

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Institut National Polytechnique Félix  
HOUPHOUËT- BOIGNY de Yamoussoukro



École Doctorale Polytechnique

**THÈSE**

Pour l'obtention du grade de

**DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE**

**FÉLIX HOUPHOUËT-BOIGNY**

**Mention : Géosciences et Environnement**

**Spécialité : Hydrologie et Environnement**

**Thème :**

**ETUDE DES NORMES HYDROLOGIQUES DANS UN CONTEXTE  
DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN AFRIQUE DE L'OUEST :  
CAS DE LA CÔTE D'IVOIRE**

*Présentée et soutenue publiquement le 08 avril 2022 par*

**NASSA Relwindé Abdoul-Karim**

**JURY**

<b>M. ASSIDJO Emmanuel Nougou</b>	Professeur Titulaire, INP-HB, Yamoussoukro	Président
<b>M. BIEMI Jean</b>	Professeur Titulaire, UFHB, Cocody-Abidjan	Rapporteur
<b>M. KOUASSI Kouakou Lazare</b>	Professeur Titulaire, UJLOG, Daloa	Rapporteur
<b>M. KOFFI Yao Blaise</b>	Maître de Conférences, UFHB, Cocody-Abidjan	Examineur
<b>M. KOUASSI Amani Michel</b>	Maître de Conférences, INP-HB, Yamoussoukro	Directeur de thèse

## DÉDICACE

*À ma mère TRAORE Mariam, qui me comble de tant de soutien et me voue un amour profond.  
Que le tout-puissant te bénisse abondamment.*

## REMERCIEMENTS

Au moment d'écrire ces dernières lignes qui scelleront l'apothéose de ma thèse, deux mots me viennent à l'esprit : *“enfin”* car la ligne droite finale de la rédaction est un marathon qui pourrait ne jamais se terminer car le manuscrit est toujours améliorable ; mais surtout *“déjà”* car je me rends compte que les conditions de travail et de vie dont j'ai bénéficié pendant ces trois années ont été exceptionnelles. En effet, il est bien rare qu'une thèse soit une aventure individuelle et celle-ci ne fait pas exception à la règle. Ainsi, pour l'individu qui s'engage, la production d'un rapport de thèse est une expérience stimulante, mais aussi une démarche longue et laborieuse au cours de laquelle la démotivation pourrait supplanter la persévérance. L'on comprend dès lors l'importance du réseau professionnel et humain sur lequel il faut pouvoir compter pour mener à terme un tel projet de recherche. Qu'il soit donc permis de m'acquitter des « dettes » de reconnaissance que j'ai contractées pendant la confection de ce rapport de thèse.

J'ai vraiment apprécié ces années de travail, et cela, je le dois aux personnes qui m'ont entouré. Je tiens à les remercier.

Je remercie le Tout Puissant, Allah de m'avoir donné la santé et la motivation nécessaire pour aborder ce mémoire ainsi que toute ma famille pour son soutien moral et financier.

Je remercie toute la direction de l'Ecole Doctorale de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro (EDP\_INP-HB) pour son accueil et encadrement. Je pense au Professeur YAO Kouassi Benjamin, Directeur de l'EDP\_INP-HB, au Docteur ABROH, Directeur des Études à l'EDP\_INP-HB. J'ai également une pensée pour Docteur KONIN Athanas, le Directeur de l'UMRI 68 pour l'accueil chaleureux au sein de son laboratoire de recherche.

Aussi, j'ai eu le Docteur KOUASSI Amani Michel, comme Directeur de thèse, à qui je dois l'essentiel du chemin parcouru.

Dr. KOUASSI Amani Michel, je tiens à vous remercier pour votre aide financière et matérielle, vos qualités scientifiques et votre bonne humeur. Vous n'avez jamais laissé une question sans réponse. Durant ces trois années, vous avez été d'une réactivité sans faille et d'une efficacité impressionnante : une sorte de *“rouleau compresseur”* du travail. Je vous remercie pour tout le temps que vous m'avez accordé pour me former, m'apprendre tant de choses, me relire : j'ai énormément appris à vos côtés. Vous avez dirigé mes travaux d'une main de maître.

Toujours là quand il faut, *“monstre”* de travail et d'efficacité, qualités scientifiques, le tout agrémenté de qualités humaines rares.

Dr. KOUAKOU Eugène, ce fut un plaisir d'être un de vos étudiants et d'avoir travaillé avec vous. Je garderai un très bon souvenir des échanges scientifiques que nous avons eus. Vous avez participé au côté technique de l'histoire. Vous m'avez soutenu moralement. Pour tout cela, je vous remercie.

Je remercie toutes les personnes avec qui j'ai pu collaborer tout au long de ma thèse. Je pense particulièrement à mes proches collègues du laboratoire ; ASSOKO Victoire, KOUAO Jean Muller, GNANGOUIN Asaph Joël et YAO Koffi Léon, tous doctorants à l'EDP, avec qui j'ai pu discuter de façon technique autour de ce travail. Mes sincères remerciements vont à l'endroit de mes cadettes TOURE Makouin Aissa, BOSSA Judith et KOUAHO Marie Esther pour le soutien inestimable dans l'histoire de cette thèse.

Comment ne pas reconnaître le travail et le support scientifique de tous les enseignants qui ont participé à mes points de Thèse ? Je voudrais témoigner donc ma reconnaissance aux Professeurs BIEMI Jean, KOUASSI Kouakou Lazare, Docteur KOFFI Yao Blaise.

Tous mes remerciements à ma chérie ISSA Rahina, pour son amour inconditionné, son soutien inestimable et sa patience tout au long de ces années de recherche.

Mes remerciements vont aussi à ma famille et mes amis qui, avec cette question récurrente, « quand est-ce que tu la soutiens cette thèse ? », bien qu'angoissante en période fréquente de doutes, m'ont permis de ne jamais dévier de mon objectif final. SAWAGOGO Seydou, SAWADOGO Adama, ISSA Sana, OUARME Seydou, SANOGO Drissa, DIALLO Zana, je tiens à vous remercier pour le soutien moral que vous m'avez apporté.

Qu'Allah vous bénisse !

## TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE.....	i
REMERCIEMENTS.....	ii
SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....	ix
LISTE DES FIGURES.....	x
LISTE DES TABLEAUX .....	xiii
RÉSUMÉ.....	xvi
ABSTRACT .....	xvii
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : GÉNÉRALITES .....	4
CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART.....	5
1.1. PHÉNOMÈNES CLIMATIQUES EXTRÊMES.....	5
1.1.1. <i>Evènements extrêmes simples</i> .....	5
1.1.2. <i>Evènements extrêmes complexes</i> .....	5
1.2. THÉORIE DES VALEURS EXTRÊMES.....	6
1.3. NOTIONS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE, VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET PLUIES EXTRÊMES .....	8
1.4. SYNTHÈSE DES TRAVAUX SUR LES VARIATIONS CLIMATIQUES EN AFRIQUE DE L'OUEST ET EN CÔTE D'IVOIRE .....	10
1.5. NOTIONS DE NORMES HYDROLOGIQUES .....	13
1.6. SYNTHÈSE DES TRAVAUX SUR LES NORMES HYDROLOGIQUES .....	16
1.7. SYNTHÈSE DES TRAVAUX SUR LA SENSIBILITÉ DES LOIS STATISTIQUES ..	17
1.8. SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE STATIONNARITÉ DES NORMES HYDROLOGIQUES.....	19
1.9. QUELQUES NOTIONS SUR LES MÉTHODES DE PRÉDÉTERMINATION DES CRUES DE L'ORSTOM ET DU CIEH .....	20
1.9.1. <i>Méthode de l'ORSTOM</i> .....	20
1.9.2. <i>Méthode du CIEH</i> .....	20
1.10. NOTIONS SUR LES MODÈLES DE GÉNÉRATION DE PLUIES.....	21
1.10.1. <i>Développement des modèles stochastiques de génération des pluies</i> .....	21
1.10.2. <i>Base méthodologique de génération de pluies</i> .....	22
1.10.3. <i>Chaînes de Markov et génération de données pluviométriques</i> .....	22
1.10.3.1. <i>Modélisation des occurrences des pluies</i> .....	22

1.10.3.2. Modélisation des quantités de précipitations et fiabilité des générateurs stochastiques .....	23
1.11. CONCLUSION PARTIELLE .....	24
<b>CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE</b> .....	<b>26</b>
2.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE .....	26
2.2. CONTEXTE CLIMATIQUE.....	27
2.2.1. <i>Principaux régimes climatiques de la Côte d'Ivoire</i> .....	27
2.2.1.1. Climat Attiéen (Littoral et Intérieur) .....	27
2.2.1.2. Climat Baouléen.....	27
2.2.1.3. Climat Soudanais.....	27
2.2.1.4. Climat des Montagnes .....	28
2.2.2. <i>Température</i> .....	29
2.2.3. <i>Évaporation</i> .....	29
2.3. VÉGÉTATION .....	30
2.4. RELIEF .....	31
2.5. CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE ET HYDROLOGIQUE .....	32
2.6. CONTEXTE GÉOLOGIQUE.....	34
2.6.1. <i>Socle Precambrien</i> .....	35
2.6.2. <i>Bassin sédimentaire</i> .....	36
2.7. CONTEXTE PÉDOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	37
2.8. ENVIRONNEMENT HUMAIN ET ÉCONOMIQUE.....	39
2.9. CONCLUSION PARTIELLE.....	41
<b>PARTIE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES</b> .....	<b>42</b>
<b>CHAPITRE 3 : MATÉRIEL ET DONNÉES</b> .....	<b>43</b>
3.1. DONNÉES CLIMATIQUES .....	43
3.1.1. <i>Choix des données pluviométriques</i> .....	43
3.1.1.1. Critère de sélection des postes pluviométriques .....	43
3.1.1.2. Extraction des variables descriptives des pluies .....	45
3.1.2. <i>Critique des données</i> .....	46
3.1.2.1. Reconstitution des lacunes et des valeurs erronées .....	46
3.1.2.2. Identification et correction des valeurs erronées.....	46
3.1.2.3. Caractéristiques descriptives des données de pluies .....	52
3.2. OUTILS INFORMATIQUES .....	58
3.3. CONCLUSION PARTIELLE.....	58

<b>CHAPITRE 4 : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE</b> .....	60
4.1. ANALYSE DE LA STATIONARITE DES NORMES HYDROLOGIQUES .....	60
4.1.1. <i>Analyse du contexte climatique</i> .....	60
4.1.1.1. Vérification de l'hypothèse d'existence de rupture .....	60
4.1.1.2. Détermination des écarts de variation des pluies annuelles .....	61
4.1.1.3. Analyse des tendances des séries des pluies annuelles constituées.....	61
4.1.2. <i>Modélisation statistique des pluies journalières maximales annuelles</i> .....	63
4.1.2.1. Hypothèses de l'analyse fréquentielle.....	63
4.1.2.2. Calcul des fréquences empiriques et caractérisation des périodes de retour .....	64
4.1.2.3. Système d'aide à la décision (SAD).....	65
4.1.2.4. Détermination des meilleurs modèles statistiques d'ajustement .....	70
4.1.2.5. Ajustement d'une distribution statistique et validation du modèle statistique .....	72
4.1.3. <i>Analyse comparative des normes hydrologiques</i> .....	74
4.1.3.1. <i>Calcul des normales</i> .....	74
4.1.3.2. <i>Détermination des quantiles des pluies extrêmes</i> .....	74
4.1.4. <i>Définition des matrices des écarts relatifs</i> .....	76
4.1.5. <i>Détermination des matrices binaires</i> .....	76
4.2. ACTUALISATION DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES DES MÉTHODES EMPIRIQUES DE L'ORSTOM ET DU CIEH .....	77
4.2.1. <i>Analyse de la sensibilité des lois statistiques à la taille des données</i> .....	77
4.2.2. <i>Détermination des paramètres climatiques de la méthode de l'ORSTOM</i> .....	77
4.2.3. <i>Détermination des paramètres climatiques de la méthode du CIEH</i> .....	78
4.2.4. <i>Détermination du gradex des méthodes empiriques de l'ORSTOM et du CIEH</i> .....	79
4.3. ANALYSE PROSPECTIVE DES NORMES HYDROLOGIQUES .....	80
4.3.1. <i>Analyse des indicateurs de normes hydrologiques passées</i> .....	80
4.3.2. <i>Conception et évaluation du modèle Markovien</i> .....	81
4.3.2.1. <i>Conception du modèle stochastique</i> .....	81
4.3.2.2. <i>Modèle d'occurrence des précipitations par chaîne de Markov</i> .....	81
4.3.2.2.1. <i>Préparation des données pluviométriques</i> .....	81
4.3.2.2.2. <i>Génération des probabilités de transition</i> .....	82
4.3.2.2.3. <i>Simulation des quantités de pluies durant les jours humides</i> .....	83
4.3.2.3. <i>Évaluation du modèle</i> .....	83

4.3.3.	<i>Approches de correction des sorties du modèle Markovien</i>	84
4.3.4.	<i>Analyse de l'état prospectif des indicateurs de normes hydrologiques</i>	86
4.4.	CONCLUSION PARTIELLE	86
<b>PARTIE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS</b>		89
<b>CHAPITRE 5 : ANALYSE DE l'impact DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA STATIONNARITÉ DES NORMES HYDROLOGIQUES</b>		90
5.1.	CARACTÉRISTIQUES CLIMATIQUES	90
5.1.1.	<i>Vérification de l'hypothèse d'existence de rupture</i>	90
5.1.2.	<i>Écarts de variation des pluies annuelles</i>	91
5.1.3.	<i>Analyse des tendances des séries des pluies annuelles</i>	92
5.2.	MODÉLISATION STATISTIQUE DES PLUIES EXTRÊMES	95
5.2.1.	<i>Vérification des hypothèses d'application de l'analyse fréquentielle</i>	95
5.2.2.	<i>Système d'Aide à la Décision (SAD)</i>	96
5.2.3.	<i>Ajustement des pluies journalières maximales par les modèles statistiques retenus</i>	99
5.2.3.1.	<i>Analyse graphique</i>	99
5.2.3.2.	<i>Résultats du test de khi deux</i>	105
5.2.3.3.	<i>Résultats des critères AIC et BIC</i>	106
5.2.4.	<i>Analyse de la distribution des lois en fonction des zones climatiques</i>	115
5.3.	ANALYSE DE LA STATIONNARITÉ DES NORMES HYDROLOGIQUES	115
5.3.1.	<i>Analyse des normales des pluies annuelles</i>	116
5.3.2.	<i>Analyse des normales des pluies extrêmes</i>	117
5.3.3.	<i>Analyse des quantiles des pluies extrêmes</i>	118
5.3.4.	<i>Détermination des matrices binaires des normales</i>	120
5.3.5.	<i>Détermination des matrices binaires des quantiles des pluies extrêmes</i>	123
5.4.	DISCUSSION	129
5.5.	CONCLUSION PARTIELLE	134
<b>CHAPITRE 6 : ACTUALISATION DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES DES MÉTHODES EMPIRIQUES DE L'ORSTOM ET DU CIEH</b>		137
6.1.	ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DES LOIS STATISTIQUES	137
6.1.1.	<i>Analyse des hypothèses d'application</i>	137
6.1.2.	<i>Identification des meilleures classes de lois</i>	139
6.1.3.	<i>Identification des meilleures lois</i>	141
6.1.3.1.	<i>Analyse graphique</i>	141

<b>6.1.3.2. Analyse numérique des ajustements</b> .....	144
6.2. REDÉFINITION DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES DES MÉTHODES EMPIRIQUES DE L'ORSTOM ET DU CIEH .....	149
<b>6.2.1. Analyse des normales des pluies annuelles et extrêmes</b> .....	149
<b>6.2.2. Analyse des quantiles décennaux et centennaux</b> .....	151
<b>6.2.3. Coefficient de Gradex (<math>\lambda</math>)</b> .....	154
6.3. DISCUSSION .....	156
6.4. CONCLUSION PARTIELLE.....	162
<b>CHAPITRE 7 : ANALYSE PROSPECTIVE DES NORMES HYDROLOGIQUES</b> ...	164
7.1. ANALYSE RÉGIONALE DES INDICATEURS DE NORMES HYDROLOGIQUES PASSÉES .....	164
<b>7.1.1. Analyse régionale des normales des pluies extrêmes passées</b> .....	164
<b>7.1.2. Analyse régionale des normales de pluies annuelles passées</b> .....	167
<b>7.1.3. Analyse régionale des quantiles des pluies extrêmes passées</b> .....	167
<b>7.1.3.1. Ajustement des pluies extrêmes régionales</b> .....	167
<b>7.1.3.2. Quantiles de pluies journalières extrêmes régionales</b> .....	168
<b>7.1.3.2. Analyse du coefficient régional de gradex des méthodes de l'OSTORM et du CIEH</b> .....	171
7.2. ANALYSE DE L'ÉTAT PROSPECTIF DES NORMES HYDROLOGIQUES .....	171
<b>7.2.1. Évaluation du modèle Markovien</b> .....	171
<b>7.2.2. Analyse des normales de pluies extrêmes prévues</b> .....	177
<b>7.2.3. Analyse des normales de pluies annuelles prévues</b> .....	181
<b>7.2.4. Analyse des quantiles de pluies extrêmes prévues</b> .....	182
<b>7.2.5. Calcul du biais des quantiles futurs</b> .....	185
<b>7.2.6. Détermination du coefficient de Gradex futur des méthodes de l'OSTORM et du CIEH</b> 186	
<b>7.2.7. Calcul du biais du coefficient de Gradex des méthodes de l'OSTORM et du CIEH</b> 187	
7.3. DISCUSSION .....	188
7.4. CONCLUSION PARTIELLE.....	194
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES</b> .....	196
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	200

## SIGLES ET ABRÉVIATIONS

<b>AIC</b>	:	Akaike Information Critère
<b>ARA</b>	:	Agriculture et Ressources Animales
<b>BIC</b>	:	Bayésien Information Critère
<b>BTP</b>	:	Bâtiment et Travaux Pubiques
<b>BU</b>	:	Bâtiment et Urbanisme
<b>CAP</b>	:	Coefficient d'Applatissement
<b>CAS</b>	:	Coefficient d'Asymétrie
<b>CCNUCC</b>	:	Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques
<b>CFGB</b>	:	Comité Français des Grands Barrages
<b>CHR</b>	:	Centre Hospitalier Régional
<b>CHU</b>	:	Centre Hospitalier Universitaire
<b>CIEH</b>	:	Comité Inter africain d'Études Hydrauliques
<b>CV</b>	:	Coefficient de Variation
<b>DAA</b>	:	District Autonome d'Abidjan
<b>DFR</b>	:	Départements de Formation et de Recherche
<b>DMN</b>	:	Direction de la Météorologie Nationale
<b>ETP</b>	:	Evapotranspiration
<b>FME</b>	:	Fonction Moyenne des Excès
<b>FMI</b>	:	Fonds Monétaire International
<b>FPE</b>	:	Fonction de Probabilité Empirique
<b>GEV</b>	:	Loi Généralisée des Valeurs Extrêmes
<b>GIEC</b>	:	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
<b>IDF</b>	:	Intensité-Durée-Fréquence
<b>IG</b>	:	Gamma Inverse
<b>LP3</b>	:	Log Pearson type 3
<b>MCME</b>	:	Markov Chain-Mixed Exponential
<b>MVR</b>	:	Méthode du Vecteur Régional
<b>OMM</b>	:	Organisation Météorologique Mondiale
<b>ORSTOM</b>	:	Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
<b>PIB</b>	:	Produit Intérieur Brut
<b>PND</b>	:	Programme National de Développement
<b>RGPH</b>	:	Recensement Général de la Population et de l'Habitat
<b>RMSE</b>	:	Root Mean Square Error
<b>SAD</b>	:	Système d'Aide à la Décision
<b>SJA</b>	:	Sciences Juridiques et Administration
<b>SODECI</b>	:	Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire
<b>SODEXAM</b>	:	Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique
<b>SPI</b>	:	Indice Standardisé de Précipitation
<b>STeRMi</b>	:	Sciences de la Terre et des Ressources Minières
<b>TFE</b>	:	Travail de Fin d'Études
<b>UP</b>	:	Unité Pédagogique

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Méthode des maxima par bloc ou valeurs maximales annuelles (Panthou, 2013) ...	7
<b>Figure 2</b> : Méthode des dépassements d'un seuil élevé (Panthou, 2013).....	8
<b>Figure 3</b> : Carte de localisation géographique de la Côte d'Ivoire (RGPH, 2014) .....	26
<b>Figure 4</b> : Zones climatiques de la Côte d'Ivoire (Goula et <i>al.</i> , 2007) .....	28
<b>Figure 5</b> : Températures minimales et maximales moyennes de la Côte d'Ivoire sur la période 1955-1997 (Soro, 2011) .....	29
<b>Figure 6</b> : Couvert végétal ivoirien (Brou, 2005) .....	30
<b>Figure 7</b> : Relief en Côte d'Ivoire (Brou, 2005).....	31
<b>Figure 8</b> : Réseau hydrographique et principaux bassins versants de la Côte d'Ivoire (Brou, 2005).....	32
<b>Figure 9</b> : Schéma simplifié des ensembles géologiques en Côte d'Ivoire (Tagini, 1971).....	35
<b>Figure 10</b> : Carte pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/2 000 000 (Dabien <i>et al.</i> , 1960).....	39
<b>Figure 11</b> : Répartition de la population ivoirienne selon les districts (RGPH, 2014).....	40
<b>Figure 12</b> : Localisation des stations pluviométriques sélectionnées.....	44
<b>Figure 13</b> : Double cumul des $P_{jmax}$ aux stations de Boundiali et La Mé.....	47
<b>Figure 14</b> : Double cumul des $P_{jmax}$ aux stations de Toulepleu, Agnibilékro et de Bouaflé ...	48
<b>Figure 15</b> : Double cumul des pluies annuelles des stations d'Abengourou, Guiglo et de Ferkessedougou.....	49
<b>Figure 16</b> : Double cumul des pluies annuelles des stations d'Azaguié, Dabakala et de La Mé .....	50
<b>Figure 17</b> : Résidus simples des pluies annuelles des stations de Tiassalé, Bouna, Ferkessedougou et La Mé .....	51
<b>Figure 18</b> : Histogrammes de distribution des fréquences des pluies journalières maximales (1931-2020).....	57
<b>Figure 19</b> : Diagramme du SAD (El Adlouni et <i>al.</i> , 2006) .....	67
<b>Figure 20</b> : Linéarité acceptable .....	68
<b>Figure 21</b> : Courbe non linéaire.....	69
<b>Figure 22</b> : Diagramme du rapport de Hill .....	69
<b>Figure 23</b> : Diagramme du rapport statistique de Jackson .....	70
<b>Figure 24</b> : SPI de quelques stations présentant des ruptures en 1970.....	93
<b>Figure 25</b> : SPI des stations n'ayant pas présenté des ruptures avec le test de Student .....	94

<b>Figure 26</b> : Comparaison des lissages des cinq meilleures lois des pluies journalières maximales de 1931-1970.....	100
<b>Figure 27</b> : Ajustement des pluies extrêmes à la loi Gumbel (1931-1970).....	101
<b>Figure 28</b> : Ajustement des pluies extrêmes à la loi Gamma (1971-1970).....	101
<b>Figure 29</b> : Ajustement des pluies journalières à la loi Exponentielle (1931-1970).....	101
<b>Figure 30</b> : Ajustement des pluies extrêmes à la loi Gamma inverse (1931-1070).....	102
<b>Figure 31</b> : Ajustement des pluies extrêmes à la loi de Weibull (1931-1970).....	102
<b>Figure 32</b> : Ajustement des pluies extrêmes à la loi Gumbel (1971-2010).....	102
<b>Figure 33</b> : Comparaison des lissages des cinq meilleures lois des pluies journalières maximales de 1971-2010.....	103
<b>Figure 34</b> : Ajustement des pluies extrêmes à la loi Gamma (1971-2010).....	104
<b>Figure 35</b> : Ajustement des pluies extrêmes à la loi Gamma inverse (1971-2010).....	104
<b>Figure 36</b> : Ajustement des pluies extrêmes à la loi Exponentielle (1971-2010).....	104
<b>Figure 37</b> : Fréquences d'apparition des meilleures lois d'ajustement au cours de la période 1931-1970.....	114
<b>Figure 38</b> : Fréquences d'apparition des meilleures lois d'ajustement au cours de la période 1971-2010.....	114
<b>Figure 39</b> : Comparaison des lissages des lois d'ajustement sur la période 1931-1960.....	142
<b>Figure 40</b> : Comparaison des lissages des lois d'ajustement sur la période 1961-1990.....	142
<b>Figure 41</b> : Comparaison des lissages des lois d'ajustement sur la période 1991-2020.....	143
<b>Figure 42</b> : Comparaison des lissages des lois d'ajustement sur la période 1931-1990.....	143
<b>Figure 43</b> : Comparaison des lissages des lois d'ajustement sur la période 1931-2020.....	143
<b>Figure 44</b> : Comparaison des lissages des lois d'ajustement sur la période 1961-2020.....	144
<b>Figure 45</b> : Répartition des meilleures lois pour les séries de 30 ans.....	148
<b>Figure 46</b> : Répartition des meilleures lois pour les séries de 60 ans.....	148
<b>Figure 47</b> : Répartition des meilleures lois pour les séries de 90 ans.....	148
<b>Figure 48</b> : Cartographie des normales des pluies annuelles.....	151
<b>Figure 49</b> : Cartographie des pluies décennales (1931-2020).....	153
<b>Figure 50</b> : Cartographie des pluies centennales (1931-2020).....	153
<b>Figure 51</b> : Cartographie du coefficient de gradex (1931-2020).....	156
<b>Figure 52</b> : Isohyètes de pluies journalières décennales de Soro (2011) (A) et du CIEH (1985) (B).....	159
<b>Figure 53</b> : Isohyètes de pluies journalières décennales de la présente étude (1931-2020)..	160

<b>Figure 54</b> : Isohyètes de pluies journalières centennales de Soro (2011) (A) et du CIEH (1985) (B).....	160
<b>Figure 55</b> : Isohyètes de pluies journalières centennales de la présente étude (1931-2020).	161
<b>Figure 56</b> : Histogramme des pluies journalières maximales sur la période 1931-2020 au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d’Ivoire .....	166
<b>Figure 57</b> : Ajustements des meilleures lois et intervalles de confiance de la série 1931-2020 au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d’Ivoire.....	170
<b>Figure 58</b> : Pluies journalières maximales observées et simulées au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d’Ivoire en phase de validation (1991-2020).....	173
<b>Figure 59</b> : Courbes des pluies journalières maximales observées et simulées au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d’Ivoire en phase de validation (1991-2020).....	174
<b>Figure 60</b> : Pluies annuelles observées et simulées au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d’Ivoire en phase de validation (1991-2020) .....	175
<b>Figure 61</b> : Courbes des pluies annuelles observées et simulées au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d’Ivoire en phase de validation (1991-2020).....	176
<b>Figure 62</b> : Histogrammes de distribution des pluies journalières maximales de la période 2031-2060.....	179
<b>Figure 63</b> : Histogrammes des pluies journalières maximales de la période 2071-2100 .....	180

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I</b> : Répartition des stations à analyser en fonction des stations de référence .....	45
<b>Tableau II</b> : Caractéristiques descriptives des pluies extrêmes (1931 – 2020).....	53
<b>Tableau III</b> : Caractéristiques descriptives des pluies annuelles (1931 – 2020).....	54
<b>Tableau IV</b> : Caractéristiques des classes modales des pluies journalières maximales.....	56
<b>Tableau V</b> : Modèles statistiques retenues pour l’ajustement des pluies extrêmes.....	71
<b>Tableau VI</b> : Répartition des stations pluviométriques par zone climatique (Kouao et <i>al.</i> ,2020) .....	80
<b>Tableau VII</b> : Décompte de jours humides et jours secs au sein des données historiques au cours de la période d’étude (1931 à 2020) .....	82
<b>Tableau VIII</b> : Résultats du Test de Student appliqué aux pluies annuelles (1931-2010) .....	90
<b>Tableau IX</b> : Déficits pluviométriques aux différentes stations étudiées .....	91
<b>Tableau X</b> : Résultats des tests d’hypothèses de l’analyse fréquentielle .....	95
<b>Tableau XI</b> : Résultats du Système d’aide à la décision des sous-séries de la période 1931-1970 .....	97
<b>Tableau XII</b> : Résultats du Système d’aide à la décision des sous séries de la période 1971- 2010.....	98
<b>Tableau XIII</b> : Résultats du test de khi-deux sur la période 1931-1970.....	105
<b>Tableau XIV</b> : Résultats du test de khi-deux sur la période 1971-2010 .....	106
<b>Tableau XV</b> : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1931-1970.....	107
<b>Tableau XVI</b> : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1931-1970 (suite).....	108
<b>Tableau XVII</b> : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1931-1970 (fin) .....	109
<b>Tableau XVIII</b> : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1971-2010.....	110
<b>Tableau XIX</b> : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1971-2010 (suite 1).....	111
<b>Tableau XX</b> : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1971-2010 (suite 2) .....	112
<b>Tableau XXI</b> : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1971-2010 (fin).....	113
<b>Tableau XXII</b> : Normales des pluies annuelles (1931-2010) .....	116
<b>Tableau XXIII</b> : Normales des pluies extrêmes .....	117
<b>Tableau XXIV</b> : Quantiles de pluies extrêmes de la période 1931-1970.....	119
<b>Tableau XXV</b> : Quantiles des pluies extrêmes de la période 1971-2010 .....	120
<b>Tableau XXVI</b> : Matrice binaire des normales des pluies annuelles.....	121
<b>Tableau XXVII</b> : Matrice binaire des normales des pluies extrêmes .....	122

<b>Tableau XXVIII</b> : Matrice binaire des quantiles des pluies extrêmes de période de retour de 2 ans.....	123
<b>Tableau XXIX</b> : Matrice binaire des quantiles des pluies extrêmes de période de retour de 5 ans .....	124
<b>Tableau XXX</b> : Matrice binaire des quantiles des pluies extrêmes de période de retour de 10 ans.....	125
<b>Tableau XXXI</b> : Matrice binaire des quantiles des pluies extrêmes de période de retour de 20 ans.....	126
<b>Tableau XXXII</b> : Matrice binaire des quantiles des pluies extrêmes de période de retour de 50 ans.....	127
<b>Tableau XXXIII</b> : Matrice binaire des quantiles des pluies extrêmes de période de retour de 100 ans.....	128
<b>Tableau XXXIV</b> : Pourcentages des codes binaires des différentes sous-périodes.....	129
<b>Tableau XXXV</b> : Tests d’hypothèse de l’analyse fréquentielle .....	137
<b>Tableau XXXVI</b> : Meilleures classes pour les ajustements des lois des séries de 30 ans ....	139
<b>Tableau XXXVII</b> : Meilleures classes pour les ajustements des lois des séries de 60 et 90 ans .....	140
<b>Tableau XXXVIII</b> : Pourcentages de répartition des classes sur les différentes périodes ...	141
<b>Tableau XXXIX</b> : Test de $\chi^2$ et critères AIC et BIC des meilleures lois de quelques stations .....	144
<b>Tableau XL</b> : Synthèse du classement des trois meilleures lois par période .....	146
<b>Tableau XLI</b> : Caractéristiques statistiques des normales de pluies annuelles et extrêmes (1931-2020).....	150
<b>Tableau XLII</b> : Caractéristiques statistiques des pluies décennales et centennales.....	152
<b>Tableau XLIII</b> : Coefficients de gradex et biais par rapport à la valeur régionale.....	155
<b>Tableau XLIV</b> : Caractéristiques descriptives des pluies journalières maximales (1931-2020) au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d’Ivoire.....	164
<b>Tableau XLV</b> : Statistique descriptive des pluies annuelles 1931-2020 au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d’Ivoire .....	167
<b>Tableau XLVII</b> : Critères AIC et BIC appliqués aux lois de probabilité utilisées pour la série 1931-2020 des différentes régions climatiques de la Côte d’Ivoire.....	168
<b>Tableau XLVII</b> : Quantiles des pluies journalières maximales journalières de 1931-2020 des différentes régions climatiques de la Côte d’Ivoire .....	169

<b>Tableau XLVIII</b> : Gradex régional des méthodes de l'OSTORM et du CIEH et biais relatifs .....	171
<b>Tableau XLIX</b> : Performances en phase de validation du modèle Markovien pour les pluies maximales journalières.....	172
<b>Tableau L</b> : Performances en phase de validation du modèle Markovien pour les pluies annuelles.....	172
<b>Tableau LI</b> : Statistique descriptive des pluies extrêmes de la période 2031-2060.....	178
<b>Tableau LII</b> : Statistique descriptive des pluies extrêmes de la période 2071-2100.....	178
<b>Tableau LIII</b> : Biais des pluies extrêmes des périodes 2031-2060 et 2071-2100 .....	178
<b>Tableau LIV</b> : Statistique descriptive des pluies annuelles de la période 2031-2060.....	181
<b>Tableau LV</b> : Statistique descriptive des pluies annuelles de la période 2071-2100.....	182
<b>Tableau LVI</b> : Biais des pluies annuelles des périodes 2031-2060 et 2071-2100.....	182
<b>Tableau LVII</b> : Quantiles des pluies extrêmes du régime climatique des Montagnes .....	183
<b>Tableau LVIII</b> : Quantiles des pluies extrêmes du régime climatique du Baouléen.....	183
<b>Tableau LIX</b> : Quantiles des pluies extrêmes du régime climatique de l'Attiéen de l'Intérieur .....	184
<b>Tableau LX</b> : Quantiles des pluies extrêmes du régime climatique de l'Attiéen du Littoral	184
<b>Tableau LXI</b> : Quantiles des pluies extrêmes du régime climatique du Soudanais.....	185
<b>Tableau LXII</b> : Biais des quantiles de la période 2031-2060 .....	186
<b>Tableau LXIII</b> : Biais des quantiles de la période 2071-2100.....	186
<b>Tableau LXIV</b> : Coefficient de Gradex futurs des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH au niveau des différentes zones climatiques .....	187
<b>Tableau LXV</b> : Biais du coefficient de gradex (%) des périodes futures .....	187

## RÉSUMÉ

L'objectif visé dans cette thèse est d'analyser les normes hydrologiques dans un contexte de climat changeant en Côte d'Ivoire. Pour mener à bien cette étude, des données de pluies journalières maximales annuelles et des données de pluies annuelles couvrant la période allant de 1931 à 2020, sur vingt-six (26) stations ont été utilisées. Il a été question dans un premier temps d'analyser la stationnarité des indicateurs de normes hydrologiques (normales et quantiles). La démarche est basée d'une part sur l'évaluation des normes et d'autre part sur leur comparaison à partir de deux périodes aux contextes climatiques différents à savoir une période humide (1931-1970) et une période sèche (1971-2010) à partir des matrices des écarts relatifs et des matrices binaires. Ensuite, il a été question de l'actualisation des paramètres climatiques des méthodes empiriques de l'ORSTOM et du CIEH. Enfin, l'analyse prospective des normes hydrologiques s'est faite à partir des indicateurs relatifs aux pluies extrêmes futures (2031-2060 et 2071-2100) et leurs impacts potentiels sur les normes hydrologiques de dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

Les principaux résultats de la stationnarité des normes hydrologiques montrent que les normales (pluies annuelles et pluies extrêmes) de la période humide (1931-1970) sont supérieures à celles de la période sèche (1971-2010). L'analyse des matrices binaires des normales des pluies annuelles, des normales et des quantiles des pluies extrêmes a mis en évidence une différence significative entre les normes de la période humide et celles de la période sèche. Ces résultats traduisent une non-stationnarité des normes étudiées eu égard à l'instabilité climatique.

Les résultats de l'actualisation des paramètres climatiques des méthodes empiriques de l'ORSTOM et du CIEH montrent que les lois sont plus stables lorsque la taille des séries devient importante (au moins 60 ans). Les indicateurs de normes ont été déduits de la période complète 1931-2020 du fait de sa stabilité vis-à-vis des effets des changements climatiques. Les normales des pluies annuelles évaluées sur la période entière évoluent de 1180,41 mm (Agnibilékro) à 2115,53 mm (Abidjan). Les quantiles décennaux présentent des valeurs allant de 103 mm (Dimbokro) à 222 mm (Tiassalé). Quant aux pluies centennales, elles fluctuent entre 132 mm (Dimbokro) et 326 mm (Tiassalé). Les différentes valeurs du coefficient de gradex locaux varient entre 0,28 (Dimbokro) et 0,71 (Guiglo), toutes supérieures à la valeur régionale de 0,38, dictée par l'ORSTOM et le CIEH exceptée la station de Dimbokro. Le gradex moyen en Côte d'Ivoire est de 0,47.

Les résultats de l'analyse prospective des normes hydrologiques ont permis de mettre en évidence la performance du modèle markovien traduite par des valeurs de Nash allant de 94,56 à 98,83%.

Les résultats des biais des normes hydrologiques montrent que les quantiles des périodes futures 2031-2060 et 2071-2100 comparativement à ceux de la période 1931-2020 connaîtront respectivement des augmentations allant jusqu'à +37,4% dans le domaine des montagnes et 33,62% dans l'Attien du littoral.

**Mots clés :** Changements climatiques, normes hydrologiques, méthodes de l'ORSTOM et du CIEH, Côte d'Ivoire.

## ABSTRACT

The objective of this thesis is to analyze hydrological standards in a context of climate change in Ivory Coast. To carry out this study, annual maximum daily rainfall data and annual rainfall data covering the period from 1931 to 2020, on twenty-six (26) stations were used. The first step was to analyze the stationarity of hydrological standard indicators (normal and quantile). The approach is based on a part on the evaluation of standards and another part on their comparison from two dry periods with a different climatic context, namely a wet period (1931-1970) and a dry period (1971-2010) from the relative deviation matrices and the binary matrices. Then, it was a question of updating the climatic parameters of the empirical methods of ORSTOM and CIEH. Finally, the prospective analysis of hydrological standards was made using indicators relating to future extreme rains (2031-2060 and 2071-2100) and their potential impacts on the hydrological standards for the sizing of hydraulic structures.

The main results of the stationarity of the hydrological norms declared that the normals (annual rains and extreme rains) of the wet period (1931-1970) are higher than those of the dry period (1971-2010). Analysis of the binary matrices of annual rainfall normals, normals and extreme rainfall quantiles revealed a very significant difference between the norms of the wet period and those of the dry period. These results reflect a non-stationarity of the standards studied regarding climatic instability.

The results of the updating of the climatic parameters of the empirical methods of the ORS and the CIEH indicate that the laws are more stable when the size of the large series (at least 60 years). The standard indicators were deduced from the full period 1931-2020 from its stability vis-à-vis the effects of climate change. The annual rains estimated over the entire period vary from 1,180.41 mm (Agnibilékro) to 2,115.53 mm (Abidjan). The decennial quantiles show values ranging from 103 mm (Dimbokro) to 222 mm (Tiassalé). As for the hundred-year rains, they fluctuate between 132 mm (Dimbokro) and 326 mm (Tiassalé). The different values of the gradex coefficient varying between 0.28 (Dimbokro) and 0.71 (Guiglo), all greater than the regional value of 0.38 dictated by ORSTOM and CIEH except for the Dimbokro station. The average gradex in Ivory Coast is 0.47.

The results of the prospective analysis of hydrological standards made it possible to highlight the performance of the Markovian model translated by Nash values ranging from 94.56 to 98.83%.

The results of the hydrological standards indicate that the quantiles of the future periods 2031-2060 and 2071-2100 are those of the period 1931-2020 which will respectively experience increases of up to + 37.4% in mountains area and 33, 62 % in the Attian of the littoral.

**Keywords:** Climate change, hydrological standards, statistical modeling, ORSTOM and CIEH methods, Ivory Coast.

## INTRODUCTION

Le changement climatique est une réalité qui affecte plusieurs variables climatiques dont les précipitations. Ce changement et la variabilité du climat sont considérés comme les plus grands défis auxquels l'humanité devrait faire face au cours des décennies à venir, sur toutes les échelles géographiques et dans tous les secteurs économiques (Aerts et Droogers, 2004). L'Afrique de l'Ouest est l'une des régions les plus touchées par les changements climatiques dans le monde. Elle a connu une alternance de périodes sèches et humides depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle (Paturel et *al.*, 1995). Dans certaines régions de l'Afrique de l'Ouest (Côte d'Ivoire, Mali, Burkina Faso, Sénégal, etc.), la pluviométrie annuelle a diminué de 20 à 40 % par rapport à la moyenne interannuelle (Dai et *al.*, 2004 ; Paturel et *al.*, 2003 ; Goula et *al.*, 2009). Malgré ce contexte climatique caractérisé par un déficit pluviométrique, de nombreux pays de l'Afrique de l'Ouest (Benin, Burkina Faso, Côte d'Ivoire, Niger, Ghana, Sénégal, Togo) sont confrontés à de graves problèmes d'inondation tant en milieu urbain que rural (Goula et *al.*, 2010). Il faut noter que l'aléa pluviométrique est souvent à l'origine de ces catastrophes naturelles (Kieffer-Weiss, 1998).

Dans ce contexte de paramètres climatiques modifiés, il apparaît nécessaire de revoir les paramètres de dimensionnement des ouvrages hydrauliques. La connaissance des normes hydrologiques, telles que les quantiles des précipitations extrêmes ainsi que les normales des pluies extrêmes et annuelles, sont nécessaires dans le cadre des projets d'aménagement pour la conception des ouvrages hydrauliques (les ouvrages de protection contre les inondations, les réseaux d'assainissement pluviaux, etc.) et dans de nombreuses applications d'ingénierie.

En Afrique de l'Ouest, hormis la série de travaux réalisés par le Comité Inter-Africain d'Etudes Hydrauliques (Brunet-Moret, 1967 ; Mounis et Mansongi, 1974 ; Puech et Chabi-Gonni, 1984) et qui sert de référence aux ingénieurs, très peu d'études ont été consacrées à l'analyse des pluies extrêmes (Soro, 2011 ; Panthou, 2013 ; Kouassi et *al.*, 2019).

L'estimation de la récurrence de pluies extrêmes fournit des éléments indispensables pour la construction d'infrastructures hydrauliques (Benkhaled, 2007). Une surestimation conduit à un surdimensionnement des ouvrages entraînant ainsi des surcoûts de construction, tandis qu'une sous-estimation peut occasionner des risques d'inondation, des ruptures d'ouvrages et des pertes en vies humaines. L'augmentation de la fréquence des événements extrêmes, tels que les inondations et les pluies intenses, avait été évoquée par plusieurs auteurs (Beniston et Stephenson, 2004). Ces phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes vont conditionner la vulnérabilité à l'égard des phénomènes extrêmes futurs en modifiant les

écosystèmes déjà fragiles. L'occurrence de ces épisodes exceptionnels incite à réviser les normes hydrologiques (normales de pluies annuelles, normales de pluies journalières maximales annuelles, quantiles de pluies journalières maximales annuelles) en Côte d'Ivoire. En effet, la Côte d'Ivoire fait face aux changements climatiques, dont les impacts se caractérisent en une érosion côtière manifeste, des inondations fréquentes, des glissements de terrains, l'émergence de certaines maladies telles que la fièvre typhoïde, la dégradation des terres, et la perte de la biodiversité. Au cours de ces dernières années, la capitale économique (Abidjan) et certaines villes (Grand Lahou, Dimbokro, M'Bahiakro, Bouaflé, etc.) subissent des inondations et des glissements de terrains pendant la grande saison des pluies provoquant de nombreux dégâts matériels et humains (ONPC, 2014). La validité des méthodes de prédétermination des crues décennales et centennales prescrites par les hydrologues de l'ORSTOM est de plus en plus questionnée (Soro, 2011). Cette problématique soulève la question principale suivante : « Sur quelle base pourrait-on/devrait-on élaborer de nouvelles normes hydrologiques pour la gestion de nouveaux projets de construction des ouvrages hydrauliques ?

Aussi, les différents paramètres climatiques intégrant les méthodes et formules de dimensionnement de ces ouvrages seraient-ils adaptés à l'instabilité climatique constatée en Côte d'Ivoire ? En Afrique de l'Ouest et centrale en général, et en Côte d'Ivoire en particulier, les ouvrages hydrauliques sont souvent dimensionnés à partir des méthodes de l'Office de la recherche scientifique et technique outre-mer (ORSTOM) (Brunet-Moret, 1967) et du Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH, 1985). Dans l'application de ces méthodes empiriques, des paramètres climatiques basés sur des données passées, elles-mêmes affectées par le phénomène de changement climatique, sont utilisés. Les cartes de pluies décennales et centennales établies concernent souvent des périodes largement dépassées de nos jours. Dès lors, la nécessité de l'élaboration d'un outil d'aide qui prend en compte les impacts des changements climatiques en Côte d'Ivoire, se pose avec persistance. Ainsi, dans l'optique de contribuer à la révision des normes hydrologiques que la présente étude a été initiée. Elle a pour thème : « **Etude des normes hydrologiques dans un contexte de changement climatique en Afrique de l'Ouest : cas de la Côte d'Ivoire** ».

L'objectif général de ce travail est d'analyser les normes hydrologiques dans un contexte de climat changeant en Côte d'Ivoire.

Il s'agira spécifiquement de :

- analyser la stationnarité des normes hydrologiques ;

- déterminer les valeurs actualisées des paramètres climatiques des méthodes empiriques de l'ORSTOM et du CIEH ;
- réaliser une analyse prospective des normes hydrologiques.

Cette thèse est structurée en trois grandes parties. La première partie est consacrée aux généralités. Cette partie comporte deux chapitres à savoir l'état de l'art (chapitre 1) et les généralités sur la Côte d'Ivoire (chapitre 2).

La deuxième partie présente le matériel (chapitre 3) ainsi que les méthodes utilisées (chapitre 4).

Dans la troisième partie, il y sera présenté les résultats de l'étude, leurs analyses et discussions. La présentation des résultats s'organise autour de trois (3) principaux chapitres. Le chapitre 5 présente l'analyse de la stationnarité des normes en passant par une analyse de tendances climatiques. L'actualisation des paramètres climatiques des méthodes empiriques de l'ORSTOM et du CIEH tels que les normales de pluies annuelles, normales de pluies extrêmes et les quantiles de pluies extrêmes a été l'objectif principal du chapitre 6. Le chapitre 7 présente les résultats de l'analyse prospective des normes en passant par une projection des pluies futures par le modèle Markovien et la détermination des normes futures au milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (2031-2060) et à la fin du 21<sup>ème</sup> Siècle (2071-2100).

