

Université Assane Seck de Ziguinchor



U.F.R Sciences et Technologies

Département de physique

Mémoire de Master 2

Mention : physique et Applications

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

**ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ HYDRO-CLIMATIQUE
DU BASSIN VERSANT DU FLEUVE CASAMANCE**

Présenté par: Pierre Malang SADIO

**Sous la direction de Dr Mamadou Lamine MBAYE et sous la
supervision de Pr Moctar CAMARA**

Soutenu publiquement le 13/06/2020/ devant le jury composé de :

Qualité du Jury	Nom et Prénom(s)	Grade	Établissement
Président	CAMARA Moctar	Professeur Titulaire	UASZ/UFRST
Rapporteur	DIATTA Samo	Maitre-Assistant	UASZ/UFRST
Examineur	TINE Modou	Assistant	UASZ/UFRST
Examineur	DIATTA Joseph Sambasene	Maitre-Assistant	UASZ/UFRST
Encadrant	MBAYE Mamadou Lamine	Maitre-Assistant	UASZ/UFRST



Dédicaces

A la mémoire de mon grand-père, de ma grande mère et de mon père.

Puisse leurs âmes reposent en paix.

A ma brave mère, infatigable éducatrice,

Femme qui a accepté tous les sacrifices,

Sans se plaindre et m'a donné sans réserve tout ce qu'elle a.

A mon beau père Edouard SADIO, qui s'est donné corps et âme pour assurer le paiement des frais de ma scolarité depuis le primaire jusqu'à nos jours.

A mon tuteur et tutrice qui m'ont donné à manger, à boire et à coucher depuis ma première année universitaire jusqu'à maintenant.

REMERCIEMENTS

Ce travail de fin d'études de Master a été réalisé au Laboratoire d'Océanographie, des Sciences de l'Environnement et du Climat (**LOSEC**) de l'Université Assane Seck de Ziguinchor (UASZ).

Je voudrais témoigner toute ma gratitude à toute cette équipe du labo en particulier le Docteur Samo DIATTA responsable du Master physique de l'Atmosphère et de l'Océan pour sa disponibilité, son engagement et ces conseils dont il fait preuve pour nous mettre dans le bon chemin, aux Docteurs Ibrahima DIBA, Aliou Badara SARR et aux Doctorants Jules BASSE, Hamady Ngansou SABALY, Cheikh Waly DIEDHIOU et Youssouph COLY.

Je tiens à remercier infiniment mon encadrant, le Docteur Mamadou Lamine MBAYE, l'infatigable enseignant de l'Université de Ziguinchor pour avoir accepté d'accompagner mon mémoire malgré ses multiples occupations. Sa disponibilité, sa rigueur et ses conseils m'ont été un grand apport et m'ont permis de pouvoir achever ce rapport.

Je remercie aussi l'ensemble du corps enseignant de l'UFR science et technologie de l'Université Assane Seck en particulier ceux de MPC I pour m'avoir permis d'avoir les outils nécessaires à la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont aussi à l'encontre de tous mes amis de la promotion de 2016/2019.

Mes sincères remerciements vont également à :

Mon oncle Insa SADIO, mon tuteur pour tout son soutien et ces différents conseils utiles à mon endroit,

Monsieur BODIANG et sa femme Khady GASSAMA pour m'avoir hébergé pendant trois ans d'affilé pour pouvoir obtenir mon premier Diplôme Universitaire,

Mes parents Georges Loufa SADIO, Edouard Karfa SADIO Célestine MANE pour tout ce qui ont consenti à l'endroit de ma petite famille durant mon absence. Mes amis Mamadou SADIO, Diombicou MENDY, Moustapha MANSALY, Olivier Abdoulaye SADIO, Yero Souleymane MANE, Theodore MANSALY, Ismaïla MANSALY, ... pour leurs efforts louables.

Mes frères Christophe SADIO, Gilbert SADIO et Moussa BIAYE qui se sont occupés de la famille durant toute ma période d'étude.

Je ne serais terminé sans pour autant remercier mon président et l'ensemble des membres du jury pour le temps et les efforts consenti à la compréhension de mon rapport de mémoire sans oublié aussi l'ensemble des enseignants de physiques (SAO et matériaux) et les différentes responsables des labos.

Résumé

Cette étude a pour objectif principal de mieux comprendre la variabilité hydro-climatique du bassin versant du fleuve Casamance dans le but de réduire la vulnérabilité des populations locales face aux péjorations climatiques. Ainsi pour se faire, des données d'observation (CRU) au pas de temps mensuel (1901-2013), des sorties de modèles climatiques journalières sous les scénarios d'un réchauffement de 1.5°C et 2°C et des données de débit de la station de Kolda (1998-2008) ont été utilisées.

La première partie de ce rapport est réservée à l'étude de la variabilité hydro-climatique passée dans le bassin. Les résultats issus de cette partie nous ont permis de distinguer les périodes de forte température et d'ETP, de sécheresse accrue, d'étiage, mais aussi de forte crue.

La deuxième partie est consacrée à l'évaluation des impacts du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant avec des réchauffements globaux de 1.5°C et 2°C. Les indices climatiques calculés dans la méthodologie nous ont prouvé d'une part, une baisse remarquable des précipitations, et une hausse générale de la température et de l'ETP par rapport à la période de référence de réchauffement globale de 0.5°C et d'autre part une augmentation du nombre de jours consécutifs secs (CDD) et une diminution du nombre de jours consécutifs humides (CWD) dans le bassin. Ces impacts sont beaucoup plus intenses pendant la période de réchauffement globale de 2°C que celle de 1.5°C.

Un focus a été mis sur l'analyse comparative des résultats obtenues à partir des données d'observation et celles des sorties des modèles, afin de pouvoir faire une analogie entre la réalité et les résultats fournis par les modèles, vérifier leur fiabilité mais aussi de prévoir les modifications des conditions climatiques des années à venir dans le bassin.

Par ailleurs, le régime hydrologique du bassin du fleuve Casamance, comme celui des cours d'eau soudano-sahéliens, est bouleversé par une variation de séquence de périodes humides et de période sèches mais aussi par une répartition inégale de la pluviométrie.

Mots clés: variabilité, hydro-climatique, bassin versant, fleuve Casamance, réchauffement globale de 1.5°C et 2°C, indices climatiques.

Abstract:

The main objective of this study is to better understand the hydro-climatic variability of the Casamance river catchment area in order to reduce the vulnerability of local populations to climatic deterioration. Thus, observation data (CRU) at monthly time step (1901-2013), outputs from daily climate models under the scenarios of 1.5 ° C and 2 ° C warming and flow data from the station de Kolda (1998-2008) were used.

The first part of this report is reserved for studying the past hydro-climatic variability in the basin. The results from this section enabled us to distinguish periods of high temperature and FTE, of increased dryness, of low water, but also of high flood.

The second part is devoted to the evaluation of the impacts of climate change on the hydrology of the watershed with global warming of 1.5 ° C and 2 ° C. The climatic indices calculated in the methodology have proven to us on the one hand, a remarkable drop in precipitation, and a general increase in temperature and ETP compared to the reference period of global warming of 0.5 ° C and on the other hand an increase in the number of consecutive dry days (CDD) and a decrease in the number of consecutive wet days (CWD) in the basin. These impacts are much more intense during the global warming period of 2 ° C than that of 1.5 ° C.

A focus was put on the comparative analysis of the results obtained from the observation data and those of the models outputs, in order to be able to make an analogy between reality and the results provided by the models, check their reliability but also to forecast changes in climatic conditions in the coming years in the basin.

In addition, the hydrological regime of the Casamance river basin, like that of the Sudano-Sahelian rivers, is upset by a variation in the sequence of wet periods and dry periods, but also by an uneven distribution of rainfall.

Key words: variability, hydro-climatic, watershed, Casamance River, global warming of 1.5°C and 2°C, climate indices.

Liste des figures

Figure 1. 1 : Évaluation, en Afrique de la température de 1900 en 2000, (source: GIEC, 2007) 4

Figure 1. 2 : Schéma conceptuel représentant une moyenne zonale des éléments clés de la mousson ouest africaine pendant l’été boréal : la circulation méridienne-verticale et les vents zonaux dominants. Le graphique du bas représente des profils méridiens de température potentielle (Q) et de température potentielle équivalente (Qe) dans la couche limite atmosphérique, (Source, peyrillé, 2006) 9

Figure 2. 1 : Le bassin versant du fleuve Casamance 12

Figure 2. 2 : Le bilan hydrique 18

Figure 3.1 : Indice Standardisé de la précipitation de la basse Casamance 20

Figure 3. 2 : Indice Standardisé de la précipitation de la moyenne et de la haute Casamance 21

Figure 3. 3 : Evolution des cumuls des pluies dans le bassin versant de la Casamance 22

Figure 3. 4 : Les anomalies de température dans la basse Casamance 23

Figure 3. 5: Les anomalies de température dans la moyenne et haute Casamance..... 24

Figure 3. 6 : Les anomalies de l’évapotranspiration dans la basse Casamance 25

Figure 3. 7 : Les anomalies de l’évapotranspiration dans la moyenne et la haute Casamance 26

Figure 3. 8 : La relation pluie et débit annuelle de la station de Kolda..... 27

Figure 3. 9 : Cycle saisonnier de la précipitation et du débit de la station de Kolda pour la période de 1998 à 2008. 28

Figure 3. 10 : Les anomalies du débit dans la haute Casamance 29

Figure 3. 11 : Variation interannuelle de l'indice de sécheresse des différentes stations du bassin versant de la haute Casamance. 30

Figure 3. 12 : Variation interannuelle de l'indice de sécheresse des différentes stations du bassin versant de la basse Casamance 31

Figure 3. 13 : La variation interannuelle du bilan hydrique pour tous les 12 mois de l’année dans la moyenne et la haute Casamance 32

Figure 3. 14 : Variation interannuelle du bilan hydrique de la basse Casamance. 32

Figure 3. 15 : Variation interannuelle du bilan hydrique dans la haute et moyenne Casamance pour la période pluvieuse (JJAS). 33

Figure 3. 16 : Variation interannuelle du bilan hydrique dans la haute et moyenne Casamance pour la période pluvieuse (JJAS). 34

Figure 3. 17: Cycle saisonnier de la précipitation dans le bassin de la Casamance..... 35

Figure 3. 18 : Cycle saisonnier de la température dans le bassin du versant du fleuve Casamance. 36

Figure 3. 19: Cycle Saisonnier de l'évapotranspiration selon Penman-Monteith dans le bassin de la Casamance 37

Figure 3. 20: Cycle Saisonnier du changement de la précipitation dans le bassin de la Casamance..... 38

Figure 3. 21: Cycle Saisonnier du changement de la température dans le bassin de la Casamance 39

Figure 3. 22 : Cycle saisonnier de l'évapotranspiration du bassin versant de la Casamance... 40

Figure 3.23 : Variation des indices de pluie: CWD (a), CDD (b), SDII (c), et le RX5DAY (d) en fonction des différentes stations du bassin versant du fleuve Casamance. 41

Figure 3. 24 : Le 95th et 99th percentile en fonction des différentes stations du bassin versant de la Casamance 43

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Les impacts du changement sur les ressources en eaux	7
Tableau 2 : Caractéristiques des modèles régionaux	14
Tableau 3 : Indices liés à la pluie	16
Tableau 4 : L'indice de sécheresse	17
Tableau 5 : Les caractéristiques du bassin versant.....	19

Liste des Abréviations

CC:	Changement Climatique
CCNUCC:	Convention des Cadres des Nations Unies sur le Changement Climatique
CRU:	Unité de Recherche sur le Climat
ETP:	Evapotranspiration Potentielle
FAO:	Food and Agriculture Organization
FIT:	Front Intertropical
FP1 & FP2:	Réchauffement global respectif de 1.5°C et de 2°C
GIEC:	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat
JEA:	Jet d'Est Africain
JET:	Jet d'Est Tropical
JJAS:	Juin-Juillet-Août-Septembre
LOSEC:	Laboratoire d'Océanographie des Sciences de l'Environnement et du climat
OMM:	Organisation Météorologique Mondiale
RP:	Réchauffement global de 0.5°C
PNUE:	Programme des Nations Unies pour l'environnement
ZCIT:	Zone de Convergence Intertropicale
99th et 95th	Représentent respectivement le 99ème et 95ème centile

Table des matières

Dédicaces	i
REMERCIEMENTS	ii
Résumé	iii
Abstract:	iv
Liste des Tableaux.....	vii
Liste des Abréviations	viii
Table des matières	ix
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Généralités sur la variabilité des changements climatiques en Afrique de l'ouest et au Sénégal	3
1.1 Définitions	3
1.1.1 Changements climatiques, variabilité climatique et climat.....	3
1.1.2 Scénario climatique et scénario de changement climatique.....	3
1.2 Impacts des changements climatiques en Afrique de l'ouest et au Sénégal	3
1.2.1 Impact sur la température	3
1.2.2 Impact sur la Précipitation.....	4
1.2.3 Impact sur les ressources en eau	5
1.3 Rappels sur les principaux systèmes du climat ouest africain	8
1.3.1 Aperçu sur la situation climatique de l'Afrique de l'Ouest	8
1.3.2 Le système de mousson en Afrique de l'ouest : Les principaux axes de Vent.....	9
a. Flux de mousson	9
b. L'Harmattan	10
c. Jet d'Est Africain (JEA)	10
d. Jet d'Est Tropical (JET).....	10
Chapitre 2 : Données et méthodes.....	11
2.1 Présentation de la zone d'étude : Bassin versant du fleuve Casamance	11

2.1.1	Le climat.....	12
2.1.2	La végétation	12
2.1.3	Le Relief du bassin de la Casamance	13
2.2	Présentation des données.....	13
2.2.1	Les Données d’observation	13
2.2.2	Les Données des sorties des modèles.....	13
2.3	Méthodes	15
2.3.1	Indice de pluie Standardisé	15
2.3.2	Anomalies de température.....	15
2.3.3	Indice de pluie extrême	15
2.3.4	Analyse des données	16
2.3.5	Indice de Sécheresse et le Bilan hydrique	16
2.3.6	Estimation des Caractéristiques physiques du Bassin versant du fleuve	18
Chapitre 3: Résultats et Discussions		20
3.1	Variation interannuelle de la précipitation, de la température, et de l’évapotranspiration potentielle selon Penman.....	20
3.1.1	Précipitation	20
3.1.2	Température	23
3.1.3	Evapotranspiration selon Penman-Monteith	24
3.2	Variation interannuelle (Relation pluie-débit et Anomalies du débit) et mensuelle (Relation pluies-débits-évapotranspirations) sur la station de kolda	26
3.3	Indice de Sécheresse.....	29
3.4	Le bilan hydrique	31
3.4.1	Annuelle (12 mois).....	31
3.4.2	Annuelle (JJAS)	33
3.5	Evaluation de simulations climatiques.....	35
3.5.1	Précipitation	35
3.5.2	Température	36

3.5.3 ETP selon Penman-Monteith,	36
3.6 Les indicateurs de Changement climatique (CC).....	37
3.6.1 Précipitation	38
3.6.2 Température	39
3.6.3 Evapotranspiration selon Penman-Monteith	39
3.7 Indices extrêmes de pluie	40
3.7.1 L'intensité des jours de pluie, le cumul sur 5 jours consécutifs et les nombres de jours consécutifs secs et humides.....	41
3.7.2 Evènements de pluie extrêmes (95P et 99P)	43
Conclusion et perspectives	44
Recommandations	44
Bibliographie.....	46

Introduction générale

Le changement des conditions climatiques est actuellement l'une des inquiétudes majeures de la communauté internationale. Ce phénomène est considéré comme l'une des menaces qui font freiner le développement durable avec des conséquences multiples sur la santé humaine, l'activité économique, les ressources en eau, etc. De nombreuses études et travaux comme celle de Descroix *et al.*, (2015), dans l'Afrique de l'ouest ont montré que la pluviométrie a baissé de 20% pendant plus de 25 ans (1968-1995), et a entraîné une forte mortalité de la végétation naturelle, y compris des mangroves touchées par la sur-salure des rivières. Ce changement s'est illustré par une diminution du nombre d'événements pluvieux, au 20^{ème} siècle après les années 60 dans les zones subtropicales et tropicales, IPCC, (2001). Le taux de diminution a été très remarquable en Afrique de l'Ouest (-1.2 à -4.2% par décennie) d'après Hulme *et al.*, (2001). Sur ce même rapport du GIEC, il est constaté une augmentation des températures de près de 0.7 degré dans toute l'Afrique. Certaines études ont montré que cette hausse 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. Les températures minimales des mois de mars-avril et mai ont parfois augmenté de 3 °C, constituant un nouveau « record ». (Barrat, 2012 et Descroix *et al.*, 2015). Les études ont aussi montré une augmentation des extrêmes de températures durant les années 1988, 1995 et 1998, considérées comme les plus chaudes Hulme *et al.*, (2001). En Afrique de l'ouest, la dégradation du couvert végétal est en grande partie due à l'aridité du climat, aux sécheresses successives et aux activités humaines d'après les observations et les recherches qui y sont menées, (Barrat, 2012 et Noblet *et al.*, 2018).

Le Sénégal plus particulièrement le bassin versant de la Casamance est confronté, depuis le début des années soixante-dix, à une baisse continue des quantités d'eau précipitées, Diatta *et al.*, (2008). Cette diminution de la pluviométrie, diversement ressentie selon les différentes unités climatiques qui constituent la région sud de la Casamance, a eu des effets néfastes dans beaucoup de domaines (agriculture, pêche, etc.). Appartenant au domaine climatique soudanien, la Casamance reste la zone la plus pluvieuse et la plus forestière du Sénégal. Ainsi grâce à l'importance des précipitations et du réseau hydrographique, la zone regorge de nombreuses potentialités (l'eau, forêt, poisson, etc.). En effet, le bassin versant de la Casamance, zone fortement rurale dont son économie dépend bien des activités agricoles, subit une forte modification climatique aux effets environnementaux souvent désastreux. Ces impacts sont illustré par une hausse de la température montré par Sané *et al.*, (2010), la remonté

de la langue salée, Faye *et al.*, (2015) etc. C'est dans ce contexte que notre étude vise à contribuer à une meilleure compréhension de la variabilité hydro-climatique du bassin versant de la Casamance. Ainsi, il s'agit spécifiquement d'étudier la variabilité hydro-climatique passée et d'évaluer les changements de l'hydroclimatologie sous le réchauffement global de 1,5 et de 2 °C.

Après l'introduction, notre rapport de mémoire de master est structuré en trois différentes parties:

- la première partie expose une étude bibliographique sur les généralités de la variabilité et des changements climatiques en Afrique de l'ouest et au Sénégal en particulier ;
- la deuxième partie présente la zone d'étude, les données et la méthodologie utilisées;
- les résultats et discussion sont présentés dans la troisième partie.

