



UFR : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département : Physique

**Mémoire de Master 2**

Mention: Physique et Application

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

**Effets du réchauffement global de 1.5 et 2.0°C sur  
l'hydrologie du bassin versant de la Falémé**

Présenté par **Khadidiatou SY**

Sous la direction de **Dr Mamadou Lamine MBAYE**

et sous la supervision de **Pr Saidou Moustapha SALL**

Soutenu publiquement le 21/03/2019 devant le jury composé de:

<u>Qualité</u>	<u>Prénoms et Nom</u>	<u>Grade</u>	<u>Établissement</u>
Président	Dr Moctar Camara	Maitre de conférences	(UASZ)
Rapporteur	Dr Samo Diatta	Maître-Assistant	(UASZ)
Examineur	Dr Joseph Sambasene Diatta	Maître-Assistant	(UASZ)
Maître de stage	Mr. Bakary Faty	Ingénieur	(DGPRE)
Encadrant	Dr Mamadou Lamine Mbaye	Assistant	(UASZ)



## **Remerciements**

Après avoir loué ALLAH(SWT), je LE remercie pour m'avoir donné le courage, la force et la volonté pour réussir et de m'avoir éclairci le chemin tout au long de ma vie.

### **A mes chers parents**

Aucun remerciement ne serait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que J'ai pour vous. Je vous dois ce que je suis aujourd'hui grâce à votre amour, à votre Patience et vos innombrables sacrifices. Que Dieu, le Miséricordieux, vous laisse avec la famille.

### **A ma famille d'accueil**

Grand merci à Mr et madame Manga, à Ndeye fatou Tamba, je ne vous oublierai jamais.

### **A Docteur Mamadou Lamine Mbaye**

Dr. Mbaye, je vous exprime mes remerciements les plus sincères, d'abord en tant que mon premier enseignant en hydrologie et le déclencheur de ce qui allait devenir une passion.

Je vous remercie en tant que mon directeur de mémoire de fin d'études.

Votre disponibilité, votre patience, votre méthodologie et vos remarques et suggestions, m'ont permis non seulement d'enrichir mes connaissances en hydrologie et en informatique. Mais aussi d'approfondir un sujet passionnant, d'actualité, et d'importance croissante: changement climatique et ses impacts sur les ressources en eau.

Je remercie **Pr Saidou Moustapha SALL** d'avoir supervisé ce travail et de m'avoir accordé l'accès au niveau du laboratoire LPAO-SF de Dakar ainsi que ces suggestions et conseils.

### **A Monsieur Bakary Faty**

Je présente vivement mes remerciements à Mr. Faty, agent de la DGPRES Dakar/Sénégal d'avoir supervisé ce travail en tant que maître de stage.

Je tiens à vous remercier pour votre aide au quotidien durant tout mon séjour à la DGPRES, pour vos qualités scientifiques, la disponibilité, l'encadrement et les suggestions pertinentes m'ont permis de mieux orienter et faire cette étude sans oublier votre bonne humeur.

Vous n'avez jamais laissé une question sans réponse, j'ai énormément appris à vos côtés. A travers lui, je remercie tout le personnel de ladite structure et particulièrement Mamadou Lamine Gassama avec qui nous avons partagé le bureau. A ce remerciement, j'associe le directeur Niokhor Ndour d'avoir bien voulu accepter mon stage à la DGPRES.

### **A Tous les membres du jury**

Je remercie également les membres du jury avec à la tête le président, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail.

**A Tous mes enseignants tout au long de mes études**, surtout les enseignants chercheurs du département de physique : Dr Bamol Ali Sow, Dr Moctar Camara, Dr Moustapha Thiame, Dr Ababacar Ndiaye, Dr Diouma Kobor, Dr Lat Grand Ndiaye, Dr Ibrahima Sakho.

Je remercie sincèrement tous mes camarades de promotion, également tous les doctorants des Laboratoires LOSEC de Ziguinchor et LPAO-SF de Dakar.

**A mes amis**

A tous ceux qui m'ont aidé, encadré, encouragé et montré leur intérêt, à vous tous MERCI !!

## **Résumé**

Le changement climatique soulève de nombreuses interrogations quant au devenir des ressources en eau en Afrique de l'Ouest. En effet, l'eau dans cette région est un élément fondamental pour de multiples activités socio-économiques. Ainsi il est indispensable de participer à l'évaluation d'impact du changement climatique sur les ressources en eau. C'est dans ce contexte que cette étude propose une évaluation de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant de la Falémé, situé au Sahel en Afrique de l'Ouest. La méthodologie appliquée consiste à calibrer et valider le modèle hydrologique GR4J avant de simuler l'évolution future des débits dans le bassin versant de la Falémé sous les réchauffements globaux de 1.5 et 2°C.

Le calage-validation du GR4J a été effectué sur la base des données de pluie, d'ETP et des débits observés. Les sorties de trois modèles régionaux issus du projet CORDEX-Afrique (DMI-HIRHAM, SHIM-RCA, et BCCR-WRF) sous les scénarios de réchauffement planétaire de 1.5°C et 2°C sont utilisées en entrée du modèle hydrologique GR4J afin de simuler les écoulements futurs à l'échelle du bassin versant. La Fonction de distribution cumulative – Transformation (CDF-t) a été appliquée pour corriger les biais sur les scénarios avant leur utilisation dans le modèle hydrologique. L'exploitation des principaux résultats permet de souligner une adéquation satisfaisante entre les débits simulés et ceux observés en calage et en validation, tant du point de vue des critères de performance statistique calculés que graphique. Les régimes d'écoulements des eaux ont été assez bien reproduits par le modèle hydrologique GR4J. Les projections révèlent une hausse générale de la température moyenne annuelle et de l'ETP; une diminution de la pluviométrie moyenne annuelle est projetée par les modèles DMI-HIRHAM, BCCR-WRF et la moyenne d'ensemble ; tandis qu'une hausse est notée avec le modèle SMHI-RCA. Quant aux écoulements futurs, une tendance à la baisse des débits moyens annuels et mensuels sont prévus au niveau des deux sous bassins de la Falémé (Kidira et Gourbassi) avec les entrées issues des modèles DMI-HIRHAM, BCCR-WRF et la moyenne d'ensemble; contrairement aux forçages du GR4J par les sorties du modèle SMHI-RCA qui projettent une hausse. Il faut noter que la baisse est plus marquée au sous bassin de Gourbassi qu'à celui de Kidira. Ainsi, des recommandations ont été formulées pour atténuer les impacts probables du changement climatique sur les activités socio-économiques qui utilisent les ressources en eau.

**Mots-clés** : Bassin versant, Falémé, réchauffement planétaire de 1.5°C et 2°C, modèle GR4J, débits, pluviométrie, évapotranspiration, correction des biais

## **Abstract**

Climate change raises many questions about the future of water resources in West Africa. Indeed, water in this region is a fundamental element for many socio-economic activities. Thus, it is essential to participate in the assessment of the impact of climate change on water resources. It is in this context that this study proposes an assessment of the impact of climate change on the hydrology of the Falémé basin, located in the Sahel (West Africa). The methodology applied consists in calibrating and validating the hydrological model GR4J before simulating the future evolution of flows in the Falémé catchment area under of 1.5 and 2°C warming.

The GR4J calibration-validation was carried out on the basis of rainfall, ETP and observed flow data. The output of three regional climate models from the CORDEX-Africa project (DMI-HIRHAM, SHIM-RCA, and BCCR-WRF) under the 1.5°C and 2°C global warming scenarios are used as input to the GR4J hydrological model to simulate future flows at the watershed scale. The transformation of a cumulative distribution function (CDF-t) was applied to correct biases on scenarios before their use in the hydrological model. The exploitation of the main results shows a good correspondence between the simulated flows and those observed during calibration and validation, both in terms of the calculated and graphical statistical performance criterion. Water flow regimes have been quite well reproduced by the GR4J hydrological model. Projections show a general increase in mean annual temperature and ETP; a decrease in mean annual rainfall is projected by the DMI-HIRHAM, BCCR-WRF models and the overall mean; while an increase is noted with the SMHI-RCA model. As for future flows, a downward trend in annual and monthly average flows is expected in the two sub-basins of the Falémé (Kidira and Gourbassi) with input from the DMI-HIRHAM, BCCR-WRF models and the overall mean; however, the GR4J forced by the SMHI-RCA model output, project increased flows. Furthermore, the decrease is more pronounced at Gourbassi sub-basin than at Kidira sub-basin. Thus, recommendations were made to mitigate the likely impacts of climate change on socio-economic activities that use water resources.

**Keywords:** Watershed, Falémé, global warming of 1.5°C and 2°C, GR4J model, flow, rainfall, evapotranspiration, bias correction

## Table des figures

Figure.1: Schéma d'un bassin versant (Haddadi, 2016).....	4
Figure.2 : représentation du fonctionnement d'un modèle pluie-debit (Perrin et al., 2009).....	8
Figure.3 : Carte de localisation du bassin versant de la Falémé .....	10
Figure.4 : Courbe hypsométrique .....	12
Figure.5 : Répartition spatiale des pentes dans le bassin versant de la Falémé .....	13
Figure.6 : Stations pluviométriques utilisées .....	16
Figure.7:structure du modèle GR4J (Perrin, 2003).....	21
Figure.8: Méthode du split-sample test (Klemeš, 1986) .....	24
Figure.9 : Les hydrogrammes moyens journaliers simulés et observés en période de calage .....	26
Figure.10 : Les hydrogrammes journaliers simulés et observés en période de validation .....	27
Figure.11 : Cycle saisonnier des pluies corrigées et non corrigés au réchauffement 1.5°C et 2°C .....	30
Figure.12: Cycle saisonnier de la température moyen mensuel au réchauffement 1.5°C et 2°C .....	30
Figure.13: Cycle saisonnier de l'évapotranspiration potentielle au réchauffement 1.5°C et 2°C .....	31
Figure.14: Cycle saisonnier des pluies simulées par les trois modèles et la moyenne d'ensemble des modèles sous le réchauffement global de 1.5°C et 2°C.....	32
Figure.15: Evolution moyennes annuelles des débits simulés par le modèle GR4J avec les sorties des MCR (BCCR-WRF et SMHI-RCA) au réchauffement global de 1.5°C et de 2°C comparés avec Historical à station de Kidira et Gourbassi .....	34
Figure.16: Evolution moyennes annuelles des débits simulés par le modèle GR4J avec les sorties du MCR (DMI-HIRHAM) et la moyenne d'ensemble des trois MCR au réchauffement global de 1.5°C et de 2°C comparés avec Historical à station de Kidira et Gourbassi .....	35
Figure.17 : cycle saisonnier des débits moyens mensuels simulés par le modèle GR4J avec les sorties des trois modèles et la moyenne d'ensemble des modèles MCR au réchauffement global de 1.5°C et de 2°C comparés avec Historical à station de Kidira.....	36
Figure.18: cycle saisonnier des débits moyens mensuels simulés par le modèle GR4J avec les sorties des trois modèles et la moyenne d'ensemble des modèles MCR au réchauffement global de 1.5°C et de 2°C comparés avec Historical à station de Gourbassi .....	37
Figure.19: Taux de Variation des débits futurs sous le réchauffement de 1.5 et 2°C.....	38

## Liste des Tableaux

<i>Tableau 1: Exemple de caractéristiques des modèles pluie-débit.....</i>	<i>8</i>
<i>Tableau 2: classification du relief selon <math>D_s</math>.....</i>	<i>14</i>
<i>Tableau 3 : caractéristiques morphologique de la Falémé.....</i>	<i>15</i>
<i>Tableau 4 : Caractéristiques des stations hydrologiques observées sur la Falémé.....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 5: Caractéristiques des modèles régionaux utilisés.....</i>	<i>17</i>
<i>Tableau 6: les étapes de la méthode CDF-t (Source: <a href="http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/128">http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/128</a>).....</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 8: critères évaluation du modèle GR4J sur une large valeur de Nash (Bouizrou, 2015).....</i>	<i>25</i>
<i>Tableau 9: Les résultats des critères statistiques et les paramètres du modèle en calage.....</i>	<i>28</i>
<i>Tableau 10: Les résultats des critères statistiques en validation et paramètres du modèle.....</i>	<i>28</i>

## Liste des Acronymes

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

**CCNUCC** : Convention-cadre des Nation Unies sur le changement climatique

**CDF-t** : Fonction de distribution cumulative - Transformation

**COP** : Conférence des Parties

**CORDEX** : Expérience régionale coordonnée de réduction d'échelle climatique

**CSAO/OCDE**: Club du Sahel et de l'Afrique de l'Ouest

**DGPRE** : Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau

**ECC** : Eaux et Changement Climatique

**ETP**: Evapotranspiration Potentielle

**FAO**: Organisation pour l'alimentation et l'agriculture

**GES** : Gaz à Effets de Serre

**GIEC** : Groupe d'Expert Intergouvernementale sur l'évolution du Climat

**GR1A** : Génie Rural à 1 paramètre Annuel

**GR2M** : Génie Rural à 2 paramètres Mensuels

**GR4J** : Génie Rural à 4 paramètres Journaliers

**GR5J** : Génie Rural à 5 paramètres Journaliers

**GR6J** : Génie Rural à 6 paramètres Journaliers

**HU** : Hydrogramme Unitaire

**IRSTEA** : Institut national de Recherche en Science et Technologie pour  
l'Environnement et l'Agriculture

**M.N.T** : Modèle Numérale de Terrain

**MCR** : Modèle Climatique Régional

**OMM** : Organisation Météorologie Mondiale

**RCP**: Representative Concentration Pathway

**SGO**: Sabodola Gold Operation

## Table des matières

<b>Remerciements</b> .....	i
<b>Résumé</b> .....	iii
<b>Abstract</b> .....	iv
<b>Table des figures</b> .....	v
<b>Liste des Tableaux</b> .....	vi
<b>Liste des Acronymes</b> .....	vii
<b>Introduction</b> .....	1
<b>Chapitre I : Généralités</b> .....	4
<b>I.1. Généralités sur le fonctionnement du bassin versant</b> .....	4
<b>I.2. Généralités sur le Changement climatique</b> .....	5
I.2.1. Définitions et Causes .....	5
I.2.1.1. Définitions.....	5
I.2.1.2. Causes .....	5
I.2.2. Impacts du changement climatique sur les ressources en eaux.....	6
I.3. Généralités sur la modélisation pluie-débit.....	7
<b>Chapitre II: Données et Méthodes</b> .....	10
<b>II.1. Présentation de la zone d'étude</b> .....	10
II.1.1 Localisation du bassin versant de la Falémé.....	10
II.1.2 Caractéristiques morphologiques du bassin.....	10
II.1.2.1 Caractéristiques de forme .....	11
II.1.2.2 Caractéristiques de relief .....	11
II.1.3 Localisation des stations étudiées .....	15
<b>II.2. Présentation des données hydroclimatiques</b> .....	16
II.2.1 Données d'observation .....	16
II.2.2 Données de sorties de modèles climatiques.....	17
<b>II.3 Méthode de calcul de la pluie moyenne et de l'évapotranspiration potentielle</b> .....	18
<b>II.4. Méthode de correction des biais</b> .....	18
<b>II.5. Modélisation hydrologique</b> .....	19
II.5.1. Présentation du modèle GR4J .....	19
II.5.2. Calage et validation du GR4J .....	24
II.5.3. Critère d'évaluation de la performance du GR4J .....	25
<b>Chapitre III : Résultats et Discussion</b> .....	26
<b>III.1 Calage et Validation du GR4J</b> .....	26

III.1.1 Hydrogrammes observés et simulés durant le calage .....	26
III.1.2 Hydrogrammes observés et simulés durant la validation .....	27
III.1.3 Evaluation de la performance du GR4J durant le calage et la validation.....	28
<b>III.2 Projections climatiques.....</b>	<b>29</b>
III.2.1 Cycle saisonnier des pluies simulées avant et après la correction des biais .....	29
III.2.2 Evolution de la température moyenne annuelle .....	30
III.2. 3 Evolution annuelle de l'évapotranspiration potentielle .....	31
III.2.3 Changements moyens des précipitations futures sous le réchauffement 1.5°C et 2°C .....	32
<b>III.3. Impacts du réchauffement global de 1.5 et 2 degré sur le débit .....</b>	<b>33</b>
III.3.2 Tendances moyennes des débits futurs sous les réchauffements de 1.5 et 2° .....	34
III.3.3 Variations mensuelles des débits futurs sous le réchauffement de 1.5 et 2°C .....	36
III.3.4 Changements moyens des débits futurs sous le réchauffement 1.5 et 2°C .....	38
<b>Conclusion et Perspectives .....</b>	<b>39</b>
<b>Recommandations .....</b>	<b>40</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>41</b>
<b>Webograhie:.....</b>	<b>44</b>

## **Introduction**

Le changement climatique est sans équivoque (GIEC, 2007) et les conséquences qui en résultent risquent de s'amplifier au cours des prochaines décennies. Ainsi, dans l'effort de limiter le réchauffement climatique, la communauté internationale conclut un accord sur le changement climatique lors de la 21<sup>ème</sup> Conférence des Parties (COP 21) qui s'est tenue à Paris en 2015. Cet accord demande de maintenir l'augmentation globale de la température en dessous de 2°C et idéalement à 1,5°C par rapport au niveau des températures préindustrielles. Les impacts du changement climatique sur divers secteurs (agriculture, ressources en eau, santé, etc.) et les écosystèmes font l'objet d'une attention particulière et soulèvent l'inquiétude d'une proportion grandissante de la communauté internationale scientifique et les décideurs. Qu'il s'agisse de la modification de la répartition spatio-temporelle des précipitations, de l'augmentation des températures moyennes, de la diminution des débits moyens annuels des cours d'eau ou de l'accroissement de la fréquence des événements hydrométéorologiques extrêmes. Parmi ces impacts, ceux sur les ressources en eau suscitent beaucoup d'inquiétudes en ce qui concerne la disponibilité future de cette ressource vitale dans le monde. En Afrique de l'Ouest et au Sahel particulièrement, certaines études ont abordé la problématique de l'impact futur du changement climatique sur les ressources en eau. Selon Ali et Amani (2010), les quelques travaux réalisés montrent de fortes incertitudes sur les modèles actuels avec parfois de fortes divergences dans les projections. Ce champ nécessite aujourd'hui des efforts de recherche supplémentaire pour une meilleure documentation afin de mieux orienter les politiques d'adaptation et les prises de décision dans un contexte de changement climatique.

