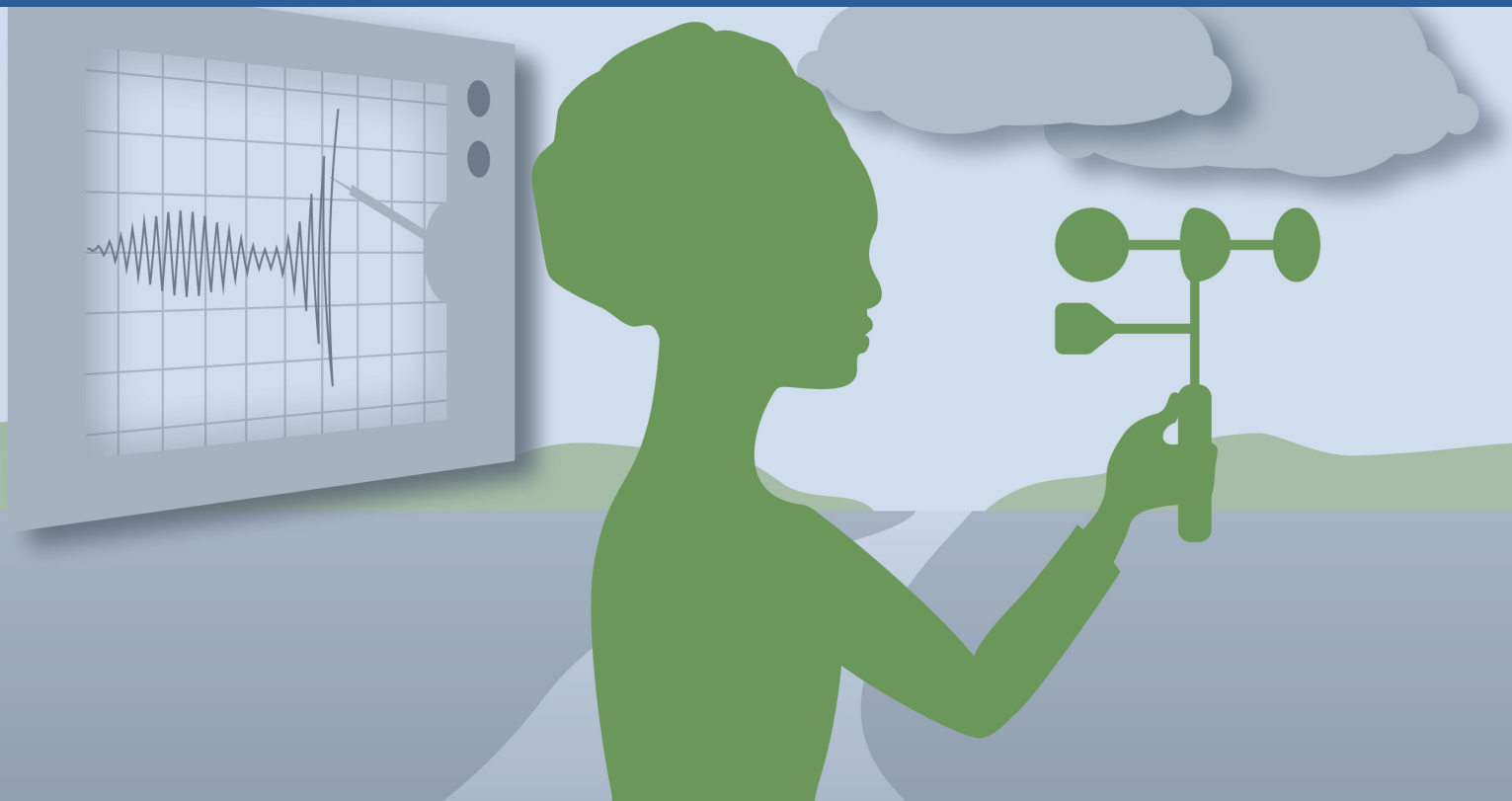


PAS-PNA



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


Etat des lieux des connaissances scientifiques sur les changements climatiques pour les secteurs des ressources en eau, de l'agriculture et de la zone côtière au Sénégal

Octobre 2018

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 :



En coopération avec :

**CLIMATE
ANALYTICS**

AUTEURS

Mélinda Noblet

Aichetou Seck

Adama Faye

Mamadou Sadio

Ibrahima Camara

Alousseynou Bah

Avec la contribution des membres des consortia de recherche des secteurs de l'agriculture, des ressources en eau et de la zone côtière du Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne.

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 :

NOBLET M., FAYE A., CAMARA I., SECK A., SADIO M., BAH A., 2018. Etat des lieux des connaissances scientifiques sur les changements climatiques pour les secteurs des ressources en eau, de l'agriculture et de la zone côtière. Report produced under the project "Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d'Afrique subsaharienne". Climate Analytics GmbH, Berlin. 76 pages.

Une copie numérique de ce rapport est disponible en ligne sur :
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 Sureté 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 changements climatiques constituent aujourd’hui un phénomène global avec de graves répercussions pour de nombreux pays. Le réchauffement mondial provoque des modifications durables de notre système climatique, qui font peser une menace aux conséquences irréversibles (PNUD, 2018)¹. Comptant parmi les zones les plus vulnérables, l’Afrique de l’Ouest est sans doute la région qui subira le plus les impacts des changements climatiques, en raison notamment de sa situation économique, de sa forte croissance démographique et de la dépendance d’une frange importante de la population aux ressources naturelles. Toutefois, et en dépit des efforts faits par la recherche, les connaissances scientifiques sur les changements climatiques et leurs impacts ont encore besoin d’être améliorées. Ce défi doit être relevé par l’ensemble des pays de l’Afrique de l’Ouest.

Au Sénégal, la question des changements climatiques pose notamment celle de la disponibilité de l’information climatique, sur laquelle les acteurs politiques pourraient s’appuyer pour développer des mesures d’adaptation pertinentes et réduire la vulnérabilité des populations. Le présent rapport effectue un état des lieux des connaissances scientifiques liées aux changements climatiques au Sénégal, plus précisément pour la région de Fatick, à travers une analyse documentaire portant premièrement sur la variabilité climatique et les tendances climatiques actuelles et futures, puis sur les impacts des changements climatiques pour des secteurs aussi stratégiques que l’agriculture, les ressources en eau et la zone côtière, et enfin sur les options et stratégies d’adaptation par secteur.

En ce qui concerne les tendances climatiques actuelles et futures, il ressort que les tendances actuelles sur la température sont marquées par une hausse accompagnée d’une irrégularité spatio-temporelle qui se renforcera dans le futur, à l’horizon 2100, quelque soit le scénario. Pour la pluviométrie, une part d’incertitude et des imprécisions demeurent encore quand il s’agit de suivre les tendances futures. Par ailleurs, il y a peu d’études et de production scientifique concernant les impacts futurs des changements climatiques sur l’agriculture, les ressources en eau et sur la zone côtière au Sénégal. Par ailleurs, les travaux existants sur le sujet ne relèvent pas la distinction entre les effets de la variabilité climatique, les effets des changements climatiques et les effets anthropiques, qui agissent fortement dans l’évolution du milieu. Concernant les mesures d’adaptation, il s’agit d’avancer d’une part sur l’évaluation et la gestion des risques climatiques qui peuvent avoir de lourdes répercussions socio-économiques, et d’autre part de tenir compte des conséquences intersectorielles afin de développer des initiatives concrètes sur le long terme.

La production de données et d’informations climatiques fiables, l’actualisation régulière des connaissances, et leur intégration dans les politiques et plans nationaux, sont donc une nécessité pour une prise en charge effective des changements climatiques.

¹ Site www.undp.org

Table des matières

1	Introduction	3
2	Approche méthodologique	4
3	Description de la zone d'étude	6
3.1	Situation géographique	6
3.2	Contexte socio-économique	7
4	Description des connaissances scientifiques existantes	7
4.1	Variabilité, tendance climatique actuelle et changement climatique projeté	8
4.1.1	Les tendances climatiques passées et actuelles	8
4.1.2	Les tendances climatiques futures	14
4.1.3	Région de Fatick	20
4.2	Impacts des changements climatiques par secteur	21
4.2.1	Secteur de l'agriculture	21
4.2.2	Secteur des ressources en eau	29
4.2.3	Secteur de la zone côtière	44
4.3	Options et stratégies d'adaptation par secteur	52
4.3.1	Agriculture	52
4.3.2	Ressources en eau	53
4.3.3	Zone Côtière	54
5	Limites en termes de connaissances scientifiques	56
5.1	Secteur de l'agriculture	56
5.2	Secteur des ressources en eau	56
5.3	Secteur de la zone côtière	58
6	Conclusion et recommandations	58
7	Références	60

1 Introduction

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^{ème} 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, les ressources en eau, sont considérés comme particulièrement vulnérables aux changements climatiques qui vont s'accompagner de nouveaux régimes de pluies (Salack, 2016). Le faux départ, l'arrêt précoce de la saison des pluies, l'intensification de la fréquence des averses quotidiennes, l'augmentation du nombre de nuits et de journées chaudes et une tendance à la baisse dans la variation de la température journalière menacent la sécurité alimentaire dans la région (Salack, 2016).

L'année 2017 a été la troisième année la plus chaude jamais enregistrée sur les terres continentales africaines depuis 1950, après 2010 (année la plus chaude) et 2016 (2^{ème} 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. 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 ondes de chaleur plus longues et plus intenses que durant les deux dernières décennies du 20^{ème} siècle (Russo, 2016). Par ailleurs, 50% des projections climatiques régionales suggèrent que ces ondes 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).

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). Le Sénégal s'est engagé depuis 2015 dans le processus de réalisation de son Plan National d'Adaptation (PNA) et bénéficie pour la période 2016-2019 du Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation (PAS-PNA) financé par le Ministère fédéral Allemand de l'Environnement, de la Protection de la Nature et la Sûreté Nucléaire (BMU), et mis en œuvre par la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) en collaboration avec Climate Analytics.

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

Dans le cadre de la composante 2, la présente étude a pour objectif principal de présenter une synthèse sur l'état des connaissances scientifiques existantes sur les changements climatiques au Sénégal. De plus, un focus sera fait sur la région de Fatick située dans le Delta du Saloum où sont réalisées les études de vulnérabilité à travers une approche intégrée, afin d'avoir une vision holistique des impacts et des options d'adaptation pour une aire bien spécifique.

Cette étude a pour objectifs spécifiques de :

- réaliser une analyse sur l'état des connaissances scientifiques liées aux changements climatiques dans les trois secteurs (agriculture, ressources en eau et zone côtière). Cette analyse prendra également en compte les tendances climatiques passées et futures, les impacts des changements climatiques, ainsi que les options d'adaptation mises en place par secteur
- identifier les lacunes en termes de connaissances scientifiques.

Suite à cette introduction, le rapport présente tout d'abord l'approche méthodologique adoptée et un panorama de la zone d'étude. L'accent sera mis sur la description des connaissances scientifiques disponibles et sur les impacts des changements climatiques au niveau sectoriel dans une seconde étape. Enfin, l'analyse sur les lacunes et les limites pour les trois secteurs cibles sera présentée avant que le rapport ne conclue sur des recommandations.

2 Approche méthodologique

L'état des lieux des connaissances scientifiques va permettre d'une part de dresser un panorama des connaissances scientifiques portant à la fois sur les impacts, la vulnérabilité et les options et stratégies d'adaptation disponibles au niveau du Sénégal pour les trois secteurs ciblés : ressources en eau, agriculture et zone côtière. D'autre part, il va permettre d'identifier les lacunes en termes de disponibilité et de fiabilité de l'information scientifique dans chacun de ces secteurs. A partir de cet

état des lieux, il sera alors possible de déterminer ce que les études de vulnérabilité sectorielles vont pouvoir fournir comme informations scientifiques complémentaires.

- Approche participative et implication des experts nationaux

Pour obtenir un premier aperçu de l'état des connaissances scientifiques, nous avons opté pour une approche participative et avons invité des experts scientifiques nationaux (6) à présenter lors de l'atelier de planification opérationnelle (APO) du projet un aperçu de la recherche sur les impacts des changements climatiques, la vulnérabilité et l'adaptation dans leur domaine. Les scientifiques invités sont considérés comme étant des références dans leur discipline dans le domaine des changements climatiques et représentaient chacun un des secteurs identifiés, en plus des sciences du climat. Dans leur présentation devaient figurer les informations suivantes :

- Recherche la plus récente et à venir sur les impacts des changements climatiques, la vulnérabilité et/ou l'adaptation dans leur domaine au Sénégal
- Approches, données et méthodologies
- Résultats et leur utilisation
- Leurs idées sur les aspects sous-évalués des impacts des changements climatiques, la vulnérabilité et l'adaptation au Sénégal

- Revue bibliographique

Ce premier niveau d'analyse sera complété par :

- Une revue bibliographique des publications scientifiques nationales et internationales, des publications gouvernementales, des ONG et des projets d'adaptation mis en œuvre ;
- Une évaluation/résumé des informations scientifiques dont disposent les chercheurs/scientifiques et centres de recherche.

Toujours dans une perspective participative, ce travail est réalisé en collaboration avec les scientifiques membres des différents consortia, afin qu'ils puissent apporter leur contribution.

3 Description de la zone d'étude

3.1 Situation géographique

La zone de l'étude, qui s'étend sur une superficie d'environ 4 519 km², se situe dans la zone agro-écologique du bassin arachidier, respectivement dans le bassin arachidier nord (départements de Fatick) et le bassin arachidier sud (Foundiougne) (Fig.1). Elle couvre les départements de Fatick et Foundiougne avec un total de 769 villages répartis sur 23 communes dont Niakhar, Dionewar et Toubacouta.

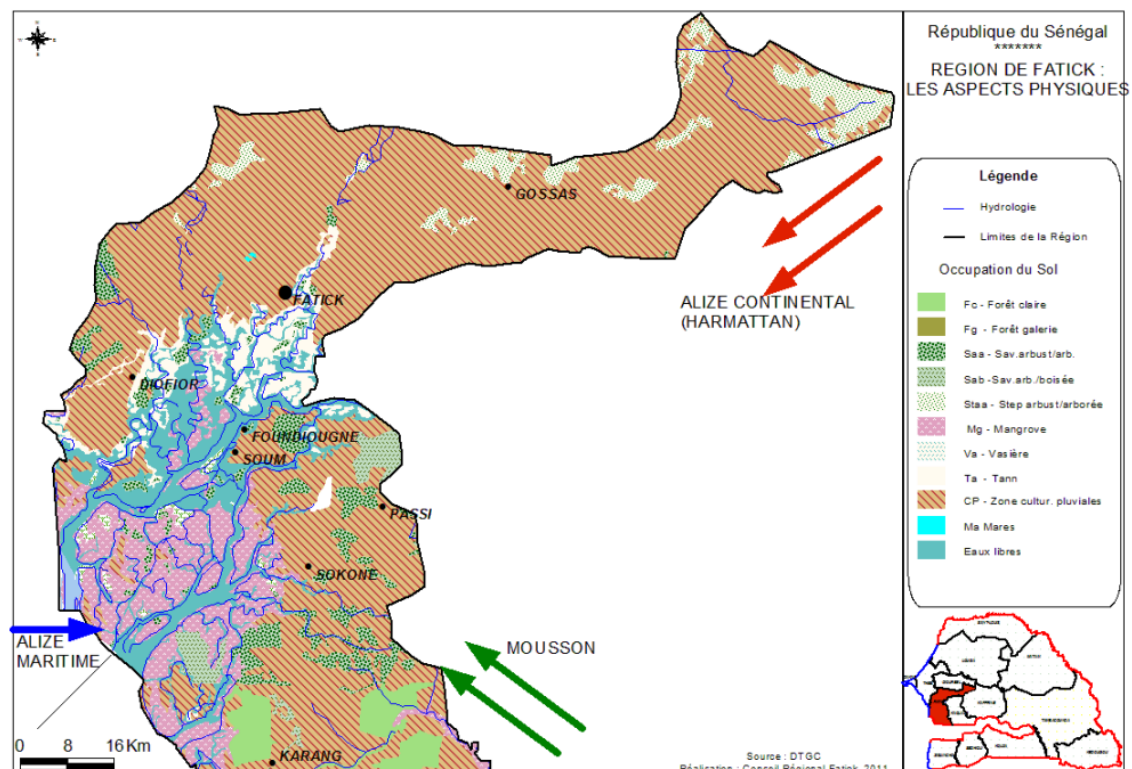


Figure 1: Aspects physiques de la région de Fatick (Source : CSE, 2012)

Le climat de la région de Fatick est de type tropical soudanien avec des températures qui varient fortement d'une zone à l'autre, mais aussi d'un mois à l'autre, oscillant d'une manière générale entre 24°C au mois de janvier et 40°C au mois d'avril/mai (CRF, 2001). Elle subit également l'influence du

climat maritime sur la partie côtière des départements de Foundiougne et Fatick. L'ensoleillement tourne autour de 7 heures par jour. Les principaux vents qui balaient la région sont : l'Harmattan, chaud et sec, qui souffle sur toute la partie Nord et Nord-Est, l'Alizé maritime présent dans la zone côtière, et la Mousson soufflant entre Avril et Octobre. Les précipitations sont relativement importantes dans les départements de Fatick et Foundiougne avec une pluviométrie régulière (43 jours en moyenne sur 90) et abondante à une hauteur moyenne de 700 à 900 mm (CSE, 2012).

Les sols sont majoritairement sableux et sablo-argileux constitués par des sols dior (sols ferrugineux tropicaux peu lessivés), des sols dekk (sols à texture plus fine avec une forte proportion en sables fins et en limons) hydromorphes à engorgement temporaire, des sols dits dekk-dior et dior-dekk, des sols halo morphes (sols salins, « tanne ») et les sols des mangroves observés dans les îles et les estuaires.

3.2 Contexte socio-économique

La population totale dans la zone de l'étude est estimée à 618 674 habitants (ANSD, 2013) . Toutefois, les projections à l'horizon 2025 font état de 930 748 habitants (ANSD, 2015).

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% (ANSD, 2014). Il est plus élevé chez les femmes (58.3%) que chez les hommes (43.4%). Le taux brut de scolarisation est de 70.10% en 2004 contre 79.90 % pour le niveau national (ANSD/SRSD/Fatick, 2015).

L'économie de Fatick est essentiellement dominée par l'agriculture, l'élevage et la pêche. Toutefois, la région dispose d'un réel potentiel touristique qui représente un intérêt certain pour le développement économique de la région (ANSD/SRSD/Fatick, 2015).

La zone du Sine Saloum fait partie des zones rurales à fort potentiel agricole où l'agriculture demeure la principale activité économique et occupe près de 90% de la population active contre 60,6% au niveau national. L'agriculture est essentiellement pluviale et orientée à grand échelle sur des cultures de rente (arachide coton), vivrière (mil, riz, maïs et niébé) et à petite échelle sur des cultures diverses comme le sésame, le manioc et le coton particulièrement dans le département de Foundiougne. En plus des facteurs climatiques, cette diversité de cultures pluviales est actuellement menacée par la dégradation des terres dont une bonne partie est salée. Très souvent deux processus de dégradation se produisent l'acidification (avec une libération de sulfate et de soufre dans le sol) et la salinisation (en lien avec les variations saisonnières de la salinité de l'estuaire ou du fleuve) qui font progressivement évoluer les sols vers des formations en tannes. Ces terres dégradées et impropres à la culture représentent 27% de la superficie régionale, et constituent une contrainte majeure pour le développement de ce secteur (ANSD/SRSD/Fatick, 2015).

4 Description des connaissances scientifiques existantes

Dans cette section seront tour à tour présentés et analysés la variabilité et la tendance climatique (actuelle et future), les impacts des changements climatiques et les options et stratégies d'adaptation par secteur.

4.1 Variabilité, tendance climatique actuelle et changement climatique projeté

4.1.1 Les tendances climatiques passées et actuelles

4.1.1.1 Les températures

L'évolution des températures en Afrique de l'Ouest, et plus spécifiquement au Sahel, est marquée par une augmentation de 0.2 à 0.8°C depuis la fin des années 1970 (Sultan, 2015).

Au Sénégal, la tendance générale à l'échelle annuelle confirme une hausse de la température par rapport à la normale 1969-1994 (Figure 2, A) (Bodian, 2014 ; Sagna et al., 2016). Cette même tendance à la hausse est observée à partir des données de la station météorologique de Bambey dans le nord de la zone du Sine Saloum (Figure 2, B) avec une plus forte augmentation des températures moyennes minimales que maximales (Kosmowski et al., 2015; MEDD, 2016; Sagna et al., 2016). Cette tendance haussière n'est pas constante dans le temps. Elle se structure comme suit : une première période de 1950 à 1968 avec des températures plus faibles que la normale, une deuxième de 1969 à 1994 avec des températures globalement proches de la normale et une troisième période de 1995 à 2014 avec des écarts thermiques pouvant dépasser 1°C au niveau de laquelle 1998 apparaît comme l'année la plus chaude.

Selon les données de températures moyennes minimales et maximales de douze stations du Sénégal de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM), une forte irrégularité spatiale et temporelle existe ainsi qu'un gradient thermique Ouest-Est plus marqué au niveau des températures minimales à cause de l'effet de l'océan. Le cycle annuel des températures est bimodal avec deux maxima, le premier en mars-avril, le second en septembre-octobre (Gaye et Sylla, 2008; Gaye *et al.*, 2015). Cette distinction correspond également aux saisons fraîche (novembre-mars) et chaude (Avril-octobre), bien marquées dans la zone du Sine Saloum avec des températures pouvant aller jusqu'à 40°C en Mai-Juin pour ensuite descendre jusqu'à 15°C entre Novembre et Janvier (Senghor, 2017). Plus localement, dans le département de Fatick, les températures maximales (minimales) varient entre 33°C et 38°C (15 et 24°C) (Figure 3). Les deux saisons (chaude et fraîche) apparaissent bien sur cette figure avec un maximum de 38°C en avril et un minimum de 15°C en Janvier. Cette différence apparaît dans la variabilité interannuelle avec une amplitude des températures de la saison fraîche comprise entre -1.8°C à 1.7°C, alors qu'en saison chaude on observe une amplitude plus réduite (-1.7°C à 1°C).

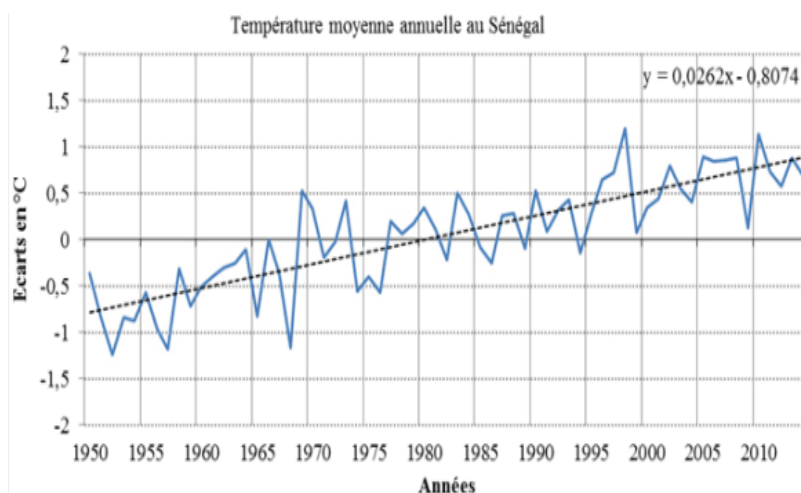


Figure 2: Variabilités interannuelles A) de la température annuelle (Sagna et al., 2016)

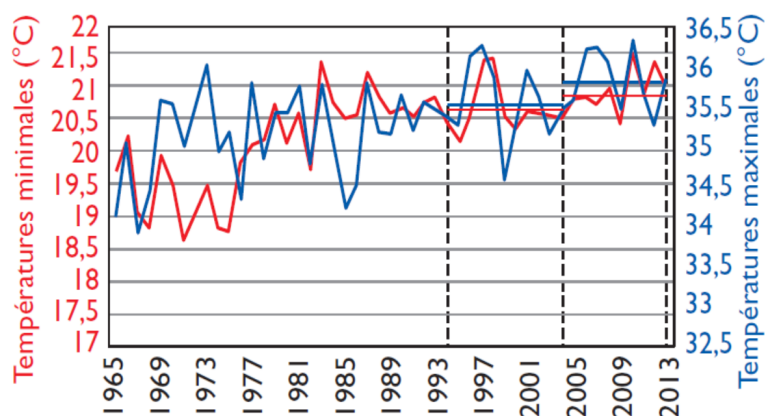


Figure 2: Variabilités interannuelles B) de la pluviométrie au Sénégal depuis 1965 (B.Sultan, 2015)

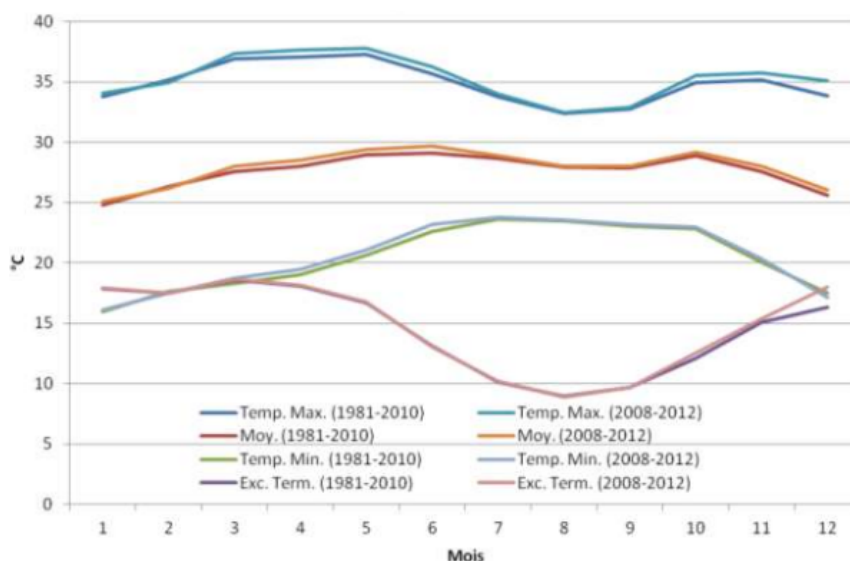


Figure 3: Variabilité annuelle des températures maximales, moyennes, minimales et excursion thermique à Fatick (PAPSEN)

4.1.1.2 La pluviométrie

Le régime pluviométrique de l'Afrique de l'Ouest est lié au mouvement saisonnier de la zone de convergence intertropicale, espace de rencontre des alizés, vents chauds et secs soufflant du Nord-Est, avec les masses d'air humide, venant de l'océan atlantique Sud. L'Afrique de l'Ouest a connu une forte diminution des précipitations durant les 50 dernières années avec une rupture nette dans les années 1968-1972. La réduction importante des précipitations apparaît clairement au Sénégal, avec des épisodes de forts déficits durant la période 1970-1997 (Bodian, 2014 ; Descroix et al., 2015).