A la suite de ces trois parties, la conclusion, des recommandations ainsi que des perspectives sont données.

Chapitre 1 : Généralités sur la variabilité des changements climatiques en Afrique de l'ouest et au Sénégal

1.1 Définitions

1.1.1 Changements climatiques, variabilité climatique et climat

La Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, CCNUCC, (2018) fait une distinction entre les «**changements climatiques** » qui peuvent être attribués aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère, et la «**variabilité climatique**» due à des causes naturelles, astronomiques et géophysiques, dont la compréhension des processus induits permet d'expliquer les variations climatiques passées, de quantifier les impacts anthropiques, et de produire des scénarios d'évolution future.

- **Le climat** est un ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'atmosphère et son évolution en un point donné.

Du point de vue environnemental, le climat peut être défini comme étant les conditions moyennes qu'il fait dans un endroit donnée (température, précipitations, ...) calculées d'après les observations d'au moins 30 ans (**OMM**) caractérisé par les valeurs moyennes, mais également par une variation et des extrêmes.

1.1.2 Scénario climatique et scénario de changement climatique

Un scénario de changements de climatiques est un climat futur vraisemblable. Il s'agit d'une représentation qui correspond à la différence entre un climat futur vraisemblable et le climat actuel, ou un climat de référence (tel que généralement représenté dans les modèles climatiques, c'est-à-dire représentations mensuelles, saisonnières et annuelles). Ce concept peut être considéré comme une étape intermédiaire menant à l'élaboration d'un scénario climatique.

Un scénario climatique résulte de la combinaison d'un scénario de changements climatiques et la description du climat actuel, tel que représenté par des observations climatiques (c'est-à-dire, grâce à l'analyse scrupuleuse des régimes climatiques), (GIEC, 2001).

1.2 Impacts des changements climatiques en Afrique de l'ouest et au Sénégal

- En Afrique de l'ouest

1.2.1 Impact sur la température

Les impacts du changement climatique sur l'évolution de la température sont entre autre :

- Le fort rayonnement durant toute l'année avec des températures moyennes peu différenciées,

- Une augmentation des températures du Sud-Ouest vers le Nord-Est avec des maximales relevées au cours de l'année pouvant atteindre ou dépasser les 45°C tandis que les minimales sont rarement en dessous de 10°C, soit une augmentation de 0.2 à 0.8°C depuis la fin des années 70, (Barrat, 2012 et Noblet *et al.*, 2018)

Les mesures nous montrent aussi une hausse de la température moyenne de l'ordre de -0,2 à 0,6°C depuis la fin du 19^{ème} siècle (Figure 1.1). 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).

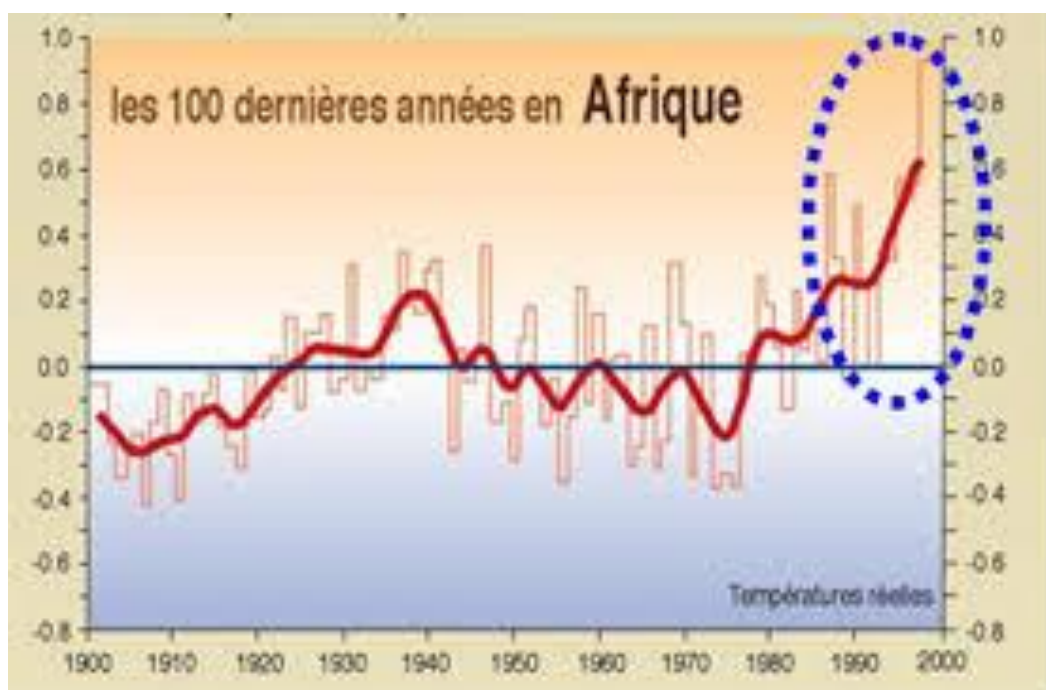


Figure 1.1 : Évaluation, en Afrique de la température de 1900 en 2000, (source: GIEC, 2007)

1.2.2 Impact sur la Précipitation

Les différentes problématiques climatiques sur la précipitation en Afrique de l'Ouest peuvent être traduites par:

- Une décroissance régulière de la quantité de pluie, et une grande variation spatio-temporelle,
- Des lignes de grain caractéristiques du Sahel axées du Nord au Sud sur une distance de 500 à 750 Km s'accompagnant souvent de vents forts et de pluies abondantes parfois catastrophiques,
- L'augmentation de la fréquence de l'intensité des sécheresses dans certaines parties de l'Afrique, (Marut, 2015).

La modification du climat au cours du 20^{ème} siècle est la première préoccupation des climatologues qui luttent contre l'augmentation des gaz à effet de serre et des aérosols qui sont les principales causes du changement climatique.

1.2.3 Impact sur les ressources en eau

Les eaux superficielles et souterraines, les neiges et les glaces sont les seules ressources d'eau douce disponibles sur la planète et sont donc essentielles à la survie de l'homme et ses activités dans tous les domaines. En même temps, elles occupent une partie importante du cycle de l'eau dans tous ses états et contribuent directement au changement du climat. Alors que les impacts du réchauffement climatique sur les aspects quantitatifs de l'hydrosphère occupent le devant de la scène (importance des précipitations, niveau des eaux dans les lacs et les nappes, régime d'écoulement des rivières), leur incidence sur la qualité des systèmes aquatiques et donc sur celle de l'eau potable qui en est issue est encore largement inconnue.

La quantité et la qualité des eaux de distribution est la source principale de multiples problèmes dans de nombreuses régions d'Afrique, mais aussi 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.

Le risque accru d'inondation qui s'y ajoute ne sera pas sans conséquence pour la société, les infrastructures physiques et la qualité de l'eau, (GIEC, 2007).

En effet l'Afrique de l'Ouest dispose d'importantes ressources en eau de surface et souterraines, mais elles sont réparties de manière inégale sur le plan spatial. Le réseau hydrographique est caractérisé par la grande variabilité saisonnière de son débit, liée notamment au régime pluviométrique et à la faible capacité de rétention des aquifères.

- Les phénomènes liés à la sécheresse ont considérablement affecté les surfaces traditionnellement inondables de certaines régions. Par ailleurs, la dégradation du couvert végétal contribue à l'ensablement des cours d'eau et des mares limitant ainsi les possibilités de culture et d'alimentation en eau des hommes et du bétail.

- Ces ressources en eaux de surface et souterraines sont fortement menacées, entre autres par les gaspillages et/ou la gestion non rationnelle et/ou l'ensablement des cours d'eau, des lacs et des mares et/ou les pollutions diverses.

Ainsi l'impact des ressources en eau se traduit par le changement au niveau du cycle hydrologique.

Les écoulements des eaux de surface dépendent en grande partie par les pluies dont son irrégularité est souvent accélérée par les conditions locales de ruissellement et d'infiltrations en

fonction des étapes de surface des sols.

En Afrique de l'ouest, les variations des cumuls pluviométriques associées aux modifications de l'occupation des sols depuis les années 1970, sont à l'origine de la diminution progressive des débits moyens annuels des grands fleuves de l'ordre de 30% et 60%.

Comme le cas du fleuve Niger (onitsha), les observations donne une diminution de l'ordre de 30% entre 1971–1989 comparée à la période de 1951–1989; celui des fleuves Sénégal et Gambie et près de 60%, (UICN, 2004; Niasse, 2004).

Les observations ont montré aussi l'augmentation du coefficient d'écoulement dans les différents bassins sont caractérisées par une diminution du couvert végétal une extension des surface cultivées et des surfaces dégradées.

Le changement climatique caractérisé par une hausse des températures et baisse de la pluviométrie affectent directement la recharge des aquifères superficiels qui sont à la baisse. Cette baisse de la recharge aboutira à la diminution des stocks des nappes phréatiques des bassins versants.

- Au Sénégal

A l'instar de tous les pays de l'Afrique de l'ouest, le Sénégal subit aussi l'influence du changement climatique, déjà en 1999 et sur la base des prévisions du climat global parvenues grâce à deux scénarios d'émissions qui sont l'IPCC (IS92a et IS92d) et la modélisation statistique visant à associer ces sorties globales et les données historique d'appréciation du climat sur le Sénégal. Ainsi pour mieux comprendre ce phénomène, un focus a été mis sur les impacts de la variabilité climatique tout en prévoyant les changements futurs de température, d'humidité relative, d'évapotranspiration et de la précipitation, (MPEN *et al.*, 1999).

L'évolution climatique récente au Sénégal se traduit par une diminution de l'ordre de 30% de la pluviométrie, une augmentation des températures de l'ordre de 0,9°C, une aridification de plus en plus importante de la partie nord, une tendance forte vers l'aridité des régions centrales et une tendance plus ou moins forte vers la semi aridité des régions méridionales. Pour ce qui est des impacts notés sur la modification climatique au Sénégal dans le domaine :

- De l'agriculture, on assiste à la salinisation des sols et des nappes, entraînant ainsi une accélération des processus de formation des tannes, réduisant les superficies cultivables et la qualité de l'eau;

- De la santé il y'a une possible recrudescence de maladies hydriques (choléra) due aux inondations et parasitaires (paludisme), due au réchauffement par développement d'agents toxiques chez les poissons et fruits de mer et moustiques (MPEN *et al.*, 1999).

-Des ressources en eaux, (Mepnbrla *et al.*, 2009) :

Tableau 1 : Les impacts du changement sur les ressources en eaux

Principaux impacts physiques	Conséquences attendues
Remontée ou Élévation du niveau marin sur la Casamance, le Sine et le Saloum environ (0.09µm à 0.88m) entre 1990 et 2100	Recrudescence de l'érosion côtière Inondation des zones basses Salinisation des eaux et des sols Risque de disparition de la mangrove Baisse générale du niveau des nappes Réduction du couvert végétale
Augmentation des hauteurs de houle	Recrudescence de l'érosion côtière
Réchauffement des eaux marines	Modifications de la biodiversité marine Développement d'agents toxiques dans les organismes marins
Modification de l'upwelling	Modification de la structure et de la composition des espèces marine

L'élévation accélérée du niveau de la mer, est l'un des conséquences du réchauffement global de la planète, cette remonté du niveau marin mentionné dans le tableau.1 ci-dessus peut être attribuée par aux crises climatiques. Il est aussi noté le problème de l'acidification des vallées secondaires due à la disparition de la mangrove avec la remontée des eaux salées jusqu'à Sédhiou et à plus de 200 km de l'embouchure en période de basses eaux. Ainsi cette situation du changement des conditions climatiques a engendré des problèmes comme la perte de terres cultivable qui affecte sérieusement la production agricole au Sénégal, Sané, *et al.*, (2007).

Face à la diminution de la quantité d'eau tombée dans le bassin, on assiste à une baisse de débit des fleuves avec une menace de disparitions de certains marigots, mares, lacs autrefois bien remplis.

➤ **Les projections sur l'évolution future du climat au Sénégal**

A l'horizon 2050, dans la base des projections, on pourrait s'attendre à:

- Une augmentation de la température sur Dakar de 1,5°C, Ziguinchor (1,0 °C), Saint-Louis (1,6°C), 2,35 °C à Matam et enfin 2,05 °C à Kédougou.
- Une baisse de la précipitation de - 6,0% sur Saint-Louis, -7,0 % à Matam, -10,0 % à Dakar, -24,0 % à Ziguinchor et enfin -23,0 % à Kédougou.

- Pour ce qui concerne l'humidité relative les scénarios indiquaient que l'air devient de plus en plus sec dans les zones du Nord-est et du Sud-est du pays, c'est-à-dire de Dakar à Kédougou, en passant par Ziguinchor, Saint-Louis et Matam (MPEN *et al.*, 1999).

1.3 Rappels sur les principaux systèmes du climat ouest africain

1.3.1 Aperçu sur la situation climatique de l'Afrique de l'Ouest

Le climat est tropical sec. On distingue quatre types de climat:

- Un climat désertique au Nord (pluviométrie annuelle < 200 mm);

C'est un climat aride caractérisé par une sécheresse et une aridité permanente qui dure toute l'année. Les précipitations y sont très peu abondantes qui tombent uniquement sous forme de neige dans certaines régions désertiques froides.

- Sahélien au centre (pluviométrie annuelle comprise entre 200 mm et 600 mm) ;

Il marque la transition vers le climat désertique. Les pluies sont devenues presque rares sur une période de trois à cinq mois (juin à octobre avec un maximum centré sur Juillet/Août). Les pluies sont irrégulières avec une variation dans le temps et dans l'espace.

- Soudanien (pluviométrie annuelle comprise entre 600 mm et 1200 mm);

C'est un climat tropical sec avec l'allongement de la saison sèche au fur et à mesure que l'on approche des tropiques. La sécheresse est accentuée par l'harmattan (vent chaud qui souffle du Nord-Est vers l'atlantique) et la saison hivernal qui se situe entre mai-juin et septembre-octobre avec une forêt tropicale sèche.

- Guinéen (pluviométrie annuelle > 1200mm)

C'est aussi un climat tropical mais humide qui est un peu avoisine de celui équatorial du fait de l'abondance des pluies avec deux saisons sèches inégales (août-septembre et décembre-avril). Il est retrouvé en générale tout au long du golfe de guinée, de la sierra Leone au Nigeria.

Les pluies liées aux lignes de grains sont particulièrement importantes aux latitudes sahéliennes. Le régime de mousson est le facteur dominant des saisons des pluies. Le climat est marqué par une pluviométrie annuelle décroissante du Sud au Nord.

En Afrique de l'ouest (4°-20°N ; 20°W- 40°E), une décroissance a été observée dans les précipitations annuelles depuis la fin des années 60, avec une diminution de 20 à 40% entre les périodes 1931- 1960 et 1968-1990, Nicholson *et al.*, (2000) ; Chappell et Agnew, (2004) ; Dai *et al.*, (2004). Dans la zone tropicale de forêt humide, la décroissance moyenne dans la précipitation annuelle est environ de 4% dans l'ouest. Le climat est du type sahélien. Il comporte une saison des pluies que l'on appelle hivernage et une saison sèche. La saison des pluies s'étend

de juin à octobre avec un pic en août-septembre et variable selon la latitude (moins de précipitations dans le nord par rapport au sud). C'est la période des moussons.

1.3.2 Le système de mousson en Afrique de l'ouest : Les principaux axes de Vent

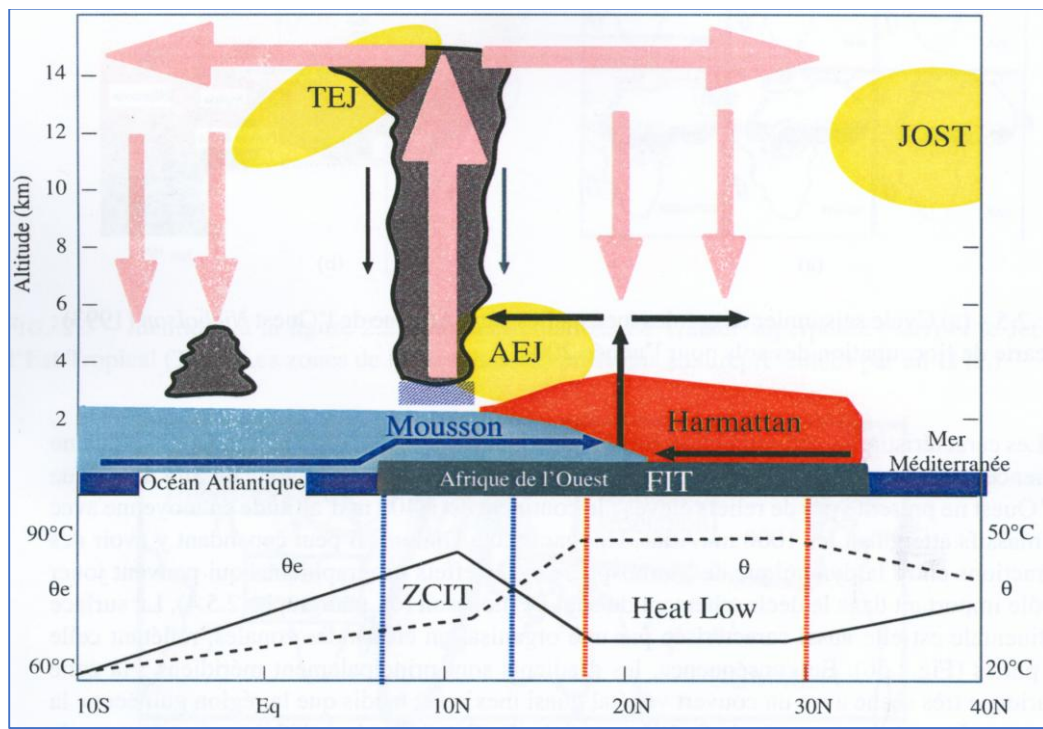


Figure 1. 2 : Schéma conceptuel représentant une moyenne zonale des éléments clés de la mousson ouest africaine pendant l'été boréal : la circulation méridienne-verticale et les vents zonaux dominants. Le graphique du bas représente des profils méridiens de température potentielle (Q) et de température potentielle équivalente (Qe) dans la couche limite atmosphérique, (Source, peyrillé, 2006)

a. Flux de mousson

La mousson Ouest africaine illustrée dans la figure 1.2 ci-dessus peut être définie comme une justification dynamique et hydrique de l'atmosphère au différentiel énergétique entre l'océan et le continent. Pratiquement les alizés provenant de l'Atlantique sud, gouvernés par les hautes pressions de l'anticyclone de Sainte-Hélène se remplissent d'humidité pour suivre la direction sud-ouest sous l'influence de la force de Coriolis après avoir franchi l'Equateur. Le continent africain (Afrique de l'ouest) reçoit suffisamment d'humidité procuré par le flux de mousson pour pouvoir assurer le déclenchement de l'activité convective.