Le bassin versant de la Falémé ne fait pas exception à la règle générale. Il y a très peu d'études mises en œuvre pour déterminer les impacts probables qui caractériseront la ressource en eau à l'échelle de ce bassin. Dans ce contexte, il devient pertinent de s'interroger sur les impacts du changement climatique qui affecteront la disponibilité de l'eau dans le bassin versant de la Falémé. D'ailleurs, les ressources en eau de ce cours d'eau, qui étaient très peu sollicitées, subissent aujourd'hui de très fortes pressions dues aux prélèvements pour les exploitations minières et aurifères. Avec la construction (en cours) du barrage hydroélectrique à Goubassi, le cours d'eau subira d'autres pressions davantage car une grande quantité d'eau sera mobilisée pour la production d'hydroélectricité. Aussi une société d'exploitation aurifère du nom de Sabodola Gold Operations (SGO) implantée à Sabodola a une autorisation de réalisation de trois bassins de retenus d'eau de 15 millions de mètres cubes par an (document officiel, DGPPE). C'est donc dire qu'une diminution de la disponibilité des ressources en eau dans le

bassin pourrait s'avérer extrêmement problématique. Selon Doll et Zhang (2010), d'ici 2050, le changement climatique pourrait avoir plus d'impacts sur les régimes hydrologiques que les barrages et les prélèvements sur les cours d'eau ne l'ont eu actuellement. On peut craindre, cependant, que les exploitations dues aux activités relatives à l'eau du bassin et génératrices de revenu ne soient considérablement affectées par une diminution potentielle de la ressource en eau de la Falémé.

Afin de mettre en place une planification efficace et de pouvoir lutter contre les risques combinés de tout ceci, il est absolument nécessaire d'étudier les impacts du changement climatique sur le bassin versant. L'évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau est l'un des défis majeurs du 21<sup>ème</sup> siècle (Velázquez et Troin, 2015). C'est dans ce contexte que ce travail vise à étudier les impacts du changement climatique sur la ressource en eau du bassin versant de la Falémé au réchauffement global de 1.5°C et 2°C. Ceci permettra d'évaluer les débits futurs afin d'en connaître les tendances, puisque selon le quatrième rapport d'évaluation du GIEC (2007), l'écoulement annuel des cours d'eau et la disponibilité en eau sont appelés à s'amoinrir. Ainsi, ce mémoire tentera d'apporter des éléments de réponses aux questions scientifiques suivantes: quels seront les changements potentiels sur la précipitation, la température et l'évapotranspiration du bassin? Et quelle sera la disponibilité future de la ressource en eau de la Falémé ?

L'objectif principal de ce travail est de contribuer à évaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de surface de la Falémé dans les décennies à venir.

Plus spécifiquement l'étude vise à :

- Caler et valider le modèle hydrologique GR4J sur le bassin versant de la Falémé avec les données hydrométéorologiques observées;
- Evaluer les changements potentiels des variables hydroclimatiques (précipitation, température et évapotranspiration) au réchauffement global de 1.5 et 2°C;
- Evaluer l'impact du changement climatique sur les ressources en eau de la Falémé en forçant le modèle GR4J avec les données corrigées.

Après l'introduction, le mémoire est structuré principalement en trois grandes parties:

- Dans la première partie (chapitre I), on présente quelques généralités sur le fonctionnement du bassin versant et le Changement climatique ;
- la deuxième partie (chapitre II), présente la zone d'étude ainsi que les données et la méthodologie appliquée ;
- la troisième partie (chapitre III) présente les résultats et discussions sur l'évaluation du

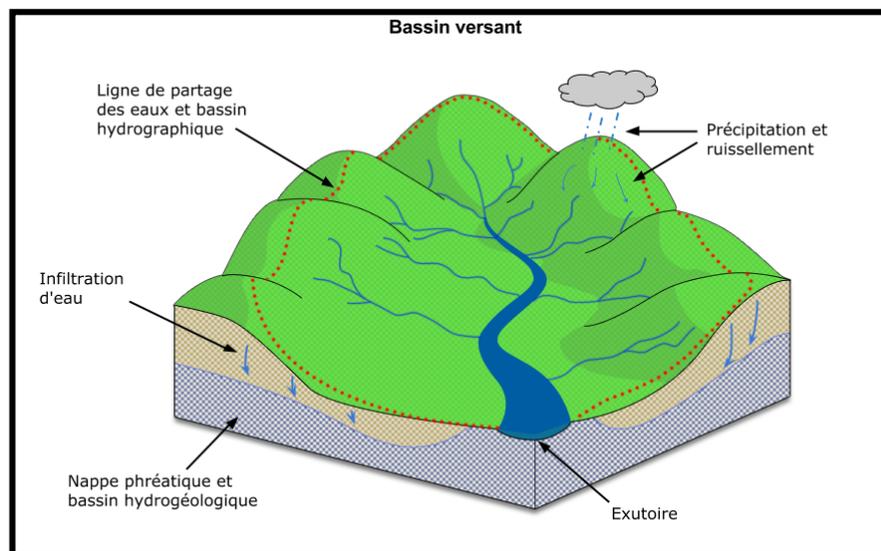
modèle hydrologique, la performance des modèles climatiques à simuler le climat présent ainsi que les résultats d'évaluation des impacts futurs du changement climatique sur le régime hydrologique.

Ceci est suivi, d'une conclusion, des perspectives, et des recommandations

## Chapitre I : Généralités

### I.1. Généralités sur le fonctionnement du bassin versant

Le fonctionnement d'un bassin versant repose généralement sur l'hydrologie du bassin versant. Ce fonctionnement commence par le cycle hydrologique dont le moteur principal est l'énergie solaire. Le cycle de l'eau ou cycle hydrologique est l'ensemble des processus de transformation et de transfert de l'eau. A l'échelle du bassin versant le cycle de l'eau est aussi un ensemble de processus complexes et variés: les précipitations, l'évaporation, la transpiration (des végétaux), l'interception, le ruissellement de surface, l'infiltration, la percolation, l'emmagasinement et les écoulements souterrains. Par définition, le bassin versant (Figure.1) représente une entité géographique drainée par un réseau hydrographique, sur laquelle toutes précipitations reçues ruissellent vers le point le plus bas que l'on appelle l'exutoire.



*Figure.1: Schéma d'un bassin versant (Haddadi, 2016)*

Autrement dit le bassin versant est l'unité géographique sur laquelle se base l'analyse du cycle hydrologique et ses effets. Il est délimité par les crêtes (ligne de points hauts d'un relief séparant deux versants opposés) au-delà desquelles les pentes dirigent les précipitations tombées vers un autre cours d'eau. Ces frontières sont appelées lignes de partage des eaux. La connaissance du paramètre hydrologique d'un bassin versant appelé le débit, permet d'avoir une idée sur le comportement du bassin. En se référant aux travaux de Haddadi (2016), le débit  $Q$  d'un cours d'eau, exprimé en  $m^3/s$  ou  $l/s$ , correspond au volume d'eau liquide traversant une section transversale de l'écoulement par unité de temps.

## **I.2.Généralités sur le Changement climatique**

### **I.2.1. Définitions et Causes**

#### **I.2.1.1. Définitions**

Le climat est un phénomène global et complexe qui a un impact sur l'ensemble des formes de vie de la planète. Selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), le climat est « la synthèse des conditions météorologiques d'une région donnée, caractérisée par les statistiques à long terme des variables de l'état de l'atmosphère ». L'étude se fait sur des périodes assez longues, classiquement 30 ans, car le climat n'est pas stable et a beaucoup évolué sur de longues périodes. La variabilité climatique ou le changement climatique n'est pas un phénomène nouveau. La Terre a toujours connu sur des temps géologiques, des périodes successives de refroidissement et de réchauffement, mais aussi des variations plus légères sur des temps plus court (ECC, 2014). Il existe principalement deux définitions du changement climatique. Celle du Groupe Intergouvernemental d'Evolution sur le Climat (GIEC) et celle de la Convention-cadre des Nation Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC). Le GIEC entend par changement climatique toute évolution du climat dans le temps, qu'elle soit due à la variabilité naturelle ou aux activités humaines. Cette définition semble être différente de celle de la CCNUCC qui définit par changement climatique toute modification du climat causée directement ou indirectement par les activités humaines qui modifient la composition de l'atmosphère, et s'ajoutent à la variabilité climatique naturelle observée sur des périodes de temps comparables (GIEC, 2007).

#### **I.2.1.2. Causes**

Les causes de ce changement climatique peuvent très bien être naturelles, c'est-à-dire résulter d'un forçage externe naturel que sont :

- Les variations de l'activité solaire qui s'expliquent par la variabilité de l'émission solaire ;
- La tectonique des plaques (dérive des continents, mouvement des pôles et expansion des fonds océaniques) ;
- Les éruptions volcaniques importantes, capables d'injecter dans la basse stratosphère d'énormes quantités de poussières, de cendres, de pierres et de vapeur d'eau qui peuvent séjourner pendant plusieurs années ;

Ou bien d'origine anthropique (GES, aérosols, etc.). Le facteur qui reste le plus préoccupant aujourd'hui est l'influence de l'homme sur le climat, qui tient sa place dans les préoccupations actuelles sur le changement climatique.

Selon le dernier rapport du GIEC (2014), l'essentiel de la hausse observée de la température moyenne globale depuis le milieu du 20<sup>ème</sup> siècle est très probablement dû à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique.

### **I.2.2. Impacts du changement climatique sur les ressources en eaux**

L'ensemble de la communauté scientifique, des décideurs publics et la population en général semble avoir pris conscience au cours de ces dernières décennies de l'importance des enjeux relatifs au changement climatique. En s'intéressant d'abord aux températures et aux précipitations futures, toutes les projections du climat global (futur proche et lointain) prévoient une intensification du réchauffement moyen, en plus de la variabilité des précipitations et aussi une plus grande fréquence et une intensification des phénomènes extrêmes (GIEC, 2014). De plus, le GIEC prévoit d'ici la fin du siècle des précipitations plus abondantes et des épisodes de précipitations extrêmes plus fréquents dans les masses continentales des hautes et moyennes latitudes, et dans les régions tropicales humides. A l'inverse, les régions arides et semi-arides des moyennes latitudes et des régions subtropicales subiront une baisse des précipitations, une aggravation et augmentation des sécheresses (Observatoire défense et climat, 2017).

En outre, le dernier rapport du GIEC révèle qu'à l'échelle mondiale, selon tous les scénarios (RCP), il est probable que les régions soumises aux régimes de mousson vont s'étendre et que les précipitations de mousson s'intensifieront (GIEC, 2014).

Dès lors, ces projections relatives aux précipitations ont de fortes conséquences sur les ressources en eaux de surface et souterraine. De plus, l'eau étant au cœur du changement climatique, c'est par ce vecteur, notamment à travers des modifications du cycle hydrologique, que les effets du changement climatique se feront le plus ressentir (ECC, 2014).

Selon le GIEC (2007), l'alimentation des nappes souterraines devrait diminuer avec la réduction des précipitations et du ruissellement, entraînant une augmentation du stress hydrique, notamment dans les régions où ces nappes souterraines viennent pallier les demandes en eau à usage agricole et domestique pendant la saison sèche (Barrat, 2012).

En Afrique de l'Ouest, les débits moyens annuels simulés sur les dernières décennies du 21<sup>ème</sup> siècle révèlent une forte variabilité dans certains grands et petits hydrosystèmes.

Il est possible de dégager certaines tendances à partir des études et des observations.

Par exemple l'étude menée par Ardoin et *al* (2005) prévoit que la Gambie connaîtrait une diminution des écoulements entre -30% et -66% à l'horizon 2080 et une augmentation des écoulements pour le Chari entre +47% et 53% à l'horizon 2080 mais également pour celui du Sassandra de l'ordre de +38% (horizon 2050) et +10% (horizon 2080).

Le rapport de PAS-PNA (2018), dans le cadre des impacts du changement climatique sur les ressources en eaux au Sénégal monte des tendances inverses des débits de quelques bassins. C'est-à-dire, une tendance à la hausse pour certains et une tendance à la baisse pour d'autres.

La tendance à la baisse des débits est attendue sur les bassins de Sokotoro, Dakka Saidou et Bafing Makana à l'horizon 2030, 2060 et 2090 (Bodian et *al*, 2013) ; Bafing Makana à l'horizon 2050 (Bodian et *al*, 2018), la baisse à Bakel à l'horizon 2020, 2050 et 2080 (Ardoin et *al*, 2009) puis à l'horizon 2100 (Mbaye et *al*, 2015a).

Une légère augmentation des débits de Sokotoro à horizon 2030, 2060 et 2090 (Bodian et *al*, 2013) et de Kolda (Bodian et *al*, 2016) à l'horizon 2080 est attendue.

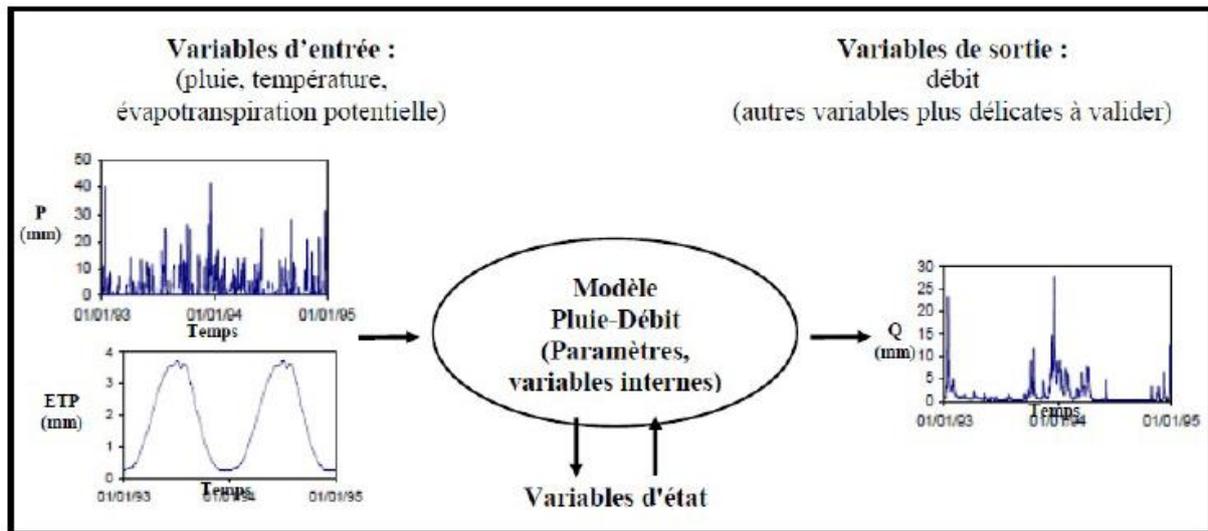
Les ressources en eau du milieu d'étude (la Falémé) seraient probablement affectées par le changement climatique. Ainsi les résultats des travaux de Faty, 2014 ont conclu que la Falémé devait subir une diminution des écoulements de 28% pour la période 2016-2045 et 18% à l'horizon 2036-2065 à Gourbassi. Une augmentation de 7% à l'horizon 2050 à la station de Kidira.

