

# Université Assane Seck de Ziguinchor



UFR Sciences et Technologies

Département de physique

**Mémoire de Master**

Mention: Physique et Applications

Spécialité: Sciences de l'Atmosphère et de l'Océan

## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

Présenté par :

**Assane NDIAYE**

Encadrant: **Dr Mamadou Lamine MBAYE**

Co-encadrant: **Dr Ibrahima CAMARA**

Sous la supervision de **Dr Bamol Ali SOW**, Maitre de Conférences

Soutenu publiquement le 20/06/2020/ devant le jury composé de:

Qualité du jury	Nom et Prénom(s)	Grade	Établissement
Président	SOW Bamol Ali	Maitre de conférences	UASZ/UFRST
Rapporteur	SANE Youssouph	Chercheur	ANACIM
Examineur	THIAME Moustapha	Maitre-Assistant	UASZ/UFRST
Examineur	SARR Alioune Badara	Post-Doctorant	UASZ/UFRST
Co-Encadrant	CAMARA Ibrahima	Chercheur	UCAD/ESP
Encadrant	MBAYE Mamadou Lamine	Maitre-Assistant	UASZ/UFRST



Dédicaces

Je rends grâce à Allah, le Clément, le Miséricordieux pour m'avoir accordé la santé et la force nécessaire pour accomplir ce travail.

Je dédie ce travail, à toute ma famille. Particulièrement :

À mon feu père **Abdoulaye Ndiaye**

À mon feu frère **Tamba Ndiaye**

À mon feu frère **Cheikh Loum**

À ma maman **Diabou Diame**

À mes frères: **Mbaye Loum, Cherif, Ismaila, Ousseynou, Babacar, Birame, Ousmane ndiaye, Momodou**

À mes soeurs: **Ami Aidara, khady Loum, Adji sira Ndiaye, Diarra et Penda Ndiaye**

À mes **Amis: Kor Faye, Alassane Cissé, Demba Cissé, Cheikh Diouf**

À mes nièces et neveux **Fatou bintou Sow, Niambou Ndiaye, khadim Ndiaye, Samba Ndiaye, Amath, Fatou Wade, Adama et Awa Ba**

À mes ami (e) s, mes camarades de promotion, mes «anciens», mes professeurs et à tous les étudiants et étudiantes de Sao

### Remerciements

Je remercie le bon Dieu de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire. Ce travail a été effectué à l'université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ) et au Laboratoire d'Océanographie des Sciences de l'Environnement et du climat (L.O.S.E.C.).

Avant de présenter les résultats du travail, il est important pour moi de témoigner ici une grande reconnaissance à toutes les personnes qui m'ont aidé à son aboutissement.

Je tiens sincèrement à remercier: En premier lieu, le Docteur Mamadou Lamine Mbaye, mon encadreur à qui j'exprime toute ma reconnaissance pour avoir accepté de conduire ce mémoire malgré ses multiples occupations. Pour votre confiance en mon travail, votre patience, vos nombreux conseils, votre disponibilité, veuillez trouver ici, l'expression de ma sincère et profonde gratitude ; Je remercie également mon Co-encadrant Dr Ibrahima CAMARA à qui j'exprime toute ma reconnaissance pour avoir accepté de co-encadrer ce mémoire malgré ses multiples occupations.

Je remercie également les membres du jury : Dr Bamol Ali Sow (Président), Dr Youssouph Sane (Rapporteur), Dr Moustapha Thiame (Examineur), Dr Alioune Badara Sarr (Examineur) d'avoir accepté d'évaluer ce mémoire.

Je remercie les enseignants chercheurs du département de Physique : Dr Bamol Ali Sow, Dr Moctar Camara, Dr Mamadou Lamine Mbaye, Dr Diouma Kobor, Dr Joseph S Diatta, Dr Samo Diatta, Dr Ababacar Ndiaye, Dr Lat-grand Ndiaye, Dr Moustapha Thiame, Dr Modou Tine. Je remercie aussi Dr Edouard Diouf du département de Mathématiques.

Mes remerciements vont aussi à l'endroit de tous les docteurs et doctorants et chercheurs du laboratoire physique de L.O.S.E.C et L.C.P.M (laboratoire de chimie physique des matériaux): Dr Ibrahima Diba, Dr Alioune Badara Sarr, M. Hamady Ngansou Sabaly, M. Jules Basse, M. Moustapha Sow, M. Cheikh Waly Diédhiou, M. Youssouf Coly, Pierre Malang sadio, M. Birane Ndom, M. Lamine Konté, M. Youssouph Badji, M. Mamadou Diouldé Bâ pour tous leurs conseils et aides. Je ne saurais terminer sans pour autant remercier toute la promotion (M. Amadou diouf, M. David sagna, M. dioumacor Faye, M. Adama thiandoum, M. jack dama diouf, Mme Fatou khoulé,) qui a été une deuxième famille durant toute la formation.

J'adresse des remerciements particuliers à ma famille pour m'avoir toujours poussée à poursuivre mes études. Vous m'avez encouragé et donné de la force. Je suis très reconnaissant à ma mère de m'avoir donné une bonne éducation. Un grand merci à ma sœur ADJI SIRA NDIAYE qui m'a toujours fait confiance dans mes études et m'a soutenu dans tous les domaines. Je voudrais aussi remercier mes frères et soeurs qui m'ont toujours aidé et soutenu: Mbaye Loum, Ndiaga Ndiaye, Khady Loum, Ismaila Ndiaye et mon jumeau ouseynou ndiaye.

### Résumé

Comptant parmi les zones les plus pauvres, 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.

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 programmes d’adaptation pertinents afin de réduire la vulnérabilité des populations. Dans le but d’apporter des éléments de réponse aux potentiels impacts du changement climatique, nous avons fixés comme objectif, d’étudier la variabilité et le changement hydro-climatiques dans le bassin versant du ferlo.

Pour ce faire, des données d’observations (CRU), et des sorties de modèles climatiques régionaux (REMO, HIRHAM et RCA) ont été utilisées pour analyser les tendances hydro-climatiques passées et futures, ainsi que les impacts potentiels du changement climatique dans le Ferlo.

Les résultats de cette étude montrent que la température est marquée par une hausse accompagnée d’une forte variabilité temporelle qui se renforcera davantage dans le futur à l’horizon 2100, quel que soit le scénario considéré. Pour la pluviométrie, une part d’incertitude et des imprécisions demeurent encore quand il s’agit de suivre les tendances futures. Cependant, une diminution importante de la précipitation est attendue dans cette zone, symbolisée par la présence d’isohyètes de faibles valeurs.

Dans le futur, le bassin pourrait enregistrer une longueur de la saison très courte due à un début tardif et une fin précoce des précipitations.

Quant à la fréquence et l’intensité des précipitations, la moyenne d’ensemble prévoit une baisse et hausse respectivement, ce qui pourrait engendrer des événements extrêmes dans le futur dont les conséquences sont souvent désastreuses.

Ces résultats pourraient aider les décideurs, les agriculteurs et les éleveurs à mieux planifier et orienter les activités socio-économiques afin de réduire les risques liés aux impacts négatifs du changement climatique et d’augmenter leur résilience.

**Mots clés:** Variabilité hydro climatique, changement climatique, bassin versant Ferlo

### Abstract

As one of the poorest areas, West Africa is undoubtedly the region that will suffer the most from the impacts of climate change, due in particular to its economic situation, its high population growth and the dependence of a large segment of the population on natural resources.

In Senegal, the issue of climate change raises the question of the availability of climate information on which political actors could rely to develop relevant adaptation programmes in order to reduce the vulnerability of populations.

In order to provide elements of response to the potential impacts of climate change, we have set the objective of studying hydro-climatic variability and change in the Ferlo watershed.

To this end, observational data (CRU) and outputs from regional climate models (REMO, HIRHAM and RCA) were used to analyse past and future hydro-climatic trends and the potential impacts of climate change in the Ferlo.

The results of this study show that the temperature is marked by an increase accompanied by a strong temporal variability that will become more pronounced in the future by 2100, regardless of the scenario considered. For rainfall, there is still some uncertainty and imprecision when it comes to monitoring future trends. However, a significant decrease in precipitation is expected in this area, symbolised by the presence of low isohyets.

In the future, the basin could experience a very short season length due to a late start and early end of precipitation.

As for the frequency and intensity of precipitation, the overall average is expected to decrease and increase respectively, which could lead to extreme events in the future with often disastrous consequences.

These results could help decision-makers, farmers and herders to better plan and direct socio-economic activities to reduce the risks associated with the negative impacts of climate change and increase their resilience.

**Keywords:** Hydro-climatic variability, climate change, Ferlo catchment area

### Liste des abréviations

ANACIM : Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie

CCNUCC: Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

CPDN: Contribution Prévue Déterminée au niveau National

CORDEX: Coordinated Régional Climate Downscaling Experiment

CRU: Climatic Research Unit

CSE: Centre de Suivi Ecologique

DSP: Début de la Saison des pluies

FSP: Fin de la saison des pluies

GES: Gaz à effet de serre

GIEC: Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

IPS: Indice de Pluies Standardisé

LSP: Longueur de la Saison des Pluies

MCG : Modèle de Circulation Général

MCR : Modèle de Circulation Général

NASA : National Aeronautics and Space Administration

NOAA: National Oceanic and Atmosphère Administration

OMM: Organisation Météorologique Mondiale

PNAT: Plan National d'Aménagement du Territoire

RCP: Représentative Concentration Pathway

**Table des matières**

Remerciements .....	3
Résumé .....	4
Abstract .....	5
Liste des abréviations .....	6
Liste des figures .....	9
Liste des Tableaux.....	12
Introduction Générale.....	13
CHAPITRE I : Généralités des changements climatiques en Afrique de l’ouest .....	15
Introduction .....	15
I.1 Définitions.....	15
I.2 Causes du changement climatique .....	15
I.3 Effet sur la température .....	16
I.4 Effet sur la pluviométrie.....	17
I.5 Effet sur les ressources en eau.....	19
I.6 Situation des changements climatiques en Afrique de l’Ouest .....	20
I.7 Les modèles climatiques .....	21
Conclusion.....	23
CHAPITRE II : Données et Méthodes .....	24
Introduction .....	24
II.1 Présentation de la zone d’étude.....	24
II.1.2 Environnement physique du secteur d’étude .....	25
II.1.2.1 Le climat.....	25
II.1.2.2 Géomorphologie.....	26
II.1.2.3 Pédologie.....	26
II.1.2.4 Hydrologie.....	27

## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

---

---

II-2. Données .....	28
II-3. Méthodes .....	29
Conclusion.....	31
CHAPITRE III : Résultats et discussions .....	32
Introduction .....	32
III.1 Variabilités climatiques et hydrologiques observées.....	32
III.1.1 Précipitation .....	32
III.1.2. Variation saisonnière des températures .....	35
III.1.3 Coefficient de variation.....	37
III.1.4 Coefficient de ruissellement .....	38
III.1.5 Rapport de proportionnalité des écoulements de surface et de base.....	39
III.1.6 Variation saisonnière du cumul, de l'intensité et de la fréquence des précipitations .....	40
III.1.7 Date de début et longueur de la saison des pluies.....	41
III.2 Indicateurs de changement climatique .....	43
III.2.2 Précipitation .....	43
III.2.3 Température .....	46
III.2.4 Fréquence et intensité de la précipitation dans le futur.....	47
III.2.5 Début et longueur de la saison des pluies dans le futur .....	49
Conclusion.....	51
Conclusion et Perspectives.....	52
Bibliographie .....	53

### Liste des figures

<b>Figure 1:</b> a) Émissions annuelles de GES anthropiques dans le monde, 1970–2004. b) Parts respectives des différents GES anthropiques dans les émissions totales de 2004, en équivalent-CO <sub>2</sub> . c) Contribution des différents secteurs aux émissions totales de GES anthropiques en 2004, en équivalent-CO <sub>2</sub> . (La foresterie inclut le déboisement). (GIEC ,2007). .....	16
<b>Figure 2 :</b> Evolution mondiale de la Température de 1860 en 2000 (Source: GIEC. 2007)...	17
<b>Figure 3:</b> Anomalies de température annuelles de 1880 à 2019, par rapport à la moyenne de 1951-1980 sources: NASA, NOAA (2019). .....	17
<b>Figure 4:</b> Distribution spatiale des tendances linéaires dans le volume des précipitations annuelles sur les terres émergées au cours de la période 1901-2005 (% par siècle). Les points indiquent les zones pour lesquelles les tendances sont significatives. Les zones grisées indiquent qu'une insuffisance dans les données empêche de donner une tendance fiable. Le pourcentage est en base 1961-1990. (Source: GIEC, 2007). .....	18
<b>Figure 5:</b> Échelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle (Source : Planton, 2011). .....	22
<b>Figure 6:</b> Situation géographique de la zone du Ferlo .....	24
<b>Figure 7:</b> Carte des différents types de sol couvrant le bassin versant Ferlo (Cisse, 2016; PNAT, 1985). .....	26
<b>Figure 8:</b> Cumuls interannuels moyens des précipitations; a: données de CRU et b: moyenne d'ensemble des modèles .....	32
<b>Figure 9:</b> Evolution de l'indice standardisé des précipitations moyenne sur le bassin versant du Ferlo. ....	33
<b>Figure 10:</b> Variation des isohyètes suivant les normales de l'OMM (1961 à 1990, 1971 à 2000 et 1981 à 2010) avec les données de CRU. ....	34
<b>Figure 11:</b> Variation saisonnière de la température dans le bassin versant du Ferlo de 1976 à 2005 avec les données de CRU et moyenne d'ensemble des modèles. ....	35
<b>Figure 12:</b> Evolution de la température maximale et minimale dans le bassin versant du Ferlo. Le trait (en vert) représente la moyenne des données utilisées (CRU). ....	36
<b>Figure 13:</b> Variabilités interannuelles de l'anomalie de la température de 1976 à 2005 trait bleu moyenne d'ensemble des modèles et rouge les données de CRU.....	37
<b>Figure 14:</b> Coefficient de ruissellement de 1976 à 2005 dans le bassin versant du Ferlo (JJASO) calculé à partir des donnés du modèles REMO.....	39

<b>Figure 15:</b> Rapport de proportionnalité entre les écoulements de surface et de base par rapport à l'écoulement total (JJASON) de 1976 à 2005 dans le bassin versant du Ferlo calculé à partir du modèle REMO.....	40
<b>Figure 16:</b> variation du cumul pluviométrique, intensité et fréquence de la précipitation dans le bassin versant du Ferlo de 1976 à 2005(jas) avec la moyenne d'ensemble des modèles (REMO, HIRHAM et RCA). .....	41
<b>Figure 17:</b> Evolution du début et fin de la saison des pluies moyennées sur la zone du Ferlo, calculée à partir de la moyenne d'ensemble des modèles.....	42
<b>Figure 18:</b> Evolution de la longueur moyenne de la saison des pluies dans le Ferlo, calculée à partir des dates de début et fin de la saison des pluies. ....	42
<b>Figure 19:</b> Gauche: changement des précipitations (exprimé en %) au Ferlo entre le futur proche (2021/2050) et la période de référence (1976/2005) pour les modèles HIRHAM, RCA REMO selon les scénarios rcp45 rcp8.5 .Droite: idem pour la figure droite pour le futur proche et lointain. (2071/2100). ....	43
<b>Figure 20:</b> Evolution de l'indice de pluie standardisé de l'historique (noire), du scénario RCP4.5 (bleu) et du scénario RCP8.5 (rouge). ....	44
<b>Figure 21:</b> Isohyètes dans le futur proche (2021 à 2050) avec les différents scénarios rcp4.5 et rcp8.5 noire (période de référence 1976-2005), vert rcp4.5 (2021-2050), rouge rcp8.5 (2021-2050).....	45
<b>Figure 22:</b> Isohyètes dans le futur lointain (2071 à 2100) avec les différents scénarios rcp4.5 et rcp8.5 noire (période de référence 1976 -2005), vert rcp4.5 (2071-2100), rouge rcp8.5 (2071-2100).....	45
<b>Figure 23:</b> Evolution de la température moyenne: bleue Scénario RCP4.5, jaune Scénario RCP8.5. Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 3 modèles.....	47
<b>Figure 24:</b> Evolution de la température maximale, minimale de l'historique (noire), du Scénario RCP4.5 (bleue) et du scénario RCP8.5 (rouge). Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 3 simulations des modèles. ....	47
<b>Figure 25:</b> Evolution de la fréquence des pluies (a: première figure de la fréquenceet; b: deuxième figure de la fréquence), intensité journalière de la précipitation (c: première figure de l'intensité; d: deuxième figure de l'intensité), du Scénario RCP4.5 (bleue) et du scénario RCP8.5 (rouge). Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble. ....	48
<b>Figure 26:</b> Evolution du date de début et fin de la saison des pluies du scénario RCP4.5 (bleue) et du scénario RCP8.5 (rouge) dans le futur proche (a: première figure du date de début; b: première date de fin de la saison) et futur lointain (c: deuxième date de début et d: deuxième	

---

---

date de fin de la saison). Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 3 des modèles..... 50

---

---

Liste des Tableaux

**Tableau 1:** Données des modèles climatiques utilisés ..... 28

**Tableau 2:** Coefficient de variation de la précipitation dans le bassin versant du Ferlo de 1976 à 2005 avec les données de CRU (observation) et la moyenne des modèles (simulation) ..... 38

**Tableau 3:** Changement absolu moyen des températures maximales et minimales pour les horizons 2050 et 2100 sous les deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5). Les données utilisées sont celle de la moyenne d'ensemble des trois modèles ..... 46

**Tableau 4:** Changement absolu moyen des cumuls pluviométriques, fréquence et intensité de la précipitation pour les horizons 2050 et 2100 sous les deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5). Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des modèles ..... 49

**Tableau 5:** Evolution du date de début, de fin et de la longueur de la saison des pluies dans le Ferlo pour les horizons 2050 et 2100 sous les deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5). Les données utilisées sont celle de la moyenne d'ensemble des trois modèles ..... 51

**Tableau 6:** les dates moyennes de fin, debut de la saison des pluies pour les trois periodes (reference, future proche et future lointain) ..... 51

### Introduction Générale

Le changement climatique et son influence sur l'environnement et la société sont au cœur des préoccupations politiques et scientifiques actuelles (Dezetter *et al.*, 2010). Il est considéré comme l'un des menaces les plus graves qui affectent le développement durable avec des effets défavorables attendus sur la santé humaine, la sécurité alimentaire, l'activité économique, les ressources en eau et les autres ressources naturelles. Certes, le climat de la planète a des variations naturelles mais selon le dernier rapport du groupe d'expert intergouvernemental sur l'évolution du climat, l'essentiel de l'accroissement observé de la température moyenne globale depuis le milieu du 20<sup>e</sup> siècle est très probablement dû à l'augmentation observée des concentrations de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique (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 *et al.*, 2015). Parmi les zones les plus affectées figurent l'Afrique de l'Ouest (Faye *et al.*, 2019), 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 *et al.*, 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 *et al.*, 2016).