Ce cycle de sécheresse qui a débuté dans la décennie 1970 est clairement matérialisé par la translation méridienne des isohyètes dessinées pour les normales 1931-1960 d'une part et 1961-90 d'autre part (Figure 4) (Dacosta, Kandia et Malou, 2002 ; Leroux, 1995 ; Moron et al., 2006). Entre ces deux normales, l'isohyète 400mm, par exemple, s'est déplacé de près de 100km vers le Sud, fragilisant ainsi les cultures pluviales dans toute la partie nord du pays. Une translation d'une ampleur analogue de l'isohyète 800mm est l'une des causes du déplacement du bassin arachidier vers le sud occasionnant une perte d'environ 200mm de pluie et une réduction de la saison agricole (Figure 5). C'est une modification assez remarquable quand on sait que la zone du Saloum était traversée par l'isohyète 1000mm dans les années 1950. Il s'agit notamment d'une des causes du recul de la culture du coton au nord de la Gambie (Oyebande, Kane et al., 2006).

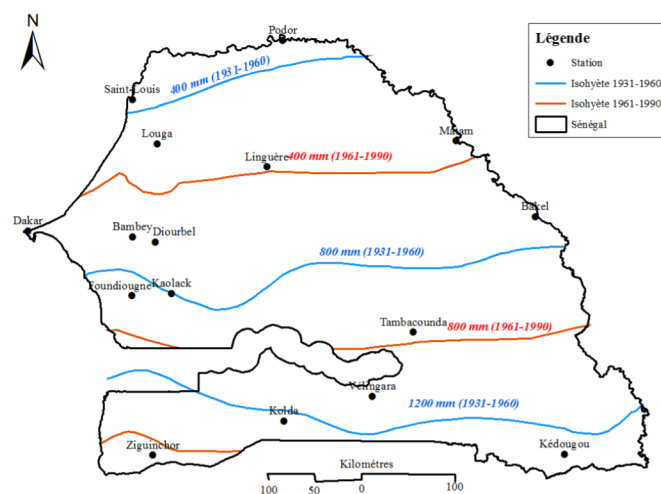


Figure 4: Les isohyètes moyennes annuelles du Sénégal (source : ANACIM)

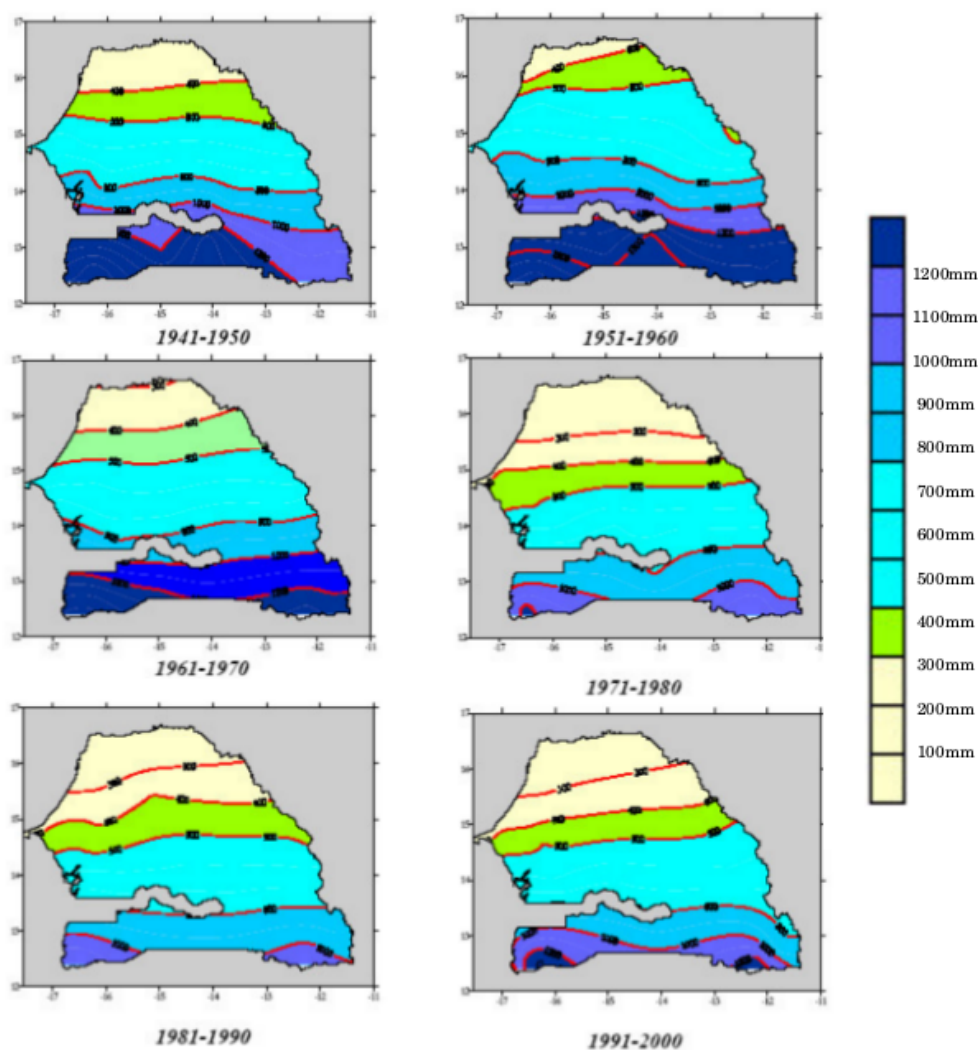


Figure 5: Cartes des moyennes pluviométriques (mm) par décennie (CSE annuaire 2ème édition, p.19)

L'analyse de l'Indice des Pluies du Sénégal (IPS), calculé sur la base des données de 22 stations suivies par l'ANACIM, met en évidence trois périodes bien distinctes (Figure 6 gauche):

- Une première phase humide des décennies 1950-1967, puis une longue période sèche qui lui a succédé entre 1968-1990, enfin une lente remontée des pluies depuis 1999 au Sénégal (Bodian, 2014), voire un retour à la moyenne long terme 1900-2015 cette même année (Descroix et al., 2015), avec 5 ans de retard sur le reste du Sahel où le retour à la moyenne long terme s'est effectué en 1994). Dans la zone du Sine Saloum, un profil pluviométrique similaire obtenu à partir des données des stations météorologiques de Bambey, Niakhar et Fatick est observé avec une oscillation des pluies depuis 1950 (Figure 7) (Dieng et al., 2017 ; Muller et al., 2015).
- La décennie 1980-1990 a été particulièrement sèche dans toutes les zones climatiques confondues au Sénégal (Bodian, 2014 ; Leroux, 1995 ; Ndong, 1995 ; Sene et Ozer, 2002), ainsi que dans le Sahel avec des anomalies des pluies négatives (Dai et al., 2004). La persistance de ces anomalies négatives est considérée comme un « changement » et non une variabilité pluviométrique car les différences inter-décennales étaient statistiquement significatives (Bell et Lamb, 2006). Par ailleurs, les périodes de sécheresse (1968-1998) ont

fortement affecté les ressources en eau (Descroix et al., 2017). Les conséquences majeures de cette période de sécheresse se traduisent par un bilan négatif en termes d'entrée et de sortie d'eau et une augmentation de la salinité des eaux du fleuve.

- Les tendances récentes lors de la dernière phase convergent vers une légère amélioration de la pluviométrie aussi bien au Sénégal que dans une bonne partie de la zone sahélienne (Sambou, 2015 ; Sarr, 2008), voire un retour à la moyenne long terme dès 1999 (Descroix et al, 2015). En effet, depuis le début de cette légère remontée, le déficit du nombre de jours pluvieux a persisté mais il est compensé par une plus grande occurrence des pluies fortes au Sénégal (Deme et al., 2015).

Les travaux de Bodian (2014) basés sur l'analyse des indices de pluie standardisée ont mis en évidence la variabilité des précipitations annuelles dans la zone nord soudanienne du Sénégal (zone du Saloum) et le retour à des conditions humides depuis 2000 avec une forte variabilité interannuelle des précipitations (Figure 6 droite). Cependant, Descroix et al., (2015) indique que la variabilité interannuelle n'est pas plus forte qu'avant la période humide 1950-1967 ; et elle reste plus faible que dans la plupart des autres régions tropicales sèches de la planète (Australie, Nord-Mexique, et a fortiori, Nordeste Brésilien ou Pérou côtier) (Nouvelot et Descroix, 1996 ; Descroix et al., 2018).

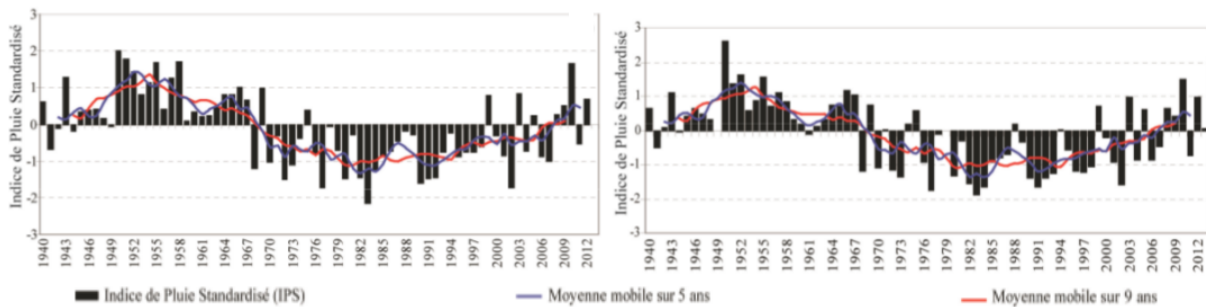


Figure 6: variabilité temporelle des indices de pluie standardisés : Gauche : valeurs moyennes calculées par krigeage à partir de l'ensemble des stations. Droite: valeurs moyennes calculées par krigeage à partir des stations de la zone nord-soudanienne (zone incluant le Sine Saloum).

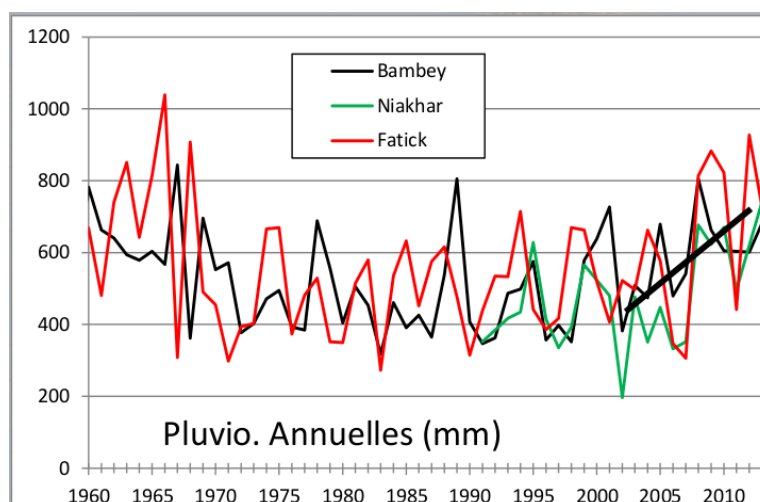


Figure 7: Hauteur d'eau précipitée dans le bassin arachidier (Bambey, Niakhar et Fatick). (Muller et al., 2015)

Cependant, le nombre d'événement pluvieux reste déficitaire sur les années récentes, impliquant la persistance d'un risque climatique élevé de séquences sèches, potentiellement préjudiciable pour les rendements agricoles (Sultan, 2015). Néanmoins, certains auteurs signalent un certain regain pluviométrique au Sahel en particulier au Sénégal depuis quelques années. (Salack et al., 2012). Cette situation est bien observée dans le Sine Saloum (Dieng, 2017), notamment à Niakhar avec le retour de certaines cultures comme le mil Sanio (Muller et al., 2015). Les travaux de Faye et al. (2014) ont mis en évidence la variabilité climatique dans le Saloum par une corrélation des précipitations et des nombres de jours de pluies (Figure 8). Les résultats ont montré sur une référence (1976-2005) une variation des volumes d'eau précipités et des nombres de jours de pluies dans les trois stations avec des séquences de diminution allant de 1976 à 1998 et d'augmentation allant de 1999 à 2005 (Figure 8).

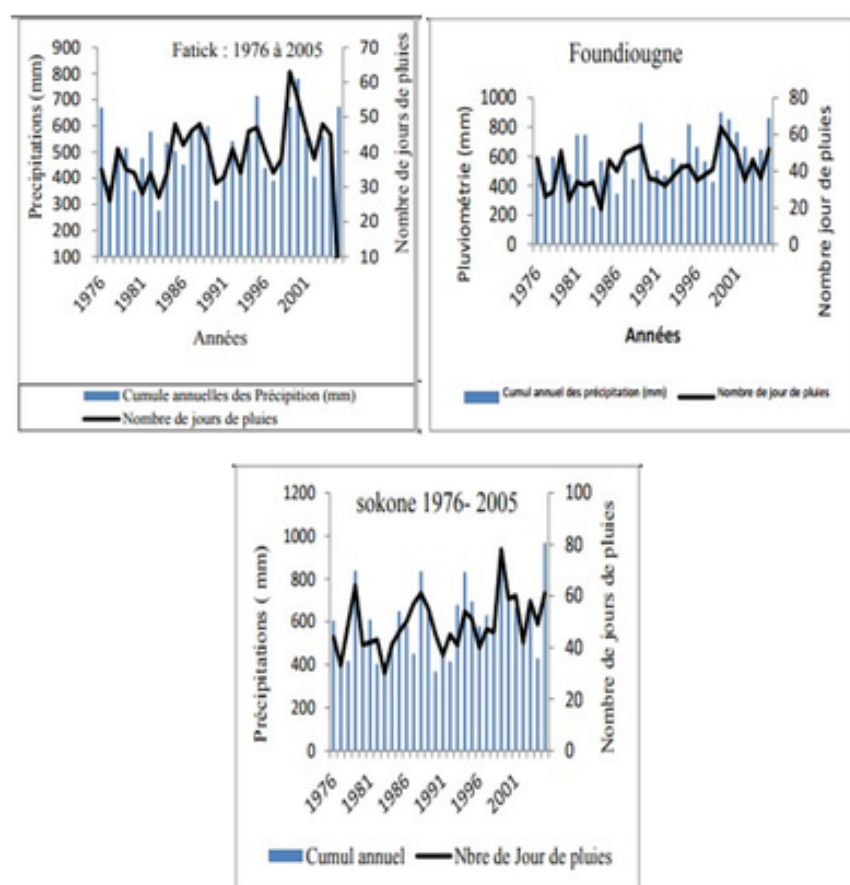


Figure 8: Variabilité interannuelle des précipitations et nombre de jours de pluies de 1976 à 2005 dans les stations de Fatick, Foundiougne et Sokone (Faye et al., 2014)

Depuis ce retour, des cumuls pluviométriques excédentaires (annuels et intra-saisonniers) sont enregistrés dans plusieurs localités du pays presque à chaque saison (Salack et al., 2012). Une récurrence des événements d'inondations et la fréquence des pauses pluviométriques en début de saison des pluies (supérieures de 15 jours), sont enregistrées en particulier dans la période mai-juin-juillet sur tout le territoire, tandis que la fin des saisons des pluies a tendance à enregistrer des pauses de durée moyenne. Les dates de semis optimales sont généralement caractérisées par une forte variabilité inter-saisonnière, conduisant à un raccourcissement de la saison culturale. Ceci suppose une fréquence des « faux départs » et des fins précoces de la saison qui contribuent à

augmenter les risques agro-climatiques dans le pays (Salack et al., 2012).

4.1.2 Les tendances climatiques futures

4.1.2.1 Les modèles climatiques

L'évolution future du climat global au cours du 21^{ème} siècle est abordée à travers des modèles climatiques globaux listés dans le quatrième rapport du GIEC (IPCC, 2007). Ces modèles représentent l'atmosphère, l'océan, la glace de mer et la surface continentale (hydrographie, végétation). L'une des limites de ce genre de modèles est leur résolution spatiale. En effet, l'échelle typique des variables en sortie est la centaine de kilomètres, voire plus (2,5°x3,75° pour le modèle HadCM3 du Hadley Centre) : cela implique que de vastes régions sont considérées comme uniformes par rapport à des variables comme la pluie, alors que la variabilité à l'échelle régionale et locale est forte.

D'un point de vue pratique, cela pose un problème quand on s'intéresse à l'impact des changements climatiques dans le futur. Pour les études agronomiques par exemple, les processus qui contrôlent les rendements sont à des échelles bien plus fines (Baron et al, 2005). Le même problème a lieu avec les problématiques de gestion de l'eau, à l'échelle du bassin versant (Groves et al, 2008).

Pour le résoudre, on utilise des procédés de descente d'échelle ou downscaling qui permettent de transformer les variables données à l'échelle globale vers une échelle locale (Figure 9). Les procédés pour faire cela sont multiples (Fowler et al, 2007 ; Giorgi et al., 2001). On citera juste deux des principales méthodes : le « dynamical downscaling » et le « statistical downscaling ». La première méthode se rapporte à l'utilisation de Regional Climate Models (RCM) qui produisent des informations (à la résolution spatiale 0,5°x0,5° typiquement) en utilisant « les conditions aux limites (par exemple des paramètres atmosphériques d'un General Circulation Models (GCM) comme la pression à la surface, le vent, la température et la vapeur), et les principes de la physique au sein de la circulation atmosphérique » (Ziervogel, 2008) alors que la seconde cherche une relation entre les sorties des GCM et des données historiques observées à l'échelle régionale pour passer à une échelle plus fine. C'est dans ce contexte qu'est né le cadre d'action appelé international Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX). Ce cadre permet de concevoir une série d'expériences destinées à obtenir des projections climatiques pouvant servir aux études d'impacts et d'adaptation.

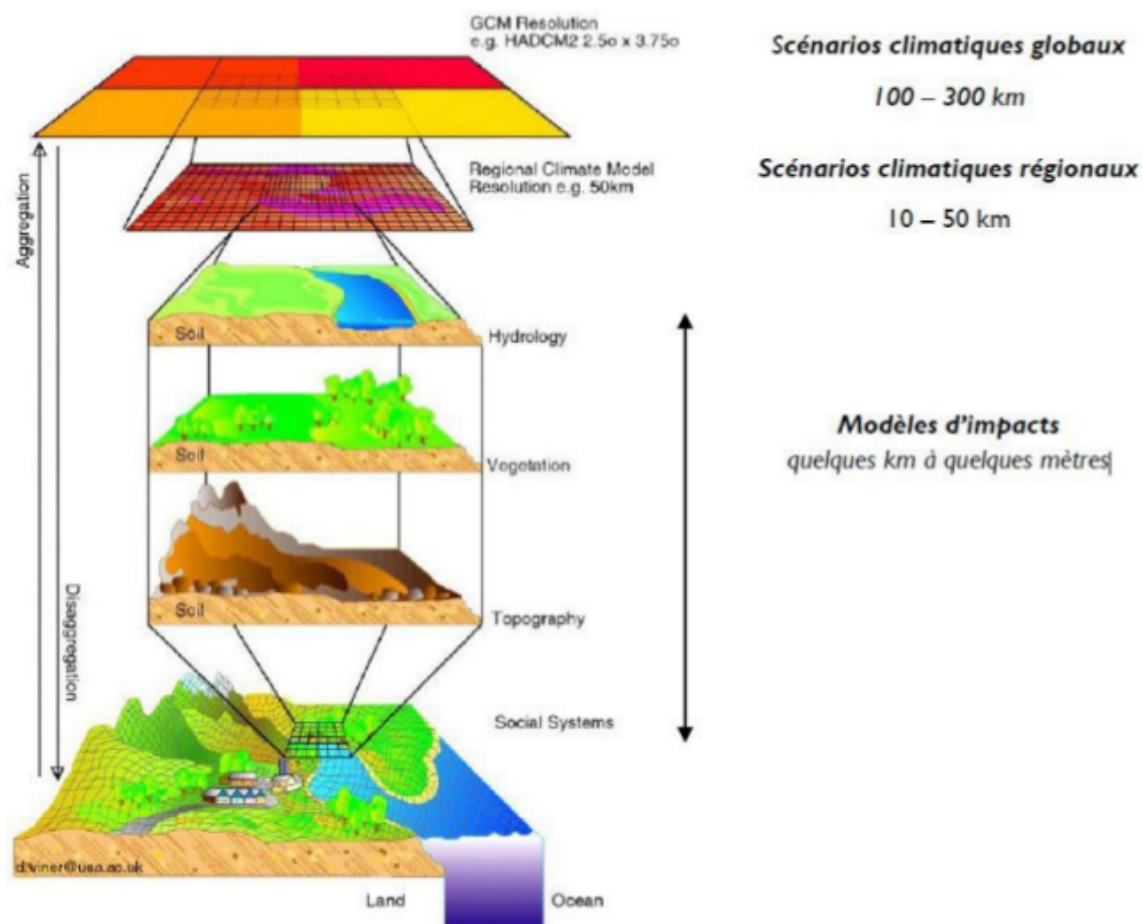


Figure 9: Échelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle (d'après S. Planton)

Ces modèles nécessitent des variables de forçage en entrée comme les concentrations en CO₂ et autres gaz à effet de serre dans le futur. Cette nouvelle génération de simulations de scénario fait appel à des concentrations de référence (RCP, pour Representative Concentration Pathway), c'est-à-dire un ensemble de scénarios d'évolution des concentrations de gaz à effet de serre prescrites pour le 21^{ème} siècle correspondant à différents niveaux de stabilisation du forçage radiatif d'ici l'année 2100. Quatre niveaux de forçage de fin de siècle ont été fixés : 2.6, 4.5, 6 et 8.5 W/m² correspondant aux RCP2.6, RCP4.5, RCP6 et RCP8.5) respectivement, variant d'optimiste à pessimiste en termes des efforts mondiaux pour réduire les émissions des gaz à effet de serre). La priorité dans l'analyse pour cet état des lieux sera accordée aux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 qui sont dits réaliste et pessimiste respectivement.

Ces modèles permettent de donner des prévisions à divers horizons temporels et ce sur plusieurs variables climatiques comme les précipitations ou les températures (moyennes et extrêmes). Depuis le quatrième rapport du GIEC, ces variables sont en général disponibles à un pas de temps quotidien, ce qui est suffisant pour nourrir des modèles agronomiques.

4.1.2.2 Températures

Diallo et al. (2016) ont utilisé des modèles régionaux (RMC) (RegCM4, CCLM et SMHI) pour mettre en évidence les évolutions temporelles d'anomalies de températures en Afrique de l'Ouest. Les modèles prévoient une augmentation des températures de 2°C à 6°C à l'horizon 2100 selon les scénarii et par rapport à 1901-1950 en Afrique de l'Ouest.

Au Sénégal, les études de Tall et al. (2017) montrent une hausse des températures variant entre 1.5 et 2.5°C pour les RCP4.5 (Figure 10a et c). Pour le scénario RCP8.5, la hausse des températures varie entre 2.5°C et 6°C (Figure 10b et d). Pour le Sénégal, les modèles donnent des résultats cohérents concernant les températures moyennes (Figure. 11).

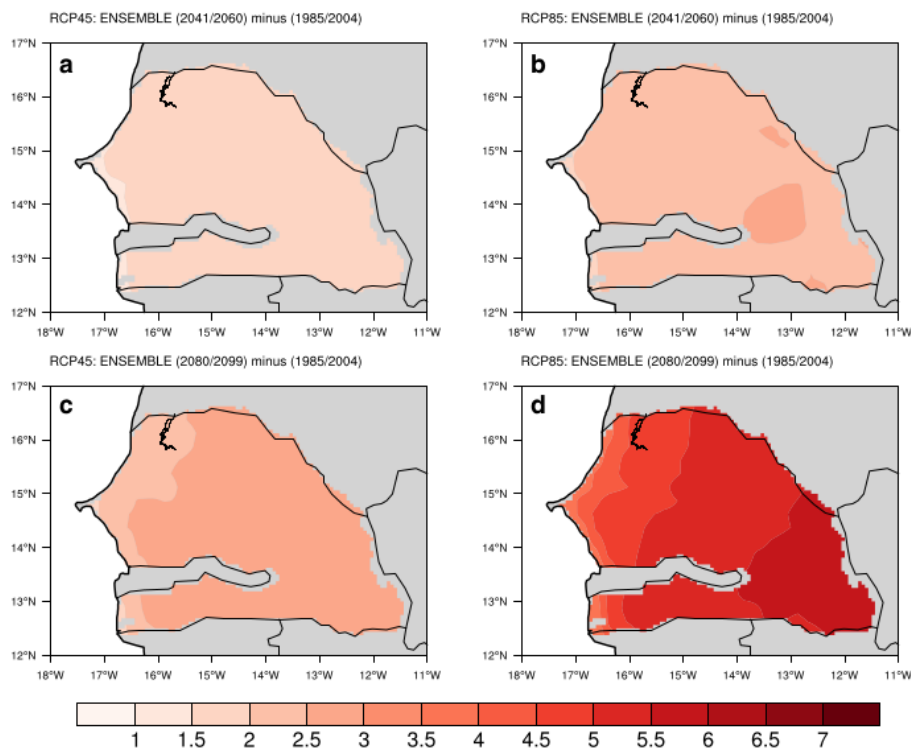


Figure 10: Variations (futur moins période de référence) de la température moyenne annuelle (en K) pour le futur proche (2041-2060, panneaux supérieurs) et le futur lointain (2080-2099, panneaux inférieurs) et pour RCP4.5 (panneaux de gauche) et RCP8.5 (panneaux de droite) (Tall et al., 2017)

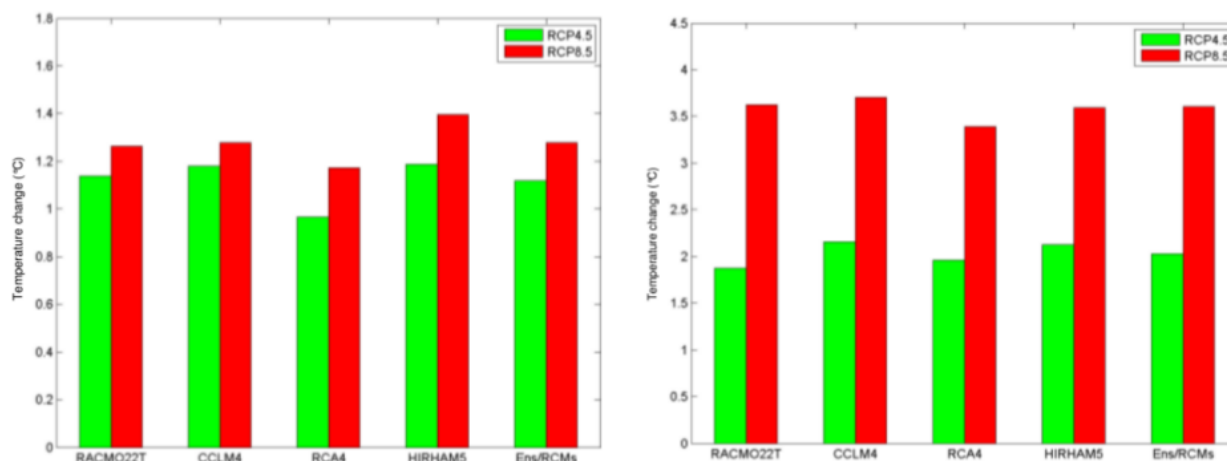


Figure 11: Gauche: Changements projetés des températures JJAS (exprimés en °C) à Ziguinchor entre le futur proche (202-/2050) et la période de référence pour les modèles RACMO22T, CCLM4, RCA4, HIRHAM5 et leur moyenne d'ensemble (Ens/RCMs) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Droite : idem que figure de gauche pour le futur lointain (2071/2100). (Sarr et Camara, 2018).