---

---

# **PARTIE I : GÉNÉRALITES**

---

---

## CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART

### 1.1. PHÉNOMÈNES CLIMATIQUES EXTRÊMES

On regroupe sous le terme d'événements climatiques extrêmes, des phénomènes météorologiques de natures différentes, ayant en commun une occurrence rare et un impact éprouvant sur les écosystèmes et l'activité humaine (Beniston et Stephenson, 2004). Selon GIEC (2007), un phénomène climatique extrême est un phénomène qui est rare dans le cadre de sa distribution de référence statistique à un endroit spécifique. Les phénomènes climatiques extrêmes sont définis par Goubanova (2007) comme étant des phénomènes climatiques qui présentent des écarts par rapport à la normale climatologique. D'un point de vue statistique, les paramètres climatiques (pluie, température, etc.) peuvent être caractérisés par une distribution de probabilité. Les « queues de distribution » constituent alors ce que l'on appelle des « événements climatiques extrêmes », c'est-à-dire des anomalies météorologiques dont la probabilité d'occurrence est faible (moins de 10 %) (Abdelnour et *al.*, 2002).

#### *1.1.1. Evènements extrêmes simples*

Les événements extrêmes simples se décrivent par une seule variable (la température, la pluie, l'insolation, etc.) qui atteint une certaine valeur. Ainsi, les températures extrêmes regroupent les valeurs minimales et maximales de température. Elles sont respectivement responsables des vagues de froid et de chaleur. Les pluies extrêmes regroupent les valeurs maximales ou les valeurs supérieures à un seuil de pluie.

#### *1.1.2. Evènements extrêmes complexes*

Les événements extrêmes complexes impliquent un ensemble de variables associées à un événement climatique particulier. Les tempêtes et les cyclones peuvent être décrits comme des phénomènes météorologiques complexes. En effet, le passage d'un cyclone par exemple, se caractérise à la fois par des pluies intenses, par un vent violent et des bouleversements dans la nature.

On parle d'événements extrêmes lorsque des variables climatiques dépassent un seuil proche des valeurs observées les plus hautes ou les plus basses. Ce seuil peut être défini à partir d'une intensité (température supérieure à 40°C par exemple) ou d'une fréquence d'occurrence (événements ayant une période de retour de 10, 20 ou 30 ans par exemple). L'étude de l'évolution des événements extrêmes sous changement climatique est délicate. En effet, les

événements extrêmes se produisent, par définition, relativement rarement. On ne dispose donc que de peu de séries d'observations assez longues pour étudier statistiquement l'évolution des événements les plus extrêmes.

Le GIEC a publié en 2012 un rapport spécial sur les événements extrêmes (GIEC, 2012). Au niveau mondial, il est considéré comme quasiment certain que la fréquence et l'intensité des températures extrêmes chaudes augmenteront, et que celles des températures extrêmes froides baisseront. Des températures extrêmes chaudes ayant en climat actuel une période de retour de 20 ans pourraient avoir une période de retour de 2 à 10 ans dans les années 2050, et de 1 à 7 ans dans les années 2081-2100, selon le scénario et le modèle considéré. A l'image des projections de précipitations moyennes, l'évolution des précipitations extrêmes est plus incertaine. Globalement, les pluies pourraient être moins fréquentes mais plus intenses : la pression de vapeur saturante augmente avec la température de l'air, ce qui signifie qu'un air plus chaud peut contenir plus d'eau. Ainsi, chaque goutte d'eau peut résider plus longtemps dans l'air. Lors d'un événement pluvieux, plus de pluie serait donc susceptible de tomber. Le GIEC (2012) annonce une probable intensification des précipitations au niveau global.

## 1.2. THÉORIE DES VALEURS EXTRÊMES

La modélisation des événements extrêmes (ouragan, tremblement de terre, inondation, crues, crises financières, chocs pétroliers, etc.) est aujourd'hui un champ de recherche particulièrement actif, notamment par l'importance de leurs impacts économiques et sociaux (Raggar, 2009). L'étude des valeurs extrêmes revient à analyser des queues de distribution, ou de façon équivalente, à l'examen de la plus grande observation d'un échantillon. En ce sens, l'on peut considérer la théorie des valeurs extrêmes comme la contrepartie de la théorie statistique classique, qui est principalement basée sur l'étude de la moyenne d'un échantillon plutôt que des observations extrêmes (Toulemonde, 2008). La théorie des valeurs extrêmes a été développée pour estimer les probabilités d'occurrences d'évènements rares (Embrechts et *al.*, 2003). C'est une branche de la statistique qui s'intéresse à la caractérisation asymptotique des maxima ou minima d'une variable aléatoire. Elle établit le comportement limite des queues de loi de probabilité de variables aléatoires. Lorsque ces comportements par le biais de paramètres ont été estimés, il devient possible de calculer la probabilité d'un événement de grande amplitude (Garrido, 2002). Le caractère asymptotique de ces résultats incite toutefois à la prudence dans les conclusions dans la mesure où l'on ne dispose pas d'un nombre infini de données. Bien que les modèles proposés soient censés avoir un caractère

fortement prédictif, il est nécessaire de prendre conscience des limites de ces méthodes (Martinez, 2008).

Dans la littérature statistique, il existe de nombreuses formules d'estimation de la fréquence empirique. Ces formules empiriques peuvent être résumées par la relation générale suivante (Soro, 2011) :

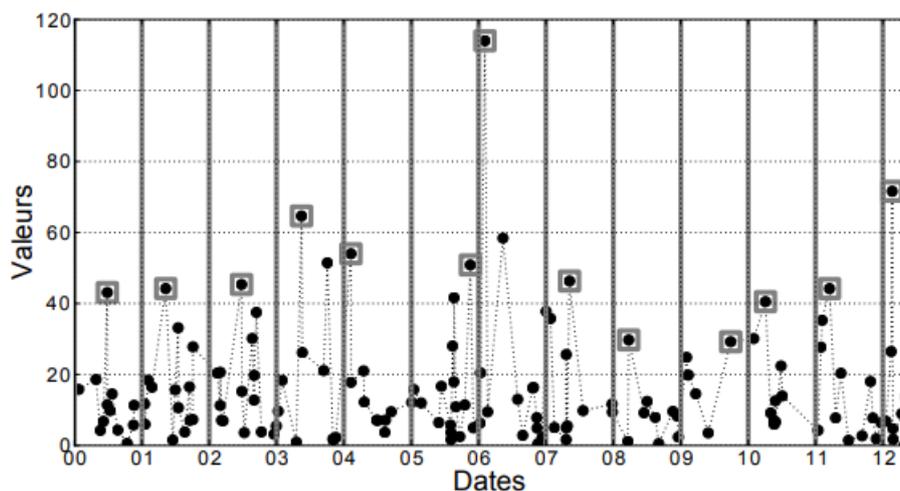
$$F_{n,a}(x_i) = \frac{i-a}{n+1-2a} \quad (1)$$

Où  $a \in [0; 0,5]$  et  $n$  est la taille de l'échantillon.

Pour une série donnée, la formule la plus adaptée dépend de la loi sous-jacente de la variable modélisée par la distribution statistique.

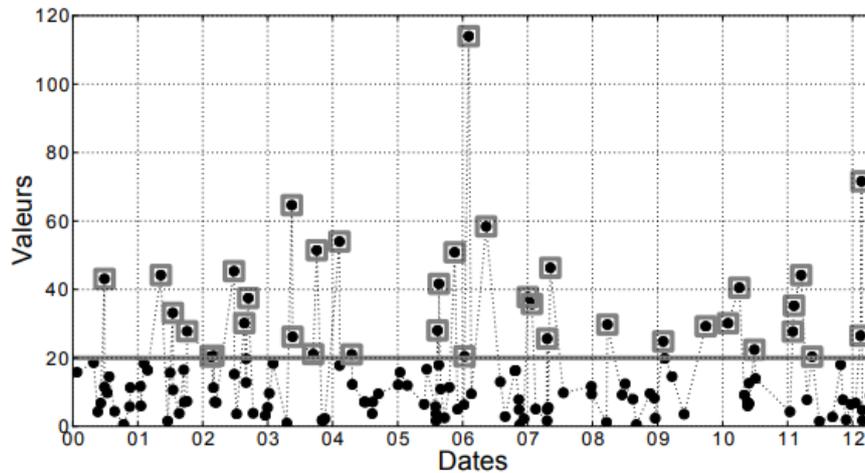
L'étude des extrêmes passe par l'analyse du maximum d'un échantillon de taille  $n$  donné :

$M_n = \max\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , où  $X_1, \dots, X_n$  un échantillon de  $n$  variables aléatoires réelles indépendantes et identiquement distribuées de la loi. L'analyse des maxima d'échantillon de taille  $n$  est aussi appelée analyse des maxima par bloc. Dans le cas de la figure 1, un bloc correspond à un an et  $M_n$  est le maximum de cet échantillon. On s'intéresse alors à la loi de distribution du maximum  $M_n$ .



**Figure 1** : Méthode des maxima par bloc ou valeurs maximales annuelles (Panthou, 2013)

L'analyse par les maxima annuels a été fortement critiquée dans le sens où l'utilisation d'un seul maximum conduit à une perte d'information contenue dans les autres grandes valeurs au lieu de la plus grande (Panthou, 2013). Le problème a donc été résolu en considérant plusieurs grandes valeurs dépassant un seuil donné (figure 2).



**Figure 2 :** Méthode des dépassements d'un seuil élevé (Panthou, 2013)

Cette approche appelée méthode des excès permet aussi de fournir une caractérisation asymptotique de la distribution de ces dépassements de seuil (Pickands, 1975). Afin d'exploiter plus de données, plusieurs approches alternatives à l'analyse des maxima annuels ont été développées. L'une de ces approches consiste à considérer les dépassements d'un seuil élevé (figure 2).

Toutefois, les méthodes couramment utilisées sont la fonction moyenne des excès et l'approche proposée par Coles (2001). La fonction moyenne des excès utilise l'approximation asymptotique selon laquelle le nombre annuel moyen de dépassement croît linéairement en fonction du seuil. L'approche proposée par Coles (2001), quant à elle, repose sur la stabilité des estimateurs des paramètres du modèle statistique sur une gamme de seuil. Le choix du seuil au niveau de ces méthodes est souvent le résultat d'un compromis entre les petites et les grandes valeurs du seuil (Bacro et Chaouche, 2006). En effet, un seuil trop élevé produit très peu de valeurs pour l'analyse, tandis qu'un seuil trop bas assure une série avec plus d'observations.

### 1.3. NOTIONS DE CHANGEMENT CLIMATIQUE, VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET PLUIES EXTRÊMES

Avec la croissance rapide de la littérature sur le changement climatique, les définitions des concepts continuent d'être revues. Ainsi, diverses définitions des concepts clés des impacts du changement climatique et des termes et concepts d'adaptation varient, selon les institutions et les différents groupes de parties prenantes. Quelques termes et concepts sont

fréquemment utilisés tout au long de cette recherche et il est donc important de se familiariser avec la façon dont ils sont définis.

Le climat se réfère à l'état de l'atmosphère à une période et à un temps donné. Une fluctuation dans l'état de ce climat ramène à la notion de variabilité climatique, tandis qu'un changement de cet état fait appel à la notion de changement climatique. Cependant, les deux termes "variabilité climatique" et "changement climatique" sont abusivement utilisés, et cela, de façon interchangeable par plusieurs auteurs, probablement dû à une complexité à les dissocier. En effet, le concept de variabilité climatique se réfère aux fluctuations naturelles intra et interannuelle du climat (GIEC, 2007). Elle se définit comme étant, la variation de l'état moyen du climat à des échelles temporelles et spatiales. Cette variabilité est souvent prévisible ou connue à l'avance. Elle est une caractéristique inhérente du climat qui se manifeste par les différences entre les statistiques de long terme des éléments climatiques (pluie, température, humidité, durée des saisons), calculées pour des périodes différentes. La variabilité du climat est souvent perçue à travers l'irrégularité des paramètres climatiques dans leur évolution.

La définition du changement climatique varie d'un auteur à un autre. Ainsi, selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC, 2012), le changement climatique se réfère à tout changement du climat au fil du temps, que ce soit due à la variabilité naturelle ou à la suite d'activités humaines. Selon cette définition, le GIEC ne fait pas de distinction entre les facteurs à l'origine du changement climatique et ceux conduisant à la variabilité du climat. Cette définition donnée par le GIEC diffère de celle donnée par la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (CCNUCC). De ce fait, selon la CCNUCC, le changement climatique se réfère à un changement de climat qui est attribué directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et cela, en addition de la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables. Ainsi, la CCNUCC établit une distinction entre les changements climatiques imputables à l'activité humaine altérant la composition de l'atmosphère, et la variabilité climatique imputable à des causes naturelles. Cependant, il est reconnu par tous que le changement climatique se réfère à un changement dans l'état du climat qui peut être identifié (à l'aide de tests statistiques) par des changements dans la moyenne et/ou la variabilité de ses propriétés, et qui persiste pendant une période prolongée, généralement pendant des décennies ou plus.

Vue la complexité à différencier les termes "variabilité climatique" et "changement climatique" sans une étude statistique préalable permettant de les spécifier, ces deux termes

sont utilisés de façon interchangeable. Mieux encore, ces deux termes sont ramenés à la notion de variations climatiques. Cette notion de variation climatique englobe à la fois la définition de la variabilité climatique et les définitions du changement climatique données par le GIEC et le CCNUCC. Ainsi, la variation climatique se réfère, dans cette étude, à la variation des paramètres des systèmes climatiques. Ces changements ont des conséquences importantes sur l'environnement humain, allant de l'augmentation de la température à la récurrence des événements extrêmes, tels que les tempêtes, les ouragans, les sécheresses, les inondations, et les conditions de chaleur extrêmes qui ont des impacts importants sur la santé et les comportements humains.

#### 1.4. SYNTHÈSE DES TRAVAUX SUR LES VARIATIONS CLIMATIQUES EN AFRIQUE DE L'OUEST ET EN CÔTE D'IVOIRE

Les pays de l'Afrique de l'Ouest, subissent aujourd'hui, après les sécheresses des années 70 et 80, les effets de fortes pluies et des inondations dévastatrices. Les dommages et pertes liés à ces événements hydroclimatiques extrêmes ont été évalués à plusieurs centaines de milliards de francs CFA (Sarr et *al.*, 2013). En effet, ces événements ont mis à mal les systèmes humains (pertes humaines et matérielles), les systèmes agricoles (cultures englouties) et les infrastructures économiques (routes, ponts, barrages détruits). Ces événements pourraient s'amplifier et devenir plus fréquents dans ce contexte de changement climatique (Sarr et *al.*, 2013). Plus de 80 à 90 % des catastrophes naturelles sont liées à des événements hydroclimatiques tels que les sécheresses, les fortes pluies, les inondations (OMM, 2006). Selon les travaux du GIEC (2013) estimant que la concentration du CO<sub>2</sub> va doubler d'ici 2100, alors que la température moyenne au sein des espaces côtiers de l'Afrique de l'Ouest (Sénégal, Guinée Bissau) va augmenter de 3°C et sera plus élevée (4°C) dans le sahel continental (Mali, Burkina Faso, Niger). Cette hausse des températures se manifeste déjà par des fortes pluies et des inondations dévastatrices que connaît la sous-région ces dernières années. On peut donc s'attendre, au cours des années à venir, à des situations contrastées alternées de sécheresse et d'excédents pluviométriques. La conséquence serait une augmentation des catastrophes hydroclimatiques (GIEC, 2013). Aussi de nombreuses études effectuées sur la variabilité climatique ouest africaine ont montré que celle-ci est caractérisée par une alternance de périodes sèches et de périodes humides. Goula et *al.* (2007) soulignent l'existence de ruptures dans les séries pluviométriques. Ces ruptures ont engendré des déficits pluviométriques importants allant de 10% à 30% selon les localités (Goula et *al.*, 2007). Ces études ont également montré une diminution du nombre de jours de pluie (Kouassi et *al.*, 2010). Les saisons pluvieuses ont

connu, en général, un raccourcissement de leur durée (Servat et *al.*, 1999). Il y a aussi le fait que la variabilité climatique se traduit par des précipitations de fortes intensités causant souvent des inondations.

En ce qui concerne les changements climatiques et pluies extrêmes en Afrique de l'Ouest, New et *al.* (2006) ont analysé six stations journalières sur l'Afrique de l'Ouest (deux en Gambie et quatre au Nigeria) ne montrant de tendances significatives (à la hausse) des pluies maximales journalières annuelles que sur une station. Goula et *al.* (2012) ont effectué une analyse des tendances et des ruptures en Côte d'Ivoire à partir de 44 postes pluviométriques sur trois indices (pluie maximale annuelle, nombre de jours dépassant le seuil de 50 mm et contribution au cumul annuel des jours dépassant 50 mm). Les principaux résultats de l'étude montrent que quelques séries présentent une rupture ou une tendance à la baisse mais la majorité des stations ne présente pas de non-stationnarités significatives. Les tests régionaux appliqués sur des régions homogènes montrent un contraste entre des régions où la baisse des indices est significative avec des régions où il n'y a pas de tendance significative. On notera par ailleurs, des études plus globales (Groisman et *al.*, 2005 ; Alexander et *al.*, 2006). Ces études souffrent en général d'un manque de données en Afrique de l'Ouest et ne peuvent donc pas donner d'estimations de l'évolution des extrêmes pluviométriques sur la région. L'étude des extrêmes peut aussi porter sur la caractérisation d'un évènement passé : c'est ce que l'on appelle un retour d'expérience. Dans ce cas, les scientifiques cherchent à évaluer la période de retour de l'évènement, à comprendre ses causes météorologiques, à documenter ses impacts. La mousson exceptionnelle de 2007 qui a provoqué de nombreuses inondations en Afrique de l'Ouest, a fait l'objet d'un retour d'expérience. Les études des auteurs tels que Paeth et *al.* (2010), Samimi et *al.* (2012) reviennent sur cette année exceptionnelle. À partir de données pluviométriques, Paeth et *al.* (2010) ont estimé que la période de retour des évènements de 2007 varie entre 1 et 50 ans (allant jusqu'à 200 ans sur le bassin de la haute Volta). Toutefois, au vu de la faible longueur des séries utilisées (12 ans) et des incertitudes encore importantes des estimations par satellite, de telles estimations sont à prendre avec précaution. Cette étude revient aussi sur les causes météorologiques de ces évènements exceptionnels. L'étude de Samimi et *al.* (2012) se concentre sur la description que les médias ont faite de ces évènements exceptionnels. Par ailleurs, quelques études abordent le sujet à travers l'établissement d'outils statistiques d'aide au dimensionnement d'ouvrages hydrauliques tels que les courbes IDF (Intensité-Durée-Fréquence) en Afrique non-sahélienne : au Congo (Mohyont et *al.*, 2004 ; Mohyont et Demarée, 2006 ; Van de Vyver et Demarée, 2010), en Côte d'Ivoire (Soro et *al.*, 2008 ; Soro et *al.*, 2010, Soro, 2011), au Nigeria (Oyegoké et Oyebande, 2008) et au Ghana (Okonkwo et

Mbajjorgu, 2010). Ces courbes servent à documenter pour différentes durées, la fréquence des intensités de pluie. Deux raisons peuvent expliquer le manque d'études sur les extrêmes pluvieux en Afrique de l'Ouest :

- la prédominance du discours « sécheresse » qui a longtemps favorisé les études sur les extrêmes secs plutôt que les extrêmes humides (Tschakert et *al.*, 2010) ;
- la difficulté de disposer de données pluviométriques au pas de temps journalier et infra-journalier sur des périodes suffisamment longues pour pouvoir échantillonner les événements extrêmes et donc rares par définition (Paeth et *al.*, 2010).

Depuis la fin des années 1960, la Côte d'Ivoire, comme l'ensemble des pays de l'Afrique de l'Ouest et Centrale, connaît une aggravation de la variabilité climatique (Brou et *al.*, 2005). Celle-ci se manifeste, en particulier, par une modification du régime des précipitations et par une diminution des hauteurs annuelles. La baisse des précipitations s'est amorcée, en Côte d'Ivoire comme dans les autres pays du golfe de Guinée, dès la fin des années 1960, en phase avec ce qui a été observé dans le Sahel, et s'est intensifiée au cours des années 1980 et 1990 (Paturel et *al.*, 1995) avant de connaître une légère rémission dans les années 2000. Au cours des cinq dernières décennies, la pluviosité annuelle a baissé de façon sensible. Avant la décennie 1970 (1950-1969), le volume annuel moyen précipité est partout supérieur à 1 000 mm, avec des maxima annuels moyens même largement supérieurs le long de la dorsale montagneuse guinéenne et à proximité du littoral (Brou et *al.*, 2005). Cette situation contraste considérablement avec ce qui est observé ultérieurement (1970-1999) où la plupart des stations enregistrent des niveaux de précipitations plus faibles que par le passé. En effet, initialement confinée au quart Nord-Est, la zone de précipitation inférieure à 1 200 mm atteint désormais le Centre-Sud (à la latitude de Tiassalé) et le Centre-Ouest (incluant les stations de Bouaflé, de Daloa et de Séguéla). C'est autour de Dabakala et de Bouna que la situation est la plus préoccupante. Dorénavant, les pluies annuelles y restent généralement inférieures à 1000 mm. L'ambiance climatique y est donc de plus en plus proche de celle des climats tropicaux secs. Cette diminution brutale de la pluviosité touche aussi les stations du Sud, notamment une partie du Sud-Ouest, la limite de Soubré et Gagnoa ainsi que le littoral centre à Sassandra. Dans ces stations qui étaient comptées parmi les plus pluvieuses, les hauteurs d'eau ne dépassent plus les 1400 mm. Quelques stations échappent à cette situation de baisse généralisée des quantités d'eau précipitée annuellement. Il s'agit en particulier de la station de Tabou, la plus arrosée du territoire où les hauteurs annuelles restent supérieures à 2400 mm. La variation relative calculée entre les années 1950 à 1960 et les années 1970 à 1990 permet de noter que la

diminution des précipitations atteint environ 25% sur l'ensemble du pays, voire un peu plus dans la partie septentrionale où elle peut atteindre 28%. Malgré la survenance de deux années humides récentes 1994 et 1999 qui ont apporté un espoir de rémission de la sécheresse, les différents tests statistiques et la répartition dans le temps des années sèches et humides ont permis de conclure que la sécheresse n'était pas encore terminée en fin 2002 (Gil et Yann, 2004).

### 1.5. NOTIONS DE NORMES HYDROLOGIQUES

Les projets d'aménagement basés sur l'eau sont en général dimensionnés en s'appuyant sur des normes établies à partir des observations de terrain. En fonction du type de données sur lequel elle est établie, l'on parlera de norme hydrologique, norme climatologique, etc.

En statistique, s'il est généralement admis qu'une moyenne est d'autant plus proche de la réalité que la série à partir de laquelle elle a été déterminée est longue, on reconnaît par ailleurs qu'une chronique de 30 années d'observations est suffisante pour conduire à une moyenne convenable. Une normale est une moyenne de variables calculées sur une période uniforme relativement longue. Il peut s'agir de normales climatologiques, pluviométriques en fonction du type de données. L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) considère qu'une période de trente ans est assez longue pour réduire les variations interannuelles (Ouédraogo, 2001 ; Sighomnou, 2004 ; Kouassi et *al.*, 2010). Notons que la période normale dans ce contexte est l'intervalle de temps sur lequel est définie une normale.

Il y a de nombreuses façons de calculer les « normales climatologiques », dont les plus utiles respectent les normes établies (Panthou, 2013). En effet, l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 2006) recommande que les pays préparent des normales hydrologiques voire climatiques sur des périodes officielles de 30 ans se terminant en 1930, 1960 et 1990, pour lesquelles les normales climatiques mondiales de l'OMM sont publiées. L'Organisation Météorologique Mondiale a adopté une nouvelle approche à deux niveaux des périodes de référence de 30 ans pour les données climatologiques, afin de tenir compte de l'accélération du rythme du changement climatique ainsi que du besoin de disposer, à des fins opérationnelles, d'informations climatiques actualisées. Actuellement, les normales climatologiques sont mises à jour tous les 30 ans. La période officielle de référence pour ces normales est donc toujours la période allant de 1961 à 1990. Les moyennes calculées sur cette base sont appelées normales climatologiques standard de l'OMM. Cependant, avec l'augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre, le climat de notre planète évolue beaucoup plus vite qu'auparavant. Il se peut par conséquent que les décideurs de secteurs sensibles aux conditions

climatiques, comme la gestion des ressources en eau, l'énergie, l'agriculture ou la viticulture, se fondent sur des informations obsolètes pour prendre des décisions importantes. Le Congrès météorologique mondial, la plus haute instance de l'OMM en matière normative, a approuvé une résolution selon laquelle, l'OMM doit actualiser les normales climatologiques standard à des fins opérationnelles tous les 10 ans et doit utiliser la période 1981-2010 comme période de référence actuellement en vigueur. Cette période sera actualisée tous les 10 ans, de sorte que, dans les années 2020, on devrait utiliser la période de référence de 30 ans allant de 1991 à 2020. Mais l'on conservera cependant la période de référence 1961-1990 comme période de référence historique, afin de faciliter les évaluations du changement climatique à long terme et permettre au public et aux scientifiques de se faire une idée plus exacte du rythme du changement climatique, jusqu'à ce qu'il y ait une raison scientifiquement impérieuse de la modifier. Ainsi, l'adoption d'une approche à deux niveaux pour les périodes de référence contribuera à harmoniser et normaliser les différentes méthodes employées au niveau national et facilitera les comparaisons internationales. La période climatologique standard de l'OMM pour le calcul des normales correspond à des données consécutives sur 30 ans, débutant le 1<sup>er</sup> janvier et se terminant le 31 décembre de chaque année. De plus, l'OMM a établi que les normales devraient être des moyennes arithmétiques avec un nombre limité de valeurs manquantes (OMM, 2006). Pour être acceptables, les normales qui représentent des moyennes doivent respecter la règle suivante : si, pour un pas de temps donné (mois, année, etc.), il manque plus de 3 valeurs consécutives ou plus de 5 valeurs en tout, ce pas (mois, année) ne doit pas être pris en compte dans le calcul. C'est ce qu'on appelle la « règle des 3-5 » qui a été établie par l'OMM pour servir de guide afin de déterminer les enregistrements complets de données. Pour les normales qui représentent des totaux, comme les précipitations, etc., on doit disposer de toutes les données d'un mois donné pour qu'on en tienne compte dans le calcul des normales.

La théorie des valeurs extrêmes a pour but d'étudier et de caractériser le comportement des valeurs extrêmes d'un échantillon de variables aléatoires. On souhaite estimer des petites probabilités ou des quantités dont la probabilité d'observation est très faible, c'est-à-dire proche de zéro. Ces quantités sont appelées quantiles ; on parle de quantile extrême lorsque l'ordre du quantile (probabilité d'observation) converge vers zéro quand la taille de l'échantillon tend vers l'infini. Ces quantiles extrêmes se situent dans les queues de distribution des lois de probabilité. Ainsi, à l'inverse de l'approche statistique classique qui s'intéresse au comportement moyen et à la variabilité des phénomènes autour de la moyenne, on s'intéresse ici au comportement des queues de distributions.

Que pouvons-nous dire du comportement du maximum ou du minimum d'un phénomène si la loi de probabilité qui le régit n'est pas connue ?

Un exemple d'application historique des quantiles est l'hydrologie. En effet, si l'on dispose d'un échantillon de hauteurs d'eau annuelles d'un cours d'eau, on peut se poser plusieurs questions intéressantes sur les événements extrêmes. En particulier :

- quelle est la hauteur d'eau qui est atteinte ou dépassée pour une faible probabilité donnée ?
- pour une "grande" hauteur d'eau fixée, quelle est la probabilité d'observer une hauteur d'eau qui lui sera supérieure ?

L'étude des quantiles permet de répondre à ce type de questions. Ainsi, les quantiles pluviométriques sont des quantités très utiles en hydrologie statistique (Habibi *et al.*, 2013 ; Agué et Afouda, 2015). Ils sont obtenus à partir de la distribution de probabilité cumulée associée à une variable pluviométrique quantitative.

Le terme de quantile permet d'associer, à une valeur particulière de la variable hydrologique étudiée, une période de retour  $T$  exprimée en année(s). Diverses définitions de cette période de retour existent au sein de la communauté scientifique internationale (Lang, 1995). On peut en donner une définition courante à partir d'un exemple bien connu : le quantile de débit ( $Q$ ) instantané maximal annuel décennal ( $QIXA_{10}$ ). Ce quantile traduit simplement qu'une certaine valeur du QIXA est susceptible d'être atteinte ou dépassée, en un site donné, avec une probabilité d'occurrence qui est en moyenne d'une fois tous les dix ans.

La méthode de CRUPEDIX et SOCOSE illustrent bien la notion de norme. En effet, dans cette méthode, le quantile  $P_{10}$  (pluie journalière décennale) est considéré comme une norme (Puech et Chabi-Gonni, 1984). Dans la méthode de l'ORSTOM et de GRADEX (Puech et Chabi-Gonni), les pluies décennale  $P_{10}$  et centennale  $P_{100}$  qui sont des quantiles de pluies journalières maximales annuelles sont considérées comme des normes et quant à la méthode de CIEH, la pluie annuelle moyenne ( $P_{an}$ ) qui est une normale pluviométrique est considérée comme une norme (Puech et Chabi-Gonni, 1984).

## 1.6. SYNTHÈSE DES TRAVAUX SUR LES NORMES HYDROLOGIQUES

Les impacts des changements climatiques à savoir : la baisse des précipitations, les sécheresses enregistrées entraînent des conséquences qu'il faut prendre en compte dans les études hydrologiques afin de mieux déterminer les quantiles de pluies extrêmes. Pour Kouassi et *al.* (2019), les quantiles varient pour une durée de retour donnée en fonction des périodes de référence choisies pour leur détermination. En effet, le choix de la période de référence impacte les quantiles des pluies journalières maximales annuelles. L'incidence du choix d'une série hydrologique (pluies journalières maximales annuelles) pour les calculs relatifs aux projets d'investissement en hydraulique urbaine est donc considérable. Cela semble être dû à l'impact du changement climatique sur les quantiles des pluies journalières maximales annuelles. Les différents résultats obtenus ont montré que les périodes de référence de calcul des quantiles que choisissent les projecteurs des ouvrages hydrauliques connaissent une instabilité due à la non-stationnarité du climat pendant la période d'étude considérée (Kouassi et *al.*, 2019). Une comparaison des résultats obtenus par Kouassi et *al.* (2019) à ceux des travaux antérieurs montre que les quantiles de différentes durées de retour (10, 50, 100 ans) sont inférieurs à ceux obtenus pour les mêmes périodes de retour et la même station par Goula et *al.* (2007), Goula et *al.* (2010) et Soro (2011). Les écarts relatifs absolus évalués montrent que les quantiles obtenus par Kouassi et *al.* (2019) sont statistiquement différents de ceux de Goula et *al.* (2007) et Goula et *al.* (2010), dont les études ont été menées sur les périodes 1947-1995 et 1947-1993. Seule la pluie décennale de la période de référence historique (1961-1990) n'est pas statistiquement différente des autres quantiles décennaux déterminés par Goula et *al.* (2010). En effet, l'écart relatif est de 4,76 % qui reste inférieur à 5 %. La majorité (58 %) des quantiles calculés aux périodes de retour égales à 10, 50 et 100 ans est différente statistiquement de ceux de Soro (2011) calculés sur la période 1942-2002. En effet, l'écart relatif varie entre 6,01 % et 10,24 % qui reste supérieur à 5 %. L'écart entre les quantiles croît avec la période de retour. De façon générale, l'écart est plus faible au niveau des quantiles de la période de référence historique (1961-1990) suivie de ceux de la période de référence actualisée (1981-2010). En considérant les périodes de référence (1961-1990 et 1981-2010), il apparaît une différence significative entre les valeurs de quantiles proposées par Goula et *al.* (2007), Goula et *al.* (2010) et Kouassi et *al.* (2009). En effet, les quantiles proposés par Goula et *al.* (2007) et Goula et *al.* (2010) sont surestimés par rapport à ceux calculés à partir des données des périodes de référence de l'OMM (1961- 1990, 1981-2010). Cependant, il apparaît une différence non significative entre les valeurs de quantiles proposées par Soro (2011) et celles obtenues par Kouassi et *al.* (2019) sur

la base des périodes de référence standard (1961-1990 et 1981-2010) surtout pour les quantiles de la période de référence historique (1961-1990). Cette différence peut s'expliquer par le choix des échantillons. En effet, les séries utilisées par Goula et *al.* (2007) et Goula et *al.* (2010) ne prennent pas en compte la période après 1993 d'une part et après 1995 d'autre part. Ces séries s'insèrent dans la période considérée par Soro (2011) qui va de 1942 à 2002. Il ressort que les quantiles de la période 1961-1990 (période de référence historique) peuvent être admis pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques en général et les ouvrages d'assainissement en particulier dans le district d'Abidjan, en lieu et place des quantiles des séries entières proposés par les travaux de Goula et *al.* (2007), Goula et *al.* (2010) et Soro (2011). Pour les pluies de fréquence rares (50 et 100 ans), il est possible d'utiliser les quantiles proposés par Soro (2011). Pour une meilleure sécurité des ouvrages hydrauliques, Kouassi et *al.* (2019) recommandent d'utiliser les quantiles de la période historique (1961-1990) pour les périodes de retour inférieures à 50 ans. En ce qui concerne les durées de retour supérieures à 50 ans, il est possible d'utiliser les quantiles des deux périodes de référence (1961-1990, 1981-2010).

#### 1.7. SYNTHÈSE DES TRAVAUX SUR LA SENSIBILITÉ DES LOIS STATISTIQUES

Selon Soro (2011), la taille et la qualité des séries de données pluviographiques utilisées pour élaborer les courbes régionales Intensité-Durée-Fréquence (IDF) souligne la nécessité d'une révision de l'étude des intensités exceptionnelles de pluie en Côte d'Ivoire, afin de mettre à jour les normes hydrologiques indispensables au dimensionnement des ouvrages d'assainissement des eaux pluviales.

En Côte d'Ivoire, l'inadéquation de la loi généralisée des valeurs extrêmes pour l'ajustement des maxima horaires peut être due en partie au nombre de paramètres de la loi de probabilité et à la taille des séries pluviométriques (Soro et *al.*, 2010). En effet, l'estimation des paramètres des lois de probabilité devient moins précise lorsque ces derniers sont nombreux et notamment du paramètre de forme. Ce dernier est très difficile à estimer lorsque la taille des échantillons est faible. En outre, les critères de comparaison utilisés, notamment le critère Bayésien a tendance, à cause du principe de parcimonie, à favoriser les lois à deux paramètres (Gumbel, Lognormale) au détriment de celles à trois paramètres (GEV).

La Loi de Gumbel et la loi Lognormale à deux paramètres s'ajustent bien à la majorité des séries de données horaires extrêmes. En effet, 91 % des séries d'intensités maximales annuelles ont une queue de distribution qui appartient au domaine d'attraction de Gumbel (Gumbel, Lognormale). Au Sud-Est du Nigéria, Okonkwo et Mbajiorgu (2010) ont aussi montré que les

séries des intensités maximales annuelles avaient une distribution de type exponentiel. Cette prédominance des lois de type exponentiel (Gumbel, Lognormale) pourrait être justifiée par la taille des échantillons analysés. En effet, dans une étude sur la longue série pluviométrique d'Athènes (136 années), Koutsoyiannis et Baloutsos (2004) ont constaté que la loi Gumbel n'est pas adaptée aux maxima annuels de la série de 136 années, tandis qu'elle paraissait appropriée si l'on ne considère, par exemple, que les 34 dernières années.

L'évolution des courbes intensité-durée-fréquence est souvent liée à la taille des séries de données utilisées. Ceci a été confirmé par Endreny et Imbeah (2009) au niveau de la station d'Accra et Ho au Ghana.

La loi généralisée des valeurs extrêmes est peu susceptible de s'appliquer aux séries de pluies horaires à cause de la taille des échantillons utilisés (souvent inférieure à 30 ans) qui rend difficile l'estimation du paramètre de forme.

Olivry et *al.* (1995) ont procédé à des prédéterminations des débits moyens journaliers maximums annuels du Niger à Koulikoro en scindant l'échantillon total des observations en deux parties, avant et après 1970. L'ajustement sur la période de 1971 à 1992 montre une sous-estimation de 24% par rapport aux résultats obtenus en considérant toute la période d'observation. Hubert et *al.* (1989) après avoir mis en évidence des ruptures situées avec le maximum de probabilité entre 1968 et 1970 dans les séries de précipitations et de débits en Afrique de l'Ouest recommandent que les normes hydrologiques soient désormais établies sur des données de la phase climatique récente. Les données de certaines phases climatiques antérieures, similaires à la phase climatique actuelle pourraient venir augmenter la taille de l'échantillon des données de la période récente.

Todorov (1985) suggère l'établissement de nouvelles normales pluviométriques incluant toutes les années récentes, mais précise que la longueur de la période sur laquelle les normales seraient calculées devra dépendre de l'utilisation envisagée. Hubert et *al.* (1989) recommandent que les normes hydrologiques soient désormais établies sur la base des données récentes, éventuellement 'grossies' de certaines phases pluviométriques anciennes qui ne prennent pas en compte les fluctuations récentes, avec le risque de ne jamais atteindre les prévisions. Morel (1986) de son côté suggère deux séries de normes dont une pour chaque contexte, soit une norme de période sèche et une autre pour la période humide. Devant cette situation, on peut se demander quelle attitude adopter pour le dimensionnement des ouvrages et l'évaluation des risques divers liés à l'eau ? Aucune solution définitive n'a été proposée jusque-là. Devant cette complexité de la question, vouloir répondre à la question posée serait s'engager dans un débat

sans fin. C'est ainsi que Paturel et *al.* (2003) estiment que le problème de la révision des normes en hydro-pluviométrie revêt une très grande importance sur un plan pratique, alors il est difficile de proposer une solution unique et définitive (Kouassi et *al.*, 2019).

Devant cette complexité de la question, vouloir répondre à la question posée serait s'engager dans un débat qui n'est pas clos. En nous référant pour l'instant, à la conclusion de Paturel et *al.* (2003) qui estiment que le problème de la révision des normes en hydro-pluviométrie revêt une très grande importance sur un plan pratique, nous disons avec ces derniers qu'il est difficile de proposer une solution unique et définitive.

#### 1.8. SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE STATIONNARITÉ DES NORMES HYDROLOGIQUES

En se basant sur la norme météorologique qui désigne une moyenne sur 30 ans et étant entendu qu'elle varie tous les 10 ans, la norme utilisée pour une année X devrait logiquement être calculée sur les 30 dernières années. Dans ces conditions, la norme pluviométrique de l'année 2000 devrait être calculée sur la période 1971-2000.

Une analyse comparative des modules de trois cours d'eau de l'Afrique de l'Ouest (Ouédraogo, 2001) montre que les différences peuvent être très importantes dans certains cas. Ainsi, un rapport de 2,5 a été observé entre la norme calculée sur la période 1971-2000 et celle calculée sur la période 1951-1980, sur le Bani à Douna. Pour l'ensemble des trois cours d'eau étudiés, le débit millennial calculé sur la période 1971-2000 est inférieur au débit décennal de la période 1951-1980.

La "norme" des variables hydrologiques définie comme une moyenne sur une période passée ne semble pas suffisante dans un contexte d'importante variabilité. La "norme" climatique trentenaire ne semble plus stable sur la période récente. Il est donc tout à fait crucial d'analyser la pertinence de cette notion de "norme" dans un contexte déficitaire prolongé comme celui observé depuis ces cinquante dernières années en Afrique de l'Ouest et Centrale.

## 1.9. QUELQUES NOTIONS SUR LES MÉTHODES DE PRÉDÉTERMINATION DES CRUES DE L'ORSTOM ET DU CIEH

### *1.9.1. Méthode de l'ORSTOM*

La crue décennale peut être définie comme étant la crue provoquée par une pluie décennale (hauteur de précipitation égale ou dépassée en moyenne une fois par décennie), toutes les autres conditions étant celles observées le plus fréquemment lors de fortes averses (humectation du sol, état de la végétation, forme et répartition spatiale de la pluie). Bien que dans de nombreux cas, l'aménageur s'intéresse essentiellement au débit maximum, la méthode proposée permet d'estimer le volume ruisselé ainsi que les temps de montée et de base, paramètres indispensables à la conception de certains aménagements : retenues, réservoirs, contrôle de zones d'épandage, etc.

L'approche proposée, résolument déterministe, est celle d'un modèle global pluie-débit fondé sur la théorie de l'hydrogramme unitaire. On considère que le bassin versant constitue une entité homogène, tant en ce qui concerne les apports pluviométriques que ses caractéristiques physiques. Les nombreuses études hydrologiques effectuées en régions sahélienne et tropicale sèche ont permis de dégager les principaux facteurs explicatifs des crues : la hauteur et la forme de l'averse génératrice, la superficie du bassin versant, l'infiltrabilité du sol et le relief.

La méthode s'applique à des bassins dont la superficie se situe entre quelques dizaines d'hectares et plus de 1500 km<sup>2</sup>, en distinguant néanmoins les bassins sur lesquels la crue décennale n'est généralement pas unitaire. De plus, pour une meilleure précision, les deux grandes régions climatiques : sahélienne et tropicale sèche, ont été traitées séparément. Par ailleurs, les bassins sahéliens dont la superficie est inférieure à 10 km<sup>2</sup>, ont été étudiés indépendamment pour la mise au point de la méthode qui a ensuite été appliquée à l'ensemble des autres bassins. Pour les bassins dont la superficie est supérieure à 120 km<sup>2</sup>, et surtout pour ceux dépassant 350 km<sup>2</sup>, seule a été prise en considération, pour l'estimation des caractéristiques de crue, la partie aval du bassin versant susceptible de générer un écoulement à l'exutoire. L'aire couverte par cette surface active est liée à la pente, à la forme et à l'infiltrabilité du bassin, ainsi qu'au degré de dégradation du réseau hydrographique.

### *1.9.2. Méthode du CIEH*

Puech et Chabi-Conni (1984) ont proposé une méthode statistique, connue depuis sous le nom de méthode CIEH et basée sur 162 bassins versants. La méthode du CIEH, basée sur des régressions multiples, est d'une utilisation aisée et ne nécessite aucune intervention sur le

terrain. Elle repose sur la détermination de paramètres physiographiques, obtenus facilement à partir de cartes topographiques toujours disponibles.

Cette méthode est fondée sur l'utilisation de la formule de Manning-Strickler applicable aux écoulements uniformes, ou peu variés, en régime permanent (Equation 2).

$$Q = K_s \times S \times R^{2/3} \times I^{1/2} \quad (2)$$

Où : Q est le débit exprimé en m<sup>3</sup>/s ;

S est la section transversale calculée en m<sup>2</sup> ;

R est le rayon hydraulique, en m, sachant que  $R = \frac{S}{P}$  (P étant le périmètre mouillé, c'est-à-dire la longueur du lit développée sous la ligne d'eau, en mètres) ;

I est la pente du fond du canal, en m/m ;

K<sub>s</sub> est le coefficient de rugosité de Manning-Strickler.

## 1.10. NOTIONS SUR LES MODÈLES DE GÉNÉRATION DE PLUIES

Le besoin de modéliser des données synthétiques de pluies se justifie par le fait que les données disponibles ne contiennent qu'une quantité limitée d'informations. Ces informations ne concernent que la variabilité de précipitations dans le passé (Hussain, 2008), ce qui ne permet pas de faire des projections. La connaissance de la probabilité future d'occurrence des précipitations pourrait être utile lors de la planification, la gestion des cultures, la gestion de l'eau et la prévision de certaines catastrophes hydrométéorologiques telles que les inondations. Cela contribuerait à réduire donc le risque dû à l'incertitude des événements climatiques importants (Dash Priyaranjan, 2012). Ainsi, des générateurs météorologiques stochastiques de pluie sont développés pour produire des séries temporelles chronologiques synthétiques de variables climatiques telles que les précipitations, la température et le rayonnement solaire (Richardson, 1981 ; Richardson and Wright, 1984 ; Rascko et al., 1991). L'hypothèse sous-jacente est que la série chronologique synthétique soit statistiquement proche de celle de la série observée.

### *1.10.1. Développement des modèles stochastiques de génération des pluies*

Il existe de nombreux développements de modèles, qui représentent des précipitations continuellement dans l'espace. Cox et Isham (1994) ont présenté une classification intéressante

des modèles de précipitations en trois types que sont les modèles statistiques empiriques, les modèles dynamiques et les modèles stochastiques intermédiaires. L'idée derrière cette classification est le niveau de réalisme physique incorporée dans la structure du modèle. Le dernier type est le plus utilisé et il en existe une variété [WGEN (Richardson and Wrigt, 1984), ClimGEN (Campbell, 1990), projet STARDEX (Haylock et Goodess, 2004), MCME (Hussain, 2008) et d'autres (Semenov and Barrow, 1997)]. La variété WGEN (Richardson and Wrigt, 1984) est celle incorporée sous le logiciel de Simulation GoldSim.

### ***1.10.2. Base méthodologique de génération de pluies***

Les méthodologies de génération de données sont parfois intégrées dans des modèles stochastiques existants (Safouane et *al.*, 2016). Ces modèles sont capables de simuler des données journalières de pluies de durée variable (jusqu'à plusieurs années). La plupart est basée distinctement sur :

- la modélisation de l'occurrence des pluies ;
- la simulation des hauteurs de pluies.

La prise en compte de la dépendance à l'intérieur des séries temporelles conduit en général à l'utilisation d'une chaîne de Markov pour la modélisation. Ainsi, une grande variété de modèles de simulation d'événements météorologiques a été étudiée par le modèle des chaînes de Markov (Gringorten, 1996). L'estimation des quantités de pluies nécessite en revanche, l'ajustement des données pluviométriques à une distribution de fréquence (Hussain, 2008).