### **I.3. Généralités sur la modélisation pluie-débit**

La modélisation pluie-débit est une discipline des sciences hydrologiques qui s'intéresse principalement aux processus hydrologiques afin d'aboutir à un outil de travail exploitable dans différents domaines. Par ailleurs, la simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voire indispensable pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau (Perrin et *al*, 2007). Parmi les objectifs de la modélisation hydrologique, on peut citer:

- La simulation des débits, pour des sites non jaugés ou le comblement de lacunes dans des séries de données;
- La prévision des crues et des étiages, il s'agit d'estimer à l'avance des débits susceptibles de présenter des risques d'inondation ou de sécheresse;
- La prédétermination des débits de crues ou d'étiages : ceci permet le dimensionnement d'ouvrages ou d'aménagements dans le lit du cours d'eau;
- La délimitation des zones inondables.

Pour prendre en charge ces objectifs, de nombreux modèles pluie-débit ont été développés. Ainsi un modèle pluie-débit est un outil mathématique qui intègre les processus hydrologiques à l'échelle du bassin versant pour déterminer la réponse de celui-ci face à un forçage. Un exemple de fonctionnement d'un modèle pluie-débit est représenté à la figure.2. Cette figure se résume principalement à trois parties: les variables d'entrées que le modèle hydrologique reçoit en entrée et les variables de sortie.



**Figure.2** : représentation du fonctionnement d'un modèle pluie-debit (Perrin et al., 2009)

De nombreuses structures, classifications et définitions des modèles pluie-débit ont été proposées, selon Dahmani (2016), les classifications de modèles que l'on trouve dans la littérature sont nombreuses et peuvent être fonction de plusieurs caractéristiques Oudin (2004). Le tableau 1 représente les différents types de modèles selon leurs caractéristiques (Clarke, 1973, Ambroise, 1998, Perrin, 2000, Oudin, 2004).

**Tableau 1**: Exemple de caractéristiques des modèles pluie-débit

Caractéristiques	Types de modèles
Selon la nature de la variable	-Modèle déterministe (variables non aléatoires) -Modèle stochastique (variables aléatoires)
Traitement de l'espace (homogénéité du bassin)	-Modèle global -Modèle semi-distribué ou (semi-global) -Modèle spatialisé
Fondement théorique et approche de développement	-Modèle empirique -Modèle conceptuel -Modèle à base physique

En guise d'exemples de modèles conceptuels, depuis une trentaine d'années, l'équipe d'hydrologie des bassins versants d'IRSTEA a développé une famille de modèles hydrologiques connus sous le nom de « modèle GR » (pour « Génie Rural »), permettant de prédire au mieux les débits des cours d'eau, et sur une très grande variété de bassins versants, tout en ne requérant que très peu de données d'entrées, données qui, par ailleurs, sont parfois aisément disponibles dans certains bassins (Haddi,2016). Les modèles GR ont été développés à différents pas de temps : Annuel (GR1A), mensuel (GR2M), journalier (GR4J, GR5J, GR6J) et horaire (GR3H). Le modèle GR4J (Génie Rural à 4 paramètres Journaliers) a été choisi dans cette présente étude due au fait de sa robustesse, sa simplicité et son utilisation aux grands nombre bassins dans le contexte africain.

## Chapitre II: Données et Méthodes

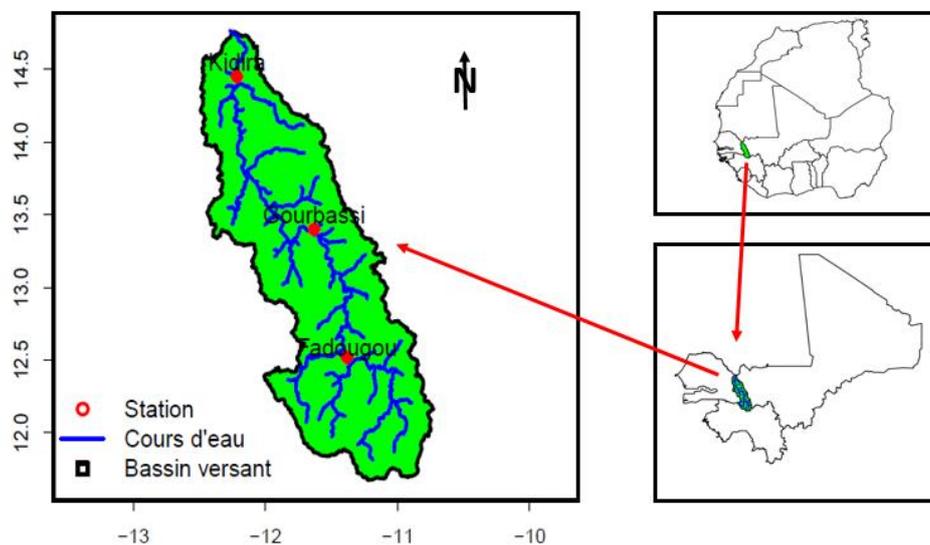
### II.1. Présentation de la zone d'étude

#### II.1.1 Localisation du bassin versant de la Falémé

Le bassin versant de la Falémé se situe entre les latitudes  $12^{\circ}11'N$  –  $14^{\circ}27'N$  et les longitudes  $11^{\circ}12'W$  –  $12^{\circ}15'W$  (Figure.3). La Falémé est l'un des principaux affluents sur la rive gauche du fleuve Sénégal. Elle prend sa source à 800 m d'altitude dans une région de plateaux latéritiques au pied du Fouta Djalon et s'allonge sur 625 km environ jusqu'à la confluence avec le Sénégal. Son bassin versant couvre une superficie de 28900 km<sup>2</sup>, il est partagé entre trois états que sont : le Sénégal (pour 11500 km<sup>2</sup>), le Mali (pour 13800 km<sup>2</sup>) et la Guinée Conakry (pour 3600 km<sup>2</sup>).

Le bassin compte trois principales stations hydrologiques que sont Fadougou ( $12^{\circ}31'N$  ;  $11^{\circ}23'W$ ), Gourbassi ( $13^{\circ}24'N$  ;  $11^{\circ}38'W$ ) et Kidira ( $14^{\circ}27'N$  ;  $12^{\circ}13'W$ ).

La Falémé couvre trois domaines géographiques et climatiques (domaines guinéen, Sud soudanien et Nord soudanien) (Faye, 2014). Les roches du précambrien supérieur et les roches sédimentaires du paléozoïque constituent les principales formations géologiques du bassin.



*Figure.3 : Carte de localisation du bassin versant de la Falémé*

#### II.1.2 Caractéristiques morphologiques du bassin

L'identification des caractéristiques morphologiques est nécessaire pour déterminer et analyser le comportement hydrologique d'un bassin versant. Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant influencent fortement sa réponse hydrologique, et notamment le régime des

écoulements en période de crue ou d'étiage. Le temps de concentration ( $t_c$ ) qui caractérise en partie la vitesse et l'intensité de la réaction du bassin versant à une sollicitation des précipitations, est influencé par diverses caractéristiques morphologiques.

### II.1.2.1 Caractéristiques de forme

La forme du bassin versant a une grande influence sur l'écoulement global et surtout sur l'allure de l'hydrogramme résultant d'une pluie donnée.

#### ❖ La surface et le périmètre du bassin

La surface (S) est la portion du plan délimité par la ligne de crête, ou contour du bassin, elle est généralement exprimée en  $\text{Km}^2$ . Sa mesure est faite soit à l'aide d'un planimètre,  $S=28900 \text{ Km}^2$ .

Le périmètre (P) est la longueur de la ligne de contour du bassin. Il est mesuré à l'aide d'un curvimètre et s'exprime en Km,  $P=938\text{km}$ .

#### ❖ L'indice de compacité de Gavelius (1914)

Il existe plusieurs indices morphologiques permettant de caractériser le milieu, mais aussi de comparer les bassins versants entre eux. Nous allons citer l'indice de compacité de Gavelius (1914)  $K_G$  appelé aussi le coefficient de compacité, il est défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi \cdot A}} = 0.28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

Avec

A : surface du bassin versant ( $\text{Km}^2$ )= 28900  $\text{Km}^2$

P : périmètre du bassin (Km)= 938km

Un bassin versant est de forme circulaire lorsque son  $K_G$  est de proche de 1 et de forme allongée lorsque le  $K_G$  est supérieur à 1.

On obtient :  $K_G = 1.54$  ( $K_G > 1$ )

D'après cette valeur de  $K_G$ , on peut dire que notre bassin est de forme allongée.

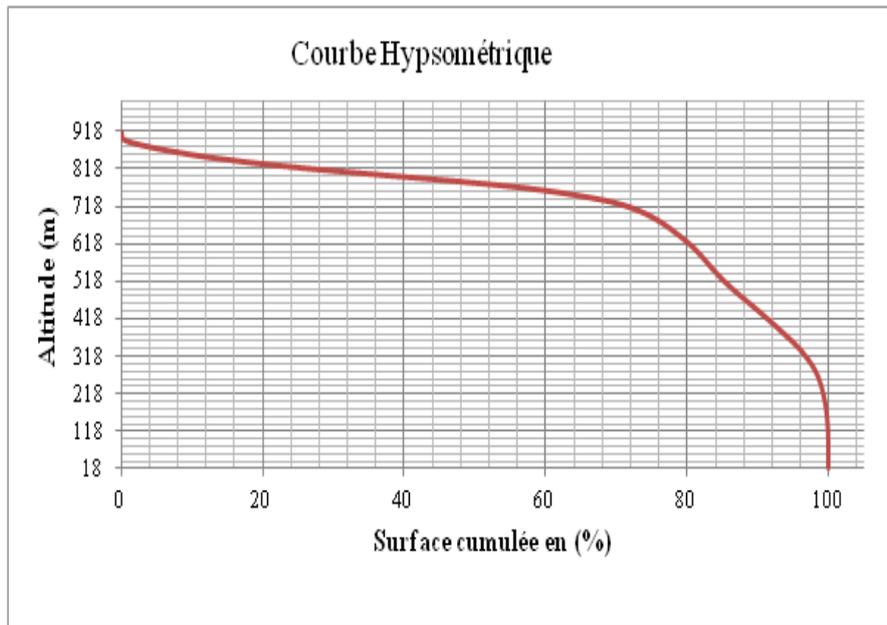
### II.1.2.2 Caractéristiques de relief

L'influence du relief sur l'écoulement se comprend aisément, car des paramètres hydrométéorologiques (précipitations, températures, etc.) varient avec l'altitude.

Le relief d'un bassin versant se détermine au moyen d'indices de pente ou de caractéristiques suivants:

❖ **La courbe hypsométrique,**

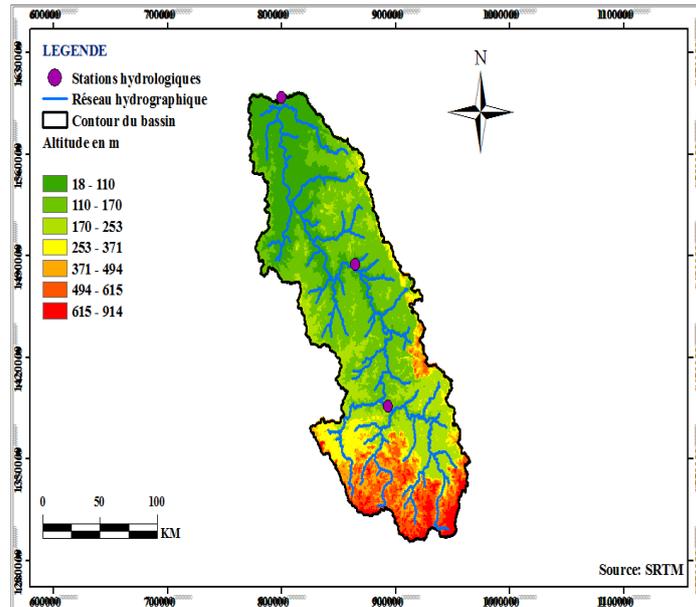
La courbe fournit une vue synthétique de la pente du bassin, donc du relief. La Figure.4 représente la répartition de la surface du bassin versant de la Falémé en fonction de son altitude.



*Figure.4 : Courbe hypsométrique*

Le modèle numérique du terrain (M.N.T) du bassin versant de la Falémé est présenté à la Figure.5, il donne un aperçu à la répartition des altitudes dans le bassin et confirme les informations données par la courbe hypsométrique.

La répartition altimétrique révèle une prédominance des terrains compris entre 18 et 253 m. L'altitude moyenne s'élève à 466 m. Le bassin présente des altitudes comprises entre 18 m en aval et 914m en amont.



*Figure.5 : Répartition spatiale des pentes dans le bassin versant de la Falémé*

#### ❖ Les altitudes caractéristiques

Elles sont déterminées à partir de la courbe hypsométrique ou bien à partir d'une carte topographique du bassin :

L'altitude maximale correspond au point le plus élevé ou bien culminant du bassin,

**$H_{\max} = 914\text{m}$**

L'altitude minimale correspond au point le plus bas du bassin,  **$H_{\min} = 18\text{m}$**

L'altitude médiane est l'altitude lue au point d'abscisse 50% de la surface totale du bassin sur la courbe hypsométrique. Cette grandeur se rapproche de l'altitude moyenne dans le cas où la courbe hypsométrique du bassin versant concerné présente une pente régulière.

L'altitude moyenne déduite directement de la courbe hypsométrique ou bien à partir d'une carte topographique. L'altitude moyenne est définie comme suit:

$$H_{\text{moy}} = \sum \frac{A_i \cdot h_i}{A} \quad (2)$$

Avec  $A_i$  : aire comprise entre deux courbes de niveau ( $\text{Km}^2$ ) ;

$h_i$  : altitude moyenne entre deux courbes de niveau (m) ;

$A$  : surface totale du bassin versant ( $\text{Km}^2$ )

#### ❖ La pente moyenne

La pente moyenne du bassin versant  $i_m$  est une caractéristique importante qui renseigne sur la topographie du bassin, elle est donnée par la relation suivante :

$$i_m = \frac{D \cdot L}{A} \quad (3)$$

La pente moyenne est exprimée en (m/km). L est la longueur totale de courbes de niveau (km), D : distance entre deux courbes de niveau (m), A : surface du bassin (Km<sup>2</sup>).

❖ Indice de pente globale

Indice de pente globale  $I_g$  permet de comprendre et de mettre en évidence l'influence du relief sur le ruissèlement à l'intérieur du bassin versant. Il est défini par la relation suivant :

$$I_g = \frac{D}{L} \quad (4)$$

Avec :

$D = H_{5\%} - H_{95\%}$  : dénivelée entre les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin versant tiré es à partir de la courbe hypsométrique (m).

L: la longueur du rectangle équivalent (m)

❖ La dénivelée spécifique

Suivant la classification de l'Office de Recherche Scientifique d'Outre-Mer (ORSTOM) (Tableau1), la dénivelée spécifique permet de se prononcer sur le relief.

$$D_s = I_g \sqrt{A} \quad (5)$$

Avec :

$I_g$ = indice de pente globale

A=superficie du bassin versant

La dénivelée spécifique du bassin versant de la Falémé est de 56 ,9m inférieur à 100m, donc son relief est modéré.