4.1.2.3 Précipitations

Les précipitations restent la variable climatique la plus difficile à projeter, surtout dans le contexte Ouest-africain, qui marqué par de fortes variabilités intra et interannuelles. Les modèles climatiques ne convergent pas sur les tendances futures des précipitations en Afrique de l'Ouest.

Les résultats issus de trois modèles régionaux sous les scénarii RCP4.5 et RCP8.5 montrent une tendance générale baissière de la pluviométrie moyenne vers l'horizon 2035 en Afrique de l'Ouest (Diallo et al. 2012). Cependant, les résultats de Tall et al. (2017) montrent une augmentation des pluies de 10 à 50% pour le futur proche (2041-2060) pour le scénario RCP4.5 (Figure 12a). Pour le scénario RCP8.5, ils mettent en évidence une légère diminution des pluies dans la zone du Sine Saloum (Figure 12b). Pour le futur lointain (2080-2090), Tall et al. (2017) prédisent une baisse des pluies sur toute l'étendue du territoire national (Figure 12c et d).

Les modèles mettent également en évidence des changements saisonniers (Juin-Juillet-Aout-Septembre-Octobre : JJASO et Décembre-Janvier-Février : DJF) de la pluviométrie en moyenne, de quelques événements extrêmes de précipitations (JJASO) sur la décennie 2031-2040 par rapport à la normale 1976-2005 (Deme et al., 2015 ; Diallo et al., 2016; Sultan, 2015).

Malgré les descentes d'échelle, il existe un large éventail de projections sur les précipitations en Afrique de l'Ouest (Bader, 2015). Ceci se répercute aussi sur les sorties au Sénégal aussi bien pour le futur proche que lointain (Figure 13). Cette large diversité s'explique entre autres par :

- la difficulté de bien représenter les systèmes convectifs liés à la mousson Ouest-africaine
- la connaissance insuffisante des mécanismes régissant le climat Ouest africain (forçage et rôles des océans, bilan hydrique continentaux, etc.)
- le manque d'observations du climat en Afrique de l'Ouest qui permettraient une meilleure paramétrisation et une validation des modèles climatiques

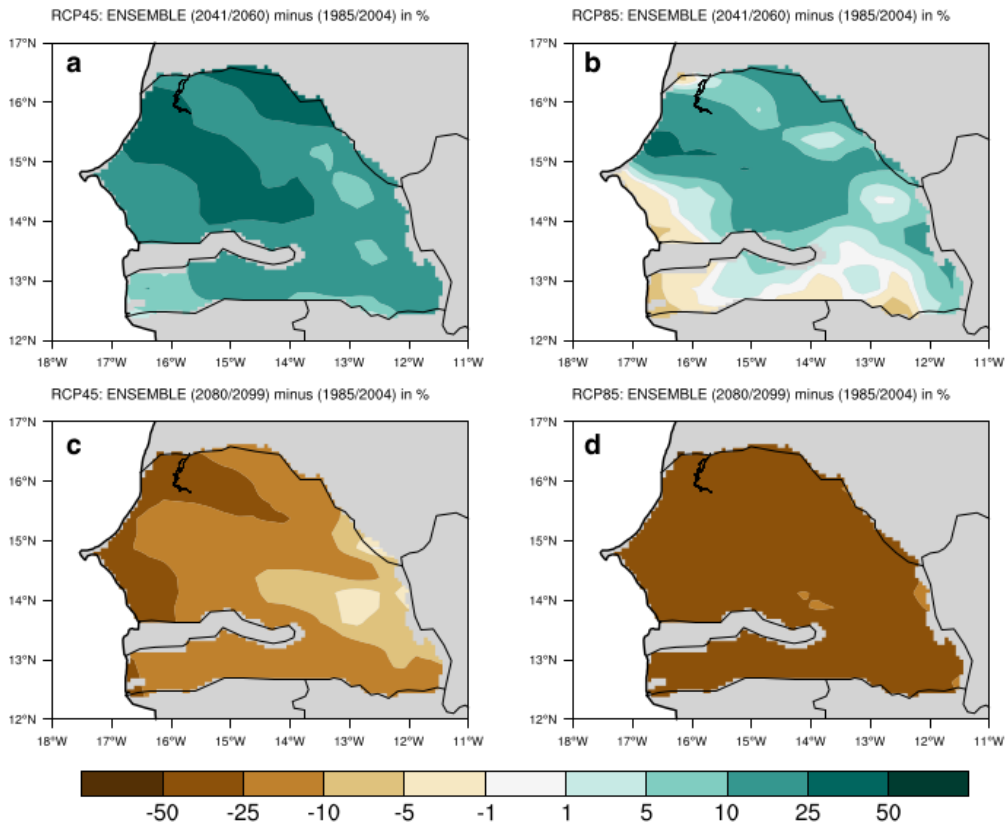


Figure 12: Variations (futur moins période de référence) de la précipitation moyenne annuelle (en% par rapport à la période de référence) pour le futur proche (2041-2060, panneaux supérieurs) et le futur lointain (2080-2099, panneaux inférieurs) et pour RCP4.5 (panneaux de gauche) et RCP8.5 (panneaux de droite) (Tall et al., 2017)

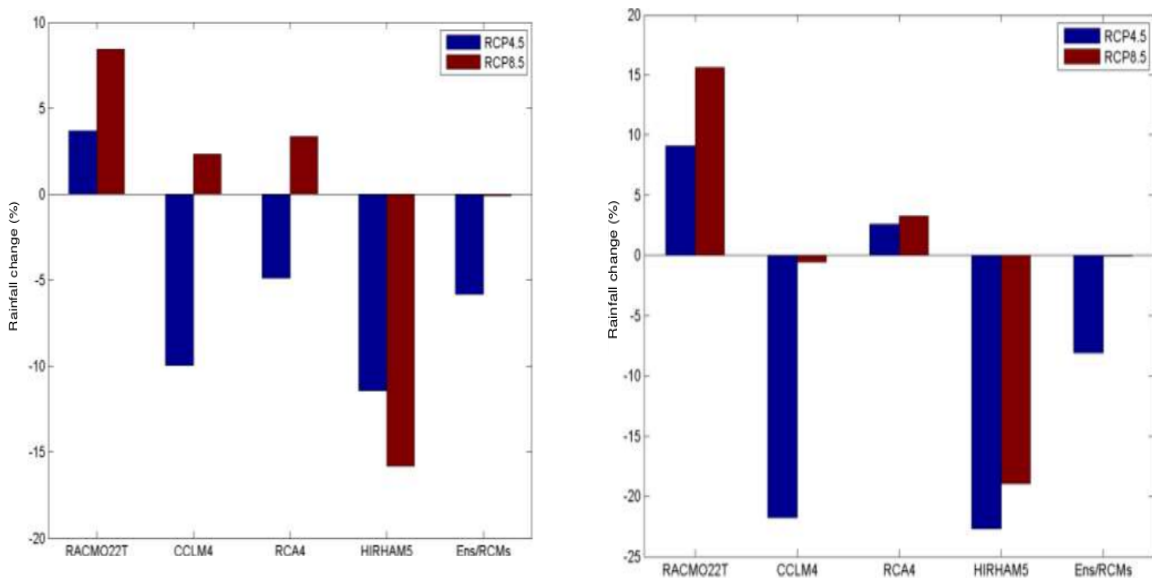


Figure 13: Gauche : Changements projetés des précipitations JJAS (exprimés en %) à Ziguinchor entre le futur proche (2021/2050) et la période de référence pour les modèles RACMO22T, CCLM4, RCA4, HIRHAM5 et leur moyenne d'ensemble (Ens/RCM) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Droite : idem que figure de gauche pour le futur lointain (2071/2100). (Sarr et Camara, 2018)

4.1.2.4 Extrêmes

Les changements climatiques sont susceptibles d'accroître la fréquence et la gravité des événements climatiques extrêmes (inondations et sécheresses) dans les zones connaissant déjà une forte variabilité des précipitations (GIEC, 2007). Les recherches disponibles à ce jour indiquent une tendance à l'augmentation des jours de pluie intense au sein de nombreuses régions, notamment dans les zones intertropicales. Au Sénégal, les travaux de Sarr et Camara (2017) prévoient une augmentation des événements de pluie très intense (Figure 14), sauf RCA4, pouvant ainsi entraîner de fortes inondations sur le Sénégal.

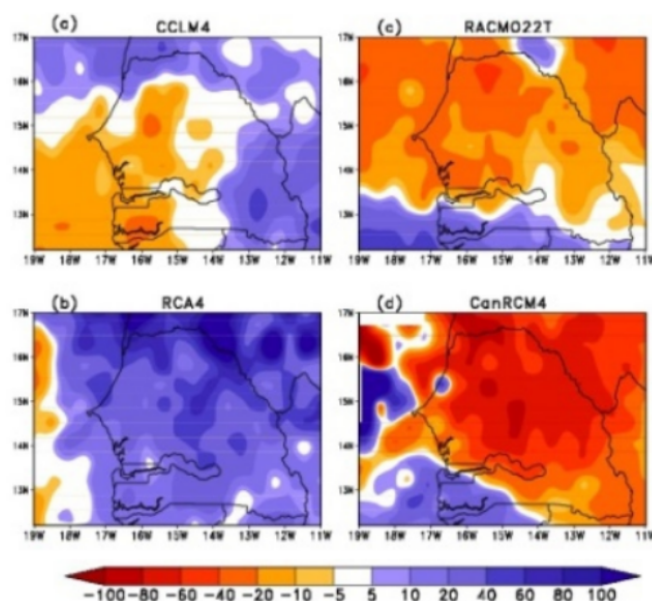


Figure 14: Écart relatif du nombre de jours de pluie très intenses ($R > 20$ mm/j) entre le futur lointain (2071-2100) et la période historique (1976-2005) durant l'été (juillet-septembre) pour les 4 modèles climatiques régionaux et leur moyenne forcés par le scénario de gaz à effet de serre RCP8.5 au Sénégal. (Sarr et Camara, 2017)

Les changements climatiques pourront se traduire par une augmentation de la durée maximale des poches de sécheresse pouvant atteindre 25% en zone sahélienne et 47% en zone soudanienne à l'horizon 2050 (Karambiri et al., 2011). Ces résultats corroborent ceux du GIEC (2008) et aussi de Sarr et Camara (2017) qui indiquent une augmentation du nombre maximum annuel de jours secs consécutifs (Figure 15).

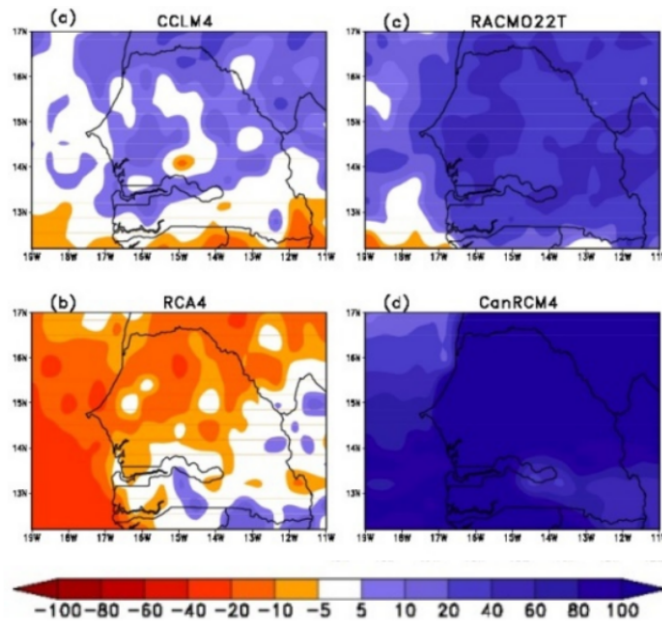


Figure 15: Écart relatif de la durée maximale du nombre de jours consécutifs secs (CDD) entre le futur lointain (2071-2100) et la période historique (1976-2005) durant l'été (juillet-septembre) pour les 4 modèles climatiques régionaux et leur moyenne forcés par le scénario de gaz à effet de serre RCP8.5 au Sénégal.

4.1.3 Région de Fatick

Dans la zone du Saloum à l'horizon 2050 et 2100, Church et al. (2001) ont montré une élévation du niveau marin, une augmentation des températures, des inondations et une baisse de la pluviométrie. Ces résultats auront des impacts négatifs sur les ressources en eau sur le plan quantitatif que qualitatif et en parallèle sur le secteur agricole.

Tableau 1: Scénarios du changement climatique dans le Saloum pour l'horizon 2050 et 2100 (Church et al., 2001)

	2050	2100
Sea level rise		
- Low hypothesis	7 cm	20 cm
- Middle hypothesis	20 cm	49 cm
- High hypothesis	39 cm	86 cm
Inundation levels		
Cap Vert (North coast)		
- Minimum	2 m	2 m
- Maximum		8 m
Cap Vert (South Coast) and Saloum		
- Minimum	1 m	2 m
- Maximum		6-8 m
Temperature	+1° to +1.9 °C	
Precipitations		
- Cap Vert	-1 to -10%	
- Saloum	-5 to -15%	

L'évolution du climat futur (2031-2040 horizon du PSE) dans la zone de Fatick par rapport à la normale de référence (1976-2005) montre une diminution de la pluviométrie (-89 mm ; RCP4.5 et -61 mm ; RCP 8.5) et une augmentation des températures (+1.17 ; RCP4.5 et +1.37 ; RCP 8.5) selon les

scénarios. Dans la zone du Saloum, la combinaison de la diminution des précipitations et de l'élévation du niveau de la mer pourrait augmenter le risque d'intrusion saline dans la nappe superficielle et l'assèchement des cours d'eau. Cependant, de récents travaux montrent que l'élévation du niveau de la mer facilite l'entrée d'eau relativement moins salée (35-37 g/l) dans les bolongs, provoquant ainsi une désalinisation relative, avec des valeurs atteignant 120 g/l en fin de saison sèche (Descroix et al, 2017)

Tableau 2: Scénarios climatiques à l'horizon 2040 au Sénégal (ANACIM, 2016)

	Scenarios	Nord	Sud-Est	Sud-Ouest	Centre-Ouest
Pluie	RCP4.5	-16	-89	-89	-89
	RCP8.5	-8	-61	-61	-61
Température	RCP4.5	+1.18	+1.17	+1.17	+1.17
	RCP8.5	+1.41	+1.37	+1.37	+1.37

Source : ANACIM, 2016

4.2 Impacts des changements climatiques par secteur

4.2.1 Secteur de l'agriculture

Les populations, particulièrement celles du monde rural, sont le plus exposées aux impacts des changements climatiques à cause de leurs systèmes de production, d'élevage ou de cultures moins performants et étroitement tributaires de la pluviométrie (Bazzaz et Sombroek, 1996). A titre d'exemple, Sultan (2015) indique que cette dépendance à la pluviométrie est très forte pour l'agriculture qui occupe près de 93% des terres cultivées en Afrique de l'Ouest, alors que leur accès réduit aux adaptations technologiques et la croissance démographique, les capacités économiques et institutionnelles limitées constituent des facteurs aggravant l'impact socio-économique (Berg, et al., 2013 ; Berg, 2011 ; Challinor, et al., 2007; Müller, et al., 2011 ; Roudier, et al., 2011 ; Salack et al., 2015 ; Salack, et al., 2012 ; Sultan, et al., 2014).

Le Sénégal, comme de la plupart des pays d'Afrique de l'Ouest, est aussi très affecté par les modifications des paramètres climatiques. Les évolutions des variables climatiques dans les 50 dernières années, précédemment décrites plus haut, ont eu des conséquences importantes sur le secteur agricole sénégalais dont plus de 90% des cultures sont pluviales. Cette forte dépendance à la pluviométrie très variable d'une année à l'autre fait de l'agriculture sénégalaise l'un des secteurs les plus vulnérables aux effets de la variabilité et des changements climatiques actuels.

En effet, les facteurs à l'origine de l'impact sur le secteur agricole sont le déficit hydrique des cultures dû à l'augmentation de l'évapotranspiration mais aussi le réchauffement qui est à l'origine de la perturbation de la carte variétale du pays (MEDD, 2016). Ces impacts sont une des causes d'une contre-performance de l'agriculture sénégalaise et une baisse notable de sa contribution dans le Produit Intérieur Brut (PIB) du pays qui est passée de 6.8% en 2013 contre 7% en 2012 (CSE, 2015; MEDD, 2016). La production agricole nationale a accusé une baisse remarquable en 2014, imputable à la baisse de la production de céréales (1 249 000 tonnes contre 1 269 000 tonnes en 2013). En dépit de ses performances erratiques, l'agriculture occupe toujours une place centrale dans l'économie nationale et constitue un levier essentiel pour la satisfaction des besoins alimentaires des

populations, la création de richesses et la garantie d'une sécurité alimentaire durable. Le secteur agricole sénégalais emploie 1 220 000 actifs, soit 28% de la population active sénégalaise et repose à 90% sur des exploitations familiales (ANSD, 2014). Ces exploitations se retrouvent majoritairement dans les zones rurales où les modifications climatiques et les impacts biophysiques associés sont plus marqués se traduisant par de faibles précipitations, des sols fragiles ou dégradés et un accès au marché limité (GIEC, 2007).

4.2.1.1 La vulnérabilité de l'agriculture sénégalaise

Le Sénégal, avec une population composée à 55% de ruraux, dépend donc fortement du secteur agricole. Selon l'ANSD (2014), 49.5% de ménages sont purement agricoles et 61% parmi ces derniers s'adonnent à la culture pluviale comme activité dominante Ceci est particulièrement vrai dans des régions comme Fatick, où plus de 8/10^{ème} des ménages s'adonnent à l'agriculture pluviale principalement (ANSD/SRSD/Fatick, 2015). Il est donc évident que les bouleversements climatiques cités ci-dessus sont davantage ressentis au niveau de l'agriculture où la succession d'années de sécheresse et de pluviométrie excédentaire réduit les récoltes et impacte les revenus d'un monde rural qui devient de plus en plus pauvre.

La dégradation des conditions climatiques que l'on observe au Sénégal depuis plus d'une trentaine d'années représente une contrainte majeure au développement du secteur agricole. Après une longue sécheresse (1968-1986), c'est à présent surtout l'augmentation des événements extrêmes qui est source de difficultés pour l'agriculture. Plusieurs conséquences découlent de cette situation d'insécurité climatique (Gaye et al., 2015) :

- une augmentation de la demande évaporative qui, en 2000, se chiffrait déjà à 1 435 millions de m³ ;
- une inadaptation des systèmes de production avec comme corollaire la baisse des rendements, liée au raccourcissement de la saison pluvieuse ;
- une baisse des ressources en eau douce liée à la remontée du biseau salé et à la pénétration des eaux océaniques dans les zones estuariennes.

La région de Fatick est parmi les zones les plus exposées du pays car en plus de la variabilité climatique on distingue une forte réduction des surfaces cultivables du fait de la salinisation des terres. Une bonne partie des terres cultivables nécessite de grosses quantités d'intrants agricoles organiques ou minéraux souvent moins accessibles pour les populations à cause de leur coût élevé mais aussi à cause du retard dans leur distribution par rapport au démarrage de la saison agricole. Cette situation a été à l'origine par exemple d'une diminution des rendements agricoles à Fatick au niveau de toutes les spéculations (sauf pour le riz, le sorgho et le niébé dont les rendements sont en augmentation respectivement de 100%, 28.4% et 28.4%) durant la campagne d'hivernage de 2013 (ANSD/SRSD/Fatick, 2015).

Au rythme actuel sans mesure d'adaptation, l'ensemble de ces facteurs (climatiques et non climatiques) risque de limiter les rendements agricoles dans le futur. En effet, sur la base de l'analyse de l'évolution de la productivité de l'agriculture sénégalaise à travers un scénario optimiste (mise en œuvre du PSE) et un scénario pessimiste (survenue d'aléas climatiques : inondation, sécheresse), le modèle T21 développé par la Direction de la Planification Nationale (DPN) montre que sans mesures

d'adaptation, les changements climatiques risquent de limiter les rendements dans le secteur de l'agriculture à l'horizon 2035 (MEDD, 2016).

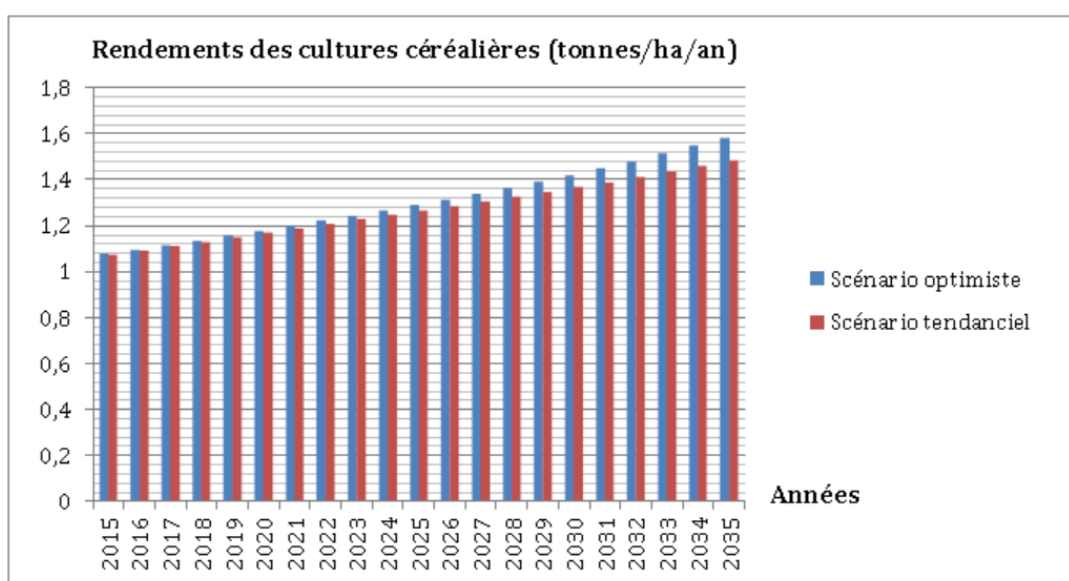


Figure 16: Évolution des rendements des culture céréalières (tonnes/ha/an) selon le modèle T21 (Source : CDN, 2016)

Il apparaît donc crucial de pouvoir fournir une image plus précise de l'évolution attendue du potentiel de production agricole au Sénégal dans le contexte du réchauffement climatique.

4.2.1.2 La modélisation comme outil d'aide à la décision

La quantification des impacts agronomiques des changements climatiques nécessite la mise en place d'une méthodologie souvent complexe avec des outils tirés de l'économie (scénarios d'émission), de la science du climat (modèles et projections climatiques), de l'agronomie (modèles agronomiques) et de la statistique (régionalisation et correction de biais), ayant chacun leurs barres d'erreurs et leurs limites (Berg, 2011 ; Dingkuhn et al., 2003). Cette estimation des impacts des changements climatiques sur les systèmes agricoles est essentielle pour comprendre et prévenir les problèmes potentiels des ressources naturelles et leur gestion future. Cependant, cette tâche reste encore difficile à réaliser du fait des fortes incertitudes sur les projections régionales du changement climatique, dans la réponse des plantes aux changements environnementaux (pluie, températures, concentration de CO₂ dans l'atmosphère), dans le couplage des modèles agronomiques et climatiques et dans la façon dont les systèmes agricoles vont s'adapter progressivement aux changements environnementaux (Challinor et al., 2007 ; Sultan et al., 2008).

4.2.1.2.1 La modélisation des cultures

Pour quantifier les liens entre le climat et l'agriculture, un prérequis est de construire un modèle qui permette de transcrire l'information climatique (températures et/ou précipitations, par exemple) en termes de variables agronomiques (rendements agricoles, biomasse). Ce type de modèle est particulièrement utile pour synthétiser les connaissances existantes sur les relations climat/plante,

explorer des hypothèses de changements de climat ou de pratiques agricoles, identifier des variables clés sur lesquelles la recherche doit mettre l'accent et construire des scénarios pour le futur (Benjamin Sultan, 2015).

Un certain nombre d'approches de modélisation concernant l'évaluation des impacts des changements climatiques sur l'agriculture ont été développées. Les approches utilisées pour évaluer les impacts biophysiques comprennent (UNFCCC, 2009) :

- des modèles basés sur des indices calculés en utilisant des combinaisons de facteurs climatiques importants pour les cultures. Ces modèles sont cependant basés seulement sur le climat et ne prennent pas en compte les réponses en matière de gestion ou de considérations concernant la fertilisation par le carbone ;
- des modèles statistiques et des fonctions de rendements basés sur les relations empiriques entre le climat observé et les réponses des cultures. Utilisés pour la prédiction des rendements pour les marchés des produits de base et en vue d'émettre des alertes précoces contre la famine. Ils offrent une bonne description des cultures actuelles et des variations climatiques. Toutefois, ils n'expliquent pas les mécanismes de causalité et ne rendent possiblement pas compte des relations futures entre le climat et les cultures ou de la fertilisation par le CO₂ ;
- des modèles basés sur des processus utilisés pour calculer la réponse des cultures par rapport aux facteurs qui affectent la croissance et le rendement (p. ex. climat, sols et gestion). Ces modèles sont basés sur les processus, largement étalonnés et validés. Ces modèles sont utiles pour tester un large éventail d'adaptations. Ils nécessitent par contre des données détaillées sur le climat et la gestion pour de meilleurs résultats.

Chacun de ces modèles possède des informations sur différents types d'impacts. Par exemple, des indices simples agro-climatiques peuvent être utilisés pour analyser les changements dans de grandes zones de cultures, alors que les modèles de croissance des cultures basées sur les processus devraient être utilisés pour analyser les changements spécifiques (ex. le rendement de cultures). Néanmoins, ces modèles de croissance des cultures, ne reproduisent pas toute la variabilité du milieu biophysique (Sultan et al., 2008). Cette variabilité est très forte à l'échelle locale dans le Sahel, notamment d'une parcelle à une autre pour des distances inférieures au kilomètre et pour un climat identique. Les facteurs d'ordre environnemental liés à cette variabilité sont la nature et la fertilité des sols, la topographie, les stress biotiques (mauvaises herbes, oiseaux, maladies, insectes...), et d'ordre socioéconomiques comme le statut foncier de la parcelle, la disponibilité de la main-d'œuvre, le pouvoir d'achat du paysan pour l'acquisition des intrants (fumure organique et minérale), l'absence de politique de soutien des prix aux producteurs. Par ailleurs, les paramètres simulés par ces modèles comme le rendement ne sont donc pas directement comparables aux données réelles du milieu paysan (Sultan et al., 2008).

Cette variabilité implique une calibration et une validation de chaque modèle pour s'assurer de l'ajustement des résultats du modèle des cultures avec un ensemble de données expérimentales sur le terrain.

4.2.1.2.2 Couplage des scénarios climatiques et des modèles de culture

A cause de l'évolution climatique récente, des impacts socio-économiques forts et de la perspective

du changement global lié au réchauffement climatique, une recherche pluridisciplinaire est préconisée par la communauté scientifique (Berg, 2011 ; Hansen, 2002). Les efforts de recherche sur la vulnérabilité agricole sont beaucoup plus orientés vers le couplage de modèles entre le climat et l'agriculture de manière à ce que les progrès scientifiques en termes de compréhension et de prévision de la variabilité et des changements climatiques puissent être bénéfiques pour les sociétés (Ardoin, 2006 ; Sultan et al., 2008).

