

RÉPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union - Discipline – Travail

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



Institut National Polytechnique

Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Yamoussoukro



École Doctorale Polytechnique

N° d'ordre :114/2022

THÈSE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY

Mention : GÉOSCIENCES ET ENVIRONNEMENT

Spécialité : HYDROLOGIE ET ENVIRONNEMENT

Thème :

CONCEPTION D'OUTILS DE PRÉVISION DES EXTRÊMES HYDROLOGIQUES EN RÉGION TROPICALE OUEST AFRICAIN : CAS DU BASSIN VERSANT DE LA MARAHOUÉ EN CÔTE D'IVOIRE

Présentée et soutenue publiquement le vendredi 13 mai 2022 par

ASSOKO Adjoa Victoire Sandrine

JURY

| | | |
|---------------------------|--|--------------------|
| M. BROU Yao Casimir | Professeur Titulaire, INP-HB, Côte d'Ivoire | Président |
| M. KOUASSI Amani Michel | Maître de Conférences, INP-HB, Côte d'Ivoire | Directeur de thèse |
| M. KOUAME Koffi Fernand | Professeur Titulaire, UFHB, Côte d'Ivoire | Rapporteur |
| M. GOULA Bi Tié Albert | Professeur Titulaire, UNA, Côte d'Ivoire | Rapporteur |
| M. KOUASSI Kouakou Lazare | Professeur Titulaire, UJLoG, Côte d'Ivoire | Examineur |

RÉPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union - Discipline – Travail

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



Institut National Polytechnique

Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Yamoussoukro



École Doctorale Polytechnique

N° d'ordre :114/2022

THÈSE

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE FELIX HOUPHOUËT-BOIGNY

Mention : GÉOSCIENCES ET ENVIRONNEMENT

Spécialité : HYDROLOGIE ET ENVIRONNEMENT

Thème :

CONCEPTION D'OUTILS DE PRÉVISION DES EXTRÊMES HYDROLOGIQUES EN RÉGION TROPICALE OUEST AFRICAIN : CAS DU BASSIN VERSANT DE LA MARAHOUÉ EN CÔTE D'IVOIRE

Présentée et soutenue publiquement le vendredi 13 mai 2022 par

ASSOKO Adjoa Victoire Sandrine

JURY

| | | |
|---------------------------|--|--------------------|
| M. BROU Yao Casimir | Professeur Titulaire, INP-HB, Côte d'Ivoire | Président |
| M. KOUASSI Amani Michel | Maître de Conférences, INP-HB, Côte d'Ivoire | Directeur de thèse |
| M. KOUAME Koffi Fernand | Professeur Titulaire, UFHB, Côte d'Ivoire | Rapporteur |
| M. GOULA Bi Tié Albert | Professeur Titulaire, UNA, Côte d'Ivoire | Rapporteur |
| M. KOUASSI Kouakou Lazare | Professeur Titulaire, UJLoG, Côte d'Ivoire | Examineur |

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|------|
| DÉDICACE | i |
| REMERCIEMENTS | iii |
| LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS | v |
| LISTE DES TABLEAUX..... | viii |
| LISTE DES FIGURES..... | ix |
| RÉSUMÉ | xii |
| ABSTRACT..... | xiii |
| INTRODUCTION | 1 |
| PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS..... | 6 |
| CHAPITRE 1. ÉTAT DES CONNAISSANCES | 7 |
| 1.1. CLARIFICATION DES CONCEPTS | 7 |
| 1.2. CARACTÉRISATION HYDRO-CLIMATIQUE | 10 |
| 1.3. MODÉLISATION STATISTIQUE ET SYSTÈMES D'ALERTE PRÉCOCES (SAP) DE DÉBITS EXTRÊMES | 12 |
| 1.4. PROSPECTIVE DES DÉBITS EXTRÊMES | 17 |
| 1.5. CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES | 24 |
| 1.6. PRÉVISION DES DÉBITS EXTRÊMES | 26 |
| CONCLUSION PARTIELLE..... | 33 |
| CHAPITRE 2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE..... | 35 |
| 2.1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE..... | 35 |
| 2.1.1. APERÇU DU FLEUVE BANDAMA | 35 |
| 2.1.2. APERÇU DU FLEUVE MARAHOUÉ..... | 36 |
| 2.1.3. CONTEXTE CLIMATIQUE..... | 37 |
| 2.1.3.1. Régime tropical de transition (climat soudanais)..... | 37 |
| 2.1.3.2. Régime équatorial de transition atténué (climat baouléen)..... | 38 |
| 2.1.3.3. Évolution de la température et de la pluviométrie | 38 |
| 2.1.4. COUVERT VÉGÉTAL | 39 |
| 2.1.5. CADRE GÉOMORPHOLOGIQUE | 40 |
| 2.1.6. HYDROGRAPHIE ET RÉGIME D'ÉCOULEMENT..... | 40 |
| 2.1.7. TYPES DE SOL..... | 41 |
| 2.1.7.1. Sols ferralitiques..... | 41 |
| 2.1.7.2. Les sols sur roches basiques..... | 42 |
| 2.1.7.3. Les sols hydromorphes..... | 42 |
| 2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE..... | 42 |
| 2.2.1. APERÇU GÉOLOGIQUE DE LA CÔTE D'IVOIRE | 42 |
| 2.2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE DE LA MARAHOUÉ..... | 44 |
| 2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE..... | 45 |

| | |
|--|----|
| 2.4. CONTEXTE SOCIO-ÉCONOMIQUE..... | 46 |
| CONCLUSION PARTIELLE..... | 48 |
| DEUXIÈME PARTIE : MATÉRIEL ET MÉTHODES..... | 49 |
| CHAPITRE 3. MATÉRIEL..... | 50 |
| 3.1. PRÉSENTATION DES DONNÉES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES BRUTES | 50 |
| 3.1.1. VARIABLES EXPLICATIVES | 50 |
| 3.1.2. VARIABLES À EXPLIQUER | 50 |
| 3.2. OUTILS INFORMATIQUES | 50 |
| CONCLUSION PARTIELLE..... | 52 |
| CHAPITRE 4. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE..... | 53 |
| 4.1. CARACTÉRISATION HYDRO-CLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA MARAHOUÉ..... | 53 |
| 4.1.1. CARACTÉRISATION DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES | 53 |
| 4.1.1.1. Analyse du régime climatique du bassin versant de la Marahoué | 53 |
| 4.1.1.2. Variations et tendances interannuelles des paramètres climatiques..... | 54 |
| 4.1.2. ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT | 55 |
| 4.1.2.1. Analyse du régime hydrologique saisonnier de la Marahoué | 55 |
| 4.1.2.2. Procédure d'analyse des fréquences de distributions des débits | 55 |
| 4.1.2.3. Variations et tendances interannuelles du débit | 56 |
| 4.1.3. CARACTÉRISATION DES RÉSERVOIRS SOUTERRAINS..... | 56 |
| 4.1.3.1. Méthode de Lang (2007) | 56 |
| 4.1.3.2. Évaluation de la réserve en eau souterraine | 57 |
| 4.2. MODÉLISATION STATISTIQUE ET SYSTÈMES D'ALERTE PRÉCOCES (SAP) DE DÉBITS EXTRÊMES DE LA MARAHOUÉ | 59 |
| 4.2.1. CHOIX DES DONNÉES..... | 59 |
| 4.2.2. MÉTHODOLOGIE DE L'ANALYSE FRÉQUENTIELLE | 60 |
| 4.2.2.1. Hypothèses de l'analyse fréquentielle..... | 60 |
| 4.2.2.2. Choix et estimation des paramètres des modèles statistiques | 61 |
| 4.2.2.2.1. Loi Exponentielle | 62 |
| 4.2.2.2.2. Loi Log normale (loi de Galton) | 62 |
| 4.2.2.2.3. Loi de Weibull..... | 64 |
| 4.2.2.2.4. Loi Gamma..... | 64 |
| 4.2.2.2.5. Loi Pearson de type III (loi Gamma incomplète)..... | 65 |
| 4.2.2.3. Calcul des fréquences empiriques | 65 |
| 4.2.2.4. Sélection des meilleurs ajustements..... | 66 |
| 4.2.2.4.1. Contrôle visuel de l'ajustement | 67 |
| 4.2.2.4.2. Test de khi-deux (χ^2)..... | 67 |
| 4.2.2.4.3. Critères d'information d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC)..... | 68 |
| 4.2.2.5. Détermination des quantiles | 69 |
| 4.2.2.6. Caractérisation des périodes..... | 70 |
| 4.2.3. DÉTERMINATION DES SEUILS DE CRUES | 70 |
| 4.2.4. DÉTERMINATION DES SEUILS D'ÉTIAGES..... | 71 |
| 4.3. PROSPECTIVE DES DÉBITS EXTRÊMES ET CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES DE LA MARAHOUÉ..... | 72 |

| | | |
|------------|--|-----|
| 4.3.1. | PROSPECTIVE DES DÉBITS EXTRÊMES DE LA MARAHOUE | 72 |
| 4.3.1.1. | Définition des indicateurs des débits extrêmes | 72 |
| 4.3.1.2. | Analyse prospective des paramètres climatiques | 73 |
| 4.3.1.3. | Évaluation du modèle GR2M | 74 |
| 4.3.1.3.1. | Description du modèle GR2M | 74 |
| 4.3.1.3.2. | Calage du modèle GR2M | 75 |
| 4.3.1.3.3. | Validation du modèle GR2M | 75 |
| 4.3.1.3.4. | Évaluation de la performance du modèle GR2M | 75 |
| 4.3.1.4. | Simulation des débits extrêmes | 77 |
| 4.3.2. | CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES | 77 |
| 4.3.2.1. | Modélisation hydraulique | 77 |
| 4.3.2.1.1. | Géométrie | 78 |
| 4.3.2.1.2. | Conditions hydrauliques | 78 |
| 4.3.2.1.3. | Calage du modèle et simulation | 78 |
| 4.3.2.2. | Représentation des zones inondables | 78 |
| 4.4. | OUTIL DE PRÉVISION DES DÉBITS DE LA MARAHOUE | 79 |
| 4.4.1. | CHOIX DES VARIABLES ET ARCHITECTURE DES MODÈLES | 80 |
| 4.4.2. | MISE EN FORME DES DONNÉES | 82 |
| 4.4.3. | PROCÉDURE DE CALAGE ET DE VALIDATION DU MODÈLE | 83 |
| 4.4.4. | PERFORMANCE DES MODÈLES EN CALAGE ET EN VALIDATION | 83 |
| 4.4.4.1. | Scores déterministes | 84 |
| 4.4.4.1.1. | Coefficient de corrélation (R) | 84 |
| 4.4.4.1.2. | Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) | 84 |
| 4.4.4.2. | Scores de contingence | 85 |
| | CONCLUSION PARTIELLE | 87 |
| | TROISIÈME PARTIE : RÉSULTATS ET DISCUSSION | 89 |
| | CHAPITRE 5. DYNAMIQUE HYDROCLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA MARAHOUE | 90 |
| 5.1. | CRITIQUE DES DONNÉES | 90 |
| 5.1.1. | DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES | 90 |
| 5.1.2. | DONNÉES HYDROMÉTRIQUES | 97 |
| 5.1.3. | GÉNÉRATION DE PLUIES ET ETP | 100 |
| 5.2. | ANALYSE DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES | 101 |
| 5.2.1. | RÉGIME CLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA MARAHOUE | 101 |
| 5.2.2. | VARIATIONS ET TENDANCES DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES | 103 |
| 5.3. | ANALYSE DU DÉBIT D'ÉCOULEMENT DE LA MARAHOUE | 106 |
| 5.3.1. | ANALYSE DU RÉGIME HYDROLOGIQUE DE LA MARAHOUE | 106 |
| 5.3.2. | ANALYSE DES FRÉQUENCES DE DISTRIBUTION DES DÉBITS | 107 |
| 5.3.3. | VARIATION ET TENDANCES INTERANNUELLES DU DÉBIT | 109 |
| 5.3.4. | ANALYSE DES DÉBITS EXTRÊMES DE LA MARAHOUE | 112 |
| 5.3.4.1. | Analyse des débits moyens maximaux annuels (Q_{MXA}) | 112 |
| 5.3.4.2. | Analyse des débits journaliers maximaux annuels (Q_{JMAX}) | 114 |
| 5.3.4.3. | Analyse des débits moyens minimaux annuels (Q_{MNA}) | 115 |
| 5.3.5. | ANALYSE DES RÉSERVOIRS SOUTERRAINS DU BASSIN VERSANT DE LA MARAHOUE | 117 |
| 5.3.5.1. | Analyse de la fonction capacitive des réservoirs souterrains | 117 |

| | |
|--|-----|
| 5.3.5.2. Analyse de la réserve souterraine du bassin versant de la Marahoué | 118 |
| 5.4. DISCUSSION | 119 |
| CONCLUSION PARTIELLE..... | 123 |
| CHAPITRE 6. SYSTÈMES D'ALERTE PRÉCOCE (SAP) DES DÉBITS DE HAUTES EAUX ET D'ÉTIAGES DE LA MARAHOUE | 123 |
| 6.1. MODÉLISATION STATISTIQUE ET SAP DE DÉBITS DE HAUTES EAUX | 124 |
| 6.1.1. VÉRIFICATION DES HYPOTHÈSES DES DONNÉES DE Q_{JMAX} | 124 |
| 6.1.2. AJUSTEMENT GRAPHIQUE DES DONNÉES DE Q_{JMAX} | 124 |
| 6.1.3. AJUSTEMENT ANALYTIQUE DES DONNÉES DE Q_{JMAX} | 128 |
| 6.1.3.1. Test du Khi-deux d'adéquation appliqué aux Q_{JMAX} | 128 |
| 6.1.3.2. Critères d'AIC et BIC appliqués aux Q_{JMAX} | 129 |
| 6.1.3.3. Caractérisation des périodes de retour des Q_{JMAX} | 129 |
| 6.1.3.4. Détermination des seuils de Q_{JMAX} | 130 |
| 6.2. MODÉLISATION STATISTIQUE ET SAP DE DÉBITS D'ÉTIAGES..... | 131 |
| 6.2.1. VÉRIFICATION DES HYPOTHÈSES DES DONNÉES DE Q_{MNA} | 131 |
| 6.2.2. AJUSTEMENT GRAPHIQUE DES Q_{MNA} | 132 |
| 6.2.3. AJUSTEMENT ANALYTIQUE DES DÉBITS D'ÉTIAGES | 134 |
| 6.2.3.1. Test du Khi-deux d'adéquation appliqué aux données de Q_{MNA} | 134 |
| 6.2.3.2. Critères d'AIC et BIC appliqués aux Q_{MNA} | 134 |
| 6.2.3.3. Caractérisation des périodes de retour des Q_{MNA} | 135 |
| 6.2.3.4. Détermination des seuils d'étiage | 136 |
| 6.3. DISCUSSION | 137 |
| 6.3.1. DÉBITS DE HAUTES EAUX (Q_{JMAX})..... | 137 |
| 6.3.2. DÉBITS D'ÉTIAGES (Q_{MNA})..... | 139 |
| CONCLUSION PARTIELLE..... | 141 |
| CHAPITRE 7. ANALYSE PROSPECTIVE DES DÉBITS EXTRÊMES ET CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES DE LA MARAHOUE..... | 143 |
| 7.1. ANALYSE PROSPECTIVE DES DÉBITS EXTRÊMES | 143 |
| 7.1.1. ANALYSE DES DONNÉES CLIMATIQUES FUTURES..... | 143 |
| 7.1.1.1. Analyse des données pluviométriques futures | 143 |
| 7.1.1.2. Analyse des données d'ETP futures..... | 145 |
| 7.1.2. PERFORMANCE DU MODÈLE GR2M..... | 146 |
| 7.1.3. ANALYSE STATISTIQUE DES DÉBITS FUTURS..... | 147 |
| 7.1.3.1. Analyse des modules et débits mensuels futurs | 147 |
| 7.1.3.2. Analyse des débits extrêmes | 149 |
| 7.1.3.3. Analyse des fréquences d'occurrence | 151 |
| 7.2. CARTOGRAPHIE DES RISQUES D'INONDATION | 155 |
| 7.3. DISCUSSION | 160 |
| 7.3.1. ANALYSE PROSPECTIVE DES DÉBITS EXTRÊMES..... | 160 |
| 7.3.2. SUSCEPTIBILITÉ À L'INONDATION..... | 163 |
| CONCLUSION PARTIELLE..... | 166 |
| CHAPITRE 8. PRÉVISION DES DÉBITS DE LA MARAHOUE..... | 167 |
| 8.1. PERFORMANCE DES DÉBITS TRIMESTRIELS..... | 167 |
| 8.1.1. SCORES DÉTERMINISTES DES DÉBITS TRIMESTRIELS | 167 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 8.1.2. | SCORES DE CONTINGENCE DES DÉBITS TRIMESTRIELS | 168 |
| 8.2. | PERFORMANCE DES DÉBITS MENSUELS | 173 |
| 8.2.1. | SCORES DÉTERMINISTES DES DÉBITS MENSUELS | 173 |
| 8.2.2. | SCORES DE CONTINGENCE DES DÉBITS MENSUELS | 174 |
| 8.3. | DISCUSSION | 179 |
| 8.3.1. | PRÉVISION DES DÉBITS TRIMESTRIELS | 179 |
| 8.3.2. | PRÉVISION DES DÉBITS MENSUELS | 181 |
| | CONCLUSION PARTIELLE..... | 184 |
| | CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES..... | 185 |
| | RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 188 |

DÉDICACE

A DIEU notre Père,
A JÉSUS-CHRIST son Fils notre Sauveur,
A L'ESPRIT-SAINT qui habite en nos cœurs,
Amen.

A SEKA Owochi René

A SEKA René Karl-Yohann

Partis trop tôt. Je vous aime.

REMERCIEMENTS

Enfin, nous y sommes ! Comme s'il s'agissait d'hier, l'année académique 2010-2011 marqua mon entrée au sein de ce prestigieux établissement qu'est l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB). Il m'a fallu du temps, depuis le cycle Technicien Supérieur en Travaux Publics, pour aboutir à cet ouvrage, jonchée d'obstacles. Heureusement, ces épreuves ont été surmontées grâce à un enthousiasme et un optimisme renouvelés. De ce fait, écrire des remerciements, c'est avant tout reconnaître que sans soutiens et conseils, je n'aurais pas pu mener à bien ces travaux. Dans les moments de doute, j'ai toujours pu trouver quelqu'un qui, par une parole ou un geste, m'a transmis l'énergie d'aller de l'avant. Je voudrais donc prendre le temps de remercier chaleureusement toutes ces personnes.

Mes remerciements les plus chaleureux s'adressent à mon Directeur de thèse, Dr. KOUASSI Amani Michel, Maître de Conférences, Enseignant-Chercheur et Directeur du Département Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi) à l'INP-HB. Il a suivi et motivé mon travail, toujours présent et jamais à court d'idées. De plus, il m'a ouvert la voie de l'enseignement et m'a adoptée comme un membre de sa famille. Pour tout cela, à lui et à son épouse (ma tata), je souhaite exprimer toute ma gratitude.

Je remercie les Professeurs YAO Benjamin et YAO Alphonse, respectivement Directeur de l'École Doctorale Polytechnique (EDP) et Directeur de l'École Supérieure des Mines et de Géologie (ESMG), pour m'avoir permis de réaliser cette thèse. Je tiens à adresser une mention spéciale au Dr. DOUDJO Soro pour sa grande disponibilité en dépit de sa charge de travail en tant que Directeur des études de l'École Doctorale.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury pour leur présence, la lecture attentive de la thèse ainsi que pour les remarques lors de la soutenance afin d'améliorer le mémoire.

Mes sincères remerciements au Dr. KOUAKOU Koffi Eugène, Maître de Conférences, pour m'avoir encouragée dans la recherche scientifique. Je lui dis un grand merci pour son soutien.

J'associe à ces remerciements le Dr. KOUDOU Aimé, Maître de Conférences, dont les remarques et suggestions pertinentes pendant la phase d'instruction, ont contribué à l'amélioration de ce document. Merci infiniment !

Mes remerciements vont également au Dr. YAO Blaise, Maître de Conférences, et aux Dr. KOUAME Kassi et KONATE Lassina, dont le concours, les remarques et orientations ont été déterminants pendant la rédaction du mémoire.

Aux membres du jury qui ont accepté de critiquer ce travail, je dis grand merci pour leurs suggestions constructives.

Je tiens également à remercier la Société de Développement et d'Exploitation Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique (SODEXAM), en particulier Dr. DJE Kouakou Bernard, Chef du Département de la Climatologie et des Applications Météorologiques ainsi qu'au Dr. COULIBALY Kolotioloma, Chef du Service Climatologie, pour m'avoir facilité l'accès aux données.

J'exprime toute ma reconnaissance aux Responsables de la Direction Générale du Portefeuille de l'État (DGPE), à commencer par le Directeur Général M. BAMBA Seydou, le Directeur du Portefeuille des Secteurs Primaire et Secondaire (DPSPS), M. ASSI Franck ainsi que les Sous-Directeurs et tous les Chefs de service en particulier M. TOURE Léon.

Je témoigne ma profonde gratitude à cette famille de cœur, ma famille religieuse, à savoir les Pères ADANGBA Victor et KOUAME Hervé, les congrégations des sœurs Ursulines (à la tête ma Mère, Sr MARIE Chantal), des sœurs Carmélites (avec ma grande sœur, Sr CONSOLATA) et des sœurs Missionnaires du travail (avec ma tante, Sr JEANNE D'Arc), pour toutes les prières à mon endroit.

Je pense aussi à mes amis, qui ont accepté au quotidien les bonnes et les mauvaises humeurs, ainsi que les absences du fait ce travail de thèse, KONATE Zakhary, mon aîné OUATTARA Zana, ma grande sœur MANOUAN Véronique, KOUAKOU Michel, ADOMAYAKPOR Atsu, GOSSIO Noé dit M. le Maire, mon jeune tuteur dont la disponibilité me laisse en admiration, OTRON Aba et ZOGBE Emma. Je n'oublie pas non plus les membres du laboratoire, merci d'avoir été là ; il s'agit de NASSA Relwindé Abdoul-Karim, KOUAO Jean-Muller et YAHOT Joël.

Pour terminer, je souhaite enfin remercier très chaleureusement mes parents. Vous avez toujours été là. Merci à ma mère N'GBESSO Yaba Jeanne, pour son immense soutien et sa compréhension. Tu es pour moi un exemple de courage et de sacrifice. Trouve dans ce travail la joie pour moi d'être ta fille et qu'il appelle sur moi ta continuelle bénédiction. Merci à toute ma famille, particulièrement à mon Pépé MERESSO-YAO et mes oncles N'GUESSAN Kotchi (qui reste un modèle pour moi) et N'GUESSAN Olivier, ainsi qu'à leurs familles respectives.

Enfin, que tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce mémoire de Thèse et que ma mémoire, n'a pu honorer à travers ces lignes, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

AGRHYMET : Centre régional de formation et d'application en Agro-Météorologie et en Hydrologie opérationnelle

AIC: Akaike Information Criterion

AIP : Agence Ivoirienne de Presse

ARDCI : Assemblée des Régions et Districts de Côte d'Ivoire

BIC: Bayesian information criterion

BNETD : Bureau National d'Études Techniques et Développement

CCNUCC : Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

CICG : Centre d'Information et de Communication du Gouvernement

CIGN : Centre d'Information Géographique et du Numérique

CIMA : Centre International pour le Monitoring Environnemental

CNO : Centre-Nord-Ouest

CNS : Conseil National de Sécurité

CNTIG : Comité National de Télédétection et d'Information Géographique

DGIHH : Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humaine

DGPE : Direction Générale du Portefeuille de l'État

DMN : Direction de la Météorologie Nationale

DPSPS : Direction du Portefeuille des Secteurs Primaire et Secondaire

EDP : École Doctorale Polytechnique

ETP : Évapotranspiration Potentielle

FAR: Fausse Alerte

FTB : Fonction de Transfert avec Bruit

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

GLAAS: Global Annual Assessment of Sanitation and Drinking-Water

HEC-RAS: Hydrologic Engineering Centers River Analysis System

HSS: Hit Skill Score

INP-HB: Institut National Polytechnique Felix Houphouët Boigny

IRD : Institut de recherche pour le développement

MIE : Ministère des Infrastructures Économiques

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Économiques
OCHA: Office for the Coordination of Humanitarian Affairs
OMM : Organisation Météorologique Mondiale
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
ONAD : Office National de l'Assainissement et du Drainage
ONG: Organisation non gouvernementale
ONPC : Office National de la Protection Civile,
ORSEC : Plan d'Organisation des Secours
ORSTOM : Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer
PMC : Perceptron Multi Couche
PMCI : Persus Mining CI SA
PMY : Persus Mining Yaouré
POD: Probabilité de Détection
PRESAO : Prévisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest
QASO: Débit moyen des hautes eaux calculé sur la période Août-Septembre-Octobre
QFMA : Débit moyen des basses eaux calculé sur la période Février-Mars-Avril
QJFM : Débit moyen des basses eaux calculé sur la période Janvier-Février-Mars
QJMAX : Débit Journalier Maximal Annuel
QMNA : Débit moyen mensuel Minimal Annuel
QMXA: Débit moyen mensuel Maximal Annuel
QSON: Débit moyen des hautes eaux calculé sur la période Septembre-Octobre-Novembre
RLM : Régression Linéaire Multiple
RMSE : Root Mean Square Error (racine carrée de l'erreur quadratique moyenne)
RNA : Réseaux de Neurones Artificiels
RTI : Radiodiffusion Télévision ivoirienne
SACO : Société Africaine de Cacao
SAP : Système d'Alertes Précoces
SITAB : Société Ivoirine des Tabacs
SODEXAM: Société d'Exploitation et de Développement Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique
SOLIBRA : Société de Limonaderies et Brasseries d'Afrique
TSO : Températures de Surface de l'Océan

UAI: Unité Agricole Intégrée

UNISDR: United Nations International Strategy for Disaster Reduction

UNDRR: United Nations Office for Disaster Risk Reduction

UVICOCI : Union des Villes et Communes de Côte d'Ivoire,

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|-----|
| Tableau I : Classification de l'indice De Martonne..... | 54 |
| Tableau II : Formules de probabilités empiriques utilisées dans la pratique..... | 66 |
| Tableau III: Seuils d'intensité et de probabilité d'occurrence (Werren et Lasri, 2014)..... | 79 |
| Tableau IV : Code de couleur de la matrice suisse et sa signification (Werren et Lasri, 2014)..... | 79 |
| Tableau V: Table de contingence (Hamatan et al., 2004) | 85 |
| Tableau VI : Stations de référence | 94 |
| Tableau VII : Caractéristiques statistiques des données pluviométriques (mm) du bassin versant de la Marahoué (1961-2017)..... | 94 |
| Tableau VIII : Corrélacion entre cumuls de pluie des périodes des hautes eaux et débits moyens de basses eaux à la station de Bouaflé (1961-2017)..... | 118 |
| Tableau IX : Corrélacion entre cumuls de pluie et débits moyens de la période de basses eaux à la station de Bouaflé (1961-2017) | 118 |
| Tableau X : Résultats des tests d'hypothèses appliqués aux Q_{JMAX} | 124 |
| Tableau XI : Test de χ^2 appliqué aux Q_{JMAX} | 128 |
| Tableau XII : Critères AIC et BIC appliqués aux lois de probabilité pour les Q_{JMAX} de Bouaflé..... | 129 |
| Tableau XIII : Fréquences de retour des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé (1961-2017) | 129 |
| Tableau XIV : Quantiles (X_T) et intervalles de confiance des Q_{JMAX} de la Marahoué (Bouaflé)..... | 130 |
| Tableau XV : Résultats des tests d'hypothèses appliqués aux Q_{MNA} de Bouaflé (1961-2017) | 131 |
| Tableau XVI : Test de χ^2 appliqué aux Q_{MNA} de la station de Bouaflé (1961-2017)..... | 134 |
| Tableau XVII : Critères AIC et BIC appliqués aux lois de probabilité pour les Q_{MNA} de la station de Bouaflé | 135 |
| Tableau XVIII : Fréquences de retour des Q_{MNA} de la station de Bouaflé (1961-2017) | 135 |
| Tableau XIX : Quantiles des Q_{MNA} de la station de Bouaflé (1961-2017) | 136 |
| Tableau XX : Performance du modèle GR2M | 146 |
| Tableau XXI : Caractéristiques statistiques des débits extrêmes de la Marahoué sur la période 2031-2060 | 150 |
| Tableau XXII : Caractéristiques statistiques des débits extrêmes de la Marahoué sur la période 2071-2100 | 150 |
| Tableau XXIII : Tableau récapitulatif des zones à risques dans la ville de Bouaflé | 156 |
| Tableau XXIV : Scores déterministes des modèles RNA de prévision des débits trimestriels en calage | 167 |
| Tableau XXV : Scores déterministes des modèles RNA de prévision des débits trimestriels en validation | 168 |
| Tableau XXVI : Robustesse des modèles RNA de prévision des débits trimestriels | 168 |
| Tableau XXVII : Scores de contingence des modèles RNA de prévision des débits trimestriels en validation | 169 |
| Tableau XXVIII : Scores déterministes des modèles RNA de prévision des débits mensuels en calage | 173 |
| Tableau XXIX : Scores déterministes des modèles RNA de prévision des débits mensuels en validation .. | 174 |
| Tableau XXX : Robustesse des modèles RNA de prévision des débits mensuels | 174 |
| Tableau XXXI : Scores de contingence des modèles RNA de prévision de débits mensuels en validation .. | 175 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|-----|
| Figure 1 : Schéma d’alerte SODEXAM (Plateforme humanitaire du secteur privé de Côte d’Ivoire, 2019) . | 15 |
| Figure 2 : Algorithme pour la conduite d’une étude prospective (Bouzaïane et Mouelhi, 2008) | 17 |
| Figure 3 : Classification des risques de catastrophes naturelles (Plateforme humanitaire du secteur privé de Côte d’Ivoire, 2019) | 18 |
| Figure 4: Nombre de catastrophes climatiques majeures en Afrique de l’Ouest de 1980 à 2013 (EM-DAT, 2017 in Gemenne et al., 2017)..... | 20 |
| Figure 5 : Structure d’un neurone artificiel (Voyant, 2011)..... | 30 |
| Figure 6 : Exemple d’architecture de RNA avec deux couches cachées et deux sorties (Voyant, 2011) | 31 |
| Figure 7 : Carte de présentation du bassin versant du Bandama | 36 |
| Figure 8 : Localisation géographique de la zone d’étude (SODEXAM, 2019)..... | 37 |
| Figure 9 : Évolution de la température moyenne mensuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017)..... | 38 |
| Figure 10 : Évolution de la pluviométrie moyenne mensuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017)..... | 39 |
| Figure 11 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Marahoué (SODEXAM, 2019) | 40 |
| Figure 12 : Régime hydrologique du bassin versant de la Marahoué (1961-2017)..... | 41 |
| Figure 13: Schéma simplifié des ensembles géologiques en Côte d’Ivoire (Ouattara, 1998) | 43 |
| Figure 14 : Bassin sédimentaire de la Côte d’Ivoire (Aka, 1991 in Assalé, 2013)..... | 44 |
| Figure 15 : Carte géologique du bassin versant de la Marahoué (Delor et al., 1995)..... | 45 |
| Figure 16 : Matrice de danger Suisse (Werren et Lasri, 2014) | 79 |
| Figure 17 : Courbes des résidus de précipitation aux stations de Kani (a) et Madinani (b)..... | 91 |
| Figure 18 : Courbes des résidus de précipitation aux stations de Bouaké (a) et Béoumi (b) | 92 |
| Figure 19 : Courbes des résidus de précipitation aux stations de Vavoua (a) et Bouaflé (b). | 93 |
| Figure 20 : Courbes des résidus de température à la station de Yamoussoukro..... | 95 |
| Figure 21 : Courbes des résidus de température à la station de Korhogo..... | 96 |
| Figure 22 : Comparaison des débits moyens annuels de la station de Bouaflé à ceux de Séguéla-Béoumi.... | 98 |
| Figure 23 : Comparaison des Q_{MNA} de la station de Bouaflé à ceux de Séguéla-Béoumi | 98 |
| Figure 24 : Comparaison des Q_{MXA} de la station de Bouaflé à ceux de Séguéla-Béoumi | 99 |
| Figure 25 : Nuage de points entre les Q_{JMAX} de la station de Bouaflé et ceux de Séguéla Béoumi | 99 |
| Figure 26 : Comparaison entre pluies observées et pluies simulées par les chaînes de Markov : a) pluies annuelles et b) pluies mensuelles | 100 |
| Figure 27 : Comparaison entre ETP observées et ETP simulées par les chaînes de Markov : a) ETP annuelles et b) ETP mensuelles..... | 101 |
| Figure 28 : Courbe ombrothermique du bassin versant de la Marahoué (1961-2017) | 102 |
| Figure 29 : Indices de De Martonne du bassin versant de la Marahoué (1961-2017)..... | 102 |
| Figure 30 : Variation de la pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017) | 103 |
| Figure 31 : Indices pluviométriques annuels du bassin versant de la Marahoué (1961-2017) | 103 |
| Figure 32 : Variation de la température annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017) | 104 |
| Figure 33 : Indices thermiques annuels du bassin versant de la Marahoué (1961-2017)..... | 104 |
| Figure 34 : Tendances de la température annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017)..... | 105 |
| Figure 35 : Variation de l’ETP annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017)..... | 105 |
| Figure 36 : Indices d’ETP annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017) | 106 |
| Figure 37 : Tendances de l’ETP annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017) | 106 |
| Figure 38 : Régime hydrologique de la Marahoué à Bouaflé (1961-2017)..... | 107 |
| Figure 39 : Coefficients de débit du bassin versant de la Marahoué (1961-2017) | 107 |
| Figure 40 : Fréquences de débits moyens annuels de la Marahoué (1961-2017)..... | 108 |
| Figure 41 : Fréquences de débits mensuels de la Marahoué (1961-2017)..... | 109 |

| | |
|--|-----|
| Figure 42 : Variation du module de la Marahoué (1961-2017)..... | 110 |
| Figure 43 : Variation des indices de débits sur la Marahoué (1961-2017)..... | 110 |
| Figure 44 : Variations mensuelles des débits sur les différentes périodes homogènes | 111 |
| Figure 45 : Variation du débit spécifique de la Marahoué (1961-2017) | 111 |
| Figure 46 : Variation de la lame d'eau de la Marahoué (1961-2017) | 112 |
| Figure 47 : Variation interannuelle des Q_{MXA} de la Marahoué (1961-2017)..... | 112 |
| Figure 48 : Fréquence d'occurrence mensuelle des Q_{MXA} de la Marahoué (1961-2017)..... | 113 |
| Figure 49 : Fréquences des Q_{MXA} de la Marahoué (1961-2017)..... | 113 |
| Figure 50 : Fréquences cumulées des Q_{MXA} de la Marahoué (1961-2017)..... | 114 |
| Figure 51 : Variation interannuelle des Q_{JMAX} de la Marahoué (1961-2017)..... | 114 |
| Figure 52 : Fréquences des Q_{JMAX} de la Marahoué (1961-2017)..... | 115 |
| Figure 53 : Fréquences cumulées des Q_{JMAX} de la Marahoué (1961-2017)..... | 115 |
| Figure 54 : Variation interannuelle des Q_{MNA} de la Marahoué (1961-2017)..... | 116 |
| Figure 55 : Fréquence d'occurrence mensuelle des Q_{MNA} de la Marahoué (1961-2017)..... | 116 |
| Figure 56 : Fréquences des Q_{MNA} de la Marahoué (1961-2017)..... | 117 |
| Figure 57 : Fréquences cumulées des Q_{MNA} de la Marahoué (1961-2017)..... | 117 |
| Figure 58 : Courbe de tarissement de la Marahoué (1961-2017) | 119 |
| Figure 59 : Évolution des probabilités empiriques des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé (1961-2017) | 125 |
| Figure 60 : Ajustement des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé à la loi Exponentielle (1961-2017)..... | 125 |
| Figure 61 : Ajustement des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé à la loi de Weibull (1961-2017) | 126 |
| Figure 62 : Ajustement des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé à la loi Log-normale (1961-2017)..... | 126 |
| Figure 63 : Ajustement des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé à la loi Gamma (1961-2017) | 127 |
| Figure 64 : Ajustement des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé à la loi Pearson de type III (1961-2017) | 127 |
| Figure 65 : Comparaison de l'ajustement des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé (1961-2017) | 128 |
| Figure 66 : Périodes de retour des Q_{JMAX} à la station de Bouaflé (1961-2017)..... | 130 |
| Figure 67 : Seuils de crue en rapport avec les $Q_{JMAX-100}$ à la station de Bouaflé | 131 |
| Figure 68 : Évolution des probabilités empiriques des Q_{MNA} de la station de Bouaflé (1961-2017) | 132 |
| Figure 69 : Ajustement des Q_{MNA} de la station de Bouaflé à la loi Gamma (1961-2017)..... | 132 |
| Figure 70 : Ajustement des Q_{MNA} de la station de Bouaflé à la loi Weibull (1961-2017)..... | 133 |
| Figure 71 : Ajustement des Q_{MNA} de la station de Bouaflé à la loi Exponentielle (1961-2017)..... | 133 |
| Figure 72 : Comparaison de l'ajustement des Q_{MNA} de la station de Bouaflé (1961-2017) | 134 |
| Figure 73 : Périodes de retour des Q_{MNA} à la station de Bouaflé..... | 136 |
| Figure 74 : Seuils d'étiage en rapport avec les Q_{MNA-5} à la station de Bouaflé..... | 137 |
| Figure 75 : Moyennes (a) et écart-types (b) mensuels de la pluie sur le bassin versant de la Marahoué aux horizons passé (1961-1990) et futurs (2031-2060 et 2071-2100)..... | 143 |
| Figure 76 : Indices annuels normalisés des pluies sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (b). | 144 |
| Figure 77 : Biais mensuels interannuels de la pluviométrie sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (a) au niveau du bassin versant de la Marahoué. | 144 |
| Figure 78 : Moyennes (a) et écart-types (b) mensuels de l'ETP sur le bassin versant de la Marahoué aux horizons passés et futurs. | 145 |
| Figure 79 : Indices annuels normalisés des ETP sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (b)..... | 145 |
| Figure 80 : Biais mensuels interannuels de l'ETP sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (b) au niveau du bassin versant de la Marahoué..... | 146 |
| Figure 81 : Débits observés et simulés en phase de calage par GR2M | 147 |
| Figure 82 : Débits observés et simulés en phase de validation par GR2M | 147 |
| Figure 83 : Indices annuels normalisés des débits sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (b) | 148 |
| Figure 84 : Moyennes (a) et écart-types (b) mensuels interannuels des débits à la station de Bouaflé aux horizons passés et futurs | 148 |
| Figure 85 : Biais mensuels interannuels du débit sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (b)..... | 149 |

| | |
|--|-----|
| Figure 86 : Biais des indicateurs de débits extrêmes de la Marahoué sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (b) | 151 |
| Figure 87 : Fréquences d'occurrence mensuelle des Q_{MNA} (a) et Q_{MXA} (b) sur la normale de référence 1961-1990 à la station de Bouaflé | 152 |
| Figure 88 : Fréquences d'occurrence mensuelle des Q_{MNA} (a) et Q_{MXA} (b) sur la normale 2031-2060 à la station de Bouaflé | 152 |
| Figure 89 : Fréquences d'occurrence mensuelle des Q_{MNA} (a) et Q_{MXA} (b) sur la normale 2071-2100 à la station de Bouaflé | 152 |
| Figure 90 : Fréquences de distribution (a) et cumulées (b) des Q_{MNA} sur la normale 1961-1990 à la station de Bouaflé. | 153 |
| Figure 91 : Fréquences de distribution (a) et cumulées (b) des Q_{MNA} sur la normale 2031-2060 à la station de Bouaflé | 153 |
| Figure 92 : Fréquences de distribution (a) et cumulées (b) des Q_{MNA} sur la normale 2071-2100 à la station de Bouaflé. | 154 |
| Figure 93 : Fréquences de distribution (a) et cumulées (b) des Q_{MXA} sur la normale 1961-1990 à la station de Bouaflé. | 154 |
| Figure 94 : Fréquences de distribution (a) et cumulées (b) des Q_{MXA} sur la normale 2031-2060 à la station de Bouaflé | 154 |
| Figure 95 ; Fréquences de distribution (a) et cumulées (b) des Q_{MXA} sur la normale 2071-2100 à la station de Bouaflé | 155 |
| Figure 96 : Zones inondables pour une période de retour de 10 ans à Bouaflé..... | 157 |
| Figure 97 : Zones inondables pour une période de retour de 50 ans à Bouaflé..... | 158 |
| Figure 98 : Zones inondables pour une période de retour de 100 ans à Bouaflé..... | 159 |
| Figure 99 : Débits trimestriels observés et simulés du modèle 1 en validation (1991-2017) :..... | 170 |
| Figure 100 : Débits trimestriels observés et simulés du modèle 2 en validation (1991-2017) :..... | 171 |
| Figure 101 : Débits trimestriels observés et simulés du modèle 3 en validation (1991-2017) :..... | 172 |
| Figure 102 : Débits mensuels observés et simulés du modèle 1 en validation (1991-2017) :..... | 176 |
| Figure 103 : Débits mensuels observés et simulés du modèle 2 en validation (1991-2017) :..... | 177 |
| Figure 104 : Débits mensuels observés et simulés du modèle 3 en validation (1991-2017) :..... | 178 |

RÉSUMÉ

La présente étude vise à concevoir des outils de prévision des extrêmes hydrologiques sur le bassin versant de la Marahoué à l'exutoire de Bouaflé en Côte d'Ivoire. Pour atteindre cet objectif, les données climatologiques au pas mensuel (pluviométrie, températures, et évapotranspiration potentielle) et les données hydrométriques (débits) aux pas mensuel et journalier sont utilisées sur la période 1961-2017. La méthodologie employée, s'est basée sur quatre grands axes. D'abord la caractérisation hydro-climatique, à travers l'indice de Gaussen, l'indice de De Martonne et l'indice normalisé, suivi de l'analyse de la fréquence de distribution et l'évaluation des réserves souterraines. Ensuite, la modélisation statistique et les Systèmes d'Alertes Précoces (SAP) ont été traités sur la base de l'analyse fréquentielle. Ainsi, les lois de distribution qui s'ajustent au mieux aux débits extrêmes ont été retenues en s'appuyant sur les représentations graphiques et des tests statistiques (test de Khi-deux, BIC et AIC). De même, les seuils de vigilance, d'alerte et de crise ont été déterminés pour les crues et les étiages. Puis l'étude prospective et la cartographie des zones inondables, ont permis la mise en œuvre du modèle GR2M, ainsi que la définition de nouveaux indicateurs de débits extrêmes suivant les horizons 2031-2060 et 2071-2100. La cartographie des zones inondables a été établie avec le logiciel HEC-RAS. Enfin, la prévision des débits extrêmes, réalisée à l'aide des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA), a permis de concevoir, caler et valider des modèles afin d'évaluer leur performance. Il ressort des travaux que le bassin versant de la Marahoué appartient à un régime unimodal à deux saisons et de type tropical humide. L'analyse des fréquences de distribution des débits a montré qu'au niveau des débits annuels ($[32-62] \text{ m}^3/\text{s}$) comme des débits mensuels ($[0-80] \text{ m}^3/\text{s}$), les classes modales sont confondues aux classes médianes. Les réserves souterraines évaluées sont faibles avec un coefficient de tarissement moyen de $3,4 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$, une durée moyenne de tarissement de près d'un mois et un volume d'eau mobilisée par les aquifères de $0,92 \text{ km}^3$. Les résultats de l'analyse fréquentielle ont montré que les Q_{JMAX} et Q_{MNA} de la Marahoué suivent préférentiellement la loi Gamma qui représente le modèle statistique qui s'ajuste au mieux à ces données. Ainsi, la loi Gamma a été utilisée pour la définition du système d'alertes précoces des crues [seuils de vigilance ($927 \text{ m}^3/\text{s}$), d'alerte ($1030 \text{ m}^3/\text{s}$) et de crise ($1133 \text{ m}^3/\text{s}$)] et des étiages [seuils de vigilance ($0,156 \text{ m}^3/\text{s}$), d'alerte ($0,142 \text{ m}^3/\text{s}$) et de crise ($0,127 \text{ m}^3/\text{s}$)]. L'étude prospective a mis en évidence que sur les horizons futurs (2031-2060 et 2071-2100) la variation moyenne de la pluie annuelle s'élève à +16% et celle de l'ETP évolue à +3%. S'agissant des débits extrêmes, la tendance des débits des basses eaux laisse transparaître une baisse de 22%. Par ailleurs, la tendance des débits des hautes eaux présente une baisse drastique entre les estimations passées et celles à venir avec une moyenne de 85%. En outre, les cartes des zones inondables établies pour les périodes de retour de 10, 50 et 100 ans, montrent que les sites occupés d'une part par la Solibra, et d'autre part par l'hôtel Lopoifla et le complexe hôtelier le Pacifique, présentent respectivement des niveaux de danger élevé et moyen sur toutes les périodes de retour définies. Les différentes architectures des modèles de prévision des débits trimestriels et mensuels ont révélé que les prévisions des débits trimestriels sont plus performantes que ceux des débits mensuels. En effet, en phase de validation les valeurs du Nash des débits trimestriels présentent un maximum de 81%, contre 79% pour les débits mensuels. Cette étude a également montré que la prévision au délai de 1 mois présente les meilleurs résultats, en particulier avec l'ajout des variables explicatives telles que la température et l'ETP en plus de la pluie. Les résultats obtenus ont montré la capacité des RNA, à prévoir de façon satisfaisante les débits du bassin versant de la Marahoué.

Mots clés : Prévision, Débit extrême, Réseaux de Neurones Artificiels, Bassin versant de la Marahoué, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

This study aims to design tools for predicting hydrological extremes in the Marahoué watershed at the Bouaflé outlet in Côte d'Ivoire. To achieve this objective, climatological data at monthly intervals (rainfall, temperature, and potential evapotranspiration) and hydrometric data (flows) at monthly and daily intervals are used over the period 1961-2017. The methodology used is based on four main axes. First the hydro-climatic characterization, through the Gausson index, the De Martonne index and the normalized index, followed by the analysis of the distribution frequency and the evaluation of underground reserves. Then, statistical modeling and Early Warning Systems (EWS) were treated on the basis of frequency analysis. Thus, the distribution laws that best fit extreme flows were selected based on graphical representations and statistical tests (Khi-square test, BIC and AIC). Similarly, vigilance, alert and crisis thresholds have been determined for floods and low flows. Then the prospective study and the mapping of the flood zones, allowed the implementation of the GR2M model, as well as the definition of new indicators of extreme flows according to the horizons 2031-2060 and 2071-2100. The mapping of the flood zones was established with the HEC-RAS software. Finally, the prediction of extreme flows, carried out using Artificial Neural Networks (ANN), has made it possible to design, calibrate and validate models in order to assess their performance. It appears from the work that the Marahoué watershed belongs to a two-season unimodal regime of the humid tropical type. The analysis of flow distribution frequencies showed that at the level of annual flows ($[32-62]$ m³/s) as well as monthly flows ($[0-80]$ m³/s), the modal classes are confused with the classes medians. The underground reserves evaluated are low with an average depletion coefficient of $3.4 \cdot 10^{-2} \text{ d}^{-1}$, an average duration of depletion of almost a month and a volume of water mobilized by the aquifers of 0.92 km³. The results of the frequency analysis showed that the Q_{JMAX} and Q_{MNA} of Marahoué preferentially follow the Gamma law which represents the statistical model which best fits these data. Thus, the Gamma law was used to define the early warning system for floods [vigilance (927 m³/s), alert (1030 m³/s) and crisis (1133 m³/s) thresholds] and low water levels [vigilance (0.156 m³/s), alert (0.142 m³/s) and crisis (0.127 m³/s) thresholds]. The prospective study has shown that over the future horizons (2031-2060 and 2071-2100) the average variation in annual rainfall amounts to +16% and that of PET evolves to +3%. With regard to extreme flows, the trend in low water flows shows a decrease of 22%. In addition, the trend of high water flows shows a drastic drop between past estimates and those to come with an average of 85%. In addition, the maps of the flood zones established for the return periods of 10, 50 and 100 years show that the sites occupied on the one hand by the Solibra, and on the other hand by the Lopoifla hotel and the hotel complex the Pacific, present respectively high and medium danger levels over all defined return periods. The different architectures of the quarterly and monthly flow forecasting models revealed that quarterly flow forecasts perform better than monthly flow forecasts. Indeed, during the validation phase, the Nash values of quarterly debits present a maximum of 81%, against 79% for monthly debits. This study also showed that the 1-month lead time forecast presents the best results, especially with the addition of explanatory variables such as temperature and PET in addition to rain. The results obtained showed the capacity of the ANNs to satisfactorily predict the flows in the Marahoué watershed.

Keywords: Forecast, Extreme flow, Artificial Neural Networks, Marahoué watershed, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION

De tout temps, l'eau a été un facteur prédominant dans le développement socio-économique de l'homme. Par le passé, les grandes civilisations antiques ont privilégié l'exploitation des berges des grandes étendues d'eau telles que le Nil et les accès à la mer, endroits où l'homme avait un meilleur accès à la ressource eau. Au fil du temps, l'homme a essayé de domestiquer l'eau notamment au moyen de barrages pour l'hydroélectricité, l'irrigation, les exploitations agricoles et autres aménagements hydrauliques. Ainsi, les ressources naturelles de manière générale, et la ressource eau en particulier, sont devenues des facteurs à part entière de productivité et de développement.

Cependant, avec les révolutions industrielles et l'urbanisation qui s'en est suivie, les productivités agricole et industrielle n'ont cessé d'augmenter, ce qui s'est traduit par une pression accrue de l'homme sur son environnement naturel. De plus, avec l'explosion démographique, les besoins en ressources naturelles se sont considérablement accrus, et les problèmes de répartition et de disponibilité de l'eau se sont érigés au nombre des problématiques les plus urgentes. Alors qu'elles étaient considérées comme inépuisables, les ressources naturelles redeviennent un facteur limitant le développement économique, entraînant la hausse des prix de l'énergie et des matières premières industrielles. On assiste également à une « *inversion des pénuries* » (Grandjean et Jancovivi, 2006) ; car dans le même temps l'offre de travail humain connaît une évolution inverse et devient surabondante (chômage) (Tritz, 2013). L'apparition de la question du réchauffement climatique à la fin des années 1980 est l'un des symptômes manifestes de la problématique de l'usage rationnel des ressources naturelles. Le protocole de Kyoto signé en 1997 témoigne d'une prise de conscience des Nations Unies à agir de façon concertée pour une réorientation du développement économique à l'échelle globale. De même, la protection de ce bien vital a motivé la création de plusieurs programmes, notamment celui des Nations Unies (UN-Water), et d'une évaluation annuelle [Global Annual Assessment of Sanitation and Drinking-Water (GLAAS)], coordonnée par l'OMS.

Néanmoins, la volonté de coordonner les actions au niveau des États ne s'est pas toujours traduite par la prise de mesures nationales idoines au sein des pays signataires du fait de la diversité des enjeux d'urbanisation et des priorités de développement économique. Or, force est de constater que l'enjeu climatique et par conséquent la gestion des ressources en eau impacte fortement les autres défis entre autres la pression démographique, l'assainissement, le drainage, la production alimentaire, la santé, la protection contre les inondations et la sécheresse. Ainsi, la gestion de la ressource en eau passe nécessairement par une étude approfondie de celle-ci.

Comparativement aux pays ayant impulsé les révolutions industrielles et innovations technologiques postérieures, le continent africain semblait à l'abri de la problématique d'optimisation des ressources

naturelles car présentant des végétations globalement plus généreuses et une bonne disponibilité de la ressource en eau. Cependant, ce relatif avantage a laissé place à une accélération des perturbations climatiques à partir des années 1970. Comme le montre les travaux de Tangara (2005), Aguiar (2009), Noufé (2011), Soro (2011), Kodja (2018), Yao *et al.* (2019), l'Afrique n'est pas suffisamment couverte face aux perturbations climatiques et impacts subséquents. De plus si aucune mesure concrète n'est prise en matière de climat et de développement, jusqu'à 32 millions de personnes en Afrique de l'Ouest pourraient être contraintes à se déplacer à l'intérieur de leur pays d'ici 2050. À titre illustratif le Niger à lui seul pourrait compter jusqu'à 19,1 millions de migrants climatiques internes, soit près de 30,26 % de sa population (Rigaud *et al.*, 2021).

La variabilité climatique s'est manifestée par une baisse considérable des régimes de précipitations et d'écoulements en Afrique de l'Ouest. Ces dernières décennies, les précipitations sur l'ensemble ouest-africain connaissent d'extrêmes variations (Servat *et al.*, 1998 ; Ardoin, 2004). La baisse des pluies a entraîné celle des ressources en eau de surface et souterraine et par conséquent, la baisse de la disponibilité en eau (Yao *et al.*, 2012).

Les changements climatiques se manifestent par des anomalies et des crises plus ou moins aléatoires, parfois des phases successives d'excédents (inondations) et dans d'autres cas des déficits hydriques (sécheresse). Entre 2010 et 2016, en Afrique de l'Ouest, 715 projets de réduction du risque hydro-climatique, d'adaptation et de résilience au changement climatique ont été lancés pour un montant de 7,3 milliards de dollars américains (Tiepolo *et al.*, 2018).

La Côte d'Ivoire, n'étant pas épargnée, elle subit également depuis quelques décennies, les effets des changements causés par les phénomènes climatiques extrêmes. En effet, les inondations ont un impact considérable sur la population, touchant environ 60 000 personnes par an, soit 0,3% de la population totale de la Côte d'Ivoire (CIMA et UNISDR, 2018). Par ailleurs, les dommages dans la seule ville d'Abidjan ont été évalués à plus de 18 milliards de FCFA, et les besoins suite à ces inondations urbaines, s'élèvent à près de 200 milliards de francs CFA (AIP, 2018). Cette situation a nécessité des efforts soutenus du gouvernement ivoirien afin de trouver des solutions d'urgence. S'il est vrai que les raisons des événements causés par les extrêmes sont variés en fonction de la zone impactée (secteur rural ou zone urbaine), il n'en demeure pas moins qu'elles restent très inquiétantes. De ce fait, c'est à juste titre que nous évoquons comme source des inondations, les crues au niveau des cours d'eaux, les canalisations non appropriées ou mal entretenues, l'occupation anarchique des bassins d'orage, l'obstruction des ouvrages d'assainissement et drainage avec les déchets issus du nettoyage des rues, l'urbanisation incontrôlée des zones inondables, la très forte paupérisation d'une frange de la population et la prolifération des habitations précaires dans les zones inondables ; l'imperméabilisation due au développement des villes, l'eau ne s'infiltrant plus et surcharge les systèmes

d'évacuation du sol. En ce qui concerne les sécheresses, elles sont provoquées par le manque de pluie sur une longue période. Cependant, au-delà des chiffres, l'expérience de la catastrophe constitue pour les riverains une épreuve marquante, de dénuement et de pertes aussi bien matérielles qu'humaines. Les sinistrés doivent parfois recourir à des hébergements de fortune où, ils se retrouvent destinataires de dons et d'aides d'urgence. La perte des objets personnels affecte en second lieu la mémoire des sinistrés pour qui la destruction des souvenirs peut provoquer des formes d'amnésie et rend plus difficile la transmission de la biographie familiale aux générations futures. De ce fait, les récents événements rencontrés en Côte d'Ivoire (répartis sur l'ensemble du territoire) ont montré la nécessité d'anticiper les phénomènes extrêmes et d'essayer dans la mesure du possible de le prévoir ; en témoigne les inondations survenues en 2018, dans de grands centres urbains tels que les villes d'Abidjan, Grand-Lahou, Agboville, Aboisso, Tiassalé, N'Douci, Zuénoula et Bouaflé pour ne citer que celles-ci. A l'inverse, des épisodes prolongés de pénuries d'eau ont été observés particulièrement dans les parties Nord et Centre du pays (villes de Bouaké, Tiébissou, Niakara, Bouna et Odienné). Dès lors, connaître le comportement hydrologique d'un bassin versant devient une priorité dans la gestion des ressources en eau.

Le bassin versant de la Marahoué a été fortement éprouvé par les extrêmes hydrologiques (crue et étiage). Les feux de brousse en 2015, déclenchés pendant la période de sécheresse dans plusieurs villages proches de la ville de Bouaflé (Attossé, Ténikro, Akouébo et Kabakourouso), ont occasionné des morts et de nombreux dégâts matériels (AIP, 2016). En 2018, les inondations ont affecté plus de 10 mille personnes dans les villes de Bouaflé et Zuénoula (Région de la Marahoué). Fort de ces constats, il apparaît que le bassin versant de la Marahoué à l'exutoire de Bouaflé est caractérisé par une variabilité pluvio-hydrologique où différents phénomènes hydro-climatiques extrêmes se côtoient.

À ce jour, peu d'études ont abordé les débits extrêmes en associant tant l'aspect étiage que l'aspect crue au pas de temps mensuel ou autre saisonnalité, en lien avec un système d'alertes précoces de crue et d'étiage (seuil d'alerte, seuil de tolérance et seuil de crise). Un système d'alerte permettrait de prévoir le dépassement des seuils de débit et favoriserait la prise de mesures devant concourir à protéger les populations et les biens sur le bassin versant de la Marahoué. C'est dans ce contexte que cette recherche intitulée « Conception d'outils de prévision des extrêmes hydrologiques en région tropicale ouest africaine : cas du bassin versant de la Marahoué en Côte d'Ivoire » a été initiée. Elle suscite l'interrogation principale suivante : Quels outils d'aide faut-il élaborer pour une meilleure prévision des extrêmes hydrologiques ?

La réponse à cette préoccupation amène à formuler l'hypothèse selon laquelle « les systèmes d'alertes précoces, la cartographie des zones inondables et les modèles statistiques sont des outils qui peuvent

aider à la prévision des débits extrêmes ». L'objectif de ce travail est de concevoir des outils de prévision des extrêmes hydrologiques sur le bassin versant de la Marahoué. Pour atteindre cet objectif principal, quatre (4) objectifs spécifiques ont été définis. Il s'agit de :

- i) caractériser la variabilité hydro-climatique du bassin versant de la Marahoué sur la période 1961-2017;
- ii) définir un système d'alertes précoces (SAP) de débits extrêmes de la Marahoué ;
- iii) réaliser une prospective des débits extrêmes et une cartographie des zones inondables de la Marahoué ;
- iv) concevoir des modèles de prévision des débits extrêmes.

La présente thèse est structurée en trois (03) grandes parties regroupant huit (08) chapitres. La première partie comprend les chapitres 1 et 2 qui décrivent les généralités relatives au thème. Le chapitre 1 présente un état des connaissances relatives à la variabilité hydro-climatique, aux systèmes d'alertes précoces, à la démarche prospective sur des horizons futurs, à la cartographie des zones à risque d'inondation et la prévision des débits extrêmes. Le chapitre 2 décrit l'environnement physique de la zone d'étude. Les aspects qui ont été abordés sont entre autres le climat, la végétation, la géomorphologie, la géologie et le contexte humain.

La deuxième partie rassemble les chapitres 3 et 4 qui mettent en évidence l'ossature méthodologique. Le chapitre 3 décrit l'ensemble des données et matériel utilisés. Il s'agit notamment de la critique des données climatiques au pas annuel et de la présentation des outils informatiques. Le chapitre 4 est consacré à la méthodologie de l'étude. Les méthodes d'analyses statistiques et de modélisation sont mises en évidence afin d'aborder la conception des outils de prévision.

La troisième partie comprend les chapitres 5 à 8 et décrit les principaux résultats obtenus. Le chapitre 5 présente les résultats de caractérisation de la variabilité hydro-climatique du bassin versant de la Marahoué. Il s'agit d'apporter des connaissances sur le fonctionnement du bassin étudié, de dégager les évolutions des débits extrêmes et d'identifier les principales conséquences sur les réserves souterraines. Le chapitre 6 rend compte des résultats de la modélisation statistique et du système d'alertes précoces (SAP) de débits extrêmes de la Marahoué. Il est question notamment de la vérification des hypothèses, des ajustements graphiques et analytiques et de la détermination des seuils des extrêmes hydrologiques. Le chapitre 7 aborde les résultats de l'analyse prospective des débits extrêmes de la Marahoué, ainsi que la cartographie des zones inondables. Ainsi, ces résultats intègrent les caractéristiques statistiques des débits extrêmes simulés avec GR2M, les fréquences d'occurrence et les quantiles pour les horizons 2031-2060 et 2071-2100. Les zones inondables de la ville de Bouaflé sont identifiées. Le chapitre 8 propose les modèles de prévisions des débits

trimestriels et mensuels sur la base des réseaux de neurones artificiels (RNA). Ces modèles sont évalués au moyen de la robustesse, des scores déterministes, des scores de contingence et des représentations graphiques.

Une conclusion générale fait la synthèse des résultats obtenus. Des perspectives de recherche et les références bibliographiques terminent cette étude.

PREMIÈRE PARTIE :
GÉNÉRALITÉS

CHAPITRE 1. ÉTAT DES CONNAISSANCES

Le présent chapitre fait mention des définitions des concepts utilisés et l'état de l'art. Ce dernier aborde les points des travaux antérieurs réalisés sur la caractérisation, la prédétermination et la prévision des débits extrêmes.

1.1. CLARIFICATION DES CONCEPTS

Il existe de nombreuses définitions issues de diverses sources nationales et internationales. Pour des raisons de cohérence, le choix s'est en premier porté sur le glossaire international d'hydrologie de l'organisation météorologique mondiale, dans lequel les définitions des termes sont données dans plusieurs langues.

Caractérisation : la caractérisation dans un contexte de changement climatique consiste à analyser les taux de variation d'indicateurs entre autres les précipitations, la température, l'écoulement fluvial, le niveau des nappes et des réservoirs, l'humidité du sol et le manteau neigeux sur une période de référence déjà vécue. Elle fera ainsi appel à des indices qui sont le plus souvent des représentations numériques des intensités du phénomène étudié, que l'on calcule à partir de valeurs climatiques ou hydrométéorologiques, dont les indicateurs précités. On pourra citer notamment l'indice standardisé des précipitations (SPI), l'indice d'aridité de De Martonne (1926), l'indice de continentalité thermique de Gorczynski (1920) in Daget 1968, l'indice de déficit hydrique qui exprime le rapport de la différence entre un seuil pluviométrique fixé et la pluviométrie d'une période ou de l'année en cours (Stoppa et Hess, 2003).

Prévision : selon l'OMM (2012), la prévision correspond à l'annonce précise ou estimation statistique de l'apparition et de l'ampleur d'un événement futur. Cette définition déjà mise en évidence par Lettenmaier et Wood (1993) indique que la prévision doit être réalisée à une date donnée, ou durant un intervalle de temps spécifique. De même dans une optique de précision, Fortin *et al.* (1997) indique que par prévision des débits, on entend le fait d'estimer le débit Q_x à un temps futur x en n'utilisant que l'information disponible au temps $t < T$, correspondant normalement au temps présent. Cette information comprend les valeurs mesurées du débit lui-même (si elles sont disponibles), depuis un temps reculé $t - r$ jusqu'au temps t , ainsi que d'autres séries temporelles X_1, X_2, \dots, X_n . Il s'agit généralement d'information météorologique, par exemple les précipitations et la température.

Débit : il existe en français deux débits distincts, de signification et d'origine différentes. D'une part, le débit dérivé de l'ancien français d'origine scandinave « bitte » dans le sens de débiter, vendre au détail, action et manière de fournir. D'autre part du latin debitum « dette » au sens de la chose ou somme due, soustraire d'un compte (en comptabilité).

En hydrologie comme le souligne Margat (1972), on considère surtout la première définition, mais une convergence de sens se produit parfois avec la seconde définition notamment dans les bilans d'eau, car ce qui est fourni, débité (au sens I) par une nappe est aussi soustrait débité (au sens II) du système. Ainsi, nous aurons un sens neutre quantitatif, défini par l'OMM (2012) comme la quantité d'eau écoulée pendant une durée déterminée. En termes de bilan d'eau, on retiendra la définition de Goguel (1959) *in* Margat 1972, qui fait référence à la somme des émissions, des sorties d'eau d'une nappe, opposée à la somme des apports, des entrées. Il n'existe à l'heure actuelle aucune méthode, économiquement acceptable, permettant de mesurer le débit en continu. Les chroniques de débit sont donc constituées en convertissant les données de hauteur d'eau en débit à l'aide d'une courbe de tarage. La courbe de tarage permet de faire correspondre à chaque hauteur d'eau une unique valeur de débit.

Extrêmes : Goubanova (2007), qualifie d'«extrêmes», les différents types d'événements climatiques susceptibles de présenter des écarts importants à la normale climatologique. Se basant sur la définition du climat, Beniston et Stephenson (2004) déclarent que la notion d'extrême est très complexe et se réfère à l'éloignement de la valeur d'une variable météorologique, ou à une combinaison de ces dernières, par rapport à leurs valeurs moyennes en un lieu et en un moment donné. La définition appropriée ne peut être choisie qu'en fonction du contexte dans lequel se situe l'étude (Kodja, 2018). Ce faisant, dans le cadre de cette étude, la définition proposée par le glossaire international d'hydrologie est privilégiée. Elle définit une série de valeurs extrêmes comme une série chronologique de données comprenant les valeurs maximales ou minimales d'une variable hydrologique. Par ailleurs, cette définition des extrêmes est inhérente au choix de la méthode utilisée pour en calculer l'évolution. Concernant les événements hydrologiques extrêmes, ils sont essentiellement les crues des cours d'eau suivies des inondations des plaines après un excédent pluviométrique, ou des étiages à la suite de sécheresse pluviométrique (Kodja, 2018).

Étiage : le mot étiage est un mot typiquement français qui n'a pas vraiment d'équivalent dans d'autres langues (Garcia, 2016). Ainsi, en anglais, les termes « low-flow » (littéralement basses eaux) ou « hydrological drought » (littéralement sécheresse hydrologique) sont employés. Selon l'OMM (2012), l'étiage correspond au « niveau le plus bas atteint par un cours d'eau ou un lac ». Dans le dictionnaire français d'hydrologie de surface, Roche (1986) donne une autre définition et prend en compte la notion de temporalité. Il définit l'étiage comme le « niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau en un point donné ». La différence entre étiage et basses eaux n'est alors pas encore introduite. Dans le dictionnaire français d'hydrologie, Dacharry (1996) définit l'étiage comme étant le « débit exceptionnellement faible d'un cours d'eau, qu'il ne faut pas confondre avec les basses eaux saisonnières habituelles, même s'il est en exacerbation ». Cette définition fait la distinction entre

étiages et basses eaux, phénomène habituel du cycle de l'eau défini comme la gamme de débits inférieurs aux débits moyens interannuels ou inférieurs aux débits médians (Garcia, 2016). Par ailleurs, on considère les débits d'étiage comme faisant partie du régime hydrique d'une rivière tandis que les sécheresses sont un événement qui résulte de précipitations anormalement basses au cours d'une période prolongée.

Crue : Martin-Gousset (2008) rappelle que la crue est le participe passé féminin substantivé de croître du latin *crescere*, lui-même issu d'une racine indo-européenne exprimant les idées de « semence » et de « croissance ». Ainsi, la crue est un phénomène caractérisé par une montée plus ou moins brutale du niveau d'un cours d'eau, liée à une croissance du débit. L'OMM (2011) souligne dans son manuel sur la prévision et l'annonce des crues, que le terme « crue » se définit comme la montée, en général brève, du niveau d'un cours d'eau jusqu'à un maximum dont il redescend plus lentement ou encore un écoulement relativement fort tel qu'il est mesuré par la hauteur d'eau ou le débit. Elle ne se traduit pas toujours par un débordement du lit mineur. On caractérise d'ailleurs les crues par leur période de récurrence ou période de retour : la crue quinquennale (fréquence une année sur 5 - Récurrence 5), la crue décennale (fréquence une année sur 10 - Récurrence 10), la crue centennale (fréquence une année sur 100 - Récurrence 100). Les crues saisonnières sont des phénomènes naturels. Elles sont essentielles au maintien de la diversité des hydrosystèmes (OIEau, 2019). Abordant le même sens, Fouchier (2010) indique que l'excès d'écoulement superficiel des eaux se manifeste par les crues des cours d'eau ou bien, en dehors de tout réseau hydrographique organisé, par le phénomène de ruissellement. A l'extrême, ces phénomènes peuvent engendrer des inondations. L'« inondation », est à distinguer de la crue à proprement parler. Elle fait plutôt référence à la submersion par l'eau débordant du lit normal d'un cours d'eau ou d'autres surfaces d'eau, ou accumulation d'eau provenant de drainages, sur des zones qui ne sont pas normalement submergées.

Adaptation : AGRHYMET (2009), dans l'étude sur le sahel face aux changements climatiques, définit l'adaptation comme l'ensemble des réponses (des solutions) aux effets néfastes ou positifs des changements climatiques. Elle peut se faire naturellement, ou par une réaction spontanée (par exemple face à une catastrophe climatique) ou être anticipée dans le cadre d'une planification. Cette stratégie d'adaptation doit permettre de renforcer la résilience en anticipant les effets négatifs du changement climatique et en exploitant au maximum les opportunités qu'elle crée. Ce phénomène impactant les territoires de façon très variable, les initiatives d'adaptation sont tout particulièrement efficaces à l'échelon local, puisqu'elles permettent de prendre en considération la singularité régionale. En étant conçue et mise en place de façon posée, l'adaptation pourrait alors régler certains des principaux problèmes liés aux ressources naturelles et pouvant devenir une source de litiges à la suite des changements climatiques (sécurité alimentaire, répartition des ressources en eau, etc.).

1.2. CARACTÉRISATION HYDRO-CLIMATIQUE

Dans un contexte mondial marqué par les changements climatiques, l'étude des paramètres hydro-climatiques et de leur évolution apparaît indispensable à l'appréhension des menaces qui pèsent sur l'équilibre régional. En effet, les impacts de ces changements varient d'une région du globe à une autre avec des conséquences socio-économiques particulièrement importantes dans les pays en développement (Sultan, 2015). Ainsi, parmi les zones les plus affectées, figure l'Afrique de l'Ouest (Dilley *et al.*, 2005 ; GIEC, 2014). Aujourd'hui, de nombreuses études se penchent sur le sujet, avec des approches variées. Ces approches, dans bien des cas, font appel au paramètre climatique le plus observé dans les réseaux météorologiques au sol, à savoir la pluviométrie (Wesselink *et al.*, 1995 ; Houndénou, 1999 ; Vissin, 2007 ; Amoussou, 2010 et Chabi, 2015). Par ailleurs, la pluviométrie permet de déterminer les saisons contrairement aux zones tempérées qui se réfèrent à la température (Boko, 1988).

En Afrique de l'Ouest, un aperçu du régime pluviométrique est présenté par Barrat (2012) dans son étude relative à la gestion intégrée et concertée des ressources en eau des systèmes aquifères. Dans ses travaux, l'auteur révèle que l'Afrique de l'Ouest a connu une forte diminution des précipitations durant les 50 dernières années avec une rupture nette dans les années 1968-1972. Depuis le milieu des années 1990, un retour à de meilleures conditions pluviométriques est perceptible à travers le glissement des isohyètes en chemin inverse.

Suivant l'analyse de l'Indice des pluies, calculé sur la base de données de 600 stations suivies par le centre régional d'Agro-Hydro-Météorologie en abrégé AGRHYMET (dont le siège est à Niamey au Niger), trois périodes bien distinctes sont mises en évidence : une période humide allant de 1950 à 1969, suivie d'une persistance d'années sèches de 1970 à 1993 et enfin, une troisième période marquée par une alternance d'années humides et sèches qui s'étend de 1994 à nos jours.

Pour Mach *et al.* (2014), l'Afrique de l'Ouest a été marquée depuis les années 1970 par une irrégularité de pluie et de sécheresse plus intense et généralisée. Allant plus loin, Boko (1988), Houndenou *et al.* (1998), Vissin (2001, 2007), Fontaine *et al.* (2012), Peugeot *et al.* (2012) et Amoussou *et al.* (2012), ont montré que la variabilité climatique en Afrique tropicale est marquée depuis les années 1970 par une tendance à la sécheresse ; ce qui a affecté les hydrosystèmes avec une répercussion sur les écoulements. Ces conclusions découlent des analyses menées par lesdits auteurs sur les données mensuelles de pluie et de débit de la période 1961-2000.

Pour ce qui se rapporte à la Côte d'Ivoire de façon spécifique, les résultats des travaux effectués par Mahé *et al.* (2001), Bigot *et al.* (2005), Soro *et al.* (2017) se rapprochent des tendances évoquées précédemment. En effet dans son étude sur la caractérisation des séquences de sécheresse

météorologique, Soro *et al.* (2017) montrent au travers de l'analyse de l'indice standardisé des précipitations (SPI), que l'extrême nord-ouest du pays a connu un important déficit pluviométrique après 1970 avec des pics en 1983 et 1987. Cette analyse a été exécutée sur la base de la pluie annuelle couvrant la période 1940 à 2010, soit 71 ans de mesures. Cependant, la légère hausse telle que présentée par Savané *et al.* (2001) et Brou *et al.* (2005) n'a pas été observée dans ladite étude. En effet, pour ce qui est de l'extrême nord-ouest de la Côte d'Ivoire (entre les longitudes 6°24' et 7°34' Ouest et les latitudes 9°30' et 10°29' Nord), le SPI a révélé que la période 2000-2010 a connu un important déficit pluviométrique. A la station de Tengréla, neuf (9) événements de sécheresse ont été recensés et répartis sur les périodes suivantes : 2000-2002, 2004-2005 et 2007-2010. Durant la période 2000-2010, 7 années sur 11 ont connu un déficit pluviométrique à la station de Boundiali. Ces épisodes secs ont été observés de 2000 à 2002 et de 2004 à 2007. Quant à Odienné, elle a eu une alternance de périodes sèches et humides suivies de 2 années de sécheresse (2007-2008).

Ces déficits pluviométriques ont engendré des déficits d'écoulement, comme le signale Kamagaté *et al.* (2019) en référence à son étude relative à l'impact des évolutions climatiques sur les ressources en eau des petits bassins en Afrique Sub-Saharienne (cas du Bassin Versant du Bandama à Tortiya). L'auteur a porté une attention sur l'évolution spatiale des hauteurs mensuelles des pluies, des températures moyennes de l'air, des évapotranspirations potentielles sur la période de 1901 à 2016 et des données de débits journaliers couvrant la période 1975-2002. Le choix des auteurs a été porté sur ces données en raison des résultats satisfaisants obtenus dans de nombreuses études. De plus, les auteurs ont démontré que le déficit hydrologique après la date de rupture est estimé à 66,5%. Un résultat qui corrobore ceux de Servat *et al.* (1998), en ce sens qu'en Afrique de l'Ouest de manière générale, les déficits d'écoulement sont rarement inférieurs à 30% et parfois supérieurs à 55 voire 60%. Ces résultats renforcent également l'observation faite sur les volumes moyens d'eau mobilisés qui évoluent de 0,840 km³ avant 1971 à 0,508 km³ après 1971, soit une baisse de 24,6%. En effet, pour Adja *et al.* (2019), de nombreuses études ont mis en évidence le caractère prédominant des états de surface dans la modification de l'écoulement en milieu sahélien (Legesse *et al.*, 2003 ; Mahé *et al.*, 2003 ; Séguis *et al.*, 2003 ; Mahé *et al.*, 2005), mais aussi dans la modification de l'infiltration pour la recharge des réservoirs souterrains. Kouassi *et al.* (2017b), s'inscrivent dans la même tendance à travers leur étude relative aux modifications induites par la variabilité pluviométrique sur le comportement hydrologique du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire. La méthodologie s'est appuyée sur les données climatologiques (pluie, température), au pas de temps mensuel couvrant la période 1951-2015. A l'issue des travaux, il est observé que les déficits hydrologiques évalués fluctuent entre 15% (potentiel d'infiltration) et près de 60% (potentiel de ruissellement) en passant par 16% pour la pluie moyenne et 31% pour la pluie efficace. Par ailleurs, les déficits pluviométriques calculés par Kouassi *et al.* (2007) sur le bassin versant du N'Zi (sous bassin du bassin versant du

Bandama) fluctuent entre 13% et 24% avec une moyenne de 16%. Kouassi *et al.* (2007) ont également montré que les déficits d'écoulement fluctuent entre 51 et 55% avec une moyenne de 52%. La dépendance des écoulements vis-à-vis de la pluviométrie est ainsi mise en exergue, tout comme dans les travaux de Ardoin-Bardin (2004), Mahé *et al.* (2005), Goula *et al.* (2006), Kouassi *et al.* (2012) et N'Guessan *et al.* (2017).

Au regard de ces travaux, l'urgence de rationaliser l'utilisation de l'eau en vue de pérenniser son approvisionnement se fait pressante. Pour ce faire, il est fondamental de maîtriser la fluctuation du niveau des cours d'eau et celui des eaux souterraines en vue de prendre les mesures nécessaires pour faire face aux conséquences de la variabilité climatique.

Ainsi, il a été calculé le coefficient de tarissement moyen qui s'est établi au pas annuel à une valeur de $0,032 \text{ j}^{-1}$ sur le fleuve Bagoé. Cette évaluation s'inscrit dans la gamme des coefficients de tarissement du fleuve Niger et ses affluents. En effet, le fleuve Niger à Koulikoro a un coefficient de tarissement compris entre $0,02$ et $0,03 \text{ j}^{-1}$ voire $0,04 \text{ j}^{-1}$, également valable pour le Bani à Douna au Mali (Bricquet *et al.*, 1997). Cet état de fait, pourrait se justifier par l'existence de plusieurs ouvrages hydrauliques à vocation agro-pastorale assurant aussi l'alimentation en eau potable (AEP) de grandes localités au sein des bassins versants tels que ceux du N'Zi et de la Bagoé. Ainsi, les perturbations anthropiques sont à l'origine de la modification du régime hydrologique des bassins versants, exacerbant ainsi les effets de la variabilité climatique que connaît lesdits bassins (Brou *et al.*, 1997 in Adja *et al.*, 2019).

1.3. MODÉLISATION STATISTIQUE ET SYSTÈMES D'ALERTE PRÉCOCES (SAP) DE DÉBITS EXTRÊMES

Le PNUE (2013) dans son rapport annuel, fait état de ce que les modifications du régime météorologique, qui rendent les précipitations de plus en plus imprévisibles, accroissent le risque d'inondation et mettent à mal plusieurs facteurs à savoir, la production alimentaire, le niveau des mers, les réserves côtières en eau douce. Aussi, les phénomènes climatiques extrêmes, dont la fréquence et la gravité qui ne font que croître, peuvent s'avérer dévastateurs. Cette alerte, qui rejoint les points développés plus haut, nécessite qu'un intérêt particulier soit porté aux études du risque hydrologique. A ce sujet, Souanef (2015) a déclaré que le plus important dans l'étude du risque hydrologique est de déterminer les valeurs maximales des précipitations ou des débits responsables des dégâts et des catastrophes. C'est une tâche très contraignante, en raison de la rareté des extrêmes ainsi que de la taille des séries d'observations qui pour la majorité des cas, sont courtes. Toutefois, lorsque les données concernant des événements passés sont disponibles, l'analyse fréquentielle, qui est une méthode de prédiction, permet d'étudier ces événements passés et d'en déterminer la

probabilité de réapparition future, afin de s'en prémunir. Miller *et al.* (1982), spécifie qu'au moins 10 années de données sont nécessaires pour justifier une analyse statistique. S'inscrivant dans cette tendance, les auteurs Kouider (2003), Benkhaled et Remini (2003) et Souanef (2015), ont eu recours à un nombre d'années d'observations supérieur ou égal à 10 ans, soit respectivement 10, 12, 15 et 62 années. Le nombre d'années d'observations est très déterminant pour la fiabilité et l'interprétabilité des résultats, tout comme dans l'approche par le modèle fréquentiel.

Pour ajuster les extrêmes, de nombreuses lois sont utilisées dans le monde. Citons entre autres la loi des valeurs extrêmes généralisée (GEV), la loi Lognormale, la loi Log-Pearson type III, la loi Gamma, la loi Lognormale (Riad, 2003 ; Achite *et al.*, 2004 et López *et al.*, 2012). Mareuil (2005) estime que les critères de choix énumérés par la littérature peuvent mener à des solutions inadéquates. Par ailleurs, la différence entre les quantiles estimés sous une hypothèse d'une loi de Gumbel ou sous une hypothèse de la loi GEV est considérable. Pour une fréquence donnée, les quantiles d'une loi GEV peuvent être de deux fois ou trois fois plus importants que les quantiles d'une loi de Gumbel (Muller, 2006).

Une fois l'utilisation de l'information historique ainsi que le choix de la loi réalisés dans une analyse fréquentielle, l'estimation des périodes de retour peut être définie à la suite des travaux. Cet état de fait permet d'améliorer l'estimation des quantités de grandes périodes de retour. Ainsi, des plans d'alerte et d'évacuation des populations doivent donc être réalisés en intégrant les seuils d'alerte du système de surveillance des crues et étiages. De même, la planification ou la conception d'ouvrages hydrauliques exposés aux débits extrêmes nécessite l'estimation du risque d'opération. Par exemple, les canaux dont l'alternance entre le remplissage pendant la saison pluvieuse (liquides, solides, ou un mélange) et l'exposition au soleil ou à un environnement abrasif durant la saison sèche produit la dégradation et l'affaiblissement du béton. Ceci pose un problème à surveiller pendant toute la vie utile de l'ouvrage (Edgard, 2008).

Le niveau de protection correspond au degré maximum d'aléa contre lequel on souhaite se protéger, et cela se fait par le biais des aménagements structurels (digues, bassins de rétention) et les aménagements non structurels (règlementation de l'occupation du sol, contraintes d'urbanisme). La connaissance préventive du risque permet donc d'orienter les choix politiques d'occupation du territoire et de protection des enjeux par des aménagements.

En Côte d'Ivoire, l'on se situe plus dans le cadre de la gestion et la réduction des risques de catastrophes. Sur le plan national, la Présidence de la République participe à cette mission à travers quatre structures spécialisées, à savoir, le Bureau National d'Etudes Techniques et Développement

(BNETD), le Centre d'Information Géographique et du Numérique (CIGN), Comité National de Télédétection et d'Information Géographique (CNTIG), et le Conseil National de Sécurité (CNS). Sur le plan local, certains organismes œuvrent pour la mise en œuvre des actions de réduction des risques de catastrophes. Il s'agit notamment de l'Union des Villes et Communes de Côte d'Ivoire (UVICOCI) et de l'Assemblée des Régions et Districts de Côte d'Ivoire (ARDCI) qui œuvrent pour l'amélioration du cadre de vie des populations locales ; tandis que les organismes comme la Croix Rouge de Côte d'Ivoire concentrent leurs efforts sur le déploiement de mécanismes qui répondent aux besoins des populations sinistrées. En outre, la société civile contribue également à la gestion des risques de catastrophes. À côté de ces acteurs, il faut noter l'existence de cellules et diverses entités techniques (sous la tutelle des différents ministères) participant activement à la gestion des risques de catastrophes. À cet effet, nous pouvons citer :

- l'Office National de la Protection Civile (ONPC) qui mène une fois par an une campagne de sensibilisation contre les effets de pluies diluviennes ;
- l'Office National de l'Assainissement et du Drainage (ONAD) qui construit des barrages écrêteurs des crues, particulièrement dans la ville d'Abidjan ;
- la Préfecture d'Abidjan qui veille au déclenchement du plan d'Organisation des Secours (ORSEC) pour une intervention en cas de catastrophes naturelles ;
- la Société de Développement et d'Exploitation Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique (SODEXAM) qui émet les bulletins météorologiques et les alertes précoces pour une prévention des risques de catastrophes.

De façon opérationnelle, la SODEXAM travaille en étroite collaboration avec les autres entités ci-dessus citées, notamment l'ONPC et le CICG (Centre d'Information et de Communication du Gouvernement) lors des phases d'alertes précoces, pendant les crises et après les crises suivant un schéma bien défini (figure 1).

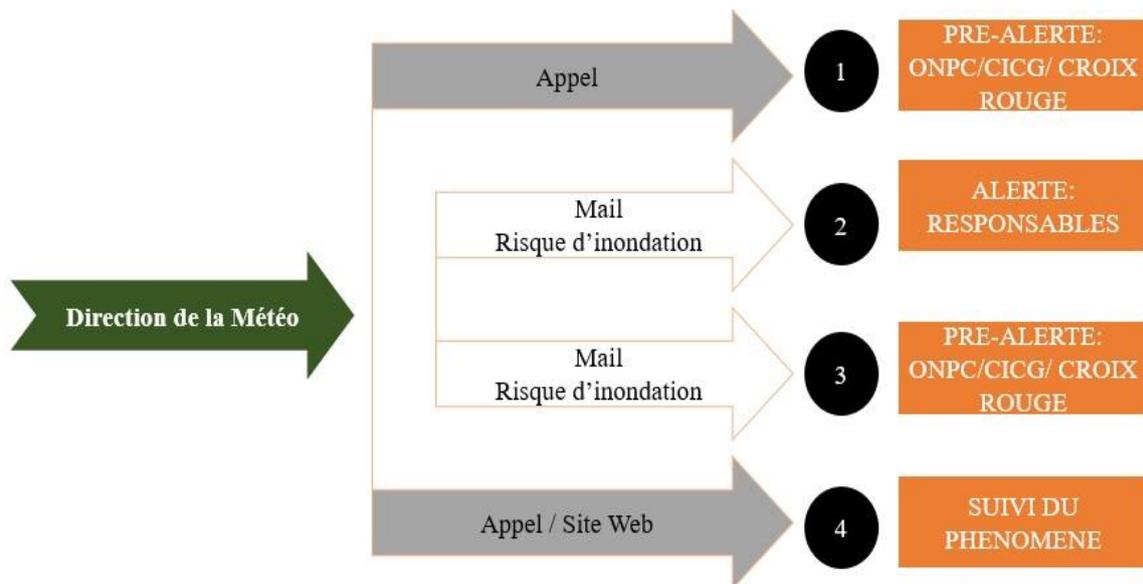


Figure 1 : Schéma d'alerte SODEXAM (Plateforme humanitaire du secteur privé de Côte d'Ivoire, 2019)

Toutefois, le cadre opérationnel souffre de grandes insuffisances dans la gestion des catastrophes liées aux phénomènes extrêmes en Côte d'Ivoire.

En effet, à ce jour, il y a peu de législations ayant spécifiquement trait au domaine de la gestion des risques de catastrophe en Côte d'Ivoire, à part le Plan ORSEC (ONU-SIPC, 2011). Les situations d'urgence sont réglementées par le Plan d'Organisation des Secours (ORSEC) sous le décret N°79-643 du 8 août 1979 portant organisation du plan de secours à l'échelon national en cas de catastrophes. Le ministère de l'Intérieur a la responsabilité de déclencher le Plan ORSEC à l'échelon national. Au niveau local, le Plan ORSEC est déclenché par le préfet qui utilise tous les moyens à sa disposition pour répondre aux éventuelles catastrophes. Il organise la visite et l'identification des victimes avant la réunion pour faire le bilan du sinistre. Avant la saison pluvieuse, il organise aussi des missions dans les quartiers afin d'identifier les zones à risque. Ce plan représente un mécanisme de coordination des opérations de secours mis en place, aux niveaux national, départemental et communal, en vue de gérer les urgences liées aux catastrophes susceptibles de survenir. Il constitue le cadre légal national de gestion des situations d'urgence et réglemente la mobilisation des ressources exceptionnelles pour faire face aux catastrophes. Cependant, il a été observé que depuis la prise de ce décret, sa première véritable mise en œuvre date d'environ une dizaine d'année (en 2009 lors des inondations à Abidjan). De même, il est utile de mentionner que la Préfecture ne dispose pas de fonds d'urgence ni de stock. Par ailleurs, comme son intitulé l'indique, ce plan n'est réellement enclenché que lorsque la catastrophe survient.