**Tableau 2: classification du relief selon  $D_s$**

Relief très faible	$D_s < 10m$
Relief faible	$10m < D_s < 25m$
Relief assez faible	$25m < D_s < 50m$
Relief modéré	$50m < D_s < 100m$
Relief assez fort	$100m < D_s < 250m$
Relief fort	$250m < D_s < 500m$
Relief très fort	$D_s < 500m$

Le Tableau 3 ci-dessous donne un résumé de la morphologie du bassin versant de la Falémé.

**Tableau 3 : caractéristiques morphologique de la Falémé**

Paramètre	Symbole	Unité	Valeur
Superficie	S	Km <sup>2</sup>	28900
Périmètre	P	Km	938
Longueur équivalente	L	km	396
Largueur équivalent	l	km	73
Altitude Min	H <sub>min</sub>	m	18
Altitude Max	H <sub>max</sub>	m	914
Altitude Moy	H <sub>moy</sub>	m	466
Indice de Compacité	k <sub>c</sub>		1.54
Indice de pente global	I <sub>g</sub>		0.33
Pente moyenne	Im	m/km	1.5
Dénivelé spécifique	D <sub>s</sub>	m	56.9
Longueur réseau	L <sub>ré</sub>	Km	625

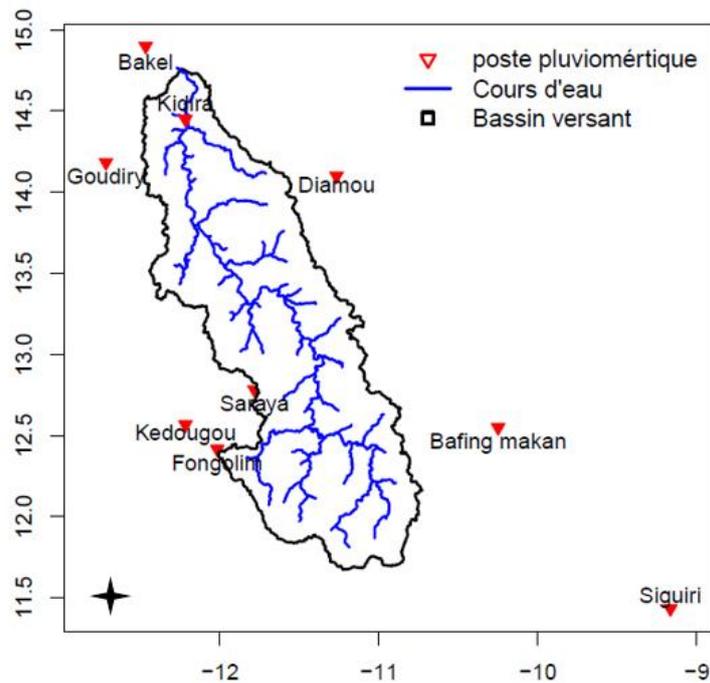
### II.1.3 Localisation des stations étudiées

Dans cette étude, deux stations hydrologiques ont été retenues parmi les trois principales. Elles ont permis de diviser le bassin versant de la Falémé en deux sous bassins. Le bassin versant de la Falémé à Gourbassi avec une superficie de 17100 Km<sup>2</sup> et à Kidira (exutoire) couvrant une superficie de 28900 Km<sup>2</sup>.

Les neuf (9) postes pluviométriques utilisées dans cette étude sont présentées à la Figure.6.

Le choix des 9 stations (Figure.6) est basé sur trois critères :

- la taille de l'échantillon ;
- la position géographique des stations par rapport au bassin ;
- la qualité des données.



*Figure.6 : Stations pluviométriques utilisées*

## II.2. Présentation des données hydroclimatiques

### II.2.1 Données d'observation

Les données météorologiques font parties des variables d'entrée qui permettent de réaliser une modélisation hydrologique. Une estimation précise et cohérente de ces variables est indispensable à l'obtention de résultats de simulation hydrologique adéquats (Roy, 2011). Les données climatiques journalières observées utilisées pour faire tourner le modèle hydrologique (pluie-débit) sélectionné pour cette étude, ont été fournies par l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM) du Sénégal pour les stations sénégalaises et par les Directions Nationales de Météorologie de la Guinée Conakry et du Mali pour les stations guinéennes et maliennes. Tandis que les débits journaliers observés à Gourbassi et Kidira proviennent, respectivement de la Direction Nationale de l'Hydraulique du Mali et la Direction et la Planification des Ressources en Eau du Sénégal (DGPRE).

Les caractéristiques des deux stations de contrôle retenues sont présentées dans le tableau 4.

**Tableau 4 : Caractéristiques des stations hydrologiques observées sur la Falémé**

station	Latitude	longitude	Années d'observation	Débit annuel moyen
Kidira	14°27'N	12°13'O	1984-2005	91,52m <sup>3</sup> /s
Gourbassi	13°24'N	11°38'O	1984-2005	72,02m <sup>3</sup> /s

## II.2.2 Données de sorties de modèles climatiques

Pour évaluer les effets du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Falémé, nous avons utilisé des données climatiques de haute résolution (0.5°x0.5°) à pas de temps journalier de trois(3) modèles climatiques régionaux (MCR).

Les 3 MCR sont issus du programme CORDEX-Afrique sous les réchauffements planétaires de 1.5°C et de 2°C.

Le choix des trois modèles régionaux (MCR) retenus est motivé par le fait qu'ils sont très utilisés dans les études d'impacts du changement climatique en Afrique de l'ouest (Camara et al, 2013; Diallo et al, 2012, Mahamadou et al, 2018 etc.). Certaines caractéristiques des modèles sont présentées au tableau 5.

**Tableau 5: Caractéristiques des modèles régionaux utilisés**

Modèles régionaux	Institutions-pays	Historique	1.5°C	2°C	Modèle global	RCP
BCCR-WRF	BCCR, Espagne	1976-2005	2029-2058	2064-2093	NCC-NorESM1-M	4.5
DMI-HIRHAM	DMI, Danemark	1976-2005	2029-2058	2064-2093	NCC-NorESM1-M	4.5
SMHI-RCA	SMHI, Suède	1976-2005	2029-2058	2064-2093	NCC-NorESM1-M	4.5

## II.3 Méthode de calcul de la pluie moyenne et de l'évapotranspiration potentielle

### ❖ Méthode de calcul de la pluie moyenne

Il existe de nombreuses méthodes de calcul de la pluie moyenne dans la littérature scientifique. Cependant, du fait du nombre très limité de stations, la pluie moyenne reçue par le bassin est calculée à partir des données pluviométriques des 9 stations pluviométriques en utilisant la méthode arithmétique à l'aide du logiciel R. La série de la pluie moyenne calculée couvre la période 1984-2005.

### ❖ Méthode de calcul de l'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (ETP), un des termes majeurs du bilan hydrologique, est en relation directe avec le climat, le sol ou encore la végétation (Faye et Sow, 2014).

L'ETP a été calculée par la formule de la FAO et modifiée par Allen et al. (1998) à l'aide d'une feuille de calcul Excel en utilisant les températures journalières maximales ( $T_{\max}$ ) et minimales ( $T_{\min}$ ). La formule de la FAO 1998 est la suivante :

$$ETP=0.0023 (T_{\text{mean}}+17.8)(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})^{0.5}.Ra \quad (6)$$

Avec, Ra = équivalent en eau du rayonnement extraterrestre en (mm/jour)

## II.4. Méthode de correction des biais

Les sorties des modèles climatiques présentent des biais qui nécessitent d'être corrigés. Pour ce faire, la méthode CDF-t (*Cumulative Distribution Function-Transform*) a été utilisée dans cette étude pour corriger les biais associés aux sorties des modèles climatiques régionaux (BCCR-WRF, DMI-HIRHAM et SMHI-RCA).

CDF-t est une méthode statistique développée par Michelangeli et al., (2009) pour générer des fonctions de répartition d'une variable climatique locale en climat futur à partir des fonctions de répartition de cette même variable observée dans le climat de référence (données de stations) et estimée par les simulations climatiques pour la période historique et pour les périodes futures. En générale la méthode CDF-t est souvent utilisée, par la prise en compte des modifications de la fonction de distribution, coté simulations, entre le climat présent et le climat futur. Dans l'approche CDF-t, une transformation T est appliquée au CDF à grande échelle pour définir un nouveau CDF aussi proche que possible du CDF mesuré à la station (Vrac et al, 2012). Les grandes étapes de la méthode CDF-t sont résumées dans le tableau 6.

**Tableau 6:** les étapes de la méthode CDF-t (Source: <http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/128>)

	Historique	Future
MCR	$F_{Gh}T$	$F_{Gf}T$
Station	$F_{Sh}$ ↓	$F_{Sf}?$ ↓

$F_{Gh}$  et  $F_{Sh}$  définit respectivement le CDF de la variable modélisée (par MCR) et de la variable observée (à station) pour une période historique.

- La transformation T permettant de passer de  $F_{Gh}$  et  $F_{Sh}$  est défini comme :

$$T(F_{Gh}(x)) = F_{Sh}(x) \quad (7)$$

L'équation (1) est supposée valide pour tout x et donc pour

$x = F_{Gh}^{-1}(u)$ , quel que soit  $u \in [0,1]$ .

En remplaçant x dans l'équation (1), on obtient :

$$T(u) = F_{Sh}(F_{Gh}^{-1}(u)) \quad (8)$$

Cette relation est supposée rester la même entre les CDF de la variable modélisée et de la variable observée pour une période future, respective  $F_{Gf}$  et  $F_{Sf}$ :

$$T(F_{Gf}(x)) = F_{Sf}(x)$$

- On cherche maintenant quelle sera la fonction de distribution (CDF) pour la variable locale dans le futur ( $F_{Sf}$ ). En appliquant l'équation (1) et (2) à  $F_{Gf}$  on obtient l'équation (3) qui permet de définir une fonction cumulative de distribution (CDF) pour les données des stations futures :

$$F_{Sf}(x) = T(F_{Gf}(x)) \Leftrightarrow F_{Sf}(x) = F_{Sh}(F_{Gh}^{-1}(F_{Gf}(x))) \quad (9)$$

## II.5. Modélisation hydrologique

### II.5.1. Présentation du modèle GR4J

Le modèle GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journaliers) est un modèle global pluie-débit à quatre paramètres. Son développement a été initié à l'IRSTEA (ex- Cemagref) au début des années 1980, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue d'utilisations pour des applications de gestion de la ressource en eau et d'ingénierie (dimensionnement d'ouvrage, prévision des crues et des étiages, gestion de réservoirs, détection d'impact) (Andréassian et al, 2007). Ce modèle simple et efficace est une tentative de description mathématique globale du cycle hydrologique à l'échelle du bassin

versant: les qualificatifs de processus qui sont traités de façon globale. GR4J représente la transformation pluie-débit à l'aide d'une structure à deux réservoirs (production et routage) qui se vident et se remplissent au cours du temps. Cet aspect du modèle permet d'avoir une mémoire des conditions antérieures et de produire un effet tampon sur les forçages d'origine atmosphérique (apports d'eau et d'énergie) (Khediri *et al*, 2015).

#### ❖ **Fonctionnement du modèle**

Le modèle GR4J ne nécessite pas une description fine du bassin et n'a besoin qu'un nombre réduit de données d'entrées hydrométriques et d'informations sur le bassin versant. Comme les séries de pluies et l'évapotranspiration potentielle (ETP) exprimés en moyenne journalière sur le bassin, les débits moyens journaliers à l'exutoire pour le calage et la superficie du bassin. Le schéma de la structure est donné à la figure.7. Il s'agit d'un modèle à deux réservoirs (production et routage) dont le fonctionnement est la suivante : l'apport pluviométrique  $P$ , après une phase d'interception, se répartit entre écoulement profond et remplissage du réservoir de production  $S$ , qui peut lui-même se vidanger par deux façons: par évapotranspiration ou bien par percolation vers l'écoulement profond. Ensuite, la lame d'eau produite est divisée en deux parties d'écoulement. La première (90%) est transformée par un hydrogramme unitaire  $HU1$  et remplit le réservoir de routage, la seconde est transformée par un hydrogramme unitaire  $HU2$  et génère un écoulement rapide. Le terme  $F$  représente un terme d'échange avec les bassins voisins. Le réservoir de routage se vidange en générant un flux  $Q_r$  qui s'ajoute aux flux  $Q_d$  pour donner l'écoulement final  $Q$  (Bouizrou, 2015).

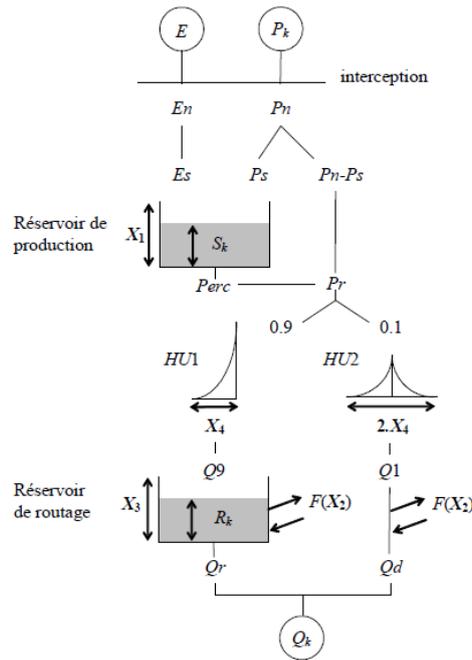


Figure.7: structure du modèle GR4J (Perrin, 2003)

$P_k$ : la pluie journalière du jour k

E: évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

HU: Hydrogramme unitaire

Les paramètres à caler ( $X_1$  à  $X_4$ ) :

$X_1$ : capacité maximale du réservoir de production (mm)

$X_2$ : coefficient d'échanges souterrains (mm)

$X_3$ : capacité maximale du réservoir de transfert (mm)

$X_4$ : temps de base de l'hydrogramme unitaire (jour) HU1.

#### ❖ Description mathématique

##### La production

La production évalue la partie des précipitations qui alimente les eaux de ruissellement à l'exutoire du bassin versant, ainsi que la partie s'évapore.

$p_k$ : La pluie journalière du jour k

E: évapotranspiration potentielle moyenne pour le même jour calendaire.

$P_n$  : Pluie nette

$E_n$ : ETP nette

HU: Hydrogramme unitaire

Lors de la phase de neutralisation, une quantité de l'ETP est produite de la pluie brute.

Si  $P_k \geq E$  alors,  $P_n = P_k - E$  et  $E_n = 0$  (11)

Si  $P_k \leq E$  alors,  $P_n = 0$  et  $E_n = E - P_k$  (12)

Dans le cas où  $P_n$  est différente de 0, une partie  $P_s$  de  $P_n$  alimente le réservoir de production et est calculée par :

$$P_s = \frac{X_1 * \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1}\right)^2\right) * \tanh \frac{P_n}{X_1}}{1 + \frac{S_k}{X_1} * \tanh \frac{P_n}{X_1}} \quad (13)$$

Où  $S_k$  est le niveau de la production du réservoir

Et si  $E_n$  est différent de 0, une quantité d'évaporation  $E_s$  est retirée du réservoir de production :

$$E_s = \frac{S_k * \left(2 - \frac{S_k}{X_1}\right) * \tanh \frac{E_n}{X_1}}{1 + \left(\frac{S_k}{X_1}\right) * \tanh \frac{E_n}{X_1}} \quad (14)$$

Alors, le  $S_k$  est mis à jour, et la capacité maximale est déterminée par un premier paramètre libre  $X_1$  exprimé en mm  $S_k$  est calculé par :

$$S_k = S_k - E_s + P_s \quad (15)$$

La percolation issue du réservoir de production  $S_k$  est alors calculée :

$$perc = S_k * \left(1 - \left(1 + \left(\frac{4}{9} * \frac{S_k}{X_1}\right)^{\frac{1}{4}}\right)\right) \quad (16)$$

De nouveau,  $S_k$  devient :

$$S_k = S_k - perc \quad (17)$$

La vidange peut se faire par deux chemins distincts l'évapotranspiration et la percolation.

