

Université Gaston BERGER de Saint-Louis (Sénégal)
UFR des Lettres et Sciences Humaines (UFR-LSH)
Section de géographie
Parcours : Écosystèmes et Environnement
Mention : Hydrologie



MEMOIRE DE MASTER

Régionalisation des paramètres du modèle GR2M dans le bassin de la Gambie

Mémoire de Master
Soutenu publiquement par
Tegue Diagne NDIAYE
Le 03 Mars 2022

Devant le jury composé de :

Boubou Aldiouma SY	Professeur Titulaire	UFR LSH/UGB	Président
Lamine DIOP	Maitre-assistant	UFR S2ATA/UGB	Examineur
Adama SARR	Assistant	UFR LSH/UGB	Examineur
Ansoumana BODIAN	Maitre de conférences	UFR LSH/UGB	Encadrant

Année académique : 2020/2021

Sommaire

Dédicace.....	iv
Remerciements.....	v
Résumé.....	vii
Liste des figures.....	ix
Liste des tableaux.....	xii
Sigles et Abréviations.....	xiii
Introduction générale.....	1
1. Contexte et problématique.....	1
2. Objectif.....	3
3. Plan du mémoire.....	3
Chapitre 1 : Localisation et caractérisation de la zone d'étude.....	5
1. Bassin versant de la Gambie.....	5
2. Stations hydrométriques du bassin de la Gambie.....	6
3. Caractéristiques physiographiques des sous bassins versants.....	11
3.1. Caractéristiques géométriques des sous bassins versants.....	11
3.2. Caractéristiques topographiques des sous bassins versants.....	13
3.3. Caractéristiques du réseau hydrographique des sous bassins	15
Conclusion partielle.....	17
Chapitre 2 : Outils, Données et Méthode.....	18
2.1. Outil : le modèle hydrologique GR2M.....	18
2.1.1 Choix du modèle	18
2.1.2 Description du modèle pluie débit mensuel GR2M.....	18
2.1.3. Paramètres optimisables du modèle GR2M.....	19
2.1.4. Optimisation des paramètres du modèle.....	20
2.1.5. Evaluation de la performance du modèle.....	20
2.1.6. Choix des périodes de calage.....	22
2.2. Données utilisées.....	22
2.2.1. Les données hydrologiques.....	23
2.2.2. Les données de pluie.....	23

2.2.3. Les données d'évapotranspiration.....	24
2.3. Méthodologie.....	25
2.3.1. Calcul de la pluie et de l'ETP moyenne des sous bassins versants.....	25
2.3.2. Calage-validation du modèle et simulation des débits.....	25
2.3.3. Régionalisation des paramètres du modèle GR2M.....	26
Chapitre 3 : Résultats.....	27
3.1. Analyse des pluies moyennes des sous bassins versants.....	27
3.1.1. Cycle saisonnier de la pluie des sous bassins versants	27
3.1.2. Pluie annuelle de 1970 à 2015 des sous bassins versants.....	27
3.1.3. La répartition spatiale de la pluie moyenne annuelle de 1970 à 2015 des sous bassins.....	28
3.2. Analyse de l'évapotranspiration moyenne des sous bassins versants.....	29
3.2.1. Cycle saisonnier de l'ETP des sous bassins versants.....	29
3.2.2. ETP moyenne annuelle des sous bassins de 1970 à 2015.....	30
3.2.3. Répartition spatiale de l'ETP moyenne annuelle des sous bassins de 1970 à 2015.....	31
3.3. Calage global du modèle GR2M.....	31
3.4. Simulation.....	32
3.5. Régionalisation des paramètres du modèle GR2M.....	34
3.5.1. Simulation de débits avec la moyenne arithmétique des paramètres optimisés et régionalisés.....	38
Conclusion partielle.....	42
Conclusion générale.....	43
Bibliographie.....	44

Dédicace

Je dédie ce mémoire à titre posthume à feu **Souleymane Chakourane Jules DIOUF**, coordonnateur national de Climate Action Group (CAG). Tu m'avais promis d'être présent le jour de ma soutenance. Mais, hélas !!! On ne prend jamais de rendez-vous avec le destin....

Que le bon dieu t'accueille dans son paradis céleste.

Remerciements

J'exprime toute ma gratitude au Professeur Ansoumana BODIAN qui a assuré l'orientation et l'encadrement scientifique de ce mémoire. Vous n'avez ménagé aucun effort pour nous mettre dans de bonnes conditions de travail de par votre disponibilité, votre rigueur et votre sociabilité.

Je remercie le Dr Papa Malick NDIAYE, qui a accepté de m'aider dans toutes les étapes de mon travail. Merci pour le temps que vous avez accordé malgré votre programme chargé. Également merci de m'avoir permis de bénéficier de votre expérience.

Mes remerciements vont également à l'endroit de M. Laurent Pascal Malang DIEME, doctorant du Laboratoire Leïdi, « super ance », votre rigueur, votre sens du travail d'équipe et votre esprit d'innovation m'ont bien marqué. Merci de m'avoir soutenu depuis la rédaction du projet de recherche.

A M. Omar GOUDIABY, doctorant du Laboratoire Leïdi, je vous remercie de par votre disponibilité.

Mes sincères remerciements vont à l'endroit de Mor Ndiaye de la Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta et de la Falémé (SAED), le grand programmeur, je te remercie de ta disponibilité et de ta gentillesse. J'admire tes qualités humaines et tu es devenu un frère de par ta loyauté et ta sincérité dans l'acte.

A M. Espoir GAGLO de l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD) merci de votre générosité intellectuelle.

Je remercie les membres du jury qui ont accepté d'apporter un regard critique et constructif à ce travail. Je veux nommer M. Lamine DIOP de l'UFR des Sciences Appliquées et Techniques (SAT) de l'UGB, M. Boubou Aldiouma SY de l'UFR des Lettres et Sciences Humaines (LSH) de l'UGB et M. Adama SARR de l'UFR des Lettres et Sciences Humaines (LSH) de l'UGB, qui ont significativement contribué à l'amélioration du document final.

Je remercie également M. Boubacar CISSE de l'Office des Lac et Cours d'eau (OLAC), M. Konaté de l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie (OMVG), M. Latsouck DIOUF de l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS), M. DIONG du centre de documentation et des archives de l'Organisation pour la Mise en Valeur du Sénégal (CDA-OMVS), M. Koné de l'école Prytanée Militaire de Saint-Louis et Dr Cheikh FAYE de l'Université Assane SECK de Ziguinchor.

Enfin, je tiens à remercier tout, spécialement, ma bien-aimé mère Fatou SINE pour son amour, son soutien, ses conseils et son encouragement inconditionnel. « sama yaye » comme j'aime t'appeler affectueusement que le bon Dieu t'attribue une longue vie. Tu es ma grande force et ma source de motivation. Je remercie aussi mes frères et sœurs Ndella, Ndeye Khady, Mamy, Vieux Rawane, Boubou, Samba et les jumeaux (Ousseynou, Assane) pour votre amour et votre soutien tout au long de mon cursus scolaire. Merci également à mes tontons Amadou Anta et Babacar Samb de m'avoir bien aidé dans mes études. A ma nièce Aïssatou Diaw et mon neveu Mouhamed Diaw, je vous aime.

Résumé

En Afrique de l'Ouest, un suivi continu des ressources en eau des bassins versants se fait de plus en plus rare et les chroniques de données disponibles sont lacunaires en dépit des efforts accomplis par les services nationaux qui gèrent les réseaux de suivi hydrométriques. En effet, les services hydrologiques nationaux ont des difficultés à assurer un suivi adéquat des cours d'eau en raison d'un manque de ressources financières et humaines. La connaissance de la ressource est donc limitée par l'inaccessibilité des données hydro-climatiques observées, leur caractère lacunaire et la faible densité spatiale des stations de mesure. Ainsi, l'objectif de cette présente étude est d'estimer les apports en eau dans le bassin versant du fleuve Gambie via une régionalisation des paramètres du modèle hydrologique GR2M. La méthode de régionalisation s'appuie dans un premier temps sur la connaissance des jeux de paramètres sur les bassins dont on dispose des données hydrologiques, pour, dans un second temps prévoir les jeux de paramètres sur des bassins non jaugés. La démarche méthodologique adoptée comporte trois phases : (i) calcul de la pluie moyenne mensuelle et de l'ETP moyenne mensuelle (données d'entrée du modèle GR2M) des sous bassins versants par la méthode distance inverse pondérée au carré; (ii) évaluation de la performance du modèle et la détermination des paramètres X_1 et X_2 pour les sous bassins dont les chroniques de débit des stations hydrométriques sont au moins de cinq années puis simuler les débits avec les paramètres optimisés X_1 et X_2 ; (iii) interpolation des paramètres X_1 et X_2 enfin de générer de nouveaux paramètres régionalisés X'_1 et X'_2 pour les dix-huit bassins puis simuler les débits avec les paramètres X'_1 et X'_2 ensuite comparer les débits simulés en phase (ii) et (iii) avec KGE et PBIAIS comme critère d'évaluation du modèle GR2M. Les résultats obtenus montrent que la démarche de régionalisation ne donne pas des résultats concluants ce qui limite la connaissance des ressources en eau des bassins versants non jaugés par cette approche.

Mots clés: Bassin de la Gambie, GR2M, Modélisation pluie-débit, Régionalisation, Simulation

Liste des figures

Figure 1 : Localisation du bassin versant de la Gambie.....	4
Figure 2: Répartition spatiale des stations hydrométriques	7
Figure 3: Répartition spatiale des sous bassins versants	8
Figure 4 : Distribution des altitudes au niveau des différents sous bassins versants de la Gambie.....	9
Figure 5 : Profil topographique des sous bassins versants.....	10
Figure 6 : Schéma conceptuel du modèle GR2M décrivant les entrées, les variables internes, les réservoirs et paramètres associés	19
Figure 7: Inventaire des données de débits des 18 stations hydrométriques retenues	23
Figure 8: Inventaire des données de débits des 18 stations hydrométriques retenues.....	24
Figure 9 : Pluie moyenne annuelle des sous bassins	27
Figure 10 : Cycle saisonnier de la pluie des sous bassins	28
Figure 11 : Répartition spatiale de la précipitation moyenne annuelle de la Gambie.....	29
Figure 12 : ETP moyenne annuelle des sous bassins de 1970 à 2015.....	30
Figure 13 : l'évolution saisonnière de l'ETP des sous bassins	30
Figure 14 : Répartition spatiale de l'ETP moyenne annuelle de la Gambie	31
Figure 15 : Hydrogrammes des débits observés et simulés et la variation saisonnière des débits observés et simulés des bassins de Gouloumbou, de Kédougou, de Mako et de Missira Gounas	33
Figure 16 : Hydrogramme des débits observés et simulés (a) et la variation saisonnière des débits observés et simulés (b) du bassin de Simenti.....	34
Figure 17 : Hydrogrammes des débits observés et simulés avec les paramètres régionalisés des bassins de Gouloumbou, de Kédougou, de Mako, de Simenti, de Wassadou amont et de Wassadou aval	36

Figure 18 : Hydrogrammes des débits observés et simulés avec les paramètres ($X''1$ et $X''2$) des bassins de Gouloumbou, de Mako, de Missira Gounas, de Simenti et de Wassadou aval.....	37
Figure 19 : Hydrogrammes des débits observés et simulés avec les paramètres ($X''1$ et $X''2$) des bassins de Gouloumbou, de Mako, de Missira Gounas, de Simenti et de Wassadou aval.....	40
Figure 20 : Comparaison des débits et leur variation saisonnière	41

Liste des tableaux

Tableau 1 : Inventaire des données disponibles sur les 18 stations du bassin de la Gambie....	6
Tableau 2 : Formulation mathématique des paramètres morphométriques d'un bassin versant.....	12
Tableau 3 : Valeurs des paramètres morphométriques des sous bassins versants.....	12
Tableau 4 : Formulation mathématique des paramètres topographiques d'un bassin versant...	14
Tableau 5 : Valeurs des paramètres topographiques des sous bassins versants.....	14
Tableau 6 : Classification du relief selon ORSTOM.....	15
Tableau 7 : Classification des sous bassins selon ORSTOM.....	15
Tableau 8 : Formulation mathématique des paramètres du réseau hydrographique d'un bassin versant.....	16
Tableau 9 : Valeurs des paramètres du réseau hydrographique des sous bassins versants.....	16
Tableau 10 : Critères d'évaluation du modèle GR2M.....	22
Tableau 11 : Valeurs des paramètres optimisés X_1 et X_2 des sous bassins et des critères numériques.....	32
Tableau 12 : Paramètres optimisés (X_1 et X_2) et régionalisés (X'_1 et X'_2).....	35
Tableau 13 : Valeurs de KGE et du PBIAIS en comparant des débits observés et simulés avec les paramètres régionalisés.....	37
Tableau 14 : Formulation mathématique des paramètres X''_1 et X''_2	38
Tableau 15 : Valeurs des paramètres X''_1 et X''_2 des sous bassins.....	39
Tableau 16 : Formulation mathématique des paramètres X'''_1 et X'''_2	39
Tableau 17 : Valeurs des paramètres X'''_1 et X'''_2 des sous bassins.....	39

Sigles et Abréviations

AISH : Association International des Sciences Hydrologiques

CEDEAO : Communauté Economique des Etats de l’Afrique de l’Ouest

CRU : Climate Research Unit

DGPRES : Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau

ETP : Evapotranspiration Potentielle

GR2M : Modèle génie rural pluie-débit mensuel a 2 paramètres

IRD : Institut de Recherche pour le Développement

IRSTEA : Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture

OMVG : Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie

OMVS : Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal

ORSTOM : Office de Recherche Scientifique et Techniques Outre-Mer

PAS-PNA : Projet d’Appui Scientifique aux Processus de Plans Nationaux d’Adaptation

PGES : Plan de Gestion Environnementale et Sociale

PUB : Predictions in Ungauged Basins

SAED : Société d’Aménagement et d’Exploitation des terres du Delta et de la Falémé

UGB : Université Gaston Berger

Introduction générale

1. Contexte et problématique

A toutes les échelles territoriales, une bonne gestion des ressources en eau est une nécessité (Bodian, 2012). Ce constat général prend encore plus de sens dans les régions Ouest africaines, où la pression sur les ressources en eau s'accroît, notamment par l'accroissement de la demande, la réalisation de nombreux projets de grands barrages, et la poursuite de la détérioration des conditions hydro-climatiques (Niasse, 2004). Face à de tel contexte, il est important que la région renforce sa capacité de prévention et donc de promotion de la concertation, surtout autour de la gestion des cours d'eau. Car, le continent africain est couvert par 63 bassins versants transfrontaliers (Niasse, 2004). Et, 25 d'entre eux (40 %) se situent en partie ou en totalité en Afrique de l'Ouest (Niasse, 2004). Ainsi, les principaux cours d'eau transfrontaliers de la région sont dotés d'organisations de bassin : Autorité du Bassin du fleuve Niger (ABN), Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS), Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie (OMVG), Commission du Bassin du Lac Tchad (CBLT). Etant donné que, les cours d'eau transfrontaliers sont des milieux susceptibles de générer des conflits ou des tensions autour de la ressource.

Cependant, on ne peut bien gérer une ressource que quand elle est connue (Bodian, 2011). Or, la connaissance de la ressource hydrique est fragmentée dans les bassins versants Ouest africains à l'exception le bassin versant de la Gambie. En effet, les services hydrologiques nationaux ont des difficultés à assurer un suivi adéquat des cours d'eau en raison d'un manque de ressources financières et humaines (Bodian et al, 2016).

Généralement, ce suivi est assuré par un réseau de stations hydrométriques qui constitue la source principale d'information sur les débits à l'échelle du bassin versant (Joseph, 2007). Concernant le bassin versant de la Gambie, le fleuve est jadis suivi à travers un réseau de stations hydrologiques dont la station de référence est Kédougou. Malheureusement celle-ci est endommagée durant la crue de 2013. Depuis cette date, la station de référence sur le fleuve Gambie est Mako. Cette station se situe sur le cours principal du fleuve (Faye, 2019). D'autres stations secondaires sont suivies : Simenti, Niokolo, Gouloumbou, etc. Ce suivi hydrologique est assuré par des lecteurs qui relèvent les hauteurs d'eau à 08 h, 13 h et 18 h. Les données ainsi collectées sont transmises à la brigade hydrologique de Tambacounda puis acheminées à la

DGPRES à Dakar. Ces données permettent de déterminer le régime hydrologique du fleuve Gambie (DGPRES, 2017).

Cependant, ces dernières décennies, les pays qui se partagent le bassin de la Gambie (Guinée, Sénégal et Gambie) ont des difficultés à assurer correctement la gestion optimale des ressources en eau du fleuve en raison de l'insuffisance de la connaissance quantitative des apports (dégradation de certaines stations hydrométriques, l'insuffisance du réseau de mesure, affluents non contrôlés, suivi épisodique) (OMVG, 2008). Les chroniques de débit disponibles pour certains affluents sont donc lacunaires, discontinues, de courte durée et, en conséquence, difficilement exploitables pour une analyse hydrologique fiable.

Dans un tel contexte, qu'une mission d'installation de trois stations hydrométriques automatiques sur le bassin de Kédougou, de Mako et de Diaguiri, est organisée pour renforcer le système de suivi à l'échelle du bassin de la Gambie (Faty, 2021).

Et pour une bonne connaissance de la ressource sur la Gambie, il faut une technique alternative pour combler les lacunes des chroniques de débit disponibles en vue d'assurer une bonne maîtrise des apports.

Cette technique alternative est la modélisation hydrologique. Car, la modélisation est un moyen d'extrapolation des mesures et d'estimation des variables que nous ne savons pas mesurer (Poncelet, 2016). Et l'usage du modèle pluie-débit constitue un palliatif pour les données hydrologiques lacunaires puisqu'il nous permet de compléter des séries de débit à partir des séries de pluie (Diémé, 2015).

Par ailleurs, les bassins pour lesquels la mesure du débit n'est pas disponible sur une période d'intérêt sont regroupés sous le terme de bassins "non jaugés". Pour ces bassins, le calage des modèles est impossible et il est nécessaire de trouver des stratégies de paramétrisation alternatives. Celles-ci sont regroupées sous le nom de régionalisation des paramètres (Poncelet, 2016).

La régionalisation a déjà fait l'objet de nombreux travaux (Roy, 2000 ; Tardif, 2005 ; Paturel et al., 2006 ; Abaza, 2010 ; Khalifa, 2011 ; Poncelet, 2016 ; Dufour, 2017). Ces études réalisées à l'échelle d'un bassin versant ainsi que les travaux de Predictions in Ungauged Basins (PUB) ou prédiction dans un bassin non jaugé et de l'Association International des Sciences Hydrologiques (AISH) mettent au point sur la compréhension de la régionalisation et les études faisables sur les bassins non jaugés. Ainsi, à notre connaissance, peu de travaux (Bodian, 2011 ;

Paturel et al., 2006...) portant sur la régionalisation ont été recensés à l'échelle des bassins versants Ouest-africains. Il y'a donc un intérêt de requérir aux méthodes de régionalisation et, d'autre part, s'appuie sur le développement hydro-informatique innovant sur le bassin versant de la Gambie.

2. Objectif

L'objectif de cette présente étude est d'estimer les apports en eau des affluents non suivis de la Gambie à travers une régionalisation des paramètres du modèle hydrologique GR2M. De façon spécifique, il s'agit de constituer une base de données hydrométriques dans le cadre d'une exploitation opérationnelle pour une gestion rationnelle des ressources en eau.

3. Plan du mémoire

Après une introduction générale qui met en exergue le contexte, la problématique de l'étude et les objectifs du mémoire, le document est structuré en quatre chapitres. Le chapitre 1 donne la localisation du bassin versant de la Gambie, la présentation des 18 stations hydrométriques retenues. Dans le chapitre 2 le modèle GR2M, les données hydroclimatiques utilisées ainsi que la méthodologie adoptée sont présentés. Le chapitre 3 présente les résultats obtenus.