Faisant office d'alerte précoce, la SODEXAM produit des bulletins qui font l'objet d'un suivi particulier par les organismes suivants : ONPC, RTI, MCAU, MIE, Secrétariat du Gouvernement, POLICE, ONAD, OCHA, Croix Rouge. Lesdits bulletins étant édités tous les 3 jours sur la base des images satellitaires, une alerte est émise lorsqu'une cellule est identifiée comme orageuse avec de fortes pluies pouvant occasionner des inondations imminentes sur la ville d'Abidjan (Aguia, 2018). Il se pose ainsi les problèmes de régionalisation de l'alerte inondation et la faible échéance pour la mise à disponibilité de l'information.

Il est à noter que la Côte d'Ivoire n'a pas suffisamment d'expérience dans la stratégie et la planification des risques de catastrophes. Le pays ne dispose pas d'organisme unique ou de ministère spécifiquement responsable de la Gestion des Risques et des Catastrophes, pouvant favoriser la mise en œuvre d'une stratégie nationale concertée dans ce domaine. Des efforts doivent être faits sur ces aspects (ONU-SIPC, 2011).

Aussi, selon le rapport d'évaluation des capacités nationales pour la réduction des risques en Côte d'Ivoire paru en 2015, pour répondre aux urgences dus aux catastrophes naturelles, les ONG se sont substituées à l'Etat pendant plusieurs années. Ce constat a été repris par plusieurs acteurs humanitaires, qui estiment que des efforts sont encore à faire par l'Etat, afin de mieux se préparer pour les prochains événements. De même, il a été mentionné une absence de système d'alerte précoce national multirisque, centralisé et connecté aux décideurs, acteurs et communautés à la base pour un partage à temps utile des informations d'alerte et de préparation à une éventuelle catastrophe.

Ainsi, même si la Côte d'Ivoire est, aujourd'hui, peu préparée à la prévision des catastrophes, la mise en place d'un système d'alerte précoce solide et de plans de réponses associés (prospective) peut très rapidement renforcer la réactivité des populations à risque face aux aléas naturels, d'autant plus que ces aléas sont de plus en plus fréquents et sévères dans le pays. L'importance de cet aspect est encore plus perceptible au regard du montant alloué au Plan d'Action de l'axe stratégique alerte précoce et préparation à la réponse dont l'enveloppe s'est chiffrée à environ 1,708 milliards de FCFA en 2011, outre l'enveloppe budgétaire d'environ 311,5 millions FCFA pour le volet sensibilisation.

1.4. PROSPECTIVE DES DÉBITS EXTRÊMES

La « prospective » est le regard scientifique sur l'avenir (Valaskakis, 1975). C'est une démarche qui vise d'une manière rationnelle, créative et holistique, à se préparer aujourd'hui pour demain. Elle ne consiste pas à prévoir l'avenir mais à élaborer des scénarios possibles sur la base de l'analyse des données disponibles (états des lieux, tendances lourdes, phénomènes d'émergence, changements, ruptures, etc.) et de la créativité d'imaginer des futurs possibles. La prospective est une démarche innovante, qui ouvre des horizons pour mieux imaginer des changements futurs et pour inspirer une stratégie basée sur les défis de l'avenir en intégrant les acteurs concernés.

Par ailleurs, la bonne prospective n'est pas celle qui se réalise mais celle qui conduit à l'action. C'est un instrument d'aide à la décision. Elle propose des scénarios d'avenir et également un système de choix entre les scénarios ainsi qu'une stratégie d'accompagnement. On précisera dès maintenant que pour parvenir à identifier les futurs possibles, il faudrait pouvoir se poser les bonnes questions. Dans ce sens, plusieurs démarches sont possibles. Des auteurs comme Jouvenel (1993) ou Godet *et al.* (2003) *in* Bouzaïane et Mouelhi (2008) ont mis au point des méthodologies fonctionnelles pour la conduite d'une étude prospective applicable à tous les domaines. S'inspirant de ces études, Bouzaïane et Mouelhi (2008) ont proposé un découpage des étapes d'une étude prospective sous forme d'un algorithme simplifié, représenté à la figure 2.

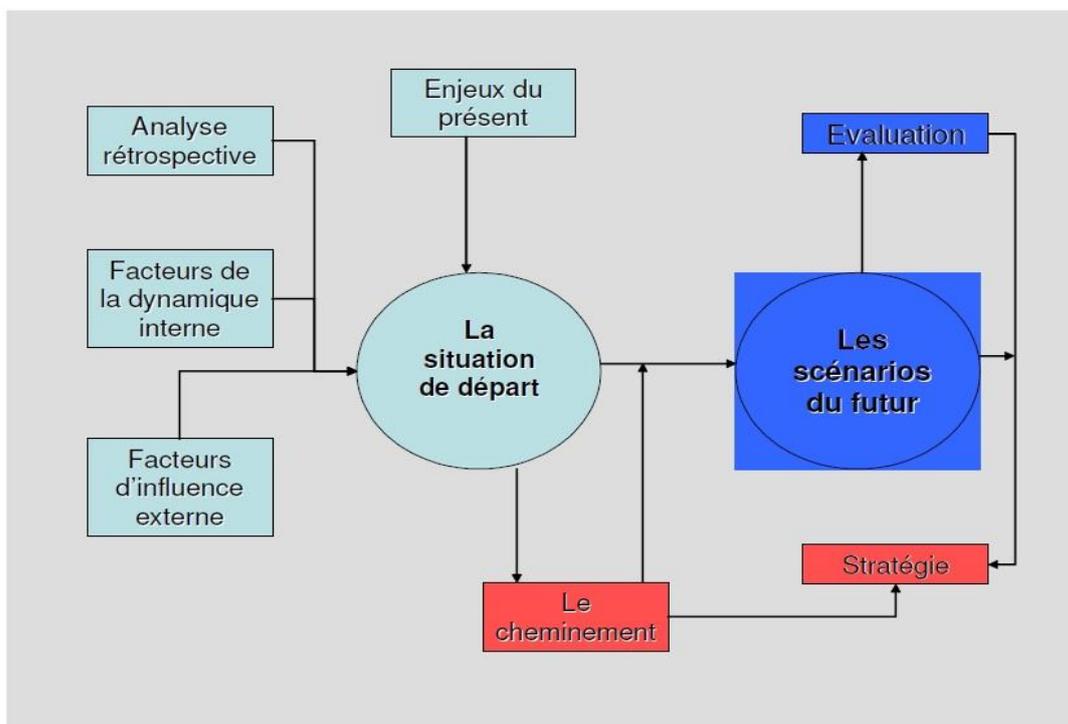


Figure 2 : Algorithme pour la conduite d'une étude prospective (Bouzaïane et Mouelhi, 2008)

Dans le cas d'extrêmes hydrologiques, l'étude prospective vise à définir les différentes évolutions possibles des extrêmes hydrologiques à partir d'un état donné. En effet, les risques liés aux catastrophes naturelles suscitent un intérêt et un enjeu considérable pour les populations. À titre illustratif, les profils de catastrophes naturelles dans le monde sont présentés à la figure 3.

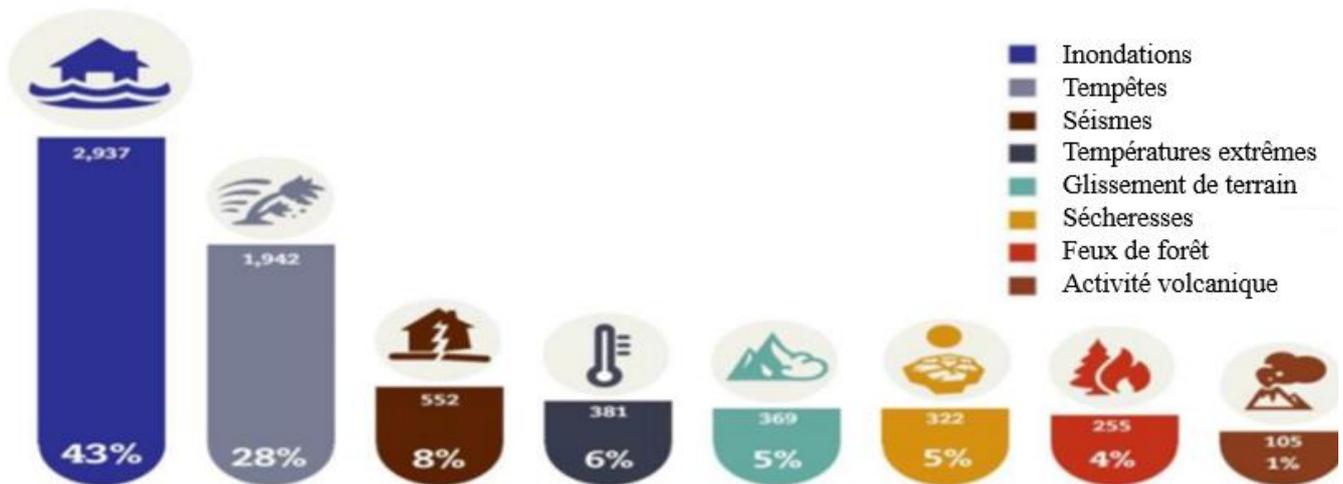


Figure 3 : Classification des risques de catastrophes naturelles (Plateforme humanitaire du secteur privé de Côte d'Ivoire, 2019)

Hauhouot (2008) affirmait que plus d'un million et demi de personnes sont touchées chaque année en Afrique par des inondations consécutives à des pluies diluviennes. L'auteur, soutenu par Red Cross/Red Crescent Climate Centre (2008), caractérise l'année 2007 comme étant l'année des pluies en Afrique.

Toujours sur le continent africain, en 2009, de fortes précipitations ont entraîné d'importants sinistres avec environ 200 décès enregistrés, des dégâts matériels considérables ainsi que le déplacement de centaines de milliers de personnes dans près de 20 pays. Par ailleurs, l'effectif des personnes touchées par les différentes inondations qu'a connu l'Afrique de l'Ouest, en particulier, au cours de l'année 2009 est estimé à 770 000 (OCHA-Afrique de l'Ouest, 2009).

Cette évaluation semble bien progressée compte tenu des évènements observés en 2020, soit 11 ans plus tard. En effet, l'Afrique de l'Ouest et la région du Sahel font face à des inondations spectaculaires. Au cours de l'année 2020, l'on a relevé des cumuls supérieurs à 200 mm en 24 heures. Cette situation a fait l'objet de couverture médiatique, notamment par le journaliste Laurent Larcher qui en a présenté les conséquences dans un article paru dans le journal Lacroix en 2020. Au Burkina Faso, ce sont des quartiers entiers de la capitale Ouagadougou qui ont été submergés par la pluie. A Niamey dans la capitale nigérienne, des digues ont cédé, des milliers d'habitations ont été détruites.

Aussi, sous l'effet des précipitations, le fleuve Niger avait débordé de son lit, en faisant au moins 65 morts et obligeant plus de 300 000 sinistrés à quitter leurs maisons. Au Soudan, les effets des fortes pluies ont été tout aussi tragiques. Le niveau du Nil a atteint 17,57 mètres de hauteur, selon le ministère de l'Irrigation et des Ressources aquatiques, un niveau de l'eau jamais atteint depuis 1912, date du début des relevés sur le fleuve.

En outre, les zones les plus sévèrement touchées par les catastrophes naturelles et les modifications climatiques qui nécessitent en priorité un suivi et une planification ciblée, ont été mises en évidence par le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE, 2011). Ces zones, au nombre de dix-neuf ont été caractérisées par le Programme comme « points chauds » climatiques en Afrique de l'Ouest. En dépit de leur caractérisation comme des points chauds, ces zones ont été fortement frappées par des inondations ces dernières années et marquées à la fois par une croissance des températures et une augmentation substantielle de la fréquence des sécheresses.

La hausse des températures et de la fréquence des sécheresses affectent particulièrement les pays les plus arides (axe Mauritanie – Mali – Niger) qui concentrent près de 90% des victimes de la sécheresse (soit 50 millions de personnes cumulées) depuis 2000 en Afrique de l'Ouest (EM-DAT, 2014). De même, Gemenne *et al.* (2017) ont déclaré qu'une grande partie de la population ouest africaine souffre d'une diminution de la longueur de la saison des pluies ainsi que d'une augmentation des périodes sèches à l'intérieur des saisons pluvieuses. Cette situation serait due à la baisse très significative des précipitations comme c'est le cas en Mauritanie (Ozer *et al.*, 2014), au Burkina Faso (De Longueville *et al.*, 2016) et au Niger (Ozer *et al.*, 2009, 2017). Une majorité des agriculteurs dans le Sahel estime que ces changements sont perceptibles depuis 20 à 30 ans alors que dans les zones plus humides, les effets sont ressentis au cours de la dernière décennie (Ozer et Perrin, 2014). Cette situation est bien illustrée par la figure 4. On y aperçoit nettement que ces dernières années sont beaucoup plus soumises aux extrêmes humides avec cependant une réelle présence des périodes de sécheresse.

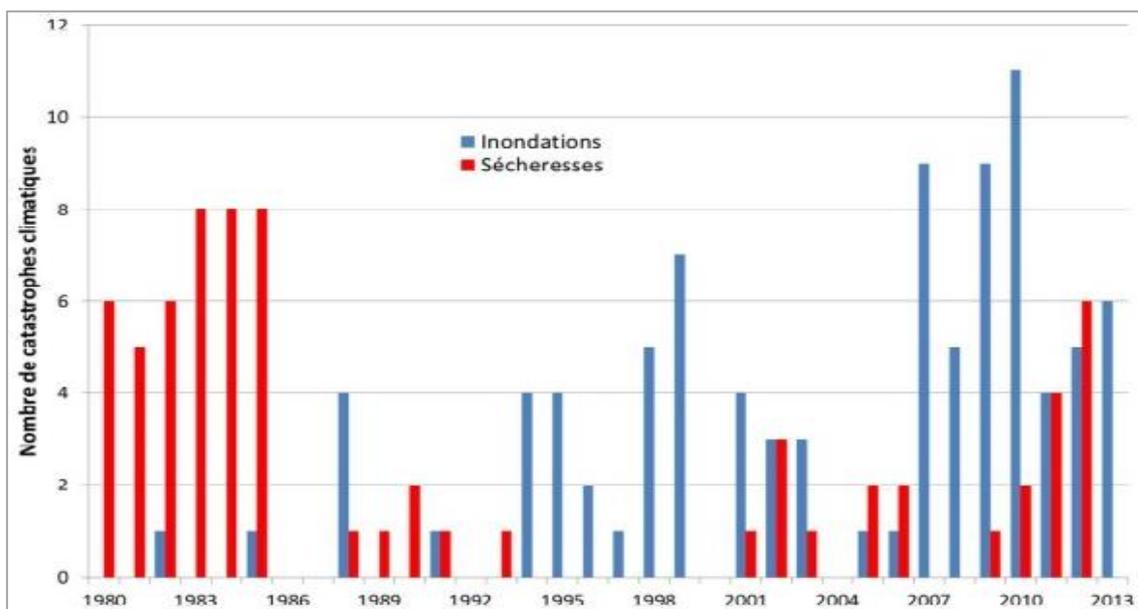


Figure 4: Nombre de catastrophes climatiques majeures en Afrique de l’Ouest de 1980 à 2013 (EM-DAT, 2017 *in* Gemenne *et al.*, 2017)

L’impact des périodes sèches sur le volume d’eau disponible peut entraîner de nombreux problèmes. Avec l’accroissement de la population et le développement socioéconomique, la demande en eau continue d’augmenter. Par ailleurs, depuis la fin du XIXe siècle, la température moyenne de la terre a augmenté d’environ 0,6°C avec comme conséquence une élévation du niveau des mers atteignant jusqu’à 20 cm au XX^{ème} siècle (Diarra *et al.*, 2007).

Cela reste indéniable, les évènements évoqués doivent conduire à mieux anticiper l’avenir, inciter à la proactivité. Les évènements à venir, ne seront qu’une suite logique des changements climatiques déjà enclenchés. Il est reconnu que le changement climatique bouleverse le cycle de l’eau en affectant les précipitations, l’infiltration et le ruissellement sur et dans les sols ainsi que l’évaporation, la sursaturation de vapeur d’eau et la condensation dans l’atmosphère (GIEC, 2013).

L’organe subsidiaire du conseil scientifique et technologique de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC) et le Groupe Intergouvernemental sur l’Évolution du Climat (GIEC ou IPCC) prédisent que d’ici 2100, la température globale de la surface de la terre pourrait augmenter de 1,4 à 5,8°C avec comme conséquence, une élévation du niveau des mers de 9 à 88 centimètres.

Commeaux *et al.* (2010), ont montré la sensibilité de la réponse hydrologique en basses eaux sur le bassin français de la Meuse face à la méthode de descente d’échelle spatiale et temporelle. Dans cette optique, deux méthodes de descente d’échelle ont été appliquées. Les 4 scénarios climatiques désagrégés ainsi obtenus ont ensuite été utilisés comme intrants d’un modèle hydrologique conceptuel global sur la période allant de 1971 à 2100. En réponse aux changements climatiques, la prospective

hydrologique conduit logiquement à une baisse préoccupante des débits fréquentiels d'étiages, de l'ordre de -45% par rapport à leur valeur actuelle.

Ducharne (2008) emboitant le même pas, s'est penché sur la question de la Seine en 2100. Pour l'auteur, il était important d'étudier l'influence du changement climatique (CC) sur l'hydrologie et la qualité de l'eau. De son étude, il ressort que l'impact du changement climatique sur le bassin de la Seine, dessiné à l'horizon 2100, est loin d'être catastrophique, quand bien la modification des débits est susceptible d'affecter la gestion des grands barrages réservoirs de la Seine et mériterait donc une prospective spécifique. A cet effet, l'auteur recommande de caractériser comment le changement climatique est susceptible de modifier la distribution de ces extrêmes, en termes de crues, d'étiages et de sécheresse (analyse fréquentielle et prédétermination). Pour rappel, le bassin versant de la Seine couvre 78600 km², soit 14 % de la surface de la France métropolitaine.

Dans l'étude menée sur l'impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème de la Loire, il a été mis en évidence la tendance à une diminution de la ressource en eau par tous les modèles. Les auteurs Durcane *et al.* (2009) ont déclaré que les étiages seraient plus sévères et les durées de faibles débits seraient parfois fortement accrues. Ces changements affectent l'ensemble des bassins versants de manière homogène. Cette modification profonde serait due à l'augmentation des pertes par évapotranspiration et des précipitations totales globalement en baisse (légère augmentation des précipitations au printemps compensée par une forte diminution le reste de l'année). De même à l'horizon 2050 pour les rivières du grand bassin de la Garonne, des incertitudes importantes demeurent pour les précipitations et l'élévation de la température qui entraînera une augmentation forte de l'évapotranspiration. Par ailleurs, les débits naturels d'étiage seront en moyenne réduits de moitié (Grusson, 2016).

L'Afrique n'est pas en marge de ce futur peu reluisant. En effet, les études réalisées dans le cadre de la première communication nationale sur les changements climatiques et sur l'évolution des paramètres climatiques au Burundi à l'horizon 2050 le démontrent bien. Se basant sur le modèle de circulation générale, les études montrent que la température moyenne annuelle va augmenter de 1°C à 3°C. La pluviométrie accusera une hausse de $\pm 10\%$ et le régime pluviométrique sera perturbé de façon qu'il ne comporte plus que deux grandes saisons de six mois chacune : une saison pluvieuse qui s'étendrait de novembre à avril et une saison sèche [Contribution Prévue Déterminée au niveau National (CPDN)/Burundi, 2015].

Pour Meklati (2009), le Maghreb est en situation de stress hydrique et devrait se trouver en situation de pénurie d'eau à l'horizon 2025. Pour l'auteur, en Algérie, la problématique de l'eau sera sans doute une préoccupation majeure durant ce XXI^{ème} siècle. En effet, l'eau subit depuis une trentaine d'années

une dégradation sensible et tend à se raréfier dans l'ensemble du pays. Kouraiss et Ait-Brahim (2010) confirment cette situation au Magheb en indiquant que le quatrième rapport du GIEC prévoit une diminution au niveau des précipitations qui pourrait atteindre -20% à l'horizon 2050 sur le Maroc. De même, une augmentation au niveau des températures devrait être observée au Maroc pour atteindre la fourchette 2,5°C à 5,5°C à l'horizon 2100 selon les conclusions des études menées par le GIEC. Par ailleurs, le pays a peu de possibilités de mobiliser des ressources supplémentaires pouvant soutenir la croissance des besoins. La quasi-totalité des écoulements dans les rivières du pays est déjà mobilisée au moyen de 128 grands barrages et de nombreux ouvrages plus petits. La construction de 59 barrages programmés ne pourra fournir que des volumes supplémentaires très faibles (Kouraiss et Ait-Brahim, 2010).

Au Niger également, les rudiments d'étude sur la prospective sont bien présents au travers des travaux menés par Velluet (2014). Pour l'auteur, la sensibilité au changement climatique en Afrique subsaharienne, risque d'être amplifiée par le changement climatique global. En effet, les prévisions pour la fin du XXI^e siècle annoncent une augmentation des températures (Christensen *et al.*, 2007) et du stress hydrique (Boko *et al.*, 2007). Or, même si le devenir des précipitations reste encore très incertain (Druyan, 2011), l'augmentation des températures risque de réduire la durée des cycles de production végétale. De ce fait, pour l'auteur, tous ces éléments soulignent la nécessité de produire des projections fiables sur le devenir de ces ressources en eau et une meilleure compréhension des processus hydrologiques de surface afin d'anticiper les effets du changement global et optimiser la gestion des ressources. L'auteur marque cependant une observation judicieuse à prendre en compte. Notamment, le manque de connaissances concernant les propriétés hydrodynamiques de surface du type de sol de la zone d'étude qui a certainement un impact sur les processus d'infiltration via les racines et sur le ruissellement.

Selon Houndénou *et al.* (2011), les populations pauvres sont souvent les plus touchées puisqu'elles ne vivent que dans les zones les plus vulnérables avec une faible capacité d'adaptation. Donou (2015) confirme également que les événements hydro-climatiques extrêmes responsables de cette situation ne semblent pas s'améliorer à l'horizon 2050. Ils vont plutôt s'amplifier par l'augmentation de leur fréquence.

D'après Kouassi *et al.* (2010), l'occurrence des extrêmes climatiques affecte les systèmes humains, environnementaux et socioéconomiques en particulier dans les pays en voie de développement.

Les différents aspects abordés dans ce paragraphe sur l'état des connaissances permettent de mieux cerner l'environnement climatique en Côte d'Ivoire.

En effet, au cours de l'année 2019, la plateforme humanitaire du secteur privé de la Côte d'Ivoire a réalisé une évaluation du paysage des situations d'urgence complexe et des catastrophes naturelles. Il en ressort que les premières inondations ont eu lieu en Côte d'Ivoire sur la période 1968-1970, impactant environ 800 000 habitants. Ces sinistres se sont accompagnés parfois de crises sanitaires comme des épidémies de choléra dans plusieurs régions. En outre, aux dates du 30 et 31 mai 1996, des pluies torrentielles ont fait d'importants dégâts matériels et des pertes en vies humaines (28 morts) dans plusieurs quartiers de la capitale économique Abidjan. En 2007, un puissant orage accompagné de fortes pluies a affecté la ville d'Abidjan, causant des dégâts humains (09 morts) et matériels, principalement dans les communes de Yopougon et d'Attécoubé. Le reste du pays n'étant pas épargné avec une pluie torrentielle qui a occasionné au moins 5 morts et de nombreux dégâts matériels dans les quartiers populaires des villes de Korhogo et Ferkessédougou. Durant l'année 2009, des pluies diluviennes accompagnées de vents violents ont provoqué dans la ville d'Abidjan des glissements de terrain, des inondations, la destruction de logements, avec les conséquences suivantes : 22 personnes décédées, 6 disparus, 7 blessés, 48 familles et 121 étudiants sans abris. L'ampleur de la catastrophe est telle que la préfecture d'Abidjan a été amenée à déclencher pour la première fois le Plan ORSEC, plan institué par décret du 8 Août 1979 portant organisation du Plan des secours à l'échelon national en cas de catastrophe (ONU-SIPC, 2011).

En effet, l'année 2018 a été une année particulièrement meurtrière et coûteuse en raison des catastrophes naturelles. Les pluies du 18 au 19 juin 2018 qui se sont abattues sur le territoire national ont causé plus de 35 décès, des pertes économiques estimées à 5 milliards FCFA et un coût de 199 milliards FCFA induit pour le relèvement de l'activité économique.

Evoquant dans ce paragraphe les extrêmes climatiques, il est bon de souligner que la Côte d'Ivoire a aussi connue d'intenses moments de périodes sèches, associés de manière générale à une augmentation de la température. Les effets immédiatement visibles pour ce qui est de la foresterie, sont une défoliation importante, le brunissement des tiges et feuilles, la mortalité de jeunes pousses, les feux de brousse et de forêts ou plantations agricoles. Au cours de la campagne agricole 1982-1983, marquée par une saison sèche particulièrement prolongée, la Côte d'Ivoire a connu des incendies catastrophiques de forêts et feux de brousse faisant des dégâts considérables (110 000 ha de café et cacao, plus de 67 000 ha de forêts), entraînant par ailleurs la mort de 22 paysans. Le Comité National de Défense de la Forêt et de Lutte contre les Feux de Brousse (CNDFB) sera créé à la suite de cette catastrophe. Cette sécheresse a aussi affaibli la capacité de production des barrages hydro-électriques. Par ailleurs, en février 2010 un feu de brousse dans les environs de la localité de Nassian (Région du Zanzan, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire) a détruit 5 villages et fait 20 000 sinistrés. En 2018, aux mois de mars et avril, un affluent du Bandama (la Loka) qui alimente la ville de Bouaké en

eau potable a tari, entraînant de nombreuses coupures d'eau et obligeant les autorités ivoiriennes à réaliser des forages d'eau dans un contexte géologique de socle cristallin qui ne donne pas en général de bons débits de forage nécessaires à la couverture des besoins en eau de cette localité (Kouassi *et al.*, 2018b).

1.5. CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES

Les risques hydrométéorologiques constituent une préoccupation majeure pour les scientifiques. Les zones tropicales humides où la fréquence et l'intensité des précipitations sont sources de multiples aléas naturels ne sont pas épargnées (Alla, 2013). Ainsi, les prévisions des débits extrêmes présentées dans les paragraphes précédents constituent un modèle de gestion des risques de type temporel. Dans le présent paragraphe, il s'agira de porter une attention particulière sur la gestion de type spatio-temporel. L'évènement extrême retenu à cet effet, est la crue.

En effet, de toutes les catastrophes naturelles qui frappent le monde chaque année, les inondations sont, les plus fréquentes, les plus dommageables et les plus mortelles (Pulvirenti *et al.*, 2011). Elles sont la source de près de la moitié des décès occasionnés par les évènements hydro-climatiques extrêmes au cours des 50 dernières années, et sont responsables de près du tiers des pertes économiques au niveau mondial (James, 2008). Si les tendances aux changements climatiques, combinées à l'augmentation de la population vivant sur les terres inondables, à la déforestation, à la disparition des terrains marécageux et à l'augmentation du niveau moyen des mers, se confirment dans les décennies à venir, les inondations catastrophiques devraient être plus fréquentes (IPCC, 2012). Un nombre croissant d'individus devraient donc être exposés à ce phénomène, ce qui rend la question de la gestion du risque d'inondation de plus en plus importante pour les gouvernements et pour les municipalités.

En matière de gestion du risque d'inondation, trois catégories d'outils permettent la cartographie de l'aléa. Il s'agit des relevés sur le terrain, de la télédétection ainsi que de la modélisation hydraulique (Tanguy, 2012).

L'acquisition de données directement sur le terrain est une méthode largement utilisée pour l'étude des phénomènes spatiaux et environnementaux, mais n'est pas adaptée à la caractérisation de l'aléa inondation en phase de gestion de crise. Par ailleurs, le facteur limitant le plus important est le temps nécessaire à l'acquisition de données sur la zone, à leur traitement puis à la production d'une carte de l'aléa inondation. Un temps souvent trop long pour être adapté à la phase de gestion de crise, en particulier quand l'étendue des zones touchées est importante (Tanguy, 2012).

S'agissant de la télédétection, elle englobe différents outils qui peuvent aider à caractériser l'inondation. Il y a entre autres, la photographie aérienne qui permet d'obtenir des images de haute

résolution des plaines inondables (Schumann *et al.*, 2009). Cependant, son utilisation pour la génération de cartes est souvent limitée par les conditions météorologiques empêchant le survol de la zone cible et enfin les difficultés de détection des sites sous un couvert végétal dense ou à travers un épais couvert nuageux. Ensuite, les capteurs optiques satellitaires opérant dans les bandes du visible et de l'infrarouge (de 0,4 μm à 100 μm) ont permis d'améliorer l'accès aux données nécessaires à la cartographie des inondations à un coût moins élevé que celui de la photographie aérienne (Brivio *et al.*, 2002 in Tanguy, 2012). Viennent enfin les capteurs satellitaires opérant dans les micro-ondes passives (hyperfréquences allant de 1GHz à 100 GHz) tels que les capteurs SSM/I ou AMSR-E qui, mesurant les radiations micro-ondes émises naturellement par la terre et l'atmosphère (Naira, 2008 ; Tanguy, 2012)

Pour ce qui est de la modélisation hydraulique, elle permet de simuler numériquement et de prédire l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques hydrauliques d'une rivière au cours d'une crue, telles que le débit, la hauteur d'eau, les surfaces inondées ou les vitesses de l'eau (Hostache *et al.*, 2005 ; L'Homme, 2006). C'est un outil couramment employé dans le cadre de la gestion des inondations, aussi bien pour la prévision des inondations que dans les volets de prévention et de gestion de crise (Tanguy, 2012). Ainsi, il prend appui sur la connaissance et la localisation des zones à risque. Il est possible de réduire les vulnérabilités humaines et économiques. Il s'agira d'informer la population ou encore en limiter l'implantation des biens et des personnes dans les zones exposées à l'aléa inondation. De ce fait, le modèle retenu sera capable d'interpréter la topographie des terrains et permettre de déterminer les directions d'écoulement ainsi que les lieux de débordement.

En effet, l'évolution spatio-temporelle, ici définie par la cartographie de l'aléa est d'une grande importance. Avec les aspects sociaux et économiques de la vulnérabilité, il constitue l'une des composantes importantes du risque.

Pour rappel, le risque correspond à la combinaison de la probabilité d'occurrence d'un aléa et des conséquences pouvant en résulter sur les éléments vulnérables d'un milieu donné (Morin, 2008). Les pertes peuvent être estimées en termes de vies humaines, de destruction d'infrastructures ou en termes financiers (UNDRO, 1979). Ainsi, une inondation ne constitue pas un risque dans une zone inhabitée, aucun élément vulnérable n'y étant en théorie présent en termes de sécurité civile. Si au contraire elle touche une zone densément peuplée, où des infrastructures importantes sont implantées, le risque sera présent et pourra être fort (Cutter *et al.*, 2003).

L'étude menée au Maroc par Werren et Lasri (2014) sur la cartographie du danger d'inondation met en relation l'utilisation conjointe de la modélisation hydrologique et de la modélisation hydraulique. En effet pour les auteurs, l'exposition des personnes et des biens aux inondations a augmenté au

Maroc en raison du développement urbain mal maîtrisé et des tendances climatiques. La cartographie de l'aléa inondation et la prise en compte des cartes dans les documents de l'aménagement urbain visent la réduction de l'exposition à l'aléa, et par conséquent, la réduction du risque lié aux inondations. Le guide produit par les auteurs propose aux praticiens (gestionnaires de l'eau, bureaux d'étude, urbanistes), une méthodologie de cartographie menée sur deux sites d'étude marocains à savoir le bassin versant de l'Oued Fès et les bassins versants drainant la zone urbaine de Beni Mellal.

En Afrique Centrale, Leumbe *et al.* (2015), s'attardent sur la cartographie des zones à risques d'inondation dans la région de l'extrême-nord du Cameroun. Les auteurs se sont laissés interpeler par les crues exceptionnelles du Logone et des nombreux cours d'eau saisonniers qui parcourent la zone d'étude. En effet, en septembre 2012, ces crues provoquées par les fortes précipitations enregistrées sur le bassin versant sur une très courte période ont entraîné des inondations dans l'ensemble de la région. En s'appuyant sur le couplage des données de télédétection et d'un système d'information géographique, la cartographie des zones à risque d'inondation (Maga et ses environs) a été réalisée.

En Côte d'Ivoire, les événements des trente dernières années montrent qu'un certain nombre de phénomènes naturels surviennent de plus en plus. Des pertes en vies humaines, des dégâts matériels et économiques relativement importants sont occasionnés par ces phénomènes.

De même en Côte d'Ivoire, s'appuyant sur l'approche méthodologique issue du couplage système d'information géographique (SIG), de données interprétées à partir d'images TM de Landsat, de produits dérivés d'un modèle numérique d'altitude (MNA) et des données hydro-climatiques, Saley *et al.* (2005) ont cartographié des zones à risque d'inondation de la région semi-montagneuse de l'Ouest de la Côte d'Ivoire.

En juin 2014, l'organisation OCHA produit la carte des zones à risques d'inondations et de choléra pour la capitale économique de la Côte d'Ivoire. De l'étude, il ressort que 26% de la superficie de la ville d'Abidjan sont des zones à risques (inondations et éboulements). Depuis 2009, 13 personnes en moyenne perdent la vie chaque année dans la ville d'Abidjan à cause de ces intempéries. Malgré les mesures du gouvernement, plusieurs ménages habitent toujours les zones à risques. Ainsi, la ville d'Abidjan présente plusieurs zones à risques pendant les saisons de pluie avec de réelles menaces sur les populations, soit 80 000 personnes menacées par les inondations.

1.6. PRÉVISION DES DÉBITS EXTRÊMES

Prévoir le débit du cours d'eau un certain temps avant qu'il ne se produise est un des objectifs de l'hydrologue. Bien évidemment, on entend par prévision dans le cas de ce travail, l'utilisation de l'information passée et présente pour estimer un débit extrême (crue ou étiage) pour un ou plusieurs

instants dans le futur. Pourquoi est-il utile d'avoir des estimations du débit pour des instants futurs d'un cours d'eau à un endroit donné ? Pour répondre à cette question, l'organisme CIMA et UNISDR (2018) recommande de penser à deux des phénomènes les plus catastrophiques dans le monde : les inondations et les périodes de sécheresse. Bien qu'il soit difficile de discerner une tendance sur le nombre de personnes tuées dans les catastrophes naturelles, on constate une augmentation du nombre d'évènements et de personnes affectées par les catastrophes dans les dernières décennies. On pourrait croiser cette dernière évolution avec la démographie mondiale, l'urbanisation galopante et l'augmentation significative des températures depuis 1980. En moyenne par an, de 2000 à 2005, près de 300 millions de personnes ont été affectées par les catastrophes naturelles et près de 78 000 y ont trouvé la mort (EM-DAT, 2007). En outre, tous les domaines d'activités sont impactés. S'agissant du secteur de la santé, nous pouvons citer l'étude menée par Servat et Lapetite (1990) relative à la prévision hydrologique dans le cadre de la lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest. Selon les auteurs, le logiciel Perles développé par l'ORSTOM (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-mer, organisme aujourd'hui remplacé par l'Institut de recherche pour le développement en abrégé IRD) a permis l'amélioration du rendement des traitements et la réduction des coûts de fonctionnement du programme de lutte contre l'onchocercose. En effet, cet outil intervient à la fois dans la prévision des débits à différentes échéances et dans le calcul des doses préventives d'insecticide nécessaires, représentant par la même occasion un gestionnaire de banque de données limnimétriques.

Aussi la modélisation du débit des cours d'eau est-elle devenue un élément important pour la planification et la gestion des approvisionnements en eau et des ouvrages régulateurs ainsi que pour la prestation de services hydrologiques de prévision et d'alerte. A l'image du logiciel Perles, des progrès ont été accomplis dans le domaine de la modélisation des systèmes hydrologiques en lien étroit avec le perfectionnement des ordinateurs et autres logiciels d'application. Par ailleurs, la puissance de calcul des nouveaux ordinateurs rend utilisable des algorithmes autrefois difficiles à mettre en œuvre. Des ouvrages de référence portant sur ces aspects sont certes connus, mais connaissent un faible attrait en ce qui concerne le développement de programmes informatisés directement utilisables (WMO, 2014). Pour Abda *et al.* (2016), malgré les nombreuses recherches qui leur ont été consacrées, les modèles restent d'utilisation difficile et incertaine.

Au cours des vingt dernières années, les hydrologues ont commencé à appliquer des techniques d'intelligence artificielle pour estimer et prévoir différents phénomènes hydrologiques (Tachi et Bentradi, 2018). Parmi ces techniques le plus célèbre est le réseau de neurones artificiels "RNA" (ASCE 2000 a, b ; Solomatine et Dulal., 2003 ; Abrahart *et al.*, 2004 ; Zhu *et al.*, 2007 ; Lecerf , 2014 ; Tachi *et al.*, 2016 ; Rousseau, 2019 ; Hardy, 2019).

L'engouement suscité par la thématique apprentissage, statistique appliquée à l'hydrologie, a donné lieu à plusieurs articles et études qui intègrent la comparaison entre les réseaux de neurone et d'autres modèles. C'est le cas notamment dans la recherche menée par Awadallah (1999) relative à l'hydroclimatologie globale pour la prévision des crues du Nil. Deux modèles de prévision des débits ont été construits à cet effet, le premier est basé sur les fonctions de transfert avec bruit (FTB) et le second sur les réseaux de neurones artificiels (RNA). Les entrées des modèles sont les températures de surface de l'océan (TSO) dans des régions déterminées ainsi que les volumes cumulatifs des apports naturels des années antérieures. La prévision se fait trois mois avant l'occurrence de la pointe de la crue afin de permettre une meilleure planification des prochains prélèvements mensuels faits à partir du réservoir. Selon l'auteur, les modèles parviennent à expliquer 63% de la variation des débits, avec des coefficients de corrélation qui excèdent 0,85 entre les débits prédits et les débits observés, ainsi que des erreurs relatives de 6% en moyenne. Les modèles de prévision publiés dans la littérature n'expliquent que 36% de la validité de la crue du Nil.

Les réseaux de neurones sont employés afin de renouveler d'anciens systèmes. En effet, dans la modélisation hydrologique menée par Yonaba (2009), la recherche visait à remplacer le module BV3C (bilan vertical 3 couches) du modèle distribué HYDROTEL par un ensemble de réseaux de neurones. Ce module étant complexe, les réseaux de neurones une fois optimisés, constituent des outils de calculs très simples, rapides et transportables sur des supports informatiques simples. Il a été ainsi développé trois réseaux de neurones : un premier décrivant le comportement de l'humidité dans les trois couches superficielles de sol ; un deuxième qui quantifie le débit sortant de la première couche correspondant au ruissellement ; et un troisième quantifiant le débit dans la deuxième couche. L'erreur moyenne absolue a été analysée sur plusieurs horizons de 3, 7, 14, 30 et 45 jours. Il en ressort qu'au-delà de 14 jours, l'efficacité des réseaux de neurones devient limitée avec possibilité d'erreurs plus importantes. Il a été donné également de s'apercevoir que, plus la variable modélisée est continue et varie lentement dans le temps, plus les réseaux de neurones se montreront efficaces et précis.

En ce qui concerne la modélisation pluie-débit, de nombreuses études ont montré que les réseaux de neurones artificiels offrent de bonnes perspectives (Hsu *et al.*, 1995 et Solomatine et Dulal., 2003). En effet, la relation pluie-débit, et généralement les phénomènes hydrologiques sont considérés comme dynamiques, non linéaires et souvent difficiles à modéliser. De ce fait, l'application de l'apprentissage statistique à ce champ scientifique est donc logique (Toukourou, 2009).

Les réseaux de neurones artificiels (RNA), fabriqués à partir de structures cellulaires artificielles, constituent une approche permettant d'aborder sous des angles nouveaux les problèmes de perception, de mémorisation, d'apprentissage et de raisonnement, en d'autres termes d'Intelligence Artificielle

(notée IA) (Faraway et Chatfield, 1995 ; Cortez *et al.*, 2001, 2002 ; Crone, 2005 ; De Gooijer *et al.*, 2006).

Actuellement, l'utilisation des réseaux de neurones artificiels est importante et la recherche continue à mobiliser les énergies. Les réseaux de neurones s'avèrent être des alternatives très prometteuses pour contourner certaines difficultés ou limites rencontrées par les méthodes numériques classiques. Grâce à leur traitement parallèle de l'information et à leurs mécanismes inspirés des cellules nerveuses (neurones), ils infèrent des propriétés émergentes permettant de solutionner des problèmes complexes. Les premiers travaux sur les RNA ont été menés par Mc Culloch et Pitts (1943). Leur but était de comprendre les propriétés des systèmes nerveux à partir de composants élémentaires. Grâce à des modèles à base de neurones simplifiés (les neurones formels), ils montrent qu'il est possible de construire des systèmes capables de calculer des fonctions logiques. Dans les années 50, des chercheurs ont commencé à développer des modèles « software » (logiciel) mais aussi « hardware » (matériel) afin de simuler les fonctions de base du système nerveux. En effet, le terme hardware englobe tous les composants physiques d'un ordinateur. Les composants Hardware sont des matériels physiques palpables, pouvant être à l'intérieur ou à l'extérieur de l'ordinateur (carte mère, le processeur, la carte graphique, la clé USB, les DVD et CD-ROM ...). Contrairement au Hardware, le Software n'est pas palpable, mais il permet toutefois de faire fonctionner l'ordinateur. En 1956, une grande conférence était organisée à Darmouth sur le thème de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage : elle sera le point de départ de l'âge d'or des RNA et de l'IA. Peu de temps après, Rosenblatt crée le premier Perceptron (Rosenblatt, 1962), un réseau de neurones artificiels capable de classer des individus en catégories de façon robuste et capable de conserver ses performances face à des données bruitées et à des dégradations de sa structure (pertes de cellules, modifications d'une partie des connexions). De leur côté, Widrow et Hoff (1960) propose l'Adaline (Adaptative LINear Element) : le premier réseau de neurones destiné à résoudre un problème du monde réel, la suppression d'échos sur une ligne téléphonique. En 1965, Nilsson publie « Machine Learning » (1965) qui donne les fondements mathématiques de l'apprentissage automatique pour la reconnaissance des formes. Après des débuts prometteurs, les réseaux de neurones subissent la concurrence des techniques de calculs plus classiques et tombent en désuétude suite notamment aux critiques de Minsky et Paper (1969). Ceux-ci mettent en évidence l'incapacité des réseaux à une couche à calculer l'opérateur logique et les difficultés théoriques posées par l'apprentissage dans les réseaux multicouches. Les autres techniques d'intelligence artificielle vont conserver les faveurs des chercheurs pendant dix ans avant de montrer elles aussi leurs limites. Les réseaux de neurones vont réapparaître dans les années 80 avec les travaux de Hopfield (1982 ; 1984) sur les réseaux entièrement interconnectés, ceux de Kohonen (1982) avec les cartes autoorganisatrices à apprentissage non

supervisé et enfin ceux de McClelland et Rumelhart (1986a, 1986b) qui introduisent l'algorithme d'apprentissage de rétropropagation de l'erreur.

Pour bien comprendre ce que sont les réseaux de neurones, il convient de s'attarder sur l'élément fonctionnel, représenté à la figure 5. Ce dernier est une fonction algébrique paramétrée, à valeurs bornées, de variables réelles appelées entrées et nommées x_j . Celles-ci sont multipliées par un poids w_{ij}^1 pour donner le produit $x_j w_{ij}^1$ qui est ensuite pris comme argument d'une fonction de transfert (ou d'activation) g pour former la sortie $y_i = g(\sum_{j=1}^n x_j w_{ij}^1 + b_i^1)$. Le poids qui n'est pas connecté aux entrées porte le nom de biais (constante d'ajustement indépendante des entrées b_i^1)

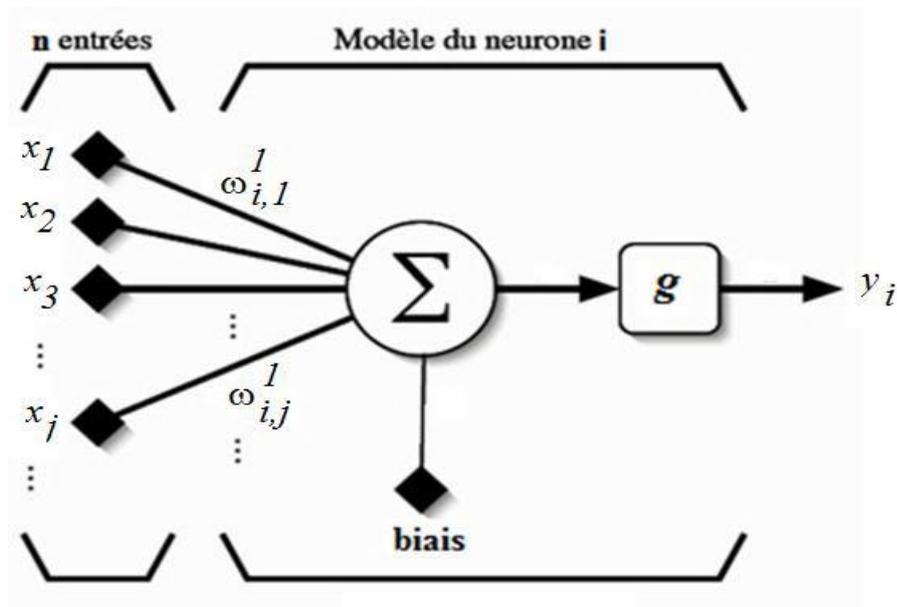


Figure 5 : Structure d'un neurone artificiel (Voyant, 2011)

Les fonctions d'activation ont évolué au cours du temps. Dans les versions originelles, on utilisait une fonction d'activation de type « seuil », c'est-à-dire une fonction qui prenait uniquement deux valeurs, 0 ou 1, selon que la force des signaux arrivant au neurone dépassait un certain seuil dont la valeur est l'opposé de celle du biais (figure 6). Malheureusement, ces fonctions (de type Heaviside ou échelon) ne sont pas dérivables sur \mathbb{R} , ce qui génère des difficultés lors de la détermination des poids et des biais lors de la phase d'apprentissage. Afin de pallier ce problème de non-dérivabilité, plusieurs fonctions, dites sigmoïdes, dont la forme s'approche de la fonction échelon, peuvent être utilisées. Les fonctions classiquement utilisées sont la fonction linéaire : $g(x)=x$, la tangente hyperbolique : $g(x)=\tanh(x)=\frac{e^x-e^{-x}}{e^x+e^{-x}}$ et la fonction sigmoïde standard : $g(x)=\frac{\tanh(x)+1}{2}$. Ces fonctions sont bornées et proposent des valeurs de sortie comprises entre 0 et +1, ou entre -1 et +1. Il est aussi possible d'utiliser d'autres types de fonctions dérivables (gaussiennes, autres sigmoïdes, etc.). En fonction de l'intensité du signal qui arrive au niveau de la fonction d'activation, le neurone sera soit

« allumé » soit « éteint ». Dans le premier cas, cela signifie que la sortie sera égale à 1, et dans le second que la sortie sera -1.

Le neurone artificiel isolé n'a que peu d'intérêt et est rarement utilisé. Cependant, une fois interconnecté avec d'autres neurones, ils forment alors un réseau capable de résoudre des problèmes très complexes : classification, reconnaissance de forme, prédiction de séries temporelles, etc. C'est souvent une solution idéale lorsque l'on dispose de beaucoup de données et que l'on ne connaît pas les règles qui régissent les phénomènes que l'on veut modéliser. Dans ce paragraphe, nous allons lister les différentes familles de réseaux qui agencent les neurones. Le réseau le plus utilisé dans la littérature est sans conteste le Perceptron MultiCouche (PMC) qui est organisé en plusieurs couches de neurones formels. L'information circule de la couche d'entrée vers la couche de sortie uniquement. Chaque couche est constituée d'un nombre variable de neurones, les neurones de la couche de sortie correspondant toujours aux sorties du système (Voyant, 2011). En toute généralité, les réseaux de neurones artificiels sont des collections de petites unités, ou encore une juxtaposition d'éléments unitaires, fonctionnels et interconnectés (Bofinger et Heilscher, 2006 ; Bosch *et al.*, 2008). Il existe une multitude d'agencements possibles (Jodouin, 1994). Certaines applications peuvent nécessiter plusieurs sorties (dans le cas d'une classification à plusieurs classes par exemple). Presque tous les réseaux utilisés ont une seule sortie : la configuration obtenue est certainement la plus classique. Dans cette architecture, les neurones sont organisés en couches comme le montre la figure 6.

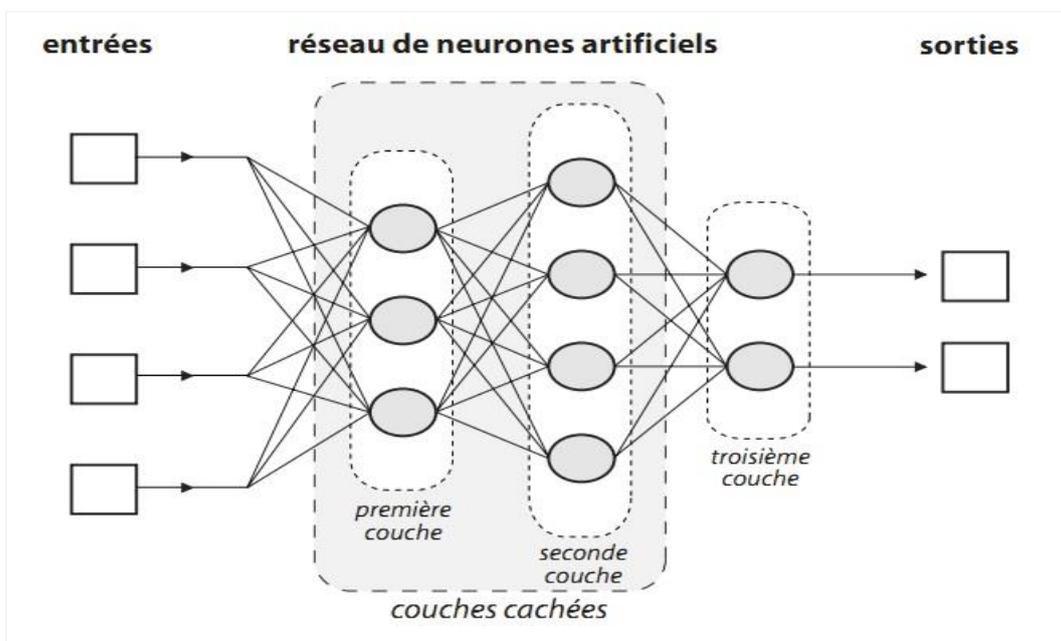


Figure 6 : Exemple d'architecture de RNA avec deux couches cachées et deux sorties (Voyant, 2011)

La couche intermédiaire située entre les entrées et les sorties est appelée couche cachée. Il peut y avoir plusieurs couches intermédiaires. Les connexions se réalisent d'une couche à la suivante sans

qu'il y ait de connexion entre couches non adjacentes. Dans le cas du PMC avec une seule couche cachée, on qualifie également cette architecture « de réseau à deux couches » puisqu'il y a deux couches de poids ajustables : une qui relie les entrées aux neurones cachés et l'autre les neurones cachés aux sorties. Les neurones cachés sont ceux de la couche cachée. Les fonctions d'activations de type sigmoïde (généralement présentes sur la ou les couches cachées) sont les éléments principaux qui permettent aux PMC d'être qualifiés de modèles non-linéaires. Si l'on remplace ces fonctions d'activation sigmoïdes par des fonctions linéaires, on transforme le PMC en une régression linéaire.

Concernant les autres familles de RNA, on peut aussi citer celles des réseaux de neurones bouclés ou récurrents (Dreyfus, 2004). Contrairement aux réseaux de neurones non bouclés (comme les PMC) dont le graphe de connexion est acyclique, ils peuvent avoir une topologie de connexions quelconque, comprenant notamment des boucles qui ramènent aux entrées, la valeur d'une ou plusieurs sorties (Elman, 1990). Pour qu'un tel système soit causal, il faut évidemment qu'à toute boucle soit associé un retard (Elman, 1991). La forme générale des équations régissant un réseau de neurones bouclés est appelée forme canonique. En fait, tout réseau de neurones bouclé, aussi compliqué soit-il, peut être ramené à une forme canonique, comportant un réseau de neurones non bouclé dont certaines sorties (les variables d'état) sont ramenées aux entrées par des bouclages de retard unité.

L'autre grande famille de réseaux de neurones concerne les réseaux de fonctions radiales (ou RBF en anglais pour « Radial Basis Function »). Les fonctions radiales ont été introduites par Powell (1985) dans le cadre de l'interpolation, c'est-à-dire de la recherche de fonctions passant exactement par un nombre fini de points (appelés « points de collocation »). La recherche d'une fonction passant exactement par des points n'a de sens que si ces points ne sont pas entachés de bruit. L'article de référence des réseaux RBF est écrit par Broomhead et Lowe (1988). Il propose d'utiliser ces réseaux pour l'approximation de fonctions non linéaires. La fonction recherchée est toujours une combinaison linéaire de fonctions radiales, mais leur nombre est beaucoup plus petit que le nombre de points et elles ne sont donc pas forcément centrées en ces points. La propriété d'approximateurs universels pour ces réseaux n'a été que très récemment prouvée pour des fonctions d'activation gaussienne. Ces réseaux ont été utilisés fréquemment comme outil de modélisation de type « boîte noire ». Cependant, leur utilisation est plus dédiée aux processus de type entrée-sortie en automatisme qu'à la prédiction à horizon.

En règle générale, les réseaux de neurones sont couplés à un algorithme « d'entraînement » ou d'apprentissage qui consiste à modifier les poids synaptiques en fonction d'un jeu de données présentées en entrée du réseau. Le but de cet entraînement est de permettre au réseau de neurones « d'apprendre » à partir des exemples. Si l'entraînement est correctement réalisé, le réseau est capable de fournir des réponses en sortie très proches des valeurs d'origine du jeu de données d'entraînement.

Les réseaux que l'on vient de présenter sont dit à apprentissages supervisés et bien d'autres modèles sont intégrés à cette grande thématique RNA. De plus, il existe aussi des réseaux à apprentissage non supervisés : le réseau est laissé libre de converger vers n'importe quel état final lorsqu'on lui présente une entrée. Pour n'en citer qu'un faisant partie de cette famille de RNA, il existe le réseau de Hopfield (1982) qui réalise une mémoire adressable par son contenu. Il s'agit d'un réseau récurrent (la propagation de l'information ne s'effectue pas de l'entrée vers la sortie) constitué de neurones formels à deux états (-1 et 1 ou 0 et 1), dont la loi d'apprentissage est la règle de Hebb (1949). La liste des familles de réseaux exposée montre à quel point il est difficile de trouver celle qui va permettre de solutionner un problème posé, tant il existe de variétés différentes. Pour réussir à dégager les plus pertinents de chaque problématique, il est préconisé d'étudier la littérature sur le sujet choisi (Voyant, 2011).

Les modèles de RNA utilisés dans la prévision des extrêmes, restent globalement orientés sur les crues (Ayrat, 2005 ; Kharroubi, 2013 ; Abda, 2016 ; Ramos, 2018). Cette situation est tout à fait compréhensible. En effet, cela n'est un secret pour personne, les inondations et les tempêtes restent les phénomènes naturels les plus fréquents ces dernières années. Elles représentent plus de 60% des causes des catastrophes naturelles dans le monde. De ce fait, l'implémentation des RNA dans cette recherche se veut aussi complète que possible d'un point de vue des extrêmes hydrologiques.

CONCLUSION PARTIELLE

Le présent chapitre a permis de définir quelques concepts nécessaires à la bonne compréhension du sujet. Ainsi, en rapport avec le thème qui est traité, l'on peut retenir deux grandes notions. D'une part, la prévision qui correspond à l'annonce précise ou estimation statistique de l'apparition et de l'ampleur d'un événement futur. D'autre part, la notion d'extrême, définie selon le glossaire international d'hydrologie comme étant des valeurs maximales ou minimales d'une variable hydrologique. A travers la revue de littérature des travaux ayant un lien direct ou similaire avec l'étude, il ressort que les déficits pluviométriques observés sur le territoire ivoirien ont engendré des déficits d'écoulement. A titre illustratif, les déficits pluviométriques évalués sur le bassin du Bandama fluctuent entre 15 et 60%. En ce qui concerne les systèmes d'alertes précoces (SAP) de débits extrêmes, ils s'intègrent dans un cadre de gestion et réduction des risques de catastrophes. En Côte d'Ivoire, plusieurs structures interviennent dans ce cadre à savoir le BNETD, le CNS, l'ONPC, la SODEXAM et l'ONAD. Toutefois, à ce jour, il y a peu de législations ayant spécifiquement trait au domaine de la gestion des risques de catastrophe en Côte d'Ivoire, à part le Plan ORSEC. De même, la Côte d'Ivoire n'a pas suffisamment d'expérience dans la stratégie et la planification des risques de

catastrophes. Des efforts doivent être faits sur ces aspects, d'autant plus que le montant alloué au Plan d'Action de l'axe stratégique alerte précoce et préparation à la réponse dont l'enveloppe s'est chiffrée à environ 1,708 milliards de FCFA en 2011. Sachant que les événements à venir, ne seront qu'une suite logique des changements climatiques déjà enclenchés, il convient d'élaborer dès à présent des scénarios possibles. En effet, le CCNUCC et le GIEC prédisent que d'ici 2100, la température globale de la surface de la terre pourrait augmenter de 1,4 à 5,8°C. Cette situation pourrait entraîner une diminution du niveau des précipitations de l'ordre de -20% à l'horizon 2050. De ce fait, l'étude prospective s'avère plus que nécessaire. Cette étude proposera également une cartographie des zones inondables. De toutes les catastrophes naturelles qui frappent le monde chaque année, les inondations sont, les plus fréquentes, les plus dommageables et les plus mortelles. Pour ce qui est de la prévision des débits extrêmes (étiage et crue), il sera retenu les réseaux de neurones artificiels (RNA) et plus spécifiquement le Perceptron MultiCouche (PMC). De nombreuses études ont montré que les réseaux de neurones artificiels offrent de bonnes perspectives pour la modélisation pluie-débit.

CHAPITRE 2. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1. CONTEXTE GÉOGRAPHIQUE

2.1.1. APERÇU DU FLEUVE BANDAMA

Le fleuve Bandama, long de 1050 km, s'étend du Nord au Sud de la Côte d'Ivoire. A ce titre, il constitue le seul parmi les grands fleuves de la Côte d'Ivoire dont le bassin versant est entièrement en territoire ivoirien (figure 7). Il se situe entre les longitudes 3°50'Ouest et 7°0'Ouest et entre les latitudes 5°14'Nord et 10°20'Nord. Il prend sa source à une altitude de 480 m, entre Korhogo et Boundiali et son exutoire se situe dans la région de Grand-Lahou à N'Zida. Ses deux affluents principaux sont la Marahoué (affluent de la rive droite de 550 km de long) et le N'Zi (affluent de la rive gauche de 725 km de long).

Après une orientation Est-Ouest de son cours supérieur jusqu'à Ferkéssédougou, le Bandama prend une direction Nord-Sud. De Ferkéssédougou à sa confluence avec le Bou, il se caractérise par une succession de méandres. Dans la partie nord, il reçoit successivement le Solomougou et le Bou (affluent de la rive droite), le Badénou et la Lokpôhô (affluent de la rive gauche). A l'approche de Kossou, la vallée se resserre notablement. Peu après Kossou, il reçoit la Marahoué ou Bandama rouge. Le Bandama prend ensuite une direction NO-SE jusqu'à sa confluence avec le N'Zi. Il reprend ensuite une direction N-S jusqu'à son embouchure à Grand-Lahou.

Le bassin versant du Bandama est limité par :

- les bassins versants du Niger et de la Comoé au Nord ;
- les bassins versants du Boubo, de l'Agnéby et l'océan atlantique au Sud ;
- le bassin versant de la Comoé à l'Est ;
- le bassin versant du Sassandra à l'Ouest.

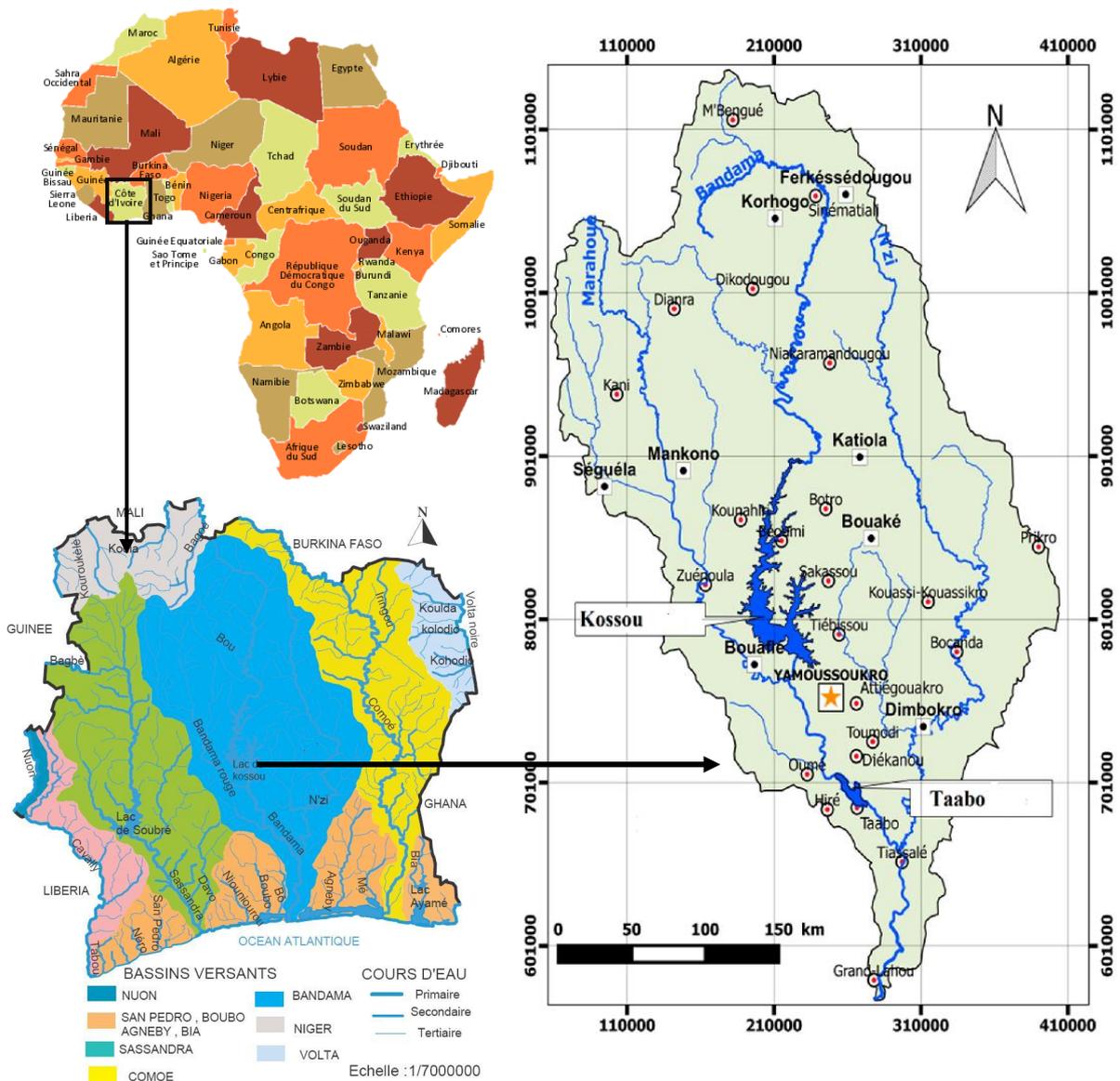


Figure 7 : Carte de présentation du bassin versant du Bandama

2.1.2. APERÇU DU FLEUVE MARAHOUÉ

Le bassin versant de la Marahoué ou Bandama rouge est situé en Côte d'Ivoire entre les longitudes 5°5' et 7°1' Ouest et les latitudes 6°7' et 9°5' Nord (figure 8). De forme ellipsoïdale avec une superficie de 24300 km² (soit 25% de la superficie totale du bassin versant du Bandama), la longueur du cours d'eau principal est de 550 km. La Marahoué est l'affluent de rive droite le plus important du Bandama (Camus, 1972). Le cours d'eau principal de la Marahoué est encadré par deux affluents : le Béré à l'Est et le Yani ou Bahoroni à l'Ouest. Il se jette dans le Bandama blanc à l'endroit où se trouve le village de Bozi, peu après la ville de Bouaflé.

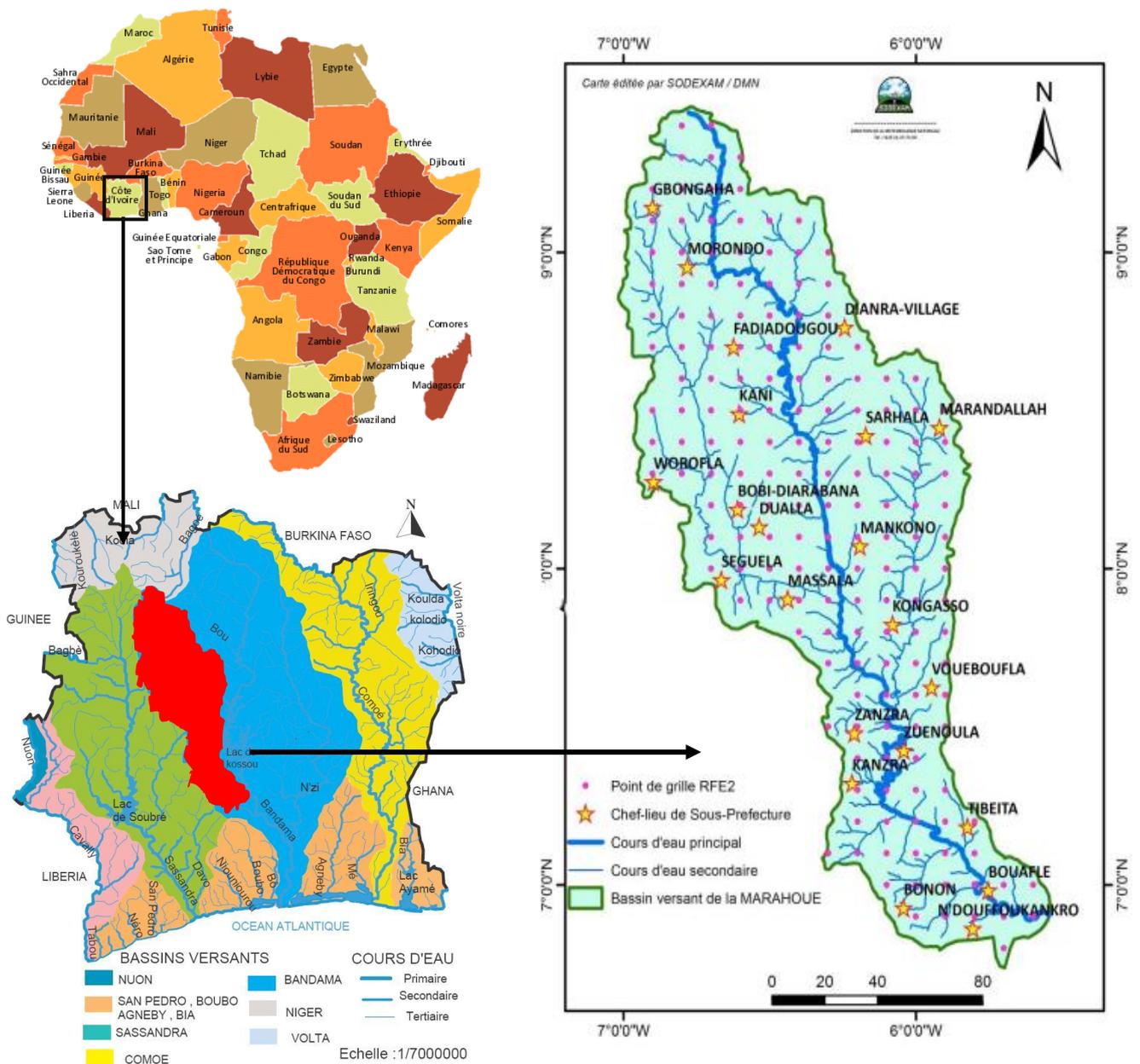


Figure 8 : Localisation géographique de la zone d'étude (SODEXAM, 2019)

2.1.3. CONTEXTE CLIMATIQUE

La zone d'étude est une zone de brassage de deux régimes climatiques que sont le régime tropical de transition et le régime équatorial de transition atténué.

2.1.3.1. Régime tropical de transition (climat soudanais)

Cette zone englobe la partie nord du bassin et limitée au Sud par la latitude 8°00'N. Les précipitations annuelles évoluent entre 1000 à 1700 mm. Ce régime se caractérise par deux saisons : une saison pluvieuse de mai à octobre (6 mois) et une saison sèche de novembre à avril (6 mois) qui est accentué

par l'harmattan. Ce climat correspond au climat tropical de transition. Les mois d'août et septembre sont les mois les plus pluvieux (Irié, 2017).

2.1.3.2. Régime équatorial de transition atténué (climat baouléen)

Le climat baouléen est situé en dessous du parallèle 8°00 Nord. Il présente quatre (4) saisons dans le cycle annuel avec des précipitations comprises entre 1500 et 2200 mm. Ainsi, on y observe une grande saison des pluies de mars à juin (4 mois), suivie d'une petite saison sèche en juillet et août (2 mois), ensuite une petite saison des pluies en septembre et octobre (2 mois) et enfin une grande saison sèche de novembre à février (4 mois). Ce type de climat fait la transition entre le climat soudanien et le climat subéquatorial. Ce climat tropical humide est proche du climat subéquatorial par l'abondance des précipitations (Kouamé, 2013 ; Irié, 2017).

2.1.3.3. Évolution de la température et de la pluviométrie

L'évolution de la température, représentée à la figure 9, de manière générale sur tout le bassin laisse entrevoir deux grandes plages de températures. Une première plage où les températures sont supérieures à la moyenne qui est de 26°C (février, mars, avril et mai) et une seconde plage où elles sont inférieures à cette moyenne (janvier, juin, juillet, août, septembre, octobre, novembre et décembre).

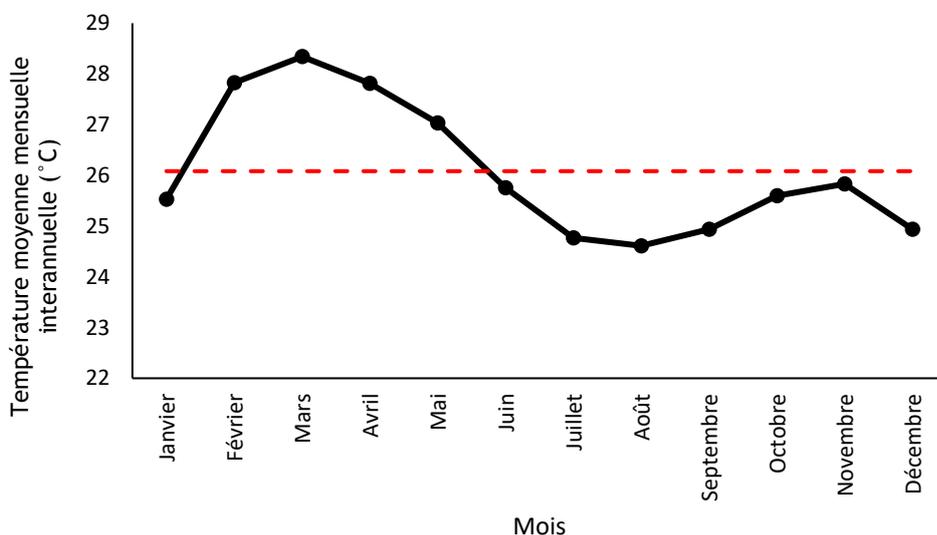


Figure 9 : Évolution de la température moyenne mensuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961- 2017)

La figure 10 représente l'évolution des précipitations moyennes mensuelles interannuelles sur le bassin versant de la Marahoué. Elle illustre bien l'évolution des différents régimes pluviométriques déjà signalés plus haut, relatif à la description des aspects climatiques de la zone d'étude. En effet,

sur le graphique, la saison sèche est représentée par des pluies inférieures à 100 mm dure cinq mois (janvier, février, mars, novembre et décembre). Ensuite, on a une période intermédiaire de cinq mois (avril, mai, juin, juillet et octobre), avec une moyenne de 128 mm. La saison pluvieuse quant à elle, est marquée par deux mois (août et septembre), avec une moyenne de 190 mm.

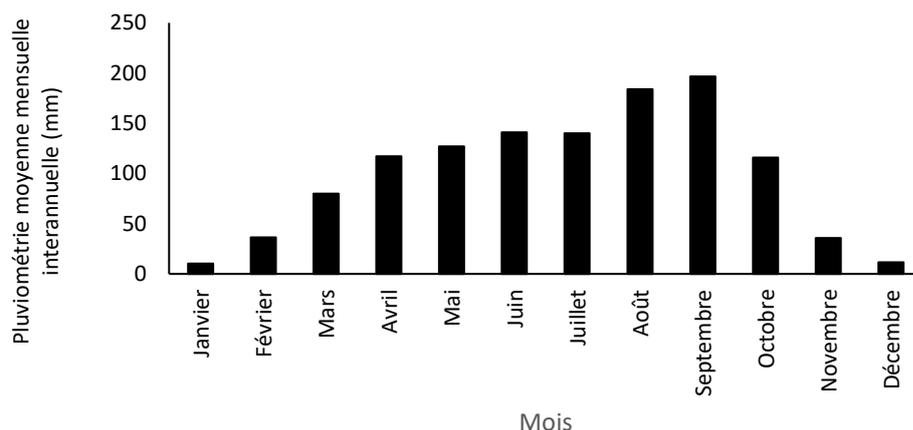


Figure 10 : Évolution de la pluviométrie moyenne mensuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961- 2017)

2.1.4. COUVERT VÉGÉTAL

En Côte d’Ivoire, deux grands types de paysages végétaux se partagent le territoire. En tenant compte de la situation géographique du bassin versant de la Marahoué, on peut relever qu’il est à cheval entre les deux secteurs suivants :

- le domaine guinéen ou mésophile : situé dans la moitié sud en zone forestière. On y retrouve des prairies alti-montaines (sommet du mont Nimba) et des savanes de basse côte entre Grand-Lahou et la lagune Aby. Ce domaine est localisé au Sud-Ouest de la Marahoué et caractérisé par la présence de lambeaux de forêts mésophiles et de larges mailles de savane ;
- le domaine soudanais : situé dans la partie septentrionale en zone de savane se subdivise en deux secteurs à savoir le secteur sub-soudanais et le secteur soudanais. Le secteur sub-soudanais, plus important que le second secteur, s’étend de la limite nord de la zone guinéenne aux frontières du Mali et du Burkina Faso. Quant au secteur sub-soudanais, il occupe la moitié Nord du bassin versant de la Marahoué, et est composé de forêts claires et de savanes avec quelques îlots de forêts denses (Adon, 2015).

Les essences dominantes sur le bassin versant de la Marahoué sont l'Iroko, le Samba, le Fraké et le Fromager pour la partie forestière. Les roseaux et les rôniers sont plus présents dans la zone de savane.

2.1.5. CADRE GÉOMORPHOLOGIQUE

Le bassin versant de la Marahoué est une ancienne pénéplaine constituée par un socle qui descend en pente douce vers le Sud. Le modelé ondulé et monotone est caractérisé par une succession de collines plus ou moins sub-aplanies qui sont le résultat d'une reprise d'érosion d'anciennes surfaces plus ou moins planes et indurées, qui ont laissé des reliques telles que les buttes témoins de la région septentrionale du bassin versant. On peut distinguer quelques grandes unités (Avenard, 1971) : la région de Boundiali au Nord-Ouest est formée de plateaux accidentés (500 m) ; plus au Sud, l'unité de Mankono-Séguéla, correspond à un ensemble assez homogène de plateau (300 à 400 m). La région septentrionale est très aplanie avec quelques reliefs isolés (400 à 500 m) (Lévêque *et al.*, 1983).

2.1.6. HYDROGRAPHIE ET RÉGIME D'ÉCOULEMENT

La Marahoué évolue suivant un réseau de type dendritique. Cette forme de réseaux correspond soit à des sédiments uniformément résistants, horizontaux ou biseautés par une surface horizontale, soit à des roches cristallines (Koffi, 2007). Dans le bassin versant de la Marahoué, les eaux y circulent du Nord au Sud et les débits sont généralement croissants dans cette direction (figure 11).

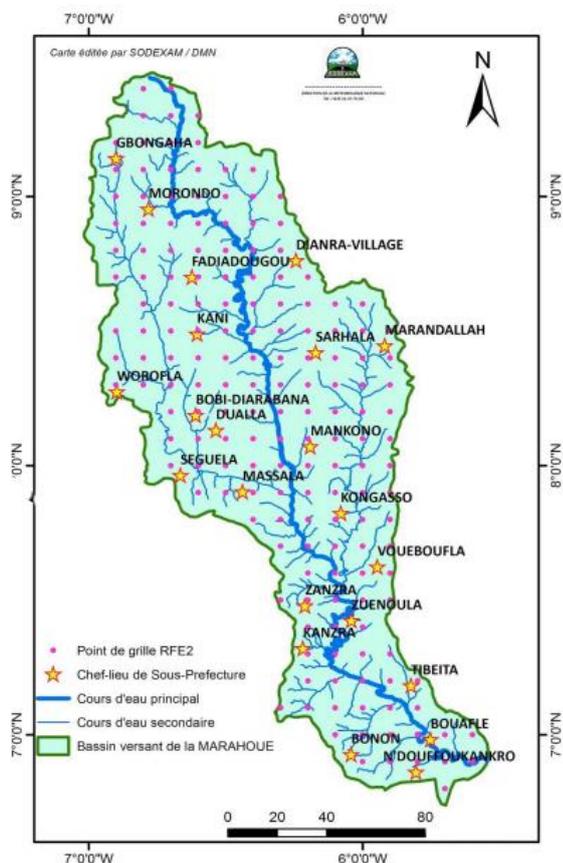


Figure 11 : Réseau hydrographique du bassin versant de la Marahoué (SODEXAM, 2019)

La figure 12 présente l'évolution du débit à la station hydrométrique de Bouaflé. On y observe un régime relativement simple avec le débit minimum en février et le débit maximum au mois de septembre. La période de faible écoulement s'étend de décembre à juin tandis que la période de forts écoulements s'étend quant à elle, de juillet à novembre.

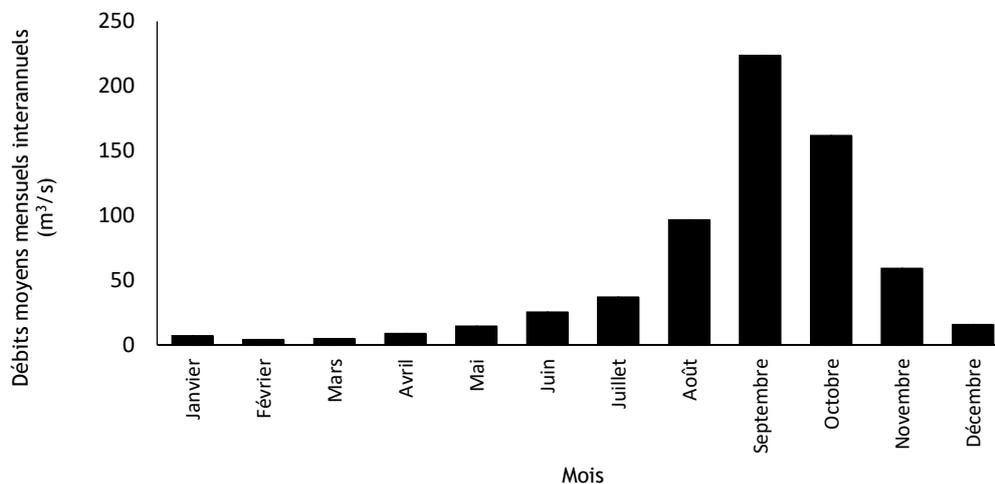


Figure 12 : Régime hydrologique du bassin versant de la Marahoué (1961-2017)

2.1.7. TYPES DE SOL

Le bassin versant de la Marahoué est constitué principalement de sols ferralitiques associés à d'autres types de sols.

2.1.7.1. Sols ferralitiques

Le sol du bassin versant de la Marahoué est dominé par des sols essentiellement ferralitiques (Monnier, 1978 *in* Irié, 2017). On en distingue deux types (Kouamé, 2013):

- une bande de sols fortement désaturés sous pluviométrie élevée (plus de 1500 mm de pluie) se moule à peu près sur la forêt ombrophile au Sud. L'horizon humifère est peu épais et l'horizon gravillonnaire peu développé. La pédogénèse est actuelle ;
- le reste du bassin est occupé par les sols moyennement désaturés. L'horizon gravillonnaire est plus important et les concrétionnements sont fréquents. On relève également de nombreuses zones cuirassées.

Les caractères de fertilité de ces sols sont très variables. En effet, tandis que les sols de transition sont plus favorables aux cultures arbustives plus exigeantes (caféier, cacaoyer au Sud), les sols moyennement désaturés du Nord conviennent beaucoup plus à la culture du coton.

2.1.7.2. Les sols sur roches basiques

Les sols sur roches basiques présentent des éléments grossiers, constitués de fragments de roches plus ou moins altérées et ferruginisées et de petites concrétions noires de type "plomb de chasse". Les caractères de fertilité dépendent essentiellement de la profondeur du sol, c'est-à-dire de la densité des éléments grossiers et du niveau d'induration. Toutefois, la mise en valeur est rendue difficile par le modelé très accidenté, et souvent seuls les bas de pente sont susceptibles d'être utilisés pour les cultures. Ces sols occupent principalement les chaînes de collines du complexe volcano-sédimentaire, et ils sont fréquemment juxtaposés avec des cuirasses (Koffi, 2007).

2.1.7.3. Les sols hydromorphes

Ces types de sol sont localisés dans les zones à écoulement difficile (bas-fonds), dans les plaines d'inondation, et dans les régions où la nappe phréatique peut affleurer facilement (sables littoraux). Ces sols ont une faible fertilité en basse côte. Par ailleurs, ils sont excellents pour le bananier et les cultures vivrières sur buttes (Kouamé, 2013).

2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

2.2.1. APERÇU GÉOLOGIQUE DE LA CÔTE D'IVOIRE

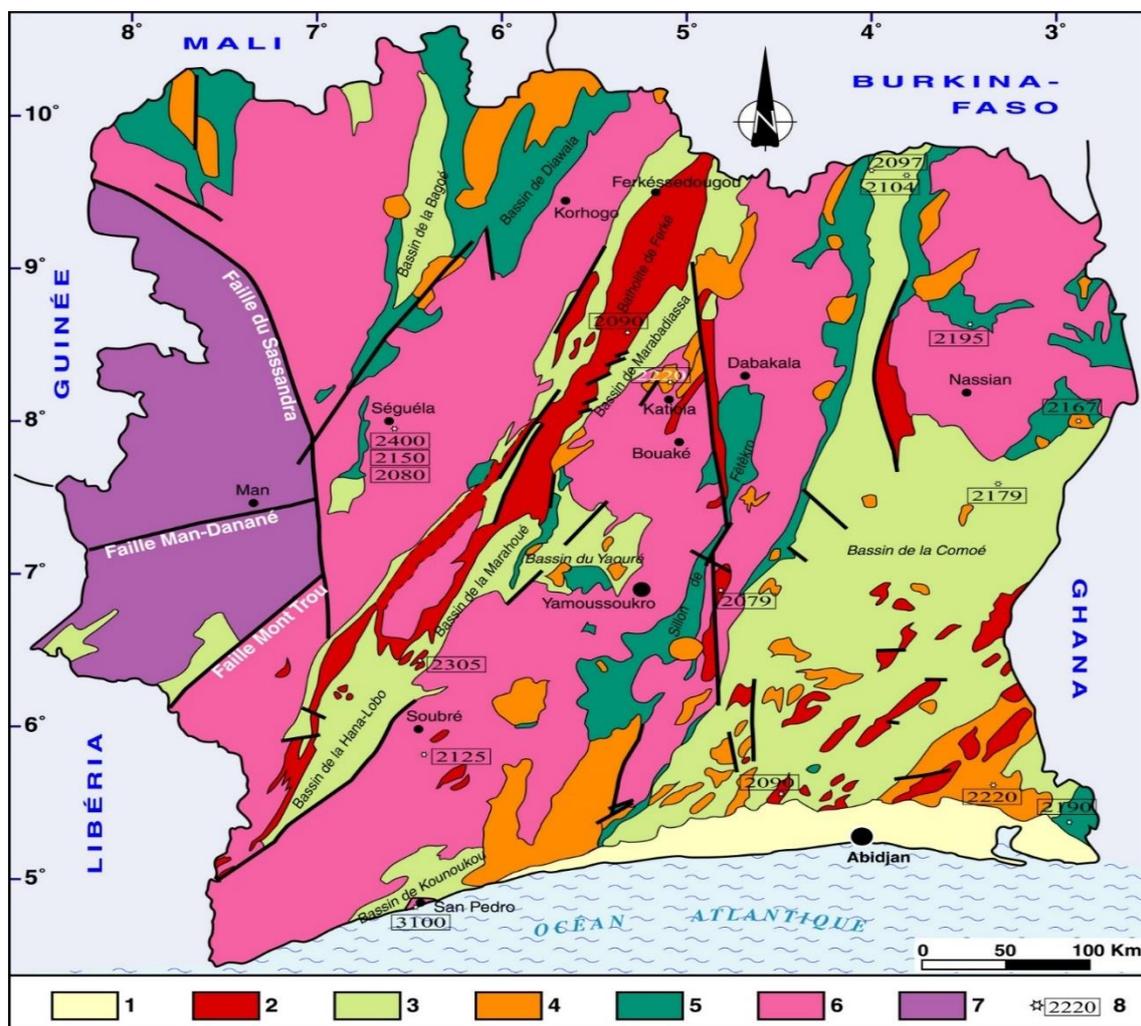
La Côte d'Ivoire appartient au vieux bouclier précambrien de l'Afrique de l'Ouest (Tagini, 1971 ; Martin, 1973 ; Assalé, 2013 ; CEMA-Environnement, 2017) qui avant l'ouverture de l'Atlantique, était en continuité avec celui du Brésil (Blarez, 1986). Les formations géologiques de la Côte d'Ivoire se répartissent, selon Pothin *et al.* (2000), entre deux entités chronologiquement distinctes. On distingue d'une part le socle précambrien qui couvre 97,5 % du territoire ivoirien et un bassin sédimentaire secondaire-tertiaire couvrant 2,5 % du territoire formant une mince frange littorale (figure 13).

Le socle appartient à la partie méridionale du craton ouest-africain appelée « Dorsale de Man » ou « Dorsale de Léo ». Trois grandes orogènes (léoniennes, libérienne et éburnéenne) ont contribué à la mise en place des deux unités géologiques de cette dorsale. Ainsi, on retrouve le domaine Kénéma-Man affecté par les mégacycles léonien et libérien, et le domaine Baoulé-Mossi affecté par le mégacycle éburnéen (Bessoles, 1977). Ces domaines sont séparés par la Faille de Sassandra (Assalé, 2013 ; CEMA-Environnement, 2017).

Le Domaine Kénéma-Man est le plus accidenté et est limité à l'Est par la faille de Sassandra. On le trouve à l'Ouest dans la région montagneuse de Man et dans le Sud-Ouest, de San-Pedro jusqu'à Tabou (figure 13). Il est structuré par les cycles orogéniques Léonien (3 500-2 900 Ma) et Libérien

de 2 900-2 400 Ma (Camil, 1984). Le Domaine Kénéma-Man est d'âge Archéen. La lithologie du domaine archéen est constituée de gneiss gris tonalitiques et trondhjémiques, de charnokites, de roches vertes métamorphisées dans le faciès granulitique, de quartzites rubanés à magnétite et de migmatites à biotite. Ces formations sont intrudées par des granites roses et par des complexes basiques-ultrabasiques (Camil, 1984 *in* Gnanzou, 2014).