### ***1.10.3. Chaînes de Markov et génération de données pluviométriques***

#### **1.10.3.1. Modélisation des occurrences des pluies**

Gabriel and Neumann (1962) sont considérés comme les premiers à utiliser une chaîne de Markov stationnaire à deux états d'ordre 1 pour décrire l'occurrence des précipitations journalières. Ils supposent que la probabilité de pluies journalières ne dépend que des conditions climatiques (sec ou humide) de la veille. Haan et *al.* (1976) a, par ailleurs, proposé un modèle stochastique pour simuler les pluies quotidiennes. L'élément fondamental est que toute chaîne de Markov se base sur les matrices de probabilité transitoire de divers pas de temps. Une chaîne de Markov d'ordre 1 est un processus stochastique avec la propriété que la valeur du processus au temps  $t$ ,  $X_t$ , dépend uniquement de sa valeur au temps  $t-1$ ,  $X_{t-1}$ , et non sur la valeur de la séquence de valeur que le processus à traverser pour atteindre  $X_{t-1}$ . Généralement, le nombre d'états à chaque temps peut être défini comme  $n$ . Ainsi, il existe  $n \times n$  transitions entre deux temps successifs. Alors, il est possible de déterminer le nombre de probabilités de transition,

$P_{ij}$  d'un état à l'instant  $t$  à un autre état à un instant  $t+1$ . En conséquence, la matrice de probabilité de transition suivante,  $P_{t, t+1}$  peut être mise en œuvre à partir des données de pluies observées. La structure de la matrice de probabilité de transition serait :

$$P_{t,t+1} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \dots & P_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \dots & P_{nn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

et peut être estimée par la relation suivante énoncée par Siriwardena et *al.* (2002) :

$$P_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sum_{j=1}^C f_{ij}} \quad i, j = 1, 2, \dots, C \quad (4)$$

$f_{ij}$  : représente la fréquence historique de transition de l'état  $i$  à l'état  $j$  ;

$C$  : le nombre maximal d'états.

Avec les données maximales extrêmes annuelles de pluies, cette matrice présente les probabilités de transition,  $P_{ij}$  de pluie annuelle de l'état  $i$  au temps  $t$  à l'état  $j$  au temps  $t+1$  donné avec  $n$  état pluvieux, les propriétés suivantes de la matrice de transition sont valables par définition. La probabilité de chaque état varie entre 0 et 1.

Ainsi,  $0 < P_{ij} < 1$  ou  $i, j = 1, 2, \dots, C$

$$\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1 \quad (5)$$

Avec  $i = 1, 2, \dots, C$

En pratique, les éléments de la matrice de probabilité de transition constituent la fréquence relative de la pluie enregistrée et reçue le  $j^{\text{ème}}$  état au temps  $t+1$  fournie comme tel au  $i^{\text{ème}}$  état au pas de temps précédent ( $t-1$ ). Les multiplications successives de matrice  $P_{t, t+1}$ , isolément, jusqu'à une stabilisation des probabilités de transition, mènent à la population de probabilité de transition de la matrice. C'est cette matrice de probabilité de transition stable qui est utilisée pour la modélisation des séries temporelles de pluies par la chaîne de Markov d'ordre 1.

### 1.10.3.2. Modélisation des quantités de précipitations et fiabilité des générateurs stochastiques

L'occurrence d'un événement pluviométrique étant donnée, la connaissance de la distribution des précipitations est essentielle pour modéliser les séquences quotidiennes de précipitations. Il

existe principalement deux approches pour estimer la hauteur de pluie pour les jours humides. Katz (1977) et Buishand (1977) considère la séquence des précipitations comme un processus dépendant de la chaîne où les quantités de précipitations, bien que indépendantes, leur fonction de distribution dépend de l'état du jour précédent (sec ou humide). La méthode la plus adoptée suppose toutefois que les pluies quotidiennes successives sont indépendantes et une distribution théorique peut être ajustée aux précipitations (Todorovic and Woolhiser, 1975). Il existe un nombre important de distributions statistiques des précipitations pour différentes durées. Il semble qu'il n'y ait pas de distribution unique qui a fait l'unanimité dans la description des distributions des hauteurs de pluies. Les fonctions de distribution Weibull théorique, Gamma, exponentielle sont utilisées, le plus souvent, de façon pratique pour prédire les hauteurs de précipitations (Konaté, 2018). L'estimation précise des paramètres des distributions mentionnées ci-dessus repose en grande partie sur la méthode du maximum de vraisemblance ou la méthode des moments (Greenwood and Durand, 1960). Il faut remarquer que la fiabilité de ces modèles repose, en grande partie, sur leur capacité à reproduire les caractéristiques statistiques comparables à celles des séries historiques (Salas et *al.*, 1980 ; Unal et *al.*, 2004 ; Kim et Olivera, 2010 ; Kim et Olivera, 2012).

#### 1.11. CONCLUSION PARTIELLE

Les pays de l'Afrique de l'Ouest, subissent aujourd'hui, après les sécheresses des années 70 et 80, les effets de fortes pluies et des inondations dévastatrices. Les dommages et pertes liés à ces événements hydroclimatiques extrêmes sont très importants. En effet, ces événements ont mis à mal les systèmes humains (pertes humaines et matérielles), les systèmes agricoles (cultures englouties) et les infrastructures économiques (routes, ponts, barrages détruits). Ils ont également été à l'origine des impacts psychologiques importants notamment sur les groupes les plus vulnérables. Ces événements pourraient s'amplifier et devenir plus fréquents dans ce contexte de changement climatique. L'incidence du choix d'une série hydrologique (pluies journalières maximales annuelles) pour les calculs relatifs aux projets d'investissement en hydraulique urbaine est donc considérable. Cela semble être dû à l'impact du changement climatique sur les quantiles des pluies journalières maximales annuelles. Les impacts des changements climatiques à savoir : la baisse des précipitations, les sécheresses et les inondations enregistrées ont des conséquences qu'il faut prendre en compte dans les études hydrologiques afin de mieux déterminer les normes hydrologiques. Les méthodes de l'ORSTOM et du CIEH de détermination des normes hydrologiques servant au dimensionnement des ouvrages hydrauliques sont largement utilisées en Afrique de l'Ouest. Ces méthodes ont été élaborées

avec des données hydroclimatiques qui elles même sont impactées par l'effet des changements climatiques. Ces normes hydrologiques servant au dimensionnement des ouvrages hydrauliques doivent prendre en compte l'instabilité du climat. D'où la révision de certaines normes hydrologiques.

## CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

### 2.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

La Côte d'Ivoire est située en Afrique de l'Ouest entre les longitudes 2°30 et 8°40 Ouest et les latitudes 4°20 et 10°50 Nord (Figure 3). Le territoire est limité au Sud par l'Océan Atlantique, à l'Est par le Ghana, au Nord par le Burkina Faso, le Mali, à l'Ouest par la Guinée et le Liberia. Sa superficie est de l'ordre de 322 462 km<sup>2</sup> (Mines, 1998).



Figure 3 : Carte de localisation géographique de la Côte d'Ivoire (RGPH, 2014)

## 2.2. CONTEXTE CLIMATIQUE

### 2.2.1. Principaux régimes climatiques de la Côte d'Ivoire

En Côte d'Ivoire, la pluviométrie est tributaire des variations thermiques de l'Océan Atlantique, du couvert végétal et des déplacements du Front Inter Tropical de transition (F.I.T.). Les déplacements du Front Inter Tropical créent une zonation Nord-Sud des différentes régions climatiques qui permet de distinguer quatre types de climat (Figure 4).

#### 2.2.1.1. Climat Attiéen (Littoral et Intérieur)

Ce climat englobe le littoral et une grande partie de la zone forestière, se rétrécissant dans le Sud-Ouest du pays à la limite sud de Taï et de Soubré. Dans cette zone climatique, des pluies sont inégalement réparties. Les régions les plus arrosées (hauteur moyenne annuelle supérieure à 1800 mm) sont la bande littorale s'étendant de Jacquville à la frontière Est avec le Ghana (Brou, 2005). La partie du littoral de San-Pedro à Grand-Lahou est arrosée par des pluies variant entre 1400 et 1800 mm annuellement. La région de Tabou est particulière avec une hauteur moyenne de 2200 mm. Sur le reste de cette zone climatique, les hauteurs vont en décroissant du Sud vers le Nord (de 1600 à 1200 mm).

#### 2.2.1.2. Climat Baouléen

C'est un climat de type intermédiaire très variable selon les années qui s'étend des régions de Bouna et de Bondoukou au Centre de la Côte d'Ivoire (région de Bouaké), aux régions forestières et montagneuses de l'Ouest (entre Taï et Touba). Il jouit d'un climat de transition entre le climat équatorial et le climat tropical de transition.

La répartition géographique des pluies se fait d'Est en Ouest, de la région faiblement arrosée de Bouna (hauteur moyenne annuelle entre 1000 et 1100 mm) aux régions fortement arrosées de l'Ouest, la hauteur moyenne annuelle étant supérieure à 1900 mm. La croissance est régulière suivant la ligne Séguéla-Vavoua-Touba (Soro, 2011).

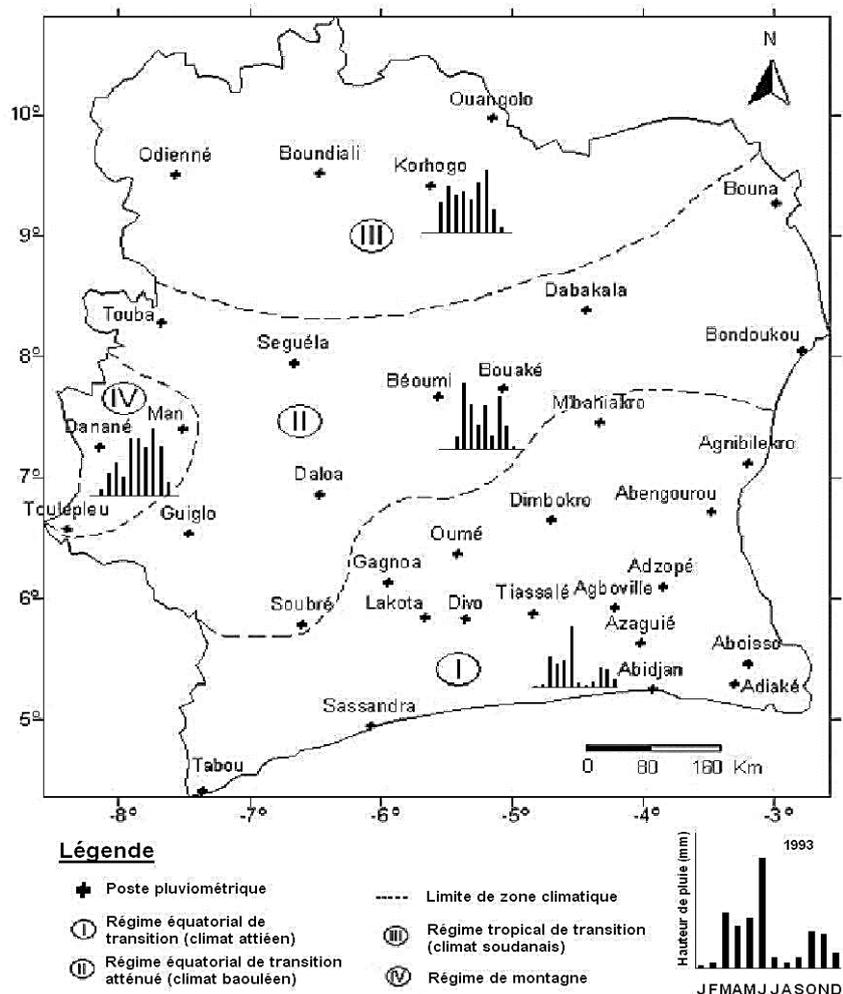
#### 2.2.1.3. Climat Soudanais

Cette zone englobe la partie septentrionale du pays et s'étend de la région de Ouangolo aux régions de Tengréla et d'Odienné. La température y est plus variable et l'humidité relative demeure plus basse. La répartition géographique des pluies dans le climat soudanais est semblable à celui du climat Baouléen et se fait d'Est en Ouest. En effet, on passe progressivement des secteurs faiblement arrosés du Nord-Est (entre 1000 et 1200 mm à Bouna),

aux ambiances plus humides des milieux montagneux de l'Ouest avec 1600 mm par an en moyenne à Odienné (Soro, 2011).

#### 2.2.1.4. Climat des Montagnes

C'est un type de climat très influencé par les facteurs orographiques locaux du fait de la localisation de l'aire concernée à l'extrémité occidentale des reliefs de la dorsale guinéenne. Il s'agit en réalité d'une zone charnière entre les climats tropicaux humides et subéquatoriaux. C'est le régime pluviométrique des massifs montagneux de l'Ouest de la Côte d'Ivoire dans les régions de Man, Danané et Toulepleu (Figure 4).

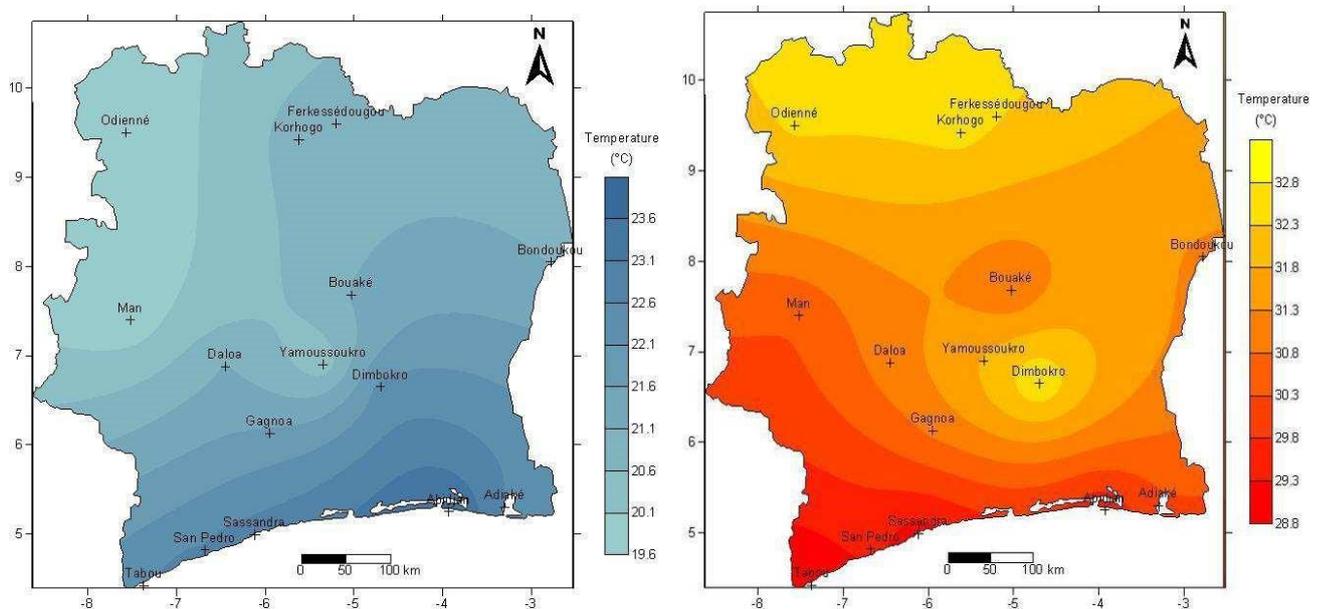


**Figure 4 :** Zones climatiques de la Côte d'Ivoire (Goula et al., 2007)

### 2.2.2. Température

En Côte d'Ivoire, le gradient thermique est orienté grossièrement du Sud vers le Nord (Brou, 2005). Un échauffement de l'air est en effet observé au fur et à mesure que l'on progresse vers le Nord. Les températures annuelles les plus basses sont toutefois observées dans la zone montagneuse (Figure 5), à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Les températures les plus fortes sont enregistrées dans l'extrême nord à Korhogo, mais également dans le secteur sud-est de la cuvette de Dimbokro (Figure 5).

Les mois les plus chauds de l'année sont ceux de février, mars et avril où, à l'exception du quart sud-ouest du pays, toutes les localités connaissent des températures mensuelles supérieures à 27 °C. La Côte d'Ivoire enregistre ses températures les plus basses en juillet et en août. Sur l'ensemble du pays, ces températures descendent souvent à 20 °C.



**Figure 5 :** Températures minimales et maximales moyennes de la Côte d'Ivoire sur la période 1955-1997 (Soro, 2011)

### 2.2.3. Évaporation

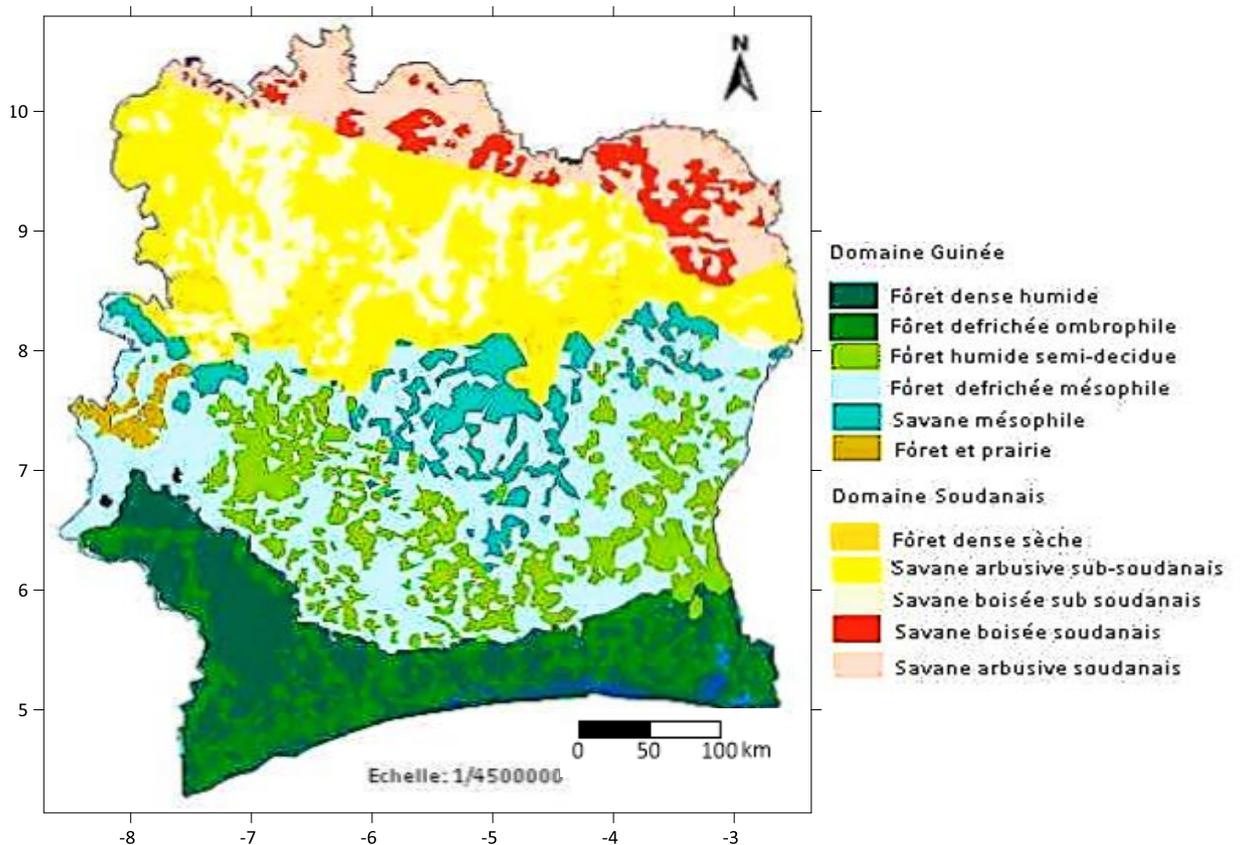
Les phénomènes d'évaporation jouent un rôle prépondérant dans les bilans hydriques. L'évapotranspiration potentielle (ETP), où la végétation intervient essentiellement, peut atteindre en moyenne 1500 mm par an. L'évaporation totale annuelle sur des bacs Colorado diminue depuis le Nord (2000 mm) vers le Sud (1000 mm) (Brou, 2005). Les variations

saisonniers de l'évaporation suivent assez bien celles de la température et de l'humidité relative de l'air. Ces variations dépendent de l'influence de l'altitude et des formations végétales.

### 2.3. VÉGÉTATION

En Côte d'Ivoire, deux grands types de paysages végétaux (figure 6) se partagent le territoire (Brou, 2005) :

- le domaine guinéen situé dans la moitié sud en zone forestière. On y distingue quatre secteurs caractérisés par des groupements végétaux particuliers répondant à des conditions écologiques différentes. Il y a également des prairies altimontaines (sommet du mont Nimba) et des savanes de basse côte entre Grand-Lahou et la lagune Aby ;
- le domaine soudanais, situé dans la partie septentrionale en zone de savane se subdivise en deux secteurs : le secteur sub-soudanais et le secteur soudanais. Le secteur subsoudanais plus important, s'étend de la limite nord de la zone guinéenne aux frontières du Mali et du Burkina Faso. Le secteur soudanais est très limité et ne concerne que l'extrême nord du pays, suivant une ligne Férédou (au Nord d'Odienné), Ferkéssédougou, Nassian (au Sud de la réserve de Bouna), Farko.



**Figure 6** : Couvert végétal ivoirien (Brou, 2005)

## 2.4. RELIEF

La Côte d'Ivoire est relativement peu accidentée. Elle ne possède pas de hautes montagnes à l'exception de la région de Man, à l'Ouest, avec quelques sommets de plus de 1 000 m tels que le Mont Tonkui (1200 m) et le Mont Nimba (1752 m), et de la région de Boundiali au Nord-Ouest. Tout le Sud du pays est occupé par des plaines légèrement ondulées se relevant un peu vers l'Ouest, à la frontière du Libéria (collines de Grabo de 390 à 424 m). Du Centre au Nord, s'étend une grande zone de hauts plateaux, dominée par quelques petites chaînes (les collines Baoulé et les collines de Bongouanou) et par quelques reliefs isolés telles que les buttes tabulaires du Bowé de Kiandi, au Nord-Est (Brou, 2005). La côte ouest, qui s'étend de la frontière libérienne à la ville de Fresco, est rocheuse et abrite de belles plages et quelques falaises (Figure 7).

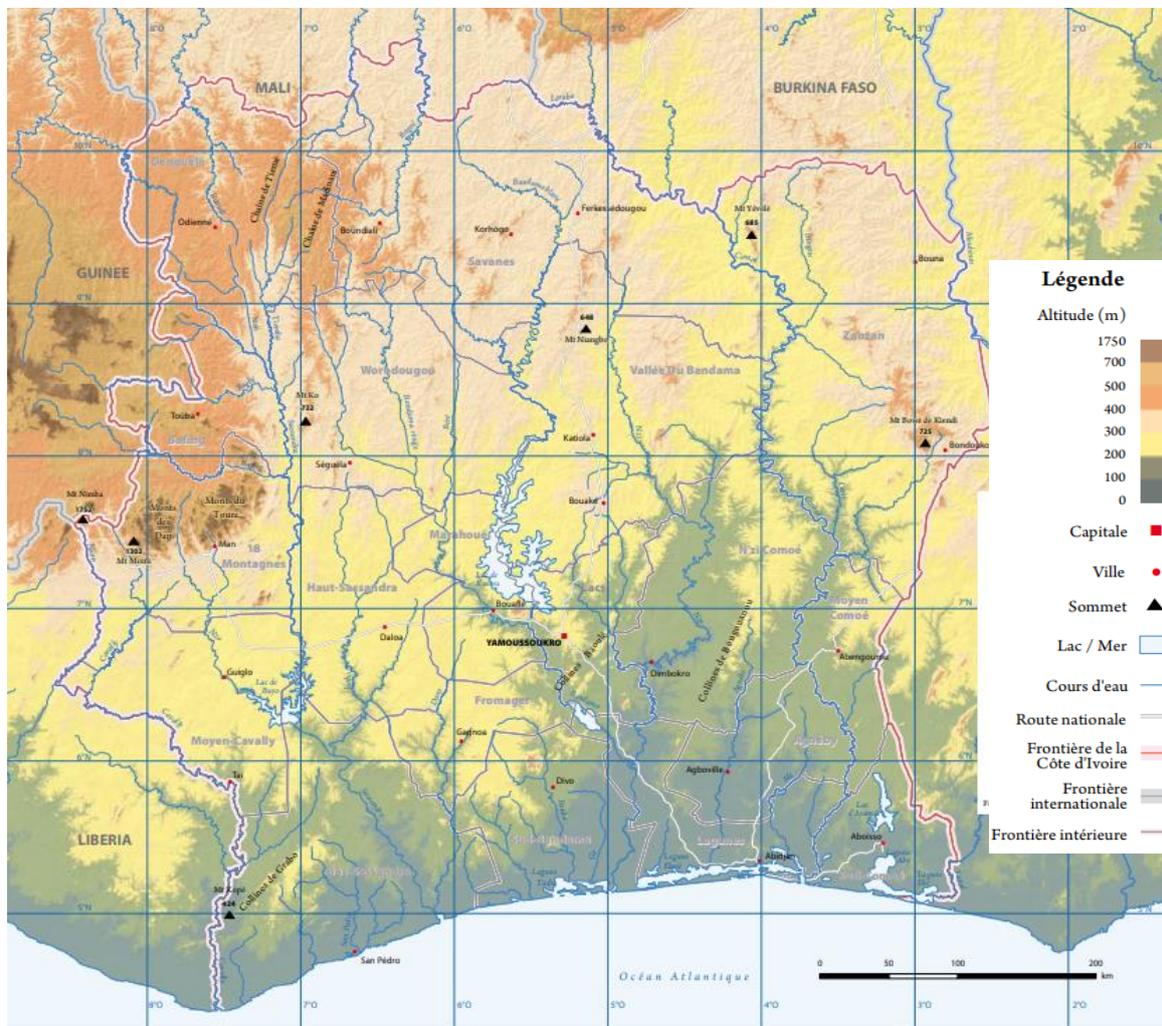
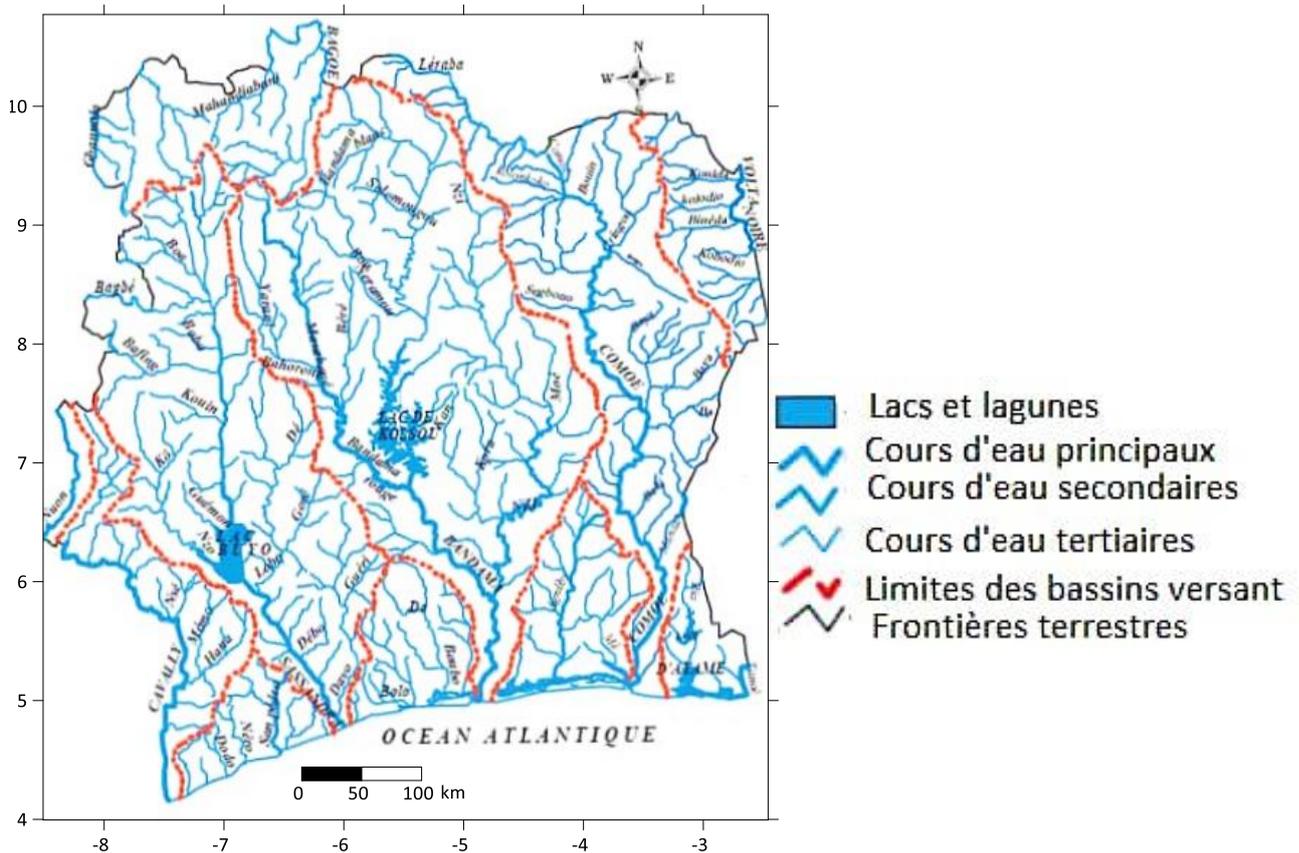


Figure 7 : Relief en Côte d'Ivoire (Brou, 2005)

## 2.5. CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE ET HYDROLOGIQUE

Le réseau hydrographique qui couvre le pays est d'environ 4 462 Km<sup>2</sup>, soit 1,38 % de la superficie totale du pays et est constitué au Sud par l'océan (Atlantique), les lagunes dont les plus célèbres sont les complexes (figure 8) :

- **Aby-Tendo-Ehy** : couvre 427 km<sup>2</sup>, s'étend sur 56 km de largeur d'Est à Ouest et 24 km de long du Nord au Sud ;
- **Ebrié** : avec une étendue de 566 km<sup>2</sup> de superficie pour une largeur et une longueur moyenne de 7 km et 150 km sur une profondeur moyenne de 4 m. Elle est aussi divisée en plusieurs sections par les lagunes Aghien et Potou, le canal d'Assini, la ville d'Abidjan et le canal de Vridi ;
- **Lagune Grand-Lahou** : elle a une superficie de 190 km<sup>2</sup> et s'étend sur une longueur de 50 km. Elle comprend en outre une suite de quatre lagunes de petite taille.



**Figure 8** : Réseau hydrographique et principaux bassins versants de la Côte d'Ivoire (Brou, 2005)

Le débit des cours d'eau dépend de nombreux facteurs, tels que le relief, la végétation, la nature du sol, la structure du réseau hydrographique, l'évaporation, etc. mais l'influence des

précipitations est nettement prépondérante. De ce fait, les régimes hydrologiques s'apparentent assez étroitement aux régimes des précipitations. Pour caractériser l'abondance et les variations saisonnières des cours d'eau de Côte d'Ivoire, on peut donc encore distinguer quatre régimes hydrologiques principaux.

- **Régime tropical de transition**

Il s'étend sur la partie septentrionale de la Côte d'Ivoire (approximativement au Nord de l'axe Ferkéssédougou-Touba) c'est-à-dire une région de savane plus ou moins boisée suivant la pluviométrie annuelle. Pour les bassins versants importants de 1 000 à 5 000 km<sup>2</sup> du type Bagoé ou Haut-Bandama, ce régime comporte généralement une crue unique en août, septembre, octobre, suivie d'un tarissement rapide en novembre et décembre, puis d'une longue période de basses eaux de janvier à mai, pendant laquelle le débit tombe à une très faible valeur. Les premières pluies de l'année donnent lieu, si elles sont abondantes, à une remontée irrégulière du débit qui, peu notable en mai, devient très nette en juillet.

- **Régime équatorial de transition**

Le domaine de ce régime s'étend sur la partie méridionale de la Côte d'Ivoire, au Sud de la ligne Abengourou-Toumodi-Soubré. La végétation y est du type forestier. Sur les bassins versants importants tels que l'Agnéby (aval) et la Bia, le régime équatorial de transition se caractérise par le dédoublement de la crue annuelle, qui s'explique aisément par la répartition saisonnière des pluies. La première période de hautes eaux, prédominante, se situe en juin-juillet et la seconde en octobre-novembre. Une période de basses eaux s'observe en août-septembre et une autre, bien plus marquée, s'étend de décembre à mars. Sur les petits bassins versants, les précipitations d'avril et mai donnent lieu à un ruissellement notable mais ce sont celles de juin-juillet et parfois celles d'octobre-novembre qui engendrent les fortes crues. L'affaiblissement des débits en août-septembre est très net. Les étiages sont sévères en février-mars.

- **Régime équatorial de transition atténué**

Appartiennent à ce régime, les cours d'eau de la région centrale de la Côte d'Ivoire, limitée par les axes de Ferkéssédougou-Touba et Abengourou-Soubré. Cette région est couverte de savane boisée, sauf à ses extrémités sud-ouest et sud-est (de part et d'autre du « V Baoulé ») où domine la forêt (savane guinéenne et forêt dense humide semi-décidue, secteur mésophile du domaine guinéen). Le régime « équatorial de transition atténué », qui est bien représenté par le Nzi à N'zianouan et le Kan à Tiébissou, est intermédiaire entre les deux régimes précédents. La saison des moyennes et hautes eaux s'étale de mai à novembre, mais le dédoublement de la crue annuelle n'est plus toujours nettement marqué. Il est nécessaire que la pluviosité de la deuxième

saison des pluies soit très faible pour que la pointe de juin-juillet devienne prédominante par rapport à celle de septembre-octobre. Sur les petits bassins versants, les précipitations de la première saison des pluies peuvent donner lieu à des crues aussi importantes que celles de la deuxième saison, mais bien souvent elles ne servent qu'à reconstituer les réserves hydriques du sol.

- **Régime de montagne**

Ce régime s'observe dans la partie montagneuse de l'Ouest de la Côte d'Ivoire, c'est-à-dire dans les régions de Man, Danané, Toulépleu, Taï où les précipitations annuelles varient de 1 600 à 2 500 mm et où la végétation est presque partout forestière (type montagnard, secteur ombrophile du domaine guinéen). L'influence orographique se traduit par des débits spécifiques élevés. La saison des moyennes et hautes eaux s'étend d'avril à octobre. Les crues atteignent leur maximum en septembre, mois le plus pluvieux, comme dans le régime tropical de transition. L'étiage très soutenu a lieu en janvier-février.

La plupart des grands cours d'eau de la Côte d'Ivoire ont un régime hydrologique mixte, car du fait même de l'étendue de leur bassin de réception, ils subissent des influences multiples. Le Sassandra, par exemple, se rattache au régime tropical de transition à son extrémité supérieure, puis dans son cours moyen et inférieur reçoit des affluents de montagne, des affluents de régime équatorial de transition atténué (Lobo) et enfin des affluents du régime équatorial de transition pur (Davo). Dans des proportions variables, le Cavally, le Bandama et la Comoé partagent également les caractéristiques de plusieurs régimes.

## 2.6. CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Le contexte géologique de la Côte d'Ivoire est celui du craton Ouest africain, vieille plateforme granitisée et stabilisée depuis la fin de l'orogénèse éburnéenne. La Côte d'Ivoire appartient plus précisément à la partie méridionale du craton ouest africain appelée dorsale de Man. Elle est marquée par deux ensembles géologiques bien distincts (figure 9).

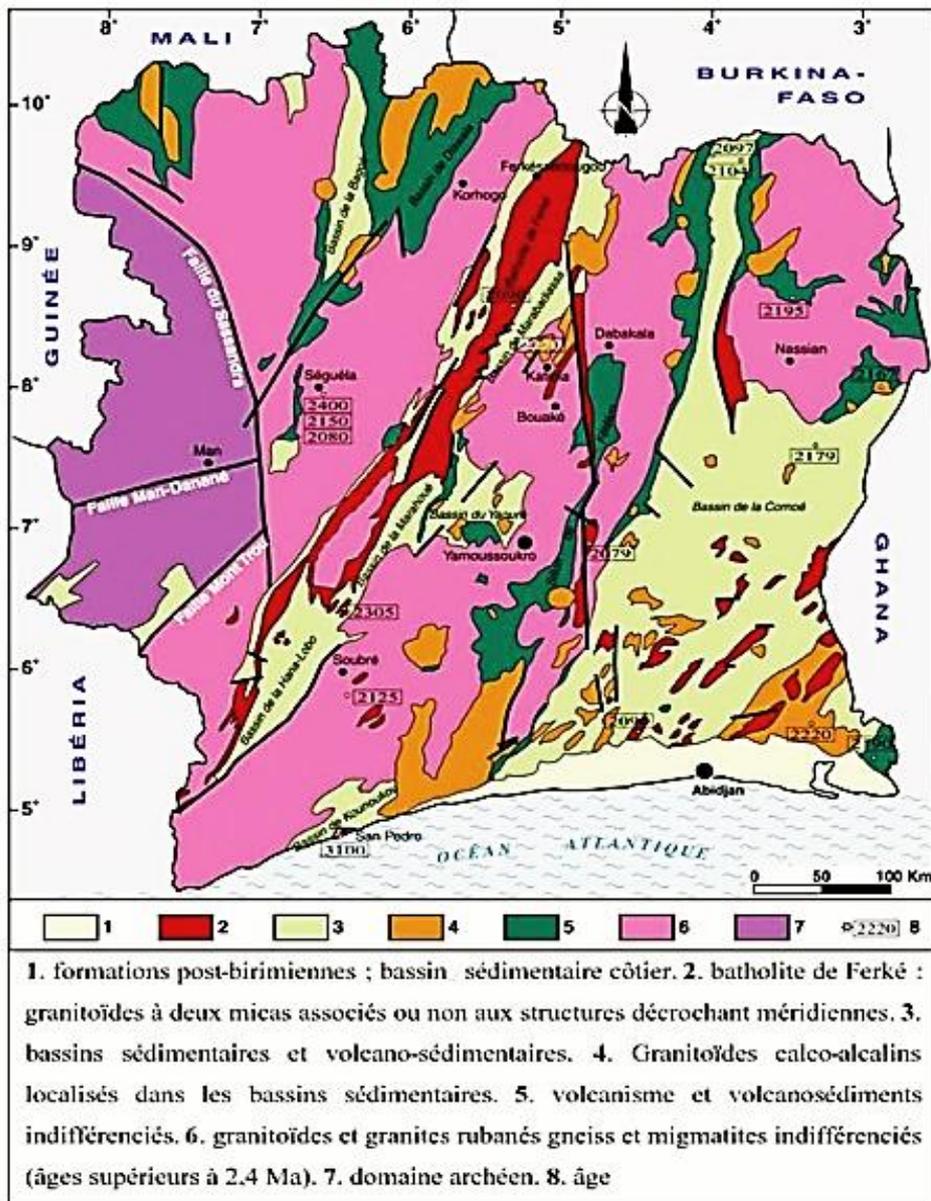


Figure 9 : Schéma simplifié des ensembles géologiques en Côte d'Ivoire (Tagini, 1971)

### 2.6.1. Socle Precambrien

Cet ensemble occupe 97,5% du territoire et est constitué de roches magmatiques et métamorphiques dont l'âge varie entre 3500 et 1800 Ma. On y trouve de vastes étendues de granites, de schistes, de gneiss, et de migmatites parsemées de roches vertes associées à des quartzites. Il présente des formations structurées dans la direction NNE et SSW et est subdivisé en deux domaines principaux séparés par la faille de Sassandra de direction NS :

- **le domaine archéen (Kénéma-Man)** : ce domaine est situé à l'Ouest de la faille de Sassandra et est constitué de formations anciennes structurées au cours des orogénèses léoniennes (3500-2900 Ma) et libériennes (2900-2400 Ma). Les formations archéennes sont constituées de deux grands ensembles lithologiques : un complexe de base, de nature cristalline, constitué de migmatites et de gneiss granulitiques et un ensemble de ceintures de roches à caractère supracrustal, constituées de quartzites à magnétites, de roches basiques à ultrabasiqes, reposant en discordance sur le premier ensemble. A ces deux ensembles, s'associent des granites et des charnockites sous forme d'intrusions dans le socle granito-gneissique. Au cours des orogénèses, ces formations ont été métamorphosées dans le faciès des amphibolites jusqu'au faciès granulite.
- **le domaine paléoprotérozoïque (Baoulé-Mossi)** : il est situé à l'Est de la faille du Sassandra et se prolonge jusqu'à la frontière Côte d'Ivoire-Ghana. Il est occupé par les formations dites du protérozoïque inférieur. Ces formations ont été structurées par deux cycles :
  - le cycle Burkinéen (2400 à 2200 millions d'années) marquant la mise en place et la structuration des formations Dabakaliennes. Ces formations affleurent au Nord-Est, au Centre et dans le Sud-Est de la Côte d'Ivoire ;
  - le cycle Eburnéen (2200 à 1800 millions d'années) marquant la mise en place et la structuration des formations du Paléoprotérozoïque. Il s'agit de sillons volcanosédimentaires intercalés entre des batholites de granitoïdes.

Outre le domaine **Kénéma-Man** et le domaine **Baoulé-Mossi**, il existe un troisième domaine moins important qui est le domaine SASCA.

➤ **le domaine SASCA** : ce domaine est situé dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire entre les fleuves Sassandra et Cavally. D'où le nom SASCA. Il est constitué de roches du libérien représentées par les gneiss, les migmatites, les quartzites et les granites, et des formations éburnéennes composées de schistes, de grès, de quartzites et de conglomérats. On retrouve également les granites, les granodiorites et des syénites. Le métamorphisme est du type faciès schistes verts.

### **2.6.2. Bassin sédimentaire**

Le bassin sédimentaire, qui s'est formé lors de l'ouverture de l'océan atlantique, il y a 150 Ma, occupe le Sud de la Côte d'Ivoire. Il s'étend de Sassandra à la frontière du Ghana. Il présente deux (2) parties. La partie émergée ou zone on-shore de 8 000 km<sup>2</sup> qui s'étire d'Est en Ouest sur 360 km est dominée par les sédiments sablo-argileux qui continuent toujours de s'y déposer.

Ces formations sont traversées d'Est en Ouest par la faille des lagunes. La partie immergée ou zone offshore de 40 000 km<sup>2</sup> s'étend d'Est en Ouest depuis la côte jusqu'à des profondeurs d'eau supérieures à 3 000 m. Cet ensemble occupe 2,5% du territoire et est constitué de formations sédimentaires d'âge tertiaire-quadernaire.

## 2.7. CONTEXTE PÉDOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le sol joue un rôle majeur dans le cycle de l'eau, assurant le partage entre infiltration et ruissellement avec des conséquences sur la qualité et le temps de transfert de l'eau. Le sol régule les transferts d'eau entre l'atmosphère, le sous-sol et la surface, et constitue un réservoir pour les écosystèmes terrestres (Dabien et *al.*, 1960).

La classification des sols de la Côte d'Ivoire sera présentée sur une base génétique. Elle fait intervenir un ensemble de facteurs jouant un rôle primordial dans l'évolution du sol : en premier lieu le climat, puis la nature de la roche, la topographie, la végétation et éventuellement l'action de l'homme. Les différents types de sol et leurs répartitions géographiques sont décrites dans les paragraphes suivants.

### ➤ **Les sols ferrallitiques**

Ils sont localisés dans la basse Côte d'Ivoire forestière. La zone des sols ferrallitiques moyennement lessivés est largement étalée dans la région forestière centrale, sur les flancs nord-est et nord-ouest des deux zones ouest et est de sols ferrallitiques très lessivés.

### ➤ **Les ferrisols**

Ils occupent la frange septentrionale du massif forestier lorsque la pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 1300 et 1500 millimètres. Ce sont des sols moins profonds que les sols ferrallitiques, bien que l'épaisseur de la roche altérée sous-jacente soit quelquefois considérable.

### ➤ **Les sols ferrugineux**

La zone des sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions couvre le Nord-Est de la Côte d'Ivoire, au-delà d'une ligne Bondoukou-Dabakala-Kong.

### ➤ **Les sols bruns tropicaux**

Ils sont localisés en gisements intra-zonaux sur les affleurements de roches vertes (amphibolites) et de dolérites, dans les chaînes métamorphiques birimiennes, à partir de la limite du Sud des ferrisols en direction des régions soudaniennes. La majeure partie de ces sols est effectivement de teinte brune ou brun-jaune. Cependant dans les régions de Bondoukou, Bouna,

Fettekro, il est identifié des terres noires sur dolérites dont les caractéristiques physico-chimiques sont voisines de celles des terres noires du Togo sur diorites et gabbros.

#### ➤ **Sols hydromorphes**

Les hydromorphes minéraux à l'exception de la zone lagunaire où ces sols sur alluvions peuvent présenter une grande extension (régions d'épandage du Bandama, de l'Agnébi, de la Comoé et de la Bia), ces sols n'ont pu être figurés sur la carte au 1/2 000 000 à la figure 8. Ils existent cependant dans tous les fonds de vallées et présentent parfois des superficies importantes sur les terrasses des grandes rivières.

Les sols hydromorphes sur sable ancien du cordon littoral sont limités à la zone intérieure du cordon littoral. L'aliol humique devient plus profond et moins épais à mesure que l'on se rapproche de la côte, suivant étroitement le niveau supérieur de la nappe phréatique ; l'aliol disparaît dans la zone des sables peu évolués récents et actuels.

Un certain nombre de profils de sols observés sur les colluvions sableuses profondes de bas de pente, particulièrement en zone granitique, présentent une morphologie assez voisine de ces sols hydromorphes minéraux très lessivés à tendance podzolique.

Les sols hydromorphes organiques (les tourbes forestières ou sols hydromorphes organiques) sont surtout limités à la bordure lagunaire et à certaines zones deltaïques étendues comme les marais de l'Agnébi, où il est observé les profils les plus typiques.