Chapitre 1 : Localisation et caractérisation de la zone d'étude

1. Bassin versant de la Gambie

Le bassin versant de la Gambie se situe entre 11°22' et 14° 40' N, et 11°13' et 16° 42' W avec une superficie de 77054 km² et une longueur totale de 1180 km (Gomis, 2000). La Gambie prend sa source au lieu-dit Horè Dima à une douzaine de kilomètres au Nord de Labé en plein cœur du Fouta Djallon (Daget, 1960). La figure 1 donne la localisation du bassin versant de la Gambie.

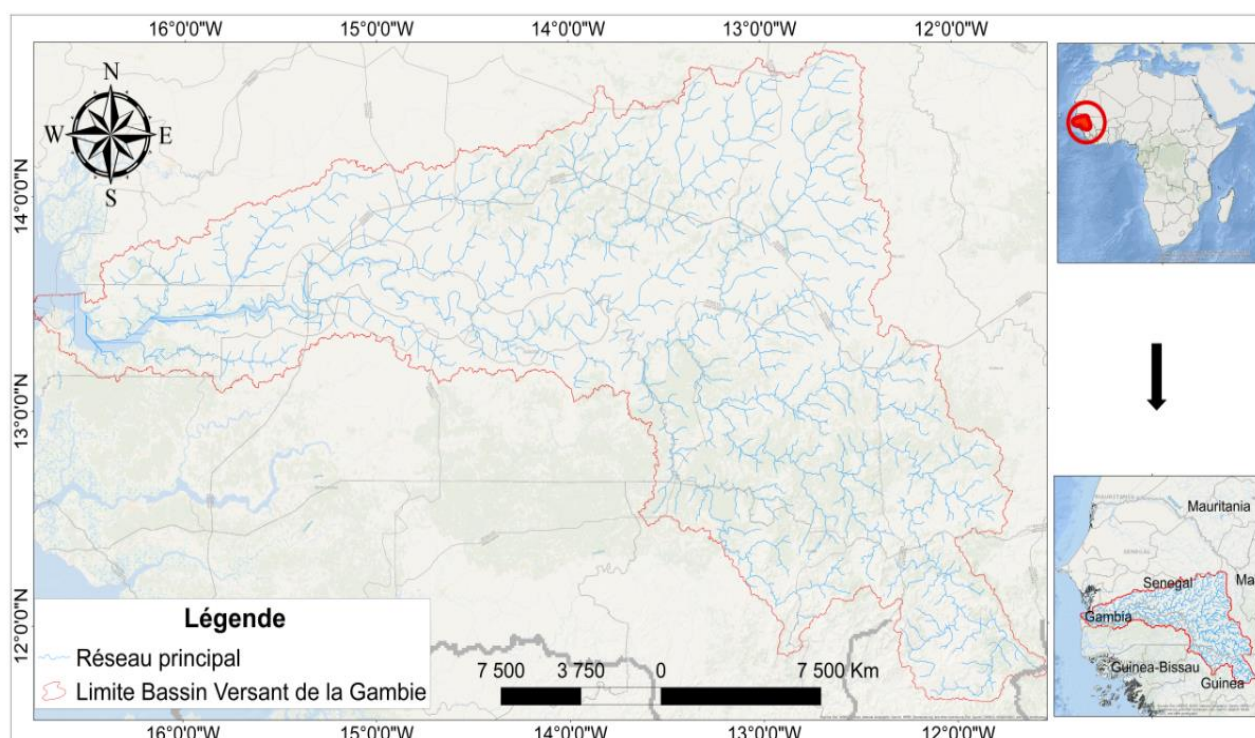


Figure1 : Localisation du bassin versant de la Gambie

Le bassin de la Gambie est divisé en deux grandes parties : la partie amont ou "bassin continental" avec une orientation générale SE-NW qui s'étend de l'amont (les hautes terres du Fouta Djallon) jusqu'à Gouloumbou au Sénégal (Lamagat, 1990) et la partie aval ou "bassin (ou bief) maritime" avec une orientation E-W de Gouloumbou jusqu'à l'embouchure.

La Gambie dans son bief continental, est un fleuve alimenté essentiellement par les précipitations. Il reçoit de nombreux affluents sur sa rive gauche (Diaguiri, Niokolo-Koba, Niériko, Sandougou...) et sur sa rive droite (Thiokoye, Diarha, Koulountou... (Faye et Mendy, 2018).

Dans son bief maritime, le secteur estuarien, de longueur 520 km, correspond approximativement à la partie gambienne du milieu aval. L'estuaire qui s'élargit progressivement depuis la frontière sénégal-gambienne jusqu'à Banjul, est soumis au niveau de la mer et à l'influence de la marée, et constitue un axe navigable sur toute sa longueur. Il peut schématiquement être découpé en trois secteurs (estuaire supérieur, estuaire moyen, estuaire inférieur) en fonction des caractéristiques de salinité, d'amplitude de la marée et d'amplitude de la crue (Etude économique complémentaire pour l'aménagement hydroélectrique de Sambangalou sur le fleuve Gambie, 2011).

Dans sa globalité, le bassin versant de la Gambie est à cheval sur trois Etats: la Guinée (15,4% de la superficie du bassin), le Sénégal (70,9% de la superficie) dont il draine presque toute la région Tambacounda, une partie de la Haute Casamance et du Saloum méridional et la Gambie (13,7% de la superficie) dont il est l'épine dorsale et où il rejoint l'océan Atlantique (Ndiaye, 2015).

2. Stations hydrométriques du bassin de la Gambie

Les observations hydrométriques ont commencé dans le bassin de la Gambie en 1953 avec l'ouverture de la station de Gouloumbou. En 1968, l'ancienne Brigade Ecole de Tambacounda a repris le suivi avec l'appui de l'ORSTOM dans le cadre du projet REG 60 pour l'étude des bassins de la Gambie et de la Casamance. La convention n°48/CD/74/VI/A/12 passée entre le Ministère du Développement Rural et l'ORSTOM a permis l'extension du réseau. Le démarrage du programme AGRHYMET en 1973 a aidé le service à assurer la régularité et la qualité du suivi, avec la fourniture d'équipements et la formation du personnel (Ndiaye, 1995). Tout devait être mis en œuvre pour que les observations soient faites sans lacunes et que les mesures soient exécutées régulièrement. Et les défaillances en matériel ou en personnel doivent être évitées (Olivry, 1983). Cependant, compte tenu de la dégradation de certains équipements et le suivi non régulier des stations, les chroniques de données du bassin sont lacunaires (cf. tableau 1). C'est ainsi, en raison de l'objectif de cette présente étude, dix-huit stations hydrométriques ont finalement été retenues avec une densité variable en amont et en aval de Gouloumbou. Le tableau 1 donne l'inventaire des données des 18 stations hydrométriques. La figure 2 montre la répartition spatiale de ces 18 stations hydrométriques.

Tableau 1 : Inventaire des données disponibles dans le bassin de la Gambie

Nom de la station	Longitude en degré décimaux	Latitude en degré décimaux	Date Début	Date Fin	% lacunes	Durée (année)	Bassin	Rivière
Kédougou	-12,18	12,55	16/05/2000	16/08/2013	33	9	Gambie	Gambie
Koulountou au gue du pnnk	-13,48	12,78	01/05/1974	18/07/2003	77	7	Gambie	Koulountou
Sintian Koundara aval	-13,92	13,25	01/07/1972	01/01/1995	2	22	Gambie	Sima
Koussanar	-14,08	13,87	01/01/1973	30/09/2000	32	19	Gambie	Koussanar
Mako	-12,36	12,85	01/05/1970	11/11/2020	5	48	Gambie	Gambie
Missira Gounas	-13,62	13,20	07/07/1970	05/11/2000	18	25	Gambie	Koulountou
Diaguiri au pont routier	-12,09	12,63	14/06/1974	16/11/2020	20	37	Gambie	Diaguiri
Diarha au pont routier	-12,77	12,61	09/07/1972	14/04/2007	22	27	Gambie	Diarha
Gouloumbou	-13,72	13,47	02/07/1953	12/11/2020	75	17	Gambie	Gambie
Goumbeyel	-13,18	13,69	01/01/1977	28/10/2020	53	21	Gambie	Niéri ko
Niaoulé Tanou	-13,68	13,48	16/08/1970	29/08/1993	24	18	Gambie	Niaoulé
Niokolo Koba au pont routier	-12,72	13,07	20/06/1971	13/11/2020	36	32	Gambie	Niokolo Koba
Sili au pont routier	-12,27	12,54	02/07/1974	30/09/2011	38	23	Gambie	Siling
Simenti	-13,30	13,03	01/05/1970	12/10/2020	11	45	Gambie	Gambie
Sintiou Malem	-13,91	13,81	16/06/1973	10/09/2017	29	32	Gambie	Sandougou
Tiokoye au pont routier	-12,54	12,57	23/06/1971	31/08/2020	21	39	Gambie	Tiokoye
Wassadou- amont	-13,37	13,35	29/04/1970	18/04/2004	4	32	Gambie	Gambie
Wassadou- aval	-13,38	13,35	30/04/1970	09/07/2008	1	38	Gambie	Gambie

L'analyse du tableau 1 montre que la présence d'une station hydrométrique ne garantit pas l'existence effective d'une chronique d'observations. Les données hydrométriques à l'échelle du bassin versant de la Gambie sont incomplètes ou fragmentaires du fait des lacunes d'observation. Il n'est pas toujours possible de disposer des séries chronologiques de débits

continues et longues sur un même site, en dépit des efforts accomplis par les services nationaux (DGPPE, OMVG) gestionnaires des cours d'eau de la Gambie. Le suivi du régime hydrologique du fleuve Gambie n'est donc pas assuré convenablement. Cette insuffisance de la connaissance quantitative des apports (affluents non contrôlés, suivi épisodique) limite la connaissance de ressource hydrologique du bassin de la Gambie. Or, une bonne connaissance des régimes hydrologiques permet de mieux estimer les apports volumétriques annuels pour mieux dimensionner les ouvrages de stockage et déterminer leur potentiel à contribuer au développement et à la satisfaction des besoins des populations. Et une position géographique idéale constitue un atout pour les stations hydrométriques dans leur fonction de quantifier de débit des cours d'eau.

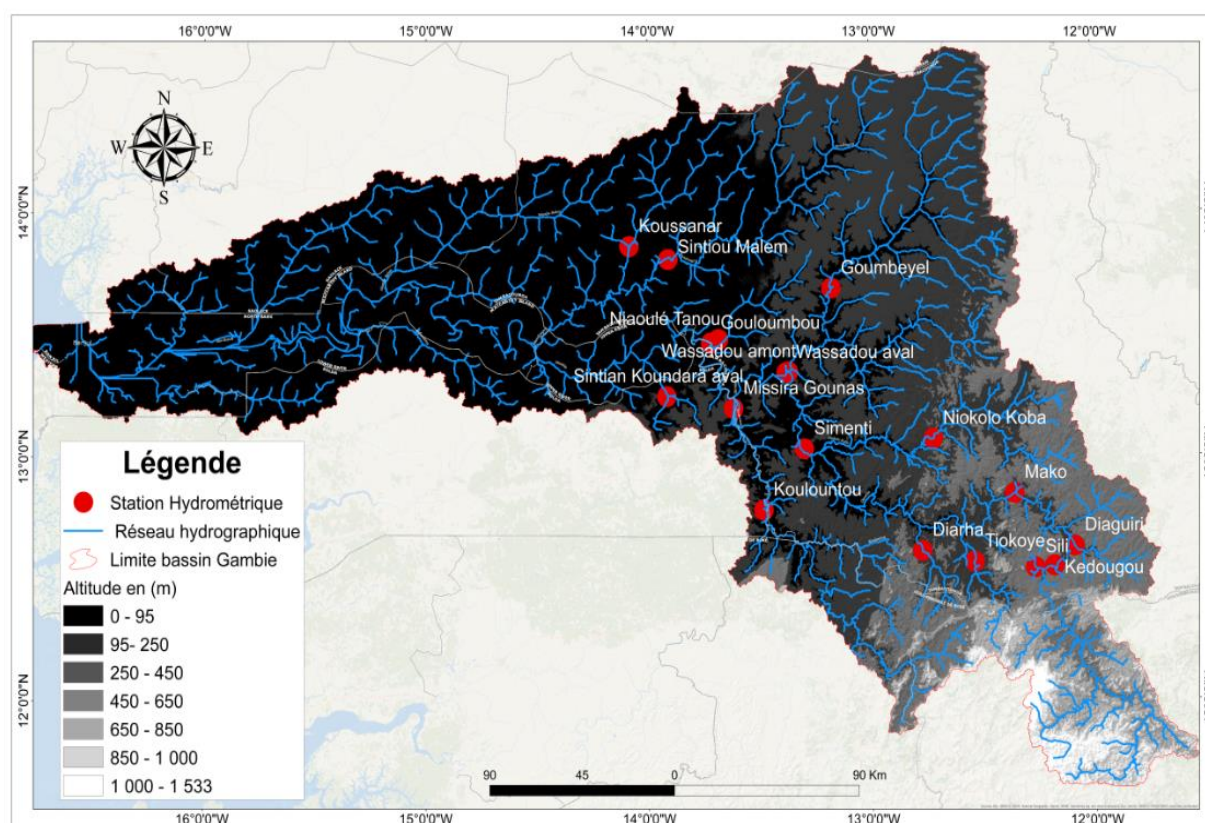


Figure 2: Répartition spatiale des stations hydrométriques

Le réseau des stations retenues permettant de couvrir le bief continental du bassin de la Gambie est plus dense aux alentours de Gouloumbou où les influences marines dominent les influences fluviales en période de vives eaux (Chaperon et Guinguen, 1974). En particulier, ces stations hydrométriques assurant la fonction de quantifier le débit des cours d'eau sont aussi des points de référence afin de délimiter les bassins versants qu'ils contrôlent. Car, selon Martin et al. (2004), le réseau des stations hydrométriques détermine un ensemble de bassins versants

emboîtés. En effet, 18 bassins versants (sous bassin versant) sont délimités à partir de ces stations. Pour mener à bien cette démarche, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) provenant des images SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), d'une résolution de 30*30m, a été utilisé pour extraire celui du bassin versant de la Gambie puis délimité ce dernier en 18 sous bassins à partir des stations hydrométriques retenues avec le logiciel Arcgis. La figure 3 donne la répartition spatiale des sous bassins délimités.

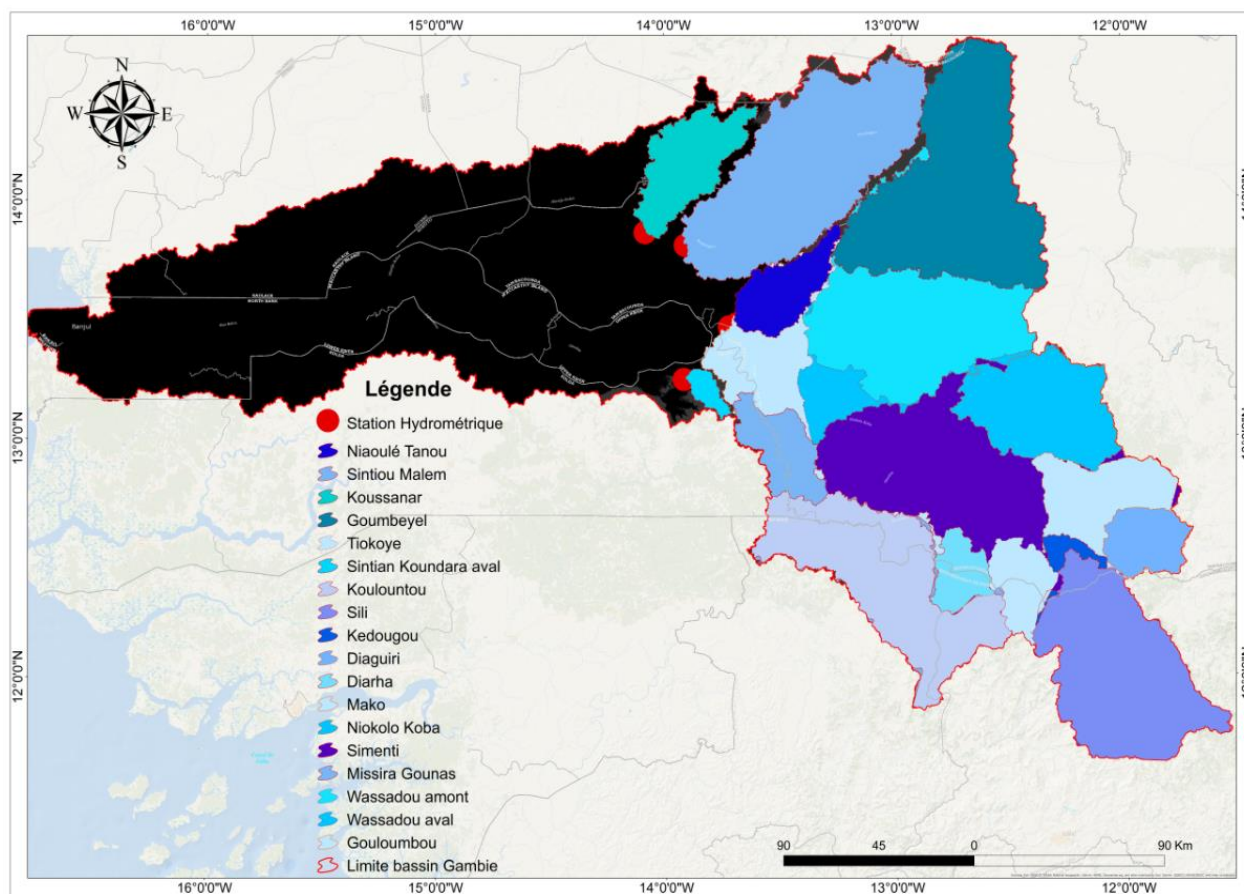


Figure 3: Répartition spatiale des sous bassins versants

Le logiciel Arcgis avec son extension Arcswat et ses outils ont permis de réaliser la délimitation ainsi que l'extraction de certains paramètres des bassins délimités (sous bassins) tels que la superficie, le périmètre, la dénivelée, la longueur des cours d'eau. Ces sous bassins délimités, étant dans une même entité géographique, sont les objets d'étude afin de comprendre le comportement hydrologique du bassin versant de la Gambie. La figure 4 montre la distribution des altitudes au niveau des sous bassins versants.