Le Domaine Baoulé-Mossi occupe la presque totalité du territoire, soit 73 % de la superficie totale. Il a été structuré par le mégacycle éburnéen survenu au Protérozoïque inférieur (2 400- 1 600 Ma). Ce domaine est constitué de roches birimiennes, principalement des volcanites (tholéiitiques et calco-alcalines), des granitoïdes, des volcano-sédiments et sédiments (Ouattara *et al.*, 2010).



1. formations post-birimiennes ; bassins sédimentaire côtier. 2. batholite de Ferké : granitoïdes à deux micas associés ou non aux structures décrochant méridiennes. 3. bassins sédimentaires et volcano-sédimentaires. 4. granitoïdes calco-alcalins localisés dans les bassins sédimentaires. 5. volcanisme et volcano-sédiments indifférenciés. 6. granitoïdes et granites rubanés gneiss et migmatites indifférenciés (âges supérieurs à 2,4 Ma). 7. domaine archéen. 8. Âge.

Figure 13: Schéma simplifié des ensembles géologiques en Côte d'Ivoire (Ouattara, 1998)

Le bassin sédimentaire ivoirien doit son existence à l'ouverture de l'océan Atlantique. Il est le plus occidental des petits bassins d'âge Méso-cénozoïque de la façade côtière du golfe de Guinée (Sombo, 2002). Il occupe une superficie de 30 000 km² s'étendant de Sassandra à l'Ouest jusqu'à Axim au Ghana à l'Est. C'est un bassin de type ouvert qui présente une partie émergée et une partie immergée (figure 14).

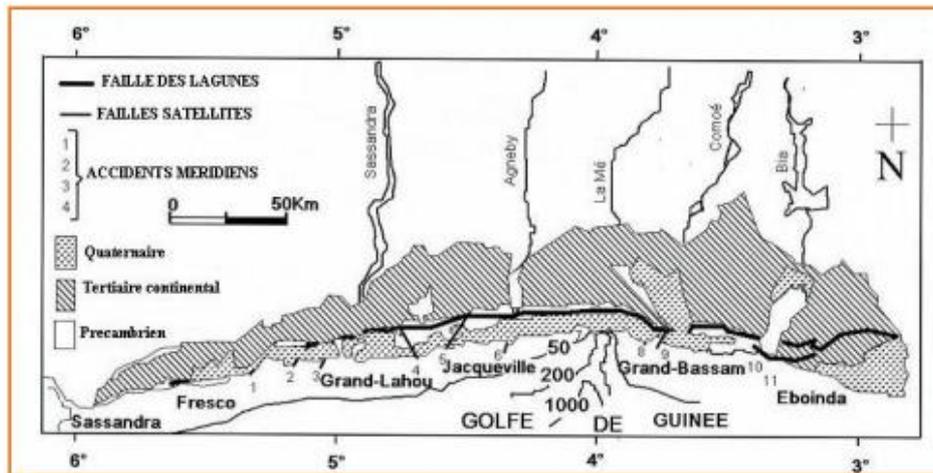


Figure 14 : Bassin sédimentaire de la Côte d'Ivoire (Aka, 1991 in Assalé, 2013)

2.2.2. CONTEXTE GÉOLOGIQUE DE LA MARAHOUÉ

Selon Avenard (1971), le bassin versant de la Marahoué est situé sur le socle appartenant au vieux bouclier précambrien de l'Afrique de l'Ouest. Ainsi, la géologie de la Marahoué suivant sa position géographique, fait partie intégrante du domaine Baoulé-Mossi appelé également domaine protérozoïque de la dorsale de Man. Le bassin versant de la Marahoué est composé de différents types de roches mères dont les principales sont les roches granitiques et les roches métamorphiques. Trois (3) formations essentielles se trouvent sur le socle du bassin (figure 15) :

- les granites d'âge protérozoïque moyen : elles constituent la formation dominante du bassin (Irié, 2017). On y distingue des granites calco-alcalins de types variés (granites à muscovites, granites à deux micas, granites à amphibolites et biotite, granodiorites), des migmatites qui ne se distinguent pratiquement pas des granites éburnéens comme roche mère (PRACTICA, EW/VITA et UNICEF, 2009) ;
- les roches métamorphiques schisteuses d'âge protérozoïque moyen : ces roches datent plus précisément du Birrimien et se retrouvent principalement dans le Nord du bassin. Ce sont principalement des schistes arkosiques ou argileux, des arkoses et des quartzites qui conservent encore leur tendance schisteuse ;

- les roches vertes d'âge protérozoïque moyen : elles comprennent des amphibolites et des schistes amphibolitiques dérivées de roches basiques, dolérites et gabbros. Elles forment l'ossature des chaînes de collines des intragéosynclinaux.

Le substrat géologique du bassin versant de la Marahoué est granitique et a donné naissance à des sols de texture argilo-sableuse ou argileuse, riches en humus. De façon générale, les sols du bassin sont fertiles, profonds et favorables aux cultures pérennes telles que le café, le cacao, aux cultures vivrières de grande consommation domestique (dans le Sud) et industrielle telles que la canne à sucre, le coton et l'anacarde (dans le Nord).

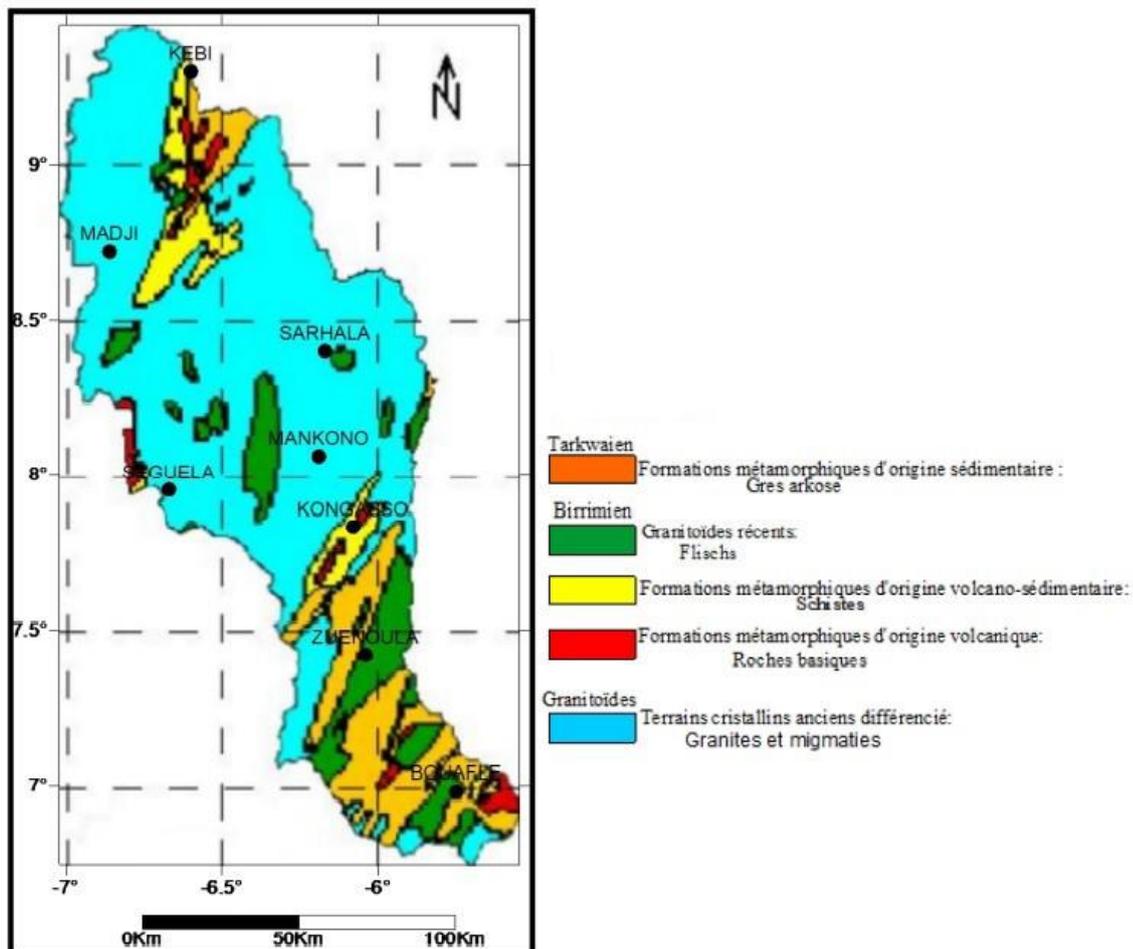


Figure 15 : Carte géologique du bassin versant de la Marahoué (Delor *et al.*, 1995)

2.3. CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

En référence aux travaux menés par de nombreux auteurs, notamment Biémi (1992), Jourda (2002), Koffi (2007) et Yao (2015), il est relevé que le bassin versant de la Marahoué présente deux types d'aquifères, à savoir les aquifères d'altérites et les aquifères de fissures ou de fractures.

Les altérites sont issues de l'altération météorique et/ou chimique de la roche saine compacte ou fracturée. De ce fait, les réservoirs d'altérites, considérés pendant longtemps comme étant les seules formations pouvant contenir de l'eau exploitable, sont le premier niveau de réserve d'eau souterraine en milieu de socle cristallin et cristallophyllien (Koffi, 2007 ; Kouamé, 2013 ; Dje Bi, 2015). Deux types d'aquifères des altérites sont connus : ce sont les aquifères des altérites développées sur les schistes et ceux développés sur les granitoïdes. Les aquifères des altérites issues des schistes sont les plus épais. Cependant, leur exploitation est en nette régression du fait qu'ils sont sujets à des fluctuations de niveau dues aux variations saisonnières et à la facilité de contamination des eaux par la pollution. Quant aux aquifères des altérites issues des granitoïdes, ils sont composés, de haut en bas, de cuirasse latéritique de sable argileux et d'arènes grenues dont l'épaisseur oscille entre 10 et 20 m en Afrique de l'Ouest, et donc en Côte d'Ivoire (Lasm, 2000 *in* Koffi, 2007 ; Kouamé, 2013).

Les aquifères fissurés ou de fractures constituent des réservoirs beaucoup plus intéressants, mais d'allure irrégulière et s'étendent en moyenne à une épaisseur de 50 m (Maréchal *et al.*, 2003). Ces aquifères développent une perméabilité dix fois supérieure à celle des altérites et sont caractérisés par une faible porosité. La présence de ce type d'aquifère est donc subordonnée à l'existence d'une fissuration et/ou d'une altération. Autrement dit, l'emmagasinement d'eau n'est possible que si les roches sous-jacentes ont été soumises à des transformations postérieures à leurs genèses qui sont d'ordre météorique ou tectonique (Lasm, 2000). Contrairement aux aquifères d'altérites, les aquifères de fissures sont à l'abri des fluctuations saisonnières (Koffi, 2007 ; Dje Bi 2015). En conséquence, dans les régions de socle, ces aquifères sont de plus en plus recherchés et exploités au moyen de forages pour l'alimentation en eau potable.

2.4. CONTEXTE SOCIO-ÉCONOMIQUE

Du point de vue administratif, le bassin versant de la Marahoué, traverse essentiellement les régions administratives du Gbéké, de la Marahoué, de la Bagoué, du Béré, du Worodougou, du Kabadougou, et du Haut-Sassandra. La population résidente de la région de la Marahoué est estimée à 862 344 (RGPH, 2014). Elle est constituée de communautés ethniques différentes selon les régions. Ainsi, on y rencontre majoritairement les peuples Gouros, Baoulé et Yahouré, Malinkés et les Sénoufos peuplant majoritairement les régions septentrionales du bassin (Dje Bi, 2015)

L'activité économique dominante dans cette partie de la Côte d'Ivoire, est le commerce avec de grands établissements tels que les Établissements Robert Gonfreville et la Société Ivoirienne de Tabac (SITAB). L'industrie agroalimentaire, est également bien représentée à travers la Société de Limonaderies et Brasseries d'Afrique (SOLIBRA), la Société Africaine de Cacao (SACO) ou encore l'Unité Agricole Intégrée (UAI) de SUCRIVOIRE.

Sur le plan minier, le département de Séguéla est réputé pour ses dykes kimberlitiques riches en diamant et exploités aussi bien de manière industrielle qu'artisanale (Adon, 2015). La zone de Yaouré, en allant de Bozi, Akakro, N'Dakoffiyobouékro constitue un centre d'intérêt minier pour la production de l'or (6 684 kg d'or sur la période 1999-2004). Les villages de Zagouta, Zégata, Zougoussou, Angovia, Kpangbankouamékro et d'Alékran regorgent des potentialités aurifères. A titre d'exemple, l'exploitation moderne de l'or est assurée par deux (02) sociétés pour le seul Département de Bouaflé à savoir Persus Mining CI SA (PMCI) et Persus Mining Yaouré (PMY).

Le bassin versant de la Marahoué regorge de nombreuses potentialités touristiques. Ainsi, la région de Kabadougou regorge de forêts classées où on retrouve des espèces animales comme la panthère et le phacochère. La montagne Denguélé est également un attrait touristique très prisé et renferme de nombreuses grottes. La région du Béré, est particulièrement prisée pour ses atouts touristiques que sont la lutte traditionnelle, la colline du test de grossesse, ou encore les villages de tisserands et de teinturiers. Les masques (Goli, Flali et Djodjan) et danses (Sadjo, Copé et Yagba) présentent également un beau tableau touristique. Dans la partie sud du bassin, on retrouve le Goli Oka (lieu d'observation des hippopotames), le parc national de la Marahoué (lieu d'observation d'éléphants, chimpanzés, buffles, gazelles, biches) ou encore les pierres sacrées de Gohitafla. En effet, le parc national de la Marahoué est l'un des huit (8) parcs nationaux que compte la Côte d'Ivoire. Ce parc est le troisième parc important de la Côte d'Ivoire après celui de la Comoé (1 149 150 hectares) et Taï (330 000 hectares). Il fut érigé en réserve de faune en 1956, puis en parc national par décret n°68-80 du 09 février 1968. Il s'étend sur une superficie de 101.000 hectares.

La région de la Marahoué est réputée pour la production des cultures vivrières. Plusieurs coopératives ont été créées à cet effet. Les vivriers pratiqués dans la localité sont la banane plantain, l'igname, le maïs, le riz et le manioc. A titre illustratif, les productions annuelles du riz, de la banane et du manioc sont estimées respectivement à 53 320 tonnes, 8 338 tonnes et 27 456 tonnes. Les cultures de rentes pratiquées sur le bassin versant de la Marahoué, sont principalement le café, le cacao et le coton. Ces cultures occupent de vastes étendues de terres (Dje Bi, 2015 et Adon, 2015).

L'élevage de poulets, de bovins et de caprins se pratiquait déjà dans la région ; mais depuis l'installation de l'usine SOLIBRA, l'élevage des porcs s'est développé grâce aux résidus de maïs utilisés pour la fabrication de la bière. La pêche se pratique également sur le fleuve Marahoué (SAECI et IEC, 2019).

CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a permis de comprendre le milieu géographique et les aspects physiques de la zone d'étude. En effet, le bassin versant de la Marahoué ou Bandama rouge est situé en Côte d'Ivoire entre les longitudes 5°5' et 7°1' Ouest et les latitudes 6°7' et 9°5' Nord. De forme ellipsoïdale avec une superficie de 24300 km² et un cours d'eau principal long de 550 km, le bassin versant se trouve à cheval sur deux régimes climatiques. D'une part le climat soudanais qui compte deux saisons et d'autre part, le régime équatorial de transition atténué qui présente quatre saisons. Ainsi, deux types de paysages végétaux se retrouvent sur le bassin versant de la Marahoué à savoir les domaines soudanais et guinéen. En ce qui concerne le domaine soudanais, il est composé de forêts claires et de savanes avec quelques îlots de forêts denses sèches, et occupe la moitié nord du bassin versant. S'agissant du domaine guinéen ou mésophile, il est localisé au Sud-Ouest du bassin de la Marahoué et caractérisé par la présence de lambeaux de forêt mésophile et de larges mailles de savane. Par ailleurs, la géomorphologie, permet de distinguer quelques grandes unités notamment les plateaux accidentés (500 m), un ensemble assez homogène de plateaux (300 à 400 m) et la région septentrionale qui est très aplanie avec quelques reliefs isolés (400 à 500 m). En outre, le bassin versant de la Marahoué est dominé par des sols ferrallitiques et repose sur le socle précambrien. Ce socle est dominé par des formations granitoïdes (granites, migmatites et granodiorites) qui ont donné naissance à des sols de texture argilo-sableuse ou argileuse, riches en humus. Ces formations géologiques ont favorisé la constitution de deux types d'aquifères, à savoir les aquifères d'altérites et les aquifères de fissures ou de fractures. Contrairement aux aquifères d'altérites, les aquifères de fissures sont à l'abri des fluctuations saisonnières et sont exploités au moyen de forages pour l'alimentation en eau potable. La zone d'étude bénéficie d'écosystèmes très diversifiés et offre des conditions naturelles très favorables au titre desquelles, le parc national de la Marahoué qui est le troisième parc important de la Côte d'Ivoire après celui de la Comoé et Taï.

La première partie qui vient de s'achever a traité de l'état des connaissances et de la zone d'étude. Aussi, le choix de la zone d'étude revêt d'un intérêt d'autant plus que plusieurs localités au sein du bassin ont enregistré des inondations en 2018 affectant plus de 10 000 personnes. De même, des feux de brousse en 2015, déclenchés pendant la période de sécheresse, ont occasionné des morts et de nombreux dégâts matériels.

La deuxième partie de ce mémoire sera consacrée au matériel et aux méthodes, utilisés pour atteindre les objectifs de cette étude.

DEUXIÈME PARTIE :
MATÉRIEL ET MÉTHODES

CHAPITRE 3. MATÉRIEL

3.1. PRÉSENTATION DES DONNÉES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES BRUTES

3.1.1. VARIABLES EXPLICATIVES

Les données climatiques utilisées au cours de cette étude ont été mises à notre disposition par la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) à travers la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Il s'agit des données de pluviométrie (mensuelle) et de température (mensuelle). Les stations pluviométriques retenues ont été sélectionnées afin de constituer un échantillon le plus représentatif possible de la variabilité des conditions hydro-climatiques à l'échelle du bassin versant de la Marahoué. Dans le but de garantir une couverture relativement homogène, en fonction des données disponibles, des stations pluviométriques ont été retenues au Nord, au Centre et au Sud du bassin versant de la Marahoué. Ainsi, le réseau pluviométrique sélectionné compte dix (10) postes à savoir Béoumi, Bouaflé, Boundiali, Dianra, Kani, Madinani, Mankono, Séguéla, Vavoua et Zuenoula. Les données pluviométriques collectées s'étendent sur la période 1961-2017 (57 ans).

S'agissant des données de températures, elles ont été collectées aux stations de Korhogo, Odienné, Daloa et Yamoussoukro. Les données de température, sur la période 1961-2017 de ces quatre stations, ont été utilisées pour calculer la température moyenne sur le bassin versant de la Marahoué. En ce qui concerne l'ETP, elle a été évaluée à partir de la méthode de Thornthwaite.

3.1.2. VARIABLES À EXPLIQUER

Les données hydrométriques ont été mises à notre disposition par la Direction Générale des Infrastructures de l'Hydraulique Humain (DGIHH). Ces données concernent d'une part, les débits mensuels, et d'autre part, les débits journaliers maximaux annuels collectés au niveau de la station hydrométrique de Bouaflé. Par ailleurs, les débits de la station de Séguéla-Béoumi ont été utilisés dans le cadre de la méthode des analogues. Ces données couvrent la période 1961 – 2017 (57 ans).

3.2. OUTILS INFORMATIQUES

Le traitement des données, pour cette étude, a été réalisé au moyen des logiciels suivants :

- **PACK OFFICE**

Nous avons eu recours au logiciel Microsoft Word 2016 et le logiciel Microsoft Excel 2016. Le logiciel Word a permis principalement de rédiger les travaux exécutés. Le logiciel Excel, quant à lui, a permis de réaliser les différents calculs et graphes.

- **INSTAT+ v3.37**

Le modèle statistique Instat, se présente comme un logiciel d'analyse de données climatiques (Stern *et al.*, 2006). Il possède en son sein un modèle stochastique de génération de données climatiques futures basé sur les chaînes de Markov.

- **HYFRAN**

Le logiciel HYFRAN (Hydrological Frequency Analysis version 1.1) est un logiciel d'ajustement de lois statistiques. Ce logiciel propose les tests statistiques classiques préalables à l'ajustement d'une loi, en vue de vérifier les hypothèses d'indépendance, de stationnarité et d'homogénéité de l'échantillon. Il dispose d'un panel de lois statistiques différentes à 2 ou 3 paramètres pour la réalisation des ajustements ainsi que des outils de comparaison graphiques et sur la base de critères (Hubert, 2005).

- **HEC-RAS**

Le Logiciel HEC-RAS est un outil de modélisation hydraulique développé par le ministère américain de la Défense et distribué gratuitement par l'Hydrologic Engineering Center de l'U.S. Army Corps of Engineers. Initialement un logiciel de modélisation monodimensionnelle (1D), il permet également la modélisation bidimensionnelle (2D) avec sa version 5.0. Dans le présent travail il sera employé le couplage 1D/2D qui permet de représenter le lit mineur et les zones inondables. C'est un logiciel très répandu dans le monde et trouve ses applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale. Il est également très utile entre autres dans le cas d'études d'impact de construction d'ouvrages (ponts, seuils), de ruptures de barrages, d'inondations, etc. Toutefois à ce jour, le logiciel n'inclut pas de module permettant une modélisation hydrologique. Si nécessaire, la modélisation hydrologique doit être réalisée préalablement par le biais d'un autre outil (AQUAGEOSPHERE, 2017).

- **IBM SPSS**

International Business Machines Corporation (IBM) est une société multinationale américaine présente dans les domaines du matériel informatique, du logiciel et des services informatiques. Ainsi, IBM SPSS Statistics est une puissante plateforme de logiciels statistiques. Cette plateforme, offre un ensemble de fonctionnalités robustes qui permet d'extraire rapidement des informations exploitables pour différents types de données. En utilisant le logiciel IBM SPSS Statistics dans leurs opérations quotidiennes, les organisations deviennent des entreprises prédictives, capables de diriger et d'automatiser les décisions (IBM Corp, 2016) Guide. Le logiciel IBM applique aux réseaux de neurones, (IBM SPSS Neural Networks), permet de générer de meilleurs modèles prédictifs. Aussi, il est possible avec IBM SPSS Neural Networks, de sélectionner soit la procédure Perceptron multicouche (MLP) soit la fonction à base radiale (RBF).

CONCLUSION PARTIELLE

Le présent chapitre a permis de présenter l'ensemble des données et des outils utilisés dans le cadre de cette étude. Les données climatiques et hydrométriques sollicitées auprès de la SODEXAM et de la DGIHH couvrent la période 1961-2017. Le réseau des pluviomètres est constitué de 10 postes de mesure et les données de base sélectionnées sont les cumuls mensuels. Les valeurs annuelles de ce réseau présentent une moyenne de 1196 mm. Les données de température quant à elles, ont été recueillies sur 4 stations proches du bassin versant de la Marahoué et présentent une moyenne annuelle de 26 °C. L'ETP a été calculée à partir de la méthode de Thornthwaite et les valeurs annuelles présentent une moyenne de 1567 mm. Les données hydrométriques quant à elles, ont été collectées à la station hydrométrique de Bouaflé. Cette station hydrométrique est représentative pour traduire de manière significative, le caractère climatique et physiographique du bassin versant de la Marahoué. La moyenne des débits annuels sur la période se fixe à 65 m³/s et celle des journaliers maximaux annuels est estimée à 472 m³/s. La base de données retenue offre une couverture homogène du bassin versant de la Marahoué.

Les différentes données ainsi présentées ont nécessité plusieurs outils de traitement pour leur exploitation. Ces outils sont constitués des logiciels INSTAT+v3.37, HYFRAN, HEC-RAS et IBM SPSS sans oublier le pack office. L'utilisation opérationnelle des différentes données à partir des outils définis nécessite des méthodes précises et rigoureuses.

CHAPITRE 4. MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

4.1. CARACTÉRISATION HYDRO-CLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA MARAHOUÉ

4.1.1. CARACTÉRISATION DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES

4.1.1.1. Analyse du régime climatique du bassin versant de la Marahoué

Une analyse de deux indices climatiques (indice de Gaussen et indice de De Martonne) sur la période 1961-2017 a été effectuée pour caractériser les régimes climatiques saisonniers de la zone d'étude. L'indice de Gaussen (1954) permet d'identifier pour chaque station, la durée de la période sèche et partant celle de la saison pluvieuse, en s'appuyant sur la comparaison des moyennes mensuelles des températures (T en °C) avec celles des précipitations (P en mm) (Bridi, 2012 ; Mokhtari *et al.*, 2013 ; Farah, 2014 ; Sebaibi, 2014). Un mois est dit sec lorsque P est inférieure ou égale à 2T ; c'est-à-dire quand les pertes en eau (supposées causées par une température trop forte) sont supérieures aux apports (pluies). Inversement, quand P est supérieure à 2T, le mois est considéré comme humide. Le principe de cette méthode consiste à représenter sur un même graphe la température et la pluviométrie en ordonnée, pour les 12 mois de l'année en abscisse. Les échelles prises en ordonnée sont telles que 1°C correspond à 2 mm de précipitations. Une période est humide à chaque fois que la courbe des pluies passe au-dessus de la courbe des températures. Une période est dite sèche dans le cas inverse. Cela permet de définir une aire ombrothermique. Plus l'aire est importante et plus la saison est sèche. L'indice d'aridité mensuel de De Martonne (De Martonne, 1926) est défini par l'équation 1 (Mercado-Mancera *et al.*, 2010 ; Nistor, 2016 ; Chekhnaba, 2017) :

$$I_{\text{mensuel}} = \frac{12p}{t+10} \quad \text{Eq. (1)}$$

Avec :

- **p** : précipitation mensuelle (mm) ;
- **t** : température moyenne mensuelle (°C).

Selon Piedallu *et al.* (2007), cet indice exprime la sécheresse mais ne permet pas de savoir à partir de quel moment un mois est vraiment "sec". Dans l'impossibilité de résoudre ce problème, différents seuils ont été proposés. La valeur la plus couramment utilisée pour un mois sec est 20 (ce qui correspond, par exemple, pour une température de 25°C, à une pluviométrie de 60 mm).

Dans le cadre de cette étude, les hypothèses suivantes ont été admises :

- i) un mois est dit humide si la valeur mensuelle de l'indice de De Martonne est supérieure à la valeur annuelle ;
- ii) un mois est dit sec si la valeur mensuelle de l'indice de De Martonne est inférieure à la valeur annuelle.

L'indice d'aridité annuel De Martonne (De Martonne, 1926) est défini par l'équation 2 (Bridi 2012 ; Mokhtari *et al.*, 2013 ; Farah, 2014 ; Sebaibi, 2014 ; Ionac *et al.*, 2015 ; Nistor, 2016 ; Ouhamdouch *et al.*, 2018 ; Emadodin *et al.*, 2019) :

$$I_{\text{annuel}} = \frac{P}{T+10} \quad \text{Eq. (2)}$$

- **P** : précipitation annuelle (mm) ;
- **T** : température moyenne annuelle (°C).

L'aridité augmente quand la valeur de l'indice annuel diminue (Tableau III). De Martonne a proposé six grands types de macroclimats allant des zones désertiques ou hyperarides ($I < 5$) aux zones humides à forêt prépondérante ($I > 40$) (Bridi 2012 ; Mokhtari *et al.*, 2013 ; Sebaibi, 2014) :

Tableau I : Classification de l'indice De Martonne

| Indice I | Type de climat |
|---------------|---|
| $I < 5$ | hyperaride |
| $5 < I < 10$ | Aride |
| $10 < I < 20$ | semi-aride |
| $20 < I < 30$ | semi-humide (climat tropical) |
| $30 < I < 40$ | humide (climat tropical humide) |
| $I > 40$ | très humide (climat équatorial ou montagnard) |

4.1.1.2. Variations et tendances interannuelles des paramètres climatiques

Les variations et les tendances temporelles des différents paramètres climatiques [pluie, température et évapotranspiration potentielle (ETP)] ont été analysées à partir de graphes et d'indices normalisés. L'indice standard de normalisation (SI_i) a l'avantage de mettre en évidence les périodes excédentaires et déficitaires d'une variable donnée. Il se définit comme une variable centrée réduite exprimée par l'équation 3 :

$$SI_i = \frac{X_i - X_0}{\mu} \quad \text{Eq. (3)}$$

Avec :

- X_i : valeur de la variable de l'année i ;
- X_0 : valeur moyenne interannuelle de la variable sur la période étudiée ;
- μ : valeur interannuelle de l'écart-type de la variable sur la période étudiée.

4.1.2. ANALYSE DES CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCOULEMENT

4.1.2.1. Analyse du régime hydrologique saisonnier de la Marahoué

La période de hautes eaux se définit comme étant la période de l'année où le débit naturel d'un fleuve est supérieur à son module (Dkengne, 2006 ; Lang, 2007 ; Bard *et al.*, 2012). Le module étant défini comme la moyenne des débits annuels sur une période d'observations suffisamment longue pour être représentative des débits mesurés ou reconstitués. Il est fréquemment dénommé module interannuel ou module (OIEau, 2019). De ce fait, les mois de hautes eaux sont définis comme les mois ayant des débits moyens supérieurs au module. Selon ces mêmes auteurs, les mois de basses eaux sont définis comme les mois dont le débit moyen est inférieur au module. Cependant, dans le cadre de cette étude, le seuil de basses eaux retenu est le dixième du module. Ainsi, un mois a été considéré comme mois de basses eaux si son débit moyen est inférieur au dixième du module. Aussi, les coefficients de débit (débit mensuel/module) ont été analysés.

4.1.2.2. Procédure d'analyse des fréquences de distributions des débits

Il s'agit de caractériser les fréquences de distribution des débits mensuels et annuels (modules). Ainsi, la procédure appliquée se présente comme suit :

- la détermination du nombre de classe ;
- l'évaluation de l'intervalle de classe et la définition des classes ;
- la définition des effectifs puis des fréquences par classe ;
- la représentation des fréquences de pluies.

Le nombre de classes a été déterminé à partir de la règle d'Iman et Conover (Jacques, 2005 ; Ramarotafika, 2012 ; Nanty, 2015 ; Kouassi *et al.*, 2016, Ehoussou *et al.*, 2019) (équation 4) :

$$C = \text{int} \left(\frac{\text{Ln}(n)}{\text{Ln}(2)} \right) \quad \text{Eq. (4)}$$

Avec n : la taille de l'échantillon.

L'intervalle de classe (J) a été défini comme suit (équation 5) :

$$J = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{c} \quad \text{Eq. (5)}$$

Avec :

- **J** : intervalle de classe ;
- **Q_{max}** : valeur maximale de la série considérée (m³/s);
- **Q_{min}** : valeur minimale de la série considérée (m³/s);
- **C** : nombre de classes.

À partir de la borne inférieure, on obtient les limites de classes ou bornes de classes par addition successive de l'intervalle de classe. En règle générale, on tente de faire coïncider l'indice de classe ou valeur centrale de la classe avec un nombre entier.

Les courbes de fréquence ont été effectuées à partir des fréquences des débits (mensuels et annuels) calculés à partir de l'effectif par classe (N_i) et de l'effectif total de l'échantillon (N) (équation 6) :

$$F_i = 100 \times \frac{N_i}{N} \quad \text{Eq. (6)}$$

Avec F_i : fréquences des différentes classes.

4.1.2.3. Variations et tendances interannuelles du débit

Le débit d'écoulement a été analysé sous plusieurs formes. D'abord, sous la forme de module, c'est-à-dire, débit moyen annuel (m³/s). Ensuite, sous la forme de débit spécifique (l/s/Km²) soit le rapport du module par la surface du bassin versant. Enfin, sous la forme de lame d'eau (mm) c'est-à-dire le rapport du volume d'eau par la surface du bassin versant. Les variations des différentes variables afférentes au débit ont été analysées sous formes brutes et sous forme d'indices normalisés.

4.1.3. CARACTÉRISATION DES RÉSERVOIRS SOUTERRAINS

4.1.3.1. Méthode de Lang (2007)

Lang (2007) a mis en place une méthode basée sur les corrélations entre cumuls de précipitations et débits en période d'étiage permettant d'analyser la capacité de stockage des réservoirs souterrains dans un bassin versant donné. Un lien a été établi entre les débits de basses eaux et les cumuls de pluies des périodes de hautes eaux et basses eaux. En effet, ce sont les pluies de la saison humide qui engendrent les hautes eaux par accumulation des eaux de ruissellement, et rechargent les nappes par infiltration et vont permettre de soutenir les débits durant les périodes sèches (Lang, 2007 ; Lang, 2011 ; Bard *et al.*, 2012 ; Garcia, 2016). Les précipitations constituent le facteur climatique déterminant pour les débits extrêmes (crues et étiages). Les précipitations mensuelles enregistrées avant la période de basses eaux jouent donc un rôle déterminant pour évaluer l'état des réservoirs souterrains. Les séquences sans précipitation observées durant la saison sèche peuvent donc être considérées comme un facteur

aggravant. Ainsi, les précipitations mensuelles permettent d'expliquer l'origine de la recharge de nappes qui favorise les débits d'étiage. En rapportant cette analyse au fonctionnement des bassins versants, les cumuls de précipitations permettraient d'évaluer les volumes d'eau stockés durant une période. Toutefois, ce fonctionnement ne concerne que les bassins versants qui bénéficient d'aquifères conséquents (Lang, 2007). Pour ceux développés dans des milieux imperméables ou pour ceux qui connaissent des abatements pluviométriques trop abondants, aucune corrélation significative entre les pluies cumulées et les débits de basses eaux n'est établie (Lang, 2007). Les débits de basses eaux sont influencés par les précipitations de ladite période pour les bassins versants pas très perméables (Lang, 2007). Les bassins imperméables ou très arrosés sont très réactifs aux apports pluviométriques. Pour ces bassins, la sévérité des débits d'étiage s'explique davantage par les précipitations observées durant la période d'étiage elle-même. Cette analyse rappelle toute la complexité du phénomène de l'étiage et la difficulté à l'appréhender (Lang, 2007). Elle s'avère intéressante dans un contexte opérationnel de prévision des débits d'étiage car elle montre dans quelle mesure, pour certains bassins, il est impossible de réaliser des prévisions à long terme, c'est-à-dire à échéance de plusieurs mois. Aussi, les débits de basses eaux dépendent des débits de la précédente période des hautes eaux. Ainsi, des corrélations ont été établies entre les débits moyens mensuels de la période des basses eaux et les cumuls des précipitations des périodes de hautes et basses eaux. Les cumuls des précipitations des périodes de hautes eaux et de basses eaux sont calculés de façon progressive du premier au dernier mois de ladite période. Les débits moyens de la période des basses eaux sont calculés de façon progressive du premier au dernier mois de ladite période.

4.1.3.2. Évaluation de la réserve en eau souterraine

Le tarissement principal, par les volumes qu'il implique et sa représentativité de l'ensemble des aquifères du bassin, constitue une caractéristique importante du régime hydrologique tropical (Briquet *et al.*, 1995 in Kouassi *et al.*, 2013). Le calcul du coefficient de tarissement est basé sur le modèle de Maillet qui a déjà été employé par divers auteurs, notamment Amoussou (2010) et Kouassi *et al.* (2013).

Le modèle de Maillet admet qu'en régime non influencé c'est-à-dire en l'absence de toute précipitation, le tarissement correspond à la décroissance exponentielle du débit en fonction du temps. Dans cette approche, la courbe annuelle de tarissement est l'expression de la vidange du réservoir souterrain. En effet, on définit le tarissement comme étant la décroissance du débit d'eau souterraine allant aux eaux de surface pendant les périodes sans alimentation, due à la diminution de la réserve d'eau souterraine et exprimée par la courbe de tarissement. En d'autres termes, c'est la période pendant laquelle la vidange des nappes souterraines constitue la seule contribution à l'écoulement des cours d'eau d'un bassin. Selon Olivry *et al.* (1993) cités par Amoussou (2010), le coefficient de

tarissement permet d'apprécier l'état des « entrées » d'eau qui contribueraient à la modification apparente des relations pluie/débit observées sur les bassins fluviaux. Il permet ainsi de comparer l'évolution de l'eau de surface et le stockage de l'aquifère afin de mieux cerner le comportement du réservoir de vidange. Le coefficient de tarissement (k) dépend des caractéristiques physiques et géométriques de l'aquifère. L'expression du modèle de Maillet est la suivante (équation 7):

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad \text{Eq. (7)}$$

Avec :

- Q_t (m^3/s) : débit à l'instant t ;
- Q_0 (m^3/s) : débit au début du tarissement ;
- k : coefficient de tarissement de Maillet ;
- t : temps en jour.

Le coefficient de tarissement de Maillet (k) a été obtenu par résolution de l'équation 8 qui s'exprime comme suit (Kouassi *et al.*, 2013):

$$\frac{e^{-kt}}{k} + \frac{v}{Q_0} - \frac{1}{k} = 0 \quad \text{Eq. (8)}$$

On peut formuler l'expression de la durée de tarissement (T) exprimée en jours par l'équation 9 (Amoussou, 2010 ; Kouassi *et al.*, 2013):

$$T = \frac{1}{k} \quad \text{Eq. (9)}$$

Pour la représentation des courbes de tarissement, on part du débit moyen mensuel le plus élevé de l'année (Q_0) et on reporte en abscisse les débits mesurés tous les 30 jours (1 mois), jusqu'à ce qu'ils remontent de façon significative. Les courbes de tarissement vont correspondre aux périodes pendant lesquelles le débit décroît de façon plus ou moins régulière (régime non influencé), c'est-à-dire en absence de toute précipitation.

Le volume d'eau mobilisé par l'ensemble des aquifères du bassin versant est donné par l'équation 10 (Kouassi *et al.*, 2013):

$$V_{\text{mobilisé}} = \int_0^{+\infty} Q_0 e^{-kt} dt = \frac{86400 \times Q_0}{k} \quad \text{Eq. (10)}$$

Avec : Q_0 exprimé en m^3/s et k en jours^{-1} .

Le modèle de Maillet a permis de déterminer sur le bassin versant de la Marahoué le coefficient de tarissement, la durée de tarissement et le volume d'eau mobilisé par les aquifères.

4.2. MODÉLISATION STATISTIQUE ET SYSTÈMES D'ALERTE PRÉCOCES (SAP) DE DÉBITS EXTRÊMES DE LA MARAHOUÉ

L'approche méthodologique a consisté d'abord à vérifier un certain nombre d'hypothèses statistiques. Ces hypothèses s'inscrivent dans le contexte de l'analyse fréquentielle. Il s'agit entre autres, des hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité des données. Ensuite, les différentes lois de distribution choisies ont été ajustées aux données de débits extrêmes (crues et étiages) au pas de temps annuel. Enfin, une évaluation de la validité des modèles adoptés a été réalisée. Les lois de distribution qui s'ajustent au mieux aux débits ont été retenues afin de déterminer les seuils d'alerte.

4.2.1. CHOIX DES DONNÉES

L'extraction des variables descriptives constitue la première étape de la caractérisation des débits extrêmes. La méthode d'extraction utilisée est l'échantillonnage des valeurs extrêmes. Les variables usuellement employées sont les suivantes :

- Le débit moyen mensuel minimum annuel (Q_{MNA})

Pour la caractérisation des étiages (basses eaux) d'un cours d'eau, le Q_{MNA} est employé comme référence mensuelle (Lang, 2011 ; Augas *et al.*, 2015 ; Garcia ,2016). Il se définit comme le débit moyen (Q) mensuel (M) minimal (N) de chaque année (A), sur une période donnée (Gailliez, 2013).

- Le débit journalier maximal annuel (Q_{JMAX})

Il s'agit du débit (Q) journalier (J) maximal (MX) de chaque année (A) pendant l'épisode de crue (Ingérop, 2015). Selon Onikpo et Ellis (2019), le Q_{JMAX} compte parmi les indicateurs utilisés pour faciliter la conception et le choix de la taille des équipements. Cette valeur représente le débit journalier maximal de chaque année sur une période d'étude donnée.

- Le débit moyen mensuel maximal annuel (Q_{MXA})

En ce qui concerne les crues (hautes eaux) d'un cours d'eau, il est nécessaire de déterminer comme prédicteur hydrologique mensuel le Q_{MXA} (Grelier *et al.*, 2017). Il s'agit du débit moyen (Q) mensuel (M) maximal (X) de chaque année (A) pendant l'épisode de crue (Segui *et al.*, 2018). Cette valeur représente le débit mensuel maximal de chaque année sur une période donnée.

Ainsi, les différents débits déterminés pour chaque année, ont permis d'obtenir deux séries de débits extrêmes sur la période 1961-2017.

4.2.2. MÉTHODOLOGIE DE L'ANALYSE FRÉQUENTIELLE

L'analyse fréquentielle est une méthode statistique de prédiction consistant à étudier les événements passés, caractéristiques d'un processus donné (hydrologique ou autre), afin d'en définir les probabilités d'apparition future, autrement dit, estimer les probabilités d'occurrence du phénomène étudié.

4.2.2.1. Hypothèses de l'analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle passe en premier lieu par l'appréciation de la qualité des séries à posséder une fonction de distribution en utilisant les tests de stationnarité de Kendall, d'indépendance de Wald-Wolfowitz et d'homogénéité de Wilcoxon (Habibi *et al.*, 2013 ; Ague et Afouda, 2015).

Ces tests fonctionnent tous sur le même principe qui consiste à énoncer une hypothèse sur la population mère et à vérifier sur les observations constatées si celles-ci sont vraisemblables dans le cadre de cette hypothèse. L'hypothèse à tester est appelée H_0 (hypothèse nulle) et s'accompagne impérativement de son hypothèse alternative appelée H_1 . Le test s'attachera à valider ou à rejeter H_0 (et par conséquent à tirer la conclusion inverse pour H_0). Si le résultat du test amène à accepter l'hypothèse nulle H_0 , alors la probabilité que la répartition soit aléatoire est élevée. En revanche, le rejet de H_0 signifie que cette répartition des réponses recèle des informations qui ne semblent pas être aléatoires et qu'il convient d'approfondir l'analyse.

Les résultats de ces tests d'hypothèses sont généralement présentés sous forme de couple (statistiques des tests, p-value). La p-value étant la probabilité au dépassement de la valeur calculée de la statistique du test que l'on compare ensuite avec le niveau de signification.

- **Hypothèse d'homogénéité (test de Wilcoxon)**

Un échantillon aléatoire (débits de crues par exemple) est dit « homogène » lorsque les données qui le constituent proviennent de la même distribution (prises dans les mêmes conditions). La vérification de cette hypothèse est fondée sur la comparaison des moyennes des débits obtenus avant et après la date de changement dans la procédure d'acquisition des données, lorsque cette dernière date de changement est connue.

Pour ce faire, le test de rang de Wilcoxon (1945) a été utilisé. Ce test permet d'effectuer des comparaisons entre deux sous échantillons et de vérifier si les moyennes des deux sous-échantillons sont significativement différentes. Dans un langage mathématique, la formulation du problème concernant ce test se pose comme suit : considérons, en cas de déplacement d'une station, une population formée de deux séries de données de débit maximum annuel, par exemple qu'on note

respectivement x_1, x_2, \dots, x_n et $x_{n+1}, x_{n+2}, \dots, x_m$ de moyennes respectives μ_1 et μ_2 . Le test de Wilcoxon est un test qui permet de comparer les hypothèses définies par les équations 11 et 12 (Kouider, 2003) :

- $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ Eq. (11)

- $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ Eq. (12)

Autrement dit :

- H_0 : les moyennes des deux sous-échantillons sont égales ;
- H_1 : les moyennes des deux sous-échantillons sont différentes.

• **Hypothèse de stationnarité (test de Kendall)**

Les phénomènes étudiés sont dits « stationnaires » si les caractéristiques statistiques (moyenne, variance ou moments d'ordre supérieur) des séries de données qui les décrivent ne varient pas dans le temps. Le test de stationnarité de Kendall, qui est un test de corrélation sur le rang, permet de détecter les tendances dans les séries (Yue et Pilon, 2004). Ce test permet de comparer les hypothèses suivantes :

- H_0 : il n'y a aucune tendance dans les observations ;
- H_1 : il y a une tendance dans les observations.

• **Hypothèse d'indépendance (test de Wald-Wolfowitz)**

Même si les données d'une série sont aléatoires, elles ne sont pas nécessairement indépendantes. Un échantillon de données d'une série de débits maximums annuels est dit indépendant si l'intensité d'une crue n'est pas influencée par celle observée l'année précédente (Kouider, 2003).

Le test non paramétrique utilisé pour vérifier l'hypothèse d'indépendance des observations est le test de Wald et Wolfowitz (1943). Ce test permet de comparer les hypothèses suivantes :

- H_0 : les observations sont indépendantes ;
- H_1 : les observations sont dépendantes.

Il faut toutefois noter que, d'une manière générale, les tests statistiques ne servent qu'à indiquer la probabilité qu'un critère soit satisfait. Aussi, ces trois tests ont l'avantage d'être des tests non paramétriques. Ils ne font aucune hypothèse sur la distribution utilisée.

4.2.2.2. Choix et estimation des paramètres des modèles statistiques

Le choix du modèle fréquentiel influence fortement la validité des résultats de l'analyse fréquentielle. De manière générale, la détermination de la meilleure loi d'ajustement a toujours été délicate. Il est

ainsi, impossible de répondre à la question, quelle est la véritable distribution dont les observations sont tirées ? La vraie distribution des données pourrait se révéler extrêmement complexe et comporter plus de paramètres qu'un hydrologue ne peut espérer en estimer (WMO, 2009). L'objectif est donc d'établir une approximation simple et pertinente de la distribution réelle des Q_{MNA} et Q_{MXA} .

Le paragraphe suivant fournit un aperçu des lois utilisées dans le cadre de cette étude. Il s'agit notamment des lois utilisées au cours des travaux antérieurs et proposées par le logiciel HYFRAN (Gailliez, 2013 ; Agué et Afouda, 2015 ; Kouassi *et al.*, 2018 a ; Kouassi *et al.*, 2019). Il s'agit des lois suivantes :

- loi Exponentielle ;
- loi Weibull ;
- loi Gamma ;
- loi Log-normale ;
- loi Pearson de type III.

En ce qui concerne les débits de crues, nous avons retenu les cinq lois susmentionnées. Pour ce qui est des étiages en revanche, seuls trois lois ont été utilisées. Il s'agit des lois Gamma, Weibull et Exponentielle.

La présentation complète de ces lois a été faite par plusieurs auteurs (Gailliez, 2013 ; Agué et Afouda, 2015 ; Kouassi *et al.*, 2018 b ; Kouassi *et al.*, 2019). Les paragraphes ci-après présentent dans le détail les différentes lois énoncées.

4.2.2.2.1. Loi Exponentielle

La loi Exponentielle est une loi simple d'usage qui, associée au coefficient de tarissement de Maillet, permet de proposer un modèle souple de prévision des débits (Lang, 2007).

La loi Exponentielle est décrite par l'équation 13 :

$$P(D > d) = e^{-\mu d} \quad \text{Eq. (13)}$$

Avec :

- μ , seul paramètre de la loi, est donné par : $1/\sqrt{d}$;
- d est la durée des séquences moins la durée seuil S_d (Lang, 2007).

4.2.2.2.2. Loi Log normale (loi de Galton)

Dans beaucoup de cas, pour des variables aléatoires X strictement positives ($x > 0$), leur logarithme est correctement décrit par une distribution normale. Si on pose $y = \log x$, la densité de probabilité (Gailliez, 2013) est fournie par la relation 14 :

$$f(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma_y^2}} \exp\left[-\frac{(\log x - \mu_y)^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad \text{Eq. (14)}$$

Avec : $0 < x < \infty$

Les paramètres naturels de la distribution Log-normale sont la moyenne et la variance, présenté à l'équation 15 (Gailliez, 2013):

$$\mu_x = \exp\left[\mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2}\right] \quad \text{et} \quad \sigma_x^2 = \mu_y^2(\exp \sigma_y^2 - 1) \quad \text{Eq. (15)}$$

Dans beaucoup de cas, les logarithmes d'une variable aléatoire X ne sont pas distribués normalement mais le fait de soustraire une limite inférieure avant de prendre les logarithmes peut résoudre le problème. La distribution Log-normale à 3 paramètres est présenté par les équations 16, 17, 18, 19 et 20 :

$$y = \log(x - \zeta) \quad \text{Eq. (16)}$$

$$\mu_x = \zeta + \exp\left[\mu_y + \frac{\sigma_y^2}{2}\right] \quad \text{Eq. (17)}$$

$$\sigma_x^2 = \exp(2\mu_y + \sigma_y^2)(\exp \sigma_y^2 - 1) \quad \text{Eq. (18)}$$

Le coefficient d'asymétrie s'exprime comme suit :

$$\gamma_x = 3\phi + \phi^3 \quad \text{Eq. (19)}$$

$$\text{Avec : } \phi = \sqrt{\exp(\sigma_y^2) - 1} \quad \text{Eq. (20)}$$

Pour la distribution Log-normale à 3 paramètres, la méthode des moments est inefficace. Un estimateur simple et efficace du troisième paramètre ξ est donné par la formule 21 :

$$\xi = \frac{x_{(1)} \cdot x_{(n)} - x_{médiane}^2}{x_{(1)} + x_{(n)} - 2x_{médiane}} \quad \text{Eq. (21)}$$

Quand $\xi = x_{(1)} + x_{(n)} - 2x_{médiane} > 0$, où $x_{(1)}$ et $x_{(n)}$ sont respectivement la plus grande et la plus petite valeur observée ; $x_{médiane}$ est la médiane de l'échantillon (Gailliez, 2013).

La loi Log-normale à deux paramètres (moyenne et écart-type) est choisie pour sa simplicité, et sa relativement bonne adéquation pour les chroniques d'observation d'une vingtaine d'années (Gailliez, 2013).

4.2.2.2.3. Loi de Weibull

La distribution de Weibull est une des distributions les plus utilisées dans la littérature pour l'étude de l'étiage en particulier. Elle correspond à une distribution de type III pour les minimas. Lors de la comparaison avec d'autres distributions (Pearson type 3 et type 5, Lognormale à 3 paramètres), elle apparaît dans plusieurs études (Hamza, 1999 ; Ribatet, 2007 ; Martinez, 2015). Gumbel fut le premier à appliquer la théorie des valeurs extrêmes aux événements d'étiage, et en particulier, la loi de Weibull à trois paramètres (Gumbel, 1954). La fonction de répartition est donnée par les relations 22 et 23 :

$$F(x) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)^k \right] \quad \text{Eq. (22)}$$

Avec :

$$\xi = -k^{-1} < 0 ; x \geq u > 0 ; \alpha > 0 \quad \text{Eq. (23)}$$

La densité de probabilité s'exprime comme suit (équation 24) :

$$f(x) = \frac{k}{\alpha} \left(\frac{x-u}{\alpha}\right)^{k-1} \exp \left[-\left(\frac{x-u}{\alpha}\right)^k \right] \quad \text{Eq. (24)}$$

Avec :

- α : le paramètre d'échelle,
- k : le paramètre de forme,
- u : le paramètre de position.

Les moments sont exprimés par les équations 25 et 26 :

$$\mu_x = \alpha \Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \quad \text{Eq. (25)}$$

$$\sigma_x^2 = \alpha^2 \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{2}{k} \right) - \left[\Gamma \left(1 + \frac{1}{k} \right) \right]^2 \right\} \quad \text{Eq. (26)}$$

Comme pour la loi Log-normale, la loi de Weibull peut être à deux ou trois paramètres selon que l'on tient compte du paramètre de position, qui dans le cas de la loi à 3 paramètres, doit être inférieure au plus faible débit minimum observé. La loi de Weibull a l'avantage de pouvoir représenter des données dont le coefficient d'asymétrie est négatif (Gailliez, 2013).

4.2.2.2.4. Loi Gamma

La densité de probabilité de la loi Gamma est décrite par l'équation 27 :

$$f(x) = \frac{\alpha^\beta \cdot x^{\beta-1} \exp(-\alpha x)}{\Gamma(\beta)} \quad \text{Eq. (27)}$$

Avec : $0 < x < +\infty$ et $\alpha, \beta > 0$

$\Gamma(\beta)$ représente la fonction Gamma définie par la relation 28:

$$\Gamma(\beta) = \int_0^{\infty} \exp^{-x} \cdot x^{\beta-1} \cdot dx \quad \text{Eq. (28)}$$

- pour β entier : $\Gamma(\beta) = (\beta - 1)!$,
- pour β non entier, la fonction Gamma est calculée par développement en série et intégration numérique.

La méthode des moments conduira aux égalités suivantes (équation 29 et 30) :

$$\mu_x = \frac{\beta}{\alpha} \quad \text{Eq. (29)}$$

$$\sigma^2 = \frac{\beta}{\alpha^2} \quad \text{Eq. (30)}$$

4.2.2.2.5. Loi Pearson de type III (loi Gamma incomplète)

Selon Haché (1993), la variable aléatoire X suit une distribution Pearson type 3 P3 (a,λ,m) si sa fonction de densité de probabilités s'écrit suivant l'équation 31 :

$$F(X) = \frac{|\alpha|}{\Gamma\lambda} \exp[-\alpha(X - m)][\alpha(X - m)]^{\lambda-1} \quad \text{Eq. (31)}$$

Avec :

- $m \leq x < \infty$ si $\alpha > 0$
- $-\infty < x \leq m$ si $\alpha < 0$
- Avec le paramètre $\alpha \neq 0$.

La distribution gamma est un cas particulier de la distribution Pearson type 3 obtenue lorsque $m = 0$.

Les lois pour estimer la crue pour une certaine probabilité d'apparition donnée (ou période de retour) intègrent par ailleurs la loi de Person III ou gamma incomplète (Kouider, 2003 ; Zahar et Laborde, 2007 ; Georgeta, 2013) tandis que Anctil *et al.* (2000) et Zaidman *et al.* (2003) l'ont utilisé pour la description des débits minimaux annuels.

4.2.2.3. Calcul des fréquences empiriques

En pratique, après avoir trié les débits en ordre décroissant (ou croissant), on associe à chacun des événements une fréquence empirique de probabilité au dépassement dont la forme générale peut être résumée par l'équation 32 qui garantit la symétrie autour de la médiane :

$$P_m = \frac{m-\alpha}{n+1-2\alpha} \quad \text{Eq. (32)}$$

Avec :

- P_m : probabilité de dépassement de la même valeur ;
- m : le rang qu'occupe la valeur ;
- n : le nombre d'observation ;
- α : constante qui peut prendre des valeurs comprises entre 0 et 0,5.

Le tableau IV donne les valeurs de « α » les plus utilisées dans la pratique, et les formules de probabilité correspondantes. Ces formules correspondent à des cas particuliers de la formule générale.

Pour les besoins de la présente étude, il a été adopté la formule de Hazen qui est un choix traditionnel opéré par de nombreux auteurs en zone tropicale humide (Benkhaled, 2007 ; Goula *et al.*, 2010 ; Soro, 2011). La formule de Hazen correspond à une probabilité empirique calculée avec une valeur de α égale à 0,5.

Tableau II : Formules de probabilités empiriques utilisées dans la pratique

| Noms | α | Formules | Références | Remarques |
|-------------------|----------|-----------------------|----------------|--|
| Weibull | 0 | $\frac{r}{n+1}$ | Weibull (1939) | Utilisée aux États-Unis |
| Chegodayev | 0,3 | $\frac{r-0,3}{n+0,4}$ | Chow (1964) | Recommandée lorsque les paramètres de la population parente sont connus. |
| Cunnane | 0,4 | $\frac{r-0,4}{n+0,2}$ | Cunnane (1978) | Formule de compromis |
| Hazen | 0,5 | $\frac{r-0,5}{n}$ | Hazen (1914) | Recommandée si les paramètres de la population parente sont inconnus |

4.2.2.4. Sélection des meilleurs ajustements

En hydrologie, la complexité de la sélection du meilleur ajustement réside dans le fait qu'on souhaite prédire des quantiles pour des périodes de retour élevées pour lesquelles nous ne disposons pas forcément de données en nombre suffisant (Kouider, 2003).

Ainsi, nous nous appuyerons sur différentes procédures permettant de comparer des ajustements de lois de probabilité et de sélectionner celles qui s'ajustent au mieux aux données.

D'abord l'examen visuel des graphiques d'ajustement donne de bonnes indications. En effet, même s'il peut paraître rudimentaire, il reste un bon moyen pour juger de la qualité d'un ajustement et devrait toujours constituer un préambule à tout test statistique. Selon Meylan *et al.* (2008), la méthode dite « graphique » reste indispensable.

Ensuite, le test d'adéquation du khi-deux a été adopté, en tant que test le plus ancien et le plus puissant. Il a été introduit au début du siècle par Karl-Pearson.

Enfin, le critère d'information Bayésien (BIC) proposés par Schwarz (1978) et le critère d'information d'Akaike (AIC) (Akaike, 1974), représentent les méthodes les plus connues. Ces méthodes ont été utilisées dans le cadre de la présente recherche. Ces deux critères sont utilisés pour s'assurer qu'une distribution de probabilité spécifiée représente bien les données.

4.2.2.4.1. Contrôle visuel de l'ajustement

La méthode graphique est la façon la plus efficace pour visualiser la série de données et vérifier si les distributions ajustées apparaissent en accord avec les données (Meylan *et al.*, 2008).

En effet, l'ajustement graphique, bien qu'étant une méthode approximative, constitue un aspect essentiel du jugement porté sur l'adéquation entre la loi choisie et les données traitées, quelle que soit la méthode d'ajustement utilisée.

Le contrôle visuel de l'ajustement n'est pas un test au sens statistique du terme. Il s'agit d'un outil d'aide à la décision (Gailliez, 2013). Il suit les étapes suivantes :

- calculer des fréquences expérimentales de chaque valeur ;
- positionner les points expérimentaux sur un papier à probabilité ;
- tracer la courbe d'ajustement correspondant au modèle comparé à travers le nuage de points ;
- visualiser et distinguer le meilleur modèle d'ajustement.

La méthode graphique présente l'avantage d'être facile d'utilisation. Néanmoins, si un seul point parmi les données est fortement décalé par rapport aux autres, il est difficile de juger le poids à donner à ce point. Dans ce cas, des méthodes statistiques rigoureuses doivent être utilisées.

4.2.2.4.2. Test de khi-deux (χ^2)

Le test de χ^2 est appliqué pour vérifier l'ajustement d'un échantillon à une loi théorique. Ce test est couramment utilisé, malgré le fait qu'il permet de mesurer l'ajustement à une loi théorique sans toutefois permettre la comparaison de deux ajustements (Gailliez, 2013).

La procédure d'application du test de khi-deux se présente comme suit. Soit un échantillon de « n » valeurs classées par ordre croissant (ou décroissant) et pour lequel une loi de répartition $F(x)$ a été déterminée. On divise cet échantillon en un certain nombre « k » de classes contenant chacune « n_i » valeurs expérimentales. Le nombre « v_i » est le nombre théorique de valeurs affectées à la classe i par la loi de répartition. Ce nombre v_i est donné par l'équation 33 :

$$v_i = n \int_{x_{i+1}}^{x_i} f(x) dx = n[F(x_i) - F(x_{i+1})] \quad \text{Eq. (33)}$$

Avec : $f(x)$ la fonction densité de probabilité correspondant à la loi théorique.

L'expression de χ^2 expérimental est présentée par l'équation 34 :

$$\chi^2 = \sum \frac{(n_i - v_i)^2}{v_i} \quad \text{Eq. (34)}$$

La probabilité de dépassement correspondant au nombre de degré de liberté λ est ainsi déterminée (équation 35) :

$$\lambda = k - 1 - n_p, \quad \text{Eq. (35)}$$

Avec : n_p étant le nombre de paramètres de la loi $F(x)$.

Si cette probabilité est supérieure à 0,05, l'ajustement est satisfaisant. Dans le cas contraire, il y a rejet de la loi.

Ce test prouve l'adéquation entre l'ajustement et les données mais ne permet pas de tirer une conclusion sur le choix de la meilleure loi.

4.2.2.4.3. Critères d'information d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC)

La valeur du critère d'Akaike (Akaike, 1974) et du critère bayésien (Schwarz, 1978) pour une loi de probabilité donnée, ajustée à un échantillon « x » de taille « n » est basée sur un calcul de la log-vraisemblance maximisée (Gailliez, 2013).

Ainsi, pour évaluer la qualité d'un modèle, Akaike (1974) a défini un critère d'information qui porte son nom (AIC pour Akaike Information Criterion). Ce critère, qui peut être adapté à divers contextes, vise à réduire au minimum la mesure d'une information. Il est défini sous l'équation 36 (WMO, 2009):

$$AIC(f) = -2 \log L(\hat{\theta}, x) + 2k \quad \text{Eq. (36)}$$

Avec :

- $L(\hat{\theta}, x)$: la fonction de vraisemblance ;
- k : le nombre de paramètres.

Selon Akaike (1974), le modèle qui rend le mieux compte des données avec le moins de paramètres est celui pour lequel le critère d'information d'Akaike a une valeur minimale.

Toutefois, à lui seul, le critère d'information d'Akaike ne permet pas de choisir un modèle. Il est donc employé concomitamment avec le critère d'information bayésien (en anglais BIC). Le BIC représente une généralisation bayésienne de la notion de critère d'information d'Akaike minimal. Le critère

d'information bayésien BIC a pour objectif de sélectionner le modèle « M » qui maximise la probabilité a posteriori. La formule permettant le calcul du critère BIC est définie par l'équation 37 (WMO, 2009) :

$$BIC(f) = -2 \log L(\hat{\theta}, x) + k \log(n) \quad \text{Eq. (37)}$$

Avec :

- $L(\hat{\theta}, x)$: la fonction de vraisemblance ;
- k : le nombre de paramètres ;
- n la taille de l'échantillon.

Le critère d'information bayésien est également un critère de parcimonie. De tous les modèles, celui pour lequel le critère d'information bayésien a une valeur minimale est considéré comme le meilleur.

4.2.2.5. Détermination des quantiles

Les séries intégrées dans une procédure d'analyse fréquentielle, comme abordé ci-dessus, permettent d'estimer un quantile de période de retour donné à partir d'une loi statistique ajustée sur les observations. La détermination des quantiles a été effectuée à partir de l'approche analytique dont le fondement mathématique se présente comme suit (Kouassi *et al.*, 2019) (équation 38) :

$$x(F) = x_0 + S \times u(F) \quad \text{Eq. (38)}$$

Avec :

- x_0 : la moyenne arithmétique ;
- S : l'écart-type de l'échantillon considéré ;
- u : variable réduite de la loi considérée.

x_0 et S étant connus, on calcule $x(F_i)$, qui est le quantile recherché pour une fréquence de non dépassement donnée F_i . Après avoir déterminé le quantile relatif à une fréquence donnée, il faut connaître l'intervalle de confiance de ce quantile, c'est-à-dire la gamme de valeurs qui devrait contenir ce quantile. L'intervalle de confiance autour d'un quantile quelconque n'est estimé en pratique que lorsque l'effectif de l'échantillon est suffisamment important pour que les moyennes et les écarts-types empiriques suivent sensiblement des lois normales indépendantes ($n > 30$). Ainsi, l'intervalle de confiance a été déterminé selon la formule (équation 39) :

$$\hat{x} = x(F) \pm u(\alpha) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{1 + \frac{u^2(F)}{2}} \quad \text{Eq. (39)}$$

Avec :

- \hat{x} : la valeur vraie ;
- x : le quantile déterminé ;
- σ : l'écart-type de l'échantillon ;
- n : la taille de l'échantillon ;
- α : le seuil de confiance ;
- $u(\alpha)$ coefficient lu dans la table de Gauss pour une fréquence de dépassement donnée $[(1-\alpha)/2]$.

4.2.2.6. Caractérisation des périodes

Selon Hangnon *et al.* (2015), la période de retour (ou temps de retour) caractérise le temps statistique entre deux occurrences d'un événement naturel d'une intensité donnée. Ce terme est très utilisé pour caractériser les risques naturels. La période de retour d'un événement est définie comme étant l'inverse de la probabilité annuelle de dépassement de cet événement (Mohymont et Demarée, 2006).

Pour les débits maximaux mensuels annuels, on a l'équation 40 :

$$T = 1 / (1-F) \quad \text{Eq. (40)}$$

En ce qui concerne les débits minimaux mensuels annuels, on a l'équation 41 :

$$T = 1/F \quad \text{Eq. (41)}$$

Avec :

- T : période de retour (année) ;
- F : fréquence de non-dépassement.

Un événement extrême est qualifié de très exceptionnel si sa période de retour est au-delà de 100 ans; d'exceptionnel si la période de retour est située dans l'intervalle de 30 à 100 ans; de très anormal si la période de retour est comprise entre 10 à 30 ans; d'anormal si la période de retour est située entre 6 à 10 ans, et de normal si la période de retour est à moins de six ans (Hangnon *et al.*, 2015).

4.2.3. DÉTERMINATION DES SEUILS DE CRUES

Dans cette étude, la crue de référence à retenir pour le zonage est, conventionnellement, la plus forte crue connue (Circulaire, 1994). Dans le cas où celle-ci serait plus faible qu'une crue de fréquence centennale, il est recommandé de considérer la crue centennale. De nombreux travaux se sont appuyés sur cette méthodologie de détermination des débits de crues de référence (Bravard et Clemens, 2006 ; Benmansour, 2009 ; GEI, 2013).

Ce choix répond à la volonté de :

- se référer à des événements qui se sont déjà produits, qui sont donc non contestables ;

- privilégier la mise en sécurité de la population en retenant des crues de fréquences rares ou exceptionnelles.

Selon Meddi et Sadeuk. (2007), les études de l'aléa d'inondation nécessitent pour une modélisation, l'estimation des débits extrêmes de crue. De même, dans des cas de dimensionnement des déversoirs de sécurité des barrages hydroélectriques ou encore la délimitation des zones inondables, il est nécessaire de proposer des prévisions de crue et les périodes de retour nettement supérieures à la durée d'observation des débits sur le site étudié.

Cependant, les seuils définissant les venues d'eau particulièrement dangereuses sont laissés à l'appréciation du gestionnaire et des bureaux d'étude (CEREMA, 2018). De même, ce choix est repris par les guides du Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation (CEPRI) (2017) en ces termes : les seuils en termes de hauteur d'eau et/ou de débit au droit des stations du réseau correspondant au passage de niveau de vigilance ne sont pas figés et peuvent évoluer au fur et à mesure de l'amélioration de la connaissance des phénomènes de crues des cours d'eau. Par ailleurs, selon Kouadio (2016), les services étudiant l'aléa crues en vue d'une caractérisation hydrométéorologique des phénomènes sont confrontés à de nombreuses incertitudes notamment la difficulté de maîtriser les seuils de déclenchement des alertes.

Dans le cadre de cette étude, la détermination des débits seuils repose sur les propositions suivantes :

- le seuil de vigilance correspond à 90% du débit de référence ;
- le seuil de crise correspond à 110% du débit de référence.

Par ailleurs, le débit de référence sera présenté dans le chapitre des résultats.

Les différents seuils sont présentés dans les plages de couleurs communément utilisés : jaune pour les risques faibles d'inondation (inondation possible dans les sites à très forts risques) ; orange pour les risques moyens d'inondation (inondation très probable) et rouge pour les risques élevés d'inondation (inondation imminente) (SODEXAM, 2018).

4.2.4. DÉTERMINATION DES SEUILS D'ÉTIAGES

Le plan sécheresse fixe un cadre national de gestion de la ressource en eau (Lang, 2011). Il doit permettre de prévenir les déséquilibres entre prélèvements et ressources disponibles, en imposant des limitations temporaires de certains usages de l'eau. Ce plan définit notamment le débit seuil d'alerte (DSA), qui correspond au seuil en dessous duquel les premières restrictions doivent être prises. L'objectif est d'éviter d'atteindre le débit de crise (DCR), valeur de débit en dessous de laquelle l'alimentation en eau potable ainsi que la survie des espèces aquatiques sont menacées. Le Plan Cadre Sécheresse définit différents stades relatifs à la gravité de la situation (Lang, 2011):

- le seuil de vigilance ;
- le niveau d’alerte ;
- le niveau de crise ;
- le niveau de crise renforcé.

Ces seuils sont fonctions des différents débits indicateurs (débits caractéristiques).

Dans cette étude, l’indicateur pour les étiages est fondé sur le Q_{MNA-5} qui se définit comme le débit moyen mensuel minimal annuel sec de récurrence 5 ans, ou encore le débit mensuel minimal de fréquence quinquennale sèche (ayant une probabilité 1/5 chaque année de ne pas être dépassé). Ce Q_{MNA} renseigne sur la sévérité des étiages et constitue une valeur réglementaire prescrite par la loi française du 3 janvier 1992 relative à la gestion des eaux (Sauquet *et al.*, 2009). Ainsi, deux (2) seuils ont été définis pour la gestion de crise et ont été déjà appliqués aux cours d’eau ivoiriens (Kouassi *et al.*, 2018b). Il s’agit du seuil de vigilance (équation 42) et du seuil de crise (équation 43) :

$$\text{Seuil de vigilance} = 1,1 \times Q_{MNA-5} \quad \text{Eq. (42)}$$

$$\text{Seuil de crise} = 0,9 \times Q_{MNA-5} \quad \text{Eq. (43)}$$

Les différents seuils sont présentés dans les plages de couleurs communément utilisées : jaune pour les débits sans dommages significatifs mais dangereux, orange pour les étiages importants et rouge pour des étiages majeurs.

4.3. PROSPECTIVE DES DÉBITS EXTRÊMES ET CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES DE LA MARAHOUÉ

4.3.1. PROSPECTIVE DES DÉBITS EXTRÊMES DE LA MARAHOUÉ

4.3.1.1. Définition des indicateurs des débits extrêmes

Sur la base des périodes de basses et hautes eaux, exposées précédemment, les indicateurs de débits extrêmes suivants ont été retenus :

- Q_{MNA} : débit moyen mensuel minimal annuel ;
- Q_{JFM} : débit moyen des basses eaux calculé sur la période janvier-février-mars ;
- Q_{FMA} : débit moyen des basses eaux calculé sur la période février-mars-avril ;
- Q_{MXA} : débit moyen mensuel maximal annuel ;
- Q_{ASO} : débit moyen des hautes eaux calculé sur la période août-septembre-octobre ;
- Q_{SON} : débit moyen des hautes eaux calculé sur la période septembre-octobre-novembre.

4.3.1.2. Analyse prospective des paramètres climatiques

Cette étape du travail a permis de réaliser une prévision des paramètres climatiques que sont la pluie et l'ETP au moyen des chaînes de Markov.

En effet, dans le domaine des prévisions des séries temporelles, de nombreux auteurs ont eu recours aux processus de Markov (Logofet et Lesnaya, 2000), en particulier aux chaînes de Markov (Muselli *et al.*, 2001 ; Dlamini *et al.*, 2015 ; Konaté, 2018). C'est un processus stochastique qui possède la propriété Markovienne signifiant qu'étant donné l'état présent, les états futurs seront indépendants des états passés. En d'autres termes, la description de l'état actuel permet de définir les éléments qui pourraient influencer l'évolution du processus (Muselli *et al.*, 2001). Les états futurs seront modélisables grâce à un processus probabiliste dépendant uniquement des états présents. Pour initier l'utilisation de ces processus, il est nécessaire de calculer d'abord la matrice de transition du phénomène. La probabilité de transition de l'état i à l'état j est définie par $p_{i,j}$ (équation 44). La famille de ces probabilités est appelée la matrice de transition de la chaîne de Markov et est notée R_M .

$$P_{ij} = P(x_t = j / x_{t-1} = i) \quad \text{Eq. (44)}$$

La formulation de la prédiction à l'instant $t+h$, est donnée par l'équation 45 :

$$X_{t+h} = X_t * (R_M)^h \quad \text{Eq. (45)}$$

Le choix de la dimension de la matrice de transition est dépendant du nombre de classes que l'on considère. Pour une précision optimale, il faudra en prendre un nombre important. Néanmoins, cette condition est tributaire du nombre d'événements présents dans l'historique d'apprentissage. En effet, avec un nombre de classes élevé et peu d'historique, la matrice de transition comportera énormément de valeurs nulles.

Aussi, pour une meilleure harmonie dans le cadre de ce travail, le choix a été porté sur trois normales. D'une part la normale de référence 1961-1990, et d'autre part, les normales futures 2031-2060 (milieu du siècle) et 2071-2100 (fin du siècle). Pour chaque normale, la pluie et l'ETP ont été simulées. Les taux de variation des différents paramètres ont été exprimés selon l'équation 46 (Kouakou, 2011) :

$$\Phi_i^{\text{hor}} = 100 * \frac{(\overline{X_i^{\text{hor}}} - \overline{X_i^{\text{réf}}})}{\overline{X_i^{\text{réf}}}} \quad \text{Eq. (46)}$$

Avec :

- $\overline{X_i^{\text{hor}}}$: valeur moyenne mensuelle ou annuelle calculée sur l'horizon déterminé ;
- $\overline{X_i^{\text{réf}}}$: valeur moyenne mensuelle ou annuelle calculée sur la période de référence ;
- i : numéro du pas de temps (mois ou année).

4.3.1.3. Évaluation du modèle GR2M

Faisant suite aux données d'entrées (pluie, ETP), les débits mensuels futurs ont été calculés à partir du modèle GR2M sur les périodes 2031-2060 et 2071-2100.

4.3.1.3.1. Description du modèle GR2M

Le choix s'est porté sur le modèle conceptuel global GR2M puisqu'il présente l'avantage d'intégrer en entrée un minimum de données (pluie, évapotranspiration). D'ailleurs, plusieurs auteurs l'ont utilisé pour des études en Afrique de l'Ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire sur les grands cours d'eau ivoiriens notamment Kouassi *et al.* (2012) pour le bassin versant du N'Zi (Bandama), Kouamé *et al.* (2013) sur le bassin versant du N'Zo à Kahin (Sassandra), Kouakou (2011) sur le bassin versant de la Comoé et Yao *et al.* (2019) sur le bassin versant du Sassandra. De même, ce modèle a été beaucoup utilisé pour l'évaluation et la gestion des ressources en eau en Côte d'Ivoire (Kouakou *et al.*, 2012 ; Kouassi *et al.*, 2012 ; Kouamé *et al.*, 2013 ; Mangoua, 2013 ; Adja *et al.*, 2019 ; Yao *et al.*, 2019). Tous ces auteurs s'accordent sur la performance et la robustesse du modèle GR2M. En effet, les modèles GR sont des modèles hydrologiques du Génie Rural, élaborés par le CEMAGREF. Ils ont la réputation d'être des modèles robustes et ont l'avantage de ne pas contenir beaucoup de paramètres de réglage. Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres au pas de temps mensuel) est constitué d'un réservoir de production qui régit la fonction de production et qui est caractérisé par sa capacité maximale et d'un réservoir « eau gravitaire » qui régit la fonction de transfert. Ce modèle mensuel de bilan d'eau est régi par deux paramètres à caler (X1 et X2). Le premier paramètre X1 représente la capacité maximale du réservoir « sol ». Le deuxième paramètre X2 représente le paramètre d'échange souterrain au niveau du réservoir « eau gravitaire ». D'après Mouelhi (2003), un nombre de deux paramètres libres dans un modèle conceptuel global est suffisant pour représenter la relation pluie-débit au pas de temps mensuel selon Kouassi *et al.*, 2012 ; Kouamé *et al.*, 2013 ; Adja *et al.*, 2019. Le modèle GR2M est schématisé par :

- une fraction de la pluie mensuelle qui participe à l'écoulement direct ;
- le niveau d'un réservoir qui représente le stock d'eau et évolue en fonction de la fraction de pluie restante et de l'évapotranspiration potentielle par l'intermédiaire d'une évapotranspiration réelle ;
- une vidange progressive de ce stock d'eau qui produit l'écoulement retardé.

En ce qui concerne les données utilisées, elles sont toutes exprimées en mm (précipitations, évapotranspirations potentielles). Ainsi les données de débits, qui ont servi pour le calage et la validation, ont été ramenées en lame d'eau mensuelle ruisselée (mm) en se basant sur l'équation 47 :

$$R = \frac{Q \times t}{S} \quad \text{Eq. (47)}$$

Avec :

- **R** : lame d'eau mensuelle ruisselée (m) ;
- **Q** : débit mensuelle (m³/s) ;
- **t** : temps en second (s) ;
- **S** : surface du bassin versant concerné (m²).

4.3.1.3.2. Calage du modèle GR2M

Le calage d'un modèle consiste à déterminer le jeu de paramètres du modèle permettant de reproduire le plus fidèlement possible les débits observés à l'exutoire (Ardoin, 2000). La qualité de la reproduction de ces débits est mesurée par une valeur numérique appelée fonction critère. Quelle que soit l'approche utilisée, le calage du modèle exige :

- une série de données "représentative" des différentes entrées dans le système ;
- une estimation initiale des paramètres et des variables d'état du système ;
- une méthode d'ajustement des paramètres ;
- une méthode ou un critère permettant d'évaluer la qualité de la simulation des débits par le modèle (Maklhof, 1994).

Le modèle a été calé sur la période 1961-1990.

4.3.1.3.3. Validation du modèle GR2M

La validation du modèle vise à vérifier si le modèle calé simule correctement des séries de données de référence, non utilisées lors du calage. La qualité du modèle se mesure autant à la valeur du critère d'ajustement. L'objectif est de chercher à améliorer les valeurs des critères d'ajustement traduisant les performances des simulations. L'évaluation de la robustesse d'un modèle s'effectue uniquement au contrôle, donc est fonction des résultats obtenus en validation. Ainsi, le modèle GR2M a été validé sur la période 1991-2017.

4.3.1.3.4. Évaluation de la performance du modèle GR2M

La performance du modèle GR2M a été évaluée à l'aide du critère de Nash-Sutcliffe, du paramètre de la robustesse et des représentations graphiques. Les performances en calage sont moins révélatrices des réelles capacités de simulation des modèles. Celles-ci sont mieux exprimées par la validation.

4.3.1.3.4.1. Critère de Nash-Sutcliffe

Le critère de Nash-Sutcliffe mesure la performance du modèle par rapport à un modèle qui utiliserait la valeur moyenne comme valeur simulée. Le modèle est considéré comme performant quand les débits estimés se rapprochent des débits observés, c'est-à-dire quand la valeur du critère de Nash est proche de 100%. Le critère de Nash-Sutcliffe accorde plus d'importance aux erreurs sur les forts débits. Ainsi en pratique, il convient de garder cette propriété à l'esprit pour l'interprétation des performances des modèles, ou de transformer les variables sur lesquelles on calcule le critère. Le critère de Nash-Sutcliffe est donné par la formule 48 (Kouassi *et al.*, 2012):

$$\text{Nash} - \text{Sutcliffe} = (100) * \left(1 - \frac{\sum_i(Q_i - Q'_i)^2}{\sum_i(Q_i - \bar{Q}'_i)^2}\right) \quad \text{Eq. (48)}$$

Q_i et Q'_i respectivement les débits mesurés (observés) et calculés pour les $i=1, \dots, N$, \bar{Q}'_i est la moyenne des débits calculés. Par ailleurs, l'échelle suivante peut être utilisée pour apprécier la qualité de la simulation (Kouassi *et al.*, 2012) :

- Nash-Sutcliffe $\geq 90\%$, le modèle est excellent ;
- Nash-Sutcliffe compris entre 80% et 90%, le modèle est très bon ;
- Nash-Sutcliffe compris entre 60% et 80%, le modèle est bon ;
- Nash-Sutcliffe $\leq 60\%$, le modèle est mauvais.

4.3.1.3.4.2. Critère de robustesse

On peut également évaluer la qualité des modèles développés au moyen de la robustesse. Cette technique permet de tester l'adaptabilité du modèle quelle que soit sa complexité. Le critère de robustesse (α) du modèle a été évalué par la différence du Nash-Sutcliffe en validation et en calage. Le modèle est dit robuste si le critère de robustesse varie entre -10 et +10%. La robustesse se définit par la formule 49 :

$$\alpha = (\text{Nash-Sutcliffe}_{\text{validation}} - \text{Nash-Sutcliffe}_{\text{calage}}) \quad \text{Eq. (49)}$$

4.3.1.3.4.3. Représentations graphiques

Les analyses graphiques sont réalisées afin de comparer les débits simulés aux débits observés. En pratique, si la simulation était parfaite, c'est-à-dire, si chacune des valeurs simulées par les modèles était égale à la valeur observée, le nuage de points constitué serait aligné et confondu à la droite d'équation $y=x$. Cependant, comme la modélisation n'est pas parfaite, l'évaluation qualitative de la performance des différents modèles a également consisté à apprécier la dispersion du nuage de points autour de la première diagonale. Les points trop éloignés de la droite de référence seront qualifiés de surestimés (au-dessus de la droite) ou sous-estimés (en dessous de la droite).

4.3.1.4. Simulation des débits extrêmes

L'étude prospective s'achève par la production de scénarios sur l'évolution de la situation présente vers des avenir possibles, sur les deux normales futures. Lesdits scénarios couvrent une large gamme d'avenir possibles à savoir au milieu (2031-2060) et à la fin du siècle en cours (2071-2100). Pour ce faire, une extraction des indicateurs de débits extrêmes a été effectuée. A partir des débits simulés sur les différentes périodes futures, une étude statistique des débits extrêmes prévus a été réalisée. Cette étude a intégré la détermination des fréquences d'occurrence mensuelle et de distribution, et le calcul du taux de variation (biais) des différents paramètres.

4.3.2. CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES

La cartographie des zones inondables est basée sur l'exploitation des débits journaliers maximaux annuels. Elle fait appel à deux points essentiels à savoir :

- la modélisation statistique suivie de la détermination des quantiles de débits de crue sur la base de l'analyse fréquentielle ;
- la modélisation hydraulique qui intègre la cartographie des hauteurs d'eau et des vitesses de propagation de crues.

Le premier aspect étant déjà évoqué dans les paragraphes précédents, nous nous attèlerons à développer le second point, c'est-à-dire la modélisation hydraulique. Cependant, on retient que l'analyse fréquentielle a été réalisée sur trois périodes traduisant le court terme (10 ans), le moyen terme (50 ans) et le long terme (100 ans).

4.3.2.1. Modélisation hydraulique

Une modélisation hydraulique permet de simuler numériquement et de prédire l'évolution spatio-temporelle des caractéristiques hydrauliques d'une rivière au cours d'une crue, telles que le débit, la hauteur d'eau, les surfaces inondées ou les vitesses de l'eau (Hostache *et al.*, 2005). L'objectif de cette modélisation est de simuler les crues de la Marahoué pour différentes périodes de retour (10, 50 et 100 ans) et de générer par la suite la cartographie des hauteurs d'eau et des vitesses d'écoulement (cartes des plaines inondables) pour les crues de référence. Ces deux paramètres serviront à établir les cartes d'aléa. L'outil retenu pour cette application est le logiciel HEC-RAS. Le logiciel de simulation HEC-RAS (Hydrologic Engineering Centers River Analysis System) de version 5.01 est présenté comme le modèle de référence dans de nombreuses études (Horritt et Bates, 2002 ; Adjounihin, 2015 ; Guiati, 2019). Une démarche spécifique a été suivie pour déterminer les limites du plan d'eau pour les différents profils calculés. Ces limites ont été ensuite importées sous Google

Earth afin de voir les zones touchées par l'inondation : on parle de carte des plaines inondables. Cette démarche peut être résumée en trois (03) étapes :

- importation du modèle numérique de terrain sous HEC-RAS ;
- délimitation des limites du plan d'eau pour les différents profils calculés ;
- importation des limites sous Google Earth : (carte des plaines inondables).

Les écoulements dans cette étude sont considérés non permanents compte tenu de la variation des paramètres hydrauliques et hydrologiques (débits, niveaux d'eau, profondeurs et vitesses) en fonction du temps. Le modèle sous HEC-RAS est constitué de trois composantes (géométrie, conditions hydrauliques, calage et simulation).

4.3.2.1.1. Géométrie

Tout d'abord, il faut identifier les tronçons homogènes pouvant être décrits par un profil. Pour cela, on a établi un profil en long de la Marahoué à partir du MNT généré en suivant l'axe du fleuve. Ensuite, la carte MNT de la zone préalablement téléchargée (sous l'extension .tif) sur Global Mapper (échelle : 1/1000) a été importée vers le logiciel HEC-RAS. Enfin, la délimitation de la zone à simuler a été réalisée suivant les lignes de crêtes tout en précisant l'amont et l'aval du cours d'eau.

4.3.2.1.2. Conditions hydrauliques

La simulation a été faite en régime non permanent. Les débits déterminés pour les périodes de retour ont été introduits en amont du modèle pour chaque intervalle de temps et en aval, la pente du terrain a été également introduite.

4.3.2.1.3. Calage du modèle et simulation

Cette étape marque la fin de la modélisation hydraulique de la propagation des crues. Le calage consiste à ajuster les paramètres principaux du modèle et sa structure de telle manière que les calculs fournissent une ligne d'eau et une limite de la zone inondable aussi proche que possible des observations. Cette phase est le croisement des données géométriques, topographiques et hydrologiques.

4.3.2.2. Représentation des zones inondables

Les cartes de dangers se basent sur une matrice (Figure 16) qui croise l'intensité maximale d'un phénomène de crue et sa probabilité d'occurrence. En termes d'aménagement urbain, cette approche permet de mettre en place des mesures de réduction des risques adaptées et ciblées pour chaque portion du terrain analysé. Dans la méthodologie, des seuils d'intensité et de probabilité d'occurrence ont été établis pour chaque aléa considéré (tableaux V et VI).

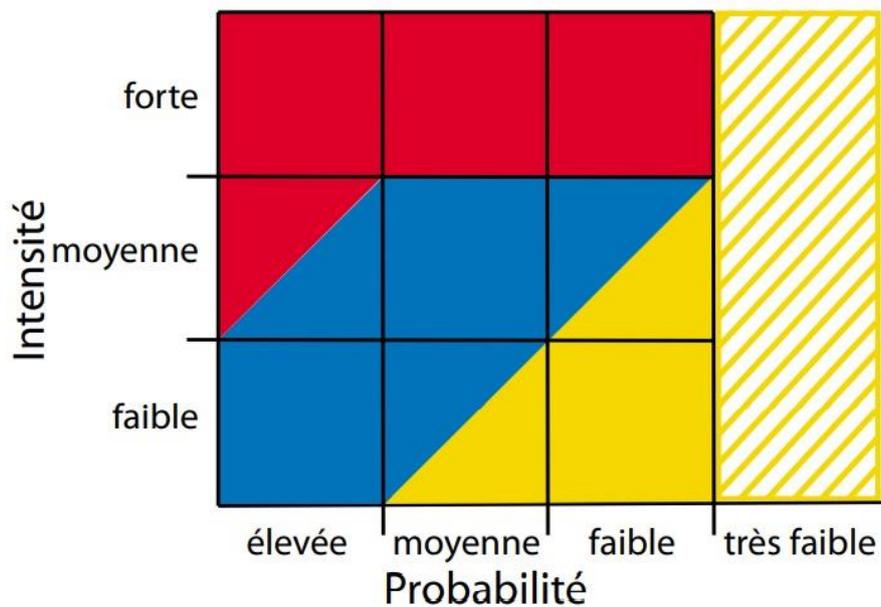


Figure 16 : Matrice de danger Suisse (Werren et Lasri, 2014)

Tableau III: Seuils d'intensité et de probabilité d'occurrence (Werren et Lasri, 2014)

| MESURE | CRITÈRE | FAIBLE | MOYENNE | FORTE |
|--------------------|-------------------------------|--------------------|------------------------|------------------|
| Intensité | Hauteur (m) | $h < 0,5$ | $0,5 < h < 2$ | $h > 2$ |
| | Vitesse x Hauteur (m^2/s) | $v \times h > 0,5$ | $0,5 < v \times h < 2$ | $v \times h > 2$ |
| Probabilité | Temps de retour T (ans) | 100 | 50 | 10 |

Tableau IV : Code de couleur de la matrice suisse et sa signification (Werren et Lasri, 2014)

| ZONE | NIVEAU DE DANGER | SIGNIFICATION POUR L'AMÉNAGEMENT |
|--------------------|--------------------|--|
| Rouge | Danger élevé | Interdiction de construire, dézonage des zones constructibles non utilisés ; |
| Bleu | Danger moyen | Construction possible à condition de prendre des mesures préventives |
| Jaune | Danger faible | Construction agréée, zone de sensibilisation au danger. |
| Jaune-blanc | Danger très faible | Construction agréée |

4.4. OUTIL DE PRÉVISION DES DÉBITS DE LA MARAHOUÉ

Le choix du modèle s'est porté sur les RNA, entre autres pour leur performance et leur robustesse. Il s'agit d'un modèle empirique capables de traiter la non-linéarité (Lek *et al.*, 1996 ; Randrianarivony *et al.*, 2009 ; Koffi *et al.*, 2014 ; Abda *et al.*, 2015).