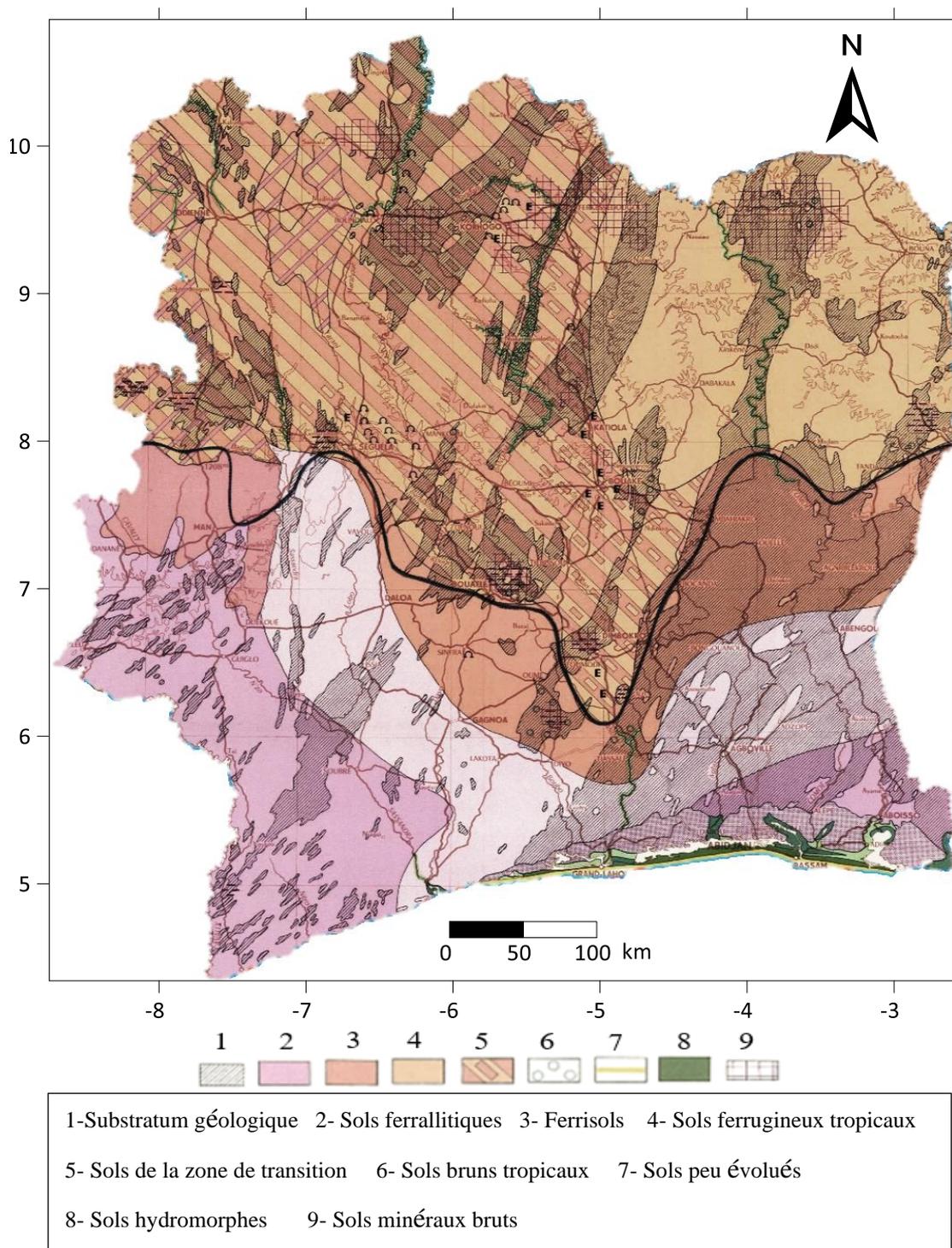
#### ➤ **Sols peu évolués**

Les sols dans cette rubrique sont les sols du cordon littoral formés sur sables marins récents ou actuels, et couvrant quelques centaines de mètres de large le long de la côte. Ces sols sont caractérisés essentiellement par un léger enrichissement superficiel organique sur 25 à 30 centimètres, et une grande homogénéité du profil au point de vue textural (sable grossier), tout au moins dans les premiers mètres de sédiments.

#### ➤ **Sols minéraux brutes**

Pour mémoire, nous citerons les amoncellements de blocs de cuirasse ferrugineuse où ce matériau constitue en quelque sorte une roche-mère secondaire sur laquelle la végétation devra se reconstituer et donner le départ à une nouvelle phase pédogénétique qui conduira à une dislocation et à une disparition de la cuirasse. Ce phénomène doit être considéré à l'échelle géologique. Les nappes caillouteuses d'origine granitique, doléritique ou schisteuse de régions où affleure le socle peuvent être considérées comme des sols minéraux bruts ou des sols squelettiques. L'extension de ces sols minéraux bruts est extrêmement limitée dans les régions tropicales et équatoriales de la Côte d'Ivoire.

La figure 10 résume tous les types de sols rencontrés en Côte d'Ivoire.

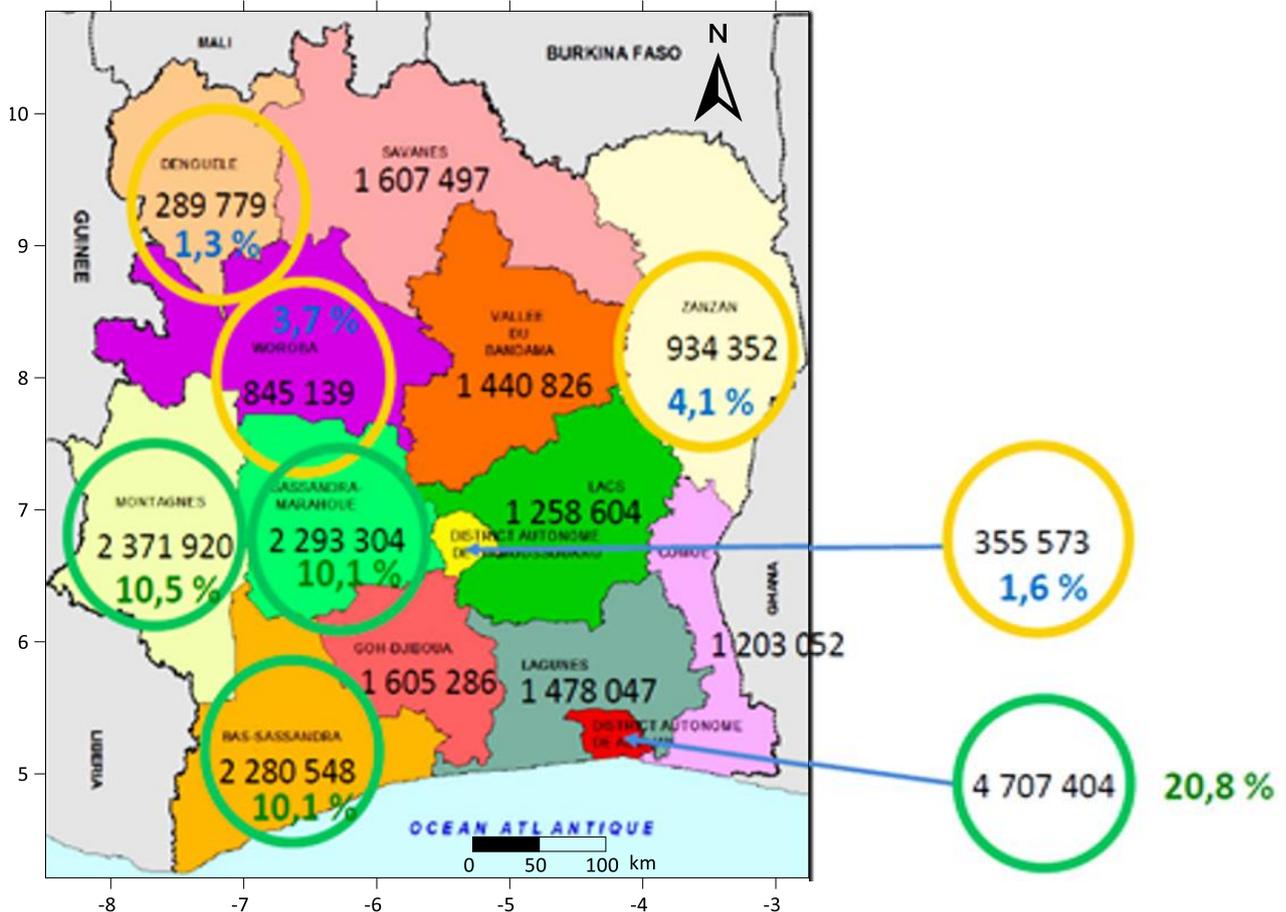


**Figure 10** : Carte pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/2 000 000 (Dabien *et al.*, 1960)

## 2.8. ENVIRONNEMENT HUMAIN ET ÉCONOMIQUE

Selon le RGPH (2014), la population est estimée à 22 671 331 et le district d'Abidjan représente 20,8 % de cette population comme l'indique la figure 11. Par contre selon le FMI (2019), la

population ivoirienne est estimée à 26,27 millions d'habitants dont 25% d'étrangers, soit un accroissement de près de 13% en cinq années. Selon la Banque mondiale (2016), la densité de la population était de 74,5 habitants / km<sup>2</sup> par contre avec la population de 2019, la densité est passée à 81,47 habitants / km<sup>2</sup>.



**Figure 11** : Répartition de la population ivoirienne (RGPH, 2014)

Depuis son indépendance, la Côte d'Ivoire a accordé une place de choix à chaque secteur d'activités dans sa stratégie de développement économique. D'une façon générale, on distingue 3 secteurs d'activités économiques : le secteur primaire, le secteur secondaire et le secteur tertiaire. L'étude de ces différents secteurs d'activités permet d'apprécier le niveau de développement du pays et de mesurer leur poids dans l'économie de la Côte d'Ivoire.

La Côte d'Ivoire, qui dispose de solides atouts économiques, est une puissance sous-régionale. Elle possède des infrastructures héritées des deux décennies du « miracle ivoirien » (1960-1980) : 2<sup>ème</sup> port d'Afrique subsaharienne, important réseau routier et l'aéroport international agrandi. Dans le secteur agricole, le pays est le 1<sup>er</sup> producteur de cacao au monde avec plus de 35 % du marché. Il figure aux tous premiers rangs africains pour plusieurs autres productions

agricoles d'exportation (caoutchouc, noix de cajou, coton, café, palmier à huile, banane, ananas, cola). Le secteur secondaire est dominé par le raffinage de pétrole brut, le BTP et la transformation agroalimentaire. Le secteur tertiaire (47 % du PIB) est fortement dominé par les activités bancaires, les transports, la distribution ainsi que les TIC, dont la téléphonie mobile (trois opérateurs). Le pays assure son autosuffisance énergétique grâce à l'exploitation depuis quelques années de gisements de gaz et de pétrole ; ils lui ont permis d'exporter de l'électricité et des produits pétroliers dans la sous-région. Avec une croissance de 8,6 % par an en moyenne depuis 2012, la Côte d'Ivoire visait à accéder au rang d'économie émergente en 2020. Le programme national de développement (PND) pour la période 2016-2020 avait prévu de grandes réformes structurelles visant à stimuler une croissance soutenue, tirée par le secteur privé, et à transformer structurellement l'économie.

## 2.9. CONCLUSION PARTIELLE

En Côte d'Ivoire, la pluviométrie est tributaire des variations thermiques de l'Océan Atlantique, du couvert végétal et des déplacements du Front Inter Tropical de transition (F.I.T.). On distingue quatre types de climat. Il s'agit du Climat Attiéen (Littoral et Intérieur), du climat Baouléen, du climat Soudanais et du climat des Montagnes. Le gradient thermique est orienté grossièrement du Sud vers le Nord. Les phénomènes d'évaporation jouent un rôle prépondérant dans les bilans hydriques. L'évapotranspiration potentielle (ETP), où la végétation intervient essentiellement, peut atteindre en moyenne 1500 mm par an. La végétation ivoirienne est subdivisée en deux grandes parties à savoir la zone forestière et la zone de savane. Le relief est composé des plaines s'étendant au Sud du pays, les plateaux prolongeant les plaines vers le Nord et les massifs montagneux localisés dans l'Ouest. La Côte d'Ivoire appartient plus précisément à la partie méridionale du craton ouest africain appelée dorsale de Man marquée par deux ensembles géologiques bien distincts à savoir le socle et le bassin sédimentaire. Le contexte pédagogique de la Côte d'Ivoire a pu nous renseigner sur les sols ferrallitiques, les ferrisols, les sols ferrugineux, les sols bruns tropicaux, les sols hydromorphes, les sols peu évolués et les sols minéraux brutes. Selon le RGPH (2014), la population est estimée à 22 671 331 et le district d'Abidjan représente 20,8 % de cette population. Malgré les efforts de l'Etat ivoirien pour développer les secteurs secondaire et tertiaire, le secteur primaire et plus particulièrement l'agriculture demeure la mamelle de l'économie de la Côte d'Ivoire.

---

---

## **PARTIE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES**

---

---

## CHAPITRE 3 : MATÉRIEL ET DONNEES

### 3.1. DONNÉES CLIMATIQUES

#### 3.1.1. *Choix des données pluviométriques*

Les données utilisées pour réaliser cette étude sont issues du réseau national de mesure pluviométrique de la Côte d'Ivoire.

##### 3.1.1.1. Critère de sélection des postes pluviométriques

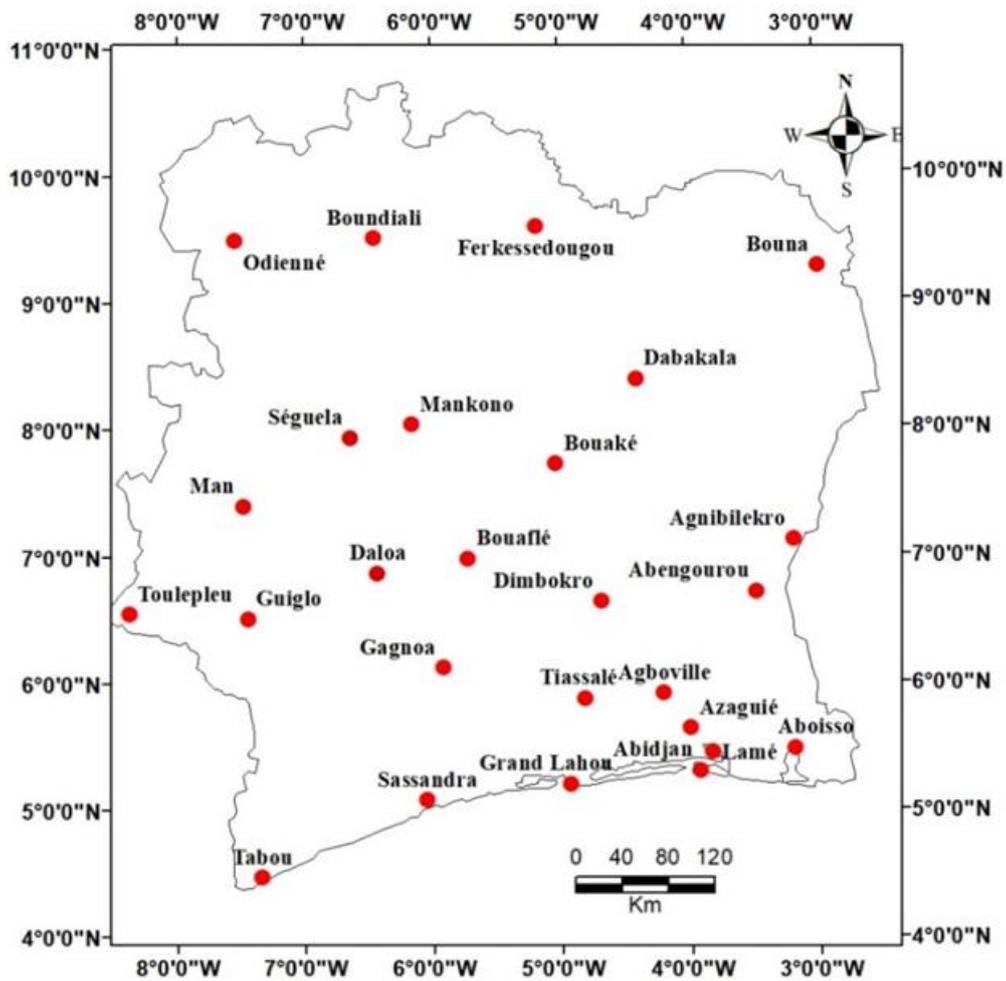
Les stations sélectionnées sont celles couvrant les différents régimes climatiques de la Côte d'Ivoire et répondant aux critères suivants :

➤ **Ancienneté**

Les phénomènes climatiques extrêmes présentent par nature une variabilité très importante. Pour bien appréhender l'évolution spatio-temporelle et réaliser la modélisation statistique de tels phénomènes, il est nécessaire de disposer d'une durée d'observations pluviométriques suffisamment longue. Les données climatiques utilisées dans cette étude sont constituées de pluies journalières maximales annuelles et de pluies annuelles provenant de 26 stations météorologiques (dont neuf (9) stations synoptiques) réparties sur tout le territoire ivoirien (figure 12). Elles ont été collectées auprès du service de météorologie nationale (SODEXAM : Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique) à travers la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Ces différentes données couvrent la période 1931-2020 (90 ans).

➤ **Taux de lacunes**

Rares sont les stations qui possèdent une chronique continue de pluie journalière depuis leur mise en service. Cependant, la présence de lacunes est susceptible de diminuer le nombre d'années réellement utilisables et entraîne parfois des biais lors du traitement statistique. Le pourcentage de données manquantes doit être aussi faible que possible (inférieur à 5 %) (Soro, 2011).



**Figure 12** : Localisation des stations pluviométriques sélectionnées

Le tableau I présente la répartition des stations en fonction des stations de référence (stations synoptiques). Cette répartition est basée sur la proximité de la position géographique par rapport aux stations de référence.

**Tableau I** : Répartition des stations en fonction des stations de référence

<b>Stations de référence (X)</b>	<b>Stations à corriger (Y)</b>
<b>Abidjan</b>	Aboisso, Agboville, Azaguié, Grand-Lahou, La Mé, Tiassalé, Sassandra, Tabou
<b>Bouaké</b>	Bouna, Dabakala, Mankono
<b>Daloa</b>	Bouaflé, Guiglo, Gagnoa
<b>Dimbokro</b>	Abengourou, Agnibilékro
<b>Man</b>	Séguéla, Toulepleu
<b>Odienné</b>	Boundiali, Ferkéssédougou

### **3.1.1.2. Extraction des variables descriptives des pluies**

L'extraction des variables descriptives constitue la première étape de la modélisation statistique des pluies extrêmes. En effet, la qualité des résultats ultérieurs dépend en premier lieu du soin apporté à cette première étape de la modélisation statistique.

En ce qui concerne les valeurs extrêmes, la méthode d'extraction des variables descriptives utilisée est l'échantillonnage des valeurs maximales annuelles. La mise en œuvre de la méthode d'échantillonnage par valeurs maximales est très simple (Muller, 2006). Pour les cumuls journaliers, elle a consisté à sélectionner sur une année civile (du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre), la hauteur de pluie la plus élevée. Il faut noter que la modélisation statistique des valeurs extrêmes utilisant les valeurs de pluies journalières maximales est généralement préférée à l'utilisation des pluies journalières supérieures à un seuil, aussi bien par les chercheurs que par les projecteurs, car elle est plus facile à appliquer et souvent plus efficace sur le plan statistique (Habibi et *al.*, 2013). Ainsi, plusieurs auteurs utilisent cette variable de pluies journalières maximales annuelles pour modéliser les pluies extrêmes (Onibon et *al.*, 2004 ; Benkhaled, 2007 ; Goula et *al.*, 2007 ; Zahar et Laborde, 2007 ; Soro, 2011 ; Habibi et *al.*, 2013 ; Koumassi et *al.*, 2014 ; Agué et Afouda, 2015 ; Kouassi et *al.*, 2018).

Quant aux pluies annuelles, elles sont issues du cumul des pluies journalières d'une année civile.

### **3.1.2. Critique des données**

#### **3.1.2.1. Reconstitution des lacunes et des valeurs erronées**

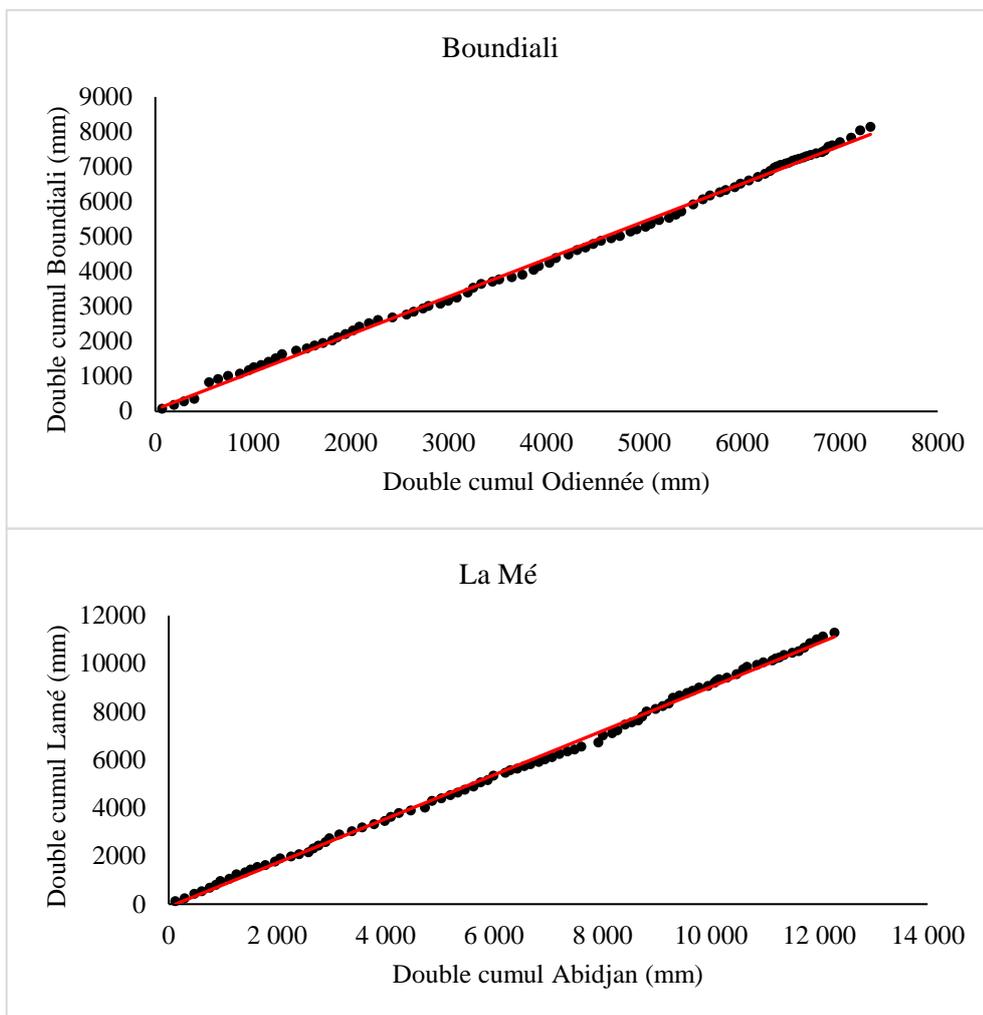
Le comblement des lacunes a été effectué à partir des méthodes du vecteur régional (MVR). La méthode du vecteur régional consiste à remplacer la valeur manquante par une moyenne pondérée de la tendance annuelle des stations pluviométriques.

La Méthode du Vecteur Régional (MVR) a été établie par Hiez (1977), et améliorée par Brunet-Moret (1979 ; 1994). La MVR répond au double objectif de critique et de synthèse de l'information pluviométrique à l'intérieur d'une région climatique homogène du point de vue des processus et facteurs générant les précipitations et peut s'appliquer à tout un ensemble de séries d'observations d'une même variable, liées statistiquement entre elles par des rapports de proportionnalité.

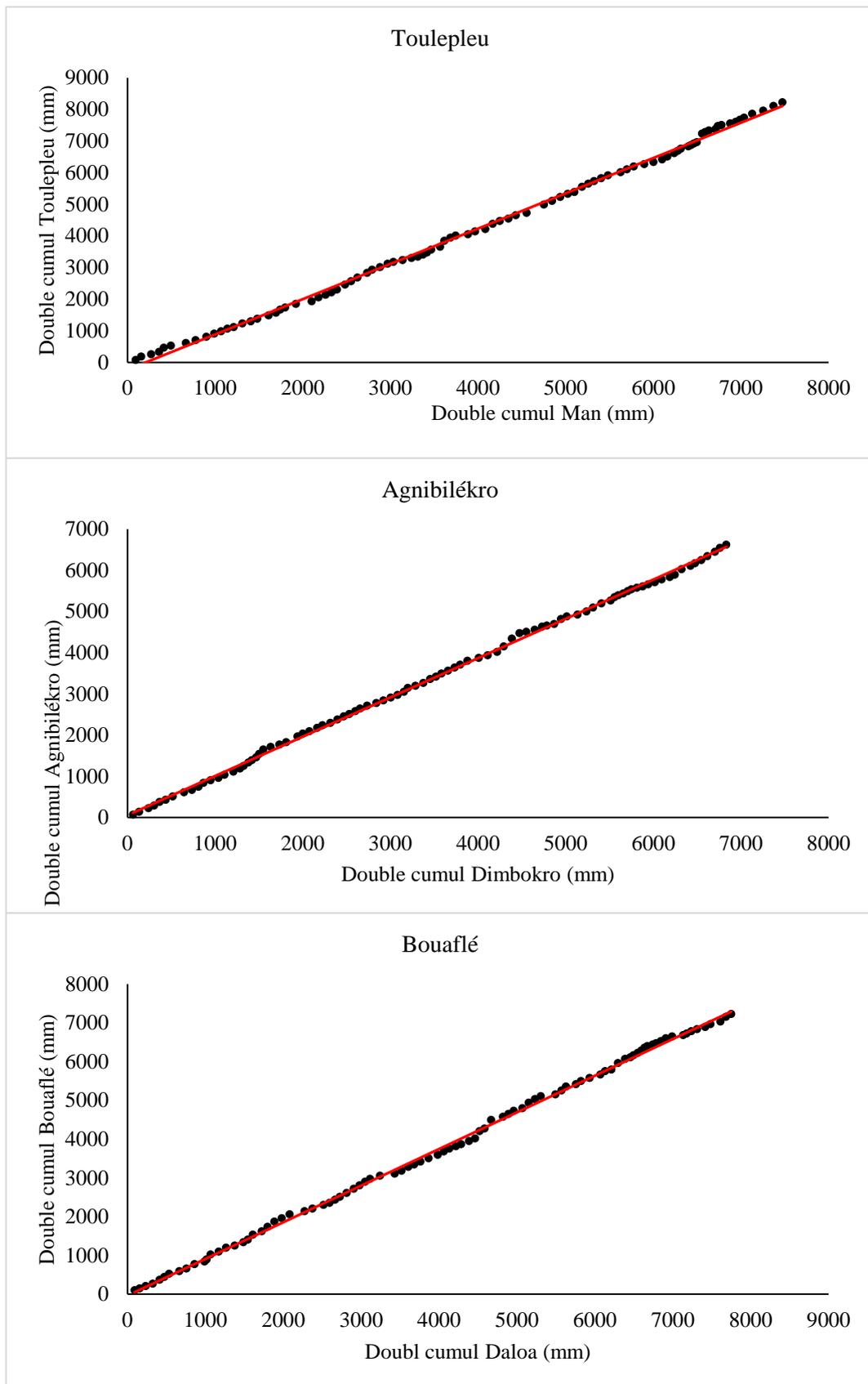
On admet que l'ensemble des stations sélectionnées obéit à une tendance climatique régionale unique, chacune d'elles n'étant par conséquent qu'une représentation de cette tendance, déformée à la fois par de possibles anomalies locales et par d'éventuelles erreurs d'observation. Les valeurs des pluies sont reconstituées à l'intérieur de surfaces régionales homogènes du point de vue géomorphoclimatique. Cela se fait à partir d'une moyenne régionale de référence, le « vecteur » (Kouassi, 2007). Aussi, certaines lacunes ont été comblées à l'aide de la méthode de la régression linéaire.

#### **3.1.2.2. Identification et correction des valeurs erronées**

La méthode du double cumul appliquée sur les pluies journalières maximales annuelles ( $P_{jmax}$ ) a permis de montrer dans la majorité, une absence de valeurs erronées. La plupart des stations comme le présente les figures 13 et 14, présentent des points qui épousent une tendance linéaire. Ce qui montre un faible taux de valeurs erronées par endroits.

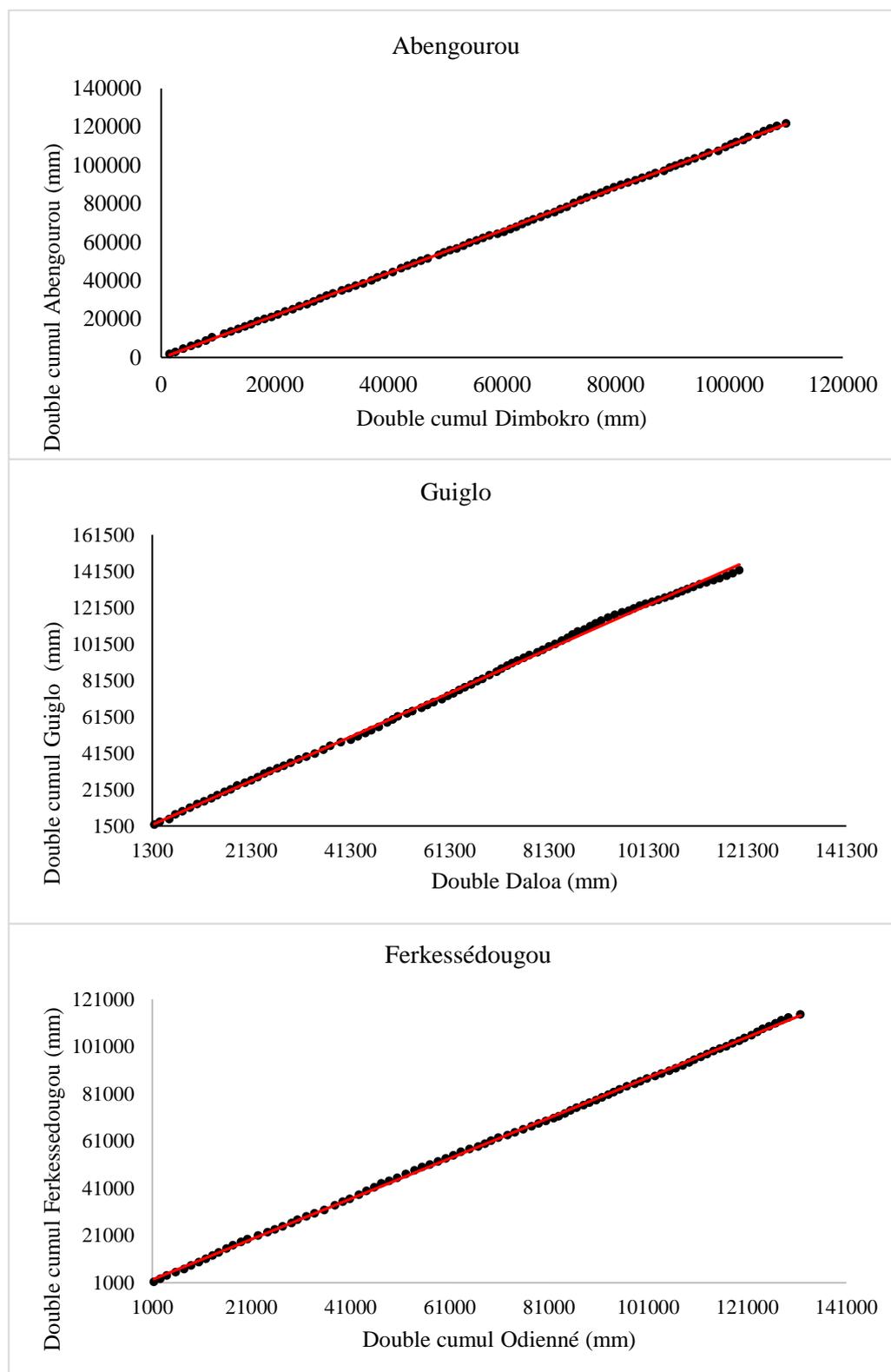


**Figure 13** : Double cumul des  $P_{jmax}$  aux stations de Boundiali et La Mé



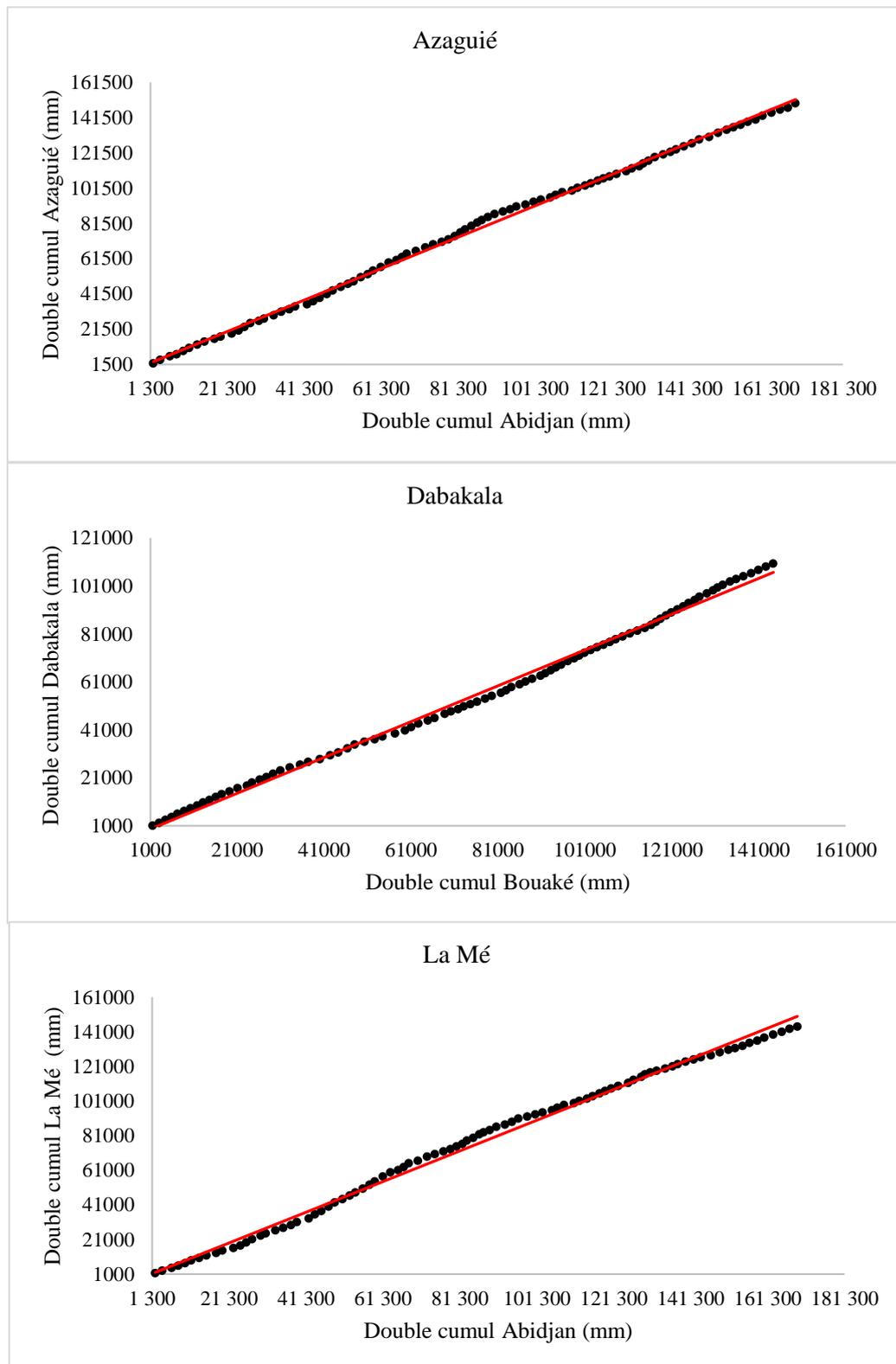
**Figure 14 :** Double cumul des  $P_{jmax}$  aux stations de Toulepleu, Agnibilékro et de Bouaflé

Au niveau des pluies annuelles, il n'existe pas de valeurs erronées avec la méthode du double cumul (figure 15).



**Figure 15 :** Double cumul des pluies annuelles des stations d'Abengourou, Guiglo et de Ferkessédougou

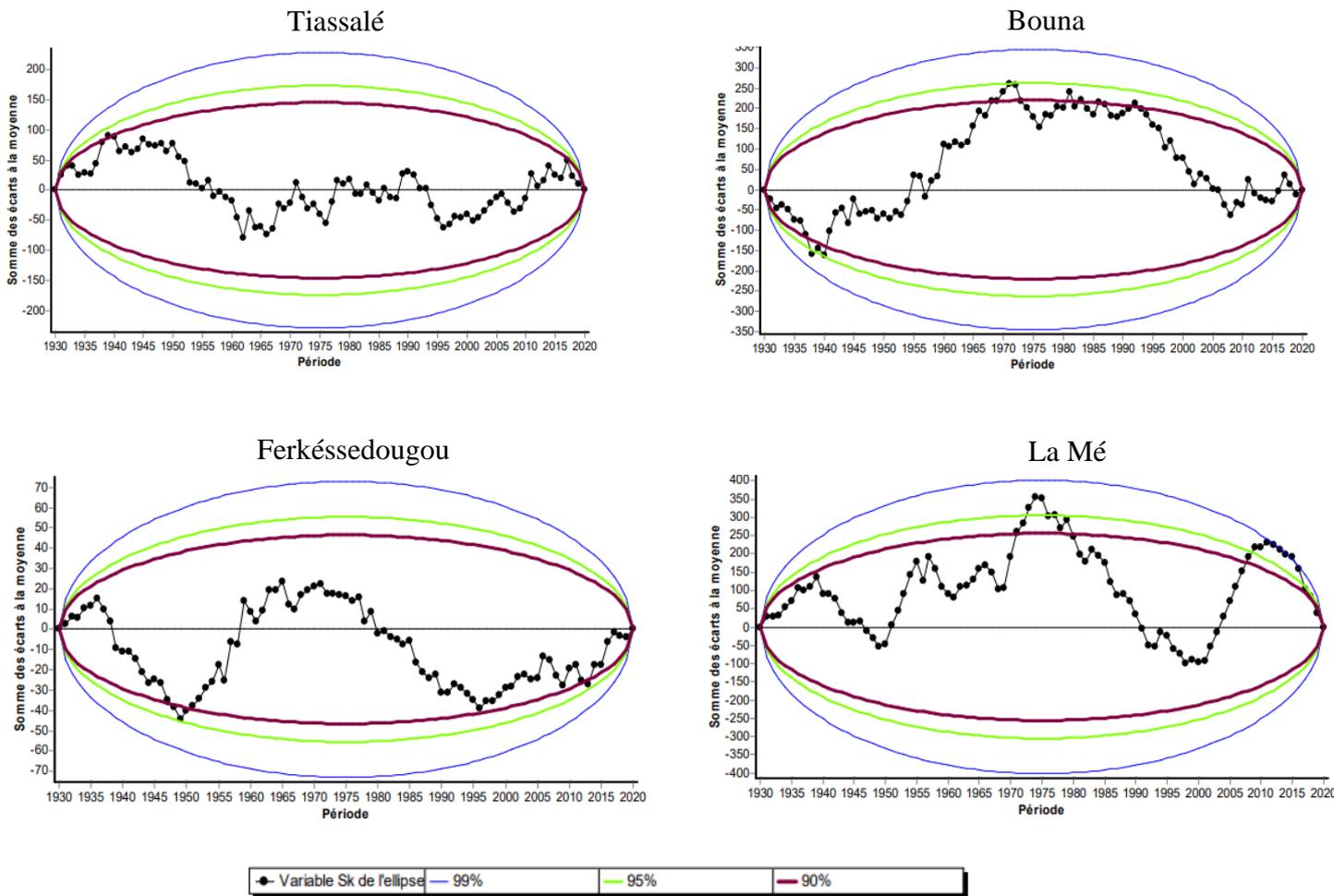
Seulement les stations d'Azaguié, Dabakala et La Mé présentent quelques petites irrégularités en dessous de 5% (figure 16).



**Figure 16 :** Double cumul des pluies annuelles des stations d'Azaguié, Dabakala et de La Mé

La méthode des résidus simples a permis une mise en évidence de quelques valeurs erronées (figure 17). Le test de Bushand et l'ellipse de contrôle de Bois mettent en exergue certaines valeurs qui semblent être erronées. Le seuil de 90% a été retenu et les valeurs de résidus au-delà de ce seuil ont été considérées comme des valeurs erronées.

L'ensemble des valeurs erronées ont été reconstituées et corrigées à partir de la régression linéaire et du vecteur régional. Dans l'ensemble, les données utilisées sont de bonne qualité.



**Figure 17 :** Résidus simples des pluies annuelles des stations de Tiassalé, Bouna, Ferkessedougou et La Mé

### 3.1.2.3. Caractéristiques descriptives des données de pluies

Il s'agit ici, de faire la statistique descriptive des données. Elle consiste à déterminer les paramètres tels que la moyenne, le minimum, le maximum, le coefficient de variation (CV), le coefficient d'aplatissement (CAP) et le coefficient d'asymétrie (CAS) des paramètres étudiés (pluies annuelles et pluies extrêmes). Ils permettent de décrire les données de manière efficace, c'est à dire permettant de mieux les "visualiser" et les comprendre à travers le comportement des séries.

Les caractéristiques des pluies journalières maximales sont présentées dans le tableau II. Les pluies journalières maximales varient entre 24,43 mm (Bouaké) et 480 mm (Boundiali) avec une moyenne allant de 73,61 mm (Agnibilékro) à 136,59 mm (Grand-Lahou). Les valeurs de l'écart-type des différentes stations oscillent entre 20,32 mm (Dimbokro) et 59,29 mm (Tabou) avec une moyenne de 38,02 mm. Les valeurs du coefficient de variation sont toutes supérieures à 25%. Elles varient de 26,76% (Dimbokro) à 58,52% (Boundiali). Ainsi, les hauteurs des pluies journalières maximales annuelles des différentes stations sont hétérogènes. Ces hauteurs de pluies sont donc dispersées dans le temps et dans l'espace.

Quant au coefficient d'aplatissement, les valeurs de celui-ci sont toutes supérieures à zéro avec des valeurs allant de 0,21 (Odienné) à 4,58 (Boundiali). Ce qui montre que les valeurs de pluies des différentes stations ne suivent pas la loi de distribution normale et présentent un pic moins plat avec des extrémités plus épaisses par rapport à la distribution normale. Les coefficients d'asymétrie sont généralement positifs. Ils sont en proportion de 12% de valeurs négatives et 88% de valeurs positives avec des valeurs allant de -0,56 (Mankono) à 30,47 (Boundiali) ; Ce qui traduit le fait que la distribution au niveau de ces données est étalée à droite de leur moyenne. Quant aux stations présentant des valeurs négatives, la distribution de leurs données est étalée à gauche de leur moyenne.

**Tableau II** : Caractéristiques descriptives des pluies extrêmes (1931 – 2020)

<b>Stations</b>	<b>Minimum (mm)</b>	<b>Moyenne (mm)</b>	<b>Maximum (mm)</b>	<b>Ecart type (mm)</b>	<b>CV*(%)</b>	<b>CAP**</b>	<b>CAS***</b>
<b>Abengourou</b>	29,82	83,45	234,50	37,13	44,49	1,77	3,99
<b>Abidjan</b>	38,60	136,44	311,60	45,95	33,67	0,80	1,58
<b>Aboisso</b>	42,90	132,77	327,10	55,68	41,94	1,04	1,17
<b>Agboville</b>	47,00	87,11	294,93	36,22	41,58	2,35	10,55
<b>Agnibilékro</b>	25,20	73,61	190,10	25,42	34,54	1,49	4,13
<b>Azaguié</b>	42,00	97,42	225,46	36,28	37,24	1,03	1,17
<b>Bouaflé</b>	31,08	80,22	223,20	30,87	38,48	1,77	5,16
<b>Bouaké</b>	24,43	74,40	196,68	29,23	39,29	1,35	3,19
<b>Bouna</b>	26,04	79,13	211,02	34,36	43,42	1,43	3,01
<b>Dabakala</b>	24,63	82,12	223,39	32,77	39,90	1,54	4,13
<b>Boundiali</b>	26,31	90,41	480,00	52,91	58,52	4,58	30,47
<b>Daloa</b>	28,20	86,12	193,50	32,22	37,41	1,22	1,92
<b>Dimbokro</b>	31,20	75,93	130,00	20,32	26,76	0,43	0,22
<b>Ferkéssédougou</b>	26,23	75,59	185,72	30,53	40,39	0,77	0,80
<b>Gagnoa</b>	37,50	81,57	246,90	30,96	37,95	2,50	9,96
<b>Grand-Lahou</b>	34,16	136,59	296,00	52,74	38,61	0,82	0,61
<b>Guiglo</b>	39,16	99,38	264,11	43,89	44,16	1,54	2,98
<b>La Mé</b>	39,97	125,40	293,88	44,65	35,60	1,34	2,60
<b>Man</b>	28,99	83,04	198,62	32,11	38,66	0,93	1,61
<b>Mankono</b>	30,93	83,01	157,30	32,67	39,35	0,47	-0,56
<b>Sassandra</b>	37,00	119,86	253,00	53,75	44,84	0,58	-0,37
<b>Séguéla</b>	27,16	78,68	230,94	35,52	45,15	1,21	2,77
<b>Odienné</b>	27,92	81,25	153,50	29,65	36,49	0,21	-0,48
<b>Tiassalé</b>	28,10	87,32	227,18	33,84	38,76	1,74	4,24
<b>Tabou</b>	38,25	136,48	345,70	59,29	43,44	0,43	0,57
<b>Toulepleu</b>	33,50	91,45	269,18	39,46	43,15	2,12	6,68

\*Coefficient de Variation ; \*\*Coefficient d'Aplatissement ; \*\*\* Coefficient d'Asymétrie

Le tableau III renseigne sur la statistique descriptive des pluies annuelles.