Cette approche pluridisciplinaire a été celle du projet européen PROMISE (Predictability and variability of monsoons and agricultural and hydrological impacts 1 ; 2000-2003), et elle constitue également un axe fort du projet international AMMA (Analyse multidisciplinaire de la mousson africaine 2) et AMMA 2050. Cependant, si les avancées de la recherche en climatologie améliorent de jour en jour la prévision saisonnière du climat grâce aux modèles de circulation générale, l'utilisation de cette information climatique pour l'agriculture reste marginale en Afrique. L'utilisation des projections climatiques dans les Modèles Globaux de Climat (MCG) pour forcer les modèles de cultures ou hydriques est difficile et soulève plusieurs questions importantes.

Tout d'abord, la combinaison des modèles globaux de climat et des modèles de cultures basés sur les procédés pose un certain nombre de problèmes méthodologiques notamment en raison du saut d'échelles entre d'une part les modèles agronomiques, par exemple, conçus pour appréhender des processus impliquant la plante, le sol et l'atmosphère à l'échelle de la parcelle, et d'autre part les modèles globaux conçus pour simuler le climat sur des mailles de plusieurs centaines de kilomètres de côté (Baron et al., 2005 ; Challinor et al., 2009; Sultan et al., 2008). De ce fait, comme beaucoup de modèles environnementaux ou de modèles d'impacts, les modèles de cultures sont spécifiques d'une échelle donnée, dans leur cas l'échelle parcellaire, et nécessitent des données d'entrée à cette échelle (Baron et al., 2005; Heuvelink, 1998). Il apparaît donc inapproprié de forcer directement un modèle agronomique avec des sorties de MCG. Il est nécessaire de traduire les sorties des modèles globaux en une information locale utilisable par les modèles agronomiques à partir de l'information établie à plus grande échelle par les modèles de climat. Pour réaliser ce transfert d'échelle, on utilise des méthodes dites de descente d'échelle (ou « downscaling ») (Herrera et al., 2006).

Les méthodes de désagrégation se répartissent en trois catégories :

- les méthodes dynamiques utilisant des modèles à méso-échelle simulant le climat local d'une région déterminée à résolution fine (20-50 km) en prenant en compte les spécificités régionales comme le modèle MAR développé pour l'Afrique de l'Ouest par (Gallée et al., 2004) ;
- les méthodes statistiques basées sur des relations empiriques entre la circulation atmosphérique à grande échelle et le climat local (Zorita et Von Storch, 1999). Parmi ces méthodes, on compte les générateurs de temps (Wilks et Wilby, 1999) qui sont des modèles stochastiques générant des séries virtuelles avec les mêmes propriétés que les séries observées, les méthodes de type régression linéaire (analyse canonique, régression multiple) ou non linéaire (réseau de neurones) et les méthodes en type de temps (classification automatique, analogues) ;
- les méthodes statistico-dynamiques combinant les méthodes empiriques et dynamiques (Zorita et Von Storch, 1999).

Les méthodes statistiques sont très simples à mettre en place, peu coûteuses en termes de temps, et peuvent également corriger efficacement les biais des MCG comme le montrent Ndiaye et al. (2011).

En revanche, elles nécessitent d'avoir à disposition des jeux de données longs et fiables à l'échelle locale et font une hypothèse forte de stationnarité (les relations entre la grande échelle et l'échelle locale sont invariables dans le temps) qui peut être mise à défaut si le climat change.

Les méthodes dynamiques par contre sont coûteuses en temps de calcul et reproduisent, voire amplifient, les biais des MCG. Mais elles peuvent s'avérer très pertinentes dans le contexte des changements climatiques puisque les Modèles Régionaux de Climat (MRC) simulent toute la complexité du climat local (Diallo et al., 2012 ; Jones et Thornton, 2003 ; Sylla et al., 2010, 2015).

C'est l'objet des simulations régionales CORDEX-Afrique (« international Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment Africa ») comprenant un sous-ensemble réduit des simulations MCG avec différents MRC (Ismaila Diallo et al., 2016) disponibles pour des études d'inter-comparaison et d'évaluation des impacts. La disponibilité de simulations climatiques fiables à haute résolution spatiale temporelle est cruciale pour une évaluation robuste des impacts climatiques à l'échelle régionale, mais les simulations CORDEX-Afrique montrent des résultats encourageants pour l'Afrique de l'ouest.

Bien que ces simulations puissent améliorer les prévisions de la variabilité des conditions météorologiques et du climat (Feser et al., 2011 ; Gutmann et al., 2012), ainsi que les projections sur le rendement des cultures (Easterling et al., 2001 ; Tsvetsinskaya et al., 2003), il est important de garder à l'esprit que la méthode de downscaling est une source supplémentaire d'erreurs et d'incertitudes pour les projections de rendement des cultures.

4.2.1.2.3 Sélection de modèles de cultures en Afrique de l'Ouest

L'amélioration de la prévision du climat offre donc des avantages potentiels intéressants pour l'agriculture. D'une part, de nombreuses études ont essayé de relier les résultats des prévisions saisonnières des MCG aux modèles de cultures, traduisant ainsi les prévisions climatiques en prévisions de cultures saisonnières (Hansen, 2002). D'un autre côté, cette combinaison fournit également un outil pour évaluer les impacts des changements climatiques futurs sur la production agricole (Jones et Thornton, 2003). Ceci est particulièrement important pour l'Afrique subsaharienne où la variabilité du climat et la sécheresse menacent la sécurité alimentaire.

Les modèles de cultures peuvent être divisés en deux catégories : les modèles statistiques qui simulent les rendements suivant quelques mesures simplifiées des conditions météorologiques, telles que la température moyenne de la saison de croissance et les précipitations (Lobell et al., 2008), et les modèles de cultures basés sur des processus qui simulent explicitement les principaux mécanismes de la croissance et le développement des cultures (Ewert et al., 2014). Le tableau 3 montre une sélection des modèles qui ont été utilisés spécifiquement au Sénégal ou en Afrique de l'Ouest pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les rendements de diverses cultures.

Tableau 3: Sélection de quelques modèles de climat, modèles agronomique (y compris une combinaison entre les modèles de cultures) utilisés au Sénégal, dans les pays d'Afrique sub-saharienne ou d'Afrique de l'Ouest pour évaluer l'impact du changement climatique sur les rendements agricoles de diverses cultures (Sy, 2016)

Sources (Références)	Modèles climatiques	Modèles agronomiques	Zones	Horizons	Cultures	Période de référence
Fischer <i>et al.</i> (2005)	HadCM3, CSIRO, CGCM, NCAR	AEZ + BLS	Afrique Sub-Saharienne	2080	Global	1961-1990
Nelson <i>et al.</i> (2009)	NCAR, CSIRO	IMPACT + DSSAT	Afrique Sub-Saharienne	2050	Global, Maïs, Mil, Riz, Sorgho, Blé, Soja, Arachide	2000
Jones et Thornton (2003)	HadGEM2	CERES-maïs	Afrique de l'Ouest	2055	Maïs	1990
Lui <i>et al.</i> (2008)	HadGEM3	GEPIC	Afrique Sub-Saharienne, Afrique de l'Ouest	2030	Global, Maïs, Mil, Riz, Sorgho, Blé, Manioc	1990-1999
Lobell <i>et al.</i> (2008)	20 GCMs	Empirique	Afrique de l'Ouest	2030	Manioc, Maïs, Mil, Riz, Sorgho, Blé, Igbame Arachide	1998-2002
Muller <i>et al.</i> (2010)	CCSM3, ECHAM5, ECHO-G, GFDL, HadCM3	LPJmL	Afrique de l'Ouest	2050	Global	1996-2005
Parry <i>et al.</i> (2004)	HadCM3	Empirique + BLS	Afrique de l'Ouest	2020/2050 /2080	Global	1990
Schlenker et Lobell (2010)	16 GCMs	Empirique	Afrique de l'Ouest	2055	Manioc, Maïs, Mil, Sorgho, Arachide	1960 -2002
Adiku <i>et al.</i> (2015)	5 CMIP5 GCM	DSSAT + APSIM	Sénégal		Maïs, Mil, Arachide	
Jarvis <i>et al.</i> (2012)	Inconnu	EcoCrop	Afrique de l'Ouest	2030	Maïs, Mil, Sorgho, Banana et Haricots	
Folberth <i>et al.</i> (2014)	3 CMIP5 GCMS	GEPIC	Afrique Sub-Saharienne	2041-2050 / 2081-2090	Maïs	2001–2010
Parkes <i>et al.</i> (2015)	HadGEM1	GLAM	Afrique de l'Ouest	2020	Arachide	
Berg <i>et al.</i> (2013)	BCCR, MIROC-MEDRES,	ORCHIDEE	Sénégal	2020-2049 /2070-	Culture C4	1970-1999

	MIROC-HIRES, CSIRO3.5, GISS AOM, IPSLCM4, INMCM,			2099		
Deryng (2015)	HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM- CHEM, GFDL- ESM2M, NorESM1-M	EPIC + GEPIC + LPJ-GUESS + pDSSAT + PEGASUS	Sénégal	2030	Maïs,Blé, soja,Riz, Mil Sorgho, CanneàSucre Haricots, Manioc,Coton, Tournesol, Arachide	2000
Sultan <i>et al.</i> (2013)	CMIP5 et CMIP3 GCMs	SARRA-H	Afrique de l'Ouest	2031-2050 /2071- 2090	Mil (trois cultivars), Sorgho (trois cultivars)	1961–2000
Sultan <i>et al.</i> (2014)	CCSM4, CMCC- CM, CMCC-CMS, CSIRO-Mk3-6-0, GFDL-ESM2G, HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC5, MPI-ESM-MR	SARRA-H + APSIM	Afrique de l'Ouest	2031-2060	Sorgho (deux cultivars)	1961–1990

4.2.1.3 Impact des changements climatiques sur les rendements agricoles au Sénégal

La quantification des impacts agronomiques des changements climatiques nécessite la mise en place d'une méthodologie souvent complexe avec des outils tirés de l'économie (scénarios d'émission, modèles de décision des ménages agricoles), de la science du climat (modèles et projections climatiques), de l'agronomie (modèles agronomiques) et de la statistique (régionalisation et correction de biais), ayant chacun leur part d'erreur et leurs limites. Malgré ces incertitudes, il a pu être montré une baisse plausible de la productivité des céréales dans le futur sous l'effet du réchauffement climatique. Cette baisse des rendements est particulièrement marquée dans l'ouest du Sahel où se combinent les effets d'une baisse des pluies et d'une hausse des températures à l'horizon 2050 (Sultan, 2015).

Au Sénégal, Deryng *et al.* (2015) ont montré un climat plus sec à partir des années 2030 à 2035 à l'aide de trois scénarios climatiques (HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR et GFDL-ESM2M) et un climat plus humide grâce à deux scénarios (MIROC-ESM-CHEM et NorESM1-M). L'impact global de cette variabilité climatique sur le rendement des cultures dans les zones semi-arides du Sénégal est négatif. Ainsi, le rendement moyen des cultures à la fin des années 2030 diminue de $7,5 \pm 16,7\%$ dans un contexte de changements climatiques : les rendements de l'arachide, du mil, du sorgho et du

maïs diminuent entre 5,4% et 12,3% dans la médiane de l'ensemble. En revanche, les rendements en coton, riz et manioc augmentent de 5% à 13,2%. Sous CCw / oCO₂, le rendement moyen des cultures diminue de $8,5 \pm 9,9\%$, le maïs enregistrant la plus forte baisse ($-8,8 \pm 14,7\%$) (Figure 16). Une autre étude de Aduki et al. (2015) avec les cinq scénarios climatiques et deux modèles de cultures Decision support system for agrotechnology transfer DSSAT (Hoogenboom et al., 1999) et APSIM (Keating et al., 2003) montre que les changements climatiques projetés affecteraient négativement la productivité des céréales à Nioro dans la région de Fatick. L'impact simulé des changements climatiques était également plus élevé avec DSSAT qu'avec APSIM. L'utilisation de la technologie de base (c.-à-d. les variétés de cultures actuelles) a le plus souvent entraîné un rendement inférieur dans les scénarios climatiques futurs. Cette étude a montré que les agriculteurs de Nioro du Rip, au Sénégal, peuvent avoir des impacts négatifs variables sur leurs revenus nets par exploitation et sur le revenu par habitant, et une augmentation des taux de pauvreté sous hypothèse de changements climatiques sans adaptation. L'utilisation de variétés végétales actuelles dans le contexte des régimes pluviométriques futurs prévus entraînera une baisse de la productivité (basée sur les modèles DSSAT et APSIM), et donc des rendements plus faibles.

Dans le contexte actuel, le défi à relever ne réside donc pas tant dans l'estimation déterministe et vraisemblablement inatteignable de l'évolution future des rendements, mais dans la quantification, la hiérarchisation et la réduction des incertitudes associées aux projections des impacts des changements climatiques. Le cadre des nouveaux projets internationaux d'intercomparaison de méthodes de régionalisation (CORDEX) et d'intercomparaison des modèles agronomiques (AGMIP : Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) marquera très certainement un tournant vers une meilleure prise en compte de cette incertitude à travers des études coordonnées dédiées aux impacts du climat sur l'agriculture qui étaient jusqu'alors menées de manière très isolée et fragmentée. Cependant, il ne faut pas attendre plus de certitudes pour d'ores et déjà réfléchir à des mesures d'adaptation qui soient à la fois scientifiquement pertinentes et socialement acceptables, le climat d'aujourd'hui ayant déjà un impact sur les ressources des populations rurales.

Néanmoins, l'étude des vulnérabilités et de l'adaptation aux changements environnementaux nécessite un dialogue entre les sciences biophysiques (climat, hydrologie, agronomie) et les sciences humaines (démographie, histoire, anthropologie, économie). Cette approche pluridisciplinaire est cruciale, lorsqu'on aborde la problématique de l'adaptation aux changements environnementaux où la réponse des sociétés est enchâssée dans des transformations sociales globales et où la variable climatique est loin d'être le seul et unique facteur de la vulnérabilité des sociétés sahéliennes.

4.2.2 Secteur des ressources en eau

La région de Fatick fait partie de la zone éco-géographique du bassin arachidier. Elle est caractérisée par un réseau hydrographique dense et la présence de ressources en eau souterraine stockées dans des réservoirs ou systèmes aquifères.

En 2015, les besoins annuels en eau des ménages s'élevaient à 2 044 918 m³ contre 1 736 579 m³ en 2010. L'augmentation de la population et de la transhumance saisonnière pourrait accentuer les besoins en eau dans la zone du Saloum (Malou et Cissé, 2016 ; Marega, 2016). Aujourd'hui, les

enjeux majeurs post 2015 de l'état dans le secteur rural (horizon 2025) se résument à l'amélioration de l'accès à l'eau et de la qualité (réduire le taux de chlorures et de fluorures et sauvegarder la sécurité sanitaire des consommateurs) (ANSD/SRSDF, 2015). La production d'eau a augmenté entre 2012 et 2013 elle est passée de 790 362 m³ à 1 084 586 m³ dans la région de Fatick.

Tableau 4: Évolution de la production d'eau en m³ par département de 2010 à 2013 (ANSD/SRSDF, 2015)

Départements	2010	2011	2012	2013
Fatick	568174	596066	620066	713163
Foundiougne	144196	146296	170296	371423
Total	712370	742362	790362	1084586

Parallèlement le nombre de forages répartis dans la zone du projet était de 90 en 2012 et le réseau d'adduction a connu une augmentation au courant de l'année 2013.

Tableau 5: Situation des forages par département en 2013 (ANSD/SRSDF, 2015)

Départements	Caritas	DHR	Total
Fatick	8	47	55
Foundiougne	22	13	35
Total 2012	30	60	90
Total 2013	37	80	107

4.2.2.1 État des ressources en eau de surface

Les ressources en eau de surface dans la zone d'étude sont caractérisées par un grand système fluvial constitué par un ensemble de bassins versants côtiers débouchant sur un estuaire complexe au eaux très salées : le Sine-Saloum (Dacosta 1994) dont la direction principale de l'écoulement se fait d'Est vers l'Ouest (Kaolack vers Foundiougne). Son embouchure se situe vers Kaolack. Avec une longueur d'environ 120 km (Benam, 2014), l'estuaire du Saloum se divise en bras de faible pente. L'affluent principal du Saloum est le Sine, encore assez indigent. Par contre, au Sud-ouest de la zone, se trouve le bassin versant de la Nema avec une superficie de 50 km² sur une longueur de 11 km (Lienou, 1996). C'est un des seuls cours d'eau douce au Sénégal (avec le Medina Djikoye voisin) en dehors des organismes régionaux (Gambie et Sénégal), essentiellement allogènes Son fonctionnement a été fortement modifié par le déficit pluviométrique ininterrompu de 1970 à 1999 (Diop et al., 2015) (Figure 17). Par ailleurs, on constate une réduction du potentiel des petites rivières côtières (Néma, Sokone, Senghor) en lien avec la réduction des apports d'eau douce continentale.

Ainsi, il est à noter que de manière générale, les facteurs de modification du fonctionnement hydrologique des bassins versants côtiers (Néma et Médina Djikoye par exemple) sont dus à une combinaison d'éléments à la fois naturels et anthropiques. En effet, l'action de l'homme à travers le

développement de systèmes de culture, d'aménagements hydro-agricoles et d'irrigation joue un rôle notable dans la disponibilité de la ressource.

Dans le Saloum, la salinité constitue la contrainte majeure de la ressource en eau, menaçant sa qualité. En effet, les ressources en eau de surface du fleuve sont caractérisées par une salinité qui augmente vers l'amont de l'embouchure. L'environnement géomorphologique a fortement favorisé l'intrusion d'eau salée dans le fleuve (Faye et al., 2003). L'estuaire du Saloum subit la prépondérance du courant de flot et non du jusant, traduisant ainsi l'originalité d'un schéma contraire à ce qui se produit habituellement dans un estuaire (Diop E. , 1986). Ce courant peut entraîner une remontée importante d'eau de mer jusqu'à des distances de 100 Km de l'embouchure (Barusseau J. , 1983) (Figure 17). En général, ces eaux essentiellement salées ne redescendent pas vers l'embouchure. La salinité des eaux et des sols est ainsi entretenue par un fort pouvoir évaporateur en amont (Diara, 1999). Le fleuve Saloum reste en permanence influencé par un apport accru d'eau salé diminuant ainsi considérablement les réserves en eau douce. Enfin, le niveau piézométrique négatif favorise une direction d'écoulement de la source saline vers l'aquifère (Faye et al., 2003).

Pour exemple, les premières mesures de salinité des eaux de surface remontant à 1927 à la station de Kaolack montrent un taux de salinité de 58 g/l (Dieng, 2017) (Figures 19 et 20), contre 35g/l pour la salinité des eaux océaniques. Par ailleurs, des mesures récentes du LMI PATEO montrent des salinités de 80 à 110 g/l à Kaolack sur le Saloum suivant la saison, de 100 à 120 g/l sur le Sine à Fatick.

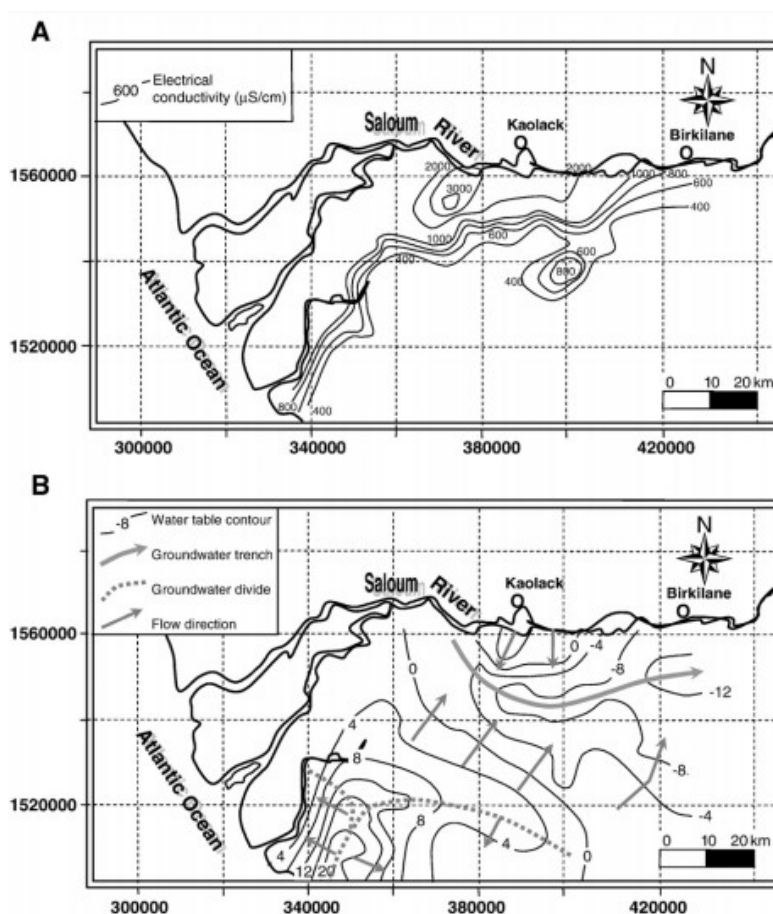


Figure 17: Valeurs de conductivité électrique (A) et de la piézométrie du CT (B) dans le Saloum (Faye et al., 2003)

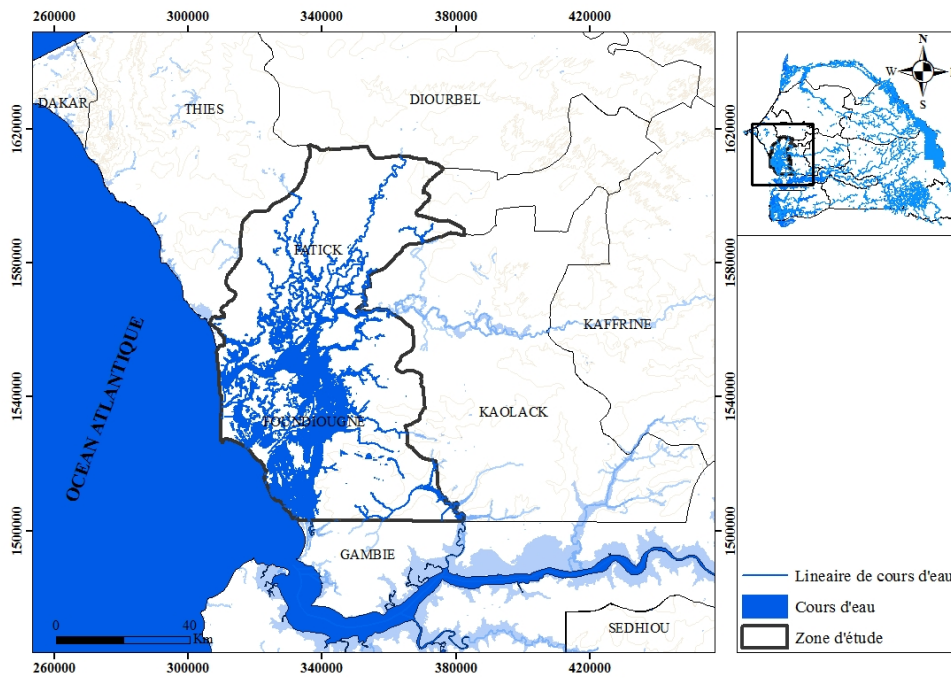


Figure 18: Cartographie des différents bras de mer dans le Saloum

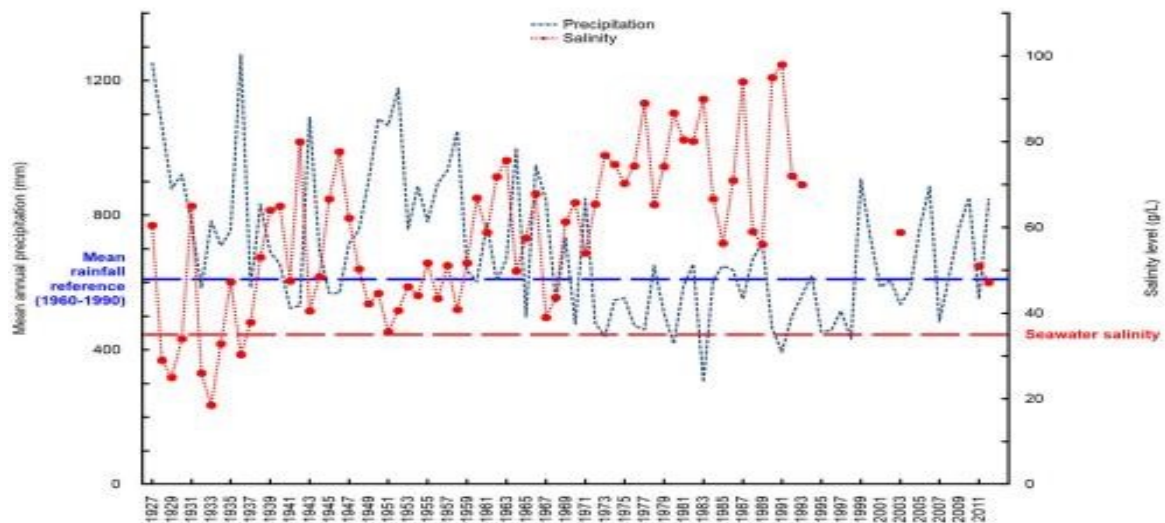


Figure 19: Corrélation entre la salinité et la pluviométrie dans le Saloum période 1927-2012 (Dieng, 2017)

La morphologie actuelle du delta du Saloum s'explique par les phénomènes géologiques du quaternaire marqués par des variations du niveau de la mer et des variations du climat (Barusseau et al., 1999). Le Saloum, comme la plupart des cours d'eau de cette région a un régime hydrologique unimodal avec une concentration des écoulements durant la saison des pluies (Dacosta, Mendy et al., 2003). Dans le Saloum, l'écoulement ne survient que pendant la saison des pluies du fait de la situation géographique quasi-plate. En saison des pluies, des mares importantes jalonnent les cours d'eau. Cependant il faut d'importantes pluies pour voir leur écoulement s'organiser en écoulement concentré.