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 occupent une place importante dans l'économie nationale et leur sensibilité aux impacts des changements climatiques risque de remettre en question les objectifs du Plan Sénégal Emergent (CPDN, 2015).

Compte tenu de cette vulnérabilité de ces ressources face à la variabilité du climat, l'évolution des ressources en eau devient une question préoccupante pour de nombreuses localités du Sénégal plus particulièrement la zone du Ferlo; Une zone à vocation agro-sylvopastorale qui se singularise par la fragilité de ses ressources. C'est dans ce contexte que notre étude vise à faire une analyse de la situation du secteur des ressources en eau et établir les indicateurs d'un changement climatique ; puis enfin évaluer les effets de ces changements climatiques sur les ressources en eau au niveau du bassin versant du Ferlo.

- Objectif général

Dans le but d'apporter des éléments de réponse aux potentiels impacts du changement climatique dans le bassin versant du Ferlo, nous avons fixés comme objectif général:

- ✓ D'étudier la variabilité et le changement hydro-climatiques

- Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques pour atteindre cet objectif global sont les suivants:

- ✓ Analyser la variabilité spatio-temporelle des paramètres hydro-climatiques dans la zone du Ferlo.
- ✓ Estimer les indicateurs futurs de changement climatique dans le bassin versant du Ferlo.

Cette étude comporte trois (3) chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation générale de l'étude ; il s'agit dans le chapitre I d'aborder le cadre conceptuel et la revue de la littérature.
- Dans le chapitre II, nous présentons la zone d'étude ainsi que les données utilisés puis nous exposons le cadre méthodologique ;
- Le dernier chapitre est réservé à la présentation des résultats et à leurs discussions. Il s'articule comme suit : d'abord nous avons effectué une analyse de la variabilité spatio-temporelle des paramètres hydro-climatique dans le passé (1976 à 2005), avant d'estimer les indicateurs futurs (2021 à 2050 et 2071 à 2100) du changement climatique dans le bassin versant du ferlo.

---

### CHAPITRE I : Généralités des changements climatiques en Afrique de l'ouest

---

#### Introduction

Dans ce chapitre seront présentées, une synthèse des travaux antérieurs du changement climatique en Afrique de l'ouest, sur ses relations avec la température, la pluviométrie et les ressources en eau puis les conséquences en Afrique de l'ouest.

#### I.1 Définitions

Selon la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC), le changement climatique est un changement du climat attribué directement ou indirectement à toute activité humaine qui modifie la composition de l'atmosphère de la Terre et qui s'ajoute à la variabilité naturelle du climat observée au cours des périodes de temps comparables.

Quant au Groupe intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC), le changement climatique se réfère à une variation statistiquement significative dans l'état moyen du climat ou dans sa variabilité, variation persistant sur une longue période de temps (décades ou plus). Le changement climatique peut être dû aux processus naturels internes où à des forçages exogènes ou à des changements anthropogéniques persistants dans l'atmosphère ou dans les usages du sol.

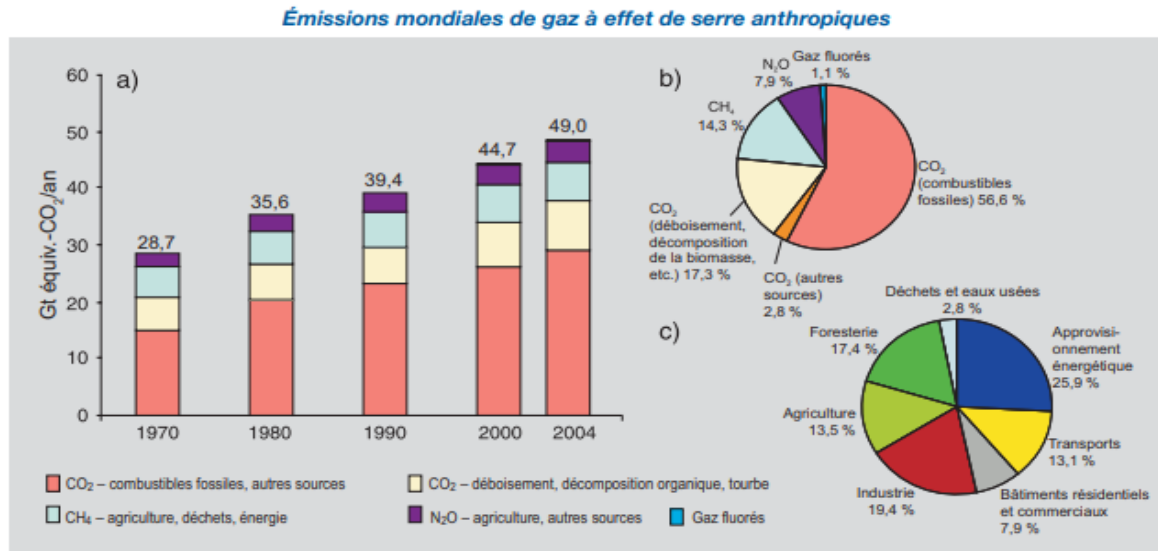
#### I.2 Causes du changement climatique

La plupart des membres de la communauté scientifique s'accordent à dire que la majeure partie du réchauffement observé au cours de la seconde moitié du XXe siècle serait imputable aux activités humaines (GIEC, 1990). Nos habitudes de consommation seraient donc parmi les responsables de ces changements. On sait que l'atmosphère de la Terre laisse passer la lumière du soleil qui réchauffe la surface du globe. La chaleur qui s'élève de la surface de la terre est en partie absorbée par les gaz et la vapeur d'eau présente dans l'atmosphère, ce processus qui conduit à élever la température est appelé «effet de serre». En l'absence de gaz à effet de serre [dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>), oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), etc.], la plus grande partie de la chaleur pénétrant dans l'atmosphère terrestre serait directement réémise dans l'espace, et la température moyenne de la Terre serait de -18 °C au lieu de 15° C.

Selon Bouraima (2010), au cours des 10 000 dernières années, la quantité de ces gaz à effet de serre présents dans notre atmosphère est demeurée relativement constante et a permis à la Terre de conserver un climat relativement stable. La concentration de ces gaz a commencé à croître avec l'avènement de l'industrialisation, la hausse de la demande en énergie, la croissance

## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

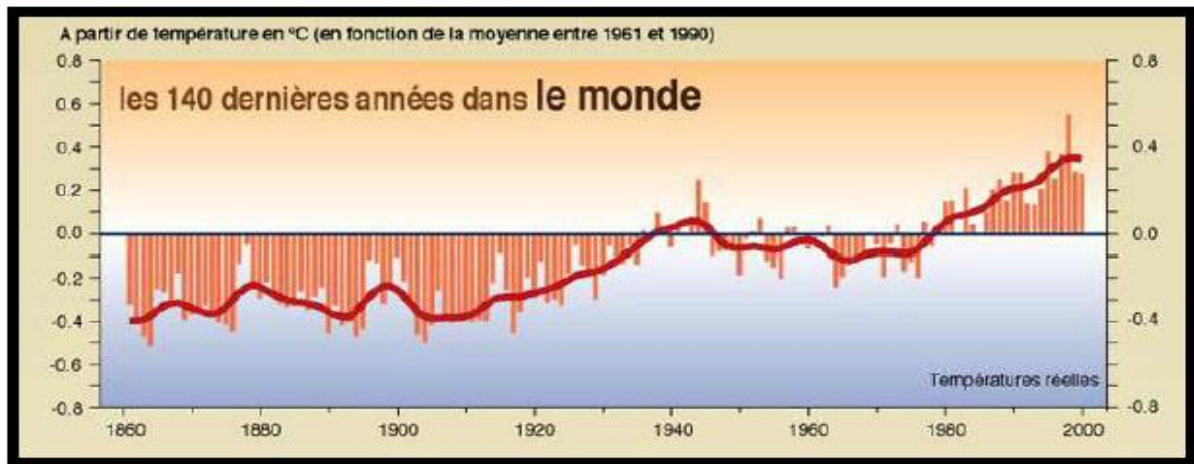
démographique et les changements dans l'utilisation du territoire. Cette augmentation passe d'une moyenne de 280 ppm (partie par million) avant 1750 à 388 ppm en 2009 (Puget et al., 2010), et une hausse d'émission de GES de 70 % entre 1970 et 2004 (GIEC, 2007) (figure1). Ces différents méfaits environnementaux (pollution par les déchets domestiques, les fertilisants, toxiques, déchets industriels et biomédicaux, pollution atmosphérique, etc.) causés par l'action de l'homme, contribuent directement ou indirectement au phénomène global du réchauffement de la planète comme l'a souligné l'académie des sciences (Puget et al., 2010).



**Figure 1:** a) Émissions annuelles de GES anthropiques dans le monde, 1970–2004. b) Parts respectives des différents GES anthropiques dans les émissions totales de 2004, en équivalent-CO<sub>2</sub>. c) Contribution des différents secteurs aux émissions totales de GES anthropiques en 2004, en équivalent-CO<sub>2</sub>. (La foresterie inclut le déboisement). (GIEC, 2007).

### I.3 Effet sur la température

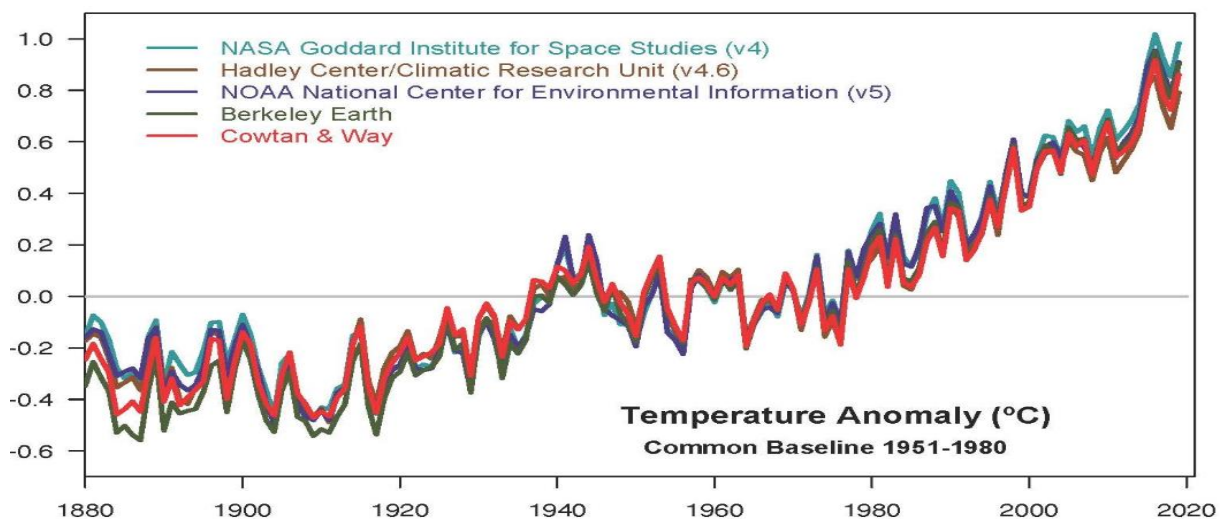
Les mesures indiquent une hausse de la température moyenne mondiale de l'ordre de 0,2 à 0,6°C depuis la fin du XIXe siècle (Figure 2). Cela correspond aux projections modélisées de l'ampleur du réchauffement à ce jour, surtout si l'on tient compte de l'effet refroidissant des aérosols. Le réchauffement a eu lieu essentiellement de 1910 à 1940 et de 1976 jusqu'à maintenant (GIEC, 2007).



**Figure 2 :** Evolution mondiale de la Température de 1860 en 2000 (Source: GIEC. 2007).

Selon des analyses indépendantes de la National Aeronautics and Space Administration, (NASA) et de la National Oceanic and Atmosphere Administration (NOAA), les températures de la surface de la Terre en 2019 étaient les deuxièmes les plus chaudes depuis le début de la tenue des registres modernes en 1880.

À l'échelle mondiale, les températures de 2019 n'étaient devancées que par celles de 2016 et ont poursuivi la tendance au réchauffement à long terme de la planète (figure3).



**Figure 3:** Anomalies de température annuelles de 1880 à 2019, par rapport à la moyenne de 1951-1980 sources: NASA, NOAA (2019).

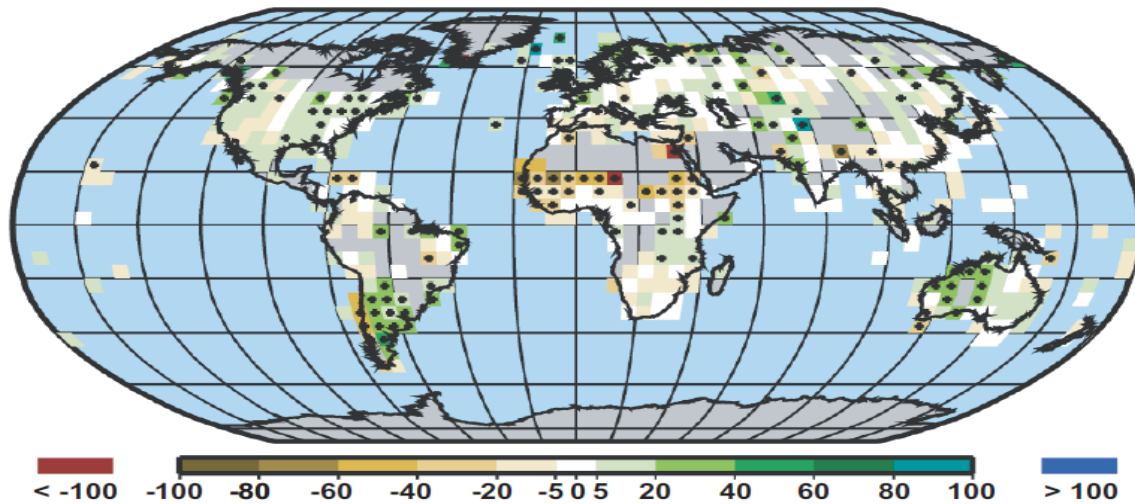
### I.4 Effet sur la pluviométrie

Les changements observés au niveau des températures constituent l'un des changements les plus évidents mais aussi les plus facilement observables compte tenu des jeux de données disponibles (Lespinas, 2008). Il en va tout autrement des autres variables du cycle hydrologique (précipitations, évapotranspiration, etc.) qui sont en général peu et/ou mal observées et pour

lesquelles nous ne disposons donc que d'un nombre limité de données d'observations de bonne qualité (Trenberth *et al.*, 2007).

Au-dessus des terres émergées, les précipitations semblent avoir légèrement augmenté au cours du siècle dernier, bien que des tendances opposées aient été observées sur un grand nombre de régions (Solomon *et al.*, 2007). Une augmentation significative des précipitations a été observée dans les parties orientales d'Amérique du Nord et d'Amérique du Sud, en Europe du Nord et en Asie du Nord et Centrale. A l'inverse, un assèchement a été relevé dans le Sahel, en Méditerranée, en Afrique du Sud et en Asie du Sud (figure4).

De manière générale, les précipitations ont eu tendance à augmenter au-dessus des continents situés au-delà de 30° Nord au cours du siècle dernier tandis qu'elles ont plutôt diminué au niveau des latitudes tropicales sur la même période.



**Figure 4:** Distribution spatiale des tendances linéaires dans le volume des précipitations annuelles sur les terres émergées au cours de la période 1901-2005 (% par siècle). Les points indiquent les zones pour lesquelles les tendances sont significatives. Les zones grisées indiquent qu'une insuffisance dans les données empêche de donner une tendance fiable. Le pourcentage est en base 1961-1990. (Source: GIEC, 2007).

Les travaux de Lambert *et al.* (2004) ont conclu qu'à l'échelle globale, la variabilité des précipitations observées ne peut s'expliquer uniquement par la variabilité intrinsèque et que des facteurs externes ont donc joué un rôle (GES, aérosols, rayonnement solaire, volcanisme).

Néanmoins, la plus grande partie des variations forcées des précipitations semble venir du rayonnement visible (principalement naturel donc) et non du rayonnement infrarouge dû aux GES. De même Gillet *et al.* (2004) n'ont pas pu mettre en évidence l'impact des GES (et du flux solaire) sur les précipitations globales, mais ont démontré l'impact du volcanisme sur celles-ci: les précipitations ont en général tendance à diminuer dans les années qui suivent les éruptions. Seule l'étude récente de Zhang *et al.* (2007) fait apparaître pour la première fois un

impact des forçages anthropiques sur les précipitations. Ces auteurs ont pu démontrer une influence anthropique dans l'augmentation des précipitations aux moyennes latitudes de l'hémisphère nord et aux subtropiques et tropiques profonds de l'hémisphère sud et dans la diminution des Précipitations aux subtropiques et tropiques de l'hémisphère nord.

### **I.5 Effet sur les ressources en eau**

La question de la ressource en eau est l'une des priorités en termes d'impacts et d'adaptation liés au changement climatique. Il est crucial d'avoir un accès fiable à l'eau propre pour l'usage domestique, la production alimentaire et énergétique, les loisirs et le maintien des écosystèmes naturels. Bien que la plupart des régions du monde aient éprouvé à un moment ou à un autre des difficultés telles que des sécheresses, des inondations ou des problèmes de qualité de l'eau en raison de la répartition inégale de cette ressource et de la variation de leur disponibilité d'une année à l'autre, ces problèmes deviennent plus fréquents en raison du changement climatique.