**Tableau III** : Caractéristiques descriptives des pluies annuelles (1931 – 2020)

Stations	Minimum (mm)	Moyenne (mm)	Maximum (mm)	Ecart type (mm)	CV*(%)	CAP**	CAS***
<b>Abengourou</b>	1015,10	1352,77	1994,00	243,88	18,03	0,39	0,77
<b>Abidjan</b>	1300,69	1878,01	2115,53	397,79	21,18	0,20	0,47
<b>Aboisso</b>	1165,70	1801,71	2048,60	415,11	23,04	-0,08	0,48
<b>Agboville</b>	1072,50	1376,09	2001,20	260,34	18,92	-0,29	0,46
<b>Agnibilékro</b>	1004,13	1180,41	1821,39	215,17	18,23	0,01	0,35
<b>Azaguié</b>	1131,20	1663,75	2001,09	341,28	20,51	-0,53	0,35
<b>Bouaflé</b>	1031,00	1301,12	1929,80	196,82	15,13	1,79	0,97
<b>Bouaké</b>	1043,41	1604,41	1869,10	373,01	23,25	0,88	1,02
<b>Bouna</b>	1001,20	1246,64	1934,80	156,92	12,59	4,46	1,51
<b>Dabakala</b>	1005,70	1226,57	1742,20	144,18	11,75	2,06	0,97
<b>Boundiali</b>	1008,35	1374,08	1709,00	346,73	25,23	-0,09	0,38
<b>Daloa</b>	1069,00	1330,26	1919,00	238,74	17,95	0,92	1,04
<b>Dimbokro</b>	985,85	1222,57	1832,00	207,09	16,94	4,29	1,62
<b>Ferkéssédougou</b>	1081,40	1273,21	1972,50	186,53	14,65	1,25	0,86
<b>Gagnoa</b>	1006,40	1440,21	1998,70	233,22	16,19	0,11	0,69
<b>Grand-Lahou</b>	1205,00	1584,39	2051,30	442,07	27,90	0,32	0,58
<b>Guiglo</b>	1006,53	1577,09	1966,00	317,86	20,15	0,23	0,52
<b>La Mé</b>	1043,41	1600,04	2069,10	374,29	23,39	0,88	1,04
<b>Man</b>	1022,27	1600,35	2015,15	400,44	25,02	11,67	2,31
<b>Mankono</b>	1023,03	1281,41	1719,00	166,12	12,96	0,01	0,31
<b>Sassandra</b>	1181,20	1544,22	1960,50	366,28	23,72	0,34	0,64
<b>Séguéla</b>	996,90	1285,67	1855,90	203,13	15,80	1,20	0,98
<b>Odienné</b>	1004,57	1464,11	1654,00	262,21	17,91	1,54	0,94
<b>Tiassalé</b>	1139,90	1276,77	1988,20	274,64	21,51	0,63	0,08
<b>Tabou</b>	1219,30	1785,82	2100,30	464,84	26,04	-0,08	0,36
<b>Toulepleu</b>	1231,08	1620,67	2101,40	369,74	22,81	-0,14	0,48

\*Coefficient de Variation ; \*\*Coefficient d'Aplatissement ; \*\*\* Coefficient d'Asymétrie

Les pluies annuelles varient entre 985,85 mm (Dimbokro) et 2115,53 mm (Abidjan) avec une moyenne allant de 1180,41 mm (Agnibilékro) à 1878,01 mm (Abidjan). Les valeurs de l'écart-type des différentes stations oscillent entre 144,18 mm (Dabakala) et 464,84 mm (Tabou). Les valeurs du coefficient de variation des stations de Man, Grand-Lahou, Boundiali et Tabou sont supérieures à 25%. C'est-à-dire 15,38% des stations ont des valeurs supérieures à 25%. Ainsi, les hauteurs de pluie annuelles de ces stations sont hétérogènes et dispersées dans le temps et dans l'espace. Quant aux 84,62% des stations, elles présentent des valeurs inférieures à 25%. Leurs hauteurs de pluie sont donc homogènes et non dispersées. La plus faible valeur du coefficient de variation (11,75%) est observée à Dabakala et la plus élevée (27,90%) à Grand-Lahou. Quant au coefficient d'aplatissement, il varie de -0,53 à 11,67 avec une moyenne de 1,23. Les valeurs de celui-ci sont généralement supérieures à zéro soit 23,08% des stations. Ce qui montre que les valeurs de pluies de ces stations présentent un pic moins plat avec des extrémités plus épaisses par rapport à la distribution normale. Cependant, celles présentant des valeurs de coefficient d'aplatissement négatives, soit 76,92% des stations, présentent une distribution plus plate avec des extrémités moins épaisses par rapport à la distribution normale. Ainsi, toutes les valeurs de pluie de l'ensemble des stations ne suivent pas la loi de distribution normale. Les coefficients d'asymétrie sont tous positifs. Il varie de 0,08 à 2,31 avec une moyenne de 0,78. Ce qui traduit le fait que la distribution au niveau de ces données est étalée à droite de leur moyenne.

#### **3.1.2.4. Analyse des fréquences de distributions des pluies extrêmes**

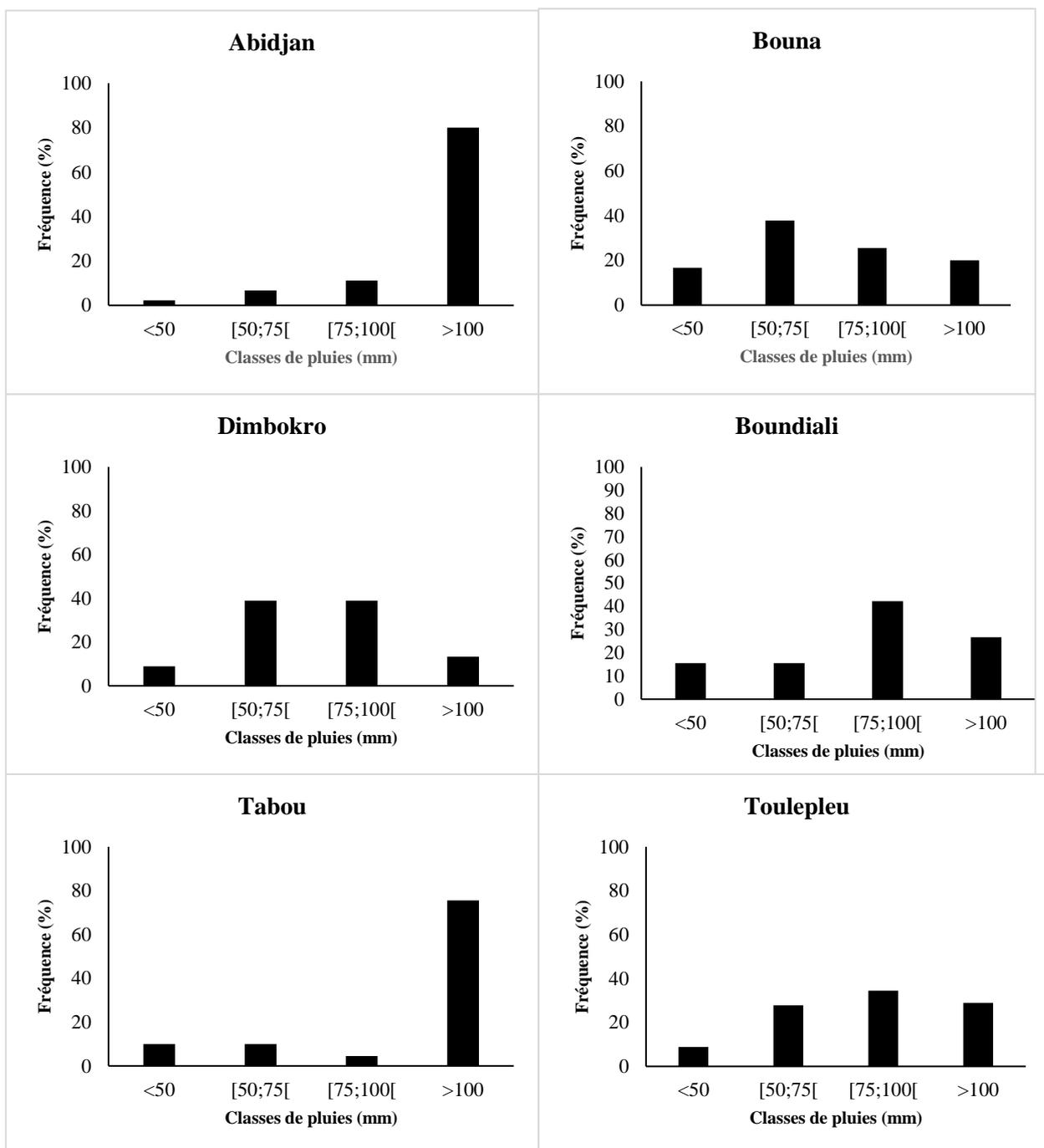
Les pluies extrêmes ont été réparties sur quatre (4) classes sur la base d'un seuil de précipitation de 50 mm, où les pluies supérieures à celui-ci sont qualifiées de pluie intense (Konaté *et al.*, 2016). Ce seuil est largement utilisé par les services météorologiques pour qualifier un événement pluvieux significatif pour influencer les activités anthropiques et susceptibles de déclencher des catastrophes humaines (Chen and Zhai, 2013). Ce seuil de 50 mm est utilisé dans cette étude à cause de son importance en prenant en compte la capacité d'adaptation des sociétés vis-à-vis des événements extrêmes (Beniston et Stephenson, 2004). Ainsi un événement pluvieux est dit « significatif » lorsqu'une pluie excède 50 mm à une station. Il est considéré comme « intense » lorsqu'elle dépasse 75 mm et de « très intense » quand elle est au-dessus de 100 mm. Le tableau IV présente les caractéristiques des classes normales. En effet, la classe modale ]50 ; 75] affiche une fréquence variant de 6,67% à 52,22% avec une moyenne de 27,86%. La fréquence de la classe ]75 ; 100] oscille entre 4,44% et 42,22% et une moyenne de

27,26%. La dernière classe reste la plus dominante avec une fréquence minimale de 10%, une fréquence maximale de 80% et une fréquence moyenne de 34,83%.

**Tableau IV** : Caractéristiques des classes modales des pluies journalières maximales

Classes modales	F min (%)	F max (%)	F moy (%)	Stations
<b>]50 ; 75]</b>	6,67	52,22	27,86	Abengourou; Agnibilékro; Bouafle; Bouaké; Bouna; Daloa; Dimbokro; Ferkessedougou; Gagnoa; Seguéla
<b>]75 ; 100]</b>	4,44	42,22	27,26	Agboville ; Dabakala ; Boundiali ; Dimbokro ; Man ; Mankono; Odienné; Tiassalé; Toulepleu
<b>&gt;100</b>	10,00	80,00	34,83	Abidjan ; Aboisso ; Azaguié; Grand-Lahou; Guiglo; La Mé; Sassandra; Tabou

La figure 18, illustre les distributions des hauteurs de pluies de quelques stations au niveau des pluies journalières maximales. En se basant sur les différentes classifications des pluies extrêmes, on constate que la plupart des stations du Sud présentent des pluies très intenses ( $P_{jmax} > 100$  mm). A l'Ouest et une frange partie de l'Est, on assiste à des pluies intenses (]50 ; 75]). Au Nord et le reste du centre affichent des pluies moins intenses (inférieures à 50 mm).



**Figure 18** : Histogrammes de distribution des fréquences des pluies journalières maximales (1931-2020)

### 3.2. OUTILS INFORMATIQUES

Le traitement des données pour cette étude s'est fait au moyen de logiciels tels que :

- **Excel 2016** : ce tableur a permis de réaliser des calculs et des graphes ;
- **XLStat18** : ce logiciel dont le fonctionnement s'appuie sur Microsoft Excel pour la saisie des données et la publication des résultats, a permis de déterminer les coefficients d'aplatissement et d'asymétrie ;
- **Hyfran (Hydrological Frequency Analysis) Plus** : il s'agit d'un outil d'hydrologie statistique qui a permis de faire l'analyse fréquentielle des pluies extrêmes c'est-à-dire de l'outil de décision SAD pour les choix de classe des lois, la détermination des fréquences empiriques jusqu'à la détermination des quantiles y compris les tests d'hypothèses de l'analyse fréquentielle ;
- **Surfer 16** : pour la cartographie des paramètres étudiés (normales, quantiles, coefficient de gradex).
- **Arcmap sous Arcgis 10.7** : pour la réalisation des cartes de répartition géographique ;
- **Goldsim Pro 12.1** : Il a servi à la simulation des pluies futures. Il possède de puissantes fonctionnalités de simulation probabiliste pour représenter quantitativement la variabilité et l'incertitude inhérente à tous les systèmes du monde réel. Il permet d'évaluer de manière réaliste comment les systèmes sont susceptibles d'évoluer au fil du temps afin de comparer les conceptions et plans et surtout minimiser les risques pour de meilleures décisions.

### 3.3. CONCLUSION PARTIELLE

Le matériel utilisé durant l'exécution de ce travail est composé de données climatiques et d'outils informatiques. Il s'agit des données de pluies journalières couvrant la période 1931-2020 et provenant de vingt-six (26) postes pluviométriques répartis sur tout le pays. Elles ont été mises à notre disposition par la SODEXAM (Société de Développement et d'Exploitation Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique). Les pluies journalières maximales varient entre 47 mm (Agboville) et 480 mm (Boundiali) avec une moyenne allant de 73,61 mm (Agnibilékro) à 136,59 mm (Grand-Lahou). Les valeurs de l'écart-type des différentes stations oscillent entre 20,32 mm (Dimbokro) et 59,29 mm (Tabou) avec une moyenne de 38,02 mm. Les valeurs du coefficient de variation sont toutes supérieures à 25%. Elles varient de 26,76% (Dimbokro) à 58,52% (Boundiali). Les pluies annuelles varient entre 985,85 mm (Dimbokro)

et 2115,53 mm (Abidjan) avec une moyenne allant de 1180,41 mm (Agnibilékro) à 1878,01 mm (Abidjan). Les valeurs de l'écart-type des différentes stations oscillent entre 144,18 (Dabakala) et 464,84 mm (Tabou). Les valeurs du coefficient de variation des stations de Man, Grand-Lahou, Boundiali et Tabou sont supérieures à 25%.

Ce chapitre a débuté par le choix des données pluviométriques conformément aux exigences de ce travail de recherche pour ensuite aboutir sur une critique des données avant toute utilisation. Il s'agissait de reconstituer les lacunes et des valeurs erronées au sein de notre base de données pluviométriques de 1931-2020, d'identifier et corriger les valeurs erronées. La méthode du double cumul, celle de Bushand et l'ellipse de contrôle de Bois ont été utilisées pour l'identification des probables valeurs aberrantes. La méthode de régression linéaire couplée à celle du vecteur régional ont été utilisées pour corriger les valeurs erronées et combler les lacunes. Dans ce chapitre, les outils informatiques utilisés ont été présentés. Nous avons utilisé des outils statistiques (XLstat18, le tableur Excel 16 et Hyfran Plus), des outils de Système d'Information Géographique (Surfer 16, Arcmap 10.7) et un outil de simulation pluviométrique (GoldSim Pro 12.1).

## CHAPITRE 4 : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Cette partie présente la description complète des différentes étapes de l'étude.

### 4.1. ANALYSE DE LA STATIONARITE DES NORMES HYDROLOGIQUES

#### 4.1.1. Analyse du contexte climatique

La méthodologie a consisté d'abord à émettre une hypothèse et à vérifier celle-ci à partir des tests statistiques. Ensuite, une détermination des écarts de variation a été faite. Enfin, les indices pluviométriques standardisés (SPI) ont été calculés sur la période d'étude à partir des pluies annuelles.

##### 4.1.1.1. Vérification de l'hypothèse d'existence de rupture

Une « rupture » peut être définie comme un changement dans la loi de probabilité de la série chronologique à un instant donné (Lubès et *al.*, 1998). Une telle rupture marque une modification du régime pluviométrique. Plusieurs auteurs ont montré qu'en Afrique de l'Ouest en général et en Côte d'Ivoire en particulier, l'année 1970 est l'année de rupture dans la plupart des séries pluviométriques (Kouassi et *al.*, 2010 ; Soro et *al.*, 2016 ; Kouassi et *al.*, 2017). De tout ce qui précède, une hypothèse a été émise selon laquelle, l'année 1970 est l'année de rupture au sein des données de pluies annuelles des stations considérées dans le cadre de cette étude.

Ainsi, la vérification de l'existence de cette rupture a été faite à partir du test de Student. Ce test paramétrique de Student a été réalisé sur les données de pluies annuelles couvrant la période 1931-2010 et comparant les données des sous séries de tailles égales (1931-1970 et 1971-2010). En effet, le test de Student ou test t est un test statistique permettant de comparer les moyennes de deux groupes d'échantillons. Il s'agit donc de savoir si les moyennes des deux groupes sont significativement différentes au point de vue statistique. La procédure adoptée a consisté à :

- déterminer la valeur du critère t qui s'exprime comme suit :

$$t = \frac{\bar{X}_a - \bar{X}_b}{\sqrt{S^2_{m(a)} - S^2_{m(b)}}} \quad (6)$$

Avec :

- $\bar{X}_a$  = moyenne de l'échantillon (1931-1970) ;
- $\bar{X}_b$  = moyenne de l'échantillon (1971- 2010)

- $S_m(a)$ =écart moyen de l'échantillon (1931-1970) ;
- $S_m(b)$ =écart moyen de l'échantillon (1971- 2010).
- déterminer  $t'$  la valeur tabulée de  $t$  à partir de la table de Student. On admet un taux de confiance ou probabilité au dépassement ( $p = 1-\alpha$ ) de 95% et un degré de liberté  $n' = n_1 + n_2 - 2$  ;
- comparer ensuite  $t$  et  $t'$  ;
- conclure : si  $t$  (observé) <  $t'$  ( $t$  théorique) alors la différence entre les moyennes des deux échantillons n'est pas significative du point de vue statistique.

#### 4.1.1.2. Détermination des écarts de variation des pluies annuelles

Les écarts de variation des pluies annuelles par rapport à l'année 1970 choisie comme année de rupture à la suite du test de Student ont été évalués à partir de la formule suivante :

$$D = \frac{x_j}{x_i} - 1 \quad (7)$$

Avec :

- $D$  : écart de variation ;
- $x_j$  : moyenne de la série après rupture ;
- $x_i$  : moyenne de la série avant rupture.

Selon la valeur de  $D$ , on a :

- Si  $D \geq 0$ , alors il y a un excédent pluviométrique de la période d'après la rupture par rapport à celle d'avant la rupture ;
- Si  $D < 0$ , alors on parle de déficit pluviométrique de la période d'après la rupture par rapport à celle d'avant la rupture.

#### 4.1.1.3. Analyse des tendances des séries des pluies annuelles constituées

L'analyse des tendances des pluies annuelles a été réalisée à partir de l'indice standardisé des précipitations (SPI) (Ardoin, 2004 ; Koné et *al.*, 2019) et la méthode de Hanning (Kouakou et *al.*, 2012 ; Kouassi et *al.*, 2017). Ces méthodes ont été appliquées sous Excel à partir des paramètres de tendance et de dispersion (moyennes et écart-type) calculés pour chacune des séries statistiques des vingt-six stations sur une période allant de 1931 à 2010. Les graphiques

afférents à chacune des stations ont été représentés afin de ressortir les différentes variations enregistrées. L'expression du SPI se présente comme suit :

$$\text{SPI} = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma(x)} \quad (8)$$

Avec :  $\bar{x}$  la moyenne de la série et  $\sigma(x)$  l'écart-type de la série.

Pour Koné *et al.* (2019), selon la valeur du SPI, on a :

- si le SPI < 0 alors la période est considérée comme sèche ;
- si le SPI > 0 alors la période est considérée comme humide.

La méthode du filtre passe-bas de Hanning d'ordre 2, appelée aussi moyenne mobile pondérée a été utilisée afin d'éliminer les variations saisonnières pour permettre une meilleure observation des fluctuations interannuelles. Avec le filtre, les cumuls annuels de la série filtrée de taille  $n$  sont calculés au moyen de l'expression suivante :

$$X_t = 0,06 X_{t-2} + 0,25 X_{t-1} + 0,38 X_t + 0,25 X_{t+1} + 0,06 X_{t+2} \quad (9)$$

Pour  $3 \leq t \leq (n-2)$  où  $X_t$  est le cumul ou moyenne pluviométrique et  $t$  représente l'année courante. Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers termes  $X_1$  et  $X_2$  et des deux derniers termes  $X_{n-1}$  et  $X_n$  de la série sont calculés au moyen des expressions suivantes ( $n$  étant la taille de la série) :

$$- X_1 = 0,54 X_1 + 0,46 X_2 ; \quad (10)$$

$$- X_2 = 0,25 X_1 + 0,50 X_2 + 0,25 X_3 ; \quad (11)$$

$$- X_{n-1} = 0,25 X_{n-2} + 0,50 X_{n-1} + 0,25 X_n ; \quad (12)$$

$$- X_n = 0,54 X_n + 0,46 X_{n-1}. \quad (13)$$

Les totaux pluviométriques pondérés de ce filtre sont par la suite centrés et réduits au moyen de l'équation  $X_2$  afin de bien visualiser les périodes climatiques.

#### 4.1.2. Modélisation statistique des pluies journalières maximales annuelles

L'approche méthodologique a consisté d'abord à vérifier un certain nombre d'hypothèses statistiques dans le contexte de l'application de l'analyse fréquentielle, telles que l'indépendance, l'homogénéité et la stationnarité des données. Ensuite, les différentes lois de distribution choisies ont été ajustées aux données de pluies journalières maximales annuelles. Enfin, une évaluation de la validité des modèles adoptés a été réalisée. Des lois de distribution employées dans la conception des réseaux d'assainissement et des aménagements pour la protection contre les inondations, principalement dans les zones urbaines et semi urbaines, ont ainsi été retenues dans cette analyse. Il s'agira dans la suite, d'une analyse fréquentielle locale sur les données de pluies journalières maximales de 26 stations en Côte d'Ivoire et ceci selon les périodes 1931-1970 et 1971-2010. La série 1931-1970 supposée humide et celle de 1971-2010 supposée sèche ainsi dégagées dans cette partie ont la même taille (40 ans). Le but de cette analyse fréquentielle est de déterminer des quantiles de pluies extrêmes qui serviront à l'analyse de l'impact des changements climatiques sur ces derniers.

##### 4.1.2.1. Hypothèses de l'analyse fréquentielle

Pour être représentatif de la population d'où il est tiré, l'échantillon des observations doit présenter un certain nombre de qualité qui ont été bien précisées par Bobée et Ashkar (1991). Les observations contenues dans l'échantillon doivent être :

- ✓ aléatoires : c'est-à-dire, en hydrologie, être le résultat de fluctuations naturelles et non la conséquence d'influences anthropiques ;
- ✓ indépendantes : la valeur d'une observation ne doit pas être influencée par la valeur de l'observation précédente au sens chronologique ;
- ✓ homogènes : c'est-à-dire provenant d'une même population ;
- ✓ stationnaires : les variables appartenant à une série chronologique sont dites stationnaires quand leurs caractéristiques statistiques (moyenne, autocovariance) ne changent pas avec le temps. En hydrologie, les variations naturelles dues aux saisons peuvent être neutralisées en découpant l'année en périodes pendant lesquelles on considère que la variable est stationnaire.

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 (Soro, 2011 ; Habibi et al., 2013 ; Agué 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.

Le test d'homogénéité de Wilcoxon à l'échelle annuelle consiste à découper la série selon les différentes ruptures et à vérifier si ces sous-séries ont la même moyenne.

Les hypothèses sont donc :

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

Le test de stationnarité de Kendall, qui est un test de corrélation sur le rang, sert à détecter les tendances dans les séries (Yue et Pilon, 2004). Pour ce test, les hypothèses sont les suivantes :

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

Le test d'indépendance de Wald-Wolfowitz est utile pour vérifier dans les observations, l'existence d'une dépendance séquentielle qui conduirait, lorsque celle-ci est avérée, à définir le type et le niveau de celle-ci avant de continuer l'étude du processus des fréquences. Pour cela les hypothèses sont les suivantes :

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

Le seuil de p-value est de 0.05.

#### **4.1.2.2. Calcul des fréquences empiriques et caractérisation des périodes de retour**

La détermination des fréquences expérimentales se base sur l'étude critique et comparative des différentes approches pour le développement des fonctions de probabilité empiriques (FPE). Malgré la recommandation d'utiliser la FPE basée sur la médiane des statistiques d'ordre comme compromis entre les FPE non biaisées et les FPE basées sur le mode des statistiques d'ordre, la formule de Hazen a été retenue. En effet, en zone tropicale humide, celle-ci a été utilisée par la plupart des auteurs (Benkhald, 2007 ; Goula et *al.*, 2010 ; Soro, 2011 ; Kouassi et *al.*, 2018). Après un classement par ordre croissant des données de pluies de taille  $n$ ,

l'expression de la fréquence empirique ou expérimentale de non-dépassement de Hazen pour une valeur  $x$  de rang  $i$  se présente comme suit (Equation 14) :

$$f(X_i) = \frac{i - 0,5}{n} \quad (14)$$

Avec  $n$ , la taille des données considérées.

Les épisodes pluvieux à la source d'inondations recensées peuvent être qualifiés d'événements extrêmes ou non. 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. Le calcul des fréquences d'apparition des pluies extrêmes fournit des indications intéressantes pour les gestionnaires de l'aménagement (El Ghachi et Morchid, 2015). La période de retour d'un événement est définie comme étant l'inverse de la probabilité annuelle de dépassement de cet événement (Mohyont et Demarée, 2006) (Equation 15) :

$$T = \frac{1}{1-F} \quad (15)$$

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

Un événement pluvieux 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 et 30 ans ; d'anormal si la période de retour est située entre 6 et 10 ans et de normal si la période de retour est à moins de 6 ans (Hangnon et *al.*, 2015).

#### 4.1.2.3. Système d'aide à la décision (SAD)

Avant de passer à l'ajustement d'une distribution statistique à une série de données, il est souhaitable de déterminer en premier lieu à quelle classe cette distribution appartient (El Adlouni et *al.*, 2008). Un Système d'Aide à la Décision (SAD) a été développé pour permettre de choisir la classe de distributions la plus adéquate pour estimer le quantile de période de retour  $T$  élevée. En effet, une classification des lois par rapport à la queue droite de la distribution, permet de distinguer trois principales catégories dans lesquelles on peut classer les dix distributions les plus utilisées en hydrologie, pour les valeurs maximales :

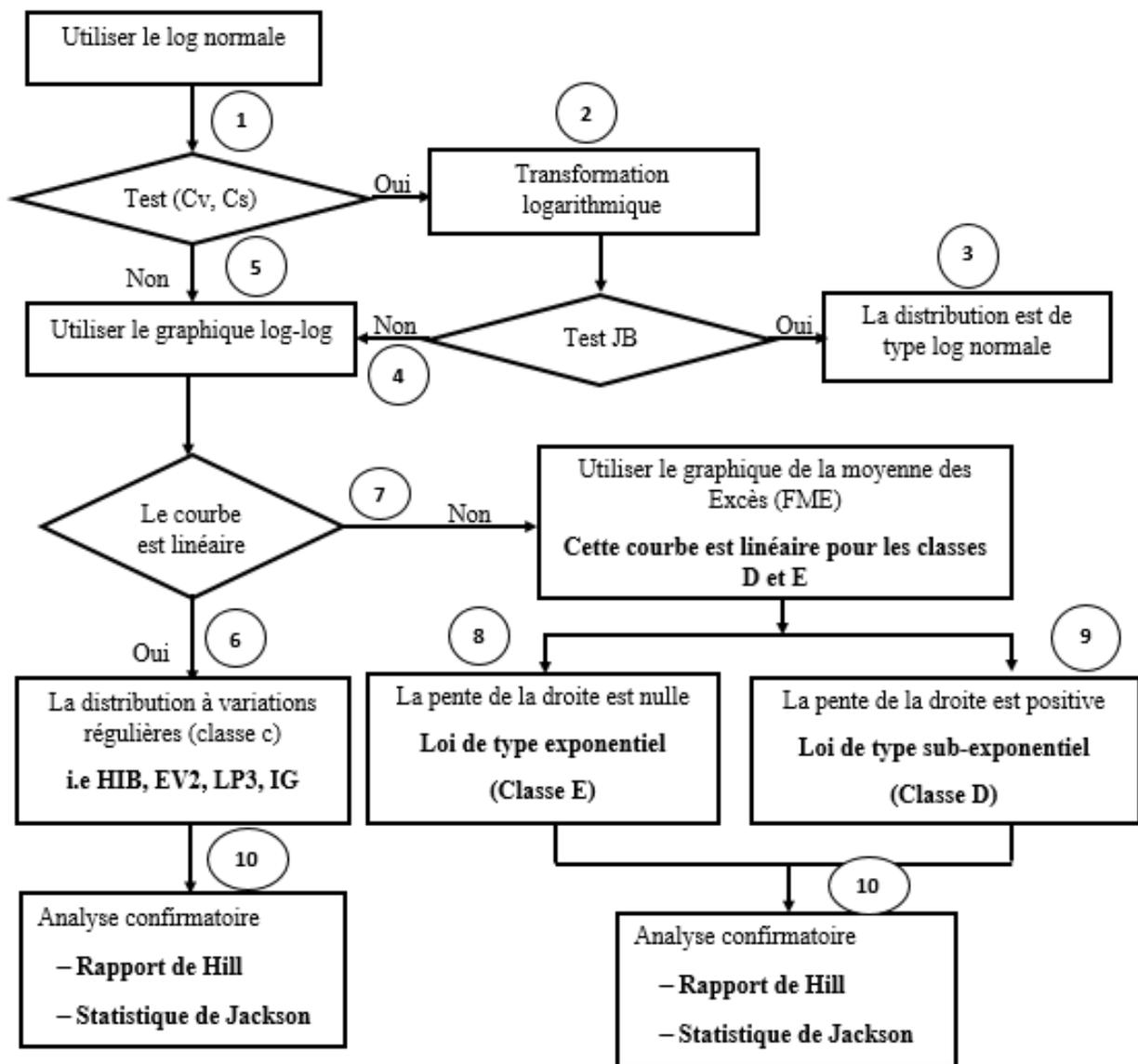
- la classe C (distribution à variations régulières) : Fréchet (EV2), Halphen B Inverse (HIB), Log-Pearson type 3 (LP3), Gamma Inverse (GI) ;

- la classe D (distributions sub-exponentielles) : Halphen type A (HA), Halphen type B (HB), Gumbel (EV1), Pearson type 3 (P3), Gamma (G) ;
- la classe E (loi exponentielle).

Les méthodes développées dans le SAD permettent d'identifier la classe la plus adéquate pour l'ajustement d'un échantillon donné. Ces méthodes sont :

- le test de Jarque-Bera : considéré pour tester la Log-normalité avec une sélection a priori basée sur le diagramme [coefficients de variation et d'asymétrie (Cv, Cs)] ;
- le graphique Log-Log : utilisé pour discriminer d'une part la classe C et d'autre part les classes D et E ;
- la fonction moyenne des excès (FME) : utilisée pour discriminer les classes D et E ;
- deux statistiques : le rapport de Hill et la statistique de Jackson qui peuvent être utilisées pour effectuer une analyse confirmatoire des conclusions suggérées à partir des deux précédentes méthodes (graphique Log-Log et FME) (El Adlouni et *al.*, 2006).

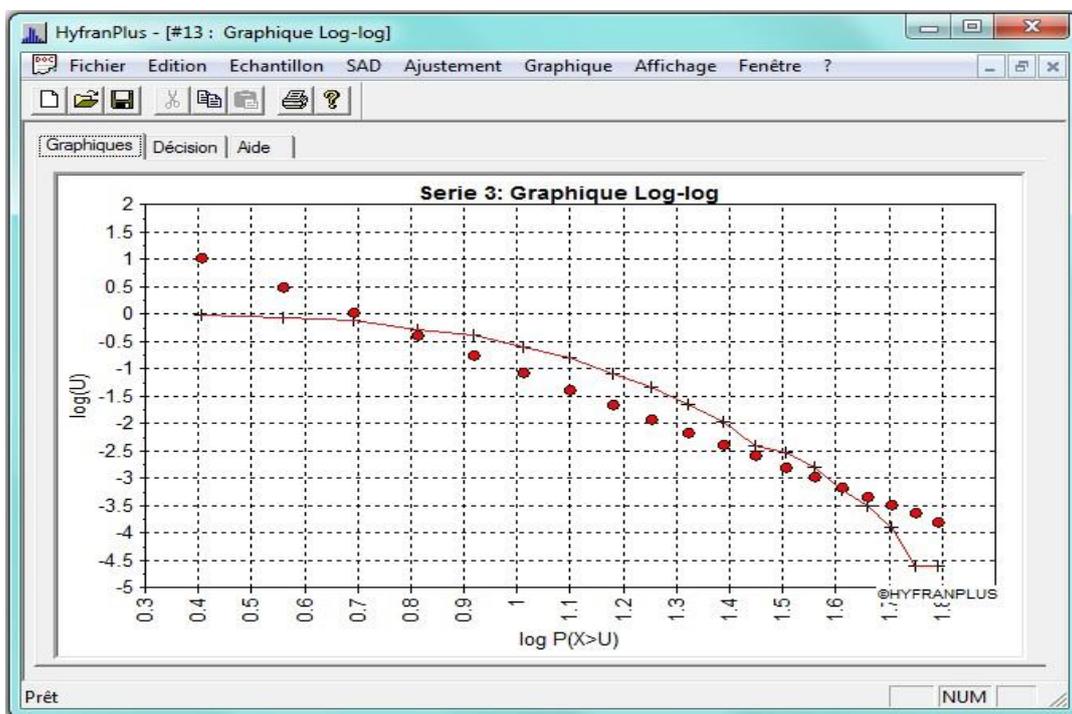
L'approche considérée dans le système d'aide à la décision peut être résumée par le diagramme en figure 19.



**Figure 19** : Diagramme du SAD (El Adlouni et al., 2006)

Le processus consiste à vérifier dans un premier temps l'hypothèse de Log-normalité pour les séries étudiées. Lorsque le rejet de cette hypothèse est accepté au niveau de signification de 5%, l'utilisation du test de Jarque-Bera n'est pas nécessaire (El Adlouni et al., 2008). Dans ce cas, on passe directement au test de Log-log plot pour voir si la courbe représentée dans ce diagramme est linéaire c'est-à-dire que la distribution des pluies journalières est à variations régulières (figure 20) ou non (figure 21). Donc, pour les stations où la courbe est linéaire, on utilise l'analyse confirmatoire par l'intermédiaire du rapport de Hill (El Adlouni et al., 2008) (Figure 22) et de la statistique de Jackson (Jackson, 1967) (figure 23). Lorsque ces deux tests indiquent que les séries de pluies journalières suivent une distribution exponentielle ou sub-exponentielle, la méthode FME (Fonction Moyenne des Excès) est utilisée pour discriminer

entre les classes D et E. Il s'agit d'un graphique basé sur la fonction moyenne des excès (méthode FME) qui permet de déterminer la classe d'appartenance de la loi (classe D ou E). L'utilisation de la méthode FME permet de distinguer entre la classe D et la classe E (El Adlouni et *al.*, 2008). En effet, si en plus du fait que la courbe de la fonction FME est linéaire pour les distributions des classes D et E, la pente est nulle, la loi la plus adéquate appartient à la classe E (loi Exponentielle) (El Adlouni et *al.*, 2008). Dans le cas contraire (pente strictement positive), la distribution la plus adéquate appartient à la classe D des distributions sub-exponentielles (El Adlouni et *al.*, 2008).



**Figure 20** : Linéarité acceptable (El Adlouni et *al.*, 2008).

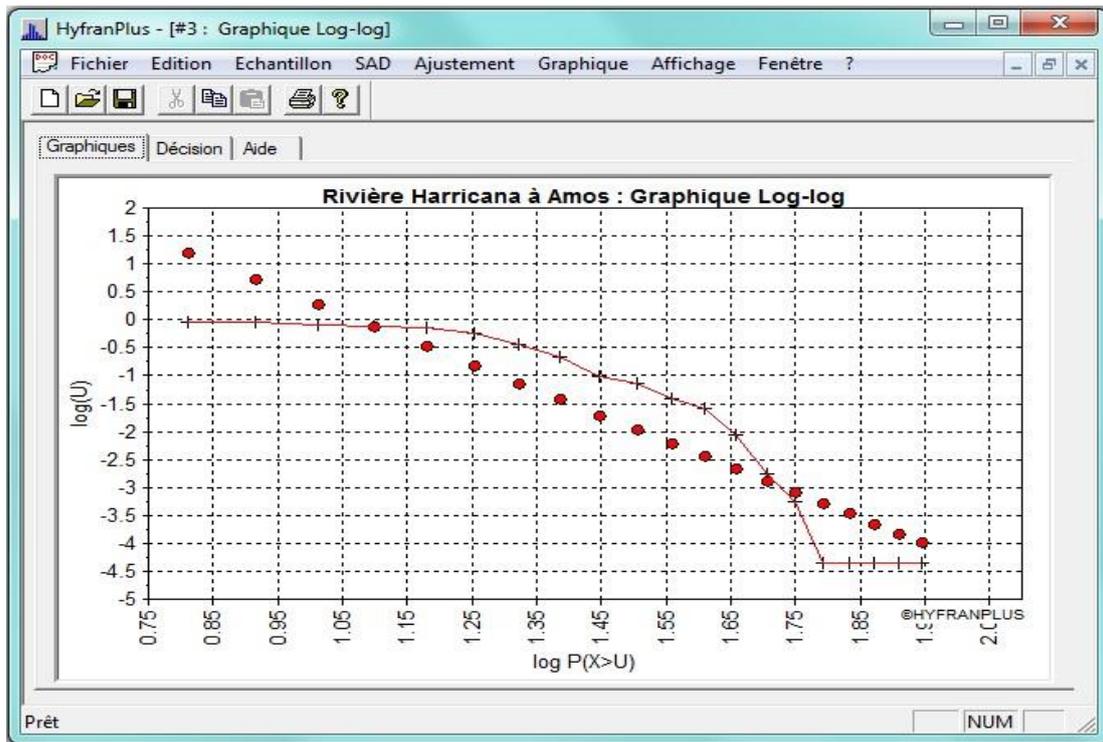


Figure 21 : Courbe non linéaire (El Adlouni et al., 2008).

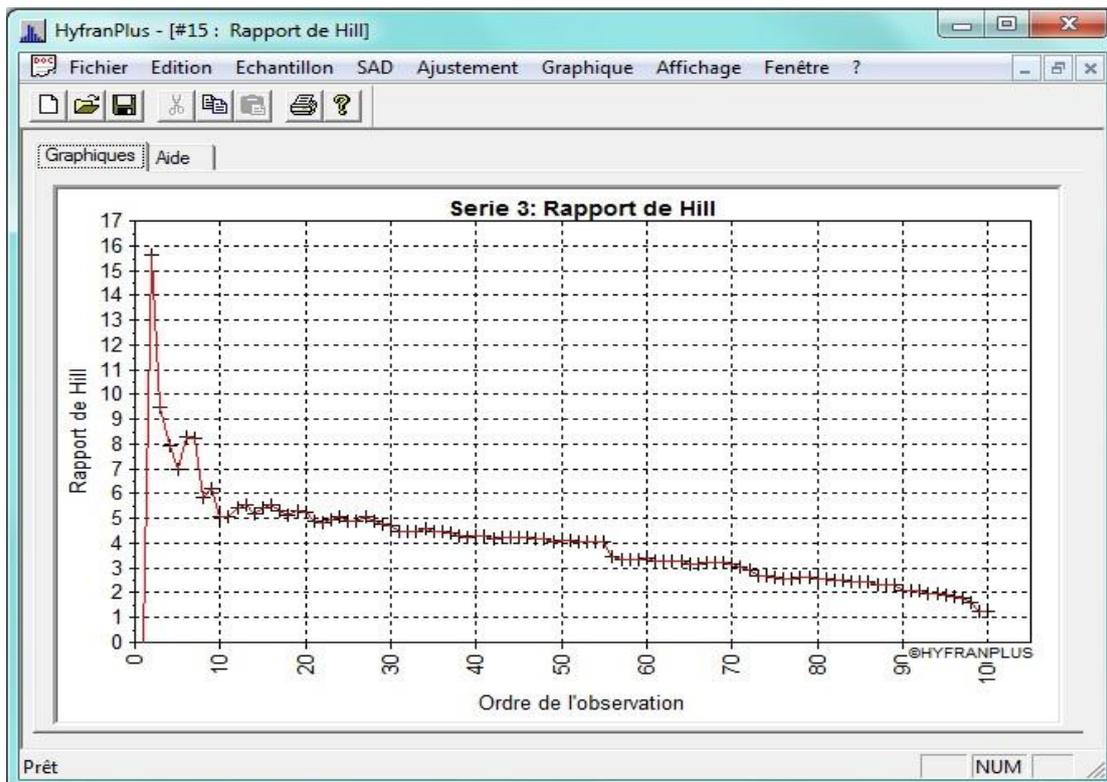
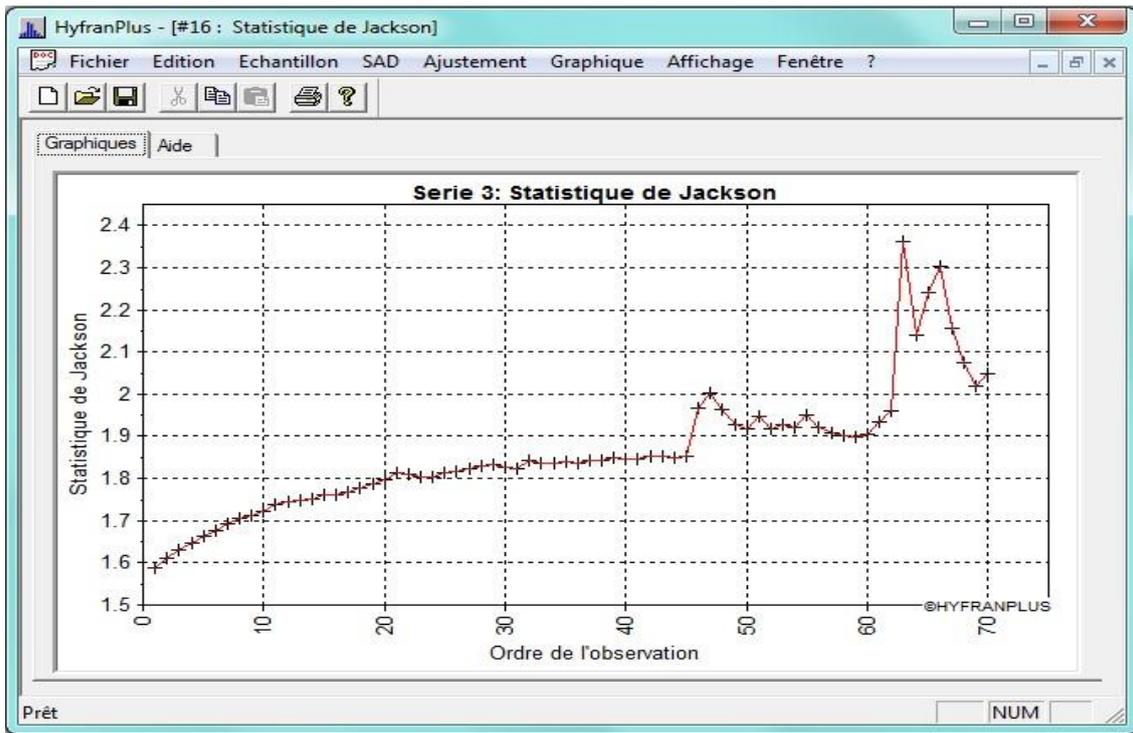


Figure 22 : Diagramme du rapport de Hill (El Adlouni et al., 2008).



**Figure 23** : Diagramme du rapport statistique de Jackson (El Adlouni et *al.*, 2008).

#### 4.1.2.4. Détermination des meilleurs modèles statistiques d'ajustement

Le choix des différents modèles statistiques retenus pour l'ajustement des pluies journalières maximales annuelles repose sur des considérations théoriques et les recommandations des travaux antérieurs en la matière (Muller, 2006 ; Goula et *al.*, 2007 ; El Adlouni et *al.*, 2008 ; Soro, 2011). De manière générale, la détermination de la meilleure loi d'ajustement a toujours été délicate et le choix du modèle peut être crucial pour l'estimation des précipitations de différentes périodes de retour des valeurs extrêmes.

Dans le cadre de cette étude, plusieurs lois ont été retenues grâce à l'outil SAD et sont consignées dans le tableau V.

**Tableau V** : Modèles statistiques retenus pour l'ajustement des pluies extrêmes

Lois de probabilité	Fonctions de densité f(x)	Paramètres
<b>Loi GEV</b>	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[ 1 - \frac{k}{\alpha} (x - \mu) \right]^{\frac{1}{k}-1} \cdot \exp \left\{ - \left[ 1 - \frac{k}{\alpha} (x - \mu) \right]^{\frac{1}{k}} \right\}$	$\mu, \alpha, k$ (16)
<b>Loi Gumbel</b>	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[ - \frac{x - \mu}{\alpha} - \exp \left( - \frac{x - \mu}{\alpha} \right) \right]$	$\mu, \alpha$ (17)
<b>Loi Normale</b>	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]$	$\mu, \sigma$ (18)
<b>Loi Lognormale</b>	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ - \frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right]$	$\mu, \sigma$ (19)
<b>Loi Exponentielle</b>	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[ - \frac{x - m}{\alpha} \right]$	$\alpha, m$ (20)
<b>Loi Gamma</b>	$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} x^{\lambda-1} e^{-\alpha x}$	$\alpha, \lambda, \Gamma$ (21)
<b>Loi Weibull</b>	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left( 1 - \frac{x - \mu}{\alpha} \right)^{\frac{1}{k}-1} \exp \left\{ - \left[ 1 - k \left( \frac{x - \mu}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{k}} \right\}$	$\mu, \alpha, k$ (22)
<b>Loi de Fréchet</b>	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left( 1 - \frac{x - \mu}{\alpha} \right) \exp \left\{ - \left[ 1 - k \left( \frac{x - \mu}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{k}} \right\}$	$k, \mu, \alpha$ (23)
<b>Loi Pearson Type 3</b>	$f(x) = \frac{\alpha^\lambda}{\Gamma(\lambda)} (x - m)^{\lambda-1} e^{-\alpha(x-m)}$	$\alpha, \lambda, m$ (24)

Une fois les lois d'ajustement connues, les différents paramètres des lois  $\mu, \alpha$  ou  $\lambda, k$  désignent respectivement les paramètres de position, d'échelle et de forme des différentes lois. Le paramètre de position  $\mu$  caractérise l'ordre de grandeur de la série des pluies extrêmes. Le paramètre de forme  $k$  indique le comportement des extrêmes ou la forme de la distribution. Suivant le signe de ce paramètre de forme, on définit trois types de lois GEV :

- $k = 0$ , loi à queue légère (ou distribution de Gumbel) ;
- $k < 0$ , loi à queue lourde (ou distribution de Fréchet) ;
- $k > 0$ , loi à queue bornée (ou distribution de Weibull).