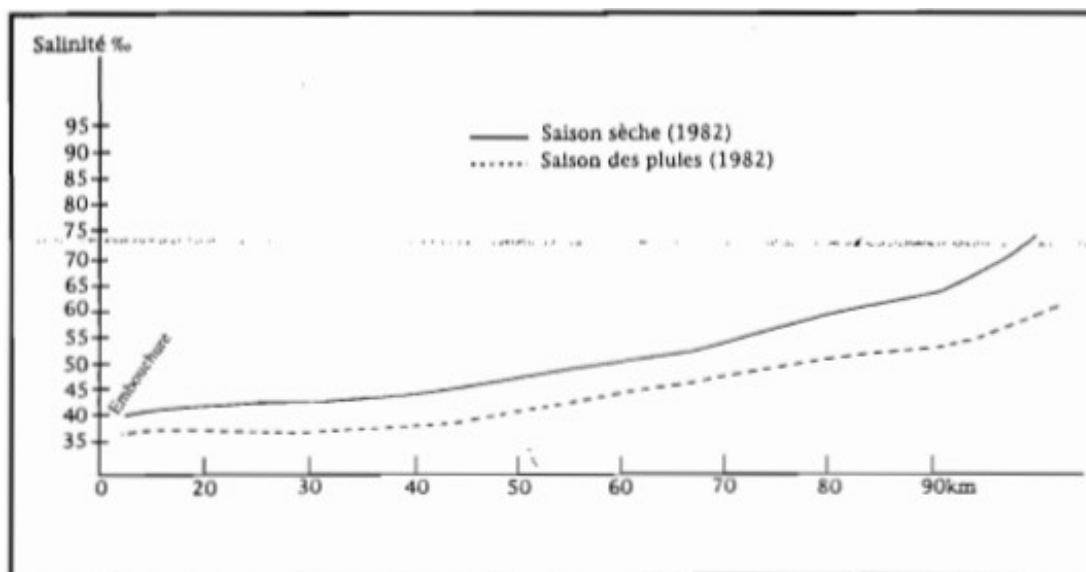


Figure 20: Variabilité saisonnière de la salinité dans le Saloum en 1982 (Rapport Unesco-Comar, 1985)

Barousseau et al., (1989) ont montré que la variabilité saisonnière de la salinité dans le Saloum a une conséquence directe sur le fonctionnement hydrodynamique estuarien du fleuve. Cette variation de la salinité s'exprime par une augmentation pendant la saison sèche et une diminution pendant la saison pluvieuse de l'embouchure vers l'amont du fleuve mais les teneurs en sels du fleuve restent toujours supérieures à la salinité de l'eau de mer (Figure 21).

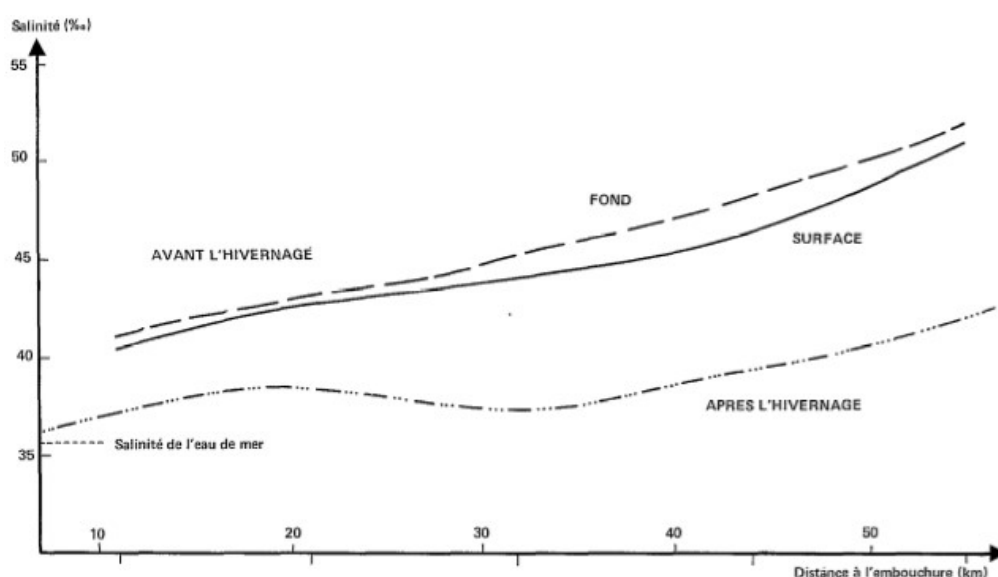


Figure 21: Évolution saisonnière de la salinité dans le fleuve Saloum en 1982 (Barousseau et al., 1986)

Néanmoins, Les travaux de Niang et al., (2010) ont mis en évidence l'importance de la pointe de Sangomar sur l'évolution du fleuve Saloum. En effet, la rupture de la pointe de Sangomar (1987) associée aux ondes de tempête (mouvements des houles de direction SW) suivie d'une entrée d'eau de mer a entraîné un dessalement des fonds du fleuve associé aux phénomènes de dilution (Bouaita et al., 2017) (Figure 22).

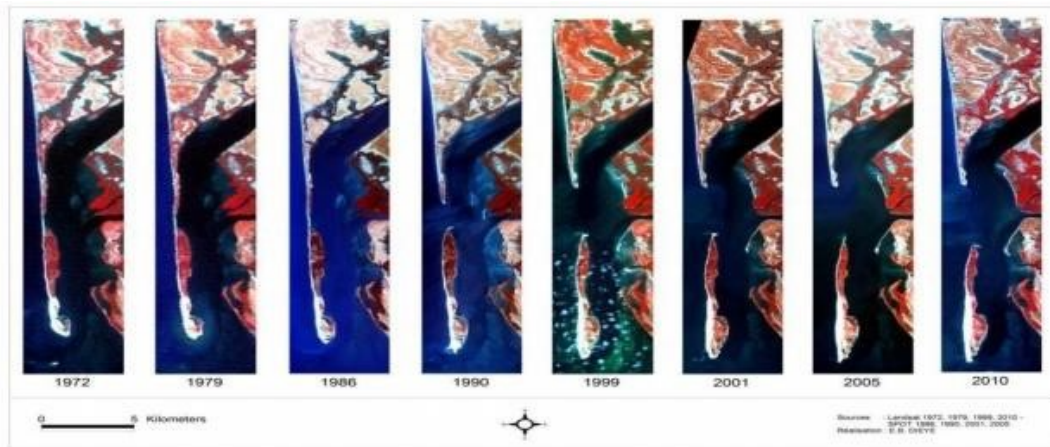


Figure 22: Illustration de l'évolution de la flèche de Sangomar de 1972 à 2010 (Dieye et al., 2013)

Aujourd'hui, l'estuaire du Saloum connaît une forte salinisation avec des teneurs dépassant en général 80 g/l en janvier et 120 g/l en mars et avril. La zone de transition eau douce/eau salée assurant l'équilibre hydrostatique est fortement menacée par l'avancée du biseau salée et l'exploitation de la nappe superficielle (CSE, 2015) (Figure 23).

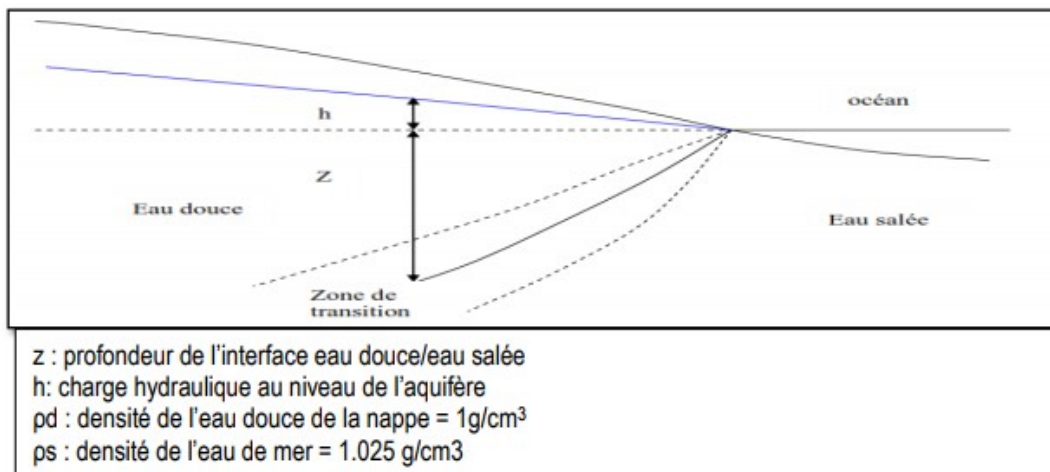


Figure 23: Illustration de limite eau de mer et eau douce (Faye, 2005)

4.2.2.2 État des ressources en eau souterraine

Dans le Saloum, l'approvisionnement en eau est essentiellement assuré par les eaux souterraines. Les deux grands aquifères les plus importants qui sont exploités sont les aquifères sableux du Maastrichtien et du Continental Terminal (CT).

4.2.2.2.1 Le continental terminal (CT)

Le CT est représenté dans le Saloum par des terrains allant de l'Oligo-Miocène au Pliocène et assure 95 % de l'apport en eau potable (AEP) de la population locale. La nappe s'alimente, par infiltration directe des eaux de pluie, mais se décharge considérablement, par évaporation au cours de la saison sèche. Diop et al. (2015) ont mis en évidence la relation d'échange entre "nappe-cours d'eau" dans le bassin de la Nema. En effet, un important rapport de drainage à flux réversible (le cours d'eau alimentant la nappe en période de crue et la drainant pendant l'étiage) est noté.

L'aquifère du CT est composé d'une alternance de sables et d'argiles parfois latéritiques qui repose sur un substratum argileux compact (identifiées par des résistivités d'ordre 10-30 ohms), ou de marnes et des calcaires (30-50 ohms) d'âge Éocène (Dieng, 2017). La morphologie du substratum est très variable (profondeur entre 35 et 105 m) et résulte de l'érosion des formations éocènes après la régression de la fin du Tertiaire. L'aquifère est libre dans toute la région ce qui le rend vulnérable à la variabilité climatique et aux actions anthropiques (Figure 26). Faye (2005) estime la recharge entre 13 et 54 mm/an avec la méthode du bilan hydrique. Dieng (2017) trouve une gamme de 17 et 100 mm/an avec la méthode du bilan des chlorures.

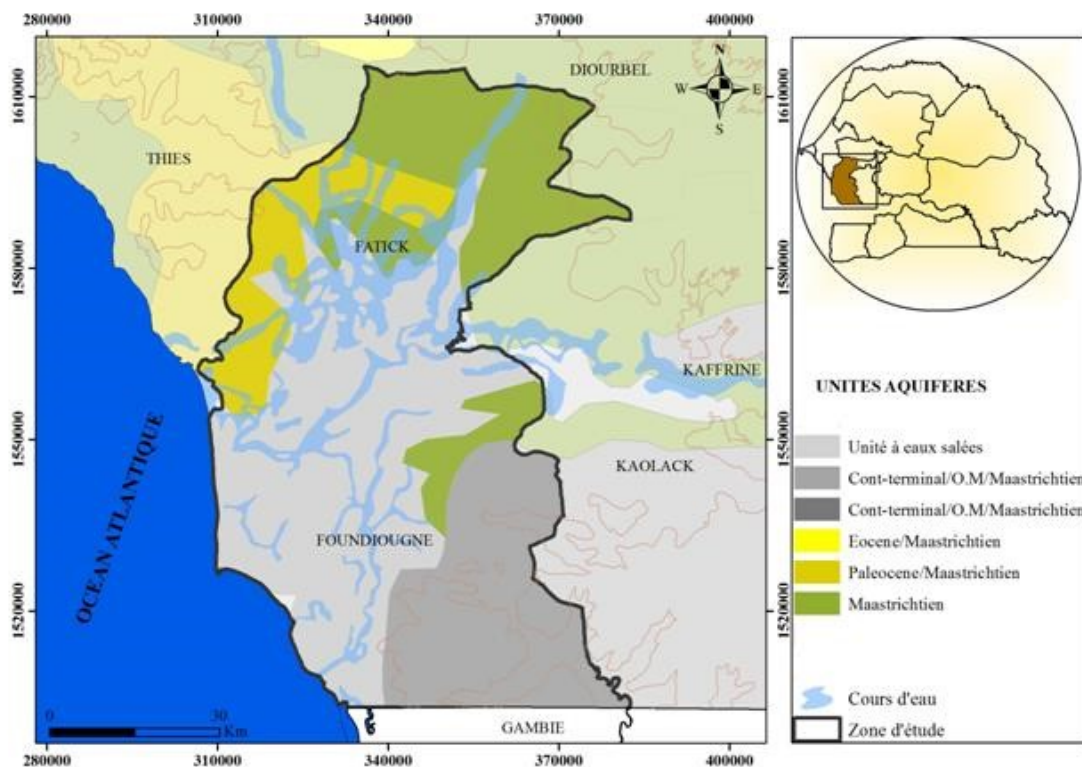


Figure 26: Systèmes aquifères dans le Saloum (Source : DGPRE)

Les faciès géochimiques de la nappe du CT sont de différents types : bicarbonaté sodique (Na-HCO₃), chloruré calcique (Ca-Cl), bicarbonaté calcique (Ca-HCO₃), chloruré sodique (Na-Cl) et sulfaté calcique (Ca-SO₄) (Dieng, 2017). Cette typologie révèle les processus géochimiques majeurs suivant l'écoulement naturel du système. La contamination saline est bien mise en évidence par les faibles valeurs de résistivités au Nord (30 ohms) (Figure 27).

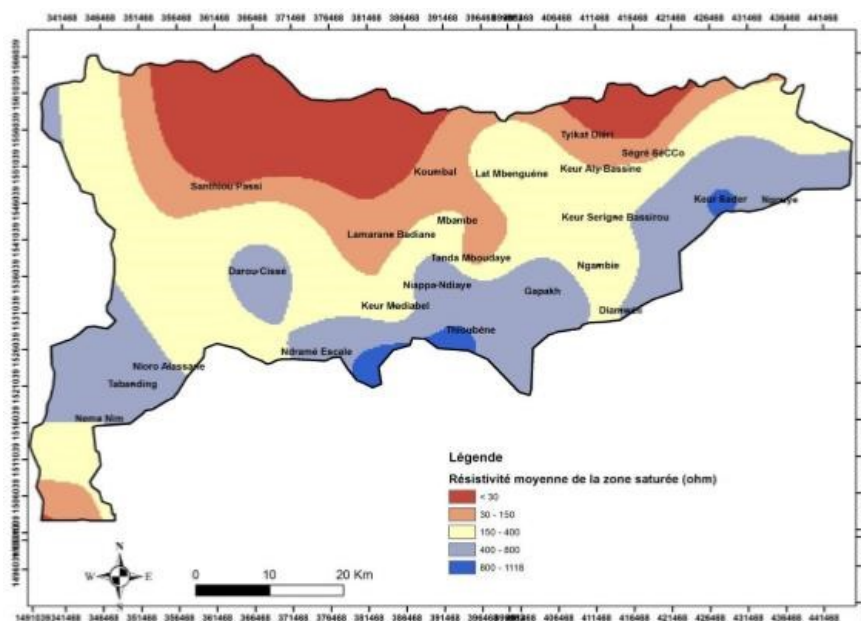


Figure 27: Résistivité moyenne de la zone saturée de la nappe CT dans le Saloum (Dieng, 2017)

Les effets successifs d'une baisse des précipitations jusqu'au années 1980, et d'une surexploitation des nappes croissante, expliquent les problèmes de qualité des ressources en eau ce qui rend le potentiel exploitable très limité (avancée du biseau salée, nitrates etc.) (Faye et al., 2016). Le système aquifère du CT est caractérisé par une variation du niveau piézométrique qui présente des altitudes proches du 0 IGN au niveau du fleuve et environ -5 m vers le Sud du fleuve (Figure 28). Au Nord, les eaux de surface salées du fleuve sont en contact direct avec la nappe superficielle contrairement au Sud où la contamination se fait de manière indirecte par percolation à travers la zone vadose (Dieng, 2017).

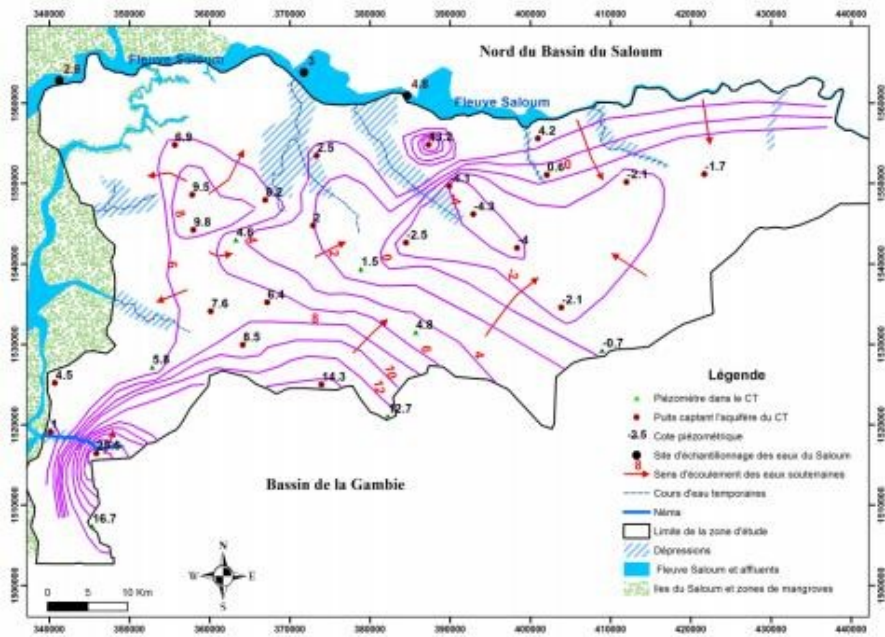


Figure 28: Piézométrie de la nappe du CT mesurée en Mai 2012 (Dieng, 2017)

De plus, la profondeur de l'eau du système aquifère du CT varie de 3 à 40 m par rapport au sol mettant en évidence la vulnérabilité de l'aquifère par endroit aux effets conjugués du climat et de l'homme (Benam, 2014). Dans le Saloum, le déficit d'écoulement des systèmes fluviaux, qui s'est accentué pendant la sécheresse des années 1970 et 1980, a conduit à une hyper salinisation des ressources en eau (Dieng, 2017) d'une part. D'autre part la forte exploitation de la nappe superficielle menace la qualité du système aquifère (Bah, 2017).

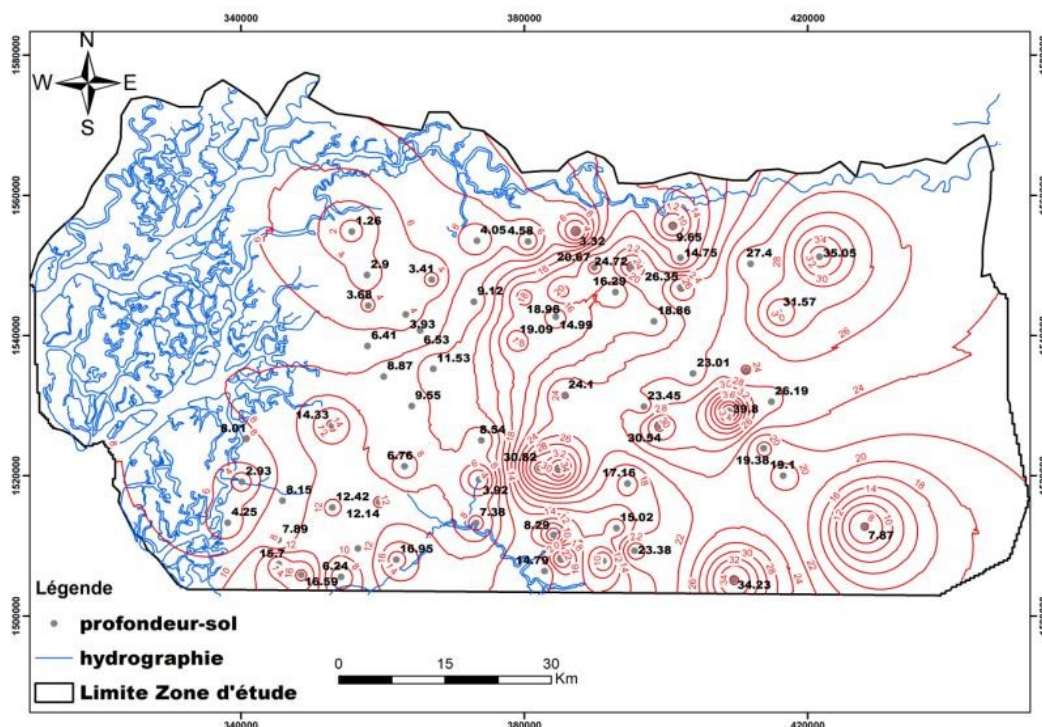


Figure 29 : Profondeur de la nappe du CT par rapport au sol en Novembre 2012 (Benam, 2014)

La nappe du CT est exploitée par le biais de forages et de puits villageois. D’après les enquêtes effectuées lors des travaux de Dieng (2017), il est apparu que ces forages fonctionnent le plus souvent pendant 2 à 8 heures de pompage par jour et débitent entre 30 et 700 m³/h, soit un débit moyen de 7000 m³/j. En dehors des forages, les puits sont exploités par les riverains environ 2 à 5 par village (Benam, 2014). L’exploitation de la nappe superficielle dans le Saloum remonte à des siècles par les hommes, cependant selon Dieng (2017) l’accroissement du nombre de puits villageois depuis les 1970 suite au croît démographique et à l’avènement des forages, la nappe a connu une forte sollicitation. En 2012, les prélèvements étaient estimés à 8 400 m³/j (Figure 30).

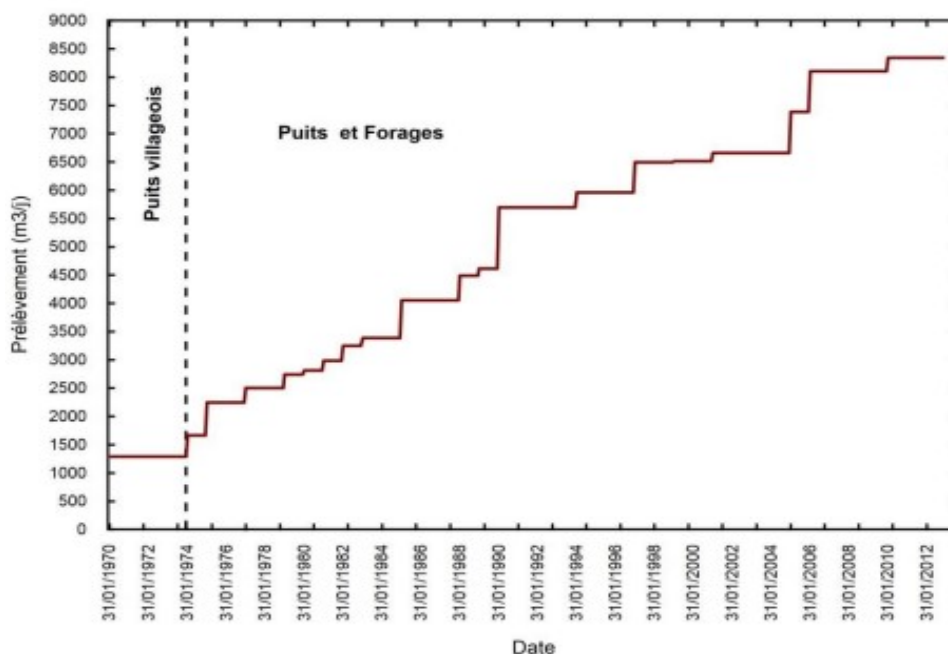


Figure 30: Évolution des prélèvements d’eau dans la nappe du CT au Saloum depuis 1970 (Dieng, 2017)

A l’Ouest dans les îles, on note une salinité des eaux dans les puits due à l’intrusion de l’eau de mer. Cependant, des poches de faible valeur de conductivité électrique (CE) sont localisées dans la zone notamment dans les villages de Mar Lodj, Moundé (400 µs/cm), Dionewar (160 µs/cm). L’existence de ces poches s’expliquerait par la géologie locale et/ou une dilution par infiltration (Pauld, 1967 ; Senghor, 2017) (Figure 31).

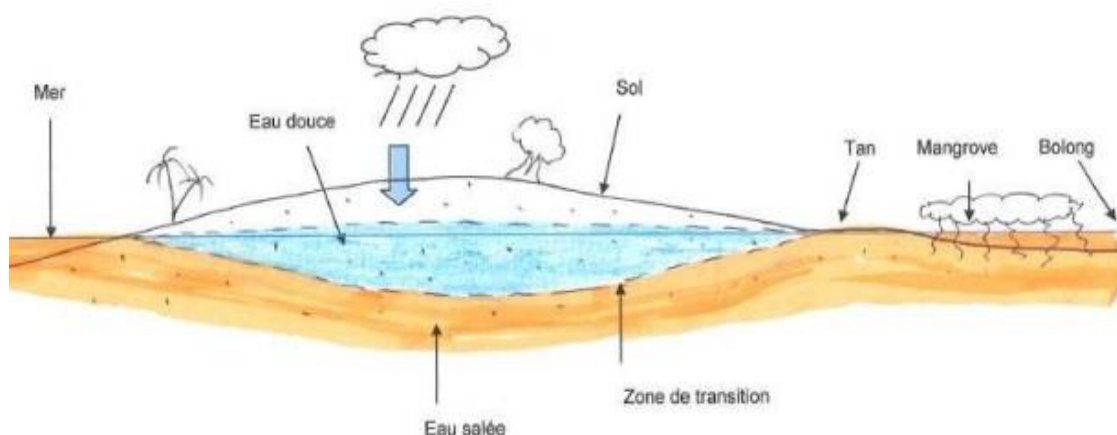


Figure 31: Schéma conceptuel d’un îlot d’eau douce (Senghor, 2017)

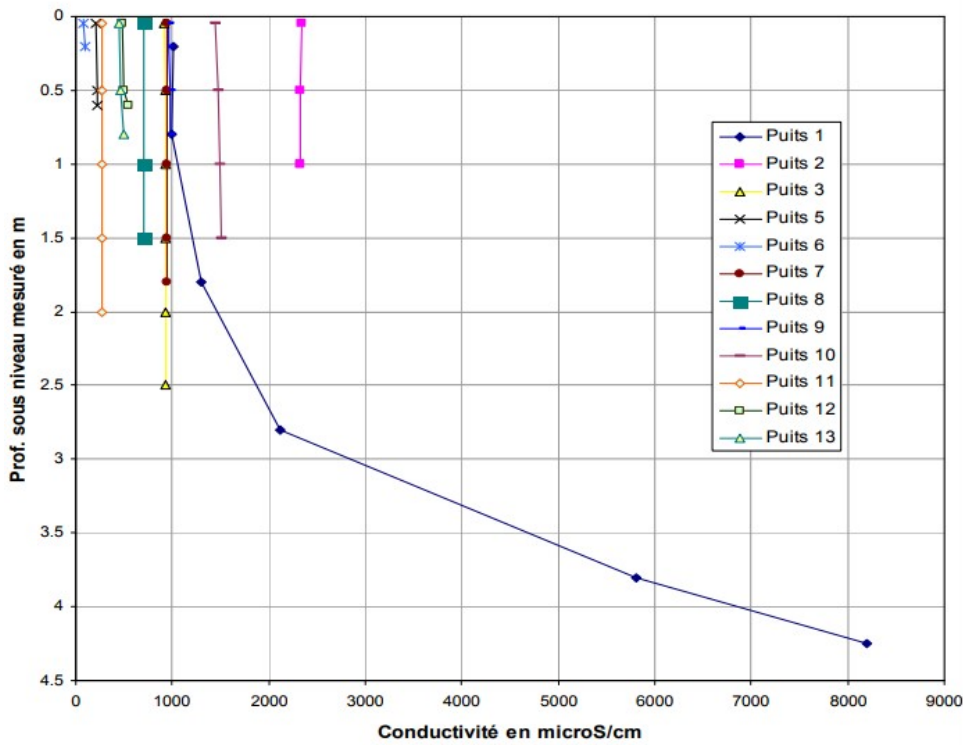


Figure 32: Conductivités électriques ($\mu\text{S}/\text{cm}$) des eaux par rapport aux profondeurs des puits dans les îles du Saloum (Senghor, 2017)

4.2.2.2.2 Le Maastrichtien

La nappe du Maastrichtien est exploitée par les forages. Les débits varient suivant la taille des populations desservies de l'ordre de $200 \text{ m}^3/\text{h}$ par forage (Faye et al. 2013). La qualité des eaux souterraines du Maastrichtien dans la zone s'est fortement altérée, l'eau est salée et/ou fluorée (Faye et al., 2014).