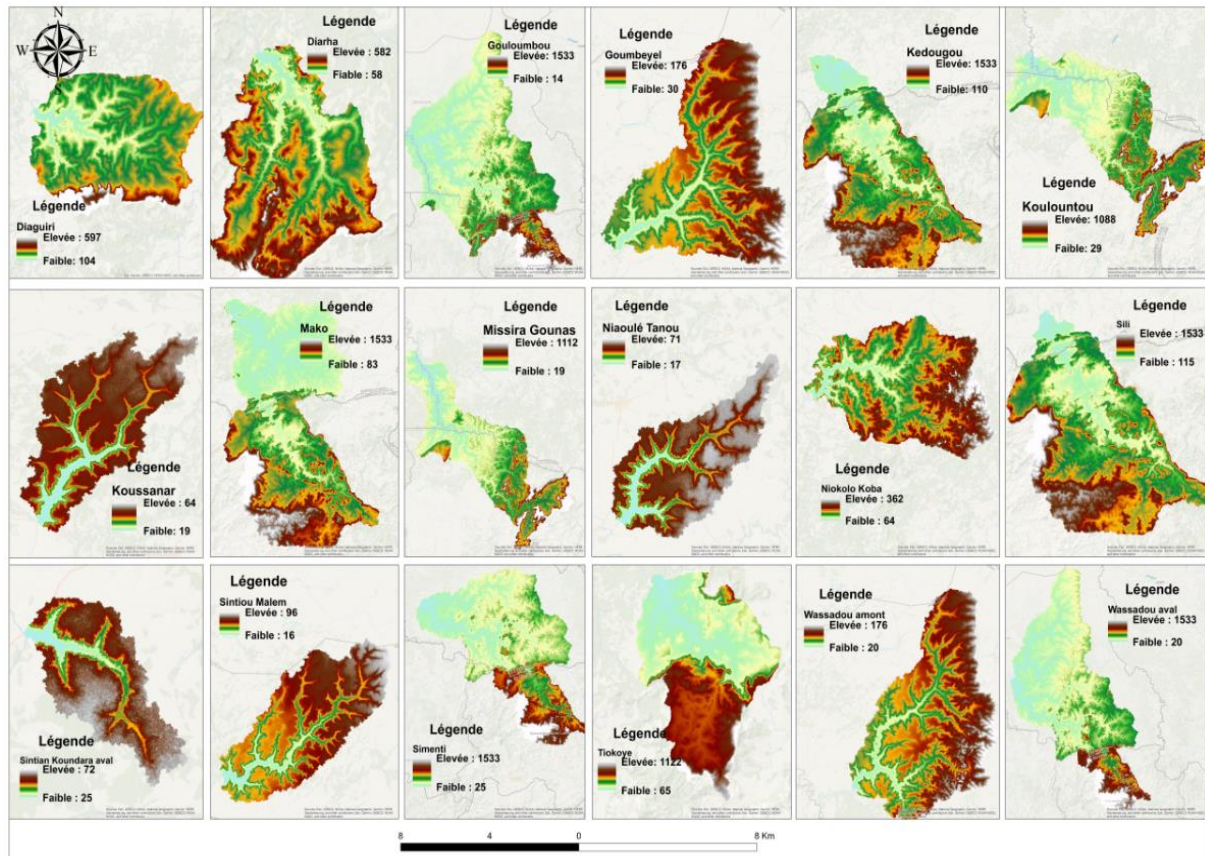


Figure 4 : Distribution des altitudes au niveau des différents sous bassins versants de la Gambie

Selon Chaperon et Guinguen (1974), le bassin versant de la Gambie est divisé en 4 zones de relief : le haut bassin (supérieur à 600m), la seconde zone (600 à 250m), le bassin moyen (100 à 250m) et le bassin inférieur (0 à 50m). Il est donc nécessaire de répartir les sous bassins versants en tranches d'altitude afin de dégager les différents paramètres du relief (Laabidi, 2016). De la figure 4, les sous bassins se trouvent dans des tranches d'altitude différentes. Et d'après la figure 2, le bassin de la Gambie dans son bief continental, l'altitude décroît progressivement vers Gouloumbou. Or, l'altitude influence les caractères du climat et le fonctionnement hydrologique du bassin versant (El Khalki, 2015). Ainsi, pour mieux comprendre le fonctionnement hydrologique des sous bassins il faut connaître la configuration de leur relief. La figure 5 ci-dessous regroupe le profil topographique des sous bassins.

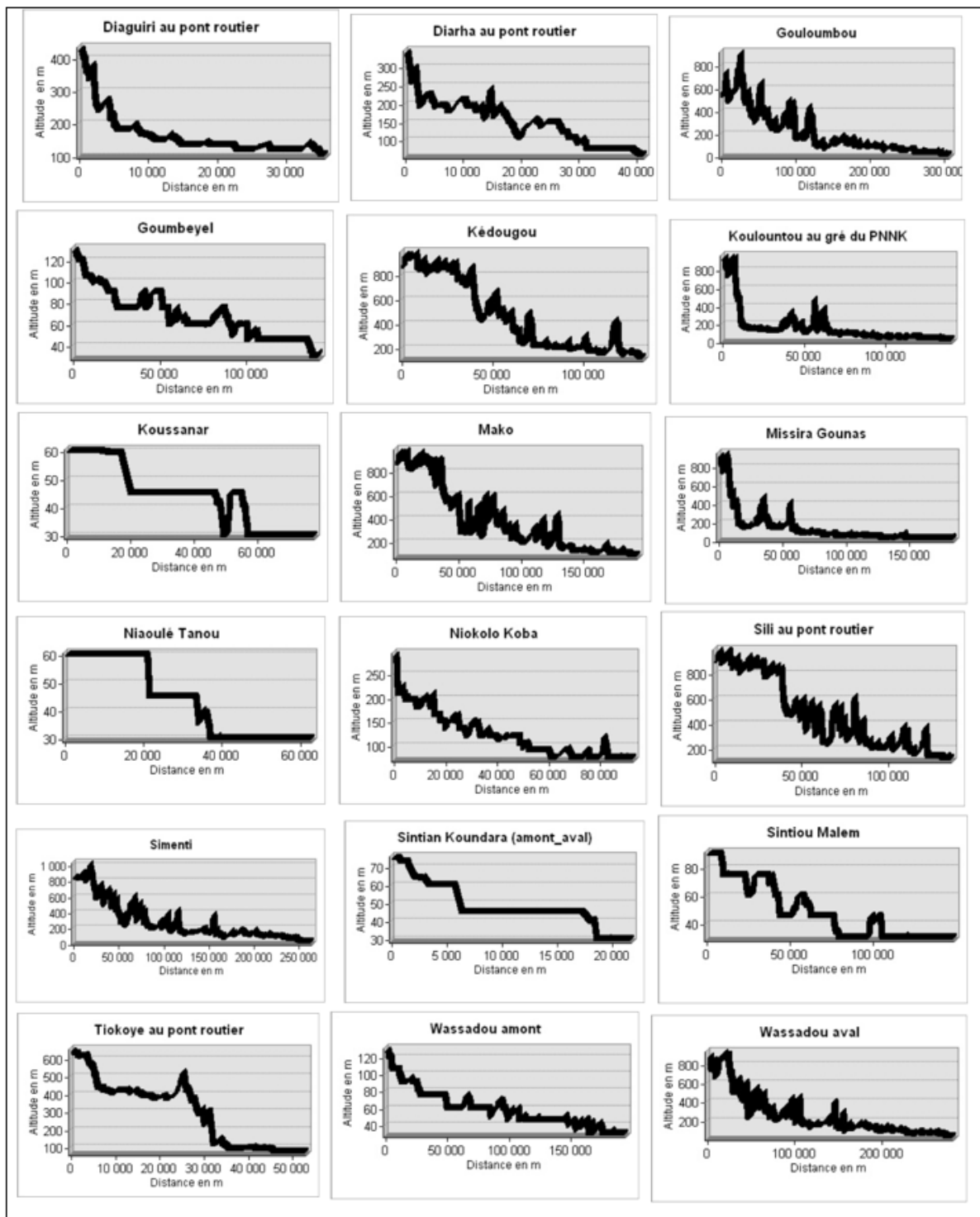


Figure 5 : Profil topographique des sous bassins versants

La figure 5 illustre la configuration du relief des sous bassins pour une bonne compréhension du déclenchement et de la propagation des écoulements de crue des bassins. Car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin versant (Laabidi et al., 2016).

3. Caractéristiques physiographiques des sous bassins versants

La transformation de la pluie en écoulement (aussi bien superficiel que souterrain) passe par l'intermédiaire du bassin versant. Ce dernier est défini comme "la région qui reçoit les précipitations et, suite aux processus hydrologiques entraînant pertes et retards, les achemine jusqu'à un exutoire" (OMM, 1996). La réponse hydrologique d'un bassin dépend donc des conditions climatiques auxquelles il est soumis mais aussi des caractéristiques physiques qui lui sont propres : géologie, morphologie, couverture végétale etc. (Kisangala muke, 2008). Par conséquent, chaque bassin versant est un système complexe, hétérogène et unique (Beven, 2000). Alors pour comprendre le fonctionnement hydrologique du bassin de la Gambie, il faut déterminer les paramètres physiographiques des bassins versant délimités (sous bassins versants). Et la détermination des paramètres physiographiques (paramètres de forme, de relief d'un bassin versant et la typologie d'un réseau hydrographique) est devenue facile avec des outils tels que le système d'information géographique (SIG) et la télédétection (CIAT, 2011). Et l'usage du logiciel Arcgis et le Modèle Numérique de Terrain (MNT) du bassin de la Gambie, dans cette présent étude, ont permis d'extraire certains paramètres des sous bassins notamment la superficie (S), le périmètre (P), l'altitude maximale (Hmax), l'altitude minimale, la longueur du cours d'eau principal (Lcp), le nombre de cours d'eau élémentaire (ni) de chaque sous bassin, la longueur des cours d'eau élémentaire (Lni). Ces paramètres extraits sont utilisés afin de déterminer d'autres paramètres physiographiques tels que les paramètres géométriques, topographiques et du réseau hydrographique avec le logiciel Microsoft Excel. Les formulations mathématiques des paramètres géométriques, topographiques et du réseau hydrographique d'un bassin versant sont regroupées dans les tableaux 2, 4 et 6. Les tableaux 3, 5 et 7 regroupent respectivement les valeurs des paramètres géométriques, topographiques et du réseau hydrographique des sous bassins.

3.1. Caractéristiques géométriques (morphologiques) des sous bassins

Pour évaluer la façon dont un sous bassin réagit par rapport à l'écoulement et sa contribution à l'hydrologie du bassin, les paramètres morphologiques sont privilégiés (Faye, 2014). Les classiques de l'hydrologie proposent, pour caractériser la géométrie d'un bassin versant, différents indices de forme (K_c , I_H ...) destinés à comparer les bassins voire à estimer certaines de leurs caractéristiques hydrologiques (Bendjoudi & Hubert, 2002). Cependant, les indices (d'allongement ou d'élongation) abordent la forme du bassin versant dans une dimension plane

qui ne prend pas en compte le dynamisme imposé par le relief. De nouveaux indices morphosynthétiques sont donc proposés pour mesurer l'influence de la morphologie sur la dynamique de la réponse hydrologique en tout point de l'espace (Douvinet et al., 2022). Néanmoins, dans cette étude les indices sont utilisés. Car, ils sont devenus des outils de référence et faciles à calculer (Gaucherel, 2003). Le tableau 2 regroupe la formulation des paramètres morphométriques d'un bassin et les valeurs en tableau 3.

Tableau 2: Formulation mathématique des paramètres morphométriques d'un bassin versant

Paramètres morphométriques		Sigles	Formules	Unité de mesure
Indice de compacité de Gravélius		Kc	$(0,28 \cdot P)/S^{0,5}$	~
Rectangle équivalent	Longueur équivalente	L	$((Kc \cdot S^{0,5})/1,12)(1+(1-(1,12/Kc)^2)^{0,5})$	Km ²
	Largeur équivalente	I	$((Kc \cdot S^{0,5})/1,12)(1-(1-(1,12/Kc)^2)^{0,5})$	Km ²
Circularité du bassin		Rc	$4\pi S/P^2$	~
Index de Forme		F	$F = I/L$	~
Indice de Horton		IH	$IH = S/Lcp^2$	~

Tableau 3 : Valeurs des paramètres morphométriques des sous bassins versants

Les sous bassins versants	Surface en km ²	Périmètre en km	Indice de compacité de Gravélius	Rectangle équivalent en km		Circularité du bassin	Index de Forme	Indice de Horton
				L	I			
Kédougou	5203	548	2,13	253	21	0,22	0,08	0,16
Diaguiri au pont routier	1038	210	1,83	94	11	0,30	0,12	0,51
Tiokoye au pont routier	949	231	2,10	107	9	0,22	0,08	0,26
Sili au pont routier	4978	527	2,09	243	20	0,23	0,08	0,17
Mako	8154	802	2,49	380	21	0,16	0,06	0,15
Diarha au pont routier	753	200	2,04	92	8	0,24	0,09	0,55
Niokolo Koba au pont routier	2938	425	2,20	198	15	0,20	0,08	0,22
Simenti	17963	1285	2,68	613	29	0,14	0,05	0,14

Koulountou au gré du PNNK	4738	693	2,82	332	14	0,12	0,04	0,12
Missira Gounas	6025	923	3,33	448	13	0,09	0,03	0,09
Wassadou amont	11292	996	2,62	474	24	0,14	0,05	0,24
Wassadou aval	30066	1869	3,02	901	33	0,11	0,04	0,17
Sintian Koundara aval	243	138	2,48	65	4	0,16	0,06	0,36
Goumbeyel	6507	822	2,85	395	16	0,12	0,04	0,33
Niaoulé Tanou	1211	343	2,76	164	7	0,13	0,04	0,36
Gouloumbou	39022	2087	2,96	1005	39	0,11	0,04	0,14
Sintiou Malem	6248	841	2,98	405	15	0,11	0,04	0,22
Koussanar	1797	516	3,41	251	7	0,08	0,03	0,44

L'indice de compacité de Gravélius est le plus communément utiliser pour caractériser la morphologie des bassins versants (Bendjoudi & Hubert, 2002). Alors, les valeurs de l'indice de compacité de Gravéluis varient de 1,83 pour le bassin de Diaguiri au pont routier à 3,41 pour le bassin de Koussanar (Tableau 3). Ces valeurs traduisent allongement des sous bassins selon Gravélius (1914). Ces résultats corroborent avec ceux de Faye (2014). En outre, la forme allongée est caractéristique d'un bassin engendrant des crues avec un débit de pointe marqué et un faible étalement de la montée et de la décrue (l'Helgoualc'H, 2016).

3.2. Caractéristiques topographiques des sous bassins

L'influence du relief sur l'écoulement est encore plus évidente et se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin versant (Laabidi et al., 2016). Le relief apparaît donc comme un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin versant (Faty, 2011). La formulation des paramètres topographiques d'un bassin est regroupée dans le tableau 4 et les valeurs des paramètres topographiques des sous bassins en tableau 5. Le tableau 6 donne la classification du relief selon ORSTOM. Le tableau 7 donne la classification du relief des sous bassins selon ORSTOM.

Tableau 4 : Formulation Mathématique des paramètres topographiques d'un bassin versant

Paramètres topographiques		Sigles	Formules	Unité de mesure
Altitude moyenne		Hmoy	$(H_{max}+H_{min})/2$	Mètre
Dénivelée		D	$H_{max}-H_{min}$	Mètre
Indices (pas d'unité de mesure)	Indice de pente global	Ig	$Ig = D/L$	~
	Indice de pente	Ip	$((1/0,8)*Ig)^{0,5}$	~
Dénivelée Spécifique		Ds	$Ds = Ig*S^{0,5}$	mètre
Temps de concentration selon Giandotti, (1937)		tc	$((4*S^{0,5})+(1,5Lcp))/(0,8((H_{moy}-H_{min})^{0,5}))$	Jour ou heure

Tableau 5 : Valeurs des paramètres topographiques des sous bassins versants

Les sous bassins versants	Altitude en m			Dénivelée en m	Indice de pente en m/km		Dénivelée spécifique en m	Temps de concentration (Giandotti)
	Hmax	Hmin	Hmoy		Ip	Ig		
Kédougou	1533	110	821,5	1423	2,65	5,61	404,95	1j 2h
Diaguiri au pont routier	597	104	350,5	493	2,56	5,25	169,06	15h 38min
Tiokoye au pont routier	1122	65	593,5	1057	3,52	9,92	305,47	11h 41min
Sili au pont routier	1533	115	824	1418	2,70	5,84	411,69	1 j 1h
Mako	1533	83	808	1450	2,19	3,82	345,00	1j 9h
Diarha au pont routier	582	58	320	524	2,67	5,71	156,64	12h 46min
Niokolo koba au pont routier	362	64	213	298	1,37	1,51	81,73	1j 16min
Simenti	1533	25	779	1508	1,75	2,46	329,60	2j 1h
Koulountou au gré du PNNK	1088	29	558,5	1059	2,00	3,19	219,40	1j 7h
Missira Gounas	1112	19	565,5	1093	1,75	2,44	189,35	1j 13h
Wassadou amont	176	20	98	156	0,64	0,33	34,96	4j 11h
Wassadou aval	1533	20	776,5	1513	1,45	1,68	291,13	2j 12h
Sintian Koundara (aval)	72	25	48,5	47	0,95	0,72	11,22	1j 2h
Goumbeyel	176	30	103	146	0,68	0,37	29,85	3j 6h
Niaoulé Tanou	71	17	44	54	0,64	0,33	11,45	2j 6h
Gouloubou	1533	14	773,5	1519	1,37	1,51	298,67	2j 23h
Sintiou Malem	96	16	56	80	0,50	0,20	15,61	4j 16h
Koussanar	64	19	41,5	45	0,47	0,18	7,60	2j 22h

Selon Thibault (2011), Le temps de concentration (T_c) correspond au temps de contribution d'un bassin versant pour obtenir le débit de point. Alors, les valeurs du temps de concentration (tableau 5) des sous bassins comprises entre [12h 46min ; 4j 16h] traduisent l'allongement et la faible pente du bassin de la Gambie. Par analogie, la possibilité pour qu'il ait une concentration de fortes pluies, génératrices d'écoulements torrentiels, est moindre, dans la Gambie.

Tableau 6 : Classification du relief selon ORSTOM

Classe	Type de relief	Ds
R1	Relief très faible	10
R2	Relief faible	10—25
R3	Relief assez faible	25—50
R4	Relief modéré	50—100
R5	Relief assez fort	100—250
R6	Relief fort	250—500
R7	Relief très fort	>500

Tableau 7 : Classification des sous bassins selon ORSTOM

Type de relief	Les sous bassins
Relief fort	Kédougou ; Tiokoye ; Sili ; Mako ; Simenti ; Wassadou aval ; Gouloumbou
Relief assez fort	Diaguiré ; Diarha ; Koulountou ; Missira Gounas
Relief modéré	Niokolo Koba
Relief assez faible	Wassadou amont ; Goumbeyel,
Relief faible	Sintian Koundara aval ; Niaoulé Tanou ; Sintiou Malem
Relief très faible	Koussanar

Pour Chaperon et Guiguen (1974), dans le bassin de la Gambie, plus de la moitié de la superficie (53.2 %) est située entre 0 et 100 m ; 25.4% entre 100 et 200 m ; seuls 21.4% se trouvent au-dessus de 200 m.

3.3. Caractéristiques du réseau hydrographique des sous bassins

Les pentes et la forme des talwegs ne constituent pas les seules conditions d'écoulement des eaux fluviales, le tracé en plan des cours d'eau a également des répercussions sur le régime. Si le réseau fluvial est ramifié, les débits absolus de la rivière augmenteront très rapidement. Car, les affluents apporteront au cours d'eau principal un appoint important (Fischer, 1930). Ainsi, selon Derruau, (1974), le chenal du bassin versant de la Gambie est majoritairement de type anastomosés avec quelques rares chenaux sinueux (bassin Kédougou, bassin Koulountou...). Le tableau 8 regroupe la formulation des paramètres du réseau hydrographique et les valeurs en tableau 9.