La publication en 2008 par le GIEC d'un rapport sur le thème permet de fournir un tableau d'ensemble des conséquences du changement climatique sur les ressources en eau et vice-versa. Les conséquences du réchauffement climatique sur le cycle de l'eau sont très contrastées en fonction des régions. Le GIEC estime que globalement, les précipitations, et avec elles le débit des rivières, devraient augmenter dans les hautes latitudes (par exemple en Europe du Nord) et dans certaines régions des tropiques, mais baisser dans les latitudes plus basses, en particulier dans la région méditerranéenne et dans les zones subtropicales.

D'après le rapport de GIEC/IPCC (2008), Le réchauffement des températures et les impacts qui lui sont associés auront également des conséquences sur la qualité de l'eau disponible pour la consommation humaine. Il a ainsi été observé que le réchauffement de la température des lacs et des rivières entraîne une dégradation de leur qualité aussi bien en termes biologiques que chimiques. L'intensité accrue des précipitations pourrait aggraver la pollution de l'eau, dans la mesure où ces précipitations emmèneraient avec elles davantage de polluants vers les aquifères souterrains, et ce d'autant plus que l'érosion associée à des précipitations intenses rend ces substances plus mobiles. L'érosion a également pour conséquence d'accroître la turbidité de l'eau. Si les précipitations et le débit des rivières sont trop importants, voire s'ils entraînent des inondations, ils risquent de saturer les systèmes de récupération et de traitement des eaux usées, avec à la clé un risque accru de contaminations ou de décharges intempestives. Si à l'inverse ils sont trop faibles, la quantité d'eau disponible ne suffira pas à dissoudre de manière satisfaisante les polluants. L'évolution du climat va conduire à une intensification du cycle hydrologique global et peut avoir d'importantes répercussions sur les ressources régionales en

eau. Les variations de la hauteur totale, de la fréquence et de l'intensité des précipitations se répercutent directement sur l'ampleur et la répartition dans le temps du ruissellement ainsi que sur l'importance des inondations et des sécheresses. Cependant, on connaît mal actuellement les effets de ces variations à l'échelle régionale. Des variations relativement faibles des températures et des précipitations, associées à leurs effets non linéaires sur l'évapotranspiration et l'humidité du sol peuvent entraîner une altération assez sensible du ruissellement, surtout dans les régions arides et semi-arides. La quantité et la qualité des eaux de distribution posent déjà de sérieux problèmes dans de nombreuses régions, et notamment dans certaines zones côtières, dans certains deltas et sur certaines petites îles, ce qui rend les pays concernés particulièrement vulnérables en cas de nouvelles réductions de la quantité d'eau disponible (GIEC, 1995).

### I.6 Situation des changements climatiques en Afrique de l'Ouest

L'Afrique de l'Ouest expérimente déjà un réchauffement des températures de 1°C depuis 1950 (Noblet *et al.*, 2018; Morice *et al.*, 2012). Le changement climatique devrait se traduire par une pénurie et la dégradation de la qualité des ressources en eau du fait de la baisse des précipitations et de l'augmentation de l'évaporation liée aux élévations des températures. Pour le futur, le réchauffement des températures pour l'Afrique de l'Ouest est estimé à 3°C dans le cadre du scénario RCP4.5 et à 6°C dans le cadre du scénario RCP8.5 à l'horizon 2100. Cela représente un réchauffement 10% à 60% supérieur au réchauffement global moyen de la planète (Dème *et al.*, 2015). Par ailleurs, 50% des projections climatiques régionales suggèrent que des vagues de chaleur, qui sont inhabituelles dans les conditions climatiques actuelles, seront plus régulières d'ici 2040 voire plus sévères sous le scénario RCP8.5 (Russo *et al.*, 2016).

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). 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 (Dème *et al.*, 2015), plusieurs études estiment dans le sahel une évolution des isohyètes vers le Sud. Selon ces études, la distance parcourue par les isohyètes dans le sens Nord-Sud est de 200 à 300 km pour l'isohyète 100 mm, 100 à 150 km pour l'isohyète 500 mm et 100 km pour l'isohyète 1000 mm il s'en suit une dégradation des ressources naturelles et une fragilisation des systèmes de production. La destruction du couvert végétal, la surexploitation des terres agricoles et l'abandon ou la réduction de la durée des

jachères ont conduit à la dégradation des sols, à la baisse des rendements agricoles et à l'insécurité alimentaire (Konaté, 2009; Ndiaye, 2015).

Au Sénégal, les impacts du réchauffement climatique global présentent des risques sérieux pour l'agriculture, les ressources en eau et les zones côtières qui sont déjà fragiles (Noblet *et al.*, 2018); Ce pays a connu une succession de sécheresse depuis son indépendance. Cette situation de sécheresse chronique aura fini d'installer un processus de désertification quasi irréversible au vu de l'ampleur de la dégradation des écosystèmes qui a entraîné la chute des rendements agricoles, les défrichements de nouvelles terres, l'appauvrissement des populations rurales et leur migration vers les centres urbains sans emplois (Seck *et al.*, 2005).

Dans le nord du pays, le changement climatique a des effets très concrets entre la hausse du niveau de la mer, l'érosion ; Cette élévation du niveau de la mer perturbe l'écoulement fluvial. Selon une étude de 2013 menée par différents experts à la demande du ministère sénégalais de l'environnement, 80 % de l'île sera en « risque fort » d'inondation d'ici 2080. Il en va de même pour les quartiers périphériques, dont Guet Ndar, sur la Langue de Barbarie, où vivent nombre de pêcheurs et qui fait office de poumon économique régional avec ses milliers de tonnes de poisson vendues chaque année. En octobre 2003, l'île est inondée par une énième crue. Trois jours plus tard, la brèche s'est transformée sous la force des vagues, à cela s'ajoute la salinisation de l'eau et des nappes phréatiques, qui a décimé les cultures maraîchères sur ses bords, où poussaient naguère oignons, tomates et choux (Roger, 2015)

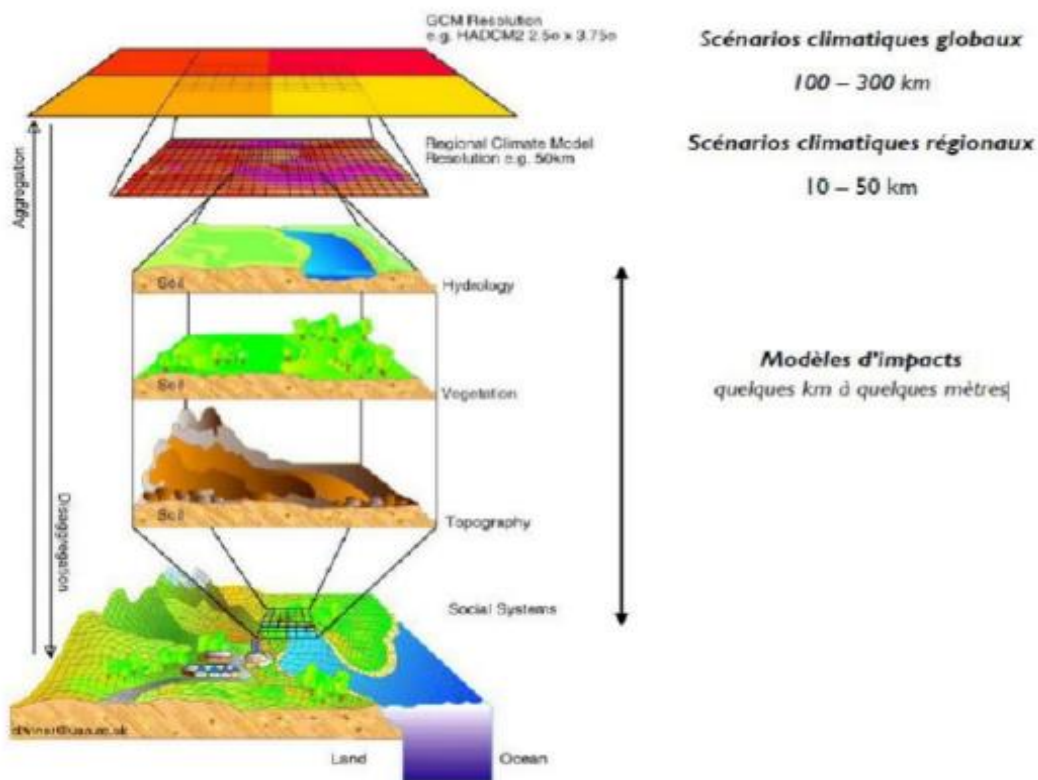
### I.7 Les modèles climatiques

L'évolution future du climat global au cours du 21<sup>ème</sup> siècle est abordée à travers des modèles climatiques globaux listés dans le quatrième rapport du GIEC (IPCC, 2007). 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: 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 5). Les procédés pour faire cela sont multiples (Fowler *et al.*, 2007 ; Giorgi *et al.*, 2001). On citera juste

## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

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  $0,5^{\circ} \times 0,5^{\circ}$  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 5:** Échelles des différents scénarios et modèles utilisés dans la descente d'échelle (Source : Planton, 2011).

Ces modèles nécessitent des variables de forçage en entrée comme les concentrations en  $\text{CO}_2$  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 21ème siècle correspondant à différents niveaux de stabilisation du forçage

## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

---

radiatif d'ici 2100. Quatre niveaux de forçage de fin de siècle ont été fixés : 2.6, 4.5, 6 et 8.5 W/m<sup>2</sup> 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 scénarii 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 agronomique.

### Conclusion

Les travaux du GIEC démontrent avec une quasi-certitude la tendance au réchauffement global et le rôle majeur des activités humaines.

En Afrique de l'ouest, ce réchauffement devrait se traduire par une pénurie et la dégradation de la qualité des ressources en eau du fait de la baisse des précipitations et de l'augmentation de l'évaporation liée aux élévations des températures.

## CHAPITRE II : Données et Méthodes

### Introduction

Dans ce chapitre seront présentés dans un premier temps, notre zone d'étude. Cette présentation du Ferlo se focalise sur les aspects du milieu physique avec une description très détaillée des caractéristiques climatiques, géologiques, morphologiques, et hydrologiques. Ce chapitre présente aussi les données utilisées au cours de cette étude et les méthodes appliquées pour l'analyse de ces données.

### II.1 Présentation de la zone d'étude

Limité par la vallée du fleuve Sénégal au nord et le bassin arachidier au sud, le bassin versant du Ferlo (Figure 6) se situe entre les latitudes  $16^{\circ}15'$  et  $14^{\circ}30'$  Nord et les longitudes  $12^{\circ}50'$  et  $16^{\circ}$  Ouest. Il s'étend sur une superficie d'environ  $70\,000\text{ km}^2$ . C'est la région éco géographique la plus vaste du Sénégal, comptant plus d'éleveurs que toute autre région du pays. Dans cette zone, l'élevage, de type extensif, exploite les pâturages naturels (Akpo *et al.*, 1995; Ba, 2007) et fonctionne selon deux modes distincts. Pendant la saison des pluies, le pâturage est constitué essentiellement de la strate herbacée alors qu'en saison sèche, la strate ligneuse contribue très fortement à l'alimentation du bétail. Le bassin est un lieu de naissance et un axe très actif de transhumance d'acheminement du bétail.

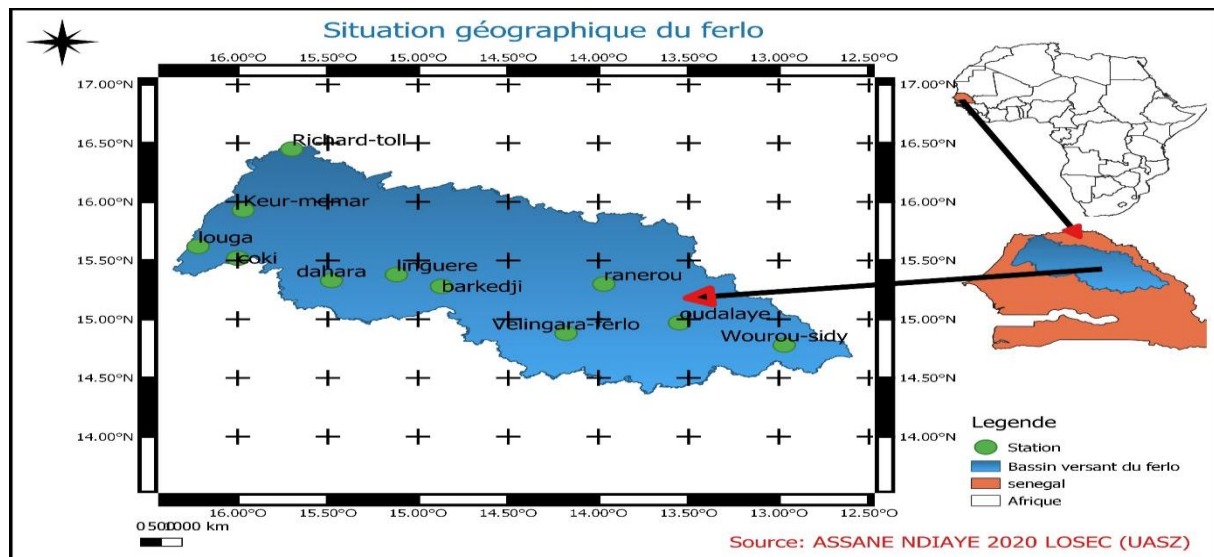


Figure 6: Situation géographique de la zone du Ferlo

---

---

### II.1.2 Environnement physique du secteur d'étude

#### II.1.2.1 Le climat

Appartenant au domaine sahélien (Cissé et al., 2012), le climat sur le bassin versant est gouverné par les paramètres comme: la température, l'humidité relative, les vents et la pluviométrie, etc.

##### II.1.2.1.1 La température

Elle est généralement élevée et varie entre un minimum de 18°C en janvier et un maximum qui peut dépasser 40°C en mai avant le démarrage des précipitations et baisse légèrement avec l'influence de la mousson (Cisse, 2016). La température moyenne oscille autour de 27,73 °C et fluctue entre une moyenne maximale de 30,19 °C au mois d'octobre et minimale de 24,4 8 °C au mois de janvier (Ndiaye et al., 2013 ; Niang, 2009).

##### II.1.2.1.2 L'humidité

L'humidité atteint un minimum en janvier et son maximum au mois de septembre avec des variations journalières très importantes. L'humidité relative présente un maximum de 74 % en août/septembre et un minimum de 31 % en février-mars (sarr, 2009).

##### II.1.2.1.3 Le vent

Les vents sont fréquents et se présentent en trois types de flux de circulation:

✓ *Les alizés continentaux ou harmattan* : En saison sèche, principalement en avril et mai, L'harmattan (vent du Nord-EST chaud et sec) souffle sur la région. Il correspond à la branche méridionale des flux de l'agglutination anticyclonique « saharo méditerranéenne ». Il se traduit par une forte amplitude thermique journalière. A son passage l'alizé continental provoque de fortes valeurs de l'évaporation.

✓ Des masses d'air humide de secteur Nord ou Nord-Ouest, s'installent dans la zone en Janvier et février, pouvant provoquer du brouillard, de la rosée et même parfois des chutes de pluies (appelées « pluies hors saison » ou « Heug »).

✓ *Le flux de mousson* : Les vents de mousson provenant du Sud-Ouest soufflent essentiellement en juillet, août et septembre. Ils emmènent de l'air très humide, source de pluies (Cisse, 2016).

##### II.1.2.1.4 pluviométrie

Le Ferlo appartient au domaine sahélien caractérisé par l'alternance de deux saisons: une saison sèche qui dure 9 mois (octobre à juin) et une saison pluvieuse de 3 mois. La pluviométrie reste faible et très instable avec une moyenne de 422,6 mm par an pour un coefficient de variation de 0,3 sur la période 1951-2004 (Ndiaye et al., 2013 ; Faye et al., 2011).

## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

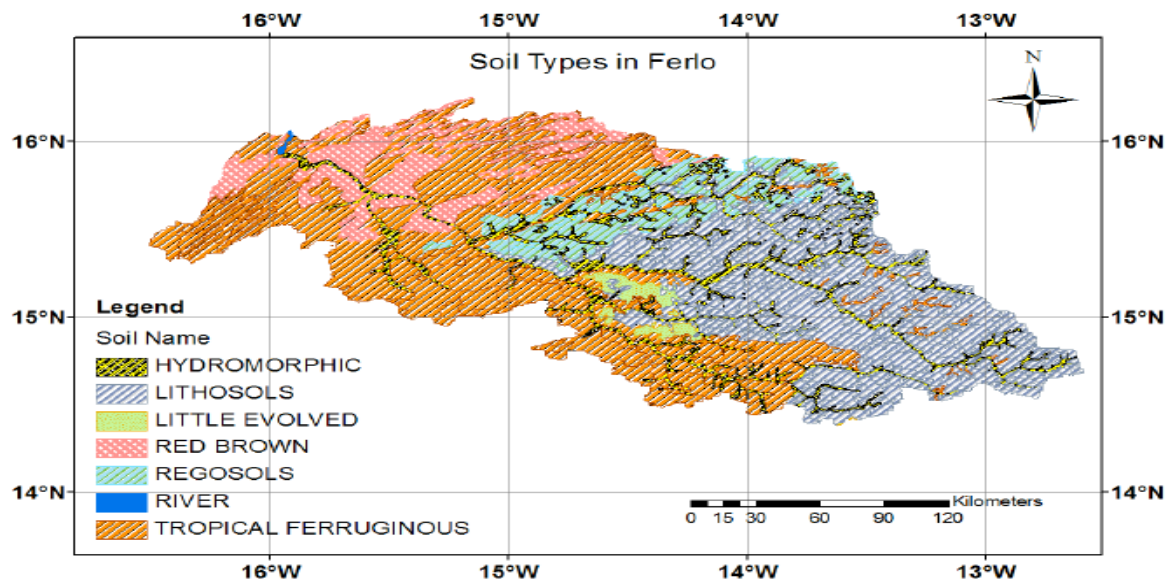
En outre, l'évaporation moyenne mensuelle est de 401 mm en mai (maximum) et de 104 mm en septembre (minimum). L'insolation varie également entre un maximum en avril/mai et un minimum en septembre avec respectivement une moyenne mensuelle de 277 heures et 225 heures d'ensoleillement (Sarr, 2009).