4.4.1. CHOIX DES VARIABLES ET ARCHITECTURE DES MODÈLES

Le choix des variables qui ont été utilisées pour la conception des modèles de prévision de débit au niveau du bassin versant de la Marahoué est basé sur une synthèse de travaux antérieurs (Benkaci, 2006 ; Koffi *et al.*, 2014 ; Abda *et al.*, 2015 ; Abda *et al.*, 2016 ; Kouassi *et al.*, 2018 a, b). Les variables météorologiques généralement utilisées concernent la pluviométrie, l'évapotranspiration potentielle et la température. Quant à la variable hydrométrique généralement utilisée, elle concerne les données de débit.

Ainsi, il a été utilisé une base de données constituée de quatre variables au pas de temps mensuel et trimestriel. Ces variables sont définies comme suit :

- trois variables indépendantes (explicatives) : précipitations, températures de l'air et ETP ;
- une variable dépendante (à expliquer) : débits moyens.

Le recours aux observations d'autres phénomènes que l'on croit précéder ou accompagner le phénomène que l'on cherche à prévoir est très important. Les précipitations, la température et l'ETP constituent des phénomènes essentiels conditionnant, avec plus ou moins de retardement, le phénomène de l'écoulement.

Cette influence largement démontrée dans la caractérisation, nous emmène à rechercher et formuler certaines corrélations, susceptibles d'être utilisées en matière de prévisions entre le débit d'un mois « Q_t », ses paramètres (P, T, ETP) à l'instant « t » et les paramètres du mois ou des mois futurs. Il est également très pertinent de rechercher et d'utiliser les débits antérieurs à Q_t . En effet, selon l'annuaire hydrologique (Société Hydrotechnique de France, 1948) ou encore le Guide des pratiques hydrologiques (OMM, 2012), la prévision est d'autant plus efficace que le débit qu'on se propose de pré-estimer dépend plus du débit antérieur que des précipitations à venir, que l'on ignore.

De ce fait, la question qui justifie les paragraphes ci-dessous, est la suivante : « dans quelle mesure les facteurs présentés précédemment interviennent dans le conditionnement de l'indice du débit futur Q_{t+1} ? ». Pour y répondre, chaque paramètre d'entrée a été considéré aux instants t-2, t-1, t, et t+1. Toutefois, les pondérations affectées aux instants t-2 et t-1 ont été moins prononcées car influençant beaucoup moins la variable expliquée. De ce fait, les variables retenues en définitive sont les suivantes :

- la pluviométrie : P(t), P(t+1) ;
- l'évapotranspiration potentielle : ETP(t), ETP(t+1) ;
- la température : T(t), T(t+1) ;

- le débit : $Q(t)$.

Sachant que la recherche et la validation d'un modèle sont parmi les domaines les plus difficiles de la statistique, nous avons prêté une attention particulière dans la sélection des variables. Selon Akossou *et al.* (2005), la construction d'un modèle commence par le choix des variables explicatives potentielles. Ce choix se fait sur la base de la connaissance que l'on a du problème, mais il est souvent aussi lié à la disponibilité des informations comme expliqué dans le chapitre sur la critique des données.

Pour ce qui est de cette étude, la méthode a consisté à établir l'équation en choisissant les variables *a posteriori*, c'est-à-dire une sélection pas à pas. Elle correspond à une procédure très couramment utilisée en pratique. Le modèle théorique, n'étant pas connu, nous procédons à la recherche du modèle en excluant les variables jugées non pertinentes, au vu des données dont on dispose. Appelée aussi méthode « Backward Selection ou Régression Descendante », elle débute avec le modèle le plus complet et élimine une à une les variables de moindre importance (la possibilité de récupérer certaines variables éliminées est prise en considération). Le principe d'élimination consiste à calculer la signification statistique (p-value) de chaque variable tout en gardant les autres et éliminer la variable X_j la moins significative. On conserve les variables les plus pertinentes, c'est-à-dire, celles dont la p-value est la plus faible. Cette analyse est basée sur le test de Student au seuil de 5%. En effet, les variables pertinentes sont celles pour lesquelles la probabilité p (p-value) est inférieure ou égale à 0,05. On arrête le processus d'élimination en choisissant le modèle qui précède l'élimination d'une variable "significative".

Les combinaisons de variables ont été étudiées en considérant les pas de temps allant de t-2 à t+1. Toutefois, les résultats présentés sont limités à ceux obtenus pour les sous-ensembles constitués des pas de t à t+1 (trois architectures). S'il est vrai que ces combinaisons présentent de fortes valeurs du coefficient de détermination, elles ont également été retenues pour faciliter l'utilisation des modèles en fonction des données disponibles.

De manière générale, l'architecture d'un modèle donné se présenterait suivant l'équation 50 :

$$I=f[P(t), P(t+1), T(t), T(t+1), Q(t), Q(t-1)] \quad \text{Eq. (50)}$$

Avec :

- **I** : indice de débit du mois prévu ;
- **P(t)** : Indice de pluie du mois t ;
- **P(t+1)** : Indice de pluie du mois t+1 ;
- **T(t)** : indice de température du mois t ;

- **T(t+1)** : indice de température du mois t+1 ;
- **Q(t)** : indice de débit du mois t ;
- **Q(t-1)** : indice de débit du mois t-1.

Les résultats du test de Student ont permis de proposer les architectures des modèles développés, présentés par les équations 51, 52 et 53 :

▪ **modèle 1** : $Q(t+1) = f[P(t), P(t+1), Q(t), Q(t-1)]$ **Eq. (51)**

▪ **modèle 2** : $Q(t+1) = f[P(t), P(t+1), T(t), T(t+1), Q(t), Q(t-1)]$ **Eq. (52)**

▪ **modèle 3** : $Q(t+1) = f[P(t), P(t+1), ETP(t), ETP(t+1), Q(t), Q(t-1)]$ **Eq. (53)**

4.4.2. MISE EN FORME DES DONNÉES

- **Calcul des indices de débit**

Les indices « I » de débit correspondant aux variables dépendantes ont été normalisés dans l'intervalle [-1,1], comme présenté dans l'équation 54 :

$$I_i = \frac{Q_i - Q_0}{\sigma} \quad \text{Eq. (54)}$$

Avec :

- **I_i** : indice de débit du mois i ;
- **Q_i** : débit moyen du mois i ;
- **Q₀** : normale hydrologique de la période de référence (1961-1990) ;
- **σ** : écart-type des débits mensuels sur la période de référence (1961-1990).

- **Normalisation des données d'entrée des modèles**

Les données d'entrée (pluie, température, ETP, débit) sont des valeurs brutes non transformées qui ont des ordres de grandeurs très différents selon les variables. Afin d'uniformiser les échelles de mesures, ces données ont été converties en valeurs standardisées. Ainsi, les valeurs ont été normalisées à partir de l'équation 55 (El Badaoui *et al.*, 2014) :

$$X_n = 0,05 + 0,9 \times \left(\frac{X_r - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \right) \quad \text{Eq. (55)}$$

Avec :

- **X_n** : valeur normalisée ;
- **X_r** : valeur à normaliser ;

- X_{\max} : valeur maximale de la série ;
- X_{\min} : valeur minimale de la série.

4.4.3. PROCÉDURE DE CALAGE ET DE VALIDATION DU MODÈLE

Dans ce travail, ce sont les réseaux de neurones non récurrents de type PMC qui ont été utilisés. Le choix d'exploiter un type de réseaux de neurones par rapport à un autre n'est pas arbitraire, mais repose sur les fondements qu'exige le problème en question. Sachant que chaque type de réseaux, en termes d'apprentissage, est conseillé pour une application donnée. Nous avons opté donc pour le PMC puisqu'il répond aux spécificités du problème de prédiction. Ce type de réseaux a été récemment validé comme outil pertinent de prévision et de simulation des débits (Fortin *et al.*, 1997 in Koffi, 2007). De plus, le Perceptron Multicouches est le Réseau de neurones le plus utilisé en modélisation hydrologique (Coulibaly *et al.*, 1999 ; Gaspar, 2010).

Pour déterminer l'architecture du réseau à utiliser, il nous faut varier le nombre de couches cachées, le nombre de neurones dans une couche cachée, les fonctions de transfert, le nombre d'itérations et le pas d'apprentissage (Chen *et al.*, 2008). Nous avons choisi de diviser la base de données en deux sous-ensembles qui se présentent comme suit :

- de 1961 à 1990 (période de référence) : pour l'apprentissage ;
- de 1991 à 2017 : pour la validation.

Comme mentionné précédemment, la structure du réseau dépend étroitement de la base de données, constituée de couples entrées-sorties, choisis. Le nombre de nœuds d'entrées et de sorties est généralement imposé par la fonction à approximer. Le premier est déterminé par le nombre de variables utilisées en entrée. Dans cette étude, nous disposons de quatre variables.

Pour la couche de sortie, le nombre de neurones est déterminé par le nombre de sorties à approximer, c'est à dire la variable qu'on veut prédire. L'objectif étant de prédire le débit, il n'a été utilisé qu'un seul neurone dans la couche de sortie (Yonaba, 2009).

4.4.4. PERFORMANCE DES MODÈLES EN CALAGE ET EN VALIDATION

La performance des modèles a été évaluée à l'aide de critères déterministes, de critères de contingence et de représentations graphiques entre débits observés et simulés. L'analyse des résultats de simulation est portée sur les performances des modèles en phase de calage et en validation. En effet, les performances en calage sont moins révélatrices des réelles capacités de simulation des modèles. Celles-ci sont mieux exprimées par la validation.

Les scores déterministes sont composés du coefficient de corrélation, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le critère d'optimisation de Nash-Sutcliffe et le paramètre de robustesse. Par ailleurs, les scores de contingence mettent en évidence le skill, la probabilité de détection (POD), la fausse alerte (FAR), le taux de coïncidence, et le hit skill score (HSS). A ces critères numériques, s'ajoutent des représentations graphiques qui sont privilégiés pour la comparaison visuelle des débits simulés et observés.

Le critère de Nash-Sutcliffe, le paramètres de la robustesse et les représentations graphiques ont déjà été présentés dans les paragraphes passés.

4.4.4.1. Scores déterministes

4.4.4.1.1. Coefficient de corrélation (R)

Le coefficient de corrélation (R) est utilisé pour mesurer la corrélation linéaire entre la variable réelle ou mesurée et la variable simulée. L'expression du coefficient de corrélation s'établit suivant l'équation 56 (Legates et McCabe, 1999 *in* Koffi, 2007) :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}) \times (Q'_i - \bar{Q}')}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2 \times \sum_{i=1}^n (Q'_i - \bar{Q}')^2}} \quad \text{Eq. (56)}$$

Avec :

- Q_i : le débit mesuré ;
- Q'_i : le débit prévu ;
- \bar{Q} : la moyenne des débits mesurés ;
- \bar{Q}' : la moyenne des débits simulés.

Dans le cadre de ce travail, un seuil de 0,6 a été retenu (Kouassi *et al.*, 2017a).

4.4.4.1.2. Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est utilisée comme la mesure de la performance globale du modèle. Le modèle est bien optimisé si la valeur de RMSE est proche de zéro, ce qui tend vers une parfaite prévision (Kouamé, 2013 ; Kouassi *et al.*, 2018c). Sa formulation mathématique est donnée par la relation 57 suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q'_i)^2}{n}} \quad \text{Eq. (57)}$$

Avec :

- Q_i : le débit mesuré au pas de temps i ;
- Q'_i : le débit simulé pour le pas de temps i ;
- n : le nombre de simulations.

4.4.4.2. Scores de contingence

Pour déterminer les scores de contingence, on classe les indices par ordre croissant. Le premier tiers correspond aux années sèches (période déficitaire), le second tiers aux années proches de la normale (période normale) et le troisième tiers aux années humides (période humide) (Hamatan, 2002 ; Hamatan *et al.*, 2004 ; Kouassi *et al.*, 2018c). Pour permettre l'évaluation des prévisions, des critères ont été définis : pourcentage de coïncidence (C), probabilité de détection d'une année sèche ou humide (POD), fausse alerte du premier ordre (FAR) et performance du modèle (HSS). Les éléments de base servant au calcul des différents critères sont récapitulés dans la table de contingence (tableau VII).

Tableau V: Table de contingence (Hamatan *et al.*, 2004)

| | | Prévisions | | | Total |
|--------------|---------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | Sèche | Normale | Humide | |
| Observations | Sèche | N_{11} | N_{12} | N_{13} | $\sum_{j=1}^3 N_{1j}$ |
| | Normale | N_{21} | N_{22} | N_{23} | $\sum_{j=1}^3 N_{2j}$ |
| | Humide | N_{31} | N_{32} | N_{33} | $\sum_{j=1}^3 N_{3j}$ |
| Total | | $\sum_{i=1}^3 N_{i1}$ | $\sum_{i=1}^3 N_{i2}$ | $\sum_{i=1}^3 N_{i3}$ | N |

▪ Probabilité de détection (POD)

La probabilité de détection exprime le pouvoir de détection d'une catégorie donnée de la saison. Si on s'intéresse à une catégorie sèche, la POD (sèche) est le nombre d'années sèches correctement

prévues par le modèle, rapporté au nombre total d'années sèches observées (soit le tiers de la série). Elle varie de 0 (mauvaise) à 1 (meilleure) suivant l'équation 58 :

$$POD(sèche) = \frac{N_{11}}{\sum_{j=1}^3 N_{1j}} \quad \text{Eq. (58)}$$

Pour une catégorie humide, la POD (humide) est le nombre d'années humides correctement prévues par le modèle, rapporté au nombre total d'années humides observées (soit le tiers de la série). Elle fluctue entre 0 (mauvaise) et 1 (meilleure) suivant l'équation 59 :

$$POD(humide) = \frac{N_{33}}{\sum_{j=1}^3 N_{3j}} \quad \text{Eq. (59)}$$

- **Fausse Alerte (FAR)**

La fausse alerte est le nombre prévu d'une catégorie donnée alors que c'est le contraire qui a été observé, rapporté au nombre total prévu de cette catégorie (Hamatan, 2002 ; Hamatan *et al.*, 2004). En s'intéressant à une catégorie sèche, la FAR (sèche) est le nombre d'années prévues sèches alors qu'elles ont été observées humides, divisé par le nombre total d'années sèches prévues par le modèle. Elle oscille entre 0 (meilleure) et 1 (mauvaise) suivant l'équation 60 :

$$FAR(sèche) = \frac{N_{31}}{\sum_{i=1}^3 N_{i1}} \quad \text{Eq. (60)}$$

En ce qui concerne la catégorie humide, la FAR (humide) est le nombre d'années prévues humides alors qu'elles ont été observées sèches, divisé par le nombre total d'années humides prévues par le modèle. Elle va de 0 (meilleure) à 1 (mauvaise) suivant l'équation 61 :

$$FAR(humide) = \frac{N_{13}}{\sum_{i=1}^3 N_{i3}} \quad \text{Eq. (61)}$$

- **Taux de coïncidence (C)**

Le taux de coïncidence est le pourcentage des catégories correctement prévues par rapport à la taille de l'échantillon (nombre total d'années) qui se détermine par l'équation 62 :

$$C = \frac{\sum_{i=j=1}^3 N_{ij}}{N} \quad \text{Eq. (62)}$$

Il exprime la performance prévisionnelle du modèle en comparant les prévisions aux observations (Hamatan, 2002 ; Hamatan *et al.*, 2004).

- **Hit Skill Score (HSS)**

Le hit skill score est la valeur ajoutée par le modèle par rapport au hasard (Hamatan, 2002 ; Hamatan *et al.*, 2004). Il est donné par les équations 63 et 64 :

$$HSS(\%) = 100 \times \frac{H-t}{N-t} \quad \text{Eq. (63)}$$

$$HSS(\%) = \frac{\sum_{i=j=1}^3 N_{ij} - \frac{N}{3}}{N - \frac{N}{3}} = \frac{3}{2} \times C - \frac{1}{2} \quad \text{Eq. (64)}$$

Avec :

- **H** : nombre de coïncidences entre catégories prévues et observées (la somme des valeurs de la diagonale de la table de contingence) ;
- **t** : nombre de coïncidences pour une table de contingence purement aléatoire (le tiers de la série) ;
- **n** : Taille de l'échantillon.

Ainsi, si un modèle est performant, alors son skill, sa POD et son taux de coïncidence sont grands, et présente des faibles valeurs de FAR.

CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a montré, les différentes méthodes appliquées sur les données climatiques et hydrométriques relatives aux extrêmes hydrologiques de la période d'étude (1961- 2017). Quatre grands aspects ont été traités dans ce chapitre.

D'abord, il a présenté la méthodologie de la caractérisation hydro-climatique du bassin versant de la Marahoué. Cette caractérisation a été faite à travers l'analyse du régime climatique, faisant ainsi appelle à deux indices climatiques à savoir l'indice de Gaussen, l'indice de De Martonne et l'indice normalisé. Aussi, l'analyse des caractéristiques de l'écoulement, a été réalisée sur la base du régime saisonnier de la Marahoué, des fréquences de distributions des débits et des variations et tendances interannuelles du débit. Par ailleurs, la caractérisation des réservoirs souterrains a été élaborée sur la base de la méthode de Lang (2007) et du modèle de Maillet.

Ensuite, concernant la modélisation du SAP, deux indicateurs ont été retenus à savoir, le Q_{MNA} et le Q_{MXA} sur la période 1961-2017. Ces indicateurs seront utilisés dans le cadre de l'analyse fréquentielle qui tend à prédire le comportement des cours d'eau. Il est à noter que dans le cadre de cette analyse, cinq lois ont été proposés (loi Exponentielle, loi Weibull, loi Gamma, loi Log-normale, loi Pearson de type III) afin de déterminer celles qui s'ajustent au mieux aux données de Q_{MNA} et Q_{MXA} . La sélection des meilleurs ajustements a été faite sur la base de l'examen visuel des graphiques d'ajustement, du test d'adéquation du khi-deux et des critères BIC et AIC, tout en déterminant les quantiles, correspondant aux seuils de vigilance et de crise. D'un autre côté, la détermination des seuils de crues a été proposée en tenant compte du débit de référence et la détermination des seuils d'étiages a été envisagée en référence au Q_{MNA-5} .

Puis, la prospective des débits extrêmes a conduit à définir quatre nouveaux indicateurs en plus du Q_{MNA} et Q_{MXA} à savoir Q_{JFM} , Q_{FMA} , Q_{ASO} et Q_{SON} . Dans l'optique de réaliser une prévision desdits indicateurs, les données futures des paramètres climatiques (pluie et ETP) ont été déterminées au moyen des chaînes de Markov. Faisant suite à ces données d'entrées (pluie, ETP), les débits mensuels futurs ont été calculés à partir du modèle GR2M. Tous les paramètres ont été déterminés afin de proposer des scénarios couvrant ainsi une large gamme d'avenirs possibles à savoir au milieu (2031-2060) et à la fin du siècle en cours (2071-2100). La prospective s'est poursuivie avec la cartographie des zones inondables sur la base de la modélisation statistique et la modélisation hydraulique qui intègre la cartographie des hauteurs d'eau et des vitesses de propagations de crues.

Enfin, la prévision des débits du bassin versant de la Marahoué a conduit à l'élaboration de modèle basé sur les réseaux de neurones (RNA). Ces modèles ont suscité des variables d'entrées aux instants « t » et « t+1 » à savoir deux variables de pluviométrie, deux variables d'ETP, deux variables de températures et une variable de débit. Sur la base des variables d'entrées, trois architectures de modèles ont été définies. Par ailleurs, la variable de sortie proposée a été l'indice de débit. La performance des modèles à la suite des phases de calage et validation, a été réalisée sur la base des scores déterministes (R, RMSE et Nash-Sutcliffe), du critère de robustesse, des scores de contingences (POD, FAR, C et HSS) et des représentations graphiques.

Les résultats obtenus après l'application de toutes ces méthodes sont présentés dans la troisième partie de ce document, à travers les chapitres 5, 6, 7 et 8.

TROISIÈME PARTIE :
RÉSULTATS ET
DISCUSSION

CHAPITRE 5. DYNAMIQUE HYDROCLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA MARAHOUÉ

5.1. CRITIQUE DES DONNÉES

5.1.1. DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES

Les données recueillies sont entachées d'erreurs, qui tiennent autant du système d'acquisition lui-même que du caractère individuel de la mesure ou de l'enquête, individualité éminemment propre à engendrer des hétérogénéités (Hiez, 1977). De plus, toute absence d'observation en une station et à une date déterminée provoque une lacune dans la matrice de données. De ce fait, une critique des données recueillies est nécessaire. En effet, la cohérence des chroniques est un préalable indispensable à la confiance que l'on peut accorder aux chroniques de données issues des stations hydrométéorologiques (Kouamé, 2013).

5.1.1.1. Données de pluviométrie

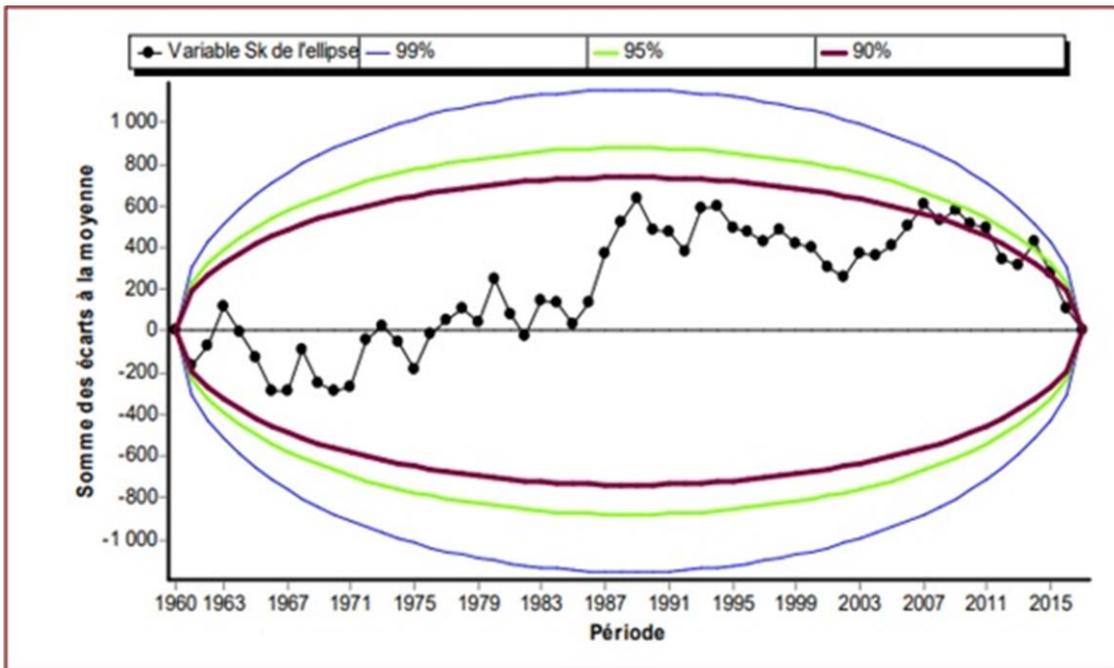
L'identification des valeurs erronées a été réalisée sur la base des résidus de précipitation par le Test de Buishand et ellipse de Bois. Ces tests sont basés, de manière fondamentale, sur le calcul des résidus, traduite par l'équation 65 :

$$\hat{\varepsilon}_i = y_i - \hat{y}_i \quad \text{Eq. (65)}$$

Avec : \hat{y}_i est la valeur ajustée de y_i par le modèle, c'est-à-dire $\hat{y}_i = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_i$ (Cornillon et Matzner-Lober, 2007).

L'application du Test de Buishand et ellipse de Bois a été faite à l'aide du logiciel KhronoStat 1.01. A titre illustratif, il est présenté aux figures 17, 18 et 19, les résultats des séries pluviométriques des zones nord, centre et sud du bassin versant de la Marahoué. Ces figures montrent que tous les points figuratifs des résidus se trouvent à l'intérieur de l'ellipse. L'hypothèse nulle est acceptée pour toutes les stations, au seuil de confiance de 90, 95 et 99%, ce qui traduit une bonne homogénéité et stationnarité des données pluviométriques du bassin versant de la Marahoué.

a)



b)

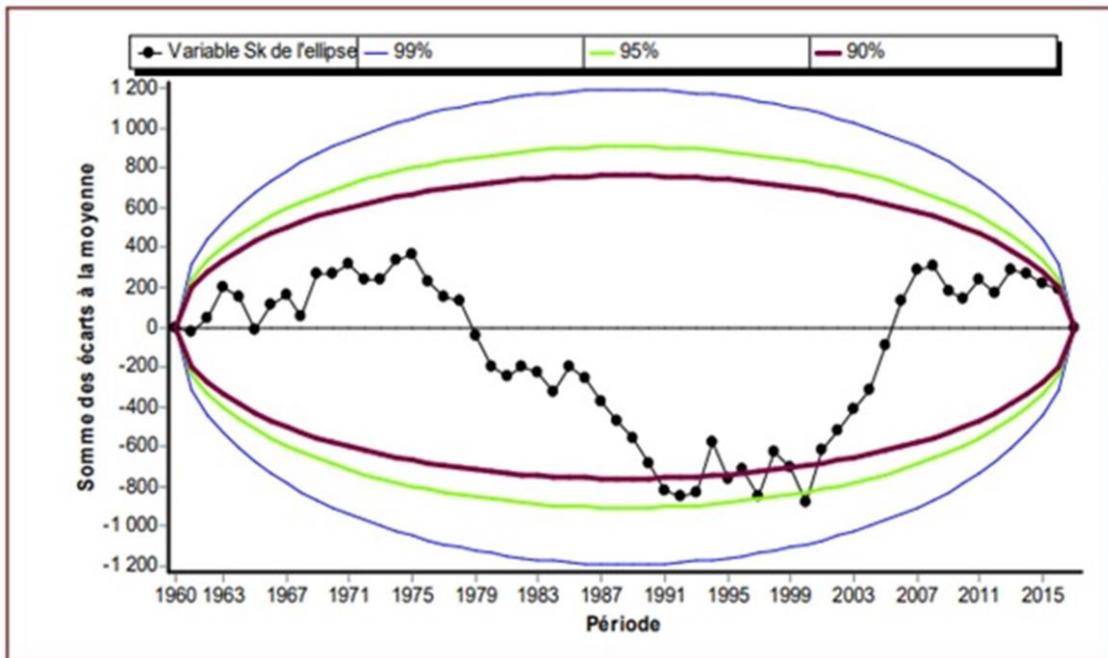
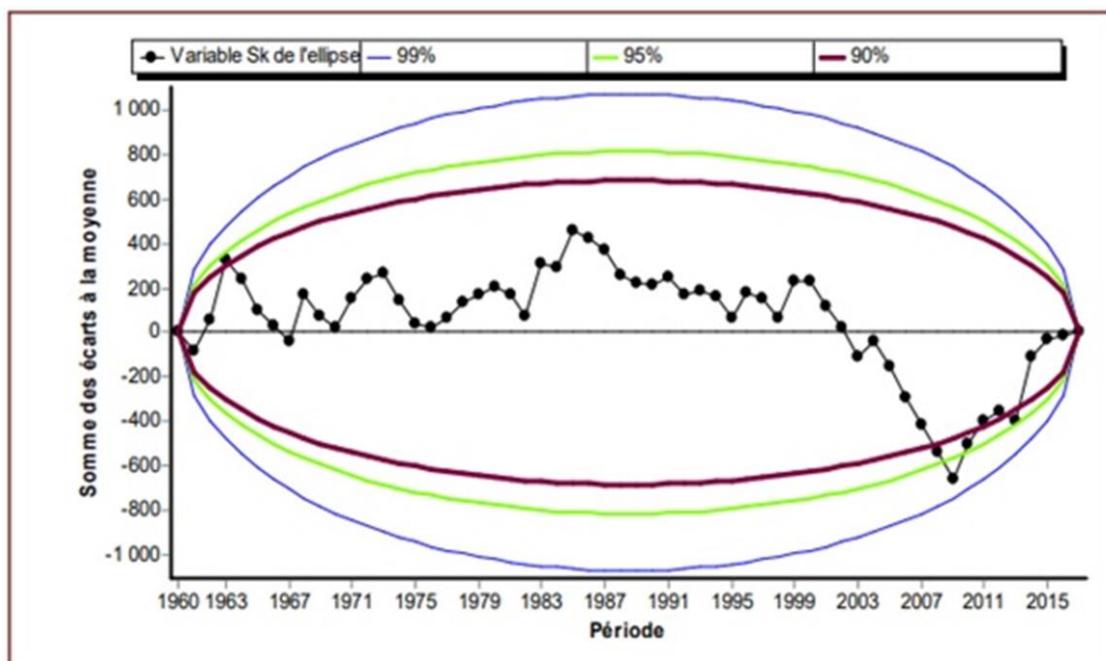


Figure 17 : Courbes des résidus de précipitation aux stations de Kani (a) et Madinani (b)

a)



b)

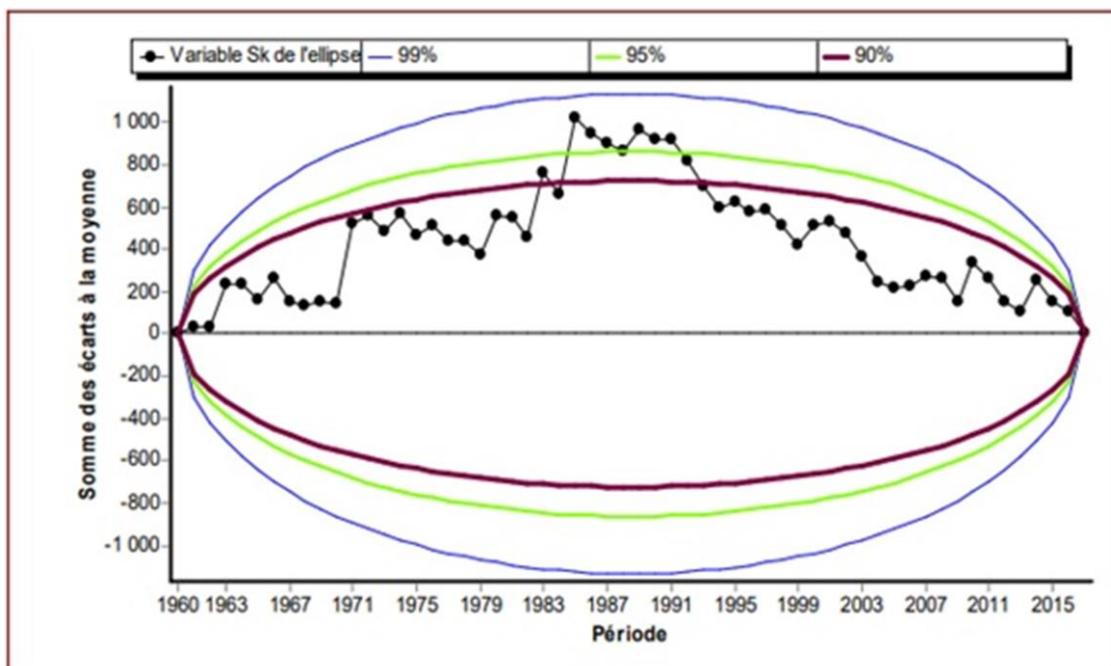
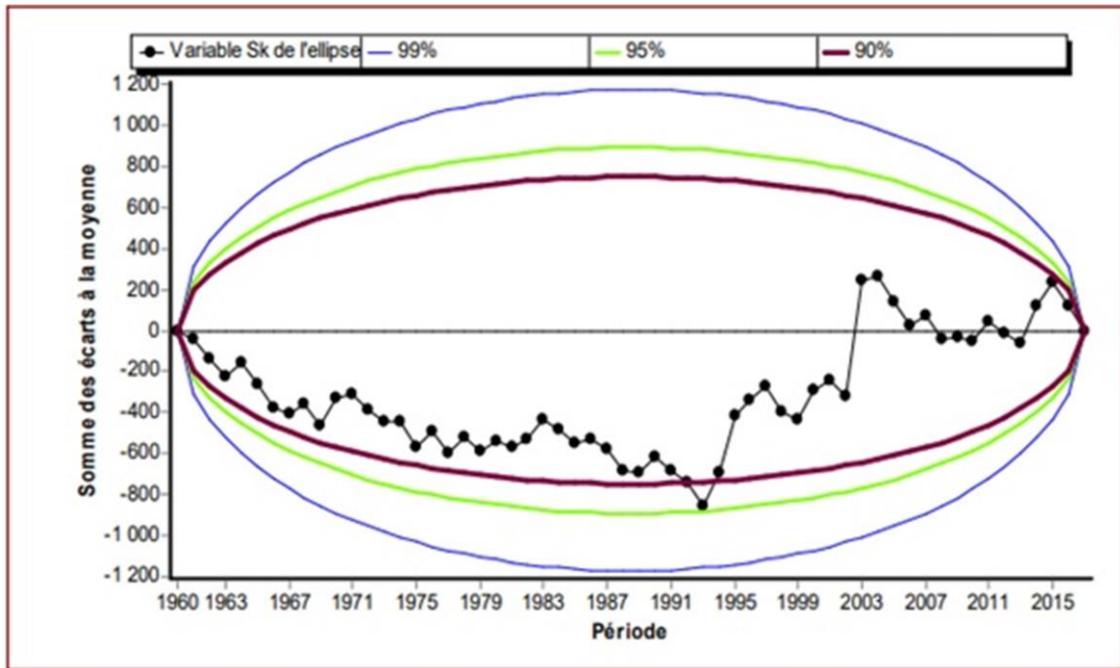


Figure 18 : Courbes des résidus de précipitation aux stations de Bouaké (a) et Béoumi (b)

a)



b)

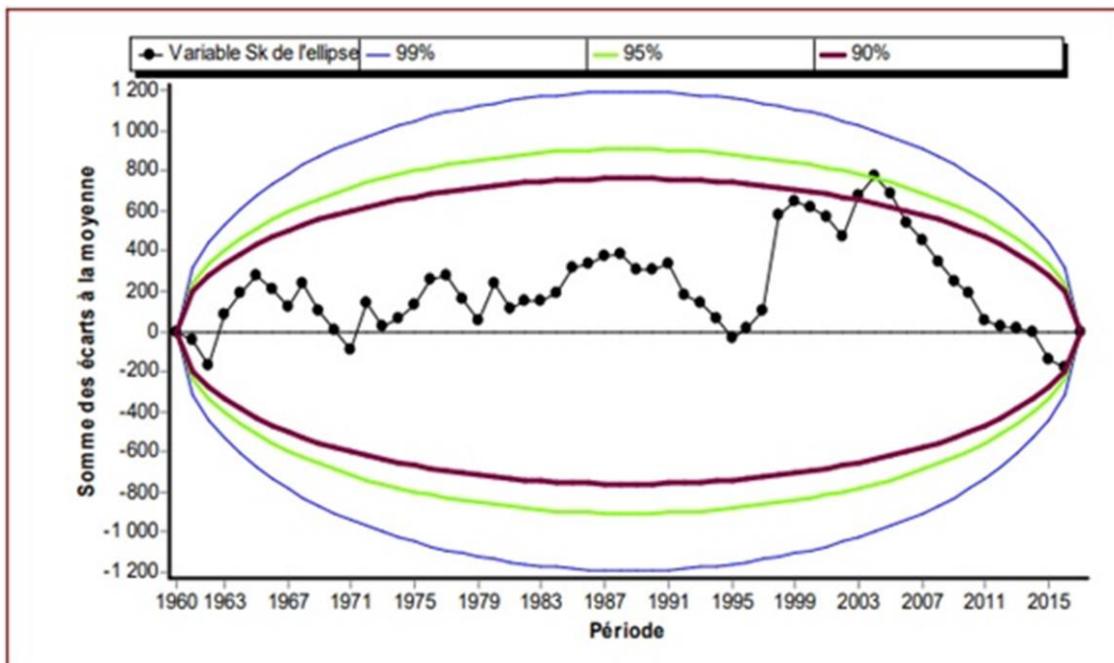


Figure 19 : Courbes des résidus de précipitation aux stations de Vavoua (a) et Bouaflé (b).

Par la suite, les séries présentant quelques lacunes ont été comblées à partir de la régression linéaire. Le principe de la régression linéaire a été de répartir les observations en fonction des stations voisines proches de la zone d'étude. Il a été établi la courbe de régression de Y par X, la représentation graphique des couples (x,y) où x et y sont les valeurs des variables de pluviométrie. Le test de régression linéaire (RL) vérifie l'hypothèse de stationnarité contre celle d'une tendance linéaire. De même, la régression linéaire est bonne si le coefficient de corrélation tend vers 1 (Kouakou, 2011). Dans le cadre de ce travail, un seuil de 0,6 a été retenu (Kouassi *et al.*, 2017a). La corrélation a donc été réalisée entre les données des différentes stations présentées dans le tableau I.

Tableau VI : Stations de référence

| Stations de référence | Stations voisines |
|-----------------------|--|
| Odienné | Boundiali, Dianra, Kani, Madinani, Séguéla |
| Daloa | Bouaflé, Vavoua, Zuenoula |
| Bouaké | Béoumi, Mankono |

Les caractéristiques statistiques des données pluviométriques reconstituées ont été regroupées dans le tableau II. Les valeurs annuelles varient entre 1053 et 1405 mm avec une moyenne de 1196 mm. Les coefficients de variation (Cv) de ces pluies annuelles fluctuent entre 0,17 et 0,35 avec une moyenne de 0,23. Huit (8) stations présentent un pourcentage de Cv inférieur à 25%. Cela signifie que la dispersion des données des séries pluviométriques considérées est assez faible. Ces valeurs montrent que les données pluviométriques retenues pour l'étude sont assez homogènes et représentatives de la zone d'étude.

Tableau VII : Caractéristiques statistiques des données pluviométriques (mm) du bassin versant de la Marahoué (1961-2017)

| | Minimum | Maximum | Moyenne | Ecart-type | CV |
|------------------|---------|---------|---------|------------|------|
| Béoumi | 529,3 | 1564,7 | 1053,34 | 181,02 | 0,17 |
| Bouaflé | 440,7 | 1929,8 | 1174,97 | 263,21 | 0,22 |
| Boundiali | 836,6 | 2309 | 1405,18 | 337,18 | 0,24 |
| Dianra | 503,7 | 2309 | 1202,3 | 421,94 | 0,35 |
| Kani | 586,36 | 1631,7 | 1107,68 | 241,24 | 0,22 |

| | Minimum | Maximum | Moyenne | Ecart-type | CV |
|-----------------|---------|---------|---------|------------|------|
| Madinani | 744,8 | 1814,09 | 1267,63 | 258,56 | 0,20 |
| Mankono | 636,42 | 1662,4 | 1184,58 | 222,16 | 0,19 |
| Séguéla | 635,27 | 3231,3 | 1329,59 | 393,35 | 0,30 |
| Vavoua | 570,2 | 1764,8 | 1153,74 | 236,54 | 0,21 |
| Zuénoula | 533,05 | 1764,8 | 1079,82 | 230,14 | 0,21 |

5.1.1.2. Données de température

Au niveau de la température, les données recueillies ne présentaient aucune lacune. Toutefois, l'identification des valeurs erronées a été réalisée sur la base des résidus de température par le Test de Buishand et ellipse de Bois. Les résultats des séries thermiques des stations de Yamoussoukro et Korhogo sont représentés respectivement aux figures 20 et 21. Il ressort de l'observation de ces figures que tous les points figuratifs des résidus se trouvent à l'intérieur de l'ellipse. L'hypothèse nulle est acceptée pour toutes les stations, au seuil de confiance de 90, 95 et 99% ; ce qui traduit une bonne homogénéité et stationnarité des données de température du bassin versant de la Marahoué.

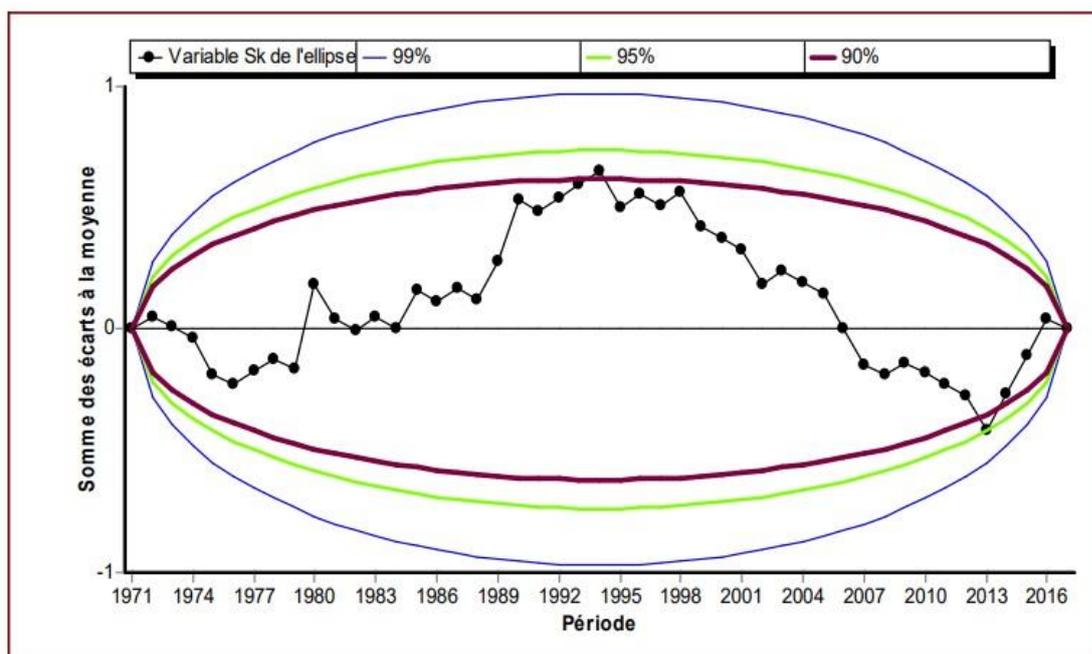


Figure 20 : Courbes des résidus de température à la station de Yamoussoukro

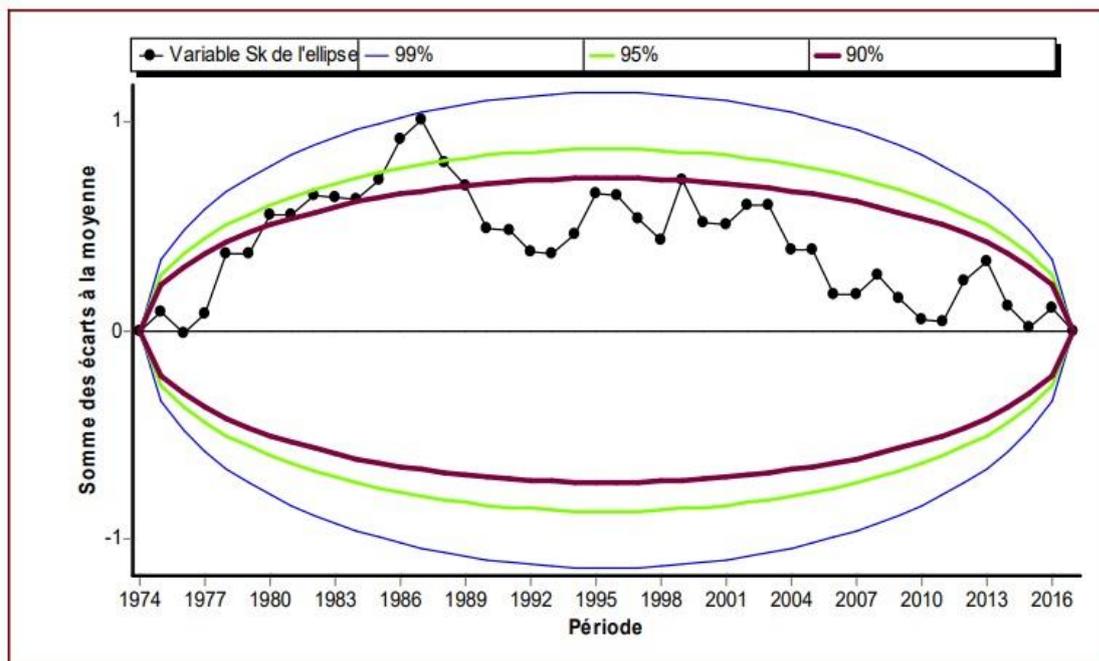


Figure 21 : Courbes des résidus de température à la station de Korhogo

Les caractéristiques statistiques de la température montrent que les valeurs moyennes annuelles vont de 25 à 27 °C avec une moyenne de 26 °C et un écart-type de 0,39 °C.

5.1.1.3. Données d'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP), au pas de temps mensuel, a été évaluée à partir de la méthode de Thornthwaite, présentée aux équations 66, 67, 68 et 69 :

$$ETP(\text{mm}) = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a F(\lambda) \quad \text{Eq. (66)}$$

$$I = \sum_{i=1}^{i=12} i \quad \text{Eq. (67)}$$

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514} \quad \text{Eq. (68)}$$

$$a = 0,49239 + 1,79 \cdot 10^{-2}I - 7,71 \cdot 10^{-5}I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7}I^3 \quad \text{Eq. (69)}$$

Avec :

- t : température moyenne mensuelle en °C ;
- I : indice thermique annuel ;

- **i** : indice thermique mensuel ;
- **F(λ)** = coefficient correcteur qui est fonction de la latitude du lieu considéré et est donné par les tables de Gerbier.

$$\mathbf{ETP}_{\text{annuelle}} = \sum \mathbf{ETP}_{\text{mensuelle}} \quad \mathbf{Eq. (70)}$$

Ainsi, l'ETP a été calculée à partir des données de pluie et de température moyennes mensuelles sur le bassin versant de la Marahoué. Les données annuelles d'ETP s'étendent sur la période 1961-2017 et varient entre 1434 et 1761 mm avec une moyenne de 1567 mm et un écart-type de 77 mm.

Les données d'ETP calculées par la méthode de Thornthwaite sont acceptables au regard de la bonne qualité des données de pluie et de température qui constituent les principaux paramètres de cette méthode. En effet, plusieurs auteurs ont utilisé cette méthode pour l'évaluation de l'ETP sur le territoire ivoirien (Kouassi *et al.*, 2012 ; Kouassi *et al.*, 2017a,b ; Adja *et al.*, 2019 ; Yao *et al.*, 2019).

5.1.2. DONNÉES HYDROMÉTRIQUES

Les séries de débits disponibles présentent des données manquantes (lacunes). Ainsi, la reconstitution des données a été réalisée par deux méthodes à savoir la méthode des analogues et la régression linéaire débit-débit m^3/s .

Le principe de la méthode des analogues est que pour deux bassins versants présentant des caractéristiques hydro-physiques et climatiques similaires (précipitation, température, évaporation, etc.), ils ont également des paramètres hydrologiques semblables (Kouassi *et al.*, 2018b).

L'hypothèse de base est donc représentée par l'équation 71 :

$$\frac{Q_1}{S_1} = \frac{Q_2}{S_2} \Rightarrow Q_1 = \frac{S_1}{S_2} Q_2 \quad \mathbf{Eq. (71)}$$

Avec :

- **Q₁** : débit de la station 1 (m^3/s) ;
- **S₁** : surface de la station 1 (m^2) ;
- **Q₂** : débit de la station 2 (m^3/s) ;
- **S₂** : surface de la station 2 (m^2).

Il est à noter que la station 1 est représentée par la station de Bouaflé et la station 2 par celle de Séguéla-Béoumi.

Ainsi, les données de débits de la station de Bouaflé ont été comparées à celles de la station de Séguéla-Béoumi. Les différentes variables examinées sont le débit moyen annuel, le débit moyen mensuel Minimal Annuel (Q_{MNA}), le débit moyen mensuel Maximal Annuel (Q_{MXA}) et le débit

journalier Maximal Annuel (Q_{JMAX}) entre la station de référence (Séguéla-Béoumi) et la station hydrométrique retenue sur le bassin versant (Bouaflé).

Le nuage de points de la figure 22 illustre la corrélation entre les débits moyens annuels de la station de Bouaflé et ceux de la station de Séguéla-Béoumi. Le nuage de points présente une bonne corrélation avec une valeur du coefficient de corrélation égale à 0,78. Par ailleurs, le coefficient de détermination est de 0,61.

Les figures 23 et 24, montrent respectivement la corrélation entre les données de Q_{MNA} et Q_{MXA} des stations de Bouaflé et Séguéla-Béoumi. Ces corrélations sont acceptables avec des valeurs du coefficient R respectivement de 0,65 et 0,74.

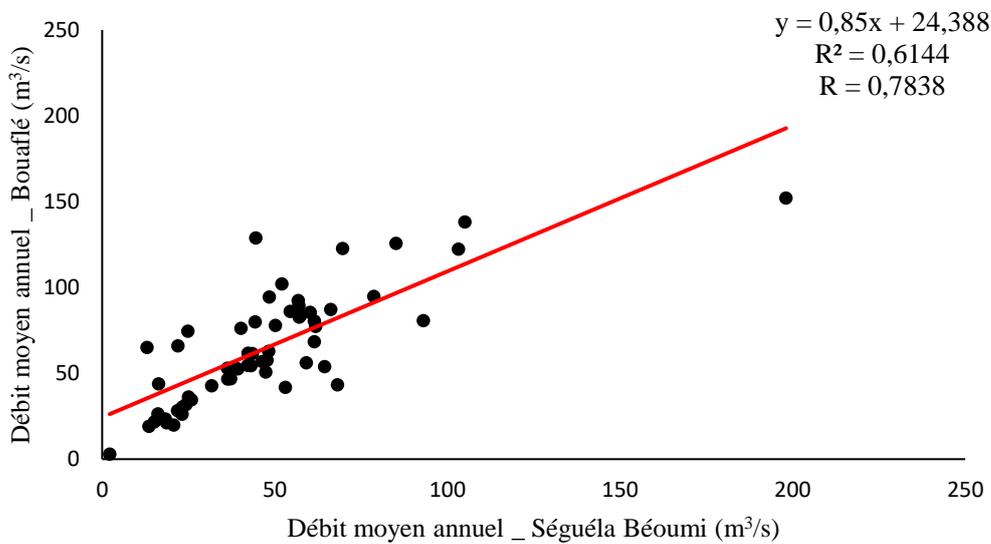


Figure 22 : Comparaison des débits moyens annuels de la station de Bouaflé à ceux de Séguéla-Béoumi

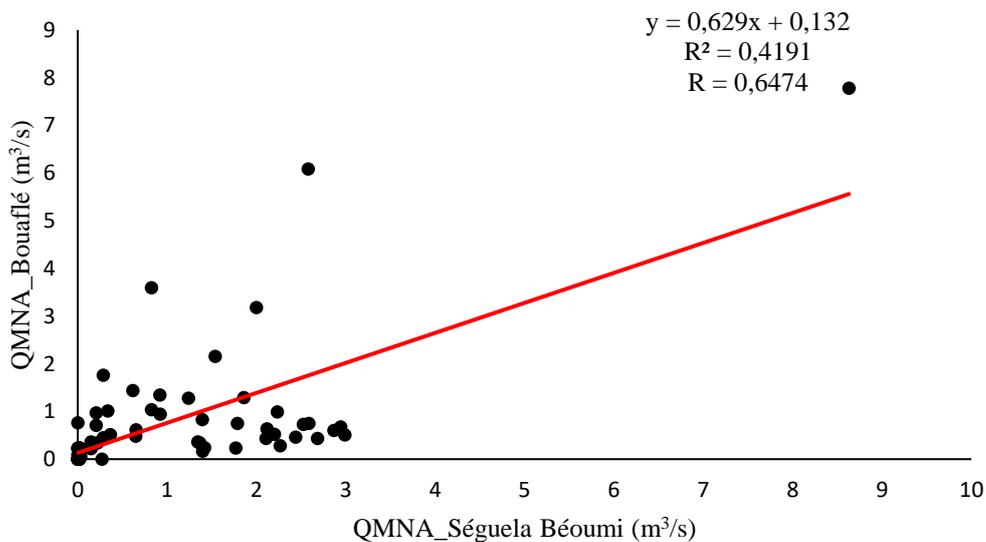


Figure 23 :

Comparaison des Q_{MNA} de la station de Bouaflé à ceux de Séguéla-Béoumi

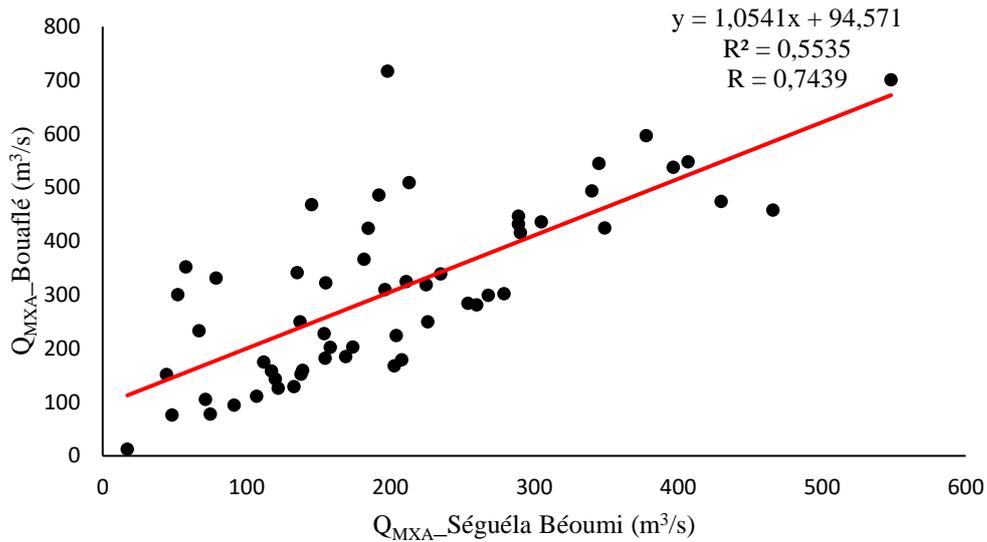


Figure 24 : Comparaison des Q_{MXA} de la station de Bouaflé à ceux de Séguéla-Béoumi

Le nuage de points de la figure 25 met en relief la corrélation entre les débits journaliers maximaux de la station de Bouaflé et ceux de la station de Séguéla-Béoumi. Le nuage de point présente une bonne corrélation avec une valeur du coefficient de corrélation de 0,72.

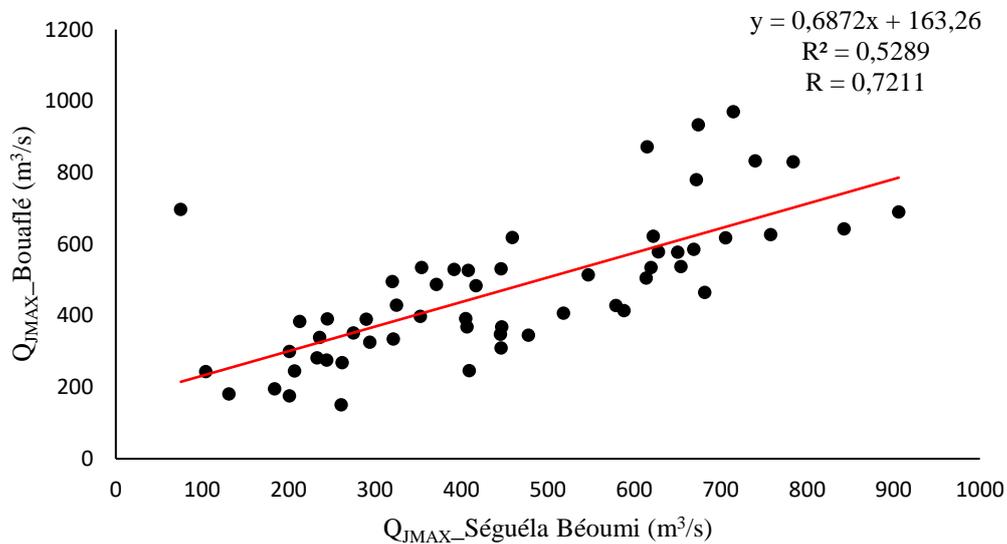


Figure 25 : Nuage de points entre les Q_{JMAX} de la station de Bouaflé et ceux de Séguéla Béoumi

Ces différents graphes montrent que les débits mesurés aux deux stations sont, dans l'ensemble, corrélés. En effet, les débits moyens annuels, les Q_{JMAX} , les Q_{MXA} et les Q_{MNA} présentent une corrélation supérieure à 60%.

Après reconstitution, les données de débits annuels de la station hydrométrique de Bouaflé oscillent entre 3 et 152 m³/s, avec une moyenne de 65 m³/s et un écart-type de 33 m³/s. En ce qui concerne les données de débits journaliers maximaux annuels, ils fluctuent entre 151 et 971 m³/s, avec une moyenne estimée à 472 m³/s et un écart-type de 192 m³/s.

5.1.3. GÉNÉRATION DE PLUIES ET ETP

Les méthodologies de génération de données sont parfois intégrées dans des modèles stochastiques existants (Safouané *et al.*, 2016). Ces modèles sont capables de simuler jusqu'à plusieurs années. Dans le cas de cette étude, une attention particulière a été portée à la simulation des hauteurs de pluie et des ETP. Ainsi, pour le traitement des données, il a été utilisé le modèle statistique INSTAT+v3.37. Il s'agit d'un logiciel d'analyse de données climatiques (Stern *et al.*, 2006), qui possède en son sein un modèle stochastique de génération de données climatiques futures basé sur les chaînes de Markov. Dans cette étude, il est adopté une chaîne de Markov d'ordre 1. Le principal but recherché à travers l'utilisation de ce modèle stochastique est de générer des données pluviométriques et d'ETP futures.

Ainsi, la figure 26 présente la corrélation entre les données de précipitations générées par le modèle de Markov et les précipitations observées. La valeur du coefficient de corrélation obtenue est de 0,9. Ce résultat témoigne d'une très bonne performance du modèle de Markov à simuler les données pluviométriques. Par ailleurs, il existe une bonne correspondance entre le régime pluviométrique simulé et celui de la période de référence. En effet, le mois de septembre demeure le mois où se produit le pic de crue.

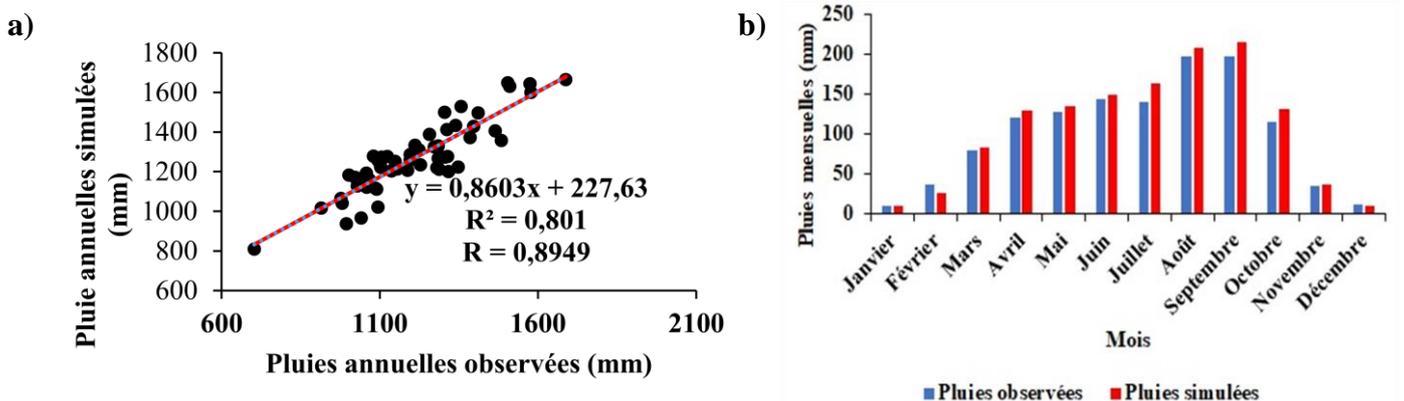


Figure 26 : Comparaison entre pluies observées et pluies simulées par les chaînes de Markov : a) pluies annuelles et b) pluies mensuelles

Tout comme les données pluviométriques, les valeurs d'ETP observées et simulées affichent une très bonne corrélation qui est de 0,95 (figure 27). Ce résultat est également traduit par la bonne dynamique des variations mensuelles et interannuelles.

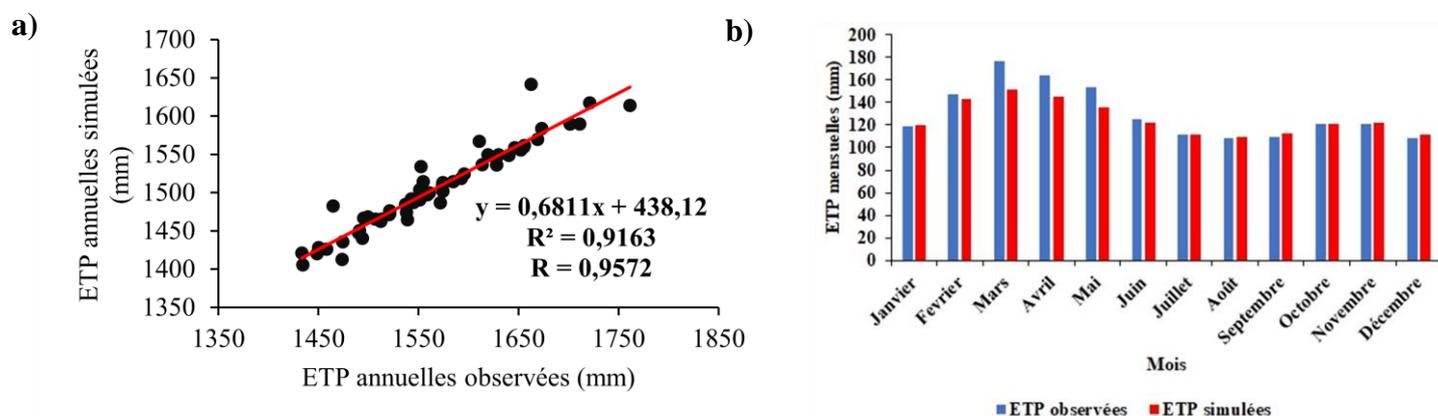


Figure 27 : Comparaison entre ETP observées et ETP simulées par les chaînes de Markov : a) ETP annuelles et b) ETP mensuelles

5.2. ANALYSE DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES

5.2.1. RÉGIME CLIMATIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA MARAHOUÉ

Le diagramme ombrothermique (indice de Gaussen) du bassin versant de la Marahoué (Figure 28) a permis de mettre en évidence un climat de type unimodal à deux saisons. Le pic est porté sur le mois de septembre qui est suivi du mois d'août. Le trimestre le plus pluvieux est le JAS (Juillet-Août-Septembre). Ainsi, la saison des pluies débute en avril qui est un mois humide à tendance sèche et s'achève en octobre. Elle dure en moyenne 7 à 8 mois. Quant à la saison sèche, elle couvre généralement 4 à 5 mois à savoir les mois de janvier, février, mars, novembre et décembre. Le trimestre le plus sec est décembre-Janvier-Février.

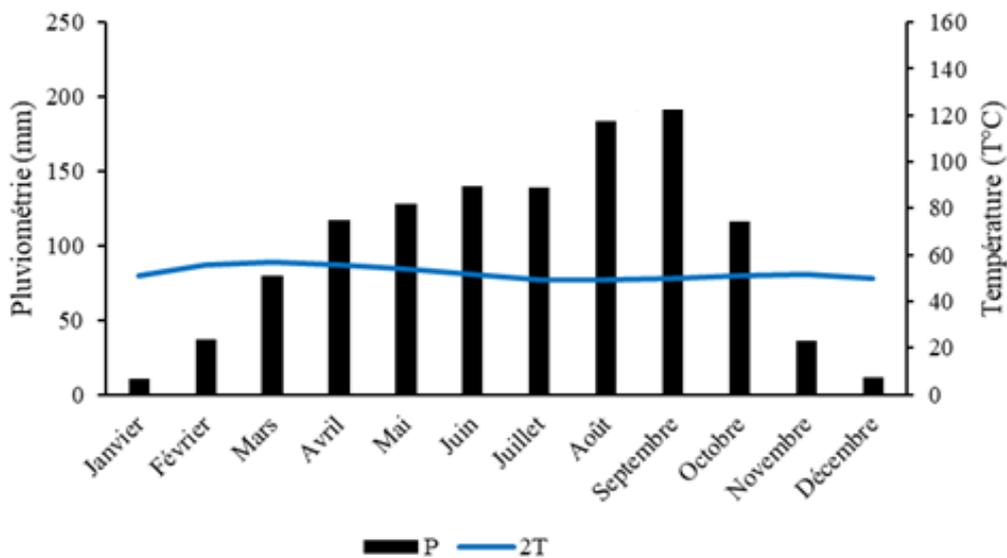


Figure 28 : Courbe ombrothermique du bassin versant de la Marahoué (1961-2017)

La représentation graphique des indices de De Martonne montre que les indices mensuels sont supérieurs à l'indice annuel pour les mois allant d'avril à octobre (7 mois) définissant ainsi la saison pluvieuse dans le bassin versant de la Marahoué (Figure 29). Les indices mensuels de De Martonne sont inférieurs à l'indice annuel pour les mois de janvier, février, mars, novembre et décembre. Ces mois définissent ainsi la saison sèche. L'indice annuel de De Martonne est de 33, ce qui permet de classer le climat du bassin versant de la Marahoué dans le climat de type tropical humide.

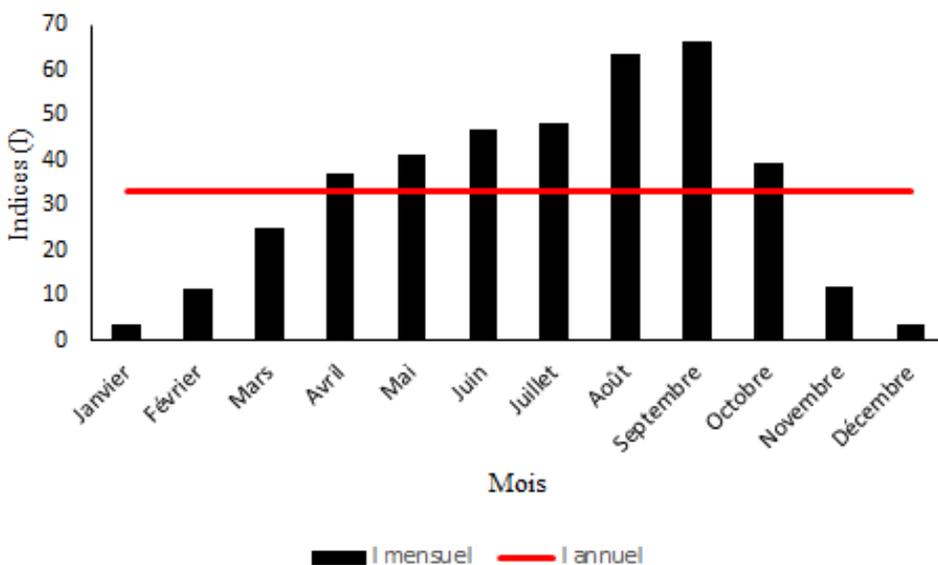


Figure 29 : Indices de De Martonne du bassin versant de la Marahoué (1961-2017)

5.2.2. VARIATIONS ET TENDANCES DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES

La pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin versant de la Marahoué est comprise entre 703,3 (1983) et 1577,3 (1963) mm avec une moyenne de 1192 mm et un écart-type de 176,6 mm (Figure 30). Une tendance à la baisse des précipitations a été mise en évidence (Figure 31). Cependant, on peut définir trois périodes. D'abord, une période humide entre 1961 et 1975 ; ensuite, une période normale de 1976 à 1998, marquée par des épisodes sèches (1981-1986 ; 1990-1993) ; enfin, une période sèche qui va de 1999 à 2017.

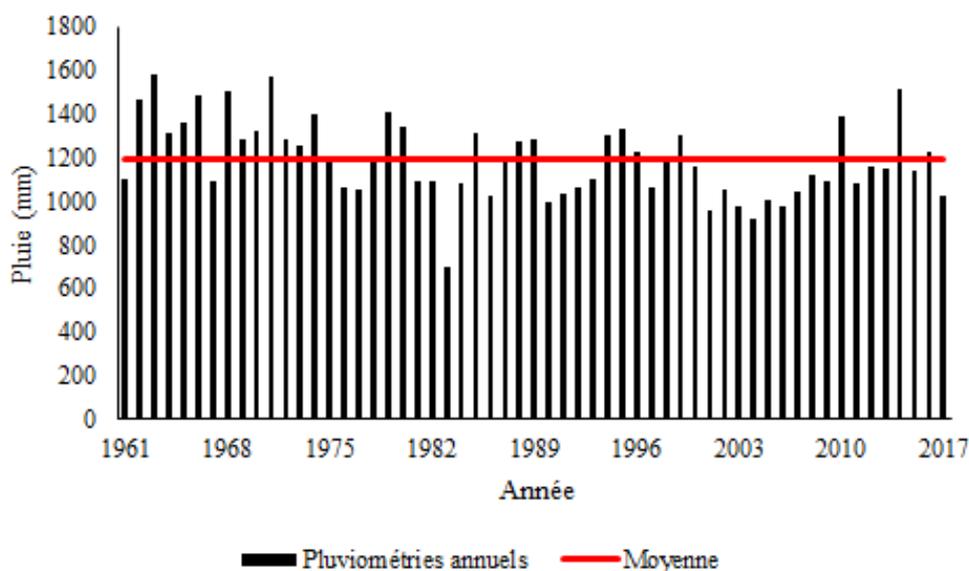


Figure 30 : Variation de la pluviométrie moyenne annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017)

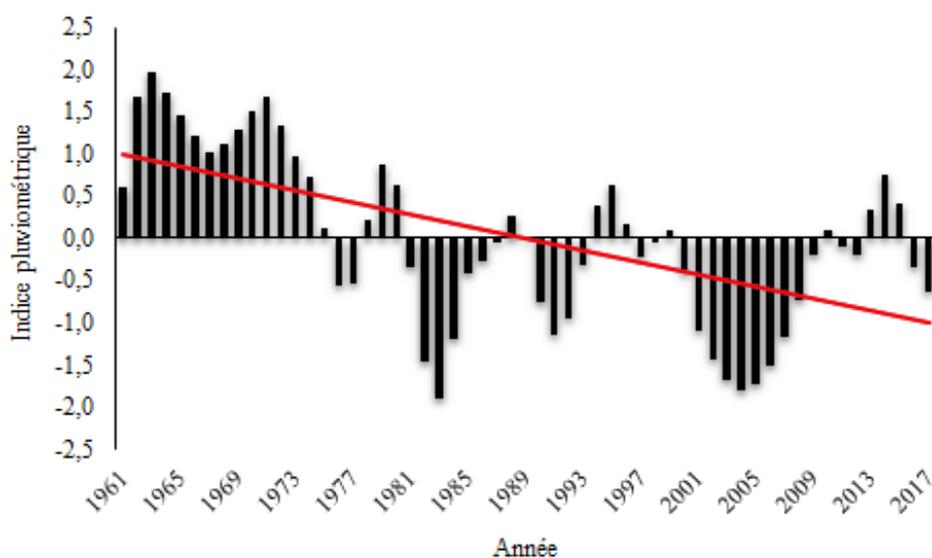


Figure 31 : Indices pluviométriques annuels du bassin versant de la Marahoué (1961-2017)

La température moyenne annuelle sur le bassin versant de la Marahoué est comprise entre 25,3 et 27,0°C avec une moyenne de 26,1°C et un écart-type de 0,39°C (Figure 32). Il est observé une

croissance graduelle de la température sur toute la période 1961-2017, ce qui indique une nette tendance au réchauffement (Figure 33). Il est constaté deux phases dans l'évolution de la température. Une première phase allant de 1961 à 1996 au cours de laquelle les indices thermiques annuels sont négatifs et une seconde phase (1997-2017) marquée par des indices thermiques positifs. Le coefficient de corrélation (R) traduisant l'évolution de la température au cours du temps (années) est de 0,8 (Figure 34). Ce qui exprime une forte corrélation entre la température et le pas de temps annuel.

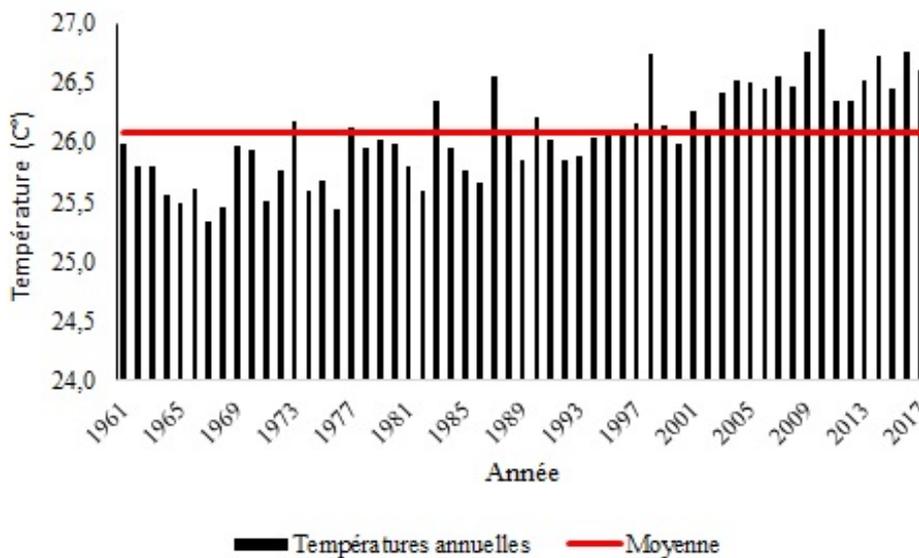


Figure 32 : Variation de la température annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017)

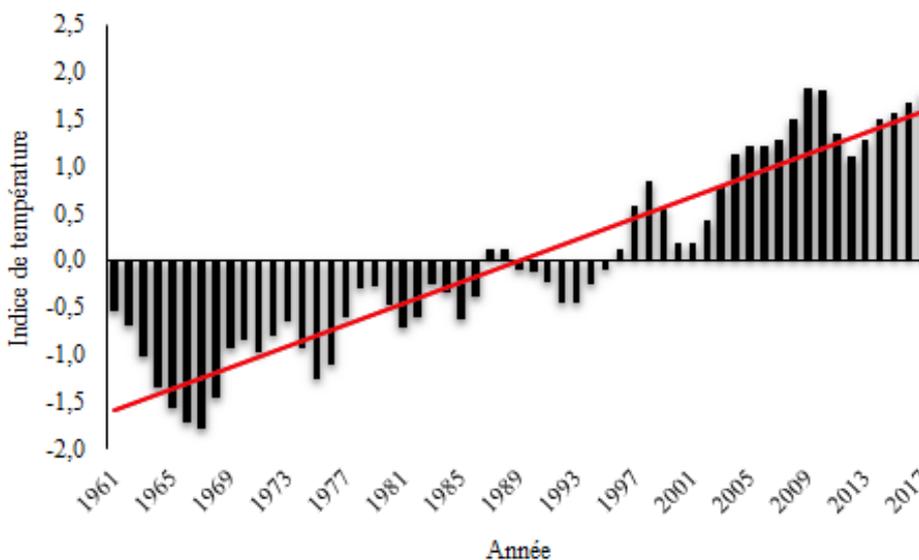


Figure 33 : Indices thermiques annuels du bassin versant de la Marahoué (1961-2017)

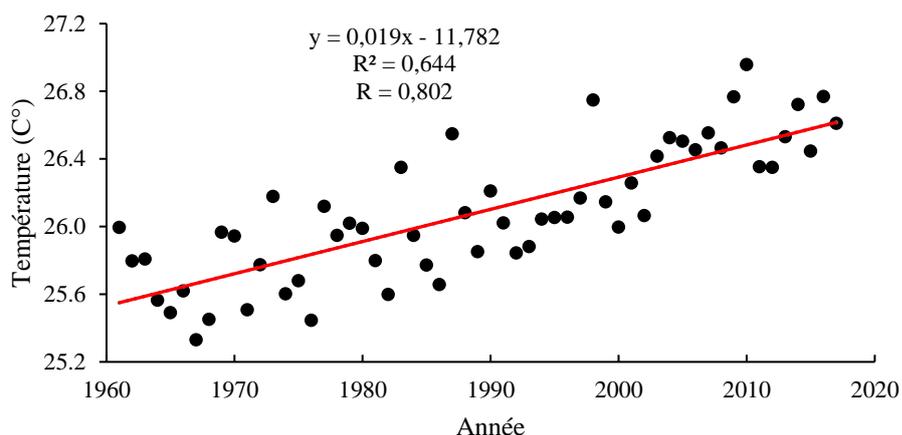


Figure 34 : Tendence de la température annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017)

L'ETP moyenne annuelle sur le bassin versant de la Marahoué est comprise entre 1434,42 mm et 1761,40 mm avec une moyenne de 1567,77 mm et un écart-type de 76,70 mm (Figure 35). Il est également constaté une croissance graduelle du pouvoir évaporant sur la période 1961-2017 (Figure 36) manifesté par deux phases. La première phase va de 1961 à 1996 au cours de laquelle les indices d'ETP annuels sont négatifs et une seconde phase allant de 1997 à 2017 où les indices d'évapotranspiration sont positifs. Une forte corrélation entre l'ETP et le temps (années) traduite par un coefficient de 0,8 a été observée (Figure 37). Le pouvoir d'évapotranspiration est de plus en plus élevé.

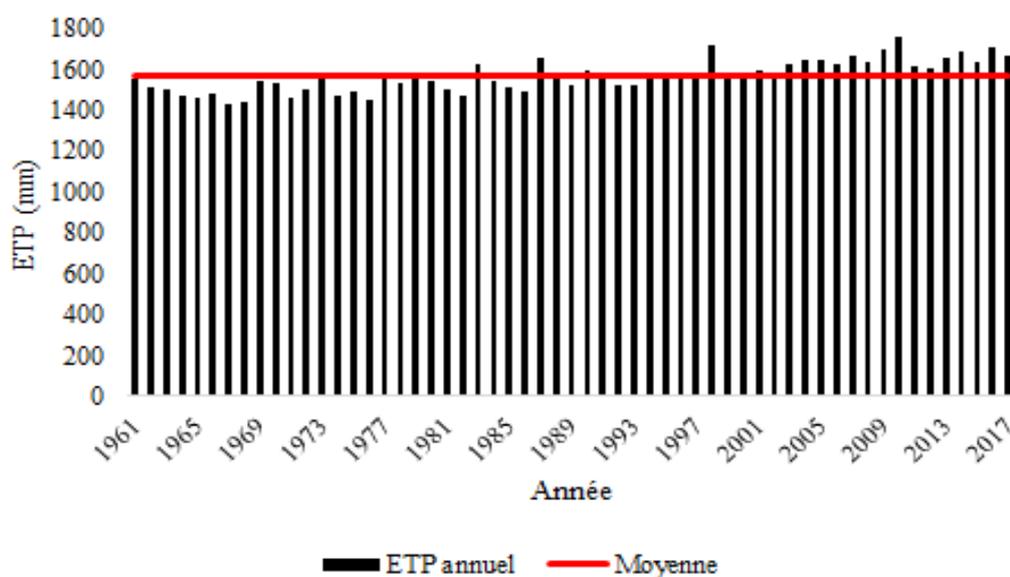


Figure 35 : Variation de l'ETP annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017)

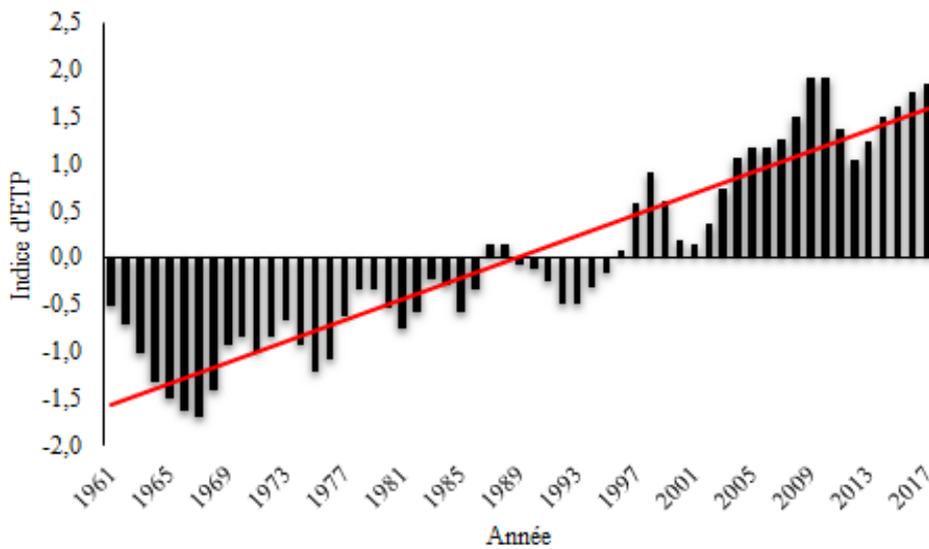


Figure 36 : Indices d’ETP annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017)

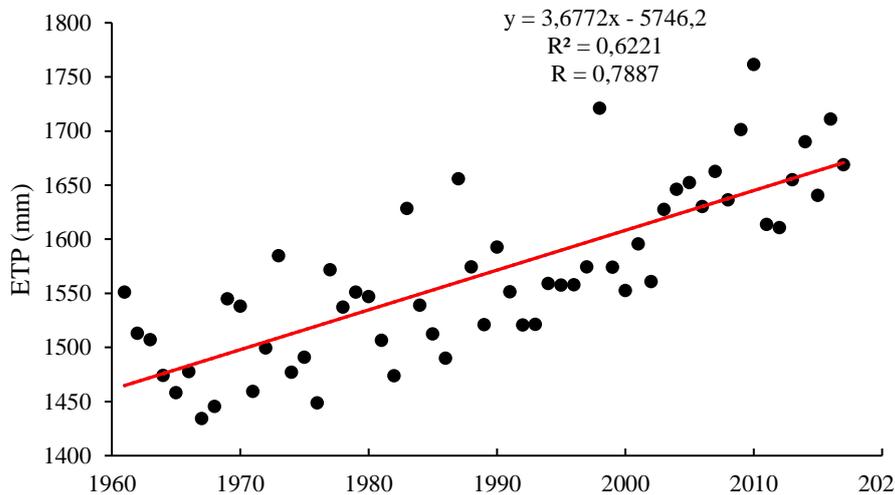


Figure 37 : Tendence de l’ETP annuelle sur le bassin versant de la Marahoué (1961-2017)

5.3. ANALYSE DU DÉBIT D’ÉCOULEMENT DE LA MARAHOUÉ

5.3.1. ANALYSE DU RÉGIME HYDROLOGIQUE DE LA MARAHOUÉ

La figure 38 met en exergue la caractérisation du régime hydrologique de la Marahoué à Bouaflé. Il est mis en évidence une période des hautes eaux allant du mois d’août au mois de novembre (ASON) et une période de basses eaux qui va de janvier à avril (JFMA). La période de moyennes eaux se situe entre mai et juillet et prend en compte le mois de décembre.

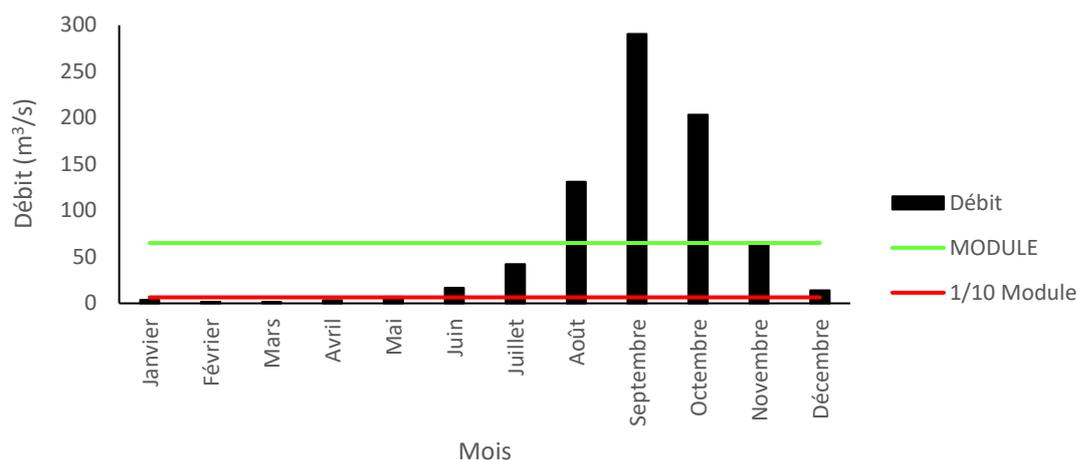


Figure 38 : Régime hydrologique de la Marahoué à Bouaflé (1961-2017)

Le coefficient de débit exprimant la relation du débit mensuel par rapport à son module a été représenté à la figure 39. De décembre à juillet, le coefficient de débit reste inférieur à 1. Il est cependant supérieur à 1 au niveau des mois d’août à novembre. Le mois de novembre enregistre un débit très proche du module. Le mois d’août a un débit double de celui du module. Quant au mois d’octobre, il est observé un débit trois fois supérieur au module. En ce qui concerne le mois de septembre, il tient la pointe des hautes eaux avec un débit quatre fois supérieur au module.

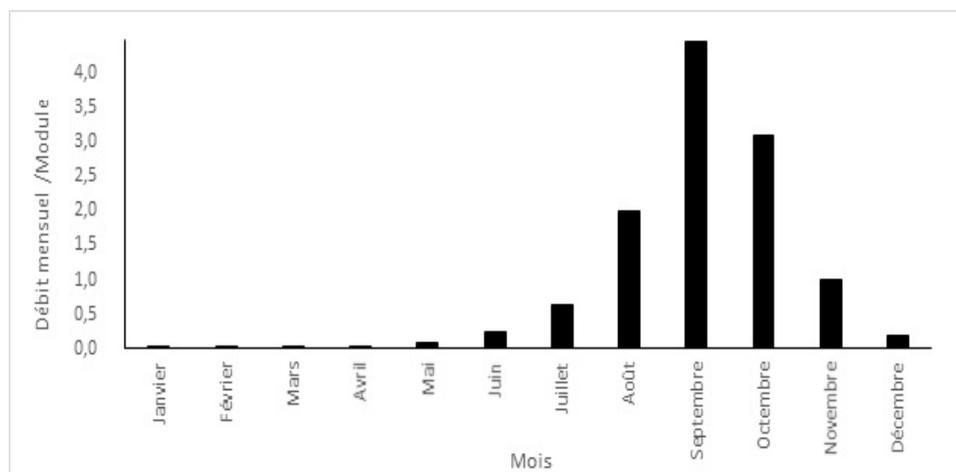


Figure 39 : Coefficients de débit du bassin versant de la Marahoué (1961-2017)

5.3.2. ANALYSE DES FRÉQUENCES DE DISTRIBUTION DES DÉBITS

Les figures 40 et 41 mettent en exergue les fréquences de débits moyens annuels. Ainsi les modules les plus fréquents se trouvent dans les intervalles suivants :] 32-62] et]62-92] m³/s. La classe modale est définie par l’intervalle]32-62] m³/s. Les plus basses fréquences correspondent aux intervalles

suivants :]92-122] et]122-152] m³/s. Enfin, la fréquence moyenne est]2-32] m³/s. Quant à la classe médiane, elle est confondue à la classe modale (] 32-62]) m³/s.

