètent le caractère salé des eaux du fleuve et de la nappe. La température des eaux de la nappe est de 28 °C en moyenne, ce qui reflète le caractère superficiel de la nappe (Tableau 17).

Tableau 17: Physico-chimie des ressources en eau en mai 2018

Ressources	Variables	pH	T (°C)	CE (µs/cm)
Eaux souterraines de la nappe du CT N= 269	Min	4.1	24.8	0
	Max	8.7	36.8	15 030
	Moy	6.8	28.7	1 630
Eau du fleuve Saloum (Foundiougne)	Min	7.8	23.7	74 600
	Max	8.3	26.1	160 000
	Moy	8.03	24.5	104 400

Dans la zone, les faciès à eau douce se situent dans le département de Foundiougne, notamment dans les communes de Keur Saloum Diané, Niourou Alassane Tall et Keur Samba Gaye. Les faciès à eau saumâtre contenant du chlorure de sodium sont localisés au niveau du département de Fatick et le long du fleuve Saloum (Figure 30). Ces résultats attestent de la dégradation avancée de la qualité des eaux du CT à Fatick.

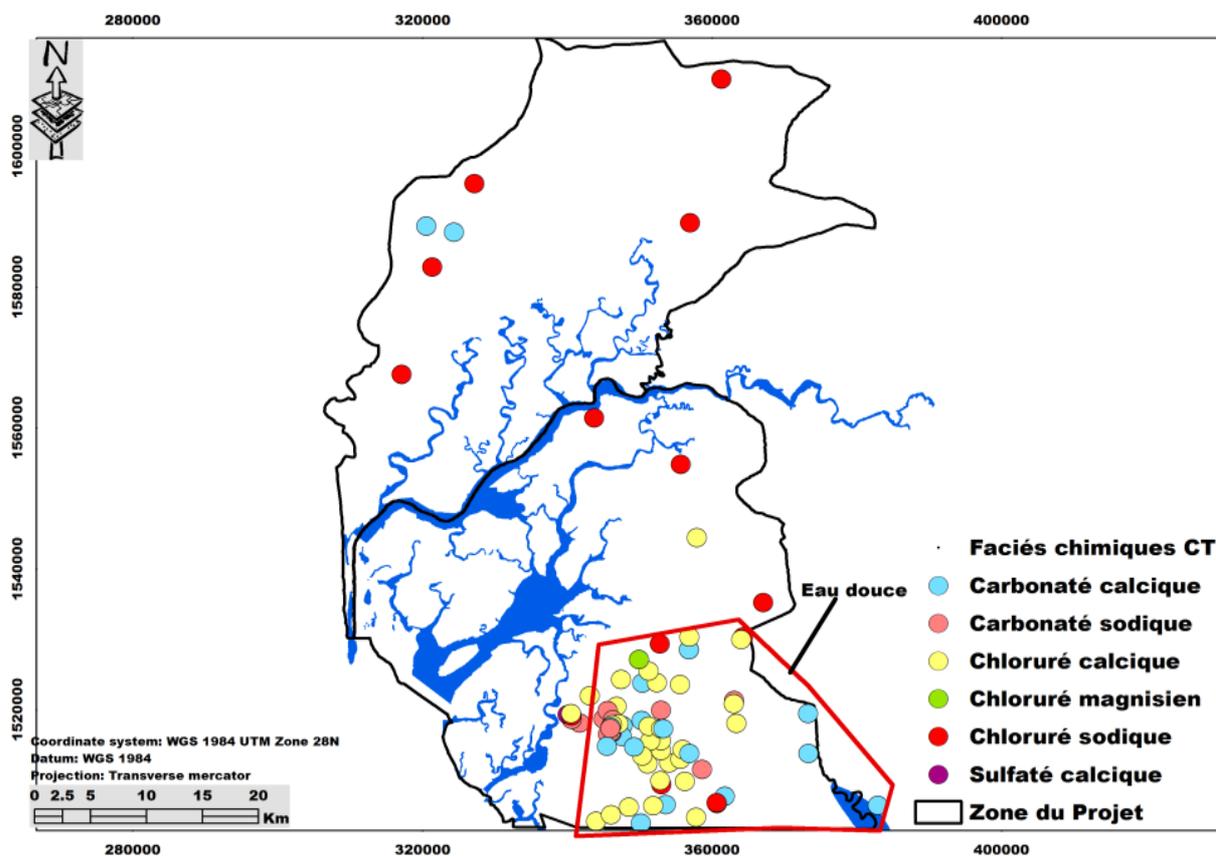


Figure 30: Spatialisation des faciès chimiques dans la zone du projet

## b. Pollution des eaux de la nappe par les nitrates

La vulnérabilité des zones de captage des eaux souterraines face à la pollution anthropique est évaluée par l'analyse des teneurs en nitrates.

Les teneurs en nitrates sont très élevées par endroit, allant jusqu'à 483 mg/l largement supérieures à la norme OMS (50 mg/l) traduisant une forte pollution ponctuelle de la nappe.

Ceci s'explique par les activités agricoles intenses et un assainissement défectueux mené autour des ouvrages hydrauliques qui sont en général des puits ouverts. Ainsi, les nitrates se retrouvent très facilement dans la nappe, par percolation des eaux de pluies pendant la saison des pluies par exemple. La consommation d'eau contaminée par les nitrates peut entraîner des maladies du foie comme des insuffisances hépatiques (Bah & Feuyom, 2016) (Figure 31).

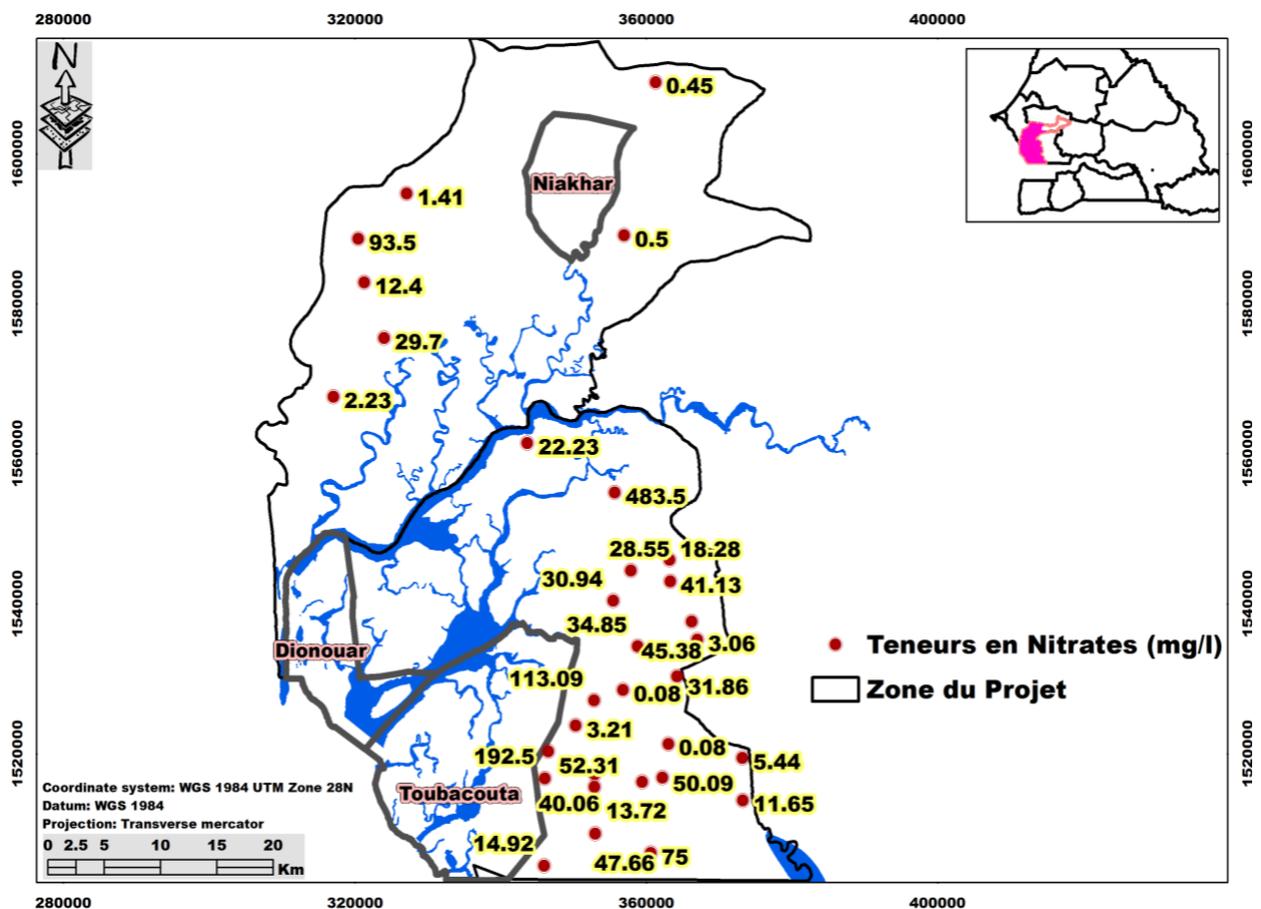


Figure 31: Teneurs en nitrates dans la nappe du CT en avril 2017

### c. Salinité des ressources en eau

Le fleuve Saloum se caractérise par une forte salinité qui augmente d'aval en amont, d'où le terme d'« estuaire inverse ». La particularité du Saloum est que, durant les hautes marées en été, le niveau de l'eau de l'estuaire devient inférieur par rapport à celui de la mer, favorisant ainsi l'intrusion des eaux salées dans le système (Mikhailov & Isupova, 2008).

La Figure 32 montre d'une part un suivi irrégulier de la salinité du fleuve Saloum depuis 1987, et d'autre part une corrélation entre la salinité et le régime des précipitations.

La salinité a fortement diminué durant la période excédentaire 1927-1968 diminuant jusqu'à 4 g/l avec des précipitations annuelles supérieures à 1000mm. Le fleuve a connu une hyper salinité ( $\geq 90$ g/l) durant la période de sécheresse (1969-1999) pendant laquelle les précipitations ont fortement diminué, et de manière continue ( $< 400$  mm). Cette hyper salinité accrue et continue du fleuve a eu des conséquences négatives qui se font toujours ressentir aujourd'hui sur la qualité des eaux de surface (estuaire inverse) et de la nappe superficielle (salinisation des points d'eau par appel d'eau salée).

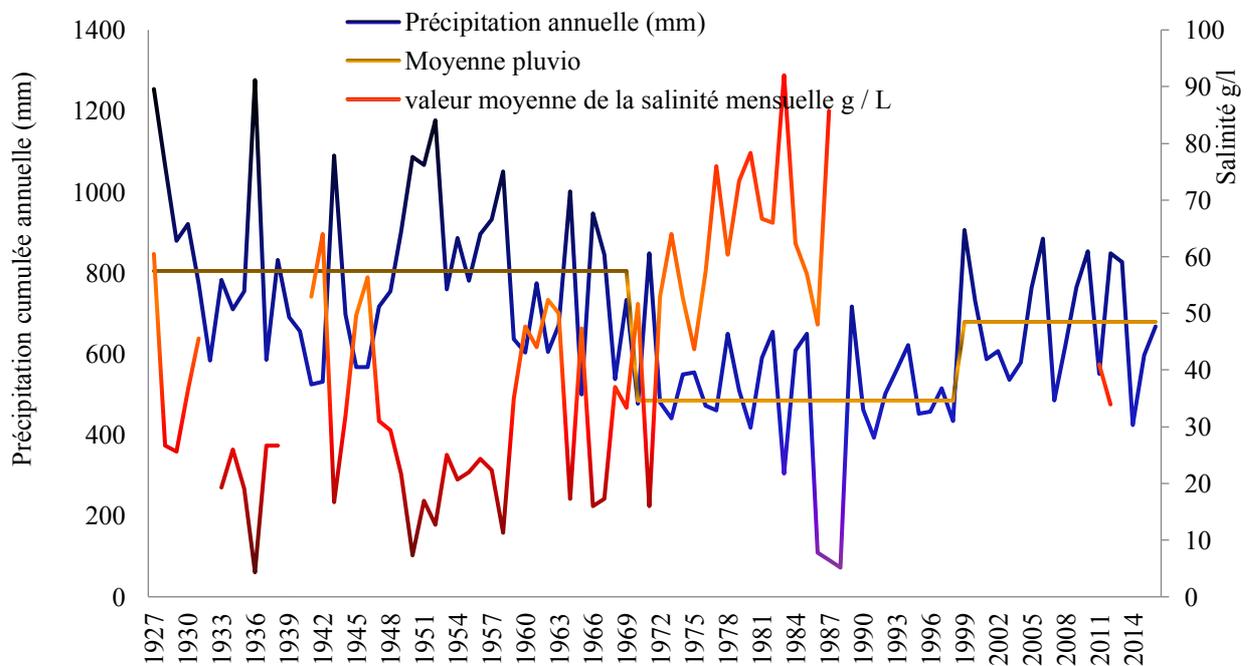


Figure 32: Salinité du fleuve Saloum à Kaolack (Dieng, 2017) modifiée de (1927-2016)

La Figure 33 met en évidence la configuration en estuaire inverse du fleuve Saloum. Le fleuve Saloum présente un gradient croissant de salinité de l'embouchure vers l'amont où elle reste en permanence supérieure à celle de l'eau de mer (35 g/l). Les risques majeurs dans ces zones à basse altitude sont d'une part la contamination saline de la nappe superficielle sous l'effet des pompages qui affecte durablement la qualité du stock d'eau douce (Ferrari & Point, 2003), et d'autre part la salinisation des terres agricoles qui deviennent impropres à l'agriculture (FAO, 2005).

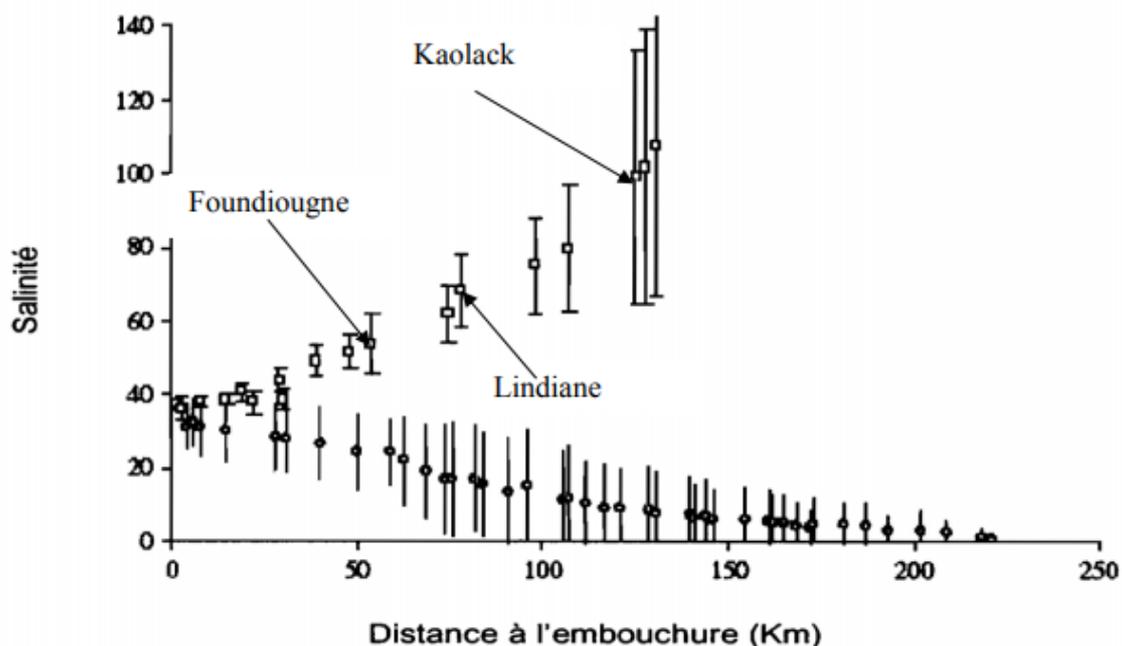


Figure 33: Gradient de salinité (g/l) le long des estuaires du Sine Saloum (□) et de la Gambie (o) (Dieng, 2017)

La salinité des eaux souterraines est étudiée à partir des puits et des forages. La zone d'eau douce se situe dans le département de Foundiougne (zone d'influence du dôme) et les teneurs en sels élevées sont localisées dans le département de Fatick (Figure 34). Malgré la salinité élevée, on note l'existence de poches d'eau douce à Fatick. Les eaux de la nappe situées dans la commune de Niakhar présentent des teneurs en sels très élevées (11‰) qui rendent l'eau impropre à la consommation humaine et à l'irrigation, réduisant considérablement l'accès à l'eau et les activités socioéconomiques.

Dans le département de Fatick, en raison du tarissement de la nappe du CT et de la salinité de la ressource du CT, la nappe profonde du Maastrichtien est sollicitée pour l'approvisionnement de la population en eau, mais cette dernière présente des taux de salinité et des teneurs en fluorures élevés dépassant les normes de l'OMS (Figure 34).

La consommation d'eau ayant des teneurs excessives en fluorures et en sodium peut être à l'origine de maladies cardiovasculaires (Méneton, 2010) et avoir des effets sur le fonctionnement des vaisseaux sanguins (hypertension artérielle) (Chippaux et al., 2007). Dans le bassin arachidier, les études récentes de Sall et al., (2011) ont mis en évidence la relation entre la consommation d'eau salée et fluorée de la nappe du Maastrichtien, et la fluorose dentaire, les douleurs articulaires, lombaires, cervicales et osseuses chez les consommateurs.

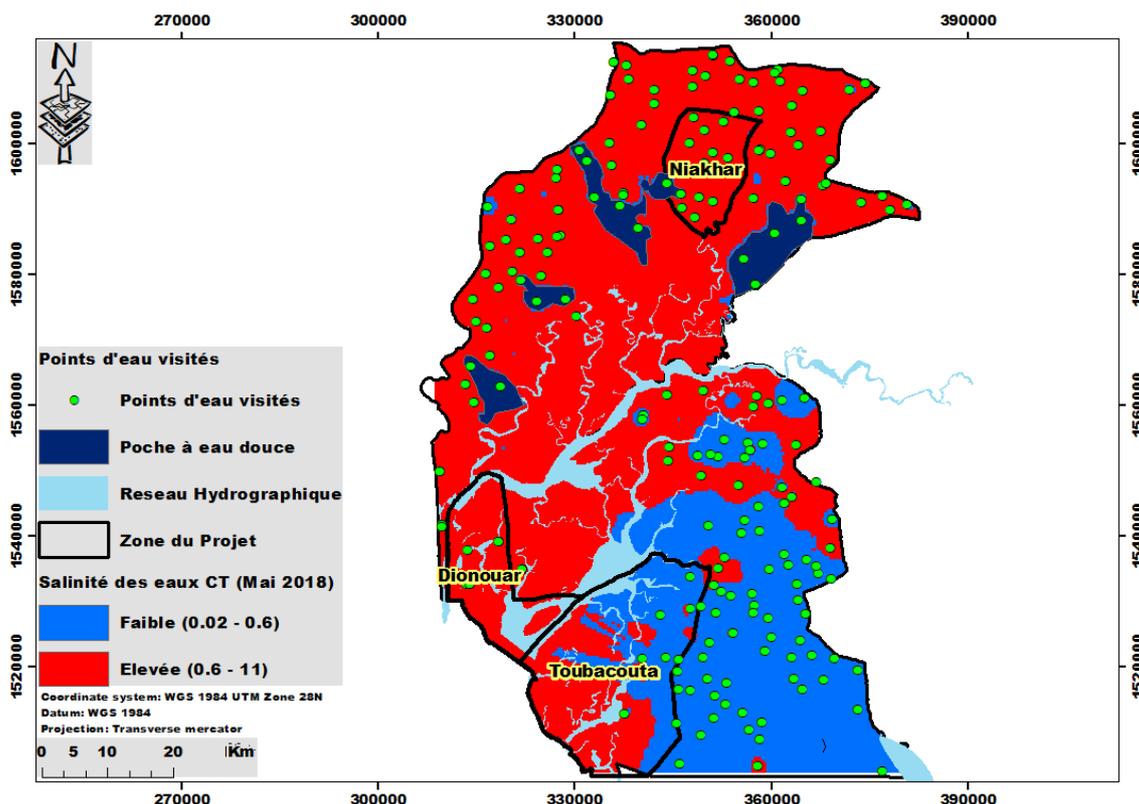


Figure 34: Salinité des eaux souterraines de la nappe du CT en Mai 2018

Les travaux de Descroix et al., (2017) sur la salinité de la nappe phréatique du centre du bassin arachidier ont mis en évidence une hausse de la salinité durant la période de sécheresse dans la zone de Niakhar (Figure 35).

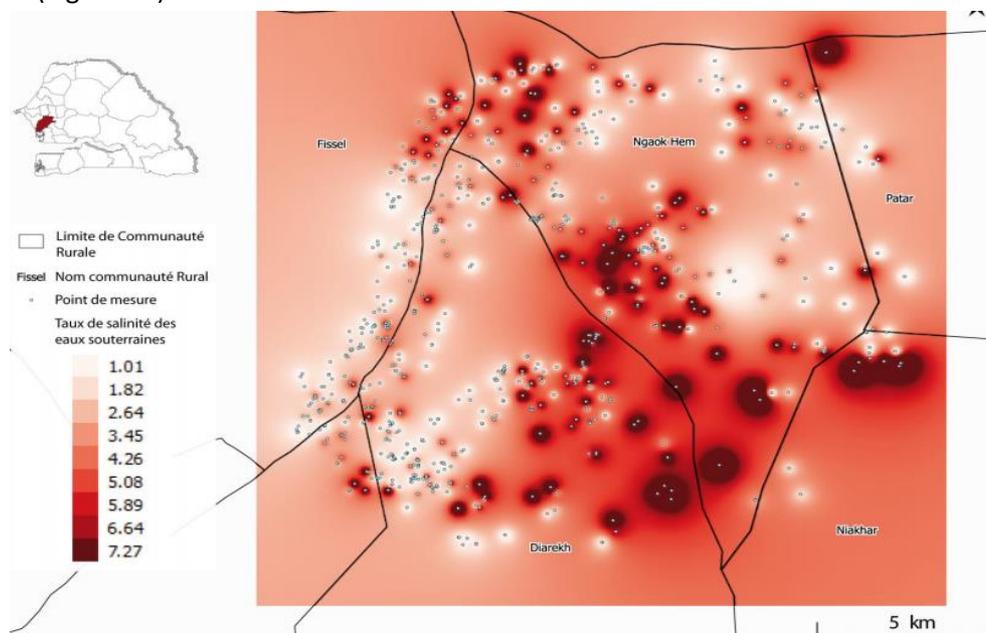


Figure 35: Salinité des eaux de la nappe du CT à Niakhar (Descroix, et al., 2017)

Les résultats sont en accord avec les travaux de (Faye S. , 2005 ; Bouaita, et al., 2017) sur la géochimie de la nappe du CT qui montrent un taux de salinité des eaux souterraines élevé dans les zones de

contact avec le fleuve Saloum, qui s'expliquerait par un appel d'eau marine et fluviale vers la nappe (Figure 36).