Et on obtient une quantité d'eau  $P_r$  entrante dans la partie routage du modèle.

$$P_r = per + (P_n - P_s) \quad (18)$$

### **Hydrogramme unitaire**

$P_r$  est divisé en deux composantes d'écoulement, 90% étant routés par un hydrogramme unitaire HU1 et un réservoir de routage et 10% par un hydrogramme unitaire symétrique HU2.

HU1 et HU2 dépendent du paramètre  $X_4$ , les ordonnées des hydrogrammes sont calculées à partir des courbes en S (cumule de la proportion de la pluie unitaire traitée par hydrogramme en fonction du temps) notée respectivement SH1 et SH2.

SH1 et SH2 sont définies en fonction du temps par :

- **SH1**

Pour  $t=0$   $SH1(t) = 0$  (19)

Pour  $0 < t < X_4$   $SH1(t) = \left(\frac{t}{X_4}\right)^{\frac{5}{2}}$  (20)

Pour  $t > X_4$   $SH1(t) = 1$  (21)

- **SH2**

Pour  $t=0$   $SH2(t) = 0$  (22)

Pour  $0 < t < X4$   $SH2(t) = \frac{1}{2} * \left(\frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}}$  (23)

Pour  $X4 < t < 2X4$   $SH2(t) = 1 - \frac{1}{2} \left(2 - \frac{t}{X4}\right)^{\frac{5}{2}}$  (24)

Pour  $t > 2X4$   $SH2(t) = 1$  (25)

Les ordonnées de HU1 et HU2 sont alors calculée par :

$$UH1(j) = SH1(j) - SH1(j - 1) \quad (9) \quad (26)$$

$$UH2(j) = SH2(j) - SH2(j - 1) \quad (10) \quad (27)$$

Où  $j$  est un entier

A chaque pas de temps  $i$ , les sorties Q9 et Q1 des deux hydrogrammes sont calculés par :

$$Q9(i) = 0.9. \sum_{j=1}^l UH1(k).pr(i - k + 1) \quad (28)$$

$$Q1(i) = 0.1. \sum_{j=1}^m UH2(k).pr(i - k + 1) \quad (29)$$

### Le routage

Le routage a un rôle de reconstitution de la réponse hydrologique du bassin versant à une impulsion de pluie; il modélise conceptuellement l'écoulement jusqu'à l'exutoire.

Pour le flux  $Q_d$  passant directement à l'exutoire, il est donné par :

$$Q_d = \max(0, Q_1 + F) \quad (30)$$

Où un **échange souterrain en eau** (perte ou gain) est calculé par F dont la formule est:

$$F(X_2) = X_2 * \left(\frac{R_k}{X_2}\right)^{\frac{7}{2}} \quad (14) \quad (31)$$

Pour le flux  $Q_r < R_K$  en sortie du réservoir,

$$Q_r = R_k * \left(1 - \left(1 + \left(\frac{R_k}{X_3}\right)^4\right)^{\frac{-1}{4}}\right) \quad (32)$$

Nous obtenons après un nouveau niveau dans le réservoir :

$$R_k = R_k - Q_r \quad (33)$$

Enfin, le débit en sortie de la simulation Q sera la somme des débits obtenus  $Q_d$  et  $Q_r$

$$Q = Q_d + Q_r \quad (34)$$

## II.5.2. Calage et validation du GR4J

Les modèles possèdent un certain nombre de paramètres qui ne sont pas directement mesurables à partir des caractéristiques du bassin versant, par conséquent, le calage du modèle est nécessaire. Le but du calage est alors de trouver les valeurs de ces paramètres pour permettre au modèle de simuler au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (Madsen, 2000). Pour caler le modèle GR4J, nous avons appliqué la procédure du *split-sample test* (Klemeš, 1986) (Figure.8) qui permet d'étudier la transférabilité des paramètres du modèle dans le temps (Espinozo, 2017).

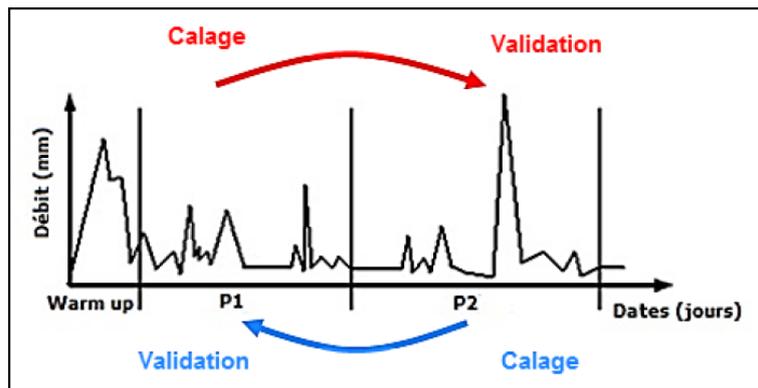


Figure.8: Méthode du *split-sample test* (Klemeš, 1986)

La procédure recommande plutôt de diviser la série chronologique des données en deux sous-périodes indépendantes de même taille (P1 et P2). Ensuite, le modèle est calé sur la première période (P1) et validé sur la seconde (P2), puis recalé sur la seconde et validé sur la première. La première période de calage couvre 1985-1995 (P1) et la deuxième période de calage s'étend de 1997 à 2005 (P2). Toutes les deux périodes de calage ont été précédées d'une année de mise en route du modèle, allant du 1<sup>er</sup> janvier 1984 au 31 décembre 1984 pour le premier calage et du 1<sup>er</sup> janvier 1996 au 31 décembre 1996 pour le second calage.

Une année est généralement admise comme la période minimale de mise en route (Chkir, 1994) pour initialiser le contenu des réservoirs. Cette période d'initialisation n'est pas prise en compte dans le calcul des critères d'évaluation du modèle. La période 1996-2005 a été utilisée pour la validation de la première période de calage (1985-1995) et celle 1996-2005 a été utilisée pour la seconde période de calage (1996-2005). Le choix de la période 1984-2005 s'explique par le fait qu'elle est la seule période sur laquelle le jeu de données ne présente pas de lacune étant donné que le modèle GR4J n'admet pas de lacune en période de calage.

Il faut noter que le calage utilisé pour cette étude est un calage automatique qui a consisté à changer, par itération, les valeurs des paramètres (X1, X2, X3 et X4) du modèle avec un intervalle régulier jusqu'à l'obtention des valeurs optimales du critère de Nash.

### II.5.3. Critère d'évaluation de la performance du GR4J

Une simple analyse visuelle des résultats d'une simulation n'est pas une évaluation objective du modèle. Ainsi nous avons besoin d'utiliser des critères objectifs pour comparer les simulations aux observations. Plusieurs critères existent pour quantifier l'écart entre les observations et les simulations par l'exemple le critère de Nash.

Le critère de Nash proposé par Nash-Sutcliffe en 1970 est l'un des critères les plus répandus des fonctions objectives, le critère s'appuie sur le rapport entre l'erreur du modèle et l'écart du débit observé à sa moyenne. La formule de la fonction-objective NSE sur les débits est la suivante:

$$\text{Nash (Q)} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{cal,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (35)$$

Avec  $i$  le temps considéré,  $Q_{obs,i}$  débits observés au temps  $i$ ,  $Q_{cal,i}$  débits calculés par le modèle hydrologique au temps  $i$ ;  $\overline{Q_{obs}}$  débits moyens journaliers observés.

Le modèle GR4J permet de calculer directement une valeur de critère de Nash. Ce critère prend des valeurs comprises entre  $-\infty$  et 1, plus la valeur est proche de 1, plus la corrélation entre les débits calculés par le modèle et les débits observés est bonne et le modèle est très performant; un Nash négatif signifie que la différence de la moyenne au carré des valeurs estimées et de la référence est supérieure ou égale à la variance des valeurs observées (Jobard et al., 2011).. Le tableau 8 présente les quatre classifications lorsque le critère de Nash est utilisé pour évaluer la performance du modèle GR4J.

**Tableau 7:** critères évaluation du modèle GR4J sur une large valeur de Nash (Bouizrou, 2015)

Critère Nash	Performance
$0,75 < \text{Nash (Q)} \leq 1$	Très Bonne
$0,65 < \text{Nash (Q)} \leq 0,75$	Bonne
$0,50 < \text{Nash (Q)} \leq 0,65$	Satisfaisante
$\text{Nash (Q)} \leq 0,50$	Non satisfaisante

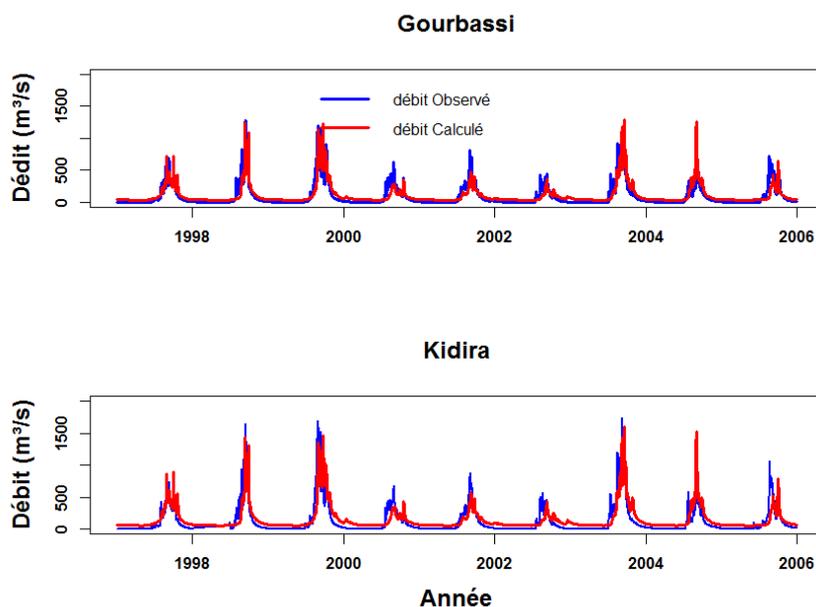
## Chapitre III : Résultats et Discussion

### III.1 Calage et Validation du GR4J

Cette partie analyse les résultats du calage-validation du modèle hydrologique GR4J alimenté avec les données observées aux stations hydrométriques de Gourbassi et de Kidira. IL faut noter qu'on ne doit pas s'attendre à ce que le modèle hydrologique reproduise fidèlement les débits moyens journaliers sur la période historique et sur la période future. Par contre, les tendances et les amplitudes doivent être retrouvées (BRGM/RP-62676-FR, 2014).

#### III.1.1 Hydrogrammes observés et simulés durant le calage

La figure.9 présente les hydrogrammes moyens journaliers simulés (couleur rouge) et observés (couleur bleu) du bassin versant de la Falémé à Gourbassi et à Kidira durant la période de calage. La forme des hydrogrammes moyens journaliers simulés par rapport à celle des hydrogrammes observés est bien reproduite. Cependant les débits de pointe (crues) de 2001 et 2002 ont été sous-estimés au niveau des stations de Kidira et Gourbassi. On constate aussi que les débits simulés et observés en période de calage sont plus importants à la station de Kidira (environ  $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ ) qu'à la station de Gourbassi (environ  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Cela veut dire que la station de Kidira, en plus d'être le point le plus bas de la Falémé, est la station qui contrôle toutes les eaux drainées par le bassin versant. Les hydrogrammes montrent une bonne corrélation entre les débits observé et simulé en période de calage sur les deux sous bassins.

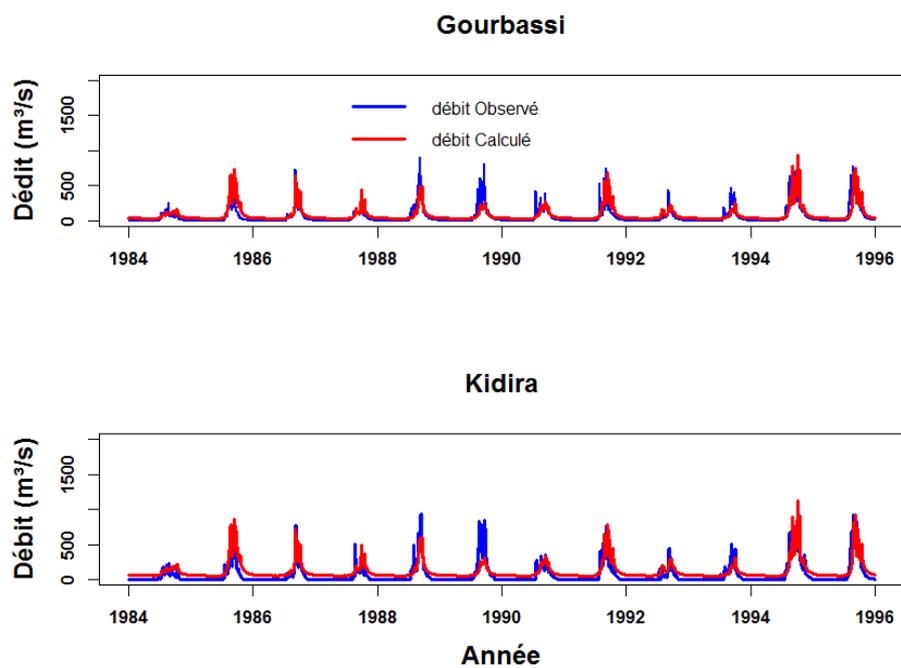


*Figure.9 : Les hydrogrammes moyens journaliers simulés et observés en période de calage*

### III.1.2 Hydrogrammes observés et simulés durant la validation

L'analyse de la figure.10 qui présente les hydrogrammes observés (couleur bleu) et simulés (couleur rouge) en période de validation montre une bonne reproduction de la forme des hydrogrammes, en d'autres termes, l'adéquation entre les débits simulés et observés au niveau des deux sous bassins versants (Gourbassi et Kidira). Les débits de pointe simulés sont bien situés dans le temps mais sont souvent sous-estimés. Pour les douze (12) années de validation, cinq (5) sont sous-estimées pour Gourbassi et quatre (4) pour Kidira (figure.10).

La sous-estimation des débits simulés par le modèle GR4J est plus marquée à Gourbassi qu'à Kidira.



*Figure.10 : Les hydrogrammes journaliers simulés et observés en période de validation*

Globalement, en calage comme en validation, les débits simulés et observés sont plus importants à la station de Kidira (environ  $1400 \text{ m}^3/\text{s}$ ) qu'à la station de Gourbassi (environ  $800 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Toutefois, on remarque que la valeur des débits simulés en période de calibration est toujours plus importante que celle des débits simulés en période de validation. Cela peut s'expliquer par le fait que le modèle a été calé sur une période plus humide que la période de validation. Il faut noter qu'en période de validation, la simulation est meilleure à Gourbassi qu'à Kidira. Ceci est probablement dû à l'homogénéité du bassin qui suppose le sous bassin Gourbassi est plus homogène que ce de Kidira.

### III.1.3 Evaluation de la performance du GR4J durant le calage et la validation

Les critères statistiques d'évaluation de la performance du modèle GR4J sur les sous-bassins (Gourbassi et Kidira) sont présentés dans les tableaux 9 et 10. Il faut rappeler que la performance du modèle est jugée non satisfaisante lorsque  $Nash(Q) \leq 0.50$ , satisfaisante  $0.50 < Nash(Q) \leq 0.65$ , bonne  $0.65 < Nash(Q) \leq 0.75$  et très bonne  $0.75 < Nash(Q) \leq 1$  (Bouizrou, 2015). Or pour cette étude, le calage du modèle GR4J donne des valeurs de Nash supérieures à 0,6 dans les deux sous bassins (tableau 9). Pour la station de Kidira, la valeur de Nash est de 0,72 alors qu'elle est de 0,70 pour la station de Gourbassi. La phase de validation présente des valeurs de Nash de 0,62 à Gourbassi et 0,58 à Kidira (tableau 10). En effet, la baisse de performance du modèle, de la période de calage à celle de la validation est très faible avec une différence de 0,14 à Kidira et 0,08 à Gourbassi. Cela veut que dire que le modèle est plus performant en période de calage qu'en période de validation.