### II.1.2.2 Géomorphologie

Une succession de dunes et de bas-fonds caractérisent le Ferlo. Leur allure générale s'aplanit progressivement du nord vers le sud pour se terminer par une topographie quasi plane laissant transparaître les affleurements rocheux de la cuirasse à Linguère (Ferlo ferrugineux) (Cissé et al., 2016 ; CSE/ROSELT, 2002). Par rapport aux formations géologiques, le bassin du Ferlo se divise en deux parties: le Ferlo sableux à l'Est et le Ferlo ferrugineux ou Cuirassé.

### II.1.2.3 Pédologie

Le profil pédologique tout au long du bassin versant est déterminé par deux sous zones: Ferlo sableux et Ferlo ferrugineux. On distingue six types de sol sur le bassin versant du Ferlo (Figure 7, PNAT, 1985), dont les plus représentatifs sont au nombre de cinq : les sols ferrugineux tropicaux, les sols hydromorphes, les régosols, les sols rouge bruns et les lithosols.



**Figure 7:** Carte des différents types de sol couvrant le bassin versant Ferlo (Cisse, 2016; PNAT, 1985).

#### ✓ *Les sols ferrugineux tropicaux*

Ils présentent une texture sableuse avec une faible capacité de rétention en eau ; ces sols sont par conséquent perméables et bien drainés. Cette perméabilité des sols est essentielle pour la recharge de la nappe. La structure de surface est peu compacte et l'infiltration est bonne. Comparés aux sols rouge-brun, la perméabilité et le drainage sont plus faibles.

### ✓ *Les sols rouge-bruns*

Ils ont une faible capacité de rétention mais une bonne perméabilité (Cisse ,2016; Cornet et Poupon, 1977). Sur ces sols, la teneur en sable varie très peu dans le profil entre 81 et 85% respectivement sur les moins sableux (à 2m) et plus sableux (à 0,3m), alors que les teneurs en argile et limon varient de façon importante dans les premières couches du sol (Cissé ,2016 ; Fournier, 1995).

### ✓ *Les sols Hydromorphes*

Sur le bassin versant du Ferlo ces sols sont sur les pentes et le long de la vallée de la rivière Ferlo, ils recouvrent la cuvette de la vallée et les zones non inondées sur lesquels le maraîchage est effectué. Ils sont favorables à ces cultures maraîchères. Avec le dépôt de limons et de matières organiques en faible profondeur apportés par la rivière, ces sols ont un excellent potentiel de fertilité.

### ✓ *Les sols Régosols*

On les trouve au centre du bassin versant; ils sont très peu profonds et peu évolués, ils occupent généralement les pentes inférieures en association avec les lithosols. C'est des sols minéraux bruts d'apport généralement éolien, sur une roche tendre. Ils sont peu fertiles.

### ✓ *Les sols Lithosols*

Ce sont des sols minéraux bruts avec un potentiel agricole très médiocre. Ils reposent sur un affleurement rocheux couvrant tout le sud-est du Ferlo. Ils sont très peu épais et limités en profondeur par la cuirasse continue dont les fragments peu altérés constituent l'essentiel du profil.

La répartition de ces différents types de sols subdivisent le Ferlo en deux grands ensembles qui sont le Ferlo sableux (Nord-Ouest) caractérisé par des sols rouge-brun et des sols ferrugineux et le Ferlo cuirassé ou latéritique (Sud-Est) où les dépôts sableux disparaissent au profit de sols gravillonnaires avec, par endroits, des affleurements latéritiques (Cissé, 2016)

### II.1.2.4 Hydrologie

Le Ferlo est une région au climat de type sahélien. Avant son assèchement durant la période 1970 – 2000 (Cissé et al., 2016), le Ferlo était un affluent du fleuve Sénégal. Aujourd'hui, durant la saison des pluies il alimente le lac de Guiers. Ni le Ferlo, ni le lac de Guiers ne contribuent plus directement à l'alimentation du fleuve Sénégal (Cissé, 2016). Les eaux de surface sont ainsi trop limitées pour la satisfaction des besoins en eau des hommes et de leurs animaux. Les eaux souterraines sont exploitées, mais la profondeur des nappes est considérable (Cissé,2016; Ndiaye, 2007).

En ce qui concerne l'hydrogéologie, on distingue les nappes profondes, appelées aquifères du Maestrichtien et de l'Éocène d'une part et celles dites superficielles ou nappes du Continental terminal et du Quaternaire d'autre part (Michel, 1973).

### II-2. Données

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont de trois types. Il s'agit :

- Des données du Climatic Research Unit (CRU): elles contiennent entre autres des données de précipitation, température moyenne, températures maximale et minimale (Harris *et al.*, 2014). Ces données ont une grille horizontale de 0,5° x 0,5° (c'est à dire environ 50kmx50km) avec une résolution temporelle mensuelle de 1901 à 2013.
- des données de sorties de modèles climatiques régionaux du programme CORDEX (Coordinated Régional Climate Downscaling Experiment, Giorgi *et al.*, 2009). Les modèles ont une résolution spatiale de 0,44 x 0,44°. Elles couvrent la période 1950-2005 pour l'historique et 2006-2100 pour les projections de scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Pour notre étude nous avons utilisé trois modèles régionaux (Tableau 1) qui contiennent chacune quatre (4) variables climatiques (précipitation, température moyenne de surface, température maximale et minimale). Et en plus de ces variables, l'un des modèles (REMO) contient d'autres variables telles que: l'écoulement total et l'écoulement de surface. L'écoulement de base est calculé à partir de la différence des deux écoulements totaux et surface.
- des données in-situ de précipitation de la station de Sagata, Richard-toll Barkedji et Linguere. Ces données ont une résolution temporelle journalière et couvrent la période allant de 1991 à 2005.

**Tableau 1:** Données des modèles climatiques utilisés

Modèles Régionaux	Forçages	Institutions
REMO	MPI-M-MPI-ESM	MPI-CSC
HIRHAM	ICHEC-EC-EARTH	DMI
RCA	MIROC-MIROC5	SMHI

### II-3. Méthodes

L'approche méthodologique adoptée pour l'étude s'est appuyée sur le calcul et l'analyse d'indicateurs climatiques et agro-climatiques. Ces indicateurs sont:

- l'Indice de Pluie Standardisé (IPS): Il permet de déterminer les périodes excédentaires et déficitaires sur une série de données.

Il s'exprime comme suit :  $IPS = \frac{Pi - \bar{P}}{\delta}$

- $P_i$  correspond à la précipitation saisonnière de l'année  $i$
- $\bar{p}$  précipitation moyenne de la série
- $\delta$  représente l'écart-type de la série.

L'IPS sera commenté en se basant sur le guide d'interprétation de l'Organisation Mondiale de la Météorologie

- l'anomalie de température, est l'écart entre la température mesurée en un lieu en degrés Celsius, positive ou négative, par rapport à la température moyenne normale (calculée sur une période d'au moins 30 ans) quotidienne, saisonnière ou annuelle observée dans une région géographique homogène.
- les dates de début, fin et la longueur de la saison des pluies : le début de la saison des pluies (noté DSP) est défini par la date après le 1er Mai à laquelle on a enregistré au moins 20mm de pluie sur 3 jours sans épisode sec excédant 7 jours dans les 30 jours qui suivent (Sivakumar, 1988). La fin de la saison des pluies (FSP) est définie par la date, après le 1<sup>er</sup> septembre, à laquelle on a au moins 20 jours consécutifs sans pluie. La longueur de la saison des pluies (noté LSP) est obtenue en faisant la différence entre les dates de fin et de début de saison (LSP= FSP – DSP).
- le coefficient de ruissellement, permet de déterminer la nature de l'écoulement de surface de la zone. La formule est la suivante :  $Cr = \frac{Rs}{Pr}$ 
  - $Rs$  correspond au ruissellement de surface
  - $Pr$  correspond à la précipitation
- Coefficient de variation de la précipitation qui permet de déterminer l'écart de la distribution de la précipitation par rapport à la moyenne de la zone. Il est calculé par la formule suivante :  $Cv = \frac{\sigma}{\mu}$

- $\sigma$  représente l'écart-type
- $\mu$  correspond à la moyenne de la précipitation dans une période donnée
- La variation diurne, permet de connaître l'ensoleillement saisonnier avec l'expression suivante : Ecart-thermique =  $T_{\max} - T_{\min}$ 
  - $T_{\max}$  : température maximale
  - $T_{\min}$ , température minimale.
- Afin de connaître la contribution de chaque ruissellement sur le ruissellement total durant les différentes saisons, nous avons calculé le rapport de ces ruissellements (surface et base) par rapport à l'écoulement total.  $\frac{Rs}{Rt}$  et  $\frac{Rb}{Rt}$ 
  - $Rs$  : ruissellement de surface
  - $Rb$  : ruissellement de base
  - $Rt$  : ruissellement total
- Fréquence de la précipitation : elle permet de connaître la nature des précipitations en termes d'apparition ; elle est calculée avec cette formule ci-dessous :
$$F = \frac{Ni}{NT} * 100$$
  - $Ni$ , représente le nombre de fois où les précipitations sont supérieures à 1 mm dans la saison (Juillet, Août et Septembre).
  - $NT$ , correspond au nombre de jours de la saison choisie.
- Intensité de la précipitation : détermine le degré de précipitation. Il est calculé en utilisant CDO (eca\_sdi), qui est une collection de commandes pour le traitement standard de données climatiques.

Soit  $PR_{wj}$  la quantité de précipitations quotidiennes lors des jours humides,  $PR \geq 1$  mm dans la période  $j$ . Si  $W$  représente le nombre de jours humides dans  $j$ , alors :

$$\text{➤ } SDII_j = (\sum_{W=1}^W PR_{Wj}) / W$$

### Conclusion

Les différentes bases de données utilisées dans cette étude décrivent bien la variabilité des paramètres ainsi que leurs variations au cours du temps sur le bassin versant du Ferlo.

Les méthodes présentées ont permis d'obtenir les différents résultats présentés dans ce qui suit (Chapitre III).

## CHAPITRE III : Résultats et discussions

### Introduction

Cette partie est réservée à la présentation des résultats et de leurs discussions. Nous présentons d'abord les résultats obtenus avec les données d'observations et la moyenne d'ensemble des modèles de 1976 à 2005 et ensuite les changements potentiels attendus sous les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 dans le futur proche (2021-2050) et le futur lointain (2071-2100).

### III.1 Variabilités climatiques et hydrologiques observées

#### III.1.1 Précipitation

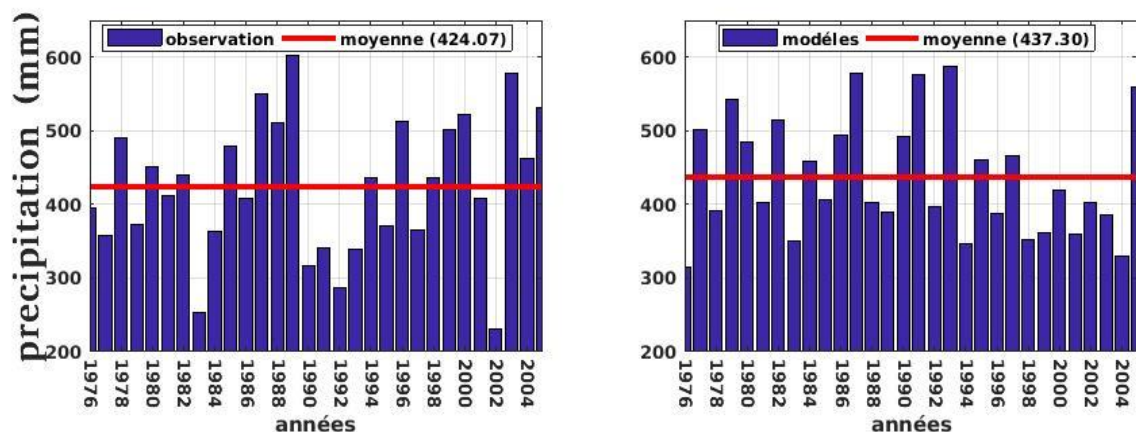
##### III.1.1.1 Cumul pluviométrique et indice de pluie standardisé

L'analyse des précipitations au Sénégal montre une forte variabilité interannuelle à décennale. Cette variabilité a affecté le bassin versant du ferlo dont le cumul annuel est analysé dans les lignes qui suivent.

L'analyse du cumul pluviométrique moyen annuel (figure 8) révèle que la zone du Ferlo présente des cumuls de pluies compris entre 200 à 650 mm avec une moyenne de 424,07 mm pour les données d'observation (figure 8a) et 437,30 pour la moyenne d'ensemble des trois modèles (figure 8b). La distribution de cette précipitation par an n'est pas homogène dans le temps. Elle présente en moyenne des années très excédentaires (1980, 1982, 1987-2005) et des années très déficitaires (1983, 1990, 1991, 1992, 2002).

Ces résultats sont conformes aux études de Faye *et al.* (2011) qui évoquent dans cette zone, une pluviométrie très faible et très instable avec une moyenne de 422.6 mm par an sur une période de 1951 à 2004.

Pour mieux caractériser ces variations, l'Indice de Pluie Standardisé (IPS) saisonnier est montré à la figure 9.



**Figure 8:** Cumuls interannuels moyens des précipitations; a: données de CRU et b: moyenne d'ensemble des modèles

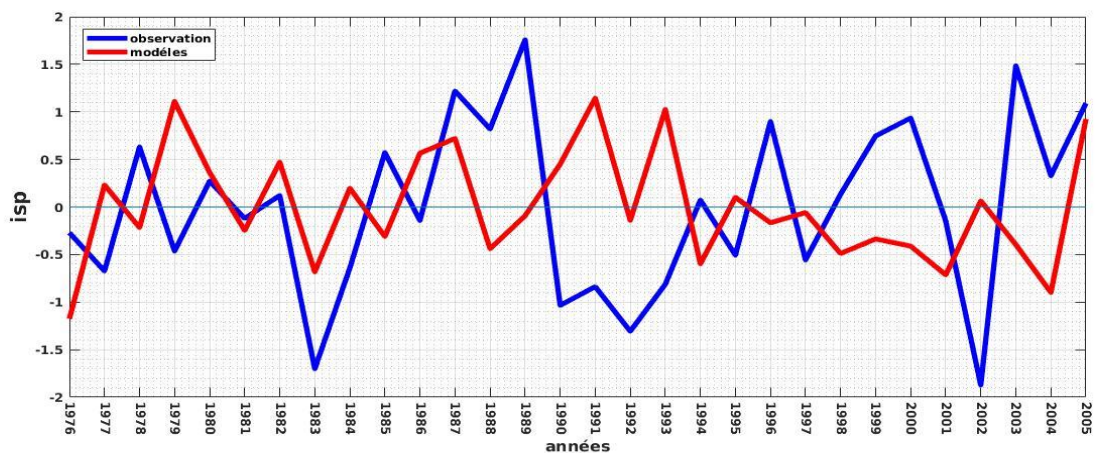
L'évolution de l'indice de pluie standardisé montre des fois des années déficitaires et tantôt des années excédentaires.

En fait, Il est possible d'affirmer que depuis vingt ans (1971 à 1990), la zone du Ferlo (Khalifaoui, 1991) et d'une façon générale l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest (Claude et Chevallier, 1991), souffre d'un déficit pluviométrique quasi-permanent.

Cette sécheresse peut se caractériser selon Albergel et al. (1985) par son caractère généralisé, persistant et intense (grandes sécheresses de 1963-1973 et 1983-1984).

De 1976 à 2005 les résultats de ces indices peuvent être interprétés en fonction des années humides et sèches.

- **1976 à 1984** : période sèche et très intense en 1983 (figure9). Cette période est située dans la période de 1977 à 1984, qui correspond à une période déficitaire au sahel selon Cissé, (2016).
- **1985 à 1989** : période pluvieuse avec des maximums notés aux années 1987 et 1989
- **1990 à 2005** : période où les précipitations sont des fois proches de la normale avec des occurrences d'années très sèche (2002) et d'années très humides (2005).