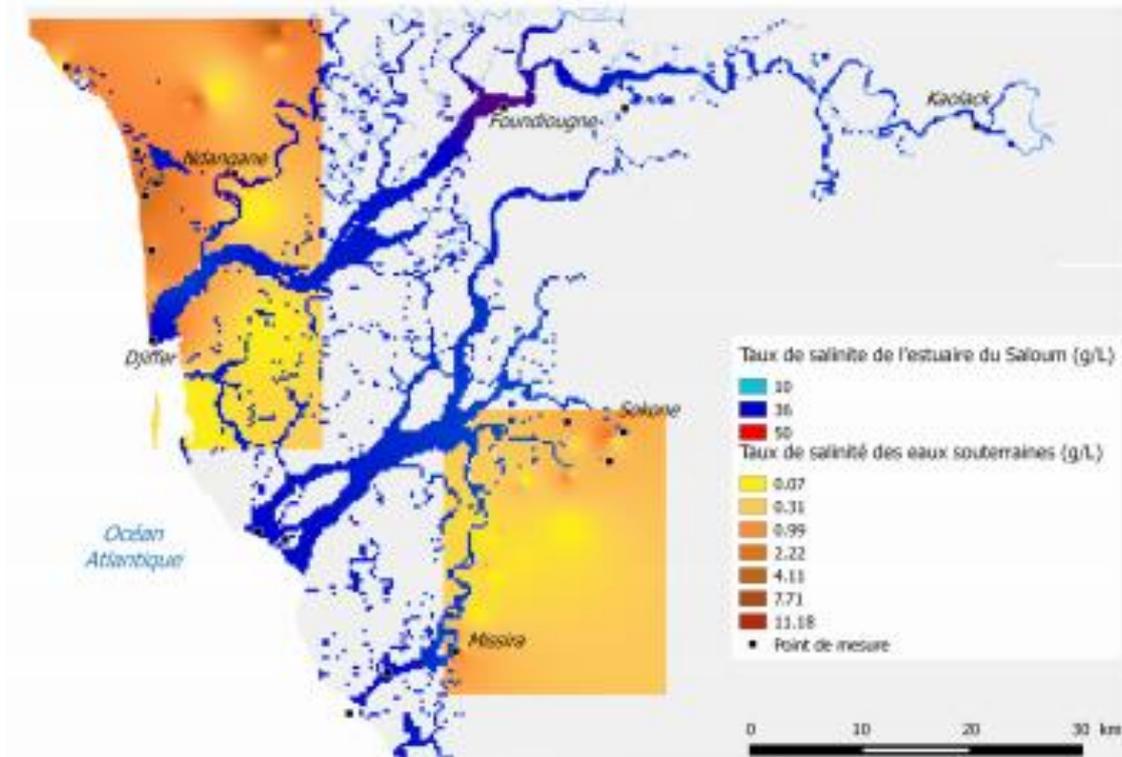


Figure 36: Taux de salinité des ressources en eau dans le Saloum (Bouaita, et al., 2017)

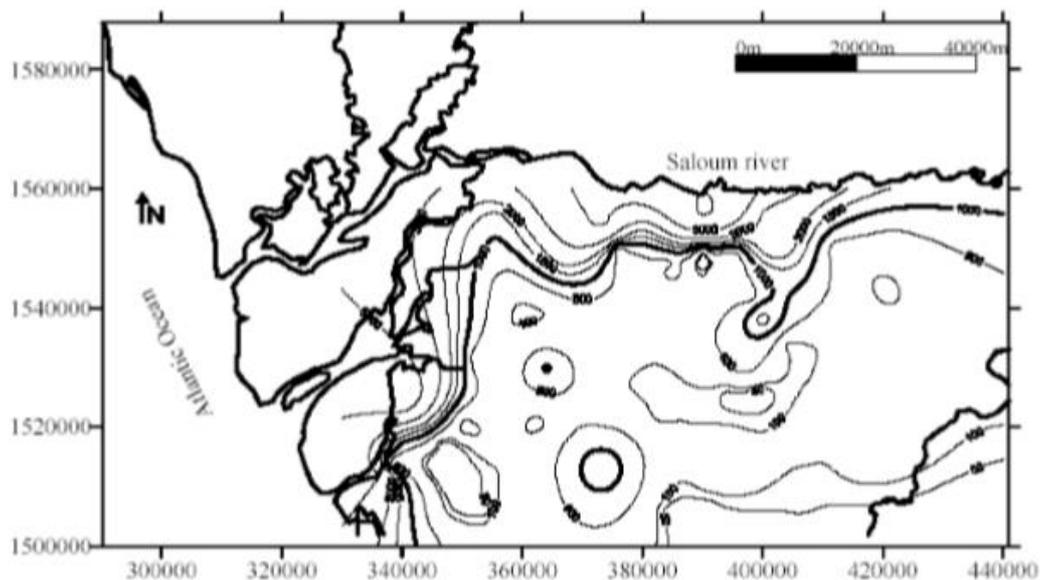


Figure 37: Conductivité électrique ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) de la nappe du CT en avril 2000 (Faye S., 2005)

Les chlorures sont de bons marqueurs géochimiques pour évaluer l'infiltration des eaux de pluie et la contamination des eaux souterraines. La Figure 38 montre des pics de chlorures dans les horizons supérieurs (<1m) à Djilor et à Nema allant jusqu'à 3 000 mg/l. Ces pics s'expliquent par une évaporation intense qui concentre les sels dans le sol, rendant ces derniers impropres à la culture (Dieng, 2017). Dans les horizons profonds (>1 m), on note une diminution et une disparition des

teneurs en chlorures à -1.5 m à Djilor, due au taux d'humidité élevé. A l'inverse, dans la zone littorale de Néma, les pics de chlorures dépassent 250 mg/l en profondeur. Ces pics s'expliquent par un apport externe de chlorures par intrusion saline (Dieng, 2017). Les résultats montrent que pendant la saison des pluies, les sels peuvent être lessivés par les eaux de pluie et transportés jusqu'à la zone saturée de la nappe.

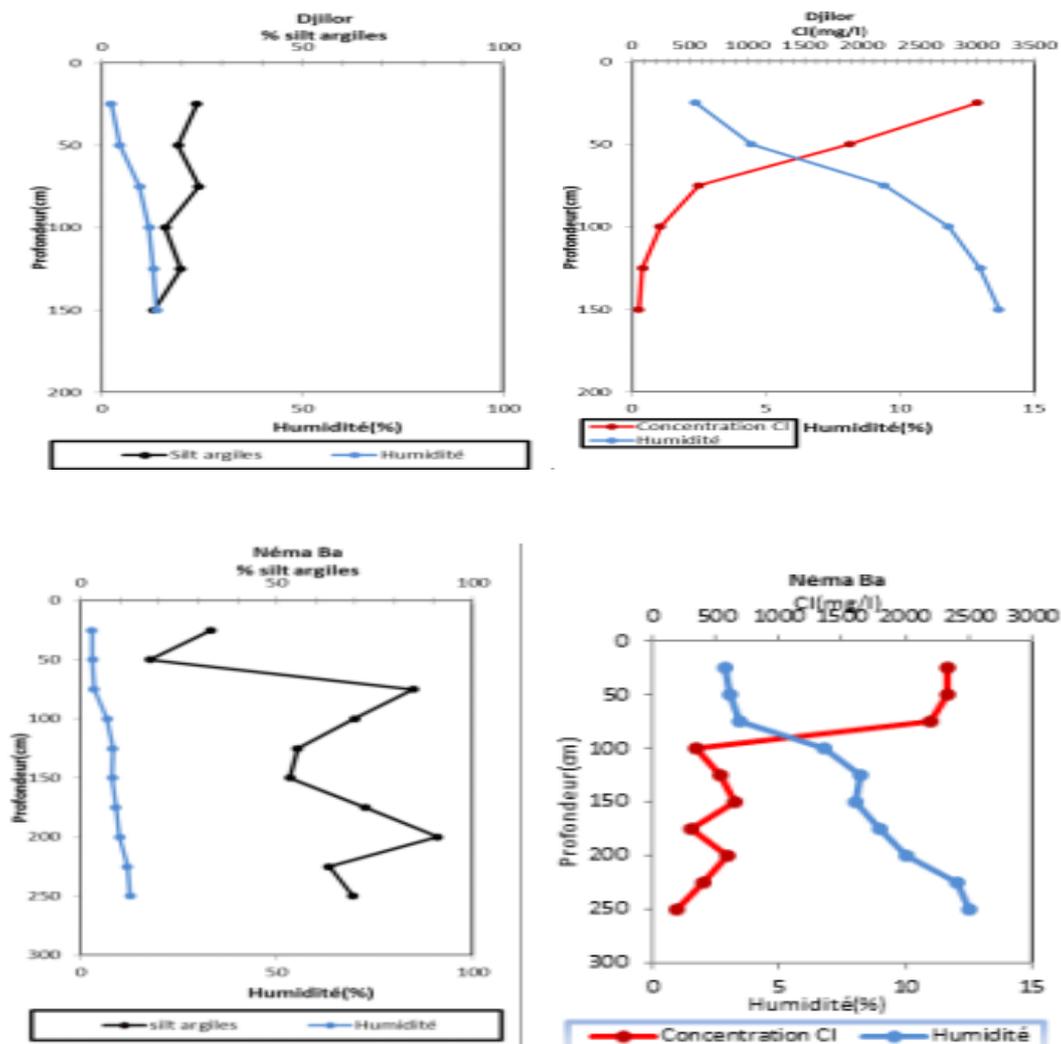
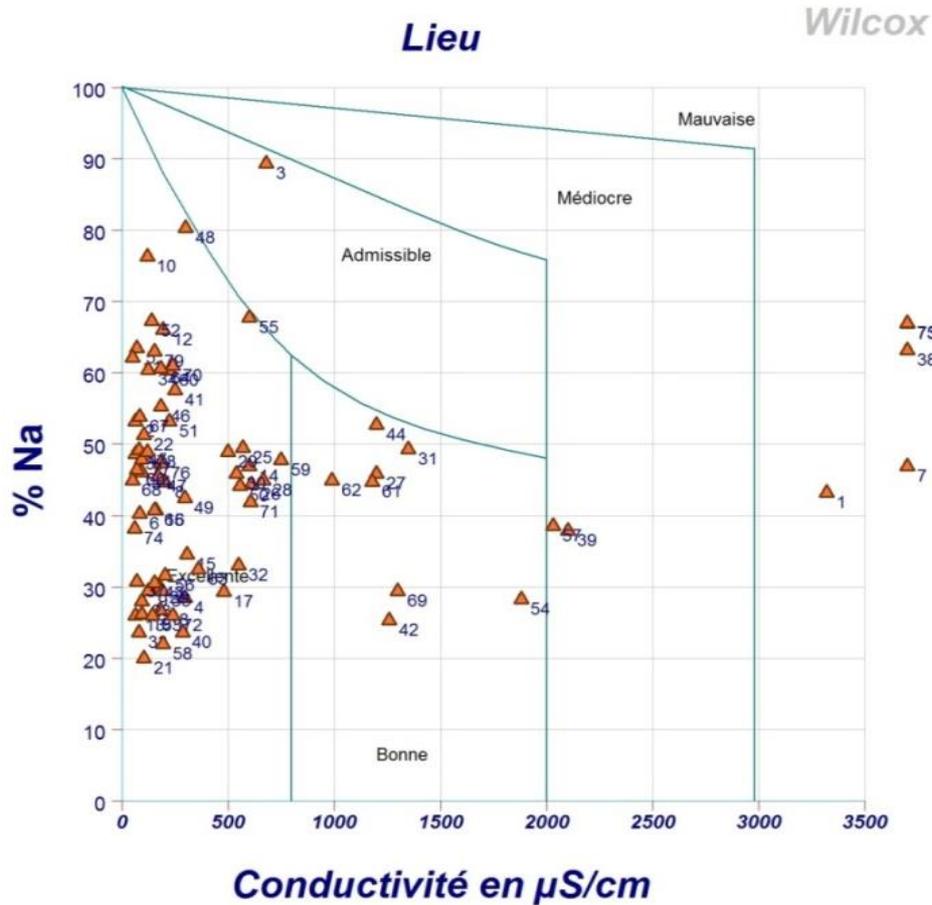


Figure 38: Évolution des teneurs en chlorures en fonction de la profondeur (Dieng, 2017)

#### d. Aptitude des eaux de la nappe à l'irrigation

Le diagramme de Wilcox permet d'évaluer l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation. L'analyse montre que la quasi-totalité des points d'eau se trouve dans les faciès excellent et bon, avec certains qui se situent dans les faciès médiocres à mauvais (Figure 39).



*Figure 39: Faciès des eaux de la nappe du CT dans le diagramme de Wilcox en avril 2017*

Cependant, la distribution spatiale des points d'eau dans la zone montre une disparité (Figure 40). Les points d'eau à faciès excellent, favorable au maraîchage se situent dans la zone à faible salinité (<0.5‰), notamment au SE (communes de Toubacouta, Keur Saloum Diané, Niore Alassane Tall et Keur Samba Gueye). La salinité importante des sols réduit considérablement les superficies irrigables. Les communes de Niakhar, Patar, Ngayokheme et Diarekh sont les plus touchées par le phénomène de salinisation des eaux de puits (Descroix, et al., 2017).

Ce phénomène de salinisation des points d'eau et des terres reste un réel handicap de développement pour les activités socio-économiques génératrices de revenus dans la région.

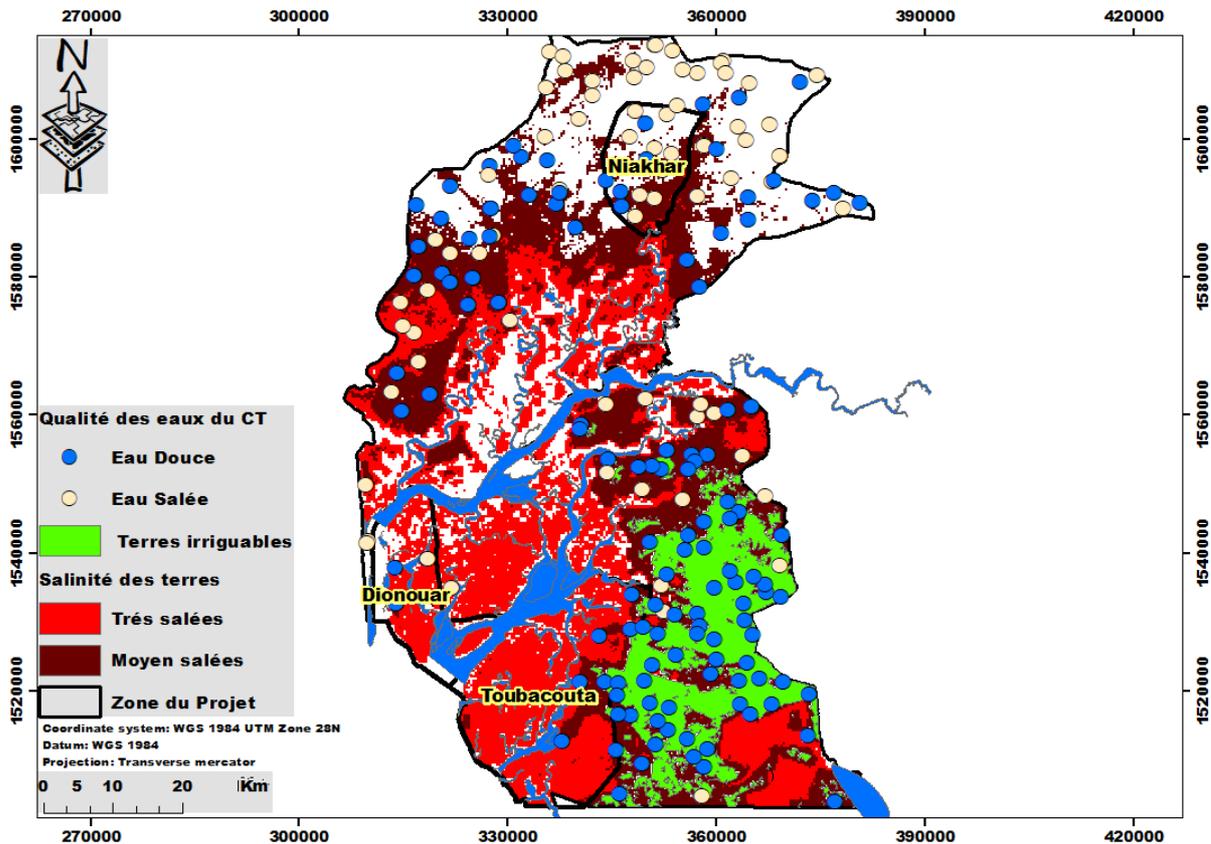


Figure 40: Typologie des eaux du CT et salinité des terres dans la zone

#### 4.2.3.2.3 Inventaire des infrastructures hydrauliques

La campagne de terrain effectuée en mai 2018 et l'analyse des rapports d'études de la DGPRE (2014) ont permis de faire l'état des lieux des infrastructures hydrauliques dans la région.

La station hydrométrique de Medina Djikoye en panne depuis 1992 a connu plusieurs tentatives de réparation. L'échelle limnimétrique de Néma Nding réalisée en 1993 et suivie jusqu'en 1998 a été réhabilitée. La réhabilitation et le rattachement de l'échelle limnimétrique se sont déroulés en 2013. La réhabilitation de la station de Néma Ba a été effectuée en 2013. L'ancienne échelle, implantée sous le pont de la route Toubacouta/Missira est actuellement hors d'usage. Une nouvelle échelle a été implantée dans le lit du cours d'eau, en amont de la première digue de retenue (DGPRE, 2014) (Figure 41). Des pluviomètres ont également été installés dans les bassins versants respectifs.



**Figure 41:** Echelle réhabilitée de Néma Nding et échelle de Néma Ba (élément 0-1m et 1-2 m) (DGPPE, 2014)

Les stations hydrométriques de mesure des débits du bassin de la Nema installées aux ponts de Nema Nding et Nema Ba sont en arrêt depuis 1998. Leur réhabilitation permettra d'avoir un historique de la mesure des débits pour mieux comprendre le fonctionnement du bassin avec le retour des précipitations constaté dans cette zone (Figure 42).



**Figure 42:** Stations hydrométriques de Nema Ba et Nema Nding (Photo, 16/05/18)

En plus des stations hydrométriques, on note un arrêt des pluviomètres de Dionewar et Niodior depuis 1980 et 2005 respectivement, réduisant la connaissance de la distribution des précipitations dans les îles du Saloum.

En Afrique subsaharienne, les conditions climatiques variables freinent le rythme d'évolution des aménagements des terres et le développement de la polyculture vivrière. Ainsi, soucieux de cette situation, le gouvernement sénégalais a mis en œuvre le programme de « réhabilitation des bassins de rétention » (CSE, 2014).

Dans la région, on note l'existence de bassins de rétention pouvant collecter jusqu'à 100 000 m<sup>3</sup>d'eau à vocation agropastorale à Ndiop Thiarene et à Ndieguene Mody.

Le Tableau 18, portant sur l'inventaire des points d'eau, montre que les forages et les puits traditionnels et modernes demeurent les sources principales d'approvisionnement en eau potable des

populations, traduisant une importante sollicitation des eaux souterraines dans la région. Les eaux de pluie sont utilisées pour l'agriculture qui reste à 95% pluviale. Les ressources hydriques disponibles sont utilisées pour la boisson, l'irrigation, l'élevage et les tâches domestiques. Plusieurs ouvrages hydrauliques ont été abandonnés à cause de la dégradation de la qualité de l'eau.

Tableau 18: État des points d'eau captant la nappe du CT en 2018 (Source: DGPPE)

Type Ouvrages	Nombre	Fonctionnalité (%)	Motricité	Usage		
				Domestique	Irrigation	Élevage
Forages	26	91	Motopompe	Oui	Oui	Oui
Puits traditionnels	1500	70	Humaine	Oui	Oui	Oui
Puits modernes	150	95	Humaine	Oui	Non	Non
Piézomètres	12	75				

La Figure 43 montre l'évolution des forages dans la zone. Avant 1974, l'approvisionnement en eau était principalement assuré par les puits traditionnels (2 à 5 par village). L'AEP à partir des forages a débuté en 1974 dans la région (Dieng, 2017). Ensuite, le nombre a augmenté durant la période de sécheresse. Aujourd'hui, les forages fonctionnels captant la nappe du CT sont au nombre de 26 et sont localisés dans le département de Foundiougne.

L'augmentation significative de ces derniers en 2016 (14 nouveaux forages) s'explique par les résultats favorables des récentes études de la DGPPE. Cette augmentation du nombre de forages a participé à l'amélioration de l'accès à l'eau potable dans la région.

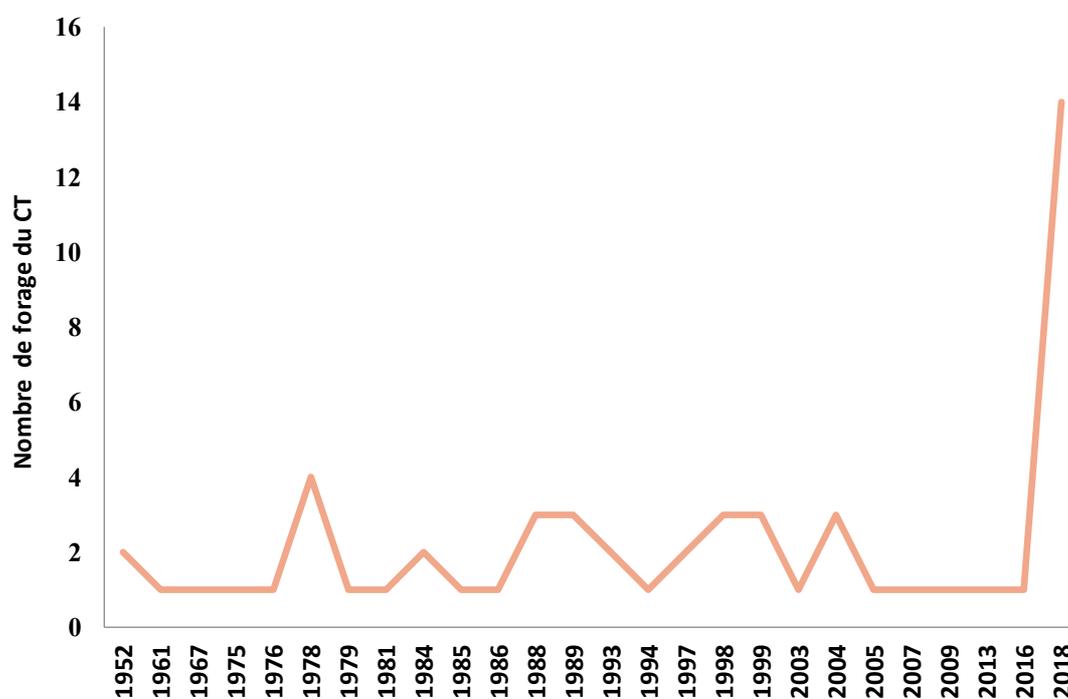


Figure 43: Évolution des forages dans la zone (Source : DGPPE)

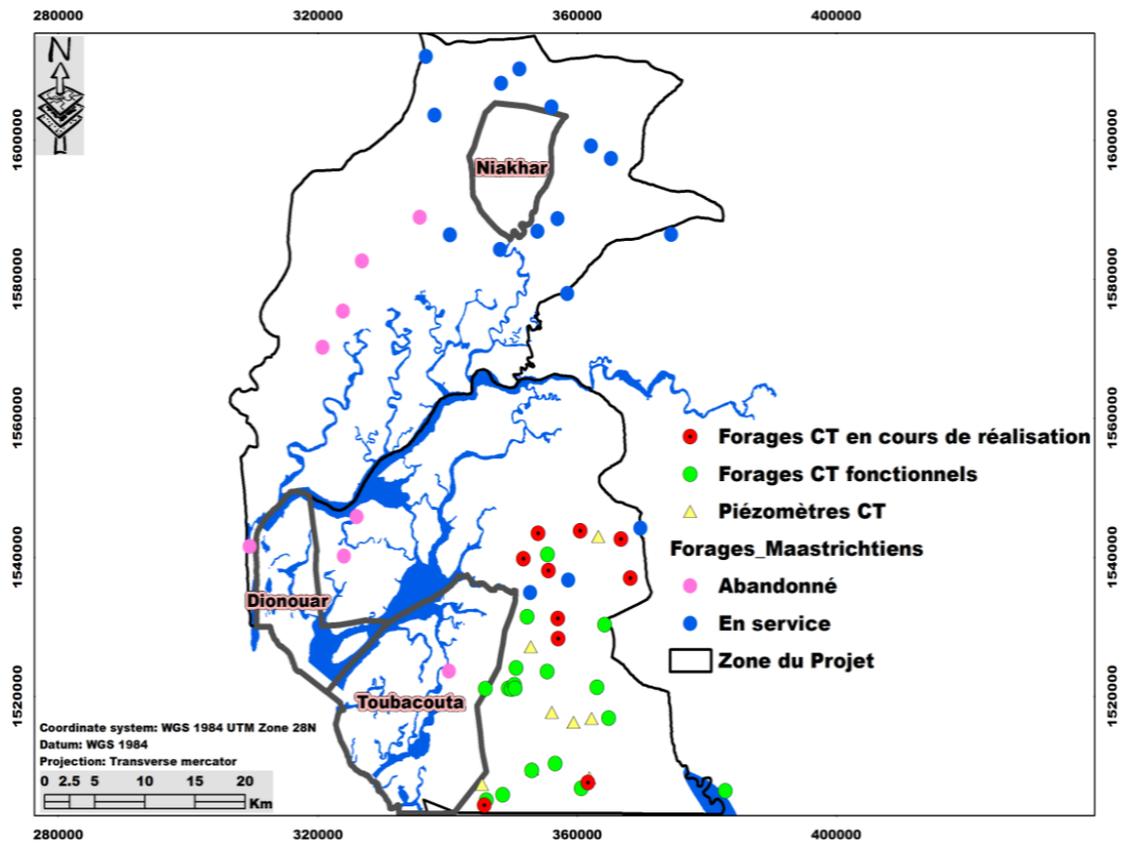


Figure 44: État des forages et piézomètres dans la zone en 2018 (Source DGPPE)

Pour mieux caractériser la couverture de la région en infrastructures hydrauliques, le nombre de personnes par équivalent point d'eau a été calculé en prenant en compte les forages captant le Maastrichtien et le CT. Le Tableau 19 montre que le taux de couverture moyen en 2017 est de 17 007 personnes par forage dans la zone. Cette moyenne indique des disparités entre les arrondissements, les faibles taux de couverture se situent dans les arrondissements de Tattaguine, Niakhar et Diakhao. Dans l'ensemble de la zone, le nombre de personnes par équivalent point d'eau dépasse largement la norme de desserte standard de 300 personnes par point d'eau. En plus du taux de couverture des points d'eau, deux autres facteurs dégradent l'accès à l'eau dans la région : d'une part la faible productivité des points d'eau, et d'autre part la qualité de la ressource fortement dégradée dans les forages captant le Maastrichtien dans les arrondissements de Diakhao, Niakhar et Tattaguine, qui ne sont pas raccordés à un réseau de transfert.