Il existe plusieurs méthodes d'estimation des paramètres telles que la méthode du maximum de vraisemblance, la méthode des moments pondérés, la méthode des moments, la méthode des L-moments ou encore la méthode bayésienne.

La méthode du maximum de vraisemblance a été retenue parce qu'elle a l'avantage d'être applicable à toutes les distributions statistiques à l'exception de la distribution Lognormale 3 et Gamma qui a nécessité l'usage de la méthode des moments. La méthode de vraisemblance donne des estimateurs corrects et efficaces (Zahar et Laborde, 2007). La méthode du maximum de vraisemblance consiste à trouver l'ensemble des paramètres qui, compte tenu de la loi de probabilité retenue, maximise la probabilité d'obtenir les valeurs observées de l'échantillon.

#### **4.1.2.5. Ajustement d'une distribution statistique et validation du modèle statistique**

Dans ce qui précède, on a utilisé le SAD pour choisir la classe qui représente le mieux la forme de la distribution empirique. On procède ensuite à l'ajustement des distributions de la classe retenue à la série des observations. L'ajustement s'effectue en choisissant, tour à tour, chacune des distributions de la classe choisie.

De nombreuses techniques (analyse visuelle des graphiques, test de khi-deux, critères Bayésien BIC et d'Akaike AIC) existent pour comparer les différentes méthodes d'analyse des lois de probabilité et pour choisir la meilleure. L'examen visuel des graphiques d'ajustement réalisés, même s'il peut paraître rudimentaire, reste un bon moyen pour juger de la qualité d'un ajustement et devrait toujours constituer un préambule à tout test statistique. Le test d'adéquation du khi-deux a été adopté, en tant que test le plus ancien et le plus puissant.

La procédure d'application du test de khi-deux se présente comme suit (Soro, 2011 ; Kouassi et al., 2019). 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 25 :

$$v_i = n \int_{x_{i+1}}^{x_i} f(x) dx = n[F(x_i) - F(x_{i+1})] \quad (25)$$

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

L'expression de  $\chi^2$  expérimental est présentée comme suit (Equation 26) :

$$\chi^2 = \sum \frac{(n_i - v_i)^2}{v_i} \quad (26)$$

La probabilité de dépassement correspondant au nombre de degré de liberté  $\lambda$  est ainsi déterminée (avec  $\lambda = k - 1 - n_p$ ,  $n_p$  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.

Si à ce niveau, une distinction n'a pas pu être faite, il est donc nécessaire d'appliquer les critères AIC et BIC. Ainsi, la sélection de la distribution statistique la mieux ajustée aux échantillons peut être faite à l'aide de deux critères à savoir le critère d'information d'Akaike (AIC) et le critère d'information Bayésien (BIC). Ces deux critères permettent de choisir la loi la mieux ajustée en tenant compte de l'erreur d'estimation et de la parcimonie (nombre de paramètres à ajuster). La distribution pour laquelle les valeurs des deux critères sont les plus faibles est celle qui est sélectionnée.

En effet, le but de ces critères est de rechercher un compromis entre une paramétrisation suffisante pour bien ajuster une loi de probabilité aux observations, et une paramétrisation la moins complexe possible.

Le critère d'information Bayésien se place dans un contexte Bayésien de sélection statistique. On recherche ici le modèle statistique qui maximise la distribution à posteriori des modèles, c'est-à-dire le modèle le plus vraisemblable au vu des données.

L'expression du critère d'information Bayésien (BIC) se présente comme suit (Lebartier et Mary-Huard, 2004 *in* Goula et al., 2010 ; Agué et Afouda, 2015) (Equation 27) :

$$BIC = -2 \log(L) + 2k \log(N) \quad (27)$$

Où :

$L$  : la vraisemblance ;

$k$  : le nombre de paramètres ;

$N$  : la taille de l'échantillon.

Le critère d'Information d'Akaike est fondé sur une pseudo-distance entre une distribution inconnue, et une distribution arbitraire. Le critère de comparaison d'Akaike (AIC) sélectionne le modèle réalisant le meilleur compromis biais-variance pour le nombre de données  $N$  dont on dispose.

L'expression du critère d'information d'Akaike (AIC) se présente comme suit (Akaike, 1974 *in* Goula et al., 2010 ; Agué et Afouda, 2015) (Equation 28) :

$$AIC = -2 \log(L) + 2k \quad (28)$$

Où :

$L$  : la vraisemblance ;

$k$  : le nombre de paramètres.

#### **4.1.2.6. Analyse de la distribution des lois en fonction des zones climatiques**

Une analyse comparative des lois a été réalisée en fonction des principales zones climatiques définies en Côte d'Ivoire. Pour chaque zone climatique, la fréquence d'apparition des meilleures lois a été présentée.

A ce niveau, les deux sous-séries ont la même taille dans le but de supprimer les effets de la taille de l'échantillon sur les lois statistiques. Il a également été question de vérifier si la meilleure loi d'une zone climatique donnée varie ou reste constante sur les deux périodes dégagées 1931-1970 (période humide) et 1971-2010 (période sèche).

#### **4.1.3. Analyse comparative des normes hydrologiques**

Une analyse de la stationnarité des normes des pluies extrêmes a été effectuée. Elle s'est appuyée sur les sous périodes 1931-1970 et 1971-2010. Les indicateurs de normes définis au cours de cette étude sont les normales des pluies annuelles, les normales des pluies extrêmes et les quantiles des pluies extrêmes.

##### **4.1.3.1. Calcul des normales**

Les normales des pluies annuelles et celles des pluies journalières maximales annuelles ont été calculées au moyen de la moyenne (Sighomnou, 2004 ; Canellas et *al.*, 2014) et sur les sous-périodes 1931-1970 (période humide) et 1971-2010 (période sèche).

##### **4.1.3.2. Détermination des quantiles des pluies extrêmes**

La détermination des quantiles a été effectuée à partir de l'approche analytique dont le fondement mathématique se présente comme suit (Equation 29) :

$$x(F) = x_0 + S \times u(F) \quad (29)$$

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. Ainsi, les quantiles des pluies journalières maximales annuelles ont été calculés sur les périodes 1931-1970 (période humide) et 1971-2010 (période sèche) pour plusieurs durées de retour ( $T$  : 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans). L'estimation des quantiles pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques requiert un certain niveau de confiance. En effet, les modèles statistiques utilisés pour représenter les pluies extrêmes sont entachés d'erreurs qu'il est nécessaire de préciser. Ainsi, l'intervalle de confiance a été déterminé selon la formule suivante (Equation 30) :

$$\hat{x}(F) = x(F) \pm t(\alpha, n-1) \frac{\sigma}{\sqrt{n}} A(T, n) \quad (30)$$

Avec :

- $\hat{x}$  : la valeur vraie ;
- $x$  : le quantile déterminé ;
- $\sigma$  : l'écart-type de l'échantillon ;
- $n$  : la taille de l'échantillon ;
- $\alpha$  : le seuil de confiance ;
- $t(\alpha, n-1)$  : constante à lire dans la table de Student à la fréquence  $(1+\alpha)/2$  ;
- $A(T, n)$  : constante dépendant de la durée de retour et de la taille de l'échantillon.

Les quantiles des pluies journalières maximales annuelles ont été évalués pour plusieurs durées de retour ( $T$  : 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans). En effet, dans les projets de dimensionnement des ouvrages hydrauliques, le choix de la période de retour est fonction de l'importance de l'ouvrage à concevoir. On peut cependant rappeler quelques récurrences habituellement utilisées dans le cadre de ces projets en Afrique de l'Ouest (Sighomnou, 2004 ; Kouassi et *al.*, 2019) :

- 2 à 5 ans pour les canaux primaires à tertiaires ;
- 10 ans pour les petits ouvrages de franchissement comme les buses et dalots ;
- 20 à 50 ans pour les ponts de petite à moyenne importance ;
- 100 ans pour les ponts de portée importante (de plus de 100 mètres).

#### 4.1.4. Définition des matrices des écarts relatifs

Les écarts relatifs absolus entre les normes étudiées (normales des pluies annuelles, normales des pluies extrêmes et quantiles des pluies journalières maximales annuelles) en considérant à chaque fois une norme comme valeur de référence, ont été évalués. Les écarts relatifs absolus représentent la valeur absolue de la différence entre la norme considérée et la norme de référence (Kouassi et al., 2019). Les écarts relatifs absolus sont exprimés en pourcentage. La formulation des écarts relatifs absolus des normes pour une période de retour se présente comme ci-après (Equation 31) (Kouassi et al., 2019) :

$$\Delta X_{i / réf} = 100 \times \left| \frac{X_i - X_{réf}}{X_{réf}} \right| \quad (31)$$

Avec :

- $\Delta X_{i / réf}$  : écart relatif absolu ;
- $X_i$  : norme de la période  $i$  ;
- $X_{réf}$  : norme de référence ;
- $i$  : période (année).

Un seuil d'acceptabilité de 1 % a été retenu, c'est-à-dire que si l'écart relatif absolu est inférieur ou égal à 1 %, on considère que la différence entre la norme considérée et la norme de référence n'est pas statistiquement significative.

#### 4.1.5. Détermination des matrices binaires

L'ensemble des écarts relatifs absolus a permis de constituer la matrice des écarts relatifs absolus. Cette matrice a été transformée en une matrice binaire (0,1). En effet, les écarts inférieurs à 1 % ont été remplacés par 1 tandis que les écarts supérieurs à 1 % ont été remplacés par 0. Le « 1 » traduit une stationnarité des normes alors que le « 0 » traduit une non-stationnarité des normes, les valeurs « 1 » sur la diagonale des matrices ne faisant pas partie (Sighomnou, 2004 et Nassa et al., 2021).

## 4.2. ACTUALISATION DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES DES MÉTHODES EMPIRIQUES DE L'ORSTOM ET DU CIEH

### 4.2.1. *Analyse de la sensibilité des lois statistiques à la taille des données*

L'approche méthodologique a consisté d'abord à vérifier un certain nombre d'hypothèses statistiques dans le contexte de l'application de l'analyse fréquentielle, telles que l'indépendance, l'homogénéité et la stationnarité des données. Ensuite, les différentes lois de distribution choisies ont été ajustées aux données de pluies journalières maximales annuelles. Enfin, une évaluation de la validité des modèles adoptés a été réalisée. Des lois de distribution employées dans la conception des réseaux d'assainissement et des aménagements pour la protection contre les inondations, principalement dans les zones urbaines et semi urbaines, ont ainsi été retenues dans cette analyse (la même approche de la modélisation statistique a été développée dans la partie 4.1).

Il s'agira dans cette partie d'une analyse de l'influence de la taille des données sur le choix de la meilleure loi statistique représentant au mieux ces données. Les tailles des séries considérées sont de 30 ans (1931-1960 ; 1961-1990 ; 1991-2020) qui constituent les trois (3) normales de référence de l'OMM, de 60 ans (1931-1990 ; 1961-2020) et de 90 ans (la chronique entière 1931-2020).

La taille minimale de 30 ans est choisie conformément aux recommandations de l'OMM, la taille de 90 ans est fixée par rapport à la disponibilité des données et la taille de 60 ans constitue la taille intermédiaire entre les deux tailles extrêmes (30 ans et 90 ans). Cette analyse se fera en faisant varier la taille des données afin d'apprécier les éventuels impacts de l'étendue de la série des données sur les lois statistiques.

### 4.2.2. *Détermination des paramètres climatiques de la méthode de l'ORSTOM*

Cette méthode permet d'évaluer le débit de la crue décennale sur les bassins de la zone sahélienne et tropicale. La méthode s'applique à des bassins dont la superficie est située entre quelques dizaines d'hectares jusqu'à 1500 km<sup>2</sup>. Le débit de crue décennale est évalué à travers les équations suivantes (Tirogo, 2008) :

$$Q_{10} = K \times Q_m \quad (32)$$

$$Q_m = \frac{V_r}{T_b} \quad (33)$$

$$V_r = K_r \times C_a(T, S, P_{an}) \times S \times P_{10} \quad (34)$$

Plusieurs formules permettent de calculer le coefficient d'abattement ( $C_a$ ) telle que la formule de Vuillaume :

$$C_a = 1 - 0,001 \times (9 \log T - 0,042 P_{an} + 152) \times \log S \quad (35)$$

Pour une période de retour de 10 ans on a :

$$Q_{10} = \frac{K \times K_r \times S \times P_{10} \times [1 - 0,001 \times (161 - 0,042 P_{an}) \times \log S]}{T_b} \quad (36)$$

Avec  $T$  : période de retour (année) ;

$P_{an}$ : pluie moyenne interannuelle (mm) ;

$Q_{10}$  : le débit maximum décennal en  $m^3/s$  ;

$K$  : le coefficient de pointe de crue ;

$P_{10}$  : la précipitation décennale ponctuelle journalière ;

$K_r$  : le coefficient de ruissellement décennal ;

$S$  : la superficie du bassin versant en  $km^2$  ;

$T_b$  : le temps de base en secondes.

Les paramètres faisant l'objet d'étude dans la formule de l'ORSTOM sont la pluie décennale ( $P_{10}$ ) et la pluie moyenne interannuelle ( $P_{an}$ ).

#### 4.2.3. Détermination des paramètres climatiques de la méthode du CIEH

Cette méthode a été mise au point sur la base de mesures et observations réalisées sur 162 bassins pour l'estimation de la crue décennale. Elle s'applique à des bassins versants d'Afrique sahélienne et tropicale sèche dont la superficie est inférieure à 2500  $km^2$  et dont la pluviométrie annuelle est inférieure à 2000 mm. La méthode est présentée sous forme de régression linéaire entre les différents paramètres. La crue décennale est évaluée à travers l'équation 37 (Tirogo, 2008) :

$$Q_{10} = a S^s \times P_{an}^p \times I_g^i \times K_{r10}^k \quad (37)$$

où : a, s, p, i, k sont des coefficients à déterminer et,

$Q_{10}$  : le débit de crue décennale ( $m^3/s$ ) ;

$S$  : superficie du bassin ( $km^2$ ) ;

$I_g$  : indice global de pente (m/km) ;

$P_{an}$  : pluie annuelle moyenne (mm) ;

$K_{r10}$  : coefficient de ruissellement décennal (%).

Le paramètre faisant l'objet d'étude au niveau de la méthode du CIEH est la pluie annuelle moyenne ( $P_{an}$ ).

#### 4.2.4. Détermination du gradex des méthodes empiriques de l'ORSTOM et du CIEH

Une analyse du gradex des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH, généralement utilisé par les praticiens pour la détermination de la crue de projet a été réalisée (Kouassi et al., 2019). En effet, le passage de la crue décennale à la crue centennale (crue de projet) est rendu possible grâce à un coefficient multiplicateur C (supérieur à 1). Cette valeur est de 0,45 pour les zones sahéliennes et 0,38 pour les zones tropicales. L'expression de ce coefficient majorateur est (Equation 38) :

$$C = 1 + \frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} \times \frac{\left(\frac{T_b}{24}\right)^{0,12}}{K_{r10}} \quad (38)$$

Où,

- $P_{10}$  : précipitation journalière correspondant à une période de retour de 10 ans ;

- $P_{100}$  : précipitation journalière correspondant à une période de retour de 100 ans ;

- $T_b$  : temps de base en heures ;

- $K_{r10}$  : coefficient de ruissellement de la crue décennale (exprimé en fraction et non pas en pourcentage) ;

- $T_b$  et  $K_{r10}$  restent constants pour un bassin donné.

On appelle coefficient de gradex ( $\lambda$ ) l'expression suivante (équation 39) :

$$\lambda = \frac{P_{100} - P_{10}}{P_{10}} \quad (39)$$

Pour une durée de retour donnée, les valeurs de  $\lambda$  varient en fonction des quantiles  $P_{100}$  et  $P_{10}$ . Une évaluation des biais a été effectuée avec la valeur définie par les concepteurs de la méthode comme référence en région tropicale (0,38).

### 4.3. ANALYSE PROSPECTIVE DES NORMES HYDROLOGIQUES

Dans cette partie, l'analyse prospective des normes hydrologiques a été faite selon l'approche régionale en considérant les cinq (5) zones climatiques homogènes (Tableau VI).

**Tableau VI** : Répartition des stations pluviométriques par zone climatique (Kouao et *al.*,2020)

Région Climatique	Montagnes	Baouléen	Attiéen de l'Intérieur	Attiéen du Littoral	Soudanais
<b>Stations</b>	Man, Toulepleu	Bouaflé, Bouaké, Dabakala, Daloa, Gagnoa, Guiglo, Mankono, Séguéla	Abengourou, Agnibilékro, Aboisso, Dimbokro, Azaguié, La Mé, Tiassalé Agboville	Abidjan, Grand-Lahou, Sassandra, Tabou	Bouna, Boundiali, Ferké, Odiénné

#### 4.3.1. Analyse des indicateurs de normes hydrologiques passées

Dans cette section, il s'agira d'abord de faire la statistique descriptive des normes hydrologiques passées (normales des pluies annuelles, normales des pluies extrêmes et quantiles des pluies extrêmes) qui consiste à déterminer les paramètres tels que la moyenne, le minimum, le maximum, le coefficient de variation, l'écart-type, le coefficient d'asymétrie et le coefficient d'aplatissement. Ils permettent d'avoir une idée globale sur le comportement de la série en fonction de la taille de l'échantillon. Ensuite, une analyse de la distribution des fréquences des pluies extrêmes a été faite.

Enfin, les normales (pluies extrêmes et annuelles) et les quantiles des pluies extrêmes des zones climatiques homogènes de la Côte d'Ivoire (climat de Montagnes, climat Baouléen, climat Attiéen de l'intérieur, climat Attiéen du littoral et le climat Soudanais) ont été déterminés sur la période de référence (1931-2020).

### **4.3.2. Conception et évaluation du modèle Markovien**

#### **4.3.2.1. Conception du modèle stochastique**

Un générateur stochastique de conditions météorologiques ou "Weather Generator" (WG) est un modèle qui reproduit les attributs statistiques (moyenne et variance) d'une variable climatique considérée à l'échelle locale (Wilby et *al.*, 2004). La variable de sortie de ce type de modèle est une série chronologique artificielle de données météorologiques à très haute résolution temporelle à la limite des ressources informatiques. Il existe deux types de générateurs stochastiques. Le type « Richardson » (Richardson, 1981 ; Richardson et Wright, 1984) ou WGEN et le type « en série » (Racsko et *al.*, 1991 ; Semenov et *al.*, 1998) ou LARS-WG. WGEN se caractérise par la modélisation de la variable considérée à l'aide de chaîne de Markov qui décrit généralement deux états comme sec ou humide pour la précipitation. Une modélisation de type ordre 1 de chaîne de Markov prend en compte l'état courant et l'état veille de la variable considérée. Le générateur utilisé dans ce travail est de type « Richardson » ou WGEN (Weather Generator) incorporé dans le logiciel GoldSim Pro 12.1 qui donne une aisance pratique.

Le principal but de ce modèle stochastique est de générer des données pluviométriques futures au milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (2031-2060) et à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2071-2100).

#### **4.3.2.2. Modèle d'occurrence des précipitations par chaîne de Markov**

Les données de pluies journalières des 26 stations de cette étude ont été utilisées pour simuler les séquences d'occurrence des précipitations à partir des matrices de probabilité de transition issues des chaînes de Markov d'ordre 1. La procédure suivie pour la génération des données de pluies est celle préconisée par Stern et Coe (1984). Elle se déroule en trois (3) étapes :

- préparation des données pour l'ajustement du modèle des chaînes de Markov ;
- génération des probabilités de transition ;
- simulation de la série pluviométrique.

##### *4.3.2.2.1. Préparation des données pluviométriques*

Les chaînes de Markov permettent de considérer que la possibilité d'un événement d'occurrence donnée dépend essentiellement de l'état du jour précédent (sec ou humide) (Dlamini et *al.*, (2015). Dans cette étude, il est adopté une chaîne de Markov d'ordre 1 avec deux (2) états pour simuler l'occurrence des pluies. Ce modèle est caractérisé par quatre (4) situations possibles

respectivement un jour sec précédé par un jour sec (*ss*), un jour sec précédé par un jour pluvieux (*sh*), un jour pluvieux précédé d'un jour sec (*hs*) et un jour pluvieux précédé par un jour pluvieux (*hh*). La préparation des données pluviométriques débute par la synthétisation de ces différentes informations contenues dans l'historique des données (Stern et al., 2006 in Konaté, 2018). Elle implique le décompte de ces différentes éventualités comme présenté dans le tableau VII.

**Tableau VII** : Décompte de jours humides et jours secs au sein des données historiques au cours de la période d'étude (1931 à 2020)

		Jour précédent ( <i>i</i> )		
		Sec ( <i>s</i> )	Humide ( <i>h</i> )	Total
Jour actuel ( <i>j</i> )	Sec ( <i>s</i> )	$N_{ss}$	$N_{sh}$	$N_s$
	Humide ( <i>h</i> )	$N_{hs}$	$N_{hh}$	$N_h$

- $N_{ss}$  : nombre de jour sec précédé par un jour sec ;
- $N_{sh}$  : nombre de jour sec précédé par un jour pluvieux ;
- $N_{hs}$  : nombre de jour pluvieux précédé d'un jour sec ;
- $N_{hh}$  : nombre de jour pluvieux précédé par un jour pluvieux ;
- $N_s$  : nombre total de jours secs ( $N_{ss} + N_{sh}$ ) ;
- $N_h$  : nombre total de jours pluvieux ( $N_{hs} + N_{hh}$ ).

#### 4.3.2.2.2. Génération des probabilités de transition

L'étape précédente est suivie par la génération des différentes probabilités de transition issues des décomptes des séquences de jours humides et secs. Ces probabilités de transition se répartissent de la façon suivante :

- $P_{-ss}$  : probabilité de jour sec précédé par un jour sec ;
- $P_{-sh}$  : probabilité jour sec précédé par un jour pluvieux ;
- $P_{-hs}$  : probabilité de jour pluvieux précédé d'un jour sec ;
- $P_{-hh}$  : probabilité de jour pluvieux précédé d'un jour pluvieux ;
- $P_{-h}$  : probabilité de jour pluvieux.

Les probabilités  $P_{-hs}$  et  $P_{-hh}$  sont celles qui caractérisent les jours pluvieux. La probabilité  $P_{-h}$  permet l'estimation de la probabilité globale, de premier ordre, d'occurrence des pluies au cours

d'une année. La quantité moyenne de pluies par jour humide est également estimée dans cette partie. Elle permet la génération des données de pluies dans l'étape suivante.

#### 4.3.2.2.3. Simulation des quantités de pluies durant les jours humides

Les quantités de pluies sont modélisées après la génération des états pluvieux en termes de jours humides (pluie  $\geq 1$  mm). Cette simulation des quantités de pluies se fait pour les jours qui ont été modélisés comme humides après ajustement d'une distribution de probabilité aux quantités de pluie de ces jours pluvieux. La distribution de probabilité utilisée pour l'ajustement est la fonction gamma à deux (2) paramètres représentés par la relation (Konaté, 2018).

$$P(x) = \left(\frac{k}{\mu}\right)^k x^{k-1} \frac{\exp\left(-\frac{kx}{\mu}\right)}{\Gamma(k)} \quad \mu > 0, k > 0; x > 0 \quad (40)$$

Les paramètres  $\mu$  et  $k$  sont respectivement la moyenne et le paramètre de forme.  $\Gamma(k)$  est la fonction gamma.

Les paramètres de la fonction gamma sont estimés par la méthode de maximum de vraisemblance. L'obtention des probabilités ajustées aux données issues du modèle des chaînes de Markov permet d'obtenir la quantité moyenne de pluies par jours pluvieux sur l'année. La quantité moyenne de pluie par jour pluvieux est estimée pour les jours humides de l'année, cependant, un seul paramètre de forme est déterminé pour toute la période de couverture des données pluviométriques. Le seuil de pluies pour les jours considérés humides est de 1 mm. Dans le cadre de cette étude les données futures sont estimées jusqu'à 2100. La modélisation est réalisée sous l'environnement du logiciel commercial Goldsim Pro 12.1. Le modèle Markovien sera calé sur la période 1931-1990 (60 ans) et validé sur la période 1991-2020 (30 ans).

#### 4.3.2.3. Évaluation du modèle

La validation du modèle se réalise en comparant les valeurs d'entraînement obtenues et les valeurs observées de la série de validation définie. Des critères numériques et des critères visuels (représentations graphiques) ont été utilisés pour juger de la performance du modèle.

Pour évaluer la qualité prévisionnelle du modèle développé dans cette étude, le critère de Nash-Sutcliffe, le biais, et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne ont été utilisés.

Le critère de Nash-Sutcliffe qui a été utilisé dans ce travail est donné par l'équation 41 :

$$Nash = 100 \left[ 1 - \frac{\sum_i (X_i - Y_i)^2}{\sum_i (X_i - \bar{X})^2} \right] \quad (41)$$

$X_i$  : valeurs observées ;  $Y_i$  : valeurs simulées et  $\bar{X}$  : la moyenne des valeurs observées.

Selon Kouassi et al. (2012) :

- Si le Nash < 60%, le modèle est dit mauvais ;
- Si  $60\% \leq \text{Nash} < 90\%$ , le modèle est dit performant ;
- Si Nash  $\geq 90\%$ , le modèle est dit très excellent.

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est utilisée comme la mesure de la performance globale du modèle. Cet indice permet une évaluation combinée de la variance et du biais. Le modèle est bien optimisé si la valeur de RMSE est proche de zéro, ce qui tend vers une parfaite prévision. Sa formulation mathématique est donnée par l'équation 42 suivante (Kouassi et al., 2018) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2} \quad (42)$$

$X_i$  : valeurs observées ;  $Y_i$  : valeurs simulées et  $n$  : la taille de l'échantillon.

Le biais quant à lui représente les écarts entre les valeurs simulées et observées. Le modèle est bien optimisé si la valeur du biais est également proche de zéro (Kouassi et al., 2018).

$$B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_i - Y_i| \quad (43)$$

$X_i$  : valeurs observées ;  $Y_i$  : valeurs simulées et  $n$  : la taille de l'échantillon.

#### 4.3.3. *Approches de correction des sorties du modèle Markovien*

Dans le but d'améliorer les modèles climatiques aux échelles souhaitées (de l'échelle régionale à l'échelle locale) et la précision (diminution des biais de modèle), plusieurs approches de correction ont été développées. L'applicabilité de six méthodes de correction des biais des précipitations journalières et annuelles a été testée dans cette étude. Ces méthodes ont été choisies sur la base d'une revue de littérature sur leur capacité à réduire considérablement les biais des données des modèles statistiques. Toutes les méthodes de correction ont été calées sur

la période 1931-1990 (60 ans) et validées sur la période 1991-2020 (30 ans). A l'issue de la validation, la meilleure méthode a été utilisée pour la correction des projections des modèles climatiques régionaux jusqu'à l'horizon 2100 en conservant les paramètres de la fonction de correction obtenue en calage.

La méthode courante de correction dite de perturbation (méthode delta) permet de réduire les biais des sorties des modèles climatiques. Elle est basée sur l'application d'un facteur de modification aux séries de données simulées par les modèles climatiques afin de les rendre plus représentatives du climat observé. Ce facteur correctif est appliqué multiplicativement pour la correction des séries. Dans le cas de cette thèse nous avons utilisé la méthode delta (encore appelée méthode directe) telle que formulée par Wetterhall et *al.* (2012).

$$P_{i,cor} = P_{i,sim} \times \frac{\overline{P_{obs}}}{\overline{P_{sim}}} \quad (44)$$

$P_{i,cor}$  et  $P_{i,sim}$  représentent respectivement la valeur corrigée et à corriger (ou simulée) de la précipitation du jour  $i$ ,  $\overline{P_{obs}}$  et  $\overline{P_{sim}}$  désignent les moyennes journalières des précipitations observées pour la période de calage et simulées par les chaînes de Markov pour la même période.

Cette méthode corrige les biais dans la moyenne mais pas le coefficient de variation des valeurs simulées (Lenderink et *al.*, 2007 ; Wetterhall, 2012).

D'autres méthodes de correction ont été développées par certains auteurs comme la méthode de mise à l'échelle qui représente la méthode delta à l'échelle mensuelle. Aussi, nous citons les méthodes quantiles empiriques. Ici, l'hypothèse de base d'un ajustement quantile-quantile est que les erreurs du modèle dépendent de la valeur de la variable simulée. Cette conception du phénomène d'incertitude des modèles est une simplification grossière des erreurs caractéristiques d'un modèle, car les erreurs de modèle ne sont pas seulement influencées par la valeur locale de la variable simulée (Gobiet et *al.*, 2015). Néanmoins, ce principe simple reste toujours puissant puisqu'il sépare les bruines des fortes précipitations, et est préférable pour la correction des biais des régimes complexes (Gobiet et *al.*, 2015). Aussi, l'application des méthodes quantiles est beaucoup plus flexible par rapport aux méthodes précédentes qui se basent sur l'hypothèse de stationnarité.

Les méthodes quantiles consistent à calculer les changements quantile par quantile dans les fonctions de répartition des données journalières. La méthode empirique utilise les distributions

empiriques des séries de données (précipitations, maximale et minimale) observées et simulées par les modèles climatiques pour corriger les biais de ces projections, d'où la dénomination de la procédure. La formulation classique de cette approche est donnée par :

$$y = F_{obs}^{-1}(F_{sim}(x)). \quad (45)$$

Où  $x$  et  $y$  désignent respectivement la valeur à corriger et la valeur corrigée ;  $F_{obs}$  et  $F_{sim}$  sont respectivement les distributions des valeurs observées et simulées par le modèle climatique.  $F_{obs}^{-1}$  est l'inverse de la distribution des valeurs observées. Ainsi dans cette formulation, la probabilité d'observer au plus  $x$  mm/jour de pluie dans la série du modèle est donc affectée au quantile de la distribution des observations. Cette méthode peut produire de meilleures corrections des biais mais dépend de plusieurs degrés de libertés et peut ne pas être stationnaire du fait des valeurs extrêmes (Konaté, 2018 ; N'Tcha, 2018). Les mêmes auteurs ont montré qu'une telle approche empirique est performante dans la correction des valeurs extrêmes des précipitations que les méthodes quantiles théoriques. Gudmundsson et al. (2012), en implémentant plusieurs méthodes quantile sur les données de précipitations journalières, ont trouvé qu'une approche empirique non paramétrique est la plus robuste.

#### **4.3.4. Analyse de l'état prospectif des indicateurs de normes hydrologiques**

Dans cette section, une analyse fréquentielle sera faite comme précédemment à partir des séries des pluies journalières projetées (2031-2060 et 2071-2100) en conservant les lois d'ajustement de la période de référence 1931-2020 pour les zones climatiques. Il s'agira de déterminer les normales futures (pluies extrêmes et pluies annuelles) et les quantiles futurs des pluies extrêmes des zones climatiques homogènes à partir des périodes futures (2031-2060 ; 2071-2100).

Cette ultime section de l'étude a permis d'évaluer les normes hydrologiques futures et de déterminer les biais entre celles calculées avec la période de référence de cette étude (1931-2020) et celles des périodes futures (2031-2060 et 2071-2100).

Une analyse comparative du gradex des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH sera également faite entre ceux déterminés dans cette étude et la valeur régionale de 0,38 pour la zone tropicale. Les biais des indicateurs de normes hydrologiques ont été évalués sur la base de la période de référence (1931-2020).

#### **4.4. CONCLUSION PARTIELLE**

Ce chapitre a débuté par la méthodologie de l'analyse de la stationnarité des normes hydrologiques où il s'agissait de vérifier l'hypothèse d'existence de rupture en 1970 par le test

de Student et les indices standards de précipitation couplée au filtre d'ordre 2 de Hanning. En effet, la méthodologie a consisté d'abord à émettre une hypothèse et à vérifier celle-ci à partir des tests statistiques. Ensuite, une détermination des écarts de variation a été faite. Enfin, les indices pluviométriques standardisés (SPI) ont été calculés sur la période d'étude à partir des pluies annuelles.

Avant l'analyse des normes proprement dite, il a été judicieux d'étaler la méthodologie de la modélisation statistique des pluies journalières maximales annuelles. Les hypothèses de l'analyse fréquentielle ont été vérifiées. En effet, cette vérification consiste en 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.

Le système d'aide à la décision (SAD) sous le programme HyfranPlus a permis de déterminer les meilleures classes des lois et partant, les meilleures lois. Les méthodes développées dans le SAD sont le test de Jarque-Bera : considéré pour tester la Log-normalité avec une sélection a priori basée sur le diagramme [coefficients de variation et d'asymétrie ( $C_v$ ,  $C_s$ )] ; le graphique Log-Log : utilisé pour discriminer d'une part la classe C et d'autre part les classes D et E ; la fonction moyenne des excès (FME) : utilisée pour discriminer les classes D et E ; et de deux statistiques : le rapport de Hill et la statistique de Jackson qui peuvent être utilisées pour effectuer une analyse confirmatoire des conclusions suggérées à partir des deux précédentes méthodes.

Ensuite, il a été développé la méthodologie de l'actualisation des paramètres climatiques des méthodes empiriques de l'ORSTOM et du CIEH. Les normes hydrologiques ont été déterminées par le biais de l'analyse fréquentielle des pluies extrêmes et la détermination du gradex des méthodes de détermination des débits de crues. Enfin, la méthodologie de l'analyse prospective à l'échelle des zones climatiques homogènes a été exposée avec une analyse des indicateurs de normes hydrologiques passées (1931-2020), la conception et l'évaluation du modèle Markovien pour les pluies extrêmes et les pluies annuelles futures (2031-2060 et 2071-2100). La méthode de Markov fournit de l'information sur les probabilités conditionnelles de passage d'un état à l'autre (par exemple dans le cas de la précipitation, c'est la probabilité qu'un jour humide suive un jour sec ou sur la probabilité qu'un jour humide suive un jour humide) calculées à partir des données d'observation de la station. Les séquences d'états en l'occurrence la distribution des jours humides dans le cas de la précipitation est modélisée à partir d'une fonction préalablement définie comme la distribution gamma dans notre cas. En général, c'est l'occurrence de la précipitation qui est modélisée en première instance et les variables

climatiques restantes sont alors calculées en fonction de leurs corrélations les unes avec les autres et du statut humide ou sec de chaque jour. Les paramètres du modèle du générateur stochastique sont déterminés sur une période d'entraînement à partir des observations (2/3 de la série entière 1931-2020). Le modèle ainsi défini est ensuite validé sur une autre fenêtre temporelle des observations. En effet, le modèle Markovien sera calé sur la période 1931-1990 (60 ans) et validé sur la période 1991-2020 (30 ans). Enfin, l'analyse des indicateurs des normes hydrologiques futures telles que les normales des pluies interannuelles, les normales et les quantiles des pluies journalières maximales annuelles et le gradex des pluies extrêmes futures sera faite. Les résultats issus de cette méthodologie sont présentés dans les chapitres 5, 6 et 7.

---

---

## **PARTIE III : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

---

---

## CHAPITRE 5 : ANALYSE DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA STATIONNARITÉ DES NORMES HYDROLOGIQUES

### 5.1. CARACTÉRISTIQUES CLIMATIQUES

#### 5.1.1. Vérification de l'hypothèse d'existence de rupture

Le test statistique de t-Student a été effectué sur les séries de pluies annuelles des périodes 1931-1970 et 1971-2010 afin de confirmer l'hypothèse de présence de rupture en 1970. Les résultats sont consignés dans le tableau VIII.

**Tableau VIII** : Résultats du Test de Student appliqué aux pluies annuelles (1931-2010)

Stations	Critère t	Critère t'	Conclusion
Abengourou	1,99		présence de rupture
Abidjan	<b>1,44</b>		absence de rupture
Aboisso	2,36		présence de rupture
Agboville	2,97		présence de rupture
Agnibilékro	<b>0,45</b>		absence de rupture
Azaguié	3,27		présence de rupture
Dimbokro	2,12		présence de rupture
Bouaflé	2,65		présence de rupture
Bouaké	4,85		présence de rupture
Bouna	2,06		présence de rupture
Boundiali	3,77		présence de rupture
Dabakala	<b>1,17</b>		absence de rupture
Daloa	4,51	1,91	présence de rupture
Ferkéssédougou	8,3		présence de rupture
Gagnoa	2,63		présence de rupture
Grand Lahou	2,17		présence de rupture
Guiglo	3,69		présence de rupture
La Mé	4,85		présence de rupture
Man	3,22		présence de rupture
Mankono	<b>1,77</b>		absence de rupture
Sassandra	5,81		présence de rupture
Séguéla	3,45		présence de rupture
Odienné	4,41		présence de rupture
Tabou	<b>0,65</b>		absence de rupture
Tiassalé	3,66		présence de rupture
Toulepleu	3,51		présence de rupture

De l'analyse du tableau, il ressort que le test de Student confirme dans 81% des cas, l'existence de rupture en 1970. En effet, pour ces différentes stations, la différence entre les deux moyennes des deux échantillons (avant et après 1970) est significative du point de vue statistique. Aussi, les

valeurs expérimentales qui restent inférieures à la valeur théorique sont comprises entre 0,45 (Agnibilékro) et 1,17 (Dabakala). Dans 19% des cas, la présence de rupture dans les séries de pluies annuelles n'a pas été confirmée. Les stations concernées sont celles d'Abidjan, Agnibilékro, Dabakala, Mankono et Tabou. Les valeurs expérimentales qui sont supérieures à 1,91 sont comprises entre 1,99 (Abengourou) et 5,81 (Sassandra).

### 5.1.2. Écarts de variation des pluies annuelles

Les écarts de variation déterminés de part et d'autre de l'année 1970 à partir des pluies annuelles des 26 stations sont consignées dans le tableau IX.

**Tableau IX** : Déficit pluviométriques aux différentes stations étudiées

Stations	Moyenne 1931-1970	Moyenne 1971-2010	Déficit (%)
Abengourou	1396,37	1293,00	-7,40
Abidjan	1926,46	1795,34	-6,81
Aboisso	1900,20	1690,48	-11,04
Agboville	1464,85	1304,24	-10,96
Agnibilékro	1195,74	1174,04	-1,81
Azaguié	1775,25	1548,98	-12,75
Dimbokro	1272,16	1179,83	-7,26
Bouaflé	1357,96	1240,12	-8,68
Bouaké	1797,64	1430,92	-20,40
Bouna	1274,30	1203,22	-5,58
Boundiali	1538,54	1261,05	-18,04
Dabakala	1243,14	1205,01	-3,07
Daloa	1450,99	1227,18	-15,42
Ferkéssédougou	1410,22	1147,39	-18,64
Gagnoa	1487,01	1360,13	-8,53
Grand Lahou	1688,00	1477,70	-12,46
Guiglo	1734,34	1497,30	-13,67
La Mé	1797,64	1430,92	-20,40
Man	1786,71	1521,40	-14,85
Mankono	1324,53	1258,18	-5,01
Sassandra	1769,16	1359,48	-23,16
Séguéla	1370,76	1218,78	-11,09
Odienné	1582,32	1369,33	-13,46
Tabou	2333,57	2267,31	-2,84
Tiassalé	1369,92	1162,00	-15,18
Toulepleu	1798,13	1527,39	-15,06

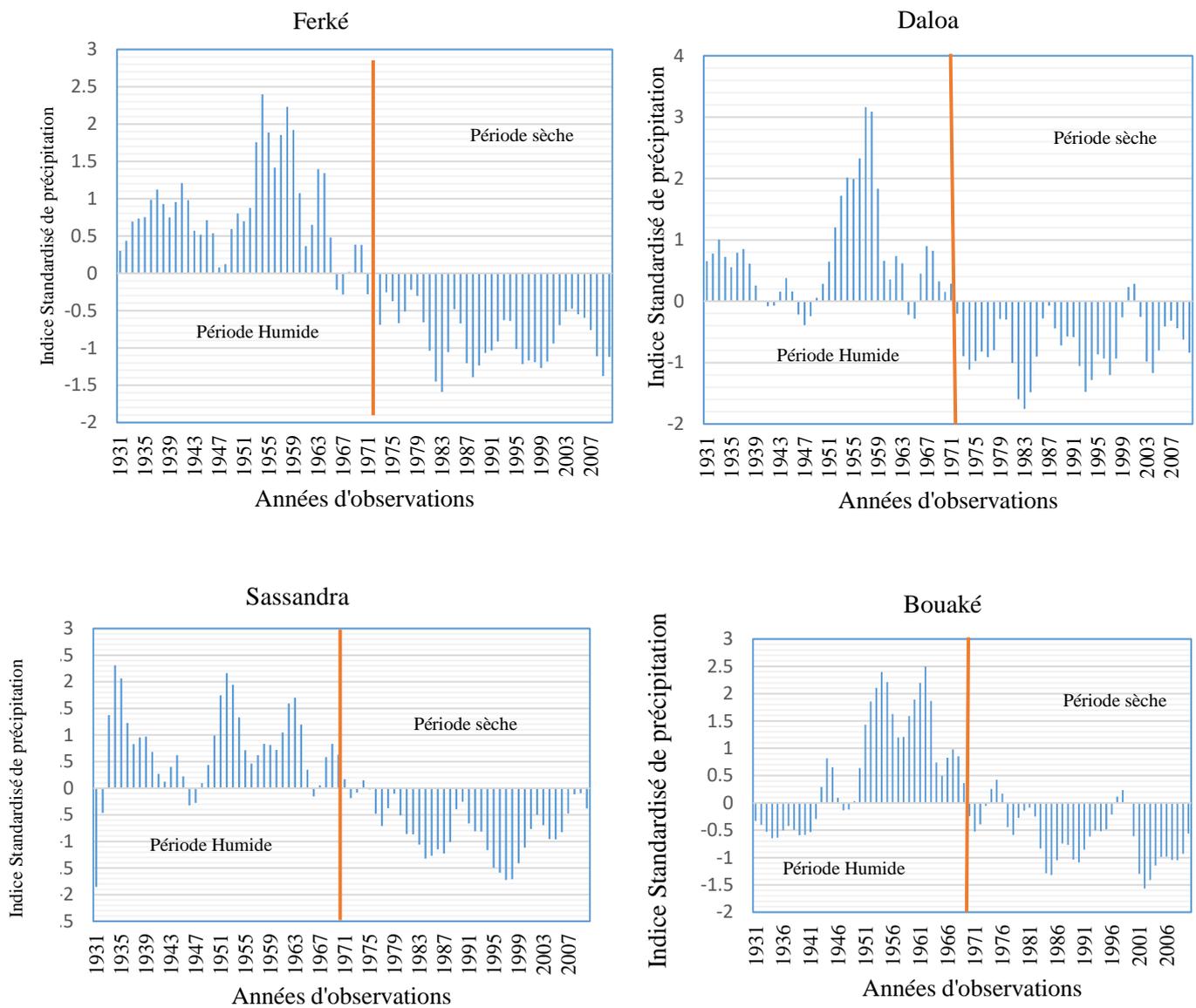
Les écarts obtenus sont tous négatifs traduisant des déficits pluviométriques en passant de la période 1931-1970 à la période 1971-2010. Ces déficits fluctuent entre 1,81% (Agnibilékro) et 23,16 % (Sassandra) avec une moyenne de 11,67%. Ces résultats montrent que la période avant 1970 (1931-1970) est plus humide que la période après 1970 (1971-2010).

Dans le climat équatorial de transition, les déficits fluctuent entre 1,81% (Aboisso) et 23,16% (Abidjan) avec une moyenne de 10,81%. Quant au climat tropical humide, il est caractérisé par des déficits variants entre 3,07% (Bouna) et 20,04% (Bouaké) avec une moyenne de 10,36%. Les déficits pluviométriques du climat subtropical oscillent entre 13,46% (Ferkéssédougou) et 18,64% (Boundiali) avec un déficit moyen de 16,71%. Concernant le climat de montagne, les déficits varient entre 14,95% (Man) et 15,06% (Toulepleu) avec une moyenne de 14,85%. De façon générale, les déficits pluviométriques diminuent lorsqu'on quitte le Sud pour le Centre et du Nord vers l'Ouest.

### ***5.1.3. Analyse des tendances des séries des pluies annuelles***

Les figures 24 et 25 illustrent l'évolution des indices pluviométriques de quelques stations de cette étude. L'analyse de ces figures montre que l'évolution pluviométrique peut être scindée en deux différentes périodes. De façon générale, la période avant 1970 est caractérisée par des indices pluviométriques positifs et celle après 1970 est marquée par des indices pluviométriques négatifs. Ces résultats obtenus traduisent bien une baisse pluviométrique après 1970.

En effet, pour les cinq stations n'ayant pas présenté de rupture avec le test de Student, l'analyse de leurs indices de précipitation montre une baisse pluviométrique après l'année 1970 (Figure 25). L'analyse des résultats du test de Student, des écarts de variation par rapport à 1970 et des indices standards de précipitations annuelles met en évidence deux grandes périodes aux caractères climatiques différents à savoir une période humide avant 1970 et une période sèche après 1970. Ainsi, la sous période 1931-1970 peut être considérée comme appartenant à une période humide. Tandis que la sous série 1971-2010 peut être qualifiée d'une période sèche.