Ainsi la genèse de la pluie en Afrique de l'ouest dépend à la fois des apports d'air humide issue des basses couches de l'hémisphère sud et des possibilités de convection verticale de cet air qui peut, en s'élevant, précipiter.

b. L'Harmattan

L'harmattan est un vent du nord-est, très chaud le jour, plus froid la nuit, très sec et le plus souvent chargé de poussière. C'est un alizé continental. Il souffle vers le sud-ouest en provenance du Sahara et affecte le golfe de Guinée en hiver, entre la fin du mois de novembre et en mi-mars. Ce phénomène est généralement combiné au système anticyclonique (haute pression barométrique) coutumier de la saison sèche des climats tropicaux. Durant cette période on assiste à un ciel beaucoup plus clair avec une très forte luminosité bien que parfois ralenti par les poussières atmosphériques.

c. Jet d'Est Africain (JEA)

- Ce Jet est en général remarqué durant la période de l'été boréal à l'échelle régionale en moyenne troposphère, compris entre 500 et 700 hPa avec une vitesse maximale qui se trouve vers 15° N. Il s'allonge en moyenne du lac Tchad au Cap-Vert, avec des intensités maximale de l'ordre de 15m/s.

- C'est un jet qui est observé pendant toute la période de mousson d'été, de fin avril à fin octobre. En hiver (Décembre-Février), ce flux d'Est s'établit le long de la côte africaine (5°N) mais devient trop faible (5m/s) pour conserver son appellation de JEA mentionné dans la figure.I.2 ci-dessus.

- Il résulterait du fort gradient thermique existant dans les basses couches entre le Sahara et le golfe de guinée et du renversement de ce gradient méridien en altitude. Cependant, Thorncroft and Blackburn,(1999) ont émis l'hypothèse que le JEA serait le résultat du chauffage adiabatique associé à la convection sèche au Nord et la convection humide dans la ZCIT (zone de convergence intertropicale).

Dépression thermique ou 'Heat low' vers 25°N sur le Sahara (Tmax à 1500 m).

d. Jet d'Est Tropical (JET)

Il s'installe en été boréal dans la troposphère entre les plateaux tibétains et les côtes ouest africaines. Son origine est liée à l'établissement de la mousson indienne notamment aux contrastes thermiques existant en été entre les hauts plateaux du Tibet et les régions océaniques dans le sud-est asiatique. Ce Jet est observé en Afrique de l'ouest entre 100 et 200hPa autour de 10°N avec une intensité maximale de l'ordre de 20 m/s.

Chapitre 2 : Données et méthodes

2.1 Présentation de la zone d'étude : Bassin versant du fleuve Casamance

Le bassin versant du fleuve Casamance est un cours d'eau qui s'étend sur une longueur de 350 km, dans la partie sud du Sénégal, il est situé en latitude entre 12°20' et 13°21' Nord et en longitude entre 14°17' et 16°47' Ouest (*figure 2.1*). Ces coordonnées géographiques témoignent que le bassin de la Casamance a une extension beaucoup plus longitudinale (environ 270 km d'Ouest en Est) que latitudinale (100 km du Nord au Sud).

Avec une superficie de 28340 km² environ, Sané *et al.*, (2007), le bassin de la Casamance essentiellement situé en territoire sénégalais, déborde légèrement sur les territoires des Républiques de Gambie au nord et de la Guinée Bissau au sud, (Bodian *et al.*, 2015).

Les études ont prouvé que l'écoulement pérenne du bassin du fleuve Casamance est estimé environ à 129 millions m³/an à la station hydrologique de Kolda, (DGPRE, 2019).

Le fleuve Casamance prend sa source dans la région de Kolda, zone de Vélingara à 50 m d'altitude plus précisément à fafacourou et son exécutoire se trouve dans la base Casamance (Ziguinchor).

Par conséquence, l'effet de la mer rehausse le cours d'eau principal de la Casamance jusqu'à Dianamalari à 152 km de l'embouchure. Sur le Soungrougrou (affluent), il avance jusqu'à Diaroumé à 130 km de l'Océan; sur le Baïla il atteint Djibidione à 154 km de Diogué à l'embouchure montré par (Bodian *et al.*, 2015 et Dacosta, 1989).

Notre étude portera sur l'ensemble du bassin de la Casamance pour ce qui est de la variabilité hydro-climatique (Précipitations, Température, Évapotranspiration, ...).

La maîtrise des ressources en eau disponibles s'est imposée, dès lors; comme une solution adaptée pour atténuer les impacts des aléas climatiques sur l'économie de la région. Elle est tributaire d'une bonne connaissance des mécanismes qui déterminent les éléments du régime hydrologique.



Figure 2.1 : Le bassin versant du fleuve Casamance

2.1.1 Le climat

Situé au sud du Sénégal, le bassin versant de la région naturelle de la Casamance a un climat tropical de type soudano-guinéen: chaud et humide avec une température moyenne annuelle de 27°C. Le climat de cette région est caractérisé par une alternance entre une saison sèche de novembre à mai et une saison humide qui dure presque cinq mois (De juin à octobre). Les apports des mois de mai et novembre sont presque négligeables dans le total moyen annuel qui est défini par des précipitations supérieures à 1000mm dans la région (Malou *et al.*, 1992).

2.1.2 La végétation

Le Bassin versant de la Casamance a une végétation tropicale, composée majoritairement de forêts. D'immenses forêts parcourues par des cours d'eau "bolongs" couvrent 62% de la superficie. Tout au long des "bolongs" se crée une végétation de mangroves, palmiers et rizières, Faye *et al.*, (2013). A l'est de la région existe une vaste étendue de savane forestière. Nous avons deux différentes forêts:

- la forêt soudano-guinéenne ou forêt sèche dense localisée en Basse Casamance,
- les forêts claires en Moyenne et Haute Casamance.

L'importance de ce patrimoine forestier est de participer pour mieux maintenir l'équilibre naturel car jouant le rôle de climatiseur, satisfaire les besoins en produits forestiers et à améliorer les conditions de vie du milieu rural, etc.

2.1.3 Le Relief du bassin de la Casamance

Du point de vue topographique, le relief du bassin versant du fleuve Casamance est généralement plat, il est composé de plateaux qui ne dépasse pas 50 m. Ce bassin versant est caractérisé par un relief faible sur lequel se pratique l'essentiel des cultures d'arachides, de riz, de céréales et d'autres cultures de la région sud du Sénégal. La faiblesse des pentes, explique l'invasion profonde de la mer à l'intérieur du bassin de la Casamance occasionnant ainsi l'hyper-salinisation des terres agricoles et la faiblesse des rendements agricole dans certaines parties du bassin du fleuve Casamance (Bodian *et al.*, 2015).

2.2 Présentation des données

Les données utilisées dans ce mémoire sont celles de la précipitation, de la température (minimale, maximale, et moyenne), de l'évapotranspiration potentielle selon Penman–Monteith, et de débit journalier. Les données des stations de Ziguinchor, Bignona, Sédhiou, Kolda, Oussouye, Diouloulou, Marsassoum et Bounkiling, ont été extraites sur les sorties des modèles climatiques et dans les données CRU (Unité de Recherche sur le Climat).

2.2.1 Les Données d'observation

- **Données de l'Unité de Recherche sur le Climat (CRU)**

Ce sont des données d'observation au pas de temps mensuelles qui couvrent la période 1901-2013 avec une résolution de 50 km environ. Ces données sont celles de l'unité de recherche sur le climat (CRU), (Revue internationale de climatologie, 2013, version TS3.10).

- **Données hydrométriques**

Ce sont des données d'observations du débit journalier (unité m³/s) mesurées à la station de Kolda sur une courte période qui parte de 1998 à 2008.

2.2.2 Les Données des sorties des modèles

Ce sont des données journalières de vingt (20) modèles climatiques régionaux issus du programme CORDEX (Coordinated Regional Climat Downscaling Experiment), avec une résolution spatiale de 50km. Trois cas de réchauffements par rapport aux températures préindustrielles ont été considérés: le réchauffement global de 0.5°C (correspondant à la période de référence nommée RP), et les réchauffements globaux 1.5 °C et 2 °C, nommés FP1 et FP2, respectivement.

Le tableau 2 ci-dessous contient quelques caractéristiques des modèles globaux, régionaux, instituts et les différentes périodes d'étude.

Tableau 2 : Caractéristiques des modèles régionaux

Modèles Globaux	Modèles Régionaux	Institut	RP (Référence)	FP1 (1.5°C)	FP2 (2.0°C)
CCCma-CanEM2	CanRCM; RCA; CRCM	CCCma, SMHI UQAM	1969-1998	2006-2035	2018-2047
ICHEC-EC-EARTH	CCLM; HIRHAM; RACMO; REMO; RCA	CLMcom; DMI; KNMI; MPI; SMHI	1958-1987	2008-2037	2030-2059
MOHC-HadGEM2	CCLM ; RACMO ; RCA	CLMcom; KNMI; SMHI	1984-2013	2017-2046	2032-2061
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCA ; CLCCLM	SMHI; CLMcom	1974-2003	2021-2050	2043-2072
NCC-NorESM1-M	RCA; WRF; HIRHAM	SMHI; BCCR; DMI	1976-2005	2029-2058	2064-2093
MPI-M-MPI-ESM-LR	CRCM; RCA REMO; CCLM	UQAM; SMHI; MPI; CLMcom	1958-1987	2006-2035	2031-2060

Ces données scientifiques nous permettront d’appréhender et d’évaluer les incidences de la variabilité du climat et des changements climatiques dans des secteurs économiques tels que l’agriculture, les ressources en eau, etc.

Elles nous permettront aussi de caractériser la variabilité hydro-climatique du cours d’eau du bassin versant du fleuve Casamance.

2.3 Méthodes

2.3.1 Indice de pluie Standardisé

L'Indice de pluie standardisé (IPS) est calculé selon la formule suivante:

$$SPI = \frac{X_i - X_m}{\delta} \quad (\text{McKee et al., 1993})$$

Où X_i est la moyenne de la pluie pour une année i , X_m et δ sont respectivement la moyenne et l'écart type des pluies annuelles observées pour une série de donnée. Cet indice traduit un excédent ou un déficit pluviométrique pour l'année considérée par rapport à la période de référence. Nous avons procédé de la même façon pour l'indice de l'évapotranspiration potentielle.

2.3.2 Anomalies de température

Il marque la différence entre la température d'une année i et la température moyenne de tous les années

$$\text{Soit } \mathbf{Anomalie} = T_i - T_{moy}$$

Où T_i est la moyenne de la température pour une année i , et T_{moy} est la Température Moyenne annuelle observée pour une série de donnée.

On parle de baisse ou de hausse de température si l'anomalie est respectivement négative ou positive.

2.3.3 Indice de pluie extrême

Les indices pluviométriques utilisés dans ce chapitre permettent de caractériser le comportement de la pluie tout en mesurant ces valeurs extrêmes. Ainsi les différents indices présents dans le tableau 3 ci-dessous sont calculés à partir des données quotidiennes de la précipitation à l'aide du logiciel CDO.

Tableau 3 : Indices liés à la pluie

CDD (Nombre de Jours Consécutifs Secs)	Nombre de jours maximal présentant un cumul pluviométrique journalier < 1 mm/j
CWD (Nombre de Jours Consécutifs humides)	Nombre de jours maximal présentant un cumul pluviométrique journalier > 1 mm/j
99 ^{ème} Centile (Evènement ou journées extrêmement humides)	Valeur au-dessus de laquelle se trouve 1% des données
95 ^{ème} Centile (La part de la pluviométrie intense)	Valeur au-dessus de laquelle se trouve 5% des données
SDII (Indice d'intensité de jours pluvieux)	La lame d'eau moyenne précipitée par jour de pluie (mm/j)
RX5DAY	Précipitation maximale de l'année durant 5 jours consécutifs dont le cumul est supérieure à 50 mm.

2.3.4 Analyse des données

Le traitement et la visualisation des données (au format NetCDF et Excel) ont été faits avec les outils suivants : CDO et Matlab.

La saison pluvieuse (JJAS) a été choisie pour le calcul des indices climatiques. Nous avons aussi calculé et représenté le cycle saisonnier, de même que les variations interannuelles.

Pour ce qui concerne les indicateurs du changement climatique, nous avons effectué la différence entre les réchauffements futurs (FP1 et FP2) et celui de la période de référence (RP).

Indice = Indice de la période de réchauffement global de 1.5 ou 2.0°C - Indice de la période de référence (historique) de réchauffement global de 0.5°C

En outre, les relations pluie-débit et évapotranspiration potentielle, étudiées au chapitre 3, ont été respectivement obtenues à partir des calculs des cumuls moyens mensuels (Cycle saisonnier) et annuels (Variations interannuelles).

2.3.5 Indice de Sécheresse et le Bilan hydrique

➤ Indice de Sécheresse

L'indice d'aridité (I_A), PNUE, (1997) est un indicateur numérique du degré de sécheresse du climat à un endroit donné. L'aridité est généralement exprimée en fonction des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle. Cet indice peut être utilisé pour quantifier la disponibilité des précipitations par rapport à la demande en eau de l'atmosphère, PNUE, (1997). Il est calculé comme suit :

$$I_A = \frac{P}{ETP}$$

Avec **P**: Précipitations moyennes annuelles et **ETP**: Évapotranspiration potentielle moyenne annuelle définie selon Penman-Monteith.

Tableau 4 : L'indice de sécheresse

Valeur de l'indice d'aridité (I_A)	Classe climatique
0.03	Hyper aride
0.03 – 0.2	Aride
0.2 – 0.5	Semi-arides
0.5 – 0.65	Subhumides sèches
0.65	Humide

➤ **Bilan hydrique**

Un bilan hydrique est le résultat chiffré de la comparaison du total des précipitations tombées dans une région et l'évapotranspiration potentielle. Le bilan hydrique permet d'apprécier la faisabilité d'une culture donnée (riz, maïs, arachide etc.) dans une région donnée. Il permet aussi de mesurer le stress hydrique et d'estimer l'éventuelle insuffisance hydrique, pour mieux prévenir les différents évènements extrêmes notamment les sécheresses ou, à l'inverse les inondations.

Le bilan hydrique correspond à un écart entre les apports (précipitations) et les pertes d'eau au niveau du couvert végétal et des cours d'eau (évapotranspiration potentielle). Il permet de rendre compte de la variation du stock d'eau du sol et l'aridité d'une région.

Il est calculé à partir de la formule ci-dessous.

$$B_h = P - ETP$$

Le schéma (figure.2.2) ci-dessous représente les différents flux, en entrée et en sortie (excepté l'infiltration, le ruissèlement, etc.), intervenant dans ce bilan.

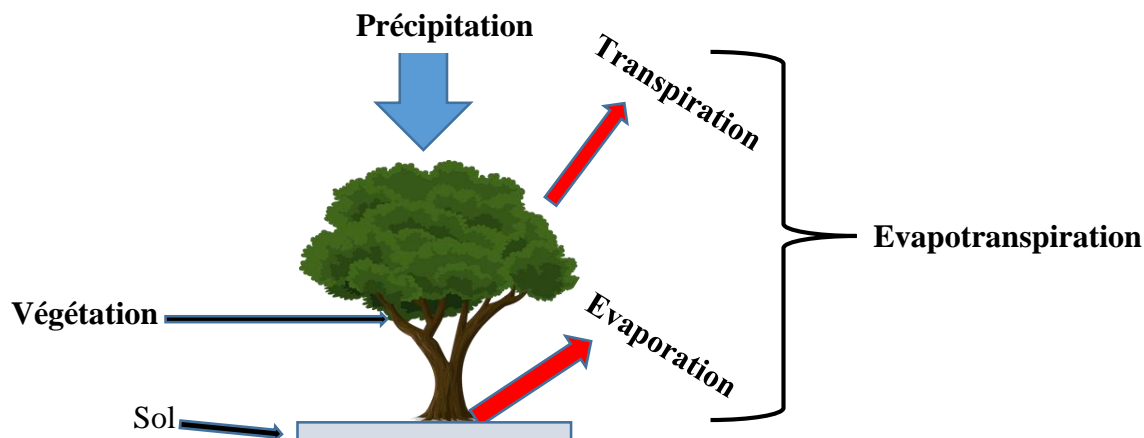


Figure 2. 2 : Le bilan hydrique

L'évapotranspiration potentielle (ETP) selon Penman–Monteith provenant de l'Unité de Recherche sur le Climat (CRU) a été utilisée dans le cadre de ce travail.

Ces dernières années, la méthode de Penman-Monteith a pris un essor sans précédent sur les autres méthodes, en particulier dans le cas où l'information sur les caractéristiques des sols (type de végétation, occupation des sols) est disponible. En conséquence, la FAO a mis à jour ses recommandations pour l'évaluation des besoins en eau des cultures. La formule originale FAO-Penman, Doorenbos et Pruitt, (1977) est maintenant remplacée par celle de Penman-Monteith, Smith, (1992), qui est plus performante dans un contexte de changement de conditions climatiques. Cette méthode est analogue à la formule initiale de Penman, mais diffère par l'introduction des notions de résistance de la surface (rugosité).

$$ETP = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta R_n + \rho C_p Q}{\Delta + \gamma^*} \text{ Equation.1 Avec } Q = \frac{1}{r_a} D \text{ et } \gamma^* = \gamma \left[1 + \frac{r_a}{r_s} \right] \text{ Equation.2}$$

Où R_n = radiation nette (mm.j-1)

D = déficit de pression de vapeur (kPa)

Δ = gradient de pression de vapeur saturée (kPa)

γ = constante psychrométrique (kPa)

λ = chaleur latente de vaporisation de l'eau (M.J.kg-1)

r_a = résistance aérodynamique pour une végétation de référence (s.m-1)

r_s = résistance de surface pour une végétation de référence (s.m-1)

C_p = chaleur spécifique de l'air à pression constante (MJ/kg*°C)

ρ = masse volumique de l'air (kg.m-3)

2.3.6 Estimation des Caractéristiques physiques du Bassin versant du fleuve

Les caractéristiques du bassin du fleuve Casamance sont résumées dans le tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5 : Les caractéristiques du bassin versant

Nom / Formule	Définitions	Valeurs
Surface du bassin versant du fleuve Casamance	C'est la portion du plan délimitée par la ligne de crête, ou contour du bassin. Sa mesure est faite soit à l'aide d'un planimètre, soit par la méthode des petits carrés.	S=28340 km ² , (Sane, Mbaye <i>et al.</i> , 2007)
Périmètre du bassin versant du fleuve Casamance	C'est la longueur de la ligne de contour du bassin. Sa mesure est faite à l'aide d'un curvimètre. Pour certaines applications on trace le périmètre stylisé du bassin en lissant son contour.	P=1496km, (Dacosta <i>et al.</i> , 1989)
Dénivelée du bassin du fleuve Casamance	C'est une différence calculée à partir de la courbe hypsométrique,	D=80m, (Dacosta <i>et al.</i> , 1989)
Indice de compacité de Gravélius: $K_c = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{S}}$	Compare le périmètre P du bassin à celui d'un cercle qui aurait la même superficie S que le bassin considéré et caractérise le milieu.	$K_c = 2.48$
Longueur (L) et largeur (l) du rectangle équivalent du bassin du fleuve: $L = \frac{K_c * \sqrt{S}}{1.12} * \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_c}\right)^2} \right]$ $l = \frac{S}{L}$	Ce sont les dimensions équivalentes du bassin versant.	L = 705.35 Km l= 40.17 Km
Indice de pente globale: $I_g = \frac{D}{L}$	Il facilite l'appréhension du relief	$I_g = 0.11$ m/Km

Le tableau 5 montre que le crue s'écoule lentement par suite de la faiblesse de sa pente, car plus la pente est grande plus l'écoulement est rapide dans le bassin. L'analyse de ces données nous permet de constater que le bassin versant du fleuve Casamance a une forme presque allongée avec un relief considéré très faible, (Bodian *et al.*, 2015).