*Tableau 19: Nombre de personnes par équivalent point d'eau*

Département	Arrondissement	Population 2017	Nombre de forages	Nb de personnes par équivalent point d'eau
Fatick	Diakhao	128 580	6	21 430
	Fimela	73 560	4	18 390
	Niakhar	88 580	4	22 145
	Tattaguine	95 599	4	23 899
Foundiougne	Djilor	151 390	8	18 923
	Niodior	32 875	7	4 696
	Toubacouta	133 956	14	9568
	<b>Moyenne</b>	<b>100 648,57</b>	<b>6,7</b>	<b>17 007,3</b>

#### 4.2.3.2.4 Taux de couverture des besoins en eau

##### a. Impacts des forages sur les ressources en eau

Pour évaluer la sollicitation de la nappe du CT, les relevés des débits de pompage journalier des forages ont été exploités. Ainsi, pour obtenir un débit moyen journalier, nous avons exploité les données de pompage des deux dernières années, 2016 et 2017, sur 20 forages. Le temps moyen d'exploitation d'un forage dans la zone est de 8 heures/j. Les débits prélevés au niveau des forages sont très variables et dépendent de la demande en eau. La moyenne journalière de prélèvement en 2017 s'élève à 7679 m<sup>3</sup>/j contre 2 518 m<sup>3</sup>/j en 2016. Le volume total annuel prélevé au niveau des forages en 2017 s'élève à 2 802 890 m<sup>3</sup> contre 919 070 m<sup>3</sup> en 2016. Cette forte augmentation des prélèvements observée en 2017 s'explique par le début du pompage continu des quatre forages de Simong Diene pour l'AEP des îles du Saloum (Tableau 20). Il faut noter également l'absence d'information sur les pompages au niveau des forages de Keur Samaba Gaye et de Medina Djikoye due aux pannes de compteurs.

Tableau 20: Prélèvements moyens annuels des eaux de la nappe du CT en 2016 et 2017

Forages	Départements	Type d'ouvrage	m <sup>3</sup> /j (2016)	m <sup>3</sup> /j (2017)	Usage
Diagle	Foundiougne	Forage	275.3	285.5	AEP/Elevage/irrigation
K. Saloum Diane	Foundiougne	Forage	257	240.2	AEP/Elevage/irrigation
K. Samba Gueye	Foundiougne	Forage	129.03		AEP/Elevage/irrigation
Medina Djikoye	Foundiougne	Forage	80.96		AEP/Elevage/irrigation
Ndramelbra	Foundiougne	Forage	147.75	160.2	AEP/Elevage/irrigation
Poste Karang	Foundiougne	Forage	702.1	660.2	AEP/Elevage/irrigation
Saboya		Forage	150.4	170.8	AEP/Elevage/irrigation
SimongDiene	Foundiougne	Forage	287.03	334.3	AEP/Elevage/irrigation
Sirmang	Foundiougne	Forage	17.75	19.4	AEP/Elevage/irrigation
SimongDiene F5	Foundiougne	Forage		1805	AEP/Elevage (Iles du Saloum)
SimongDiene F2	Foundiougne	Forage		214.45	AEP/Elevage (Iles du Saloum)
SimongDiene F1	Foundiougne	Forage		1445.6	AEP/Elevage (Iles du Saloum)
SimongDiene F4	Foundiougne	Forage		1378.6	AEP/Elevage (Iles du Saloum)
Keur Mama Lamine/ Nioro Alassane Tall	Foundiougne	Forage	115.22	122.5	AEP/Elevage/irrigation
TabaNding	Foundiougne	Forage	78.8	130.4	AEP/Elevage/irrigation
KeurAyip Ka	Foundiougne	Forage		137.2	AEP/Elevage/irrigation
PakalaSanthie	Foundiougne	Forage		230	AEP/Elevage/irrigation
K ThiernoNgalagne	Foundiougne	Forage		40	irrigation
Diouroup	Fatick	Forage		7	Industriel
Diossong	Foundiougne	Forage	277	297.6	AEP/Elevage
Volume prélevé par jour (m <sup>3</sup> /j)			<b>2518</b>	<b>7679</b>	

Les informations relatives aux prélèvements sont limitées dans la région. Les travaux de (Dieng, 2017 et Faye S., 2005) ont mis en évidence la faible sollicitation de la nappe du CT durant les années 70. Cependant, à partir de 1975 jusqu'à aujourd'hui, les prélèvements n'ont cessé d'augmenter jusqu'à des valeurs de 8 500 m<sup>3</sup>/j en 2012 (Figure 45).

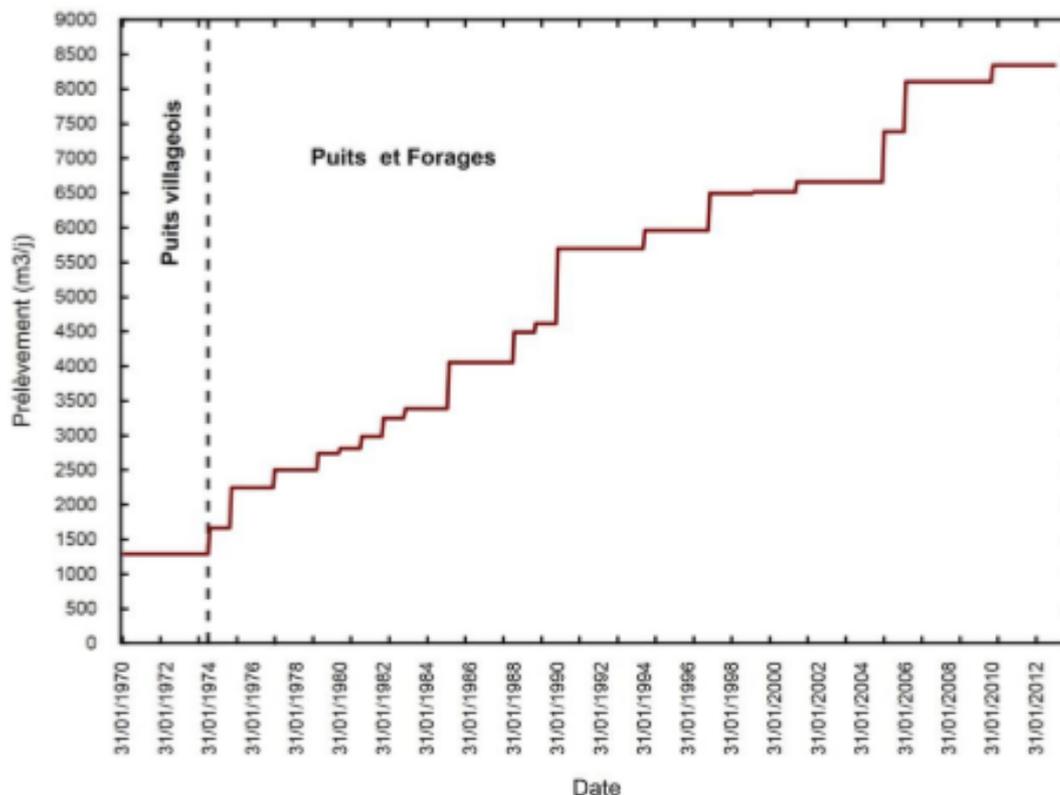


Figure 45: Volumes de pompages journaliers de la nappe du CT dans le Saloum pour la période 1970-2012 (Dieng, 2017)

### b. Accessibilité des points d'eau

La politique de gestion et d'approvisionnement en eau potable en milieu rural est assurée par l'Office des Forages Ruraux (OFOR). La mission d'enquête sur le terrain a permis d'évaluer l'accessibilité, la disponibilité et le coût moyen de l'eau dans la zone.

Les résultats de l'enquête de terrain ont montré que la distance moyenne parcourue par les villageois pour accéder au point d'eau est de 3 km à Niakhar et 250 m à Toubacouta et Dionewar selon les saisons. Le coût de l'eau varie entre 250 et 400 F CFA le mètre cube selon les saisons et les zones des réseaux d'adduction des forages. Le paiement se fait généralement par versement mensuel, et la sanction en cas de non-paiement est le débranchement du réseau de distribution. L'approvisionnement en eau est gratuit au niveau des puits.

**Tableau 21** : Accessibilité des ressources en eau dans la région

Caractéristiques	Communes	Forage ou Borne Fontaine	Puits traditionnels	Pluies
<b>Disponibilité</b>	Niakhar	4 (Maastrichtien)	Faible	Saisonnaire
	Toubacouta	3 (CT)	Elevée	Saisonnaire
	Dionewar	Bornes fontaines	Faible	Saisonnaire
<b>Accessibilité des points d'eau</b>	Niakhar	0 à 1 km	0 à 7 km	
	Toubacouta	0 à 1 km	0 à 500 m	
	Dionewar	0 à 300 m	0 à 400 m	
<b>Alimentation par réseau (transfert)</b>	Niakhar	Non		
	Toubacouta	Oui		
	Dionewar	Oui		
<b>Usage de l'eau</b>	Niakhar	Domestique/ Cheptel	Boisson/Domestique	Boisson/Domestique
	Toubacouta	Boisson/ Domestique	Boisson/Domestique/ Cheptel/ Maraîchage	Faible et périodique
	Dionewar	Boisson/Domestique/Cheptel	Domestique / Cheptel	
<b>Coût de l'eau (FCFA)</b>	Niakhar	300/m <sup>3</sup>	Gratuite	
	Toubacouta	250-400/m <sup>3</sup>	Gratuite	
	Dionewar	15 à 25/20L	Gratuite	
<b>Environnement des points d'eau</b>	Niakhar	Non aménagé/ Insalubre	Non aménagé/Insalubre	
	Toubacouta	Aménagé	Non aménagé/Insalubre	
	Dionewar		Non aménagé/Insalubre	

### c. Besoins en eau de la population

L'approvisionnement en eau des populations se fait par un réseau d'adduction à partir des forages. Les villageois s'approvisionnent à partir des robinets installés dans les maisons et des bornes fontaines. Dans la zone, les besoins en eau de la population se résument essentiellement à la cuisson, la boisson, l'irrigation et la lessive.

Le Tableau 22 montre que les besoins en eau varient dans la zone en fonction de la population. Les besoins en eau sont plus importants dans les communes les plus peuplées. En 2017, les besoins en eau de la population étaient évalués à 30 498 m<sup>3</sup>/j traduisant un besoin annuel domestique de 11 131 770 m<sup>3</sup>. Depuis 2005, l'état du Sénégal a investi 214 492 milliards de FCFA pour améliorer l'accès à l'eau potable en milieu rural (PEPAM, 2014), ce à quoi s'ajoute la réalisation de puits modernes et de forages financés par des ONG et des associations villageoises actives. Malgré les importants efforts dans ce secteur, des disparités d'accès à l'eau potable sont toujours notées dans le milieu rural.

**Tableau 22:** Besoins domestiques en eau en 2017 (m<sup>3</sup>/j)

Département	Arrondissement	Population 2017	Besoin en eau (l/j)	Besoin en eau (m <sup>3</sup> /j)
<b>Fatick</b>	Diakhao	128 580	4 500 300	4 500
	Fimela	73 560	2 574 600	2 574
	Niakhar	88 580	3 100 300	3 100
	Tattaguine	95 599	3 345 965	3 345
<b>Foundiougne</b>	Djilor	151 390	5 298 650	5 298
	Niodior	32 875	1 150 625	1 150
	Toubacouta	133 956	4 688 460	4 688
	<b>Total</b>	<b>704 540</b>	<b>30 497 985</b>	<b>30 498</b>

#### **d. Couverture en eau des cultures et du cheptel**

Dans la région, l'agriculture reste pluviale. Le calendrier agricole suit le rythme des précipitations. L'agriculture irriguée est réduite par la salinisation des terres et des ressources en eau. Elle est pratiquée sur ¼ de la région, notamment au Sud, par des groupements de femmes avec l'appui des ONG. Les cultures sont arrosées à partir des puits peu profonds creusés à l'intérieur des jardins. L'alimentation en eau du cheptel est assurée via les cours d'eau en saison des pluies. En saison sèche, le tarissement des cours d'eau pousse les éleveurs vers les sources pérennes, les puits et les abreuvoirs des forages. Pendant cette période, les phénomènes de migrations des éleveurs à la recherche d'eau et de fourrages sont fréquents, ce qui peut être à l'origine de conflits au niveau des points d'eau. Les besoins en eau pour le cheptel ont été calculés en prenant en compte la consommation journalière des bovins, ovins, asins, caprins, équins, porcins et volailles. Les besoins en eau du cheptel dans la zone du projet en 2017 sont estimés à 15 408 m<sup>3</sup>/j traduisant un besoin annuel de 5 623 920 m<sup>3</sup>.

**Tableau 23:** Besoins en eau du cheptel en 2017 en (m<sup>3</sup>/j)

Département	Arrondissement	Bovins	Ovins	Caprins	Equins	Asins	Porcins	Volailles
<b>Fatick</b>	Diakhao	16 783	30 959	33 924	2 078	2596	25744	237327
	Fimela	37 211	46 017	50 427	6 793	3174	38620	355406
	Niakhar	<b>21 427</b>	<b>25 590</b>	<b>28 042</b>	<b>4434</b>	<b>1947</b>	<b>19308</b>	<b>178003</b>
	Tattaguine	23 403	30 646	35 587	4 524	1947	19310	177805
<b>Foundiougne</b>	Djilor	30 878	49 055	39 146	28 957	10568	3287	210022
	Niodior	<b>4 097</b>	<b>2 131</b>	<b>1701</b>	<b>446</b>	<b>112</b>	<b>3039</b>	<b>157525</b>
	Toubacouta	<b>35 043</b>	<b>65 215</b>	<b>52 040</b>	<b>15 424</b>	<b>17128</b>	<b>5074</b>	<b>262546</b>
<b>Besoins en eau du Bétail</b>	<b>Total</b>	<b>168 842</b>	<b>249 613</b>	<b>238 867</b>	<b>62 656</b>	<b>37 472</b>	<b>114 382</b>	<b>1 578 634</b>
	<b>Besoins en eau (l/j)</b>	7429048	1787229	1194335	2046345	936800	1572752	442 017
	<b>Besoins en eau (m<sup>3</sup>/j)</b>	7429	1787	1194	2046	937	1572	442
	<b>Besoins en eau du cheptel (m<sup>3</sup>/j)</b>	<b>15 408</b>						

Le cumul des besoins en eau annuels domestiques et du cheptel est estimé à 16 755 690 m<sup>3</sup> en 2017. Le volume total annuel prélevé au niveau des forages du CT en 2017 s'élève à 2 802 890 m<sup>3</sup>, ajouté à cela le volume annuel prélevé au niveau des 16 forages du Maastrichtien fonctionnels qui s'élève à 1 460 000 m<sup>3</sup> soit un débit moyen d'exploitation de 250 m<sup>3</sup>/j et le volume annuel du réseau d'adduction de Notto-Diosmone-Palmarin alimentant les villages situés dans la zone d'intérêt évalué à hauteur de 2 686 400 m<sup>3</sup> soit une production moyenne journalière de 7 360 m<sup>3</sup>/j en 2017. Ces résultats montrent un taux de couverture moyen des besoins en eau qui est de l'ordre de 41 %, soit un déficit de production journalière d'environ -26 866 m<sup>3</sup>/j (-59 %). Ainsi, la capacité de production des forages et du réseau d'adduction reste faible pour satisfaire la demande en eau dans la région. Cependant, ces résultats à l'échelle régionale cachent des disparités à l'échelle départementale. En effet, les besoins en eau sont plus importants et la disponibilité plus faible dans le département de Fatick, contrairement dans le département de Foundiougne où les besoins en eau sont moins importants.

#### 4.2.4 Capacité d'adaptation

Voir schéma de la chaîne d'impact p.78 et p.79 (chaîne d'impact modifiée).

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

L'étude de la vulnérabilité actuelle sur les ressources en eau se fixait comme principal objectif de contribuer à l'identification des facteurs importants de la vulnérabilité des ressources en eau face à la variabilité climatique dans la région de Fatick.

L'analyse de l'exposition à travers les indicateurs climatiques sur la période 1950-2017 a permis de mettre en évidence la variabilité des précipitations et des températures dans la région par rapport à la normale de référence 1961-1990.

La tendance à la baisse des précipitations observée durant la période de sécheresse (1968-1998) à Fatick et à Toubacouta a fortement affecté les ressources hydriques. Le retour des précipitations remarqué depuis les années 2 000 s'est fait ressentir positivement sur les ressources en eau.

L'analyse de la sensibilité montre que l'irrégularité de la distribution saisonnière des précipitations se reflète sur la disponibilité et la qualité des ressources en eau. La baisse des volumes précipités sur la période 1968-1998 se manifeste par la baisse généralisée des écoulements de surface et la dégradation de la qualité des ressources en eau.

Le bilan hydrique a montré une baisse considérable des volumes d'eau infiltrés dans la région traduisant la baisse du niveau de la nappe durant la période 1976-2005. Cependant, depuis 2 000 on note une nette élévation du niveau de la nappe du CT de plus de 10 m, consécutive à la bonne pluviométrie enregistrée dans la région. La qualité des ressources en eau est fortement menacée par la salinisation dans la région.

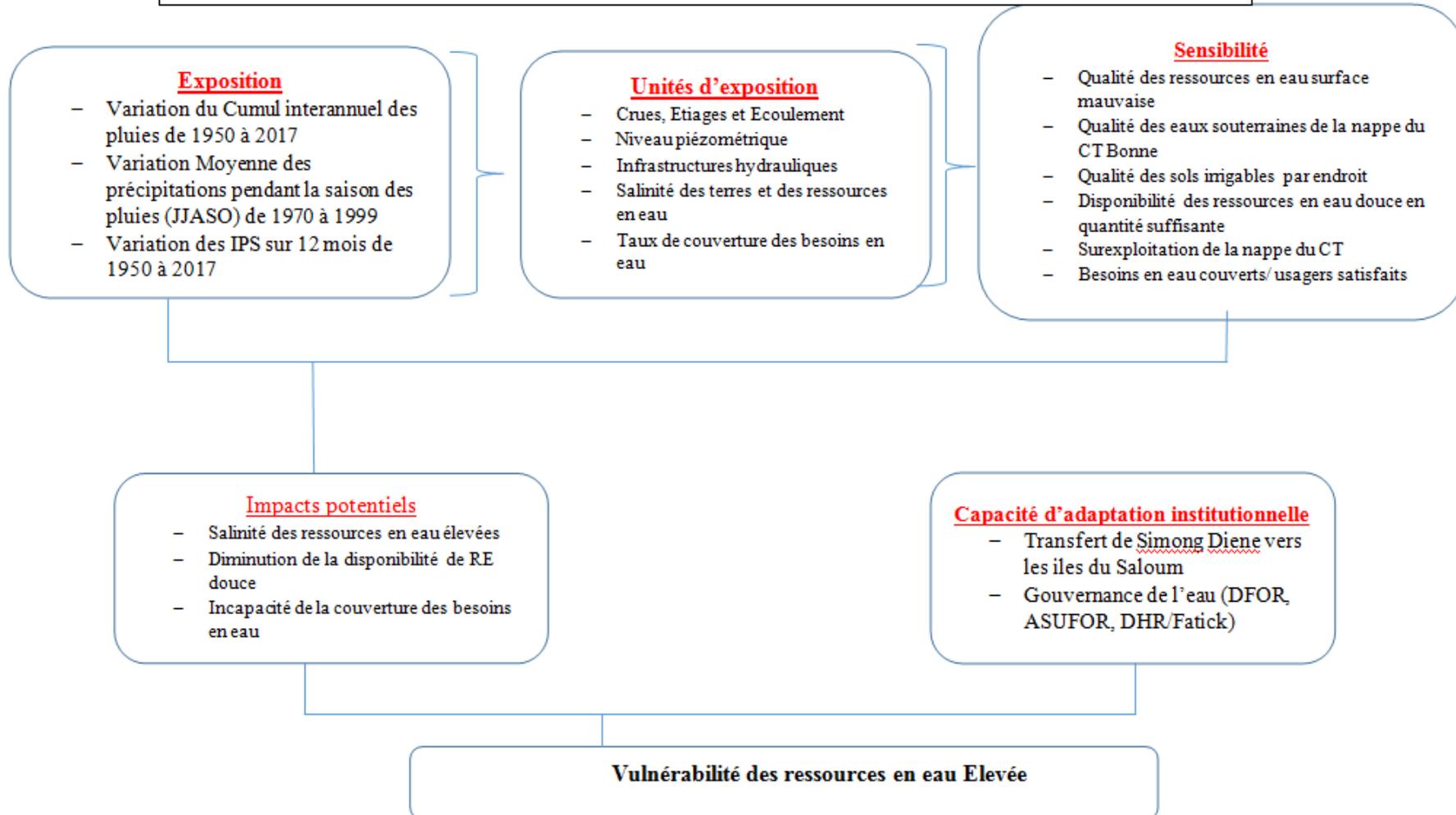
Dans la région, le taux de couverture des besoins en eau est moyen de l'ordre de 41 %. Cependant, on note une nette disparité entre les départements de Fatick et Foundiougne. Les besoins en eau sont couverts à Foundiougne, contrairement à Fatick où l'accès à la ressource est limité par la qualité. La variabilité interannuelle et intra-saisonnière des paramètres climatiques affecte directement la quantité et la qualité des ressources en eau.

Le manque d'information sur l'évolution quantitative et qualitative des ressources en eau, ainsi que l'arrêt des stations pluviométriques dans la région sont des facteurs aggravants de la vulnérabilité par rapport aux ressources hydriques.