Tableau 8 : Formulation mathématique des paramètres du réseau hydrographique d'un bassin versant

Paramètres du réseau hydrographique	Sigles	Formules	Unité de mesure
Densité hydrographique en Km	F	$\sum n_i/S$	Km ⁻²
Densité de drainage en Km/Km ²	Dd	$\sum L_n i/S$	Km/Km ²
constante de stabilité du cours d'eau en km ² /km	C	1/Dd	Km ² /Km

Tableau 9: Les valeurs des paramètres du réseau hydrographique des sous bassins versants

Les sous bassins versants	Nombre de cours d'eau	Longueur du cours d'eau principal en Km	Longueur totale des cours d'eau en Km	Densité hydrographique en Km ⁻²	Densité de drainage en Km/Km ²	constante de stabilité du cours d'eau en km ² /km
Kédougou	27	178	460	0,01	0,09	11,31
Diaguiri au pont routier	37	45	185	0,04	0,18	5,61
Tiokoye au pont routier	31	61	170	0,03	0,18	5,58
Sili au pont routier	25	169	445	0,01	0,09	11,19
Mako	23	232	542	0,003	0,07	15,04
Diarha au pont routier	19	37	143	0,03	0,19	5,27
Niokolo Koba au pont routier	25	115	309	0,01	0,11	9,51
Simenti	17	361	904	0,001	0,05	19,87
Koulountou au gré du PNNK	25	196	431	0,01	0,09	10,99
Missira Gounas	27	257	475	0,004	0,08	12,68
Wassadou amont	33	218	606	0,003	0,05	18,63
Wassadou aval	25	416	1193	0,001	0,04	25,20
Sintian Koundara aval	13	26	48	0,05	0,20	5,06
Goumbeyel	25	140	469	0,004	0,07	13,87
Niaoulé Tanou	27	58	148	0,02	0,12	8,18
Gouloumbou	29	519	1480	0,001	0,04	26,37
Sintiou Malem	25	167	415	0,004	0,07	15,06
Koussanar	25	64	195	0,01	0,11	9,22

Selon Kisangala muke (2008), la densité de drainage dépend de la géologie (structure et lithologie), des caractéristiques topographiques du bassin versant et, dans une certaine mesure, des conditions climatologiques et anthropiques. Alors, les valeurs de densité de drainage (tableau 7) obtenues comprises entre [0.04 ; 0.20] sont faibles. Ces résultats indiquent que les sous bassins versants ne sont pas bien drainés. En effet, la Gambie se trouve en région à

substratum très perméable, à couvert végétal important et à relief peu accentué avec des cours d'eau assez dense. Ces résultats corroborent ceux de Chaperon et Guinguen (1974).

Conclusion partielle

Pour mieux comprendre le comportement du bassin versant face à une quantité de précipitations recueillis lors d'une averse, il est indispensable de faire une analyse de ses caractéristiques physiographiques. Ces derniers interviennent dans les modalités de l'écoulement superficiel et ils influencent fortement la réponse hydrologique du bassin.

Chapitre 2 : Outil, Données et Méthodologie

Les chroniques de données disponibles du bassin de la Gambie sont lacunaires (cf. tableau 1). Ces lacunes découlant de la dégradation du système de suivi, des suivis épisodiques par manque de moyens limitent la faisabilité des études hydrologiques dans le bassin. Par conséquent, l'objectif de cette présente étude hydrologique est d'utiliser les données climatiques disponibles et le modèle GR2M fonctionnant au pas de temps mensuel pour reconstituer les données manquantes dans le bassin versant de la Gambie, grâce au package R (airGR) (<http://www.r-project.org/>) de l'équipe Hydrologie INREA, téléchargeable gratuitement sur le site de l'équipe (<https://webgr.inrae.fr/logiciels/airgr/>). Ce package contient les modèles hydrologiques GR4H, GR4J, GR2M, GR1A (fonctionnant à des pas de temps horaire à annuel), le modèle de neige CemaNeige, des outils de calage, ainsi que le calcul de critères d'efficacité, etc. (Delaigue et al., 2018).

2.1. Outil : Le modèle hydrologique GR2M

2.1.1. Choix du modèle

Le choix d'une démarche de modélisation dépend des objectifs et des données disponibles. L'idéal est aussi de choisir un modèle bien adapté aux processus se produisant dans le bassin versant étudié. De ce fait, dans cette présente étude, on a choisi le modèle GR2M dont la robustesse à simuler les écoulements en contexte africain a été montré dans plusieurs études (Paturel et al. 1995 ; Ouédraogo et al., 1998 ; Mahé et al., 2005 ; Ardoin-Bardin et al., 2009). Ce choix s'explique aussi par un certain nombre de contraintes. Etant donné que le bassin versant de la Gambie est à cheval sur trois pays et dans l'état actuel des données disponibles (lacunaires) sur le bassin il serait difficile de vouloir mettre en œuvre une modélisation à base physique. Celle-ci est, en effet, complexe et nécessite un grand nombre de variables pour lesquelles il n'existe généralement pas de séries observées au niveau dudit bassin.

2.1.2 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. La structure du modèle, bien qu'empirique, l'apparente à un modèle conceptuel à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle (Bodian, 2011). Sa structure est constituée de deux grandes parties : une partie production, représentée par une fonction de

production et une partie transfert représentée par une fonction de transfert. La fonction de production traduit la transformation proprement dite de la pluie en lame d'eau disponible au ruissellement; la fonction de transfert traduit le mouvement de cette lame d'eau, accumulée au sol lors de la précipitation, vers l'exutoire du bassin versant. Ces fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin versant (Bodian, 2011). Pour une ample précision sur le fonctionnement du modèle GR2M, le lecteur peut consulter l'étude de Bananeh Junior (2015). Le schéma conceptuel du modèle GR2M est présenté à la figure 6.

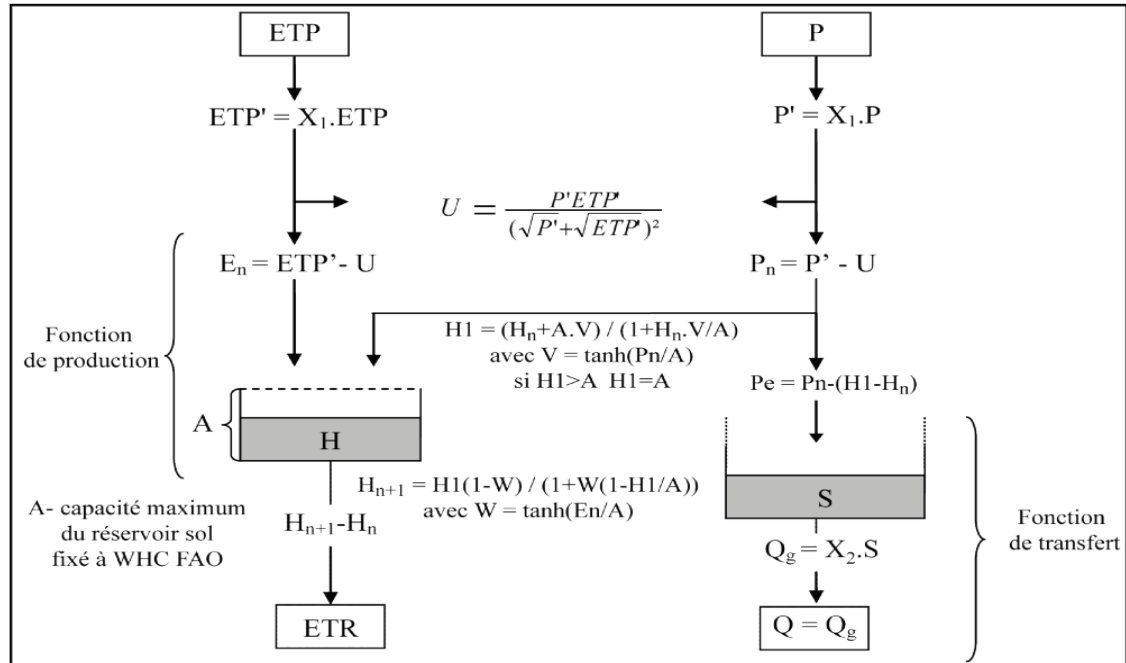


Figure 6 : Schéma conceptuel du modèle GR2M décrivant les entrées, les variables internes, les réservoirs et paramètres associés (source : Perrin, 2003)

2.1.3. Paramètres optimisables du modèle GR2M

Le modèle de bilan d'eau contient deux paramètres à caler : X1 et X2. Le premier paramètre¹ (X1) représente la capacité maximale du réservoir « sol ». Le deuxième paramètre² (X2) représente la constante de vidange du réservoir « eau gravitaire » (Bodian, 2016). Et selon Mouelhi (2003), dans un modèle conceptuel global, deux paramètres libres sont largement suffisants, à l'échelle mensuelle.

¹ Le paramètre X1 du modèle GR2M est noté X2

² Le paramètre X2 du modèle GR2M est noté X1

2.1.4. Optimisation des paramètres du modèle GR2M

L'optimisation ou le calage d'un modèle hydrologique est une opération extrêmement importante dans la réponse que celui-ci donnera lors des simulations. Il permet d'ajuster les paramètres afin de représenter au mieux le régime hydrologique du bassin versant (Doucet-Généreux, 2015). Dans la pratique, il existe deux types de techniques pour caler un modèle : les techniques manuelles et les techniques automatiques avec l'utilisation d'algorithmes (Serna, 2005). C'est ainsi, le calage des modèles est porté à un niveau plus performant avec l'utilisation d'algorithmes d'optimisation et avec l'avancement des technologies permettant une augmentation considérable de la puissance de calcul (Cartier, 2012). L'optimisation automatique est alors choisie dans cette étude car elle a l'avantage d'être plus rapide en utilisant des algorithmes pour générer automatiquement les jeux de paramètres X1 et X2 du modèle GR2M. Et plusieurs algorithmes sont renseignés dans le package airGR et celui développé par Michel (1991) (noté Calibration_Michel) est utilisé.

2.1.5. Evaluation de la performance du modèle GR2M

L'optimisation des paramètres du modèle, qu'elle soit manuelle ou algorithmique, nécessite la définition d'une fonction objective quantifiant l'erreur du modèle, c'est-à-dire la différence entre les débits observés et les débits simulés (Agosta, 2007). On peut distinguer deux types de critères d'évaluation des performances des modèles (Perrin, 2000) : les critères quantitatifs qui font appel à des évaluations numériques et les critères qualitatifs, eux, s'appuient généralement sur des observations graphiques (hydrogrammes comparant les débits observés et simulés). Les critères quantitatifs NSE, KGE et RMSE sont utilisées dans cette étude pour quantifier la qualité des ajustements réalisés par le modèle GR2M dans la Gambie. Car, le choix de la fonction objective ou la mesure de performance lors de la calibration impacte la performance du modèle calibré (Larabi, 2017). Etant donné que, chaque fonction objective est particulièrement sensible à un seul aspect (débit élevé ou étiage) de l'hydrogramme dépendamment de sa définition selon Vrugt et al. (2003). De même, Krause et al. (2005) dans son étude en comparant plusieurs mesures (NSE, log NSE, RMSE, R2,...) conclue qu'aucune mesure de performance n'est optimale. Et selon Yapo et al. (1998), aucune mesure de performance, peu importe sa définition, n'est capable d'identifier tous les aspects et caractéristiques importantes de l'hydrogramme. Par exemple, le NSE est performant pour capter l'occurrence du débit de pointe et la corrélation linéaire entre les simulations et les observations, mais sous-estime la variabilité et le débit

moyen (Gupta et al., 2009). Gupta et al. (2009) proposent une décomposition de ce critère, nommée Kling-Gupta Efficiency (KGE), pour tenir compte de la variabilité, de la corrélation et de la moyenne des débits. Il a été démontré que le KGE est capable de capter la variabilité, le débit de pointe ainsi que le débit moyen avec une corrélation linéaire élevée entre les simulations du modèle et les observations selon Larabi (2017). Par conséquent, utiliser une seule fonction objective est inadéquat pour représenter toute la variabilité d'un hydrogramme (Pechlivanidis et al., 2011). En effet, Gupta et al. (1998) soulignent l'importance d'utiliser simultanément une combinaison de mesures de performance dans le but de capter différentes caractéristiques de l'hydrogramme et introduisent ainsi l'approche multi-objective. Les formules des critères numériques sont regroupées dans le tableau 10.

❖ Coefficient de Nash-Stucliffe

Le critère de Nash permet d'évaluer la qualité des résultats des simulations en comparaison des observations, à la fois en terme de phase et d'intensité (Nash et Sutcliffe, 1970). Cependant, l'utilisation seule du critère de Nash-Stucliffe n'est pas suffisante afin d'évaluer la performance d'un modèle. Tel que démontré par Jain et Sudheer (2008), il est possible d'obtenir de très fortes valeurs de ce critère (proche de 1) avec des modèles mal adaptés aux conditions de simulations, tandis que des modèles adaptés peuvent donner de très mauvais résultats. Cela indique donc que le critère de Nash-Sutcliffe n'est pas suffisant comme seul indice de performance. Il est donc nécessaire d'inclure d'autres critères dans le calage d'un modèle (Doucet-Généreux, 2015).

❖ KGE

Le Kling Gupta Efficiency (KGE-Gupta et al., 2009) est une version modifiée du critère de Nash. Il ne donne qu'une indication sur les performances globales du modèle à produire des débits proches de ceux de références. Le KGE varie entre $-\infty$ et 1. Plus il est proche de 1, plus les débits simulés sont proches des débits de référence (Mata Espinoza, 2017).

❖ Coefficient RMSE

On peut aussi évaluer l'erreur quadratique moyenne, Root Mean Square Error (RMSE) pour décrire la dispersion entre les variables simulées et observées (Bireche, 2017). Plus la valeur de RMSE est faible, plus la dispersion est faible et plus la variable simulée par le modèle est proche de celle observée (Hyndman, 2006).

Tableau 10 : Les critères d'évaluation du modèle GR2M

Critères d'évaluation	Formulation	Plage de variation	Valeur optimale
NSE	$1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - Q_{sim,t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - \overline{Q_{obs}})^2}$	[0 ; 1]	1
KGE	$1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\alpha - 1)^2}$]-∞ ; 1]	1
RMSE	$\frac{1}{n} \sum (Q(i+L) - Q(i+L))^2$	[0, +∞[0

2.1.6. Choix des périodes de calage et de validation

Le calage des paramètres s'effectue à partir des données de débit observées à l'exutoire du bassin versant (Lebecherel, 2015). Car, le modèle GR2M nécessite des données de débit observées plus ou moins longues et continu pour son fonctionnement. Alors, en raison du caractère lacunaire des données de débit observé (cf. tableau 1), on a opté pour le calage global avec les stations dont les années d'observations sont au moins de cinq années de données complètes. Etant donné que, le choix des périodes de calage est primordial pour la spécification des paramètres du modèle (Bodian, 2011). En outre, le fonctionnement du modèle GR2M nécessite en entrées des données de précipitation et d'évapotranspiration moyenne mensuelle et fournit en sortie le débit (Sossou, 2011).

2.2. Données utilisées

Dans le cadre de ce travail, trois jeux de données sont utilisés au pas de temps mensuel : les débits, la pluie et l'ETP. Ces jeux de données couvrent la période 1970 à 2015 soit 45 ans observations.

2.2.1. Les données hydrologiques

La figure 7 donne l'inventaire des données hydrologiques disponibles dans le bassin versant de la Gambie. La lecture de cette figure permet de constater que les données de débits observées disponibles dans le bassin du fleuve Gambie sont très lacunaires. Les stations de Mako, de Simenti, de Wassadou aval et de Kédougou ont les séries les plus longues et présentant moins de lacunes. Ainsi, à cause du caractère très lacunaire des données de certaines stations hydrométriques (Goumbeyel, Koulountou, Koussanar, Niaoulé Tanou, Niokolo Koba et Sintiou Malem), elles n'ont pas pu être utilisées pour le calage-validation du modèle GR2M.

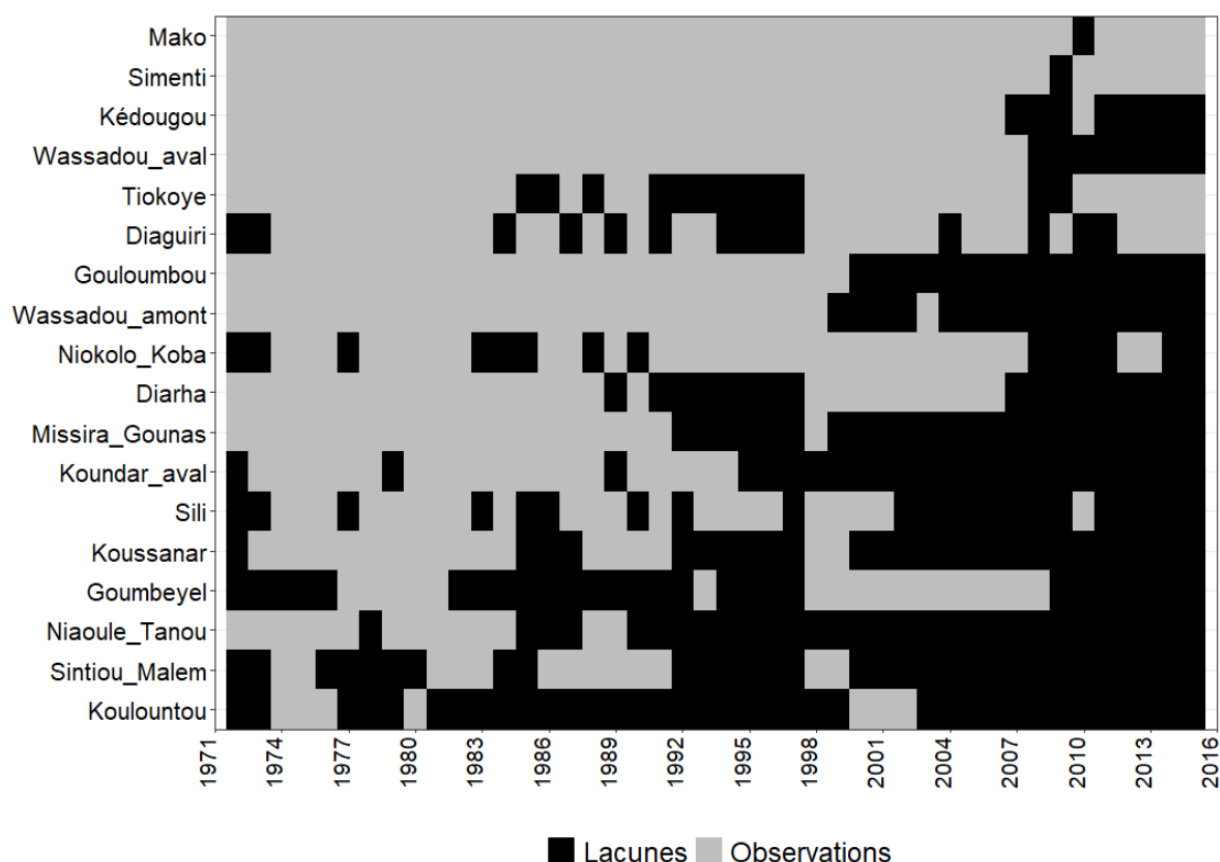


Figure 7 : Inventaire des données de débits des stations hydrométriques retenues

2.2.2 Les données de pluie

La figure 8 donne l'inventaire des données de pluie disponibles, illustrant le caractère très lacunaire des données de certaines stations pluviométriques (Dabala, Tougue, Koussanar, Labé, Yundum...).