**Figure 24 :** Indice standard de précipitation de quelques stations présentant des ruptures en 1970

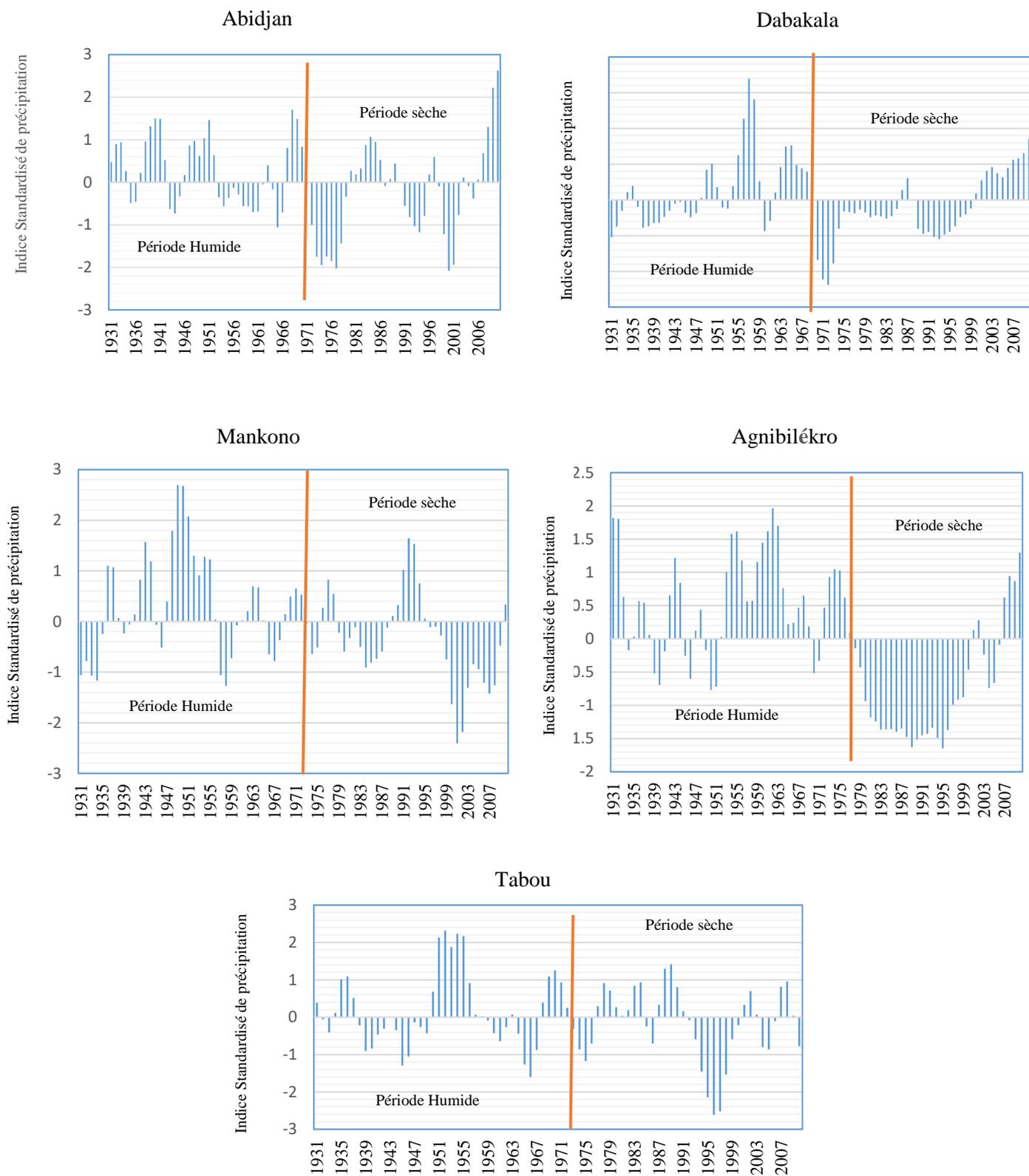


Figure 25 : Indice standard de précipitation des stations n'ayant pas présenté des ruptures avec le test de Student

## 5.2. MODÉLISATION STATISTIQUE DES PLUIES EXTRÊMES

### 5.2.1. Vérification des hypothèses d'application de l'analyse fréquentielle

Le tableau X montre les résultats des tests d'hypothèses de l'analyse fréquentielle. L'analyse de ce tableau a permis de constater que les tests d'indépendance et d'homogénéité restent valables pour les pluies maximales journalières à un seuil de 5 % (seuil de rejet de  $H_0$ ). Quant au test de stationnarité de Kendall, il a été accepté au seuil de 1 % à l'exception de la station d'Odienné.

**Tableau X : Résultats des tests d'hypothèses de l'analyse fréquentielle**

Stations	Test d'indépendance		Test de stationnarité		Test d'homogénéité	
	U	P	K	P	W	P
Abengourou	2,900	0,004	0,376	0,707	0,037	0,971
Abidjan	1,090	0,277	2,770	0,006	2,820	0,005
Aboisso	0,153	0,879	1,770	0,077	2,340	0,019
Agboville	0,005	0,996	1,810	0,070	2,200	0,028
Agnibilékro	2,880	0,004	0,655	0,512	0,418	0,676
Azaguié	0,358	0,720	2,520	0,012	2,100	0,036
Bouaflé	0,714	0,475	2,640	0,008	1,990	0,046
Bouaké	2,110	0,035	2,720	0,007	2,290	0,022
Bouna	2,110	0,035	0,795	0,427	0,093	0,926
Boundiali	1,960	0,054	2,180	0,029	0,865	0,387
Dabakala	0,832	0,406	1,170	0,240	0,836	0,403
Daloa	1,150	0,250	2,330	0,020	1,900	0,057
Dimbokro	0,800	0,005	0,028	0,978	0,406	0,685
Ferkéssédougou	0,286	0,775	3,600	0,004	4,040	0,000
Gagnoa	2,460	0,014	0,028	0,978	0,840	0,401
Grand Lahou	0,880	0,379	0,624	0,533	1,360	0,174
Guiglo	0,844	0,399	0,366	0,714	0,999	0,318
La Mé	0,716	0,474	0,204	0,042	2,490	0,013
Man	3,060	0,002	2,230	0,026	0,901	0,367
Mankono	2,680	0,007	3,080	0,002	2,550	0,011
Odienné	3,930	8,52E-05	4,350	1,40E-05	3,310	0,001
Sassandra	2,490	0,013	4,710	0,005	4,220	0,000
Séguéla	1,450	0,147	4,450	0,006	3,150	0,002
Tabou	3,960	0,003	3,860	0,007	2,460	0,014
Tiassalé	0,775	0,439	1,970	0,049	1,830	0,067
Toulepleu	0,715	0,475	1,390	0,165	0,418	0,676

Les valeurs de U, K, W désignent respectivement la valeur de la statistique de Wald-Wolfowitz, la valeur de la statistique de Kendall et la valeur de la statistique de Wilcoxon. La valeur de P désigne la p-value.

Ces résultats montrent que les séries des valeurs maximales annuelles de précipitations journalières considérées sont constituées par des valeurs indépendantes, homogènes et stationnaires. Ainsi, les séries des pluies journalières maximales annuelles vérifient les conditions d'application de l'analyse fréquentielle.

### **5.2.2. *Système d'Aide à la Décision (SAD)***

Les tableaux XI et XII présentent les résultats du SAD respectivement des périodes 1931-1970 et 1971-2010. De l'analyse des résultats issus du système SAD, les classes les plus adéquates sont les classes C, D et E pour toutes les séries de l'étude. En effet, la série humide 1931-1970 a une tendance C-D, soit 65,38% ; tandis que la série sèche se prête mieux aux classes de lois C-E avec une probabilité de 73,07%.

Notons que les classes C, E et D désignent respectivement les distributions à variations régulières (Fréchet (EV2), Halphen B Inverse (HIB), Log-Pearson type 3 (LP3), Gamma Inverse (GI)), les distributions sub-exponentielles (Halphen type A (HA), Halphen type B (HB), Gumbel (EV1), Pearson type 3 (P3), Gamma (G)) et la distribution exponentielle (loi exponentielle).

Tableau XI : Résultats du Système d'aide à la décision des sous-séries de la période 1931-1970

	LOIS	Abengourou	Abidjan	Aboisso	Agboville	Agnibilekro	Azaguié	Bouaflé	Bouaké	Bouna	Boundiali	Dabakala	Daloa	Dimbokro
Class C	Log-normal	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Fréchet (EV2)	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Halphen type B Inverse (HIB)	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Log-Pearson type 3 (LP3)	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Inverse Gamma (IG)	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Class E	Exponential distribution	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗
	Halphen type A	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓
Class D	Gamma	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓
	Pearson type 3	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓
	Halphen type B	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓
	Gumbel	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓
TESTS	Log Normal test	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	JB Test	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	A	NA	NA	NA
	Log log plot	C	NA	C	NA	NA	NA	C	C	C	NA	NA	C	NA
	Mean Excess Function 1		D		E	D	E				E	D		D
	Hill ratio plot	C	D-E	C	D-E	D-E	D-E	D-E	D-E	C	D-E	D-E	C	C
	Jackson Statistic	C	D-E	C	C	D-E	C	D-E	C	D-E	D-E	C	C	D-E
RESULTS	Class	C	D	C	C-E	D	C-E	D-C	D-C	D-C	E	D-C	C	D-C
PROPORTIONS	C	100%	0%	100%	33%	0%	33%	33%	67%	67%	0%	33%	100%	33%
	D	0%	100%	0%	0%	100%	0%	67%	33%	33%	0%	67%	0%	67%
	E	0%	0%	0%	67%	0%	67%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	0%

	LOIS	Ferké	Gagnoa	Gd Lahou	Guiglo	Lamé	Man	Mankono	Odienné	Sassandra	Seguela	Tabou	Tiassalé	Toulepleu
Class C	Log-normal	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Fréchet (EV2)	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
	Halphen type B Inverse (HIB)	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
	Log-Pearson type 3 (LP3)	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
	Inverse Gamma (IG)	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
Class E	Exponential distribution	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗
	Halphen type A	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗
Class D	Gamma	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗
	Pearson type 3	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗
	Halphen type B	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗
	Gumbel	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗
TESTS	Log Normal test	NA	NA	NA	NA	A	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	JB Test	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Log log plot	NA	C	C	C	NA	C	C	C	NA	NA	NA	NA	C
	Mean Excess Function 1	E				E				D	E	E	D	
	Hill ratio plot	D-E	C	C	D-E	D-E	C	C	C	C	C	C	D-E	C
	Jackson Statistic	C	D-E	C	C	D-E	C	D-E	C	D-E	D-E	D-E	D-E	C
RESULTS	Class	C-E	C-E	C	C-E	E	C	D-C	C	D-C	C-E	C-E	D	C
PROPORTIONS	C	33%	67%	100%	67%	0%	100%	33%	100%	33%	33%	33%	0%	100%
	D	0%	0%	0%	0%	0%	0%	67%	0%	67%	0%	0%	0%	0%
	E	67%	33%	0%	33%	100%	0%	0%	0%	0%	67%	67%	100%	0%

Tableau XII : Résultats du Système d'aide à la décision des sous séries de la période 1971-2010

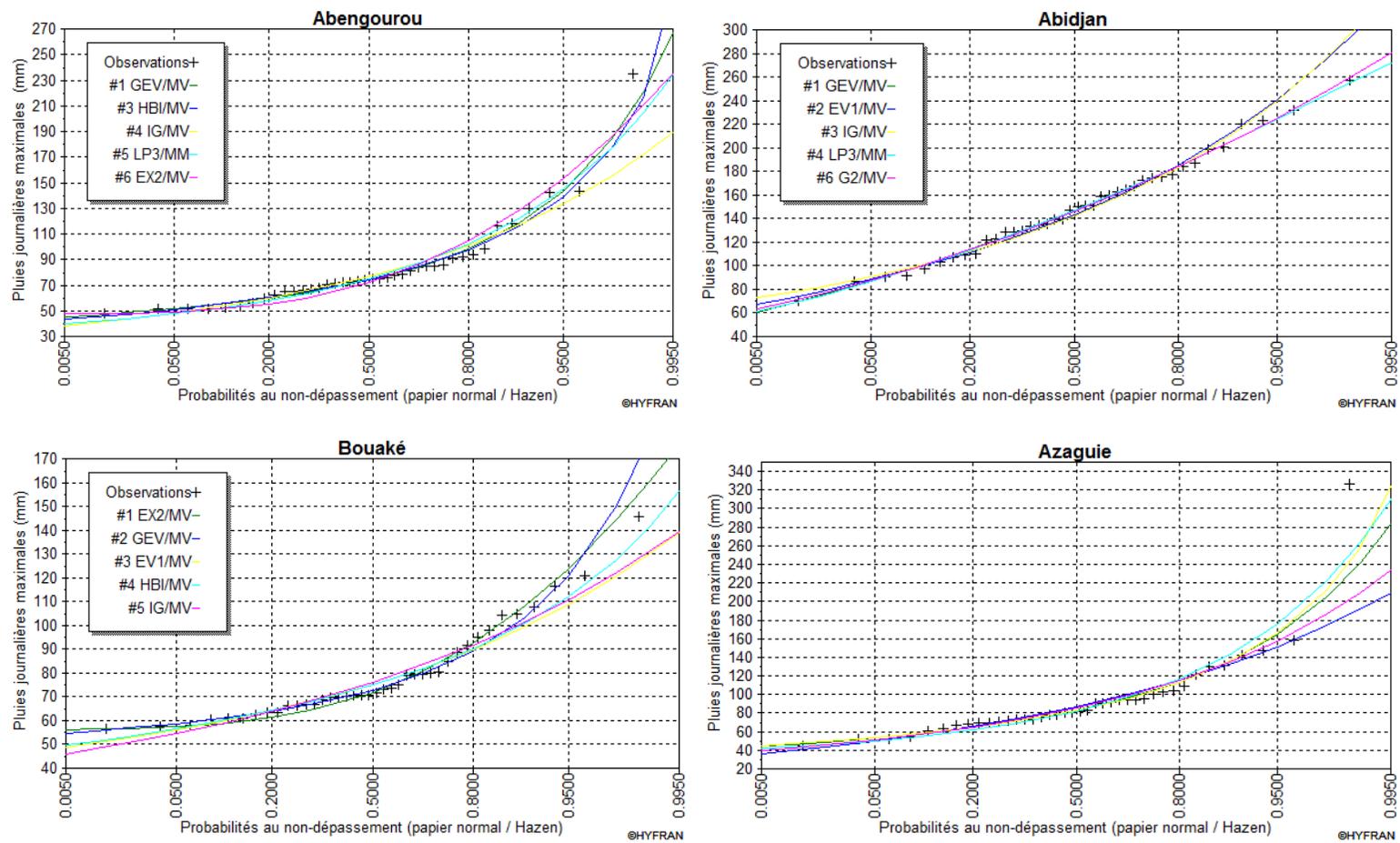
	LOIS	Abengourou	Abidjan	Aobisso	Agboville	Agnibilekro	Azaguié	Bouaflé	Bouaké	Bouna	Boundiali	Dabakala	Daloa	Dimbokro
Class C	Log-normal	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Fréchet (EV2)	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓
	Halphen type B Inverse (HIB)	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓
	Log-Pearson type 3 (LP3)	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓
	Inverse Gamma (IG)	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓
Class E	Exponential distribution	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✗
Class D	Halphen type A	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓
	Gamma	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓
	Pearson type 3	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓
	Halphen type B	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓
	Gumbel	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓
TESTS	Log Normal test	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	JB Test	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Log log plot	C	NA	C	NA	C	C	C	C	C	NA	NA	C	NA
	Mean Excess Function 1		D		E						D	E		D
	Hill ratio plot	D-E	D-E	C	D-E	D-E	C	D-E	C	C	D-E	D-E	D-E	C
Jackson Statistic	C	D-E	C	C	D-E	D-E	C	C	C	D-E	D-E	C	D-E	
RESULTS	Class	C-E	D	C	C-E	C-E	D-C	C-E	C	C	D	E	C-E	D-C
PROPORTIONS	C	67%	0%	100%	33%	33%	67%	67%	100%	100%	0%	0%	67%	33%
	D	0%	100%	0%	0%	0%	33%	0%	0%	0%	100%	0%	0%	67%
	E	33%	0%	0%	67%	67%	0%	33%	0%	0%	0%	100%	33%	0%

	LOIS	Ferké	Gagnoa	Gd Lahou	Guiglo	Lamé	Man	Mankono	Odienné	Sassandra	Seguela	Tabou	Tiassalé	Toulepleu
Class C	Log-normal	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Fréchet (EV2)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Halphen type B Inverse (HIB)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Log-Pearson type 3 (LP3)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Inverse Gamma (IG)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Class E	Exponential distribution	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Class D	Halphen type A	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗
	Gamma	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗
	Pearson type 3	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗
	Halphen type B	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗
	Gumbel	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✓	✗	✗
TESTS	Log Normal test	NA	A	NA	C	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	JB Test	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Log log plot	C	C	C	C	C	C	C	NA	C	C	C	C	C
	Mean Excess Function 1								D					
	Hill ratio plot	C	D-E	D-E	C	C	D-E	C	C	C	D-E	C	C	C
Jackson Statistic	C	D-E	D-E	C	C	D-E	D-E	D-E	D-E	D-E	D-E	D-E	C	C
RESULTS	Class	C	C-E	C-E	C	C	D-C	C-E	D-C	C	C-E	D-C	C	C
PROPORTIONS	C	100%	33%	33%	100%	100%	33%	67%	33%	67%	33%	67%	100%	100%
	D	0%	0%	0%	0%	0%	67%	0%	67%	0%	0%	33%	0%	0%
	E	33%	67%	67%	0%	0%	0%	33%	0%	33%	67%	0%	0%	0%

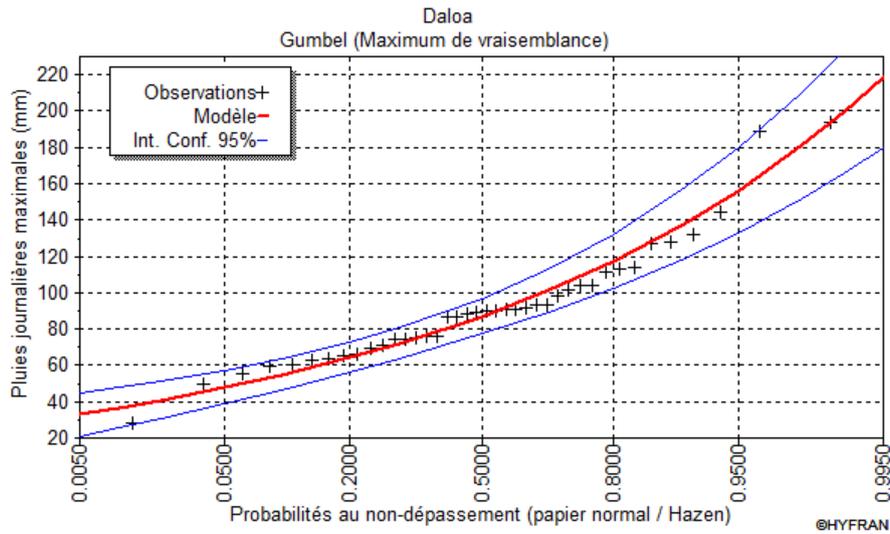
### **5.2.3. Ajustement des pluies journalières maximales par les modèles statistiques retenus**

#### **5.2.3.1. Analyse graphique**

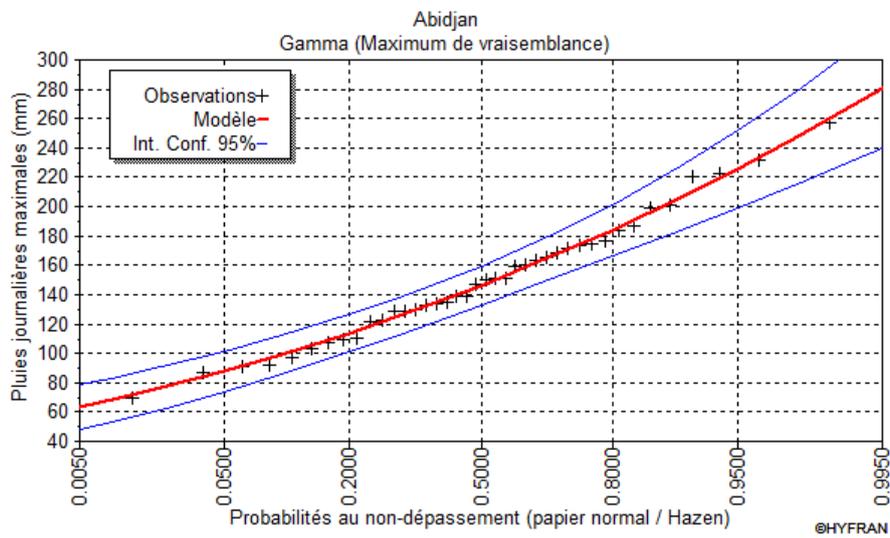
Les résultats d'ajustement des données de pluies extrêmes pour les périodes 1931-1970 et 1971-2010 sont illustrés par les figures 26 à 36. L'examen visuel des différentes figures a permis de montrer que les meilleures lois semblent être celles de Gumbel, Gamma, exponentielle, Gamma inverse et Weibull pour la période 1931-1970. Cependant, pour la période 1971-2010, les meilleures lois semblent être celles de Gamma inverse, Gumbel, Gamma et Exponentielle. Les différentes courbes d'intervalle de confiance construites à 95 % montrent que la majorité des points s'alignent aux droites d'ajustement. L'ajustement est dans son ensemble satisfaisant, car les courbes d'ajustement passent par les points expérimentaux qui mettent en évidence un bon comportement comparé aux autres lois. La loi qui ajuste les pluies journalières maximales annuelles varie selon la période à l'exception des stations d'Abidjan, Agnibilékro, Dabakala, Dimbokro, Grand-Lahou et Aboisso qui sont ajustées par les mêmes lois quelle que soit la période. Ces résultats ont été confirmés par la suite à travers le test de khi-deux et les critères numériques AIC et BIC.



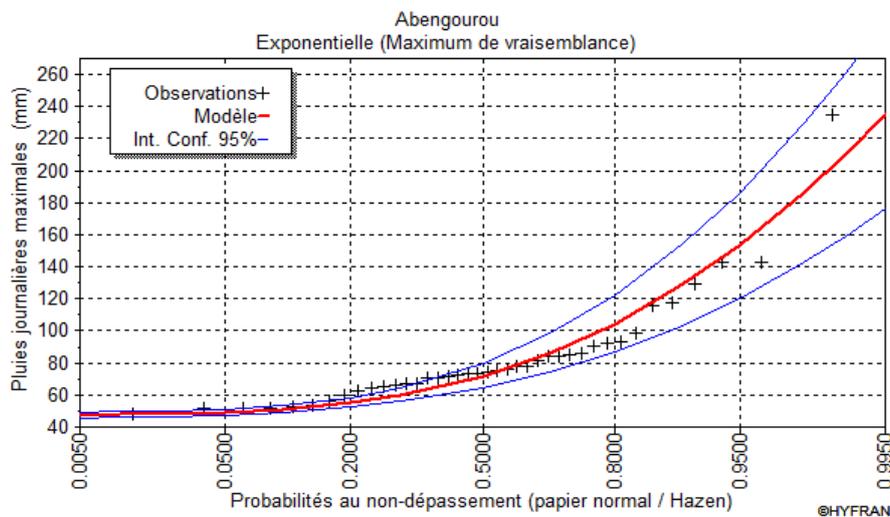
**Figure 26 :** Comparaison des lissages des cinq meilleures lois des pluies journalières maximales de 1931-1970



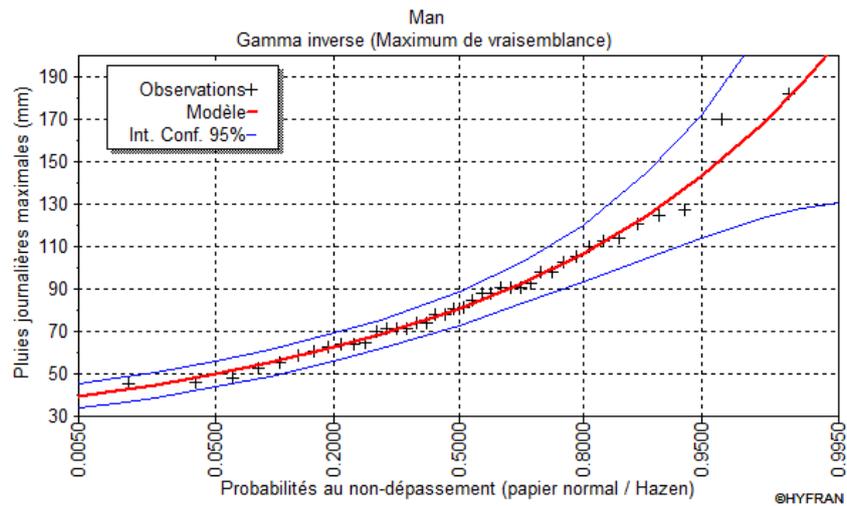
**Figure 27 :** Ajustement des pluies journalières maximales à la loi Gumbel (1931-1970)



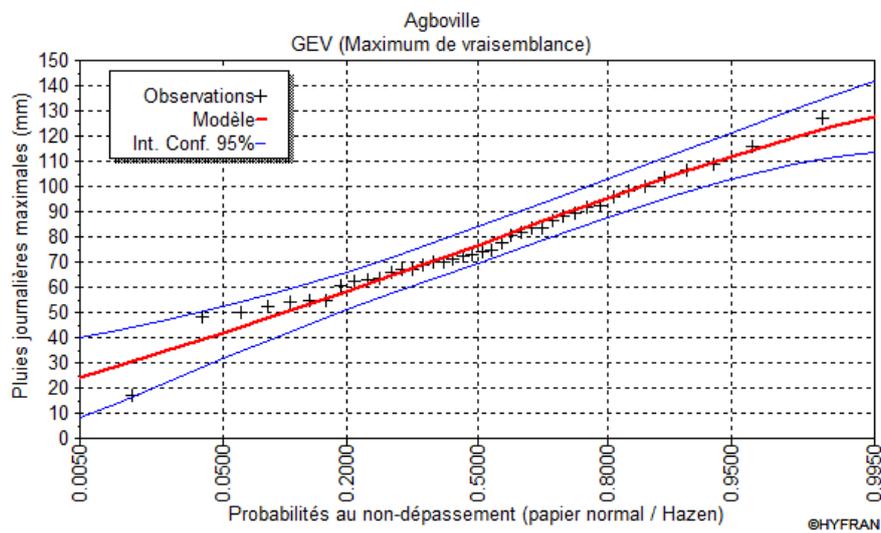
**Figure 28 :** Ajustement des pluies pluies journalières maximales à la loi Gamma (1971-1970)



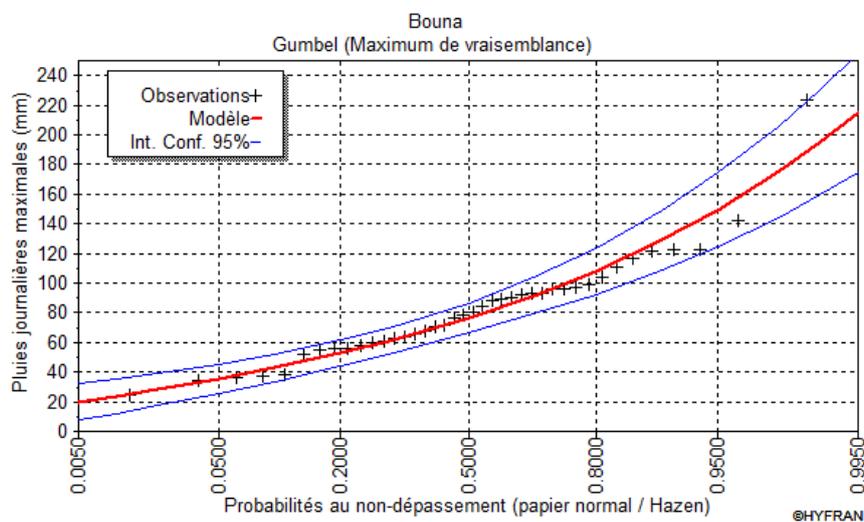
**Figure 29 :** Ajustement des pluies journalières maximales à la loi Exponentielle (1931-1970)



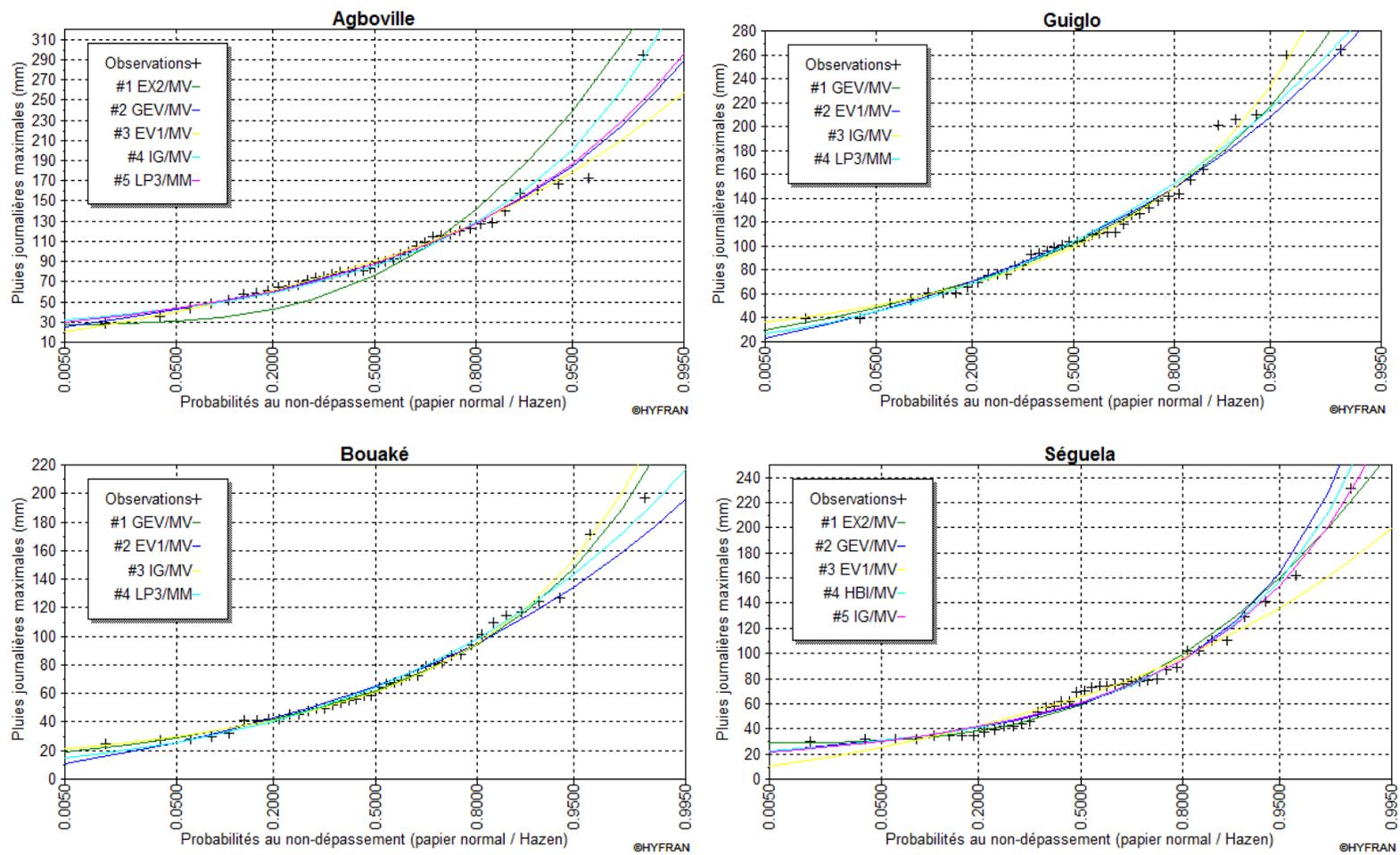
**Figure 30 :** Ajustement des pluies journalières maximales à la loi Gamma inverse (1931-1070)



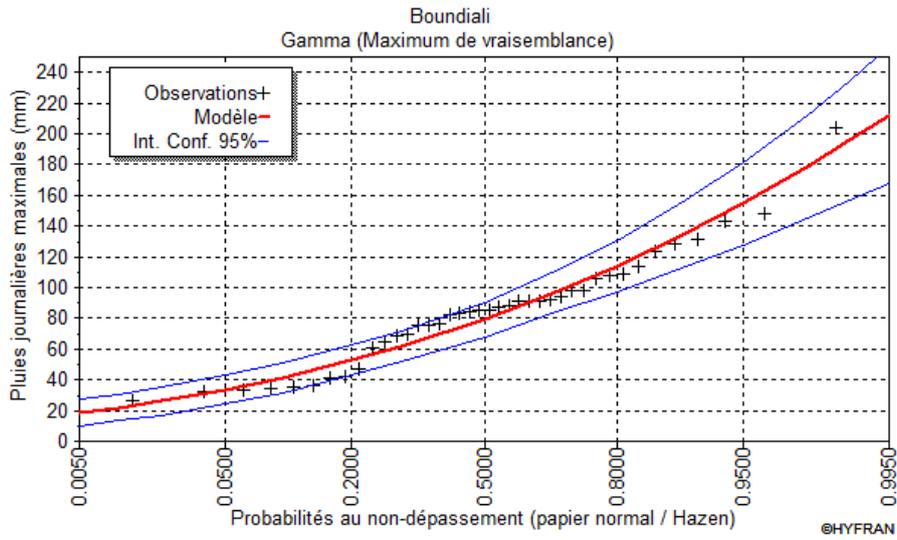
**Figure 31 :** Ajustement des pluies journalières maximales à la loi de Weibull (1931-1970)



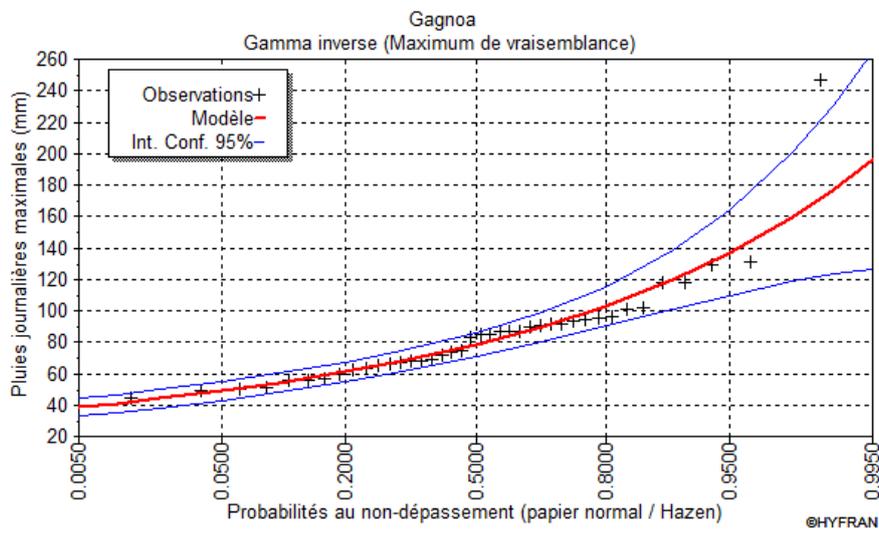
**Figure 32 :** Ajustement des pluies journalières maximales à la loi Gumbel (1971-2010)



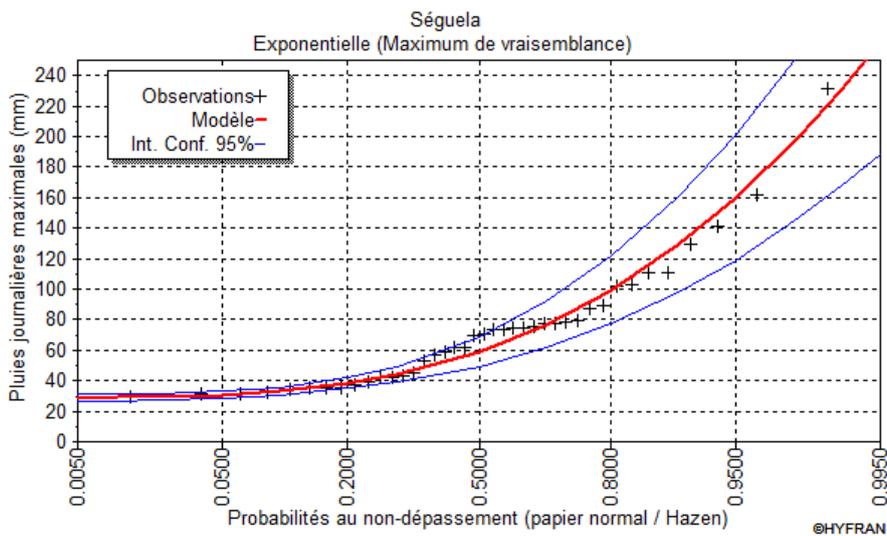
**Figure 33** : Comparaison des lissages des cinq meilleures lois des pluies journalières maximales de 1971-2010



**Figure 34 :** Ajustement des pluies journalières maximales à la loi Gamma (1971-2010)



**Figure 35 :** Ajustement des pluies journalières maximales à la loi Gamma inverse (1971-2010)



**Figure 36 :** Ajustement des pluies journalières maximales à la loi Exponentielle (1971-2010)

### 5.2.3.2. Résultats du test de khi deux

Les résultats du test de khi-deux appliqué aux données de pluies journalières maximales annuelles sont consignés dans les tableaux XIII et XIV.

**Tableau XIII** : Résultats du test de khi-deux sur la période 1931-1970

Stations	Modèles	Khi deux	P-Value
Abengourou	Exponentielle	9,6	0,09
Abidjan	Gamma	0,8	0,98
Aboisso	Gumbel	6,8	0,24
Agboville	GEV	3,2	0,52
Agnibilékro	Gumbel	2,8	0,73
Azaguié	Gamma inverse	5,6	0,35
Bouaflé	Gamma inverse	1,6	0,90
Bouaké	Exponentielle	3,6	0,61
Bouna	Gamma	2	0,85
Dabakala	Gumbel	4,4	0,49
Boundiali	GEV	5,2	0,27
Daloa	Gumbel	7,2	0,21
Dimbokro	Gumbel	3,2	0,67
Ferkéssédougou	Gumbel	4,4	0,49
Gagnoa	Gumbel	2,4	0,79
Grand Lahou	Gumbel	8,8	0,12
Guiglo	Gumbel	2,4	0,79
La Mé	Gumbel	4,8	0,44
Man	Gamma inverse	0,8	0,98
Mankono	Gamma	4,8	0,44
Sassandra	Gamma	8,4	0,14
Séguéla	Gumbel	3,2	0,67
Odienné	Gumbel	0,8	0,98
Tiassalé	Gamma	5,6	0,35
Tabou	Gumbel	6,8	0,24
Toulepleu	Gumbel	4,4	0,49

La qualité de l'ajustement est jugée acceptable pour la totalité des lois qui ajustent les pluies journalières maximales annuelles au seuil de signification de 5%. Le test d'adéquation statistique de « khi deux » est accepté. On constate que les cinq lois à savoir la loi de Gumbel, la loi Gamma, la loi Gamma inverse, la loi Weibull, et la loi exponentielle ajustent au mieux les séries des pluies extrêmes de la période de 1931-1970. En ce qui concerne les séries de la période 1971-2010, elles sont mieux ajustées par quatre lois à savoir la loi Gamma inverse, la loi Gumbel, la loi Gamma et la loi Exponentielle.

**Tableau XIV** : Résultats du test de khi-deux sur la période 1971-2010

Stations	Modèles	Khi deux	P-Value
Abengourou	Gamma inverse	2,8	0,73
Abidjan	Gamma	9,2	0,10
Aboisso	Gumbel	0,8	0,98
Agboville	Gumbel	0,4	1,00
Agnibilékro	Gumbel	1,6	0,90
Azaguié	Gamma	5,2	0,39
Bouaflé	Gamma inverse	2,8	0,73
Bouaké	Gamma inverse	0,8	0,98
Bouna	Gumbel	2	0,85
Dabakala	Gumbel	7,2	0,21
Boundiali	Gamma	12	0,03
Daloa	Gamma inverse	7,6	0,18
Dimbokro	Gumbel	9,6	0,09
Ferkéssédougou	Gamma inverse	1,6	0,90
Gagnoa	Gamma inverse	4,8	0,44
Grand-Lahou	Gumbel	4	0,55
Guiglo	Gumbel	2	0,85
La Mé	Gamma inverse	6,4	0,27
Man	Gamma	10,4	0,06
Mankono	Gumbel	2,4	0,79
Sassandra	Gamma inverse	4,4	0,49
Séguéla	Exponentielle	9,2	0,10
Odienné	Gamma	4	0,55
Tiassalé	Gamma inverse	8	0,16
Tabou	Gamma	13,6	0,02
Toulepleu	Gamma inverse	9,2	0,10

### 5.2.3.3. Résultats des critères AIC et BIC

La meilleure loi à retenir est celle qui a simultanément les plus faibles valeurs au niveau des deux critères AIC et BIC. Les tableaux XV à XVII et XVIII à XXI présentent les critères AIC et BIC des deux périodes (1931-1970 et 1971-2010).