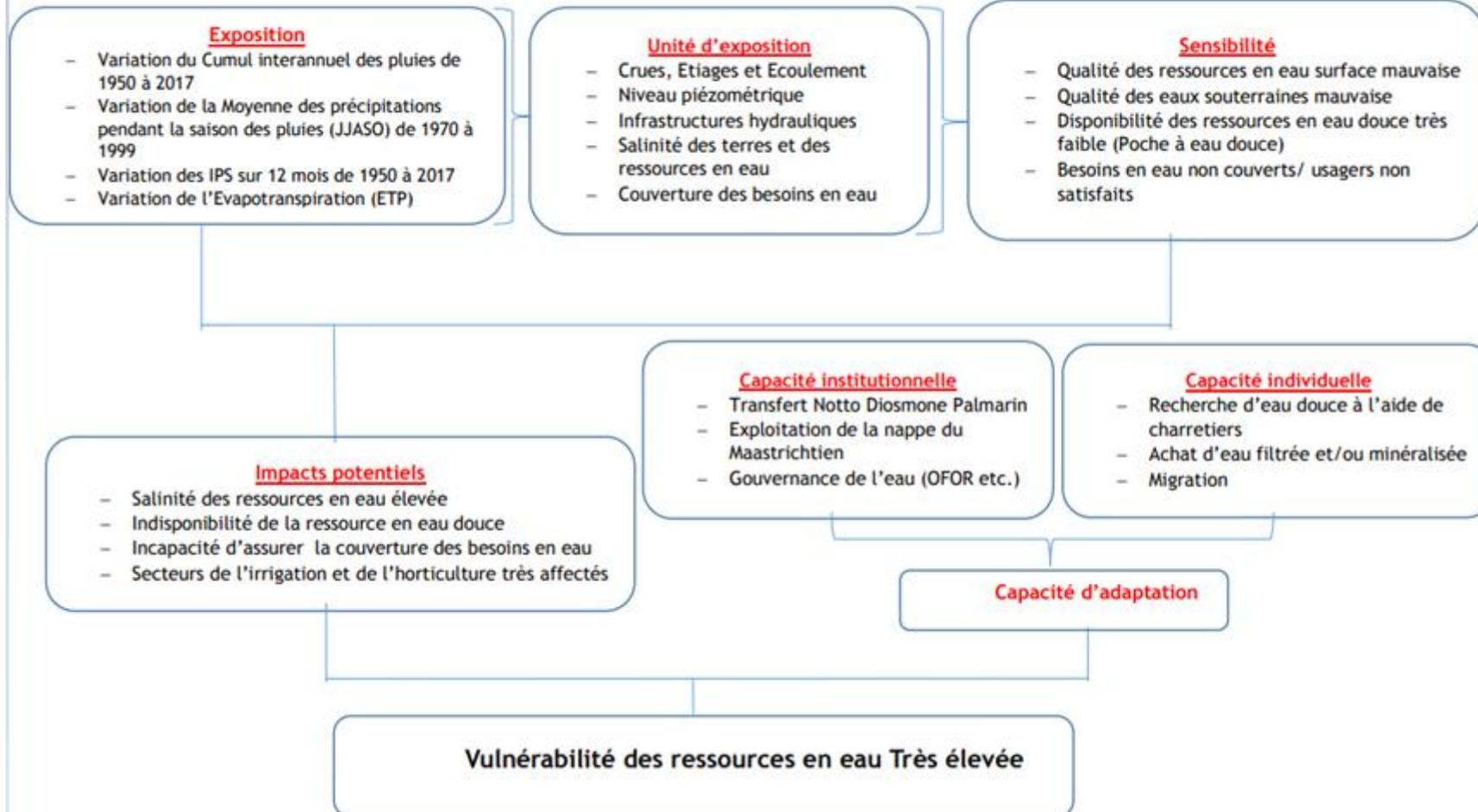
La caractérisation de la vulnérabilité par rapport aux ressources en eau dans la région a permis de développer une approche basée sur l'utilisation d'indicateurs quantifiables. Elle a permis également de mieux comprendre la vulnérabilité des populations face à la variabilité climatique dans une dynamique environnementale et socioéconomique.

L'évaluation de la sensibilité des ressources en eau montre que le département de Fatick est plus vulnérable que le département de Foundiougne vis-à-vis de la variabilité climatique et des effets anthropiques.

**Chaine d'impact de la vulnérabilité actuelle des Ressource en eau dans le département de Foundiougne**



### Chaîne d'impact de la vulnérabilité actuelle des ressources en eau dans le département de Fatick



## 5 Évaluation de la vulnérabilité future

« L'eau est le premier intermédiaire par lequel le changement climatique impacte les écosystèmes terrestres, ainsi que le mode de vie et le bien-être de nos sociétés » (UN-WATER, 2010)

Les impacts peuvent jouer à la fois sur le cycle annuel de l'eau et sur les extrêmes comme les inondations et les sécheresses, et ainsi affecter durablement l'hydro-système.

Au Sénégal, l'agriculture et l'urbanisme, deux éléments importants, devront s'adapter pour mieux supporter l'élévation de la température et l'évolution des ressources en eau.

Dans ce contexte, l'évaluation des impacts potentiels des changements climatiques sur les ressources en eau dans la région de Fatick est un enjeu important pour une gestion optimale de la ressource et l'atteinte des objectifs de développement durable dans le secteur de l'eau au Sénégal.

### 5.1 Approche méthodologique

L'approche méthodologique utilisée pour évaluer la vulnérabilité des ressources en eau aux changements climatiques s'est basée essentiellement sur les résultats de la caractérisation de la vulnérabilité climatique actuelle.

Cette approche se base sur l'exploitation des données sorties des Modèles Climatiques Globaux (MCG) corrigées et désagrégées aux horizons temporels 2035 (horizon du PSE) et 2050 et sur la caractérisation des impacts potentiels de l'évolution du climat futur sur les ressources en eau via des méthodes simples de corrélation tendancielle. Parallèlement, les besoins en eau des populations, du cheptel et de l'irrigation sont estimés et les capacités d'adaptation aux conditions futures sont évaluées.

La disponibilité de la ressource, la qualité et le taux de couverture des besoins en eau sont les principaux indicateurs de suivi pour évaluer la sensibilité des ressources en eau à l'exposition future.

Ces indicateurs ont été évalués sur les eaux souterraines de la nappe du CT qui contribue à hauteur de 95% à l'approvisionnement en eau potable dans la région de Fatick.

La méthode d'acquisition et de traitement des données pour chaque indicateur de suivi ainsi que la méthode d'évaluation des capacités d'adaptation et les limites de la méthodologie sont détaillées ci-après.

#### 5.1.1 Acquisition des données

L'acquisition des données s'est basée sur deux types d'approche : la recherche documentaire et l'exploitation des sorties des modèles climatiques globaux aux horizons 2035 et 2050. Les données de Fatick et de Toubacouta ont été obtenues à partir de la moyenne d'ensemble de 24 simulations des modèles climatiques globaux qui contiennent chacune sept (7) variables climatiques corrigés (précipitations, température moyenne de surface, température maximale et minimale, rayonnement solaire, humidité relative et vent de surface) (cf. partie II.1. Rapport exposition future).

**Tableau 24:** Modèles climatiques et Résolution spatio-temporelle pour la période 2006-2050

Nom	Résolution temporelle	Résolution spatiale (lon x lat)
ACCESS1-0	Journalière	50kmx50km
ACCESS1-3	-	-
CMCC-CM	-	-
CMCC-CMS	-	-
MIROC-ESM	-	-
MIROC-ESM-CHEM	-	-
MRI-CGCM3	-	-
MPI-ESM-LR	-	-
MPI-ESM-MR	-	-
bcc-csm1-1	-	-
bcc-csm1-1-m	-	-
BNU-ESM	-	-
GFDL-ESM2M	-	-
GFDL-ESM2G	-	-
GFDL-CM3	-	-
nmcm4	-	-
IPSL-CM5A-LR	-	-
IPSL-CM5A-MR	-	-
IPSL-CM5B-LR	-	-
MIROC5	-	-
NorESM1-M	-	-
HadGEM2-AO	-	-
'HadGEM2-CC	-	-
HadGEM2-ES	Journalière	50kmx50km

### 5.1.2 Traitement des indicateurs

Un rapport spécifique a été consacré à l'exposition future dans la région qu'on va exploiter aux besoins de certains éléments pour mieux étayer nos arguments dans ce rapport.

La vulnérabilité future du secteur des ressources en eau est étudiée à partir d'analyses statistiques et spatio-temporelles des paramètres climatiques.

Les données utilisées proviennent essentiellement des sorties des modèles climatiques globaux de CMIP5. Les données concernent les paramètres de précipitations journalières, l'humidité ; les données de radiation solaire ; les températures moyenne, minimales et maximales journalières pour deux scénarii climatiques RCP4.5 et RCP8.5 du GIEC, (2014) décrites par (Moss, et al., 2010) et couvrent la période de 2006-2050 pour les stations de Fatick et Toubacouta.

#### a. Indicateur de disponibilité de la ressource

L'approche par méthode de corrélation simple par tendance a été appliquée dans toute la zone pour estimer l'évapotranspiration, la recharge et les volumes d'eau infiltrés pour les horizons 2035 et 2050 par la méthode de Turc jugée plus représentative dans la zone du Saloum (Diouf et al., 2016).

$$R = P - \frac{P}{\sqrt{0,9 + P^2/L^2}}$$

$$L = 300 + 25T + 0.05(T)^2$$

P et T : pluie (en mm) et température (en °C) moyenne annuelle  
R : Peff moyenne annuelle (mm/an)

L'évapotranspiration future (ETP) est calculée à partir de la macro PE<sup>7</sup> développée par Oudin et al, (2005) et un facteur de correction de 0.408 nécessaire a été appliqué (Ndiaye et al, 2017). Le bilan hydrique est calculé à partir de la macro ESPERE<sup>8</sup> développée par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM, 2015) avec comme données d'entrée les précipitations journalières, l'évapotranspiration journalière et la température journalière (Tableau 25). Les résultats fournis par la méthode de Turc, (1954) jugée mieux représentative dans la région (Diouf et al., 2016) ont été considérés pour l'interprétation de la sensibilité.

Tableau 25 : Données d'entrées et de sorties des macros utilisées

Macros	Données d'entrées	Données de sorties	Sources
PE	Température (T); Wind Speed (U); Insolation/Radiation (D); Relative Humidity (RH); Extraterrestrial radiation (Re) (depending on the latitude and Julian day).	ETP	Oudin et al. (2005)
ESPERE Version 1.5	Précipitations journalières ; ETP journalière et la Température moyenne journalière	Pluie efficace ; Volume d'eau infiltré annuel et Recharge annuelle	(BRGM, 2015)

Pour aboutir aux résultats escomptés, des hypothèses ont été considérées suivant les caractéristiques géo-lithologiques. La région est caractérisée par une alternance de sables et d'argiles parfois latéritiques qui repose sur un substratum argileux compact (Dieng, 2017).

Ainsi, les principes suivants ont été considérés :

Tableau 26 : Hypothèses considérées pour la macro ESPERE

Rappel des PARAMETRES		
SURFACE de la Zone (en Km <sup>2</sup> )		
Méthode Turc		5594
Réserve Utile Maximale (mm)	175	
Coefficient d'infiltration (Transforme Pluie efficace en Recharge)		
Méthode Turc		1
Porosité efficace		
WTF		0.15

<sup>7</sup>macro PE est une feuille de calcul Microsoft Excel© permettant de calculer l'évapotranspiration.

<sup>8</sup>macro ESPERE est une feuille de calcul Microsoft Excel© permettant de mettre en œuvre rapidement et simultanément une dizaine de méthodes d'estimation de la recharge ou de la pluie efficace.

Les résultats obtenus ont été utilisés pour le calcul des moyennes annuelles de deux périodes 2006-2035 et 2021-2050 pour les stations de Fatick et Toubacouta. Celles-ci ont été comparées à la normale climatique de référence du CMIP5 (1976-2005), pour évaluer la tendance évolutive de la disponibilité de la ressource à l'horizon 2050 pour chaque scénario climatique RCP4.5 et RCP8.5.

#### **b. Indicateur du taux de couverture des besoins en eau**

Les besoins en eau domestiques journaliers de la population, ont été calculés en considérant un taux de croissance de la population de **3.2%** (ANSD, 2015) sur la période 2014-2050 et l'urbanisation progressive des milieux ruraux.

L'élévation de la température de +1.2 °C (Camara, 2018) et l'urbanisation progressive dans la région seront accompagnées d'une augmentation de la consommation journalière humaine de 0.5 l/habt/j. Ainsi, le principe de partir d'une norme actuelle (2017) de 35 l/habt/j pour atteindre 45 l/habt/j à l'horizon 2035 et 55 l/habt/j à l'horizon 2050 est appliqué.

Les besoins en eau futurs journaliers du bétail, ont été évalués en partant d'un ratio de 3.5 tête/personne et en considérant une consommation d'eau moyenne journalière du bétail de l'ordre de 15 408 m<sup>3</sup>/j en 2017.

Le ratio 3.5 est obtenu en divisant l'effectif total du bétail en 2017 qui est de 2 450 466 par la population totale en 2017 qui est de 704 540 (ANSD, 2015). Ainsi, l'effectif du bétail aux horizons 2035 et 2050 est obtenu en multipliant le ratio par la population estimée pour les deux horizons.

Les besoins en eau futurs journaliers pour l'irrigation, ont été évalués en supposant qu'ils vont rester constantes dans le temps les superficies irrigables d'une part et d'autre part en prenant en compte une dose moyenne journalière de 77 m<sup>3</sup>/ha/j (PAPSEN, 2016) affectés aux surfaces réellement irrigables 65 316 ha en 2016 (<ftp://ftp.soilgrids.org/data/recent/> et <ftp://ftp.soilgrids.org/legends/>) (Figure 46).

Les tendances d'évolution des besoins en eau journaliers à l'horizon 2035 et 2050 ont été calculées pour chaque secteur par la différence entre besoin en eau calculé pour l'horizon considéré et besoin en eau calculé en 2017. Ce qui permet d'évaluer l'augmentation du débit journalier des pompes à l'horizon 2050.

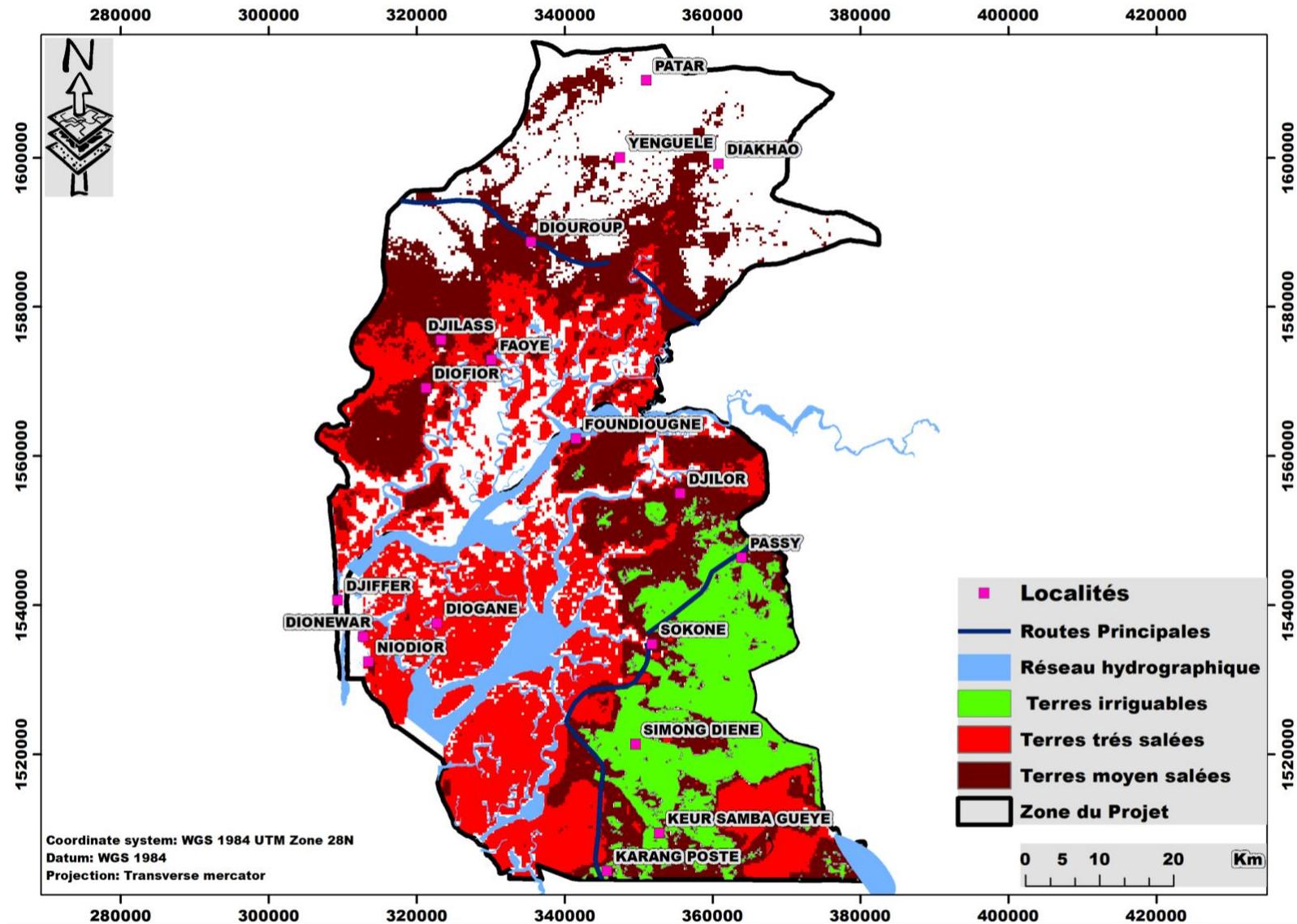


Figure 46: Distribution des surfaces irrigables dans la zone (<ftp://ftp.soilgrids.org/data/recent/>)

### c. Indicateur de qualité de la ressource

La configuration du système biophysique qui est un système estuarien à très basse altitude gagné par l'eau de mer à travers les houles et les marées qui se font sentir dans la zone ouest et des besoins en eau qui augmentent constitue une menace des ressources en eau dans la région.

Pour étudier la qualité future des ressources en eau, l'indicateur de salinité a été considéré en partant de la situation actuelle. Le principe que les ressources en eau déjà contaminées par la salinité le resteront dans le futur est considéré. Ainsi, pour évaluer l'évolution future de la salinité des eaux souterraines du CT dans les zones non contaminées, les facteurs suivants ont été considérés :

- L'élévation du niveau marin est estimée à 0.003 m/an à l'horizon 2030 pour la plupart des scénarios de RCP (Jevrejeva et *al.*, 2016) soit 3 mm/an et la hauteur moyenne des houles est estimée à 1.74 m (Sadio, 2018). A l'horizon 2050, la hauteur moyenne des houles est estimée à 4 m et l'élévation du niveau marin à 50 cm pour les scénarii rcp4.5 et rcp8.5 (Sadio, 2018). Les faibles altitudes favorisent une submersion marine pouvant entraîner un important épanchement de la salinité et une contamination par intrusion saline marine et fluviale de la nappe du CT dans les zones à basse piézométrie (< 0 IGN) (Figure 47).

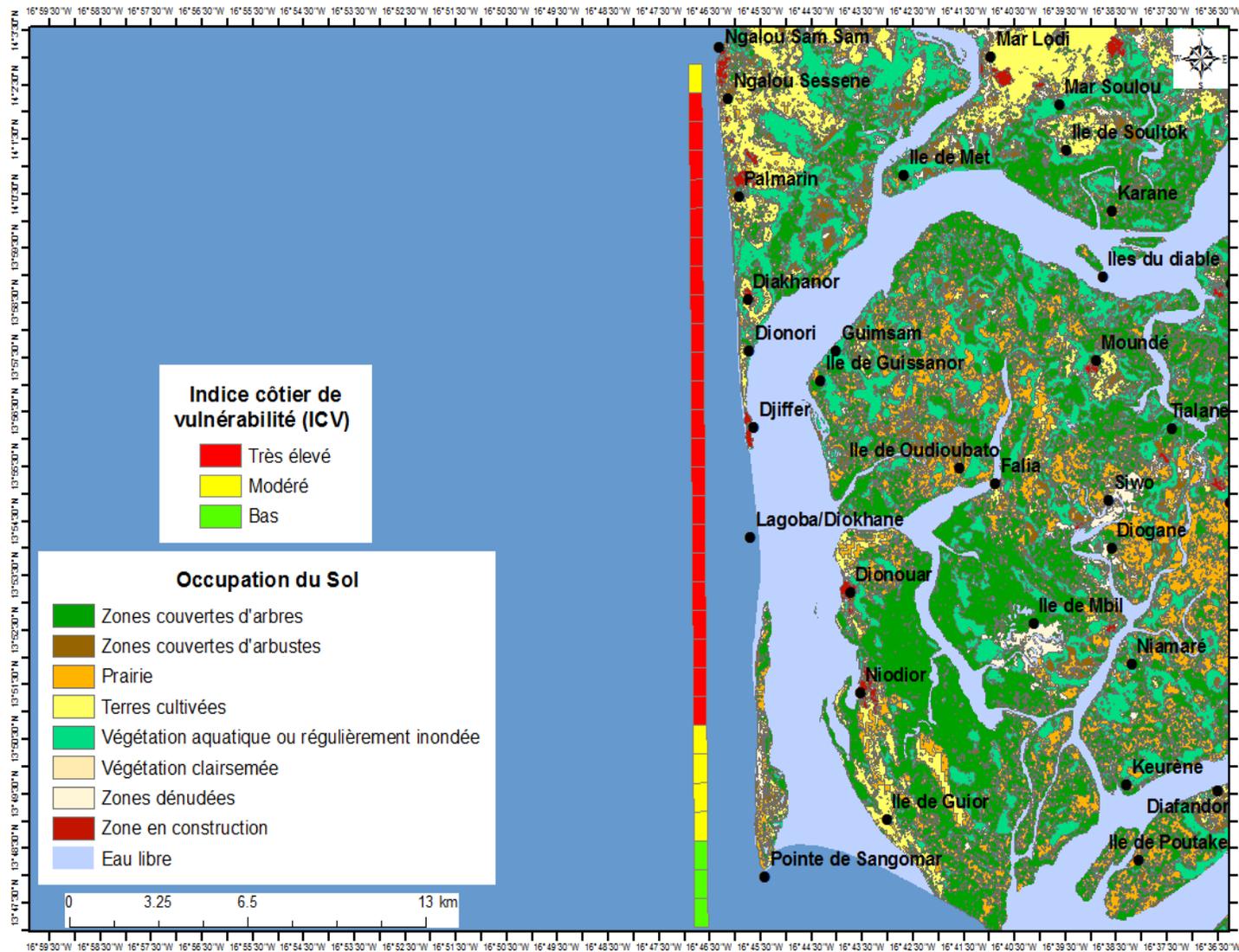


Figure 47: Carte d'occupation du sol croisée à l'ICV à l'horizon 2050 (Sadio et al, 2018)

- L'augmentation de la température, accompagnée d'une baisse des précipitations entraîne directement une baisse du potentiel de recharge de la nappe du CT et parallèlement une baisse de la charge hydraulique ;
- L'augmentation des pompages couplée à la baisse de la recharge va entraîner d'une part une augmentation de l'intrusion d'eau salée marine et fluviale avec des débits plus importants pour les eaux marines et d'autre part une diminution du débit drainé par les cours d'eau ;
- Le couvert végétal est connu pour atténuer les écoulements de surface et favoriser l'infiltration de l'eau. Sa disparition par la déforestation, les feux de brousse, la croissance démographique et la pression foncière constitue un facteur majeur qui participe à la baisse de la recharge ;
- La superficie des terres salées est très importante dans la région environ 3 089 Km<sup>2</sup> (<ftp://ftp.soilgrids.org/data/recent/etftp://ftp.soilgrids.org/legends>) (Figure 48). Ainsi, ces sels peuvent être lessivés et se retrouver dans la nappe du CT. Ce phénomène de lessivage constitue un facteur aggravant de la dégradation de la qualité des eaux souterraines.