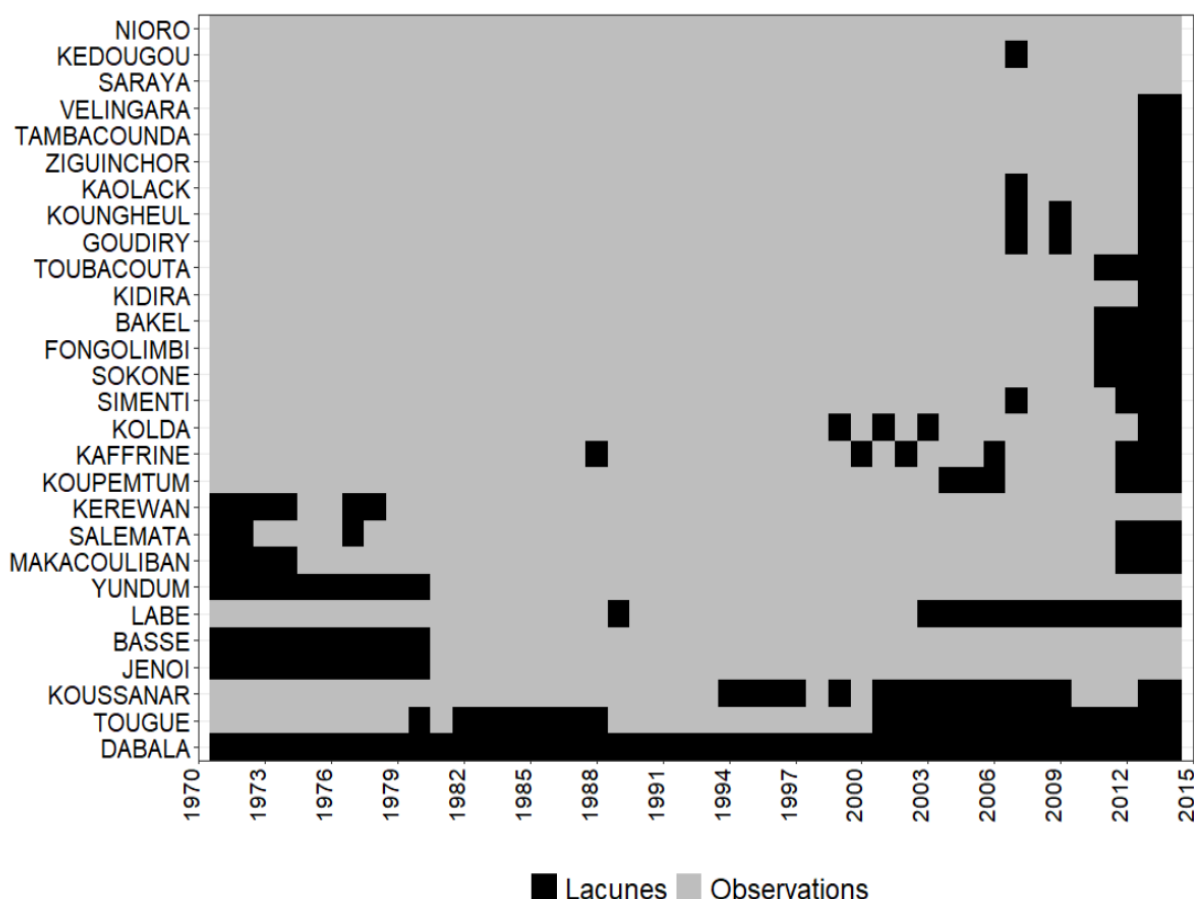


Figure 8 : Inventaire des données de pluie de 1970 à 2015 des stations de la Gambie

2.2.3 Les données d'évapotranspiration (ETP)

La prévision des écoulements futurs dépend fortement de l'évapotranspiration, dont l'évolution est influencée par plusieurs variables climatiques (Bodian et al., 2018). Car l'évapotranspiration constitue une « synthèse » climatique et donc un indicateur du changement climatique (Jiao et Wang, 2017 ; Chu et al., 2017). Par contre, dans le bassin du fleuve Gambie, la connaissance de l'évapotranspiration est limitée par l'inaccessibilité des données climatiques observées. Ainsi, les données d'ETP, utilisées dans le cadre de cette étude, proviennent de la base de données internationale « Climate Research Unit (CRU)-Université of East Anglia ». Téléchargeable sur : <http://badc.nerc.ac.uk/data/cru> (New et al., 2000). Il s'agit de données d'évapotranspiration potentielle (ou ETP), calculées à partir de la formule de Penman (1956). Le choix de ces données se justifie par la qualité et la longueur des séries disponibles ainsi que leur large utilisation dans la littérature scientifique.

2.3. Méthodologie

La démarche méthodologique adoptée pour parvenir à la régionalisation des paramètres du modèle GR2M sur les dix-huit sous bassins versants sélectionnés est synthétisée en trois phases. La première phase consiste à calculer les pluies moyennes et l'ETP moyenne des sous bassins versants. Cette partie est réalisée avec le logiciel Hydraccess. La deuxième phase est consacrée au calage-validation du modèle et la simulation des débits avec le logiciel R. Et enfin la troisième phase qui consiste à la régionalisation des paramètres du modèle GR2M, est réalisée avec le logiciel Arcgis et R.

2.3.1. Calcul de la pluie et de l'ETP moyenne

Les pluies et ETP moyennes mensuelles des sous bassins versants, donnée d'entrée du modèle GR2M, sont calculées avec le logiciel Hydraccess par la méthode distance inverse pondérée au carré (Bodian et al., 2012). Pour cette méthode, la valeur à estimer en un point de la zone d'étude est déterminée à l'aide de la moyenne pondérée des valeurs des points les plus proches du point considéré (Chang et al., 2005). En effet, Chang et al. (2005) indiquent que lorsque la densité du réseau de pluviomètres est faible, à l'image de notre zone d'étude, les erreurs d'estimation peuvent être importantes avec les autres méthodes de calcul (Krigage...). Ainsi, ils ont souligné que l'interpolation par distance inverse pondérée au carré peut réduire considérablement les erreurs qui surviennent lorsque le nombre de stations est limité.

2.3.2. Le calage-validation du modèle et simulation des débits

Les modèles requièrent une phase de spécification des paramètres qui doit se faire sur des séries de données suffisamment longues pour lesquelles il faut supposer qu'il n'y a pas eu de changement dans les caractéristiques hydrologiques ou physiographiques du bassin versant (Diello, 2007). Le choix des périodes de calage devient alors primordial pour la spécification des paramètres du modèle. Alors, compte tenu du caractère lacunaire des chroniques des débits (figure 7), on a opté pour le calage global avec douze bassins notamment de Diaguiri, de Diarha, de Gouloumbou, de Kédougou, de Mako, de Missira Gounas, de Sili, de Simenti, de Sintian Koundara aval, de Tiokoye, de Wassadou amont et de Wassadou aval dont leurs séries de données de débit sont au moins de cinq ans de données complètes. Ensuite, les paramètres optimisés seront appliqués à l'ensemble de la série pour la simulation des écoulements. Cette simulation de débits permet de quantifier la performance du modèle GR2M dans le bassin versant de la Gambie entre l'évolution des hydrogrammes observés et simulés et la variabilité de ces derniers du point de vue saisonnier.

2.3.3. Régionalisation des paramètres du modèle GR2M

Selon Arnaud et Emery, (2000), l'interpolation est la prévision de la valeur d'une variable en un site où elle n'a pas été mesurée à partir des valeurs observées. Dans ce contexte, les paramètres optimisés (X1 et X2) des douze bassins retenus en calage global sont interpolés à partir des coordonnées (latitude et longitude) des stations du tableau 1 avec le logiciel Arcgis. Afin de générer de nouveaux paramètres (paramètres régionalisés) X'1 et X'2 pour les différents sous bassins avec l'outil extract values dans Arcgis. Les paramètres régionalisés (X'1 et X'2) sont utilisés pour simuler les chroniques de débit des sous bassins versants. Les débits générés sont comparés aux débits observés avec KGE et PBIAIS comme critère d'appréciation. Cette comparaison permet une analyse sur l'applicabilité de la méthode de régionalisation des paramètres du modèle GR2M dans le bassin versant de la Gambie dans le but de reconstituer les chroniques de débit des bassins versants non jaugés.

Chapitre III : Résultats

Cette partie présente les différents résultats obtenus à partir de la méthodologie décrite précédemment.

3.1. Analyse des pluies moyennes des sous bassins versants

La figure 9 illustre le cycle saisonnier de la pluie des sous bassins. La figure 10 donne la pluie annuelle des sous bassins versant et leur répartition spatiale à l'échelle du bassin versant de la Gambie en figure 11.

3.1.1. Le cycle saisonnier de la pluie des sous bassins

Du point de vue saisonnier, les pluies sont plus abondantes entre le mois de Mai et d'Octobre. Les intensités peuvent être parfois fortes, en particulier en Août avec une valeur de 300 mm. La pluviométrie est plus faible entre le mois de Novembre et d'Avril.

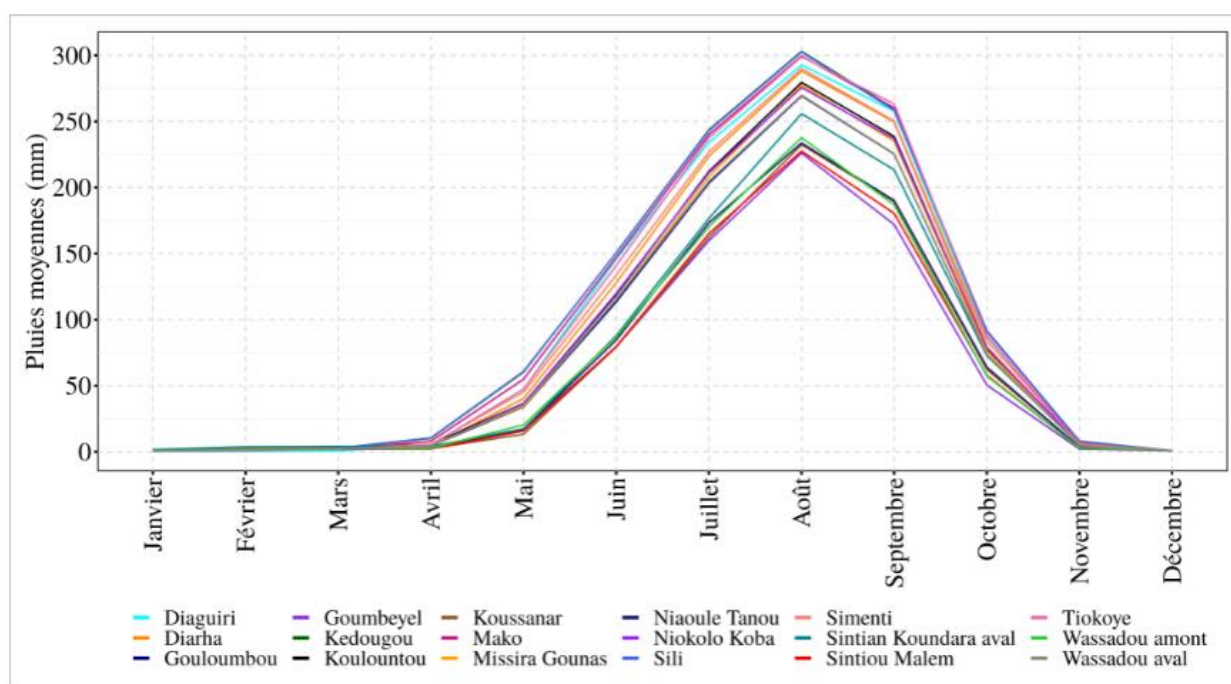


Figure 9 : le cycle saisonnier des pluies dans les différents sous bassins versant

3.1.2. Pluie annuelle de 1970 à 2015 des sous bassins versants

Une comparaison des pluies moyennes annuelles des différents sous bassins versant (Figure 10) permet de constater que les bassins Kédougou, Mako, Sili, Tiokoye, reçoivent les quantités de plus les plus importantes de précipitation à l'échelle du bassin versant de la Gambie.

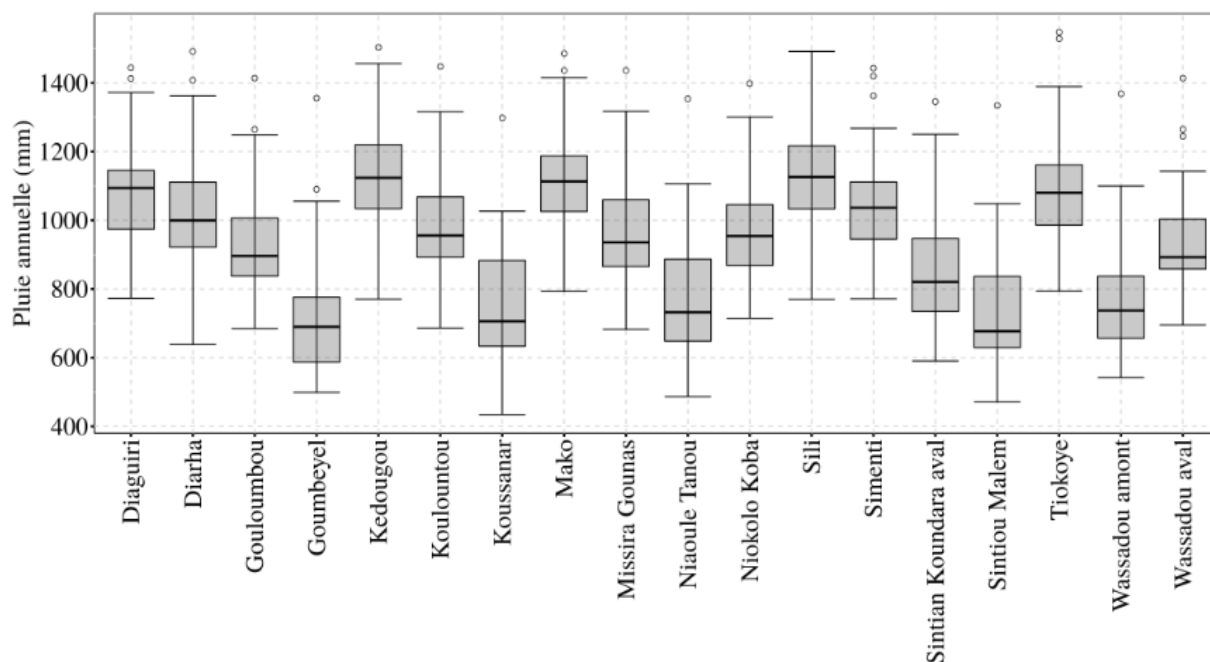


Figure 10 : Variation de la pluie moyenne annuelle des sous bassins

3.1.3. Répartition spatiale de la pluie moyenne annuelle de 1970 à 2015 des sous bassins

Selon Lamagat (1990), le bassin versant de la Gambie est divisé en deux grandes parties : bassin continental de la source jusqu'à Gouloumbou avec une orientation générale SE-NW et le bassin maritime de Gouloumbou jusqu'à l'embouchure avec une orientation E-W. Ainsi, l'analyse de la figure (11) montre que les sous bassins dont leur cours d'eau principal a le même sens d'écoulement que le bassin de Gouloumbou (des hautes terres du Fouta Djallon vers la station de Gouloumbou) ont les valeurs les plus élevées de pluie. Et les sous bassins qui se trouvent aux alentours des hautes terres du Fouta Djallon (Kédougou, Sili, Tiokoye, Diaguiri, Mako, Diarha et Simenti) reçoivent les quantités de pluies les plus importantes. Et pour Faye et Mendy (2018) la Gambie dans son bief continental, est un fleuve alimenté essentiellement par les précipitations. Par contre, pour les bassins Sintiou Malem, Koussanar, Niaoulé Tanou et Goumbeyel dont leurs sens d'écoulement est différent de celui de Gouloumbou reçoivent les quantités de pluies les plus faibles et se trouvent dans les isohyètes les plus faibles [700-800]. Alors, par analogie, les bassins de Sintiou Malem, Koussanar, Niaoulé Tanou et Goumbeyel se trouvent dans le bief maritime de la Gambie. La figure 11 donne la répartition spatiale de la pluie annuelle des sous bassins.

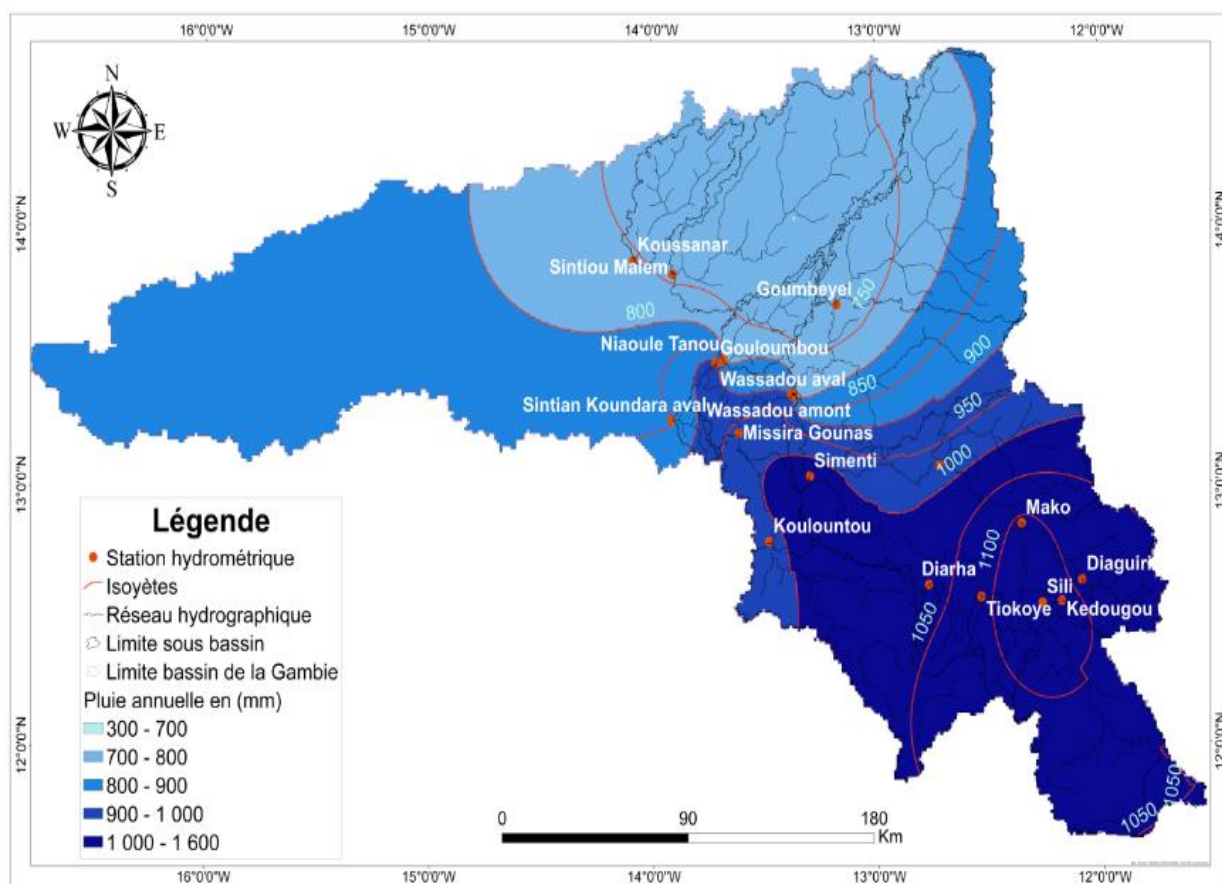


Figure 11 : Répartition spatiale de la précipitation moyenne annuelle de la Gambie

3.2. Analyse de l'ETP moyenne des sous bassins versants

La figure 12 donne l'évolution saisonnière de l'ETP des sous bassins. La figure 13 donne l'ETP annuelle des sous bassins de 1970 à 2015 et leur répartition spatiale en figure 14.

3.2.1. Cycle saisonnier de l'ETP des sous bassins versants

La variabilité saisonnière de l'ETP est forte dans la Gambie avec une tendance alternée. Les fortes valeurs d'ETP sont obtenues entre le mois de Mars et de Mai. Ensuite elle décroît pour atteindre une valeur minimale inférieure à 110 mm au mois d'Aout puis croît pour atteindre une valeur supérieure à 110 mm au mois de Décembre.