Chapitre 3: Résultats et Discussions

Ce chapitre est réservé à l'analyse des résultats obtenus y compris les discussions.

3.1 Variation interannuelle de la précipitation, de la température, et de l'évapotranspiration potentielle selon Penman.

3.1.1 Précipitation

La figure 3.1 montre l'indice Standardisé de la précipitation dans la Basse Casamance de 1901 à 2013.

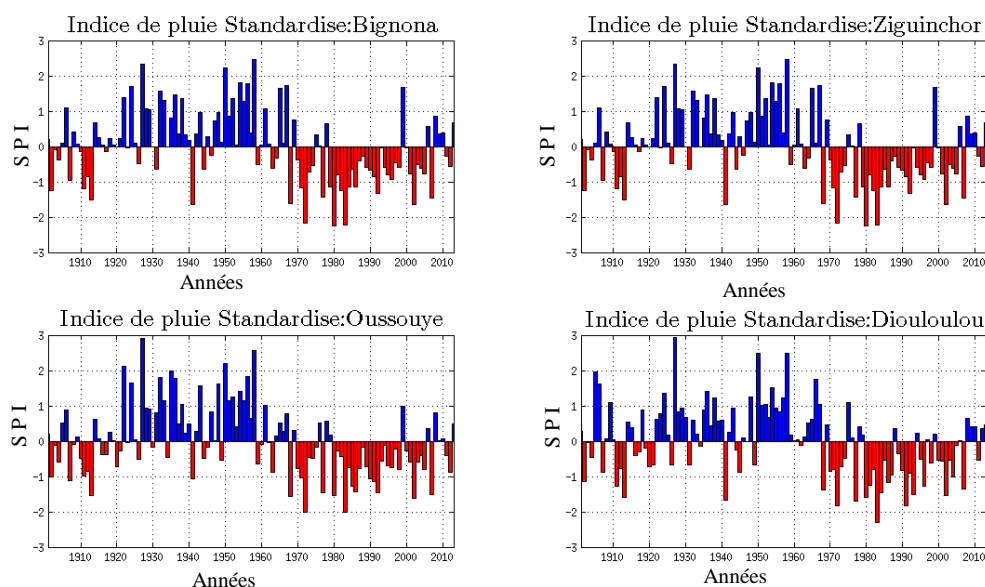


Figure 3.1 : Indice Standardisé de la précipitation de la basse Casamance

L'analyse de l'indice standardisé de précipitation dans la basse Casamance, sur les stations de Ziguinchor, Bignona, Diouloulou et Oussouye, permet de distinguer trois phases importantes. La première phase (1914-1970) a enregistré d'importants excédents pluviométriques; la seconde (1970-2002), la plus déficitaire, s'est caractérisée par une sécheresse avec des déficits très importants (figure 3.1) et de 2002 à 2013, nous constatons une variation interannuelle de la pluie et un « retour très timide » des précipitations comme suggéré par (Faye et Sané, 2015). Ce déficit pluviométrique des années 70 pourrait être expliqué par un faible développement des systèmes convectifs qui génèrent les pluies, et à une faible fréquence des lignes de grains qui apportent de la pluie au Sénégal et partout dans le sahel. Car le renforcement de l'anticyclone saharien peut intensifier l'advection d'air sec dans la région, et supprimer ainsi la

convection comme annoncé par (Hadley center, 2010). Ce déficit pluviométrique observé le long du littoral nord du Sénégal pourrait aussi correspondre à un refroidissement des eaux de surface de l'océan Atlantique tropical montré par (Aguiar, 2009).

Pour ce qui est de la moyenne et de la haute Casamance (figure 3.2), l'indice standardisé de précipitation montre aussi des variations interannuelles assez importantes.

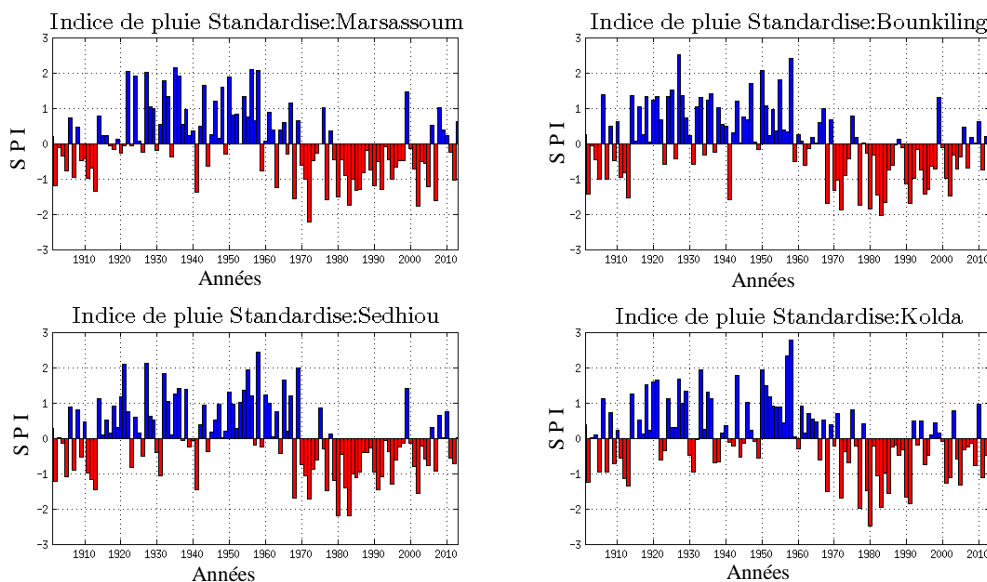


Figure 3. 2 : Indice Standardisé de la précipitation de la moyenne et de la haute Casamance

La représentation graphique des indices pluviométriques annuels permet de mettre en évidence la succession de périodes d'années sèches et d'années humides plus ou moins marquées (figure 3.2) pour les différentes stations météorologiques de la moyenne Casamance (Sédhiou, Bounkiling et Marsassoum) et de la haute Casamance (Kolda). La pluviométrie interannuelle est très variable d'une année à une autre et d'une période à une autre. L'analyse de la figure 3.2 permet de distinguer relativement trois périodes dans l'évolution de la pluie dans ces zones du bassin versant de la Casamance: la période 1913-1969 relativement humide, la période 1969-2002 qui correspond à la période sèche et enfin la dernière période (2002-2013) qui se caractérise par une alternance entre années humides et celles sèches.

En somme pour voir la variation spatio-temporelle et le déficit pluviométrique dans la base, moyenne et haute Casamance, nous avons calculé la moyenne des cumuls annuels des précipitations pour les périodes de 1934-1968 et 1968-2002 respectivement de la station de Ziguinchor (1533,27mm et 1174,28mm, soit un déficit de 358,99mm), de Sédhiou (1499,92mm et 1151,54mm, soit un déficit de 348,38mm) et de Kolda (1428,26mm et 1148,72, soit un déficit de 279,54mm).

Par contre si nous étudions les périodes 1968-2002 et 2002-2013, nous obtenons un écart positif dans les différentes stations respectivement de Ziguinchor (1174.28mm et 1291.04mm, soit une hausse de 116.76mm), de Sédhiou (1151.54mm et 1263.72, soit une augmentation de 112.18mm) et de Kolda (1148.72 et 1212.91, soit une hausse de 64.16mm).

Cet écart positif de la précipitation montre un « retour timide » des conditions humides avec des fluctuations considérables dans le bassin durant la dernière décennie.

La figure 3.3 ci-dessous indique l'évolution interannuelle des cumules de la précipitation moyenne annuelle dans le bassin versant de la Casamance de 1901 à 2013.

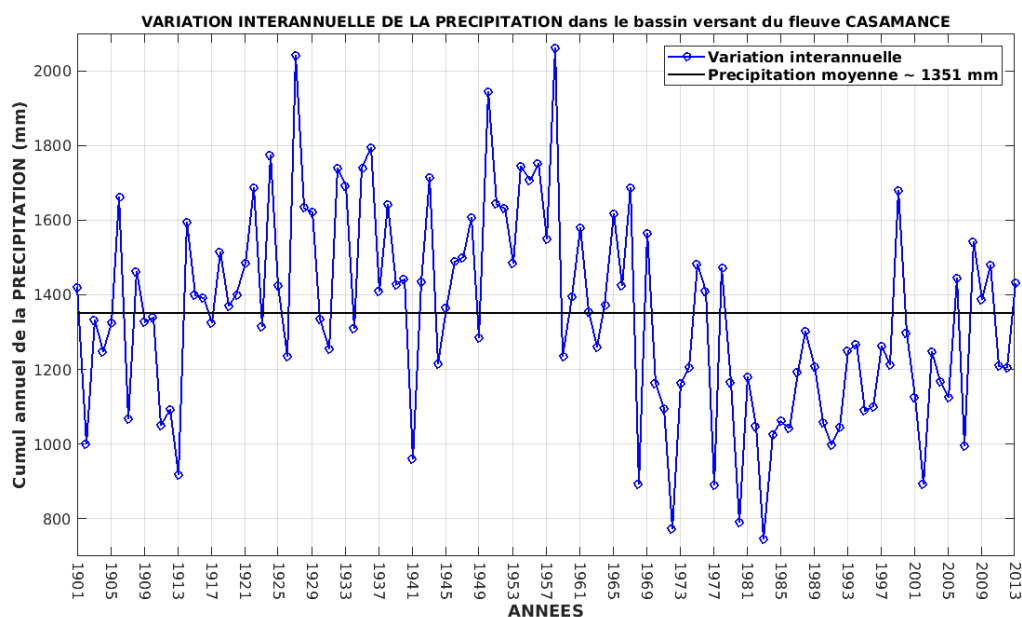


Figure 3.3 : Evolution des cumuls des pluies dans le bassin versant de la Casamance

La tendance générale de l'évolution de la précipitation est à la baisse dans le bassin versant du fleuve Casamance. Le cumul moyen de la précipitation moyenne annuelle pour la période de 1934-1968 est de 1505.19mm et celle entre 1968-2002 est de 1147,50 mm, soit un déficit de 357,69 mm pour tout le bassin. Ce déficit pluviométrique pourrait être expliqué par la longue période de sécheresse qui a été constatée juste après les années 70 dans toute l'Afrique de l'ouest, la plus faible valeur de la précipitation enregistrée est de 745,925mm en 1983 dans le bassin. Durant la période de 1934-1968, l'année 1957 est considérée comme la plus pluvieuse avec une hauteur de pluie qui dépasse 2000mm (2060,2mm). La période 2002-2013 est caractérisée par un faible retour des conditions humides et par une variabilité interannuelle plus forte de la précipitation. Cette baisse des cumuls des précipitations affecte directement les cours d'eau et les nappes souterraines puisqu'il y'a une relation qui lie ces différentes ressources naturelles.

Le retour des précipitations dans le bassin peut être généralement associé à un renforcement des gradients de température continent-océan et à une accentuation des vents de moussons et des flux d'humidité convergeant au Sahel, (Roucou *et al.*, 2015).

3.1.2 Température

La figure 3.4 met en évidence la variation des anomalies de température dans la Basse Casamance (Ziguinchor, Bignona, Oussouye et Diouloulou) de 1901 à 2013.

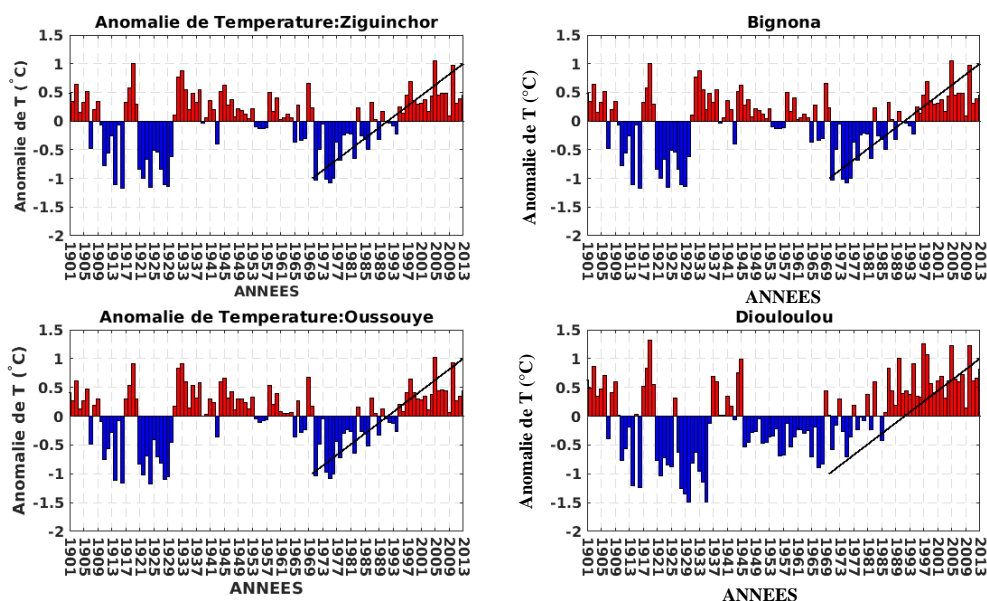


Figure 3. 4 : Les anomalies de température dans la basse Casamance

L'analyse de cette figure 3.4 nous indiquent trois différentes parties :

- De 1901–1931, nous avons une fluctuation de la température par rapport à la période référence qui a une valeur moyenne de 27°C. Dans le cadre général, nous avons tantôt des anomalies négatives et tantôt positives, par rapport à la température moyenne sur les quatre sites du bassin versant de la basse Casamance.
- De 1932-1969 et de 1993- 2013, on assiste à un accroissement significatif de la température dans la basse Casamance, ceci confirme les travaux de Sané *et al.*, (2010). Ainsi, nous remarquons que dans la basse Casamance la tendance est à la hausse avec une anomalie qui tourne autour de +1°C. Cette hausse de la température est beaucoup plus remarquable sur la station de Diouloulou, car le phénomène de la déforestation est beaucoup plus accentué dans cette partie du bassin, juste après les années 70. Dans cette zone la température varie peu dans l'espace que dans le temps. Cette partie est la moins chaude du bassin de la Casamance du fait de sa position par rapport à la côte qui lui apporte de l'air frais.

La figure 3.5 met en exergue l'évolution des anomalies de température dans la moyenne et la haute Casamance pour la période de 1901 à 2013.

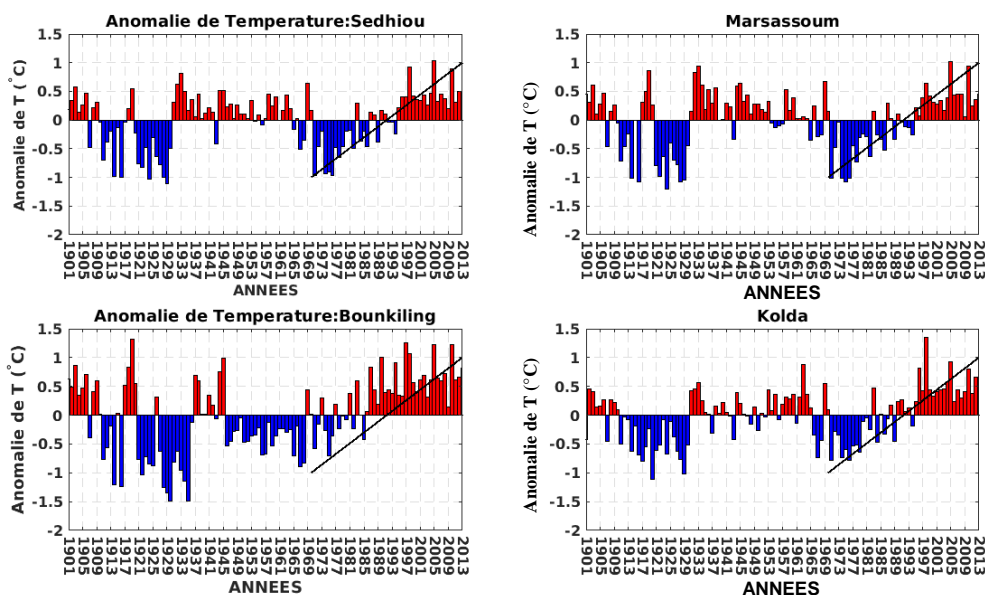


Figure 3. 5: Les anomalies de température dans la moyenne et haute Casamance

Sur la figure 3.5 qui regroupe les trois stations de la moyenne (Sédhiou, Marsassoum et Bounkilng) et la seule station de la haute Casamance (Kolda), on observe trois parties différentes de la variation interannuelle de température. L'évolution est presque identique dans ces deux zones voir même dans toute la région sud du pays.

- De 1901-1931, les anomalies sont des fois positives ou négatives, donc on a une fluctuation de la température.
- De 1932-1969 et de 1993-2013, nous avons des anomalies positives, ce qui montre une augmentation de la température. Cette hausse des températures est beaucoup plus importante sur la station de Bounkiling (moyenne Casamance) qui est un peu éloigné des côtes.
- Entre ces deux périodes, il y'a une partie où les anomalies de températures sont négatives.

Contrairement à la pluie, il est constaté que la température de cette zone varie peu dans l'espace et moins chaude grâce à l'importance de sa couverture végétale et aussi du fait de sa proximité par rapport à la côte maritime qui lui apporte de l'air fraîche, montré dans des études comme celle de (Bodian *et al.*, 2015 et Dacosta, 1989).

3.1.3 Evapotranspiration selon Penman-Monteith

La figure 3.6 ci-dessous traduit les anomalies de l'évapotranspiration selon Penman-Monteith dans le bassin versant de la basse Casamance.