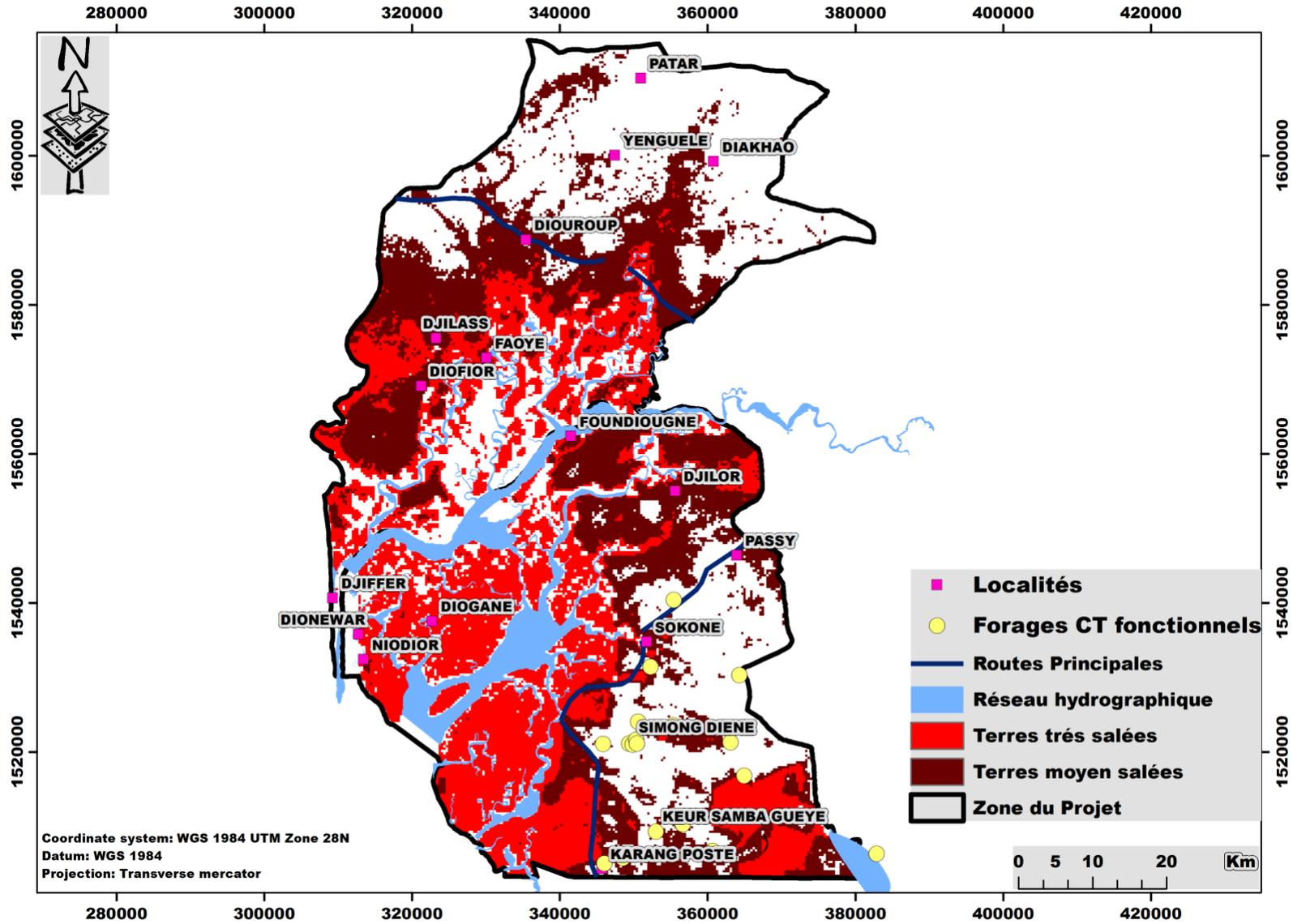


Figure 48: Distribution des terres salées dans la zone du projet (<ftp://ftp.soilgrids.org/data/recent/>)

Le traitement de l'ensemble de ces données à l'aide des méthodes statistiques, ainsi que la combinaison et la superposition des différentes sources d'informations via les Systèmes d'Information Géographique (SIG), a permis d'obtenir des cartes de base et graphes pour chaque indicateur pour l'analyse de la sensibilité.

### 5.1.3 Traitement capacité adaptation

Pour évaluer la capacité d'adaptation mise en place, nous avons exploité les rapports d'études du projet de la DGPRE « Études hydrogéologiques et hydrologiques complémentaires de la nappe du Continental Terminal de la zone Sine-Gambie ».

### 5.1.4 Limites de la méthodologie

Les limites de la méthodologie se situent essentiellement sur le manque et l'accès difficile aux données.

- L'indisponibilité de données climatiques journalières observées est une limite quant à la comparaison des moyennes calculées et observées. Ainsi à défaut d'avoir des moyennes observées, nous avons comparé les moyennes calculées pour évaluer la tendance future des volumes d'eau infiltrés ;
- L'absence de données sur la consommation en eau pour l'actuel et le futur dans le secteur touristique est une limite dans l'estimation des besoins en eau dans la région ;
- La durée du projet jugée courte a été une vraie limite pour mener à bien toutes les investigations nécessaires.

## 5.2 Résultats

### 5.2.1 Exposition

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 27). 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.

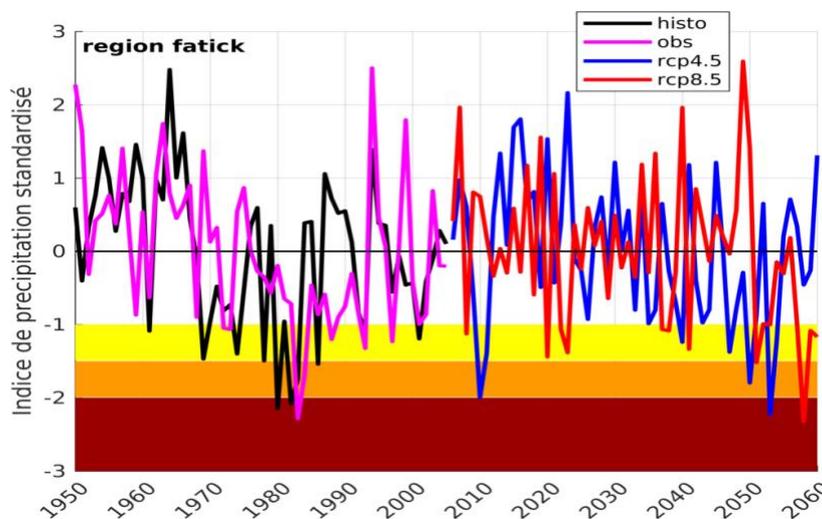
Pour le début de la saison des pluies, les scénarios prévoient des démarrages de plus en plus tardifs. A l'horizon 2035 les deux scénarios prévoient un changement presque identique alors qu'à l'horizon 2050 le RCP 8.5 projette un changement un peu plus important. A l'horizon 2035, un retard d'environ  $4.5 \pm 3$  jours sera observé alors qu'à l'horizon 2050 ce retard sur le démarrage de la saison pourrait s'accroître pour atteindre au moins  $6,5 \pm 3,5$  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  $13 \pm 7$  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 27** : 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

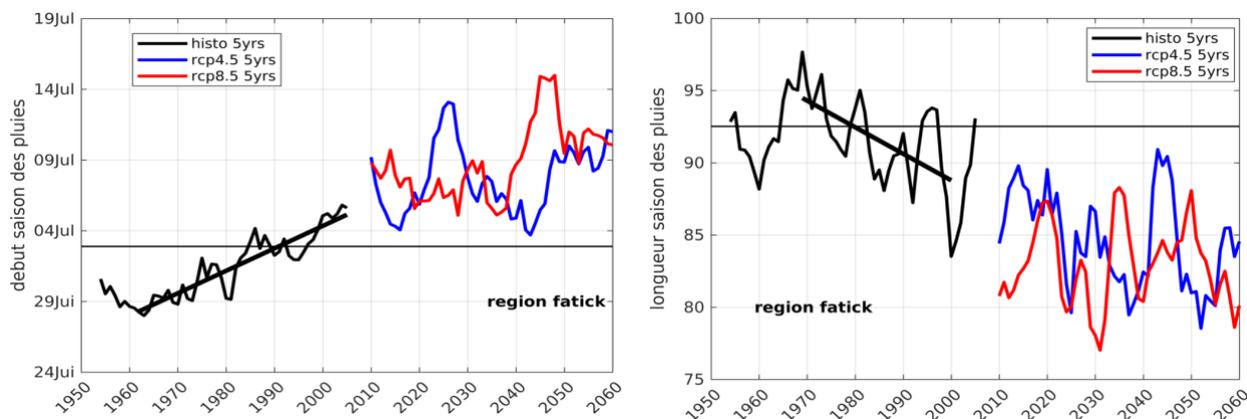
L'évolution de l'indice de pluie standardisé (IPS) (figure 49), montre qu'entre les années 2020 à 2035 les précipitations pourraient être proches de la normale de référence. Par contre les années 2040 pourraient enregistrer des sécheresses modérément sèches. Au-delà de 2045 les projections montrent une 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 49** : 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 50, 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 50 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

50 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 50:** 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 28). 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 28:** 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 51) montre que de 1950 à environ 1997 les températures maximales et minimale sont inférieures à leurs valeurs de référence (Figure 51). Les hausses par rapport à la période de référence, commencent à partir de 1998. Jusqu'en 2035 les deux scénarios (Figure 51, courbes bleue et rouge) sont proches entre eux d'où la faible différence obtenue dans le tableau 28 à l'horizon 2035.

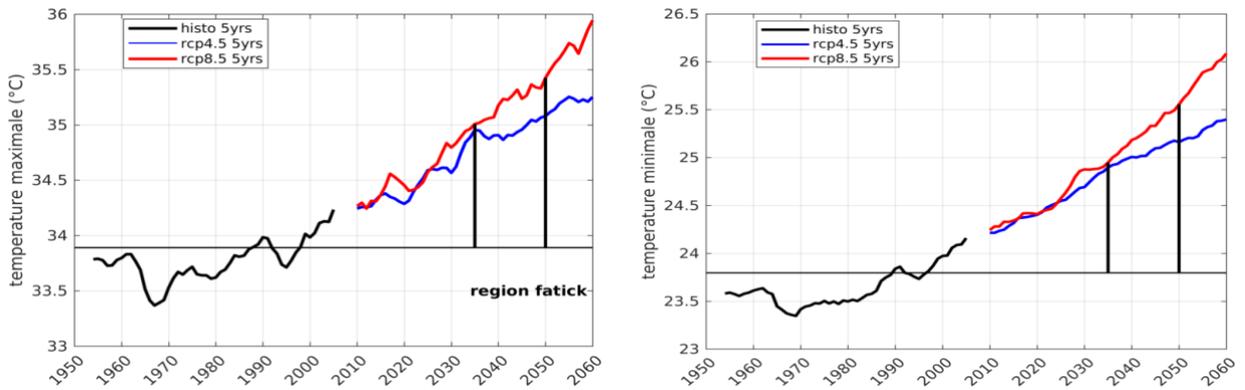


Figure 51: Évolution de la moyenne mobile sur 5ans de la température maximale de l'historique (noire), du scénario rcp4.5 (bleue) et du scénario rcp8.5 (rouge). Le trait noir fin horizontal donne la valeur de la température maximale de la période de référence. Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 24 simulations des modèles.

### 5.2.2 Sensibilité

Le degré d'affectation du système aquifère du CT à l'exposition future est évalué sur les indicateurs de suivi décrits dans l'approche méthodologique pour étudier les impacts potentiels du changement climatique sur la nappe à l'horizon 2050. Cependant, nous allons rappeler le contexte futur des ressources en eau de surface.

#### 5.2.2.1 Contexte futur des ressources en eau de surface

La Figure 52 montre des faibles quantités de précipitations à Fatick avec une moyenne de 575 mm/an. Ces faibles quantités sont perdues sous forme de vapeurs traduites par des valeurs d'ETP toujours supérieures aux quantités de pluie précipitées durant la période 2006-2050.

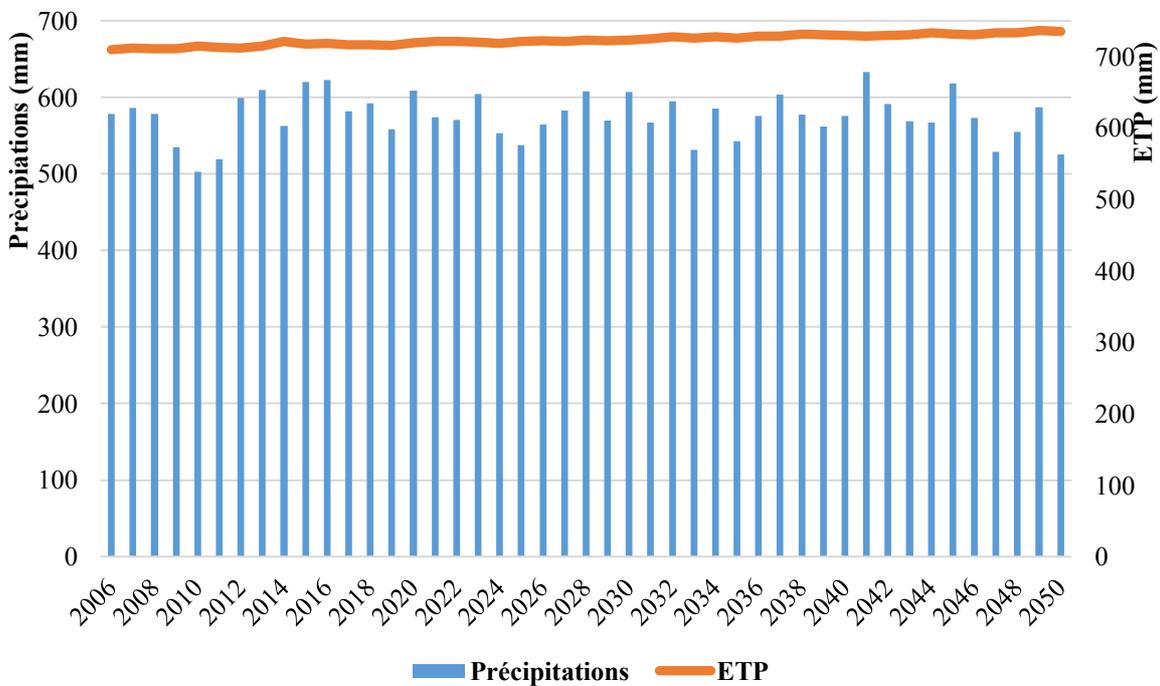


Figure 52: Évolution temporelle des précipitations et de l'ETP à Fatick pour le scénario RCP4.5

Le même phénomène est observé à Toubacouta avec des quantités de pluies faibles 635 mm/an en moyenne (Figure 53).

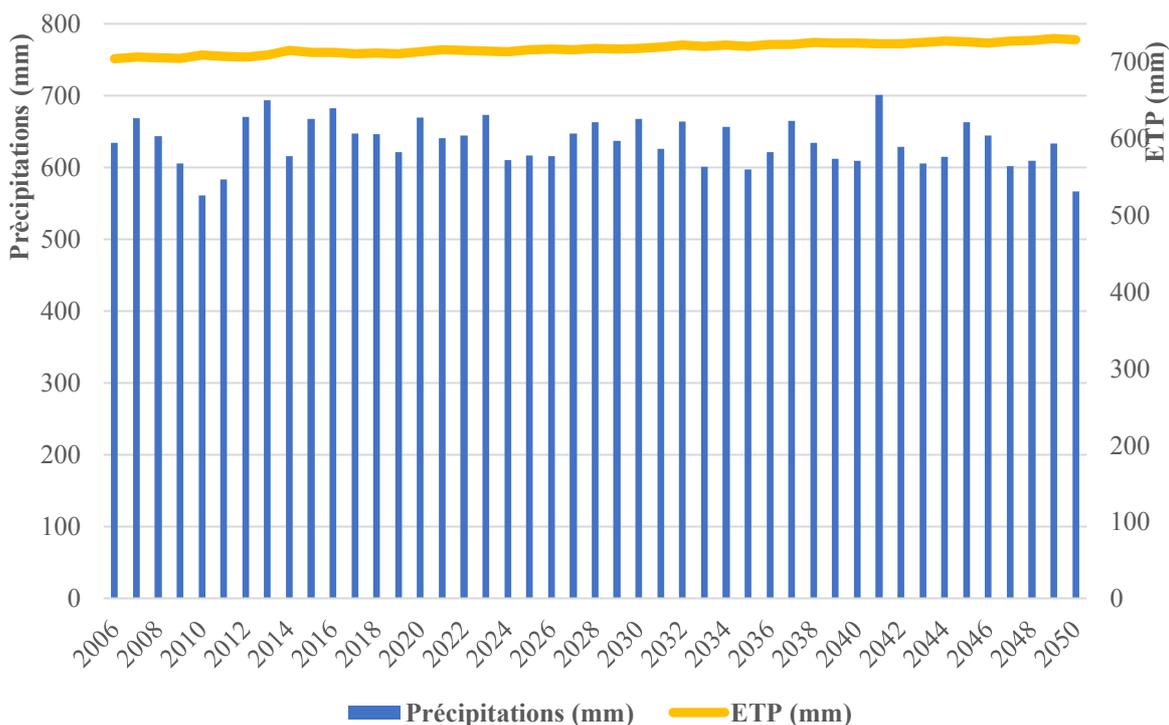


Figure 53: Évolution temporelle des précipitations et de l'ETP à Toubacouta pour le scénario RCP4.5

Dans les deux stations, L'ETP annuelle est constamment supérieure aux précipitations annuelles durant la période 2006-2050 traduisant un important déficit hydrique et une diminution considérable de l'humidité du sol.

Ces faibles quantités de pluies couplées à l'ETP élevée dans la région vont entraîner une baisse de la disponibilité des ressources en eau de surface. Cette dernière va affecter négativement le secteur de l'irrigation dans la région.

Les écoulements de surface des petits bassins (Nema et Djikoye) vont diminuer considérablement. Ce qui signifie une diminution des apports continentaux et une disparition de l'effet de sache de la langue salée. Cette disparition va contribuer à la salinisation de la nappe superficielle du CT.

Le Tableau 29 montre qu'un déficit pluviométrique de -9% à l'horizon 2035 et de -14% à l'horizon 2050 va entraîner une baisse significative des volumes d'eau écoulés à l'horizon 2035 et qui va s'accroître à l'horizon 2050 par rapport aux volumes d'eau écoulés moyens pour la période 1950-2016 dans tous les bassins versants de la région.

Tableau 29: Tendances évolutives des volumes d'eau écoulés dans la région à l'horizon 2050

Bassins versants	Volumes écoulés 1950-2016	Volumes écoulés Horizon 2035	Tendance	Volumes écoulés Horizon 2050	Tendance
Bandiala Au Sud	2744450	2486471	-257 978	2360227	-384 223
Carcar	40311934	36522612	-3 789 322	34668263	-5 643 671
Diombos Centre	18760796	16997281	-1 763 515	16134284	-2 626 511
Saloum	86977204	78801347	-8 175 857	74800395	-12 176 809
Sine	54478969	49357946	-5 121 023	46851913	-7 627 056
Djikoye	10372848	9397800	-975 048	8920649	-1 452 199
Nema	2500000	2265000	-235 000	2150000	-350 000

Ces résultats montrent que les eaux de surfaces sont très vulnérables dans la région. En effet, les écoulements ne sont plus importants pour cause de la baisse des apports continentaux de -9% à l'horizon 2035 qui va s'accroître à l'horizon 2050 de -14% selon les prévisions du scénario RCP4.5, de l'augmentation de la salinité des eaux de surface sous l'effet combiné de l'évaporation +1.4 °C et du déficit d'écoulement -14% ainsi que la remontée marine de 50 cm, de l'expansion du fleuve Saloum associée à la hausse du niveau marin et de l'augmentation des surfaces salées à l'horizon 2050.

Ces résultats sont en accord avec les travaux de Tall et *al.*, (2016) effectués dans le bassin du lac de Guiers qui montrent des climats semi-arides à arides pour les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 et ces changements menacent considérablement la disponibilité en eau douce et les cultures irriguées sur le Bassin. Les travaux de Bodian et *al.*, (2018) dans les bassins du fleuve Gambie et du Sénégal qui montrent une diminution des écoulements dans le bassin du fleuve Gambie de -22% et de -26% respectivement pour les scénarii RCP4.5 et RCP8.5.

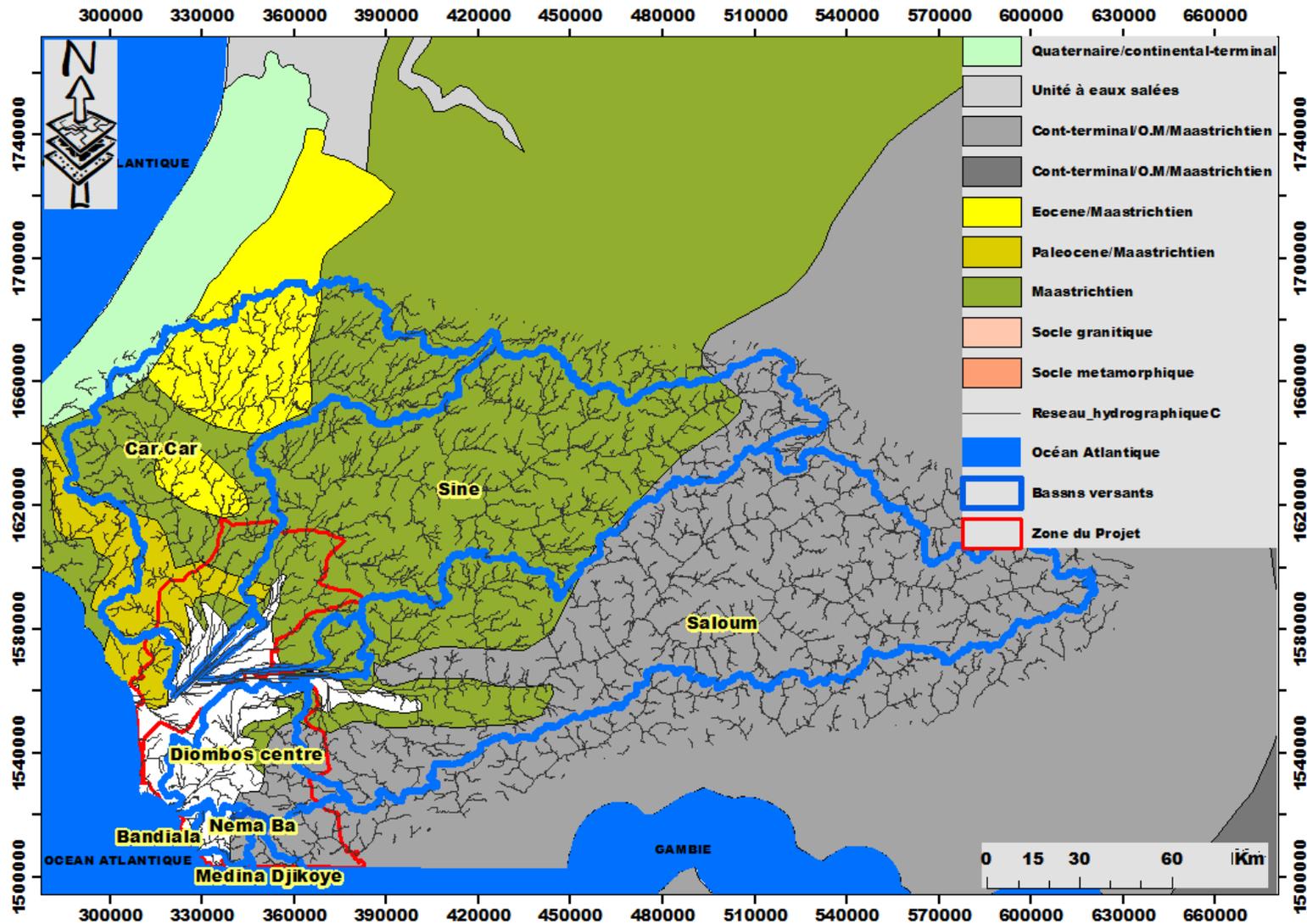


Figure 54: Contexte actuel des ressources en eau dans la région

### 5.2.2.2 Évaluation de la sensibilité des eaux souterraines

Le régime des précipitations conditionne la disponibilité des ressources en eau souterraines (Bodian, 2014) et reste le facteur principal de la production alimentaire (Sarr et al, 2013). Aujourd'hui, le retour progressif des précipitations constaté depuis 2000 est manifeste dans plusieurs régions du Sahel (Ozer et al., 2003 ; Diello, 2007 ; Sane, et al., 2018). Par ailleurs, 50% des projections climatiques régionales suggèrent que des 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. 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).

#### 5.2.2.2.1 Disponibilité de la ressource

La tendance évolutive de la disponibilité en eau est évaluée dans les zones de Fatick et Toubacouta pour les scénarii d'évolution des gaz à effet de serre RCP4.5 et RCP8.5.