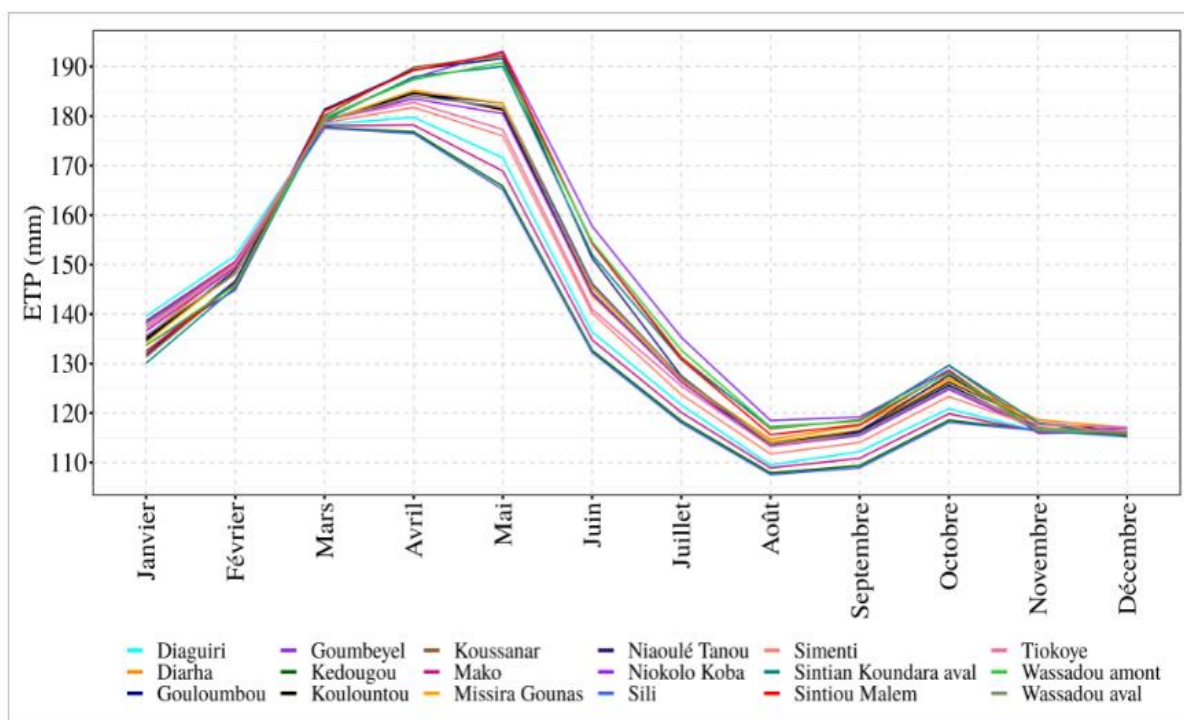


Figure 12 : l'évolution saisonnière de l'ETP des sous bassins

3.2.2. ETP moyenne annuelle des sous bassins de 1970 à 2015

Les bassins de Goumbeyel, Koussanar, Sintiou Malem et Wassadou amont ont les valeurs d'ETP les plus importantes. La figure 13 donne ETP annuelle des sous bassins.

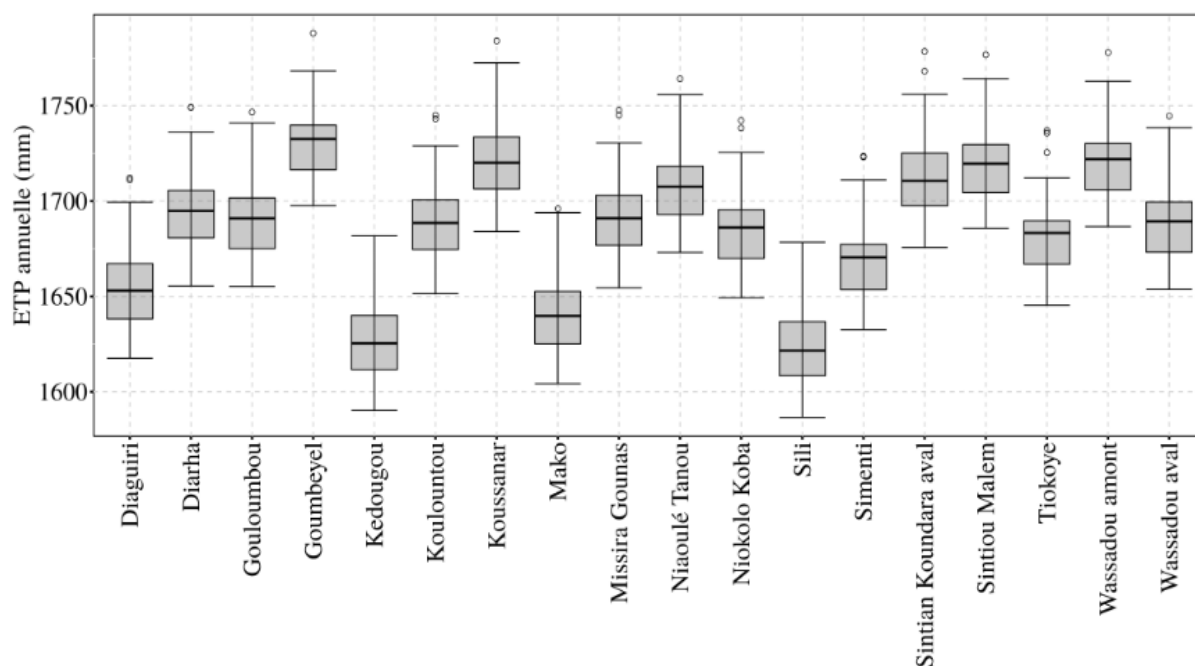


Figure 13 : Variation de l'ETP annuelle des sous bassins

3.2.3. Répartition spatiale de l'évapotranspiration moyenne annuelle des sous bassins de 1970 à 2015

Les fortes valeurs d'ETP sont notées à l'Ouest du bassin (le bief maritime) avec les bassins de Koussanar, Sintiou Malem, Goumbeyel. Cependant, dans la Gambie, les sous bassins qui reçoivent les quantités de pluie les plus importantes en occurrence Kédougou, Sili, Tiokoye, Diaguiri, Mako, Diarha et Simenti (cf. figure 11) ont les valeurs d'ETP les plus faibles. La figure 14 montre la répartition spatiale de l'ETP moyenne annuelle des sous bassins de 1970 à 2015.

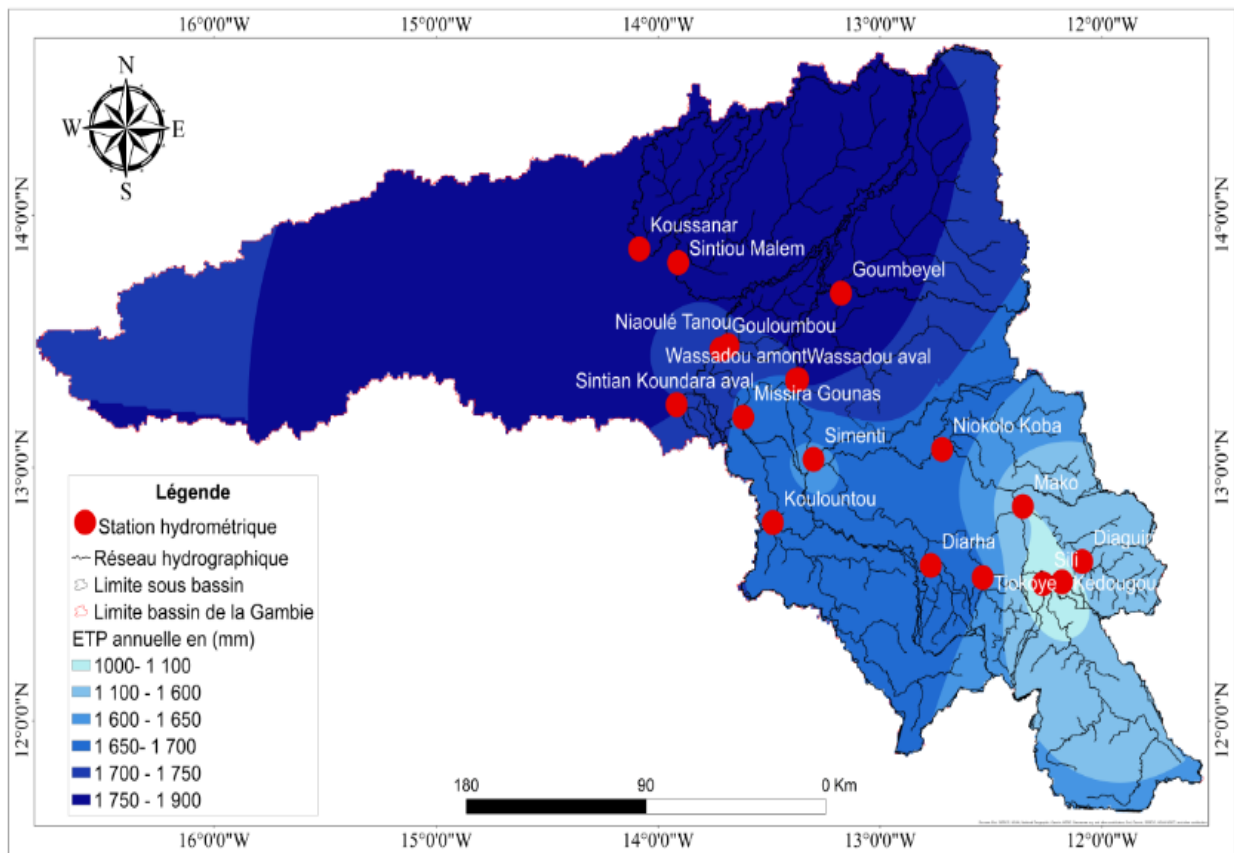


Figure 14 : Répartition spatiale de l'évapotranspiration moyenne annuelle de la Gambie

3.3. Calage global du modèle GR2M

Les performances obtenues en calage global sont supérieures à 60% pour les critères de NSE et du KGE et varie de 0,3474 à 24,455 pour le RMSE. Ces résultats témoignent de la performance et de la robustesse du modèle GR2M dans le bassin versant de la Gambie. Ainsi, les bassins de Gouloumbou, de Kédougou, de Mako et de Wassadou aval donnent les meilleurs résultats avec les plus fortes valeurs des critères de NSE et de KGE. Par contre, les bassins de Sili et de

Diaguiri ont les valeurs de NSE et de KGE les plus faibles. Alors le modèle GR2M est moins performant pour simuler les chroniques de débits des bassins de Sili et de Diaguiri. Le tableau 11 donne les valeurs des paramètres de X1 et de X2 et les critères numériques obtenus en calage global.

Tableau 11 : Paramètres X1 et X2 obtenus en calage des sous bassins et valeurs des critères numériques

sous bassins	X1	X2	KGE	NSE	RMSE
Diaguiri	658,523	0,71	0,8007	0,6215	19,7503
Diarha	391,808	0,92	0,8713	0,7977	16,7085
Gouloumbou	918,455	0,825	0,9315	0,8672	6,0947
Kédougou	544,709	1,084	0,9557	0,9161	17,2279
Mako	557,793	0,921	0,9517	0,9061	13,8544
Missira Gounas	754,646	0,872	0,8869	0,7822	9,3728
Sili	685,398	0,072	0,8186	0,6377	0,3474
Simenti	729,855	0,835	0,8537	0,7057	16,244
Sintian Koundara aval	1465,571	0,652	0,8662	0,732	3,0363
Tiokoye	462,327	0,811	0,8772	0,8049	17,1869
Wassadou amont	201,306	1,198	0,8235	0,7231	24,455
Wassadou aval	758,895	0,77	0,9356	0,886	5,834

3.4. Simulation

Pour apprécier l'écart entre les débits observés et simulés, des critères graphiques sont utilisés. L'avantage de la forme d'évaluation graphique est qu'elle permet d'apprécier visuellement la qualité des simulations et la capacité du modèle à reproduire suffisamment bien les débits observés. Ce que ne permettent pas forcément les critères numériques (Diémé, 2015). Ainsi, les résultats obtenus avec le bassin de Gouloumbou, de Kédougou, de Mako, de Missira Gounas, de Simenti, et de Wassadou aval montrent une bonne corrélation entre les débits observées et ceux simulées. En effet, il y'a plus ou moins une bonne superposition des hydrogrammes des débits observés et simulés. Ainsi, avec ces bassins on a comparé le débit observé et simulé du point de vue saisonnier. De cette comparaison il ressort que le modèle simule mieux les débits d'étiage et a du mal à bien reproduire les pics de crue. Néanmoins, la comparaison du débit observé et simulé du bassin de Wassadou amont du point de vue saisonnier donne un résultat qui diffère de ceux des autres bassins. Cette différence peut être expliquée par le fait qu'un bassin versant constitue un ensemble unique de caractéristiques physiques et de modifications anthropiques et cette unicité se reflète dans le jeu de paramètres optimisés du modèle hydrologique de ce bassin versant selon Beven (1999). La figure 15 synthétise les

hydrogrammes des débits observés et simulés et la variation saisonnière des débits observés et simulés des bassins de Gouloumbou, de Kédougou, de Mako et de Missira Gounas. La figure 16 regroupe l'hydrogramme des débits observés et simulés (a) et la variation saisonnière des débits observés et simulés (b) du bassin de Simenti.

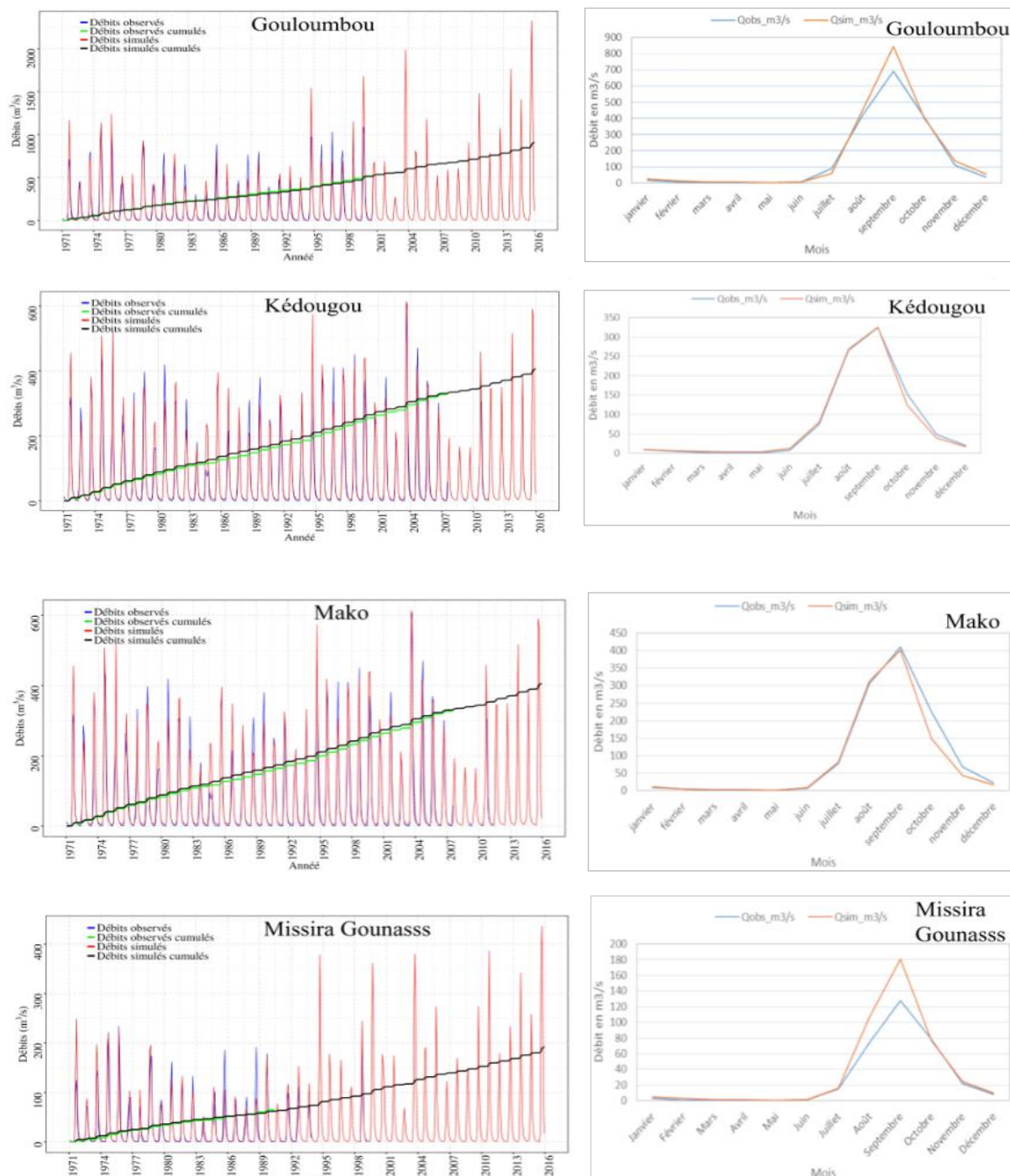


Figure 15 : Hydrogrammes des débits observés et simulés et la variation saisonnière des débits observés et simulés des bassins de Gouloumbou, de Kédougou, de Mako et de Missira Gounas

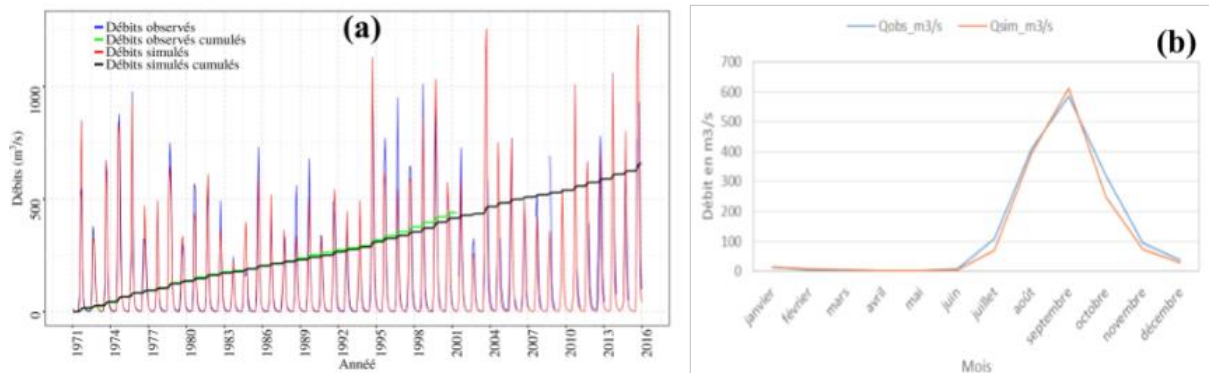


Figure 16 : Hydrogramme des débits observés et simulés (a) et la variation saisonnière des débits observés et simulés (b) du bassin de Simenti

L'analyse des figures 15 et 16 montre que, du point de vue saisonnier, le pic de crue est atteint au mois de Septembre pour tous les bassins. Et pour les bassins de Kédougou et de Mako, on note une bonne superposition entre le débit observé et simulé du mois de Janvier au mois de Septembre.

3.5. Régionalisation des paramètres du modèle GR2M

Les paramètres ($X'1$ et $X'2$) générés après interpolation des paramètres optimisés sont utilisés pour reconstituer les chroniques de débits des sous bassins. Alors, Seuls les bassins de Gouloumbou (figure 17) et de Simenti (figure 17) donnent des résultats assez satisfaisants pour la reconstitution de débit avec les paramètres régionalisés. C'est ainsi, pour évaluer la performance du modèle GR2M avec la méthode de régionalisation, on a comparé les paramètres optimisés et régionalisés (figure 18) puis les débits observés et simulés avec les paramètres régionalisés (tableau 13) avec KGE et PBIAIS comme critère de performance. Les résultats issus de cette comparaison montrent que les valeurs des paramètres optimisés sont supérieures à celles des paramètres régionalisés. Ce qui reflète la capacité limitée du modèle GR2M à reproduire les fluctuations des débits avec les paramètres régionalisés. Les paramètres optimisés ($X1$ et $X2$) et régionalisés ($X'1$ et $X'2$) des sous bassins versants sont donnés par le tableau 12. La figure 17 synthétise les hydrogrammes des débits observés et simulés avec les paramètres régionalisés des bassins de Gouloumbou, de Kédougou, de Mako, de Simenti, de Wassadou amont et de Wassadou aval. La figure 18 donne le résultat de la comparaison des jeux de paramètres optimisés et régionalisés des sous bassins. Le tableau 13 synthétise le résultat des valeurs de KGE et du PBIAIS issus de la comparaison des débits observés et simulés avec les paramètres régionalisés.