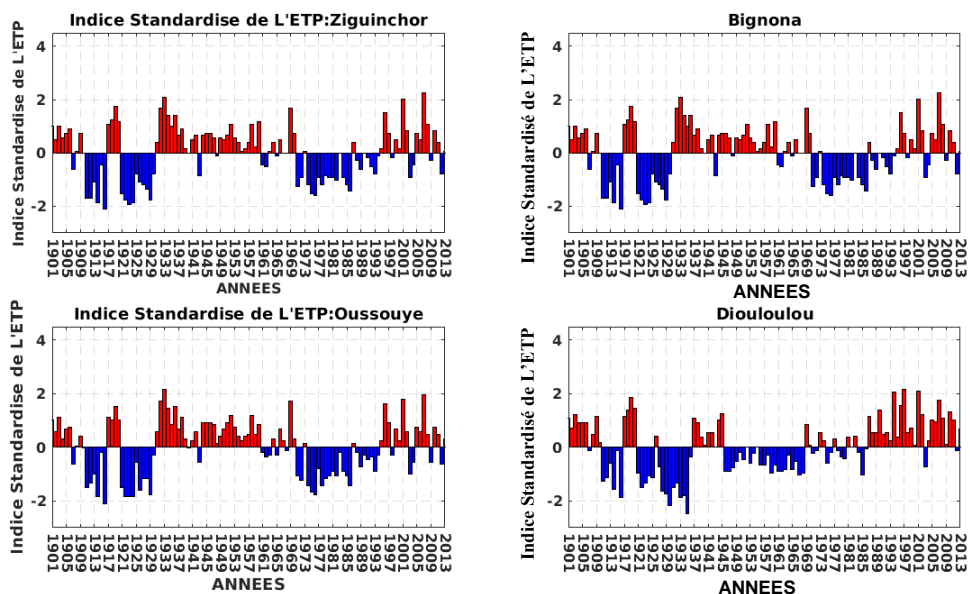


Figure 3. 6 : Les anomalies de l'évapotranspiration dans la basse Casamance

Sur cette figure 3.6, on constate qu'il y a une faible variation spatiale (d'une station a une autre) de l'indice de l'évapotranspiration dans cette zone de la Casamance.

De 1901–1931, on remarque des fois une succession d'années excédentaires, mais aussi un ensemble d'années déficitaires.

De 1932–1970 et de 1998–2013, la tendance est à la hausse comme ce qui a été observée pour la température. Donc l'augmentation de la température pourrait entraîner une hausse de l'évapotranspiration potentielle, même s'il y'a d'autres paramètres qui peuvent l'influencer (vent, l'humidité, la rugosité, etc.).

De 1970 – 1993, on assiste à une tendance qui était à la baisse dans les quatre stations du bassin de la basse Casamance. Cette anomalie négative de l'ETP pourrait être due à la baisse de la précipitation durant cette période. Car la quantité d'eau évaporée dépend de la quantité d'eau disponible (précipitée) sur la terre et au niveau du couvert végétal. Il a aussi noté que la station d'Oussouye a connu une baisse de l'ETP depuis les années 70.

Malgré les péjorations climatiques notées ces dernières décennies, cette partie de la Casamance bénéficie toujours de conditions relativement humides.

Dans la figure 3.7, il est question d'étudier les anomalies de l'évapotranspiration dans la moyenne (Sédhiou, Marsassoum et Bounkilng) et la haute Casamance (Kolda) en fonction du temps

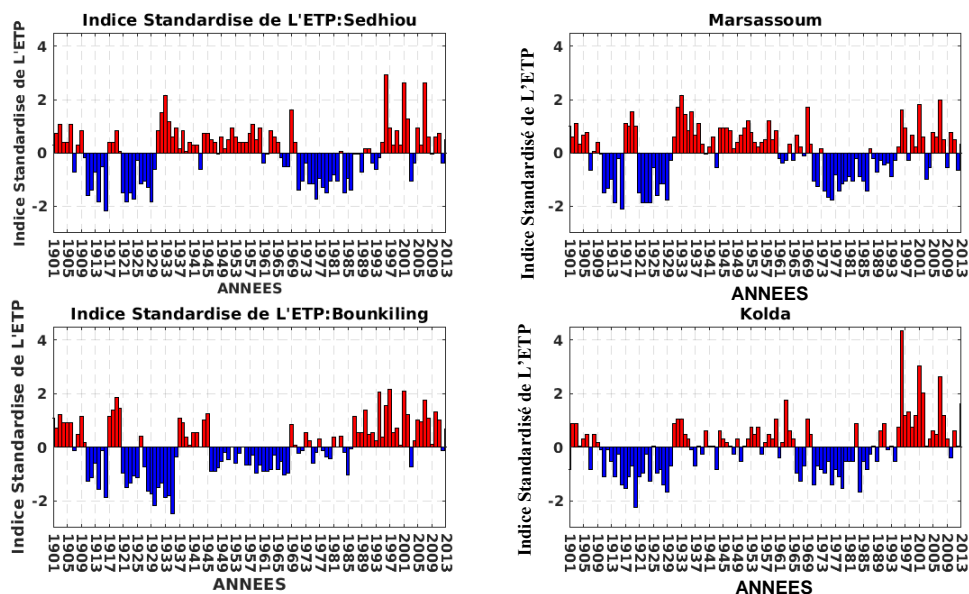


Figure 3. 7 : Les anomalies de l'évapotranspiration dans la moyenne et la haute Casamance

Comme celle de la basse Casamance, les anomalies de l'ETP de la moyenne et haute Casamance varient aussi peu dans l'espace.

De 1901–1930, on retrouve des anomalies de l'évapotranspiration potentielle avec des séries de bandes positives ou négatives par rapport à l'ETP moyenne de la zone.

De 1931–1970 et de 1993–2013, nous avons des anomalies positives dans la moyenne et la haute Casamance, avec des indices maximales sur la station de Kolda. Ceci pourrait être dû au fort taux d'évaporation et de transpiration enregistré durant cette période.

Et de 1970–1993, sur l'ensemble des stations étudiées, une chute de l'indice standardisé de l'ETP a été observée. Cette baisse de l'ETP est bel et bien en accord avec la sécheresse qui avait touché la quasi-totalité des bassins versants de l'Afrique l'ouest.

Durant cette époque, beaucoup d'indices des paramètres météo (précipitation, ETP, Température, ...) indiquent un déficit qui peut être attribué à la variabilité climatique dans cette zone qui confère au bassin de la Casamance des conditions climatiques plus contraignantes grâce à sa continentalité.

3.2 Variation interannuelle (Relation pluie-débit et Anomalies du débit) et mensuelle (Relation pluies-débits-évapotranspirations) sur la station de kolda

Cette figure 3.8 ci-dessous met en exergue la variation du débit en m³/s (ordonnée à gauche) et de la précipitation en mm (ordonnée à droite) en fonction des années (1998 à 2008).

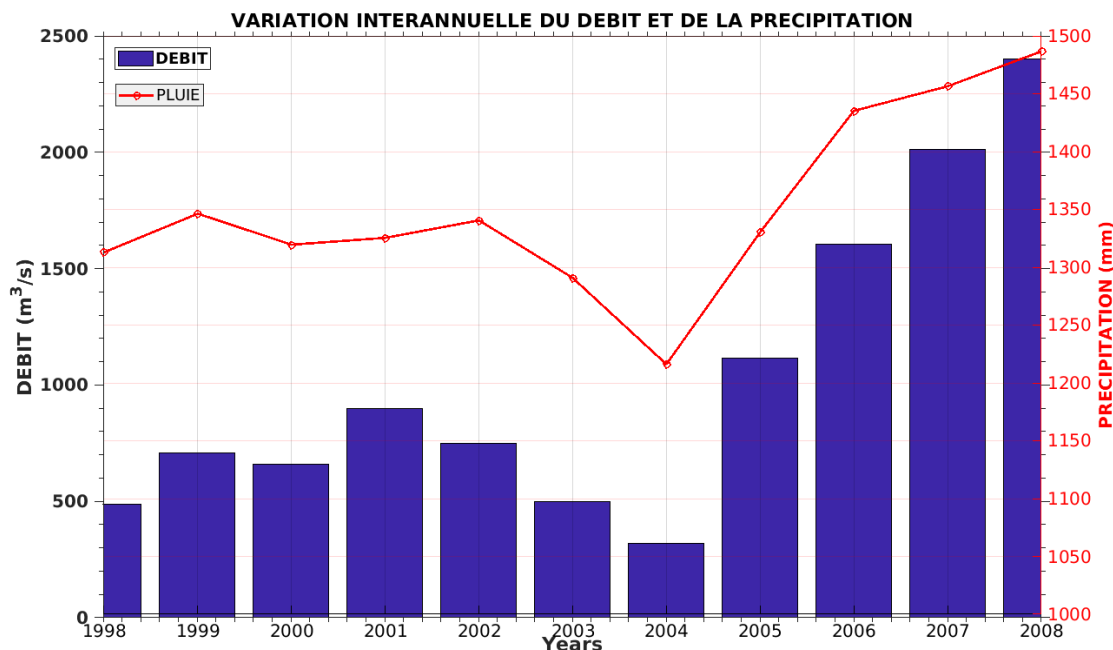


Figure 3. 8 : La relation pluie et débit annuelle de la station de Kolda

De 1998 à 2004, on note une baisse du débit annuel, cette diminution du débit s'est accentuée durant les années 1998, 2003 et 2004. Cette réduction des débits correspond bien aux années où on enregistre les faibles valeurs du cumul des précipitations avec une alternance de faible et de fort débit. Ces résultats sont bien en accord avec ceux de (Bodian *et al.*, 2015).

De 2006 à 2008, nous remarquons une augmentation des cumuls annuels des précipitations, cette hausse de la quantité de pluie tombée est en accord avec l'augmentation progressive du débit annuel dans le bassin du fleuve à Kolda. En effet la relation pluie-débit étudiée dans le bassin versant de la Casamance donne une bonne corrélation avec une forte baisse des pluies notées durant l'année 2004.

De nombreuses études antérieures indiquent que cette baisse des précipitations durant les années 70 pourrait trouver son origine dans un renforcement de la subsidence en haute et moyenne troposphère mais aussi dans une accélération du Jet d'Est Africain (JEA) qui favoriserait le transport d'humidité vers l'océan Atlantique, (Roucou *et al.*, 2015).

La figure 3.9 ci-dessous représente le cycle saisonnier du débit (axe des ordonnées à gauche), de la précipitation et de l'évapotranspiration potentielle (axe des ordonnées inverse à droite). Elle met en évidence la relation pluie-débit et évapotranspiration potentielle.

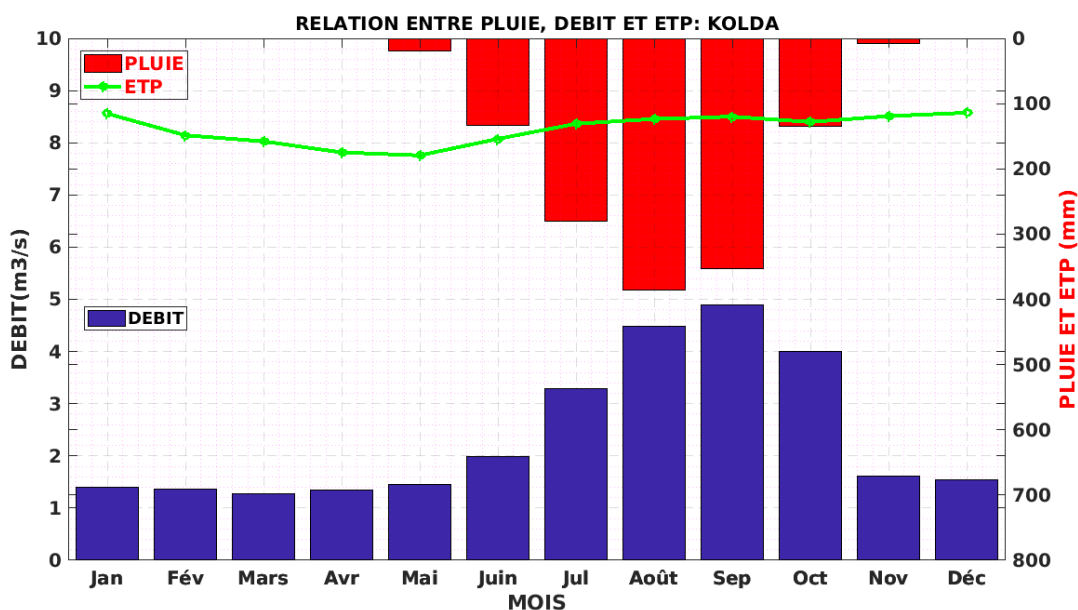


Figure 3. 9 : Cycle saisonnier de la précipitation et du débit de la station de Kolda pour la période de 1998 à 2008.

Dans cette figure, on remarque qu'on a les plus grandes valeurs des débits en juillet, août, septembre et octobre avec un maximum en septembre, ces fortes crues (haute eau) correspondent bien à la période des maxima de pluie dans le bassin du fleuve à Kolda. De faibles débits en mai, juin, novembre et décembre et les débits d'été en janvier, février, mars et avril (basse eau) coïncident bien à la saison sèche. Ces maxima de débits enregistrés durant les mois d'août et septembre sont dus à la fréquence, à l'intensité et à la durée des pluies qui s'abattent dans cette partie du sud du Sénégal. Nous avons aussi des fortes valeurs de l'évapotranspiration potentielle (ETP) durant la période sèche (Mars-Avril-Mai), pendant cette période, nous avons un ciel beaucoup plus dégagé et clair avec un fort rayonnement solaire, favorisant l'évaporation et la transpiration au niveau du couvert végétal et les cours d'eau. Après cette période de fort ensoleillement favorisant les pertes d'eau en direction de l'atmosphère (ETP), on assiste à une autre période (Juin à octobre) où le taux d'humidité, la couverture nuageuse, le débit et la précipitation sont beaucoup plus importants. Donc cela pourrait être à l'origine de ces faibles valeurs d'ETP durant toute la période pluvieuse comme montré par (Bodian *et al.*, 2015).

La figure 3.10 montre la variation des anomalies du débit durant la période de 1998 à 2008 dans la station de la haute Casamance (Kolda). Les anomalies positives en bleu (indice > 0) et celles négatives en rouge (indice < 0).

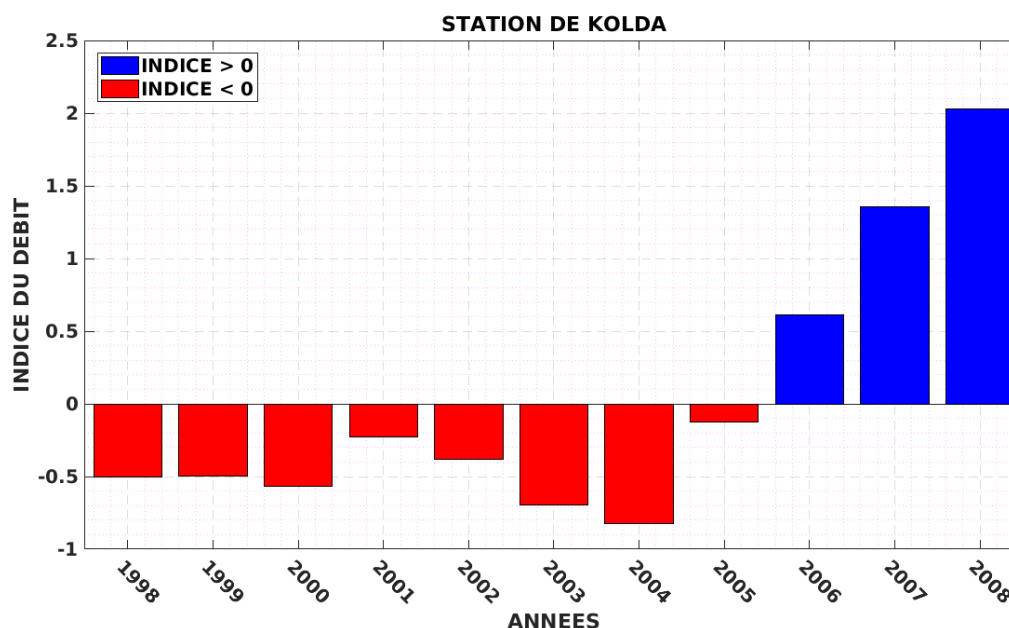


Figure 3. 10 : Les anomalies du débit dans la haute Casamance

L'étude de cette anomalie nous montre deux différentes périodes :

A savoir la période de 1998–2005, définie comme déficitaire. C'est l'époque qui correspond à la période où la quasi-totalité des bassins versants du sahel sont confrontés à une baisse de la précipitation, cela prouve que le déficit pluviométrique entraîne une décroissance du débit des cours d'eau, comme dans le cas du bassin versant du fleuve Casamance à la station de Kolda.

Aujourd'hui, la diminution des débits à Kolda entraîne une occupation du lit de la Casamance par le front urbain de la ville de Kolda.

Pour la période de 2006–2008, nous avons des indices de débit positif, cette période excédentaire est marquée par un faible retour des pluies dans la partie sud du Sénégal. Cette tendance positive peut être expliquée par le retour timide des conditions humide dans le bassin versant, surtout avec l'augmentation de la précipitation observée durant le mois de septembre et octobre.

3.3 Indice de Sécheresse

La figure 3.11 ci-après représente la variation interannuelle de l'indice de sécheresse dans la moyenne et haute Casamance.

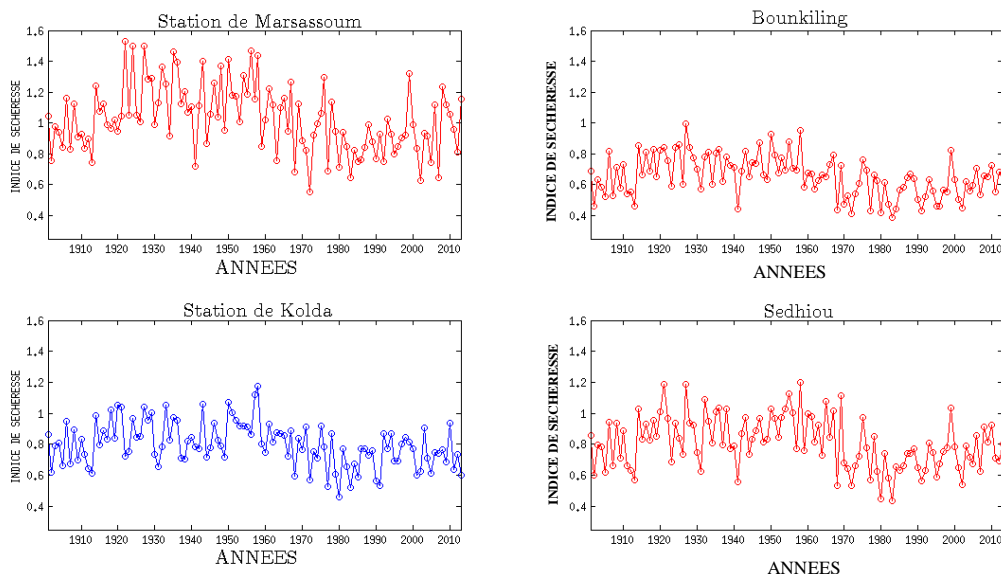


Figure 3. 11 : Variation interannuelle de l'indice de sécheresse des différentes stations du bassin versant de la haute Casamance.