*Tableau 8: Les résultats des critères statistiques et les paramètres du modèle en calage*

Calage	critère statistique	paramètres			
Station	<b>Nash</b>	<b>X1</b>	<b>X2</b>	<b>X3</b>	<b>X4</b>
<b>Gourbassi</b>	0,70	570	1	11	5
<b>Kidira</b>	0,72	745	1	11	5

*Tableau 9: Les résultats des critères statistiques en validation et paramètres du modèle*

Validation	critère statistique	paramètres			
Station	<b>Nash</b>	<b>X1</b>	<b>X2</b>	<b>X3</b>	<b>X4</b>
<b>Gourbassi</b>	0,62	570	1	11	5
<b>Kidira</b>	0,58	745	1	11	5

Le modèle GR4J donne de meilleurs résultats en calage qu'en validation quel que soit le sous bassin considéré. Ce qui est naturellement vrai car le modèle est plus robuste sur la période sur laquelle il est calé plutôt que la période sur laquelle il n'est pas calé. En plus la dégradation du critère de Nash entre le calage et la validation est probablement lié à l'humidité et à l'homogène de deux périodes.

Globalement, les résultats obtenus pour les deux sous-bassins sont satisfaisants. Le modèle GR4J peut être considéré comme satisfaisant et apte à simuler les débits futurs des deux sous bassins (Gourbassi et Kidira).

### III.2 Projections climatiques

Les tendances futures des paramètres climatiques sont présentées dans cette partie sous forme de moyenne d'ensemble des modèles régionaux utilisés. L'approche appliquée est de représenter le cycle saisonnier de la température de l'air, de l'évapotranspiration potentielle et de la précipitation sous les réchauffements de 1.5°C et 2°C. Ensuite pour mieux illustrer les variations de température pour les décennies à venir, nous avons calculé les différences de température entre les simulations sur les périodes future ( $T_f$ ) et historique ( $T_h$ ) (c'est-à-dire  $\Delta T$  absolu).  $\Delta T$  absolu s'écrit :  $T_f - T_h$  (38)

La même différence est appliquée Concernant l'ETP et les précipitations futures On obtient ainsi:

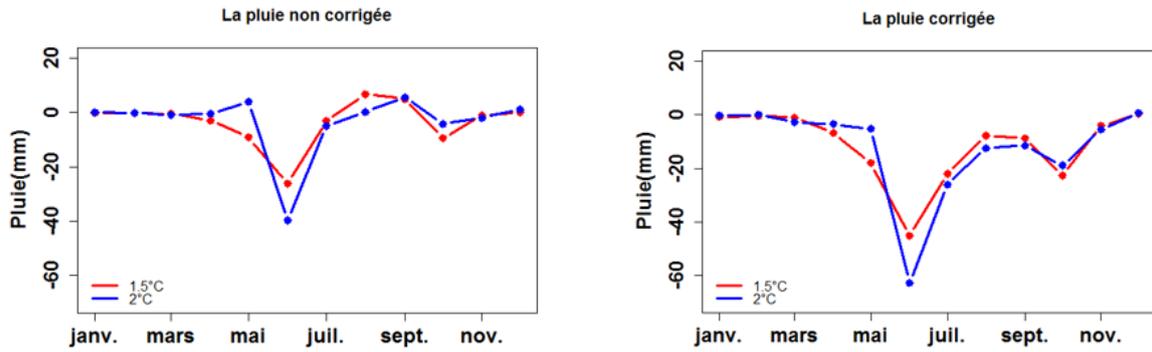
$$\Delta ETP = (ETP_F - ETP_h) \quad (39) ; \Delta P = (P_F - P_h) \quad (40)$$

Avant de montrer les projections climatiques, les variations mensuelles des précipitations corrigées et non corrigées ont été représentées.

#### III.2.1 Cycle saisonnier des pluies simulées avant et après la correction des biais

La figure.11 présente une comparaison entre les pluies simulées avec la moyenne d'ensemble (non corrigées et corrigées) au deux réchauffements 1.5°C et 2°C. Ainsi l'analyse de cette figure montre une nette amélioration des sorties corrigées par rapport aux sorties non corrigées. La sous-estimation des pluies non corrigées au réchauffement 1.5°C a été considérablement réduite après la correction pour les mois avril-mai et juillet-aout. En plus amplitude des sorties corrigées est supérieur à amplitude des sorties non corrigées, le signal est plus visible après la correction. D'après (Mbaye et al. 2015b) la technique de correction appliquée aux sorties de modèles climatiques modifie l'amplitude du signal climatique.

En d'autre terme la correction des biais des sorties de modèle montre une valeur ajoutée ; d'où la pertinence de l'utilisation des données corrigées des modèles dans l'étude d'impact du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant de la Falémé sous le réchauffement global de 1.5°C et 2°C. Ainsi, la correction statistique des biais est indispensable dans la mesure où on veut utiliser les simulations climatiques comme données d'entrée du modèle hydrologique.

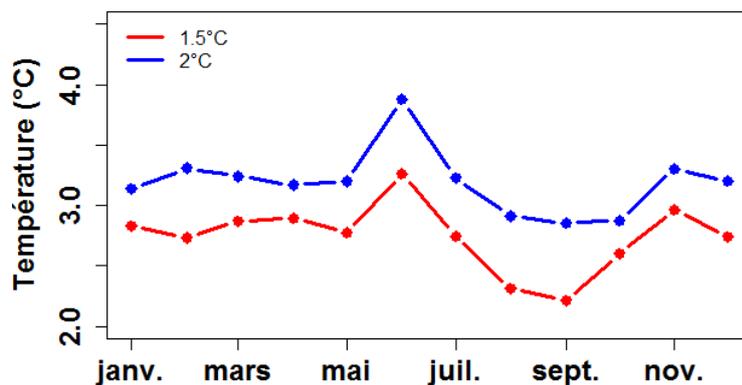


*Figure.11 : Cycle saisonnier des pluies corrigées et non corrigés au réchauffement 1.5°C et 2°C*

### III.2.2 Evolution de la température moyenne annuelle

La figure.12 présente le cycle saisonnier de la température moyen mensuel au réchauffement 1.5°C et 2°C. Le cycle mensuel de la moyenne d'ensemble des modèles régionaux utilisés dans cette étude montre une évolution similaire de la température aux deux réchauffements globaux, bien qu'il y ait une différence en termes d'intensité.

Le changement saisonnier de la température dans le bassin de la Falémé permet d'observer deux pics: un maximum principal au mois juin qui peut s'expliquer par un maximum de rayonnement solaire enregistré et à un maximum secondaire en novembre due aux activités anthropiques qui sont à l'origine des émissions des gaz à effet de serre au sein du bassin.



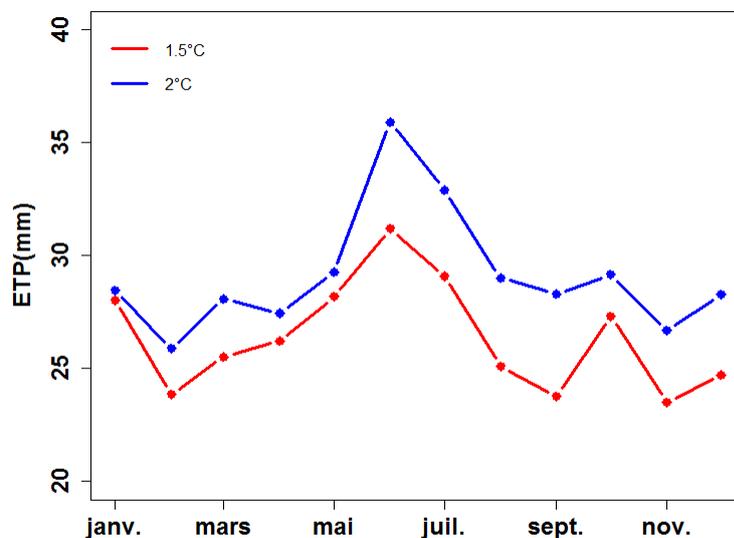
*Figure.12: Cycle saisonnier de la température moyen mensuel au réchauffement 1.5°C et 2°C*

On note aussi une diminution considérable de la température du mois de juillet au mois d'août avec le minimum enregistré en septembre. Cette diminution correspond à la période la plus pluvieuse de la zone d'étude.

Le réchauffement de 1.5°C prévoit une hausse de la température moyenne de 2,74 °C et une hausse moyenne de la température environ 3,19 °C sous le réchauffement de 2°C. Ces résultats sont conformes aux projections du GIEC (2014) qui prévoit une hausse des températures entre 3°C et 4°C sur le continent africain entre 1980-1999 et 2080-2099 (Barrat, 2012). Au Sénégal, les études de Tall *et al.* (2016) montrent une hausse des températures variant entre 1.5 et 2.5°C respectivement avec le RCP4.5 et RCP8.5.

### III.2. 3 Evolution annuelle de l'évapotranspiration potentielle

La figure.13 présente le cycle saisonnier de l'évapotranspiration potentielle au réchauffement 1.5°C et 2°C. L'analyse de la figure.13 montre une hausse importante de l'ETP mensuelle dans le futur. Malgré l'augmentation de l'ETP, le cycle saisonnier sera bien reproduit dans le futur. On peut noter que saisonnier l'ETP futur de notre zone présente un pic principal en juin et un autre pic secondaire en octobre sous les réchauffements 1.5°C et 2°C.



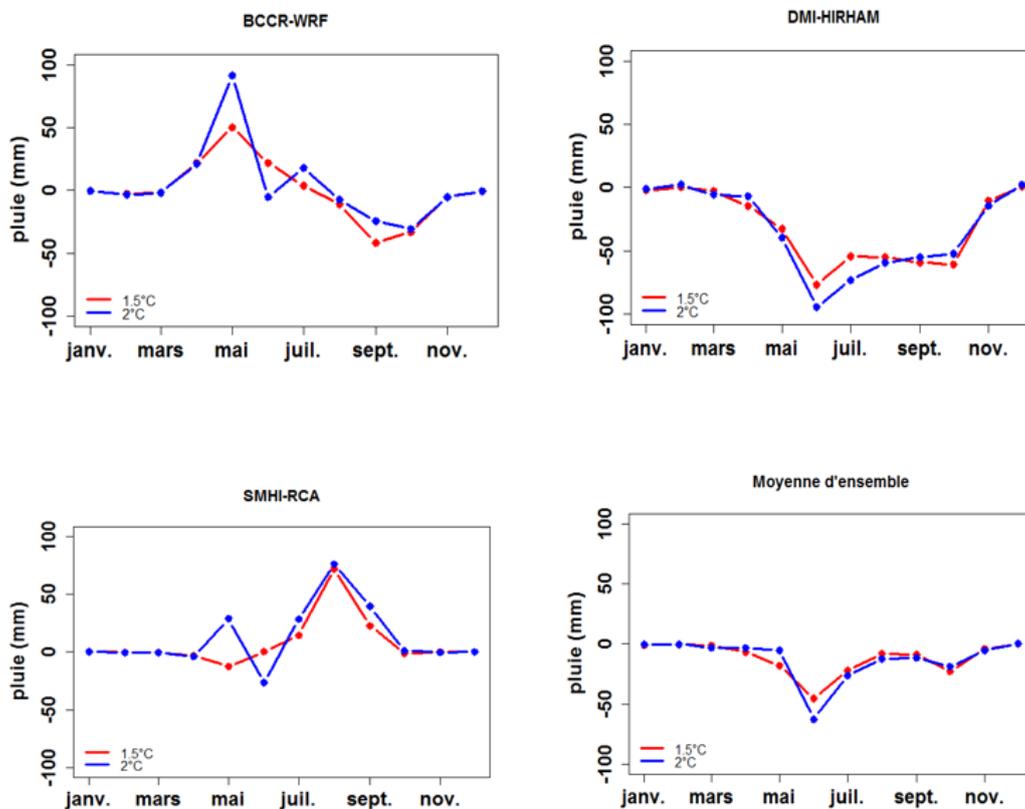
*Figure.13: Cycle saisonnier de l'évapotranspiration potentielle au réchauffement 1.5°C et 2°C*

On constate que l'évolution de la température est similaire à celle de l'évapotranspiration potentielle. Cependant, Donohue *et al.* (2010) soulignent que l'augmentation de la température n'implique pas nécessairement une augmentation de l'ETP car beaucoup d'autres variables entrent en ligne de compte comme le vent, l'humidité relative et l'albédo.

L'augmentation de l'ETP est plus marquée pour le réchauffement de 2°C, avec une valeur moyenne de 29,12 mm à l'échelle du bassin versant de la Falémé contre 26,37 mm pour le réchauffement de 1.5°C. Ces résultats sont en phase avec les études d'Ardoin et *al*, (2005) qui ont montré que l'Afrique Centrale et les pays en bordure du Golfe de Guinée sont les plus touchés par cette hausse et ont montré les plus forts taux d'augmentation de l'ETP. Ardoin, (2004) explique dans sa thèse que le réchauffement annoncé et les changements associés de l'humidité relative, de la vitesse du vent, et des rayonnements thermiques conduisent à l'augmentation de l'évapotranspiration potentielle sur toute l'Afrique de l'ouest et Centrale.

### III.2.3 Changements moyens des précipitations futures sous le réchauffement 1.5°C et 2°C

Les précipitations restent la variable climatique la plus difficile à simuler, surtout dans le contexte Ouest-africain, qui est marqué par de fortes variabilités intra et interannuelles (CSAO/OCDE, 2010). En effet, les modèles climatiques ne convergent pas sur les tendances futures des précipitations en Afrique de l'Ouest. La figure.14 présente le cycle saisonnier des pluies.



**Figure.14:** Cycle saisonnier des pluies simulées par les trois modèles et la moyenne d'ensemble des modèles sous le réchauffement global de 1.5°C et 2°C

La projection des précipitations, sous les réchauffements de 1.5°C et de 2°C par les trois modèles régionaux utilisés, montre des tendances différentes sur le bassin versant de la Falémé. Le modèle DMI-HIRHAM prévoit une baisse des précipitations durant toute l'année avec un pic au mois de juin sous les réchauffements 1.5°C et 2°C.

L'évolution des précipitations par les modèles BCCR-WRF et SMHI-RCA n'est pas homogène, les modèles prévoient une baisse et une hausse des précipitations sous le réchauffement 1.5°C et 2°C. Cependant, la diminution est plus marquée par le modèle DMI-HIRHAM. Ce dernier se caractérise par une reproduction de début précoce de la saison pluvieuse. Ces résultats corroborent ceux de Camara et *al.* (2013) qui ont montré que les modèles (KHMI-RACMO et DMI-HIRHAM) ont la particularité de simuler une saison des pluies avec un début précoce et une fin également précoce. Dans cette partie on observe de fortes divergences entre les modèles, d'après Mahamadou et *al.* (2018) ces insuffisances remarquées au niveau de chaque modèle sont sûrement liées aux schémas de paramétrisations. Ces résultats sont en accord avec ceux conclus par Ardoin (2004) dans son étude qui montre que les modèles climatiques ont la difficulté à reproduire la dynamique de la saison des pluies en plus de leur difficultés à reproduire les volumes précipités et la variabilité interannuelle.

Malgré une grande incertitude sur les précipitations, les deux réchauffements s'accordent sur une diminution des précipitations annuelles en moyenne d'ensemble comprises entre -12.38 mm sous réchauffement 1.5°C et entre -11.49 mm sous le réchauffement 2°C.

La différence en termes d'intensité du signal est aussi importante, la diminution des précipitations est plus marquée au réchauffement de 2°C.