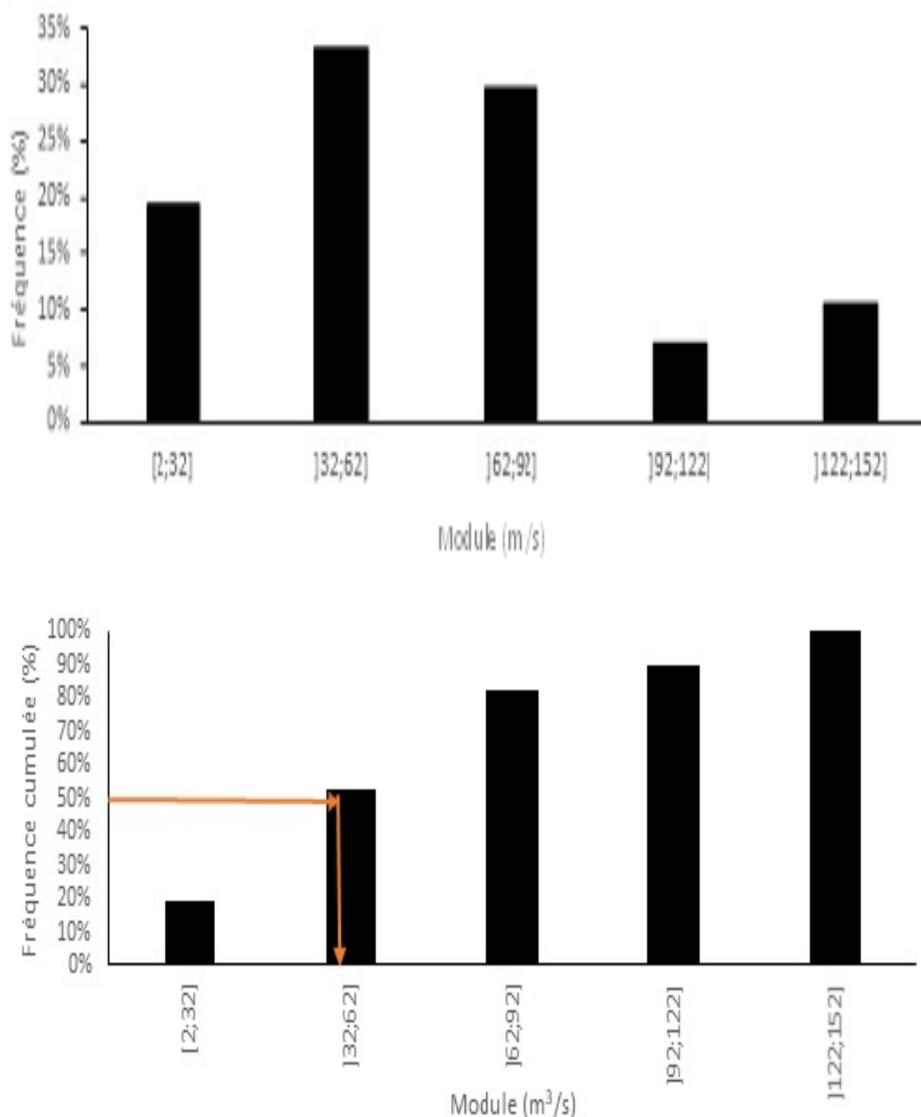


Figure 40 : Fréquences de débits moyens annuels de la Marahoué (1961-2017)

La variation des fréquences de débits moyens mensuels révèle que la classe modale de la série correspond à l'intervalle [0-80] m³/s et représente près de 80% des données de débits mensuels. Les autres classes enregistrent des fréquences inférieures à 10%. La classe médiane coïncide avec la classe modale.

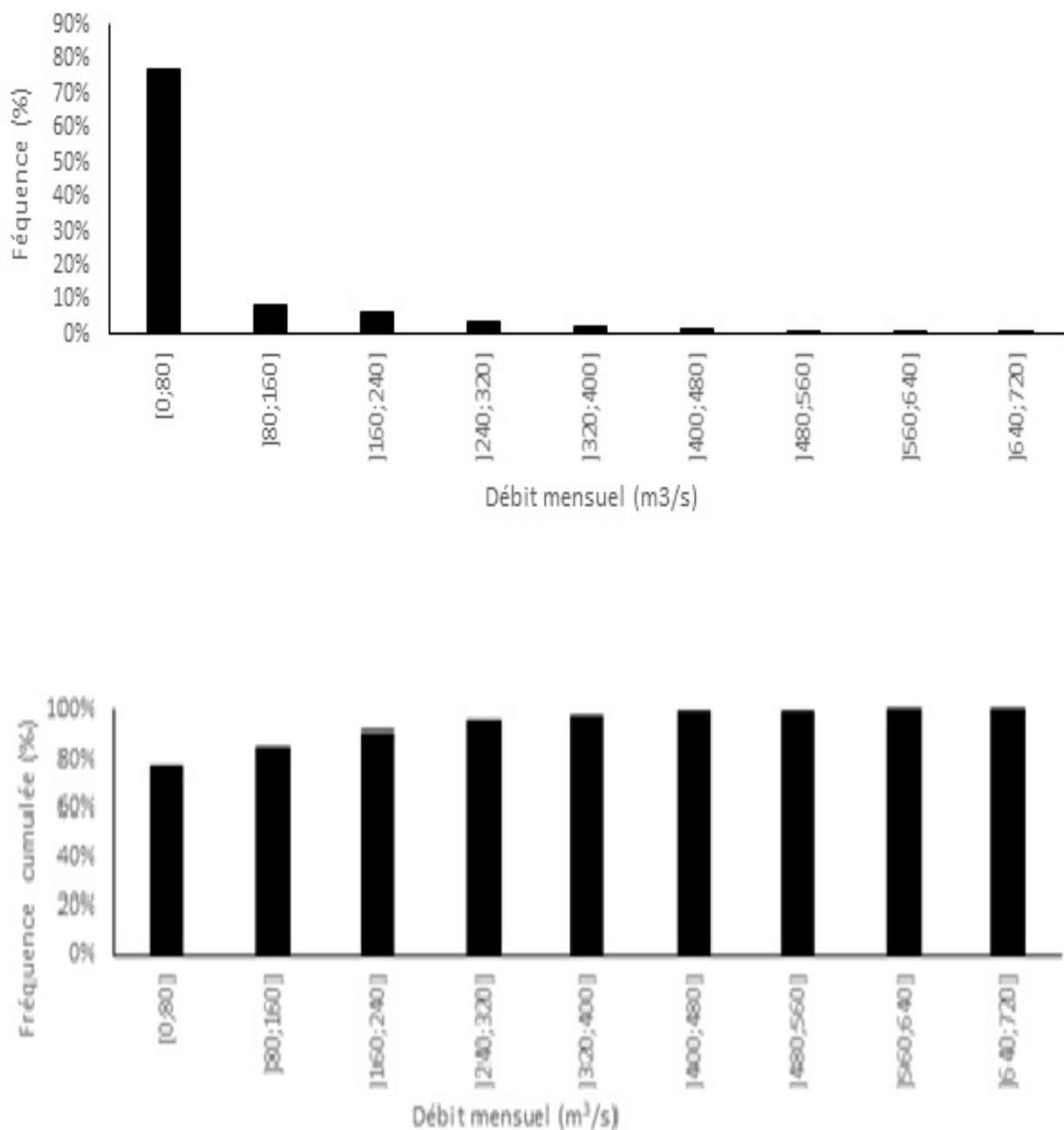


Figure 41 : Fréquences de débits mensuels de la Marahoué (1961-2017)

5.3.3. VARIATION ET TENDANCES INTERANNUELLES DU DÉBIT

La figure 42 présente la variation du module (débit moyen annuel) de la Marahoué de 1961 à 2017. En effet, le module de la Marahoué varie entre 2,9 (1983) et 151,6 m³/s (1963) avec une moyenne de 65,13 m³/s et un écart-type de 33,42 m³/s.

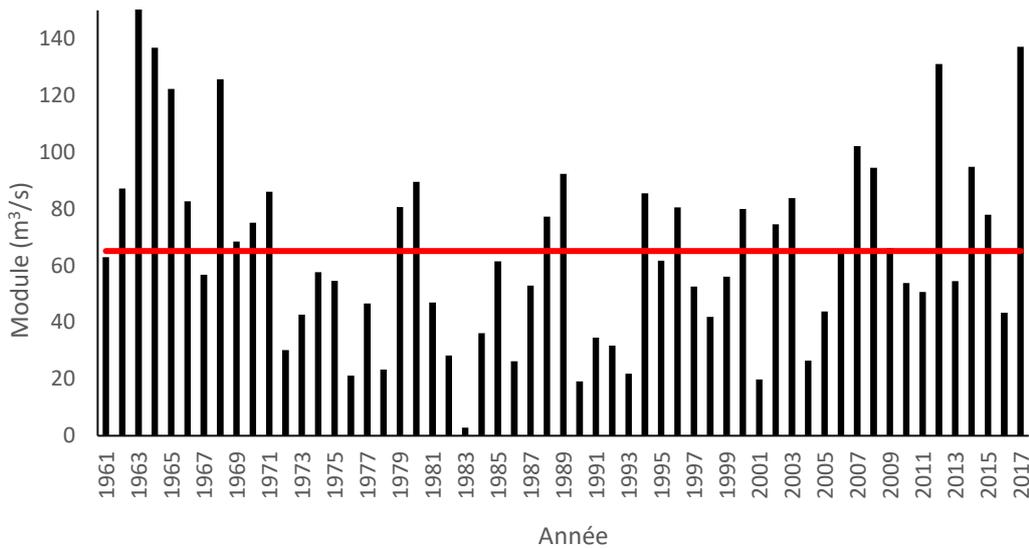


Figure 42 : Variation du module de la Marahoué (1961-2017)

Les indices de débit calculés sont illustrés par la figure 43. Le graphe met en évidence une tendance générale à la baisse des débits d'écoulement de la Marahoué. Il est observé également trois périodes. Une période humide de 1961 à 1970, suivie d'une période sèche de 1971 à 2005 et enfin le retour de la période humide de 2006 à 2017. Toutefois, la nouvelle période humide présente dans son ensemble des valeurs inférieures à celle de la période 1961-1970. Aussi, les variations les plus importantes des débits mensuels du bassin versant de la Marahoué se situent surtout entre les mois d'août et octobre (Figure 44).

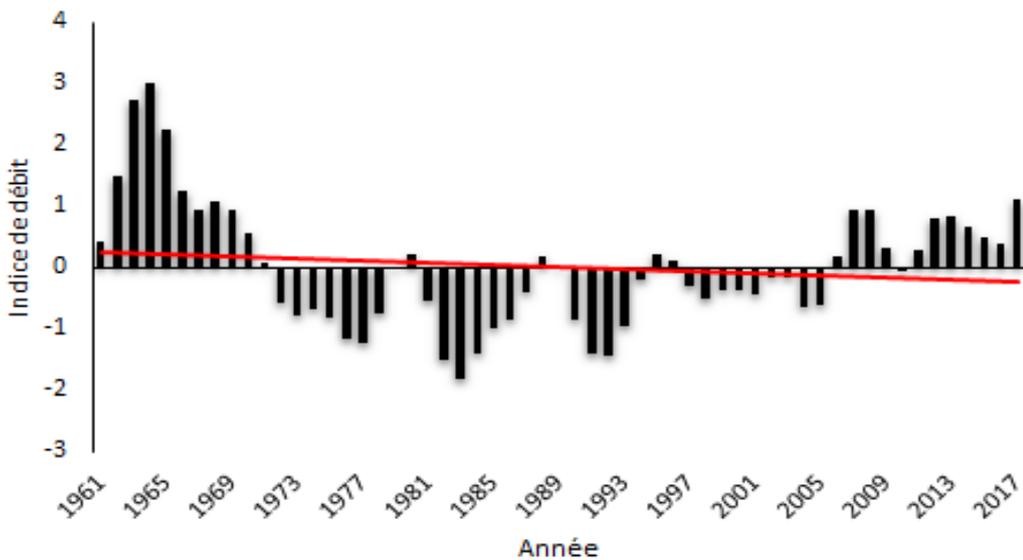


Figure 43 : Variation des indices de débits sur la Marahoué (1961-2017)

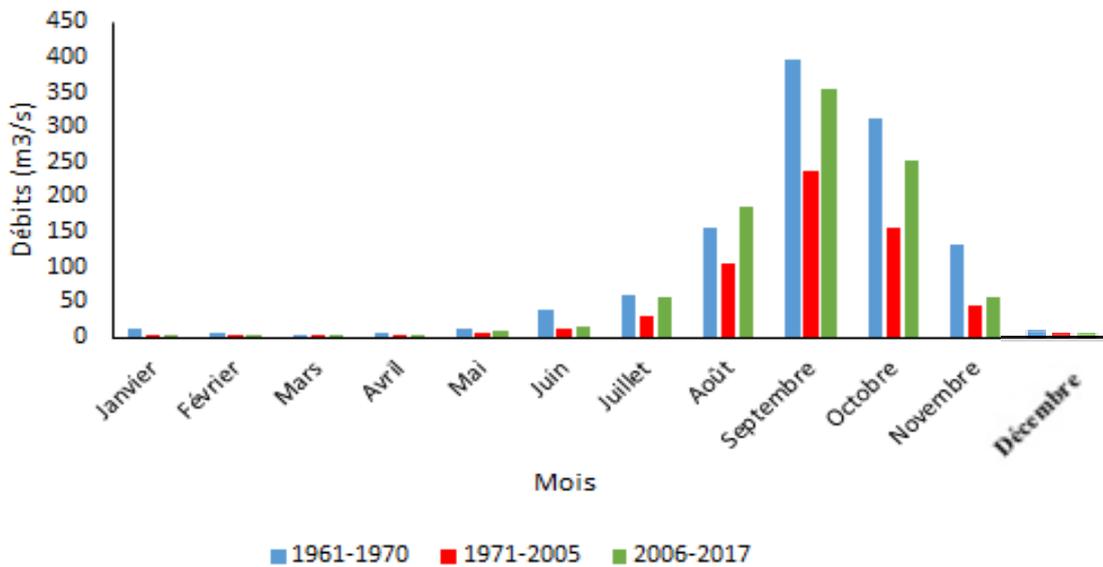


Figure 44 : Variations mensuelles des débits sur les différentes périodes homogènes

La figure 45 montre la variation du débit spécifique de la Marahoué de 1961 à 2017. Il est observé des valeurs de débit spécifique qui fluctuent entre $0,15 \text{ l.s}^{-1}/\text{km}^2$ (1983) et $7,65 \text{ l.s}^{-1}/\text{km}^2$ (1963) avec une moyenne de $3,29 \text{ l.s}^{-1}/\text{km}^2$ et un écart-type de $1,69 \text{ l.s}^{-1}/\text{km}^2$.

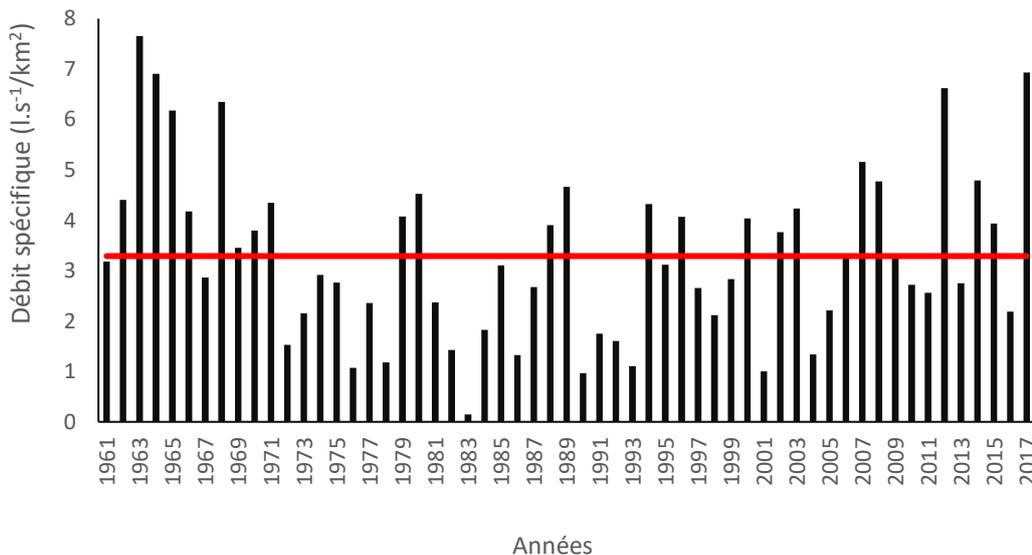


Figure 45 : Variation du débit spécifique de la Marahoué (1961-2017)

La lame d'eau ruisselée, représentant le volume d'eau écoulé par rapport à la surface du bassin versant, a été représentée par la figure 46 de 1961 à 2017 du bassin de la Marahoué. Cette figure met en évidence un maximum de 241,42 mm (1963), un minimum de 4,61 mm (1983) et une moyenne de 103,73 mm.

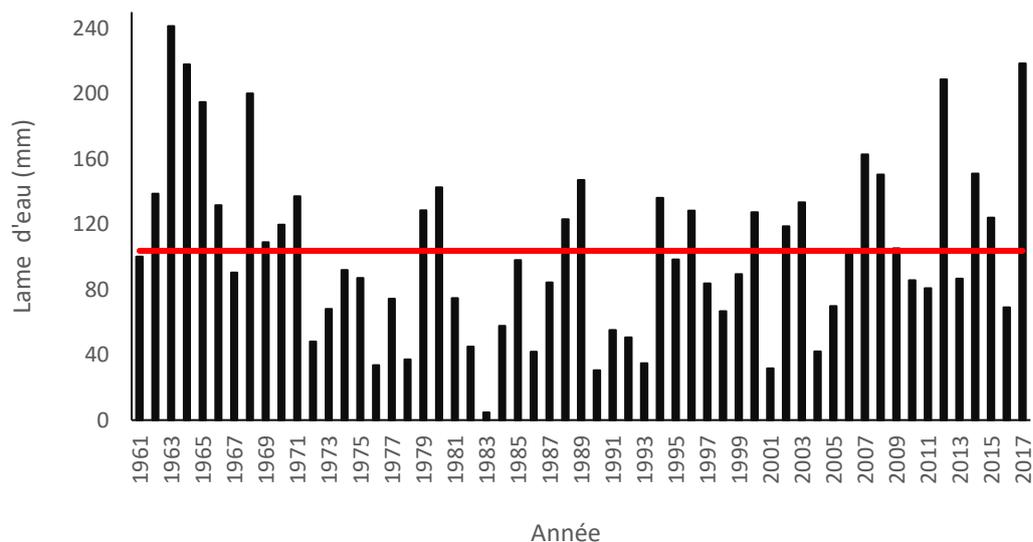


Figure 46 : Variation de la lame d'eau de la Marahoué (1961-2017)

5.3.4. ANALYSE DES DÉBITS EXTRÊMES DE LA MARAHOUÉ

5.3.4.1. Analyse des débits moyens maximaux annuels (Q_{MXA})

Les débits moyens mensuels maximaux annuels (Q_{MXA}) sont compris entre 12,2 et 716,7 m^3/s avec une moyenne de 307,6 m^3/s et un écart-type de 162,3 m^3/s (figure 47). Le coefficient d'asymétrie calculé est de 0,015.

Ces résultats montrent que les Q_{MXA} étudiés sont étalés à droite de la moyenne. Par ailleurs, 57% des Q_{MXA} sont au-dessus de la moyenne.

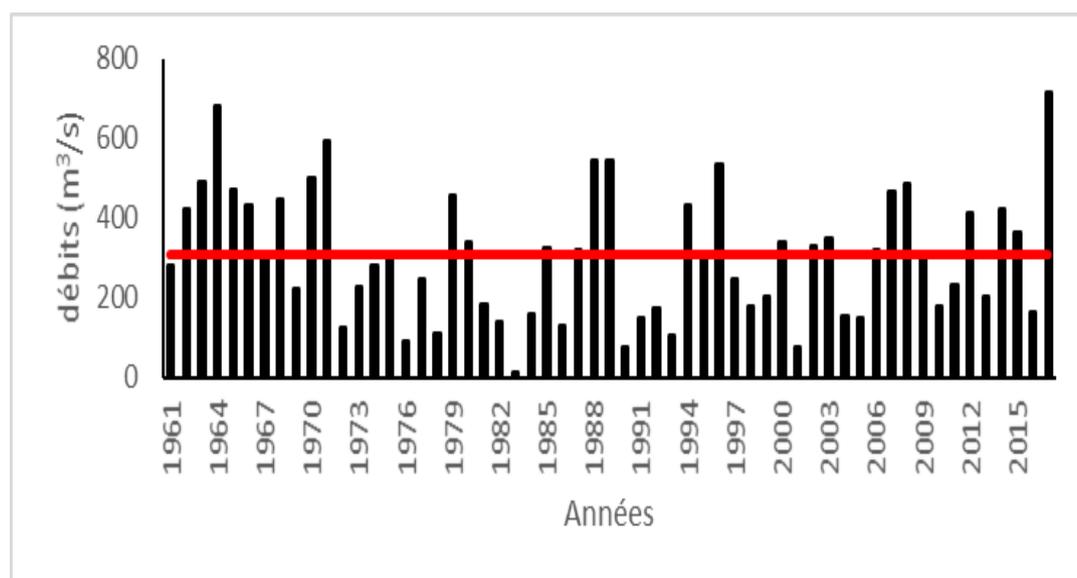


Figure 47 : Variation interannuelle des Q_{MXA} de la Marahoué (1961-2017)

Les Q_{MXA} interviennent majoritairement au mois de septembre (70%), suivi du mois d'octobre qui enregistre près de 19% (Figure 48). Enfin, il est observé les Q_{MXA} parfois aux mois de novembre et d'août pour des taux de 4% chacun. Les plus hautes eaux sont donc observées au mois de septembre qui constitue donc un mois dangereux du point de vue hydrologique à cause des inondations.

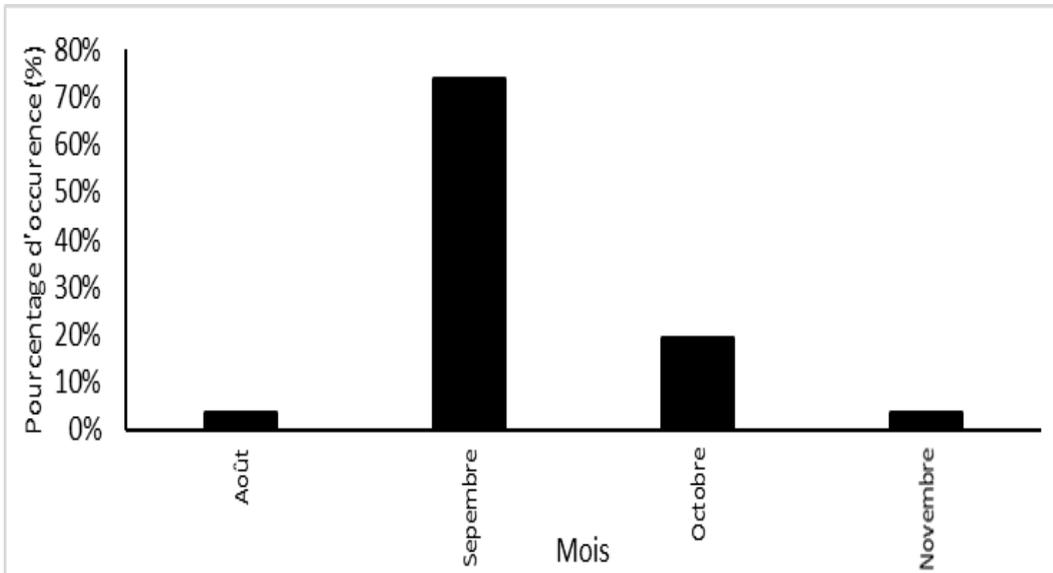


Figure 48 : Fréquence d'occurrence mensuelle des Q_{MXA} de la Marahoué (1961-2017)

La classe de Q_{MXA} la plus remarquable est celle des débits allant de 160 à 310 m^3/s avec un taux de 30% (Figure 49). Cette classe constitue la classe modale. A côté de cette classe prédominante, on a la classe des Q_{MXA} de la fourchette [310 ; 460 [m^3/s avec un taux de 28%. Ces deux classes sont suivies de la classe des Q_{MXA} les plus faibles avec un taux de 23%. Les Q_{MXA} les plus élevés appartiennent à l'intervalle [460 ; 760 [m^3/s avec un taux de 20%.

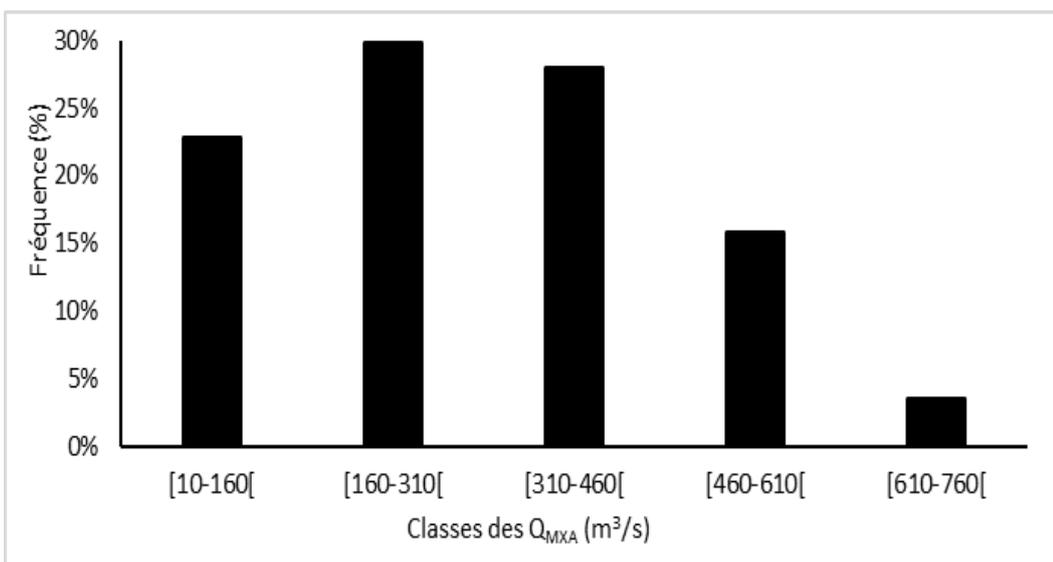


Figure 49 : Fréquences des Q_{MXA} de la Marahoué (1961-2017)

La classe médiane des Q_{MXA} est la classe $[160-310 \text{ m}^3/\text{s}]$ (Figure 50). La classe médiane est donc confondue à la classe modale.

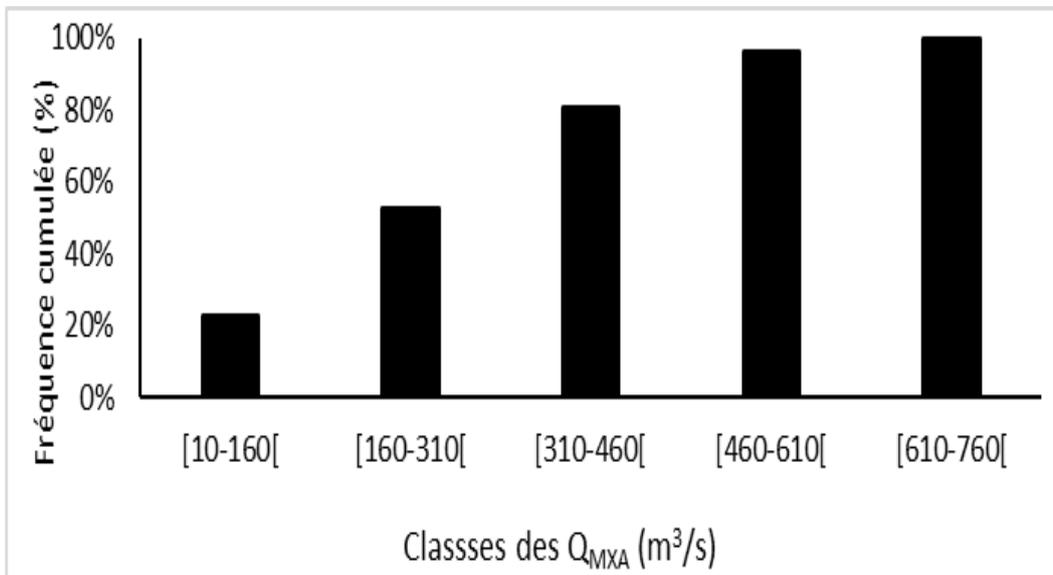


Figure 50 : Fréquences cumulées des Q_{MXA} de la Marahoué (1961-2017)

5.3.4.2. Analyse des débits journaliers maximaux annuels (Q_{JMAX})

Les débits journaliers maximaux annuels (Q_{JMAX}) sont compris entre 151 et 971 m^3/s avec une moyenne de 472,4 m^3/s et un écart-type de 192 m^3/s (figure 51). Aussi, 47% des Q_{JMAX} sont au-dessus de la moyenne.

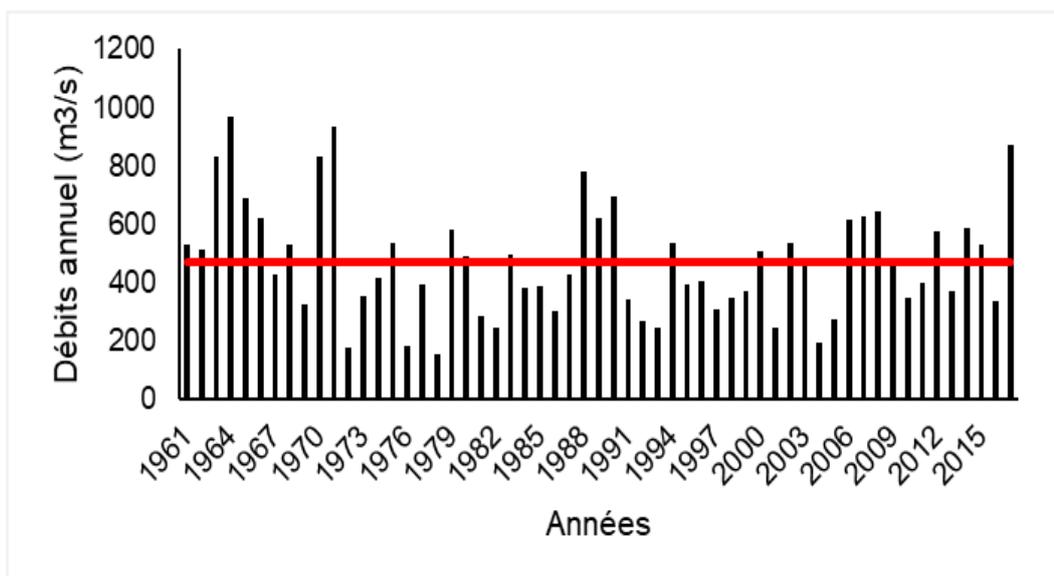


Figure 51 : Variation interannuelle des Q_{JMAX} de la Marahoué (1961-2017)

La classe de Q_{JMAX} la plus remarquable est celle des débits allant de 292 à 433 m^3/s avec un taux de 33% (Figure 52). Cette classe constitue la classe modale. A côté de cette classe prédominante, on a la classe des Q_{JMAX} de la fourchette [433 ; 573 [m^3/s avec un taux de 21% et les classes les plus faibles ont des taux de 5%.

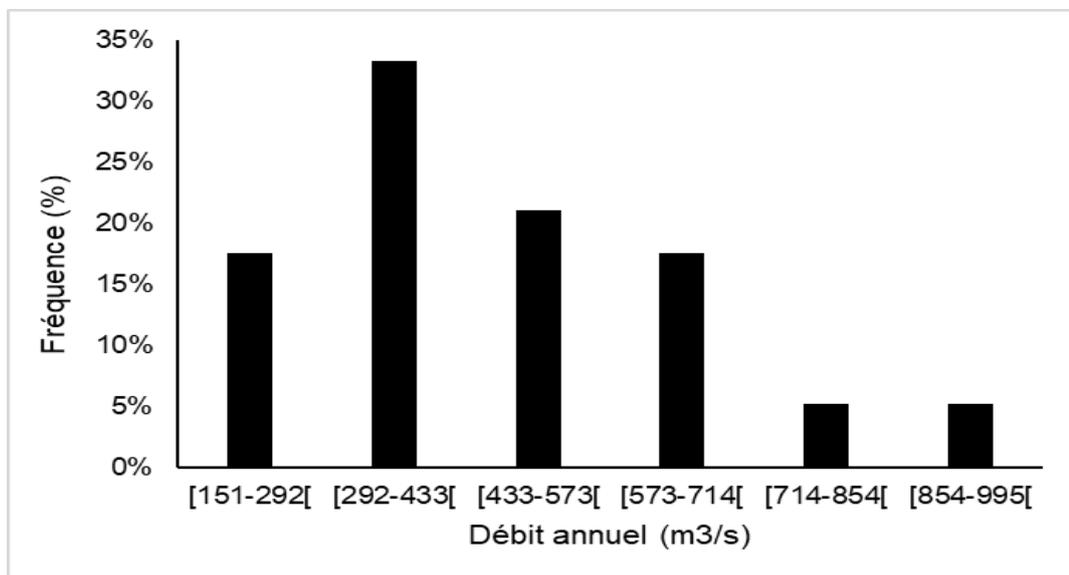


Figure 52 : Fréquences des Q_{JMAX} de la Marahoué (1961-2017)

La classe médiane des Q_{JMAX} est la classe [292-433 m^3/s [(Figure 53). La classe médiane est donc confondue à la classe modale.

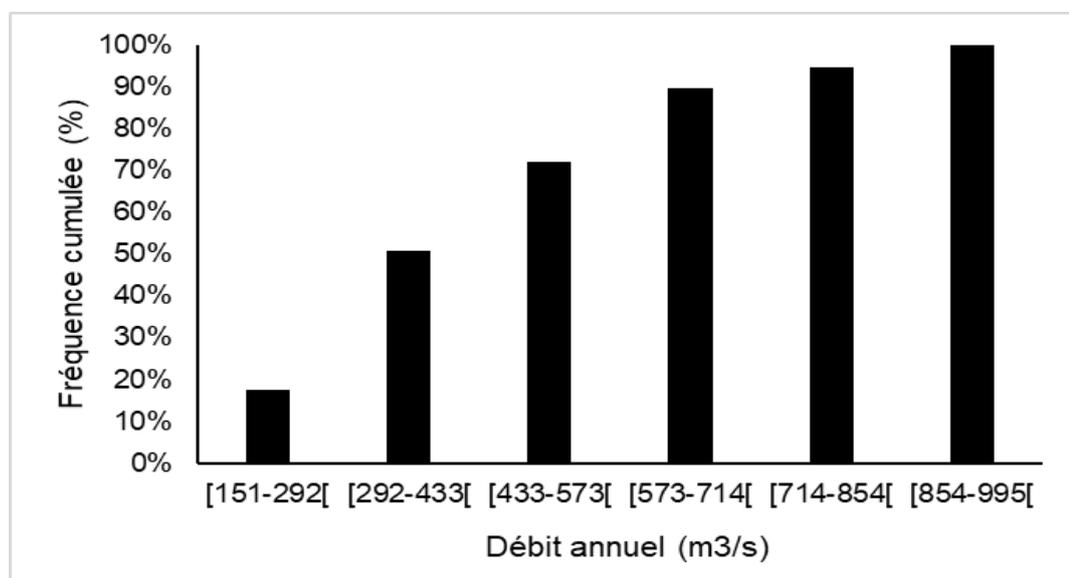


Figure 53 : Fréquences cumulées des Q_{JMAX} de la Marahoué (1961-2017)

5.3.4.3. Analyse des débits moyens minimaux annuels (Q_{MNA})

Les débits moyens mensuels minimaux annuels (Q_{MNA}) sont compris entre 0,01 et 32,6 m^3/s avec une moyenne de 2,6 m^3/s (4) ; 67% des Q_{MNA} sont en-dessous de la moyenne.

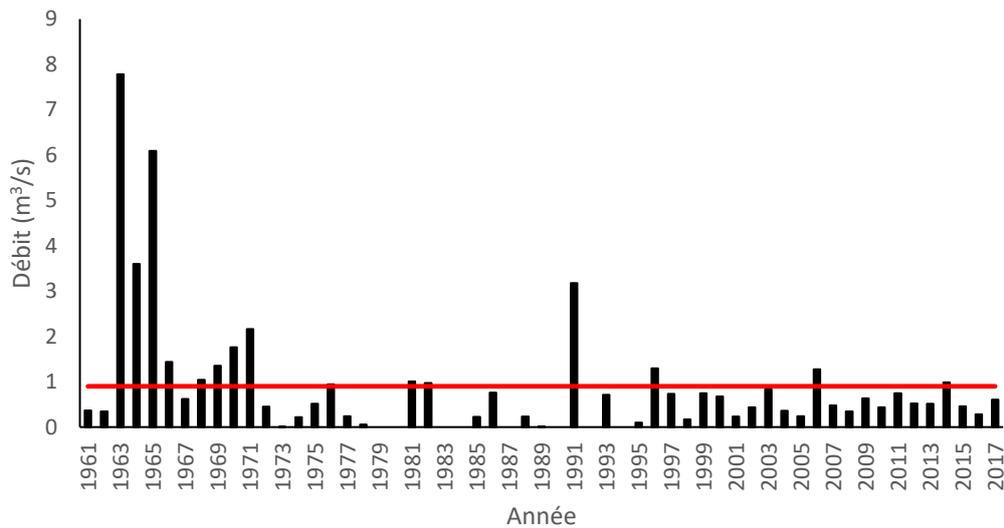


Figure 54 : Variation interannuelle des Q_{MNA} de la Marahoué (1961-2017)

Les Q_{MNA} interviennent majoritairement aux mois de février (36%) et mars (38%) (Figure 55). Ils apparaissent moins fréquemment en janvier (9%) et avril (12%). Les plus basses eaux sont donc observées aux mois de février et mars.

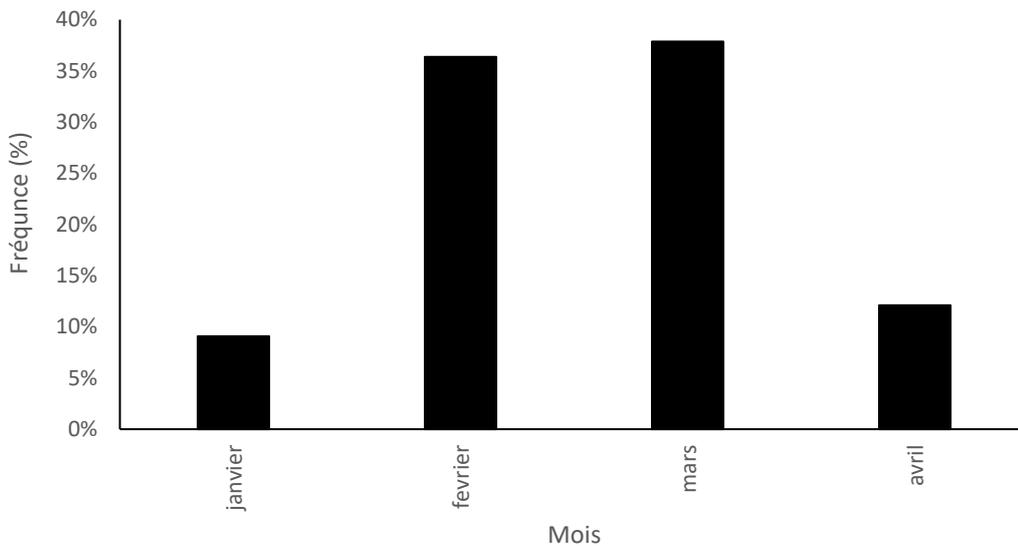


Figure 55 : Fréquence d'occurrence mensuelle des Q_{MNA} de la Marahoué (1961-2017)

Les valeurs de Q_{MNA} les plus fréquentes sont dans l'intervalle $[0-3 \text{ m}^3/\text{s} [$ (Figure 56). Quant aux autres classes de Q_{MNA} ($[3-6 \text{ m}^3/\text{s} [$ et $[6-9 \text{ m}^3/\text{s} [$), leurs fréquences respectives sont inférieures à 5%. La classe modale des Q_{MNA} est la classe $[0-3 \text{ m}^3/\text{s} [$.

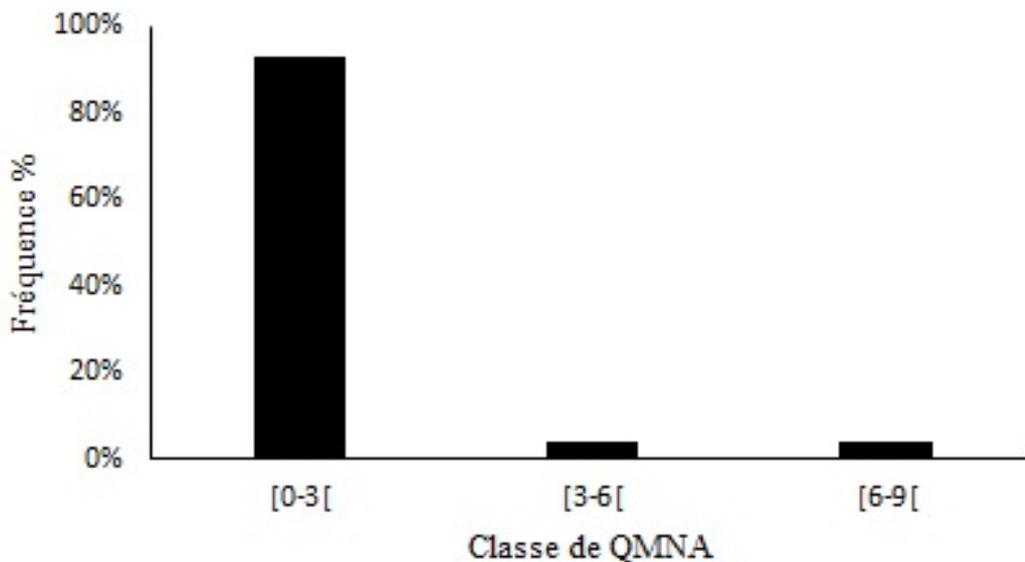


Figure 56 : Fréquences des Q_{MNA} de la Marahoué (1961-2017)

La classe médiane des Q_{MNA} est la classe $[0-3 \text{ m}^3/\text{s}[$ (Figure 57). La classe médiane est donc confondue à la classe modale.

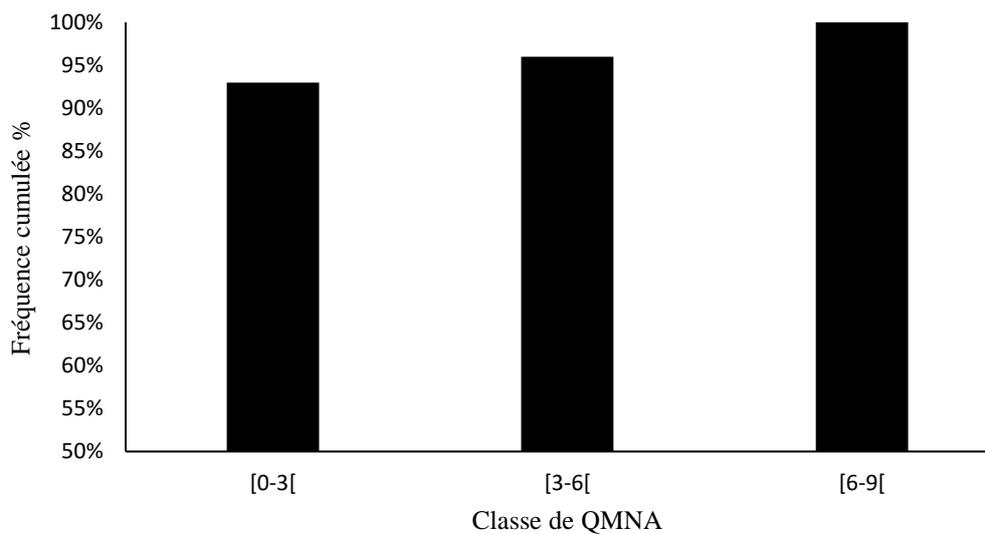


Figure 57 : Fréquences cumulées des Q_{MNA} de la Marahoué (1961-2017)

5.3.5. ANALYSE DES RÉSERVOIRS SOUTERRAINS DU BASSIN VERSANT DE LA MARAHOUÉ

5.3.5.1. Analyse de la fonction capacitive des réservoirs souterrains

Les coefficients de corrélation enregistrés entre les cumuls pluviométriques mensuels des périodes des hautes eaux et les débits moyens des périodes de basses eaux à la station de Bouaflé, ont mis en évidence un taux de 40% de coefficients de corrélation supérieur au seuil de coefficient de corrélation significatif (0,5) (Tableau VIII). Les cumuls pluviométriques ne sont donc pas bien corrélés aux débits

moyens de la période des basses eaux. Mais, le cumul pluviométrique de toute la période des hautes eaux (P-août-novembre) est relativement plus corrélé (0,50-0,52) aux débits moyens de basses eaux que les autres cumuls pluviométriques (0,32-0,47).

Tableau VIII : Corrélations entre cumuls de pluie des périodes des hautes eaux et débits moyens de basses eaux à la station de Bouaflé (1961-2017)

| | P-août | P-août-septembre | P-août-octobre | P-août-Novembre |
|------------------------|---------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| Q-janvier-mars | 0,32 | 0,39 | 0,46 | 0,51 |
| Q-février-avril | 0,34 | 0,40 | 0,44 | 0,50 |
| Q-janvier-avril | 0,33 | 0,41 | 0,47 | 0,52 |
| Q-février-mars | 0,35 | 0,41 | 0,46 | 0,51 |

Les coefficients de corrélation entre les cumuls pluviométriques mensuels de la période des basses eaux et les débits moyens de ladite période à la station de Bouaflé mettent en évidence un taux de 0% de coefficients de corrélation supérieur au seuil de coefficient de corrélation significatif (0,5) (Tableau IX).

Tableau IX : Corrélations entre cumuls de pluie et débits moyens de la période de basses eaux à la station de Bouaflé (1961-2017)

| | P-janvier-mars | P-février-avril | P-janvier-avril | P-février-mars |
|------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|-----------------------|
| Q-janvier-mars | 0,28 | 0,09 | 0,23 | 0,11 |
| Q-février-avril | 0,43 | 0,32 | 0,40 | 0,29 |
| Q-janvier-avril | 0,34 | 0,20 | 0,33 | 0,19 |
| Q-février-mars | 0,41 | 0,21 | 0,36 | 0,24 |

5.3.5.2. Analyse de la réserve souterraine du bassin versant de la Marahoué

Le coefficient de tarissement moyen proportionnel à la vitesse de vidange de l'aquifère dans le bassin versant de la Marahoué déterminé sur la période 1961-2017 est de $3,4 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$ (Figure 58). La durée moyenne de tarissement en absence de précipitations évaluée est de 29,4 jours, soit près d'un mois. Le volume d'eau mobilisé par les aquifères évalué sur la période 1961-2017 est de $0,92 \text{ Km}^3$.

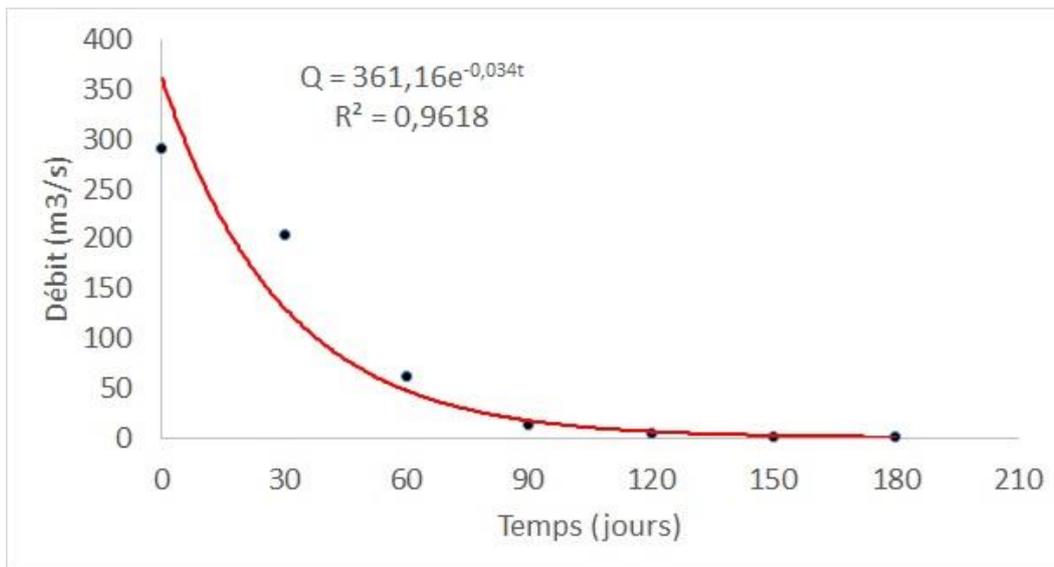


Figure 58 : Courbe de tarissement de la Marahoué (1961-2017)

5.4. DISCUSSION

Une analyse comparative des résultats issus de l'indice de Gaussen montre que pour la première condition de Gaussen selon laquelle le seuil de comparaison est 2T, il est mis en évidence huit mois pluvieux (mars-octobre) contre quatre mois secs (novembre, décembre, janvier, février). En revanche, en considérant la deuxième condition de Gaussen selon laquelle le seuil de comparaison est 3T, il est mis en évidence sept mois pluvieux (avril-octobre) et cinq mois secs (novembre, décembre, janvier, février, mars). La combinaison des indices mensuels et annuel de De Martonne, sur la base des hypothèses émises, a permis d'identifier sept mois pluvieux (avril-octobre) et cinq mois secs (novembre, décembre, janvier, février, mars). Ces résultats sont conformes aux résultats obtenus à partir de l'indice de Gaussen à la condition de 3T. Les hypothèses émises sont donc acceptables et fortes pour mettre en évidence les régimes climatiques saisonniers dans une région donnée. En effet, selon Piedallu *et al.* (2007), des seuils de l'indice mensuel de De Martonne n'ont pas été clairement définis, ce qui a amené certains auteurs à proposer des seuils plus ou moins arbitraires selon les régimes climatiques.

Une analyse des séries de paramètres climatiques moyens du bassin versant de la Marahoué (précipitation, température et évapotranspiration potentielle) au pas de temps annuel sur la période 1961-2017 a été effectuée. Il ressort que la variabilité climatique se manifeste au niveau du bassin versant de la Marahoué par la baisse des hauteurs de précipitation et la hausse de la température et de l'évapotranspiration potentielle. Il est cependant constaté une tendance à la reprise des précipitations traduite par des indices pluviométriques positifs au cours de la décennie 2010. Les résultats obtenus confirment le fait que la décennie 1990 a été déclarée la décennie la plus chaude du 20^{ème} siècle. Depuis cette décennie, la croissance de la température a pris une allure plus accentuée. L'ETP très

dépendant de la température, suit la même tendance. On peut donc dire que le bassin versant de la Marahoué connaît un problème de réchauffement climatique. Les corrélations perceptibles, mises en évidence entre d'une part la température et le temps, et d'autre part entre l'ETP et le temps, suggèrent une croissance future de ces deux paramètres climatiques. Les résultats obtenus confirment ceux obtenus par plusieurs auteurs (Soro *et al.*, 2013a ; Fossou *et al.*, 2014 ; Soro *et al.*, 2017 ; Kouassi *et al.*, 2017b). Les travaux de Kouassi *et al.* (2017b) réalisés sur l'ensemble du bassin versant du Bandama, sur la période 1951-2015, ont montré que le bassin versant du Bandama connaît une variabilité pluviométrique marquée par une longue période sèche amorcée à partir des années 1970 et une reprise de la tendance pluviométrique humide caractérisée par la rupture des années 1999-2000. Les déficits pluviométriques de la rupture de 1970 varient entre 15% et 30% pour toutes les stations. La rupture de 1999-2000, présente des variations pluviométriques qui ne sont pas homogènes sur le bassin du Bandama. Des variations excédentaires sont enregistrées au Sud et au Centre à l'exception de la station de Bouaké, et fluctuent entre 5% et 14%. Les stations du Nord cependant, présentent des déficits pluviométriques de plus en plus faibles qui évoluent entre 17% et 27%.

La baisse de la pluviométrie et le réchauffement climatique constatés influencent-ils les débits de la Marahoué ?

Les régimes hydrologiques saisonniers identifiés ne coïncident pas avec le régime climatique saisonnier. En effet, la période des hautes eaux (août-novembre) n'est pas centrée précisément sur la saison pluvieuse (avril-octobre). De la même manière, la période des basses eaux (janvier-avril) n'est pas calée sur la saison sèche (novembre, décembre, janvier, février, mars).

Alors que le trimestre le plus pluvieux est JAS (juillet-août-septembre), le trimestre de plus hautes eaux est ASO (août-septembre-octobre). Un décalage est donc constaté entre la saison climatique et la saison hydrologique. Cela pourrait s'expliquer par la présence de deux types de climat (un climat tropical atténué dans la partie nord et un climat tropical humide dans la partie sud), la forme allongée du bassin versant, etc. L'analyse des fréquences de distribution des débits a montré qu'au niveau des débits annuels ([32-62] m³/s) comme des débits mensuels ([0-80] m³/s), les classes modales sont confondues aux classes médianes.

Une analyse des débits de la Marahoué au pas de temps annuel (modules) sur la période 1961-2017 a permis de mettre en évidence une baisse des débits conformément aux précipitations. Il est également constaté une tendance à la hausse des débits au cours de la décennie 2010 traduite par des indices standardisés de débits positifs. La variabilité climatique constatée influence donc les débits d'écoulement des cours d'eau. Kouassi *et al.* (2017b) ont mené des travaux visant à analyser les modifications induites par la variabilité pluviométrique sur le comportement hydrologique du bassin

versant du Bandama en Côte d'Ivoire à partir des variables telles que la pluie efficace, le potentiel de ruissellement et le potentiel d'infiltration calculés sur la période 1951-2015. L'application de l'indice standard de normalisation et de deux tests de rupture (test de Pettitt et méthode de segmentation de Hubert) à ces variables a permis de montrer que les différents paramètres hydrologiques analysés varient au cours des années et décrivent une tendance régressive marquée par une rupture très significative en 1980-1981. Les déficits hydrologiques évalués fluctuent entre 15% (potentiel d'infiltration) et près de 60% (potentiel de ruissellement) en passant par 16% pour la pluie moyenne et 31% pour la pluie efficace.

Quelle est la capacité des réservoirs souterrains supposés soutenir les écoulements de surface dans un contexte de baisse de la pluviométrie et des débits ainsi que de la hausse des températures et des ETP dans le bassin versant de la Marahoué ?

Les faibles corrélations obtenues d'une part entre, les cumuls de précipitations mensuelles de la période des hautes eaux et les débits de basses eaux et d'autre part, entre les cumuls de précipitations mensuelles de la période des basses eaux et les débits de basses eaux témoignent de la faible capacité de stockage des réservoirs sols du bassin versant de la Marahoué. Ces résultats s'inscrivent dans la même logique que ceux obtenus par Lang (2007). Le pas de temps utilisé dans cette étude dans l'application de la méthode de Maillet est de 30 jours contrairement aux études antérieures où le pas était de 10 jours (Savané *et al.*, 2001 ; Goula *et al.*, 2006 ; Kouassi *et al.*, 2013 ; Soro *et al.*, 2013b, N'Guessan *et al.*, 2017). Selon Kouassi *et al.* (2013), Goula *et al.* (2006) ont obtenu des valeurs de coefficient de tarissement allant de 3.10^{-2} à $4.10^{-2} j^{-1}$ dans le bassin versant du Sassandra à la station de Kahin, Savané *et al.* (2001) ont abouti à des valeurs de $5,7.10^{-2} j^{-1}$ dans le bassin versant du Cavally à la station de Flampeu et $3,6.10^{-2} j^{-1}$ dans le bassin versant du Sassandra à la station de Man. Les résultats des travaux de Kouassi *et al.* (2013) sur le bassin versant du N'Zi (Bandama) aux stations hydrométriques de M'Bahiakro, Bocanda, Dimbokro et N'Zianoua, ont donné des valeurs moyennes de coefficient de tarissement variant entre 3.10^{-2} (M'Bahiakro) et $4.10^{-2} j^{-1}$ (N'Zianoua). Les valeurs du coefficient de tarissement obtenues par Soro *et al.* (2013b) sur le bassin versant du Bandama à Tortya se situent entre $1,63 10^{-2} j^{-1}$ et $8,16 10^{-2} j^{-1}$ avec une moyenne de $3,84.10^{-2} j^{-1}$. Les valeurs moyennes du coefficient de tarissement de la Marahoué à Zuénoula (1982-2004) et à Bouaflé (1955-2004) sont respectivement de $2,31.10^{-2} j^{-1}$ et $2,28.10^{-2} j^{-1}$ (N'Guessan *et al.*, 2017). Le coefficient moyen annuel de tarissement du fleuve Bagoé a été estimé à $0,032 j^{-1}$ par Adja *et al.* (2019). Les résultats obtenus au cours de cette étude ($3,4.10^{-2} j^{-1}$) s'inscrivent bien dans les intervalles des valeurs obtenues sur les principaux bassins versants de la Côte d'Ivoire. La durée moyenne de tarissement obtenue par Kouassi *et al.* (2013) sur le bassin versant du N'Zi (Bandama) oscille entre 25 et 33 jours. La valeur obtenue sur le bassin versant de la Marahoué (29 jours), s'intercale bien dans cet intervalle.

Les résultats du bassin versant du N'Zi viennent conforter ceux obtenus dans le bassin versant de la Marahoué dès lors que les deux bassins constituent des sous-bassins du grand bassin versant du Bandama. Les volumes d'eau mobilisés par les aquifères du N'Zi (Bandama) évalués par Kouassi *et al.* (2013) varient entre 0,61 et 0,64 Km³. Après 1968, les volumes mobilisés par les aquifères fluctuent entre 0,36 et 0,49 Km³. Ces volumes sont fonction de la superficie des bassins. Ainsi, les volumes d'eau mobilisés par Km² au niveau du N'Zi (Bandama) vont de $1,8 \cdot 10^{-5}$ à $4 \cdot 10^{-5}$ Km³. Les valeurs moyennes du volume d'eau mobilisé par les aquifères du bassin versant de la Marahoué à Zuénoula (1982-2004) et à Bouaflé (1955-2004), sont respectivement de 1,33 km³ ($2,12 \cdot 10^{-5}$ km³/km²) et 1,90 km³ ($7,8 \cdot 10^{-5}$ km³/km²) (N'Guessan *et al.*, 2017). Quant aux volumes mobilisés, les valeurs vont de 0,08 km³ à 2,71 km³ ($1,9 \cdot 10^{-4}$ km³/km²) (Soro *et al.*, 2013b,c). Le volume moyen interannuel d'eau mobilisé par les aquifères du bassin versant de la Bagoé a été évalué à environ 0,71 km³ ($2,12 \cdot 10^{-5}$ km³/km²) à la station hydrométrique de Kouto (exutoire) selon les travaux d'Adja *et al.* (2019). Quant au bassin versant de la Marahoué, le volume d'eau mobilisé par Km² au cours de cette étude est de $3,8 \cdot 10^{-5}$ km³. Cette valeur s'inscrit normalement dans l'intervalle obtenu par Kouassi *et al.* (2013) sur le bassin versant du N'Zi (Bandama). Il y a donc de façon générale, une concordance des résultats obtenus sur le bassin versant de la Marahoué par rapport aux résultats des travaux antérieurs sur les principaux bassins versants fluviaux de la Côte d'Ivoire en ce qui concerne le coefficient de tarissement, la durée de tarissement et le volume d'eau mobilisé par les aquifères. Ainsi, le fort coefficient de tarissement, la rapidité du tarissement et les faibles volumes d'eau mobilisés, amènent à dire que les nappes qui alimentent le fleuve Marahoué sont dans des aquifères de faible capacité. D'où la faiblesse des quantités d'eau déversées dans les cours d'eau par les nappes souterraines. En effet, le bassin est couvert de formations géologiques très consolidées. De ce fait, la présence d'eau souterraine est conditionnée par l'existence de fractures d'où la présence d'aquifères discontinus qui contiennent de l'eau dans de faibles proportions (Kouassi *et al.*, 2013). On peut donc conclure que le pas de temps utilisé n'a pas influencé de façon significative les résultats de cette étude. Les résultats issus de la loi de Maillet sont en adéquation avec ceux obtenus par l'application de la méthode de Lang (2007) au cours de cette étude. Cette méthode, relativement simple, basée uniquement sur des corrélations de cumuls de pluie (périodes de hautes eaux et de basses eaux) et de débits moyens (période de basses eaux), a permis de confirmer les résultats de l'application de la loi de Maillet, communément utilisée par les hydrologues. Cependant, cette approche est limitée par le fait qu'elle ne donne qu'une appréciation qualitative contrairement à la loi de Maillet qui permet de quantifier les paramètres de caractérisation des réservoirs souterrains. Elle peut, dès lors, constituer un outil de premier niveau d'appréciation des capacités des réservoirs souterrains.

La baisse des précipitations et des débits combinés à la hausse de la température et des évapotranspirations constatées dans le bassin versant de la Marahoué, sont de nature à amplifier l'amenuisement des réserves souterraines déjà faibles (Kouassi *et al.*, 2013).

CONCLUSION PARTIELLE

L'objectif de cette étude était la caractérisation climatique et hydrologique du bassin versant de la Marahoué à la station hydrométrique de Bouaflé (Côte d'Ivoire). L'aspect de la critique des données a permis de mettre en évidence, l'absence de valeur erronée en ce qui concerne la pluviométrie. En effet, trois stations de références ont été sélectionnées en fonction des différentes zones du bassin versant à savoir Odienné (Nord), Bouaké (Centre) et Daloa (Sud). S'agissant des débits, les régressions linéaires réalisées entre la station de Séguéla-Béoumi et celle de Bouaflé mettent en évidence une bonne corrélation des données. Les valeurs du coefficient de corrélation « R » ont été supérieures à 60%, soit 78% (débit moyen annuel), 65% (Q_{MNA}), 74% (Q_{MXA}), et 72% (Q_{JMAX}). Par la suite, afin de générer les débits des périodes futurs, les données de pluie et d'ETP ont été générées sur la base des chaînes de Markov.

Les résultats obtenus suite à la combinaison d'approches climatiques, statistiques et hydrologiques, ont montré que le bassin étudié appartient à un régime unimodal à deux saisons (7 mois pluvieux et 5 mois secs) et de type tropical humide. Les mois pluvieux vont d'avril à octobre et la saison sèche s'étend sur les mois de janvier, février, mars, novembre et décembre. La Marahoué est caractérisée par une période des hautes eaux (août-novembre), une période de basses eaux (janvier-avril) et une période de moyennes eaux (mai-juillet et décembre). L'analyse des fréquences de distribution des débits a montré qu'au niveau des débits annuels ($[32-62] \text{ m}^3/\text{s}$) comme des débits mensuels ($[10-80] \text{ m}^3/\text{s}$), les classes modales sont confondues aux classes médianes. Il est constaté une baisse des précipitations et des débits, cependant la température et l'évapotranspiration sont en hausse. Les réserves souterraines évaluées sont faibles avec un coefficient de tarissement moyen de $3,4 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$, une durée moyenne de tarissement de près d'un mois et un volume d'eau mobilisé par les aquifères de $0,92 \text{ Km}^3$. La variabilité climatique constatée ainsi que les variations hydrologiques évaluées sont de nature à amplifier l'amenuisement des réserves souterraines déjà faibles. Dans un tel contexte, il est nécessaire d'analyser les comportements hydrométriques extrêmes afin de définir des seuils d'extrêmes hydrométriques pouvant servir d'alertes précoces auprès des populations pour une anticipation sur les phénomènes extrêmes tels que les inondations, les étiages, etc.

CHAPITRE 6. SYSTÈMES D'ALERTE PRÉCOCES (SAP) DES DÉBITS DE HAUTES EAUX ET D'ÉTIAGES DE LA MARAHOUÉ

6.1. MODÉLISATION STATISTIQUE ET SAP DE DÉBITS DE HAUTES EAUX

6.1.1. VÉRIFICATION DES HYPOTHÈSES DES DONNÉES DE Q_{JMAX}

Les hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité ont été vérifiées au niveau des données de Q_{JMAX} de la station de Bouaflé. Les résultats de ces tests sont présentés dans le tableau X. Il en ressort que l'hypothèse H_0 du test d'homogénéité (Wilcoxon) a été acceptée au niveau de signification de 5%. On pourrait conclure alors que les données de Q_{JMAX} sont homogènes. L'hypothèse H_0 du test de stationnarité (Kendall) a également été acceptée au niveau de signification de 5%. Les Q_{JMAX} au niveau de la station de Bouaflé sont donc stationnaires avec une autocorrélation d'ordre 5. Quant au test d'indépendance (Wald-Wolfowitz), il a été accepté au seuil de 1%, on peut conclure que les Q_{JMAX} ne sont pas auto-corrélés.

Tableau X : Résultats des tests d'hypothèses appliqués aux Q_{JMAX}

| Test d'homogénéité | | Test de stationnarité | | Test d'indépendance | |
|--------------------|-------|-----------------------|-------|---------------------|-------|
| W | P | K | P | U | P |
| 0,401 | 0,688 | 0,661 | 0,509 | 2,06 | 0,039 |

Les résultats, sont présentés sous forme de couple statistique des tests et p-value.

6.1.2. AJUSTEMENT GRAPHIQUE DES DONNÉES DE Q_{JMAX}

La figure 59 met en évidence l'évolution des probabilités empiriques, tandis que l'ajustement des données de Q_{MXA} de la station de Bouaflé à partir des différents modèles retenus sont illustrés aux figures 60, 61, 62, 63 et 64. Pour mieux apprécier l'ajustement des différentes lois appliquées, un graphe de comparaison (Figure 65) a été construit par superposition des différents modèles. L'examen de ces différentes figures montre que les données intègrent l'intervalle de confiance des lois Weibull et Gamma (figure 61 et 63) et que ces deux lois représentent donc un bon ajustement graphique. La figure 66 indique que la courbe de la loi Pearson type III est encadrée par celles de la loi Gamma (au-dessus) et la loi Exponentielle (en dessous). Par ailleurs, les lois Weibull et Log-normale s'écartent des données de Q_{MXA} .

Au regard de la difficulté à choisir la meilleure loi, des tests numériques de vérification de l'adéquation des ajustements ont été appliqués pour mieux apprécier leur relative qualité.

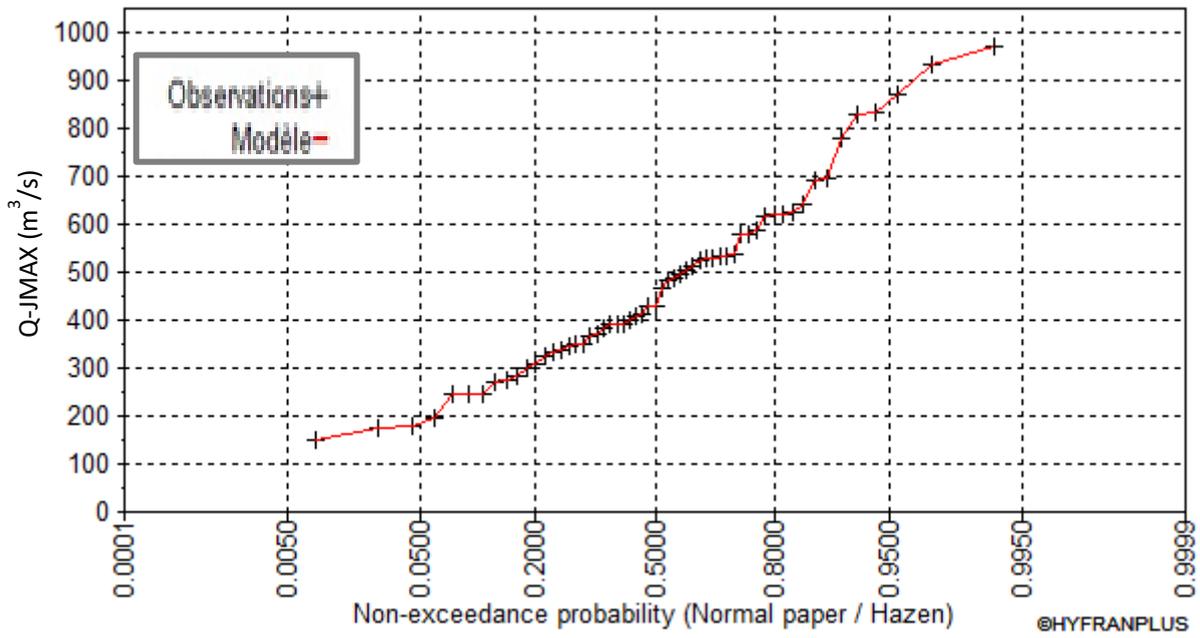


Figure 59 : Évolution des probabilités empiriques des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé (1961-2017)

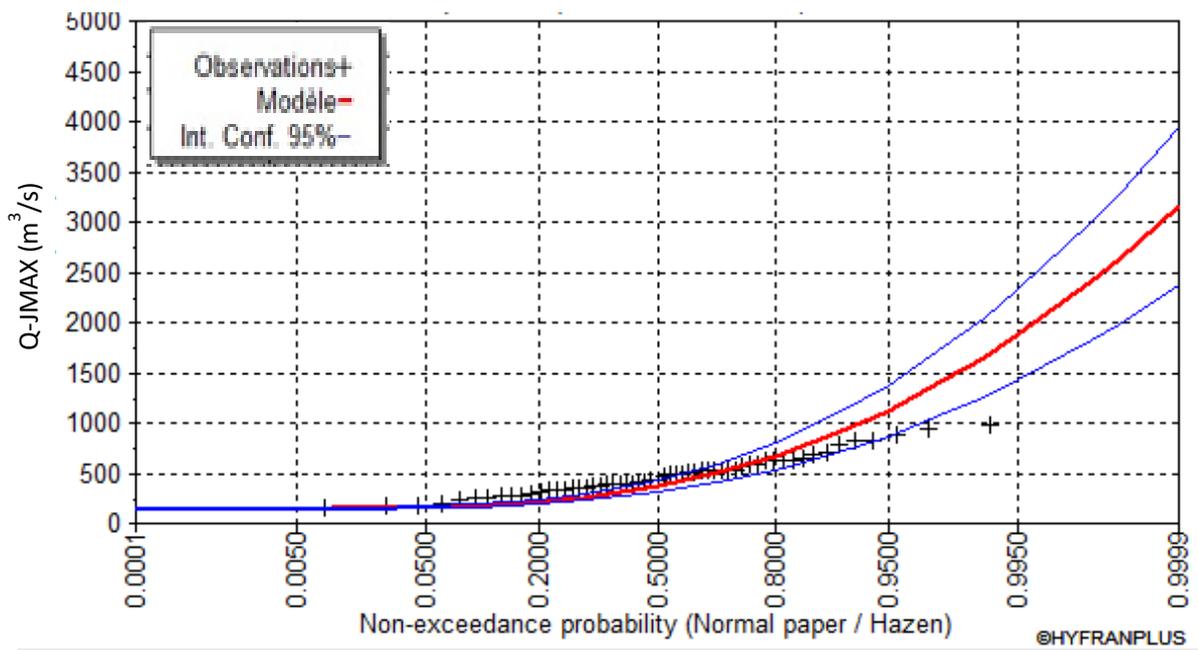


Figure 60 : Ajustement des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé à la loi Exponentielle (1961-2017)

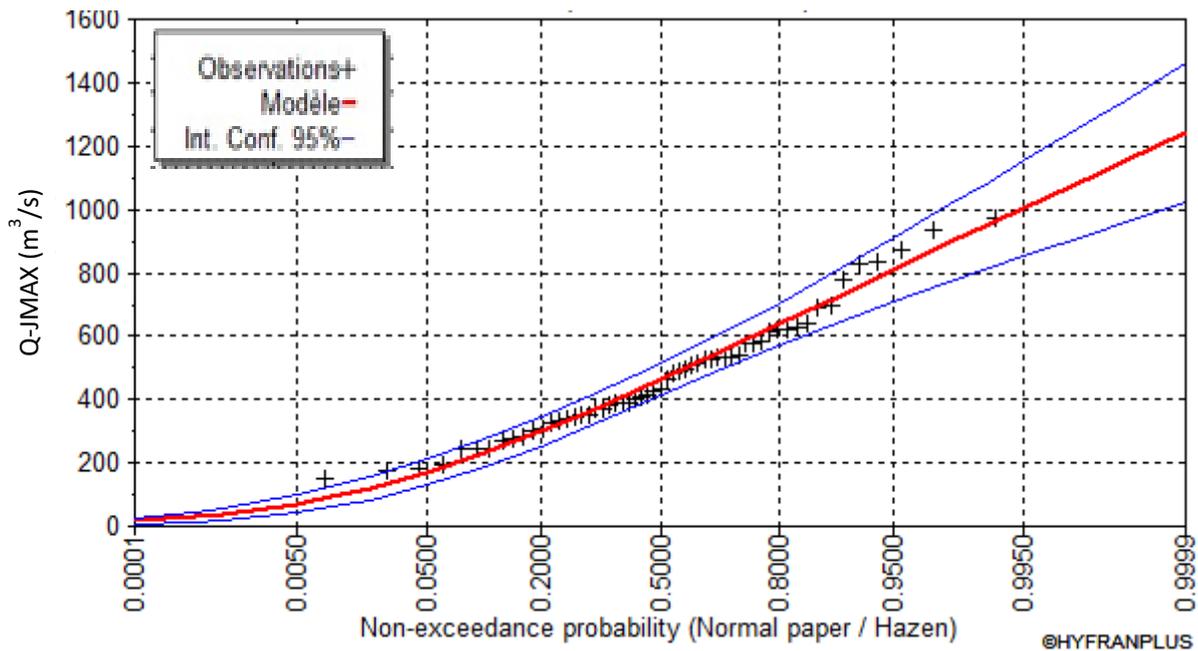


Figure 61 : Ajustement des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé à la loi de Weibull (1961-2017)

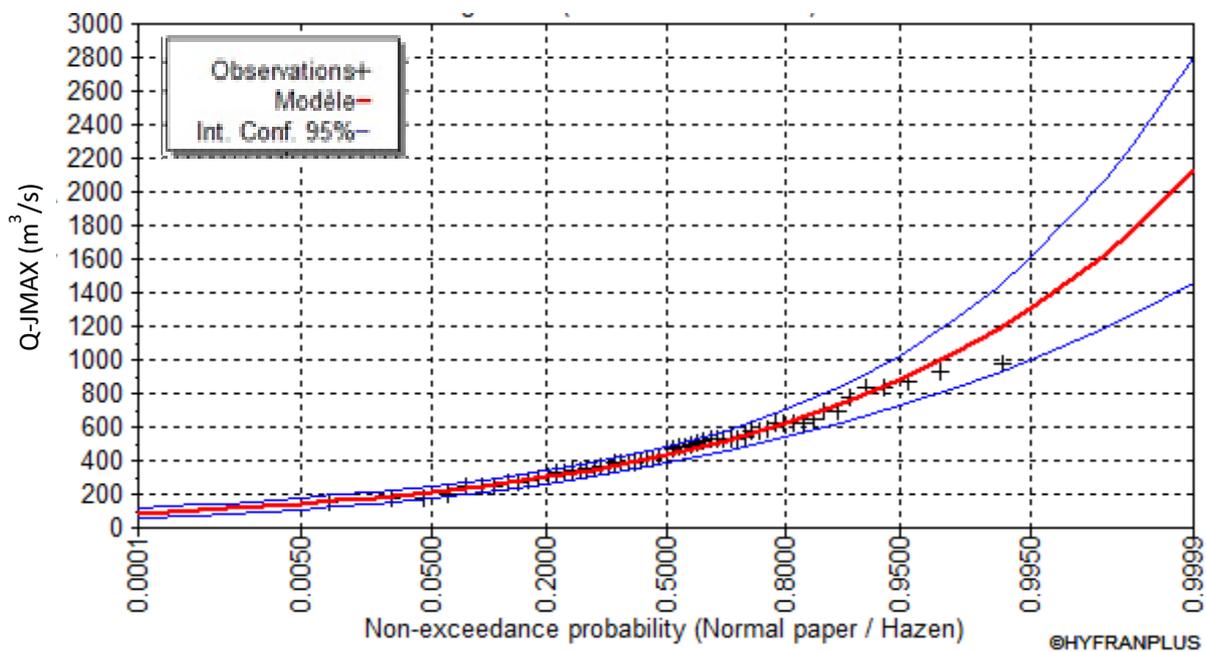


Figure 62 : Ajustement des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé à la loi Log-normale (1961-2017)

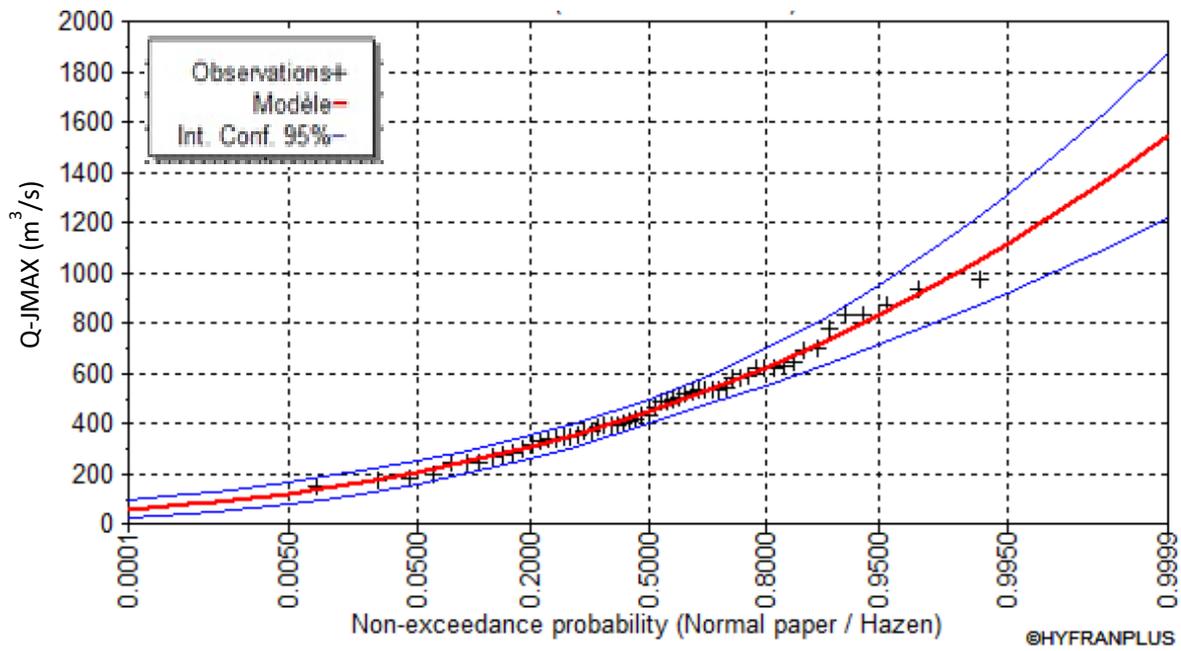


Figure 63 : Ajustement des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé à la loi Gamma (1961-2017)

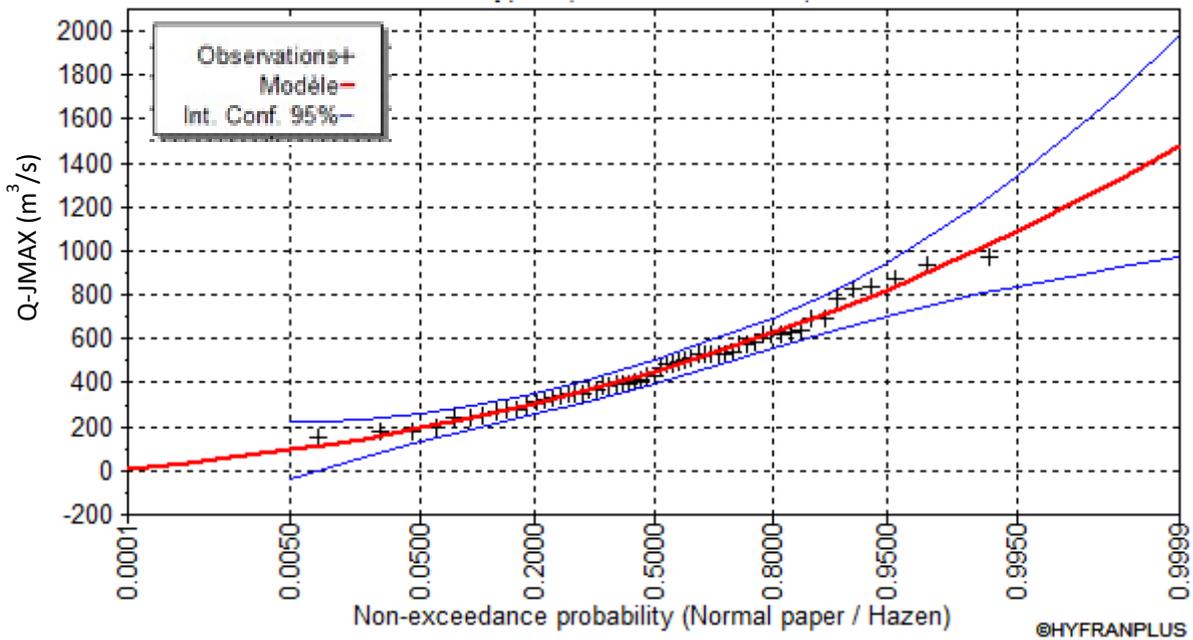


Figure 64 : Ajustement des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé à la loi Pearson de type III (1961-2017)

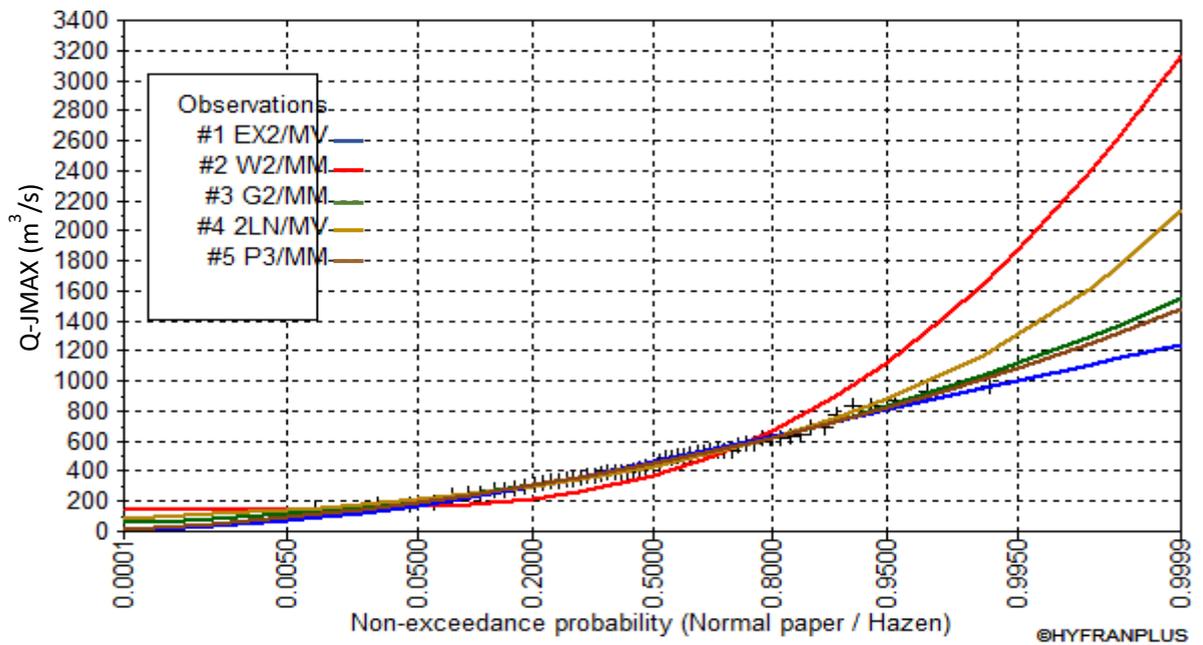


Figure 65 : Comparaison de l'ajustement des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé (1961-2017)

6.1.3. AJUSTEMENT ANALYTIQUE DES DONNÉES DE Q_{JMAX}

6.1.3.1. Test du Khi-deux d'adéquation appliqué aux Q_{JMAX}

Les résultats du test de Khi-deux d'adéquation appliqué aux Q_{JMAX} sont consignés dans le tableau XI. L'application de ce test s'est révélée concluante pour la totalité des lois d'ajustement. En effet, l'hypothèse H_0 a été acceptée au niveau de signification de 5% (les probabilités P sont toutes supérieures au seuil de 0,05) pour les lois Weibull, Gamma, Log normal et Pearson de type III. S'agissant de la loi Exponentielle, elle a été acceptée à un seuil de 1%.

De ce fait, ce test ne permet pas de trancher sur le choix de la meilleure loi d'ajustement. D'où la nécessité de recourir aux critères d'Akaike et bayésien.

Tableau XI : Test de χ^2 appliqué aux Q_{JMAX}

| Lois de probabilité | χ^2 | p |
|---------------------|----------|--------|
| Exponentielle | 19,32 | 0,0073 |
| Log-normale | 10,89 | 0,1433 |
| Weibull | 4,93 | 0,6685 |
| Gamma | 3,88 | 0,7938 |
| Pearson de type III | 3,88 | 0,6933 |

6.1.3.2. Critères d'AIC et BIC appliqués aux Q_{JMAX}

Les résultats obtenus à la suite de l'application des critères d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC) sont consignés dans le tableau XII. Pour un même critère donné, les valeurs diffèrent en passant d'une loi à une autre. Les deux critères choisissent la loi Gamma comme étant celle qui s'ajuste au mieux.

Ainsi, la loi Gamma a les valeurs les plus faibles au niveau des critères AIC et BIC, suivie des lois, Log normale, Weibull, Pearson de type III et Exponentielle.

Tableau XII : Critères AIC et BIC appliqués aux lois de probabilité pour les Q_{JMAX} de Bouaflé

| Lois de probabilité | AIC | BIC |
|----------------------------|----------------|----------------|
| Gamma | 759,015 | 763,101 |
| Log normal | 760,278 | 764,364 |
| Weibull | 761,601 | 765,687 |
| Pearson de type III | 761,626 | 767,755 |
| Exponentielle | 778,092 | 782,178 |

6.1.3.3. Caractérisation des périodes de retour des Q_{JMAX}

Les périodes de retour évaluées oscillent entre 1 et 114 ans avec une moyenne de six ans (Figure 66 ; Tableau XIII). La majorité des débits de crues annuels étudiés est rangée au titre des évènements de type normal (82,5%) avec un intervalle compris entre 151 m³/s et 622 m³/s. Les débits de type anormal (627-697 m³/s) et de type très anormal (780-873 m³/s) représentent chacun 7% des Q_{JMAX} . Au niveau des évènements exceptionnel et très exceptionnel, il a été obtenu respectivement des débits de 934 m³/s (1971) et 971 m³/s (1964).