Les valeurs de l'indice d'aridité sont comprises entre 0.4 et 1.6 dans la moyenne et haute Casamance. La figure 3.11 ci-dessus nous montre les valeurs de l'indice de sécheresse qui sont pratiquement inférieur à 1 dans la station de Bounkiling, Sédhiou et Kolda. Cela nous permettra de dire que les apports annuelles de pluie sont généralement inférieur aux sorties (ETP) dans ces stations météorologiques. Les climats de ces stations sont considérés comme tantôt subhumides sèches, tantôt humides. Pour ce qui est de la station de Marsassoum (moyenne Casamance), on remarque que les valeurs de l'indice sont comprises entre 0.6 et 1.6, donc les apports annuels de pluies sont beaucoup plus significatifs que les sorties. Le climat de cette zone pourrait être qualifié comme humide (IA supérieur à 0.65).

Pour ce qui est de la basse Casamance, nous avons aussi montré la variation interannuelle de l'indice de sécheresse dans la figure ci-dessous.

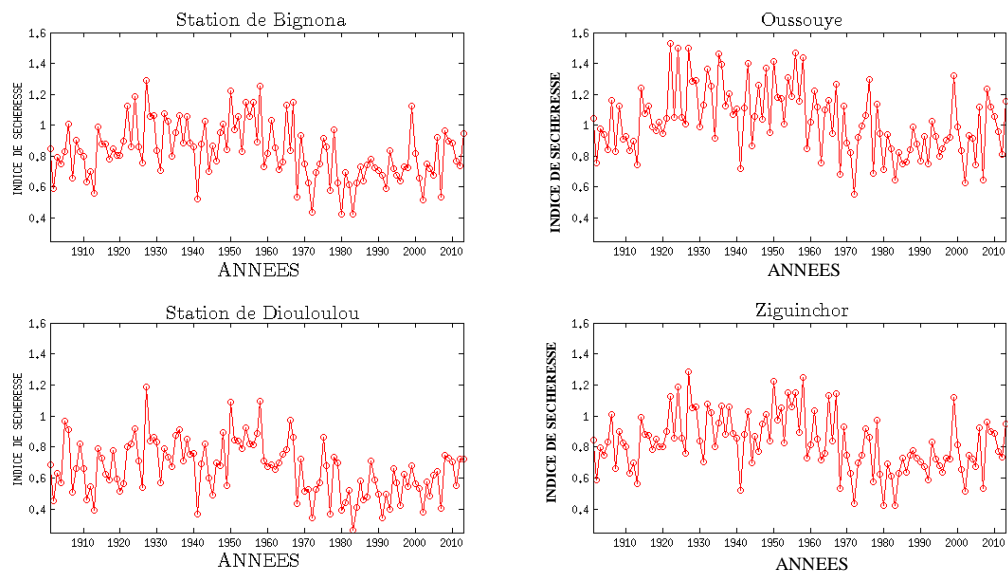


Figure 3. 12 : Variation interannuelle de l’indice de sécheresse des différentes stations du bassin versant de la basse Casamance

Comme dans la haute et moyenne, l’indice de sécheresse de la basse Casamance est compris entre 0.4 et 1.6, sauf la station de Diouloulou qui a des faibles indices de sécheresse inférieure à 0.4. D’après les calculs, on constate que les valeurs de l’indice de sécheresse sont en générale inférieur à 1 ($P < ETP$ car on a huit mois non pluvieux). Le climat de la station d’Oussouye est considéré comme humide puisque son indice d’aridité (I_a) est pratiquement supérieur à 0.65. Pour les autres stations de la basse Casamance (Ziguinchor, Bignona et Diouloulou) ont un climat un peu subhumide sèche mais majoritairement humide même s’il existe des années où l’indice est qualifié de semi-aride.

Cependant, après une analyse commenté de ces deux figures (figure 3.12 et 3.12), il est remarqué dans toutes les différentes stations du bassin versant de la Casamance qu’il y’a des faibles valeurs d’indices d’aridité durant les années 70, 80 et 90, cela prouve bien la sécheresse des années 70 dans l’Afrique de l’ouest comme montré par (Adamou *et al.*, 2010).

3.4 Le bilan hydrique

3.4.1 Annuelle (12 mois)

Cette figure 3.13 met en évidence le bilan hydrique définit comme l’écart entre la pluviométrie moyenne et l’évapotranspiration moyenne annuelle dans la moyenne et la haute Casamance.

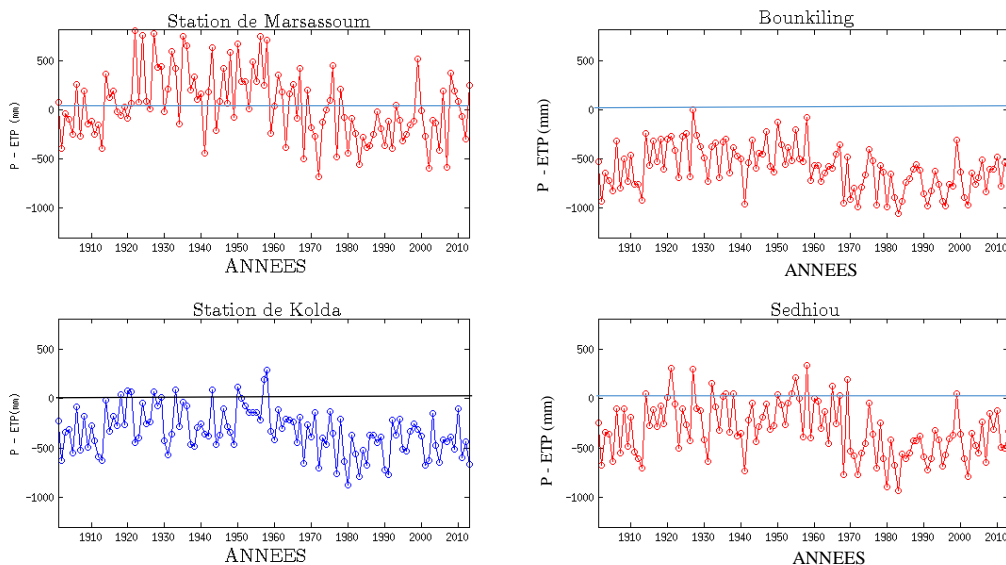


Figure 3. 13 : La variation interannuelle du bilan hydrique pour tous les 12 mois de l’année dans la moyenne et la haute Casamance

Excepté la station de Marsassoum (zone la plus pluvieuse de la moyenne Casamance) le bilan hydrique de Kolda, Sédhiou et Bounkiling est déficitaire. Le déficit hydrique est observé juste après les années 70 jusqu’à nos jours, cette période correspond bien à celle de la sécheresse que l’Afrique de l’ouest avait connue. Ce déficit est beaucoup plus ressenti dans la moyenne Casamance: station de Bounkiling où le taux d’évapotranspiration est strictement supérieur à la précipitation annuelle.

La figure 3.14 ci-dessous illustre la variation interannuelle du bilan hydrique annuelle dans la basse Casamance.

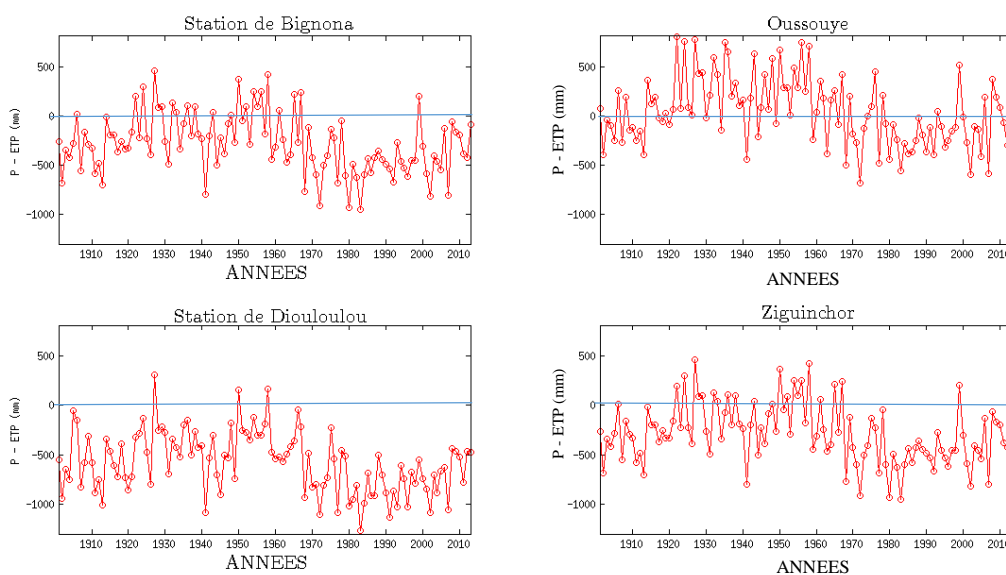


Figure 3. 14 : Variation interannuelle du bilan hydrique de la basse Casamance.

Dans cette zone le bilan hydrique est beaucoup plus déficitaire dans la station de Diouloulou, Ziguinchor et Bignona que la station d'Oussouye où il est pratiquement excédentaire. Comme tous les autres pays de l'Afrique de l'ouest, la base Casamance traverse aussi une période où la différence entre $P - ETP < 0$ depuis 1970.

3.4.2 Annuelle (JJAS)

La figure 3.15 illustre la variation interannuelle de l'écart $P-ETP$ dans la moyenne (Sédhiou, Bounkiling et Marsassoum) et la haute Casamance (Kolda) en période hivernale

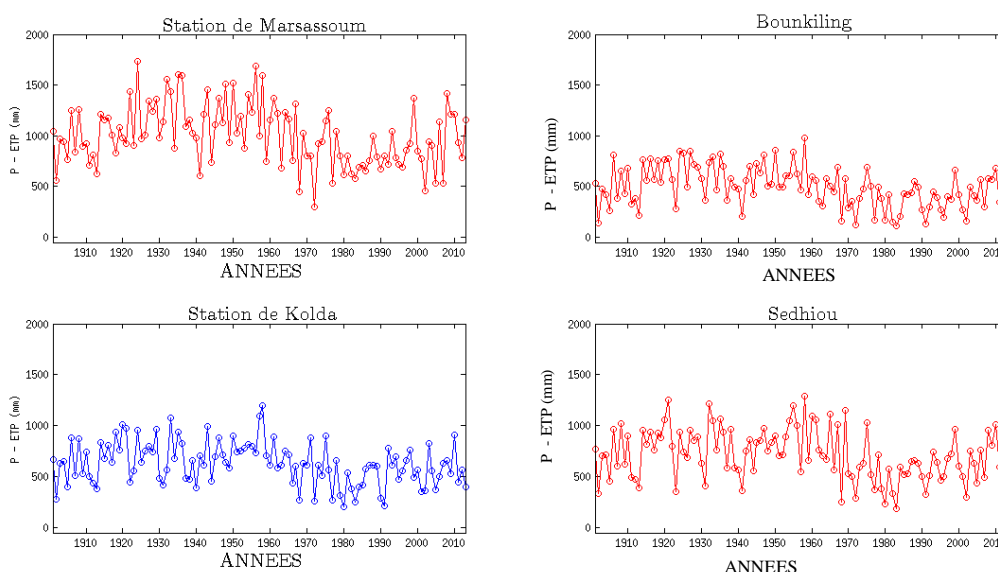


Figure 3. 15 : Variation interannuelle du bilan hydrique dans la haute et moyenne Casamance pour la période pluvieuse (JJAS).

Le bilan hydrique est strictement positif pour toutes ces différentes stations étudiées dans cette zone du bassin. Cela nous prouve encore, que dans cette partie du bassin, que les apports de pluie sont généralement supérieurs aux sorties qui sont les ETP (évapotranspiration potentielle), durant la période pluvieuse avec des écarts supérieurs à 150mm.

La différence $P-ETP$ tourne autour de 150 à 1000mm dans la station de Sédhiou, Bounkiling et Kolda. Seule la station de Marsassoum qui a des écarts qui atteignent plus de 1800mm, cela pourrait être dû à la position géographique et environnementale qu'il occupe dans cette zone.

On remarque que $P > ETP$, ceci dit que l' $ETP=ETR$ (évapotranspiration réelle), donc il serait évident qu'il ait écoulement et constitution de réserves dans ces différentes zones: la période étudiée est qualifiée excédentaire.

La variation interannuelle du bilan hydrique dans la basse Casamance est représentée dans la figure 3.16 ci-dessous

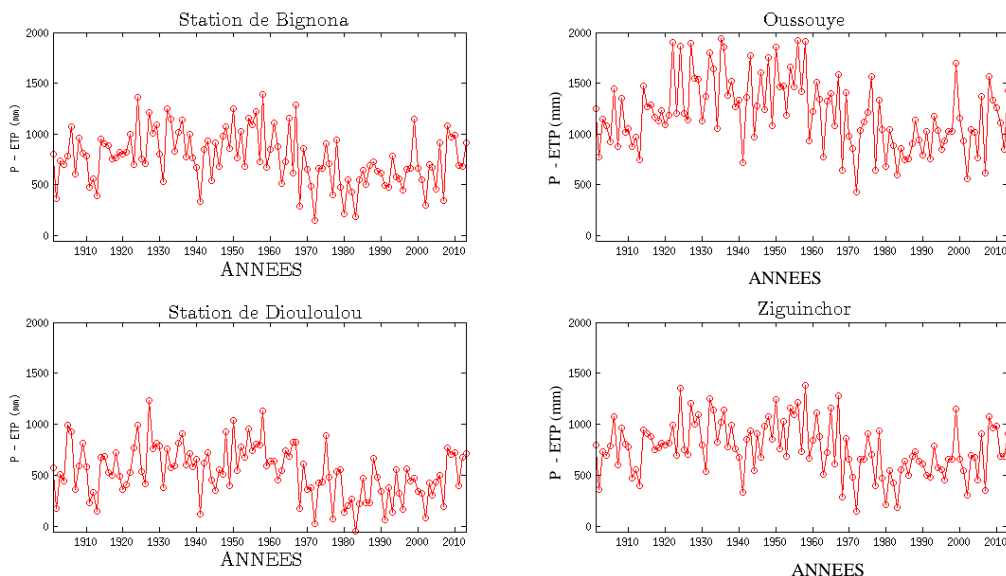


Figure 3. 16 : Variation interannuelle du bilan hydrique dans la haute et moyenne Casamance pour la période pluvieuse (JJAS).

L’analyse de cette figure 3.16 nous montre qu’il y’a une nette variation spatiale de cet écart. Pour les stations de Bignona et Ziguinchor, nous avons des bilans positifs (supérieur à 150mm), il est aussi remarqué que la station d'Oussouye à des plus grandes valeurs du bilan hydrique (500 à 2000mm), car c'est la zone la plus arrosée du bassin versant. Quant à la station de Diouloulou, on remarque que le bilan est compris entre -50 à 1000mm avec la faible valeur -45.1 mm en 1983.

Vu le comportement du bilan hydrique de ces différents stations de la base Casamance, on peut espérer un écoulement suivi de la constitution de réserves car ETR est égale à ETP ($P > ETP$). Par conséquent, après une analyse de ces deux figures (figure 3.15 et 3.16), on note une importante variation interannuelle et spatiale du bilan hydrique, il est aussi remarqué durant les années 70 et 80 une baisse progressive de cet écart. Cette chute du bilan hydrique pourrait être due par la longue période de sécheresse qui avait touché la quasi-totalité des bassins versant de l’Afrique de l’ouest.

- D’après les figure 3.15 et 16, il est constaté que la hausse des précipitations durant les mois pluvieuses s'accompagne d'une augmentation de la convergence ($P-E > 0$) indiquant un renforcement du système de mousson de juillet à octobre, d'où l'augmentation annuelle du bilan hydrique dans tout le sahel observé par (Alassane, 2004 et Roucou *et al.*, 2015).

3.5 Evaluation de simulations climatiques

Cette partie est consacrée à l'étude comparative entre les sorties de modèles climatiques et les observations afin d'évaluer les sorties de modèles.

3.5.1 Précipitation

La figure 3.17 représente la variation mensuelle de la pluie (cycle saisonnier) sur quelques stations du bassin de la Casamance. Nous comparons les observations (CRU) en rouge et les sorties de modèle de la période historique (RP) en bleu de 1958 – 2013.

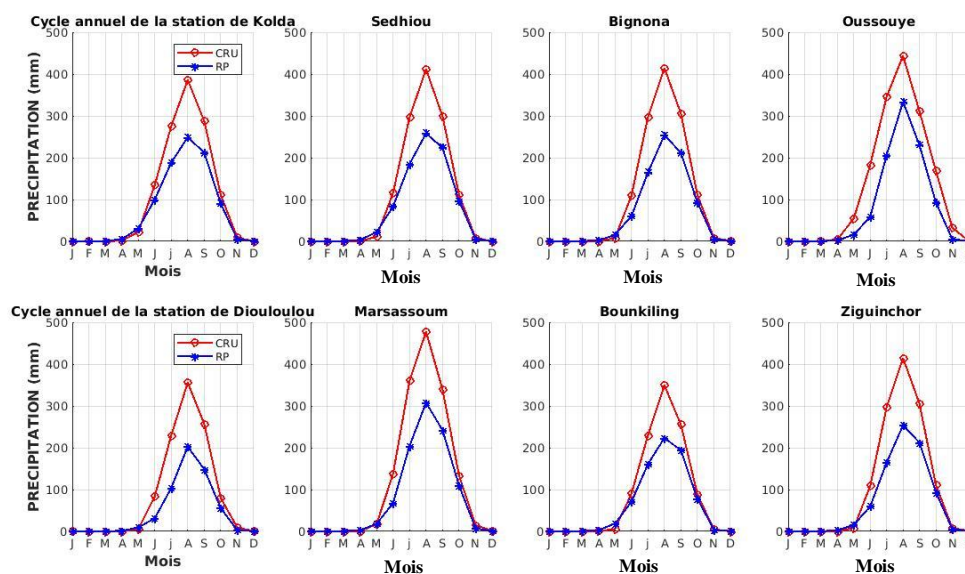


Figure 3. 17: Cycle saisonnier de la précipitation dans le bassin de la Casamance.