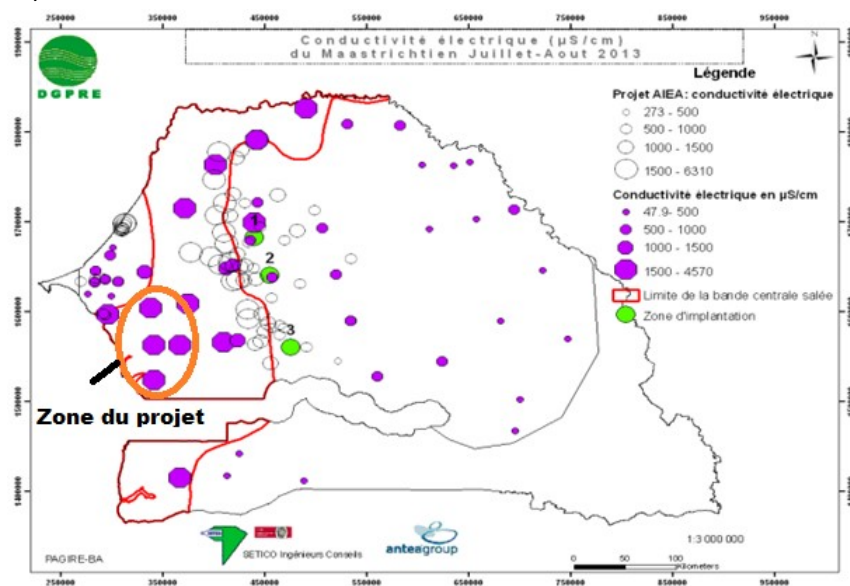


Figure 33: Conductivité électrique du Maastrichtien en Aout 2013 (Setico-antea. Rapport technique)

Les teneurs en fluorures de la nappe du Maastrichtien avoisinent 5 mg/l au nord de Fatick. Elles sont supérieures à la norme OMS (1.5 mg/l) dans les localités (Ouadiour, Niakhar, Patar sine, Ngonine et Diohine) (Bah, 2017), justifiant la présence de fluorose dentaire et osseuse (Sall et al., 2011, Gautam et al., 2011) (Figure 33).

En résumé, le principal enjeu dans la région de l'étude des ressources en eaux de surface concerne la salinité, notamment celle du fleuve Saloum, qui les rend impropres pour la boisson et pour le développement de certaines activités comme l'agriculture. Concernant les eaux souterraines, les nappes du Maastrichtien et du CT sont fortement sollicitées via des forages et puits villageois. Des contraintes touchent cependant ces ressources. D'une part, la nappe du Maastrichtien est caractérisée par une minéralisation (2946 mg/l) et des teneurs en fluorures très élevées, de l'ordre de 5 mg/l, qui limitent son utilisation pour la consommation courante. D'autre part, la nappe du Continental Terminal sur laquelle repose la majorité de la consommation en eau potable de la zone est un système dynamique superficiel qui subit directement l'influence de la salinité du fleuve, de la variabilité climatique et des effets anthropiques (en particulier de la surexploitation de la nappe). En effet, après les phases de sécheresse qu'a connues le Sénégal, le pays subit une forte variabilité climatique qui a des répercussions sur les ressources hydriques (Descroix et al, 2017). Dans le Saloum, la baisse de la pluviométrie dans les années 1970-1980, s'était traduite par un bilan négatif d'entrées et de sorties d'eau (Dieng, 2017) avec un glissement des isohyètes de 100 km vers le sud ; par conséquent la région était faiblement arrosée (500 à 800 mm de pluies par an). La recharge des nappes souterraines, notamment celle du Continental Terminal a été déficitaire durant cette période sèche; la reprise pluviométrique observée depuis les années 2000 s'est réalisée avec un retour à la variabilité interannuelle des années « moyennes » 1900-1950. Par conséquent, l'approvisionnement en eau potable de qualité dans la zone demeure très problématique. Une situation qui risque de s'exacerber avec l'élévation des températures, et, à moyen termes, le retour de périodes sèches comme prévu par les modèles après 2030.

4.2.2.3 Impacts des changements climatiques sur la ressource en eau

A ce jour, aucune étude des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau dans le delta du Saloum n'a été menée. Toutefois, le tableau 6 synthétise l'ensemble des travaux réalisés au Sénégal sur d'autres bassins versants (ressources en eau de surface). Sur neuf études réalisées entre 2009 et 2018, basées à la fois sur différents modèles climatiques et hydrologiques et différents scénarios d'émission de GES, six études prévoient une tendance à la baisse des ressources en eau de surface. Concernant les eaux souterraines, les recherches menées au Sénégal sur l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines sont très limitées.

Par ailleurs, l'augmentation des températures constitue un risque réel pour la disponibilité des ressources en eau. Leur élévation de 2°C sur l'ensemble du Sahel² va s'accompagner d'une forte évapotranspiration qui va affecter les ressources hydriques qui seront pour le cas du Saloum également touchées par une salinisation plus prononcée.

² www.climat-sous-surveillance.IRD.fr

Dans le contexte de la région de Fatick, l'approvisionnement en eau repose principalement sur les eaux souterraines, comme cela a été démontré plus haut. C'est pourquoi l'étude de vulnérabilité réalisée dans le cadre du PAS-PNA va s'attacher à évaluer l'impact des changements climatiques sur les eaux souterraines.

Tableau 6: Synthèse des travaux sur les impacts des changements climatiques sur les ressources en eau au Sénégal (réalisée par A. BODIAN, 2018)

Auteurs	Bassin	Modèle climatique	Type	Scénarios	Horizons	Modèle hydrologique	Pas de temps	Tendance globale
Ardoin <i>et al.</i> (2009)	Sénégal (Bakel)	HadCM3	GCM	A2 (AR3)	2020, 2050 et 2080	GR2M	Mensuel	Baisse
Ardoin <i>et al.</i> (2009)	Gambie (Gouloumbou)	HadCM3	GCM	A2 (AR3)	2020, 2050 et 2080	GR2M	Mensuel	Baisse
Bodian <i>et al.</i> (2013)	Sénégal (Sokotoro, Dakka Saidou, Bafing Makana)	CSMK3, HadCM3, MPEH5 et NCPCM	GCM	A2 (AR4)	2030, 2060 et 2090	GR2M	Mensuel	Baisse
Bodian <i>et al.</i> (2013)	Sénégal (Sokotoro)	CSMK3, HadCM3, MPEH5 et NCPCM	GCM	A2 (AR4)	2030, 2060 et 2090	GR2M	Mensuel	Légère augmentation
Bodian <i>et al.</i> (2016)	Casamance (Kolda)	CanESM2, ICHEC, HadGEM2_ES, MIROC5 et CNRM	GCM	rcp 4.5 et 8.5 (AR5)	2028	GR2M	Mensuel	Légère augmentation
Mbaye <i>et al.</i> (2015)	Sénégal (Bakel)	REMO	RCM	rcp 4.5 et 8.5 (AR5)	2085	Max-Planck Institute for Meteorology Hydrological Model	Journalier	Baisse
Tall <i>et al.</i> (2016)	Lac de Guiers	Multi modèle Ensemble	RCM	rcp 4.5 et 8.5 (AR5)	2050, 2090			
Bodian <i>et al.</i> (2018)	Sénégal (Bafing Makana)	CanESM2, CNRM, CSIRO, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES, et MIROC5	GCM	rcp 4.5 et 8.5 (AR5)	2050	GR4J	Journalier	Baisse
Bodian <i>et al.</i> (2018)	Gambie (Mako)	CanESM2, CNRM, CSIRO, HadGEM2-CC, HadGEM2-ES, et MIROC5	GCM	rcp 4.5 et 8.5 (AR5)	2050	GR4J	Journalier	Baisse

4.2.3 Secteur de la zone côtière

La zone côtière est un important système de ressources naturelles, qui fournit de l'espace, ainsi que des ressources vivantes et non vivantes pour les activités humaines, et ce depuis les premiers jours de la civilisation (Nguyen et al. 2016). Elle est actuellement le point focal dans de nombreuses économies nationales avec un grand nombre d'activités sociales et économiques concentrées sur le littoral et son importance va s'intensifier à l'avenir, en raison du nombre toujours croissant de personnes qui y vivent. Selon McGranahan et al. (2007, dans Wong et al., 2014), 600 millions de personnes, soit 10% de la population mondiale habiterait dans des zones côtières de faible élévation, et 65% des agglomérations de plus de cinq millions d'habitants y seraient localisées.

Au Sénégal, la zone côtière s'étend sur 700 km de long et joue un rôle central dans le développement du pays à différents niveaux : socio-économique, démographique, urbain et environnemental. Une grande partie de l'activité économique du pays se joue sur cet espace qui reçoit ainsi près de 90 % des industries, l'activité touristique qui est principalement balnéaire (4.8 % du PIB national, ANSD, 2013), et l'activité de pêche qui demeure très importante au Sénégal (1.2 % du PIB national, ANSD, 2013). Les activités économiques littorales constituent la principale source de revenus des communautés côtières et occupent une place fondamentale dans le tissu socio-économique national. Le littoral sénégalais contribue à hauteur de 68% du produit intérieur brut (PIB) du pays. Sur le plan démographique, 75% de la population sénégalaise (13.5 millions d'habitants en 2015) habite à moins de 60 km du rivage et 70% des fruits et légumes consommés à Dakar proviennent de l'agriculture littorale (CSE, 2010). Enfin, les principales villes du Sénégal se situent sur la façade océanique ou dans les estuaires (Saint Louis, Dakar, Mbour, Ziguinchor, Kaolack, etc.), ainsi 25% du linéaire côtier est urbanisé (2005-2010).

4.2.3.1 *Caractéristiques géomorphologie du littoral sénégalais*

Trois types de côtes sont observés au Sénégal :

- les côtes sableuses formant d'une part la Grande Côte ou Côte Nord, essentiellement constituée de dunes avec des dépressions d'amplitude variable marquées par une quasi-permanence de la nappe phréatique et caractéristiques des Niayes, et d'autre part la Petite Côte ou Côte Sud, se développent des plages à cordons littoraux soit isolant des marigots côtiers soit sont adossées à des dunes littorales semi-fixées.
- les côtes rocheuses limitées à la presqu'île du Cap-Vert et à quelques caps situés sur la Petite Côte ;
- les deltas et estuaires à mangroves dans la plupart des embouchures des grands fleuves comme le Sénégal et surtout le Sine-Saloum et la Casamance.

Le littoral du Sénégal est dominé par des sédiments meubles, dans une proportion de 92% pour 8% de côtes rocheuses (Diaw, 1997). Le budget sédimentaire des littoraux est relatif aux apports des cours d'eau en éléments détritiques, ainsi qu'aux sédiments provenant du littoral amont, notamment le littoral mauritanien. Ces matériaux sont pris en charge par la dérive littorale Nord-Sud résultant des houles du Nord-Ouest, même si les contributions éoliennes sont non négligeables. Par ailleurs, le transport sédimentaire littoral net est estimé à 558 000 m³/an sur la Grande Côte (Sadio et al. 2017) alors qu'il fluctue entre 10 000 et 25 000 m³/an (Barusseau, 1993) sur la Petite Côte. Le littoral du Sénégal n'échappe pas à la problématique de la vulnérabilité aux changements climatiques, suscitant des interrogations sur les stratégies d'adaptation développées en réponse.

4.2.3.2 *La zone côtière sénégalaise : une sensibilité particulière*

A l'instar des littoraux à l'échelle mondiale, le littoral du Sénégal est caractérisé depuis plusieurs décennies par une dégradation des ressources côtières et une perte croissante de ses territoires côtiers comme les plages, les vasières, les mangroves, etc. Ces dynamiques sont le résultat des effets combinés d'une géomorphologie fragile (côtes principalement sableuses de faible élévation), de phénomènes naturels (érosion côtière, submersion, salinisation des sols) et d'actions anthropiques (occupation anarchique du littoral, extraction du sable de plage, pollution marine et côtière).

Ces différentes problématiques cumulées ont des conséquences sur les ressources naturelles, la biodiversité, mais aussi sur les conditions de vie des populations, la sécurité des personnes et des biens, et plus largement sur l'ensemble du développement du pays. Elles posent les bases d'une vulnérabilité qui sera accrue par les impacts des changements climatiques. En effet, le littoral sénégalais est et sera particulièrement vulnérable aux impacts des changements climatiques que seront le renforcement de l'érosion, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes, l'élévation du niveau marin, la submersion, les inondations (PANA, 2006 ; Banque Mondiale, rapport EGIS 2013).

4.2.3.2.1 *L'érosion côtière*

Les espaces littoraux sont aujourd'hui particulièrement investis par l'homme, cette situation ajoutée à leur caractère mouvant les rend très sensibles au phénomène d'érosion. Ainsi, Bird (1987) et Nicholls (1998) avancent que près de 70% des littoraux sableux du monde connaissent une érosion, y compris les côtes à falaises qui subissent un recul du trait de côte. L'érosion côtière est surtout liée à une dynamique naturelle. Ainsi, d'après Paskoff (2001), les causes explicatives seraient davantage dues à un déficit du transit sédimentaire, à des conditions hydrométéorologiques variables (tempêtes, précipitations) et à une élévation du niveau de la mer. Toutefois l'action anthropique constitue aussi un facteur non négligeable avec l'importance des aménagements littoraux, la destruction des cordons dunaires, la déstabilisation du transit sédimentaire, etc. (Touré B. et al, 2012).

Au Sénégal, l'évolution actuelle des côtes montrent une forte tendance à l'érosion, qui est aujourd'hui très marquée avec la combinaison des facteurs naturels et humains. Dans un contexte de modification des paramètres climatiques, elle affecte presque toutes les grandes villes côtières du Sénégal, et se traduit par des destructions d'infrastructures et de bâtiments. Dans le PANA (2006), il est montré que les taux de recul de la ligne de rivage observés se situent en moyenne entre 1 et 2 m par an pour les plages sableuses. Ce taux est très important et des situations exceptionnelles ont été enregistrées avec par exemple l'ouverture de la brèche du Lagoba sur la flèche de Sangomar en 1987 (taux de 100 à 150 m par an) suite à un événement exceptionnel de tempête. En effet, cette structure sableuse qui s'étirait vers le sud sur une cinquantaine de kilomètres à partir de Djiffère jouait un rôle de protection pour les différents paysages de l'estuaire. Avec sa disparition, on observe une accentuation de l'érosion côtière, une diminution importante des plages, une perte grandissante des terres agricoles et un fort risque contamination des nappes phréatiques par l'avancée du biseau salé (Weissenberger *et al*, 2016).

Ainsi, dans le Saloum, le phénomène d'érosion reste très visible notamment dans les portions comprises entre Ndangane et Djiffère. Entre 1987 et 1992, on estimait que la nouvelle embouchure créée par la brèche de Sangomar s'accompagnait par une érosion de 20 m par an ainsi que d'un ensablement des chenaux d'accès à des villages situés dans le delta (DEEC, 2005). Ce recul du trait de côte indique la vulnérabilité de cette zone (CPDN, 2015), où des superficies des terres sont susceptibles d'être perdues à raison de 0,07 à 1,82 km² à horizon 2050 et 0,19 à 4,02 km² à horizon 2100 sur l'estuaire du Saloum (Dennis *et al*, 1995).



Figure 33 : Érosion des littoraux sableux depuis les années 1950 d'après les données bibliographiques (Source: I. Faye)

4.2.3.2.2 Sur la salinisation des eaux et des sols

L'estuaire du Saloum se caractérise par une invasion saline dans les sols et qui se traduit par la présence de sols sulfatés acides. Cette situation trouve sa cause première dans le déficit pluviométrique enregistré entre les années 1970 et 1980 qui a accéléré les premiers processus conduisant à la sursalure et à l'acidification des sols de ces milieux estuariens.

Aujourd'hui, près de 90 000 ha de terres dans l'estuaire du Saloum sont affectés par la salinisation (Sadio, 1991). Ce dernier atteste que cette dégradation chimique des sols a annihilé toute possibilité de mise en valeur de terres antérieurement rizicoles. Par ailleurs, on observe une progression du biseau salé vers l'intérieur des terres. Cependant, certains auteurs comme Sow (1992) affirment que la hausse du niveau océanique entraîne logiquement un dessalement relatif des estuaires et des mangroves et bolongs. Ce dessalement faciliterait l'entrée d'eau à une salinité de 35‰ dans des estuaires où la salinité dépasse localement 100 ‰ (valeurs courantes à Fatick, Kaolack, mais aussi autrefois en Casamance à Marsassoum, Diattacounda) avant la forte diminution observée depuis le début de la décennie 1990 et le retour des pluies.

Par ailleurs, la salinisation affecte les ressources en eau souterraines. Ainsi, le rapport Plan d'action national pour l'adaptation aux changements climatiques (2006) indique que le Sénégal est confronté à une invasion des nappes phréatiques par les eaux marines. En effet, la sécheresse a entraîné une baisse du niveau piézométrique et une avancée de l'intrusion saline (biseau salé), dans le cas du Saloum et de la Casamance, une baisse du niveau piézométrique de 10 à 15 m est notée au niveau des nappes phréatiques depuis 1968 (Malou, 1989) alors qu'elle est estimée entre 5 à 10 m dans la nappe du littoral nord. Ainsi, il apparaît que la nappe du continental terminal va connaître une baisse de son niveau en lien avec l'élévation des températures et l'accroissement des besoins humains sur la ressource ; et qu'il devrait subir aussi un renforcement de la pénétration du biseau salé dans les fleuves, avec infiltration de l'eau salée dans les nappes. Selon Diop (1986), le Saloum, présente des taux de salinités atteignant 130 ‰ au niveau des aquifères présents en dessous des tannes. Cependant, de manière générale, la plupart des villages des îles, sauf ceux de mangrove (notamment en Casamance), ont tous de l'eau douce en lentilles de petite taille qui sont très sensible à une forte exploitation.

4.2.3.2.3 Sur les écosystèmes et la biodiversité

Les menaces sur les écosystèmes marins et côtiers sont de plus en plus nombreuses. Les changements climatiques constituent un facteur additionnel de stress (Desanker, 2002), exacerbant la variabilité climatique, l'incidence des épisodes de sécheresse et des inondation, menaçant les lacs et les réserves d'eau douce du Sahel ainsi que les terres humides qui constituent d'importants réservoirs de biodiversité (UNEP, 2004b). Au Sénégal, certains écosystèmes (forêts de mangroves, zone des Niayes, zones humides côtières) sont particulièrement sensibles aux effets de la variabilité climatique à laquelle s'est ajoutée l'action anthropique.

Ainsi plusieurs anciennes zones humides, comme celles des vallées du Sine ou encore de la vallée du Ferlo ont, sous le poids des sècheresses, perdu leur qualité de zones humides pour devenir des vallées sèches ou mortes. Le rapport « *Évaluation de la vulnérabilité du secteur de la biodiversité au climat et de l'adaptation aux changements climatiques dans le cadre de la Contribution Déterminée au niveau National* » de la CDN (2017) suggère ainsi que

d'importantes menaces pèsent sur les forêts galeries dont les surfaces se réduisent considérablement comme dans le Delta du Saloum, au Ferlo, en Casamance et au Sénégal Oriental. Certaines sources estiment que cette réduction est liée à divers facteurs dont la conversion à des fins agricoles, la pollution, la coupe sauvage et donc de la non application des lois. Cette situation aussi concerne les forêts de mangroves qui sont victimes de la sécheresse et des fortes pressions anthropiques. Cette régression est estimée à 25% à Foundiougne et à Kaolack et à 8.5% au Nord-Ouest de l'estuaire (MEDD, 2010)

De plus, le rapport de la CDN (2017), souligne également le glissement généralisé des isohyètes du nord au sud, consécutif à la baisse de la pluviométrie, avec un glissement du même ordre du gradient de végétation associé. Cette situation s'illustre par un remplacement progressif des savanes boisées, des forêts claires et des forêts galeries par des savanes arbustives sur le Delta du Saloum, et une avancée progressive de la steppe à épineux dans la zone centre. Dans la zone maritime du Parc National du Delta du Saloum (PNDS), de Djiffère jusqu'à Djinack, la rupture de cordons dunaires rend vulnérable certains îlots de reproduction des oiseaux et des tortues marines.

L'incidence de la variabilité climatique sur la diversité biologique ne saurait être ignorée. Ainsi, une baisse du recouvrement et de la densité des ligneux, un appauvrissement de la biodiversité, une modification de la structure et de la composition floristique en sont les principales manifestations. Dans le Saloum, la forêt de Fathala est grandement menacée avec la présence d'une colonisation importante de la végétation par les espèces du genre *Combretum* qui sont indicatrices d'un appauvrissement du milieu. Dans le PNDS, les peuplements de *Rhizophora mangle* présentent une dynamique régressive au nord à cause de la forte salinité, de l'intensité de l'évaporation, des perturbations liées à la rupture de la flèche de Sangomar, alors que l'on constate dans la partie ouest de l'île Léba l'effet de l'érosion côtière sur les communautés végétales avec une forte mortalité de la population d'*Avicennia africana*. En effet, les sites mangroves sont particulièrement sensibles à la hausse du niveau marin et leur submersion entraîne très souvent une perte de biodiversité (OCDE, 2008).

Par ailleurs, les menaces sur la biodiversité s'observent également sur la faune. Le rapport « *Évaluation de la vulnérabilité du secteur de la biodiversité au climat et de l'adaptation aux changements climatiques* » produit dans le cadre de la Contribution Déterminée au niveau National (2017) estime qu'en plus de l'érosion côtière visible, une submersion progressive est notée au niveau de sites insulaires de reproduction (île aux Oiseaux du PNDS, île Ansoukala et île de Sangomar, Langue de Barbarie, Réserve Ornithologique de Kalissaye, etc), et souligne que sur les dix sites de nidification suivis le long des côtes sénégalaises, sept sont souvent inondés pendant la période de nidification, en raison d'une perte en superficie (Parc National de la Langue de Barbarie, Aire Marine Protégée de Joal, Réserve Naturelle Communautaire de Palmarin, PNDS, Réserve Naturelle de Popenguine, Aire Marine Protégée

d'Abéné, Réserve Ornithologique de Kalissaye), entraînant la détérioration des œufs et par conséquent un problème de renouvellement des populations de tortues.

En définitive, les aléas climatiques corrélés aux actions de l'homme ont largement entraîné des perturbations au niveau de la biodiversité la rendant de plus en plus fragile et donc sensible aux effets potentiels des changements climatiques.

4.2.3.3 Impacts des changements climatiques

La zone côtière est considérée comme étant l'une des zones les plus vulnérables aux impacts potentiels des changements climatiques, en particulier en raison de l'augmentation anticipée du niveau de la mer (WONG *et al.*, 2014). Cette menace est d'autant plus sérieuse pour les zones basses et densément peuplées (BINDOFF *et al.*, 2007 ; BIGANO *et al.*, 2008). Les travaux du GIEC (2014) prévoient une élévation du niveau de la mer de 28 à 98 cm d'ici à 2100.

4.2.3.3.1 L'élévation du niveau marin et ses impacts

Selon Nicholls et Toll (2006) la côte africaine est l'une des plus exposée aux risques d'inondation liés à l'élévation moyen du niveau de la mer. De manière plus spécifique, au Sénégal, différents travaux permettent d'apprécier l'évolution du niveau marin. En effet, le Sénégal a été précurseur des études en Afrique de l'Ouest, avec des données du marégraphe de Dakar qui sur 11 ans de mesure durant la période entre 1943 et 1965 permet de déceler une augmentation moyenne du niveau de la mer de 1,4 mm par an (ELOUARD *et al.*, 1977 ; EMERY et AUBREY, 1991). Sur base de cette élévation de 1,4 mm par an, le rapport du PANA (2006) affirme que les zones les plus vulnérables restent localisées notamment dans la région côtière de Ziguinchor, ou encore sur la petite côte. Toutefois, depuis le PANA, de récentes études indiquent une élévation du niveau marin à 3,5 mm/an.

D'ici 2080, du fait de l'élévation du niveau marin, 75% du littoral sera en risque d'érosion, contre 25% aujourd'hui (Banque Mondiale, 2013). Le risque de submersion marine en période de tempête est déjà très important car il concerne plus de 50% du littoral. Selon la Banque Mondiale (2013), la côte sénégalaise est très sensible à cet aléa, notamment les zones estuariennes et les littoraux sableux. Elle avance que pour une fréquence centennale la submersion marine peut toucher l'ensemble du littoral situé sous la côte de 1,5 m par rapport au niveau moyen des mers. Pour sa part, le rapport de la Troisième Communication Nationale du Sénégal à la convention cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques (2015) signale que l'exposition d'une multitude d'activités économiques, sociales, culturelles et d'écosystèmes accentue la vulnérabilité de certains établissements humains et sites côtiers confrontés à de fortes intrusions marines sous forme d'inondation et de raz de marée. Cette assertion est appuyée par Campillo *et al.* (2017) selon lesquels environ un cinquième du littoral du Sénégal est très vulnérable aux inondations. De plus, les recherches de Niang, *et al.* (2010) soulignent que l'élévation du niveau de la mer

augmentera les niveaux d'inondation. Ces auteurs signalent que l'inondation côtière pourrait être ainsi grave dans l'estuaire du Saloum en raison de sa faible altitude, affirmant qu'avec un niveau d'eau de 1 m minimum à horizon 2050, 27% de la superficie totale pourrait être inondée, ajoutant qu'avec un niveau d'inondation minimum de 2 m à horizon 2100, 52% des terres seront inondées. De plus, avec une élévation du niveau de la mer d'un mètre d'ici à 2100, potentiellement 6 000 km² de zones basses telles que les estuaires seraient exposés aux inondations côtières (GFDRR, 2011), ce qui pourrait entraîner la rupture des cordons dunaires et en conséquence des dégâts importants sur les terres agricoles.

Par ailleurs, selon Dennis, et al. (1995) et Niang-Diop, et al. (2000) l'évolution du niveau marin pourrait se traduire par une salinisation accrue des eaux de surface et des eaux souterraines, mettant ainsi en péril l'approvisionnement en eau des populations et du bétail mais aussi les activités économiques dont l'agriculture.

4.2.3.3.2 Les effets des changements climatiques en général sur la zone côtière

On sait également que les changements climatiques vont impacter :

- L'upwelling et donc potentiellement la ressource halieutique ;
- les houles et les vents et donc potentiellement renforcer l'érosion et dégrader les écosystèmes marins et côtiers ;
- la température des eaux océaniques et donc potentiellement la biodiversité marine et la distribution spatiale des ressources halieutiques ;
- l'acidification des océans qui devrait augmenter avec un potentiel impact sur la biodiversité et les écosystèmes côtiers en particulier les coquillages.

Concernant la biodiversité marine, certaines projections des effets du changement climatique sur l'organisation spatiale de la richesse spécifique de 1066 espèces de poissons et invertébrés marins montrent que l'espace maritime sénégalais sera parmi les plus impactés à l'horizon 2050. Ce changement est de plus en plus rapide et affecte la résilience de l'écosystème estuarien, en fragilisant son équilibre.