Tableau XIII : Fréquences de retour des Q_{JMAX} de la station de Bouaflé (1961-2017)

| Type d'évènement | Fréquence d'apparition | Pourcentage (%) | Crues (m ³ /s) |
|--------------------------|------------------------|-----------------|---------------------------|
| Normal | 47 | 82,5 | 151 - 622 |
| Anormal | 4 | 7,0 | 627 - 697 |
| Très anormal | 4 | 7,0 | 780 - 873 |
| Exceptionnel | 1 | 1,8 | 934 |
| Très exceptionnel | 1 | 1,8 | 971 |

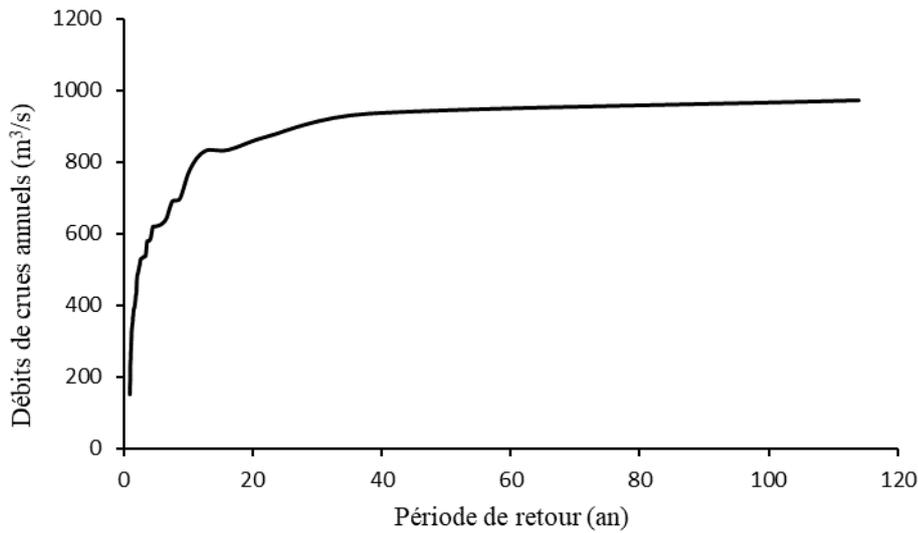


Figure 66 : Périodes de retour des Q_{JMAX} à la station de Bouaflé (1961-2017)

6.1.3.4. Détermination des seuils de Q_{JMAX}

Les quantiles des Q_{JMAX} évalués à partir des différentes lois et leurs intervalles de confiance sont présentés dans le tableau XIV à travers six (6) périodes de retour (2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans). Ces différents quantiles vont de 446 m³/s (T=2 ans) à 1030 m³/s (T=100 ans).

Tableau XIV : Quantiles (X_T) et intervalles de confiance des Q_{JMAX} de la Marahoué (Bouaflé)

| T (ans) | X_T (m³/s) | Intervalle de confiance (95%) |
|----------------|---|--------------------------------------|
| 100 | 1030 | 862 - 1210 |
| 50 | 949 | 801 - 1100 |
| 20 | 829 | 712 - 947 |
| 10 | 731 | 638 - 825 |
| 5 | 623 | 552 - 694 |
| 2 | 446 | 398 - 495 |

Avec : T : la période de retour et X_T : le débit.

La crue journalière annuelle historique documentée est celle de 1964 avec une valeur de 971 m³/s. Cette valeur étant inférieure au débit de crue modélisée pour une occurrence centennale (1030 m³/s), la crue de référence retenue est donc $Q_{JMAX-100}$ (1030 m³/s). Ainsi, les seuils de crue à la station de

Bouaflé (débit de référence : $Q_{JMAX-100}$, les seuils de vigilance et de crise) ont été déterminés à partir de cette valeur. Le seuil de vigilance évalué est de 927 m³/s et le seuil de crise calculé est de 1133 m³/s (Figure 67).

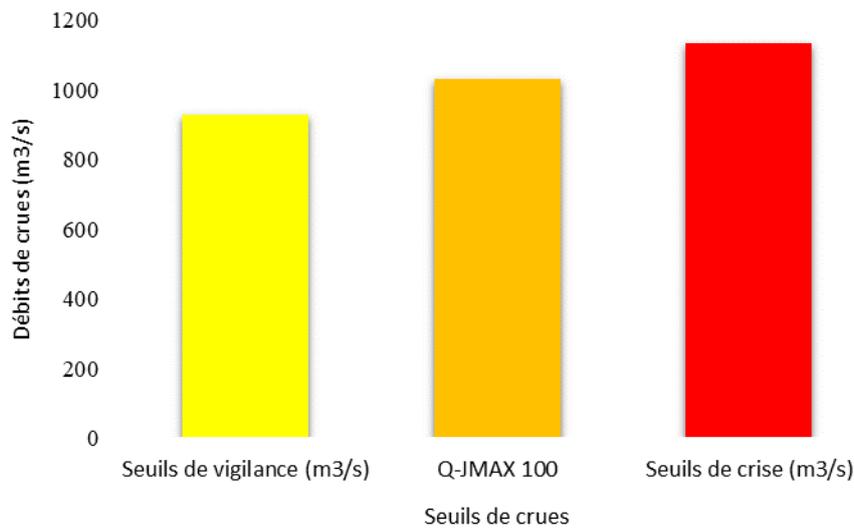


Figure 67 : Seuils de crue en rapport avec les $Q_{JMAX-100}$ à la station de Bouaflé

6.2. MODÉLISATION STATISTIQUE ET SAP DE DÉBITS D'ÉTIAGES

6.2.1. VÉRIFICATION DES HYPOTHÈSES DES DONNÉES DE Q_{MNA}

Les tests d'hypothèses d'indépendance, d'homogénéité et de stationnarité ont été vérifiés au niveau des données de Q_{MNA} de la station de Bouaflé. Les résultats de ces tests sont présentés dans le tableau XV. Il en ressort que l'hypothèse H_0 du test d'homogénéité (Wilcoxon) a été rejeté au niveau de signification de 1% pour la station de Bouaflé. On pourrait conclure alors que les données de Q_{MNA} ne sont pas homogènes. L'hypothèse H_0 du test de stationnarité (Kendall) a également été rejetée au niveau de signification de 1%. Les Q_{MNA} au niveau de la station de Bouaflé ne sont donc pas stationnaires avec une autocorrélation d'ordre 1. En ce qui concerne le test d'indépendance (Wald-Wolfowitz), l'hypothèse H_0 a été acceptée au niveau significatif de 1%.

Tableau XV : Résultats des tests d'hypothèses appliqués aux Q_{MNA} de Bouaflé (1961-2017)

| Test d'homogénéité | | Test de stationnarité | | Test d'indépendance | |
|--------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| W | P | K | P | U | P |
| 5,02 | $5,21 \cdot 10^{-7}$ | 3,18 | $1,48 \cdot 10^{-3}$ | 2,33 | $1,99 \cdot 10^{-2}$ |

6.2.2. AJUSTEMENT GRAPHIQUE DES Q_{MNA}

La figure 68 met en évidence l'évolution des probabilités empiriques des Q_{MNA} , tandis que les résultats d'ajustement à partir des différents modèles retenus sont illustrés aux figures 69, 70, et 71. Pour mieux apprécier l'ajustement des différentes lois appliquées, un graphe de comparaison (Figure 72) a été construit par superposition des différents modèles. L'examen de ces différentes figures a permis de montrer que la loi Exponentielle a tendance à sous-estimer les Q_{MNA} . En revanche, les lois Gamma et Weibull fournissent des résultats très proches.

La courbe de la loi Gamma passe au-dessus de celle de la loi Weibull par moments et inversement. Il est donc difficile à ce niveau de trancher entre les deux lois. Ainsi, des tests numériques de vérification de l'adéquation des ajustements ont été appliqués pour mieux apprécier leur relative qualité.

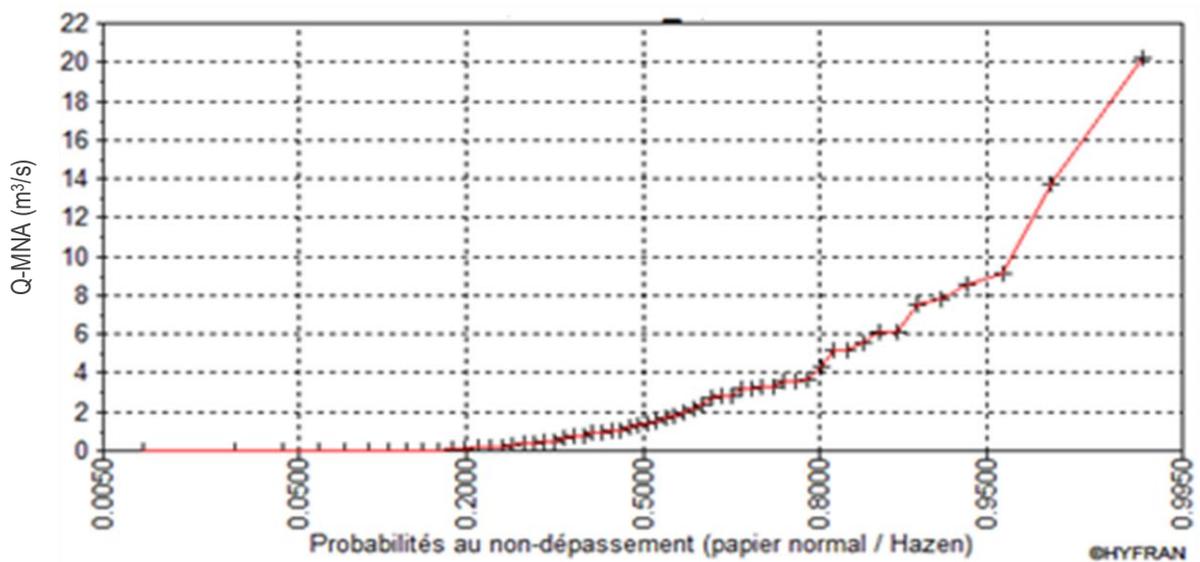


Figure 68 : Évolution des probabilités empiriques des Q_{MNA} de la station de Bouaflé (1961-2017)

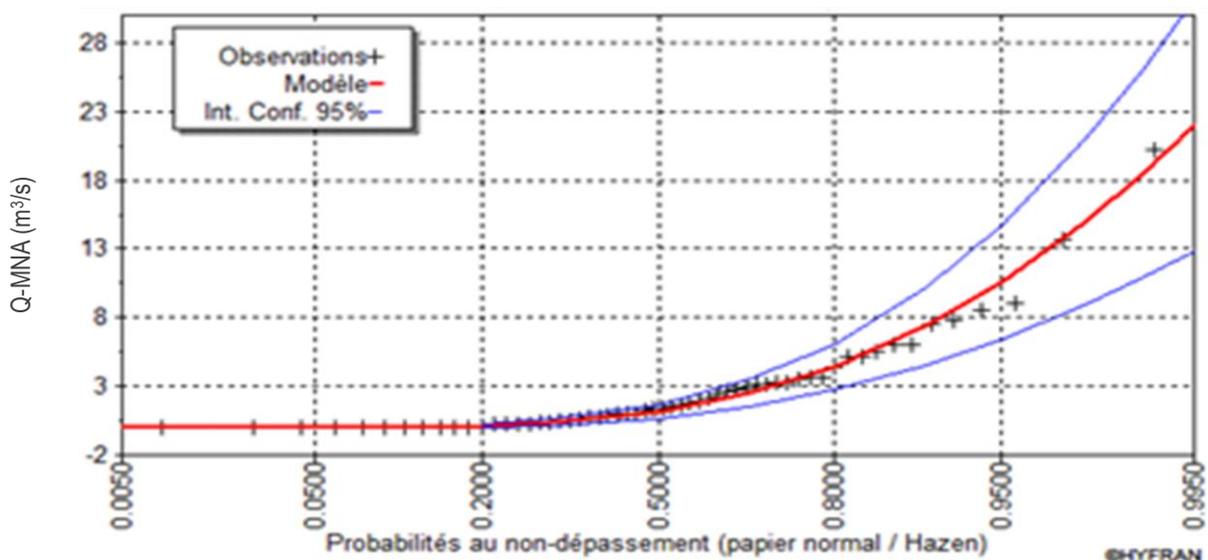


Figure 69 : Ajustement des Q_{MNA} de la station de Bouaflé à la loi Gamma (1961-2017)

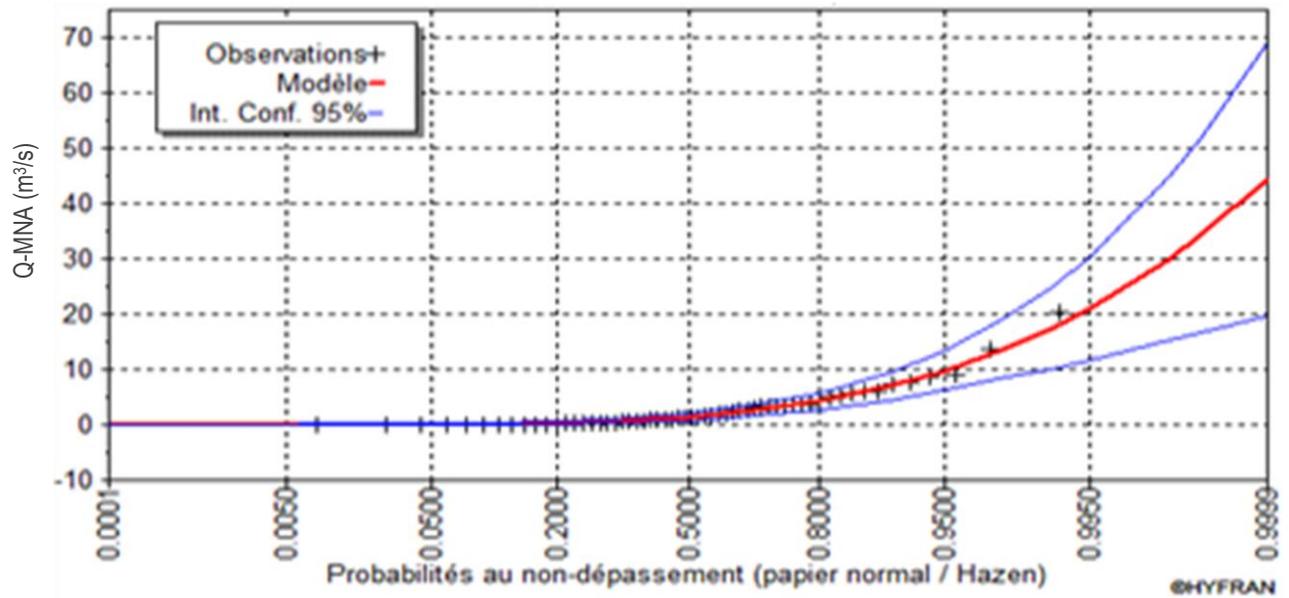


Figure 70 : Ajustement des Q_{MNA} de la station de Bouaflé à la loi Weibull (1961-2017)

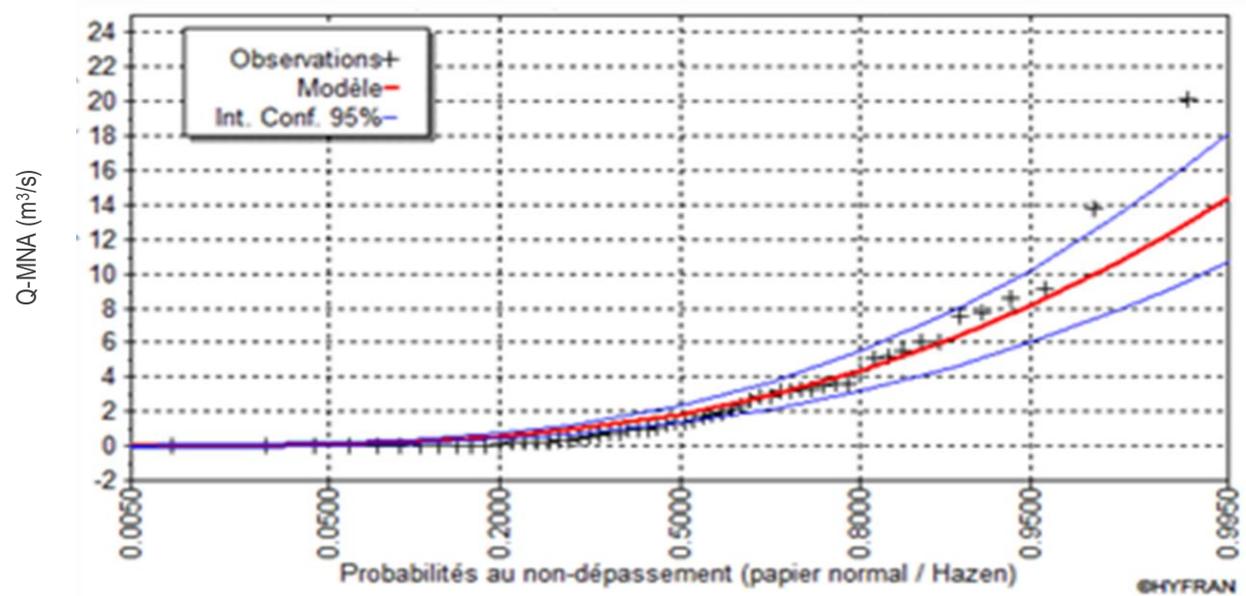


Figure 71 : Ajustement des Q_{MNA} de la station de Bouaflé à la loi Exponentielle (1961-2017)

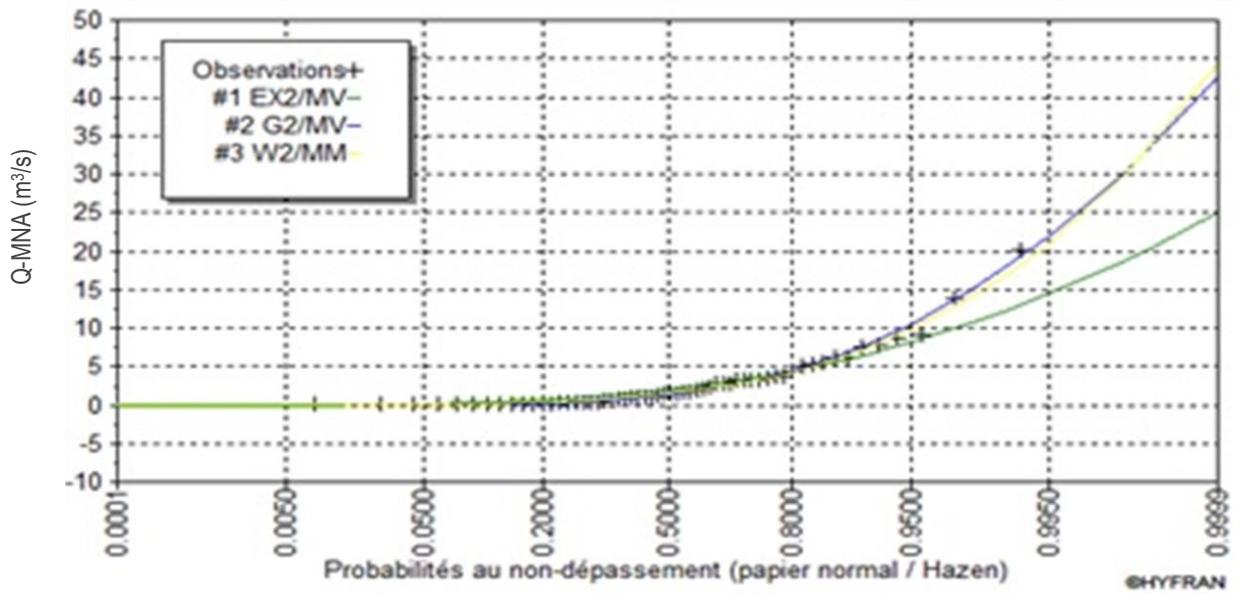


Figure 72 : Comparaison de l’ajustement des Q_{MNA} de la station de Bouaflé (1961-2017)

6.2.3. AJUSTEMENT ANALYTIQUE DES DÉBITS D’ÉTIAGES

6.2.3.1. Test du Khi-deux d’adéquation appliqué aux données de Q_{MNA}

Les résultats du test de Khi-deux d’adéquation appliqués aux Q_{MNA} sont consignés dans le tableau XVI. L’hypothèse H_0 relative à la loi Exponentielle a été rejetée au niveau significatif de 1%. Concernant la loi Gamma, l’hypothèse H_0 a été acceptée au niveau de signification de 5%. Quant aux résultats de la loi Weibull, ils montrent que l’hypothèse H_0 a été acceptée au niveau de signification de 5%. Toutefois, ce test ne permet pas de trancher sur le choix de la meilleure loi d’ajustement. D’où la nécessité de recourir aux résultats des critères d’Akaike et bayésien.

Tableau XVI : Test de χ^2 appliqué aux Q_{MNA} de la station de Bouaflé (1961-2017)

| Loi exponentielle | | Loi Weibull | | Loi Gamma | |
|-------------------|--------|-------------|--------|-----------|--------|
| χ^2 | P | χ^2 | P | χ^2 | p |
| 21,66 | 0,0029 | 9,59 | 0,2133 | 8,55 | 0,2865 |

6.2.3.2. Critères d’AIC et BIC appliqués aux Q_{MNA}

Les résultats obtenus à la suite de l’application des critères d’Akaike et Bayésien sont consignés au tableau XVII. Les deux critères choisissent la même loi donc convergent vers un même modèle. La

loi Gamma a les valeurs les plus faibles, suivie de la loi Weibull, et enfin, la loi exponentielle. Étant donné que la meilleure loi est celle qui présente les plus faibles valeurs des critères d'Akaike et bayésien, le modèle qui s'adapte au mieux à la série des Q_{MNA} est la loi Gamma.

Tableau XVII : Critères AIC et BIC appliqués aux lois de probabilité pour les Q_{MNA} de la station de Bouaflé

| Lois de probabilité | AIC | BIC |
|----------------------|---------|---------|
| Gamma | 204,021 | 208,142 |
| Weibull | 210,957 | 215,078 |
| Exponentielle | 236,268 | 240,389 |

6.2.3.3. Caractérisation des périodes de retour des Q_{MNA}

Les périodes de retour évaluées varient entre 1 et 114 ans avec une moyenne de 6 ans (Tableau XVIII ; Figure 70). La quasi-totalité des débits d'étiage mensuels et annuels étudiés est classée dans la catégorie des évènements de type normal (82,5%). Dans les types anormal et très anormal, ont été classées respectivement 7% des variables. Enfin, les évènements exceptionnel et très exceptionnel présentent respectivement une valeur de débit d'étiage de 1,8%.

Tableau XVIII : Fréquences de retour des Q_{MNA} de la station de Bouaflé (1961-2017)

| Type d'évènement | Fréquence d'apparition | Pourcentage (%) |
|--------------------------|------------------------|-----------------|
| Normal | 47 | 82,5 |
| Anormal | 4 | 7,0 |
| Très anormal | 4 | 7,0 |
| Exceptionnel | 1 | 1,8 |
| Très exceptionnel | 1 | 1,8 |

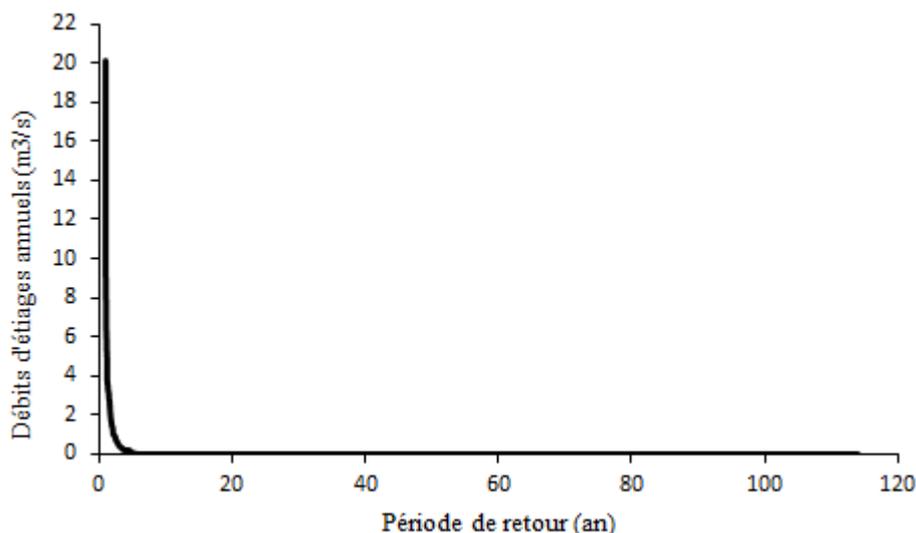


Figure 73 : Périodes de retour des Q_{MNA} à la station de Bouaflé

6.2.3.4. Détermination des seuils d'étiage

Les quantiles des débits d'étiage évalués à partir de la loi Gamma et leurs intervalles de confiance sont représentés dans le tableau XIX à travers cinq (5) périodes de retour (2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans et 50 ans). Ces différents quantiles varient entre $6,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ($T=50$ ans) et $1,15 \text{ m}^3/\text{s}$ ($T=2$ ans). Ils augmentent au fur et à mesure que les périodes de retour diminuent.

Tableau XIX : Quantiles des Q_{MNA} de la station de Bouaflé (1961-2017)

| Période de retour (ans) | 50 | 20 | 10 | 5 | 2 |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------------|----------------|
| Quantile (m^3/s) | $6,4 \cdot 10^{-3}$ | $7,6 \cdot 10^{-3}$ | $2,8 \cdot 10^{-2}$ | 0,14 | 1,15 |
| Intervalle de confiance | [0,0059-0,0068] | [0,0071-0,0081] | [0,0227-0,0341] | [0,0132- 0,271] | [0,607- 1,700] |

La figure 74 met en évidence les seuils d'étiage déterminés (débit caractéristique : Q_{MNA-5} ; les seuils de vigilance et de crise) à la station de Bouaflé. Le Q_{MNA-5} qui renseigne sur la sévérité des étiages est de $0,142 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour ce qui est des seuils de vigilance et de crise qui correspondent respectivement à un niveau de prévision des problèmes de pénurie et à un niveau de préparation d'une éventuelle crise, ils présentent respectivement les valeurs de $0,156 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0,127 \text{ m}^3/\text{s}$.

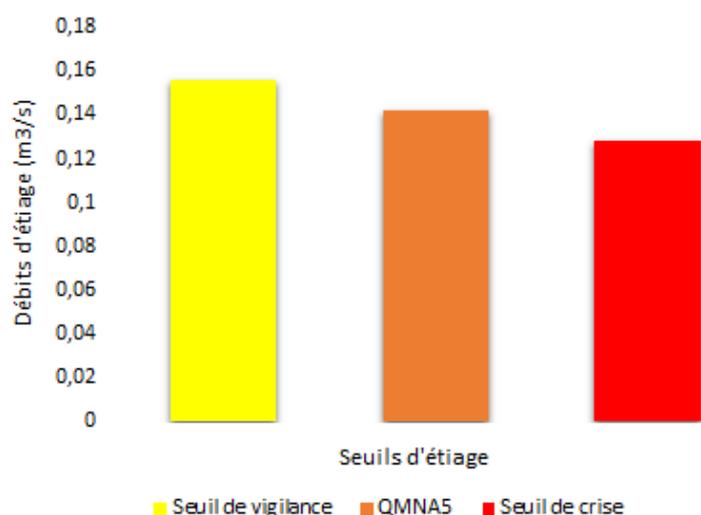


Figure 74 : Seuils d'étiage en rapport avec les Q_{MNA-5} à la station de Bouaflé

6.3. DISCUSSION

6.3.1. DÉBITS DE HAUTES EAUX (Q_{JMAX})

L'hypothèse H_0 relatif aux tests d'homogénéité de Wilcoxon et de stationnarité de Kendall, a été rejetée au niveau de signification de 1% et accepté au seuil de 5%, s'agissant du test d'indépendance de Wald-Wolfowitz a été accepté au seuil de 1%. Des résultats similaires ont été obtenus par d'autres auteurs tels que Kouider (2003). En effet, son étude a porté sur l'analyse fréquentielle des crues au Québec. Les résultats ont montré que les tests d'hypothèses de stationnarité et d'indépendance des données étudiées concernant les crues saisonnières (été, automne et printemps) et annuelles, ont été rejetés pour 14 stations à un niveau de signification de 1%. En ce qui concerne les résultats du test d'homogénéité de Wilcoxon, pour l'ensemble des regroupements des stations retenues dans le cadre de son travail, il est observé que trois regroupements ont des données qui sont rejetées par ce test à un niveau de signification de 1%. Toutefois, les séries de données extraites à partir de ces stations, bien qu'elles ne respectent pas les hypothèses de base sur lesquelles repose l'analyse fréquentielle, ont fait l'objet d'ajustement par ladite méthode.

Au niveau du Bénin, l'étude menée par Koumassi *et al.* (2014) présente des résultats similaires. En effet, l'objectif de l'étude menée par l'auteur, était de réaliser une analyse fréquentielle des phénomènes hydro-pluviométriques dans le bassin de la Sota. Les résultats des tests d'hypothèses ont montré que sur la station de Kalalé, les séries pluviométriques sont non indépendantes, non homogènes et non stationnaires. Cependant, l'analyse fréquentielle a été réalisée. En effet, malgré le fait que la série étudiée ne réponde pas favorablement aux tests d'indépendance, de stationnarité et

d'homogénéité, mais présente une corrélation minimale d'une année à l'autre, l'incidence sur l'analyse des quantiles de crue estimés est relativement faible (WMO, 2009).

Ainsi, les résultats obtenus mettent en évidence la supériorité de la loi Gamma comme la loi qui ajuste au mieux les Q_{MXA} dans le bassin de la Marahoué à Bouaflé. Elle est suivie par la loi de Weibull et vient en troisième position la loi Log-normale (Kouassi *et al.*, 2018).

Les résultats de l'analyse fréquentielle obtenus dans cette étude se rapprochent des travaux de plusieurs auteurs tels que Riad (2003), Beliveau (2006), Meddi *et al.*, (2014) etc. En effet, dans son étude menée sur l'analyse fréquentielle de la pointe, du volume et de la durée de la crue sur quatre bassins versants Québécois (Ashuapmushuan, Batiscan, Harricana et Romaine), Beliveau (2006) a eu recours à des séries d'observations journalières de débit. Un graphique superposant les probabilités empiriques et théoriques des distributions gamma, normale, GEV, Pearson type III et log-Pearson type III a été réalisé. Le choix graphique de la loi qui ajuste le mieux les observations extrêmes s'est porté sur la loi Gamma. De même, les critères BIC et AIC de la loi Gamma, ont affiché les valeurs minimums comparativement aux autres lois. Meddi *et al.* (2014) au cours de leurs travaux portant sur l'analyse statistique et la prévision des débits de crues dans le bassin versant de l'Oued Mekerra (Algérie), se sont appuyés sur des séries de débits maximaux annuels de trois stations de mesure à savoir : Haçaiba (938 km²), Sidi Ali Benyoub (1871 km²) et Sidi Bel Abbès (3000 km²). Le choix de l'auteur s'est porté sur la méthode des maxima annuels. Ainsi, il ressort des ajustements effectués que la loi Gamma donne le meilleur résultat pour les trois stations. En outre, les résultats obtenus au cours de ce travail sont en concordance avec ceux de Riad (2003). Poussé par la nécessité d'établir des systèmes performants de prévention et d'évacuation rapide de la population par l'installation d'infrastructures appropriées et systèmes d'alertes en cas de prévision de phénomènes catastrophiques naturels, l'auteur réalise une analyse hydrologique des eaux superficielles sous climat semi-aride au Maroc. Les séries des débits maximums annuels ont été employées pour l'analyse des crues par ajustement à des lois statistiques. Les ajustements effectués aboutissent à des résultats satisfaisants. L'Oued Ourika à la station d'Aghbalou présente des débits plus irréguliers avec un coefficient de variation très élevé (1,28), ce qui permet d'expliquer le recours à la loi Log-Normale. Les échantillons des données de débit de crue analysés à partir de plusieurs autres bassins versants (Ansegmir, Fom Tillicht et Ait Bouijjane) ont montré que la loi Gamma se présente comme la meilleure loi qui ajuste ces différentes données. Selon Kharroubi (2013), plusieurs recherches américaines préfèrent la loi Gamma.

Toutefois, certains auteurs sont parvenus à des conclusions qui diffèrent de celles obtenues au cours de ces travaux. En effet, selon Kharroubi (2013), les écoles anglaises préfèrent l'utilisation des lois de Gumbel, de Weibull et les lois log-Pearson III. Kouider (2003) abonde dans le même sens que les

auteurs précédents. Pour lui, plusieurs hydrologues considèrent la loi Log-normale comme étant une des distributions les plus appropriées pour l'analyse fréquentielle des débits de crues. Les travaux de Koumassi *et al.* (2014) ont porté sur l'analyse fréquentielle des débits moyens journaliers maximaux des stations de Couberi et de Gbassè sur la période 1965-2008 dans le bassin versant de la Sota au Bénin. Il ressort de l'ajustement des séries constituées à cet effet que les débits de pointe s'ajustent bien aux lois de Gumbel et de Log- Pearson III avec une marge d'erreur de 1 à 5 %. Cependant, c'est la loi de Gumbel qui est celle qui a été retenue pour estimer les quantiles des débits maximaux pour différentes périodes de retour (2 à 200 ans) et leurs intervalles de confiance.

Il ressort de cette analyse comparative qu'aucun modèle ne peut être considéré comme supérieur aux autres pour l'ensemble des applications. Par ailleurs, les résultats obtenus ainsi que leur confrontation aux travaux antérieurs montrent que le choix de la meilleure loi n'est pas toujours aisé. A cet effet, Miquel (1984) *in* Gailliez (2013), explique que lorsque plusieurs lois sont plausibles, les critères de jugement suivants peuvent être employés :

- la loi ayant le moins de paramètres est privilégiée si les ajustements sont de qualité similaire;
- à nombre de paramètres égal, l'estimation des deux lois est comparée :
- si elles sont très voisines, la loi la plus simple pour les calculs futurs est retenue ;
- si elles sont nettement différentes, une nouvelle loi doit être trouvée quitte à prendre un paramètre supplémentaire ;
- une loi à 1 ou 2 paramètres sera toujours préférée sauf si la qualité d'ajustement d'une loi à 3 paramètres est nettement supérieure à celle des lois à 2 paramètres.

De nombreux auteurs (Lang, 2007 ; Abdeldjalil, 2010 ; Gbaguidi, 2010 ; Lang, 2011 ; etc.) ont dû renoncer aux choix des données de débit comme variables de définition de systèmes d'alertes de crue. En effet, bien que reconnaissant la qualité des résultats issus de l'analyse fréquentielle pour la détermination des quantiles et seuils d'alerte des aléas liés aux inondations à partir de données de débit, certaines études ont privilégié la nécessité de disposer de longues séries d'observations de débits, et ont donc eu recours aux données de pluviométrie plus disponibles.

6.3.2. DEBITS D'ETIAGES (Q_{MNA})

Il ressort de l'analyse des résultats observés aux différents tests d'hypothèses que les hypothèses H_0 du test d'homogénéité (Wilcoxon) et du test de stationnarité (Kendall) ont été rejetées au niveau de signification de 1% à la station de Bouaflé. Toutefois, ces résultats ne sont pas de nature à remettre en cause les résultats relatifs aux quantiles déterminés à partir de la meilleure loi. En effet, les tests statistiques sont des indicateurs et non une vérité absolue. Ainsi, ils indiquent simplement que si les

hypothèses de base de l'analyse ne sont pas respectées, toutefois, les résultats obtenus restent interprétables et les prévisions qui en découlent doivent être exploitées en tenant compte de l'évolution du contexte réel.

Il ressort de l'analyse statistique effectuée que les Q_{MNA} du bassin versant de la Marahoué sont mieux ajustés avec les modèle Gamma et Weibull. Mais le meilleur modèle est le modèle Gamma. Il est donc recommandé d'utiliser cette loi pour la détermination des seuils d'étiages dans le bassin versant de la Marahoué à travers la détermination des seuils d'alerte, de tolérance et de crise.

Plusieurs travaux portent sur l'analyse fréquentielle des débits d'étiage. On peut les subdiviser en deux groupes. D'une part, les travaux dont les conclusions sont similaires aux résultats obtenus au cours de cette étude. D'autre part, les travaux dont les résultats diffèrent de ceux obtenus dans ce travail.

Pour ce qui concerne les premiers, une analyse fréquentielle des débits minimums annuels de 37 cours d'eau des Etats-Unis a été menée par Joseph (1970) cité par Edgar (2008) à partir de 4 distributions théoriques (Gamma, Log-normale à 2 paramètres, Normale, Weibull). Les conclusions de l'étude ont montré que la loi Gamma s'avère être la plus adaptée suivie de la loi de Weibull et la loi Lognormale. A cela s'ajoutent les travaux de Matalas (1963) cité par Edgar (2008). L'étude est relative à la probabilité de distribution des étiages sur les séries de débits minimaux annuels de 34 cours d'eau aux États-Unis. Les données ont été ajustées à des lois à trois paramètres que sont la loi Weibull, la loi Pearson type 3 et la loi Log-normale. Il est parvenu à la conclusion selon laquelle les lois Weibull et Pearson type 3 s'ajustent au mieux aux données de débits minimaux.

Selon le deuxième cas, les travaux de Kouassi *et al.* (2019) portant sur le bassin versant du N'Zi-Bandama (Côte d'Ivoire) sont parvenus à des résultats différents. En effet, les auteurs ont appliqué les lois de distribution telles que la loi Log-normale, la loi Exponentielle, la loi Gamma et la loi de Weibull, pour la modélisation statistique des débits moyens des mois de janvier, février et mars, qui ont été identifiés comme les mois dont les débits sont inférieurs aux débits de fréquence 0,2 (Q_{MNA-5}). Les paramètres des différentes lois ont été estimés par la méthode des maximums de vraisemblance et la méthode des moments pondérés. Les fréquences empiriques ont été calculées à partir de la relation de Hazen. L'ajustement a été apprécié à partir de représentations graphiques et du test de Khi-deux. Deux critères (critère d'Akaike et critère Bayésien) ont été retenus pour trancher sur le choix des meilleurs modèles. Les principaux résultats obtenus ont montré que les débits moyens mensuels de basses eaux du bassin versant du N'Zi-Bandama sont mieux ajustés par la loi Log-normale qui est suivie par la loi Exponentielle, ensuite viennent respectivement la loi Gamma et la loi Weibull.

Mekhloufi (2014) a effectué la prédétermination et la prévision des étiages des oueds de l'Algérie septentrionale. Il ressort de ce travail que trois lois sont fréquemment employées pour l'étude des étiages (loi Log-normal, loi Weibull et loi Exponentielle). Les conclusions de son étude ont établi que la loi Log-normale s'ajuste au mieux aux données des débits d'étiage. Par ailleurs, pour Caruso (2000) cité par Lang (2007), les lois les plus fréquemment utilisées pour ajuster les débits d'étiage sont les lois Log-normale, GEV, Weibull, Gamma, Pearson type 3 et Log Pearson type 3. Cependant, l'auteur a préconisé dans ses travaux sur la Nouvelle-Zélande, la loi de Pareto.

Yue et Pilon (2004) qui ont travaillé sur le Canada, ont testé 10 lois statistiques : Log-normale à 2 et 3 paramètres, Gamma, Weibull type 2 et 3, Logistique, GEV, Gamma Pearson, Pearson 3 et Log-Pearson type 3. Ils en concluent que la loi Pearson type 3 est la mieux adaptée aux débits d'étiage.

Comme le présente cette analyse bibliographique, il est difficile de définir une loi unique pour l'analyse fréquentielle des débits d'étiage. Il n'existe donc pas de loi unique qui permette d'ajuster convenablement toutes les données des stations, comme le précise Lang (2007).

Une comparaison entre les seuils d'étiages déterminés au cours de ce travail et ceux issus des travaux antérieurs a été effectuée. Il ressort que les seuils d'étiages définis sont compris entre ceux des stations de Fétékro et M'Bahiakro (Kouassi *et al.*, 2018b). Ainsi, le seuil d'alerte (Q_{MNA-5}) est compris entre 0,124 m³/s (Fétékro) et 0,167 m³/s (M'Bahiakro). Le seuil de vigilance appartient à l'intervalle 0,136 m³/s (Fétékro)-0,184 m³/s (M'Bahiakro). Quant au seuil de crise, il est compris entre 0,11 m³/s (Fétékro) et 0,15 m³/s (M'Bahiakro). Il est donc constaté une hétérogénéité de la répartition du Q_{MNA-5} en Côte d'Ivoire. Ce constat a déjà été fait par Garcia (2016) au niveau de la France. Le bassin versant de la Marahoué, à l'image du bassin versant du N'Zi, tous deux, affluents du Bandama, ont des valeurs de Q_{MNA-5} faibles qui traduisent des étiages non soutenus. Ce caractère hydrologique serait lié à la capacité du réservoir sol. En effet, en période d'étiage, les cours d'eau sont soutenus par les réserves souterraines. Les principales conclusions auxquelles qui ressortent, ont justifié la nécessité de déterminer les seuils d'étiage afin d'anticiper sur ces phénomènes pour une gestion durable des ressources en eau en Côte d'Ivoire. En effet, la plupart des villes de l'intérieur du pays situées sur le socle cristallin et cristallophyllien sont alimentées à partir des eaux de surface.

CONCLUSION PARTIELLE

Cinq lois de distribution ont été retenues pour la modélisation statistique des crues (la loi Gamma, la loi Weibull, la loi Exponentielle, la loi Log-normale, la loi Pearson de type III). Elles ont été ajustées aux Q_{JMAX} de la période 1961-2017. Les principaux résultats obtenus ont montré que les Q_{JMAX} de la Marahoué suivent préférentiellement la loi Gamma qui représente le modèle statistique qui ajuste au

mieux ces données. Il est suivi par la loi Log normal et en troisième position vient la loi Weibull. Ainsi, la loi Gamma a été utilisée pour la définition du système d'alertes précoces des crues dans le bassin versant de la Marahoué à travers la détermination des seuils de vigilance ($927 \text{ m}^3/\text{s}$), d'alerte ($1030 \text{ m}^3/\text{s}$) et de crise ($1133 \text{ m}^3/\text{s}$). Les seuils de crues déterminés constituent un système d'alertes de crues afin de donner des alertes précoces aux populations pour une gestion durable des inondations dans le bassin versant de la Marahoué en Côte d'Ivoire. Il s'agit donc de gagner en capacité d'anticipation pour gérer les crises provoquées par les inondations et d'assurer aux services de l'Etat et aux collectivités un délai suffisant à la mise en application de plans de secours dans le bassin versant de la Marahoué.

Quant à la modélisation statistique des étiages, elle a fait l'objet d'implémentation des lois Gamma, Weibull et exponentielle. Les principaux résultats obtenus ont montré que les Q_{MNA} de la Marahoué suivent préférentiellement la loi Gamma qui représente le modèle statistique qui ajuste au mieux ces données. Elle est suivie par la loi Weibull et en dernière position la loi Exponentielle. Ainsi, la loi Gamma a été utilisée pour la définition du système d'alertes précoces des étiages dans le bassin versant de la Marahoué à travers la détermination des seuils d'alerte ($0,142 \text{ m}^3/\text{s}$), de vigilance ($0,156 \text{ m}^3/\text{s}$) et de crise ($0,127 \text{ m}^3/\text{s}$). Il ressort que les seuils d'étiages définis sont faibles, traduisant des étiages non soutenus par les réserves souterraines.

CHAPITRE 7. ANALYSE PROSPECTIVE DES DÉBITS EXTRÊMES ET CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES DE LA MARAHOÛÉ

7.1. ANALYSE PROSPECTIVE DES DÉBITS EXTRÊMES

7.1.1. ANALYSE DES DONNÉES CLIMATIQUES FUTURES

7.1.1.1. Analyse des données pluviométriques futures

La figure 75 met en évidence la tendance des moyennes et écart-types entre la période de référence (1961-1990) et les normales prévues (2031-2060 et 2071-2100). De manière générale, le mois de mars sonne l'alerte de la période pluvieuse avec des valeurs légèrement supérieures à 50 mm. Le pic de la saison pluvieuse apparaît au mois de septembre pour les normales 1961-1990 et 2071-2100. La normale 2031-2060, quant à elle présente le pic au mois d'août. Les normales prévues sont plus humides que la normale de référence. Le contraste mis en exergue au travers de l'écart-type nous montre que les données prévues sont hétérogènes. Cette dispersion est plus importante aux mois d'avril à octobre. Ainsi par rapport aux valeurs moyennes, la tendance des précipitations prévues est plus forte en période pluvieuse et inversement en période sèche (avec les mois de janvier, février, novembre et décembre).

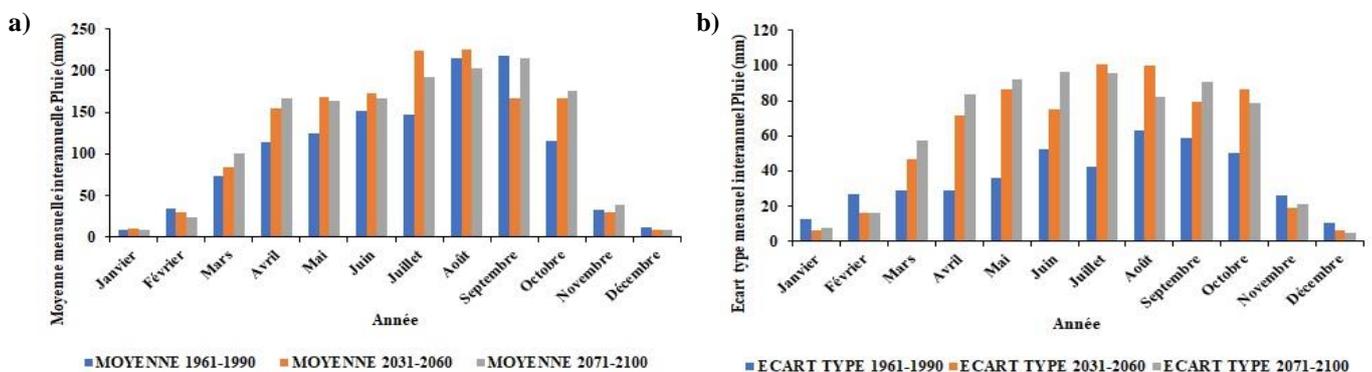


Figure 75 : Moyennes (a) et écart-types (b) mensuels de la pluie sur le bassin versant de la Marahoué aux horizons passé (1961-1990) et futurs (2031-2060 et 2071-2100)

A l'échelle annuelle, les indices normalisés de la pluie (Figure 76) montrent une prédominance des années sèches sur la normale 2031-2060. Par ailleurs, même si on observe une légère remontée de la courbe de tendance, elle reste cependant inférieure à la valeur nulle. S'agissant de la normale 2071-2100, une tendance normale est observée c'est-à-dire une alternance de périodes humides et de périodes sèches. Toutefois la période sèche reste plus importante et l'allure de la courbe de tendance est à la baisse jusqu'à la dernière période (période sèche).

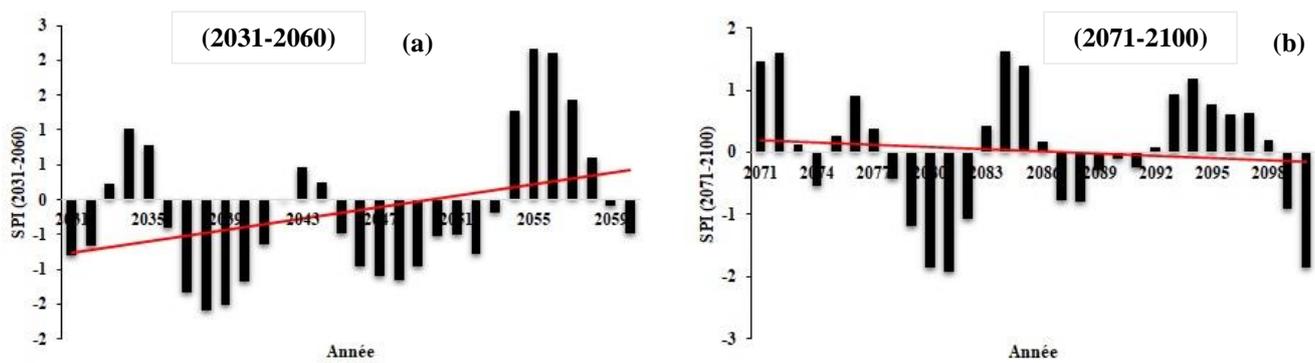


Figure 76 : Indices annuels normalisés des pluies sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (b).

Les biais de pluies annuelles sont respectivement de +15,68% pour la période 2031-2060 et +17,62% pour la période 2071-2100. Ces résultats traduisent une reprise des précipitations aux horizons futurs malgré les tendances différentes. La figure 77, met en évidence les valeurs de biais mensuels interannuels de la pluviométrie sur les normales 2031-2060 et 2071-2100. Les biais mensuels à l’horizon 2031-2060 varient entre -24,32 et 52,14% avec une moyenne de 12,01%. Les mois de janvier, mars, avril, mai, juin, juillet, août et octobre, connaîtront une augmentation de leurs hauteurs pluviométriques à l’horizon 2031-2060. Quant aux mois de février, septembre, novembre et décembre, ils connaîtront une baisse de leurs hauteurs pluviométriques à l’horizon 2031-2060.

S’agissant de l’horizon 2071-2100, les biais mensuels oscillent entre -30,67 et 51,52% avec une moyenne de 14,27%. Les mois de janvier, mars, avril, mai, juin, juillet, octobre et novembre connaîtront une augmentation de leurs hauteurs pluviométriques. En ce qui concerne les mois de février, août, septembre et décembre, ils connaîtront une baisse de leurs hauteurs pluviométriques à l’horizon 2071-2100.

En passant du milieu du siècle (2031-2060) à la fin du siècle (2071-2100), il est constaté une intensification de la baisse de la pluviométrie au mois de février, alors qu’il est observé une reprise des précipitations aux mois de septembre et novembre.

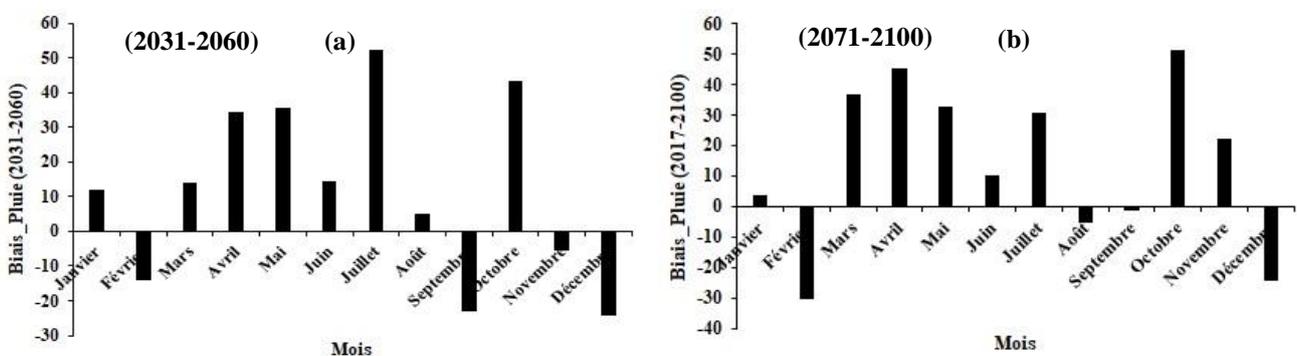


Figure 77 : Biais mensuels interannuels de la pluviométrie sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (b) au niveau du bassin versant de la Marahoué.

7.1.1.2. Analyse des données d'ETP futures

La figure 78 présente l'évolution des moyennes et écart types de l'ETP entre la période de référence (1961-1990) et les normales prévues (2031-2060 et 2071-2100). Cette répartition inter annuelle permet d'identifier le pic de l'ETP au mois de mars, suivi des mois d'avril et mai pour les normales 1961-1990, 2031-2060 et 2071-2100. Par ailleurs, il est observé que les valeurs des moyennes mensuelles interannuelles d'ETP des normales 2031-2060 et 2071-2100 sont très proches et restent supérieures à celles de la période de référence 1961-1990 à l'exception du mois de février. Le cumul annuel d'ETP augmente sur les horizons futurs.

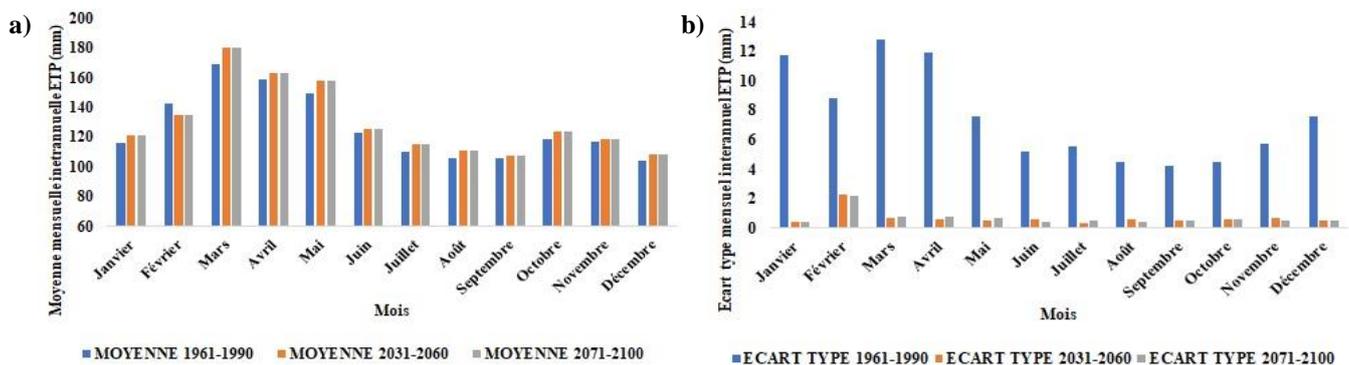


Figure 78 : Moyennes (a) et écart-types (b) mensuels de l'ETP sur le bassin versant de la Marahoué aux horizons passés et futurs.

A l'échelle annuelle, les indices normalisés de l'ETP (Figure 79) montrent une prédominance des années humides sur les normales 2031-2060 et 2071-2100. Il est ainsi observé une croissance de la courbe de tendance sur la période (2031-2060), contre une tendance à la baisse sur la période (2071-2100).

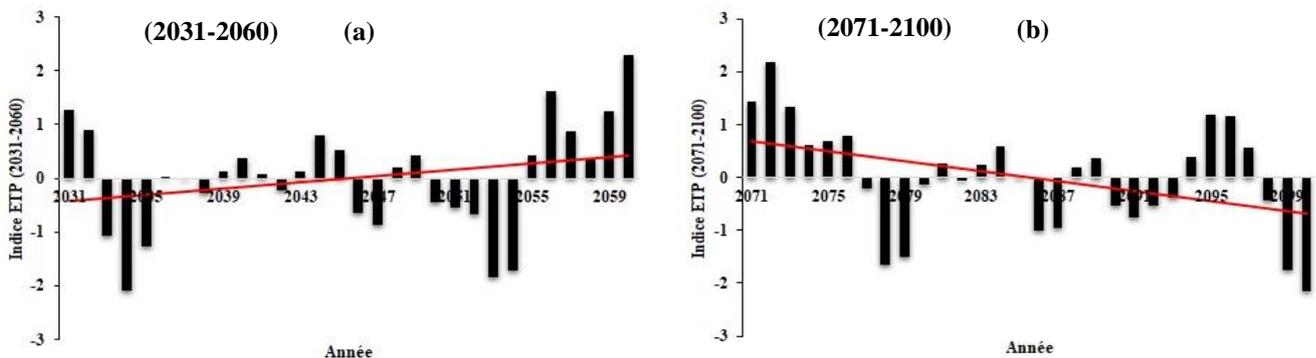


Figure 79 : Indices annuels normalisés des ETP sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (b).

Les biais d'ETP annuelles sont respectivement de +3,13% pour la période 2031-2060 et +3,12% pour la période 2071-2100. Ces résultats traduisent une faible reprise de l'évapotranspiration potentielle aux horizons futurs.

La figure 80, met en évidence les valeurs de biais mensuels interannuels de l’ETP sur les normales 2031-2060 et 2071-2100. Les biais mensuels aux deux horizons présentent une évolution semblable. Ainsi, sur l’horizon 2031-2060, ils varient entre -5,01 et 6,44% avec une moyenne de 3,14% tandis que sur l’horizon 2071-2100, ils oscillent entre -5,07 et 6,55% avec une moyenne de 3,13%. Par ailleurs, sur les douze mois de l’année, seul le mois de février connaîtra une baisse significative de l’ETP.

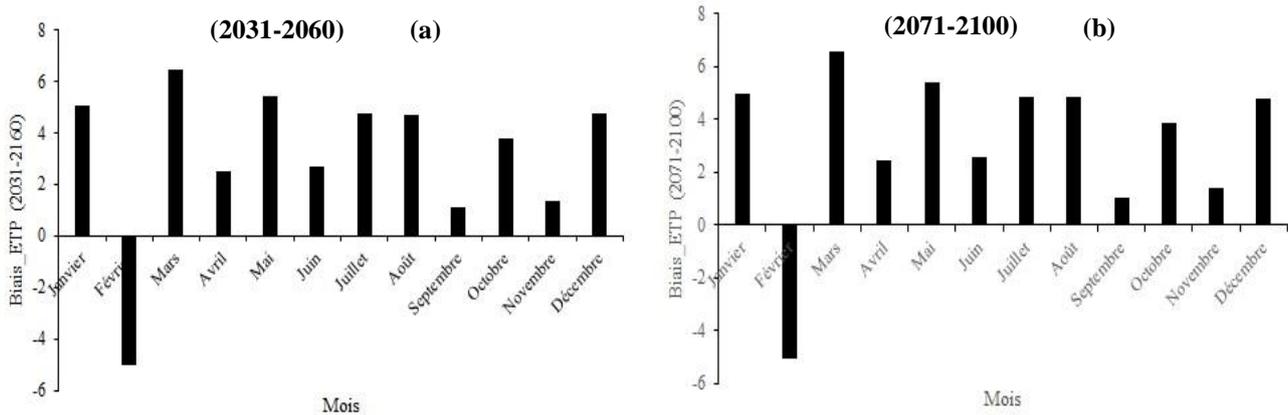


Figure 80 : Biais mensuels interannuels de l’ETP sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (b) au niveau du bassin versant de la Marahoué

7.1.2. PERFORMANCE DU MODÈLE GR2M

Le calage et la validation ont été effectués respectivement sur la période 1961- 1990 et 1991-2017 pour la station de Bouaflé. Les résultats consignés dans le tableau XX montrent qu’il existe une bonne corrélation entre les débits observés et ceux calculés. En effet, le coefficient Nash en phase de calage a été de 79% et en phase de validation 84%. Dans l’ensemble, le modèle GR2M donne des résultats très satisfaisants avec une valeur de la robustesse de +5%.

Tableau XX : Performance du modèle GR2M

| Paramètre | | Calage | | Validation | | Critère de robustesse |
|---------------------|----------------|-----------|----------|------------|----------|-----------------------|
| X ₁ (mm) | X ₂ | Période | Nash (%) | Période | Nash (%) | Nash (%) |
| 1211,97 | 0,63 | 1961-1990 | 79 | 1991-2017 | 84 | +5 |

Ces résultats numériques sont confirmés par une bonne similitude entre hydrogrammes observés et calculés aux phases de calage et de validation (figures 81 et 82). La dynamique des écoulements est

bien respectée et les débits extrêmes sont correctement reproduits en général. Toutefois, en regardant de plus près, on s'aperçoit qu'il existe un certain décalage entre les hydrogrammes mesurés et les hydrogrammes calculés par le modèle GR2M. Ces décalages sont plus marqués au niveau des débits de pointe qui sont généralement mal reproduits par le modèle GR2M. A ce niveau, le modèle sous-estime les volumes écoulés.

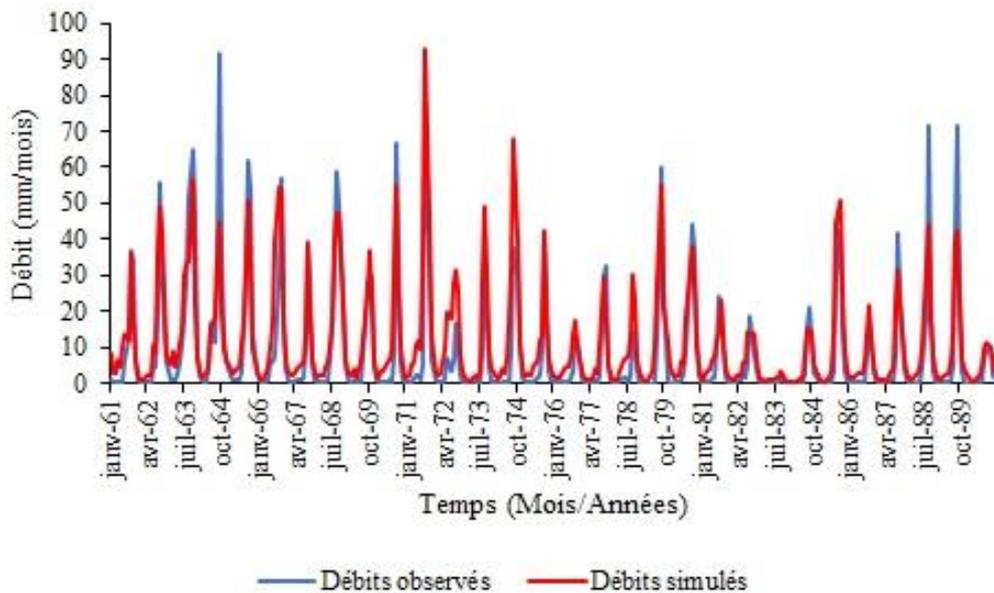


Figure 81 : Débits observés et simulés en phase de calage par GR2M

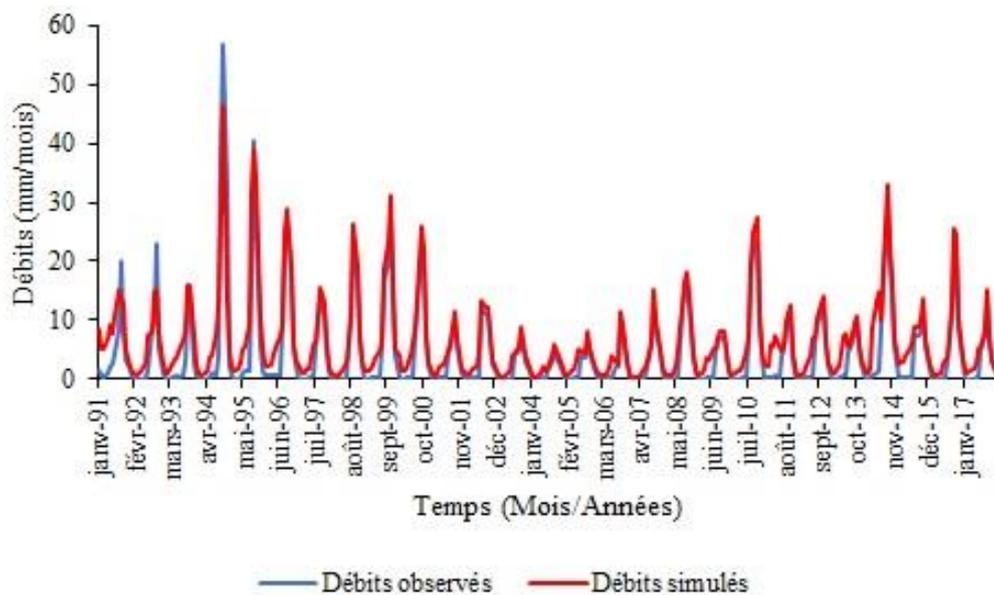


Figure 82 : Débits observés et simulés en phase de validation par GR2M

7.1.3. ANALYSE STATISTIQUE DES DÉBITS FUTURS

7.1.3.1. Analyse des modules et débits mensuels futurs

La figure 83 met en évidence les indices annuels normalisés ou Standardised Flow Index (SFI) de débits futurs. La normale 2031-2060 laisse apparaître sur les dix (10) dernières années une tendance à la hausse des débits. A l'échelle annuelle, les indices normalisés sur la normale 2031-2060 mettent en évidence une tendance normale, à savoir une alternance de périodes excédentaires et de périodes déficitaires. Par ailleurs, l'allure générale de la courbe de tendance est croissante. En ce qui concerne la normale 2071-2100, on observe toujours une période normale, cependant l'allure générale de la courbe de tendance est en baisse.

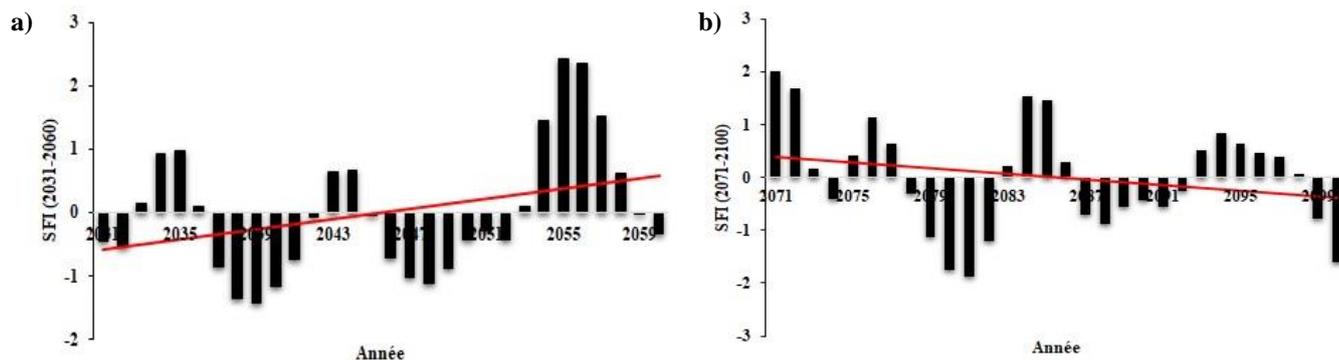


Figure 83 : Indices annuels normalisés des débits sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (b)

La figure 84 met en évidence les moyennes et écart-types mensuels des débits de la période de référence et des débits prévus. Les débits de la période de référence 1961-1990 sont plus importants sur la période des hautes eaux (août à novembre) avec le pic en septembre. Les valeurs des normales 2031-2061 et 2071-2100 bien que très faibles comparativement aux données historiques respectent l'allure générale de la tendance saisonnière.

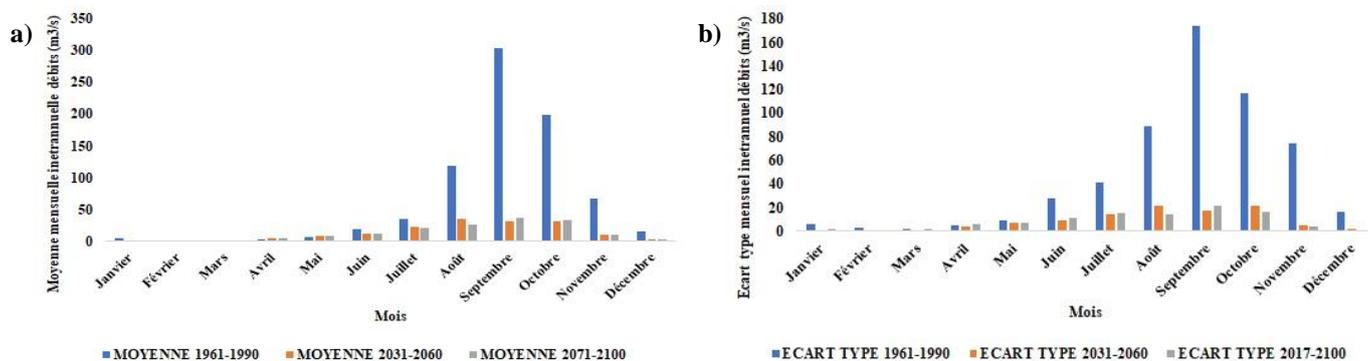


Figure 84 : Moyennes (a) et écart-types (b) mensuels interannuels des débits à la station de Bouaflé aux horizons passés et futurs

Les biais de débits annuels sont respectivement de -79,20% pour la période 2031-2060 et -78,86% pour la période 2071-2100. Ces résultats traduisent une baisse des débits aux horizons futurs malgré les tendances différentes.

La figure 85 présente les valeurs de biais mensuels interannuels des débits sur les normales 2031-2060 et 2071-2100. Les biais mensuels à l’horizon 2031-2060 varient entre -89,81% et 10,58% avec une moyenne de -49,80%. Les mois d’avril et mai connaîtront une augmentation du volume des débits à l’horizon 2031-2060. En revanche, les mois de janvier, février, mars, juin, juillet, août, septembre, octobre, novembre et décembre connaîtront une baisse des débits à l’horizon 2031-2060.

Pour ce qui est de l’horizon 2071-2100, les biais mensuels oscillent entre -87,54% et 48,81% avec une moyenne de -42,83. Les mois de mars, avril et mai connaîtront une augmentation des débits. Par ailleurs, les mois de janvier, février, mars, juin, juillet, août, septembre, octobre, novembre et décembre, connaîtront une baisse débits à l’horizon 2071-2100.

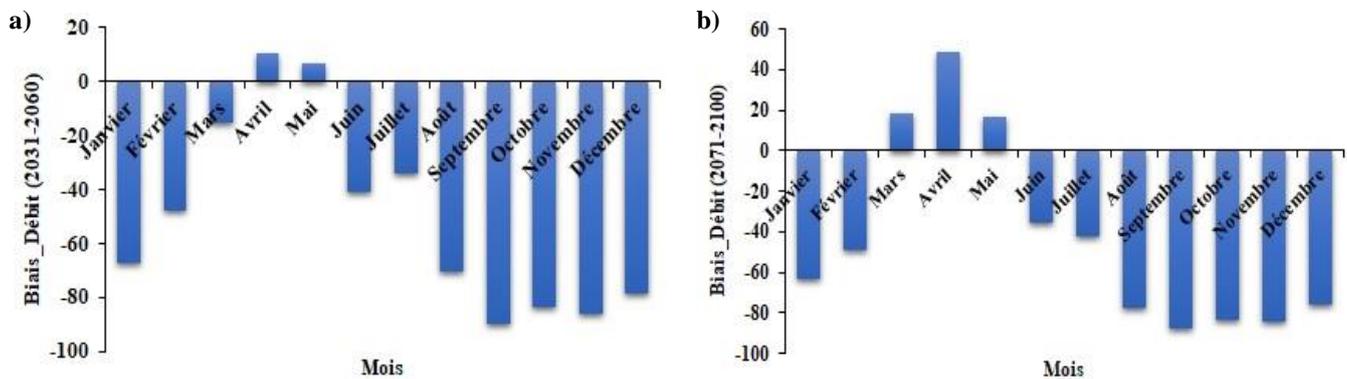


Figure 85 : Biais mensuels interannuels du débit sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (b)

7.1.3.2. Analyse des débits extrêmes

Les caractéristiques des débits extrêmes des normales 2031-2060 et 2071-2100 sont consignées dans les tableaux XXI et XXII. Aucune valeur négative n’a été observée sur toutes les prévisions. Les débits de basses eaux présentent les valeurs les plus faibles sur la normale (2031-2060). A l’inverse, les débits de hautes eaux enregistrent les valeurs les plus élevées sur la période 2071-2100.

Tableau XXI : Caractéristiques statistiques des débits extrêmes de la Marahoué sur la période 2031-2060

| Débits extrêmes (m ³ /s) | Minimum | Maximum | Moyenne | Ecart-type |
|---|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| QMNA | 0,12 | 2,44 | 0,78 | 0,46 |
| QJFM | 0,28 | 5,27 | 1,39 | 0,92 |
| QFMA | 0,20 | 6,00 | 2,25 | 1,50 |
| QMXA | 14,43 | 88,96 | 47,67 | 20,26 |
| QASO | 7,09 | 67,84 | 32,72 | 15,78 |
| QSON | 5,44 | 53,79 | 24,08 | 13,10 |

Tableau XXII : Caractéristiques statistiques des débits extrêmes de la Marahoué sur la période 2071-2100

| Débits extrêmes (m ³ /s) | Minimum | Maximum | Moyenne | Ecart-type |
|---|----------------|----------------|----------------|-------------------|
| QMNA | 0,30 | 2,42 | 0,85 | 0,41 |
| QJFM | 0,68 | 4,76 | 1,65 | 0,95 |
| QFMA | 0,47 | 10,79 | 2,93 | 2,24 |
| QMXA | 15,92 | 93,13 | 46,40 | 17,41 |
| QASO | 13,28 | 70,42 | 32,55 | 13,61 |
| QSON | 11,00 | 59,01 | 27,29 | 11,53 |

Les valeurs de biais obtenues pour les débits extrêmes sont toutes négatives en ce qui concerne la normale 2031-2060 et fluctuent entre -87% (Q_{SON}) et -11% (Q_{FMA}). Pour ce qui est de la normale 2071-2100, la tendance des biais oscille entre -85% et +16%. La seule valeur positive étant observée au débit saisonnier Q_{FMA}, tandis que la valeur maximale est affectée au débit Q_{SON} soit -85% (Figure 86).

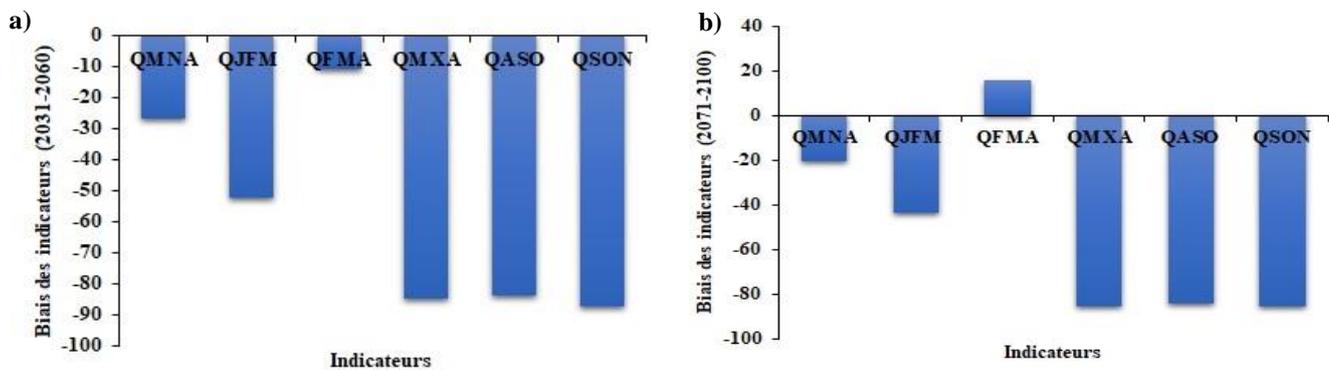


Figure 86 : Biais des indicateurs de débits extrêmes de la Marahoué sur les normales 2031-2060 (a) et 2071-2100 (b)

7.1.3.3. Analyse des fréquences d'occurrence

L'évolution des fréquences d'occurrence mensuelle pour la normale de référence et les tendances prévues, mettent en avant un changement des périodes de basses eaux et hautes eaux (figure 87, 88, et 89). En effet, s'agissant de la normale de référence 1961-1990, la fréquence des Q_{MNA} s'étend des mois de janvier à mai ainsi que le mois de juillet. Le pic est observé au mois de mars, suivi du mois de février, les taux restent très faibles pour les mois de mai et juillet. La normale 2031-2060 présente des fréquences aux mois de décembre, février, mars, avril et mai, tandis que la normale 2071-2100 affiche les fréquences pour les mois de janvier, février, mars et avril. Aussi, le mois de février présente le pic, suivi du mois de mars. En ce qui concerne les Q_{MXA} , les fréquences d'occurrence mensuelle pour ce qui est de la période de référence (1961-1990), sont perceptibles aux mois d'août, septembre, octobre et novembre, avec un pic qui s'observe au mois de septembre soit 77%. Alors que la normale 2071-2100 présente un pic également au mois de septembre avec un niveau de 43%, la normale 2031-2060 affiche le taux le plus élevé au mois d'août, soit 37%. La fréquence du mois d'octobre vient en seconde position sur les trois normales avec des taux compris entre 13% et 40%.

De la normale passée (1961-1990) aux normales futures (2031-2060 ;2071-2100), il est observé une réduction du nombre de mois d'occurrence des Q_{MNA} . En effet, on passe de six (6) mois au niveau de la normale 1961-1990, à 5 moins à la normale 2031-2060 pour finir à quatre (4) mois à la normale 2071-2100. Par ailleurs, le trimestre février-mars-avril reste la saison la plus affectée de toutes les périodes passées comme futures par les basses eaux de la Marahoué.

Aux horizons futurs, les hautes eaux sont attendues plus tôt que la période passée (1961-1990). Ces crues arriveront en juin (2031-2060) voire juillet (2071-2100). En outre, le trimestre août-septembre-octobre reste la saison la plus touchée par les hautes eaux quelle que soit la période d'observation.

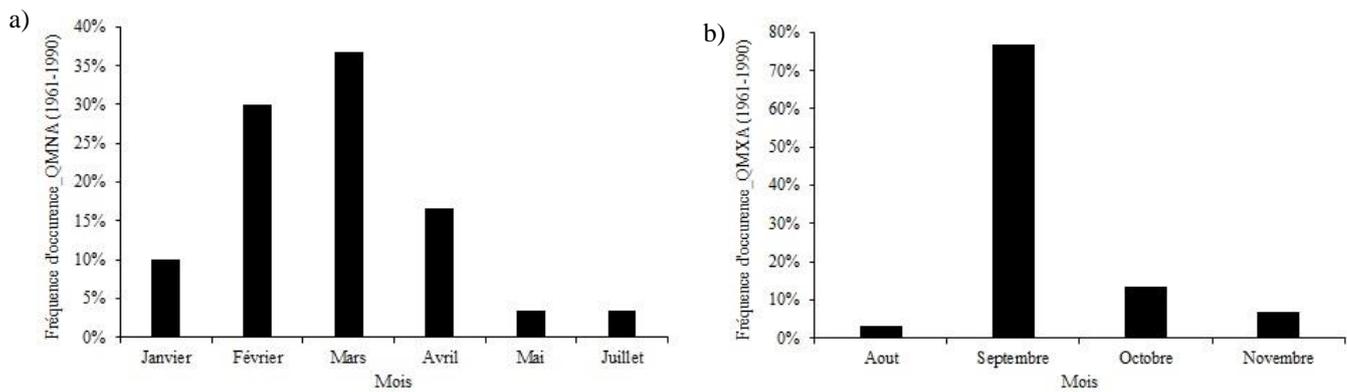


Figure 87 : Fréquences d'occurrence mensuelle des Q_{MNA} (a) et Q_{MXA} (b) sur la normale de référence 1961-1990 à la station de Bouaflé

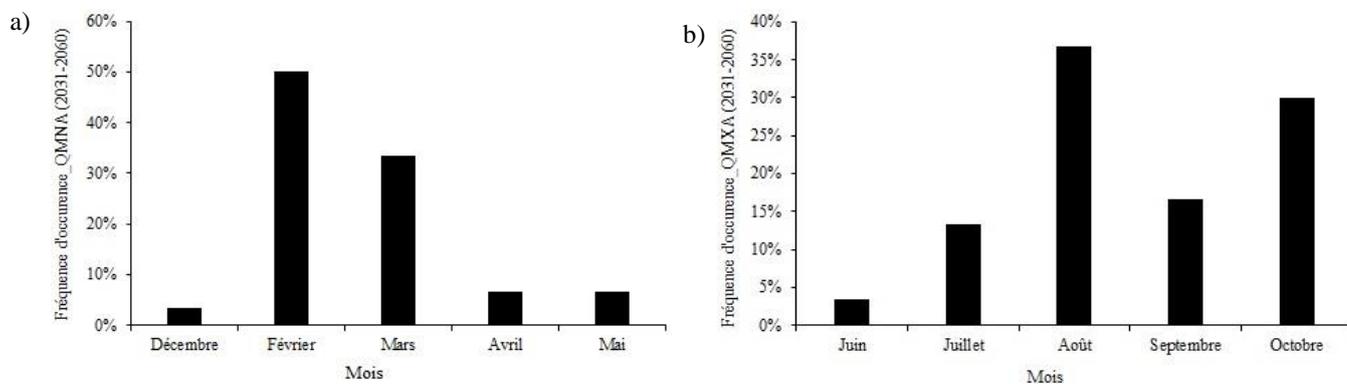


Figure 88 : Fréquences d'occurrence mensuelle des Q_{MNA} (a) et Q_{MXA} (b) sur la normale 2031-2060 à la station de Bouaflé

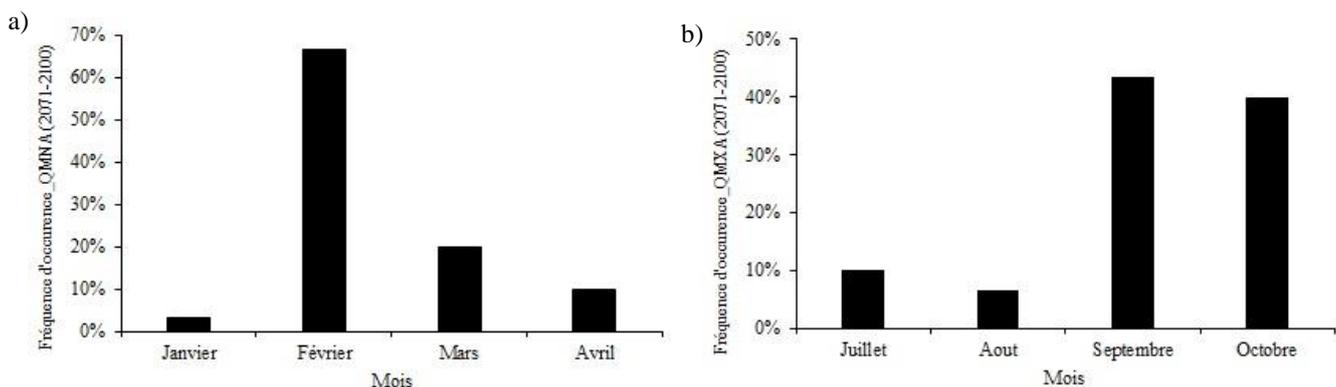


Figure 89 : Fréquences d'occurrence mensuelle des Q_{MNA} (a) et Q_{MXA} (b) sur la normale 2071-2100 à la station de Bouaflé

La fréquence de distribution des Q_{MNA} de la période de référence 1961-1990 laisse transparaître quatre classes soit [0-2[, [2-4[, [4-6[et [6-8[(Figure 90). La prédominance est observée à la première classe ([0-2[) qui atteint une fréquence de 87%. On remarque que les normales 2031-2060 et 2071-

2100, avec le nombre de classe similaire, présentent également la même tendance de manière à atteindre une fréquence de 97% pour la première classe (Figure 91 et 92). Ainsi, alors que la fréquence cumulée de 1961-1990 évolue graduellement pour atteindre la valeur maximale à la dernière classe, les fréquences cumulées des normales prévues atteignent les 100% dès la seconde classe ([2-4[).

S'agissant des Q_{MNA} , la situation de la période de référence révèle une augmentation notable de la probabilité d'avoir un épisode humide caractérisé par un débit compris entre 184 et 356 m³/s. Cette fréquence qui sera de 37% pour la période de référence ne sera pas atteinte par les normales 2031-2060 et 2071-2100 qui évoluent différemment. En effet, on aperçoit des niveaux plus modérés avec une fréquence de 100% pour les premières classes qui sont de [14-186[pour la normale 2031-2060 et [15-187[pour la normale 2071-2100 (Figure 93, 94 et 95).

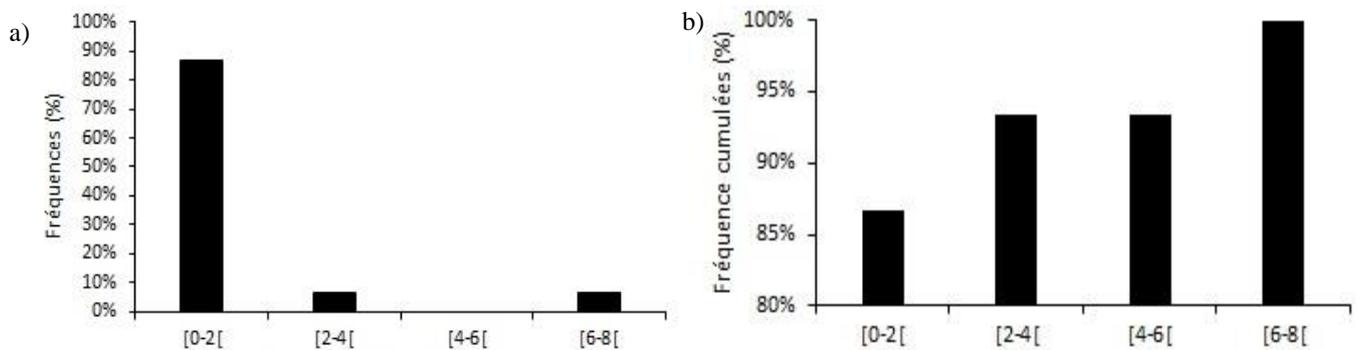


Figure 90 : Fréquences de distribution (a) et cumulées (b) des Q_{MNA} sur la normale 1961-1990 à la station de Bouaflé.

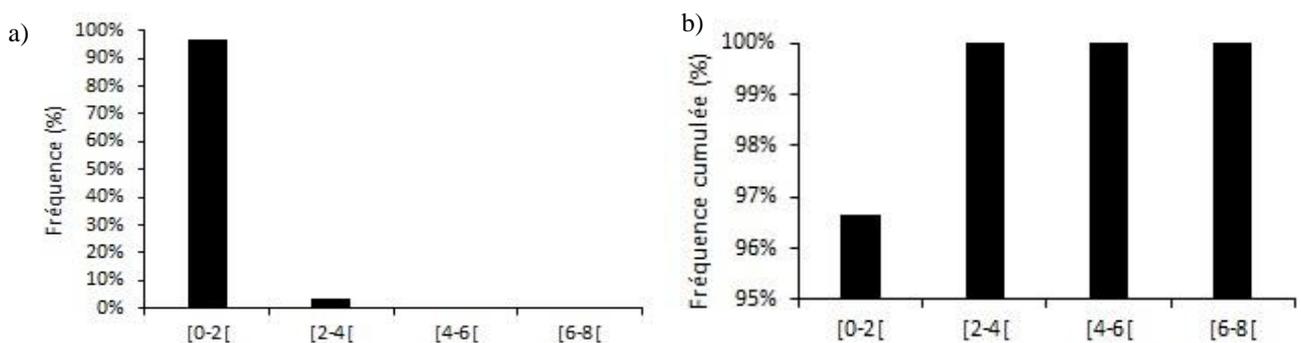


Figure 91 : Fréquences de distribution (a) et cumulées (b) des Q_{MNA} sur la normale 2031-2060 à la station de Bouaflé

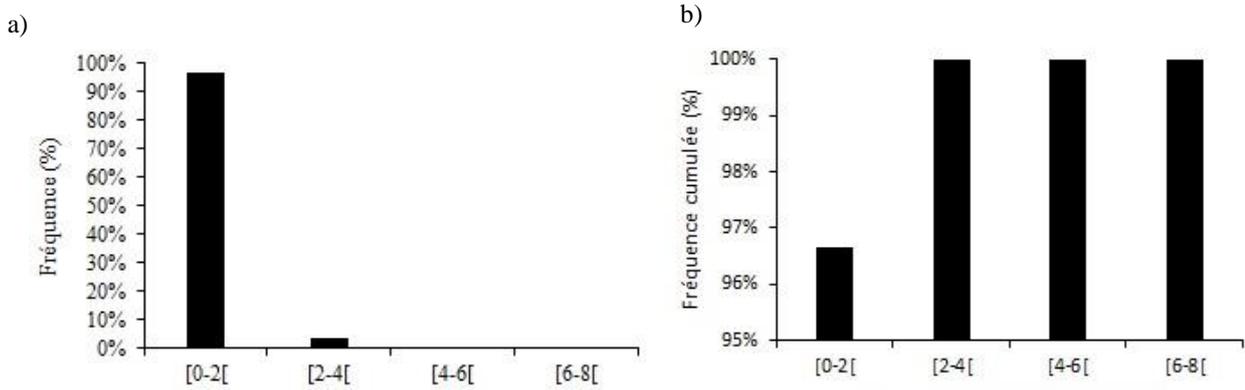


Figure 92 : Fréquences de distribution (a) et cumulées (b) des Q_{MNA} sur la normale 2071-2100 à la station de Bouaflé.