##### a. Tendance évolutive de la recharge et des volumes d'eau infiltrés pour le RCP4.5

Le Tableau 30 montre la comparaison des moyennes annuelles 2006-2035 et 2021-2050 par rapport à la période de référence 1976-2005.

Les résultats montrent qu'une augmentation moyenne annuelle de +0.6°C et un déficit pluviométrique moyen annuel de -4.5% par rapport à la période de référence 1976-2005 vont entraîner une baisse de la recharge de -12 mm/an et des volumes d'eau infiltrés de -53.3 Mm<sup>3</sup>/an et une augmentation de l'évapotranspiration de +14 mm/an pour l'horizon 2035.

Parallèlement, une augmentation moyenne annuelle de +1.1°C et un déficit pluviométrique de -4.6% par rapport à la moyenne de référence ont pour conséquence une baisse de la recharge de -13 mm/an et des volumes d'eau infiltrés de -60.4 Mm<sup>3</sup>/an et une augmentation de l'évapotranspiration de +22 mm/an pour l'horizon 2050.

**Tableau 30:** Moyenne annuelle des paramètres hydro-climatiques sur les horizons 2035 et 2050 par rapport à la période de référence 1976-2005 à Fatick pour le RCP4.5

		Moyenne annuelle 1976-2005	Horizon 2035	Tendance	Horizon 2050	Tendance
Température	°C	27.4	28	+0.6	28.5	+1.1
Précipitation		602 mm	575 mm	-4.5%	574 mm	-4.6%
ETP	mm	705	719	+14	727	+22
Recharge	mm	63	51	-12	50	-13
Volume d'eau infiltré	Mm <sup>3</sup>	286.5	233.2	-53.3	226.1	-60.4

Le scénario RCP4.5 à Toubacouta montre une baisse drastique des volumes d'eau infiltrés.

Une hausse moyenne annuelle de +0.6 °C et un déficit pluviométrique annuel de -9% ont pour conséquence une baisse drastique de la recharge de -30 mm/an et des volumes d'eau infiltrés de -136 Mm<sup>3</sup>/an et une augmentation de l'ETP de +14 mm/an pour l'horizon 2035.

La comparaison des moyennes annuelles 1976-2005 et 2021-2050 montre également une tendance à la baisse plus marquée des volumes d'eau infiltrés -156 Mm<sup>3</sup>/an et de la recharge de -34 mm/an et une augmentation significative de l'ETP de +22 mm/an.

**Tableau 31:** Moyenne annuelle des paramètres hydro-climatiques sur les horizons 2035 et 2050 par rapport à la période de référence 1976-2005 à Toubacouta pour le RCP4.5

		Moyenne annuelle 1976-2005	Horizon 2035	Tendance	Horizon 2050	Tendance
Température	°C	27.2	27.8	+0.6	28.2	+1
Précipitation		704 mm	639 mm	-9 %	632 mm	-10 %
ETP	mm	700	714	+14	722	+22
Recharge	mm	105	75	-30	71	-34
Volume d'eau infiltré	Mm <sup>3</sup>	475	339	-136	319	-156

#### b. Tendance évolutive de la recharge et des volumes d'eau infiltrés pour le RCP8.5

Les résultats obtenus pour le scénario RCP8.5 à Fatick montrent une tendance généralisée à la baisse des volumes d'eau infiltrés. En effet une hausse de la température de +0.7 °C et un déficit pluviométrique de -6.5% vont entraîner une baisse de la recharge de -15 mm/an et des volumes d'eau infiltrés de -71.5 Mm<sup>3</sup>/an et une augmentation de l'évapotranspiration de +14 mm/an pour l'horizon 2035.

Parallèlement, une augmentation moyenne annuelle de +1.2 °C et un déficit pluviométrique de -4.8% par rapport à la moyenne de référence vont avoir pour conséquence une baisse de la recharge de -14 mm/an et des volumes d'eau infiltrés de -65.5 Mm<sup>3</sup>/an et une augmentation de l'évapotranspiration de +25 mm/an pour l'horizon 2050.

**Tableau 32:** Moyenne annuelle des paramètres hydro-climatiques sur les horizons 2035 et 2050 par rapport à la période de référence 1976-2005 à Fatick pour le RCP8.5

		Moyenne annuelle 1976-2005	Horizon 2035	Tendance	Horizon 2050	Tendance
Température	°C	27.4	28.1	+0.7	28.6	+1.2
Précipitation	mm	602 mm	563 mm	-6.5%	573 mm	-4.8%
ETP	mm	705	719	+14	730	+25
Recharge	mm	63	48	-15	49	-14
Volume d'eau infiltré	Mm <sup>3</sup>	286.5	215	-71.5	221	-65.5

A Toubacouta, le scénario pessimiste RCP8.5 montre pour la période 2006-2035 une baisse très significative des volumes d'eau infiltrés. En effet une hausse annuelle de +0.6 °C et un déficit pluviométrique annuel de -11% vont entraîner une baisse de la recharge de -35 mm/an et en conséquence une perte en volume d'eau infiltré de -160 Mm<sup>3</sup>/an.

Une hausse annuelle de +1.2 °C et un déficit pluviométrique annuel de -12% ont pour conséquence une perte en volumes d'eau infiltrés de -179 Mm<sup>3</sup>/an due à une baisse drastique de la recharge de -39 mm/an et une augmentation de l'ETP de +26 mm/an.

**Tableau 33:** Moyenne annuelle des paramètres hydro-climatiques sur les horizons 2035 et 2050 par rapport à la période de référence 1976-2005 à Toubacouta pour le RCP8.5

		Moyenne annuelle 1976-2005	Horizon 2035	Tendance	Horizon 2050	Tendance
Température	°C	27.2	27.8	+0.6	28.4	+1.2
Précipitation	mm	704	626	-11%	620	-12%
ETP	mm	700	714	+14	726	+26
Recharge	mm	105	70	-35	65.6	-39.5
Volume infiltré	Mm <sup>3</sup>	475	315.6	-160	296.2	-179

### Conclusion partielle

L'analyse des sorties des modèles climatiques globaux (MCG) de CIMP5 et des sorties des macros hydro-climatiques met en exergue l'impact des changements climatiques sur la disponibilité de la ressource dans le Saloum. Les scénarii climatiques RCP4.5 et RCP8.5 sont utilisés pour évaluer les impacts potentiels aux horizons 2035 et 2050 par rapport à la période de référence 1976-2005.

Dans la région, les impacts du changement du régime climatique sur la disponibilité de l'eau se manifestent par une augmentation de l'évapotranspiration et une diminution de la recharge de la nappe du CT et en conséquence une perte considérable en volumes d'eau infiltrés.

L'augmentation du potentiel d'évapotranspiration (ETP) se situe entre +14 mm/an à l'horizon 2035 pour le RCP4.5 et +25 mm/an à l'horizon 2050 pour le RCP8.5. Le déficit pluviométrique dans la région atteint -9% à l'horizon 2035 pour le RCP4.5 et -12% à l'horizon 2050 pour le RCP8.5.

De tels changements vont entraîner une baisse drastique de la recharge de la nappe du CT et de l'humidité du sol et en conséquence une perte considérable en volume d'eau infiltré.

Cette perte en volumes d'eau infiltrés traduit une baisse des réserves renouvelables de l'ordre -136 Mm<sup>3</sup>/an (-28%) à l'horizon 2035 qui va s'accroître à l'horizon 2050 de -156 Mm<sup>3</sup>/an (-33%) selon les prévisions du scénario RCP4.5 et une baisse plus importante de l'ordre de -179 Mm<sup>3</sup>/an (-37%) à l'horizon 2050 selon les prévisions du scénario RCP8.5. En parallèle, les écoulements de base très importants pour le développement du secteur de l'irrigation dans le sud de la région vont connaître une baisse à l'horizon 2035.

Ces résultats sont en accord avec les travaux de Dieng, (2017) qui montrent à partir de la modélisation du système dynamique du CT que l'effet combiné de l'évolution du climat et des prélèvements pourrait entraîner une diminution des niveaux piézométriques jusqu'à -12 m par endroit par rapport au niveau actuel (2012) en période de sollicitation à l'horizon 2050.

### 5.2.2.2.2 Taux de couverture des besoins en eau futurs

Les projections de la demande en eau sont complexes puisqu'elles sont contraintes par de nombreuses variables comme la croissance démographique, la demande en eau unitaire, l'expansion des surfaces irriguées, l'estimation de la fréquentation touristique et le développement du secteur énergétique (Collet, 2013).

La région de Fatick constitue une zone vulnérable en termes de disponibilité des ressources en eau douce et de croissance de la demande en eau. Ainsi, l'évaluation de la capacité du stock de la nappe du CT à satisfaire la demande en eau future est cruciale pour répondre aux attentes des gestionnaires et des usagers dans ce contexte de changement climatique et de croissance démographique.

#### a. Estimation des besoins en eau

L'analyse du Tableau 34 montre qu'une hausse de la température de +1.2 °C à l'horizon 2035 couplée à la croissance de la population a pour conséquence une augmentation de la demande en eau. Les besoins en eau sont estimés à 5.11 Mm<sup>3</sup>/j à l'horizon 2035 et à 5.18 Mm<sup>3</sup>/j à l'horizon 2050.

Tableau 34: Estimation des besoins en eau par secteur

Année	Population	Dose par habitant	Besoins en eau population	Effectif Bétail	Besoins en eau bétail	Irrigation (Superficie X 77 m <sup>3</sup> /j)	Besoin en eau total
		l/j	m <sup>3</sup> /j		m <sup>3</sup> /j	Mm <sup>3</sup> /j/ha	Mm <sup>3</sup> /j
2017	704 540	35	24 658	2 395 436	15 408	5.03	5.07
2025	902 855	40	36 114	3 069 707	19 745	5.03	5.08
2035	1 237 129	45	55 671	4 206 238	27 055	5.03	5.11
2050	1 984 315	55	109 137	6 746 671	43 395	5.03	5.18

#### b. Tendence évolutive des besoins en eau dans la région

Tous les secteurs vont connaître une hausse de la demande en eau dans la région. Les besoins en eau domestiques vont augmenter de +31 013 m<sup>3</sup>/j à l'horizon 2035 et de +84 479 m<sup>3</sup>/j à l'horizon 2050. Les besoins en eau du cheptel vont augmenter de +11 647 m<sup>3</sup>/j à l'horizon 2035 et de +27 987 m<sup>3</sup>/j à l'horizon 2050.

Cette hausse de la demande en eau va entraîner une augmentation de la pression sur la ressource pour satisfaire la demande dans la région. Ainsi, la nappe du CT se retrouve sous menace de surexploitation.

Tableau 35: Tendence évolutive des besoins en eau à l'horizon 2050

		Année de référence 2017	Horizon 2035	Tendance	Horizon 2050	Tendance
Besoins en eau population	m <sup>3</sup> /j	24 658	55 671	+31 013	109 137	+84 479
Besoins en eau bétail	m <sup>3</sup> /j	15 408	27 055	+11 647	43 395	+27 987
Besoin en eau total	Mm <sup>3</sup> /j	5.07	5.11	+0.04	5.18	+0.11

La Figure 55 met en évidence la baisse des réserves renouvelables à l'horizon 2050 environ -179 Mm<sup>3</sup>/an (Tableau 33) traduite par une baisse des précipitations et une hausse de l'ETP en rapport avec l'augmentation de la demande en eau. Cette situation montre clairement que les besoins en eau futurs seront difficilement couverts dans la région.

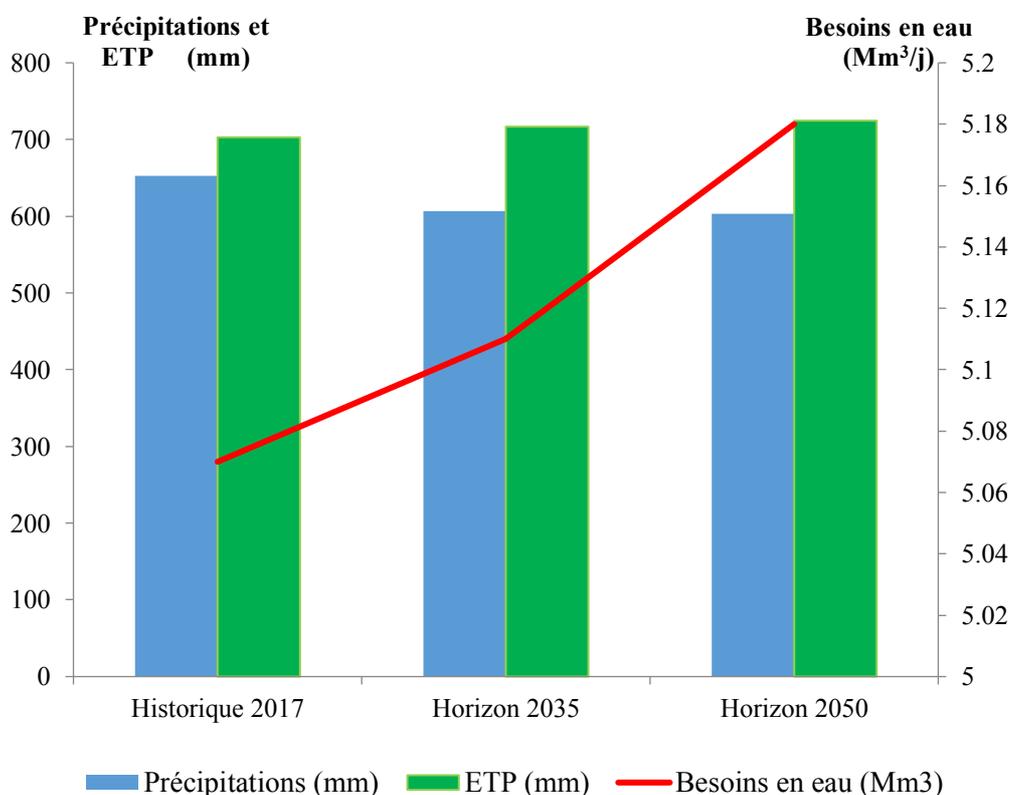


Figure 55: Évolution des précipitations, de l'ETP et des besoins en eau à l'horizon 2050

### Conclusion partielle

De façon antagoniste, la réduction de la disponibilité de la ressource va s'accompagner d'une élévation de la demande en eau. L'irrigation qui est un secteur en pleine promotion dans la région constitue le plus grand consommateur d'eau suivi du secteur de l'élevage. Avec les résultats des simulations, le secteur de l'irrigation sera très affecté par le stress hydrique dû à l'effet combiné du déficit pluviométrique qui varie de -9% à -24% et l'augmentation de l'ETP qui va réduire l'humidité du sol. En plus, la hausse annoncée de la température de +1.2 °C dans la région va entraîner un besoin accru en eau lié aux besoins de régulation thermique.

Dans la région d'étude, la demande en eau va connaître une hausse de plus de 15 Mm<sup>3</sup>/an à l'horizon 2035 sur tous les secteurs qui va augmenter à 40 Mm<sup>3</sup>/an à l'horizon 2050.

Pour satisfaire la demande en eau, la ressource en eau douce disponible de la nappe du CT serait de plus en plus exploitée. Ainsi, la baisse de la recharge et la tendance à la surexploitation dans le but de satisfaire la demande en eau peuvent contribuer à d'importants rabattements du niveau piézométrique et une dégradation irréversible de la qualité de la ressource par appel d'eau salée vers la nappe du CT qui est un système dynamique superficiel qui subit directement l'influence de la salinité du fleuve, de l'avancée de la mer, du régime climatique et des effets anthropiques.

Les résultats obtenus sur les projections des besoins en eau doivent être maniés avec beaucoup de précaution en raison d'une part de la non prise en compte du secteur touristique très développé dans le Sud de la région (Sous-estimation des besoins en eau) et d'autre part aux incertitudes liées à l'estimation à l'horizon 2050 de la population, de l'effectif du bétail et des surfaces irrigables ainsi que des incertitudes liées aux modèles climatiques.

Toutefois, la tendance prononcée à la baisse du stock de la ressource de la nappe du CT accompagnée d'une élévation de la température et de la reprise évaporatoire aura des conséquences sur la couverture de la demande en eau.

Ces résultats vont dans le même sens que ceux d'un certain nombre de travaux (Dieng, 2017 ; Malou & Cissé, 2016 et Marega, 2016) qui ont montré une augmentation de la demande en eau potable pour la couverture des besoins en eau des secteurs agricole, industriel et touristique de plus en plus développés dans la région.

#### 5.2.2.2.3. Qualité des eaux souterraines de la nappe du CT

La vulnérabilité future des ressources en eau sera liée à la disponibilité de l'eau, mais aussi à sa qualité. L'inadéquation entre la disponibilité et les besoins en eau toujours croissants d'une part et les politiques de gouvernance de l'eau et les systèmes d'exploitation de la ressource d'autre part sont des facteurs qui pourraient accroître la dégradation des ressources en eau dans la région. La combinaison des facteurs naturels (déficit pluviométrique, reprise évaporatoire, submersion marine, basse altitude et salinité des sols) et anthropiques (surexploitation, mauvaise gestion des terres et de la ressource) est un processus favorable à l'avancée de la salinité marine et fluviale vers les zones de captage. Ce qui risque d'entraîner une dégradation irréversible de la ressource et réduire d'avantage le stock en eau douce de la nappe du CT. Ce phénomène reste très probable dans la région du Saloum où tous les facteurs de dégradation sont réunis.

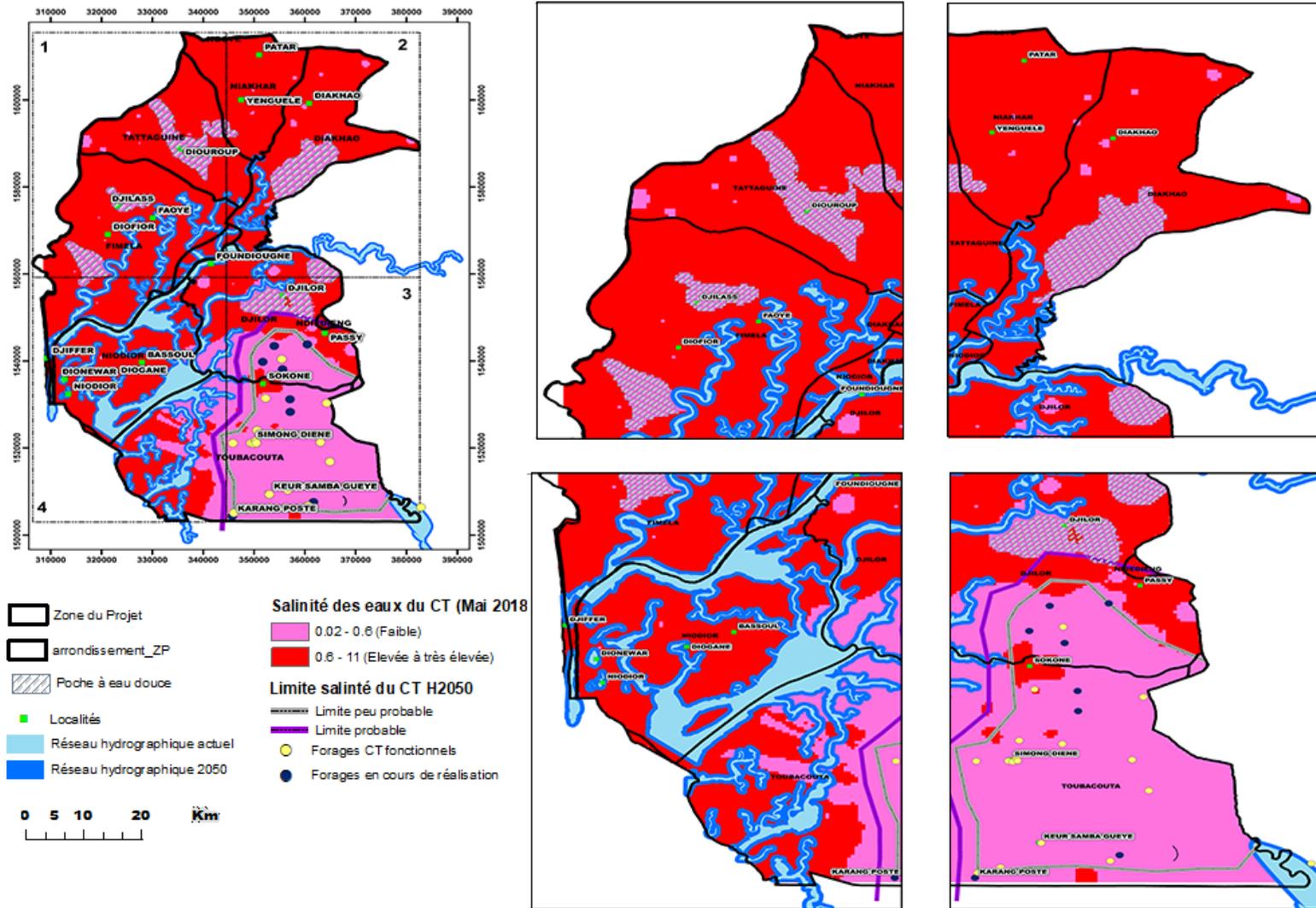


Figure 56: Salinité de la nappe du CT à l'état actuel (Mai 2018) et à l'horizon 2050

Les études d'impacts des changements climatiques sur les ressources en eau dans le Saloum sont fort limitées. Les résultats des travaux de Dieng, (2017) basés sur la modélisation de l'hydrodynamisme de la nappe du CT et l'impact du changement climatique sur la disponibilité et la qualité de la ressource montrent une dégradation progressive de la qualité à l'horizon 2050. Celle-ci est marquée par l'intrusion saline marine et fluviale avec des débits plus importants pour l'eau de mer. L'intrusion saline est accentuée par la baisse drastique de la piézométrie de la nappe due aux phénomènes combinés d'augmentation des pompages, de déficit pluviométrique et de forte reprise évaporatoire. Les résultats de Dieng (2017) montrent également que la partie Sud-ouest de la région est la plus vulnérable à l'intrusion d'eau marine. Ainsi, l'installation de nouveaux captages dans cette zone aurait pour conséquence d'accélérer le processus de dégradation de la qualité de la ressource.

**Tableau 36:** Récapitulatif des débits d'eau des sorties des modèles à l'état actuel (2012) et à l'horizon 2050 en m<sup>3</sup>/s (Dieng, 2017)

Simulation	Recharge	Intrusion marine	Intrusion fleuve	Pompage	Drains	Décharge Ocean	Décharge Fleuve	Variation de stock
<b>Transitoire 2012</b>	1.2	0.18	0.08	-0.07	-0.008	-0.37	-0.18	0.83
<b>horizon 2050 (CERFACS)</b>	1.01	0.21	0.09	-0.15	-0.003	-0.28	-0.14	0.76
<b>horizon 2050 (CanESM2)</b>	0.7	0.22	0.09	-0.15	-0.002	-0.27	-0.14	0.74

En plus de la sensibilité de la ressource à l'avancée de la salinité, les activités anthropiques liées à l'agriculture intensive et au mauvais assainissement constituent un facteur aggravant de la dégradation de la qualité de la ressource par la contamination des eaux par les nitrates. La mauvaise qualité de la ressource pourrait être à l'origine de graves maladies hydriques et engendrer d'importants flux de migration dans la région.

Les secteurs économiques de la région vont être très affectés par la baisse des réserves renouvelables et la dégradation de la qualité de la ressource à l'horizon 2050.

### 5.2.3 Capacité d'adaptation

L'état du Sénégal à travers d'importants programmes d'amélioration de l'accès à l'eau potable et de lutte contre les aléas climatiques dans le bassin arachidier a financé d'importants projets d'études comme le PCTI (Plan Climat Territorial Intégré), et les projets réalisés par la DGPRE : le PAGIRE-BA «*Etudes hydrogéologiques pour l'évaluation des potentialités des ressources en eau des zones favorables en vue d'un transfert d'eau vers la zone du Bassin Arachidier*» et le Sine-Gambie «*Etudes hydrogéologiques et hydrologiques complémentaires de la nappe du Continental Terminal de la zone Sine-Gambie*». Ces projets ont abouti à d'importants résultats dont leurs valorisations pourraient contribuer à réduire la vulnérabilité aux changements climatiques dans la région du bassin arachidier.