Comme toute la majeure partie des stations de l'Afrique de l'ouest, les stations du bassin du fleuve Casamance présentent une allure uni-modale avec un seul maximum au mois d'août qui est considéré comme le mois le plus pluvieuse dans tout le bassin du fleuve. Ce pic maximum de précipitation en août peut être dû à l'arrivée de la mousson ouest africaine, comme la montrait Bardin, (2004) et Alassane, (2004). L'analyse de cette figure 3.17 nous prouve que le modèle à toujours tendance à sous-estimé les observations pour ce qui est de la pluie. On note une nette variation spatiale des précipitations dans les différentes stations du bassin du fleuve, on a aussi deux stations plus pluvieuses: la station de Marsassoum (moyenne Casamance) et la station d'Oussouye (basse) et la moins pluvieuse: celle de Bounkiling. Compte tenu de cela, nous pouvons dire qu'il y'a une véritable variation spatiale de la précipitation. Ces zones considérées comme pluvieuses, non seulement qu'elles ont une végétation abondante mais aussi elles sont beaucoup plus proche des côtes et du fleuve Casamance contrairement aux autres qui sont moins pluvieuses.

3.5.2 Température

La figure 3.18 met en évidence le cycle saisonnier de la température maximale à partir des données de modèle de référence RP en bleu et celles de l'observation CRU en rouge.

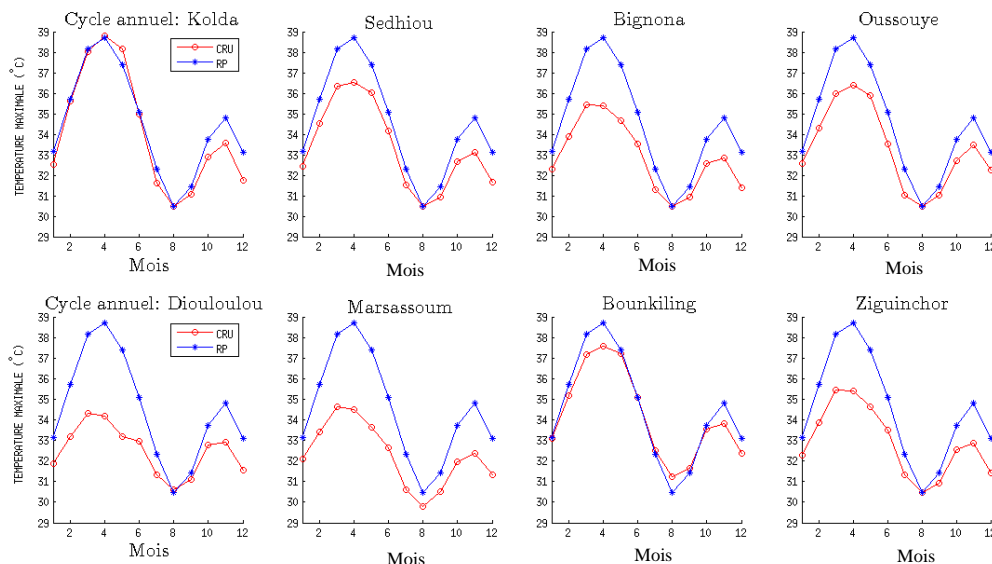


Figure 3. 18 : Cycle saisonnier de la température dans le bassin du versant du fleuve Casamance.

Compte tenu de sa faible latitude tropicale et de la continentalité, le bassin versant du fleuve Casamance connaît un régime thermique bimodal: les températures maximales et minimales les plus chaudes sévissent durant la saison sèche (M A M) et (Oct Nov.). Cette allure bimodale de la température peut être due au pic maximum de la pluie qu'on observe au mois d'août qui enregistre les faibles valeurs de température, ces résultats sont aussi en concordance avec la littérature et de Bardin *et al.*, (2004). Ainsi pour ceux qui est de la température, les données de sorties de modèles ont toujours tendance à surestimer les observations et c'est ce qu'on voit sur la figure 3.18 pour toutes les différentes stations du bassin excepté celle de Kolda où les sorties de modèles ont épousé l'observation jusqu'au mois d'août pour enfin suivre le phénomène habituel.

En effet, la Casamance maritime ou Basse-Casamance, qui s'étend du Soungrougrou au littoral, bénéficie en permanence d'une atmosphère humide tandis que la continentalité de la Casamance intérieure (Moyenne et Haute-Casamance) lui confère des conditions climatiques plus contraignantes.

3.5.3 ETP selon Penman-Monteith,

La figure 3.19 met en exergue la variation mensuelle de l'ETP (c'est-à dire la quantité d'eau

transférée en direction de l’atmosphère), tout en faisant la comparaison entre les observations et les modèles.

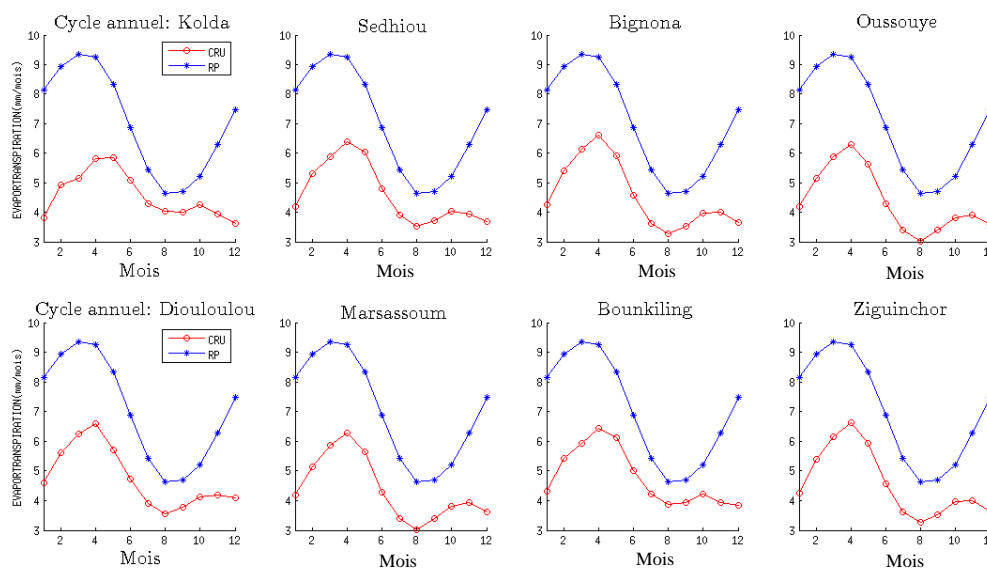


Figure 3. 19: Cycle Saisonnier de l’évapotranspiration selon Penman-Monteith dans le bassin de la Casamance

Après analyse de la figure 3.19, on remarque que le profil de l’ETP est presque identique à celui de la température. Les sorties de modèles (courbe en bleu) ont surestimé les observations (courbe en rouge) pour l’ETP. Le profil visualiser à partir des données d’observations varie dans le même sens que celui des sorties de modèles, mais on observe une petite différence pour les deux dernière mois de l’année car les observations montrent une diminution, alors que les modèles nous indiquent une hausse de l’ETP. Le maximum d’ETP enregistré durant la saison sèche, c’est-à-dire au mois de mars et avril, qui est la période la plus chaude et le minimum durant l'hivernage, qui est la période la plus humide. Ce fort taux d'humidité pourrait causer la diminution de la quantité d’eau évaporée (ETP) alors que de l’autre coté la chaleur de l’ensoleillement et le vent participent à l’augmentation de la quantité d’évapotranspiration pendant les mois les plus chaudes, ceci a été démontré par plusieurs chercheurs comme (Bodian, 2015 et Bardin *et al.*, 2004).

3.6 Les indicateurs de Changement climatique (CC)

Dans cette partie il est question de faire l’analyse des indicateurs du changement climatique.

3.6.1 Précipitation

La figure 3.20 montre l'écart absolu entre la période FP1 (réchauffement de 1.5°C) et RP (référence) d'une part (allure en bleu) et entre la période FP2 (réchauffement de 2°C) et RP d'autre part (allure en noir).

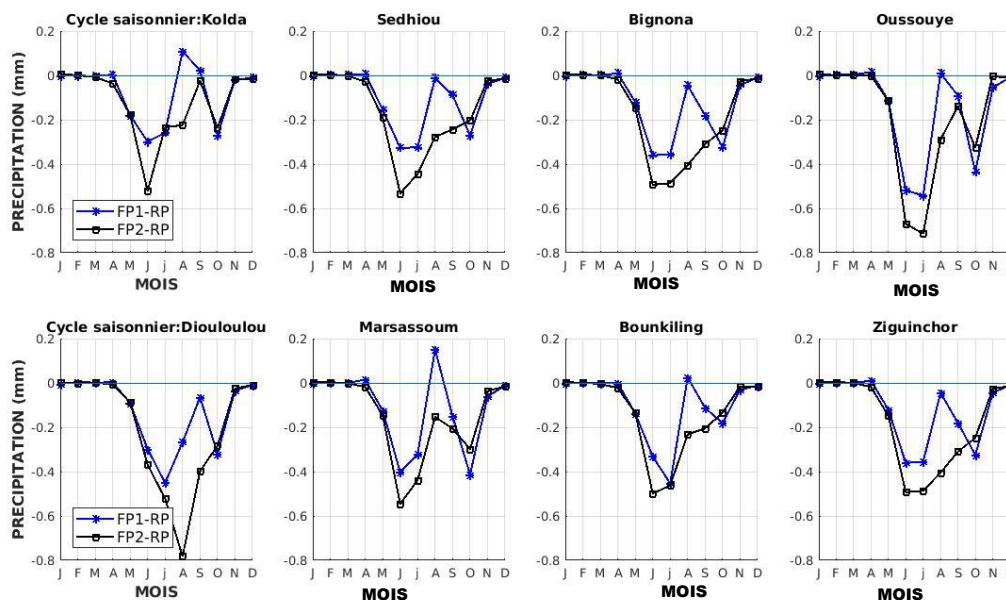


Figure 3. 20: Cycle Saisonnier du changement de la précipitation dans le bassin de la Casamance.

L'analyse de cette figure, révèle qu'une diminution probable de la quantité de pluie dans les prochaines décennies. Sous le réchauffement de 1.5°C, une diminution des pluies est projetée sur les quatre (4) stations de la basse Casamance (Ziguinchor, Bignona, Oussouye et Diouloulou) et les deux (2) stations de la moyenne (Sédhiou et Bounkiling). Une légère augmentation précipitations est notée au mois d'août pour les stations de Kolda et Marsassoum. Quant au réchauffement de 2°C, la deuxième différence FP2-RP nous montre clairement une forte baisse de la précipitation sur toutes les huit stations du bassin versant du fleuve Casamance. D'après l'analyse faite sur cette figure, on peut dire qu'on pourrait s'attendre à une baisse de la précipitation dans le futur comme prévu par le (PNUD, 2009). Cette diminution de la pluie serait beaucoup ressentie dans la basse que dans la haute et moyenne Casamance. Le déficit pluviométrique pourrait être lié à une réduction du flux de mousson et aux effets néfastes de l'augmentation des gaz effet de serre sur le climat.

3.6.2 Température

La figure 3.21 fait voir les changements mensuels de la température sous les deux réchauffements, tout en montrant l'écart entre la période de réchauffement global de 2°C et celle de la référence (bar bleue) d'une part et aussi l'écart entre la période de réchauffement de 1.5°C avec celle de la référence (période historique) d'autre part (bar jaune).

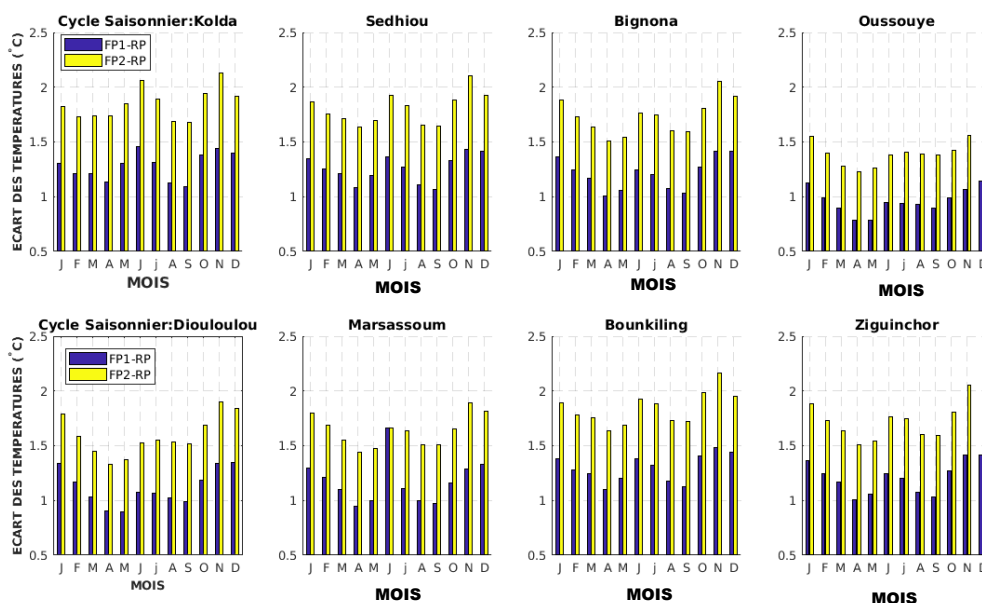


Figure 3. 21: Cycle Saisonnier du changement de la température dans le bassin de la Casamance

Dans cette figure 3.11 ci-dessus, il est remarqué une augmentation générale de la température dans toutes les stations étudiées du bassin du fleuve Casamance car l'écart des températures est positif pour tous les deux réchauffements.

Après l'analyse comparative de ces deux écarts, il est constaté que l'augmentation de la température sera beaucoup plus ressentie dans le futur lointain (réchauffement global 2°C) que dans le futur proche (réchauffement global de 1.5°C). Les grandes valeurs issues de ces différences ont été enregistrées dans les mois de juin, novembre, décembre et janvier, ce qui veut dire que le réchauffement ne sera pas le même pour tous les mois.

Cette hausse de la température est en accord avec les différents rapports du GIEC, et des études régionales et locales telles que celles de Sané *et al.*, (2010), et Mbaye *et al.*, (2018), etc.

Cette hausse des températures est sans doute liée à l'accroissement de la concentration des GES d'origine anthropique dans l'atmosphère.

3.6.3 Evapotranspiration selon Penman-Monteith

La figure 3.22 illustre les changements de l'ETP de la période FP1 et RP (allure bleue) d'une part et d'autre part entre FP2 et RP (allure noire) en fonction des mois.

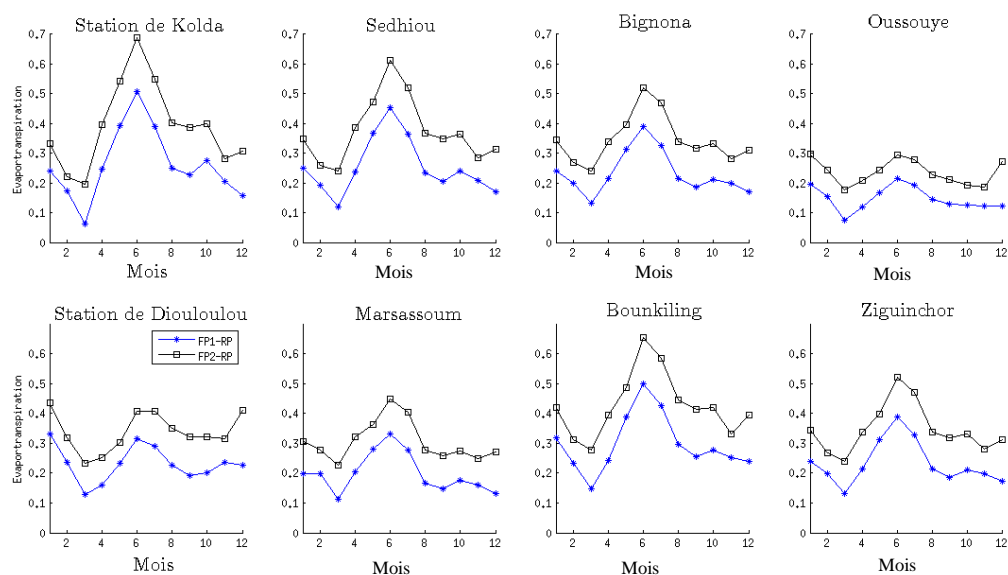


Figure 3. 22 : Cycle saisonnier de l'évapotranspiration du bassin versant de la Casamance.

L'analyse de cette figure 3.22 montre une augmentation qui est beaucoup plus amplifiée dans le futur lointain que dans le futur proche sur toutes les stations étudiées du bassin de la Casamance. L'écart est très important à la station de Kolda, c'est ce qui est logique, car la région de Kolda est la plus chaude du bassin de la Casamance. Nous avons montré précédemment que la station d'Oussouye est la plus humide et moins chaude grâce à son couvert végétal, d'où les faibles valeurs de l'ETP. Les valeurs maximales de l'écart sont localisées au mois de juin, qui fait partie des mois les plus chauds du bassin. Les fortes valeurs de l'évapotranspiration potentielle (ETP) pourraient être dues aux températures élevées, au faible taux d'humidité relative, aux vents forts, etc.

Dans cette étude, il est remarqué que le bassin versant du fleuve Casamance pourrait être confronté à une augmentation de l'ETP dans le futur. Cette hausse de l'ETP sera beaucoup plus substantielle dans le futur lointain, c'est à dire avec un réchauffement global de 2°C.

3.7 Indices extrêmes de pluie

Cette partie est consacrée à l'étude des indices extrêmes de pluie afin de prédire les modifications des conditions climatique futures dans le bassin versant du fleuve Casamance.

3.7.1 L'intensité des jours de pluie, le cumul sur 5 jours consécutifs et les nombres de jours consécutifs secs et humides

la figure 3.23 met en exergue la variation spatiale (en fonction des stations) des indices extrêmes de pluie.