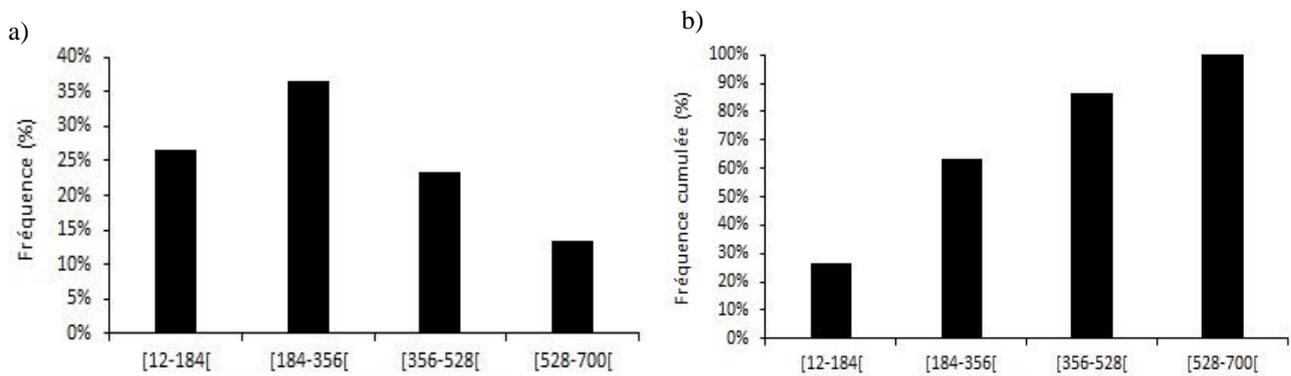


Figure 93 : Fréquences de distribution (a) et cumulées (b) des Q_{MXA} sur la normale 1961-1990 à la station de Bouaflé.

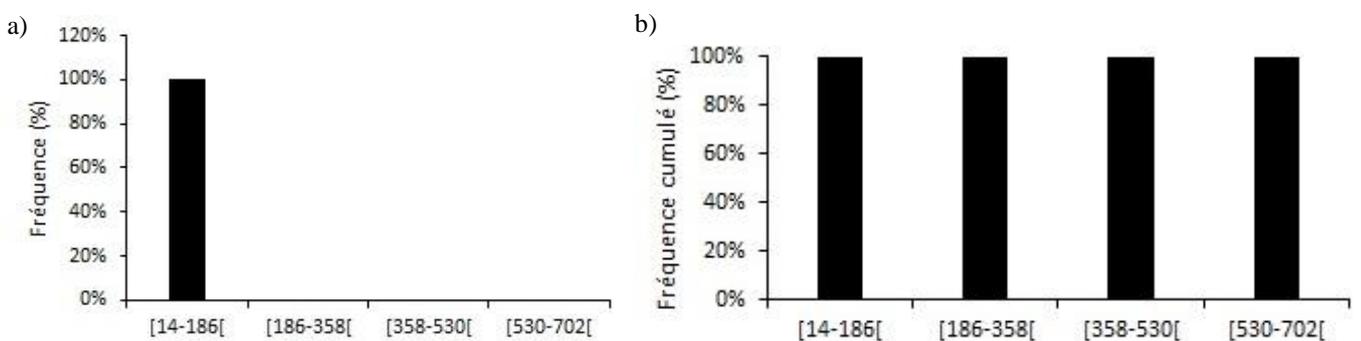


Figure 94 : Fréquences de distribution (a) et cumulées (b) des Q_{MXA} sur la normale 2031-2060 à la station de Bouaflé.

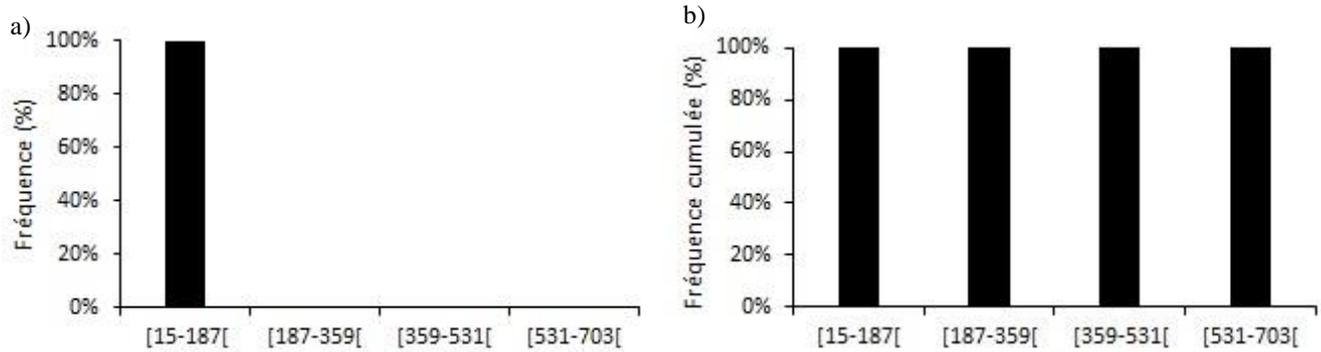


Figure 95 ; Fréquences de distribution (a) et cumulées (b) des Q_{MXA} sur la normale 2071-2100 à la station de Bouaflé

7.2. CARTOGRAPHIE DES RISQUES D'INONDATION

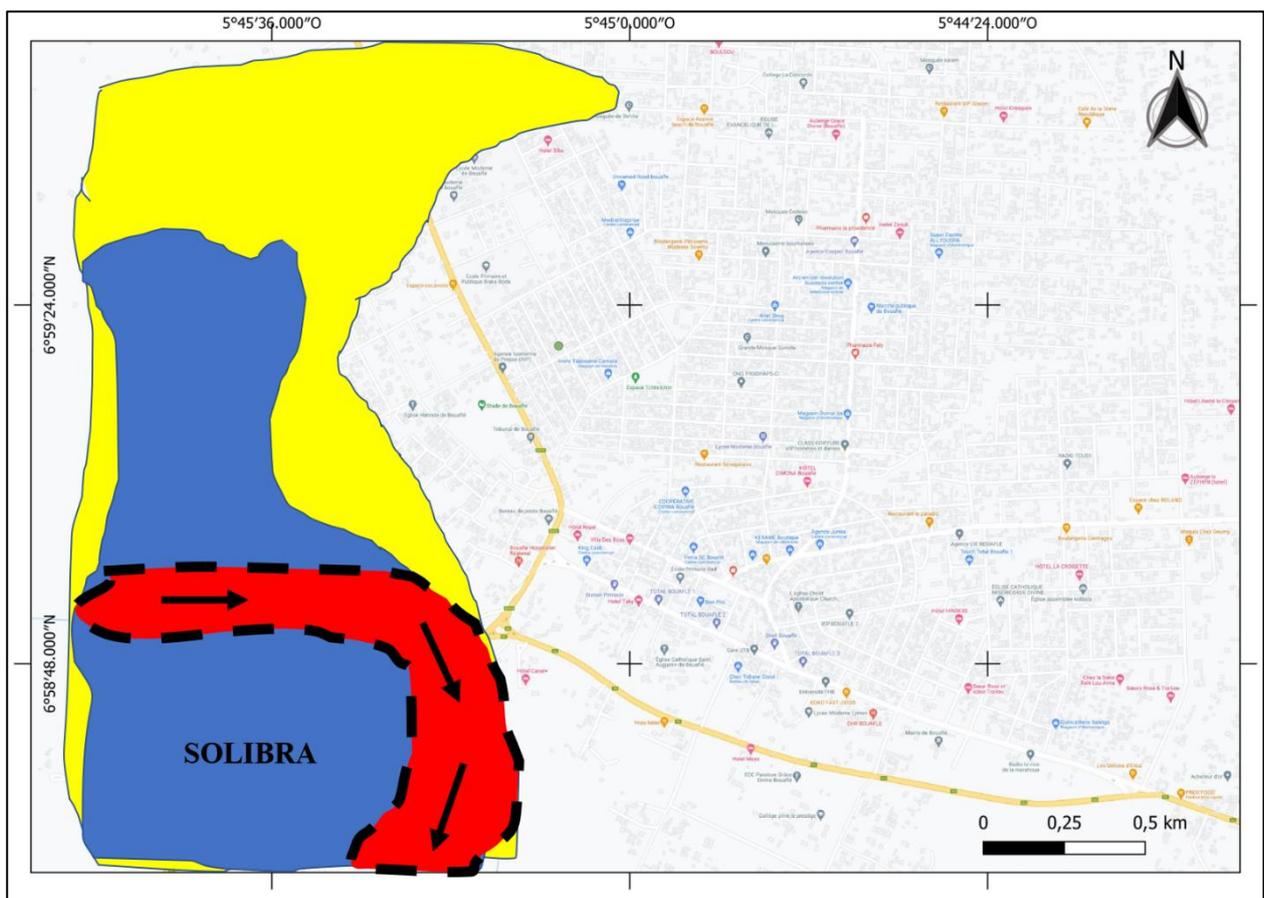
Les résultats du tableau XXV mettent en évidence les sites affectés par les inondations à court (10 ans), moyen (50 ans) et long terme (100 ans). Plus la période de retour est grande (100 ans), le niveau de la hauteur d'eau (H) et la vitesse sont importantes et peuvent atteindre la valeur maximale de 12,9 m dans le lit mineur.

Tableau XXIII : Tableau récapitulatif des zones à risques dans la ville de Bouaflé

| 10 ans | | | | | | | |
|--------------------------------|---------------|-----------------|---------------------------|-----------|-------------|------------------|---------|
| Sites | Hauteur H (m) | Vitesse V (m/s) | V x H (m ² /s) | Intensité | Probabilité | Niveau de danger | Couleur |
| LIT MINEUR | 10,7 | 0,18 | 1,926 | Forte | Forte | Elévé | |
| SOLIBRA | 6,73 | 0,22 | 1,4806 | Moyenne | Forte | Moyen | |
| HOTEL LOPOIFLA | 5,17 | 0,19 | 0,9823 | Moyenne | Forte | Moyen | |
| COMPLEXE HOTELIER LE PACIFIQUE | 2,87 | 0,16 | 0,4592 | Faible | Forte | Faible | |
| STADE MUNICIPAL | 0,35 | 0,21 | 0,0735 | Faible | Forte | Faible | |
| KING CASH | 0,35 | 0,103 | 0,03605 | Faible | Forte | Faible | |
| LYCEE MODERNE DE BOUAFLE | 0,32 | 0,07 | 0,0224 | Faible | Forte | Faible | |
| 50 ans | | | | | | | |
| Sites | Hauteur H (m) | Vitesse V (m/s) | V x H (m ² /s) | Intensité | Probabilité | Niveau de danger | Couleur |
| LIT MINEUR | 12,3 | 0,27 | 3,321 | Forte | Moyenne | Elévé | |
| SOLIBRA | 7,89 | 0,33 | 2,6037 | Forte | Moyenne | Elévé | |
| HOTEL LOPOIFLA | 5,54 | 0,24 | 1,3296 | Faible | Moyenne | Moyen | |
| COMPLEXE HOTELIER LE PACIFIQUE | 3,21 | 0,208 | 0,66768 | Faible | Moyenne | Moyen | |
| STADE MUNICIPAL | 0,56 | 0,28 | 0,1568 | Faible | Moyenne | Faible | |
| KING CASH | 1,58 | 0,21 | 0,3318 | Faible | Moyenne | Faible | |
| ESPACE FIADI | 0,87 | 0,19 | 0,1653 | Faible | Moyenne | Faible | |
| HOTEL KOALA | 0,47 | 0,12 | 0,0564 | Faible | Moyenne | Faible | |
| LYCEE MODERNE DE BOUAFLE | 0,59 | 0,11 | 0,0649 | Faible | Moyenne | Faible | |
| 100 ans | | | | | | | |
| Sites | Hauteur H (m) | Vitesse V (m/s) | V x H (m ² /s) | Intensité | Probabilité | Niveau de danger | Couleur |
| LIT MINEUR | 12,9 | 0,28 | 3,612 | Forte | Faible | Elévé | |
| SOLIBRA | 10,34 | 0,35 | 3,619 | Forte | Faible | Elévé | |
| HOTEL LOPOIFLA | 7,16 | 0,24 | 1,7184 | Moyenne | Faible | Moyen | |
| COMPLEXE HOTELIER LE PACIFIQUE | 5,02 | 0,21 | 1,0542 | Moyenne | Faible | Moyen | |
| STADE MUNICIPAL | 0,6 | 0,28 | 0,168 | Faible | Faible | Faible | |
| KING CASH | 1,7 | 0,23 | 0,391 | Faible | Faible | Faible | |
| ESPACE FIADI | 0,89 | 0,23 | 0,2047 | Faible | Faible | Faible | |
| HOTEL KOALA | 0,53 | 0,12 | 0,0636 | Faible | Faible | Faible | |
| LYCEE MODERNE DE BOUAFLE | 0,58 | 0,18 | 0,1044 | Faible | Faible | Faible | |

Les cartes des zones inondables établies sont illustrées par les figures 96, 97 et 98. Pour une durée de retour de 10 ans, il est observé que seul le lit mineur est affecté par un niveau de danger très fort, justifié par la couleur rouge. La probabilité du danger reste moyenne, mais avec une probabilité forte dans les zones de Solibra et l'hôtel Lopoifla. Pour les autres sites notamment le stade municipal ou encore le lycée moderne de Bouaflé, la probabilité est certes forte mais avec une vitesse de 0,07 présentant une intensité faible. On peut dire que le niveau de danger est tout aussi faible.

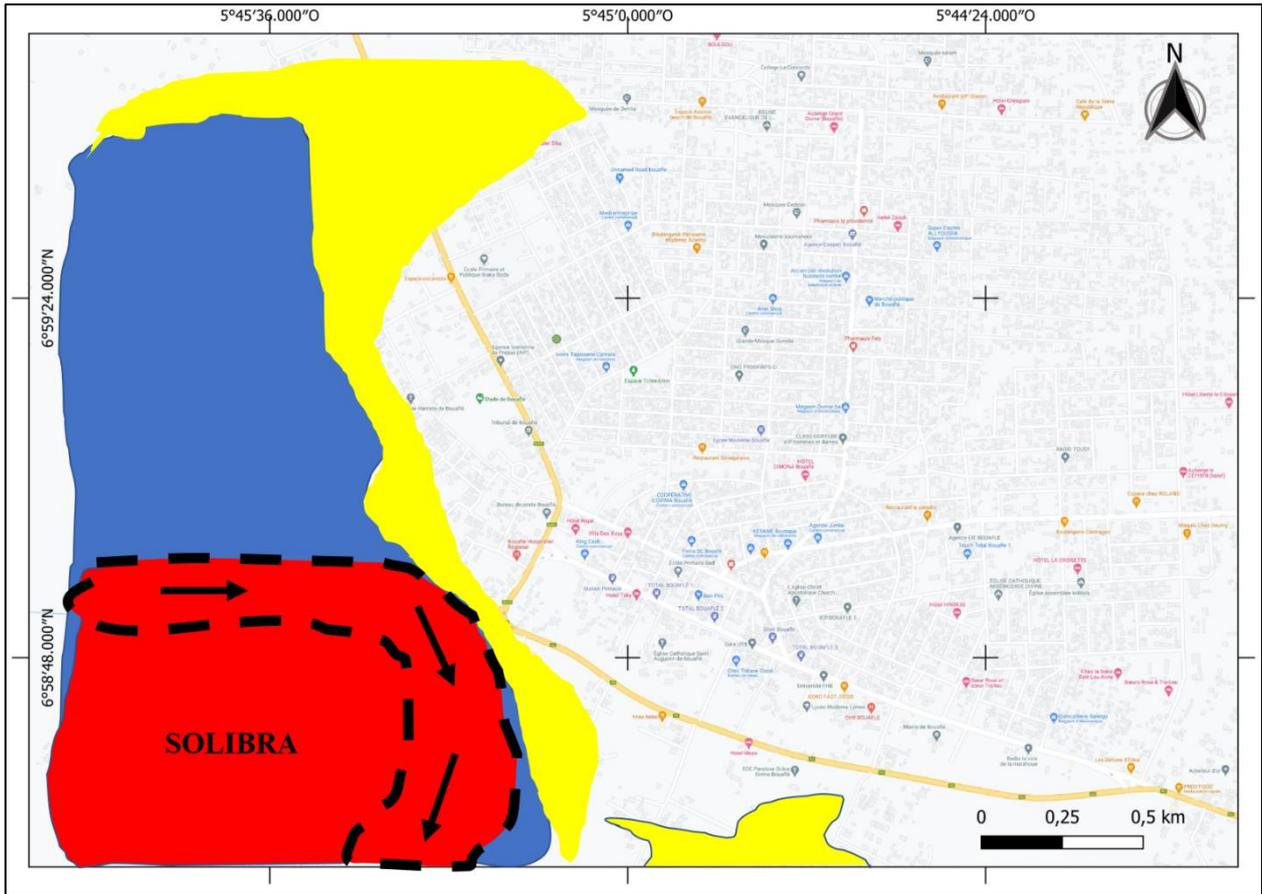
S'agissant des périodes de retour de 50 et 100 ans, deux zones présentent des niveaux de danger élevé et de forte intensité. Même si la probabilité demeure faible, les hauteurs d'eau estimées de 12,9 m (lit mineur) et 10,34 m (Solibra) interpelle sur le niveau de risque encouru.



LEGENDE

- Contours du lit mineur
- Sens de l'écoulement
- Danger faible
- Danger moyen
- Danger élevé
- Route

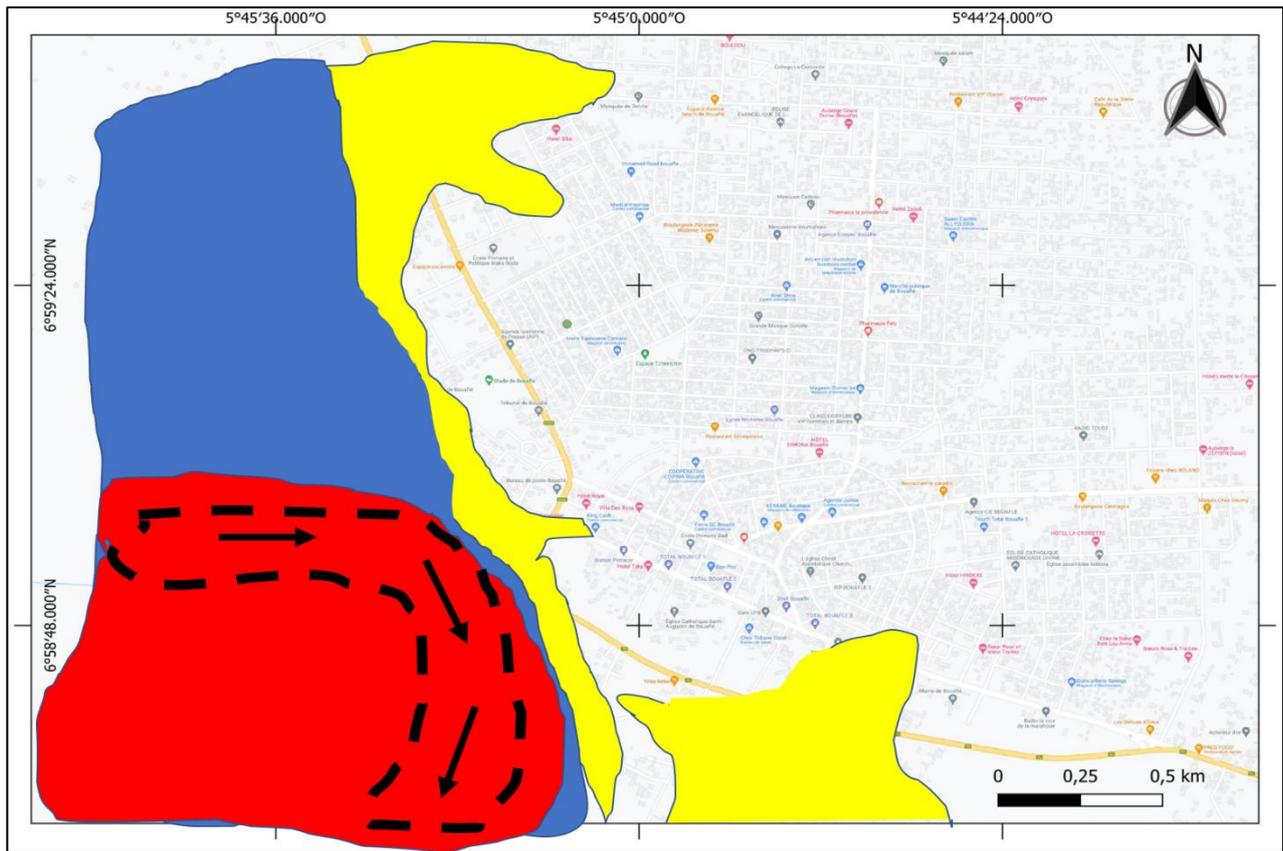
Figure 96 : Zones inondables pour une période de retour de 10 ans à Bouaflé



LEGENDE

- Contours du lit mineur
- Sens de l'écoulement
- Danger faible
- Danger moyen
- Danger élevé
- Route

Figure 97 : Zones inondables pour une période de retour de 50 ans à Bouaflé



LEGENDE

- | | | | |
|------------|------------------------|------------|----------------------|
| --- | Contours du lit mineur | → | Sens de l'écoulement |
| ■ (Yellow) | Danger faible | — (Orange) | Route |
| ■ (Blue) | Danger moyen | | |
| ■ (Red) | Danger élevé | | |

Figure 98 : Zones inondables pour une période de retour de 100 ans à Bouafilé

7.3. DISCUSSION

7.3.1. ANALYSE PROSPECTIVE DES DÉBITS EXTRÊMES

Les résultats obtenus mettent en évidence une augmentation des précipitations sur la période des hautes eaux et inversement en période de basses eaux. Ainsi, le mois de mars sonne l'alerte de la période pluvieuse avec des valeurs légèrement supérieures à 50 mm. Le pic de la saison pluvieuse présente un décalage d'un mois entre les périodes futures, soit le mois d'août pour la période 2031-2060 et le mois de septembre pour la période 2071-2100. Toutefois, les illustrations obtenues au niveau des SPI montrent que l'augmentation constatée au niveau de la pluviométrie sera plus présente au niveau de la période 2031-2060. En effet, les indices annuels normalisés des pluies (SPI) indiquent, une reprise de la tendance pluvieuse observée ces dernières décennies suivie d'un épisode sec se poursuivant jusqu'en 2100. Cette reprise est confirmée par les valeurs des biais annuels sur les différentes périodes. En effet, les biais de pluies annuelles sont respectivement de +15,68% pour la période 2031-2060 et +17,62% pour la période 2071-2100. Toutefois, les biais mensuels évalués sur les périodes futures précisent qu'en passant du milieu du siècle (2031-2060) à la fin du siècle (2071-2100), il sera observé une intensification de la baisse de la pluviométrie au mois de février. Aussi, les résultats obtenus au niveau des ETP contribuent également à mettre en évidence une perturbation du régime hydrométrique. En effet, l'allure générale des valeurs mensuelles interannuelles montre une croissance de l'ETP dans les mêmes proportions que la pluviométrie. Le pic de l'ETP est observé au mois de mars, suivi des mois d'avril et mai pour la période de référence (1961-1990) et les périodes futures (2031-2060 et 2071-2100). Les taux de variation de l'ETP sur les périodes futures sont relativement faibles, à savoir +3,13% pour la période 2031-2060 et +3,12% pour la période 2071-2100. Passant d'une normale à une autre, ces résultats expriment ainsi la persistance des quantités d'eaux susceptibles d'être évaporées.

Par ailleurs, afin de déterminer les débits des horizons futurs, le modèle GR2M a été utilisé. Ce modèle calé et validé sur des périodes historiques a démontré toute sa performance. En effet en phase de calage, le critère de Nash a donné un résultat de 79%. En phase de validation, le résultat a été de 80%. Au regard des bonnes tendances du critère de Nash (supérieur à 70%) et de la robustesse, le modèle GR2M a été retenu pour les projections du régime des écoulements.

La prévision des données de débits corrobore les résultats obtenus précédemment. En effet, la courbe de tendance des SFI, laisse transparaître une croissance des débits sur la période 2031-2060. En revanche, la normale 2071-2100 présente une allure de la courbe de tendance à la baisse. Dans l'ensemble, les indices annuels normalisés des débits (SFI) sur les normales 2031-2060 et 2071-2100 mettent en évidence une alternance régulière entre les périodes humides et sèches, avec un

allongement des épisodes secs. En ce qui concerne les représentations mensuelles interannuelles, il convient de noter que les valeurs des normales 2031-2061 et 2071-2100, bien que très faibles comparativement aux données historiques, respectent l'allure générale de la tendance saisonnière.

Évoluant dans le même sens, les résultats des biais traduisent une baisse des débits aux horizons futurs malgré les tendances différentes. Une attention particulière a été portée sur les indicateurs de débits extrêmes des périodes futures. Considérant les indicateurs des débits des basses eaux, (Q_{MNA} , Q_{JFM} , Q_{FMA}), il est observé sur la période 2031-2060 une variation moyenne de -30%. Cette tendance s'améliore sur la période 2071-2100 avec une moyenne de -16%. A l'opposé, les variations des indicateurs de débits de hautes eaux restent sensiblement constantes avec une moyenne de -85%. Ces différentes tendances relèvent une perturbation des écoulements des crues.

S'agissant de la fréquence d'occurrence mensuelle, elle a été portée de manière spécifique sur les indicateurs Q_{MNA} et Q_{MXA} . Les résultats obtenus contribuent en effet, à sonner l'alerte quant à l'augmentation probable des mois des hautes eaux. En effet, en référence à la période historique, seul le mois de septembre était représentatif des Q_{MXA} , avec une fréquence de 77%. Toutefois aux horizons futurs, les Q_{MXA} ont deux fois plus de chance de se manifester dans une année. Ainsi, sur la période 2031-2060, il est observé les mois d'août et octobre et sur la période 2071-2100, les mois de septembre et octobre sont identifiés. En ce qui concerne les Q_{MNA} , il a été observé sur la période historique une fréquence mensuelle qui s'étendait de janvier à mai avec un pic au mois de mars. Cependant les tendances futures présentent une fréquence sèche qui démarre déjà au mois de décembre (2031-2060). De même, la fréquence du mois de février se trouve plus accentuée avec un taux de plus de 50%.

La variabilité du climat et le changement climatique affectent très fortement les pays en développement (Mahé, 2006 ; Dje Bi, 2015 ; Pilabina *et al.*, 2019). Certains effets du changement climatique sont déjà observables et bien d'autres sont annoncés par le biais de nombreux travaux (Kouakou, 2011 ; Bodian, 2011 ; Kouamé *et al.*, 2019 ; Yao *et al.*, 2019 ; Yapi *et al.*, 2020). Toutefois, il convient de remarquer que les impacts des changements climatiques sont assez bien documentés sur les caractéristiques moyennes des régimes de pluie et de température à court terme (Brou *et al.*, 2005 ; Dibi, 2010 ; Boko, 2012 ; GIEC, 2014). En revanche, ils le sont moins lorsqu'on s'intéresse aux projections à long terme. Partant de ce constat, les résultats de l'étude prospective contribuent à informer sur l'évolution des paramètres climatiques et hydrométriques sur le bassin versant de la Marahoué.

Selon Wallez (2010), les prévisions de périodes sèches observées dans de nombreuses études, sont imputables aux effets attendus des changements climatiques. Le continent africain connaîtra une

augmentation de température moyenne de 3 à 4°C d'ici 2080/99. Pour l'auteur, cette augmentation bien supérieure au niveau mondial augmentera la vulnérabilité des ressources en eau et fragilisera davantage les populations, surtout les plus pauvres. Ainsi, il est très important de se pencher tant sur l'évaluation des extrêmes hydrologiques que sur les précipitations pour les décennies à venir.

La baisse du régime des précipitations et les légers décalages de la saison des pluies, sont en lien avec les résultats obtenus par d'autres auteurs (Kouakou *et al.*, 2012 ; Kouamé, 2013). Pour Kouamé (2013), Cette diminution est de moindre importance à l'horizon 2050 qu'à celui de 2080. En effet, les travaux menés par les auteurs sur la variabilité climatique dans le Centre-Est de la Côte d'Ivoire ont démontré une réduction de la pluviométrie plus sensible à Tiébissou (-12 %) et perceptible au Nord avec -8 % à Bonguéra et Prikro. S'il est vrai que le découpage des horizons permet d'avoir une visibilité plus accentuée de la tendance climatique, les scénarios restent proches. En effet, les résultats de l'étude menée par Yao *et al.* (2019) ont révélé au niveau de la pluviométrie une hausse de 0,47 % à l'horizon 2010-2025 avant de baisser de 10,8 % aux horizons 2035-2050 et 2085-2100.

Pour ce qui est de la tendance des ETP, un accroissement maximum de 28,2% a été déterminé par Kouakou (2011) sur deux périodes de projection (2031-2040 et 2091-2100). Par ailleurs, les résultats de cette étude présentent un accroissement de l'ETP, mais dans des proportions plus faibles avec une moyenne de 3%. L'écart important entre ces deux variations pourrait s'expliquer par la longueur des horizons. En effet dans cette étude, les périodes projetées couvrent une soixantaine années, comparativement à celles proposées par l'auteur, et qui couvre une vingtaine d'années.

Les performances obtenues par le modèle GR2M sont en phase avec celles présentées par Bodian (2011) dans ses travaux sur la modélisation pluie-débit relative au haut bassin du fleuve Sénégal. En effet, les simulations des débit mensuels, appliquées par l'auteur montrent que le modèle GR2M reproduit d'une manière satisfaisante la forme des hydrogrammes observés. Les débits de pointes calculés sont bien situés dans le temps, mais parfois sous-estimés ou surestimés. Les étiages, en revanche, sont parfaitement reconstitués et on observe une bonne superposition des hydrogrammes des débits observés et calculés.

Aussi, les résultats proposés dans cette étude connaissent une amélioration comparativement à ceux de Kouakou (2011) et Yao *et al.* (2019). Pour le premier cité, les travaux ont conduit à simuler l'évolution des ressources en eau sur cinq sous-bassins de la Comoé. Pour ce faire, le modèle hydrologique GR2M a été utilisé. Il ressort de l'évaluation de la performance du modèle, que le critère du Nash oscille entre 56,1% et 72,4% en calage, et entre 51,4% et 76,4% en phase de validation. Tout comme les résultats proposés dans cette étude, il est à noter l'amélioration des valeurs du critère de Nash à la validation (84%) qu'au calage (79%) est la preuve de la fiabilité des résultats. Selon Yao *et*

al. (2019), lorsque cette dynamique d'amélioration en phase de validation n'est pas respectée, cela peut être due aux prélèvements effectués en amont (retenue d'AEP, barrage hydroagricole, etc.).

S'agissant des débits moyens annuels et des débits extrêmes en particulier, ils pourraient baisser de manière drastique au regard des biais déterminés. En effet, la baisse des indicateurs de débits extrêmes présente un taux moyen de 50%. Cette tendance à la baisse reste conforme aux résultats obtenus par Kouakou *et al.* (2012) et Yao *et al.* (2019). En effet, dans l'étude relative à l'évaluation des impacts des changements climatiques sur les paramètres du bilan hydrologique du bassin versant de la Lobo, les auteurs ont présenté la variation des débits de crue pour les stations Loboville et Nibéhibé. Ainsi, les travaux ont présenté que les débits de crue à la station de Loboville diminueraient d'environ 57 % (horizon 2050) et de plus de 100 % (horizon 2085). A Nibéhibé, les débits de crues pourraient baisser de 30 % (horizon 2050) et de 75 % à l'horizon 2085.

Par ailleurs, cette étude va au-delà des travaux menés par Yapi *et al.* (2020) en rapport avec la modélisation des extrêmes climatiques de la région de la Marahoué. En effet, l'étude menée par les auteurs, a eu pour objectif d'analyser et de modéliser les tendances pluviométriques extrêmes à l'horizon 2050 à partir des données pluviométriques journalières de 1980 à 2013. Dans le cas de la présente étude, en appui à l'évolution des tendances climatiques futures, l'analyse de l'évolution des débits extrêmes a été réalisée. Aussi, au-delà de cet aspect limitant des travaux proposés par l'auteur, la tendance générale reste commune, à savoir la baisse des indices climatiques dans le bassin versant de la Marahoué aux horizons futurs.

Ainsi, face à ces bouleversements climatiques prévus, les populations sont confrontées à deux défis complémentaires ; d'une part, le défi de l'atténuation des effets que les humains exercent sur le climat, et d'autre part, celui de l'adaptation aux changements climatiques qui s'annoncent (Kouamé *et al.*, 2019).

7.3.2. SUSCEPTIBILITÉ À L'INONDATION

La modélisation spatiale a été réalisée en tenant compte du risque d'inondation qui est classiquement évalué par l'intermédiaire de deux composantes. On notera d'une part le phénomène physique de submersion, et d'autre part, la vulnérabilité liée à la présence de la population ou au degré potentiel d'endommagement des biens et perturbation des activités économiques. Ainsi, le degré d'exposition à l'inondation est généralement exprimé au moyen d'une carte des zones inondables établie pour une crue de référence (Lang *et al.*, 2003). Dans le cas de cette étude, une famille d'événements hydrologiques de la crue a été prise comme référence. De même, compte tenu du fait que le risque d'inondation évalué tient compte en premier lieu des zones habitées, le Parc National de la Marahoué n'a pas été pris en compte, bien qu'il soit (comme tous les parcs de la Côte d'Ivoire), soumis à un

risque important face à la poussée urbaine (rapport d'évaluation des capacités nationales pour la réduction des risques, la préparation et la réponse aux urgences en Côte d'Ivoire, 2015). Aussi, afin de mettre en relief le phénomène physique de submersion et la vulnérabilité, les résultats de l'étude des risques d'inondation ont été classés par période de retour, et s'appuient sur deux facteurs à savoir la hauteur d'eau et la vitesse d'écoulement. Pour BRL (2004), ces facteurs sont les plus représentatifs. Ainsi, l'inondation se présente comme forte dès la période de retour de 10 ans, uniquement pour le lit mineur. Pour les durées de retour de 50 ans et 100 ans, le lit mineur et la principale industrie de la ville de Bouaflé, à savoir Solibra, représentent des zones d'inondation avec un danger élevé. De même, les sites « espace Fiadi », « hôtel Koala » et « le lycée moderne de Bouaflé », bien qu'ayant des hauteurs d'eau comprises dans les intervalles 0,53 - 0,89 m ; 0,47 - 0,87 m, et 0,32- 0,35 m, respectivement pour les durées de retour de 100, 50 et 10 ans, sont considérés comme des zones de faibles dangers. Le code couleur proposé dans cette analyse, pour l'identification des zones d'action prioritaires, se rapproche de celui proposé par Della (2009).

En effet, en lien avec le PNUD, Della (2009) détermine les sites à risques d'inondation, d'érosion côtière et de mouvements de terrain dans la ville d'Abidjan. Le code couleur choisi par l'auteur présente des similitudes à celui proposé dans cette étude à savoir le jaune pour les risques faibles et le rouge pour les risques élevés. Le risque moyen, quant à lui, est présenté en orange. Faisant appel à une démarche de type SIG basée sur l'intégration de facteurs d'aléa (pente, résistance des sols, protection du sol) et de critères d'enjeux (densité de population, densité du bâti, qualité du bâti), l'auteur établit des cartes des zones à risque.

Cette approche revient également dans l'étude présentée par Saley *et al.* (2005) pour la région de Man en Côte d'Ivoire. Pour les auteurs, les principaux facteurs de risque d'inondation sont la pluviosité, la couverture du sol, le réseau hydrographique, la pente du terrain et les domaines litho-structuraux. Par ailleurs, le relief (MNA et fichiers dérivés) est incontournable dans les études spatiales en environnement montagneux. L'analyse spatiale multicritère, réalisée dans un SIG, a permis d'élaborer la carte des aléas ainsi que celle de la vulnérabilité à l'inondation. La combinaison de ces deux cartes permet la cartographie des zones à risque d'inondation. Les zones à moyen et fort risque couvrent 65 % du territoire.

Par ailleurs, de nombreuses études mettent en évidence la possibilité de partir du couplage des données de télédétection et d'un système d'information géographique pour la détermination des zones à risque d'inondation (Puech, 1995). Tanguy (2012) tout comme Leumbe *et al.* (2015), l'ont bien intégré dans les travaux menés respectivement au Québec et au Cameroun. Pour ces auteurs, la télédétection et les SIG sont des outils particulièrement performants pour l'étude des risques naturels, en particulier la surveillance des phénomènes d'inondations. Pour les auteurs Leumbe *et al.* (2015),

les facteurs tels que l'occupation des sols, l'hydrographie, la morphologie du bassin et la nature des sols sont responsables des inondations dans la zone de Maga (zone d'étude). Les conclusions de leurs travaux, montrent que les zones à risque fort d'inondation dans la zone de Maga et ses environs représentent environ 32,31% de la superficie totale de la zone d'étude.

Trois (3) périodes de référence ont également été choisies dans l'étude menée par Guiati (2019). Dans ces travaux menés sur la plaine de Grombalia (Tunisie), l'auteur reprend les périodes de référence 20, 50 et 100 ans. Etant donné l'absence d'une station de mesure hydrométrique sur le cours d'eau étudié, le paramétrage hydraulique du modèle a été possible avec les données des débits fréquents calculés par la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE) dans le cadre de l'étude de la crue de Nabeul. L'auteur s'est également employé à utiliser le logiciel HEC-RAS pour la modélisation 1D et 2D. Le système d'information géographique quant à lui, a été assuré par Google Earth de même que dans la présente étude. Les résultats produits par l'auteur sont de nature satisfaisante. En effet, les images Sentinel 2 présentées à la date du 23 septembre 2018, soit un jour après les inondations de Nabeul (zone d'étude) concorde bien avec les résultats du modèle HEC RAS réalisés par Guiati (2019). Les inondations dans cette partie du bassin versant proviennent principalement des pluies torrentielles qui ont dépassés 300 mm pendant 5 heures, soit une intensité maximale de 2 mm/minute.

Sollicité également dans le volet de l'assainissement, Adjounihin (2015) réalise une évaluation de la capacité de drainage des eaux pluviales sur la base de la cartographie des zones inondables. Son évaluation axée sur le modèle HEC-RAS, met en évidence les limites des plaines inondables. Les résultats montrent que le canal du Mogho Naaba (au Burkina Faso) dans sa section amont concernée par l'étude n'arrive pas à évacuer totalement les eaux pluviales surtout celles engendrées par une pluie de période de retour supérieure à 2 ans, et que les premières zones inondées sont des bâtiments se trouvant dans l'emprise du marigot. La modélisation réalisée aussi à cet effet, a permis de calculer les profils d'eau correspondants aux débits de pointe lors des crues.

L'exploitation des résultats obtenus pour le bassin versant de la Marahoué, issus de la simulation hydraulique et du système d'information géographique, peut contribuer considérablement à établir des modes d'intervention pour lutter contre les inondations. La carte de risque à l'inondation établie constitue donc une base solide pour des campagnes d'information aux populations afin d'éviter les éventuels aménagements dans les zones inondables.

CONCLUSION PARTIELLE

Comme la plupart des bassins de l'Afrique de l'Ouest, le bassin versant de la Marahoué est sujet à la variabilité climatique. Cette étude menée donne une idée de son impact sur les ressources en eau. L'indice standardisé de la pluviométrie, de l'ETP et des débits, a mis en évidence les fluctuations des régimes climatiques et hydrométrique, aux horizons futurs 2031-2060 et 2071-2100. S'agissant des débits extrêmes la tendance des débits des basses eaux laisse transparaître une amélioration des débits d'étiage particulièrement pendant la normale 2071-2100. En effet, les biais de ces indicateurs passent d'un taux de -30% à -15% à l'horizon 2071-2100. En revanche, les débits des hautes eaux observent une baisse drastique entre les estimations passées et celles à venir en conservant une moyenne de 85%. Ainsi, les changements climatiques présentement observés, de même que ceux prévus pour les prochaines décennies, sont à même d'engendrer plusieurs modifications dans l'actuelle distribution spatiale et temporelle des régimes hydrologiques.

La modélisation réalisée a permis de comprendre le fonctionnement hydrologique et hydraulique de l'hydrosystème du bassin versant de la Marahoué, plus précisément à l'exutoire de Bouaflé. Les zones particulièrement exposées aux inondations ont été déterminées. De ce fait, le site occupé par la société Solibra représente une zone à risque particulièrement pour les périodes de retour de 50 et 100 ans. Par ailleurs, les sites de l'hôtel Lopoifla et du complexe hôtelier "le pacifique", restent des zones classées à un niveau de danger moyen sur toutes les périodes de référence. Le risque devient grandissant et alarmant pour les zones proches du lit mineur, c'est-à-dire situées au Sud-Ouest du bassin versant. Cette hiérarchisation devra permettre de proposer des actions ciblées et localisées pour limiter les dégâts causés par les inondations dues au débordement du cours d'eau.

Dès lors, la recherche de solutions d'amélioration pourra s'inscrire dans une approche d'identification des marges de sécurité des zones en jaune et bleu, ainsi que du renforcement de la protection et l'abaissement de la vulnérabilité des zones en rouge.

CHAPITRE 8. PRÉVISION DES DÉBITS DE LA MARAHOUÉ

8.1. PERFORMANCE DES DÉBITS TRIMESTRIELS

8.1.1. SCORES DÉTERMINISTES DES DÉBITS TRIMESTRIELS

Les résultats de la prévision des débits trimestriels de la Marahoué en termes de scores déterministes en calage sont synthétisés au tableau XXVI. Le coefficient de corrélation varie entre 0,77 et 0,89 avec une moyenne de 0,83. L'erreur quadratique (RMSE) fluctue entre 0,46 et 0,64 avec une moyenne de 0,56. Quant au critère de Nash-Sutcliffe, il est compris entre 58,82% et 79,01% pour une moyenne de 79,01%. Les performances sont bonnes dans l'ensemble et meilleures pour les modèles 2 et 3. Les modèles sont donc capables de prévoir les débits trimestriels d'un à trois mois.

Tableau XXIV : Scores déterministes des modèles RNA de prévision des débits trimestriels en calage

| Critères | Calage 1961-1990 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|---------------------|---------|---------|------------------------|---------|---------|--------------------------|---------|---------|
| | Modèle 1 (P, Q) | | | Modèle 2 (P, T, Q) | | | Modèle 3 (P, ETP, Q) | | |
| | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 |
| Coefficient de corrélation | 0,84 | 0,77 | 0,82 | 0,87 | 0,83 | 0,79 | 0,89 | 0,83 | 0,80 |
| RMSE | 0,55 | 0,64 | 0,58 | 0,50 | 0,55 | 0,61 | 0,46 | 0,56 | 0,60 |
| Nash-Sutcliffe (%) | 70,11 | 58,82 | 66,45 | 75,18 | 69,58 | 62,27 | 79,01 | 68,58 | 64,27 |

En phase de validation, les résultats de performance des critères déterministes des modèles développés sont consignés dans le tableau XXVII. Ces résultats dans leur ensemble, présentent une faible performance des trois modèles de prévision de débits. Même si le coefficient de corrélation (0,80 - 0,92) et le RMSE (0,22 - 0,49) présentent des valeurs acceptables, il n'en est pas de même pour le Nash. En effet, ce critère enregistre des valeurs inférieures à 60%, donc pas satisfaisantes particulièrement au délai de 3 mois. Par ailleurs, les meilleures valeurs (>80%) sont enregistrées au délai d'un mois, soit 80,72% (modèle 2) et 81,08% (modèle 3).

Tableau XXV : Scores déterministes des modèles RNA de prévision des débits trimestriels en validation

| Critères | Validation 1991-2017 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|---------|---------|-----------------------------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|
| | Modèle 1 (<i>P, Q</i>) | | | Modèle 2 (<i>P, T, Q</i>) | | | Modèle 3 (<i>P, ETP, Q</i>) | | |
| | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 |
| Coefficient de corrélation | 0,84 | 0,80 | 0,82 | 0,92 | 0,87 | 0,85 | 0,91 | 0,89 | 0,84 |
| RMSE | 0,31 | 0,38 | 0,49 | 0,23 | 0,27 | 0,33 | 0,22 | 0,26 | 0,41 |
| Nash-Sutcliffe (%) | 62,88 | 46,24 | 9,61 | 80,72 | 71,95 | 57,74 | 81,08 | 73,92 | 37,04 |

Les résultats de performance en calage et validation mettent en évidence de bons résultats au délai d'un mois pour tous les modèles. Aussi, le modèle 3, présente des valeurs sensiblement supérieures aux modèles 2 et 1. Il est suivi du modèle 2. Au délai de 2 mois, seuls les modèles 2 et 3 ont été performants. Aucun modèle n'a été performant au délai 3.

Les résultats du critère de robustesse des modèle 1, 2 et 3 sont consignés au Tableau XXVIII. Ces résultats montrent que les trois modèles ont été robustes au délai 1. Au délai 2, seuls les modèles 2 et 3 ont été robustes. Seul le modèle 2 a été robuste au délai 3.

Tableau XXVI : Robustesse des modèles RNA de prévision des débits trimestriels

| Modèle | Modèle 1 (<i>P, Q</i>) | | | Modèle 2 (<i>P, T, Q</i>) | | | Modèle 3 (<i>P, ETP, Q</i>) | | |
|----------------------------------|--------------------------|---------|---------|-----------------------------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|
| Délai | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 |
| Critère de robustesse (%) | -7,23 | -12,58 | -56,84 | 5,54 | 2,37 | -4,53 | 2,07 | 5,34 | -27,23 |

Le modèle 2 présente les meilleurs résultats de robustesse, suivi des modèles 3 et 1.

8.1.2. SCORES DE CONTINGENCE DES DÉBITS TRIMESTRIELS

Le tableau XXIX met en évidence les résultats du critère de contingence en phase de validation. De manière globale, la probabilité de détection d'un trimestre humide (POD) est comprise entre 80 et 90% pour une moyenne de 84%, tandis que la moyenne de probabilité de détection de la période sèche est de 69%. De ce fait, les modèles ont une plus grande capacité à prévoir la période humide par rapport à la période sèche. Par ailleurs, la probabilité d'annoncer une fausse alerte (FAR) qu'elle soit sèche ou humide est de 1%. Le taux moyen de coïncidence est de 69% pour les trois modèles sur les trois délais. Enfin, la performance des modèles traduite par le HSS est comprise entre 37 à 68%.

Tableau XXVII : Scores de contingence des modèles RNA de prévision des débits trimestriels en validation

| <i>Critères</i> | Modèle 1 (P, Q) | | | Modèle 2 (P, T, Q) | | | Modèle 3 (P, ETP, Q) | | |
|-----------------------|------------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------|----------------|
| | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 |
| C (%) | 73 | 62 | 58 | 73 | 64 | 73 | 73 | 69 | 78 |
| POD sèche (%) | 78 | 60 | 50 | 69 | 60 | 75 | 70 | 74 | 82 |
| POD humide (%) | 81 | 81 | 83 | 90 | 82 | 83 | 90 | 80 | 85 |
| FAR sèche (%) | 0 | 3 | 3 | 0 | 4 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| FAR humide (%) | 0 | 0 | 4 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| H.S.S (%) | 59 | 43 | 37 | 59 | 55 | 59 | 60 | 54 | 68 |

De manière spécifique, le modèle 3 démontre une grande capacité des réseaux de neurones à prévoir les débits trimestriels de la Marahoué, avec la probabilité d’annoncer une fausse alerte (FAR) qui est nulle. Aussi, sachant que la simulation est parfaite pour un taux de 100% du HSS, il est observé que le modèle 3 a enregistré une performance supérieure à 50% aux différents délais. Il est suivi du modèle 2 qui a enregistré aux différents délais, des performances supérieures à 50%.

Les représentations graphiques ont été présentées uniquement en phase de validation (Figures 99, 100, et 101). De manière générale, au délai de 1 mois, les hydrogrammes simulés des modèles 2 et 3 suivent les tendances des hydrogrammes observés. De même, les nuages de points ont tendance à suivre la ligne de référence $Y = X$. Au délai de 2 mois, les débits simulés se rapprochent fortement de ceux observés (modèles 2 et 3). Enfin pour ce qui est du délai de 3 mois, les débits trimestriels simulés s’écartent fortement des débits observés quel que soit le modèle.

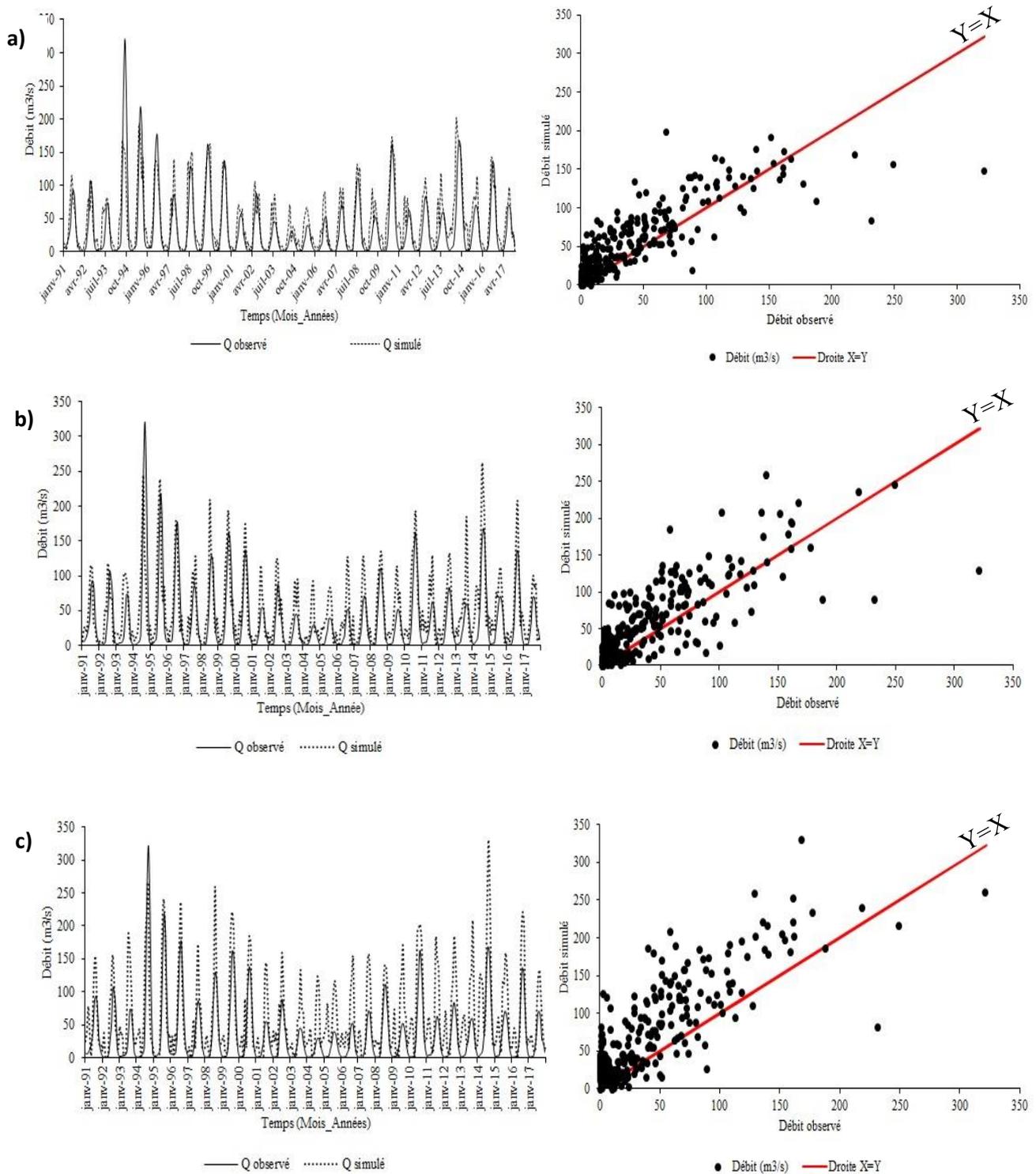


Figure 99 : Débits trimestriels observés et simulés du modèle 1 en validation (1991-2017) :

a) délai 1 mois ; b) délai 2 mois et c) délai 3 mois

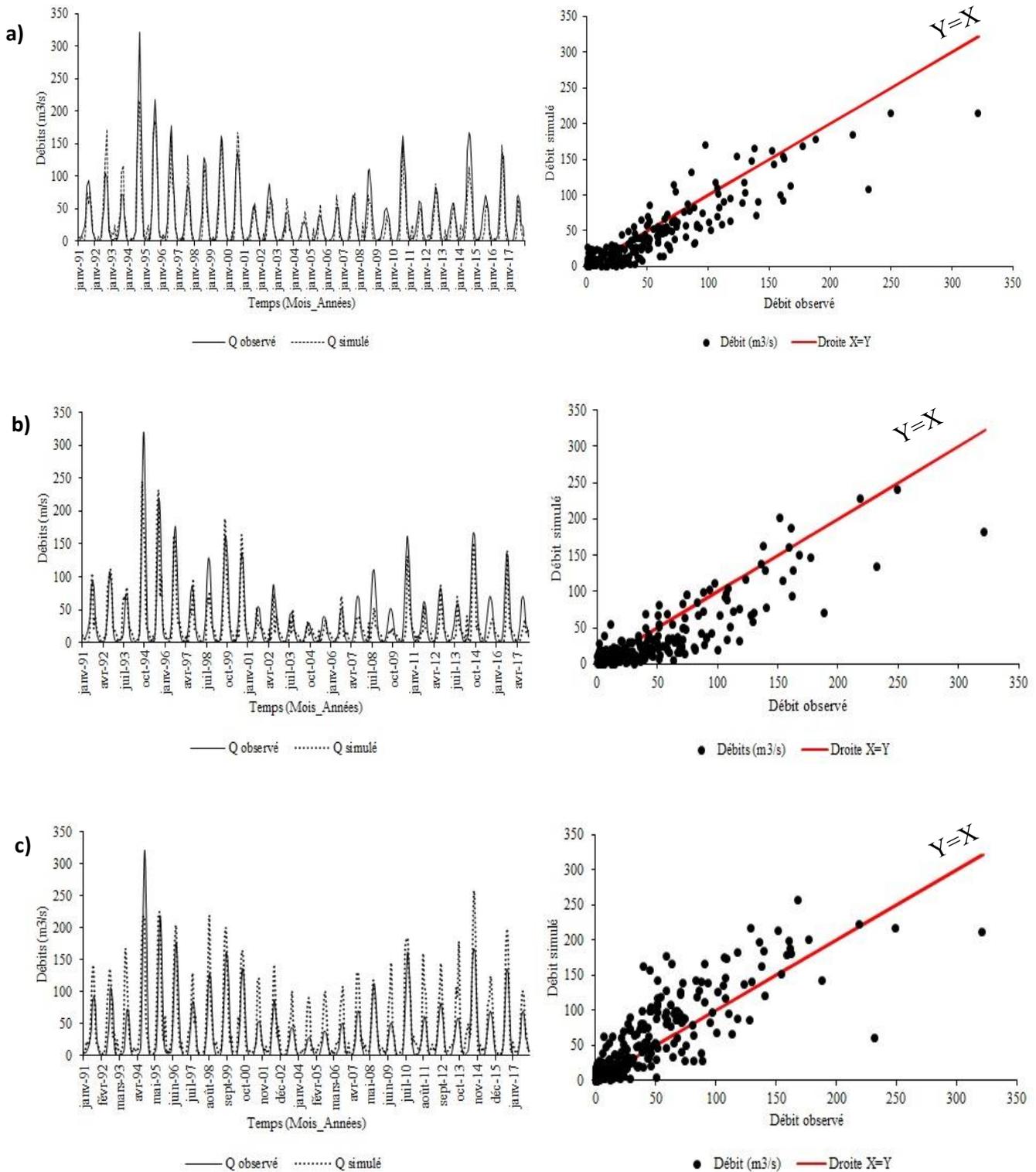


Figure 100 : Débits trimestriels observés et simulés du modèle 2 en validation (1991-2017) :

a) délai 1 mois ; b) délai 2 mois et c) délai 3 mois

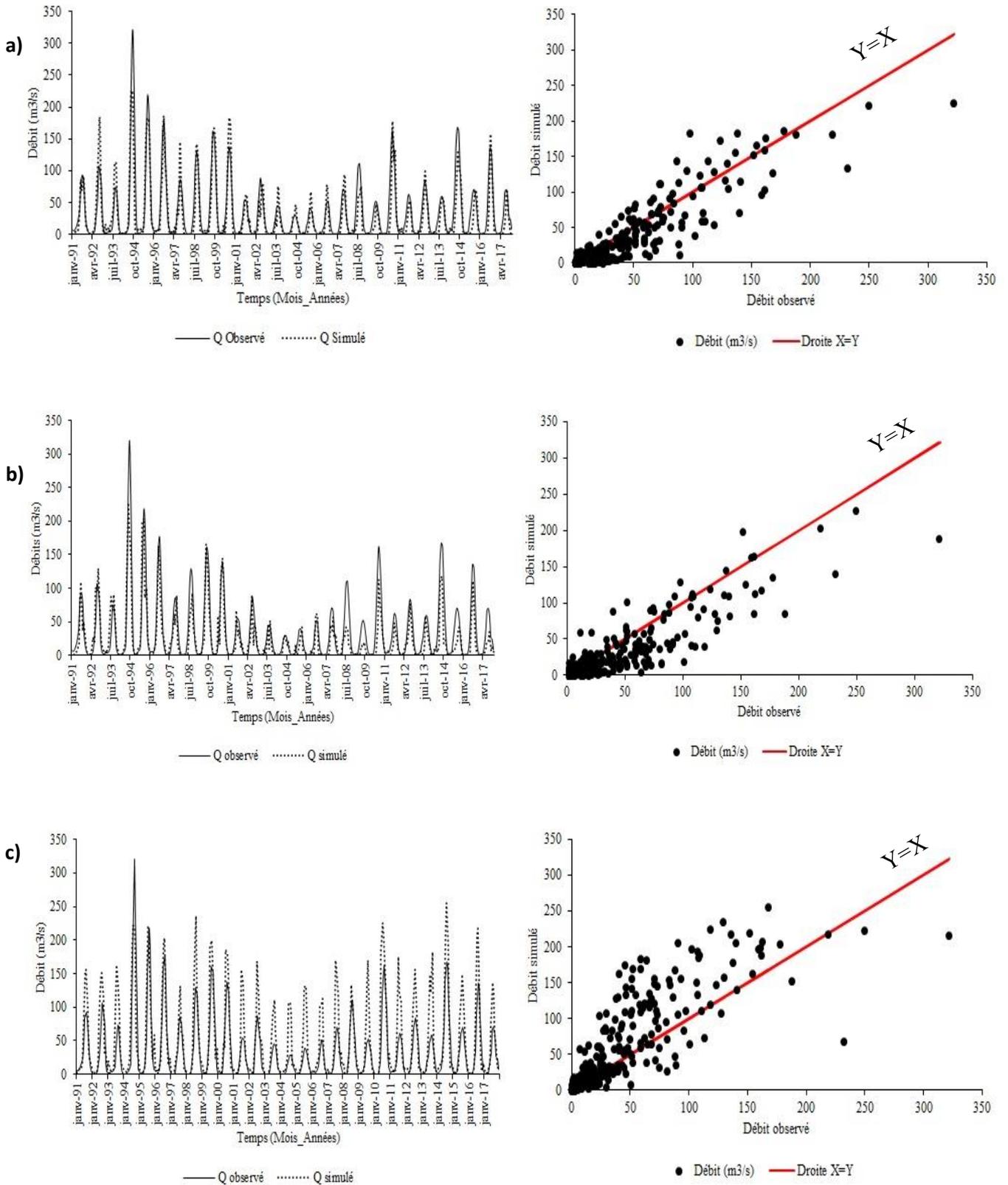


Figure 101 : Débits trimestriels observés et simulés du modèle 3 en validation (1991-2017) :
a) délai 1 mois ; **b)** délai 2 mois et **c)** délai 3 mois

8.2. PERFORMANCE DES DÉBITS MENSUELS

8.2.1. SCORES DÉTERMINISTES DES DÉBITS MENSUELS

Le tableau XXX illustre les résultats de prévision au pas de temps mensuel, en phase de calage. Il en ressort que le coefficient de corrélation varie entre 0,70 et 0,84, soit une moyenne de 0,78, et les critères du RMSE et du Nash présentent des moyennes respectives de 0,62 et 61%. Par ailleurs, le modèle 2 présente les meilleurs résultats, suivi sensiblement par le modèle 3 et le modèle 1.

Au regard du critère de Nash- Sutcliffe, le modèle 1 a été performant au délai 1. En ce qui concerne les modèles 2 et 3, ils ont été performants aux délais 1 et 2. Aucun modèle n'a été performant au délai 3.

Tableau XXVIII : Scores déterministes des modèles RNA de prévision des débits mensuels en calage

| Critères | Calage 1961-1990 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|---------|---------|-----------------------------|---------|---------|-------------------------------|---------|---------|
| | Modèle 1 (<i>P, Q</i>) | | | Modèle 2 (<i>P, T, Q</i>) | | | Modèle 3 (<i>P, ETP, Q</i>) | | |
| | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 |
| Coefficient de corrélation | 0,80 | 0,72 | 0,70 | 0,83 | 0,84 | 0,73 | 0,82 | 0,84 | 0,76 |
| RMSE | 0,60 | 0,70 | 0,71 | 0,56 | 0,54 | 0,69 | 0,58 | 0,54 | 0,65 |
| Nash-Sutcliffe (%) | 63,79 | 51,26 | 49,63 | 69,01 | 71,26 | 52,73 | 66,64 | 71,22 | 58,21 |

En phase de validation, les performances des critères déterministes sont consignées dans le tableau XXXI. Ces performances sont supérieures à celles obtenues en phase de calage. En effet, les valeurs du Nash oscillent entre 47 et 79% pour une moyenne de 65%, tandis que le coefficient de corrélation varie entre 0,75 et 0,89. Enfin, le critère du RMSE fluctue entre 0,22 et 0,35 pour une moyenne de 0,28.

Par ailleurs, quel que soit le modèle (1, 2 et 3), le délai de 1 mois présente les meilleures valeurs, suivi des délais de 2 mois et 3 mois. En termes de critère de Nash- Sutcliffe, on peut dire que le modèle 1 a été performant seulement au délai 1 alors que les modèles 2 et 3 ont été performants du délai 1 au délai 3.

Tableau XXIX : Scores déterministes des modèles RNA de prévision des débits mensuels en validation

| Critères | Validation 1991-2017 | | | | | | | | |
|-----------------------------------|----------------------|---------|---------|------------------------|---------|---------|--------------------------|---------|---------|
| | Modèle 1 (P, Q) | | | Modèle 2 (P, T, Q) | | | Modèle 3 (P, ETP, Q) | | |
| | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 |
| Coefficient de corrélation | 0,83 | 0,75 | 0,78 | 0,88 | 0,85 | 0,82 | 0,89 | 0,85 | 0,81 |
| RMSE | 0,29 | 0,34 | 0,35 | 0,23 | 0,26 | 0,28 | 0,22 | 0,26 | 0,31 |
| Nash-Sutcliffe (%) | 63,73 | 51,51 | 47,48 | 76,78 | 70,53 | 66,64 | 79,16 | 70,61 | 59,67 |

Les résultats de robustesse des modèles de prévision des débits mensuels sont mis en évidence au tableau XXXII. Les résultats obtenus, montrent que les trois modèles ont été robustes particulièrement au délai de 2 mois. Cependant, le modèle 1 semble être le plus robuste suivi du modèle 3.

Tableau XXX : Robustesse des modèles RNA de prévision des débits mensuels

| Modèle | Modèle 1 (P, Q) | | | Modèle 2 (P, T, Q) | | | Modèle 3 (P, ETP, Q) | | |
|----------------------------------|---------------------|---------|---------|------------------------|---------|---------|--------------------------|---------|---------|
| Délai | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 |
| Critère de robustesse (%) | -0,06 | 0,25 | -2,15 | 7,77 | -0,73 | 13,91 | 12,52 | -0,61 | 1,46 |

8.2.2. SCORES DE CONTINGENCE DES DÉBITS MENSUELS

Le tableau XXXIII présente les scores de contingence des modèles de prévision des débits mensuels. La probabilité de détection d'une période sèche présente une moyenne de 69%, tandis que celle de la période humide est de 79%. S'agissant de la probabilité d'effectuer une fausse alerte (FAR) de période sèche ou humide, elle varie entre 0 et 4%. Le taux de coïncidence est supérieur à 60% pour tous les modèles toutefois, le délai 1 affiche un meilleur taux de coïncidence suivi des délais 2 et 3. Quant à la performance prévisionnelle des modèles (HSS), elle fluctue entre 42 à 65%.

Ces résultats témoignent d'une grande performance des modèles de prévision des débits mensuels dans le bassin de la Marahoué.

Tableau XXXI : Scores de contingence des modèles RNA de prévision de débits mensuels en validation

| <i>Critères</i> | Modèle 1 (P, Q) | | | Modèle 2 (P, T, Q) | | | Modèle 3 (P, ETP, Q) | | |
|-----------------------|------------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------|-----------------------------|----------------|----------------|
| | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 | Délai 1 | Délai 2 | Délai 3 |
| C (%) | 77 | 66 | 64 | 69 | 62 | 64 | 61 | 69 | 64 |
| POD sèche (%) | 84 | 76 | 66 | 72 | 63 | 69 | 56 | 73 | 59 |
| POD humide (%) | 80 | 73 | 78 | 81 | 80 | 73 | 83 | 79 | 84 |
| FAR sèche (%) | 1 | 0 | 4 | 1 | 1 | 4 | 4 | 1 | 2 |
| FAR humide (%) | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 3 | 2 |
| H.S.S (%) | 65 | 50 | 45 | 53 | 43 | 46 | 42 | 54 | 45 |

Les représentations graphiques ont été présentées uniquement en phase de validation (Figures 102, 103 et 104). De manière générale, au délai de 1 mois, les hydrogrammes simulés des modèles 2 et 3 suivent les tendances des hydrogrammes observés. De même, les nuages de points ont tendance à suivre la ligne de référence $Y=X$. Au délai de 2 mois, les débits observés se rapprochent de ceux simulés pour les modèles 2 et 3. Enfin pour ce qui est du délai de 3 mois, les débits mensuels simulés s'écartent fortement des débits observés quel que soit le modèle.

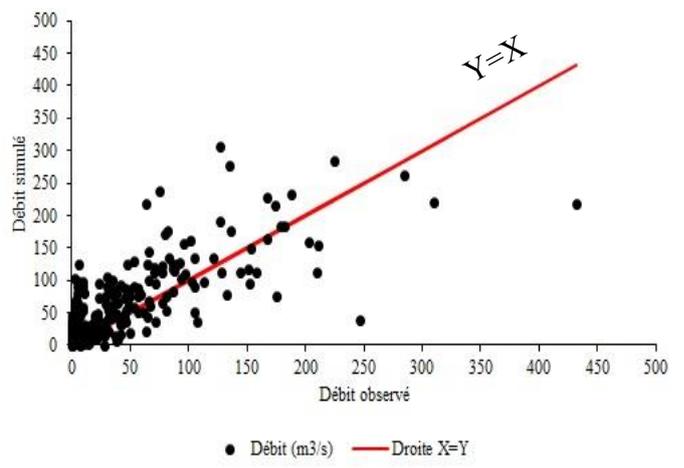
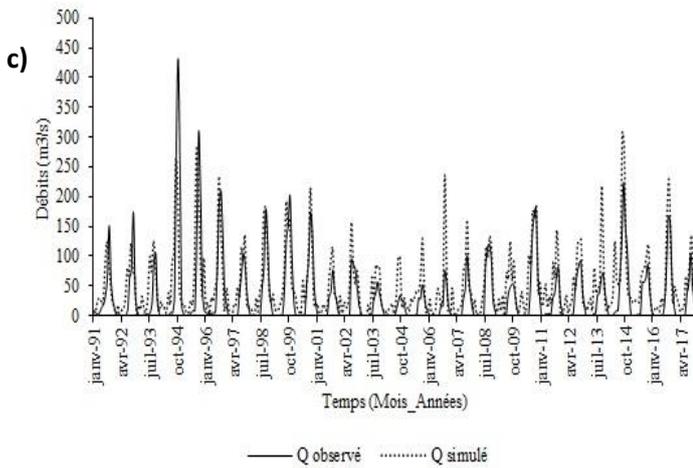
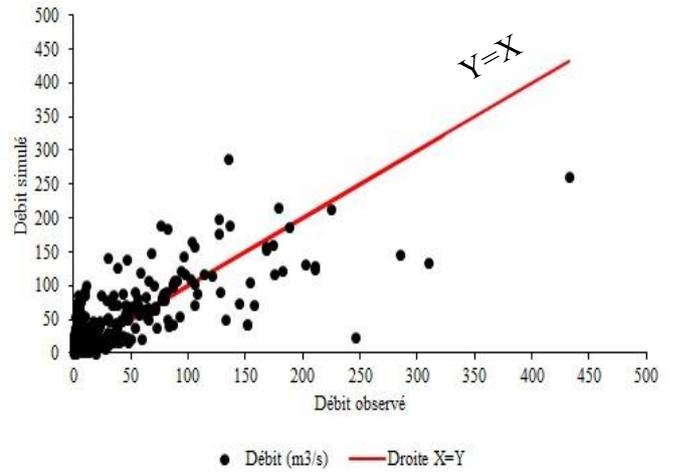
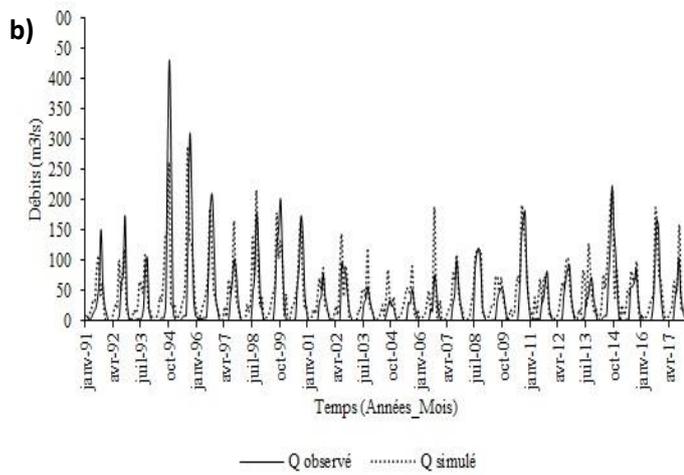
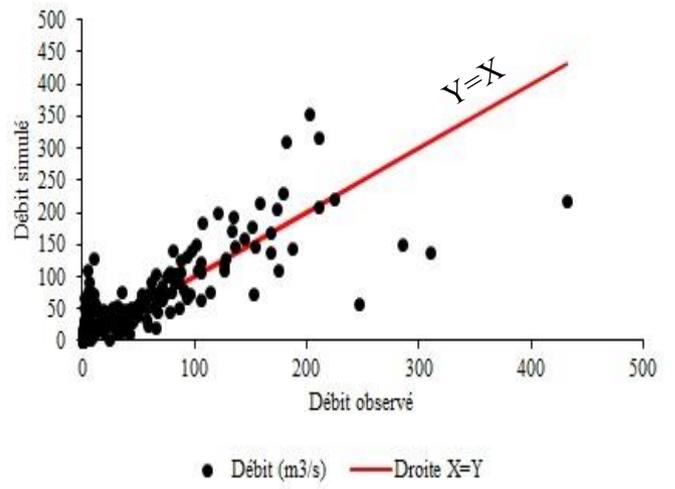
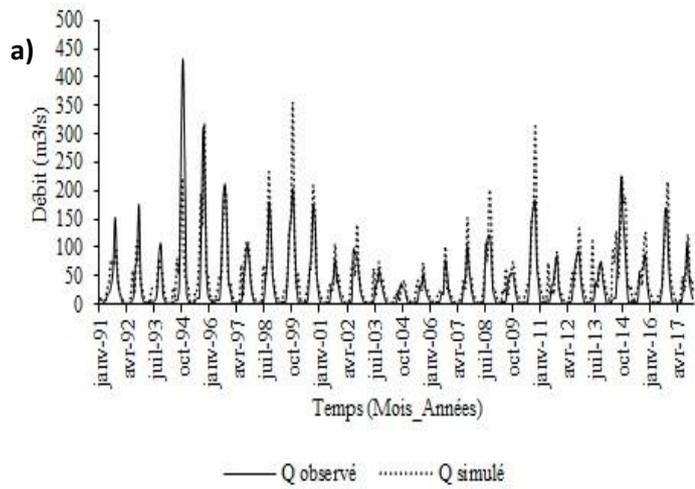


Figure 102 : Débits mensuels observés et simulés du modèle 1 en validation (1991-2017) :

a) délai 1 mois ; **b)** délai 2 mois et **c)** délai 3 mois

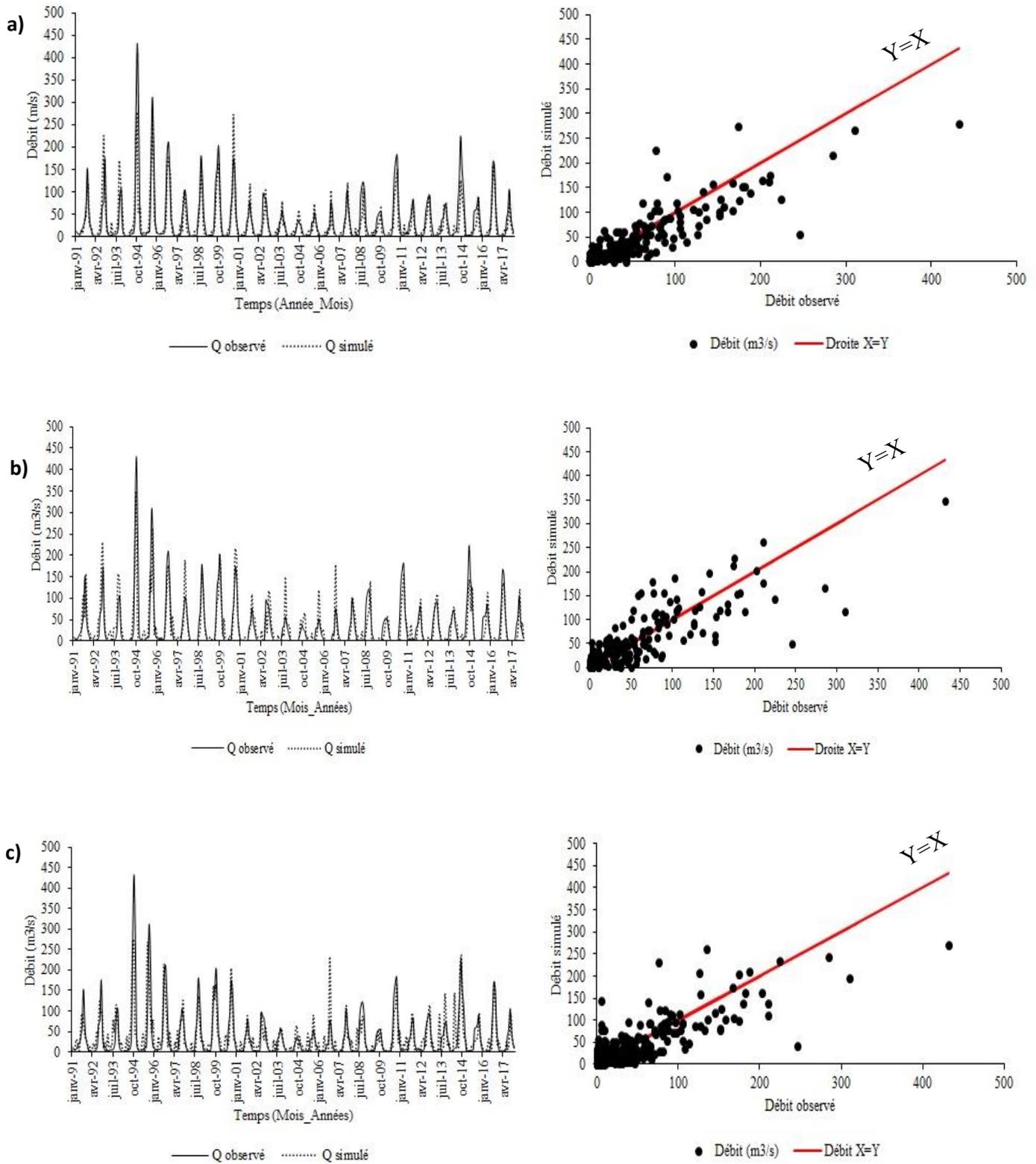


Figure 103 : Débits mensuels observés et simulés du modèle 2 en validation (1991-2017) :

a) délai 1 mois ; **b)** délai 2 mois et **c)** délai 3 mois

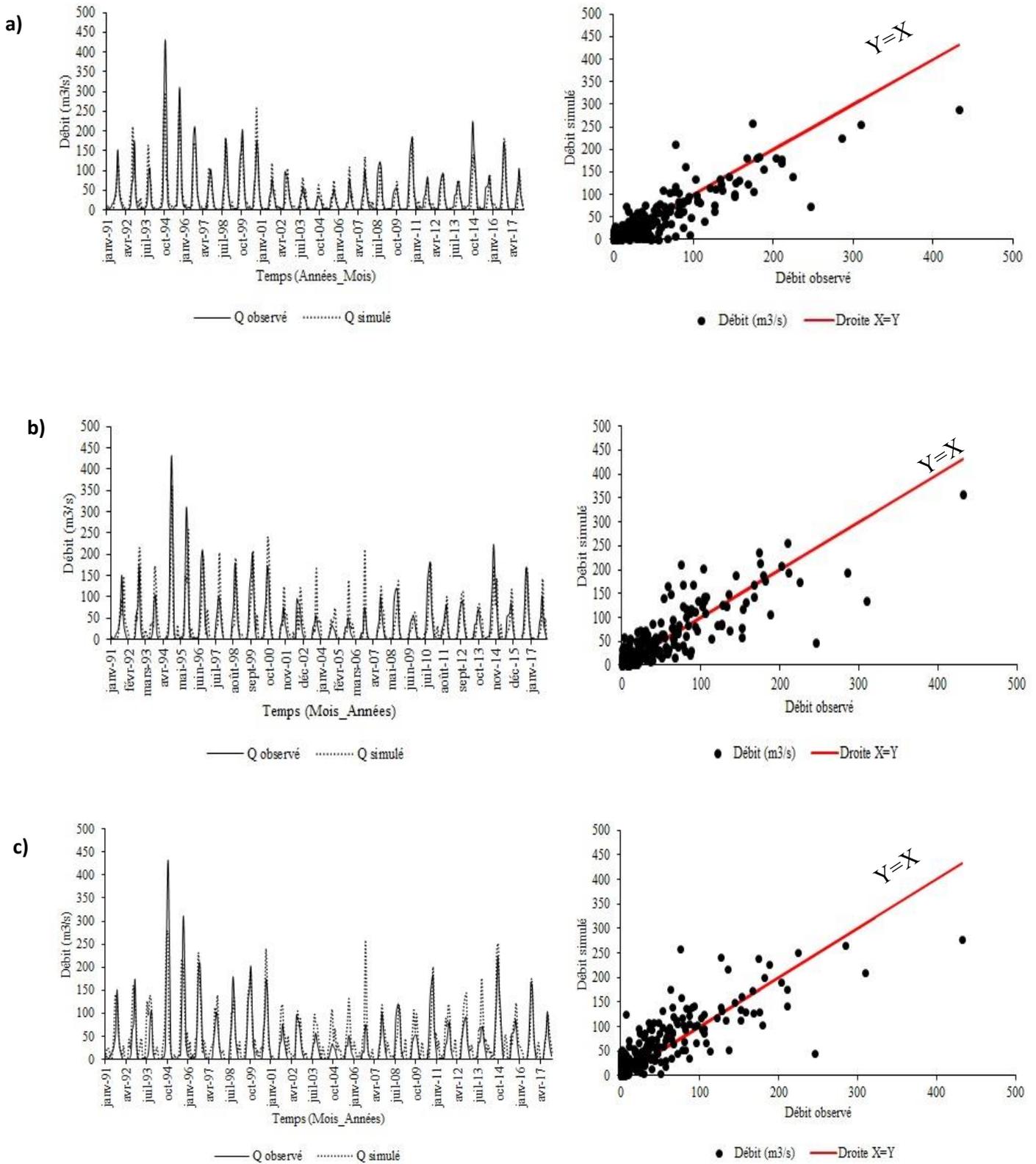


Figure 104 : Débits mensuels observés et simulés du modèle 3 en validation (1991-2017) :

a) délai 1 mois ; **b)** délai 2 mois et **c)** délai 3 mois

8.3.DISCUSSION

L'application des réseaux de neurones (RNA) en général, et les Perceptrons Multicouches en particulier, nous a permis de concevoir des modèles hydrologiques de prévision des débits de la Marahoué. Ces modèles ont été définis sur la base de débits trimestriels et mensuels. Aussi, ont-ils été répartis sur trois délais (1, 2 et 3 mois) à partir des variables d'entrée que sont la pluie, la température, l'évapotranspiration et le débit. La combinaison de ces différentes variables a permis de constituer trois modèles dont le modèle de base (modèle 1) qui est constitué de la pluie et du débit. Le modèle 2 est déduit du modèle 1 en ajoutant la température. Quant au modèle 3, il s'agit de l'ajout de l'évapotranspiration au modèle 1. L'intérêt de l'utilisation en parallèle de trois modèles, est de tester la performance et la robustesse des approches utilisées en fonction des variables retenues. Aussi, quatre approches ont été utilisées pour l'évaluation des modèles développés. Dans l'ensemble, les performances obtenues aux architectures qui prennent en compte la température ou l'ETP en plus de la pluviométrie et du débit, se trouvent être les meilleures. Les résultats des critères de performance montrent qu'une modélisation à l'aide des RNA n'est pas satisfaisante lorsque les variables d'entrées sont constituées uniquement de la pluie et du débit. L'ajout de la température ou de l'ETP apporte une contribution à l'amélioration des performances des modèles.

8.3.1. PRÉVISION DES DÉBITS TRIMESTRIELS

La première approche d'évaluation des modèles a été les scores déterministes, sur la base des critères que sont le coefficient de corrélation, le RMSE et le Nash-Sutcliffe. Les résultats obtenus montrent une bonne corrélation en phase de calage (1961-1990), avec des valeurs comprises entre 0,77 et 0,89, soit une moyenne de 0,78. Très sensible aux variations des données d'entrées, le critère du Nash-Sutcliffe met en évidence la remarque selon laquelle, plus le délai des mois augmente plus le modèle baisse en qualité. En effet, le critère de Nash-Sutcliffe du modèle 1, passe de 70,11% au délai de 1 mois à 58,82% au délai de 2 mois. S'agissant des modèles 2 et 3, les résultats se dégradent davantage au délai de 3 mois, en restant toutefois acceptables. Ainsi, en passant d'un intervalle [75,18% ; 79,01%] au délai de 1 mois, on observe une tendance comprise dans l'intervalle [68,58% ; 69,58%] au délai de 2 mois, pour s'achever dans l'intervalle [62,27% ; 64,27%] au délai de 3 mois. S'agissant de la phase de validation de manière générale, les performances réalisées par les modèles, se trouvent être meilleures que celles obtenues en phase de calage. En effet, le critère de Nash-Sutcliffe présente des taux supérieurs à 80% au délai de 1 mois et supérieur à 70% pour le délai de 2 mois. Le délai de 3 mois quant à lui, présente des résultats moins performants avec des taux inférieurs à 60%. Ainsi, les performances réalisées par les modèles en phase de validation, traduisent une bonne adaptation des modèles de RNA aux prévisions des débits trimestriels. En observant les résultats en calage et en

validation, les meilleurs résultats sont observés au délai 1. A ce niveau, le modèle le plus performant est le modèle 3, suivi du modèle 2 et du modèle 1.

Les bonnes performances présentées par les modèles 3 et 2, sont en conformité avec l'analyse menée par Johannet *et al.* (2012) dans ses travaux de modélisation hydrodynamique des aquifères karstiques. Selon l'auteur, la modélisation par réseaux de neurones est fiable. Aussi, pour la prévision à plus longue échéance, en plus de disposer de prévisions des précipitations, il requiert d'appliquer une autre entrée qui puisse alimenter le modèle avec une information relative à l'évapotranspiration.

Aussi, les résultats proposés dans cette étude restent proches de ceux présentés par Singla (2012) dans le cadre de la prévision des ressources en eau à l'échelle saisonnière en France. L'un des objectifs fut d'établir quatre expériences avec différentes initialisations (de février à mai) pour prévoir le trimestre juin-juillet-août. Les résultats se sont avérés forts satisfaisants d'autant plus que la comparaison des scores des quatre expériences montre un saut important de la qualité des prévisions. Les scores de février et mars sont comparables et nettement plus faibles que ceux des mois d'avril et mai.

La suite des travaux a conduit à l'utilisation d'autres critères, à savoir les scores de contingence. Les résultats obtenus en phase de validation, font état de ce que les modèles ont une plus grande capacité à prévoir le trimestre humide. En effet, la probabilité de détection d'un trimestre humide est excellente, avec des taux compris entre 80 et 90%. De même, la possibilité d'annoncer une fausse alerte de la période humide est très faible avec une moyenne inférieure à 1%. En revanche, les probabilités de fausses alertes des périodes sèches sont relativement élevées avec des taux compris entre 0 et 4%. Aussi, les probabilités de prévoir une période sèche sont en deçà de celle de la période humide, soit [50% ; 82%]. Par ailleurs, le taux moyen de coïncidence (69%) associé au HSS dont les résultats sont proches de 60%, informent sur la capacité des modèles à réaliser de bonnes prévisions. En effet, la performance pour un événement donné (taux de succès, fausse alarmes) reste toujours définie par le pourcentage (%) des membres qui atteignent le seuil du paramètre recherché (Hamatan *et al.*, 2004 ; Randrianasolo, 2009 ; Singla, 2012 ; Zalachori, 2013).

Aussi, de même que pour les critères déterministes, le délai de 1 mois enregistre globalement les meilleures performances. A ce délai, le modèle le plus performant est le modèle 3 suivi du modèle 2 et du modèle 1. Par ailleurs, les résultats obtenus, traduisent les difficultés qui pourraient se présenter dans la prévision des débits d'étiage (période sèche).

Cette tendance au niveau des résultats, est partagée par Kouassi *et al.* (2018c), dans ses travaux réalisés sur le bassin versant du N'Zi-Bandama en Côte d'Ivoire. En effet, dans l'évaluation des modèles statistiques de prévision saisonnière, les auteurs se sont appuyés sur les scores déterministes et de contingence. En phase de validation, les modèles développés ont enregistré de bonnes performances ($0,856 < R < 0,861$; $0,31 < RMSE < 0,33$). S'agissant du coefficient de corrélation, les

résultats obtenus sur l'ensemble des modèles, en phase de validation à tous les délais, sont compris dans l'intervalle [0,80 ; 0,91]. S'agissant des scores de contingence, il en ressort que les critères de POD (POD sèche, POD humide) obtenus sont les mêmes quel que soit le modèle (90 %) en phase de calage. En phase de validation, la probabilité d'épisode sec est de 67% et celle de la période humide est de 100%. Tandis que des valeurs nulles (0%) ont été obtenues au niveau des critères de FAR (FAR sèche et FAR humide) pour tous les modèles.

Par ailleurs, une évaluation de la qualité des prévisions sur des portions plus spécifiques de l'évènement, telles que la pointe, ou encore les faibles débits, des hydrogrammes a été réalisée. Sur la base des graphiques en phase de validation, il est à noter que le principe de régularité du régime annuel du bassin versant de la Marahoué est respecté pour les débits simulés. Les meilleures représentations sont obtenues aux modèles 2 et 3 sur les délais 1 et 2 mois. S'agissant du modèle 1, des écarts significatifs sont observés, mettant en évidence des débits de basses eaux et de hautes eaux surestimés. Les approches de prévision numérique, qui définissent des hydrogrammes sont particulièrement prisées des spécialistes en hydrologie qui cherchent à analyser des comportements hydrologiques (Segretier, 2013).