4.3 Options et stratégies d'adaptation par secteur

Cette partie pour objectif de faire l'état des lieux sur les options et stratégies d'adaptation déjà expérimentées ou proposées dans chacun des secteurs, en ayant en tête la définition de l'adaptation élaborée par le GIEC : « *ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'en exploiter des opportunités bénéfiques* ».

4.3.1 Agriculture

Dans le secteur de l'agriculture, les solutions d'adaptation préconisées s'inspirent des acquis en matière de technologie, que ce soit au plan national ou international. Elles tiennent également compte de la faisabilité et autant que possible de la rentabilité économique. Certaines de ces techniques sont des investissements à long terme qui doivent être nécessairement soutenus et subventionnés par les pouvoirs publics (MEDD, 2016). Dans le court terme, les stratégies d'adaptation s'articulent avec les programmes de lutte contre la sécheresse et la désertification menés au Sénégal depuis plusieurs années.

Parmi les technologies, la CDN agriculture met en évidence :

- la diversification des cultures,
- l'utilisation de variétés à cycle court,
- l'utilisation de variétés tolérantes à la salinité,
- la collecte et l'économie de l'eau (retenues collinaires, bassins de rétention, lutte contre l'érosion hydrique, l'érection d'ouvrages anti-sel, la mise en place de brise-vents),
- la diffusion de techniques de fertilisation raisonnée,
- la réorganisation des systèmes d'élevage,
- la mise en place d'un système d'alerte précoce en milieu rural,
- l'appui institutionnel et la formation des décideurs politiques sur les enjeux scientifiques des changements climatiques, pour renforcer leurs capacités d'analyse et d'anticipation et par voie de conséquence leur réactivité,
- la maîtrise de l'eau/promotion de l'irrigation locale,
- la promotion des technologies de Gestion Durable des Terres (GDT),
- la promotion de l'utilisation de l'information climatique,
- le renforcement de la recherche sur la carte variétale,
- l'amélioration de la disponibilité des aliments (cultures fourragères, utilisation des sous-produits agricoles),
- l'amélioration génétique des espèces,
- la promotion des espèces endogènes adaptées,
- la lutte contre les maladies émergentes,
- la promotion de l'assurance agricole/pastorale,
- la mise à l'échelle de la gestion concertée des ressources naturelles.

D'autres auteurs (Descroix, et al. 2015) proposent le développement de techniques permettant de faire infiltrer l'eau de pluie réserve très utile, ou de la concentrer pour développer des petits périmètres hydro-agricoles.

De plus, les activités de recherche devront être centrées sur :

- la lutte contre la désertification,
- l'amélioration de l'utilisation des eaux dans l'agriculture,
- une meilleure valorisation des eaux usées pour la production agricole,
- la sélection de variétés de plantes tolérant les conditions adverses du milieu,
- la mise au point d'itinéraires techniques adaptés (PANA, 2006)

Pour le long terme, le Sénégal, à l'instar de tous les pays, doit privilégier des activités moins génératrices de gaz à effet de serre. Dans le domaine agricole, cela doit se traduire par une promotion des sources de fertilisation organique qui peuvent réduire les besoins en engrais minéraux. La promotion de ces fertilisants organiques peut passer par des activités de séquestration du carbone qui permettront d'enrayer les phénomènes de dégradation des sols liés aux défrichements et aux pratiques inappropriées.

4.3.2 Ressources en eau

La variabilité climatique dans la région de Fatick est une réalité et ses impacts sur les ressources en eau durant les dernières décennies ont été démontrés à travers plusieurs études. Aujourd'hui, les enjeux majeurs de préservation de la qualité de l'eau dans la zone rurale reposent sur :

- les insuffisances liées aux solutions de traitement d'eau ;
- les insuffisances liées aux dispositifs de suivi et de protection de la qualité de l'eau et à l'état des connaissances sur la qualité des ressources en eau et
- les insuffisances liées au système de gouvernance de la qualité de l'eau.

L'état du Sénégal à travers le Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement a initié des mesures d'adaptation et de lutte contre les impacts de la variabilité climatique. A titre illustratif, des réseaux d'adduction pour l'accès à l'eau potable ont été mis en œuvre par l'état pour apporter des solutions dans les îles du Saloum :

- le projet d'adduction d'eau de Notto-Ndiosmone-Palmarin (NDP) qui a permis la réalisation d'un grand système de 585 bornes fontaines et 335 branchements privés de capacité 18 000 m³/j pour desservir 175 villages pour une population de 260 000 habitants ;
- la multiplication des points d'eau (par l'option multi-villages) à partir du PUDC ;
- la sensibilisation des usagers.

Par ailleurs, le projet d'étude hydrogéologique et hydrologique du CT Sine-Gambie a permis la réalisation de forages et de piézomètres pour le suivi régulier de la nappe dans la zone Sine-Gambie. En 2010, des projets d'études sur la gestion efficace des ressources en eau pour une résilience à un épisode de sécheresse prolongé ont été élaborés à travers le Plan Stratégique de Mobilisation des Ressources en Eau (PSMRE), notamment le projet d'étude des Sous Unités de Gestion et de Planification (UGP) de l'UGP du Sine-Saloum (Delta du Sine Saloum, Bas Saloum, Bassin du Sine, Bassin de la Gambie). Toutefois, ces projets sont actuellement toujours en attente de financement (Malou et Cissé, 2016). En parallèle, la DGPRE s'appuie sur les résultats des récentes études réalisées (PAGIRE-BA, Sine-Gambie) qui ont ciblé des zones potentielles d'exploitation pour un transfert afin de régler la problématique de la qualité des ressources en eau dans le Bassin Arachidier. Les études de faisabilité sont en cours de réalisation.

L'élaboration d'options ou stratégies d'adaptation aux changements climatiques est encore limitée dans le secteur des ressources en eau du fait du manque de connaissances scientifiques sur l'impact futur des changements climatiques sur ce secteur.

4.3.3 Zone Côtière

Les effets potentiels et/ou avérés des changements climatiques sur les systèmes littoraux (événements extrêmes, élévation croissante du niveau des mers, érosion et submersions marines accentuées, etc.) interrogent de plus en plus les vulnérabilités et les capacités d'adaptation de ces systèmes (Nicholson-Cole et O'Riordan, 2009 ; Wong et al., 2014).

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

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

de protection pourraient engendrer des impacts économiques ou environnementaux excessifs.

Ces options sont considérées au Sénégal. La SNMO par exemple envisage dès 1998 dans son plan de mise en œuvre d'action climatique la protection des zones côtières et le relogement des populations³.

Toutefois dans la pratique, les différentes sources documentaires consultées laissent apparaître diverses mesures d'adaptation mises en place par le gouvernement avec une prédominance pour les mesures de protection (Noblet, 2015). En effet, l'érosion étant un phénomène ancien au Sénégal, cela fait déjà plusieurs décennies que le gouvernement tente de contrer les impacts négatifs de ce phénomène naturel par des mesures de protections dites dures : digues, mur de protection, enrochement, brise-lames, champ d'épis, stabilisation des falaises. Les résultats de ces différentes mesures restent mitigés. En effet, ces ouvrages, outre leur coût élevé (environ 16 millions US\$ depuis 2010), ne permettront pas véritablement de réduire à long terme la vulnérabilité climatique des communautés côtières. D'autant que dans le cas du Sénégal, les côtes sont majoritairement basses et sableuses, les ouvrages en dur ont tendance à perturber le transit sédimentaire et renforcer la vulnérabilité des zones situées de part et d'autre. Par ailleurs, leur durée de vie est relativement courte (10-15 ans maximum). Cette approche réactive permet uniquement de gagner du temps, mais elle ne constitue pas une solution durable et résiliente. Plusieurs études (Schéma directeur d'Afrique de l'Ouest, 2011 ; Banque Mondiale, 2013 ; Bernatchez, P., and C. Fraser, 2012) ont montré également que les ouvrages de protection lourds ont pour effet de renforcer le phénomène d'érosion et d'amplifier à long terme la vulnérabilité des communautés. De plus, la majorité de ces ouvrages érigés il y a déjà plusieurs années ou décennies ne sont pas paramétrés pour faire face à l'impact réel des changements climatiques et par conséquent ne peuvent pas être considérés comme des options d'adaptation aux changements climatiques au sens strict. Par ailleurs, en termes de protection dites douce, plusieurs campagnes de reboisement ont été observées sur le littoral au cours des dernières décennies (mesures prises par le gouvernement et également par des ONG) ; mais aussi du rechargement artificiel de plage comme à Pilote Barre (il y a un également un projet de rechargement de plage en cours à Saly).

Concernant l'option du retrait, quelques mesures ont déjà été observées dans le passé, notamment des opérations de relogement des populations menacées ou affectées par l'érosion côtière à Palmarin Diakhanor dans les années 1987. Plus récemment, en 2015-2016, des habitants de plusieurs localités de Saint Louis touchés par des phénomènes d'érosion et de submersion marine (Doun Baba Dièye à Bountou Ndour, Diél Mbame, Mbambara, Guet Ndar et Goxxu Mbacc) ont été relogés dans des logements sociaux à

³ SNMO, p. 35

Bango/Ngallèle. Le lieu du relogement de ces populations est cependant considéré par certaines sources comme une zone inondable.

Pour finir, le gouvernement du Sénégal a récemment élaboré avec l'appui de l'Union Européenne sa Stratégie nationale de gestion intégrée des zones côtières (GIZC) qui intègre la dimension des changements climatiques et des mesures d'adaptation dans son plan d'action. Toutefois, cette stratégie est trop peu connue et sa mise en œuvre reste limitée du fait du manque de moyens dont dispose le MEDD.

5 Limites en termes de connaissances scientifiques

5.1 Secteur de l'agriculture

En matière d'évaluation de l'impact des changements climatiques sur le secteur agricole, la recherche au Sénégal s'est principalement focalisée sur la modélisation des impacts sur le rendement des principales spéculations à l'échelle du Sénégal. Mais aussi à des échelles plus localisées avec toutes les limites que comporte l'exercice de modélisation.

Dans le contexte actuel, le défi à relever ne réside donc pas tant dans l'estimation déterministe et vraisemblablement inatteignable de l'évolution future des rendements, mais dans la quantification, la hiérarchisation et la réduction des incertitudes associées aux projections des impacts des changements climatiques. Le cadre des nouveaux projets internationaux d'intercomparaison de méthodes de régionalisation (Cordex : Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) et d'intercomparaison des modèles agronomiques (AGMIP : Agricultural Model Intercomparaison and Improvement Project) marquera très certainement un tournant vers une meilleure prise en compte de cette incertitude à travers des études coordonnées dédiées aux impacts du climat sur l'agriculture qui étaient jusqu'alors menées de manière très isolée et fragmentée.

Cependant, il ne faut pas attendre plus de certitudes pour d'ores et déjà réfléchir à des mesures d'adaptation qui soient à la fois scientifiquement pertinentes et socialement acceptables, le climat d'aujourd'hui ayant déjà un impact sur les ressources des populations rurales. Et c'est aussi dans le domaine des options d'adaptation dans le secteur agricole que la recherche doit aussi se focaliser, avec par exemple, le renforcement des expérimentations sur les variétés plus résistantes au stress climatique ainsi que sur les expérimentations en agro-écologie.

5.2 Secteur des ressources en eau

Comme explicité plus haut, l'évaluation des impacts des changements climatiques sur les ressources en eau au Sénégal existe mais de manière assez inégale. Pour le moment, les

études disponibles concernent les eaux de surface et portent principalement sur le bassin versant du fleuve Sénégal. Cela s'explique par son importance considérable dans l'apport en eau potable pour la population du Sénégal. Concernant les eaux souterraines, les recherches sur l'impact des changements climatiques sur cette ressource sont très limitées alors que dans certaines régions, les eaux souterraines constituent la principale source d'eau potable comme c'est le cas dans le Delta du Saloum. Il est donc essentiel de renforcer la recherche dans ce domaine.

Dans un premier temps, il est nécessaire de disposer de données fiables et continues sur de longues périodes sur les variables clés des hydro-systèmes : pluie, débit, évapotranspiration, occupation du sol, pratiques agricoles (irrigation, efficacité), eau à usage domestique, à usage industriel et électrique. Pour cela, il faut entre autres réhabiliter le réseau d'observation (eau de surface et eau souterraine) de la DGPRE et renforcer la structure en moyens humains, matériels et financier.

Ensuite, des chaînes de modélisation intégrées des hydro-systèmes doivent être développées permettant de : (i) représenter le fonctionnement des hydrosystèmes et leur évolution; (ii) proposer des scénarios hydrologiques sous contrainte de changement climatique et d'évolution des usages de l'eau ; (iii) évaluer le niveau d'adéquation entre la disponibilité et la demande en eau à travers des indicateurs liés aux objectifs de planification ; (iv) tester des stratégies d'adaptation à travers une co-construction de scénarios avec les gestionnaires de bassin. Pour cela, il est nécessaire de disposer de données climatiques, notamment de projections climatiques à une résolution spatiale fine (CORDEX ou autre).

Concernant les eaux souterraines, l'impact des changements climatiques doit être évalué en regardant dans un premier temps comment la variabilité climatique a impacté la recharge des nappes et ensuite voir comment les modifications du climat pourront impacter la recharge des nappes.

Par ailleurs, sur les usages, il est essentiel de co-construire des scénarios d'évolution des usages de l'eau en fonction de l'évolution démographique et des besoins des différents secteurs d'activités (demande AEP, demande industrielle et énergétique, demande agricole, etc.). Pour cela, il faut commencer à documenter les consommations d'eau au niveau des différents hydro-système. Enfin, les extrêmes hydrologiques doivent être observés, afin de pouvoir évaluer leur évolution future à partir des simulations des écoulements futurs (lois GEV). De même, il est nécessaire d'évaluer l'intrusion marine avec le relèvement du niveau de la mer notamment en mettant un place un réseau de suivi du biseau salé.

Pour finir, des approches pluri/interdisciplinaires sont nécessaires pour prendre en compte l'ensemble des effets et surtout leurs interactions. Il est également indispensable de développer un dialogue entre les scientifiques, les organismes de bassin et les structures techniques (DGPRE, OLAC, etc.)

5.3 Secteur de la zone côtière

De nombreuses limites pèsent sur l'état des connaissances scientifiques sur la zone côtière sénégalaise en général et sur celle de la région de Fatick en particulier en rapport avec les changements climatiques. En effet, la compréhension des changements climatiques et de ses impacts se pose encore. Il est important de bien faire la distinction entre les effets de la variabilité climatique et ceux des changements climatiques mais aussi les effets des actions anthropiques qui sont une force motrice sur l'évolution du littoral.

C'est pourquoi il est nécessaire de renforcer la connaissance du système côtier sénégalais, en particulier d'effectuer des études hydro-sédimentaires et hydrodynamiques, des études topographiques et bathymétriques, et des études et un suivi des paramètres sédimentaires et météo-océaniques incluant une mise à jour des équipements (houlographe, marégraphe, etc.). Ces différentes études permettraient de caractériser l'impact de l'élévation du niveau marin et le risque de submersion marine dans un contexte de changements climatiques et de pouvoir mieux suivre les effets de l'érosion et les effets des changements climatiques.

Par ailleurs, le manque de maîtrise fait qu'il est actuellement très difficile de valider les modèles de projections portant sur la zone côtière. Sur ce point la synthèse du Diagnostic régional réalisée dans le cadre de l'« *Étude régionale du trait de côte et schéma directeur littoral de l'Afrique de l'ouest* » (2011) met en évidence la difficulté des modèles climatiques à modéliser correctement les températures de surface des océans. En effet, seuls 4 des 18 modèles présentent de manière assez correcte la variabilité interannuelle des températures de surface de la mer dans le Golfe de Guinée et la structure dipolaire des précipitations entre le Sahel et la côte Guinéenne.

Les lacunes mises en évidence ici peuvent influencer négativement les mesures et options d'adaptation qui seront prises et ainsi exacerber la vulnérabilité côtière.

6 Conclusion et recommandations

Les connaissances sur les tendances climatiques futures et leurs impacts se sont renforcées ces dernières années en Afrique. Toutefois, à une échelle régionale et voire plus localisée, la question de la fiabilité de cette information se pose. De nombreuses incertitudes demeurent sur la capacité à modéliser de manière précise les projections climatiques au Sahel du fait d'une part de la difficulté rencontrée par les modèles climatiques à représenter le climat sahélien et d'autre part de la faible disponibilité de séries continues de données climatiques de qualité.

Par ailleurs, l'une des limites dans la connaissance des changements climatiques et de leurs impacts est le manque de compréhension de la distinction entre la variabilité naturelle du climat, les effets des changements climatiques, et les effets anthropiques. Encore aujourd'hui, la distinction entre ces différents aspects n'est pas toujours évidente. Cette confusion est particulièrement vraie dans le secteur de la zone côtière au Sénégal où la vulnérabilité actuelle est fortement liée aux actions néfastes de l'homme sur le littoral. Il est pour le moment hasardeux de statuer sur les effets futurs des changements climatiques sur la zone côtière en particulier de l'impact de l'élévation du niveau marin par manque d'étude sur le sujet.

De plus, il faut noter que l'état des connaissances sur les changements climatiques au Sénégal, notamment dans la région de Fatick, montre qu'il y a peu d'avancées sur l'identification réelle des impacts et des risques climatiques encourus sur le moyen et long terme. Aussi, il est difficile de disposer d'études de chaînes d'impacts approfondies sur des secteurs stratégiques, comme ceux des ressources en eau et de l'agriculture.

Ainsi, afin d'assurer une bonne prise en charge de la question des changements climatiques notamment dans les politiques, il est indispensable d'améliorer le niveau de connaissances en prenant en compte les lacunes et limites discutées plus haut. A cette fin, il est indispensable d'investir dans la recherche. Davantage de moyens humains, financiers et techniques doivent être mis à la disposition des services scientifiques et climatiques appropriés. De plus, ces derniers doivent bénéficier de formations. Cette étape est d'autant plus importante et fondamentale que les systèmes actuels de surveillance et de suivi des questions climatiques ne sont pas robustes ni suffisamment outillés pour suivre les impacts des changements climatiques à tous les niveaux (national et local).

Il convient aussi de combler les lacunes relatives à la question de l'adaptation. L'adoption de mesures pertinentes d'adaptation permettrait de réduire la vulnérabilité des populations et l'ampleur des impacts sur les secteurs de développement. Aussi, il s'agit d'avancer d'une part sur l'évaluation et la gestion des risques climatiques qui peuvent avoir de lourdes répercussions socio-économiques, et d'autre part de tenir compte des conséquences intersectorielles afin de développer des initiatives concrètes sur le long terme.

Enfin, les connaissances scientifiques disponibles doivent être régulièrement discutées et actualisées, et fortement intégrées dans les différents documents de politiques et plans nationaux pour une prise en charge effective des changements climatiques.

7 Références

Adger N.W., Hughes T.P, Folke C, Carpenter S.R., Rockstrom J., (2005), "Social-ecological Resilience To Coastal Disasters". Science 309, 1036e 1039.

Andrieu, J. (2008), "Dynamique des paysages dans les régions septentrionales des Rivières-du-Sud (Sénégal, Gambie, Guinée-Bissau) ». Université Paris Diderot - Paris 7, Pp532.

Andrieu, J. (2018), « Changements de la couverture terrestre sur le littoral ouest-africain du delta du Saloum (Sénégal) à Rio Geba (Guinée-Bissau) entre 1979 et 2015 ». 314-325 pp.

ANSD (2015), « Banque de données des indicateurs sociaux du Sénégal ». Rapport final, Ministère de l'Économie et des Finances, 296p.

ANSD/SRSDF (2015). « Situation économique et sociale régionale ». Rapport définitif, 115p, Dakar.

ANSD (2014), « Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Élevage (RGPHAE) ». République du Sénégal, Ministère de l'Économie, des Finances et du Plan, Dakar.

ANSD. (2013), « Recensement Général de la Population de l'Habitat, de l'agriculture et de l'élevage (RGPHAE)». République du Sénégal, Ministère de l'Économie, des Finances et du Plan, Dakar, rapport définitif, 413p.

Ardoin, N. M. (2006), "Toward an Interdisciplinary Understanding of Place: Lessons for Environmental Education". Canadian Journal of Environmental Education (CJEE), 11(1), 112–126pp. Retrieved from <http://cjee.lakeheadu.ca/index.php/cjee/article/view/508>

Bader, J. C. (2015). « Monographie hydrologique du fleuve Sénégal De l'origine des mesures jusqu'en 2011 ». IRD Éditions, Marseille, 655p.

Bah, A. (2015). « Caractérisation hydrogéologique et hydrochimique de la nappe dans la zone Est de la Bande centrale salée du Maastrichtien (Sénégal) ». Mémoire de master, Université Cheikh Anta Diop de Dakar. 78p.

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. Université de Liège. Université Catholique de Louvain, 92p.

Balde, O., (2015), « Dynamisme des eaux sur les côtes sénégalaises ». Mémoire de Master, Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 33 p.

Bakhoum, P. W., (2013), « Vulnérabilité de l'île de Gorée à l'élévation du niveau de la mer ». Mémoire de Master 2, Institut des Sciences de l'Environnement, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 76 p

Baron, C., Sultan, B., Balme, M., Sarr, B., Traore, S., Lebel, T., Janicot S, Dingkuhn, M. (2005), "From GCM grid cell to agricultural plot: scale issues affecting modelling of climate impact" in Philosophical Transactions of the Royal Society B, Biological Sciences, 360(1463), 2095–2108. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1741>

Barousseau, J.P. Ba M., Diop S., (1993), « Rythmes pluriannuels d'évolution des lignes de rivage ». Livret-guide de la Réunion internationale PICG 274, Dakar, 11-13pp.

Barousseau, J., Bâ, D. M., & Diop, S. (1999), « L'environnement physique ». In: Rivières du sud Sociétés et Mangroves ouest-africaines, Cormier-Salem M.C., IRD Éditions, 33-62pp.

Barousseau, P., Diop, S., Giresse, P., Monteillct, & Sao. (1989), «Conséquences sédimentologiques de l'évolution climatique fini-Holocène dans le delta du Saloum ». Océanographie tropicale 21 (1), 89-98pp.

Barousseau, J. (1983), « Analyse sédimentologique des fonds marins de la petite côte, (Sénégal) ». Rapport du programme « Environnement côtier » ISRA-CRODT, 65-83pp.

Bazzaz, F. A., & Sombroek, W. G. (1996), « Global climate change and agricultural production: direct and indirect effects of changing hydrological, pedological and plant physiological processes". FAO, Rome, 66-80pp.

Bell, M. A., & Lamb, P. J. (2006), "Integration of weather system variability to multidecadal regional climate change: The West African Sudan-Sahel zone, 1951-1998". Journal of Climate, 19, 5343–5365pp.

Benam, E. (2014), « Analyse des processus géochimiques dans la zone non saturée de l'aquifère du Continental Terminal du Saloum ». Mémoire de master. Département de Géologie, Faculté des Sciences et des Techniques Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

Berg, A. (2011), « Représentation des cultures tropicales dans le modèle de surface continentale ORCHIDEE : apport à l'étude des interactions climat/agriculture ». Thèse de Doctorat, Université Paris VI- Pierre et Marie Curie, 187p.

Berg, A., De Noblet-Ducoudré, N., Sultan, B., Lengaigne, M., & Guimberteau, M. (2013), « Projections of climate change impacts on potential C4 crop productivity over tropical regions". Agricultural and Forest Meteorology, 170, 89–102pp

Bigano, A., Bosello, F., Roson, R., Tol, R.S.J., (2008), "Economy-wide impacts of climate change: a joint analysis for sea level rise and tourism". *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol.13, Issue 8, 765-791pp.

Bindoff, N.L., Willebrand, J., Artale, V., (2007), "Observations: oceanic climate change and sea level". In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: the Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, U.K and New York, 385-432pp.

Bodian, A., & Ansoumana. (2014), « Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest) ». *Physio-Géo*, Vol 8, 297–312pp.

Bouaita, Y., Descroix, L., Dacosta, H., Mendy, A., Thior, M., Ehemba, S., Sané, T. (2017), « Estuaires inverses, changement climatique et élévation du niveau océanique ».

Campillo, G., Mullan M. And Vallejo, L., (2017), « Climate Change Adaptation and Financial Protection: Synthesis of Key Findings from Colombia and Senegal,» *OECD Environment Working Papers*, N°120, 59p, OECD Publishing, Paris.

Centre de Suivi Écologique, (2015), « Rapport sur l'État de l'environnement au Sénégal. » Dakar.

Centre de Suivi Écologique, (2013), « Annuaire sur l'environnement et les ressources naturelles du Sénégal ». Dakar.

Centre de Suivi Écologique, (2012), « Caractérisation et analyse de la salinité des sols et des eaux dans les régions de Fatick et Kaolack », Dakar.

Challinor, A. J., Ewert, F., Arnold, S., Simelton, E., & Fraser, E. (2009), "Crops and climate change: Progress, trends, and challenges in simulating impacts and informing adaptation, *Journal of Experimental Botany*, Vol.60, 2775–2789pp.

Challinor, A. J., Wheeler, T. R., Craufurd, P. Q., Ferro, C. A. T., & Stephenson, D. B. (2007), "Adaptation of crops to climate change through genotypic responses to mean and extreme temperatures", *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 119(1–2), 190–204pp.

Church, J., Gregory, J., Huybrecht, S., Kuhn, M., Lambeck, K., Nhuan, M., Woodworth, P. (2001), *Changes in The Scientific Basis*, Cambridge University Press, pp. 639-693.

Conseil Régional de Fatick, (2011), “Les baies face au défi du changement climatique : quelles stratégies d’adaptation des acteurs locaux ». Actes du colloque de Toubaouta (Fatick), 196 p.

Dacosta, H., Kandia, K. Y., & Malou, R. (2002), « La variabilité spatio-temporelle des précipitations au Sénégal depuis un siècle ». IAHS Publication, 499–506pp.

Dacosta, H. (1989), « Variabilités des précipitations sur le bassin versant du Saloum ». Non publié.

Dai, A., Lamb, P. J., Trenberth, K. E., Hulme, M., Jones, P. D., & Xie, P. (2004), « The recent Sahel drought is real”. International Journal of Climatology, 24(11), 1323–1331pp.

Deme, A., Gaye, A.T., Hourdin, F. (2015), « Les projections du climat en Afrique de l’Ouest, Évidences et incertitudes ». in Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l’Ouest, Sultan B, Lalou R, Amadou Sanni M, Oumarou A et Soumaré M A eds., IRD Éditions, 61-87pp.

Descroix, L. Lalou, R., Bouaita Y., Diatte R., Ndiaye P.N., Dacosta H., Mendy A., Malou R., Senghor M.J., (2017). « Salinité et salinisation de la nappe phréatique du centre du bassin arachidier sénégalais ». Eau Société Climat, 22p.

Descroix, L., Diongue Niang, A., Panthou, G., Bodian, A., Sane, Y., Dacosta, H., Quantin, G. (2015). « Évolution récente de la pluviométrie en Afrique de l’Ouest à travers deux régions : La Ségambie et le bassin du Niger moyen ». Climatologie, 12, 25-43pp.