**Figure 9:** Evolution de l'indice standardisé des précipitations moyenne sur le bassin versant du Ferlo.

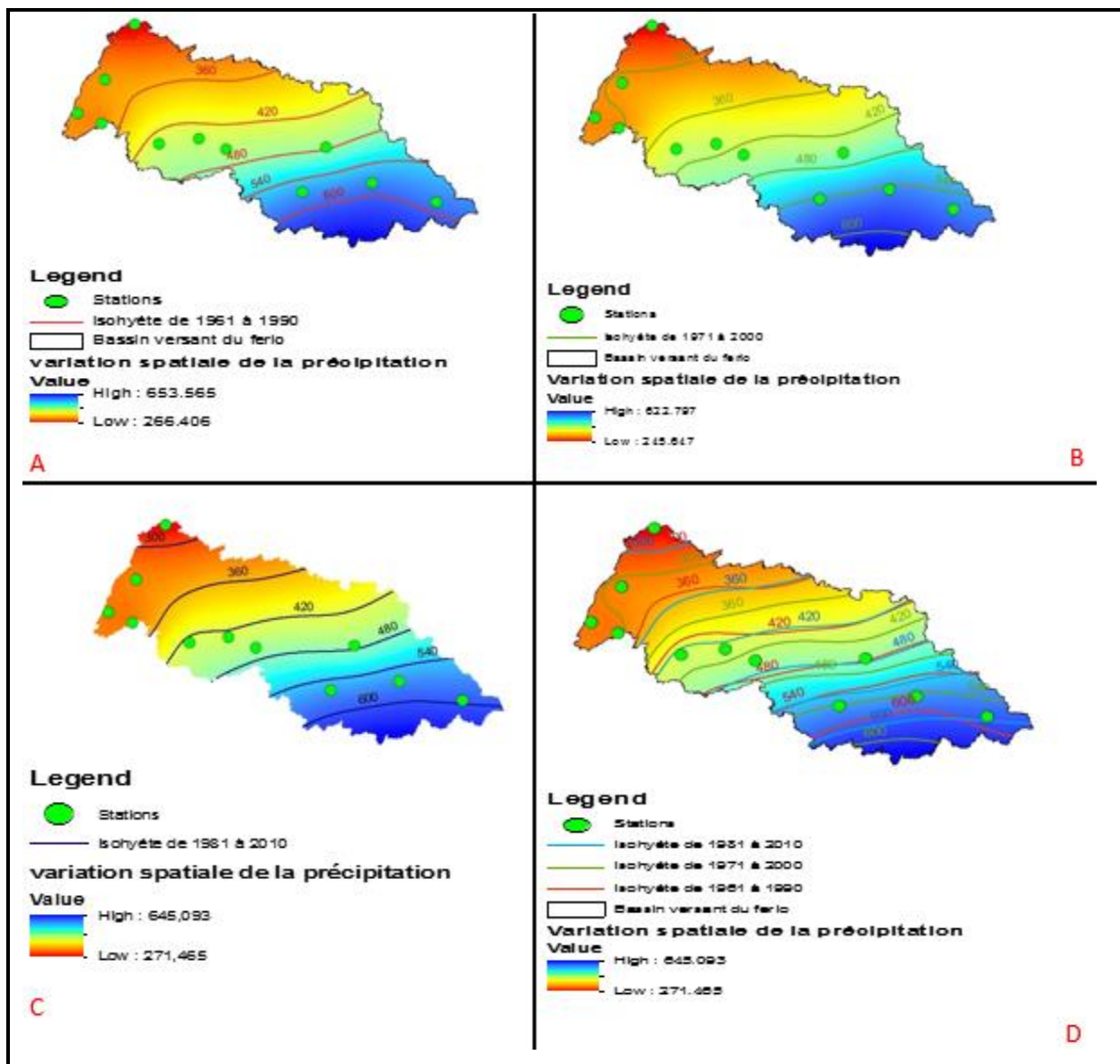
### III.1.1.2 Variation des isohyètes dans la zone du Ferlo de 1961 à 2010

La variation des isohyètes (lignes d'égale valeur de précipitation) dans la zone du Ferlo révèle que la zone Nord du Ferlo admet des isohyètes de valeur plus petit que celle de la zone sud (figure 10) ce qui montre une distribution spatiale irrégulière dans cette partie du Sénégal.

## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

De 1961 à 1990 (figure 10 A), les isohyètes sont compris entre les valeurs 300 et 600 mm et positionnés respectivement dans la partie nord et sud. De 1971 à 2000 (figure 10 B), on note un déplacement important de ces isohyètes vers le sud. Contrairement à la période 1971-2000, la période 1981 à 2010 (figure 10 C) est marquée par un léger déplacement des isohyètes vers le sud par rapport à la période de référence 1961 à 1990.

Sur la synthèse (figure 10 D), nous notons un déplacement vers le sud des isohyètes par rapport à la période de référence 1961 à 1990. Par conséquent, plus on avance vers le sud dans la zone, plus la pluviométrie augmente, ce qui est confirmé par les travaux de (Fall ,2014), qui évoque qu'à partir des années 1970, il est noté une migration des valeurs 400 mm et 500 mm vers le sud dans la zone du Ferlo.



**Figure 10:** Variation des isohyètes suivant les normales de l'OMM (1961 à 1990, 1971 à 2000 et 1981 à 2010) avec les données de CRU.

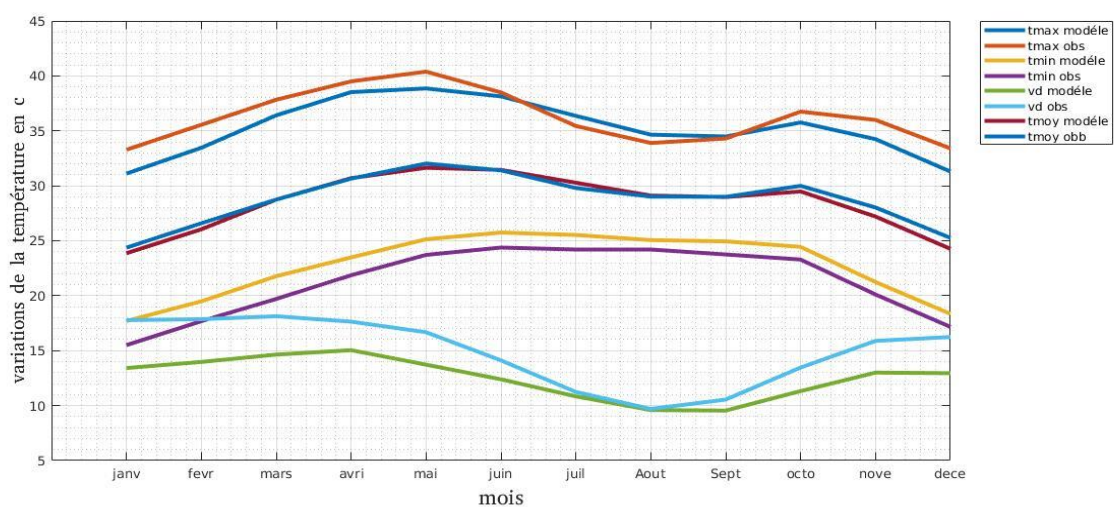
### III.1.2. Variation saisonnière des températures

Le découpage de l'année en deux saisons est basé sur les températures moyennes mensuelles observées au Sénégal. Ce découpage est différent de celui utilisé par le GIEC, qui concerne, d'une part, la période de décembre à février qui est incluse dans notre saison fraîche et d'autre part celle de juin à août qui est aussi au cœur de notre saison chaude. Pour notre part, nous avons tenu à prendre en compte les douze mois de l'année pour être plus précis dans l'analyse des variations saisonnières de la température.

Les résultats de la figure 11, représentant la variation diurne, la température minimale, maximale et moyenne révèlent :

- une température moyenne comprise entre 24 °C à 32 °C dont le maximum est observé au mois de mai et le minimum noté au mois de janvier (figure 11).
- Une température maximale (minimale) qui varie entre 33°C à 40°C (15 à 24°C) et entre 31°C à 38°C (18 °C à 26°C).
- une variation saisonnière diurne, beaucoup plus forte pendant la saison sèche (octobre – mai) que pendant la saison des pluies (juin – septembre). Cette faible valeur de la variation diurne pendant la saison des pluies peut être du soit, par une forte couverture nuageuse, l'humidité moyenne, le relief, la durée relative des jours et des nuits.

Nos résultats des différents données CRU et moyenne d'ensemble des modèles (REMO, HIRHAM, RCA) sont confirment aux études de *Ndiaye et al., 2013*; Niang, 2009 qui évoquent que la température moyenne oscille autour de 27,73 °C et fluctue entre une moyenne maximale de 30,19 °C au mois d'octobre et minimale de 24,48 °C au mois de janvier.

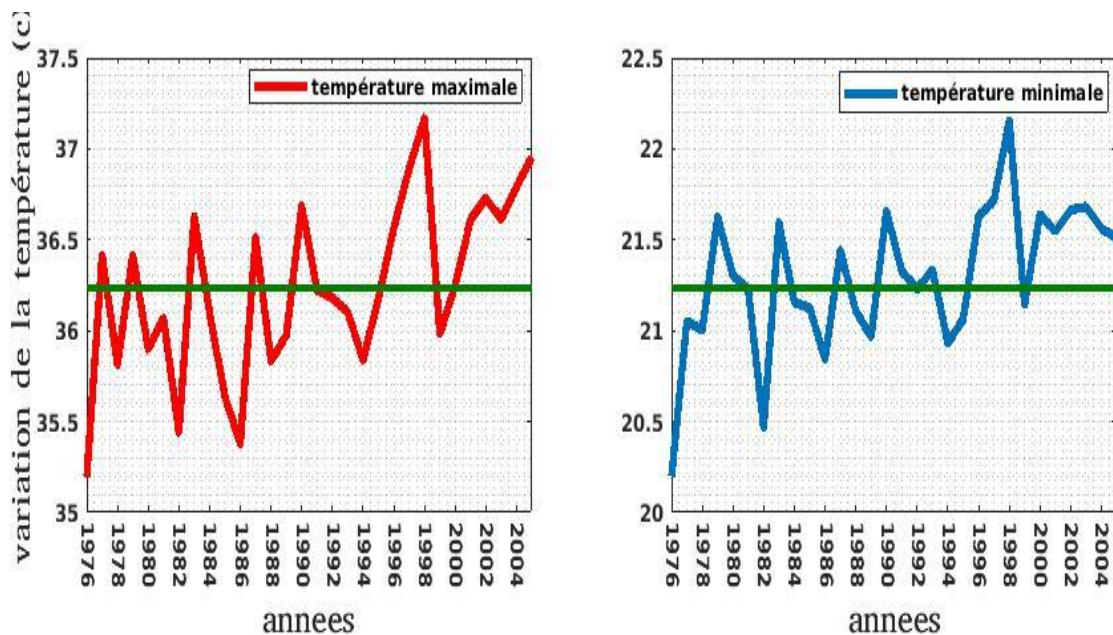


**Figure 11:** Variation saisonnière de la température dans le bassin versant du Ferlo de 1976 à 2005 avec les données de CRU et moyenne d'ensemble des modèles.

### III.1.2.1 variation interannuelle de la température maximale et minimale

L'évolution annuelle des températures maximales et minimales dans la zone du Ferlo montre, une même variation de ces variables de 1976 à 2005. Cependant on note, une tendance à la baisse de 1976 à 1994 car inférieure de la moyenne 36.23 °C pour les températures maximale et 22.5 °C pour les températures minimales (figure 12).

De 1995 à 2005 la tendance s'est augmentée avec un maximum noté à l'an 1998. Ces tendances, baisse et hausse observées sur les températures pourraient être due en partie à l'augmentation et baisse des pluies observées au niveau de la moyenne d'ensemble des modèles (figure 8a ou 8b)



**Figure 12:** Evolution de la température maximale et minimale dans le bassin versant du Ferlo. Le trait (en vert) représente la moyenne des données utilisées (CRU).

### III.1.2.2 Anomalies de la température

Dans le bassin versant du Ferlo, nos résultats sur l'anomalie de la température révèlent que:

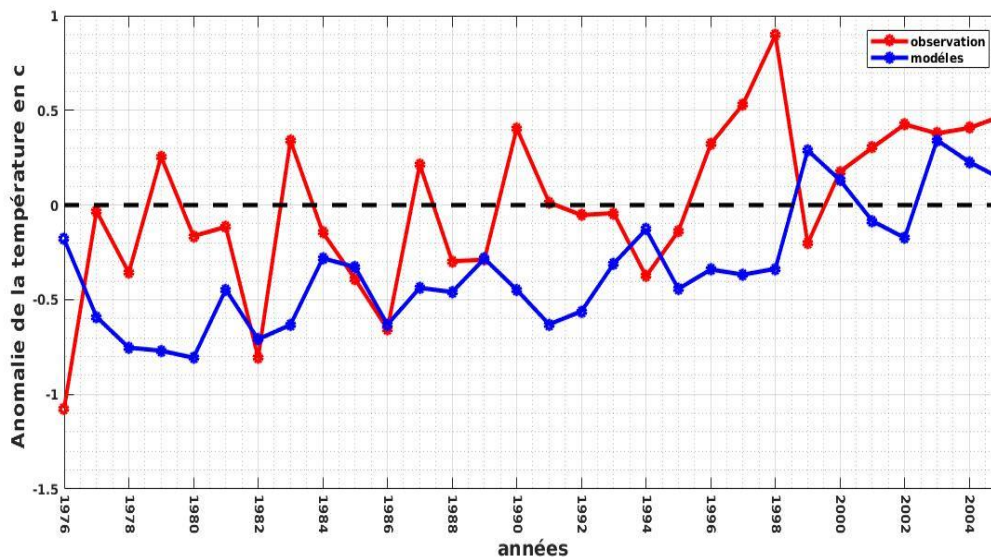
- de **1976 à 1994**, l'anomalie est en moyenne proche à la normale pour les observations et très inférieure à la normale pour la moyenne d'ensemble des modèles. Cette variation de l'anomalie dans cette période est en baisse dans l'ensemble.
- de **1995 à 2005**, l'anomalie de la température augmente et un pic observé en 1998 (figure13).

Ces résultats sont conformes aux études de :

- *Noblet et al.,(2018)* évoquent que la tendance de la température se structure comme suit: de 1969 à 1994, la température globale est proche de la normale et de 1995 à 2014, les

écarts thermiques peuvent dépasser 1°C au niveau de laquelle 1998 apparaît comme l'année la plus chaude.

- Sultan et al., (2015) : 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.
- Bodian, (2014) et Sagna et al., (2016) : au Sénégal, la tendance générale à l'échelle annuelle confirme une hausse de la température par rapport à la normale 1969-1994.



**Figure 13:** Variabilités interannuelles de l'anomalie de la température de 1976 à 2005 trait bleu moyenne d'ensemble des modèles et rouge les données de CRU.

### III.1.3 Coefficient de variation

Permettant d'apprécier le degré de variabilité des pluies dans une zone, Faye et al. (2011) admettent que le bassin versant du Ferlo a une valeur de 0,3 sur la période 1951-2004 soit une dispersion de 30 % par rapport à la moyenne. Dans nos études, pour connaître cette dispersion, nous avons choisi quatre stations de référence: Barkedji, Ranérou Richard-Toll et Velingara-ferlo

Nos résultats issus des données de CRU et moyens d'ensemble des modèles (tableau 2) montrent les variations dans les différentes stations : Fort coefficient de variation (CV) à la station de Richard-Toll suivi des stations de Ranérou et Barkedji et la station de Velingara-ferlo qui admet le plus petit coefficient de variation. A noter plus le CV est élevé, moins la station reçoit de précipitation.

La conclusion à tirer est que les précipitations de la station de Richard-toll sont plus faibles que celles de Barkedji, Ranérou et Velingara-ferlo qui reçoivent de fortes précipitations. Cela est

## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

confirmée par Ba *et al* (2018) qui évoquent, la pluviométrie diminue au fur et à mesure que l'on avance dans la partie nord correspondant au domaine sahelien.

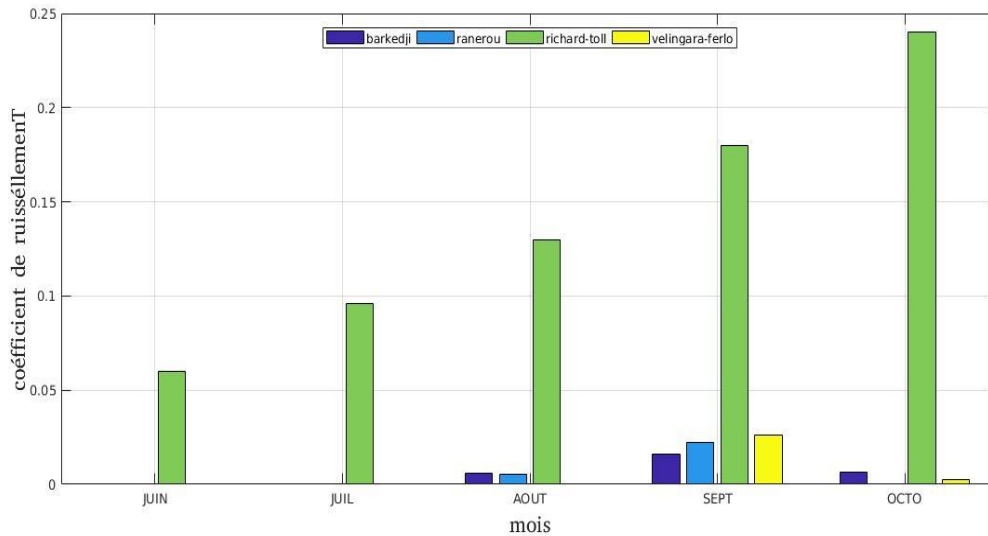
**Tableau 2:** Coefficient de variation de la précipitation dans le bassin versant du Ferlo de 1976 à 2005 avec les données de CRU (observation) et la moyenne des modèles (simulation)

stations	Barkedji	Richard-toll	Ranérou	Velingara-ferlo
Observation	0,22	0,35	0,23	0,20
Simulation	0,27	0,45	0,26	0,24

### III.1.4 Coefficient de ruissellement

Pour caractériser la capacité d'un bassin versant à ruisseler, un indice est très souvent utilisé en hydrologie de surface. Cet indice, est le coefficient de ruissellement. Il est calculé dans le bassin versant du Ferlo afin de déterminer la relation pluie et ruissellement. Ce coefficient est fortement influencé par l'imperméabilisation des surfaces mais aussi par la pente, le croisement des surfaces de ruissellement, la fréquence de la pluie...

Les résultats de nos études sur cet indice (figure 14) calculé à partir de nos stations de référence qui sont Barkedji, Ranérou, Richard-toll et Velingara-ferlo montrent qu'au mois de septembre y'a un écoulement de surface sur toute l'étendue du bassin dont le maximum est observé au niveau de station de Richard-toll. A l'exception de ce mois de septembre, la station de Richard-toll a enregistré un coefficient de ruissellement sur tous les mois pris dans cette étude contrairement à la station de Barkedji, Ranérou et Velingara-ferlo où l'indice est absent aux mois de juin et juillet. Cette tendance observée au niveau des stations pourrait être due soit à la couverture végétale, soit aux types de sols ou soit l'emplacement de la station comme celle de Richard-toll qui se localise dans le fleuve Sénégal.



**Figure 14:** Coefficient de ruissellement de 1976 à 2005 dans le bassin versant du Ferlo (JJASO) calculé à partir des données des modèles REMO.