Les résultats présentés, dans leur ensemble, mettent en évidence une concordance entre les critères. En effet, des critères déterministes et de contingences, le délai 1 mois présente les meilleures valeurs. Il est suivi du délai 2 et 3 mois. A ce niveau, le modèle 3 affichent les meilleures tendances suivies de très près par le modèle 2. De ce fait, on peut proposer les modèles 2 et 3 en fonction des données disponibles dès lors que les deux modèles ont des performances semblables. En revanche, il est à noter que plus le délai s'éloigne, plus les modèles ne sont pas stables. Le fait de pouvoir modéliser efficacement des événements dont les caractéristiques peuvent varier d'un extrême à l'autre fait également partie de la capacité de robustesse d'un système de prévision hydrologique (Segretier, 2013). En conséquence, améliorer les prévisions pour des horizons plus ou moins courts permet d'anticiper sur la sécurité des personnes et des biens.

8.3.2. PRÉVISION DES DÉBITS MENSUELS

A la lecture des résultats obtenus, l'application des réseaux de neurones (RNA) en général, et les Perceptrons Multicouches en particulier, permet d'obtenir des performances satisfaisantes pour la prévision mensuelle des débits. Pour ce qui est des critères déterministes, en phase de calage (1961-1990), les valeurs du Nash- Sutcliffe sont satisfaisants au délai de 1 et 2 mois (modèle 2 et 3) et au délai 1 mois pour le modèle 1. En effet, pour les modèles 2 et 3, le coefficient de corrélation présente une moyenne de 0,84 et le critère du Nash- Sutcliffe affiche une valeur moyenne de 71%. S'agissant du modèle 1, les performances en calage sont de 0,80 (R) et 63,79% (Nash- Sutcliffe) pour le délai 1

mois. Les résultats de ce modèle se dégradent et présentent des valeurs respectives de 51,26% au délai de 2 mois et 49,63% au délai de 3 mois.

En phase de validation, les meilleurs résultats sont obtenus au délai de 2 mois (modèle 2 et 3) suivi du délai 1 et 3 mois. Les deux autres critères déterministes présentent également de bonne performance, dont les meilleurs sont au délai de 1 mois. On observe ainsi le coefficient de corrélation qui présente des valeurs comprises entre 0,83 et 0,89 et le RMSE affiche une valeur moyenne de 0,25. Par ailleurs, les résultats obtenus par le modèle 3 sont sensiblement plus performants que ceux du modèle 2 et bien meilleurs que ceux du modèle 1. En effet, le modèle 1 perd sa performance dès le deuxième délai, tandis que le modèle 3 atteint sa valeur minimale de 59,67% au délai de 3 mois. Il est observé également que les résultats obtenus en phase de validation, sont meilleurs que ceux de la phase de calage. De ce fait, les modèles de prévision développés sur la base des réseaux de neurones sont adaptés aux débits mensuels du bassin versant de la Marahoué jusqu'au délai de 2 mois. Aussi, des phases de calage et de validation, il ressort que les résultats des modèles 2 et 3 sont relativement semblables.

Les résultats des scores de contingence, révèlent également que le délai 1 mois enregistre les meilleures tendances suivies du délai 2. En effet, la probabilité moyenne de détecter une période humide au délai de 1 mois est de 81%, contre 77% au délai de 2 mois et 78% au délai de 3 mois. De même, au délai de 1 mois, la probabilité d'effectuer une fausse alerte de période humide présente une moyenne inférieure à 1%. Il convient cependant de noter que le modèle 1 présente de meilleurs résultats que les modèles 2 et 3. En effet, au délai 1, il ressort que le taux de coïncidence est de 77% au modèle 1, contre 69% au modèle 2 et 61% au modèle 3. De même, le Hit Skill Score présente une moyenne supérieure à 50% au modèle 1 contrairement aux deux autres modèles. Au délai de 2 mois, la classification des résultats, établit le modèle 3 en premier, suivi des modèles 1 et 2.

Les représentations graphiques proposées permettent d'apprécier également la représentativité des valeurs simulées et celles observées. Les hydrogrammes présentés en phase de validation montrent que la dynamique des écoulements est bien représentée par les modèles RNA. En revanche, il existe un écart entre les hydrogrammes observés et les hydrogrammes simulés par les modèles. Cette anomalie est plus marquée au niveau des pics des débits de hautes eaux et des débits de basses eaux, qui sont généralement mal reproduits. Toutefois, ce critère ne saurait à lui seul juger de la performance des modèles développés. Comme le mentionne Toukourou (2009), de bonnes valeurs peuvent être observées même si l'hydrogramme calculé est très éloigné de l'hydrogramme observé, en termes d'ajustement du pic.

Ces observations montrent que la concordance semble difficile entre les critères déterministes et les critères de contingences. Toutefois, le modèle 3 semble se démarquer au délai de 1 mois et 2 mois comme le mieux adapté aux prévisions des débits mensuels dans le bassin versant de la Marahoué.

Les résultats présentés restent dans leur ensemble acceptable comme précisés par certains auteurs. En effet pour Toukourou (2009), Kharroubi (2013), dans l'application hydrologique et selon le type de cours d'eau, le critère de Nash est acceptable entre 60% et 70% et excellent s'il est supérieur à 90%.

De même, les résultats de la prévision des débits mensuels peuvent être également analysés au regard de l'étude menée par Koffi (2007) sur le bassin versant du Bandama Blanc. En effet, dans ses travaux, les données des stations de Bada, Marabadiassa, Tortiya et de Bou ont été utilisées pour tester la capacité des Réseaux de neurones à faire de la prévision dans un contexte perturbé avec, notamment la présence de plusieurs barrages agropastoraux. Pour atteindre cet objectif, deux Perceptrons Multicouches entraînés avec l'algorithme de la rétro propagation de l'erreur, ont été construits, l'un employé pour la simulation et l'autre en simulation et en prévision. Les données d'entrées des modèles sont constituées de la pluie, la température, l'ETP et le mois (reparties sous plusieurs architectures). Les résultats du critère de Nash présentent des valeurs comprises entre 71% et 74% en phase de calage, et 77% et 79% en phase de validation. Enfin pour l'auteur, la pluie et l'évapotranspiration potentielle sont suffisantes comme entrées des Perceptrons Multicouches Dirigés pour faire la prévision des débits mensuels du Bandama Blanc. Cette tendance est observée également dans la présente étude, avec une valeur du Nash de 79,16% en phase de validation au modèle 3. Ainsi, les résultats obtenus renforcent la recommandation de l'auteur, selon laquelle, l'ajout des variables explicatives (température et évapotranspiration potentielle) a amélioré les performances des modèles conçus.

Aussi, dans leur ensemble les modèles évalués à chaque délai, respectent les critères de PRESAO (programme de PREvision Saisonnière en Afrique de l'Ouest mis en place par le consortium ACMAD-AGRHYMET-ICRISAT-ABN). En effet, comme le souligne Hamatan *et al.* (2004) dans leur étude sur la synthèse et l'évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest, un modèle est validé par le PRESAO si son pourcentage de coïncidence « C » est supérieur à 30 %, sa probabilité de détection d'une année sèche est également supérieure à 30 % et si sa fausse alerte « FAR » est inférieure à 30 %. Dans ces travaux, les auteurs ont porté leur étude sur quatre (4) pays que sont, la Guinée, le Mali, le Tchad et le Bénin. Ainsi, il a été démontré que dans cette étude, les prévisions sont améliorées dans les pays tests, avec la prise en compte des anomalies de température de surface au niveau de l'Upwelling Equatorial Atlantique, en plus des données pluviométriques et hydrométriques. Ainsi, les modèles calés sur la période 1961-1990 et validés sur sept (7) années soit

1991-1997, présentent des valeurs intéressantes des critères d'évaluation avec un Hit Skill Score qui fluctue entre 45 et 52 %.

Il convient alors de souligner, que sur la base du seuil de validation de prévision proposé par PRESAO, tous les modèles qui ont été exposés sont performants. Ce qui traduit une bonne performance des modèles neuronaux à prévoir les débits trimestriels et mensuels du bassin versant de la Marahoué. Nonobstant ces résultats, nous soulignons que l'utilisation des débits trimestriels présente des performances plus stables et fournit également de meilleurs résultats pour une prévision.

CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce chapitre, il a été évalué des modèles de prévision de débits trimestriels et mensuels sur la base des RNA. Ces modèles ont été développés suivant trois (3) délais, à savoir le délai 1 mois, 2 mois et 3 mois. En phase de validation, les prévisions trimestrielles affichent des valeurs du Nash comprises entre 63 et 81% avec une moyenne de 72%. De même, la probabilité de détection d'une période humide, présente une moyenne de 84% et celle d'annoncer une fausse alerte, qu'elle soit sèche ou humide est de 1%. S'agissant de la performance des prévisions de débits mensuels, il est observé également une bonne performance en phase de validation, avec des valeurs qui fluctuent entre 47,48 et 79%, avec une moyenne de 65%. Par ailleurs, l'opportunité de détecter une période humide affiche une moyenne de 79%. En outre, la probabilité d'annoncer une fausse alerte (FAR) de période humide est de 2%.

En ce qui concerne les différents délais proposés, les résultats obtenus font ressortir que le délai 1 mois affiche les meilleures performances, suivi du délai 2 et 3 mois. Par ailleurs, l'analyse des résultats des modèles de prévision, montrent que les modèles 3 et 2 sont plus performants que le modèle 1. En effet, au pas trimestriel les modèles 2 et 3 ont présenté des résultats satisfaisants et sensiblement similaires.

Au regard des résultats obtenus, il est proposé, en tenant compte des données disponibles d'opter pour les modèles 2 et 3 pour les différents débits (trimestriels et mensuels) en fonction de la disponibilité des données d'entrée.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

La finalité de ce travail a été de concevoir des outils de prévision des extrêmes hydrologiques sur le bassin versant de la Marahoué. A son terme, il convient de faire un bilan des résultats obtenus ainsi que les points de recherche à envisager et/ou à approfondir. Les résultats de cette étude sur le bassin versant de la Marahoué sont repartis en quatre aspects à savoir la caractérisation hydro-climatique, la modélisation statistique et systèmes d'alertes précoces (SAP) de débits extrêmes, l'analyse prospective des débits extrêmes ainsi que la cartographie des zones inondables et la prévision des débits. Dans ce qui suit, il sera présenté une synthèse des divers résultats obtenus et quelques perspectives de recherche intéressantes à explorer dans le futur.

Les résultats obtenus à la suite de la combinaison d'approches climatiques, statistiques et hydrologiques, ont montré que le bassin étudié appartient à un régime unimodal à deux saisons (7 mois pluvieux et 5 mois secs) et de type tropical humide. Les mois pluvieux vont d'avril à octobre et la saison sèche s'étend sur les mois de janvier, février, mars, novembre et décembre. L'analyse des fréquences de distribution des débits a montré qu'au niveau des débits annuels ($[32-62] \text{ m}^3/\text{s}$) comme des débits mensuels ($[0-80] \text{ m}^3/\text{s}$), les classes modales sont confondues aux classes médianes. Il est constaté une baisse des précipitations et des débits quand la température et l'évapotranspiration sont en hausse. Les réserves souterraines évaluées sont faibles avec un coefficient de tarissement moyen de $3,4 \cdot 10^{-2} \text{ j}^{-1}$, une durée moyenne de tarissement de près d'un mois et un volume d'eau mobilisé par les aquifères de $0,92 \text{ Km}^3$. La variabilité climatique constatée ainsi que les variations hydrologiques évaluées sont de nature à amplifier l'amenuisement des réserves souterraines déjà faibles.

L'application de l'analyse fréquentielle a permis d'identifier les lois statistiques correspondant aux différents extrêmes. Les principaux résultats obtenus ont montré que les Q_{MAX} de la Marahoué suivent préférentiellement la loi Gamma qui représente le modèle statistique qui ajuste au mieux ces données. Il est suivi par la loi Log normal et en troisième position vient la loi Weibull. Ainsi, la loi Gamma a été utilisée pour la définition du système d'alertes précoces des crues dans le bassin versant de la Marahoué à travers la détermination des seuils de vigilance ($927 \text{ m}^3/\text{s}$), d'alerte ($1030 \text{ m}^3/\text{s}$) et de crise ($1133 \text{ m}^3/\text{s}$). S'agissant de la modélisation statistique des étiages, elle a fait l'objet d'implémentation des lois Gamma, Weibull et exponentielle. Les principaux résultats obtenus ont montré que les Q_{MNA} de la Marahoué suivent préférentiellement la loi Gamma qui représente le modèle statistique qui ajuste au mieux ces données. Il est suivi par la loi Weibull et en dernière position la loi Exponentielle. Ainsi, la loi Gamma a été utilisée pour la définition du système d'alertes précoces des étiages dans le bassin versant de la Marahoué à travers la détermination des seuils

d'alerte (0,142 m³/s), de vigilance (0,156 m³/s) et de crise (0,127 m³/s). Il ressort que les seuils d'étiages définis sont faibles traduisant des étiages non soutenus par les réserves souterraines.

L'analyse prospective a été réalisée sur les données climatiques et les débits futurs. Elle s'est traduite sur une période couvrant le milieu du XXI^{ème} siècle (2031-2060) et la fin du XXI^{ème} siècle (2071-2100) par rapport à la période normale de référence 1961-1990. Les résultats obtenus mettent en évidence, une reprise de la tendance pluvieuse observée ces dernières décennies suivies d'un épisode sec se poursuivant jusqu'en 2100. L'allure générale des valeurs mensuelles interannuelles des ETP montre une croissance dans les mêmes proportions que la pluviométrie, ce qui sera de nature à accentuer le niveau des quantités d'eaux susceptibles d'être évaporées. S'agissant des débits, la tendance des Q_{MNA} , laisse transparaître une amélioration des débits d'étiages contre une baisse prononcée des Q_{MXA} à venir comparativement aux estimations passées. La combinaison de la simulation hydraulique et hydrologique, notamment au moyen du logiciel HEC-RAS a permis la cartographie des zones à risque d'inondation dans le bassin versant de la Marahoué. Les cartes de danger réalisées sur la base des crues de référence de 10 ans (court terme), 50 (moyen terme) et 100 ans (long terme) constitue une base pour les éventuels aménagements envisagés dans la ville de Bouaflé. Le risque d'inondation reste fort pour les zones situées à proximité du lit mineur notamment l'industrie "Solibra", et l'on observe un danger moyen pour les sites contigus à l'hôtel Lopoifla et au complexe hôtelier "le pacifique". Les résultats de vitesse et hauteur d'eau obtenus sur chaque site, aident à assurer une gestion intégrée et efficace des inondations et représente un outil pour la sensibilisation.

La modélisation neuronale a consisté à établir différentes architectures, aux pas de temps trimestriel et mensuel, avec pour variables la pluie, la température, l'évapotranspiration et le débit. Sur la base des résultats obtenus pour chaque modèles développés, les prévisions à l'échelle trimestrielle sont plus performantes que les prévisions au pas de temps mensuel. En effet, en phase de validation, les valeurs du Nash des prévisions des débits trimestriels se fixent à un maximum de 81%, contre 79% pour la prévision des débits mensuels. Les modèles développés ont été répartis sur trois délais, à savoir le délai 1 mois, 2 mois et 3 mois. Les résultats de performance en calage et validation mettent en évidence de bons résultats au délai 1 mois pour tous les modèles. Ainsi, les valeurs du coefficient de corrélation varient entre 0,84 et 0,89 en phase de calage et 0,84 à 0,92 en phase de validation. Sur la base du délai 1 mois les différent modèles conçus (modèle 2 et 3) sont capables, de prévoir les débits saisonniers jusqu'à deux voire trois mois d'avance.

En définitive, cette étude a montré que la variabilité climatique constatée ainsi que les variations hydrologiques évaluées sont de nature à amplifier l'amenuisement des réserves souterraines déjà faibles. Aussi, les seuils de crue et d'étiage déterminés constituent un système d'alerte précoce afin

d'informer à bonne date les populations pour une gestion durable des inondations et étiages dans le bassin versant de la Marahoué en Côte d'Ivoire. Il s'agit donc de gagner en capacité d'anticipation pour gérer les crises et d'assurer aux services de l'Etat et aux collectivités un délai suffisant à la mise en application de plans de secours dans le bassin versant de la Marahoué. De même, les réseaux de neurones artificiels (RNA) sont de très bons modèles de prévision aux pas de temps mensuel et trimestriel. Par ailleurs, l'originalité de ce travail repose également sur le fait qu'une analyse prospective est menée sur le bassin versant de la Marahoué et conduit à cartographier les zones à risque d'inondation pour des périodes de retour de 10, 50 et 100 ans. Cependant quels que soient les efforts préventifs déployés pour la protection contre les inondations, on ne sera jamais à l'abri des risques et les actions menées ne permettent que la réduction de la vulnérabilité des zones face à ces risques.

Forts des différents résultats, cette thèse ouvre des perspectives pour les études futures. Il s'agira de:

- étendre l'analyse des indicateurs des événements hydrologiques extrêmes associés aux basses eaux et aux hautes eaux sur d'autres bassins versants de la Côte d'Ivoire (Sassandra, Comoé, Cavally...) afin de dégager un outil commun de gestion des crises ;
- étudier les impacts socioéconomiques, de la vulnérabilité des systèmes humains et environnementaux face aux phénomènes associés aux extrêmes dans la zone d'étude ;
- proposer une étude sur l'analyse prospective des débits de crue journalière pour le bassin versant de la Marahoué ;
- étendre l'analyse des événements hydrologiques extrêmes au travers des réseaux de neurones aux pas horaires : pour le bassin versant de la Marahoué ;
- proposer une étude sur des Plans de Prévention des Risques d'Inondations (PPRI) obligatoires pour les communes en zone de risque.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABDA Z., CHETTIH M. et ZEROUALI B. (2016). Simulation prévisionnelle des crues par un système hybride neuro-ondelettes. 2nd International Conference on Water Resources (ICWR), 4 p.

ABDA Z., CHETTIH M. et ZEROUALI B. (2015). Modélisation des débits extrêmes par les réseaux neuronaux artificiels et les systèmes à inférence neuro-floue (application aux bassins côtiers Algérois. International Conference On African Large River Basins Hydrology Hammamet, Tunisia, 11 p.

ABDELDJALIL C. (2010). Gestion de crue dans un bassin versant-Etude hydrologique, hydraulique et aménagement. Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister en hydraulique. Université Aboubakr Belkaid – Tlemcen, Algérie, 135 p.

ABRAHART R., KNEALE, P. E. et SEE L. M. (2004). Neural networks for hydrological modeling. London, CRC Press, 316 p.

ACHITE A. et MEDDI M. (2004). Estimation des crues en zone semi-aride : cas du bassin versant de l'oued Sly (Chlef). Colloque International, « Terre et Eau » - Université d'Annaba.

ADJA M. G., DJÉMIN E. J., N'DRI O. F. A., TOHOURI P., KOUAMÉ K. J. et JOURDA J. P. (2019). Apport de l'Analyse Hydrologique et de la Modélisation de la Relation Pluie-Débit dans le Suivi Quantitatif des Ressources en Eau dans un Contexte de Variabilité Climatique: Cas du Sous-Bassin Versant du Kouto (Nord de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, Vol. 154, n°2, pp. 192-212.

ADJOUNINHIN D. S. C. (2015). Évaluation de la capacité de drainage des eaux pluviales du marigot de Mogho Naaba : cartographie des zones inondables. Mémoire pour l'obtention du master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement Fondation (2iE), 120 p.

ADON G. C. R. (2015). Evaluation des potentialités en eau de l'hydrosystème de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire) : Apports des données géospatiales, du modèle hydrologique "Hydrotel" et de l'analyse multicritère. Thèse de Doctorat de l'Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire, 177p.

AGRHYMET (2009). Le Sahel face aux changements climatiques-Enjeux pour un développement durable. Bulletin Mensuel, Numéro spécial, 43 p.

AGUE A. I. et AFOUDA A. (2015). Analyse fréquentielle et nouvelle cartographie des maximas annuels de pluies journalières au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, vol. 9, N° 1, pp. 121-133.

AGUIA A. (2018). Utilisation des images satellites pour l'alerte précoce aux pluies fortes/inondations cas des inondations du 18 et 19 juin 2018 à Abidjan. 13^{ième} forum EUMETSAT, la SODEXAM face au risque d'inondation à Abidjan, 12 p.

AGUIAR L. A. (2009). Impact de la variabilité climatique récente sur les écosystèmes des Niayes du Sénégal entre 1950 et 2004. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université du Québec, Montréal, 208p.

AKA K. (1991). La sédimentation quaternaire sur la marge de Côte d'Ivoire : Essai de modélisation. Thèse Doctorat d'Etat. Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 320 p.

AKAIKE H. (1974). A newlook at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol.19, pp. 716 - 723.

AKOSSOU A. Y. J. et PALM R. (2005). Conséquences de la sélection de variables sur l'interprétation des résultats en régression linéaire multiple. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ*, vol 9, n°1, pp. 11–18.

ALLA D. A. (2013). Cartographie des zones à risque d'inondation, d'érosion côtière et de mouvements de terrain dans la ville d'Abidjan. Ministère de l'environnement, de la salubrité urbaine et du développement durable, Programme des Nations Unies pour le développement, 34 p.

AMOUSSOU E. (2010). Variabilité pluviométrique et dynamique hydrosédimentaire du bassin-versant du complexe fluvio-lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, France, 310 p.

AMOUSSOU E., CAMBERLIN P. et MAHÉ G. (2012). Impact de la variabilité climatique et du barrage Nangbéto sur l'hydrologie du système Mono-Couffo (Ouest Afrique). *Hydrological Sciences Journal*, vol,57, pp. 1–13.

ANCTIL F., LAROUCHE W. et HOANG V. D. (2000). Analyse régionale des étiages 7-jours de la province de Québec. *Water Qual. Res. J Canada*, vol.35, pp. 125-146.

AQUAGEOSPHERE (2017). Présentation du logiciel HEC-HMS. Concepts généraux de la modélisation hydrologique, 18 p.

ARDOIN-BARDIN S. (2000). Prise en compte des spécificités de l'évapotranspiration en zone semi-aride dans la modélisation globale de la relation pluie-débit. Mémoire de DEA en sciences de l'eau, Université de Montpellier II, 114 p.

ARDOIN-BARDIN S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, France, 330 p.

ASCE (2000). "Artificial Neural Networks in Hydrology. I: Preliminary Concepts". *J. Hydrol. Engng*, vol.5, pp. 115-123.

ASSALÉ P. (2013). Caractérisation sédimentologique, palynologique, géochimique et paléo-environnementale des formations sédimentaires connexes à la faille des lagunes (est du bassin onshore de côte d'ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire, 403 p.

AUGAS J., GORTAIS J., HERBER C., MERCADANTE M., PIALOT A. et PODECHARD T. (2015). « Basses eau et étiages des rivières : Origines, caractérisation et réglementation ». Séminaire 2015, Hydrologie – Rapport Bibliographique, 28 p.

AVENARD J. M. (1971). Le milieu naturel de la Côte d'Ivoire, Aspect de la Géomorphologie. *In : Mémoires ORSTOM*, n°50, pp. 9-72.

AWADALLAH A. G. (1999). Hydro-climatologie globale pour la prévision des crues du nil au moyen de fonctions de transfert avec bruit et de réseaux de neurones artificiels, Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, 250 p.

AYRAL A. (2005). Contribution à la spatialisation du modèle opérationnel de prévision des crues éclair ALHTAÏR : Approches spatiale & expérimentale-Application au bassin versant du Gardon d'Anduze. Thèse de l'Université Aix-Marseille I, France, Spécialité Bioscience de l'Environnement, 300 p.

BARD A., RENARD B. et LANG M. (2012). Tendances observées sur les régimes hydrologiques de l'arc Alpin ». *La Houille Blanche, Revue internationale de l'eau*, n°1, pp. 38-43.

BARRAT J. M. (2012). Gestion intégrée et Concertée des ressources en eau des systèmes aquifères d'Iullemeden, de Taoudéni/Tanezrouft et du fleuve Niger. Changement climatiques en Afrique de l'Ouest et conséquences sur les eaux souterraines. Rapport OSS-GICRESAIT n°13, 41 p.

BÉLIVEAU J. (2006). Analyse fréquentielle multivariée de la pointe, du volume et de la durée de la crue. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.). Faculté des Sciences et de Génie Université Laval, Québec, 60 p.

BENISTON M. et STEPHENSON D. B. (2004). Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. Elsevier - Science direct - *Global and Planetary Change*, n°911, 9 p.

BENKACI A. T. (2006). Modélisation pluie-débit mensuelle et journalière par les modèles conceptuels et les systèmes neuro-flous (application aux bassins Algériens). Mémoire de thèse de Doctorat, Institut National Agronomique d'Alger, 222 p.

BENKHALED A. (2007). Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du Cheliff comparaison des techniques et des résultats. *Courrier du Savoir*, vol. 08, pp. 83-91.

BENKHALED A. et REMINI B. (2003) Analyse de la relation puissance débit solide-débit liquide à l'échelle du bassin-versant de l'Oued Wahrane (Algérie). *Rev. Sci Eau*, vol.16, n°3, pp 333-356.

BENMANSOUR N. (2009). Etude de crues et localisation des zones inondables. Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister en sciences agronomiques. École Nationale Supérieure Agronomique El Harrach, Alger, 146 p.

BESSELES B. (1977). Géologie de l'Afrique. Le Craton Ouest-africain. *Mémoire du BRGM*, n°88, 144 p.

BIEMI J. (1992). Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest: Hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus de sillons et aire granitique de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, Cocody, Côte d'Ivoire, 479 p.

BIGOT S., BROU Y.T., OSZWALD J. et DIEDHIOU A. (2005). Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse*, vol.16, pp 5-13.

BLAREZ E. (1986). La marge continentale de la Côte d'Ivoire-Ghana. Structure et évolution d'une marge continentale transformant. Thèse d'Etat, de l'Université de Paris VI, France, 188 p.

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 AntaDiop de Dakar (Sénégal), 288 p.

BOFINGER S. et HEILSCHER G. (2006). Solar electricity forecast: approach and first results. european photovoltaic solar energy conference (EU-PVSEC) in Germany.

BOKO G. J. (2012). Trajectoires des changements dans l'occupation du sol : déterminants et simulation, cas du bassin-versant de l'Alibori (Bénin, Afrique de l'ouest). Thèse de Doctorat Unique en Géographie, FLASH-EDP/ UAC, 291 p.

BOKO M. (1988) : Climats et communautés rurales du Bénin : rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse de Doctorat ès d'Etat, Université de Bourgogne, France, 601 p.

BOKO, M., NIANG, I., NYONG, A., VOGEL, C., GITHEKO, A., MEDANY, M., OSMAN-ELASHA, B., TABO, R. et YANDA, P. (2007). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, Cambridge U.K., pp. 433–467.

BOSCH J. L., LÓPEZ G. et BATLLES F. J. (2008). Daily solar irradiation estimation over a mountainous area using artificial neural networks. *Renewable Energy*, vol. 33, no. 7, pp. 1622-1628.

BOUZAÏANE L. et MOUELHI R. (2008) Initiation aux concepts de base de la prospective. Projet de M2PA. Université Virtuelle de Tunis, 66 p.

BRAVARD J. P. et CLEMENS A. (2006). Le Rhône en 100 questions. Les crues et inondations du Rhône. Zone Atelier Bassin du Rhône, 41 p.

BRICQUET J. P., BAMBA F., MAHE G., TOURE M. et OLIVRY J. C. (1997). Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. *Journal des sciences hydrologiques*, n°16, pp 83-95.

BRIDI K. (2012). Impact des changements climatiques sur l'environnement du bassin du Tensift. Master Sciences et Techniques: Hydrologie de Surface et Qualité des Eaux, Université Sidi Mohammed Ben Abdallah, Maroc, 78 p.

BRL (2004). Commune de Vauvert-Étude de l'aléa inondation et cartographie des zones inondables sur les secteurs du Valat de la Reyne et de Gallician. Rapport définitif, 43 p.

BROOMHEAD D. S. et LOWE D. (1988). Multivariable functional interpolation and adaptative network. *Complex system*, vol 2, pp. 321-355.

BROU Y. T. (2005). Climat mutation socio-économique et paysages en Côte d'Ivoire. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR). Université des Sciences et Technique de Lille, France, 212 p.

BROU Y., AKINDES F. et BIGOT S. (2005). La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cahiers Agricultures* vol. 14, n° 6, pp 533-540.

CAMIL, J. (1984). Pétrographie, chronologie des ensembles granulitiques archéens et formations associées de la région de Man (Côte d'Ivoire). Implication pour l'histoire géologique du craton Ouest africain. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 306 p.

CAMUS, H. (1972). Hydrologie du Bandama. Rapport de l'ORSTOM, Adiopodoumé, Côte d'Ivoire, vol. 2, 150 p.

CEMA-Environnement (Cabinet d'Expertise des Milieux Aquatiques – Environnement) (2017). Projet de construction de l'autoroute périphérique d'Abidjan: section 3 « Autoroute du Nord - Autoroute de Dabou ». Etude de la qualité du milieu aquatique. 78 p.

CEPRI (Les guides du Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation) (2017). Prévision et anticipation des crues et des inondations. Les collectivités en Europe pour la prévention du risque d'inondation, 72 p.

CEREMA (2018). Étude de dangers de systèmes d'endiguement. Concepts et principes de réalisation des études. Direction Générale de la Prévention des Risques Service Technique de l'Énergie Électrique, des Grands Barrages et de l'Hydraulique, 62 p.

CHABI A. B. P. (2015). Essai de caractérisation spatio-temporelle des pluies journalières en milieu subéquatorial au Bénin, Thèse de Doctorat, EDP/UAC, 229 p.

CHEKHNABA M. (2017). Appréciation des Risques et Potentielle d'érosion Hydrique dans la Région de Naama. Mémoire de Master, Université Abdelhamid Mostaganem, Algérie, 62 p.

CHEN J., ROBERTS C., et WESTON P. (2008). Fault detection and diagnosis for railway track circuits using neuro-fuzzy systems. *Control Engineering Practice*, vol. 16, n°5, pp. 585-596.

CHOW. V. T. (1964). Handbook of applied hydrology. McGraw-Hill Book Company. New York.

CHRISTENSEN J. H., HEWITSON B., BUSUIOC A., CHEN A., GAO X., HELD R., JONES R., KOLLI R.K., KWON W.K., LAPRISE R., MAGANA RUEDA V., MEARNNS L., MENENDEZ C.G., RÄISÄNEN J., RINKE A., SARR A., WHETTON P., ARRITT R., BENESTAD R., BENISTON M., BROMWICH D., CAYA D., COMISO J., DE ELIA R., et DETHLOFF K. (2007). Regional climate projections, *Climate Change, 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge/New York, États-Unis, Chap. 11, pp. 847-940.*

CIMA (Centre International pour le Monitoring Environnemental) et UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction) (2018). Profil de Risque de Catastrophe en Côte d'Ivoire, 24 p.

CIMA (Centre International pour le Monitoring Environnemental) et UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction) (2018). Profil de Risque de Catastrophe au Gabon, 24 p.

CIRCULAIRE (1994). Circulaire du 24 janvier 1994 relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables, Paris, France.

COMMEAUX F., DROGUE G. et FRANCOIS D. (2010). Analyse prospective des débits mensuels d'étiage de la Meuse française à l'aide d'un modèle hydrologique : sensibilité aux méthodes de descente d'échelle spatiale et aux scénarios d'émission. Bulletin de l'Association de géographes français, 87^{ème} année. *Approches spatiales multi scalaires en climatologie.* pp. 178-193.

CORNILLON P. A. et MATZNER-LØBER E. Régression, Théorie et applications. Springer, *Statistiques et probabilités appliquées*, 314 p.

CORTEZ P., ROCHA M. et NEVES J. (2001). Evolving Time Series Forecasting Neural Network Models. Proceeding of int. symposium on adaptive systems: evolutionary computation and probabilistic graphical models.

CORTEZ P., SOLLARI A. F., ROCHA M. et NEVES J. (2002). Real-Time Forecasting by Bio-Inspired Models. Proceeding.

COULIBALY P., ANCTIL F. et BOBÉE B. (1999). Prévission hydrologique par réseaux de neurones artificiels : état de l'art. Canadian journal of civil engineering, vol 26, pp. 293-304.

CRONE S. F. (2005). Stepwise Selection of Artificial Neural Networks Models for Time Series Prediction Journal of Intelligent Systems. Department of Management Science Lancaster University Management School Lancaster, United Kingdom.

CUNNANE C. (1978). Unbiased plotting positions: a review. *J. Hydrol.*, vol.37, pp. 205-222.

CUTTER S. L., BORUFF B. J. et SHIRLEY W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, n°84, vol 2, pp. 242-261.

DACHARRY M. (1996). Dictionnaire Français d'Hydrologie.

DAGET P. H. (1968). Étude du climat local en région de moyenne montagne à l'aide des données météorologiques classiques. Application au Nord-est de la Margeride. Thèse de l'Université Sciences Techniques, Montpellier, 186 p.

DE GOOIJER J. G et HYNDMAN R. J. (2006). 25 years of time series forecasting. *International Journal of Forecasting*, Vol 22, n°3, pp. 443-473.

DE LONGUEVILLE F., HOUNTONDI Y. C., KINDO I., GEMENNE F. et OZER, P. (2016). Long-term analysis of rainfall and temperature data in Burkina Faso (1950-2013). *International Journal of Climatology*, n°36, pp. 4393-4405.

DE MARTONNE E. (1926). Aréisme et indice d'aridité. *Compte rendu Académie des Sciences*, Vol 181, pp. 1395-1398.

DELLA A. A. (2009). Cartographie des zones à risque d'inondation, d'érosion côtière et de mouvements de terrain dans la ville d'Abidjan. Ministère de l'environnement, de la salubrité urbaine et du développement durable, Programme des Nations Unies pour le développement, 34 p.

DELOR C., SIMEON Y., VIDAL M., ZEADE Z., KONE Y. et ADOU M. (1995). Carte Géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200 000, feuille Séguéla, Mémoire n°9 de la Direction des Mines et de la Géologie, Abidjan, 19 p.

DIARRA B., HAMALA-DIAKITE C. et MACINA M. (2007). Élaboration de stratégie d'adaptation des ressources en eau aux changements climatiques. *Projects ongoing*, phase 1, vol 1, 61 p.

DIBI K.P.A. (2010). Rainfall and Agriculture in Central West Africa since 1930: Impact on Socioeconomic Development. *LAP-LAMBERT Academic Publishing*, 304 p.

- DILLEY M., CHEN R. S., DEICHMANN U., LERNER-LAM A. L. et ARNOLD M. (2005).** Natural disaster hotspots: a global risk analysis. *Disaster Risk Management Series*, 5, Washington DC.
- DJE Bi D.D. (2015).** Evaluation et Planification des ressources en eau du Bassin versant de la Marahoué (centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Master en Sciences et Gestion de l'Environnement, Université Nangui Abrogoua, 83 p.
- DKENGNE S.P. (2006).** Modélisation et prévision des débits naturels journaliers du B.V.I. de la Sanaga à la station de contrôle de Songmbengue. Master de Statistique Appliquée, Cameroun, 101 p.
- DLAMINI N. S., ROWSHONA M. K., SAHAB UJJWAL, FIKRIA A., LAIC S. H. et MOHDD M. S. F. (2015).** Developing and calibrating a stochastic rainfall generator model for simulating daily rainfall by Markov chain approach. *Journal Technology (Sciences & Engineering)*, Vol. 76, n°15, pp. 13-19.
- DONOU B. T. (2015).** Extrêmes hydroclimatiques dans le bassin inférieur du fleuve Ouémé : Diagnostic, impact agricole et scénario de gestion. Thèse de Doctorat de l'Université Abomey Calavi, 264 p.
- DREYFUS G. (2004).** Réseaux de neurones, méthodologie et applications, Eyrolles, 2ème édition.
- DRUYAN L. M. (2011).** Studies of 21st-century precipitation trends over West Africa. *International Journal of Climatology*, n°31, vol 10, pp. 1415–1424.
- DUCHARNE A. (2008).** La Seine en 2100? Impacts croisés du changement climatique et des pressions anthropiques directes. *Techniques Sciences Methodes-Genie Urbain Genie Rural*, vol 3, pp. 76-89.
- EDGAR H. G. (2008).** Développement d'une méthodologie hydrologique/ statistique pour estimer les débits d'étiages au Québec habité ». Thèse de Doctorat de l'Université du Québec INRS-ETE, 296 p.
- EHOUSSOU K. M., KOUASSI A. M. et KAMAGATÉ B. (2019).** Caractérisation hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région du bélier, centre de la Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, pp. 137–160.
- EL BADAOUI H., ABDALLAOUI A., et CHABAA S. (2014).** Using MLP neural networks for predicting global solar radiation. *The International Journal of Engineering and Science (IJES)*, vol.2, n°12, pp. 15-26.

- ELMAN J. L. (1990).** Finding structure in time, *Cognitive Science*, n°14, pp. 179-211.
- ELMAN J. L. (1991).** Distributed representations, simple recurrent networks and grammatical structure. *Machine Learning*, n°7, pp. 195-224.
- EMADODIN I., REINSCH T. et TAUBE F. (2019).** Drought and Desertification in Iran. *Hydrology*, n°66, vol.6, pp. 1-12.
- FARAH A. K. (2014).** Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien, Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magistère en écologie et environnement Option: pathologie des écosystèmes forestiers, 113 p.
- FARAWAY J. et CHATFIELD C. (1995).** Times series forecasting with neural networks: a case study. Research report 95-06 of the statistics group. University of Bath.
- FONTAINE B. P., ROUCOU M., CAMARA N., VIGAUD A., KONARÉ S. I., SANDA A., DIEDHIOU et JANICOT S. (2012).** Variabilité pluviométrique, changement climatique et régionalisation en région de mousson africaine, *La Météorologie*, Spécial AMMA, pp. 41-48.
- FORTIN V., OUARDA T. B. M. J. et BOBÉE B. (1997).** The use of artificial neural networks for the prédiction of water quality parameters. *Water Resources Research*, n°33, pp. 2423-2424.
- FOSSOU R. M. N., LASM T., SORO N., SORO T., SORO G., DE LASME O. Z., BAKA D., O. Z. ONETIE O. Z. et OROU R. (2014).** Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines : cas des stations de Bocanda et de Dimbokro au Centre-Est de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *Larhyss Journal*, n°21, pp. 87-110.
- FOUCHIER C. (2010).** Développement d'une méthodologie pour la connaissance régionale des crues. Thèse de doctorat, 266 p.
- GAILLIEZ S. (2013).** Estimation des débits d'étiage pour des sites non jaugés. Application en région wallonne. Dissertation originale présentée en vue de l'obtention du grade de Docteur en sciences agronomiques et ingénierie biologique, Université de Liège -Gembloux, Belgique, 271p.
- GARCIA F. (2016).** Amélioration d'une modélisation hydrologique régionalisée pour estimer les statistiques d'étiage. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Ecole doctorale Géosciences, Ressources Naturelles et Environnement, 272 p.
- GASPAR D. L. (2010).** Application de l'apprentissage artificiel a la modélisation systémique de la chaine hydro-meteorologique pour la prévision des crues éclair. Travail final d'études. Ingénierie

Technique d'Œuvres Publiques. UPC, Universitat Politècnica de Catalunya, Ecole des Mines d'Alès, France, 100 p.

GAUSSEN H. (1954). Théorie et classification des climats et microclimats. Actes VII Congr. Int. Bot. Paris, pp. 125-130.

GBAGUIDI T. B. (2010). Système d'informations et représentations cartographiques pour la gestion des inondations à Cotonou. Mémoire de master en ingénierie de l'eau et de l'environnement. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2IE), Burkina Faso, 108 p.

GEMENNE F., BLOCHER J., DE LONGUEVILLE F., VIGIL DIAZ T. S., ZICKGRAF C., GHARBAOUI D. et OZER P. (2017). Changement climatique, catastrophes naturelles et déplacements de populations en Afrique de l'Ouest. *Geo-Eco-Trop*, n°41, vol 3, pp. 317-337.

GEORGETA R. R. (2013). Simulation fine des précipitations et des crues extrêmes. Application aux petits bassins versants alpins non glaciaires. Thèse de doctorat de l'Université de Lausanne, 247p.

GIEC (2013). Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique, 34 p.

GIEC (2014). Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève, Suisse, 161 p.

GNANZOU A. (2014). Etude des séries volcano-sédimentaires de la région de Dabakala (Nord-Est de la Côte d'Ivoire): genèse et évolution magmatique. Contribution à la connaissance de la minéralisation aurifère de Bobosso dans la série de la Haute-Comoé. Thèse de doctorat de l'Université Paris Sud Orsay, France et de l'Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 303 p.

GOUBANOVA K. (2007). Une étude des événements climatiques extrêmes sur l'Europe et le bassin Méditerranéen et de leur évolution future. Thèse de doctorat en sciences de l'environnement, Université Paris 6, 121 p.

GOULA A. B. T., SORO G., DAO A., KOUASSI W. F. et SROHOUROU B. (2010). Frequency analysis and new cartography of extremes daily rainfall events in Cote d'Ivoire. *Journal of Applied Sciences*, Vol. 10, n° 16, pp. 1684-1694.

GOULA B. T. A., SAVANÉ I., KONAN B., FADIKA V. et KOUADIO G. B. (2006). Etude comparative de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau des bassins du N'Zo et du N'Zi en Côte d'Ivoire. *Vertigo*, Vol.7, n°1, pp. 1-12.

GRANDJEAN A. et JANCOVICI J. M (2006). Le plein SVP ! La solution au problème de l'énergie. *Seuil*, 190 p.

GRELIER B., DROGUE G., PIROTTON M., ARCHAMBEAU P. et GERNEZ E. (2017). Peut-on estimer l'effet du changement climatique sur l'écoulement à l'exutoire d'un bassin sans modèle pluie-débit ? Un test de la méthode de transfert climat-écoulement par régression dans le bassin transnational de la Meuse. *Climatologie*, Vol. 14, pp. 48-81.

Grontmij Environnement et Infrastructures (GEI) (2013). Définition des zones inondables (aléas) et des enjeux du bassin versant de la Bénovie - Commune de Saint Bauzille de Montmel. Dossier n° FL34.B.0036 / PLA, 50 p.

GRUSSON Y. (2016). Modélisation de l'évolution hydroclimatique des flux et stocks d'eau verte et d'eau bleue du bassin versant de la Garonne. Thèse de doctorat. Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier, 355 p.

GUIATIS. (2019). Modélisation et cartographie de risque d'inondation dans la plaine de Grombalia. Mémoire de Licence appliquée en Géographie. Faculté des sciences humaines et sociales de Tunis, 33 p.

GUMBEL E.J. (1954). Statistical theory of droughts. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 80, pp. 77-89.

HABIBI B., MEDDIA M. et BOUCEFIANE A. (2013). Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales : Cas du Bassin-Chergui. *Revue Nature & Technologie, Sciences de l'Environnement*, n° 08, pp. 41-48.

HACHE M. (1993). Modélisation de variables de précipitation par des distributions statistiques. Application à la région du Québec et du Nouveau-Brunswick. Mémoire de maîtrise INRS-EAU, Université du Québec, 179 p.

HAMATAN M. (2002). Synthèse et Evaluation des Prévisions Saisonnières en Afrique de l'Ouest ». DEA Sciences de l'Eau dans l'Environnement Continental de l'Ecole Doctorale : Sciences de la Terre et de l'Eau de l'Université Montpellier II, France 116 p.

- HAMATAN M., GIL MAHE G., SERVAT E., PATUREL J. P. et AMANI A. (2004).** Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l'Ouest. Note de recherche, *Sécheresse*, Vol 15, n°3, 8 p.
- HAMZA A. (1999).** Estimation régionale des débits d'étiage de la province de Québec (Développement des modèles régionaux de queues et d'invariance d'échelle). Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès science (M. Sc). Université du Québec, INRS-EAU, 177p.
- HANGNON H., DE LONGUEVILLE F. et OZER P. (2015).** Précipitations 'extrêmes' et inondations à Ouagadougou : quand le développement urbain est mal maîtrisé. *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège, p.p. 497-502.
- HARDY C. (2019).** Contribution au développement de l'apprentissage profond dans les systèmes distribués. Thèse de Doctorat de Université de Rennes 1, Comue Université Bretagne Loire, 151 p.
- HAUHOLOT C. (2008).** Analyse du risque pluvial dans les quartiers précaires d'Abidjan. Etude de cas à Attécoubé. *Geo-Eco-Trop*, n°32, pp 75 – 82.
- HAZEN A. (1914).** Storage to be provided in impounding reservoirs for municipal water supply. *Trans. ASCE*, Vol. 77, pp. 1547-1550.
- HEBAL A. et REMINI B. (2011) :** Choix du modèle fréquentiel le plus adéquat à l'estimation des valeurs extrêmes de crues (cas du nord de L'Algérie). *Revue canadienne de génie civil*, Vol 38, n°8, pp. 881-892.
- HEBB D. O. (1949).** "Introduction", *The Organisation of Behavior*. Wiley, New York, pp. 11-19.
- HIEZ G. (1977).** Homogénéisation des données pluviométriques. *Cahiers ORSTOM*, série hydrologie, Vol.14, n° 2, 44 p.
- HOPFIELD J. J. (1982).** Neural networks physical systems with emergent collective computational abilities, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, n°79, pp. 2554-2558.
- HOPFIELD J. J. (1984).** Neurons with graded responses have collective computational properties like those of two-states neurons, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, n°81, pp 3088-3092.
- HORRITT M. S. et. BATES P. D. (2002).** Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, Vol. 268, n°(1-4), pp. 87-99.

- HOSTACHE R., PUECH C. et RACLOT D. (2005).** Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR. Cybergeog: European Journal of Geography, 10 p.
- HOUNDÉNOU C. (1999).** Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide. L'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne Dijon, France, 390 p.
- HOUNDÉNOU C. et HERNANDEZ K. (1998).** « Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990). Un exemple de sécheresse au Nord-Ouest du Bénin (Afrique occidentale) », *Sécheresse*, Vol. 9, n°1, pp. 23-34.
- HOUNDÉNOU C., AMOUSSOU E. et BOKO M. (2011).** Analyse des événements hydro-catastrophiques au Bénin en 2009-2010. In « Climat Montagnard et Risques ». XXIVème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), Mart-Rovereto, Italie, pp. 321-326.
- HSU K. L., GUPTA H. V. et SOROOSHIAN S. (1995).** Artificial Neural-Network Modeling of the Rainfall-Runoff Process. *Wat. Resour. Res.*, Vol.31, n°10, pp. 2517-2530.
- HUBERT P. (2005).** La prédétermination des crues. *C. R. Geosci.* 337, pp. 219–227
- INGEROP (2015).** Etude hydraulique et définition d'un programme d'interventions pour la réduction des risques d'inondation du fleuve Préconil et de ses affluents - Phase 1 : Analyse du fonctionnement du bassin versant. Rapport de phase 1, 104 p.
- INSTITUT NATIONALE DE LA STATISTIQUE (INS) (2000).** Recensement Général de la population et des habitats de la Côte d'Ivoire.
- IONAC N., GRIGORE E. et CONSTANTIN D. M. (2015).** Évaluation des phénomènes de dessèchement et de sécheresse dans la zone continentale du plateau de la Dobroudja du Sud. *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège, pp. 269-274.
- IPCC (2007).** Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of working group II to the fourth Assessment report of the IPCC. *Cambridge University Press*, pp 391-431.
- IPCC (2012).** Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and, II of the Intergovernmental. Panel on Climate Change, *Cambridge University Press*, Cambridge, UK, and New York, 582 pp.

IRIE. G. R. (2017). Impacts des changements climatiques sur les ressources en eau du bassin versant de la Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université Nangui Abrogoua, Côte d'Ivoire, 190 p.

IVOIRE CONSULTING ENVIRONNEMENT (IEC) et SOCIETE AGRO ECONOMIQUE DE CÔTE D'IVOIRE (2019). Projet multisectoriel d'appui au programme social du gouvernement, composante A et B. Rapport final, 292 p.

JACQUES J. (2005). Contributions à l'analyse de sensibilité et à l'analyse discriminante généralisée. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble I.

JAMES B. (2008). La prévention des catastrophes: le rôle de l'UNESCO. Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la culture, Paris. 49 p.

JODOUIN J. F (1994). Les réseaux de neurones, principes et définitions et Les réseaux neuro-mimétiques, *Hermès*, Paris, Vol 2.

JOHANNET A., TAVER V., KONG-A-SIOU L., ESTUPINA B. V., PISTRE S., MANGIN A., VAYSSADE B., VINCHES M. et BERTIN D. (2012). Les réseaux de neurones artificiels pour la modélisation hydrodynamique des aquifères karstiques : présentation générale et illustrations. *Karstologia : revue de karstologie et de spéléologie physique*, n°60, pp. 45-59.

JOURDA J. P. R. (2002). Les ressources en eau souterraine de la Côte d'Ivoire et le cas des aquifères transfrontaliers entre la Côte d'Ivoire et le Ghana. Proceedings of international workshop, Tripoli, Libya, 6 p.

KAMAGATÉ A., KOFFI Y. B., KOUASSI A. M., KOUAKOU B. D. et SEYDOU D. (2019). Impact des ÉVolutions Climatiques sur les Ressources en eau des Petits Bassins en Afrique Sub-Saharienne: Application au Bassin Versant du Bandama à Tortiya (Nord Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal, ESJ*, Vol 15, n°9, pp. 84-105.

KHARROUBI O. (2013). Prévion des crues par modèle de réseau de neurones artificiels : application au bassin versant de l'Eure. Thèse de Doctorat de l'Université de Lille 1, France, 211p.

KODJA D. J. (2018) Indicateurs des évènements hydro-climatiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest. Thèse de Doctorat de l'Université Montpellier (France) ; Université d'Abomey-Calavi (Bénin), 288 p.

KOFFI Y. B. (2007). Etude du calage, de la validation et des performances des réseaux de neurones formels à partir des données hydro-climatiques du bassin versant du Bandama blanc (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Côte d'Ivoire, 210 p.

KOFFI Y. B., AHOUSSE K. E., KOUASSI A. M., KOUASSI O., KPANGUI L. C. et BIEMI J. (2014). Application des réseaux de neurones formels pour la prévision des débits mensuels du Bandama blanc à la station de Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire). *Afrique SCIENCE*, Vol 10, n°3, pp. 134 – 145.

KOHONEN T. (1982). Self-organized formation of topologically correct feature maps. *Biological Cybernetics*, n°43, pp. 59-69.

KONATE L. (2018). Contribution des indices climatiques et des modèles de pluies à la surveillance et prévention des inondations pluviales en milieu urbain : cas du district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat de l'Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Côte d'Ivoire, 227p.

KOUADIO J. S. (2016). Les technologies smartphone comme outils d'aide à l'alerte face aux crues rapides en France-Expérimentations dans le Vaucluse et le Var. Thèse de Doctorat de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 271 p.

KOUAKOU K. E., GOULA BI. T. A, et KOUASSI A. M. (2012). Analyze of Climate Variability and Change Impacts on Hydro-Climate Parameters: Case Study of Côte d'Ivoire. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol,3 n°2, pp. 1–8.

KOUAKOU K. E. (2011). Impact de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant de la Comoé. Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé (Côte d'Ivoire), 186 p.

KOUAMÉ K. A. (2013). Application du modèle hydrologique distribué HYDROTEL à la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide soumis aux pressions anthropiques : cas du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Côte d'Ivoire, 195 p.

KOUAMÉ K. F., KOUASSI A. M., N'GUESSAN B. T. M., KOUAO J. M, LASM T. et SALEY M. B. (2013). Analyse de tendances dans la relation pluie-débit dans un contexte de changements climatiques: cas du bassin versant du N'Zo-Sassandra (Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol 2, n°2, pp. 92-103.

KOUAME K. R., DIBI KANGAH P. A., KOLI Bi Z. (2019). Variabilité climatique dans le centre-est de la côte d'ivoire: indicateurs, scénarii actuels et futurs. *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, n°1, pp. 7-20.

KOUASSI A. M. (2007). Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody, Côte d'Ivoire, 234 p.

KOUASSI A. M., ASSOKO A. V. S., KOUAKOU K. E., DJÉ K. B., KOUAMÉ K. F. et BIEMI J. (2017b). Analysis of the hydrological impacts of climate variability in West Africa: case study of the Bandama watershed in Ivory Coast. *Larhyss Journal*, n°31, pp. 19-40.

KOUASSI A. M., KOFFI Y. B., NASSA R. A. K., KOUAME K. F. et BIEMI J. (2018c). Prévision saisonnière des débits de basses eaux au sein des bassins fluviaux de l'Afrique de l'ouest : cas du bassin versant du n'Zi-Bandama, Côte d'Ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, Vol 32 pp. 153 – 171.

KOUASSI A. M., KOUAMÉ K. F., KOFFI Y. B., DJÉ K. B., PATUREL J. E. et SEKOUBA O. (2010). Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Cybergeog: European Journal of Geography*, pp. 1-16.

KOUASSI A. M., KOUAMÉ K. F., SALEY M. B. et BIEMI J. (2013). Impacts des changements climatiques sur les eaux souterraines des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'Zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, Vol. n°16, pp. 121-138.

KOUASSI A. M., KOUAME K. F., SALEY M. B. et YAO B. K. (2007). Identification de tendances dans la relation pluie-débit et recharge des aquifères dans un contexte de variabilité hydroclimatique: cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 16, n°3, pp. 412–427.

KOUASSI A. M., LOBA M. C., KOUAMÉ K. A, KOUAMÉ K. F. et BIEMI J. (2016). Modélisation empirique de la transmissivité des aquifères de socle de Côte d'ivoire, *Larhyss Journal*, n°25, pp. 139-162.

KOUASSI A. M., N'GUESSAN B. T. M., NASSA R. A. K., KOUAME K. F. et BIEMI J. (2019). Modélisation statistique des débits d'étiage au sein du bassin versant du N'zi (Bandama, Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, n°33, pp. 119-136.

KOUASSI A. M., NASSA R. A. K., KOFFI Y. B., KOUAME K. F. et BIEMI J. (2018a). Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). *Revue des Sciences de l'Eau*, n°31, pp. 147-160.

KOUASSI A. M., NASSA R. A. K., N'GUESSAN B. T. M., KOUAME K. F. et BIEMI J. (2018b). Caractérisation des débits d'étiage dans un contexte de changements climatiques : cas du bassin versant du N'Zi (Côte d'Ivoire). *Agronomie Africaine*, Vol. 30, n°3, pp. 215-223.

KOUASSI A.M, TOZAN BI, KOUAME K.F, KOUAME K.A. OKAINGNI J-C et BIEMI J. (2012). Application de la méthode des simulations croisées à l'analyse de tendances dans la relation pluie-débit à partir du modèle GR2M : Cas du bassin versant du N'Zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Comptes rendus géoscience*, Vol.344, n°5 pp. 288–296.

KOUASSI A.M., ASSOKO A.V.S., DJÉ K.B., KOUAKOU K.E., KOUAMÉ K.F. et BIEMI J. (2017a). Analysis of the persistence of drought in West Africa: Characterization of the recent climate variability in Ivory Coast. *Environmental and Water Sciences, Public Health & Territorial Intelligence*, Vol.1, n°2, pp. 47-59.

KOUIDER A. (2003). Analyse fréquentielle locale des crues au Québec (Canada). Mémoire de Maîtrise, Université du Québec, INRS, ETE, 66 p.

KOUMASSI D. H., TCHIBOZO A. E., VISSIN E. et HOUSSOU C. (2014). Analyse fréquentielle des évènements hydro-pluviométriques extrêmes dans le bassin de la Sota au Bénin. *Afrique Science* Vol.10, n°2, pp. 137 – 148.

KOURAISS K. et AIT BRAHIM Y. (2010). Les changements climatiques à Marrakech (Maroc) ÉVolution récente et projections futures. Mémoire pour obtenir le titre de : Licence es Sciences et Techniques Eau et environnement, Université Cadi Ayyad Faculté des Sciences et Techniques-Marrakech, Observatoire Régional de l'Environnement et du Développement Durable, 47 p.

LANG C. (2007). Etiages et tarissements : vers quelles modélisations ? L'approche conceptuelle et l'analyse statistique en réponse à la diversité spatiale des écoulements en étiage des cours d'eau de l'Est français. Thèse de Doctorat, Université de Metz, France, 375 p.

- LANG C. (2011).** Les étiages : Définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. *Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, Vol.2, pp. 24-27.
- LANG M., CHASTAN B. et GRELOT F., (2003).** La méthode inondabilité : Appropriation par les hydrologues de la vulnérabilité dans le diagnostic sur le risque d'inondation. Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés. *L'Harmattan*, 12 p.
- LASM T. (2000).** Hydrogéologie des réservoirs fracturés : analyse statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des Montagnes de Côte d'Ivoire (domaine Archéen). Thèse de Doctorat Unique, Université de Poitiers, France, 273 p.
- LECERF G. (2014).** Développement d'un Réseau de Neurones Impulsionnels sur Silicium à Synapses Memristives. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux, 141 p.
- LEGESSE D., VALLET C.C. et GASSE F. (2003).** "Hydrological response of a catchment to climate and land use changes in tropical Africa; case study south central Ethiopia", *Journal of Hydrology*, Vol 275, pp. 67–85.
- LEK S., DIMOPOULOS I., DERRAZ M. et EL GHACHTOUL Y. (1996).** Modélisation de la relation pluie-débit à l'aide des réseaux de neurones artificiels. *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 9, n°3, pp. 319–331.
- LETTENMAIER D.P. et WOOD E.F. (1993).** Hydrologie Forecasting. Handbook of hydrology, D.R. Maidment, McGraw- Hill.
- LEUMBE LEUMBE O., BITOM D., MAMDEM L., TIKI D. et IBRAHIM A. (2015).** Cartographie des zones à risques d'inondation en zone soudano-sahélienne : cas de Maga et ses environs dans la région de l'extrême-nord Cameroun. *Afrique Science n°11, Vol 3, pp. 45 – 61.*
- LÉVÊQUE C., DEJOUX C. et ILTIS A. (1983).** Limnologie du fleuve Bandama, Côte d'Ivoire. O.R.S.T.O.M., France, *Hydrobiologia*, Vol. 100, pp. 113-141.
- L'HOMME J. (2006).** Modélisation des inondations en milieu urbain: approches unidimensionnelle, bidimensionnelle et macroscopique, Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 298 p.
- LOGOFET D. O et LESNAYA E. V. (2000).** The mathematics of Markov models: what Markov chains can really predict in forest successions. *Ecological Modelling*, n°126, pp. 285-298.

- LÓPEZ J. et FRANCÉS F. (2012).** Non-stationary flood frequency analysis in continental Spanish rivers, using climate and reservoir index as external covariates. 3rd STAHY International Workshop on statistical methods for hydrology and water resources management, Tunis.
- MACH K. et MASTRANDREA M. (2014).** Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability, Cambridge and New York, *Cambridge University Press*, Vol. 1, pp.-32.
- MAHÉ G. (2006).** Variabilité pluie-débit en Afrique de l'Ouest et Centrale au 20ème siècle : changements hydro-climatiques, occupation du sol et modélisation hydrologique. Mémoire pour l'habilitation à diriger des recherches, Université des Sciences et Techniques Montpellier 2, 160 p.
- MAHÉ G., L'HOTE Y., OLIVRY J. C. et WOTLING W. (2001).** Trends and discontinuities in regional rainfall of West and Central Africa. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 46, n°2, pp. 211-226.
- MAHE G., LEDUC C., AMANI A., PATUREL J. E., GIRARD S., SERVAT E. et DEZETTER A. (2003).** Augmentation récente du ruissellement de surface en zone soudano-sahélienne et impacts sur les ressources en eau. *Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides*, pp. 215–222.
- MAHÉ G., PATUREL J. E., SERVAT E., CONWAY D. et DEZETTER A. (2005).** Impact of land use change on soil water holding capacity and river modeling on the Nakambe River in Burkina-Faso. *Journal of Hydrology*, Vol, 300, pp. 33-43.
- MAKHLOUF, Z. (1994).** Compléments sur le modèle pluie-débit GR4J et essai d'estimation de ses paramètres. Thèse de Doctorat, Université Paris XI Orsay, 426 pp.
- MANGOUA M. J. (2013).** Évaluation des potentialités et de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine des aquifères fissurés du bassin versant de la Baya (Est de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université d'Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 169 p.
- MARÉCHAL J. C., ROBERT W., PATRICK L., KAMBHAMPATI S. et FRÉDÉRIC T. (2003).** Anisotropie verticale de la perméabilité de l'horizon fissuré des aquifères de socles : concordance avec la structure géologique des profils d'altération, *Comptes Rendus Géosciences*, Vol 335, pp. 451-460.
- MAREUIL A. (2005).** Impact des changements climatiques sur les crues extrêmes des rivières : cas de la rivière Châteauguay. Mémoire présentée à l'école de technologie supérieure, Montréal.

- MARGAT J. (1972).** Terminologie hydrogéologique propositions pour un dictionnaire. Extraits de la Chronique d'hydrogéologie (n°5 à 11, 1965-1967) et du bulletin du BRGM (2, section III hydrogéologie, 1968-1971), Département géologie de l'aménagement hydrogéologie, Orléans, France, 139 p.
- MARTIN L. (1973).** Morphologie, Sédimentologie et Paléogéographie au quaternaire récent du plateau continental ivoirien. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université de Paris VI, ORSTOM, 340 p.
- MARTINEZ F. T. A. (2015).** Conception d'un système de prévisions hydrologiques d'ensemble multi-modèle en contexte opérationnel, Mémoire pour l'obtention du grade de Maîtres sciences (M.Sc.A.). Département des Sciences Appliquées Université du Québec, 180p.
- MARTIN-GOUSSET H. (2008).** Amélioration de la prévision des crues a l'amont de Villerest. Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur, École Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, Établissement Public Loire, 65 p.
- McCLELAND J. L. et RUMELHART D. E. (1986a).** A distributed model of human learning and memory. *Journal of experimental psychology*, n°114, p 159-188.
- McCLELAND J. L. et RUMELHART D. E. (1986b).** *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructures of Cognition*, Vol. 2, Cambridge.
- McCULLOCH W. S. et PITTS W. (1943).** "A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity". *Bull. Math. Biophys.*, Vol.5, pp. 115-133.
- MEDDI M. et ABBES A. S. B. (2014).** Analyse statistique et prévision des débits de crues dans le bassin versant de l'Oued Mekerra (Ouest de l'Algérie). *Nature & Technologie* ». C- Sciences de l'Environnement, n° 10, pp. 21-31.
- MEDDI M. et SADEUK B. A. A. (2007).** Analyse statistique et prévision des débits de crues dans le bassin versant de l'Oued Makerra (Ouest de l'Algerie). 2nd International Workshop on Hydrological Extremes: Variability in time and space of extreme rainfalls, floods and drought. *AMHY-FRIEND group*, University of Calabria Cosenza, 19 p.
- MEKHLOUFI N. (2014).** Prédétermination et Prévision des étiages des Oueds de l'Algérie Septentrionale. Mémoire de MAGISTERE de l'Université de Kasdi Merbah Ouargla, faculté des sciences pratique département d'Hydraulique et Génie Civil, 120 p.

MEKLATI A. (2009). La mise en place d'un plan d'intervention en cas de secheresse pour Wilaya d'Alger. Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara Boumerdes, 105 p.

MERCADO M. G., TROYO D. E., AGUIRRE G. A., MURILLO A. B., BELTRÁN M. L. F. et GARCÍA H. J. L. (2010). Calibration and application of the De Martonne aridity index for the analysis of hydric deficit as an estimator of aridity and desertification in arid areas. *Universidad y Ciencia, Tropico Humedo*, Vol.26, n°1, pp. 51-64.

MEYLAN P., FAVRE A. C. et MUSY A. (2008). Hydrologies fréquentielles. Une science prédictive. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, 173 p.

MILLER J. F., CRONSHEY R., HUFFMAN R G., KIRBY W.H., THOMAS JR. W. O., BERTLE F. A. et NEWTON D. W. (1982). Guidelines for determining flood flow frequency, bulletin 17b of hydrology subcommittee. Interagency advisory committee on water data, Reston Virginia, *Collections March*, 194 p.

MINSKY M. et PAPERT S. (1969). "Introduction", Perceptrons. MIT Press, Cambridge, pp. 1- 20.

MOHYMONT B. et DEMARÉE R. G. (2006). Courbes intensité-durée-fréquence des précipitations à Yangambi, Congo, au moyen de différents modèles de type Montana. *Hydrological Sciences Journal*, Vol.51, n°2, pp. 239-253.

MOKHTARI N., MRABET R., LEBAILLY P. et BOCK L. (2013). Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. *Revue marocaine des sciences agronomiques et vétérinaire*, Vol.2, n°1, pp. 50-66.

MORIN M. (2008). Concepts de base en sécurité civile, 60 p.

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'école nationale du génie rural des eaux et des forets, 323 p.

MULLER A. (2006). Comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes en France. Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2, France, 214 p.

MUSELLI M., POGGI P., NOTTON G. et LOUCHE A. (2001). First Order Markov Chain Model for Generating Synthetic 'Typical Days' Series of Global Irradiation in Order to Design PV Stand Alone Systems. *Energy conversion and management*, n°42, Vol 6, pp. 675-687.

- N'GUESSAN B. V. H., SALEY M. B., OGA Y. M. S., YAPI A. F., KOUADIO B. H., BIEMI J. et KOUADIO A. (2017).** Caractérisation de la sécheresse hydrologique dans la région de la Marahoué (Centre-Ouest De La Côte d'Ivoire). *International Journal of Engineering Science Invention*, Vol.6, n°12, pp. 19-27.
- NAIRA C. (2008).** Détermination de l'humidité du sol dans le bassin versant du Mackenzie à partir des données satellitaires AMSR-E. Thèse de l'École de Technologie Supérieure, Université du Québec, 176 p.
- NANTY S. (2015).** Quantification des incertitudes et analyse de sensibilité pour codes de calcul à entrées fonctionnelles et dépendantes. Mémoire de thèse de l'Université De Grenoble, CEA Cadarache et de l'École Doctorale Mathématiques, Sciences et Technologies de l'Information, Informatique, 175 p.
- NASH J. E. et SUTCLIFFE J. V. (1970).** River flow forecasting through conceptual models part I-A discussion of principles. *J. Hydrol*, Vol.10, n°3, pp. 282-290.
- NILSSON N. J. (1965).** Learning Machines. Foundations of trainable pattern-classifying system. *Mcgraw-Hill*, New York.
- NISTOR M. M. (2016).** Spatial distribution of climate indices in the Emilia-Romagna region. Meteorological applications, *Meteorol. Appl.* Vol 23, pp. 304–313.
- NOUFE D. (2011).** Changements hydroclimatiques et transformations de l'agriculture : l'exemple des paysanneries de l'Est de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Paris 1, France, 375p.
- O.E.C.D. (2002).** Glossaire des principaux termes relatifs à l'évaluation et la gestion axée sur les résultats, 40 p.
- OCHA-AFRIQUE DE L'OUEST. (2009).** Afrique de l'Ouest • Bulletin d'information Octobre 2009, 4 p.
- OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU (OIEau) (2019).** Glossaire - eau et milieux aquatiques. 310 p.
- OLIVRY J. C., BRICQUET J. P. et MAHÉ G. (1993).** Vers un appauvrissement durable des ressources en eau de l'Afrique humide ? *Hydrology of warm humid region*. Wallingford, UK: IAHS Press, IAHS Publ. 216, pp. 67–78.

ONIKPO C. ET ELLIS D. (2019). Guide de conception des petites installations de production d'eau potable. Québec, Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 135 p.

ORGANISATION DES NATIONS UNIES - STRATÉGIE INTERNATIONALE DE PRÉVENTION DES CATASTROPHES (ONU-SIPC) (2011). Stratégie Nationale de Gestion des Risques de Catastrophes & Plan d'Action Côte d'Ivoire. Rapport version finale, 65 p.

ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE (OMM) (2011). Manuel sur la prévision et l'annonce des crues. OMM-n°1072, 154 p.

ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE (OMM) (2012). Glossaire international d'hydrologie. OMM-n°385, 269 p.

ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE (OMM) (2012). Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé. Temps-Climat-Eau, n°1090.

ORGANISATION MÉTÉOROLOGIQUE MONDIALE (OMM) (2014). Guide des pratiques hydrologiques. Volume II Gestion des ressources en eau et application des pratiques hydrologiques. OMM-n°168, 328 pp.

OUATTARA G. (1998). Structure du batholite de Ferkessédougou (secteur de Zuénoula, Côte-d'Ivoire) : Implications sur l'interprétation du paléoprotérozoïque d'Afrique de l'ouest à 2.1 Ga, Thèse doctorat, Université d'Orléans, France, 291 p.

OUATTARA G., KOFFI G.B. ET YAO, K.A. (2010). Cartographie géologique à l'aide de l'imagerie Satellitale Radar ERS-1: Mise en Évidence de Structures Circulaires Emboîtées dans la Région de Tortiya au nord de la Côte d'Ivoire (Craton Ouest Africain). *European Journal of Scientific Research*, pp. 212-220.

OUHAMDOUCH S., BAHIR M., CARREIRA P. M. (2018). Impact du changement climatique sur la ressource en eau en milieu semi-aride : exemple du bassin d'Essaouira (Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, Vol. 31, n°1, pp.13-27.

OZER P. et PERRIN D. (2014). Eau et changement climatique : tendances et perceptions en Afrique de l'Ouest. Eau, milieux et aménagement. Une recherche au service des territoires, *Angers*, pp. 227-245.

OZER P., HOUNTONDI Y. et LAMINO M.O. (2009). Évolution des caractéristiques pluviométriques dans l'est du Niger de 1940 à 2007. *Geo-Eco-Trop: Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Ecologie Tropicales*, Vol 33, pp. 11-30.

OZER P., MANZO L. TIDJANI A. D., DJABY B. et DE LONGUEVILLE F. (2017). Évolution récente des extrêmes pluviométriques au Niger (1950-2014). *Geo-Eco-Trop: Revue Internationale de Géologie, de Géographie et d'Ecologie Tropicales*, Vol. 41, n°3, pp. 375-384

PEUGEOT C., BOCK O., BOONE A., CAPPELAERE B., GOSSET M., MEYNADIER R., SEGUIS L., LEBEL T. et REDELSPERGER J-L. (2012). Le cycle de l'eau dans le système de mousson d'Afrique de l'Ouest. *La Météorologie Spécial AMMA*, pp. 55-63

PIEDALLU C., LEBOURGEOIS F., GÉGOUT J.C., SEYNAVE I., VEPIERRE R., CLUZEAU C., NEDELTCHEVA T., BRUNO E. et BADEAU V. (2007). Développement, spatialisation et validation d'indices bioclimatiques. Rapport de recherche, 85 p.

PILABINA S., YABI I. et KOLA E. (2019). Changements climatiques et sensibilité des ressources en eau dans le bassin versant de la Kara au Nord-Togo. XXXIIème Colloque International de l'AIC, Thessaloniki – Grèce, pp. 107-112.

PLATEFORME HUMANITAIRE DU SECTEUR PRIVE DE COTE D'IVOIRE (2019). Évaluation du paysage des situations d'urgence complexe et des catastrophes naturelles. Connecting business initiative, PNUD, 57 p.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement) (2011). Sécurité des moyens d'existence. Changements climatiques, migrations et conflits au Sahel. Rapport n° DEP/1472/GE.

PNUE (Programme des Nations Unies pour l'Environnement). (2013). Rapport Annuel, 60p.

POTHIN K. B. K., GIOAN P. et GRONAYES C. C. (2000). Bilan géochronologique du socle précambrien de Côte d'Ivoire. *Bioterre, Rev. InternSci. de la Vie et de la Terre*, Vol. 1, n°1, pp. 36-47.

POWEL M. J. D. (1985). Radial Basis Function for Multivariables interpolation: a review. IMA Conference on algorithms for the approximation of functions and data. RMCS Shrivenham, UK.

PRACTICA, EW/VITA et UNICEF. (2009). Étude de faisabilité des forages manuels identification des zones potentiellement favorables, 73 p.

PUECH C. (1995). Suivi des inondations en Afrique du Nord à l'aide de la télédétection satellitaire. In 9ème Conférence régional Afro-asiatique de la CIID, Alger, 7 p.

PULVIRENTI L., PIERDICCA N., CHINI M. et GUERRIERO L. (2011). An algorithm for operational flood mapping from Synthetic Aperture Radar (SAR) data using fuzzy logic. *Natural Hazards and Earth System Science*, Vol 2, n°11, pp. 529-540.

RAMAROTAFIKA R. (2012). Modélisation stochastique de la variabilité des propriétés magnétiques des matériaux ferromagnétiques : Application sur des stators de machines électriques. Mémoire de Thèse, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris-Tech- Institut des Sciences et Technologies, 170 p.

RAMOS M. H. (2018). Qualité et valeur des prévisions hydrologiques d'ensemble. Mémoire pour Habilitation à Diriger des Recherches (HDR), Université Sorbonne, 102 p.

RANDRIANARIVONY R. N., LAURET P., RANDRIAMANANTANY Z. A. et GATINA J. C. (2009). Modélisation du régime annuel des petites rivières en vue d'installation de microcentrales hydroélectriques. *Afrique SCIENCE*, Vol 5, n°1, pp. 39- 49

RANDRIANASOLO R. A. (2009). Evaluation de la qualité des prévisions pour l'alerte aux crues. Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie, Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris, et École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts, 50p.

RAPPORT D'ÉVALUATION DES CAPACITÉS NATIONALES POUR LA RÉDUCTION DES RISQUES EN CÔTE D'IVOIRE (2015), 85 p.

RED CROSS/RED CRESCENT CLIMATE CENTRE (2008). Gestion des risques climatiques. *The Hague*, The Netherlands, 6 p.

REPUBLIQUE DU BURUNDI (2015). Contribution Prévue Déterminée au Niveau National (CPDN)/BURUNDI, plan stratégique national 2012 2015, 14 p.

RGPH (Recensement Général de la Population et de l'Habitat) (2014). Répertoire des localités : Région de la MARAHOUÉ, 40 p.

RIAD S. (2003). Typologie et analyse hydrologique des eaux superficielles à partir de quelques bassins versants représentatifs du Maroc. Mémoire de Thèse en cotutelle Université des sciences et technologies de Lille et l'Université Ibnou Zohr d'Agadir, Spécialité hydrologie de surface, 154 p.

RIBATET M. (2007). Consolidation de l'information hydrologique disponible localement et régionalement pour l'estimation probabiliste du régime des crues. Mémoire de Thèse en cotutelle de l'Institut National Polytechnique de Grenoble et Philosophiae Doctor (Ph.D.) de l'Université de Québec, 126 p.

RIGAUD K. K., DE SHERBININ A., JONES B., ADAMO S., MALEKI D., ABU-ATA N., CASALS F., ANNA T., ARORA A., CHAI-ONN, T., et MILLS B. (2021). Groundswell Afrique : Migrations climatiques internes dans les pays d'Afrique de l'Ouest. Washington, DC : Banque mondiale.

ROCHE M. (1986). Dictionnaire français d'hydrologie de surface avec équivalents en anglais, espagnol, allemand, *Masson Editeur*, 288 p.

ROSENBLATT F. (1962). Principles of Neurodynamics. Spartan Books, Washington, D.C, 616 p.

ROUSSEAU C. (2019). Algorithmes d'apprentissage optimisé via une recherche de paramètres Bayésien dans un contexte d'investissement. Mémoire pour l'obtention du grade de maîtrise ès sciences en gestion, HEC Montréal, 70 p.

SAECI (Société Agro Économique de Côte d'Ivoire) et CABINET IEC (2019). Projet multisectoriel d'appui au programme social du gouvernement. Cadre de gestion environnementale et sociale, 292 p.

SAFOUANE M., SAIDA N., SIHEM J. et MOHAMED S. (2016). Using the Markov Chain for the Generation of Monthly Rainfall Series in a Semi-Arid Zone. *Open Journal of Modern Hydrology*, Vol. 6, pp. 51-65.

SALEY M. B., KOUAMÉ F. K., MARIE JOSÉE PENVEN M. J., BIÉMI J. et KOUADIO H. B. (2005). Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire : apports des MNA et de l'imagerie satellitaire. *Téledétection*, Vol. 5, n° (1-2-3), pp. 53-67.

SAUQUET E., DUPEYRAT A., HENDRICKX F., LABEDADE R., SAMIE R., VIDAL, J-P., PERRIN C., BOUDHRAA H. et GAËCKLER M. (2009). Impacts anthropiques et étiages de la Garonne à l'horizon 2030. Actes du Colloque 193 SHF : Etiages, Sécheresses, Canicules rares et leurs impacts sur les usages de l'eau, Lyon, France.

SAVANÉ I., COULIBALY K.M. et GIOAN P. (2001). Variabilité climatique et ressources en eaux souterraines dans la région semi-montagneuse de Man. *Sécheresse*, Vol.4, n°12, pp. 231-237.

SCHUMANN G., DI BALDASSARRE G. et BATES P.D. (2009). The Utility of Spaceborne Radar to Render Flood Inundation Maps Based on Multialgorithm Ensembles. *IEEE Trans, Geosci, Remote Sensing*, Vol 8, n°47, pp. 2801-2807.

SCHWARZ G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The Annals of Statistics*. Vol.6, pp. 461-464.

SEBAIBI A. (2014). Potentialités agro-climatiques de la région de Zenata et de Maghnia. Étude d'une longue série climatique. Université Abou-Bekr belkaid, Tlemcen, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, des Sciences de la Terre et de l'Univers Département d'Agronomie et de Foresterie, 165 p.

SEGRETIER W. (2013). Approche évolutive et agrégation de variables : application à la prévision de risques hydrologiques. Mémoire de thèse de l'Université des Antilles et de la Guyane, 182 p.

SEGUIN J. J., ALLIER D., CROISSET N., KLINKA T. et MANCEAU J. C. (2018). Études de Séries Temporelles en hydrogéologie avec le logiciel R. Rapport final BRGM/RP-675 18-FR, 299 p.

SEGUIS L., CAPPELAERE B., PEUGEOT C., LEDUC C. et MILESI G. (2003). Influence de la sécheresse et du défrichement sur les écoulements d'un petit bassin versant sahélien. *Hydrologie des régions méditerranéennes et semi-arides*, n°278, pp. 429-434.

SERVAT E. et LAPETITE J. M. (1990). Télétransmission par satellite et prévision hydrologique dans le cadre de la lutte contre l'onchocercose en Afrique de l'Ouest. *Hydrol, continent.*, Vol 5, n°2, pp. 135-145.

SERVAT E., PATUREL J. E., KOUAME B., TRAVAGLI M., OUEDRAOGO M., BOYER J. F., LUBES-NIEL H., FRI TSCH J. M., MASSON J. M. et MARIEU B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. *International Association of Hydrological Sciences Publication*, n° 252, pp. 323-337.

SINGLA S. (2012). Prévisibilité des ressources en eau à l'échelle saisonnière en France ». Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Hydrologie, (2012), 245p.

SOCIÉTÉ HYDROTECHNIQUE DE FRANCE (1948). Annuaire hydrologique de la France, 201p.

SOLOMATINE D. P. et DULAL K. N. (2003). Model tree as an alternative to neural network in rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences J*, Vol 48, n°3, pp. 399-411.

SOMBO B. C. (2002). Étude de l'évolution structurale et sismo-stratigraphique du bassin sédimentaire offshore de Côte d'Ivoire. Marge passive entaillée d'un canyon. Mémoire de Thèse de Doctorat d'Etat es Sciences. Abidjan, 305 p.

SORO G. (2011). Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Mémoire de Thèse de Doctorat, Université Nangui-Abrogoua, Sciences et Gestion de l'Environnement, 193p.

SORO G., AHOUSSE K.E., TRAORÉ A. et SORO N. (2017). Impacts de la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le «V» Baoulé (centre de la Côte d'Ivoire) au cours de la période 1966-2000 sur les ressources en eau. *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement*, Vol.2, n°3, pp. 7-10.

SORO T. D., DJÈ K. B., AHOUSSE K. E., SORO G., KOUASSI A. M., KOUADIO K. E, OGA Y. M. S. et SORO N. (2013b). Climate variability impact on groundwater resources in the Highest Bandama watershed at Tortiya (Northern Côte D'Ivoire). *American Journal of Environmental Protection*, Vol.2, n°4, pp. 103-112.

SORO T. D., SORO N., OGA Y. M. S., LASM T., SORO G., AHOUSSE K. E. et BIEMI J. (2013a). La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Physio-Géo*, n°5, pp. 55-73.

SOUANEF N. (2015). Analyse fréquentielle des débits max de crues de l'Oued Abiod. Mémoire du diplôme de Magister en : Hydraulique, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie, 134 p.

STERN R., KNOCK J., GRAYER C. et LEIDI S. (2006). INSTAT+. Climatic guide, University of Reading, Reading, 322 p.

STOPPA A. et HESS U. (2003). Design and use of weather derivatives in agricultural policies: the case of rainfall index insurance in Morocco. Paper presented at the International Conference Agricultural policy reform and the WTO, Capri (Italy) pp. 23-26.

SULTAN B. (2015). Les sociétés rurales face aux changements climatiques et environnementaux en Afrique de l'Ouest, *IRD Éditio*, Marseille, France, 463 p.

TACHI A. et BENTRAD M. (2018). Prédiction de débit solide dans la période de crue par l'utilisation des réseaux de neurones artificiels : étude de cas de l'Oued Mekerra - Sidi Bel Abbes -

Algérie. Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master, Université Bedji Mokhtar Annaba, Algérie, 87 p.

TACHI S. E., OUERDACHI L., REMAOUN M., DERDOUS O. et BOUTAGHANE H. (2016). Forecasting suspended sediment load using regularized neural network: Case study of the Isser River (Algeria). *Journal of Water and Land Development*, n° 29, pp. 75–81.

TAGINI B. (1971). Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotechnique régionale. Mémoire de Thèse de l'Université de Lausanne, Suisse, 302 p.

TANGARA M. (2005). Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global. Thèse de doctorat de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes de Paris, France, 374 p.

TANGUY M. (2012). Cartographie du risque d'inondation en milieu urbain adaptée à la gestion de crise analyse préliminaire. Rapport de recherche R1395, Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, 103 p.

TIEPOLO M., A. ADAMOU S., M. ALI M., BACCI M., BAOUA M.S., BRACCIO S., ISSA H., MOUMOUNI T.A. et OUMAROU A.Z. (2018). Evaluation du risque multi-aléa dans les communes de la Région de Dosso au Niger, 2011-16. Projet ANADIA 2.0, rapport n°7, p. 41.

TOUKOUROU M. S. (2009). Application de l'apprentissage artificiel à la prévision des crues éclair. Hydrologie. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 183 p.

TRITZ Y. (2013). Développement territorial et valorisation en circuit court des ressources énergétiques locales. Vers des systèmes énergétiques agri-territoriaux ? Mémoire de Thèse de Doctorat, Université de Lyon 2, France, 447 p.

UNDRO (1979). Natural Disasters and Vulnerability Analysis, Report of Expert Group Meeting, 53p.

VALASKAKIS K. (1975). Prospective, rétrospective et perspective : un essai de modélisation du temps. *L'Actualité économique*, Vol. 51 n°2, pp. 209–228.

VELLUET C. (2014). Modélisation et analyse pluriannuelles du fonctionnement hydrologique et énergétique de deux écosystèmes dominants au Sahel agropastoral (Sud-Ouest Niger). Mémoire de thèse de doctorat Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 309 p.

VISSIN E. (2001). Contribution à l'étude de la variabilité des précipitations et des écoulements dans le bassin béninois du fleuve Niger. Mémoire de DEA de Université de Bourgogne, Dijon, France, 53p.

VISSIN E. (2007). Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Mémoire de Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, France, 311 p.

VOYANT C. (2011). Prédiction de séries temporelles de rayonnement solaire global et de production d'énergie photoVoltaïque à partir de réseaux de neurones artificiels. Mémoire de Thèse de Doctorat, Université de Corse-Pascal Paoli, France, 257 p.

WALD A. et WOLFOWITZ J. (1943). An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation *An. Math. Stat.*, Vol.14, pp. 378-388.

WALLEZ L. (2010). Inondations dans les villes d'Afrique de l'ouest : diagnostic et éléments de renforcement des capacités d'adaptation dans le grand Cotonou. Master en Ingénierie et Management de l'Environnement et du Développement Durable, Université de Sherbrooke, 90p.

WEIBULL W. (1939). A statistical theory of the strength of materials. *Ing. Vet. Ak. Stockholm (Suède), Handl.* n°153.

WERREN G. et LASRI M. (2014). Cartographie du danger d'inondation. Guide pratique pour l'application de la méthode suisse au Maroc. Université de Lausanne, Institut de géographie et durabilité, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès, Laboratoire d'analyses géo-environnementales et aménagement (LAGEA), 28 p.

WESSELINK A. J., ORANGE D., FEIZOURE C. et RANDRIAMIARISOA T. (1995). Les régimes hydroclimatiques et hydrologiques d'un bassin-versant de type tropical humide : l'Oubangui (République Centrafricaine). *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement. IAHS Publ*, n° 238, pp. 179- 194.

WIDROW B. ET HOFF M. (1960). Adaptive switching circuits. IRE WESCON Convention Record, New York, pp. 96-104.

WILCOXON F. (1945). Individual comparisons by ranking methods. *Biometrika Bulletin*, Vol.1, pp. 80-83.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO) (2009). Analyse des valeurs extremes. WMO 168, Vol 2, Chapitre 5, 66 p.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO) (2014). Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques. Septième éditions, Genève, 742p.

YAO A. B. (2015). Évaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Loba en vue d'une gestion rationnelle (centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Mémoire de Thèse de Doctorat, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, 192 p.

YAO A. B., GOULA B. T. A., KOUADIO Z. A., KOUAKOU K. E., KANE A. et SAMBOU S. (2019). Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide : cas du bassin versant de la Lobo au centre-ouest de la côte d'ivoire. *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, Vol. 19, pp. 136 – 157.

YAO A. B., GOULA B. T. A., KOUADIO Z. A., KOUAKOU K. E., KANTE A. et SAMBOU S. (2012). Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide : cas du bassin versant de la Lobo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, n°19, pp. 136-157.

YAPI A. F., N'GUESSAN B. V. H., OGA Y. M. S., KPAN O. J. G., ALLECHY F. B. et BIEMI J. (2020). Modélisation des extrêmes climatiques de la région de la Marahoué à partir d'un générateur stochastique de temps mono-site (Weagets). *European Scientific Journal, ESJ*, Vol.16, n°36, pp. 70-91.

YONABA H. (2009). Modélisation hydrologique hybride réseau de neurones - modèle conceptuel. Mémoire de Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 182 p.

YUE S. et PILON P. (2004). A comparison of the power of the t-test, Mann-Kendall and bootstrap tests for trend-detection. *Hydrological Sciences Journal*, Vol.49, n°1, pp. 21-37.

ZAHAR Y. et LABORDE J. P. (2007). Modélisation statistique et synthèse cartographique des pluies journalières extrêmes de Tunisie. *Rev. Sci. Eau*, n°20, pp. 409-424.

ZAIDMAN M.D., KELLER V., YOUNG A.R. et CADMAN D. (2003). Flow-duration-frequency behaviour of British rivers based on annual minima data. *Journal of Hydrology*, 277, pp. 195-213.

ZALACHORI I. (2013). Prévisions hydrologiques d'ensemble : développements pour améliorer la qualité des prévisions et estimer leur utilité. Mémoire de Thèse de l'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), 398 p.

ZHU Y. M., LU X. X. et ZHOU Y. (2007). Suspended sediment flux modeling with artificial neural network: An example of the Longchuanjiang River in the Upper Yangtze Catchment, China. *Geomorphology*, Vol 84, n°1, pp. 111-125.

WEBOGRAPHIE

www.aip.ci / Agence Ivoirienne de Presse (AIP). Inondation en Côte d'Ivoire (consulté en 2019, 2019 et 2020).

www.sodexam.com / Société D'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM). Bulletin de risque d'inondation à Abidjan (consulté en 2017, 2018, 2019 et 2020).

<http://www.emdat.be/> Centre for Research on the Epidemiology of Disasters-Emergency Events Database (CRED-EM-DAT), The International Disaster database (consulté en 2020).