Descroix, L., Mahé, G., Lebel, T., Favreau, G., Galles, S., Gautier, E., Sighomnou, D. (2009). “Spatio-Temporal Variability of Hydrological Regimes Around the Boundaries between Sahelian and Sudanian Areas of West Africa: A Synthesis”. Journal of Hydrology, AMMA special issue, 375, 90-102.

Dia, I. M. (2003), “Élaboration et mise en œuvre d’un plan de gestion intégrée. La Réserve de biosphère du delta du Saloum, Sénégal », xiv, 130. UICN, Gland, Suisse et Cambridge, Royaume-Uni.

Diallo, I., Giorgi, F., Deme, A., Tall, M., Mariotti, L., & Gaye, A. T. (2016), « Projected changes of summer monsoon extremes and hydroclimatic regimes over West Africa for the twenty-first century”. Climate Dynamics, 47(12), 3931–3954.

Diallo, I., Sylla, M. B., Giorgi, F., Gaye, A. T., & Camara, M. (2012), « Multimodel GCM-RCM ensemble-based projections of temperature and precipitation over West Africa for the Early 21st Century”. International Journal of Geophysics, 2012.

Diara, M. (1999), « Formation et évolution fin Holocène et dynamique actuelle du Delta du Saloum-Gambie (Sénégal-Afrique de l'Ouest) ». Thèse de Doctorat ,Université de Perpignan, 161p.

Diaw, A.T., (1984), « Morphométrie du littoral sénégalais et gambien ». Notes Africaines, N° 183, Dakar, 58-63pp.

Diaw, A.T., (1997), « Evolution des milieux littoraux du Sénégal. Géomorphologie et Télédétection ». Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres, Université de Paris I- Panthéon - Sorbonne, Paris, 270 p.

Dieng, N. M., Orban, P., Otten, J., Stumpp, C., Faye, S., & Dassargues, A. (2017), “Temporal changes in groundwater quality of the Saloum coastal aquifer”. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, vol.9, 163–182pp.

Dieng, N. (2017), « Étude 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, Université de Liège, Belgique, 253p.

Dieng, N., Faye, S., Dinis, J., Gonçalves, M., & Caetano, M. (2014), « Combined uses of supervised classification and Normalized Difference Vegetation index techniques to monitor land degradation in the Saloum saline estuary system”. In *The Land/Ocean Interactions in the Coastal Zone of West and Central Africa, Estuaries of the World*, Diop S, Barousseau J.P. et Descamps C.

Dieng, N., Orban, P., Otten, J., Stumpp, C., Faye, S., & Dassargues, A. (2016), “Temporal changes in groundwater quality of the Saloum coastal aquifer”. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 9, 163-182pp.

Dieye, E., Diaw, A., Sané, T., & Ndour, N. (2013), “Dynamique de la mangrove de l'estuaire du Saloum (Sénégal) entre 1972 et 2010 ». *Cybergeo, European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage.

Dilley, M., Chen, R. S., Deichmann, U., Lener-Lam, A. L., Arnold, M., Agwe, J., Yetman, G. (2005), “Natural Disaster Hotspots A Global Risk Analysis”, World Bank. <https://doi.org/10.1080/01944360902967228>

Diluca, C. (1976), « Étude hydrogéologique du Continental terminal entre le Sine et la Gambie ». Rapport de synthèse. BRGM, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, , 33p.

Dingkuhn, M., Baron, C., Bonnal, V., Maraux, F., Sarr, B., Sultan, B., Forest, F. (2003), « Decision support tools for rainfed crops” in the Sahel at the plot and regional scales. Decision support tools for smallholder agriculture in Sub-Saharan Africa: a practical guide”. Struif Bontkes Tjark (ed.), Wopereis Marco (ed.). IFDC, CTA. Muscle Shoals: IFDC, 127-139. ISBN 0-88090-142-X

Diop, A. (2013), “Diagnostic des pratiques d’utilisation et quantification des pesticides dans la zone des Niayes (Sénégal)”, Université du Littoral Côte d’Opale. Paris

Diop, E. (1986), “Tropical holocene estuaries, Comparative study of the physical geography features of the rivers from the South of Saloum to the Mellcorée (Guinea Republic)”. Thèse de Doctorat Univ, Louis Pasteur, Strasbourg, France, 379p.

Diop, F. G., Raymond, M., Dacosta, H., & Mendy, A. (2015), “Contrainte climatique des nappes d’eau souterraine en zone Soudano-Sahélienne : Cas de la nappe phréatique du bassin de la Nema dans la région du Sine au Centre Ouest du Sénégal”. AJST, Vol. 3, N°1

Diop, M. (2013), « Étude hydro-chimique de la nappe maastrichtienne dans la zone centrale du bassin arachidier». Mémoire de Master. Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 88p.

Direction de l’Environnement et des Établissements Classés (DEEC), (2010), Deuxième communication nationale à la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques. Ministère de la Protection de la nature

Durand, P., Anselme, B. Et Thomas, Y-F., (2010), « L’impact de l’ouverture de la brèche dans la langue de Barbarie à Saint-Louis du Sénégal en 2003 : un changement de nature de l’aléa inondation ?», Cybergeog : European Journal of Geography [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 496p,

Easterling, W. E., Mearns, L. O., Hays, C. J., & Marx, D. (2001), “Comparison of agricultural impacts of climate change calculated from high and low resolution climate change scenarios: Part II. Accounting for adaptation and CO₂direct effects”. Climatic Change, 51(2), 173–197pp.

EGIS Eau, (2017). « Étude d’évaluation des impacts projetés du changement climatique sur des zones côtières d’aménagement touristique au Sénégal et stratégies d’adaptation et de résilience. Phase 2- Contextualisation de l’étude et évaluation, modélisation spatiale des aléas, vulnérabilités, risques et impacts projetés du changement climatique sur les zones touristiques ciblées », 77204 LECO, 478 p.

EGIS International, (2013). « Etude économique et spatiale de la vulnérabilité et de l’adaptation des zones côtières aux changements climatiques au Sénégal. Phase 2 – Analyse

spatiale de la vulnérabilité aux changements climatiques de la zone côtière du Sénégal ». GED00859R. 290 p.

Elouard P., Faure H., Hebrard L., (1977). "Variation du niveau de la mer au cours des 15000 dernières années autour de la presqu'île du Cap-Vert (Dakar- Sénégal) ». Bulletin de liaison, ASEQUA, n° 50, p. 29 - 49

Ewert, F., Rötter, R. P., Bindi, M., Webber, H., Trnka, M., Kersebaum, K. C., Asseng, S. (2014), "Crop modelling for integrated assessment of risk to food production from climate change. Environmental Modelling and Software", (72), 287–303pp.

Fall, A. (2014), "Le Ferlo sénégalais : Approche géographique de la vulnérabilité des anthroposystèmes sahéliens ». Thèse de doctorat, Université de Paris 13, 380p.

Faye, S., Dacosta, H., Ka, O., & Vaultier, J. (2016), « Études hydrogéologiques et hydrologiques complémentaires de la nappe du Continental Terminal de la zone Sine-Gambie ». Ministère de l'Hydraulique de et de l'Assainissement (DGPPE), Dakar, 123p.

Faye, G., (2016), « Impacts des modifications récentes des conditions climatiques et océanographiques dans l'estuaire du Saloum et ses régions de bordures (Sénégal) » Thèse de Doctorat, Spécialité Géomorphologie littorale, Université Cheikh Anta Diop De Dakar, 513p

Faye, S., Maloszewski, P., Trimborn, P., Stichler, W., & Gaye, C. (2014), « Apports des outils géochimiques et isotopiques à l'identification des sources de salinité et à l'évaluation du régime d'écoulement de la nappe du Saloum ». J. Science. Total. Environ.17.

Faye, S. (2005). « Apports des outils géochimiques et isotopiques à l'identification des sources de salinité et à l'évaluation du régime d'écoulement de la nappe du Saloum ». Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop De Dakar, 165p.

Faye, S., Cissé Faye, S., Ndoye, S., & Faye, A. (2003), « Hydrogeochemistry of the Saloum (Senegal) superficial coastal aquifer Environmental Geology. superficial coastal aquifer" Environmental Geology, 44: 127-136.pp

Feser, F., Rockel, B., von Storch, H., Winterfeldt, J., & Zahn, M. (2011), "Regional Climate Models Add Value to Global Model Data: A Review and Selected Examples". Bulletin of the American Meteorological Society, 92(9), 1181–1192pp. <https://doi.org/10.1175/2011BAMS3061.1>

Funk, C. C., Rowland, J., Adoum, A., Eilerts, G., Verdin, J., & White, L. (2012), "A climate trend analysis of Senegal". US Geological Survey.

Ndiaye G., Fang S., Mukete B., Wu Y., 2016), “Potentials of the Groundnut Sector towards Achieving Food Security in Senegal”l. Open Acces Library Journal, 3: e 2991

Gallée, H., Moufouma-Okia, W., Bechtold, P., Brasseur, O., Dupays, I., Marbaix, P., Lebel, T. (2004), “A high-resolution simulation of a West African rainy season using a regional climate model”. Journal of Geophysical Research., vol. 109, Issue 5, D05108.

Gautam, R., Yashoda, S., & Bhardwaj, N. (2011), “Dental fluorosis, a case study from Nawa tehsil in Nagaur district, Rajasthan (India)”. In. Malcuit, E., 2012. Origine de la minéralisation des eaux dans un aquifère multicouche profond. Thèse de doctorat, 456p.

Gaye, A. T., Lo, H. M., Sakho-Djimbira, S., Fall, M. S., & Ndiaye, I. (2015), « Sénégal : revue du contexte socioéconomique, politique et environnemental », IED-Afrique, 85p.

Gaye, A. T., & Sylla, M. B. (2008), « Scénarios climatiques au Sénégal ». Laboratoire de Physique de L’Atmosphère et de l’Océan SF (LPAO-SF), École Supérieure Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal

GIEC, (1990) “Report Of The Coastal Zone Management Subgroup, Strategies for adaptation to sea level rise, Intergovernmental” Panel On Climate Change Response Strategies Working Group November

GIEC. (2007). « Résumé à l’intention des décideurs du Groupe de travail II. In Bilan 2007 des changements climatiques: Impacts, adaptation et vulnérabilité ». Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d’évaluation. Rapport du Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat (Cambridge).

Guichard F., Kergoat L., Hourdin F., Léauthaud C., Barbier J., Mougin E., Diarra B., (2015), « Le réchauffement climatique observé depuis 1950 au Sahel ». in Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l’Ouest, Sultan B, Lalou R, Amadou Sanni M, Oumarou A et Soumaré M A eds., IRD Éditions, 23-42pp.

Gutmann, E. D., R. M. Rasmussen, C. Liu, K. Ikeda, D. J. Gochis, M. P. Clark, J. Dudhia, and G. Thompson, (2012), « A comparison of statistical and dynamical downscaling of winter precipitation over complex terrain ». Journal of Climate, vol **25**, 262–281pp.

Hansen, J. W. (2002). “Realizing the potential benefits of climate prediction to agriculture: Issues, approaches, challenges”. Agricultural Systems, 74(3), 309-330pp.

Herrera, E., Ouarda, T., & Bobée, B. (2006), « Méthodes de désagrégation appliquées aux modèles du climat global Atmosphère-Océan (MCGAO) ». *Revue Des Sciences de l'eau*, 19(4), 297-312pp.

Heuvelink, G. B. M. (1998), « Uncertainty analysis in environmental modelling under a change of spatial scale. Nutrient Cycling » in *Agro-ecosystems* 50, 255–264pp.

Hoogenboom, G., Wilkens, P. W., Thornton, P. K., Jones, J. W., Hunt, L. A., & Imamura, D. T. (1999), "Decision Support System for Agrotechnology Transfer v.3.5." In *DSSAT version 3 4*, 2–36pp. <https://doi.org/10.1007/978-94-017-3624-4>

Hourdin, F., Musat, I., Guichard, F., Ruti, P. M., Favot, F., Filiberti, M. A., ... Gallée, H. (2010), « Amma-Model intercomparison project. » *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(1), 95–104.

IPCC. (2014), "Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers". IPCC, 31.

Jones, C., Giorgi, F., & Asrar, G. (2011), "The Coordinated Regional Downscaling Experiment: CORDEX—an international downscaling" link to CMIP5. *CLIVAR Exchanges*, vol. 16, 34–39pp.

Jones, P. G., & Thornton, P. K. (2003), "The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055". *Global Environmental Change*, Elsevier, vol.13, Issue1, 51-59pp.

Kane, C., (2010), « Vulnérabilité du système socio-environnemental en domaine sahélien : l'exemple de l'estuaire du fleuve Sénégal. De la perception à la gestion des risques naturels ». Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, 318 p.

Keating, B. A., Carberry, P. S., Hammer, G. L., Probert, M. E., Robertson, M. J., Holzworth, D., Hochman, Z. (2003), "An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation". *European Journal of Agronomy*, 18 (3–4), 267–288pp.

Kosmowski, F., Lalou, R., Sultan, B., Ndiaye, O., Muller, B., Galle, S., & Séguis, L. (2015), « Observations et perceptions des changements climatiques: analyse comparée dans trois pays d'Afrique de l'Ouest ». in *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest*, Sultan B, Lalou R, Amadou Sanni M, Oumarou A et Soumaré M A eds., IRD Éditions, 89-110pp

LeBarbet L., Lebel, T., Tapsoba, D. (2002). « Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990 ». *Journal of climate*, 15(2), 187-202pp.

L'Hôte, Y., Mahé, G., Some, B., & Triboulet, J. P. (2002). « Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues ». *Hydrological Sciences Journal*, 47(4), 563–572pp.

Leroux, M. (1995). « La dynamique de la grande sécheresse sahélienne » *Revue de Géographie de Lyon*, 70(3), 223–232pp.

Lienou, G. (1996). « Relations écoulements de surface-écoulements souterraines dans le bassin de Néma : Sine Saloum ». Mémoire de DEA. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 91p.

Lobell, D. B., Burke, M. B., Tebaldi, C., Mastrandrea, M. D., Falcon, W. P., Naylor, R. L. (2008), "Prioritizing climate change adaptation needs for food security in 2030". *Science*, 319(5863), 607–610pp. <https://doi.org/10.1126/science.1152339>

Malou, R., & Cissé, B. (2016), « Études de vulnérabilité du secteur des ressources en eau dans le cadre : volet adaptation ». Rapport final, DGPRES, 26p. Dakar.

Malou, R., Dacosta, H., & Ndiaye, M. (1998), « Inventaires des zones humides du Saloum ». Rapport.

Marega, O. (2016), « Changements socio-environnementaux et évolution des pratiques agropastorales en Afrique sahélienne : étude comparée entre le Ferlo (Sénégal), le Gourma (Mali) et le Fakara (Niger) ». Thèse de doctorat, Université Paris 7, 687p

Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, (2016), « Contributions Déterminées au niveau National (CDN)- volet adaptation secteur de l'agriculture », République du Sénégal.

Ministère De L'environnement Et Du Développement Durable, (sans date). « Volet adaptation de la contribution déterminée au niveau national du Sénégal Adaptation au changement climatique, Contributions Déterminées au niveau National : La Gestion des Inondations », République du Sénégal Direction de l'Environnement et des Établissements Classés, 135 p

Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, (2015), « Troisième communication nationale du Sénégal à la convention cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques », République du Sénégal, 166p

Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (2015), Contribution prévue déterminée au niveau national au changement climatique, République du Sénégal 51 p.

Mikhailov, V., & Isupova, M. (2008), "Hypersalinization of river estuaries in West Africa". *Water Resources*, vol.35, 367–385pp.

Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature, (2006). « Plan d'action national pour l'adaptation aux changements climatiques », République du Sénégal, 61p.

Ministère de l'environnement et de la Protection de la Nature, (1999), « Stratégie Nationale de Mise en Œuvre (SNMO) de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques », République du Sénégal, 51p

Morice, C. P., J. J. Kennedy, N. A. Rayner, and P. D. Jones, (2012), "Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates: The HadCRUT4 data set". *Journal of Geophysical research*, vol.117, 22p

Moron, V., Robertson, A. W., Ward, M. N., Moron, V., Robertson, A. W., & Ward, M. N. (2006), "Seasonal Predictability and Spatial Coherence of Rainfall Characteristics in the Tropical Setting of Senegal". *Monthly Weather Review*, 134(11), 3248–3262pp.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., Wilbanks, T. J. (2010). "The next generation of scenarios for climate change" *Research and Assessment. Nature*. <https://doi.org/10.1038/nature08823>

Muller, B., Lalou, R., Kouakou, P., Soumaré, M. A., Bourgoïn, J., Dorégo, S., & Sine, B. (2015), « Le retour du mil sanio dans le Sine : une adaptation raisonnée à l'évolution climatique », in *Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest*, Sultan B, Lalou R, Amadou Sanni M, Oumarou A et Soumaré M A eds., IRD Éditions, 377-401pp

Müller, C., Cramer, W., Hare, W. L., & Lotze-Campen, H. (2011), "Climate change risks for African agriculture". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108(11), 4313–4315pp.

Ndiaye, G., Fang, B. S., & Wu, Y. (2016), "Potentials of the Groundnut Sector towards Achieving Food Security in Senegal". *Open Access Library Journal* Vol.03 N°.09, 13p

Ndong, J.-B. (1995), « L'évolution de la pluviométrie au Sénégal et les incidences de la sécheresse récente sur l'environnement », *Revue de Géographie de Lyon*, 70(3), 193–198pp.

Nguyen, T.T.X., Bonetti, J., Rogers, K, Woodroffe, C.D., (2016), « Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices." *Ocean & Coastal Management* 123 18-43pp

Niang A., (2013), « Vulnérabilité de l'environnement et des ressources en eau dans l'estuaire du Sénégal : dynamique et impacts de la brèche de la Langue de Barbarie entre 2003 et 2013 ». Thèse de Doctorat d'Hydrologie Continentale, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 287p

Niang, I., Dansokho, M., Faye, S., Gueye, K., & Ndiaye, P. (2010), « Impacts of climate change on the Senegalese coastal zones: Examples of the Cap-Vert peninsula and Saloum estuary". *Global and Planetary Change* 72 (2010), 294–301pp.

Nicholson, E. (2000), "The nature of rainfall variability over Africa on timescales of decades to millennia.", *Global and planetary change*, 26(1), 137-158pp.

Nicholson, S. (2013), "The West African Sahel: A review of recent studies on the rainfall regime and its interannual variability." Hindawi Publishing Corporation ISRN Meteorology, vol. 2013, Article ID 453521, 32 p, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/453521>.

Nikulin, G., Jones, C., Giorgi, F., Asrar, G., Büchner, M., Cerezo-Mota, R., Sushama, L. (2012), "Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations". *Journal of Climate*, 25(18), 6057–6078pp.

Panassa, E. (2012), "Évaluation de la variabilité et des changements du cycle de l'eau en Atlantique tropical et Afrique de l'Ouest dans les modèles climatiques du GIEC ». ICMIPA Publishing.

Pitman, A. J., Noblet-Ducoudré, N., Cruz, F. T., Davin, E. L., Bonan, G. B., Brovkin, V., Strengers, B. J. (2009), « Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparaison study". *Geophysical Research Letters*, vol 36, Issue 14.

Pauld, M. (1967), « Les lentilles d'eau douces des îles de Saloum », Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Université Cheikh Anta Diop de Dakar

Randall, D. A., & Wood, R. A. (2007), "Climate models and their evaluation. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*", 590–662pp. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.06.045>.

Raynaut, C. (1997), « Sahels : diversité et dynamiques des relations sociétés-nature ». Éditions Karthala, Paris. 432p.

République du Sénégal, (2013), « Etablissement de la stratégie nationale de gestion intégrée des zones côtières, » Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, Union Européenne, 81p

République du Sénégal, (2001), « Plan régional de développement intégré de la région de Fatick (PRDI, 2013-2018) », Conseil Régional de Fatick, 122p

Roehrig, R., Bouniol, D., Guichard, F., Hourdin, F., & Redelsperger, J. (2013), «The present and future of the West African monsoon: a process-oriented assessment of cmip5 simulations along the AMMA transect ». *Journal of Climate*. Doi : 10.1175/JCLI-D-12-00505.1.

Roudier, P., Sultan, B., Quirion, P., & Berg, A. (2011), « The impact of future climate change on West African crop yields: What does the recent literature say? » *Global Environmental Change*, vol 21, issue 3, 1073–1083pp. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.007>

Sadio, M., Anthony, E.J., Diaw, A.T., Dussouillez, P., Fleury, J.T., Kane, A., Almar, R. And Kestenare, E., (2017). “Shoreline changes on the wave-influenced Senegal River delta, West Africa: the roles of natural processes and human interventions”. *Water*, vol 9 (357), 17 p, doi:10.3390/w9050357

Sagna, P., Ndiaye, O., Diop, C., Niang, A. D., & Sambou, P. C. (2016), “Les variations récentes du climat constatées au Sénégal sont-elles en phase avec les descriptions données par les scénarios du GIEC ? », *Irevues.Inist.fr : Pollution-Atmosphérique, Climat, Santé, Société* N°227.

Salack S., Klein C., Giannini A., Sarr B., Worou O.N., Belko N., Bliefernicht J., Kunstman H. (2016) « Global warming induced hybrid rainy seasons in the Sahel. » *Environmental Research Letter* vol.11 N°10, 11p

Salack, S., Sarr, B., Sangare, S. K., Ly, M., Sanda, I. S., & Kunstmann, H. (2015), « Crop-climate ensemble scenarios to improve risk assessment and resilience in the semi-arid regions of West Africa ». *Climate Research*, N° 65, 107-121pp.

Salack, S., Muller, B., Gaye, A. T., Hourdin, F., & Cisse, N. (2012), „Analyses multi-échelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal. » *Science et Changements Planétaires, revue Sécheresse*, vol 23 N°1, 3–13pp. <https://doi.org/10.1684/sec.2012.0335>

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, Ministère de l’Hydraulique et de l’Assainissement- DGPRES, 95p.

Sambou, P. C. (2015), « Évolution climatique récente, impacts et stratégies d’adaptation des populations dans les arrondissements de Sakal et de Ndande, dans la région de Louga », Thèse de doctorat, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 390p.

Sarr, A.B., Camara M., (2017), « Evolution des indices pluviométriques extrêmes par l'analyse de modèles climatiques régionaux du programme CORDEX: les projections climatiques sur le Sénégal », *European Scientific Journal*, vol.13, N°17, 206-222pp

Sarr, M. A. (2008), « Variabilité pluviométrique en Afrique de l'ouest : dynamique des espaces végétaux à partir des images satellitales. Exemple Du Bassin Versant Du Ferlo (Sénégal) ». *Journées de Climatologie–Nantes-Climat et Société: Climat et Végétation*, 57-76pp.

Sene, S., & Ozer, P. (2002). « Évolution Pluviométrique et relation inondations-événements pluvieux au Sénégal ». *Bulletin de La Société Géographique de Liège*, 42, 27–33pp.

Song, Z., Qiao, F., Song, Y. (2012), “Response of the equatorial basin-wide SST to non-breaking surface wave-induced mixing in a climate model: An amendment to tropical bias”. *Journal of Geophysical Research*, vol.117, Issue C11, 8p; C00J26, doi: 10.1029/2012JC007931.

Sultan, B., Lalou, R., Sanni M.A., Oumarou, A., Soumaré M.A, (2015), “Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l’Ouest. », IRD Éditions, Collection Synthèses, 464p

Sultan, B., Guan, K., Kouressy, M., Biasutti, M., Piani, C., Hammer, G. L., Lobell, D. B. (2014), “Robust features of future climate change impacts on sorghum yields in West Africa”. *Environmental Research Letters*, vol.9, N°10.

Sultan, B., Janicot, S., Baron, C., Dingkuhn, M., Muller, B., Traoré, S., & Sarr, B. (2008), “Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l’Ouest : une illustration des problèmes majeurs », *Revue Sécheresse*, vol.19, N°1, 29–37pp.

Sy, S. (2016), « Impact du changement d’occupation des sols passé et à venir sur la dynamique de la circulation de la mousson ouest africaine ». Thèse de doctorat, Université Paris VI- Pierre et Marie Curie. 181p.

Sylla, M. B., Coppola, E., Mariotti, L., Giorgi, F., Ruti, P. M., Dell’Aquila, A., & Bi, X. (2010), « Multiyear simulation of the African climate using a regional climate model (RegCM3) with the high resolution ERA-interim reanalysis”. *Climate Dynamics*, vol.35, N°1, 231–247pp.

Sylla, M. B., Gaye, A. T., Jenkins, G. S., Pal, J. S., & Giorgi, F. (2010), “Consistency of projected drought over the Sahel with changes in the monsoon circulation and extremes in regional climate model projections”. *Journal of Geophysical Research/ Atmospheres*, vol.115, Issue D16, 9p.

Sylla, M. B., Giorgi, F., Pal, J. S., Gibba, P., Kebe, I., & Nikiema, M. (2015), "Projected changes in the annual cycle of high-intensity precipitation events over West Africa for the late twenty-first century". *Journal of Climate*, vol.28, N°16, 6475-6488pp.

Travi, Y. (1983), « Hydrogéologie et hydrochimie des aquifères du Sénégal. Hydrogéochimie du fluor dans les eaux souterraines ». *Sciences géologiques, Bulletins et Mémoires N°95* 155p.

Tsvetsinskaya, E. A., Mearns, L. O., Mavromatis, T., Gao, W., McDaniel, L., Downton, M. W. (2003), « The effect of spatial scale of climatic change scenarios on simulated maize, winter wheat, and rice production in the Southeastern United States." *Climatic Change*, vol.60, Issue 1–2, 37-71p.

UEOMOA, (2010), « Etude du suivi du trait de côte et schéma directeur du littoral de l'Afrique de l'Ouest, 5B Diagnostic national du Sénégal » Direction de l'Aménagement du Territoire, 140 p.

UNFCCC (2009), « Matériels de formation GCE pour l'évaluation de la vulnérabilité et l'adaptation ; Chap.2 : Planification et sélection des cadre de vulnérabilité et de mesures d'adaptation », 26p.

Wilks, D. S., & Wilby, R. L. (1999). "The weather generation game: a review of stochastic weather models". *Progress in Physical Geography*, vol.23, N°3, 329–357pp.

Wong, P.P., Losada, I.J., Gattuso, J.-P., Hinkel, J., Khattabi, A., McInnes, K.L., Saito, Y., Sallenger, A., (2014), "Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, 361-409pp.

Xue, Y., e Sales, F., Lau, W. K. M., Boone, A., Feng, J., Dirmeyer, P., Wu, M. L. C. (2010), "Intercomparison and analyses of the climatology of the West African Monsoon in the West African Monsoon Modeling and Evaluation project (WAMME) first model intercomparison experiment". *Climate Dynamics*, vol.35, Issue 1, 3–27pp. <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0778-2>

Yates - Michelin, M. Et Bulteau, T., (2011), « Cecile : D 1.1-L'évolution pluri-décennale du trait de côte : synthèse bibliographique ». Rapport final, BRGM RP/50061-FR, 104 p.

Zorita, E., von Storch, H. (1999), "The analog method as a simple statistical downscaling technique: Comparison with more complicated methods". *Journal of Climate*, vol.12, Issue 8 (PART2), 2474-2489pp.

PARTENAIRES



Climate Analytics gGmbH

Ritterstr. 3
10969 Berlin
Germany

T / +49 302 5922 9520
E / 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

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

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 :



En coopération avec :

CLIMATE
ANALYTICS