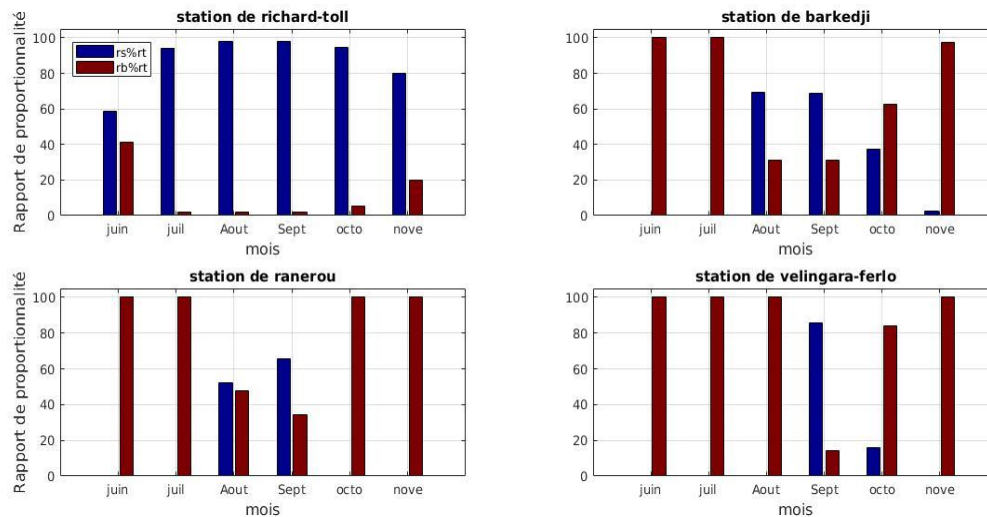
### III.1.5 Rapport de proportionnalité des écoulements de surface et de base

Le terme écoulement se rapporte toujours à la circulation gravitaire de l'eau. IL couvre plusieurs réalités selon la profondeur à laquelle on se situe.

Afin de déterminer lequel de ces écoulements prédomine dans le bassin versant du Ferlo, le rapport de proportionnalité est calculé à partir de l'écoulement total.

Les résultats montrent une variation des rapports de proportionnalité irrégulière un peu partout dans la zone du Ferlo (figure 15). Sur les stations Barkedji, Ranerou et Velingara-Ferlo, le rapport de proportionnalité de l'écoulement de surface est beaucoup plus important qu'au rapport de proportionnalité de l'écoulement de base pendant les mois les plus pluvieux (Août et Septembre). Contrairement à ces mois, Juin, Juillet, Octobre et Novembre sont marqués par une domination de l'écoulement de base par rapport à l'écoulement de surface.

Au niveau de la station Richard-toll, l'écoulement de surface domine du mois de Juin au mois de Novembre; cette dominance par rapport à l'écoulement de base pourrait être confirmée par les résultats trouvés sur le coefficient de ruissellement (figure 14).



**Figure 15:** Rapport de proportionnalité entre les écoulements de surface et de base par rapport à l'écoulement total (JJASON) de 1976 à 2005 dans le bassin versant du Ferlo calculé à partir du modèle REMO.

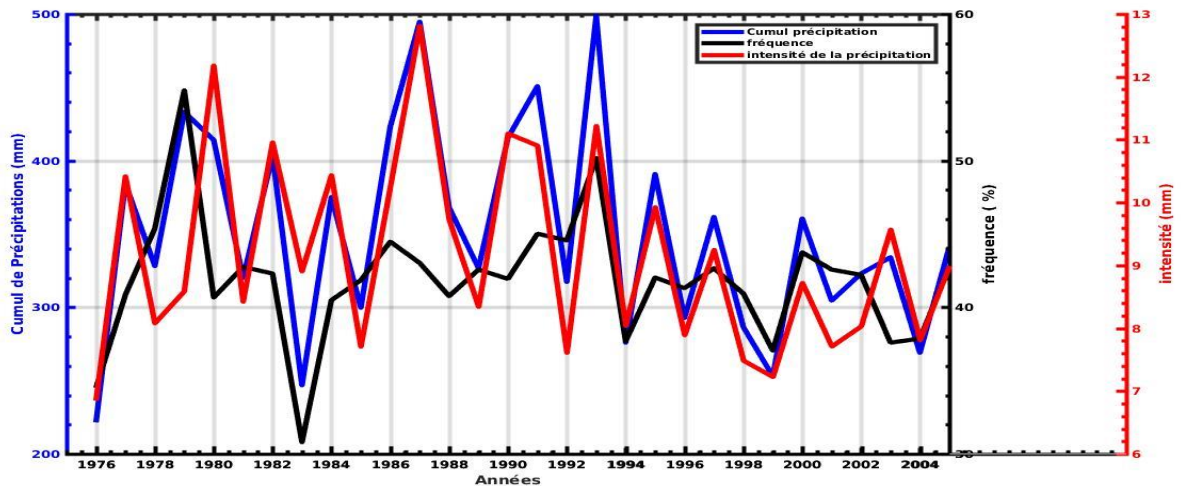
### III.1.6 Variation saisonnière du cumul, de l'intensité et de la fréquence des précipitations

La variabilité interannuelle des cumuls de précipitation et celle de l'intensité et la fréquence des précipitations est hétérogène dans le bassin versant du Ferlo de 1976 à 2005 (figure 16).

L'analyse de nos résultats montre une forte variabilité par rapport à la moyenne (350 mm/an). De 1976 à 1993, le bassin versant est considéré comme humide car renfermant des cumuls de précipitation important. Cette période humide renferme trois années excédentaires (1987, 1991, 1993) et trois périodes déficitaires (1976, 1983, 1985).

De 1994 à 2005, la zone est sèche et marquée par une diminution des paramètres de l'intensité, de la fréquence et du cumul de la précipitation.

En résumé, selon la moyenne d'ensemble des trois modèles climatique (REMO, HIRHAM, RCA), le cumul pluviométrique saisonnier est plus proportionnel de l'intensité qu'à la fréquence de la précipitation excepté les années 1979 et 1983 où on note de forte précipitation très fréquente et moins intense pour l'année 1979 et de faible précipitation moins fréquente pour l'an 1983.



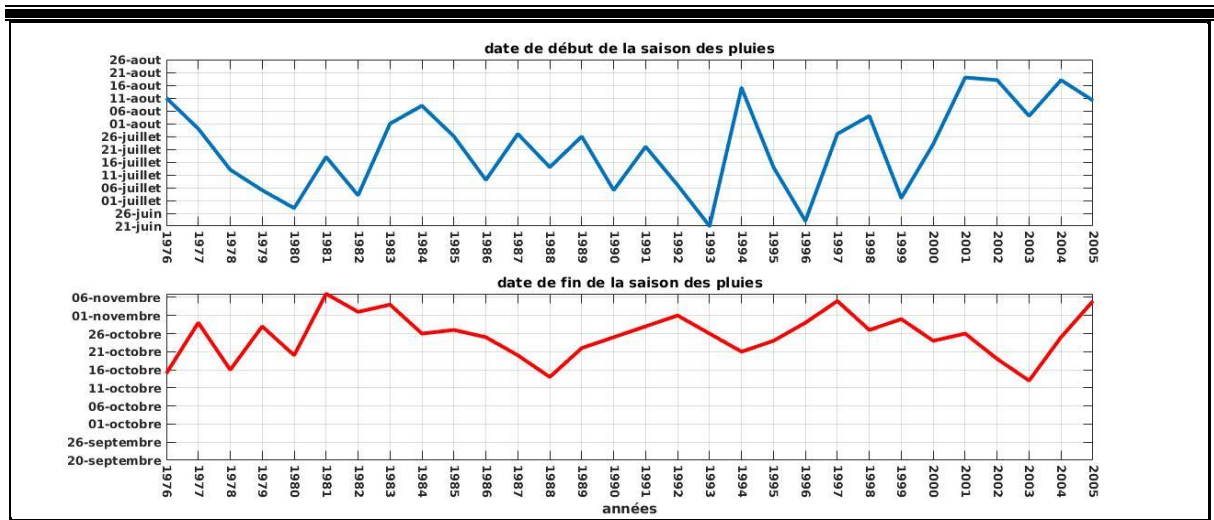
**Figure 16:** variation du cumul pluviométrique, intensité et fréquence de la précipitation dans le bassin versant du Ferlo de 1976 à 2005(jas) avec la moyenne d'ensemble des modèles (REMO, HIRHAM et RCA).

### III.1.7 Date de début et longueur de la saison des pluies

L'analyse du début de la saison des pluies (DSP) montre de façon générale que la saison des pluies commence de plus en plus tard. Le début de la saison varie entre mi-juin et mis Aout avec une forte variabilité interannuelle. Ce démarrage tardif de l'hivernage est remarqué grace à la moyenne d'ensemble des modèles. On peut distinguer deux périodes (Figure 17) :

- **1976 - 1999:** période à laquelle le DSP se tourne en moyenne autour du mois de juillet à l'exception du retard noté en 1976, 1983, 1984, 1994, 1997 et 1998.
- **2000 - 2005 :** période à laquelle l'hivernage démarre dans la première décade du mois d'aout ; ici le début est en retard par rapport à la date moyenne (27 juillet) de la période 1976 à 2005. Cette date de début est conforme à l'étude de (Gaye ,2017) qui évoque, qu'aux stations Nord-sénégal, 64% des cas la date de début oscille entre le 15 et 29 juillet.

## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

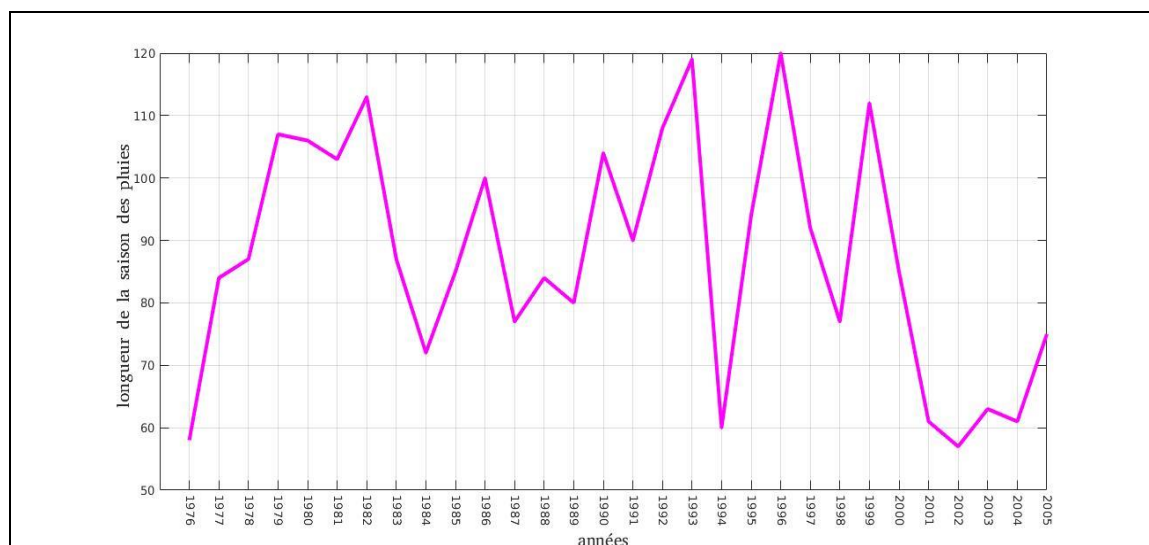


**Figure 17:** Evolution du début et fin de la saison des pluies moyennées sur la zone du Ferlo, calculée à partir de la moyenne d'ensemble des modèles.

Concernant la longueur de la saison des pluies (LSP), elle varie entre 58 et 120 jours sur la période 1976 - 2005. La moyenne d'ensemble capté par les tendances est de 87 jours.

On distingue principalement deux phases (figure 18) qui contiennent une forte variabilité Interannuelle :

- **1976 - 1999:** Période où la longueur de la saison augmente progressivement pour atteindre un maximum d'environ 120 jours en 1993 et 1996. Dans cette période on enregistre aussi un minimum respectivement 58 et 60 jours en 1976 et 1994.
- **2000 - 2005:** la LSP diminue progressivement. Cette diminution de la LSP est en phase avec la diminution du cumul pluviométrique notée sur la Figure 8.



**Figure 18:** Evolution de la longueur moyenne de la saison des pluies dans le Ferlo, calculée à partir des dates de début et fin de la saison des pluies.

## III.2 Indicateurs de changement climatique

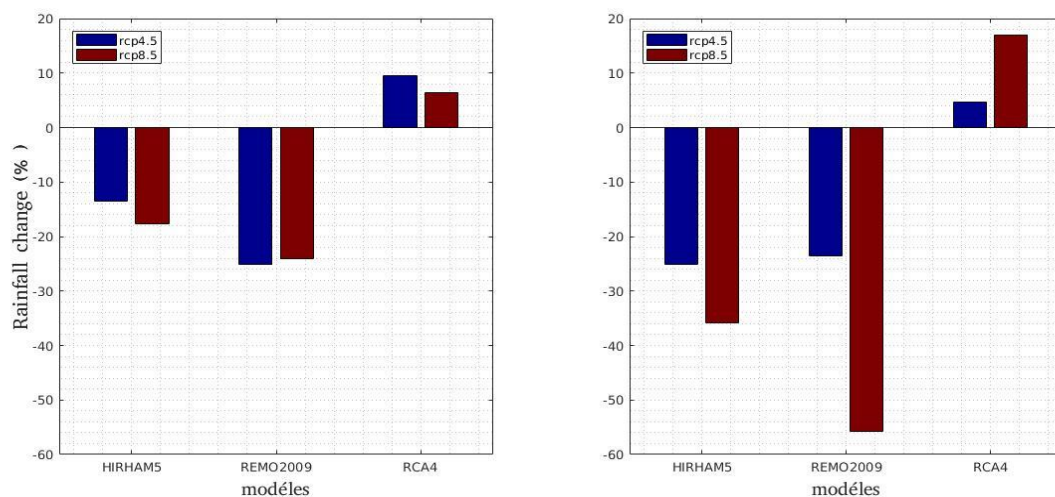
### III.2.2 Précipitation

La précipitation reste la variable climatique la plus difficile à projeter, surtout dans le contexte Ouest-africain, qui est 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 (Noblet *et al.*, 2018).

L'analyse de nos résultats (figure 19) montre que quels que soient les horizons (2050 ou 2100) et les deux scénarios considérés (RCP4.5 et RCP8.5), la pluviométrie pourrait diminuer dans la zone du Ferlo d'après les modèles REMO et HIRHAM et augmentée d'après le modèle RCA. Ceci est confirmé par (Sarr *et al.*, 2017) qui selon eux, au Sénégal les MCR s'accorde sur une diminution des précipitations à l'exception du modèle RCA4.

De manière générale, ces diminutions à l'horizon 2100 sont plus importantes que celles simulées pour l'horizon 2050. Les divergences peuvent être expliquées 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).

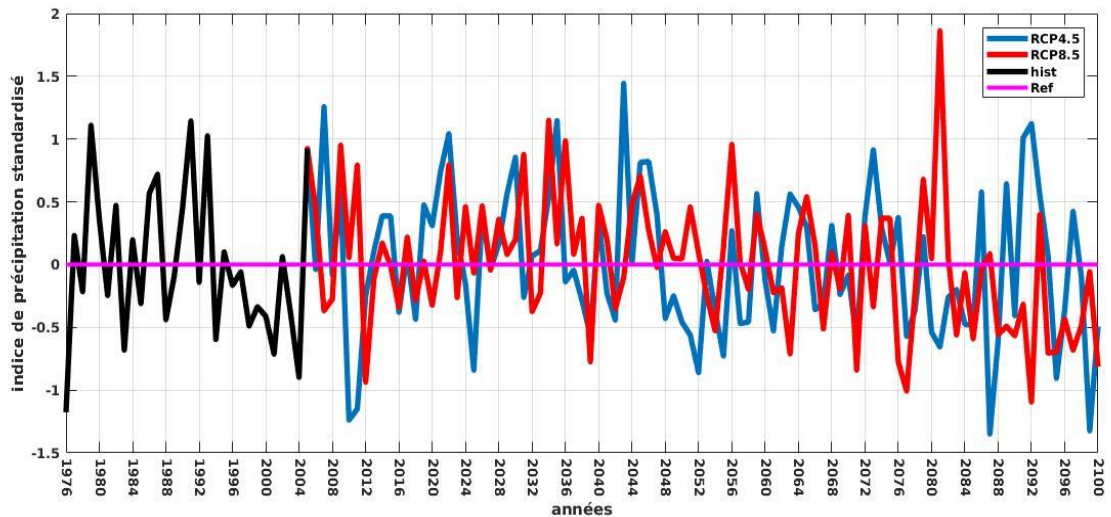


**Figure 19:** \_Gauche: changement des précipitations (exprimé en %) au Ferlo entre le futur proche (2021/2050) et la période de référence (1976/2005) pour les modèles HIRHAM, RCA REMO selon les scénarios rcp45 rcp8.5 .Droite: idem pour la figure droite pour le futur proche et lointain. (2071/2100).

Concernant l'évolution de l'IPS (figure 20), entre les années 2006 et 2100 ; les précipitations (2006 à 2079) pourraient être des fois proches de la normale. Par contre, Au-delà de cette

période, les projections montrent une recrudescence des événements de sécheresse qui pourraient être extrêmement secs.