### III.3. Impacts du réchauffement global de 1.5 et 2 degré sur le débit

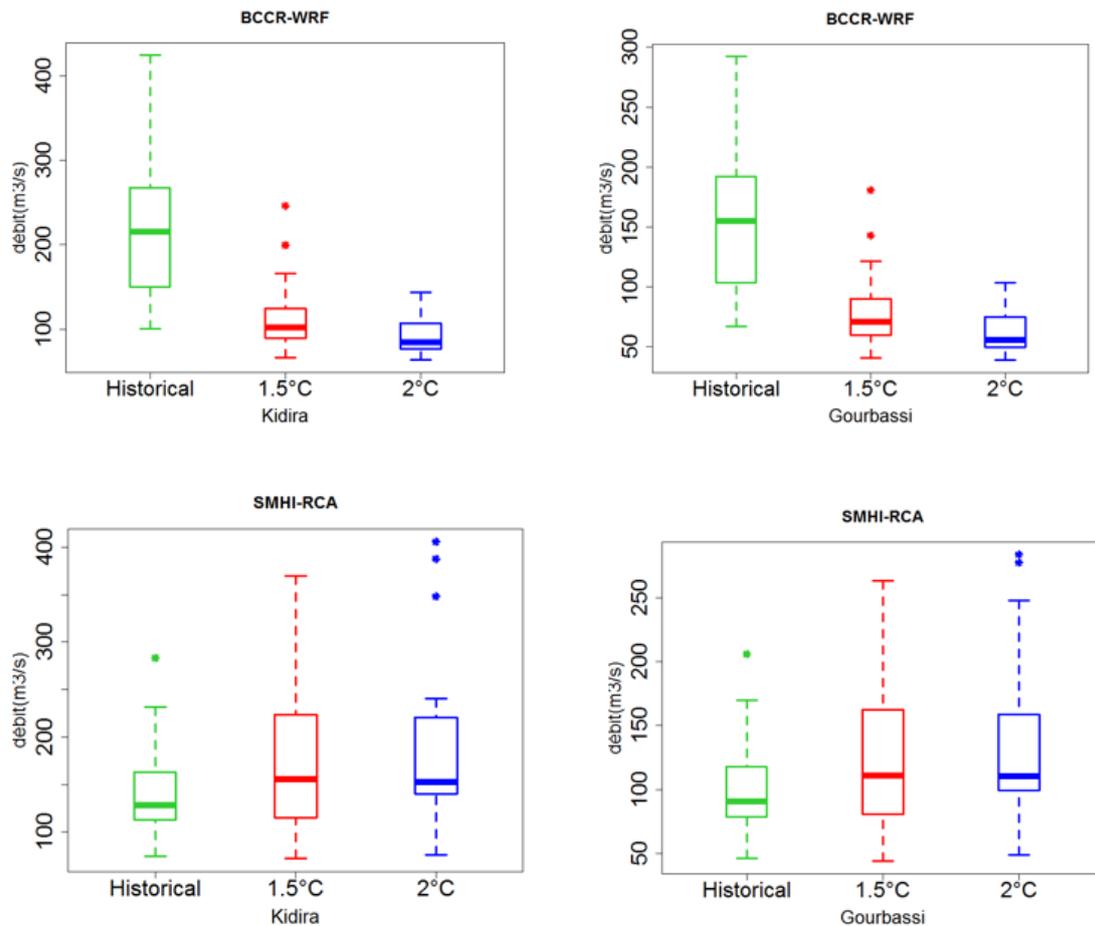
Cette partie analyse le débit futur afin de dégager les effets du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant sous les réchauffements globaux de 1.5°C et de 2°C, au niveau des deux sous bassins versant en amont à Gourbassi et aval à Kidira. Ainsi, la méthodologie adoptée est de comparer les projections liées au climat futur c'est-à-dire aux réchauffements 1.5°C et 2°C à la simulation issue de la période de référence et non à la simulation faite à partir des données observées. Les taux de variations sont calculés par la formule suivante :

$$\Delta Q = \frac{(Q_F - Q_h) \times 100}{Q_h} \quad (41)$$

Avec,  $Q_F$  = débit simulé sur période futur et  $Q_h$  = débit simulé sur la période historique

### III.3.2 Tendances moyennes des débits futurs sous les réchauffements de 1.5 et 2°

Les résultats des figure.15 et figure.16 présentent les tendances moyennes des débits futurs à Kidira et à Gourbassi sous les réchauffements globaux de 1.5°C et 2°C, par rapport à l'historique. L'évolution des débits projetés montre un comportement similaire à Kidira et à Gourbassi avec des amplitudes différentes. Ainsi, avec les deux scénarios climatiques (1,5° et 2°C) les modèles BCCR-WRF et DMI-HIRHAM prévoient une baisse des débits.



*Figure.15: Evolution moyennes annuelles des débits simulés par le modèle GR4J avec les sorties des MCR (BCCR-WRF et SMHI-RCA) au réchauffement global de 1.5°C et de 2°C comparés avec Historical à station de Kidira et Gourbassi*

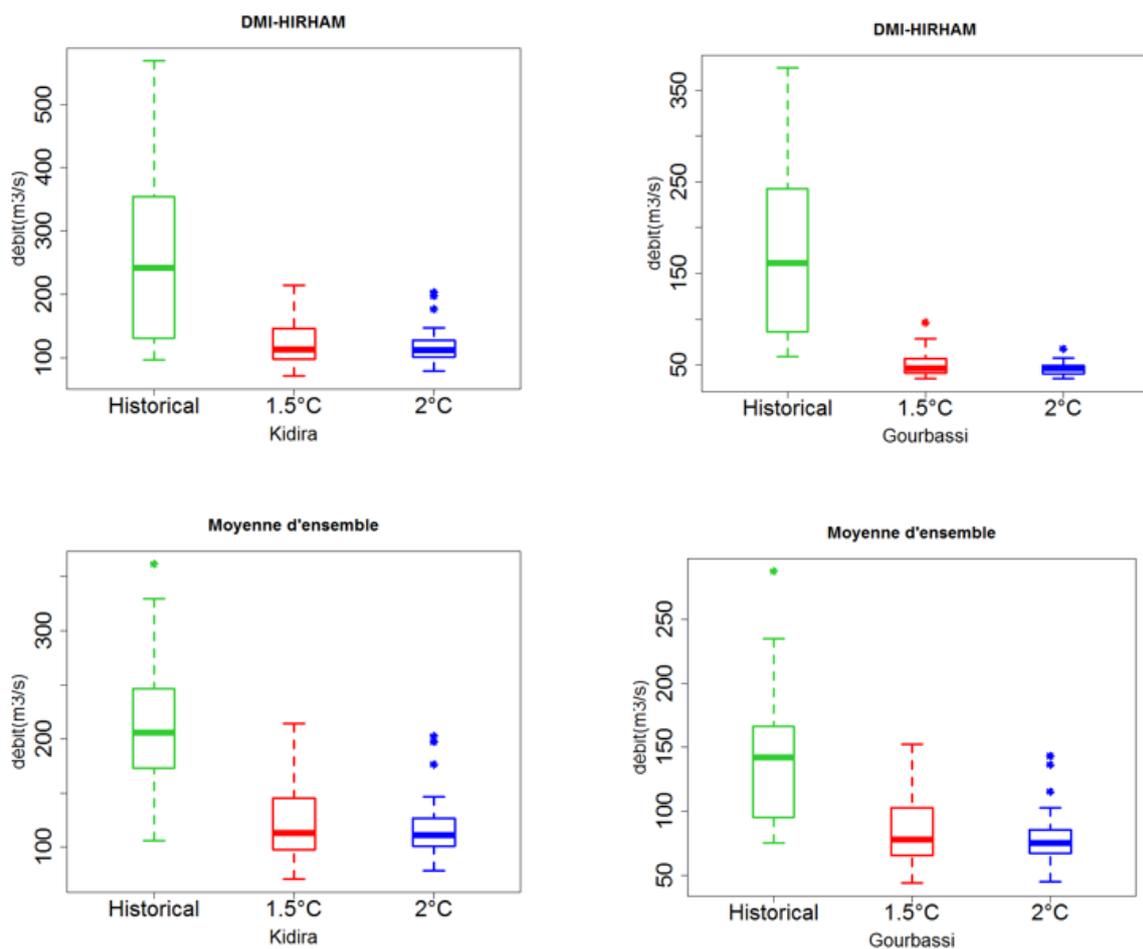
L'analyse des valeurs médianes des box-plots de ces deux modèles montre qu'en période historique la valeur médiane obtenue est nettement supérieure aux valeurs médianes sous les deux réchauffements. La valeur médiane obtenue sous le réchauffement 1.5°C est plus grande que celle obtenue avec le réchauffement 2°C. Contrairement aux autres, le modèle SMHI-RCA prévoit une hausse des débits au réchauffement de 1.5°C, avec une valeur médiane supérieure à celle de l'historique. Cependant, ce même modèle (SMHI-RCA) prévoit la même tendance

que les deux autres sous le réchauffement 2°C. Cette tendance à la baisse est plus importante avec le réchauffement 2°C à Gourbassi qu'à Kidira.

La différence relative de la moyenne d'ensemble des modèles régionaux prévoit également une diminution des débits dans les deux sous bassins avec une baisse de -44,29% pour Kidira et -44,67% pour Gourbassi.

Ces résultats indiquent que la disponibilité de la ressource en eau de surface du bassin versant de la Falémé devrait continuer à décroître d'ici la fin du 21ème siècle.

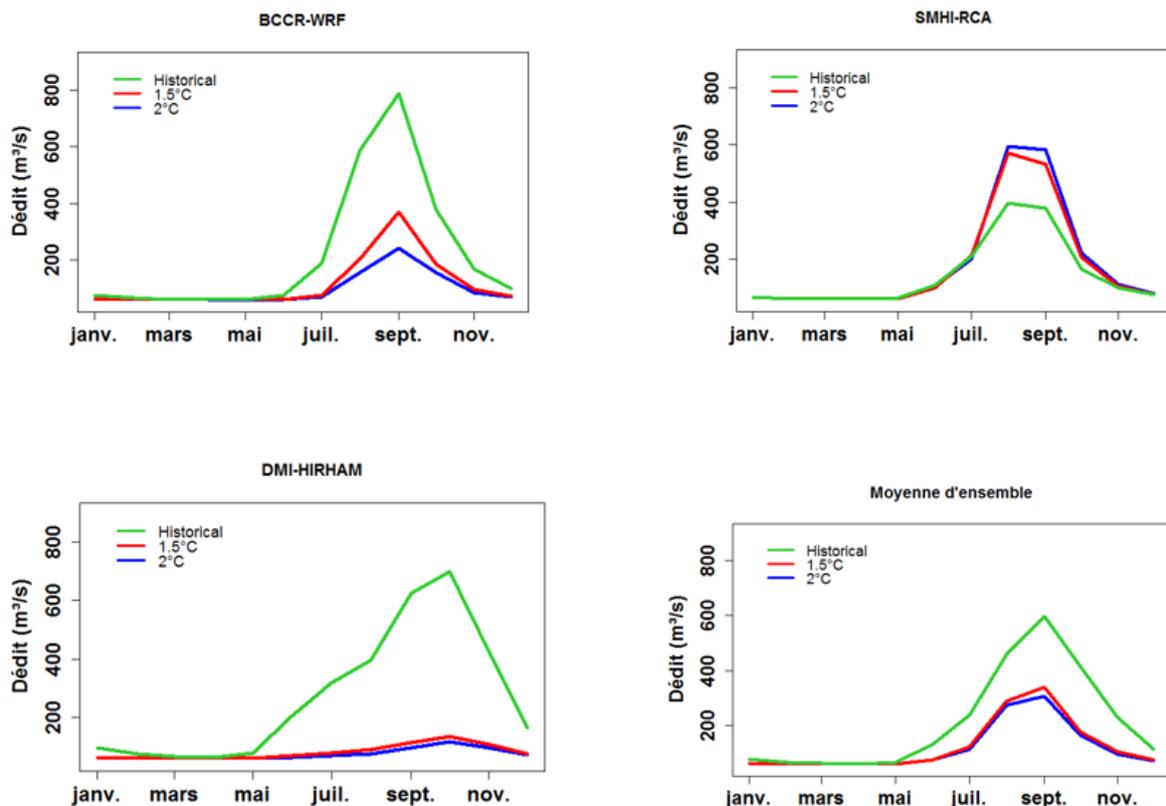
Le sous bassin Gourbassi semble le plus vulnérable au changement climatique simulé par les MCR, compte tenu d'une diminution plus importante des précipitations.



**Figure.16:** Evolution moyennes annuelles des débits simulés par le modèle GR4J avec les sorties du MCR (DMI-HIRHAM) et la moyenne d'ensemble des trois MCR au réchauffement global de 1.5°C et de 2°C comparés avec Historical à station de Kidira et Gourbassi

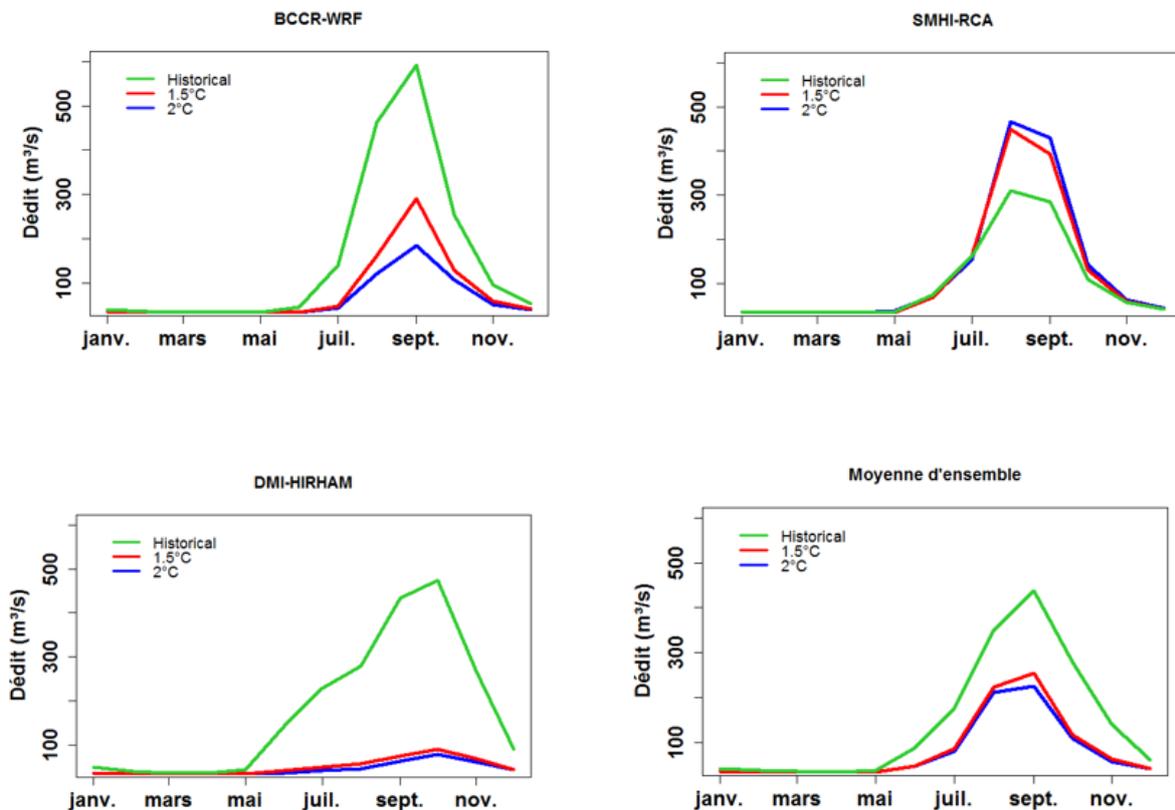
### III.3.3 Variations mensuelles des débits futurs sous le réchauffement de 1.5 et 2°C

Les figure.17 et figure.18 présentent le cycle saisonnier des débits moyens mensuels projetés pour les deux stations du bassin versant de la Falémé. Dans l'ensemble, la comparaison des débits moyens mensuels projetés montre qu'il n'y a pas de modification du cycle saisonnier des deux sous bassins. Ceci voudrait dire qu'il n'aurait pas de modifications du régime hydrologique mais les amplitudes seraient modifiées dans les décennies à venir. Le signal des périodes de hautes eaux et de basses eaux restent identiques à celui de la période historique. Cependant les modifications pourraient porter essentiellement sur les volumes d'eau écoulés. Les débits de pointe, par rapport à l'historique, connaissent une diminution avec les entrées des modèles BCCR-WRF, DMI-HIRHAM et la moyenne d'ensemble aux mois de septembre (BCCR-WRF et Moyenne d'ensemble) et octobre (DMI-HIRHAM). Il faut souligner que les débits projetés à partir des sorties du modèle SMHI-RCA se démarquent de ceux des deux autres modèles, par la différence d'augmentation des débits de point entre aout et septembre sous les réchauffements 1.5°C et 2°C.