Tableau 12 : Paramètres optimisés (X1 et X2) et régionalisés (X'1 et X'2)

Sous bassins	Paramètres optimisés		Paramètres régionalisés	
	X1	X2	X'1	X'2
Diaguiri	658,523	0,71	652,824768	0,782948
Diarha	391,808	0,92	404,832245	0,804004
Gouloumbou	918,455	0,825	920,120178	0,819406
Kédougou	544,709	1,084	572,136108	0,781622
Mako	557,793	0,921	562,70166	0,79566
Missira Gounas	754,646	0,872	778,738037	0,822139
Sili	685,398	0,072	663,737854	0,777804
Simenti	729,855	0,835	723,323547	0,822211
Sintian Koundara aval	1465,571	0,652	1423,10425	0,811583
Tiokoye	462,327	0,811	467,906006	0,792706
Wassadou amont	201,306	1,198	408,847565	0,830192
Wassadou aval	758,895	0,77	575,517944	0,829916
Goumbeyel			620,012512	0,822872
Koulountou			732,637451	0,816518
Koussanar			718,09259	0,808542
Niaoulé Tanou			864,236938	0,820485
Niokolo Koba			660,626587	0,810942
Sintiou Malem			750,965515	0,811901

Le tableau 12 montre que l'interpolation des paramètres optimisés permet de déterminer des nouveaux paramètres sur les bassins de Goumbeyel, de Koulountou, de Koussanar, de Niaoulé Tanou, de Niokolo Koba, et de Sintiou Malem dont leurs données de débits observés ne peuvent pas être utilisées en calage global en raison de leur forte lacune dans les séries de données.

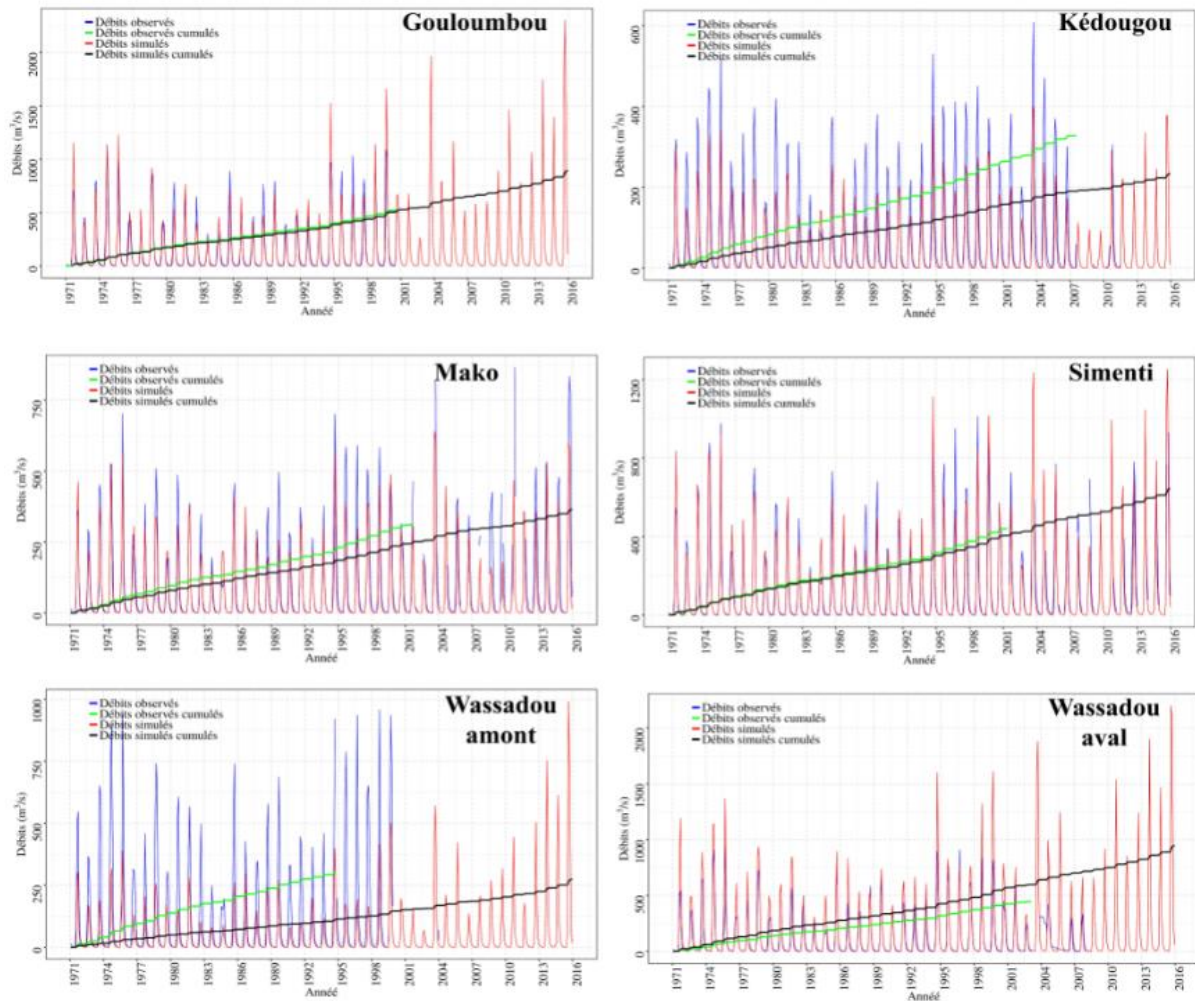


Figure 17 : Hydrogrammes des débits observés et simulés avec les paramètres régionalisés des bassins de Gouloumbou, de Kédougou, de Mako, de Simenti, de Wassadou amont et de Wassadou aval

L'analyse de la figure 17 montre qu'il y'a une bonne superposition entre les débits observés et simulés des bassins de Gouloumbou et de Simenti. Et l'écart entre les débits observés et simulés est important pour les bassins de Kédougou, de Mako, de Wassadou amont et de Wassadou aval. Cet écart montre la limite de la méthode de régionalisation à reproduire les chroniques de débit dans le bassin de la Gambie. Car, en calage validation, on a de bonne corrélation entre les débits observées et ceux simulées avec les bassins de Gouloumbou, de Kédougou, de Mako et de Simenti.

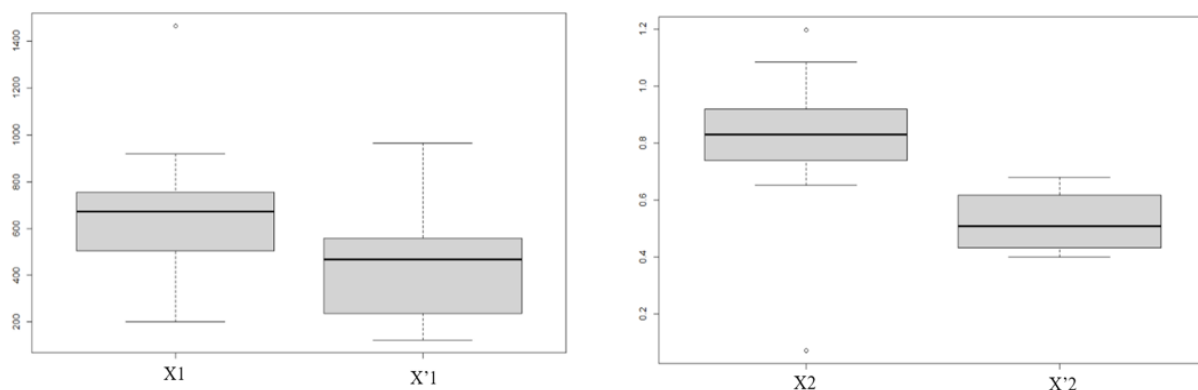


Figure 18 : Comparaison des jeux de paramètres optimisés et régionalisés des sous bassins

L'analyse de la figure 18 montre que la valeur des paramètres optimisés (X1 et X2) est nettement supérieure à celle des paramètres régionalisés.

Tableau 13: Valeurs de KGE et du PBIAIS en comparant des débits observés et simulés avec les paramètres régionalisés

Sous bassins	KGE	PBIAIS
Diaguiri	0,32	-17347,33
Diarha	0,51	-127,29
Gouloubou	0,46	-5375,38
Goumbeyel	-0,66	-922,79
Kédougou	0,46	-1677,71
Koulountou	-4,73	-17,4
Koussanar	-648	99,91
Mako	0,51	-1616,1
Missira Gounas	0,31	-3746,49
Niaoulé Tanou	-21	-14028,62
Niokolo Koba	-4,69	24,32
Sili	-75,30	98,19
Simenti	0,57	-798,22
Sintian Koundara aval	0,04	-27072,23
Sintiou Malem	-416	99,81
Tiokoye	0,22	-14687,82
Wassadou amont	-0,0016	-17326
Wassadou aval	0,52	-36445,07

L'analyse du tableau 13 montre une faible corrélation entre les débits observés et simulés avec les paramètres régionalisés au regard des valeurs du KGE et du PBIAIS.

L'analyse des différents paramètres du modèle permet d'affiner le diagnostic sur le fonctionnement du modèle GR2M avec l'approche de la méthode de régionalisation et d'identifier les pistes d'améliorations à privilégier. Alors, de la comparaison des paramètres et des débits (figure 18 ; tableau 13), on en déduit que les valeurs obtenues en régionalisation sont faibles. La méthode de régionalisation demeure donc imparfaite en raison d'un grand nombre d'incertitudes liées notamment à la qualité des données, à la condition de conception du modèle et à la faible valeur des paramètres après interpolation. Mais, selon Kay et al. (2006), la performance de chaque approche de régionalisation peut dépendre de la structure et des paramètres des modèles pluie-débit utilisé. C'est ainsi, on a tenté une autre approche, d'ajuster les paramètres régionalisés en calculant leur moyenne arithmétique afin de voir s'il peut mener à de meilleurs résultats.

3.5.1. Simulation de débits avec la moyenne arithmétique des paramètres optimisés et régionalisés

La reconstitution de débits avec la moyenne arithmétique des paramètres optimisés et régionalisés est faite en deux phases.

Dans la première phase, pour les bassins retenus en calage global, on a calculé la moyenne pondérée entre les paramètres optimisés et régionalisés de chaque sous bassins. Les paramètres obtenus $X''1$ et $X''2$ sont utilisés pour reconstituer les chroniques de débits de ces bassins. Dans cette phase, seuls les bassins de Gouloumbou (figure 19), de Mako (figure 19), de Missira Gounas (figure 19), de Simenti (figure 19) et de Wassadou aval (figure 19) donnent des résultats satisfaisants. Le tableau 14 donne la formulation mathématique des paramètres $X''1$ et $X''2$ et les valeurs en tableau 15. La figure 19 synthétise les hydrogrammes des débits observés et simulés avec les paramètres $X''1$ et $X''2$ des bassins de Gouloumbou, de Mako, de Missira Gounas, Simenti et de Wassadou aval.

Tableau 14 : Formulation mathématiques des paramètres $X''1$ et $X''2$

Paramètres	Formulation
$X''1$	$(X1+X'1)/2$
$X''2$	$(X2+X'2)/2$

Tableau 15: Valeurs des paramètres $X''1$ et $X''2$ des sous bassins

Bassins	$X''1$	$X''2$
Diaguiri	655,673884	0,746474
Diarha	398,320123	0,862002
Gouloumbou	919,287589	0,822203
Kédougou	558,422554	0,932811
Mako	560,24733	0,85833
Missira Gounas	766,692019	0,8470695
Sili	674,567927	0,424902
Simenti	726,589274	0,8286055
Sintian Koundara aval	1444,33762	0,7317915
Tiokoye	465,116503	0,801853
Wassadou amont	305,076783	1,014096
Wassadou aval	667,206472	0,799958

Dans la seconde phase, on a calculé la moyenne arithmétique des $X'1$ puis des $X'2$ des sous bassins. Les paramètres $X'''1$ et $X'''2$ obtenus sont utilisés pour simuler les chroniques de débits des sous bassins. Dans cette phase les bassins de Gouloumbou, de Simenti, de Missira Gounas et de Wassadou aval donnent des résultats satisfaisants. Et les performances obtenues en phase 1 avec ces bassins sont meilleures. Le tableau 16 donne la formulation mathématique des paramètres $X'''1$ et $X'''2$ et leurs valeurs en tableau 17.

Tableau 16 : Formulation mathématique des paramètres $X'''1$ et $X'''2$

Paramètres	Formulation
$X'''1$	$(\sum_{i=1}^n X'1_i) / n_i$
$X'''2$	$(\sum_{i=1}^n X'2_i) / n_i$

Tableau 17 : Valeur des paramètres $X'''1$ et $X'''2$ des sous bassins

$X'''1$	$X'''2$
694,464542	0,8089695

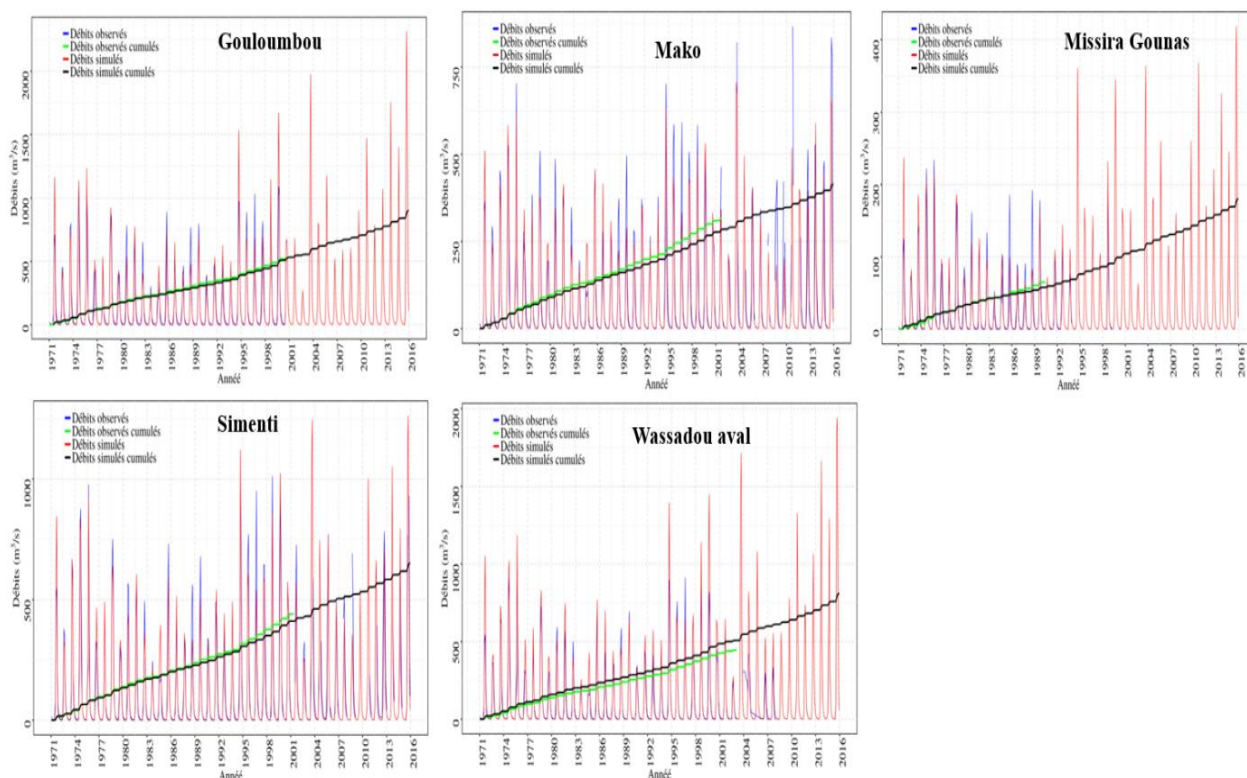


Figure 19 : Hydrogrammes des débits observés et simulés avec les paramètres ($X''1$ et $X''2$) des bassins de Gouloumbou, de Mako, de Missira Gounas, de Simenti et de Wassadou aval

Pour avoir une appréciation globale de la méthode de régionalisation des paramètres du modèle GR2M dans le bassin de la Gambie, on a comparé les débits observés, simulés ($X1$ et $X2$) en calage global, simulés avec les paramètres ($X'1$ et $X'2$ et $X''1$ et $X''2$) au pas de temps annuel et saisonnier. De cette comparaison, il ressort que les débits simulés sont plus proches en termes de performance du modèle GR2M que le débit observé pour le bassin de Gouloumbou qui donne un résultat assez satisfaisant que les autres sous bassins. Et le modèle GR2M reproduit mieux les périodes d'étiage que les périodes de crue dans la Gambie. Dans ce contexte, Oudin et al. (2008) affirment que la performance de la méthode de régionalisation dépend de la densité du réseau des stations de jaugeage ; plus les stations de jaugeage sont rapprochées, meilleure est la performance de la méthode. Et selon Ouarda et al. (2008), le fait que ces bassins versants soient contigus n'implique pas nécessairement qu'ils partagent un même comportement et une même réponse hydrologique. C'est ainsi, le fait de regrouper des bassins versants au sein de régions homogènes, sur la base de leurs caractéristiques physiques et climatiques, n'assure pas qu'ils soient similaires d'un point de vue hydrologique selon Oudin et al. (2010) qui ont investigué la question en étudiant un échantillon composé de 893 bassins versants français et

10 bassins versants anglais. La figure 20 synthétise la comparaison des débits et leur variation saisonnière.