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

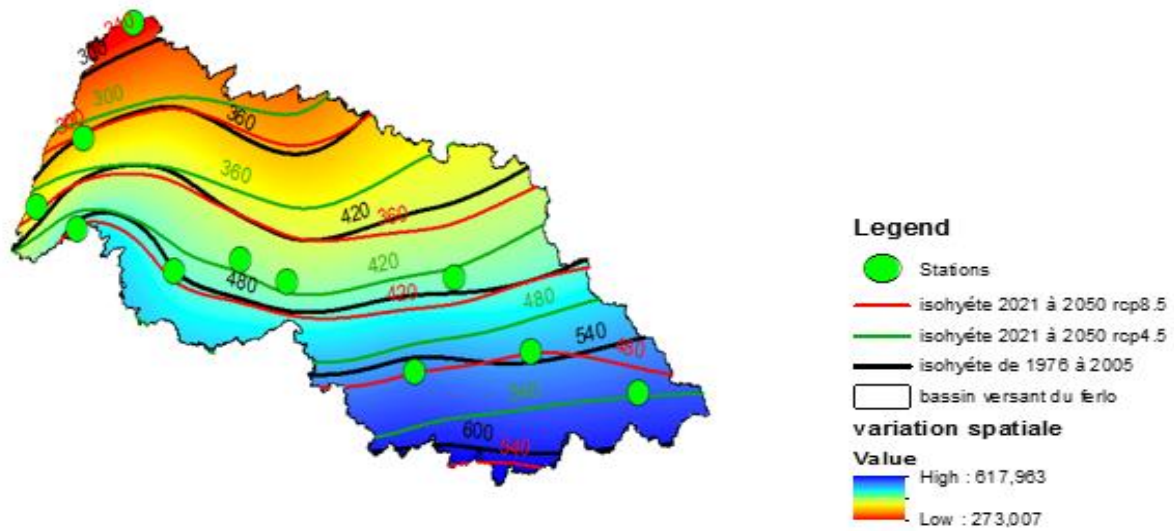


**Figure 20:** Evolution de l'indice de pluie standardisé de l'historique (noire), du scénario RCP4.5 (bleu) et du scénario RCP8.5 (rouge).

### III.2.2.1 Variation des isohyètes dans le futur 2021-2050 et 2071-2100 dans le bassin versant du Ferlo

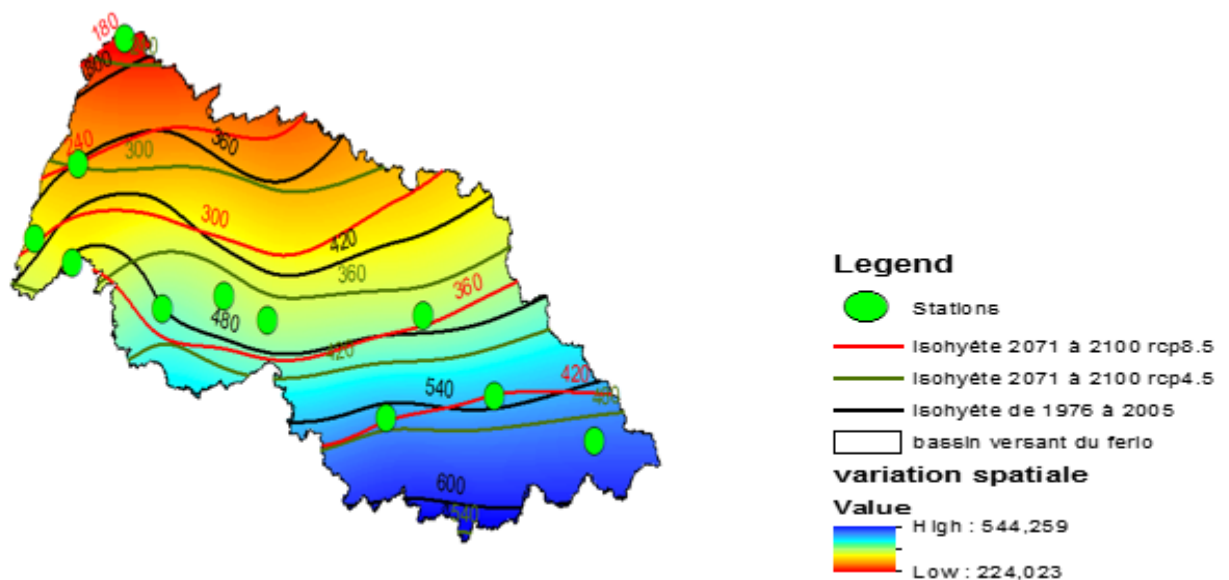
Nos précédents résultats (figure 19 et figure 20), montrent une diminution interannuelle de la précipitation dans le futur au niveau du Ferlo. Pour ce qui est de la variation spatiale dans le futur, nos études révèlent dans les périodes 2021- 2050 et 2071- 2100 sous les scénarios (RCP4.5 et RCP8.5) une variation spatiale des isohyètes vers les sud.

Pour le futur proche 2021- 2050 (figure 21) on observe, un décalage par rapport à la période de référence beaucoup plus important sous le scénario RCP8.5 que celui de RCP4.5. Cette période est marquée par une disparition de l'isohyète 600mm et présence de l'isohyète 200mm vers le nord du bassin. Ceci confirme la diminution des précipitations dans le futur.



**Figure 21:** Isohyètes dans le futur proche (2021 à 2050) avec les différents scénarios rcp4.5 et rcp8.5 noire (période de référence 1976-2005), vert rcp4.5 (2021-2050), rouge rcp8.5 (2021-2050).

Pour le futur lointain (2071-2100), on observe une migration de l'isohyète 300 mm vers le centre du bassin et présence de l'isohyète 500 au sud du bassin (figure 22). Ces déplacements d'isohyètes de faible valeur symbolisera une diminution importante de la précipitation dans cette zone.



**Figure 22:** Isohyètes dans le futur lointain (2071 à 2100) avec les différents scénarios rcp4.5 et rcp8.5 noire (période de référence 1976 -2005), vert rcp4.5 (2071-2100), rouge rcp8.5 (2071-2100).

**III.2.3 Température**

Dans le futur (figure 23), les températures maximales et minimales vont connaître, une augmentation par rapport aux valeurs de la période de référence (1976 - 2005) quel que soit le scénario considéré. L’augmentation est plus forte pour les températures maximales que pour les températures minimales.

A l’horizon 2050, la différence de changement entre les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 est de l’ordre de 0.19°C tandis qu’à l’horizon 2100, le changement induit avec le scénario RCP8.5 est plus important que celui avec le RCP4.5 de l’ordre de 1.71°C. Cette variation au niveau des scénarios est conforme aux études de (Mbaye *et al.*, 2015) qui évoque qu’une augmentation générale de la température est prévue sur l’ensemble du bassin du fleuve sénégal pour les deux scénarios mais plus prononcé dans le cadre RCP8.5.

En sommes, dans le bassin versant du Ferlo les modèles prévoient une augmentation en moyenne de 1 à 1.5°C pour le futur proche et de 2 à 4°C pour le futur lointain (figure 23). Ce ci est confirmé par les études de Tall *et al.* (2017) qui montrent au Sénégal, une hausse des températures variant entre 1.5 et 2.5°C pour les RCP4.5 et pour le scénario RCP8.5, la hausse des températures varie entre 2.5°C et 6°C.

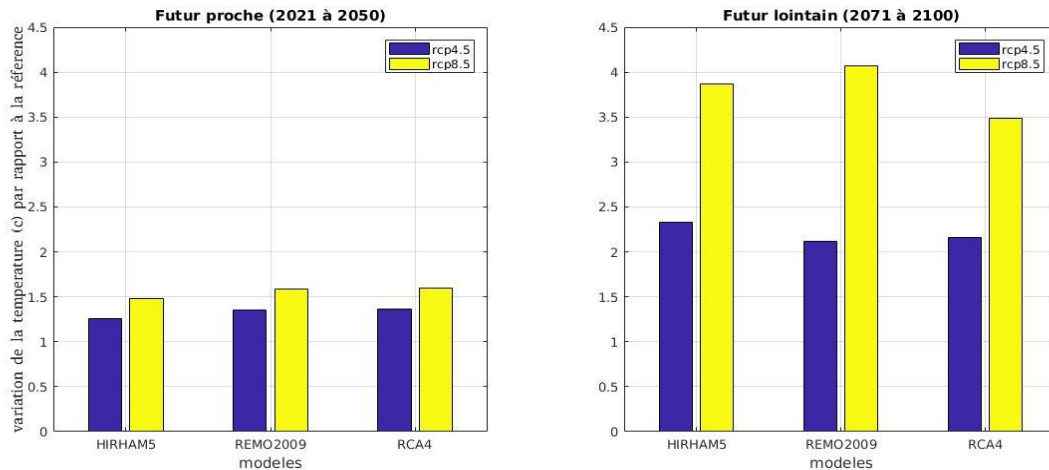
**Tableau 3:** Changement absolu moyen des températures maximales et minimales pour les horizons 2050 et 2100 sous les deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5). Les données utilisées sont celle de la moyenne d’ensemble des trois modèles

Variables climatiques	Scénarios	Horizon 2050 (2021-2050)	Horizon 2100 (2071-2100)
<i>Températures maximales</i>	<b>RCP4.5</b>	<b>+1.35</b>	<b>+2.31</b>
	<b>RCP8.5</b>	<b>+ 1.53</b>	<b>+3.83</b>
<i>Températures minimales</i>	<b>RCP4.5</b>	<b>+1.25</b>	<b>+2.08</b>
	<b>RCP8.5</b>	<b>+1.45</b>	<b>+3.98</b>

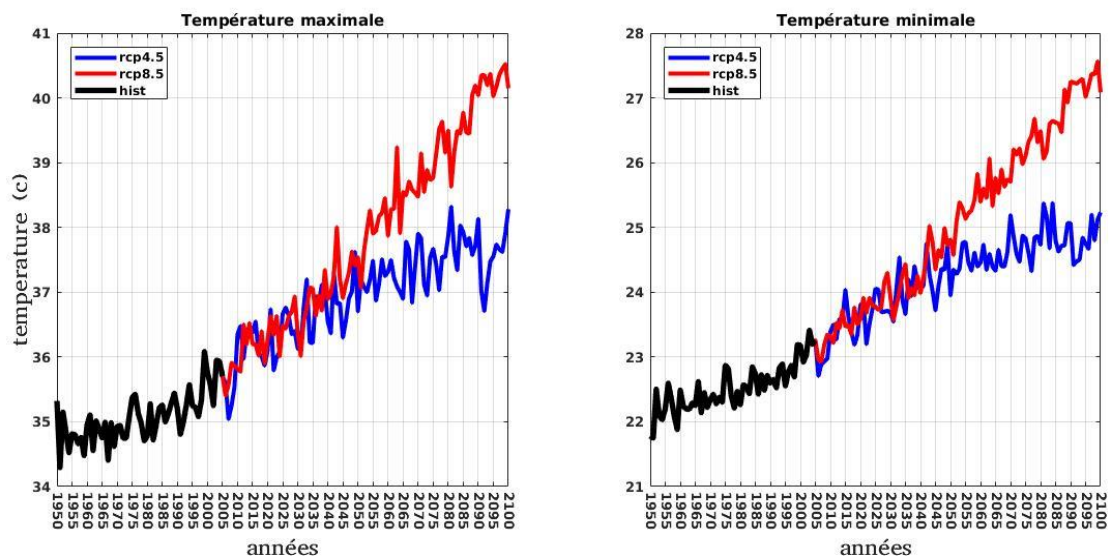
L’analyse de l’évolution des températures maximales et minimales de 1976 à 2100 (Figure 24) montre que de 1976 jusque vers les années 2005, les températures varient peu ; Jusqu’après cette période les deux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (Figure 24, courbes bleue et rouge) s’éloignent entre eux ce qui explique la forte différence obtenue dans le Tableau 3. En moyenne d’après la moyenne d’ensemble des modèles, la température de la zone du Ferlo augmentera.

## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

Ces résultats sont conformes aux études de Dème et al. (2015) qui évoque que dans 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. Selon Ardoin-Bardin et al., (2005), l'ensemble des MCG, prévoit une augmentation de la température pour les décennies à venir, qui peut atteindre jusqu'à 4°C en moyenne sur l'ensemble de la surface terrestre.



**Figure 23:** Evolution de la température moyenne: bleue Scénario RCP4.5, jaune Scénario RCP8.5. Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 3 modèles.



**Figure 24:** Evolution de la température maximale, minimale de l'historique (noire), du Scénario RCP4.5 (bleue) et du scénario RCP8.5 (rouge). Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 3 simulations des modèles.

### III.2.4 Fréquence et intensité de la précipitation dans le futur

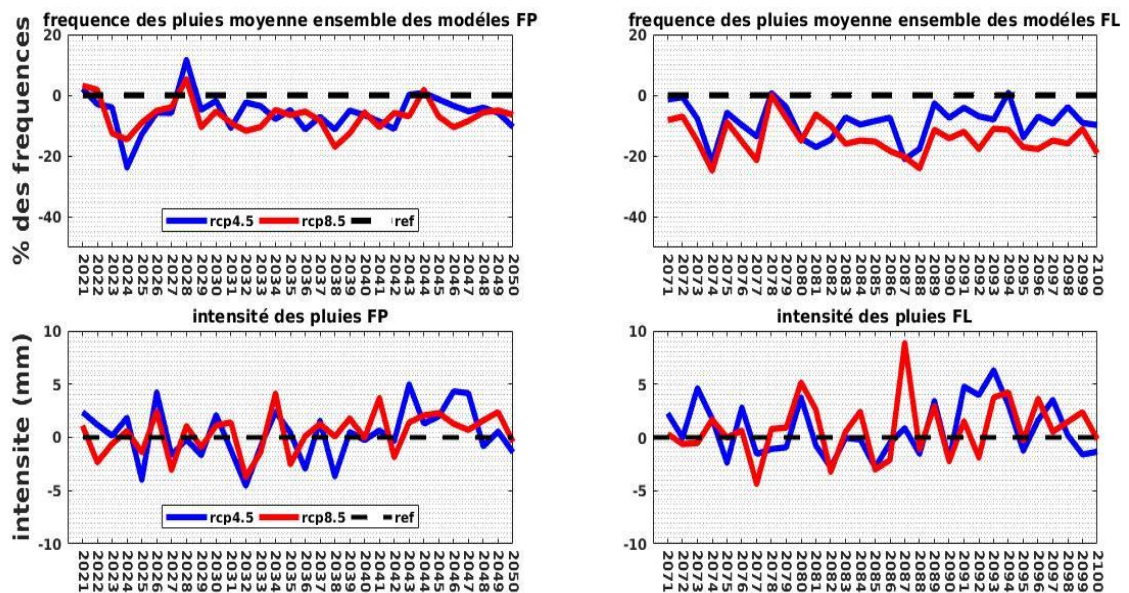
Dans la zone du Ferlo, de l'horizon 2050 à l'horizon 2100, nos résultats ont montré une diminution de la fréquence saisonnière de la précipitation sous les deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5), qui est beaucoup plus accentué dans le futur lointain (2071 à 2100) et une intensité journalière qui pourrait augmentée dans le futur (figure 25).

## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

Ces résultats sont conformes à celle du GIEC, (2007) et à celle de Noblet et al., (2018) qui évoque que, 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.

Selon Sarr et Camara (2017) quand on considère les intensités de jour pluvieux, les MCR prévoient une augmentation sur toute l'Afrique de l'ouest en particulier sur le Sénégal excepté le modèle CanRCH4 qui prévoit une diminution sur tout le Sahel ouest.

Les conséquences de cette diminution de la fréquence et l'augmentation de l'intensité auront des impacts négatifs sur les ressources en eau sur le plan quantitatif que qualitatif et en parallèle sur le secteur agricole.



**Figure 25:** Evolution de la fréquence des pluies (a: première figure de la fréquence; b: deuxième figure de la fréquence), intensité journalière de la précipitation (c: première figure de l'intensité; d: deuxième figure de l'intensité), du Scénario RCP4.5 (bleue) et du scénario RCP8.5 (rouge). Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble.

Le changement du cumul, de la fréquence et de l'intensité de la précipitation dans le futur proche (2021 - 2050) et lointain (2071 - 2100) au Ferlo par rapport à la période de référence (1976 - 2005) ont montré respectivement à l'horizon 2050 et 2100 (Tableau 4):

- Un cumul de la précipitation qui varie de -29,26 à -47,56 mm pour le RCP4.5 et -44,03 à -87,06 mm pour le RCP8.5;
- La fréquence des pluies varie de -5,64 à -7,86 (%) pour le scénario RCP4.5 et -8,72 à 14,01 (%) pour le scénario RCP8.5 ;

## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

- L'intensité journalière de la précipitation augmente de +0,37 à 0,40 mm pour le RCP4.5 et 0,72 à 0,82 mm pour le RCP8.5.

La variabilité des différents paramètres précédents pourrait augmenter les risques des évènements extrêmes dans le futur au niveau du bassin versant du Ferlo.

**Tableau 4:** Changement absolu moyen des cumuls pluviométriques, fréquence et intensité de la précipitation pour les horizons 2050 et 2100 sous les deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5). Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des modèles.