**Figure.17** : cycle saisonnier des débits moyens mensuels simulés par le modèle GR4J avec les sorties des trois modèles et la moyenne d'ensemble des modèles MCR au réchauffement global de 1.5°C et de 2°C comparés avec Historical à station de Kidira

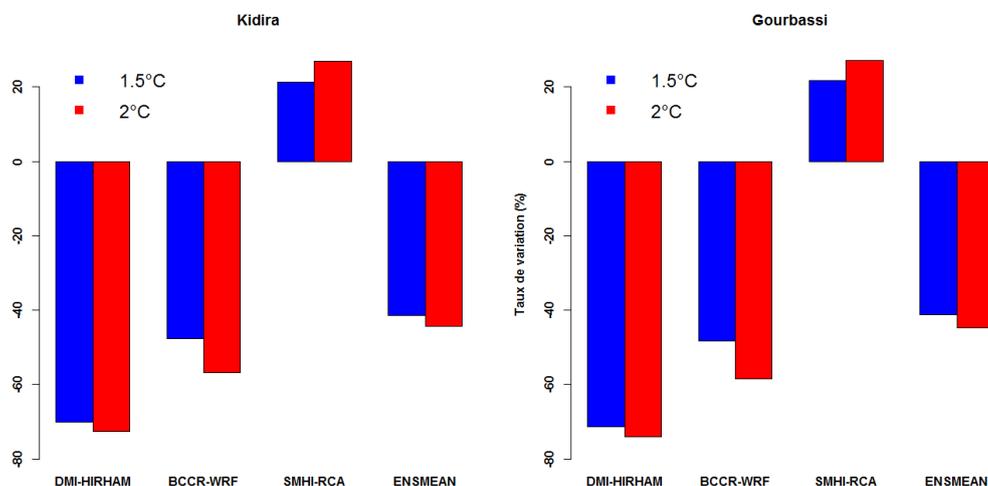
Ainsi, il est bien documenté que la diminution de la fréquence et de l'intensité des pluies sont généralement comme conséquence une diminution des débits selon le type de modèle. Ce qui nous permet de dire que les écoulements sont très sensibles aux variations des précipitations. Cette remarque est en phase avec celle de Ardoin, (2004) qui souligne qu'un excès (déficit) de précipitations selon les scénarii climatiques se traduit par une augmentation (diminution) des débits pour la majorité des bassins versants, quelle que soit l'évolution de l'ETP et donc des températures.



**Figure.18:** cycle saisonnier des débits moyens mensuels simulés par le modèle GR4J avec les sorties des trois modèles et la moyenne d'ensemble des modèles MCR au réchauffement global de 1.5°C et de 2°C comparés avec Historical à station de Gourbassi

### III.3.4 Changements moyens des débits futurs sous le réchauffement 1.5 et 2°C

Les changements des débits projetés dans la Falémé, par le modèle hydrologique GR4J alimenté avec les sorties des modèles climatiques régionaux (figure.19), montre une baisse des débits pouvant aller au-delà de -40 %. A l'exception des résultats avec les forçages du modèle SMHI-RCA, les modèles BCCR-WRF, DMI-HIRHAM et la moyenne d'ensemble (ENSMEAN) prévoient une diminution des débits sur l'ensemble du bassin mais plus marquée à Gourbassi qu'à Kidira. Ces résultats corroborent ceux de Faty (2014) qui montre que la baisse des débits est plus marquée à Gourbassi qu'à Kidira entre juillet et octobre. Cependant, le modèle SMHI-RCA se démarque toujours des autres modèles et présente ainsi une faible augmentation d'ordre de 20% sur l'ensemble du bassin.



*Figure.19: Taux de Variation des débits futurs sous le réchauffement de 1.5 et 2°C*

La baisse du débit est probablement liée à la hausse de l'ETP combinée à la baisse des précipitations prévue dans le futur par les modèles BCCR-WRF et DMI-HIRHAM sous les deux réchauffements 1.5°C et 2°C. L'augmentation du débit dans le futur projeté avec le modèle SMHI-RCA est probablement liée à l'augmentation des précipitations projetées par le même modèle.

Il faut noter que les baisses les plus sensibles sont attendues avec le réchauffement à 2°C, cela peut être dû à la baisse des précipitations projetée sous ce réchauffement. Ceci est plus visible en prenant l'exemple du modèle BCCR-WRF à station de Gourbassi. La baisse va de -48,29% sous le réchauffement 1.5°C à -58,42% sous le réchauffement 2°C.

Cette différence entre les sorties des modèles climatiques est due aux différences de paramétrisations physiques et aux schémas de convection. Ceci montre aussi les incertitudes liées aux projections, particulièrement sur les précipitations.

## Conclusion et Perspectives

Cette étude nous a permis de tirer un certain nombre de conclusions concernant d'abord le calage-validation du modèle GR4J avec les données d'observation puis concernant l'étude d'impact du changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant de la Falémé sous le réchauffement global de 1.5 et 2°C.

Pour le calage-validation, les valeurs des critères statistiques d'évaluations obtenues en calage comme en validation témoignent de la performance et de la robustesse du modèle GR4J sur le bassin versant de la Falémé. Aussi, un meilleur ajustement entre les débits observés et les débits simulés par le modèle a été observé à travers les hydrogrammes simulés et observés. Les régimes hydrologiques du bassin ont été assez bien reproduits par le modèle hydrologique.

Pour les projections futures du climat du bassin, tous les modèles prévoient une hausse générale des températures et de l'ETP d'ici à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle sous les réchauffements planétaires de 1.5°C et 2°C. Les modèles DMI-HIRHAM, BCCR-WRF et la moyenne d'ensemble révèlent une baisse importante des précipitations sur toute l'étendue du bassin versant; par contre le modèle SHIM-RCA projette une hausse des précipitations.

Quant aux débits moyens annuels et mensuels, ils pourraient baisser sur l'ensemble du bassin dans les décennies à venir par rapport aux forçages des simulations issues des modèles DMI-HIRHAM, BCCR-WRF et la moyenne d'ensemble. La baisse la plus marquée du débit a été observée à Gourbassi sous le réchauffement de 2°C. La station de Kidira présente une tendance similaire avec des amplitudes moindres. Quant aux débits simulés avec les données d'entrée du modèle SMHI-RCA, nous avons noté une tendance générale à une augmentation des débits au niveau des sous-bassins de Kidira et de Gourbassi.

Il faut noter que les résultats obtenus au terme de ce travail de master, présentent certaines limites et incertitudes liées à la qualité des données d'observation, aux projections climatiques, au modèle hydrologique, etc. A partir de ces résultats nous prévoyons approfondir ce travail avec l'utilisation d'autres modèles climatiques régionaux, différentes méthodes de correction de biais des sorties climatiques. Ensuite utiliser d'autres modèles hydrologiques comme GR5J, GR6J, SWAT, etc. et de faire une étude de sensibilité des paramètres de ces modèles à différentes formules de calcul de l'ETP. En outre, il serait intéressant aussi d'étudier les événements extrêmes hydrométéorologiques.

Compte tenu de ces résultats, des recommandations ont été formulées pour atténuer les impacts potentiels du changement climatique sur le bassin de la Falémé.

## Recommandations

Les résultats montrent que les ressources en eau du bassin versant de la Falémé, pourraient être considérablement affectées par le changement climatique. C'est ainsi qu'il faudrait développer des stratégies d'adaptations au changement climatique en tenant compte de l'augmentation de la température, de la baisse des précipitations et des débits. Pour réduire la vulnérabilité des populations et des ressources du bassin face au changement climatique, il est recommandé de:

- Intégrer la modélisation hydrologique et hydrogéologique, les informations climatiques et la démographie dans la prévision des ressources en eau;
- Utiliser les résultats issus de recherche dans les processus de gestion et de planification des ressources en eau;
- Mettre en place des techniques de collecte, de stockage et de conservation des eaux de pluviales;
- Développer un bon système de drainage pluvial qui intègre la dimension climatique dans le dimensionnement des ouvrages;
- Fixer des débits d'exploitation à ne pas dépasser et suivre le prélèvement des eaux souterraines;
- Optimiser l'irrigation par un pilotage efficace et des techniques utilisatrices de moins d'eau (Exemple: le goutte à goutte);
- Favoriser l'économie de l'eau par la sensibilisation des populations;
- Limiter l'utilisation des eaux souterraines pour l'agriculture;
- Promouvoir la gestion intégrée et concertée des ressources en eau;
- Promouvoir l'assainissement urbain et rural pour limiter la pollution des ressources en eau;
- Adopter le principe pollueur-payeur;
- La maîtrise de l'eau par des ouvrages de retenue (moyens et petits)
- Renforcer et intensifier les formations sur les évaluations de la vulnérabilité et des mesures d'adaptation dans le secteur des ressources en eau;
- Doter les établissements universitaires et instituts de recherche de moyens techniques et financiers pour intensifier la recherche dans le domaine de la modélisation des processus hydrométéorologiques et de leurs impacts.

## BIBLIOGRAPHIE

- Ali A. et Amani A., 2010.** Le sahel face aux changements climatiques, Enjeux pour un développement durable, Bulletin Mensuel, Centre Régional AGRHYMET, *Numéro spécial*, 43p.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998.** Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements, *FAO Irrigation and drainage paper*. FAO, Rome, Italy. 15p.
- Ardoin-Bardin S., 2004.** Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne, *Thèse de doctorat, Université de Montpellier II*, 265, 239, 284P.
- Ardoin-Bardin S., Dezztter A., Servat E., Mahe G., Paturol J. E., Dieulin C. & Csenave L., 2005.** Evaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'ouest et Central. *IAHS Publ.* 296, 2005. 4,7P
- Ardoin-Bardin, S., Dezetter, A., Servat, E., Paturol, J.E., Mahé, G., Niel, H., Dieulin, C., 2009:** Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrolog. Sci. J.*, 54, 77–89.
- Bodian, A. 2018.** *Ressources en eau et changement climatiques au Sénégal : Etat des lieux des connaissances scientifiques, rapport de PAS-PNA (2018)*, 22P.
- Bouizrou I. 2015.** Etude comparative de deux modèles d'aide à la décision pour la gestion des crues (SWAT et GR4J) au niveau du bassin d'Aguenza (région de Souss), *mémoire de fin d'étude, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah*, 69p.
- BRGM/RP-62676-FR, 2014.** Impact du changement climatique sur les ressources en eau de Martinique, *Rapport final*, 32P.
- Barrat J. M., 2012.** Changement climatique en Afrique de l'Ouest et Conséquences sur les Eaux Souterraines, *Rapport OSSI-GICRESAIT no 13*, 41p.
- Camara M., Diedhiou A., Sow B. A., Diallo M. D., Diatta S., Mbaye I., Diallo I., 2013.** Analyse de la pluie simulée par les modèles climatiques régionaux de CORDEX en Afrique de l'Ouest, *Sècheresse, Volume 24, Numéro1, DOI : 10.1684/sec.2013.0375*, 17P.
- Chkir, N. 1994.** Mise au point d'un modèle hydrologique conceptuel intégrant l'état hydrique du sol dans la modélisation pluie-débit, *thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées de Paris « Sciences et Techniques de l'Environnement »*, 348 p.
- CSAO/OCDE, 2010.** Climat sahélien : rétrospective et projections, *rapport*, 14P.
- Diallo, M. B. Sylla, F. Giorgi, A. T. Gaye, M. Camara, 2012.** Multimodel GCM-RCM Ensemble-Based Projections of Temperature and Precipitation over West Africa for the Early

21st Century. *International Journal of Geophysics Volume 2012, Article ID 972896, doi: 10.1155/2012/972896, 19 pages.*

**Doll P. and J. Zhang 2010.** Impact of climate change on freshwater ecosystems: a global-scale analysis of ecologically relevant river flow alterations, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14, 783-799.

**Donohue, R.J., Mc Vicar, T.R., Roderick, M.L., 2010.** Assessing the ability of potential evaporation formulations to capture the dynamics in evaporative demand within a changing climate. *Journal of Hydrology*, 386, 186–197.

**ECC:** Eaux et changement climatique, *note de recherche*, 2014. ,60p

**Espinoza S. V. M., 2017.** airGR un package de modélisation hydrologique à améliorer ? Evaluation sur un large échantillon de bassins versants, *mémoire Université Pierre et Marie Curie* 51p.

**Faty B., 2014.** Impact du changement climatique sur les ressources en eau de surface du bassin versant de la Falémé, *mémoire, Centre Régional AGRHYMET*, 72P.

**Faye C., Sow A. A., 2014.** Analyse de la variabilité des ressources en eau dans le bassin de la Falémé par modélisation hydrologique, 14, 12, 9p.

**Faye C., 2016.** Variabilité et tendance observées sur les débits moyens mensuels, saisonniers et annuels dans le bassin de la Falémé (Sénégal), *Hydrological Sciences Journal. May 2014* Doi: 10.1080/02626667.2014.990967, 13p

<https://www.researchgate.net/publication/277932378>

For computing crop water requirements, FAO Irrigation and drainage paper. *FAO, Rome, Italy.*

**GIEC, 2007.** Climate Change 2007: An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pachauri R. K. and A. Reisinger (Editors), 52 p.

**GIEC, 2014.** Changements climatiques, *Rapport de synthèse*, 180p

**Haddadi I., 2016.** Les tests statistiques de significativité appliqués à l'hydrologie, *mémoire* 53p.

**Jobard, I. Chopin, F., Berges, J.C. and R. Roca. 2011.** An intercomparison of 10-day satellite precipitation products during West African monsoon. *Int. J. Remote Sens*, 32, 2353-2376.

**Khediri W. B., Drogue G., 2015.** Quel est l'impact de l'échantillonnage spatial des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle sur le pouvoir prédictif d'un modèle hydrologique empirique ?, *climatologie*, vol.12 (2015), 6p.

**Klemeš V. 1986.** Operational testing of hydrological simulation models, *Hydrological Sciences Journal*, 31:1, 13-24, DOI: 10.1080/02626668609491024

**Madsen H. 2000.** Automatic calibration of a conceptual rainfall–runoff model using multiple objectives, *Journal of Hydrology* (235) 276–288.

**Mahamadou Y., Saley M. M., Fodé M. 2018.** Analyse multimodèle régional de climat des précipitations et de température au Niger. *Météorologie-n°101*, 12P.

**Mbaye, M.L., Hagemann, S., Haensler, A., Stacke, T., Gaye, A.T. and Afouda, A., 2015a:** Assessment of Climate Change Impact on Water Resources in the Upper Senegal Basin (West Africa). *American Journal of Climate Change*, 4, 77-93.

<http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2015.41008>

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

<https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.4478>

**Nadia D. M., 2016.** Etude hydrologique et hydrogéologique du bassin versant de l'Oued Saida, mémoire, 124p.

**Observatoire défense et climat, 2017.** Données scientifiques et scénarios climatiques, *Rapport d'étude n°2*, 14p.

**P.-A. Michelangeli, M.Vrac, H. Loukos, 2009.** Probabilistic downscaling approaches: 'Application to wind cumulative distribution functions'. *Geophysical Research Letters*, 36, L11708, doi: 10.1029/2009GL038401,

**Perrin C., Claude M., Vazken A., 2007.** Modèle hydrologiques du génie rural (GR), *Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés*, 16p.

**Roy J., 2011.** Etude d'impact de l'optimisation des règles de gestion en condition de changements climatiques sur le système hydrique de la rivière Manicouagan, *mémoire école de technologie supérieure université du Québec*, 166p.

**Tall M., Sylla M. B., Diallo I., Pal J. S., Faye A. Mbaye M. L., Gaye A. T., 2016.** Projected impact of climate change in the hydroclimatology of Senegal with a focus over the Lake of Guiers for the twenty-first century, *Theoretical and Applied Climatology*, 13P,

DOI, 1P10.1007/s00704-016-1805-y

**Velázquez J. A., Troin M. 2015.** Evaluating the uncertainty of the impacts of climate change on the hydrology of two Mexican catchments. *Wilks, D. S. (2006). Statistical Methods*

**Vrac M. et al., 2012.** Dynamical and statistical downscaling of the French Mediterranean climate: uncertainty assessment. *Nat.Hazards Earth Syst.Sci.*, 12, 2769-2784, 2012, 4p.

**Webographie:**

<http://www.drias-climat.fr/accompagnement/section/128>: 17 mars 2019