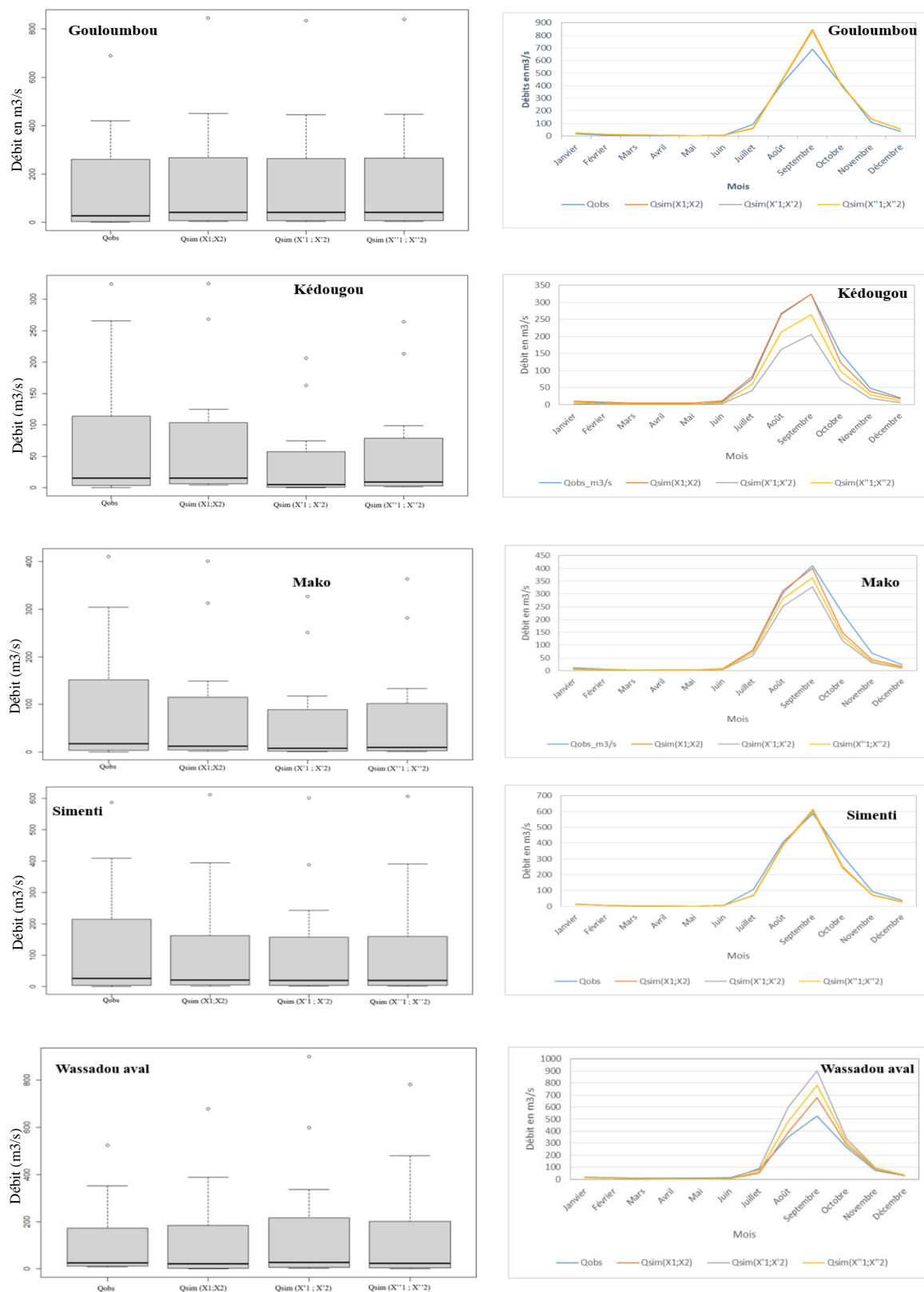


Figure 20 : Comparaison des débits et leur variation saisonnière

L'analyse de la figure 20 montre que l'application de la méthode de régionalisation a donné un résultat satisfaisant qu'avec le bassin de Gouloumbou. Par conséquent, les paramètres $((X_1, X_2); (X'_1, X'_2) \text{ ou } (X''_1, X''_2))$ peuvent être utilisés pour reconstituer le chronique de donnée de débit du bassin de Gouloumbou. Car les données de débit sont précieuses et permettent d'améliorer la qualité des études hydrologiques et par la suite l'optimisation des ouvrages hydrauliques.

Conclusion partielle

Dans ce chapitre, le modèle GR2M est mis en œuvre pour la période allant de 1970 à 2015 au niveau du bassin versant de la Gambie à travers une méthode de régionalisation dans l'objectif de reproduire la genèse des chroniques de débit disponible. Cette méthode consiste à interpoler les paramètres optimisés des sous bassins versants qui disposent des données de mesures de débit au moins de cinq ans pour afin générer des jeux de paramètres pour l'ensemble des sous bassins. Les paramètres générés sont ensuite utilisés pour simuler les chroniques de débit des sous bassins. Il ressort de cette simulation que la méthode de régionalisation dans le bassin de la Gambie se définit par une faible performance du modèle GR2M. Cette diminution de performance peut être expliquée par la faible densité du réseau hydrométrique, le caractère lacunaire des données de débits et des caractéristiques du bassin versant. Cependant, pour une meilleure connaissance de la ressource dans la Gambie, il est nécessaire de mettre en place un réseau hydrométrique optimum pour avoir des séries d'observation longues afin de permettre une estimation aussi précise que possible des flux moyens entrants et sortants du bassin versant. Car, actuellement la qualité et la longueur des séries de données observées de certains affluents de la Gambie sont de nature à amoindrir la portée des conclusions des études hydrologiques.

Conclusion générale

L'interaction des facteurs morphologiques, géologiques, pédologiques, biologiques, topographiques et climatiques engendre des différences significatives de comportement hydrologique des cours d'eau dans une région géographique donnée. Cette différence peut être montrée par le temps de concentration des sous bassins. Car, le temps de concentration caractérise en partie la vitesse et l'intensité de la réaction du bassin versant à une sollicitation des précipitations et détermine l'amplitude de crue d'un bassin.

Cependant, un diagnostic sur la position géographique et d'un suivi régulier des stations hydrométriques qui assurent la fonction de quantifier le débit des cours d'eau seraient un atout pour l'estimation fiable des apports en eau à l'échelle du bassin. Étant donné que les suivis épisodiques et la dégradation du réseau de mesure font que certains affluents de la Gambie sont des bassins versants non jaugés.

Ainsi, l'objectif de cette étude est d'apporter une réflexion sur la méthode de régionalisation des paramètres du modèle hydrologique conceptuel global GR2M sur le bassin versant de la Gambie en vue de reconstituer ces chroniques de débit. Les résultats issus de cette étude mettent en évidence que cette méthode ne donne pas des résultats concluants. Par conséquent, l'approche hydrologique de la méthode de régionalisation n'a pas abouti à une meilleure restitution de données hydrologiques du bassin de la Gambie.

C'est ainsi, pour rendre cette étude plus pertinente, il serait intéressant de faire un diagnostic sur la réalité physique du bassin versant de la Gambie. Car, le niveau d'anthropisation du bassin, la présence de barrage, les zones de captage ainsi que la chenalisation du cours d'eau ne sont pas prises en compte dans le cadre de cette étude. Et la méthode de régionalisation des paramètres ne s'applique pas sur les données d'un bassin qui « perd » de l'eau pour les adapter à un voisin qui en « gagne » ou inversement. Il est donc important de vérifier au préalable que les bassins versants utilisés comme « donneurs » pour la régionalisation soient cohérents pour ce qui est du bilan hydrologique, en plus d'avoir une hydrologie peu influencée par les aménagements anthropiques.

Bibliographie

- Abaza M., 2010. Régionalisation des paramètres hydrologiques d'un modèle de prévision des crues, rapport de stage, INRA (France).
- Agosta C., 2007. Naturalisation des débits et modélisation hydrologique sur des sous-bassins versant de la Garonne à Lamagistère, mémoire de master, université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 51 pages.
- Ardoin-Bardin S., Dezetter A., Servat E., Paturel J.E., Mahé G., Niel H. and Dieulin C., 2009. Using general circulation model outputs to assess impacts of climate change on runoff for large hydrological catchments in West Africa. *Hydrological Sciences Journal*, 54, 77-89.
- Arnaud M. et Emery X., 2000. Estimation et interpolation spatiale. *Hermes Science Publications*, Paris.
- Bendjoudi H. et Hubert P., 2002. Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 47(6) décembre 2002.
- Bireche M., 2017. Comparaison de modèles hydrologiques sur le bassin du Rhône, mémoire de master, université Pierre et Marie.
- Beven K. J. 1999. « Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling ». *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 4, no 2, p. 203-213.
- Beven K.J., 2000. Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling pp. 203–213.
- Bodian A., 2011. Approche par modélisation pluie-débit de la connaissance régionale de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal, thèse de Doctorat, université Cheikh Anta Diop de Dakar, 288p.
- Bodian A., Dezetter A., et Dacosta, H. 2012. Apport de la modélisation hydrologique pour la connaissance de la ressource en eau : Application au haut bassin du fleuve Sénégal *Climatologie*, 9, 109-125.
- Bodian A., Ndiaye O., et Dacosta H., 2016. Evolution des caractéristiques des pluies journalières dans le bassin versant du fleuve Sénégal : Avant et après rupture, *Journal des Sciences Hydrologiques*.
- Bodian A., Dezetter A., Diop L., Deme A., Djaman K., and Diop A., 2018. "Future Climate Change Impacts on Streamflows of Two Main West Africa River Basins: Senegal and Gambia", *Hydrology*, 5, 21; doi:10.3390/hydrology5010021.
- Chang C. L., Lo S. L., et Yu S. L., 2005 : Applying fuzzy theory and genetic algorithm to interpolate precipitation. *J. Hydrol.*, 314, 92-104.
- Chaperon P. et Guiguen N., 1974. Etude hydrologique du bassin continental du fleuve Gambie. Rapport terminal PNUD projet REG 60. ORSTOM avril 74-2 tomes, 257 p.
- Cartier D., 2012. Optimisation sous contraintes d'un modèle hydrologique pour une représentation de la physique des processus, mémoire de master, université de montreal.
- Chu R., Li M., Shen S., Islam A., Cao, W., Tao S. et Gao P., 2017. Changes in Reference Evapotranspiration and Its Contributing Factors in Jiangsu, a Major Economic and Agricultural Province of Eastern China, *Water*, 9, 486, doi:10.3390/w9070486.

- CIAT (Comité Interministériel d'Aménagement du territoire), 2011. Guide méthodologique pour les études de diagnostic des bassins versants.
- Daget, 1960. Bulletin de l'I. F. 8. N. T. XYII. skr. A, no 2, 1960. La faune ichtyologique du bassin de la Gambie 171. DOI : [10.1016/j.envsoft.2017.05.002](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002).
- Delaigue O., Coron, L. & Brigode, P. (2018). airGRteaching: Teaching Hydrological Modelling with the GR Rainfall-Runoff Models ('Shiny' Interface Included). R package version 0.2.2.2. URL: <https://webgr.irstea.fr/en/airGR/>
- DGPRES, 2017. Note sur le suivi hydrologique du fleuve Gambie au droit des stations de Mako et environs.
- Diello P., 2007. Interrelations Climat-Homme-Environnement dans le Sahel Burkinabé : impacts sur les états de surface et la modélisation hydrologique, thèse de Doctorat, université de Montpellier II, 395 pages.
- Diémé L.P.M., 2015. Analyse de la capacité du modèle GR4J à simuler les débits caractéristiques observés du Bafing, mémoire de master, université Gaston Berger, p52.
- Doucet-généreux P.L., 2015. Simulation des débits d'étiage dans un contexte de changements climatiques : incertitude liée au choix du modèle et au critère de calage, mémoire du projet de maîtrise, université de Sherbrooke (Québec).
- Douvinet J., Delahaye D., et Langlois P., 2008. Modélisation de la dynamique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle. *European Journal of Geography*. URL:<http://journals.openedition.org/cybergeog/16103> ;DOI :<https://doi.org/10.4000/cybergeog.16103>
- Dufour B. M., 2017. Étude de méthodes de régionalisation des paramètres des modèles hydrologiques et application à un bassin versant non jaugé au Mexique, mémoire de master II, école de technologie supérieure, 194p.
- El khalki E., 2015. Apport de la modélisation hydrologique dans la caractérisation de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau au niveau du bassin versant de l'Oued El Abid (Haut Atlas Central, Maroc), mémoire de Stage de fin d'études, université Cadi Ayyad.
- Espinoza S. V. M., 2017. AirGR un package de modélisation hydrologique à améliorer? Évaluation sur un large échantillon de bassins versants, mémoire de Master, université Pierre et Marie Curie.
- Etude économique complémentaire pour l'aménagement hydroélectrique de Sambangalou sur le fleuve Gambie, 2011.
- Faty A., 2011. Caractérisation physiographique et prédétermination de la crue décennale des bassins versants de Soungrougrou en amont de Diaroume, mémoire de master, université cheikh Anta Diop de Dakar.
- Faye C., 2014. Méthode d'analyse statistique de données morphométriques : corrélation de paramètres morphométriques et influence sur l'écoulement des sous-bassins du fleuve Sénégal. *Cinq Continents*, 4 (10): 80-108.
- Faye C., 2019. System for predicting discharges over the high water period through the classification techniques data: case of the Gambia river basin of Mako. *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2019, 11(2), 883-900.

- Faye C., et Mendy A., 2018. Variabilité climatique et impacts hydrologiques en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant de la Gambie (Sénégal), EWASH & TI Journal, Volume 2, pp. 54-66.
- Fischer J., 1930. L'élaboration d'une étude d'hydrologie fluviale. In : Les études rhodaniennes, vol. 6, n4, 1930. pp.427-449
- Gaucherel C., 2003. Pertinence de la notion d'indicateur pour la caractérisation du bassin versant, Espace Géographique, vol.3, 265-281.
- Gupta H., Kling H., Yilmaz K. K. and Martinez G. F., 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol*, 377(1-2), 80-91.
- Hyndman Rob. J.; Koehler et Anne B. 2006. Another look at measures of forecast accuracy". *International Journal of Forecasting*.
- Jiao L. et Wang D., 2017. "Climate Change, the Evaporation Paradox, and Their Effects on Streamflow in Lijiang Watershed", *Policies Journal of Environmental Studies*, Vol. 27, No. 6 (2018), 2585-2591, DOI : 10.15244/pjoes/81290.
- Joseph G., Chokmani K., Ouarda T. B. et Saint-Hilaire A. 2007. Une évaluation de la robustesse de la méthode du krigeage canonique pour l'analyse régionale des débits. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 20(4), 367–380. <https://doi.org/10.7202/016911ar>.
- Kay A. L., Jones D. A., Crooks S. M., Calver A., Reynard N. S., 2006. A comparison of three approaches to spatial generalization of rainfall-runoff models, *Hydrology Processessings*, 20: 3953– 3973.
- Khalifa A., 2011. Tentative d'amélioration des techniques de régionalisation des modèles hydrologiques pluie-débit, mémoire de master, université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris & École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts.
- Kisangala M. M., 2008. Analyse des paramètres morphométriques, climatologiques et hydrométriques du bassin du Kasai, dans sa partie congolaise, mémoire de master, université de Kinshasa.
- Krause P., Boyle D. and Bäse F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97.
- Laabidi A., El Hmaidi A., Gourari L., El Abassi M., 2016. Apports du modèle numérique de terrain MNT à la modélisation du relief et des caractéristiques physiques du bassin versant du moyen beht en amont du barrage El Kansera (Sillon Sud Rifain, Maroc). *European Scientific Journal* edition vol.12, No.29 ISSN: 1857 – 7881.
- L'Helgoualc'H R., 2016. Analyse du fonctionnement hydrologique du bassin versant de Bourville et des transferts de pesticides associés. *Science des sols*. ffdumas-01408640f.
- Lamagat P., Albergel J., Bouchez J.M., et Descroix L., 1990. Monographie du fleuve Gambie, ORSTOM-OMVG, 256p.
- Larabi S., 2017. Nouvelles approches de calibration automatique appliquées à un modèle hydrologique conceptuel semi-distribué, thèse de doctorat, université du Québec.
- Lebecherel L., 2015. Sensibilité des calculs hydrologiques à la densité des réseaux de mesure hydrométrique et pluviométrique, thèse de doctorat, IRSTEA, AgroParisTech (Paris), 280 p.

- Mahé G., Paturel J.E., Servat E., Conway D. and Dezetter A., 2005. Impact of land use change on soil water holding capacity and river modeling of the Nakambe River in Burkina-Faso. *Journal of Hydrology*, 300, 1-4, 33-43.
- Martin F., Martin C., Lavabre J. et Folton N., 2004. Fonctionnement hydrologique des bassins versants de roches métamorphiques : exemple du bassin versant des Maurets (massif des Maures, Var, France). *Etudes de Géographie Physique*, UMR 6012 "ESPACE" - Équipe G.V.E. 2004, XXXI, pp.39-69. fthal-00318476f.
- Mouelhi S., 2003. Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier, thèse de doctorat de l'ENGREF, Cemagref (Antony), université Paris VI / 323 pages.
- Nash J. E., Sutcliffe J. V., 1970 : River flow forecasting through conceptual models. Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.
- Ndiaye., 1995. Base de données hydrométriques du bassin versant de la Gambie en amont de Guénoto (Sénégal).2p
- Ndiaye P. M., 2021. Evaluation, calibration et analyse des tendances actuelles et futures de l'évapotranspiration de référence dans le bassin du fleuve Sénégal, thèse de Doctorat, université Gaston Berger de Saint-Louis.
- New M., Hulme M. and Jones P., 2000. Representing twentieth century space-time climate variability. Part II: development of a 1901-1996 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Clim.* 13(13), 2217–2238.
- Niasse M., 2004. Prévenir les conflits et promouvoir la coopération dans la gestion des fleuves transfrontaliers en Afrique de l'Ouest, *Vertig0 – la revue électronique en sciences de l'Environnement* [en ligne], Volume 5, Numéro 1.
- OMM (Organisation Météorologique Mondiale), 1996. Guide des pratiques hydrologiques : acquisition et traitement des données, analyses, prévision et autres applications. Publication OMM no.168.OMM (World Meteorological Organization), Genève, Suisse.
- OMVG (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Gambie), 2008. Projet de gestion intégré des ressources en eau dans le bassin versant du fleuve Kayanga-Gêba, rapport d'évaluation, 46p.
- Ouarda, Taha B.M.J., André S. et Bernard B., 2008. Synthèse des développements récents en analyse régionale des extrêmes hydrologiques. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, vol. 21, no 2, p. 219-232.
- Oudin, Ludovic, Andréassian V., Perrin Ch., Michel C. et Nicolas L.M., 2008. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungaged catchments: A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, vol. 44, no 3.
- Oudin, Ludovic, Kay A., Andréassian V. and Perrin Ch., 2010. Are seemingly physically similar catchments truly hydrologically similar? *Water Resources Research*, vol. 46, no 11, p. W11558.
- Ouédraogo M., Servat E., Paturel J.-E., Lubes-Niel H., Masson J.-M., 1998. Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit autour des années 1970 en Afrique de l'ouest et centrale non-sahélienne. *Proc. of the Abidjan Conf., Ivory Coast, Water Resources Variability in Africa during the XXth Century*, 315-321.

- Paturel J.-E., Servat E., Vassiliadis A., 1995 : Sensitivity of conceptual rainfallrunoff algorithms to errors in input data - case of the GR2M model. *Journal of Hydrology*, 168, 11-125.
- PAS-PNA (Projet d'Appui Scientifique aux processus de Plans Nationaux d'Adaptation), 2008. Etat des lieux des connaissances scientifiques sur les changements climatiques pour les secteurs des ressources en eau, de l'agriculture et de la zone côtière.
- Paturel J. E., Servat E., Dezetter A., Boyer J. F. , Laroche C., Mounirou L., Lubes-Niel H. et Mahé G., 2006. Modélisation hydrologique et régionalisation en Afrique de l'Ouest et centrale. *IAHS Publ.* 307, 2006.
- Pechlivanidis I. G., Jackson B. M., McIntyre N.R. and Wheeler H. S., 2011. Catchment scale hydrological modelling: A review of model types, calibration approaches and uncertainty analysis methods in the context of recent developments in technology and applications. *Global NEST Journal*, 13(3), 193-214.
- Penman, H. L., 1956. Evaporation: an introduction survey. *J. Agric. Sci.* 1, 9–29.
- Perrin C., 2000. Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, thèse de Doctorat, INPG (Grenoble) / Cemagref (Antony).
- Poncelet C., 2016. Du bassin au paramètre : jusqu'où peut-on régionaliser un modèle hydrologique conceptuel ?, thèse de Doctorat, université Pierre et Marie Curie, 366p.
- Roy E., 2000. Méthode régionale d'estimation des débits d'étiage pour la province de Québec, mémoire de master, université de Montréal.
- Serna C.R. 2005. Quelle connaissance hydrométrique minimale pour définir les paramètres d'un modèle pluie-débit ? thèse de Doctorat, ENGREF / Cemagref (Antony), 320 pages.
- Tardif S., 2005. Régionalisation et facteurs de variabilité spatiale des débits saisonniers et extrêmes journaliers au Québec méridional, mémoire de master, université du Québec à trois-rivières.
- Thibault S., 2011. Barycentre d'un réseau fractal, lag-time et temps de concentration. hal-00655526.
- Vrugt J. A., Gupta H. V., Bastidas L. A., Bouten W. and Sorooshian S., 2003. Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrology models. *Water Res. Res.* 39(8), 1214. doi:10.1029/2002WR001746.
- Yapo P. O., Gupta H. V. and Sorooshian S., 1998. Multi-objective global optimization for hydrologic models. *J. Hydrol.*, 204(1-4),83-97.