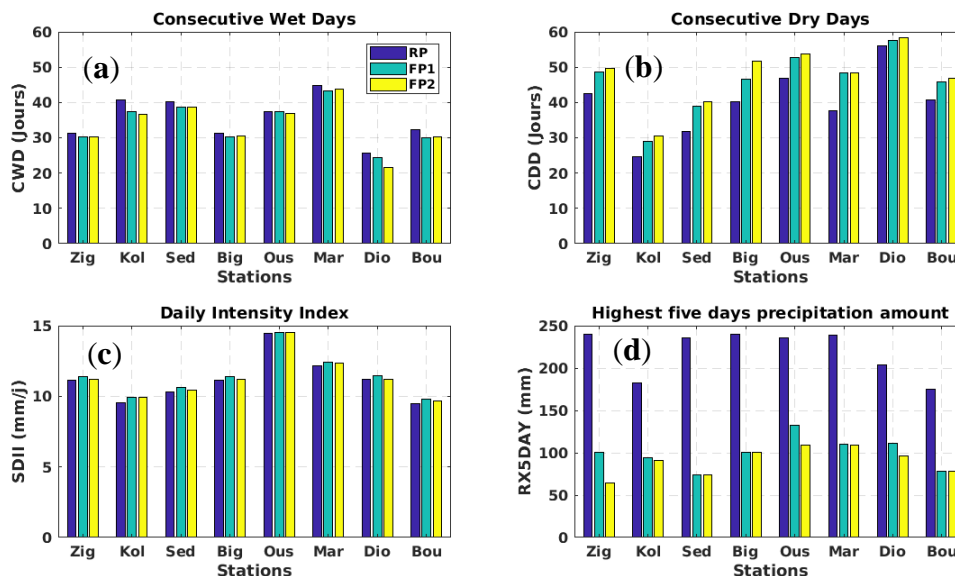


Figure 3.23 : Variation des indices de pluie: CWD (a), CDD (b), SDII (c), et le RX5DAY (d) en fonction des différentes stations du bassin versant du fleuve Casamance.

L'analyse de cette figure 3.23, peut se faire selon:

- CWD et CDD

Dans le cadre général, on constate que les barres de FP1 et FP2 sont au-dessous de celle de RP pour le CWD (figure 3.23.a), contrairement au CDD (figure 3.23b) qui montre une augmentation des séquences sèches dans le futur.

L'analyse de la figure 3.23.a nous montre que la majeure partie des stations de la zone sud du Sénégal enregistreront un nombre maximal de jours consécutifs humides compris entre 30 et 45 jours. La station de Marsassoum est l'un des sites où on obtient beaucoup plus de jours consécutifs humides. La station de Diouloulou fait l'exception avec moins de jours consécutifs humides (≤ 20 jours).

Quant à la figure 3.23.b, le nombre de jours consécutifs secs dans les différentes stations du bassin versant du fleuve Casamance est compris entre 30 et 58 jours avec plus de jours consécutifs secs à la station de Diouloulou et moins de jours consécutifs secs à la station de Kolda.

Vu l'analyse comparative de ces deux figures, on remarque que le bassin versant du fleuve Casamance pourrait s'attendre à une diminution du nombre de jours consécutifs humides et à une augmentation du nombre de jours consécutifs secs dans le futur. Cette diminution du nombre de jours de pluie et l'augmentation des séquences sèches dans le futur pourraient être due au changement climatique, au phénomène de déforestation comme prévu par (Marut J C, 2015).

L'augmentation du nombre consécutifs secs serait beaucoup plus importante dans le futur lointain avec le scénario de 2°C (période FP2) que dans le futur proche avec le réchauffement de 1.5°C (période FP1).

- SDII et RX5DAY

La figure 3.23.c met en évidence l'indice d'intensité des jours pluvieux SDII en fonction des différentes stations du bassin. Parmi les stations étudiées dans cette zone, nous avons celle d'Oussouye qui enregistre la plus grande intensité de précipitation journalière (~14.6mm/j). Il est aussi remarqué que cet indice varie entre 9 et 15mm/j pour toutes les différentes stations étudiées, avec des faibles valeurs à la station de Kolda, Bounkiling et Sédhiou.

La figure 3.23.d montre le cumul total des pluies durant 5 jours consécutifs, supérieur à 50 mm en fonction des stations. Il est constaté que ce cumul de précipitations pourrait chuter dans le futur, cette baisse serait beaucoup plus considérable dans le futur lointain (lorsqu'on aurait un réchauffement globale 2°C) que proche. Sur les différentes stations, les précipitations maximales de l'année durant cinq (5) jours consécutifs sont comprises entre 175–250 mm pour la période de référence RP et entre 50–130mm pour les périodes FP1 et FP2.

Ces pluies supérieures à 50 mm qui se produisent particulièrement aux mois d'août et septembre, pourraient être considérées comme celles qui peuvent engendrer des événements extrêmes comme des inondations ou autres dégâts; ces phénomènes sont amplifiés par le changement climatique, (Ahoussi *et al.*, 2008).

Dans le cadre général, ces différents indices de pluie montrent ainsi une diminution cohérente des séquences humides et du total des pluies fortes, mais aussi une augmentation de l'intensité quotidienne de la pluie. On remarque aussi que l'ensemble des indices étudiés dans les stations du bassin du fleuve Casamance présentent des tendances qui sont tantôt à la baisse et tantôt à la hausse. D'après ces tendances, on pourrait s'attendre à une diminution de la fréquence des pluies et à une augmentation de la quantité journalière et des extrêmes dans certaines zones du bassin. Il est aussi noté que la station météorologique de Diouloulou est le lieu où on a enregistré le plus de jours consécutifs secs (pluie inférieur à 1mm) et Oussouye, le lieu où on obtient une intensité journalière de la pluie beaucoup plus élevée. Cette proportion de ces événements

extrêmes humides dans le total pluviométrique annuel pourrait justifier que la zone d’Oussouye est la plus humide du fait de sa végétation abondante et de sa proximité à la mer. La particularité de cette zone d’Oussouye a été aussi montrée dans les travaux de la (DGPRE, 2018).

3.7.2 Evènements de pluie extrêmes (95P et 99P)

La figure 3.24 illustre l’évolution du 95th et 99th percentile (représentant respectivement la valeur au-dessus de laquelle se trouve 5% et 1% des données, à la suite d’un classement) en fonction des différentes stations de la Casamance.

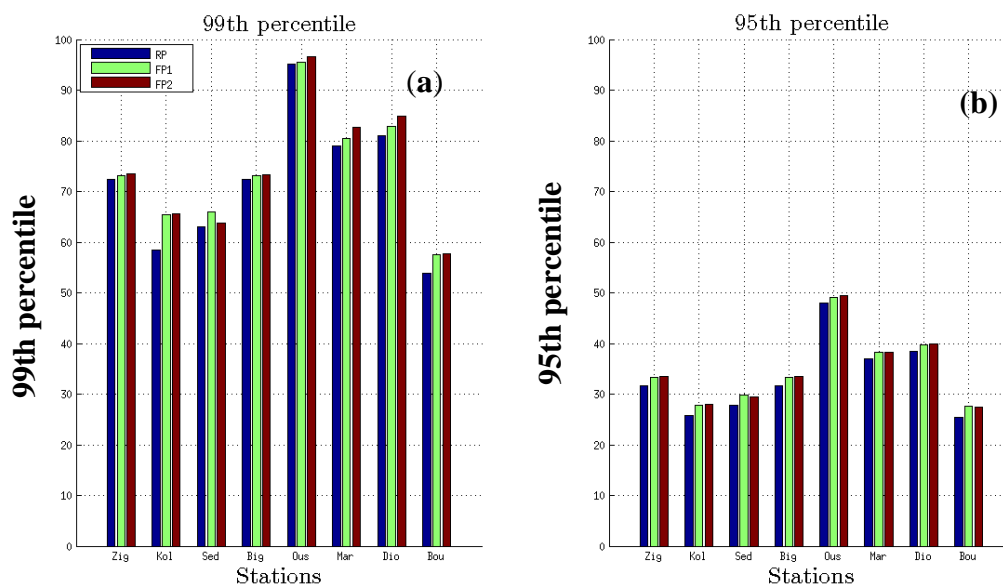


Figure 3. 24 : Le 95th et 99th percentile en fonction des différentes stations du bassin versant de la Casamance

Les grandes valeurs du 99th percentile (figure 3.24.a) ont été observées à la station d’Oussouye qui enregistre le maximum de pluie puis s’en suit les stations de Marsassoum et de Diouloulou. Cette proportion de ces événements extrêmement humides dans le total pluviométrique annuel pourrait justifier que la zone d’Oussouye est la plus humide du fait de sa végétation abondante, de ces ressources en eau et de sa proximité à la côte de l’atlantique.

- Pour ce qui concerne le 95th percentile (figure 3.24.b), on remarque une diminution substantielle des événements de pluies très intenses (maximum à Oussouye) sur les différentes stations du bassin. Ces phénomènes seront beaucoup plus intenses sous les réchauffements globaux de 1.5° et 2°C. En effet, on pourrait dire que la récurrence de ces événements extrêmes et des pluies très intenses sont aux phénomènes violents comme les lignes de grains qui sont à l’origine des pluies diluviennes.

Conclusion et perspectives

Le Sénégal, plus particulièrement le bassin versant du fleuve Casamance n'est pas épargné à des modifications hydroclimatiques.

L'objectif de cette étude est de caractériser la variabilité hydro-climatique, tout en étudiant, la variation interannuelle passée, le cycle saisonnier et les indices climatiques dans le bassin versant du fleuve Casamance.

En général, les résultats de cette étude, montrent une diminution des précipitations, une augmentation des températures et de l'évapotranspiration potentielle d'une part et d'autre part on constate qu'il y'aurait beaucoup plus de jours consécutifs secs (CDD) que de jours consécutifs humides (CWD) dans le bassin. L'étude de cette variabilité hydro-climatique nous montre qu'il est fort probable qu'il ait une nette diminution du nombre de jours où la pluviométrie est supérieure à 50mm dans l'ensemble du bassin du fleuve Casamance, suite à la baisse significative de la quantité de pluie quotidienne.

Pour ce qui est de la relation pluie-débit, les crues les plus importantes sont enregistrées au cours des mois d'août et Septembre. Le caractère exceptionnel de ces mois est lié aux importantes pluies par leur fréquence, et leur intensité survenues pendant les mois précédents sur l'ensemble du bassin.

Dans le futur, on pourrait s'attendre à une augmentation du nombre de jours consécutifs secs et à une diminution du nombre de jours humides. L'étude a montré aussi qu'en dehors de la variabilité temporelle, il existe une grande variabilité spatiale des variables météorologiques étudiées dans le bassin versant du fleuve. Ainsi du fait du fort taux de retour d'eau vers l'atmosphère (augmentation de l'ETP), nous risquons d'assister à une baisse des ressources en eau et autres ressources sur le bassin versant du fleuve Casamance.

En perspective, il serait intéressant de faire une étude d'impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin du fleuve Casamance. Pour ce faire, les sorties de modèles climatiques devront être corrigées avant leur utilisations dans les modèles hydrologiques.

Recommandations

Compte tenu de la variabilité hydro-climatique, de la dégradation continue du paysage naturel plus particulièrement dans le domaine forestier (Exemple: déforestation) du bassin versant de la Casamance et de ses ressources, Il est recommandé que:

- Les eaux de surface du bassin versant du fleuve Casamance soient protégées et gérées de

manière à assurer la qualité et la quantité pour les générations actuelles et futures afin d'atteindre les objectifs en matière de qualité et de la disponibilité de l'eau afin de répondre aux besoins biologiques, sociaux et économiques dans le bassin;

- De mettre en œuvre une politique dans le domaine de la recherche qui permettra de lutter contre la salinisation des terres agricoles et l'avancé de la mer. Cela permettra de faire des approches et des actions dans le but de pouvoir contribuer positivement à la gestion intégrée du bassin du fleuve;

- Dans le but de bien aménager le bassin du fleuve, il serait aussi souhaitable de réhabiliter les ouvrages anti-sel existants et de construire d'autres;

- Le gouvernement du Sénégal devrait verser un financement pour l'étude de l'environnement du bassin versant du fleuve Casamance, c'est-à-dire de faire une étude générale des causes et des impacts du changement climatiques dans le sens de protéger les ressources naturelles aux caprices du climat tout en cherchant des solutions ;

- Renforcer et développer les recherches au sein des universités Sénégalaises dans le domaine de la modélisation hydroclimatique des bassins versants dans le but de bien améliorer les connaissances quant aux manifestations de la variabilité du climat.

- Conscient de la réduction du couvert végétal et de la diminution de la quantité de pluie qui tombe dans le bassin du fleuve Casamance, il est recommandé de faire une campagne de reboisement des grandes arbres, des mangroves,... et aussi de réduire les sources d'émission de gaz à effet serre.

- Pour mieux faciliter les recherches dans le domaine de l'étude de la variabilité hydro-climatique dans le bassin du fleuve Casamance, il est aussi recommandé de faire la promotion de la collecte des données météorologiques, hydrologiques, environnementales, etc.

Bibliographie

Adamou W.W.B., (2010). Analyse de la variabilité hydro-climatique passée dans le haut bassin de l'Oueme à Beterou au Benin. Mémoire au 2IE : Institut International d'Ingénierie de l'eau et de l'environnement, 53p.

Aguiar L A. A (2009). Impact de la variabilité climatique récente sur les écosystèmes des niayes du Sénégal entre 1950 et 2004, thèse présentée comme exigence partielle du doctorat en sciences de l'environnement, université du Québec à Montréal : 54-55, 108p.

Ahoussi K.E., (2008). Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Cote d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Cote d'Ivoire, 270p.

Alassane A., (2004). Etude hydrogéologique du continental terminal et des formations de la plaine littorale dans la région de Porto-Novo (Sud du Bénin): identification des aquifères et vulnérabilité de la nappe superficielle. Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 145p.

Ardoin-Bardin S (2004). Variabilité hydro-climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne, Thèse de doctorat, Université de Montpellier II : 265, 239, 284, 440p.

Ardoin-Bardin S., Dezztter A., Servat E., Mahe G., Paturol J. E., Dieulin C. & Casenave L., (2005). Evaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'ouest et Central. UMR HydroSciences Montpellier, IRD, BP 64501, F-34394 Montpellier Cedex 5, France, IAHS Publ. 296, 2005. 47p.

Barrat J. M., (2012). Changements climatiques en Afrique de l'ouest et conséquences sur les eaux souterraines. Gestion intégrée et concertée des ressources en eau des systèmes aquifères d'iuillemeden, de taoudéni/Tanezrouft, et du fleuve Niger, Banque Africaine de Développement (Projet n°P-EAZ-021, Don n°5600155002001), *Rapport OSS-GICRESAIT n°13* : 10-16 et 27-28, 41p.

Bodian A, Bacci M, Diop M (2015). Impact potentiels du changement climatique sur les ressources en eau de surface du bassin de la Casamance à partir des scénarios du cmip5. *Programme d'Appui au Programme National d'Investissement en Agriculture du Sénégal (PAPSEN), Rapport n° 16* : 7-16, 49p.

Dacosta H (1989). Précipitation et écoulements sur le bassin de la Casamance. Thèse doctorale

de 3ème cycle en Géographie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Géographie Physique (Hydrologie) : 25-26, 283p.

DGPRES, (2018). Etude d'évaluation des potentialités des ressources en eau du plateau d'Oussouye. *République du Sénégal Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau Rapport r5 : rapport de synthèse*, 75p.

DGPRES, (2019). Les eaux de surface du fleuve Casamance. *Bulletin hydrologique étiage 2019*

Diatta I, Camara A (2008). Impact des fluctuations pluviométriques sur la production agricole dans la région de Thionck-Essyle en basse Casamance. Université Cheikh Anta Diop de Dakar- Certificat d'aptitude à l'enseignement moyen (CAEM).

Faye C, Sané T (2015). Les changements climatiques dans le bassin versant de la Casamance: Evolution et tendances du climat, impacts sur les ressources en eau et stratégies d'adaptation. *Eaux et sociétés face au changement climatique dans le bassin de la Casamance, Sessions 2: Cadre hydro-climatique du bassin du fleuve Casamance* : 93-100.

GIEC, (2007). Bilan des changements climatiques. Rapport de synthèse : Contribution du Groupe de travail I, II, III au quatrième Rapport d'évaluation du *GIEC*.

Grepin. G., (1992). Conservation et utilisation durable des Ressources naturelles du bassin hydrographique de la Casamance. Annales du Séminaire tenu du 22 au 26 octobre 1990 à Ziguinchor, Sénégal, 180p.

Hadley Centre, (2010). Climat sahélien : rétrospective et projections ; secrétariat du club du sahel et de l'afrique de l'ouest : 20p.

Hulme. M., (2001). Climatic perspectives on Sahelian desiccation: 1973-1998. *Global Environmental Change*, 11, 19-29.

IPCC (2001). Climate change 2001: Third assessment report. Cambridge, UK, Cambridge University Press.

Kouame A., N'Guessan et al., (2014). Analyse de phénomènes hydrologiques dans un bassin versant urbanisé: cas de la ville de Yamoussoukro (centre de Côte d'Ivoire. Université Nangui Abrogoua, Unité de Formation et de la Recherche (UFR) en Sciences et Gestion de l'Environnement, Laboratoire des Sciences de l'Environnement, 02 BP 801 Abidjan 02) / *Larhyss Journal*, 17, 135-154, 20p.

Leroux. M., (1983). Le climat de l'Afrique tropicale. Thèse de doctorat, Dijon : Champion, Paris, 372 p.

Marut J C, (2015). Changement climatique, paix et développement : des choix citoyens. Géographe, chercheur associé au laboratoire. Les Afriques dans le monde (UMR 5115 CNRS-

Sciences Po Bordeaux) : 32-40.

MEPN., (1999). Deuxième communication national du Sénégal, Draft, 80p.

Noblet M., Faye A., Camara I., Seck A., Sadio M., Bah B, (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*, 10-15, 76p.

OMM., (1994). Guide des pratiques hydrologiques: acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications. *Organisation Météorologique Mondiale-N°168, Genève*, 829p.

Ruë O, Descroix L, Grdr, Migration, Citoyenneté, Développement et IRD, UMR PALO (2015). La Casamance, à la croisée des chemins... : Eaux et sociétés face au changement climatique dans le bassin de la Casamance, (Actes de l'Atelier scientifique et du lancement de l'initiative « Un réseau scientifique au service du développement en Casamance ») : 13, 14 et 15, 142p.

Sane T, Benga A, et Sall O (2010). La Casamance face aux changements climatiques: Enjeux et perspectives. Article à l'Université de Ziguinchor, UFR des Sciences et Technologies, Département de Géographie, Laboratoire d'Enseignement et de Recherche en Géomatique (LERG, ESP, UCAD), Sénégal, *23^{ième} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes* : 560-563.

Sane T, Mbaye I (2007). Etat des lieux et étude diagnostique de l'environnement de la Casamance, *Annales de la Faculté des Lettres et Sciences Humaines*, n° 37/B : 184-185.

UNEP, (1997). (United Nations Environment Programme). Atlas mondial de la désertification 2ED. PNUE, Londres.

UI Haq M, PNUD (2009). Changement climatique, sécurité alimentaire et développement humain : Le Changement climatique et ses conséquences au Sénégal, *Rapport national sur le développement humain au Sénégal, République du Sénégal*, 102p.