### Évaluation des potentiels exploitables de la nappe du Continental terminal

Pour cette étude, nous allons considérer les résultats du projet « Études hydrogéologiques et hydrologiques complémentaires de la nappe du Continental Terminal de la zone Sine-Gambie » de la DGPRE en 2017 réalisé dans notre zone d'intervention.

Dans cette étude, trois champs captant ont été pris en compte lors de la phase de simulation du modèle ; il s'agit de :

- Champ captant de Simong Diene pour le projet de transfert vers les îles du Saloum ;
- Champ captant de Ndiayene Moussa pour le transfert vers les localités de Passy, Foundioune, Sokone et Toubacouta ;
- Champ captant de Keur Madiabel pour le transfert vers Kaolack (Figure 55).

Les 5 forages du champ captant de Simong Diene sont déjà existants et fonctionnels et assurent l'approvisionnement en eau des îles du Saloum. Les emplacements des forages proposés pour Ndiayene Moussa et Keur Madiabel sont des emplacements prévisionnels et ne correspondent pas à des forages existants, sauf pour les forages « ND » à Ndiayene Moussa, et « KM2 » à Keur Madiabel. Les champs captant de Ndiayene Moussa et Keur Madiabel peuvent servir au transfert vers les localités de Toubacouta, Sokone, Passy, Foundiougne et Kaolack révélées comme zones déficitaires. En effet, les besoins totaux en eau potable pour les localités de Kaolack, Foundioune, Sokone, Fatick à l'horizon 2025 sont estimés à 28 181 m<sup>3</sup>/j.

Les objectifs finaux des volumes journaliers pour les trois champs captant sont les suivants :

- Simong Diene : 3 200 m<sup>3</sup>/j issus du projet de transfert vers les Iles du Saloum ;
- Ndiayene Moussa : 6 000 m<sup>3</sup>/j ;
- Keur Madiabel : 15 120 m<sup>3</sup>/j.

Toutefois, à vue de la configuration du système aquifère du CT dans le Saloum qui est limité à l'Ouest par les bolons et l'océan atlantique, au Nord par le fleuve Saloum à eau salée mais également caractérisé par l'occurrence de poches salées en profondeur où les conductivités électriques peuvent dépasser 3000 µS/cm. Il est plus viable pour assurer la durabilité de limiter les pompages à 25 000 m<sup>3</sup>/j supplémentaires pour ces 3 champs captant et à un prélèvement total de 45 482 m<sup>3</sup>/j si l'on prend en compte les forages existants.



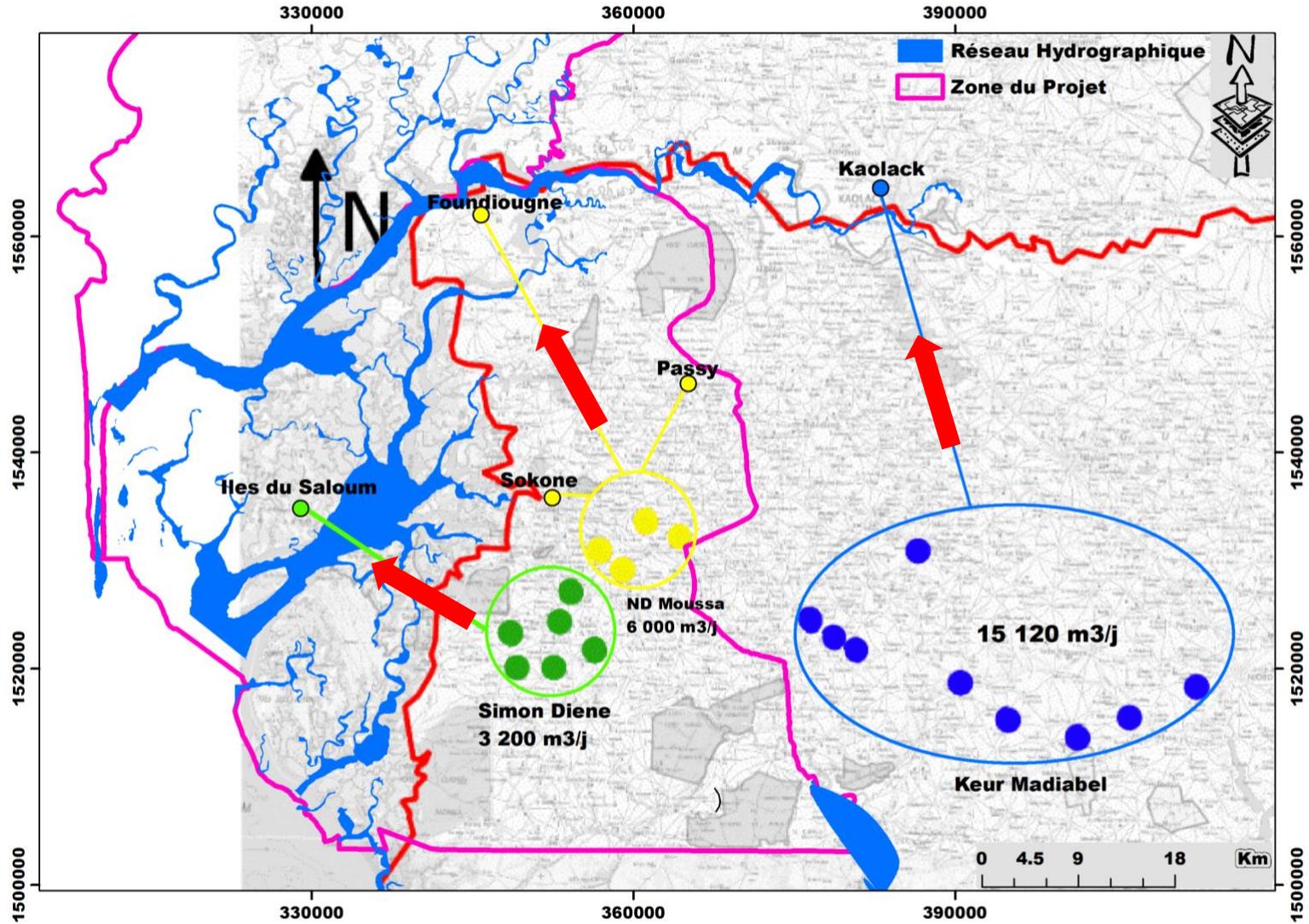


Figure 58: Localisation des trois champs captant à tester et les volumes d'eau simulés (DGPPE, 2016)

Le choix du pompage de 25 000 m<sup>3</sup>/j est surtout guidé par les rabattements induits qui peuvent atteindre 10 m et où les niveaux dynamiques sont supérieurs au niveau de la mer pour pouvoir aspirer l'eau salée provenant de l'intrusion saline.

*Tableau 37: Forages et débits unitaires dans les champs captant choisis (DGPRE, 2016)*

Champs captant	Forages	Débit unitaire (m <sup>3</sup> /h)	Volume total (m <sup>3</sup> /jour)
<b>Simong Diene (Forages déjà réalisés)</b>	F01	15	3 720
	F02	30	
	F03	20	
	F04	40	
	F05	50	
<b>Ndiayene Moussa</b>	ND (Déjà réalisé pour test)	70	6 000
	ND1	70	
	ND2	70	
	ND3	40	
<b>Keur Madiabel</b>	Keur Madiabel 2 (Déjà réalisé pour test)	70	15 120
	KM3	70	
	KM4	70	
	KM5	70	
	KM6	70	
	KM7	70	
	KM8	70	
	KM9	70	
	KM10	70	

Les résultats de ces scénarii de pompage, basés sur les débits à prélever au niveau des forages de même que les rabattements induits ont montré un potentiel exploitable pour le transfert de 25 000 m<sup>3</sup>/j supplémentaires à l'exploitation actuelle qui serait sans danger pour la ressource du CT. Toutefois pour les besoins de préservation de la ressource de la nappe du CT un dispositif de surveillance devrait être mis en œuvre.

Pour cela, les recommandations suivantes sont formulées pour l'exploitation de l'aquifère du CT :

- Un suivi régulier des niveaux de l'aquifère et de la qualité de l'eau devrait être mis en place sur toute son extension, et en particulier dans les zones identifiées comme étant à risque de dégradation de la qualité de l'eau ;
- Les sites d'implantation des nouveaux forages devraient être investigués par prospection géophysique (en ciblant les zones de résistivités moyennes et élevées) pour s'assurer des bonnes caractéristiques hydrauliques et d'une nappe de bonne qualité chimique. Cette recommandation permettrait surtout d'éviter les forts rabattements observés lors des phases de simulation ;
- Une surveillance de l'évolution des niveaux piézométriques et de la qualité de l'eau de l'aquifère au cours du temps est nécessaire au droit des forages d'exploitation, mais aussi sur un réseau de piézomètres positionnés à proximité des champs captant. Ces piézomètres de surveillance doivent être positionnés en amont des captages dans les zones d'appel des forages, mais également en direction des zones d'eau salée proches (littoral ou poches d'eaux saumâtres), afin d'anticiper les risques de dégradation de qualité des eaux. A ce propos, nous recommandons l'implantation de piézomètres de surveillance selon le dispositif présenté dans la Figure 56 ;
- En termes de suivi à réaliser, en plus des mesures de niveaux d'eau et d'analyses chimiques des ions majeurs, il est intéressant de procéder sur ces ouvrages au relevé périodique de profils verticaux de conductivité électrique, en particulier à proximité du littoral.

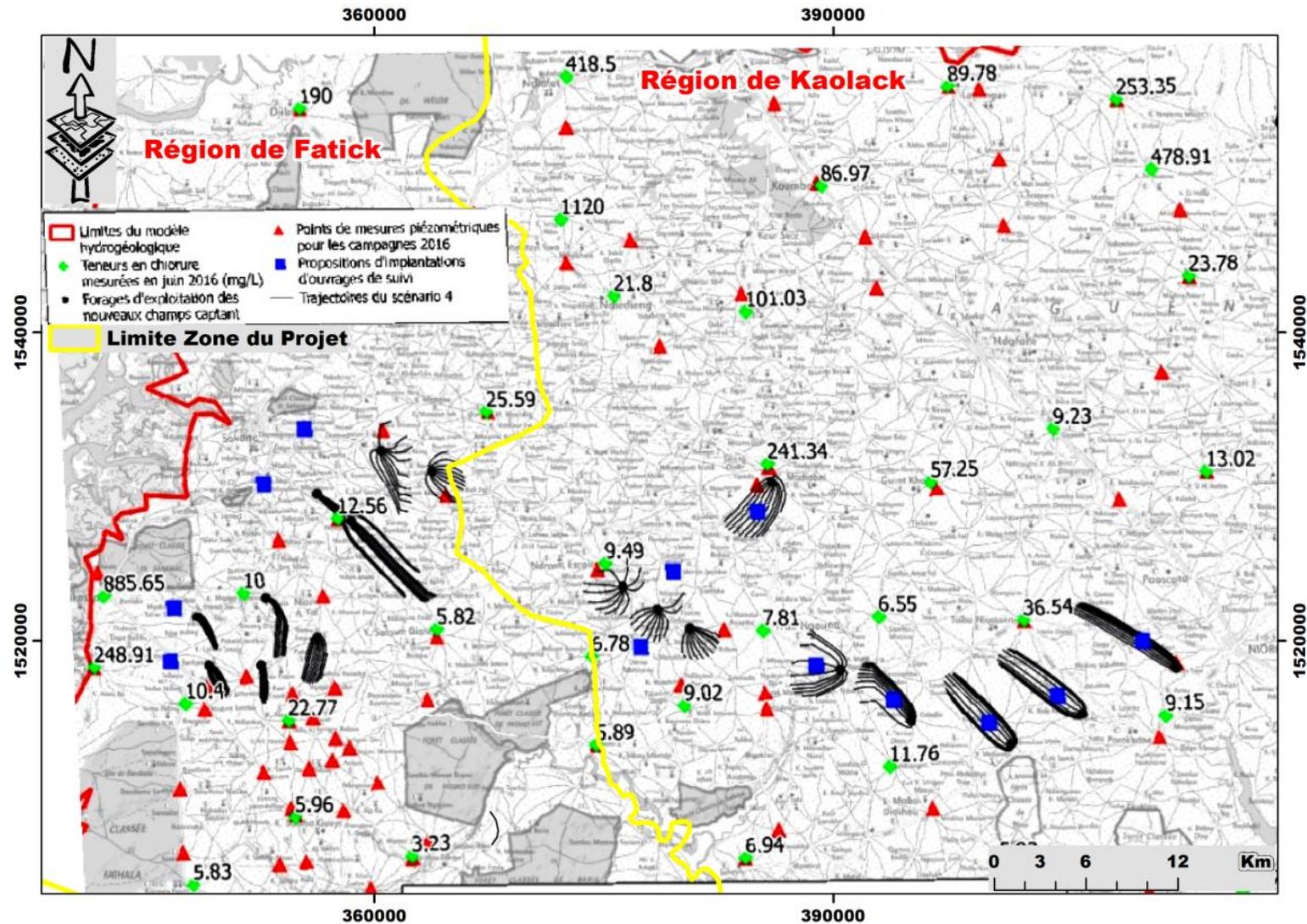


Figure 59: Proposition d'implantation d'ouvrages de suivi de la nappe à proximité des nouveaux champs captant (DGPRE, 2016)

## Conclusion partielle

Les mesures d'adaptation envisagées vont réduire la vulnérabilité des populations de 45 % à l'horizon 2035 pour le secteur de l'eau en améliorant l'accès à l'eau potable en quantité et en qualité dans la région du bassin arachidier. Toutefois, il est nécessaire d'envisager un grand transfert d'eau à l'horizon 2035 à partir du bassin du lac de Guiers pour un meilleur accès à la ressource. Notamment, la ville de Foundiougne où la puissance de la nappe du CT est faible et la nappe profonde du Maastrichtien très salée. Les volumes d'eau simulés par rapport aux besoins en eau demeurent des options viables par priorité à l'approvisionnement en eau des populations, suivi du bétail et enfin l'irrigation. Néanmoins, il est important et primordial de proposer des options d'adaptation complémentaires pour préserver les ressources en eau douce dans la région de Fatick.

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

On s'est fixée ici comme objectif de contribuer à l'identification des impacts potentiels face à l'exposition aux conditions climatiques futures. Ainsi pour atteindre l'objectif fixé, les sorties de 24 simulations des modèles climatiques globaux (MCGs) du CMIP5 sur deux scénarii RCP4.5 et RCP8.5 ont été exploitées via des outils statistiques simples. Les résultats ont été comparés aux valeurs moyennes de la normale climatique du CMIP5 1976-2005 pour évaluer les impacts potentiels des aléas climatique sur les ressources en eau.

Le contexte futur des eaux de surface a été mis en évidence où la diminution des apports continentaux a été démontrée. Concernant les eaux souterraines, la nappe du CT (source principale de l'AEP environ 95%) a été considérée. Le potentiel de renouvellement des eaux, les besoins en eau domestiques, du bétail et de l'irrigation ont été évalués ainsi que la qualité de la ressource.

L'analyse des paramètres climatiques sur la période 2006-2050 a permis de mettre en évidence une diminution prononcée des précipitations et une augmentation des températures. Celles-ci se traduisent par un déficit pluviométrique et une hausse de la reprise évaporatoire dans la région. Les tendances à la baisse et à la hausse projetées respectivement sur les précipitations et sur les températures vont entraîner une forte diminution de la recharge et des volumes d'eau infiltrés aussi bien à Fatick qu'à Toubacouta avec une baisse plus marquée à Toubacouta. Ce qui traduit une réduction considérable du stock des réservoirs souterrains.

De façon antagoniste, la baisse du stock sera accompagnée d'une augmentation significative des besoins en eau à l'horizon 2035 et 2050 pour satisfaire la demande en eau croissante des différents secteurs. Dans la même logique, la qualité de la ressource de la nappe du CT sera très probablement affectée par les effets combinés de la baisse du stock, de la hausse de la demande en eau et de l'élévation du niveau marin à l'horizon 2050. Les résultats de cette étude sont en accord avec les conclusions des récents travaux réalisés au Sénégal et dans le Sahel sur les impacts potentiels du changement climatique sur les ressources en eau (Bodian et al., 2018 ; Dieng, 2017; Tall, et al., 2016). Les capacités d'adaptation mises en place par l'état à travers l'accès à l'eau potable par le transfert sont des moyens viables déjà expérimentés dans la région avec les projets d'adduction d'eau notamment le transfert de Nottto Diosmone Palmarin (NDP) et le transfert de Simong Diene vers les îles du Saloum. Cependant, la réalisation des ouvrages des autres champs captant déjà identifiés pour le transfert d'eau vers les grandes villes est une urgence pour réduire davantage la vulnérabilité des populations dans le bassin arachidier.

En plus l'accès à l'eau par le transfert d'eau, il est nécessaire d'agir dans la région en mettant en place des options d'adaptation adéquates pour une meilleure connaissance et une meilleure gestion des ressources en eau.

**Chaîne d'impact de la vulnérabilité future des ressources en eau dans la zone**

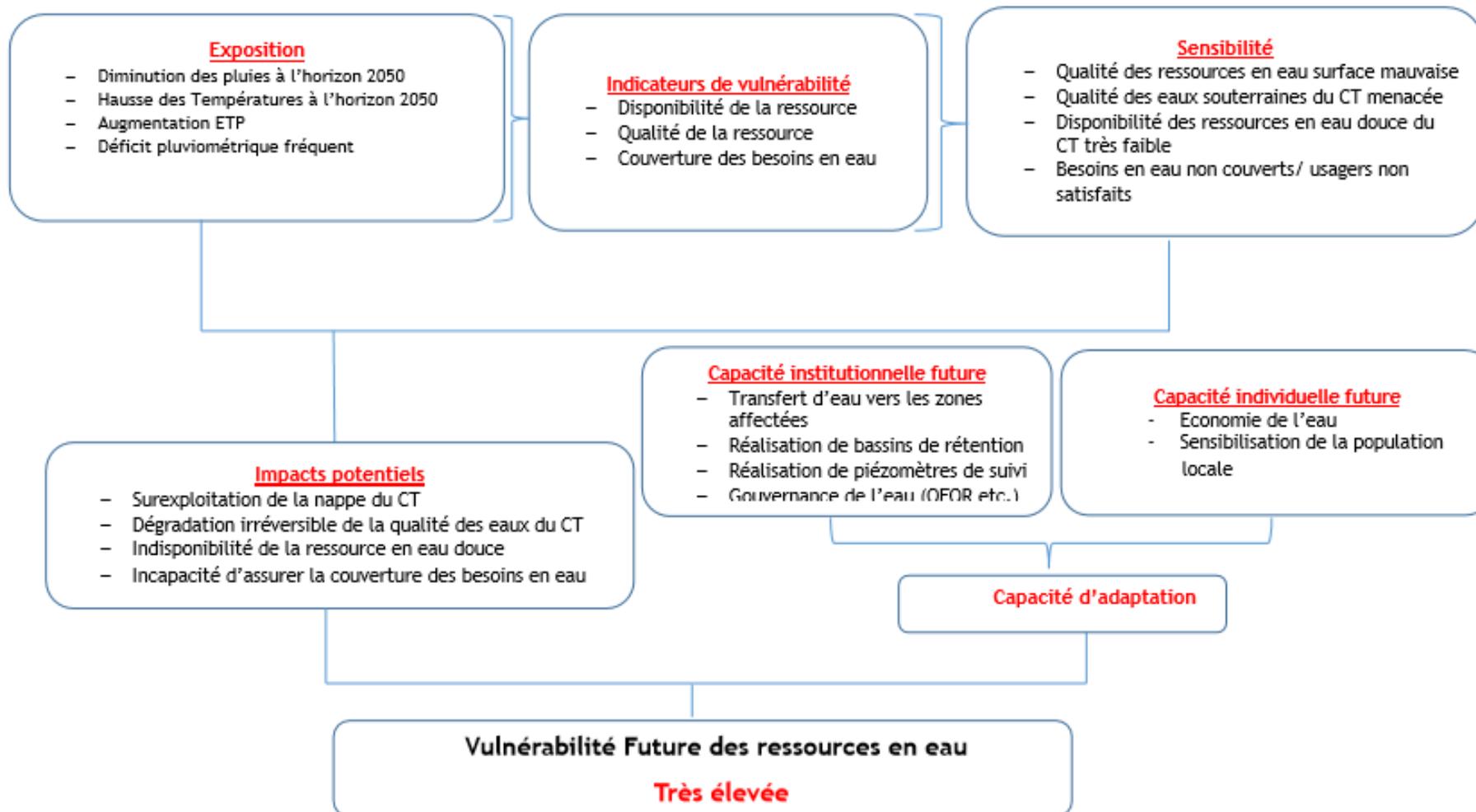


Tableau 38: Chaîne d'impact de la vulnérabilité future des ressources en eau

## 6 Synthèse des vulnérabilités actuelles et futures

L'analyse de l'exposition actuelle à travers les indicateurs climatiques sur la période 1950-2017 a permis de mettre en évidence la variabilité des précipitations et des températures dans la région par rapport à la normale de référence 1961-1990. La tendance à la baisse des précipitations observée durant la période de sécheresse (1968-1998) à Fatick et à Toubacouta a fortement affecté les ressources hydriques. L'analyse de sensibilité montre que l'irrégularité de la distribution saisonnière des précipitations se reflète sur la disponibilité et la qualité des ressources en eau. La baisse des volumes d'eau précipités sur la période 1968-1998 s'est manifestée par la baisse généralisée des écoulements de surface. Le bilan hydrique a montré une baisse considérable des volumes d'eau infiltrés dans la région traduisant la baisse du niveau de la nappe durant la période 1976-2005. Cependant, depuis 2 000 on note une nette élévation du niveau de la nappe du CT de plus de 10 m, consécutive à la bonne pluviométrie enregistrée dans la région.

Dans la région, le taux de couverture des besoins en eau est moyen de l'ordre de 41%. Cependant, on note une nette disparité zonale. Les besoins en eau sont couverts dans le département de Foundiougne, contrairement dans le département de Fatick où l'accès à la ressource est limité par la mauvaise qualité. La variabilité interannuelle et intra-saisonnière des paramètres climatiques affecte directement la quantité et la qualité des ressources en eau.

L'évaluation de la sensibilité des ressources en eau montre que le département de Fatick est plus vulnérable que le département de Foundiougne à la variabilité climatique et des effets anthropiques.

**Tableau 39:** Synthèse des enjeux liés à la variabilité saisonnière, annuelle et interannuelle du climat

Période	Enjeux	Conséquences sur les ressources en eau
Variabilité annuelle De Janvier à Mai (Période sèche) (Précipitation et Température)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absence de pluie</li> <li>• Assèchement des cours d'eau</li> <li>• Tarissement des puits</li> <li>• Abaissement du niveau piézométrique</li> <li>• Pollution des eaux</li> <li>• Dessèchement des plantes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pénurie d'eau</li> <li>• Salinisation des eaux et des terres</li> <li>• Augmentation de la salinité du CT</li> <li>• Prolifération des maladies liées à l'eau</li> <li>• Manque de nourriture pour le cheptel</li> </ul>
De Juin à Octobre (Période humide)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Variabilité des pluies : début tardif ou arrêt prématuré des pluies</li> <li>• Apparition de séquences sèches durant la période humide (20 jours cons. secs)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminution de la salinité de la nappe du CT et eau de surface par dilution</li> <li>• Perte probable de semence</li> <li>• Diminution des rendements agricoles</li> </ul>
Variabilité interannuelle (Précipitation et Température)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Période de sécheresse</li> <li>• Baisse sévère de la piézométrie du CT</li> <li>• Appel d'eau salée vers la nappe du CT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aggravation de la pénurie d'eau</li> <li>• Stress hydrique</li> <li>• Forte salinité de la nappe du CT et eaux de surface</li> <li>• Baisse des rendements agricoles</li> <li>• Diminution du cheptel</li> <li>• Problème d'insécurité alimentaire</li> <li>• Migrations (Exode rural)</li> </ul>

L'analyse des paramètres climatiques sortis des modèles climatiques globaux sur la période 2006-2050 a permis de mettre en évidence une diminution prononcée des précipitations et une augmentation des températures. Celles-ci se traduisent par un déficit pluviométrique et une hausse de l'évapotranspiration dans la région. Les tendances à la baisse et à la hausse projetées respectivement sur les précipitations et sur les températures vont entraîner une diminution des apports continentaux, une forte diminution des réserves renouvelables de la nappe du CT traduite par une baisse prononcée de la recharge et des volumes d'eau infiltrés aussi bien à Fatick qu'à Toubacouta avec une baisse plus marquée à Toubacouta.