Indicateurs Climatiques	Scénarios	Horizon 2050	Horizon 2100
Cumul pluviométrique (mm)	RCP4.5	-29,26 (mm)	-47,56 (mm)
	RCP8.5	-44,03 (mm)	-87,06 (mm)
Fréquence de la précipitation (%)	RCP4.5	-5,64 (%)	-8,726 (%)
	RCP8.5	-7,86 (%)	-14,01 (%)
Intensité journalière de la précipitation (mm)	RCP4.5	+0,37 (mm)	+0,72 (mm)
	RCP8.5	+0,40(mm)	+0 ,82(mm)

### III.2.5 Début et longueur de la saison des pluies dans le futur

L'analyse de la variation temporelle de 1976 à 2100 du début de la saison des pluies (DSP) montre que de 1976 à 2005 le début de la saison tournait autour de mis juin et mis aout avec une moyenne le 27 juillet. Les projections montrent une forte variabilité plus marquée sur le scénario RCP4.5 (Figure 26, courbe bleue) au moyen terme (2021-2050) que Pour le long

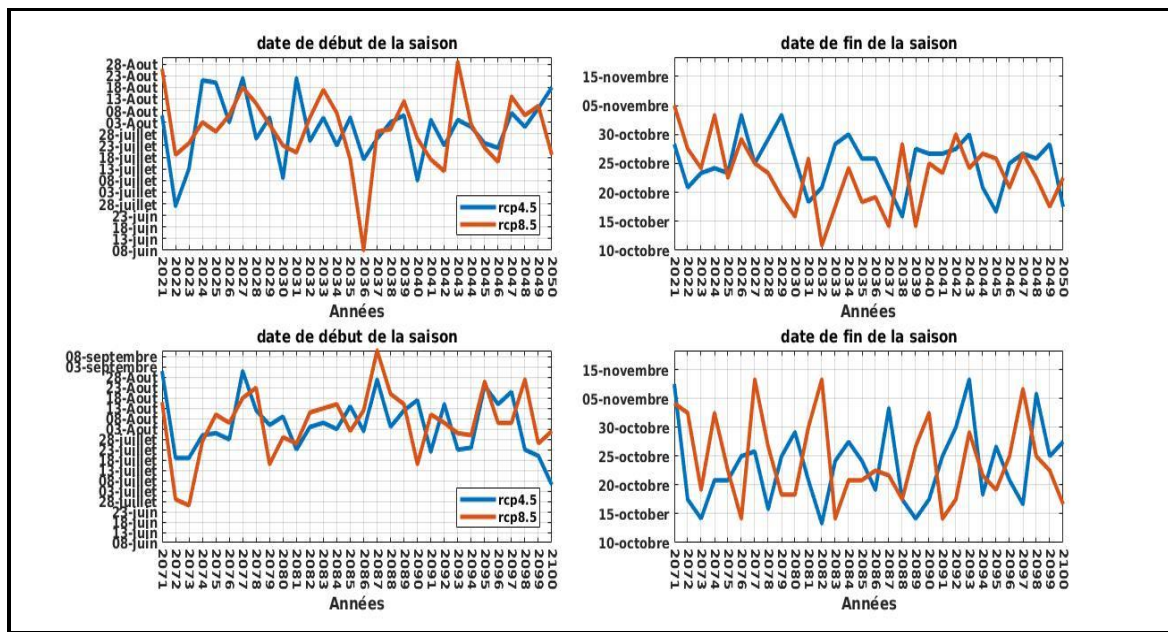
## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

terme (2071-2100), cette variabilité est plus importante pour le scénario RCP8.5 (Figure 26, courbe rouge) avec un retard qui s'accroît entre 2081-2089.

Pour les deux horizons, les saisons vont commencer de plus en plus tard.

A l'horizon 2050, nous pourrions avoir un retard d'environ 1 à 4 jours alors qu'à l'horizon 2100, ce retard pourrait s'accroître pour atteindre au plus 9 jours selon le scénario RCP8.5 (tableau 5).

Ces résultats sont conformes aux études de Diop et al, (1996) qui évoque, dans le nord du Sénégal, le démarrage est plus tardif, et des différences peuvent apparaître aussi avec d'autres travaux, notamment lorsque les dates sont calculées localement, sur des bases agro climatiques.



**Figure 26:** Evolution du date de début et fin de la saison des pluies du scénario RCP4.5 (bleue) et du scénario RCP8.5 (rouge) dans le futur proche (a: première date de début; b: première date de fin de la saison) et futur lointain (c: deuxième date de début et d: deuxième date de fin de la saison). Les données utilisées sont celles de la moyenne d'ensemble des 3 des modèles.

Pour ce qui est de la LSP, elle varie en moyenne à 87 jours de 1976 à 2005. Dans les projections de 2021 à 2100, nous notons une forte variabilité avec les deux scénarios (Tableau 5). Cette variabilité est plus forte à l'horizon 2100 avec une diminution respectivement de 7 et 6 jours pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Ceci montre l'existence d'une forte variabilité sur la fin de la saison (Tableau 6)

## Variabilité et changement hydro-climatiques dans le bassin versant du Ferlo (Sénégal)

**Tableau 5:** Evolution du date de début, de fin et de la longueur de la saison des pluies dans le Ferlo pour les horizons 2050 et 2100 sous les deux scénarios (RCP4.5 et RCP8.5). Les données utilisées sont celle de la moyenne d'ensemble des trois modèles

Indicateurs	Scénarios	Horizon 2050	Horizon 2100
<b>Début de la saison</b>	<b>RCP4.5</b>	+ 3 jrs	+8 jrs
	<b>RCP8.5</b>	+2 jrs	+9 jrs
<b>Fin de la saison</b>	<b>RCP4.5</b>	+ 4jrs	+1jrs
	<b>RCP8.5</b>	+1jrs	+3jrs
<b>Longueur moyenne de la saison des pluies</b>	<b>RCP4.5</b>	88 jrs	80 jrs
	<b>RCP8.5</b>	86 jrs	81 jrs

**Tableau 6:** les dates moyennes de fin, debut de la saison des pluies pour les trois periodes (reference, future proche et future lointain)

Dates	Référence (1976-2005)	Futur proche (2021-2050)	Futur lointain (2071-2100)
<b>Début de la saison</b>	27 juillet	30 juillet	05 Aout
<b>Fin de la saison</b>	24 octobre	27 octobre	26 octobre

### Conclusion

Dans ce dernier chapitre, il a été question de présenter les résultats recueillis.

Nous avons noté dans le bassin versant du ferlo une diminution progressive du cumul de la précipitation dans la future proche comme future lointain. Cela est accompagné par une augmentation de l'intensité journalière de la précipitation et une diminution de la fréquence des précipitations. Pour ce qui est des dates de début et longueur de la saison des pluies nos résultats montrent : Un démarrage tardif et une diminution de la longueur des saisons pluvieuses. En effet, il est important de clore notre travail par une conclusion générale.

---

### Conclusion et Perspectives

L'intérêt de cette étude est de chercher à mieux comprendre la variabilité hydro-climatique passée et future dans le bassin versant du Ferlo et les impacts potentiels de cette variabilité sur les ressources en eau. Pour cela, des indicateurs climatiques ont été calculés et analysés à l'aide de différents jeux de données. Les résultats montrent une diminution probable du cumul pluviométrique dans le futur, soit une diminution moyenne des scénarios RCP4.5 et RCP8.5 de 36.64 mm et 67.31 mm respectivement à l'horizon 2050 et 2100. Cette variation du cumul est accompagnée par une diminution de la fréquence de 6.75 à 11.36% et une augmentation de l'intensité journalière de la précipitation de 0.38 à 0.77 mm respectivement sous les deux horizons 2050 et 2100.

Pour ce qui est du début de la saison des pluies, la moyenne d'ensemble des modèles projettent un retard par rapport au début de la période de référence (27 Juillet). Ce retard probable pourrait entraîner un démarrage de l'hivernage dans la première moitié du mois d'août. Le début tardif de la saison des pluies va influencer la longueur de la saison des pluies. Cette dernière connaîtrait une diminution probable dans le futur et, pourrait être de l'ordre de 80 jours sous le scénario rcp8.5 à l'horizon 2100.

Les températures maximales et minimales connaîtraient une augmentation vers les horizons 2050 et 2100. A l'horizon 2050 les températures maximale et minimale pourraient augmenter au moins de 1.44°C et 1.35°C tandis qu'à l'horizon 2100, elles pourraient augmenter au moins de 3°C.

Le coefficient de variation calculé dans cette zone a montré une distribution irrégulières précipitations, la partie sud reçoit plus de précipitation, suivie de la partie centrale et enfin la partie Nord qui reçoit moins de précipitation

Nos résultats sont en phase avec plusieurs études faites sur le Sénégal. Néanmoins, ils comportent des limites sur le début de la saison des pluies. Ce dernier est surestimé par la moyenne d'ensemble des 3 simulations utilisées. Cette surestimation pourrait influencer le début projeté sur les deux horizons. Il serait bien dans des études futures d'utiliser beaucoup plus de modèles climatiques, différentes méthodes de correction de biais pour affiner cette recherche et aussi utiliser aussi d'autres indices et seuils agro climatiques.

### Bibliographie

Akpo L E., Gaston A., Gouzis M., 1995. Structure spécifique d'une végétation sahéenne. Cas de Wiidu Thiengoli (Ferlo, Sénégal), *Bull. Mus. Natl., Paris, 4e sér, 17, 1995. Section B, Adansonia nos 1-2, pp 39-52.*

Alberge J., Carbonnel JP., Gouzis M., 1985. Péjoration pluviométrique au Burkina Faso: incidence sur les ressources en eaux et les productions végétales. *Ch ORSTOM, sér. HydroL, vol.xxI (1), 3-19.*

Ardoin-Bardin S., Dezetter A., Servat E., Mahe G., Paturol J E., Dieulin C., Casenave L., 2005. Évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'Ouest et Centrale, *UMR HydroSciences Montpellier, IRD, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France.*

Ba A., 2007. Evaluation des revenus des agropasteurs, leurs demandes de formation et d'éducation, et leurs capacités contributives : cas de l'unité pastorale de Bélèl Bogal dans le département de Podor au Sénégal. *Mémoire de fin d'étude ENEA, Dakar, 57p*

Ba D D., Ndiaye P M., Faye C., 2018. Variabilité pluviométrique et évolution de la sécheresse climatique dans la vallée du fleuve, *21p.*

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

Balme M., Galle S., Lebel T., 2005. Démarrage de la saison des pluies au Sahel : variabilité aux échelles hydrologique et agronomique, *analysée à partir des données EPSAT-Niger Sécheresse vol. 16, n° 1,8p.*

Baron C., Sultan B., Balme M., Sarr B., Traore S., Lebel T., 2005. 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>*

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

Bouraima A W W., 2010. Analyse de la Variabilité Hydro-Climatique passée dans le haut bassin de l'oueme à Beterou au Benin, *53p.*

Camara I., Noblet M., Lejeune Q., Sané Y., 2019. Évaluation de la variabilité climatique et des tendances climatiques futures dans la région de Fatick - Sénégal. Report produced under the

project “Projet d’Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d’Adaptation dans les pays francophones les moins avancés d’Afrique subsaharienne”, *Climate Analytics gGmbH, Berlin*.

Cissé S., Eymard L., Pinsard F., Ndione J A., Gaye A T., 2012. Analyse des relations entre la variabilité de la pluviométrie et la dynamique de la végétation : cas du Ferlo (Sénégal). *Actes Colloque de l’AIC (Grenoble), 183- 188*.

Cissé S., 2016. Variabilité intra saisonnier des précipitations au shalel : impacts sur la végétation (cas du ferlo) , *160p*.

Cissé S., Eymard L., Ndione J A., Gaye A T., 2015. Analyse statistique des relations pluie-végétation au ferlo (Sénégal), *6p*.

Cornet A., Poupon H., 1977. Description des facteurs du milieu et de la végétation dans cinq parcelles situées le long d’un gradient climatique en zone sahélienne du Sénégal. *Bull. IEAM, 39, (2), 243-302*.

CSE, ROSEL T/OSS., 2002. Synthèse des études diagnostiques des sites de l’observatoire du Ferlo. Dakar, *10 p*.

Deme A., Gaye A T., Hourdin F., 2015. Les projections du climat en Afrique de l’Ouest, Évidences et incertitudes ». 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*.

Dezeter A., Paturel J., Ruelland D., Ardoin-Bardin S., Ferry., Gil Mahe L., Dieulin C., Servat E., 2010. Prise en compte des variabilités spatio-temporelles de la pluie et de l’occupation du sol dans la modélisation semi-spatialisée des ressources en eau du haut fleuve Niger, *10p*.

Diop M., Houdenou C., Richard Y., 1996. Variabilité des dates de début et de fin de l’hivernage au Sénégal. *Publ. de l’A/C, 9, p. 430-436*.

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

Faye A., Noblet M., Camara I., Mboup S D., 2019. Evaluation de la vulnérabilité du secteur agricole à la variabilité et aux changements climatiques dans la région de Fatick, *34p*.

Faye G., Frison P L., Wade S., Ndione J A., Beye A C., Rudant J P., 2011. Étude de la saisonnalité des mesures des diffusiomètres scat : apport au suivi de la végétation au sahel, cas du Ferlo au Sénégal. *Rev Télédétection*, vol. 10, n° 1, pp. 23-31.

Fournier C., 1995. Fonctionnement hydrique de six espèces ligneuses coexistant dans une savane sahélienne (region du Ferlo, Nord Sénégal). *TOM, Paris, ORSTOM*, 130p.

Gaye D., 2017. Suivi de la pluviométrie au Nord-Sénégal de 1954 à 2013 : Étude de cas des stations synoptiques de Matam, Podor et Saint-Louis, <https://www.cairn.info/revue-norois-2017-3-page-63.htm>

GIEC., 2007. Bilan 2007 des changements climatiques : *Rapport de synthèse*, [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

GIEC., 2007. Résumé à l'intention des décideurs. In: Bilan 2007 des changements climatiques : Les bases scientifiques physiques. Contribution du Groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. [Solomon, S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M. et Miller H.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA.

GIEC., 2007. 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).

GIEC., 2014. Incidences, adaptation et vulnérabilité : résumé à l'intention des décideurs, Contribution du groupe de travail II au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.

GIEC/IPCC., 2008. Rapport technique sur le changement climatique et l'eau <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tp-climate-change-water.htm>

Giorgi F., Jones C., Asrar G., 2009. Addressing climate information needs at the regional level: the framework. *World Meteorol.Org.Bull.*2009, 58,175-183.

Gillet N P., Weaver A J., Zwiers F W., Wehner M F., 2004. Detection of volcanic influence on global precipitation. *Geophys. Res. Let.*, 31, L12217, doi: 10.1029/2004GL020044.

Harris I., Jones P D., Osborn T J., and Lister D H., 2013. Updated high-resolution grids of monthly climatic observation-the CRU TS3.10 Dataset.Int.J. *Climatol.* Doi: 10.1002/joc.3711

IPCC, 2014. Climate Change 2014 Synthesis Report Summary Chapter for Policymakers. 31p.

Konaté F O., 2009. Perceptions et stratégies d'adaptation des populations de la Commune Rurale de Nossombougou aux changements climatiques (Cercle de Kolokani, Région de Koulikoro au Mali), *in Recherches africaines, N°09. Accessible sur URL : <http://www.recherches-africaines.net>, consulté le 16 février 2018.*

Lambert F H., Stott P A., Allen M R., Palmer M A., 2004. Detection and attribution of Changes in 20th century land precipitation. *Geophys. Res. Lett., L10203, doi:10.129/2004GL019545.*

lespinas F., 2008. Impact du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon, *334p.*

Mbaye M L., Haensler A., Hagemann S., Gaye A T., Moseley C and Afouda A., 2015. Impact of statistical bias correction on the projected climate change signals of the regional climate model. REMO over the Senegal River Basin. *Int.J.Climatol. doi: 10.1002/joc.4478. <https://doi.org/10.1002/joc.4478>.*

Michel P., 1973. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie: Etude Géomorphologique. *ORSTOM, Paris, Mém. N° 63, 752 p.*

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

Morice C P., Kennedy J J., Rayner N A., Jones P D., 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.*

Ndiaye O., Diallo A., Sagna M B., Guissé A., 2013. Diversité floristique des peuplements ligneux du Ferlo, Sénégal. *13p*

N'diaye B F., 2015. Changements climatiques et dynamiques des systèmes de production agricole dans le Cercle de Banamba, Région de Koulikoro au Mali, *thèse de doctorat, Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée (ISFRA). Bamako, Mali.303p*

Niang K., 2009. L'arbre dans les parcours communautaires du Ferlo-Nord (Sénégal), *Mémoire de DEA FST/UCAD, 67p.*

Noblet M., Seck A., Faye A., Sadio M., Camara I., 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 p.

PNAT., 1985. Plan National d'Aménagement du Territoire. Cartographie et Télédétection des ressources naturelles du Sénégal. Etude de la Géologie, de l'hydrologie, des sols, de la Végétation et des Potentiels d'utilisation des Sols. Available online: [http://library.wur.nl/isric/fulltext/ISRIC\\_16108.pdf](http://library.wur.nl/isric/fulltext/ISRIC_16108.pdf) (accessed on 27 September 2015).

Puget J L., Blanchet R., Salençon J., Carpentier A., Chapron J Y., 2010. Le changement climatique ; *Institut de France - L'académie des sciences*, 26 octobre 2010 ; 21p.

Roger B., 2015. *Changement climatique : au Sénégal, saint louis prend l'eau (jeune Afrique)*  
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*.

Sarr M A., 2009. Évolution récente du climat et de la végétation au Sénégal (cas du Ferlo), *Thèse de doctorat, Université Jean Moulin Lyon 3, LCRE UMR 5600 CNRS, 410 p*.

Sarr., 2009. Cartographie des changements de l'occupation du sol entre 1990 et 2002 dans le nord du Sénégal (Ferlo) à partir des images Landsat .37p.

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*.

Seck M., Moussa Na Abou M., Wade S., Thomas J P., 2005. Adaptation aux Changements climatiques : l'étude de cas des systèmes de production agricoles de Sébikotane (Sénégal), *En da T.M., 33 p*.

Sivakumar M V K., 1988. Predicting rainy season potential from the onset of rains in the Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agr. For. Meteorol. 42: 295~305*

Solomon S., Qin D., Manning M., Alley R B, Berntsen T., Bindoff N L., Chen Z., Chidthaisong A., Gregory J M., Hegerl G C., Heimann M., Hewitson B., Hoskins B J., Joos F., Jouzel J., Kattsov V., Lohmann U., Matsuno T., Molina M., Nicholls N., Overpeck J., Raga G., Ramaswamy V., Ren J., Rusticucci M., Somerville R., Stocker T F., Whetton P., Wood R

A., Wratt D., 2007. Résumé technique. In: Bilan 2007 des changements climatiques 2007: Les bases scientifiques. Contribution du groupe de travail I au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques [Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA.

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., Roudier P., Traore S., 2015. Les impacts des changements climatiques sur les rendements agricoles en Afrique de l'Ouest. In Sultan, B., Lalou, R., Sanni, M.A., Oumarou, A. et Soumaré, M.A. (Eds), « Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest », *Ed. IRD, 209-224.*

Trenberth K E., Jones P D., Ambenje P., Bojariu R., Easterling D., Klein Tank A., Parker D., Rahimzadeh F., Renwick J A., Rusticucci M., Soden B., Zhai P., 2007). Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M., Averyt K.B, Tignor M, Miller H.L. (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA.