De façon antagoniste, la baisse du stock sera accompagnée d'une augmentation significative des besoins en eau aux horizons 2035 et 2050 pour satisfaire la demande en eau croissante des différents secteurs. Dans la même logique, la qualité de la ressource de la nappe du CT et des eaux de surface sera très probablement affectée par les effets combinés de la baisse du stock, de la hausse de la demande en eau et de l'élévation du niveau marin à l'horizon 2050.

Dans le futur, si le climat joue un rôle essentiel en faisant varier le renouvellement de la ressource, l'homme par ses usages influencera fortement son évolution et sa qualité. La croissance de la population qui se dessine dans la région de Fatick tandis que les disponibilités en eau seront en nette baisse tant en quantité qu'en qualité, va exacerber davantage la pénurie. L'augmentation des besoins en eau dans tous les secteurs va entraîner des pressions supplémentaires sur les ressources en eau et les risques de pression sur l'eau vont augmenter davantage sa vulnérabilité.

Dans un tel contexte de stress hydrique et son évolution à l'horizon 2050, les questions relatives à la gestion des ressources en eau se posent de manière accrue pour mieux orienter les stratégies d'adaptation dans la région.

## 7 Identification des options d'adaptation

### 7.1 Options d'adaptation identifiées lors de l'atelier participatif de Fatick

Un atelier participatif d'élaboration d'identification de mesures d'adaptation réunissant des représentants de l'administration, des collectivités territoriales, des structures déconcentrées de l'État, de la société civile a été tenu dans la région de Fatick du 27 au 29 Novembre 2018.

Cet atelier avait pour objectif de renforcer la consistance des options d'adaptation identifiées en combinant l'approche qualitative et les options qui émergent des analyses de projections climatiques et socio-économiques dans les trois secteurs. Pour le secteur des ressources en eau, deux facteurs majeurs et incertains pouvant agir sur la disponibilité et la qualité de la ressource dans le futur ont été identifiés à savoir la pluviométrie et la salinisation.

Sur base de ces facteurs, deux scénarii probables qui peuvent affectés les ressources en eau ont été retenus :

- Le scénario « A Faxe O Ndik » (Un peu bon) : Faible pluviométrie et faible salinisation
- Le scénario « Kawtef » (Catastrophe) : Faible pluviométrie et forte salinisation

Des options d'adaptation ont été dégagées pour chaque scénario (Tableau 40).

*Tableau 40: Deux scénarios retenus pour le secteur des ressources en eau (Atelier participatif de Fatick)*

Scénario « A Faxe o Ndik »	Scénario « Kawtef »
Mise en place d'ouvrages de rétention adaptés (Bassins de rétention, impluvium etc.)	Assainissement, traitement des eaux non conformes pour la réutilisation (agriculture etc.)
Assainissement, traitement et réutilisation des eaux non conformes pour l'agriculture	Mise en place d'ouvrages de rétention adaptés (Bassins de rétention, impluvium etc.)
Faciliter l'accès à l'eau par le transfert	Faciliter l'accès à l'eau par le transfert
Mise en place de mécanismes de financements innovants dans les secteurs de l'eau et l'assainissement	Mise en place d'ouvrages anti-sel adaptés
Promotion de la GIRE dans la planification locale	Promotion de la GIRE dans la planification locale
Désalinisation des eaux souterraines pour la consommation humaine	Désalinisation des eaux souterraines pour la consommation humaine

Les options d'adaptation choisies ont été classées par ordre de priorité (Tableau 41).

*Tableau 41: Options d'adaptation prioritaires identifiées lors de l'atelier de Fatick*

Rang	Options d'adaptation prioritaires
1	Mise en place de mécanismes de financements innovants dans les secteurs de l'eau et l'assainissement
2	Faciliter l'accès à l'eau par le transfert
3	Assainissement, traitement des eaux non conformes pour la réutilisation (agriculture, cheptel etc.)
4	Mise en place d'ouvrages de rétention d'eau adaptés (Bassins de rétention, impluvium etc.)
5	Désalinisation des eaux souterraines pour la consommation humaine

## 7.2 Options préconisées par l'étude de vulnérabilité du PAS-PNA

En plus des options d'adaptation identifiées à l'atelier de Fatick, la mise en place d'une stratégie globale d'adaptation qui comporte à la fois des options d'adaptation institutionnelles qui méritent souvent des programmes gouvernementaux ou des projets de développement et des options d'adaptation au niveau individuel est indispensable pour réduire la vulnérabilité et faire face aux impacts potentiels des changements climatiques d'ici 2050 dans le secteur des ressources dans la région de Fatick. Ainsi, une forte politique gouvernementale est nécessaire pour aider à concevoir des réponses pour faire face aux défis posés par les changements climatiques dans la région.

### 7.2.1 Options d'adaptation au niveau institutionnel

Les options d'adaptation institutionnelles méritent souvent des programmes gouvernementaux ou des projets de développement pour avoir une chance d'aboutir. Aujourd'hui, il devient nécessaire de :

- *Réaliser de nouvelles infrastructures de suivi de la ressource dans les zones vulnérables identifiées (Piézomètres équipés d'enregistreur automatique);*
- *Augmenter les fréquences de suivi des ressources en eau dans la région ;*
- *Réparer l'ensemble des compteurs de mesure de débits des forages en panne dans la région ;*
- *Réaliser des stations hydrométriques de qualité dans les bassins versants pour la meilleure connaissance des ressources en eau de surface ;*
- *Réaliser des ouvrages de rétention d'eaux adaptées (bassins de rétention, impluvium etc.) pour valoriser le secteur de l'irrigation ;*
- *Réparer les stations pluviométriques en panne pour mieux évaluer l'évolution des précipitations dans la région ;*
- *Centrer les fiches de pompages au niveau de la direction hydraulique régionale (DHR) et au niveau de la DGPRE pour une meilleure connaissance et maîtrise des prélèvements ;*
- *Améliorer la gouvernance de l'eau (Accélérer la mise en place de la réforme de gestion de la ressource)*
- *Assainissement, traitement et réutilisation des eaux non conformes pour l'agriculture et l'élevage pour diminuer la pression sur la ressource*
- *S'approprier les résultats de l'étude PAS-PNA comme schéma directeur dans les prises de décision pour les politiques de développement.*

Pour surmonter tous ces défis et voir la réalisation de l'ensemble de ces projets et programmes, il est important de mettre en place des mécanismes de financements innovants dans le secteur de l'eau et de l'assainissement qui seront basés au préalable sur des stratégies de communication, d'étude technique et économique des besoins identifiés, de recherches de partenaires financiers et des financements appropriés pour protéger et s'assurer d'allouer les fonds aux projets identifiés.

### 7.2.2 Options d'adaptation au niveau individuel/communautaire

L'adaptation aux changements climatiques doit être l'affaire de tous. Ainsi, agir localement et s'activer à trouver et à mettre en œuvre des projets innovants pour apporter des réponses ponctuelles pourraient être des gestes de grande avancée d'adaptation. Il est nécessaire à l'échelle locale de :

- *Entreprendre des mesures d'économie de l'eau à grande échelle (Prise en compte de l'économie de l'eau dans les constructions (impluvium) et collecte des eaux de pluie)*
- *Sensibiliser la population sur la nécessité de gestion de la ressource*
- *Promouvoir la GIRE dans le programme scolaire*

- *Impliquer d'avantage les femmes et les jeunes dans la gestion et la planification des ressources en eau au niveau local.*

## 8 Conclusion et perspectives

Cette étude se voulait une contribution à l'identification des facteurs déterminants de la vulnérabilité des populations de la région de Fatick à la variabilité et aux changements climatiques vis-à-vis des ressources en eau.

Une synthèse bibliographique et des investigations hydrogéologiques supplémentaires ont été menées dans l'optique de réactualiser les données existantes sur le climat et les ressources en eau.

L'irrégularité de la répartition des pluies saisonnières se reflète sur l'écoulement des bassins versants et ses affluents, du stock de la nappe du CT ainsi que la qualité de la ressource. Ce déséquilibre se caractérise par la baisse généralisée des écoulements de surface avec des étiages parfois sévères et une salinisation des eaux de surface. Ce phénomène se manifeste par des retards des périodes de crues, liés à l'intermittence des pluies.

Les résultats hydrogéologiques obtenus dans la région ont montré la contamination de la nappe du CT par ces eaux de surface hyper salées et de l'eau de mer. Cette nappe assure pour l'essentiel l'AEP des populations dans la région et constitue également la seule ressource exploitable dans la région pour résoudre la demande en eau sans cesse croissante dans les îles du Saloum et localités avoisinantes. La variabilité climatique conjuguée à la pression anthropique a engendré un déséquilibre profond de l'hydro-système (Eaux de surface/Nappe du CT) dans la région de Fatick depuis la sécheresse des années 1970.

A l'horizon 2050, les résultats ont mis en lumière la relation entre le climat, l'hydro-système et la pression anthropique, à travers un bilan hydrique à l'échelle globale. Il a ainsi été montré que la baisse observée des volumes écoulés et infiltrés par rapport à la normale climatique (1976-2005) s'expliquait par une diminution des précipitations moyennes annuelles et une augmentation de l'évapotranspiration, entre les périodes 2006–2035 et 2021–2050 à l'échelle régionale.

L'analyse tendancielle a permis d'illustrer une évolution possible du stock de la nappe du CT et des besoins en eau à l'horizon 2050 sous contrainte des scénarios de changements climatiques RCP4.5 et RCP8.5. Les scénarios climatiques testés s'avèrent très pessimistes en termes de diminution des écoulements et des volumes d'eau infiltrés du fait notamment d'une tendance très marquée à la diminution des précipitations (jusqu'à -24%) et d'augmentation des besoins en eau du fait de la croissance démographique (taux de croissance de 3.2%) et de l'urbanisation.

L'étude de ces scénarios à l'horizon 2050 a révélé que les impacts combinés des scénarios climatiques et des projections des besoins en eau induiraient des difficultés de satisfaction de la demande surtout dans le département de Fatick. L'agriculture pluviale qui est la pratique dominante des activités économiques dans la région, basée sur la production de subsistance pourrait être affectée par la variabilité du régime climatique futur.

Dans la continuité de ce travail et des travaux antérieurs, il serait intéressant de :

- Pousser les recherches scientifiques dans la région, particulièrement dans l'arrondissement de Niakhar. Il s'agira de pousser la connaissance sur l'origine et l'évolution de la salinité de la nappe superficielle via des apports d'outils géochimiques, isotopiques, d'imagerie, des SIG et de la modélisation ;
- A ce jour, les études d'impact des changements climatiques sur les ressources en eau, notamment les eaux souterraines, sont très limitées dans le territoire. Vu les résultats obtenus dans la région de Fatick, il semble pertinent de poursuivre les investigations sur l'ensemble du territoire sénégalais afin d'identifier les zones vulnérables non encore identifiées pour une meilleure connaissance et gestion des ressources en eau et pour mieux s'adapter aux défis des changements climatiques pour ce secteur.

## 9 Références

- ANSD. (2015). Banque de données des indicateurs sociaux du Sénégal. Rapport final, MEF,296p.
- ANSD. (2013). Recensement Général de la Population,de l'Habitat, de l'agriculture et de l'élevage. Rapport,Pp418. Dakar.
- Bah, A. (2017). Problématique de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Continental Terminal et du Maastrichtien dans les régions de Kaolack et Fatick (Sénégal). Mémoire de Master. Univ.Liège. Univ.catho.Louvain , Pp 92.
- Bah, A., & Feuyom, F. (2016). Contamination de la nappe phréatique par les nitrates a yeumbeul (senegal) et risques sanitaires sur les consommateurs. Rapport technique, 25p.
- Bodian, A., Dezetter, A., Diop, L., Deme, A., Djaman, K., & Diop, A. (2018). Futurs Climate Change Impacts of Streamflows of Two Main West Africa River Basins: Senegal and Gambia. Hydrology Journal.
- Bodian, A. (2014). Caratérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). Physio-Géo. Journal.openedition.org, Vol.8, p. 297-312.
- Bouaita, Y., Descroix, L., Dacosta, H., Mendy, A., Thior, M., Ehemba, S. F., Sane, T. (2017). Estuaires inverses, changement climatique et élévation du niveau océanique. Eau-Société-Climat (ESC-2017).
- BRGM. (2015). Manuel Utilisateur ESPERE. Version 1.5.
- Camara, I. (2019). Exposition passée et future du Delta du Saloum. Dakar: PAS-PNA/Fatick.
- Collet, L. (2013). Capacité à satisfaire la demande en eau sous contraintes climatique et anthropique sur un bassin méditerranéen . Thèse de l'Université de Montpellier II, Pp 270.
- CSE. (2014). Annuaire sur l'environnement et les ressources naturelles du Sénégal. Dakar,Pp 388.
- Deme, A., Gaye, A., & Hourdin, F. (2015). Les projections du climate en Afrique de l'Ouest, Evidences et incertitudes. IRD Editions, 61-87.
- Descroix, L., Lalou, R., Bouaïta, Y., Diatte, R., Ndiaye, Y. M., Dacosta, H., . . . Senghor, M. J. (2017). Salinité et salinisation de la nappe phréatique du centre du bassin arachidier sénégalais. Eau-Société-Climat'2017 (ESC-2017).
- Descroix, L., Niang Diongue, A., Panthou, G., Bodian, A., Sane, Y., Dacosta, H., . . . Quantin, G. (2015). Evolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest à travers deux régions: La SénéGambie et le bassin du Niger moyen . Climatologie, vol. 12 (2015).
- DGPRES. (2016). Etudes hydrogéologiques et hydrologiques complémentaires de la nappe du Continental Terminal de la zone Sine-Gambie. Dakar: MH/DGPRES, 123p.
- DGPRES. (2014). Etude d'évaluation et suivi des ressources en eau de surface . Dakar: PAGIRE-BA.
- Diello, P. (2007). Interrelations Climat-Homme-Environnement dans le Sahel Burkinabé : Impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique. Thèse de l'Université Montpellier II, Pp 395.
- Dieng, N. (2017). Etude de la relation Eaux de Surface-Eaux Souterraines dans l'estuaire inverse du Saloum (Sénégal) : Apport des outils géochimiques, isotopiques, de la télédétection, des SIG et de la modélisation. Thèse de doctorat, ULg, Pp 253. Belgique: ULg.
- Diouf, C. O., Weihermuller, L., Ba, K., Faye, S., Faye, S., & Vereecken, H. (2016). Estimation of Turc reference evapotranspiration with limited data against the Penman-Monteith Formula in Senegal. Journal of Agriculture and Environment for International Development - JAEID 2016, 110 (1): 117 - 137.

- FAO. (2005). Programme mixte FAO/OMS sur les normes alimentaires . Commission du Codex Alimentarius.
- Faye, A. (1994). Recharge et paléorecharge des aquifères profonds du bassin du Sénégal. Apport des isotopes stables et radioactifs de l'environnement, et implication paléohydrologique et paléoclimatique. These de doctorat. Dakar: UCAD, 87p.
- Faye, A. (2018). Perception des populations par rapports aux tendances climatiques dans la région de Fatick. Climate Analytics.
- Faye, C., & Mendy, A. (2018). Climatic Variability and Hydrological Impacts in West Africa: Case of the Gambia Watershed (Senegal). EWASH&TI journal,vol2,p54-66.
- Faye, S. (2005). Apports des outils géochimiques et isotopiques à l'identification des sources de salinité et à l'évaluation du regime d'écoulement de la nappe du Saloum. Dakar: UCAD.
- Faye, S., Cissé Faye, S., Ndoye, S., & Faye, A. (2003). Hydrogeochemistry of the Saloum (Senegal) superficiel coastal aquifer . Environmental Geology, 44, 127-136.
- Ferrari, S., & Point, P. (2003). Eau et Littoral: Préservation et valorisation de la ressource dans les espaces insulaires. Karthala, Université de la Reunion.
- Fussel, H., & Klein, R. (2002). Vulnerability and Adaptation Assessments to Climate. UNDP Expert Group Meeting, 17-19.
- GIEC. (2014). Impacts, adaptation et vulnérabilité. GRTII, GIEC.
- Haziza, E. (2003). Modelisation mensuelle Pluie-Débit/Apports de la spatialisation: cas des données de sols . Université Montpellier II.
- Jevrejeva, S., Jackson, L. P., Riva, E. R., Grinsted, A., & Moore, C. J. (2016). Coastal sea level rise with warming above 2 °C. Centre National d'Etudes Spatiales.
- Lappartient, J. (1978). Extension vers le Nord du golfe miocène Casamance (Sénégal). Paris: 6è Reunion, anniversaire, sciences terre,orsay, 232p.
- Lericollais, A. (1999). La dégradaton de l'aménagement agraire . Paris : IRD, 1999.
- Lienou, G. (2007). Impacts de la variabilité climatique sur les ressources en eau et les transports de matières en suspension de quelques bassins versants représentatifs au Cameroun . Montpellier: Université de Montpellier I,p 486.
- Malou, R., & Cissé, B. (2016). Études de vulnérabilité du secteur des ressources en eau dans le cadre : volet adaptation. Rapport DGPPE, Pp 26. Dakar.
- Mara, F. (2010). Développement et analyse des critères de vulnérabilité des populations sahéennes face à la variabilité du climat: Le cas de la ressource en eau dans la vallée de la Sirba/ Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université du Quebec/Montreal, p 250.
- Marega, O. (2016). Changements socio-environnementaux et évolution des pratiques agropastorales en Afrique sahéenne : étude comparée entre le Ferlo (Sénégal), le Gourma (Mali) et le Fakara (Niger). Thèse de doctorat, Uni.Paris 7. Pp 687. France/Paris.
- Mendy, A. (2000). Etude hydrologique du bassin versant de la Nema et de la mise en valeur des bas fonds. Dakar: Université Cheikh Anta Diop, Département de Géographie.
- Mendy, A. (2010). Ressources en eau des bassins versants de la Nema et de Medina Djikoye: Perceptions, Caractérisations de la vulnérabilité et Perspectives de gestion durable. Université Cheikh Anta Diop.
- Méneton, P. (2010). Le sel, un tueur caché. Extrait du CDURABLE.info l'essentiel du développement durable. 3p.
- Mikhailov, V., & Isupova, M. (2008). Hypersalinization of river estuaries in West Africa. Water Resources, 35 :367–385.

- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., & Meehl, G. (2010). The next generations of scenario for climate change research and assessment. *Nature*, 463 (7282), 747.
- Ndiaye, P. M., Bodian, A., Diop, L., & Djaman, K. (2017). Evaluation de vingt méthodes d'estimation de l'évapotranspiration journalière de référence au Burkina Faso. *Géographie Physique et Environnement*, Volume 11, 129-146.
- OMS. (2007). *Statistiques sanitaires mondiales*. OMS, p 86.
- Oudin, L. H., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model ? Part 2- Towards a simple efficient PE model for rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology* 303 (1-4), 290-306.
- Ozer, P., Erpicum, M., Demaree, G., & Vandiepenbeck, M. (2003). The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 48, n° 3. Pp 489-492.
- PAPSEN. (2016). *Programme d'Appui au Programme National d'Investissement en Agriculture du Sénégal*. MA.
- PEPAM. (2014). *Huitième revue annuelle sectorielle conjointe*. PEPAM.
- PEPAM. (2006). *Appui à la mise en place du système de suivi-évaluation du programme d'eau potable et d'assainissement du Millénaire: Définition des indicateurs de suivi du PEPAM*. PEPAM/WSP.
- Sadio, M. (2018). *Evaluation de la vulnérabilité du secteur de la zone côtière due à la variabilité et aux changements climatiques dans la région de Fatick/Sénégal*. Climate Analytics.
- Sagna, P., Ndiaye, O., Diop, C., Niang, D. A., & Sambou, C. P. (2016). Les variations récentes du climat constatées au Sénégal sont-elles en phase avec les descriptions données par les scénarios du GIEC ? *Pollution atmosphérique - 2015 - N°227*.
- Salack S., Klein C., Giannini A., Sarr B., Worou O.N., Belko N., Bliedernicht J., Kunstman H. (2016) « Global warming induced hybrid rainy seasons in the Sahel. » *Environmental Research Letter* vol.11 N°10, 11p
- Sall, M., Gaye, C., Yam, A., Diémé, C., Sall, M., & Diop, R. (2011). *Enquête épidémiologique dans les régions de Diourbel, de Fatick, de Kaffrine et de Kaolack afin de cartographier l'impact de la fluorose dans la zone*. Programme PEPAM-BA/DGPRES : 95p.
- Sane, Y., Panthou, G., Bodian, A., Vischel, T., Lebel, T., Dacosta, H., Kane, D. M. (2018). Intensity-duration-frequency (IDF) rainfall curves in Senegal. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, , 1849–1866.
- Sarr, M., Zorome, M., Seidou, O., Bryant, C., & Gachon, P. (2013). Recent trends in selected extreme precipitation indices in senegal-A change point approach. *Journal of Hydrology*, Vol.505, p.326-334.
- Sircoulon, J. (1976). Les données hydropluviométriques de la sécheresse récente en Afrique intertropicale. Comparaison avec les sécheresses "1913" et "1940". *Cahiers ORSTOM*, Vol.XIII, n°2,p.75-174.
- SREL. (2017). *EFFECTIFS ESTIMES DU CHEPTEL DE LA REGION DE FATICK*.
- Tall, M., Sylla, M. B., Diallo, I., Pal, S. J., Faye, A., Mbaye, L. M., et al. (2016). Projected impact of climate change in the hydroclimatology of Senegal with a focus over the Lake of Guiers for the twenty-first century. *Theor Appl Climatol*.
- Turc, L. (1954). Le bilan d'eau des sols: relation entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. *Annales agronomiques*, p 491-595.
- UN-WATER. (2010). *Rapport disponible sur le site internet www.unwater.org.in Impacts du changement climatique sur les ressources en eau du bassin de la Seine*. Paris: Eau Seine Normandie.

## 10 Annexe

<b>COMPOSITION Consortium Ressources en Eau – Projet PAS-PNA</b>				
		<b>Structures</b>	<b>Personnes ressources</b>	<b>Domaines de compétences</b>
<b>Structures communes à tous les consortia</b>	<b>1</b>	<b>LPAO/SF</b>	Saïdou Moustapha SALL	Modélisation climatique et impacts biophysiques / Génération des scénarios de changements climatiques
	<b>2</b> <b>3</b>	<b>ANACIM</b>	Dr Ousmane Ndiaye Dr Youssouph Sané	Analyse climatique, Génération des scénarios de changements climatiques
	<b>4</b>	<b>EDEQUE</b>	Serigne Faye	Hydrogéologie, modélisation, géologie, hydrologie, vulnérabilité
	<b>5</b>	<b>LARTES</b>	Abdou Salam Fall	Sciences sociales (qualitatif et quantitatif)
	<b>6</b>	<b>DEEC</b>	Madeleine Diouf Sarr	
	<b>Structures spécifiques</b>	<b>7</b> <b>8</b>	<b>MHA-DGPRES</b>	Bakary Faty Boubacar Cissé
<b>9</b>		<b>Univ de Thiès (SET)</b>	Dr Mohamed Talla Cissé	Hydraulique / changement Climatique
<b>10</b>		<b>UCAD/FLSH Département de géographie + Labo LINUS/IRD</b>	Alioune Kane	Hydrologie, géographie du littoral, vulnérabilité côtière, socio-histoire des vulnérabilités côtières...
<b>11</b> <b>12</b>			Honoré Dacosta Anastasia Mendy	
<b>13</b>			<b>UGB/UFR LSH: Section de géographie</b>	Dr Ansoumana Bodian
<b>14</b>		<b>Univ de Ziguinchor (SAT)</b>	Dr Mamadou Lamine Mbaye	-Changement Climatique -Hydrologie
<b>15</b>		<b>IRD (LMI Pateo)</b>	Dr Luc Descroix	Hydrologie, climatologie, gestion des espaces littoraux



**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 :

**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  
L'État - Le Peuple - Le Dieu - Le Futur  
  
Ministère de l'Environnement et du  
Développement Durable  
(MEED)



En coopération avec :

CLIMATE  
ANALYTICS