**Tableau XV** : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1931-1970

Stations	Modèles	Nombre de paramètres	BIC	AIC
<b>Abengourou</b>	Exponentielle	2	372,68	369,30
	GEV	3	374,60	369,53
	Gamma inverse	2	374,94	371,57
	Halphen de type B inverse	3	374,96	369,89
	Log-Pearson type III	3	377,08	372,01
	Gumbel	2	377,15	373,77
<b>Abidjan</b>	Gamma	2	418,16	414,78
	Gumbel	2	419,53	416,16
	Gamma inverse	2	420,27	416,89
	Log-Pearson type III	3	421,77	416,71
	GEV	3	421,81	416,74
	Halphen de type B	3	421,84	416,77
	Pearson type III	3	421,85	416,78
	Halphen de type	3	421,85	416,78
<b>Aboisso</b>	Gumbel	2	427,60	424,22
	Gamma inverse	2	428,39	425,01
	GEV	3	430,70	425,63
	Log-Pearson type III	3	431,09	426,02
	Exponentielle	2	436,88	433,50
<b>Agboville</b>	GEV	3	368,27	363,21
	Log-Pearson type III	3	370,00	364,94
	Gumbel	2	373,11	369,74
	Gamma inverse	2	387,29	383,91
	Exponentielle	2	416,48	413,11
<b>Agnibilékro</b>	Gumbel	2	334,73	331,36
	Normale	2	347,20	343,82
<b>Azaguié</b>	Gamma inverse	2	391,37	387,99
	Halphen de type B inverse	3	392,94	387,87
	GEV	3	393,15	388,08
	Log-Pearson type III	3	394,99	389,93
	Gumbel	2	395,36	391,98
	Exponentielle	2	401,48	398,11
<b>Bouaflé</b>	Gamma inverse	2	366,44	363,06
	Gumbel	2	366,50	363,12
	GEV	3	369,28	364,21
	Log-Pearson type III	3	369,34	364,28

**Tableau XVI** : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1931-1970 (suite)

Stations	Modèles	Nombre de paramètres	BIC	AIC
<b>Bouaké</b>	Exponentielle	2	336,74	333,37
	GEV	3	340,90	335,83
	Gumbel	2	342,28	338,91
	Gamma inverse	2	344,66	341,29
	Halphen de type B inverse	3	344,66	339,60
	Log-Pearson type III	3	345,69	340,62
	Normale	2	358,16	354,78
<b>Bouna</b>	Gamma	2	365,39	362,01
	Gumbel	2	365,83	362,45
	Gamma inverse	2	365,88	362,50
	Pearson type III	3	368,06	362,99
	Halphen de type A	3	368,74	363,67
	Log-Pearson type III	3	369,09	364,03
	GEV	3	369,11	364,04
<b>Dabakala</b>	Gumbel	2	364,72	361,34
	Gamma inverse	2	364,77	361,39
	GEV	3	366,95	361,89
	Halphen de type B inverse	3	367,08	362,02
	Log-Pearson type III	3	368,32	363,25
	Exponentielle	2	383,26	379,89
<b>Gagnoa</b>	Gumbel	2	365,95	362,57
	Gamma inverse	2	366,40	363,02
	GEV	3	369,07	364,00
	Log-Pearson type III	3	369,24	364,17
	Exponentielle	2	383,26	379,89
<b>Grand Lahou</b>	Gumbel	2	429,72	426,35
	Gamma inverse	2	430,16	426,78
	GEV	3	433,37	428,30
	Log-Pearson type III	3	433,49	428,42
<b>Guiglo</b>	Gumbel	2	381,60	378,22
	Gamma inverse	2	382,02	378,64
	GEV	3	385,23	380,16
	Log-Pearson type III	3	385,34	380,28
	Exponentielle	2	401,83	398,45
<b>La Mé</b>	Gumbel	2	401,08	397,70
	Exponentielle	2	419,88	416,50
<b>Man</b>	Gamma inverse	2	381,76	378,39
	Gumbel	2	382,20	378,83
	Halphen de type B inverse	3	385,49	380,43
	GEV	3	385,55	380,48
	Log-Pearson type III	3	385,71	380,65

**Tableau XVII** : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1931-1970 (fin)

Stations	Modèles	Nombre de paramètres	BIC	AIC
<b>Mankono</b>	Gamma	2	390,17	386,79
	Gumbel	2	391,88	388,50
	Log-Pearson type III	3	392,76	387,69
	Gamma inverse	2	392,92	389,54
	Halphen de type B	3	393,47	388,40
	GEV	3	393,50	388,43
	Pearson type III	3	393,84	388,78
<b>Sassandra</b>	Gamma	2	438,41	435,03
	Gumbel	2	440,13	436,76
	Log-Pearson type III	3	440,26	435,19
	Halphen de type B	3	441,15	436,08
	GEV	3	441,33	436,26
	Pearson type III	3	441,81	436,74
	Gamma inverse	2	444,18	440,80
<b>Séguéla</b>	Gumbel	2	373,71	370,33
	Gamma inverse	2	373,74	370,36
	Log-Pearson type III	3	376,50	371,44
	GEV	3	376,55	371,48
	Exponentielle	2	385,11	381,73
<b>Odienné</b>	Gumbel	2	380,93	377,55
	Gamma inverse	2	381,01	377,64
	GEV	3	384,31	379,24
	Log-Pearson type III	3	384,49	379,43
	Exponentielle	2	389,06	385,68
<b>Tiassalé</b>	Gamma	2	380,16	376,78
	Gumbel	2	382,23	378,85
	Pearson type III	3	383,02	377,95
	Halphen de type B	3	383,58	378,52
<b>Tabou</b>	Gumbel	2	420,84	417,46
	GEV	3	421,83	416,76
	Gamma inverse	2	421,84	418,47
	Log-Pearson type III	3	421,86	416,80
	Exponentielle	2	438,96	435,58
<b>Toulepleu</b>	Gumbel	2	373,16	369,78
	Gamma inverse	2	373,23	369,85
	GEV	3	376,65	371,58

**Tableau XVIII** : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1971-2010

<b>Stations</b>	<b>Modèles</b>	<b>Nombre de paramètres</b>	<b>BIC</b>	<b>AIC</b>
<b>Abengourou</b>	Gamma inverse	2	408,98	405,60
	Gumbel	2	410,06	406,68
	Exponentielle	2	410,90	407,52
	GEV	3	412,47	407,40
	Log-Pearson type III	3	412,91	407,84
<b>Abidjan</b>	Gamma	2	424,15	420,78
	Gumbel	2	424,41	421,03
	Pearson type III	3	427,61	422,55
<b>Aboisso</b>	Gumbel	2	438,25	434,87
	Gamma inverse	2	438,84	435,46
	GEV	3	441,86	436,79
	Log-Pearson type III	3	441,86	436,79
<b>Agboville</b>	Gumbel	2	415,89	412,51
	Gamma inverse	2	417,15	413,77
	GEV	3	418,93	413,87
	Log-Pearson type III	3	419,41	414,34
	Exponentielle	2	428,03	424,65
<b>Agnibilékro</b>	Gumbel	2	385,35	381,98
	Gamma inverse	2	385,54	382,16
	GEV	3	388,50	383,43
	Log-Pearson type III	3	388,54	383,47
	Exponentielle	2	396,44	393,06
<b>Azaguié</b>	Gamma	2	412,13	408,76
	Gumbel	2	413,03	409,66
	Gamma inverse	2	415,25	411,87
	Pearson type III	3	415,64	410,57
	Log-Pearson type III	3	415,64	410,58
	Halphen de type A	3	415,76	410,69
	Halphen de type B	3	415,78	410,71
	GEV	3	416,25	411,18
<b>Bouaflé</b>	Gamma inverse	2	390,27	386,89
	Gumbel	2	392,65	389,27
	GEV	3	393,81	388,74
	Halphen de type B inverse	3	393,92	388,85
	Log-Pearson type III	3	394,68	389,61
	Exponentielle	2	394,76	391,38

**Tableau XIX** : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1971-2010 (suite 1)

Stations	Modèles	Nombre de paramètres	BIC	AIC
<b>Bouaké</b>	Gamma inverse	2	395,82	392,44
	Gumbel	2	397,91	394,53
	GEV	3	399,61	394,54
<b>Bouna</b>	Log-Pearson type III	3	400,24	395,18
	Gamma inverse	2	416,04	412,66
	Log-Pearson type III	3	417,83	412,77
	GEV	3	418,19	413,13
<b>Dabakala</b>	Gumbel	2	397,81	394,43
	Exponentielle	2	413,60	410,22
<b>Boundiali</b>	Gamma	2	405,56	402,18
	Gumbel	2	406,63	403,25
	Halphen de type B	3	408,94	403,87
	Pearson type III	3	409,22	404,15
<b>Daloa</b>	Gamma inverse	2	384,89	381,51
	Gumbel	2	384,99	381,61
	GEV	3	388,33	383,26
	Log-Pearson type III	3	388,46	383,40
	Exponentielle	2	394,14	390,77
<b>Dimbokro</b>	Gumbel	2	363,20	359,82
	Gamma inverse	2	363,67	360,30
	Log-Pearson type III	3	364,52	359,45
	Halphen de type B	3	364,57	359,51
	GEV	3	364,59	359,53
	Pearson type III	3	364,68	359,61
<b>Ferkéssédougou</b>	Gamma inverse	2	383,46	380,08
	Gumbel	2	386,34	382,96
	Halphen de type B inverse	3	387,17	382,10
	GEV	3	387,45	382,39
	Log-Pearson type III	3	388,56	383,50
<b>Gagnoa</b>	Gamma inverse	2	377,51	374,13
	Gumbel	2	379,37	376,00
	Halphen de type B inverse	3	380,11	375,04
	GEV	3	380,23	375,17
	Log-Pearson type III	3	380,25	375,18
	Exponentielle	2	383,33	379,95
<b>Grand Lahou</b>	Gumbel	2	433,62	430,24
	Gamma inverse	2	437,17	433,79
	GEV	3	437,27	432,20
	Log-Pearson type III	3	437,29	432,22
	Exponentielle	2	452,36	448,98

**Tableau XX** : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1971-2010 (suite 2)

Stations	Modèles	Nombre de paramètres	BIC	AIC
<b>Guiglo</b>	Gumbel	2	428,91	425,53
	Gamma inverse	2	428,99	425,61
	GEV	3	431,92	426,85
	Log-Pearson type III	3	432,21	427,15
<b>La Mé</b>	Gamma inverse	2	411,02	411,02
	GEV	3	411,38	411,38
	Halphen de type B inverse	3	411,70	411,70
	Gumbel	2	413,89	413,89
<b>Man</b>	Gamma	2	396,93	393,56
	Gumbel	2	397,39	394,02
	Pearson type III	3	400,56	395,49
	Halphen de type A	3	400,59	395,53
	Log-Pearson type III	3	400,82	395,76
	GEV	3	400,87	395,80
	Gamma inverse	2	401,08	397,71
<b>Mankono</b>	Gumbel	2	393,50	390,13
	Gamma inverse	2	394,53	391,15
	Log-Pearson type III	3	396,64	391,58
	GEV	3	397,13	392,07
	Exponentielle	2	398,32	394,95
<b>Sassandra</b>	Gamma inverse	2	415,20	411,82
	Gumbel	2	416,72	413,34
	Halphen de type B inverse	3	418,87	413,81
	GEV	3	419,54	414,47
	Log-Pearson type III	3	420,04	414,98
<b>Séguéla</b>	Exponentielle	2	390,01	386,63
	Gamma inverse	2	396,07	392,69
	Halphen de type B inverse	3	399,64	394,57
	GEV	3	400,23	395,17
	Gumbel	2	400,56	397,18
	Log-Pearson type III	3	401,36	396,30

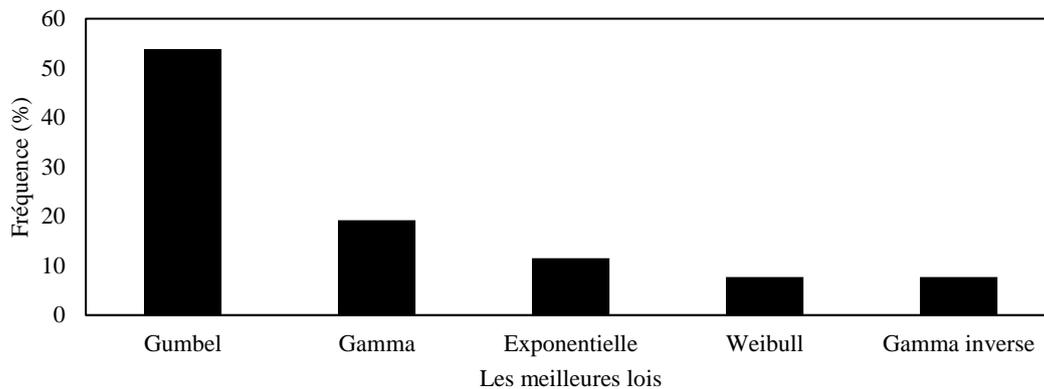
**Tableau XXI** : Critères de comparaison AIC et BIC sur la période 1971-2010 (fin)

Stations	Modèles	Nombre de paramètres	BIC	AIC
<b>Odienné</b>	Gamma	2	385,87	382,50
	Log-Pearson type III	3	386,45	381,38
	Gumbel	2	387,78	384,40
	Halphen de type B	3	388,47	383,41
	GEV	3	388,57	383,50
	Pearson type III	3	389,54	384,47
	Gamma inverse	2	390,85	387,48
<b>Tiassalé</b>	Gamma inverse	2	395,07	391,69
	GEV	3	397,76	392,70
	Gumbel	2	398,49	395,11
	Halphen de type B inverse	3	398,59	393,53
	Log-Pearson type III	3	401,24	396,17
<b>Tabou</b>	Gamma	2	452,11	448,73
	Pearson type III	3	453,56	448,49
	Gumbel	2	453,59	450,21
	Halphen de type A	3	455,54	450,47
	Log-Pearson type III	3	455,58	450,52
	Halphen de type B	3	455,75	450,68
	Gamma inverse	2	457,04	453,66
	GEV	3	457,23	452,17
<b>Toulepleu</b>	Gamma inverse	2	410,35	406,98
	Gumbel	2	413,85	410,47
	GEV	3	413,93	408,87
	Halphen de type B inverse	3	414,09	409,02
	Log-Pearson type III	3	415,47	410,40

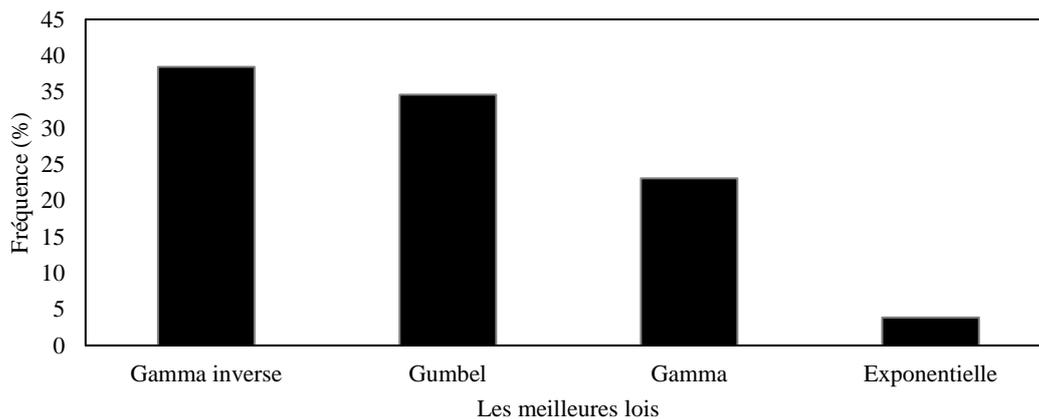
Sur l'ensemble des vingt-six (26) stations, la loi de Gumbel s'ajuste sur quatorze (14) stations soit 54% en revanche les lois Gamma inverse et Weibull s'ajustent chacune sur deux (02) stations soit 8%. Quant aux lois exponentielle et Gamma, elles s'ajustent respectivement sur 11% et 19% des stations. Ainsi, la loi Gumbel s'avère la mieux appropriée pour les ajustements des données de pluies journalières maximales de la période humide (1931-1970), suivie respectivement de la loi Gamma, la loi exponentielle, la loi Gamma inverse et la loi GEV.

En ce qui concerne la période sèche (1971-2010), la loi Gamma inverse s'ajuste au mieux sur dix (10) stations soit 38%, Gumbel s'ajuste sur neuf (09) stations soit 35%, la loi Gamma s'ajuste sur cinq (05) soit 23%. Quant à la loi Exponentielle, elle ne s'ajuste que sur une (01) seule station soit 4%. Ainsi, la loi Gamma inverse (38%) s'avère la mieux appropriée pour les ajustements des données de pluies journalières maximales de la sous série sèche (1971-2010), suivie de la loi Gumbel (35%), la loi Gamma (23%) et enfin la loi Exponentielle (4%).

L'analyse des critères numériques (AIC et BIC) montre une prédominance notable de 54% de la loi de Gumbel (Classe D) au niveau de la période humide (1931-1970) sur les lois Gamma, Gamma Inverse, Weibull et Exponentielle (Figure 37). En revanche, pour la série sèche (1971-2010), il est observé une légère dominance de la loi Gamma Inverse (Classe C) avec une proportion de 38% sur la loi Gumbel (35%) (Figure 38). Quelle que soit la série, la loi de Fréchet n'apparaît pas. La loi de Weibull perd sa représentativité vis à vis de l'ajustement des pluies journalières maximales annuelles des stations d'Agboville et de Boundiali au cours de la période 1931-1970.



**Figure 37** : Fréquences d'apparition des meilleures lois d'ajustement au cours de la période 1931-1970



**Figure 38** : Fréquences d'apparition des meilleures lois d'ajustement au cours de la période 1971-2010

#### 5.2.4. Analyse de la distribution des lois en fonction des zones climatiques

- **Période humide**

Dans le climat équatorial de transition, les lois qui prédominent sont celles de Gumbel avec une proportion d'apparition de 46,15% suivie de la loi Gamma (23,08%) et la loi Exponentielle (15,38%). Les lois Gamma inverse et Weibull apparaissent en dernière position avec un pourcentage de 7,7% chacune. Quant au climat tropical humide, il a la prédominance de la loi Gumbel (50%). Les autres lois se présentent respectivement comme suit : Gamma (25%), Exponentielle et Gamma inverse avec une proportion de 12,5% chacune. Concernant le climat subtropical, deux tiers des stations ont une tendance Gumbel (66,67%). Par contre, seulement une frange (33,33%) est dominée par la loi Weibull. Pour ce qui est du climat de montagnes, il est uniquement dominé par la loi de Gumbel (100%).

- **Période sèche**

Le climat équatorial de transition de la période sèche est dominé respectivement par les lois Gumbel (38,46%), Gamma inverse (30,77), Gamma (23,08) et Exponentielle (7,7%). Dans le climat tropical humide, une prédominance de la loi de Gumbel (50%) est observée, suivie de la loi Gamma inverse (37,5%) et Exponentielle (12,5%). Le climat subtropical quant à lui, est prédominé par la loi Gamma (66,77%) suivi de la loi Gamma inverse (33,33). Enfin, le climat de montagnes présente une apparition en proportion égale (50%) des lois Gamma et Gamma inverse.

L'analyse croisée de ces résultats montre que la loi Weibull perd sa représentativité au niveau de la période sèche. Quelle que soit la période, le climat équatorial de transition est dominé par les mêmes lois. Le climat tropical humide quant à lui, présente également les mêmes lois à l'exception de la loi Gamma qui apparaît uniquement pour la période humide. Pour ce qui est du climat subtropical et celui des montagnes, les lois dominantes varient en fonction de la période.

#### 5.3. ANALYSE DE LA STATIONNARITÉ DES NORMES HYDROLOGIQUES

L'analyse de la stationnarité des normales des pluies annuelles et extrêmes est effectuée sur la période 1931-2010. Elle s'est appuyée sur les sous périodes 1931-1970 (humide) et 1971-2010 (sèche). Les indicateurs de normes sont les normales des pluies annuelles, normales des pluies extrêmes et les quantiles des pluies extrêmes.

### 5.3.1. Analyse des normales des pluies annuelles

Les caractéristiques statistiques des normales des pluies annuelles calculées sur les différentes périodes 1931-1971 et 1971-2010 sont consignées dans le tableau XXII. L'analyse de ce tableau montre que les valeurs des normales oscillent entre 1195,74 et 2333,57 mm avec une moyenne de 1556,75 mm pour la sous période 1931-1970. Quant à la période 1971-2010, les valeurs fluctuent entre 1147,39 et 2267,31 mm avec une moyenne de 1368,39 mm. La normale de la période 1931-1970 est supérieure à la normale de la période 1971-2010.

**Tableau XXII** : Normales des pluies annuelles (1931-2010)

Stations	Normale (mm) 1931-1970	Normale (mm) 1971-2010
Abengourou	1396,37	1293,0
Abidjan	1926,46	1795,34
Aboisso	1900,20	1690,48
Agboville	1464,85	1304,24
Agnibilékro	1195,74	1174,04
Azaguié	1775,25	1548,98
Dimbokro	1272,16	1179,83
Bouaflé	1357,96	1240,12
Bouaké	1797,64	1430,92
Bouna	1274,30	1203,22
Boundiali	1538,54	1261,05
Dabakala	1243,14	1205,01
Daloa	1450,99	1227,18
Ferkéssédougou	1410,22	1147,39
Gagnoa	1487,01	1360,13
Grand Lahou	1688,0	1477,70
Guiglo	1734,34	1497,3
La Mé	1797,64	1430,92
Man	1786,71	1521,4
Mankono	1324,53	1258,18
Sassandra	1769,16	1359,48
Séguéla	1370,76	1218,78
Odienné	1582,32	1369,33
Tabou	2333,57	2267,31
Tiassalé	1369,92	1162,0
Toulepleu	1798,13	1527,39
Minimum	1195,74	1147,39
Maximum	2333,57	2267,31
Moyenne	1556,75	1368,39

### 5.3.2. Analyse des normales des pluies extrêmes

Le tableau XXIII présente les normales des pluies extrêmes de la période humide (1931-1970) et de la période sèche (1971-2010).

**Tableau XXIII** : Normales des pluies extrêmes

Stations	Normale (mm) 1931-1970	Normale (mm) 1971-2010
Abengourou	79,06	85,45
Abidjan	152,67	128,73
Aboisso	114,37	140,87
Agboville	73,70	97,61
Agnibilékro	72,35	71,63
Azaguié	91,40	103,97
Bouaflé	85,60	81,46
Bouake	77,46	71,57
Bouna	72,29	85,88
Boundiali	88,54	84,67
Dabakala	82,75	79,40
Daloa	93,99	80,73
Dimbokro	73,10	77,27
Ferkéssédougou	89,53	66,06
Gagnoa	73,84	84,27
Grand-Lahou	149,70	127,57
Guiglo	87,11	113,22
La Mé	133,82	120,09
Man	82,54	81,08
Mankono	93,89	79,19
Odienné	91,48	72,65
Sassandra	146,11	104,02
Séguéla	85,05	72,44
Tabou	151,15	131,80
Tiassalé	81,71	87,03
Toulepleu	88,56	95,33
<b>Minimum</b>	<b>72,29</b>	<b>66,06</b>
<b>Maximum</b>	<b>152,67</b>	<b>140,87</b>
<b>Moyenne</b>	<b>96,61</b>	<b>93,23</b>

Il ressort de l'analyse du tableau XXIII que les normales des pluies extrêmes évaluées sur la période 1931-1970 varient entre 72,29 et 152,67 mm avec une moyenne de 96,61 mm. Pour ce qui est de la période 1971-2010, les valeurs des normales oscillent entre 66,06 et 140,87 mm avec une moyenne de 93,23 mm. Les caractéristiques statistiques (minimum, maximum et

moyenne) des normales des pluies extrêmes de la période humide (1931-1970) restent supérieures à celles de la période sèche (1971-2010).

### ***5.3.3. Analyse des quantiles des pluies extrêmes***

Les quantiles ont été évalués sur les sous-périodes 1931-1970 et 1971-2010 à travers six (6) périodes de retour ( $T = 2, 5, 10, 20, 50$  et  $100$  ans) (tableaux XXIV et XXV).

Pour la période 1931-1970, les quantiles des pluies extrêmes de période de retour de 2 ans sont compris entre 69,9 mm (Agnibilékro) et 146 mm (Tabou) avec une moyenne de 91,49 mm. Ceux de la période de retour de 5 ans oscillent entre 83,8 (Agnibilékro) et 190 mm (Sassandra) avec une moyenne de 118,85 mm. Quant aux quantiles de la période de retour de 10 ans, ils vont de 92,9 mm (Agnibilékro) à 220 mm (Sassandra) avec une moyenne de 137,08 mm. Pour ce qui concerne les quantiles évalués sur la période de retour de 20 ans, ils varient entre 102 mm (Agnibilékro) et 248 mm (Sassandra) avec une moyenne 137,08 mm. Concernant les quantiles de période de retour de 50 ans, ils oscillent entre 113 mm (Agnibilékro) et 281 mm (Tabou) avec une moyenne 281 mm. Enfin, les quantiles de période de retour 100 ans varient entre 122 mm (Agnibilékro) et 310 mm (Grand Lahou).

Les quantiles vicennaux calculés à partir de la période de 1971-2010 vont de 57,40 (Ferkéssédougou) à 131 mm (Aboisso) avec une moyenne de 84,85 mm. Les quantiles quinquennaux varient entre 85,7 mm (Ferkéssédougou) et 184 mm (Tabou) avec une moyenne de 119,32. Concernant les quantiles décennaux, ils oscillent entre 108 (Ferkéssédougou) et 225 mm (Tabou) avec une moyenne de 143,42 mm. Quant aux quantiles bicennaux, ils sont compris entre 123 (Dimbokro) et 263,0 mm (Tabou) avec une moyenne de 166,96. Pour ce qui concerne les quantiles de pluies cinquantennaux, ils varient entre 140 (Dimbokro) et 310 mm (Tabou) avec une moyenne de 198,42 mm. Enfin, les quantiles centennaux oscillent entre 153 (Dimbokro) et 344 mm (Tabou) avec une moyenne de 222,79 mm.

L'analyse des quantiles montre que les quantiles de la période 1931-1970 sont supérieurs aux quantiles de la période 1971-2010 pour une même période de retour. En effet, les quantiles de pluie calculés à partir de la période 1931-1970 et ceux de la période de 1971-2010 augmentent avec les périodes de retour.

**Tableau XXIV** : Quantiles de pluies extrêmes de la période 1931-1970

Stations	Quantiles (mm)					
	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
<b>Abengourou</b>	71,9	104	129	153	186	210
<b>Abidjan</b>	146	184	206	225	249	265
<b>Aboisso</b>	111	155	185	213	250	278
<b>Agboville</b>	76,7	95,3	105	112	120	124
<b>Agnibilékro</b>	69,9	83,8	92,9	102	113	122
<b>Azaguié</b>	85,3	115	136	157	186	210
<b>Bouaflé</b>	79,6	101	114	128	146	159
<b>Bouaké</b>	71,8	92,5	108	124	144	160
<b>Bouna</b>	73,4	93	104	115	127	135
<b>Boundiali</b>	82,8	108	132	164	223	285
<b>Dabakala</b>	78,7	98,7	112	125	141	153
<b>Daloa</b>	86,9	117	137	156	181	200
<b>Dimbokro</b>	71,9	93,6	108	122	140	153
<b>Ferkessedougou</b>	83,6	107	122	137	156	171
<b>Gagnoa</b>	73,2	94,6	109	122	140	153
<b>Grand Lahou</b>	136	182	213	243	281	310
<b>Guiglo</b>	86	112	129	145	166	182
<b>La Mé</b>	128	161	183	204	231	252
<b>Man</b>	80,8	107	125	143	167	187
<b>Mankono</b>	90,5	117	134	148	165	177
<b>Odienné</b>	89,3	115	132	148	169	185
<b>Sassandra</b>	139	190	220	248	281	305
<b>Séguéla</b>	83,7	107	123	138	157	172
<b>Tabou</b>	146	189	218	246	281	308
<b>Tiassalé</b>	86,6	110	124	136	151	162
<b>Toulepleu</b>	85,1	108	124	139	158	172
<b>Minimum</b>	69,9	83,8	92,9	102	113	122
<b>Maximum</b>	146	190	220	248	281	310
<b>Moyenne</b>	91,49	118,85	137,08	154,79	178,08	196,46

**Tableau XXV** : Quantiles des pluies extrêmes de la période 1971-2010

Stations	Quantiles (mm)					
	T=2	T=5	T=10	T=20	T=50	T=100
Abengourou	73,30	113,00	145	181,0	235,0	284
Abidjan	123,00	165,00	191	213,0	241,0	260
Aboisso	131,00	182,00	217	249,0	292,0	323
Agboville	89,80	128,00	154	178,0	210,0	234
Agnibilékro	66,30	92,60	110	127,0	148,0	165
Azagué	98,90	135,00	158	178,0	202,0	219
Bouaflé	86,60	103,00	125	148,0	182,0	209
Bouaké	60,90	94,60	122	153,0	201,0	243
Bouna	78,10	116,00	141	166,0	197,0	220
Boundiali	79,20	114,00	135	154,0	178,0	196
Dabakala	76,60	108,00	129	149,0	175,0	195
Daloa	74,00	102,00	122	142,0	171,0	194
Dimbokro	74,10	95,20	109	123,0	140,0	153
Ferkéssédougou	57,40	85,70	108	132,0	168,0	200
Gagnoa	78,30	103,00	120	137,0	160,0	177
Grand Lahou	118,00	168,00	200	231,0	272,0	302
Guiglo	104,00	149,00	179	208,0	245,0	272
La Mé	110,00	148,00	175	202,0	239,0	268
Man	76,50	107,00	126	143,0	163,0	178
Mankono	73,60	103,00	123	142,0	166,0	185
Odienné	68,80	95,30	111	126,0	144,0	156
Sassandra	92,60	134,00	166	199,0	248,0	289
Séguéla	59,00	99,20	130	160,0	200,0	231
Tabou	120,00	184,00	225	263,0	310,0	344
Tiassalé	77,60	109,00	133	158,0	193,0	222
Toulepleu	85,10	108,00	124	139,0	158,0	172
Minimum	57,40	85,7	108	123	140	153
Maximum	131	184	225	263,0	310	344
Moyenne	84,85	119,32	143,42	166,96	198,42	222,79

#### 5.3.4. Détermination des matrices binaires des normales

L'analyse des écarts relatifs absolus des normales des pluies annuelles et extrêmes a permis de dégager les matrices binaires des normales présentées dans les tableaux XXVI et XXVII. Il ressort de l'analyse de ces matrices qu'il y a une représentation des deux codes (0,1). L'analyse de la matrice des normales des pluies annuelles montre que toutes les valeurs sont supérieures à 1%, soit 100% des stations. Pour ce qui concerne les normales des pluies journalières maximales annuelles, cinquante valeurs (50) sont supérieures à 1%, soit 96,15% des stations.

Cependant, seulement une seule station (Agnibilékro) présente des valeurs inférieures à 1%, soit 3,85%. Le nombre de valeurs supérieures à 1% étant prédominant alors l'écart entre les différentes normales est significatif. Il en résulte donc que les normales calculées sur les périodes humide (1931-1970) et sèche (1971-2010) ne sont pas stationnaires.

**Tableau XXVI : Matrice binaire des normales des pluies annuelles**

Stations	Années	1931-1970	1971-2010	Stations	1931-1970	1971-2010
<b>Abengourou</b>	1931-1970	1	0	<b>Ferkéssédougou</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Abidjan</b>	1931-1970	1	0	<b>Gagnoa</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Aboisso</b>	1931-1970	1	0	<b>Grand Lahou</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Agboville</b>	1931-1970	1	0	<b>Guiglo</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Agnibilékro</b>	1931-1970	1	0	<b>La Mé</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Azaguié</b>	1931-1970	1	0	<b>Man</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Bouaflé</b>	1931-1970	1	0	<b>Mankono</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Bouaké</b>	1931-1970	1	0	<b>Odienné</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Bouna</b>	1931-1970	1	0	<b>Sassandra</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Boundiali</b>	1931-1970	1	0	<b>Séguéla</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Dabakala</b>	1931-1970	1	0	<b>Tabou</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Daloa</b>	1931-1970	1	0	<b>Tiassalé</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Dimbokro</b>	1931-1970	1	0	<b>Toulepleu</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1

**Tableau XXVII : Matrice binaire des normales des pluies extrêmes**

Stations	Années	1931-1970	1971-2010	Stations	1931-1970	1971-2010
<b>Abengourou</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Ferkéssédougou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Abidjan</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Gagnoa</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Aboisso</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Grand Lahou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Agboville</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Guiglo</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Agnibilékro</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>La Mé</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>1</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Azaguié</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Man</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Bouaflé</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Mankono</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouaké</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Odienné</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouna</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Sassandra</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Boundiali</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Séguéla</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Dabakala</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Tabou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Daloa</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Tiassalé</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Dimbokro</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Toulepleu</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>

### 5.3.5. Détermination des matrices binaires des quantiles des pluies extrêmes

Les écarts relatifs absolus des quantiles des pluies journalières maximales annuelles sont présentés dans les tableaux XXVIII à XXXIII.

**Tableau XXVIII :** Matrice binaire des quantiles des pluies extrêmes de période de retour de 2 ans

Stations	Années	1931-1970	1971-2010	Stations	1931-1970	1971-2010
<b>Abengourou</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Ferkéssédougou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Abidjan</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Gagnoa</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Aboisso</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Grand Lahou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Agboville</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Guiglo</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Agnibilékro</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>La Mé</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Azaguié</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Man</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouaflé</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Mankono</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouaké</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Odienné</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouna</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Sassandra</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Boundiali</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Séguéla</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Dabakala</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Tabou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Daloa</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Tiassalé</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Dimbokro</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Toulepleu</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>

**Tableau XXIX** : Matrice binaire des quantiles des pluies extrêmes de période de retour de 5 ans

Stations	Années	1931-1970	1971-2010	Stations	1931-1970	1971-2010
<b>Abengourou</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Ferkéssédougou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Abidjan</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Gagnoa</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Aboisso</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Grand-Lahou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Agboville</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Guiglo</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Agnibilékro</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>La Mé</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Azaguié</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Man</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Bouaflé</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Mankono</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouaké</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Odienné</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouna</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Sassandra</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Boundiali</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Séguéla</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Dabakala</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Tabou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Daloa</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Tiassalé</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Dimbokro</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Toulepleu</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>

**Tableau XXX** : Matrice binaire des quantiles des pluies extrêmes de période de retour de 10 ans

Stations	Années	1931-1970	1971-2010	Stations	1931-1970	1971-2010
<b>Abengourou</b>	1931-1970	1	0	<b>Ferkessedougou</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Abidjan</b>	1931-1970	1	0	<b>Gagnoa</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Aboisso</b>	1931-1970	1	0	<b>Grand-Lahou</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Agboville</b>	1931-1970	1	0	<b>Guiglo</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Agnibilékro</b>	1931-1970	1	0	<b>La Mé</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Azaguié</b>	1931-1970	1	0	<b>Man</b>	1	1
	1971-2010	0	1		1	1
<b>Bouaflé</b>	1931-1970	1	0	<b>Mankono</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Bouaké</b>	1931-1970	1	0	<b>Odienné</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Bouna</b>	1931-1970	1	0	<b>Sassandra</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Boundiali</b>	1931-1970	1	0	<b>Séguéla</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Dabakala</b>	1931-1970	1	0	<b>Tabou</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Daloa</b>	1931-1970	1	0	<b>Tiassalé</b>	1	0
	1971-2010	0	1		0	1
<b>Dimbokro</b>	1931-1970	1	1	<b>Toulepleu</b>	1	0
	1971-2010	1	1		0	1

**Tableau XXXI** : Matrice binaire des quantiles des pluies extrêmes de période de retour de 20 ans

Stations	Années	1931-1970	1971-2010	Stations	1931-1970	1971-2010
<b>Abengourou</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Ferkessedougou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Abidjan</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Gagnoa</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Aboisso</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Grand Lahou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Agboville</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Guiglo</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Agnibilékro</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>La Mé</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Azaguié</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Man</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Bouaflé</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Mankono</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouaké</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Odienné</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouna</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Sassandra</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Boundiali</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Séguéla</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Dabakala</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Tabou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Daloa</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Tiassalé</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Dimbokro</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>Toulepleu</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>1</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>

**Tableau XXXII** : Matrice binaire des quantiles des pluies extrêmes de période de retour de 50 ans

Stations	Années	1931-1970	1971-2010	Stations	1931-1970	1971-2010
<b>Abengourou</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Ferkessedougou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Abidjan</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Gagnoa</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Aboisso</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Grand Lahou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Agboville</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Guiglo</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Agnibilékro</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>La Mé</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Azaguié</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Man</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouaflé</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Mankono</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Bouaké</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Odienné</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouna</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Sassandra</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Boundiali</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Séguéla</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Dabakala</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Tabou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Daloa</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Tiassalé</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Dimbokro</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>Toulepleu</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>1</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>

**Tableau XXXIII :** Matrice binaire des quantiles des pluies extrêmes de période de retour de 100 ans

Stations	Années	1931-1970	1971-2010	Stations	1931-1970	1971-2010
<b>Abengourou</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Ferkéssédougou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Abidjan</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Gagnoa</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Aboisso</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Grand Lahou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Agboville</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Guiglo</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Agnibilékro</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>La Mé</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Azaguié</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Man</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouaflé</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Mankono</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouaké</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Odienné</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Bouna</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Sassandra</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Boundiali</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Séguéla</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Dabakala</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Tabou</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Daloa</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>Tiassalé</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>0</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>
<b>Dimbokro</b>	1931-1970	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>Toulepleu</b>	<b>1</b>	<b>0</b>
	1971-2010	<b>1</b>	<b>1</b>		<b>0</b>	<b>1</b>

**Tableau XXXIV : Pourcentages des codes binaires des différentes sous-périodes**

	<b>T2</b>	<b>T5</b>	<b>T10</b>	<b>T20</b>	<b>T50</b>	<b>T100</b>
<b>Supérieur à 1%</b>	100%	92,31%	92,31%	88,46%	92,31%	96,15%
<b>Inférieur à 1%</b>	0%	7,69%	7,69%	11,54%	7,69%	3,85%

Il ressort de l'analyse de ces matrices (tableau XXXIV) qu'il y a une représentation des deux codes (0,1). Pour les périodes de retour de 2 ans, 100% des valeurs sont supérieures à 1%. Quant à la période de retour de 5 ans, 10 ans et 50 ans, 92,31% des valeurs sont supérieures à 1%, cependant 7,69% restent inférieures à 1%. Concernant, les périodes de retour de 20 ans, 88,46% des valeurs sont supérieures à 1% et 11,54% sont inférieures. Pour les périodes de retour de 100 ans, 96,15% des valeurs sont supérieures à 1% contre 3,85% inférieures à 1%. Les stations de Man et Dimbokro restent atypiques pour les périodes de retour allant de 5 à 100 ans. En effet, la station de Dimbokro présente des quantiles de pluies extrêmes plus ou moins stationnaires pour les périodes de retour supérieures ou égale à 5 ans ( $T = 5, 10, 20, 50$  et 100 ans). Tandis que la station de Man affiche des quantiles plus ou moins stationnaires pour les périodes de retour allant de 5 à 20 ans ( $T = 5, 10$  et 20 ans).

Le nombre de valeurs supérieures à 1% étant très important alors l'écart entre les différents quantiles est significatif. Il convient de déduire que les quantiles des pluies journalières maximales annuelles calculés sont donc non stationnaires.

#### 5.4. DISCUSSION

Le test d'hypothèse (Student) effectué sur les séries pluviométriques annuelles a confirmé l'existence de rupture en 1970 sur 81% des stations. De plus, les écarts calculés ont montré une baisse pluviométrique après les années 1970, donc la période 1931-1970 est relativement humide que la période 1971-2010 qui est sèche. Quant aux déficits pluviométriques obtenus, ils ne sont pas homogènes sur l'ensemble de la série (1931-2010). Les plus faibles déficits pluviométriques ont été enregistrés dans le Sud du pays (Abengourou, Abidjan, Agnibilékro, Dimbokro, Gagnoa et Tabou) avec des valeurs comprises entre 1,81% et 8,52%. En revanche les plus forts déficits ont été enregistrés dans le Nord et au Centre (Bouaké, Ferkessedougou, Boundiali) avec des valeurs comprises entre 18,04% et 20,40%. De façon générale, les valeurs des déficits pluviométriques sont comprises entre 1,82% et 23,16%. Les indices de précipitation déterminés ont confirmé que l'année 1970 est l'année de rupture. Au vu de toutes ces analyses, l'année 1970 peut être considérée comme une année de rupture en Côte d'Ivoire. Une bonne concordance du test de Student et des méthodes appliquées (écarts de variation et SPI) a été

mise en évidence. En effet, la rupture obtenue en 1970 dans cette étude est en accord avec plusieurs travaux réalisés en Côte d'Ivoire (Kouassi et *al.*, 2010 ; Soro et *al.*, 2011 ; Soro et *al.*, 2013, Kouassi et *al.*, 2017). Les écarts de variation de la présente étude et ceux obtenus par Kouassi et *al.* (2017) se chevauchent. Ses valeurs étaient comprises entre 15 et 30% sur le bassin versant de Marahoué (Bandama).

On constate donc une tendance à la baisse des déficits et partant une reprise des précipitations en Côte d'Ivoire.

Les résultats des tests préalables à l'analyse fréquentielle indiquent que les hypothèses d'application à l'analyse fréquentielle sont vérifiées sur toutes les séries, à l'exception de la station d'Odienné. Les séries des pluies journalières maximales annuelles sont donc constituées par des valeurs indépendantes, homogènes et stationnaires. Cet état de chose pourrait s'expliquer par la bonne qualité des données utilisées. L'analyse fréquentielle effectuée montre qu'il serait difficile de choisir graphiquement la meilleure loi de probabilité, d'où l'utilisation des critères de comparaison (test de khi-deux, critères AIC et BIC). Le test de Khi-deux appliqué aux pluies journalières maximales annuelles montre que les lois Gumbel, Gamma inverse, Gamma, exponentielle et Weibull, ont été acceptées au seuil de 5%, ce qui vient confirmer les résultats obtenus par les représentations graphiques. Ainsi, la meilleure loi qui ajuste au mieux les pluies journalières maximales de la période humide (1931-1970) avec une marge d'erreur de 1 à 5% est la loi de Gumbel (54%) et est suivie par la loi Gamma (19%) et exponentielle (11%). Ensuite, viennent la loi Gamma inverse et la loi Weibull (8%) qui sont les moins efficaces. Par ailleurs, pour la seconde série qui est la période sèche (1971-2010), le meilleur modèle adapté est la loi Gamma inverse (38%) suivie par la loi de Gumbel (35%). La loi Gamma (23%) et exponentielle (4%) viennent en troisième et quatrième positions. Cette différence de lois au niveau des deux périodes s'explique par le fait qu'elles n'ont pas les mêmes caractères climatiques. Gamma inverse (38%) suivie par la loi de Gumbel (35%). La loi Gamma (23%) et exponentielle (4%) viennent en troisième et quatrième positions. En considérant les vingt-six (26) séries de pluies journalières maximales annuelles étudiées (1931-1970), 54% suivent la loi de Gumbel. Cela montre bien que la loi généralisée des valeurs extrêmes de type I (loi de Gumbel) prédomine en Côte d'Ivoire mais n'est pas suffisante à elle seule en matière de quantification du risque associé aux pluies extrêmes. Ainsi, pour la plupart des stations (80%), les meilleures lois varient de la période humide à la période sèche à l'exception des stations d'Agnibilékro, Aboisso, Dabakala et Grand-Lahou dont les données sont ajustées par la même loi (Gumbel) et de la station d'Abidjan qui s'ajuste avec la loi Gamma quelle que soit la série. Dans l'ensemble, les lois ne sont pas spécifiques à une zone climatique.

Dans la frange littorale, dominée par le régime équatorial de transition, chaque distribution statistique a au moins une zone de validité. Le même constat se dégage au Centre de la Côte d'Ivoire. La loi Gamma, Gamma inverse et Gumbel s'appliquent mieux au Sud et au Centre, mais également au Nord (précisément Boundiali) et à l'Ouest (précisément à Man et Toulepleu). L'analyse statistique a révélé qu'aucune série des pluies journalières maximales étudiée ne peut être assimilée à une réalisation d'une loi de Pearson type III. La loi exponentielle, quoi que faiblement représentée est néanmoins validée dans la zone de couverture de la station d'Abengourou, Bouaké, Tabou et Séguéla. Parmi les différentes meilleures lois, certaines lois sont différentes des lois déjà trouvées dans les études antérieures comme la loi Gamma inverse, la loi Gamma, la loi Exponentielle et la loi Weibull. Cela est dû à l'utilisation de l'outil SAD dans cette présente étude qui s'avère rigoureux en ce qui concerne la classification des lois. En effet, il a d'abord montré les meilleures classes, lesquelles ont permis de voir la prédominance de certaines lois qui ne sont pas habituelles. Agué et Afouda (2015) ont montré que l'usage d'une loi (Gumbel) pourrait ne pas permettre une bonne estimation des quantiles des pluies journalières. Ces résultats cadrent bien avec ceux de la présente étude. En ce qui concerne la station d'Abidjan, certains auteurs tels que Goula et al. (2010), Agué et Afouda (2015) sont parvenus à la conclusion selon laquelle le modèle de Gumbel a été plus performant que le modèle Lognormal. Goula et al. (2010) ont conclu, au cours de leur étude portant sur 47 postes pluviométriques ivoiriens avec des données de pluies maximales annuelles couvrant la période 1947-1993, que la loi de Gumbel et la loi Lognormale ajustent mieux les pluies maximales annuelles. Pour la même station d'Abidjan, Soro (2011) a montré à travers son étude que les données de cette station suivent la loi de Gumbel. La différence des résultats obtenus pour la même station pourrait se justifier par l'écart entre les périodes d'étude. Cependant, une conclusion unique est difficile à établir car les résultats diffèrent suivant les séries étudiées (Muller, 2006). Les répartitions des lois en fonction des zones climatiques sont différentes de celles obtenues par Kamagaté (2015) dont les études ont été menées sur la période 1970-2010. Pour lui, la loi Lognormale s'applique bien dans le Nord. Par ailleurs, Hamzaoui (2016) a effectué l'analyse statistique des pluies journalières maximales en utilisant le Système d'Aide à la Décision (SAD) et a obtenu la loi GEV comme meilleure loi. Ce qui se rapproche plus de nos résultats car elle figure parmi les meilleures lois obtenues dans cette étude. Pour les mêmes auteurs, le choix de la période de référence mais surtout le contexte climatique (période humide, période sèche) impacte donc les quantiles des pluies journalières maximales annuelles. Cette variation des meilleurs modèles en fonction de la série est due aux changements climatiques constatés.

Les écarts relatifs évalués au niveau des normales des pluies annuelles des 26 stations étudiées montrent que toutes les valeurs sont supérieures à 1%. Pour ce qui concerne les normales de pluies journalières maximales annuelles, 96,15% sont supérieures à 1%. L'analyse des écarts absolus relatifs entre les quantiles de pluies journalières maximales annuelles montrent que les plus faibles écarts sont obtenus avec les périodes de retour inférieures ou égales à 10 ans et sont compris entre 0,92% et 46,67%. Cependant, pour les périodes de retour supérieures à 10 ans, les écarts varient entre 0,61% et 88,71%. Ces principaux résultats montrent que les normes étudiées (normales de pluies annuelles, normales de pluies journalières maximales annuelles et quantiles de pluies journalières maximales annuelles) sont non stationnaires à cause de l'instabilité du climat.

Selon les travaux de Nassa (2017), les écarts relatifs absolus entre les différentes normales des pluies journalières maximales annuelles (1931-1960, 1941-1970, 1951-1980 et 1961-1990) de la station de Port-Bouët (Abidjan) indiquent plusieurs regroupements. D'abord, il est mis en évidence un premier groupe caractérisé par des écarts relatifs absolus inférieurs à 5% entre les normales des périodes 1931-1961, 1941-1970, 1951-1980 et 1961-1990. Ensuite, un deuxième regroupement est observé et caractérisé par des écarts relatifs absolus inférieurs à 5% entre les normales des périodes 1971-2000 et 1981-2020. Enfin, le dernier groupe est marqué par une seule normale (1991-2020), avec des écarts relatifs absolus supérieurs à 5% avec les autres normales. Il est mis en évidence des différences significatives entre d'une part les normales de la période 1931-1990 et d'autre part, les normales des périodes 1971-2020 et 1991-2020. Les écarts relatifs absolus entre les différentes normales des pluies journalières maximales annuelles et la moyenne de la série entière indiquent que seules les normales des périodes 1961-1990 et 1971-2000 ont des valeurs d'écarts relatifs inférieures à 5%.

Sighomnou (2004) a mis en évidence au Cameroun les écarts relatifs de cumuls pluviométriques annuels entre la période de référence (1951-1980) et les autres (1941-1970, 1951-1980, 1961-1990, 1971-2000), y compris la valeur moyenne calculée sur la base de la période d'observation 1941-2000. Les écarts entre les normales 1941-1970 et 1951-1980 sont relativement modestes. Ils sont compris entre -5 et +5% sur la quasi-totalité du territoire camerounais. La marge d'erreur qu'impliquerait l'utilisation de l'une à la place de l'autre est relativement faible. On peut en conclure qu'elles sont équivalentes. Entre les normales 1961-1990 et 1951-1980, les écarts deviennent de plus en plus importants, notamment dans la partie nord du pays où ils peuvent atteindre 20% (100 à 200 mm d'écart selon les régions). Les marges d'erreur deviennent de plus en plus importantes et l'interchangeabilité des normales présente un risque considérable. Les différences sont encore plus importantes entre les normales 1971-

2000 et 1951-1980. La plage représentant les écarts de 5 à 10 % entre les deux normales recouvre plus de la moitié du pays alors que la plage 10 à 15% intéresse tout l'extrême Nord, la région du Mont Cameroun et une partie de la région montagneuse ouest du pays. Les valeurs moyennes calculées sur l'ensemble des données de la période d'observation (1941-2000) sont généralement plus faibles que celles de la période de référence habituelle. Les écarts entre les deux normales restent cependant modestes dans l'ensemble. Ils sont compris entre 0 et 5% et peuvent être considérés comme négligeables. En définitive, seules les normales 1971-2000 se démarquent nettement des autres, ce qui souligne le caractère nettement déficitaire des trois dernières décennies.

Une comparaison des normales de pluies annuelles sur 30 ans aux valeurs moyennes 1941-2000 a été également réalisée par Sighomnou (2004). Selon l'auteur, la période 1941-2000 présente l'avantage statistique d'être plus longue et d'intégrer à la fois toutes les décennies sèches et humides de la période d'observation. Les valeurs des normales 1941-1970 et 1951-1980 sont dans l'ensemble supérieures à la moyenne de la période 1941-2000, contrairement à celles des périodes 1961-1990 et 1971-2000. Cependant, en dehors de l'extrême Nord du pays et de quelques régions comme celle du Mont Cameroun et l'extrême Sud-Est, les écarts restent voisins de 5%. On peut en conclure que la moyenne calculée sur l'ensemble des données reste globalement plus proche des autres normales calculées sur des périodes de 30 ans.

Les travaux de Kouassi *et al.* (2019) sur la station pluviométrique de Port-Bouët (Abidjan) ont mis en évidence deux tendances au niveau des quantiles de pluies journalières maximales annuelles. La première tendance concerne les quantiles des périodes de retour égales à 2 et 5 ans. En effet, il est enregistré autant de valeurs d'écarts absolus relatifs inférieures ou égales à 5% que de valeurs supérieures à 5%. Dans cette tendance, les écarts entre les deux périodes de référence [période de référence historique (1961-1990) et période de référence actualisée (1981-2010)] sont les plus élevés. La deuxième tendance concerne les quantiles des périodes de retour égales à 10, 20, 50 et 100 ans. A ce niveau, il est enregistré plus de valeurs d'écarts absolus relatifs inférieures ou égales à 5% que de valeurs supérieures à 5%. Dans cette tendance, les écarts entre les deux périodes de référence [période de référence historique (1961-1990) et période de référence actualisée (1981-2010)] sont les plus faibles. Les écarts entre les quantiles de la période de référence historique (1961-1990) et les autres quantiles sont les plus élevés quelle que soit la période de retour. A l'opposé, les écarts entre d'une part les quantiles de la période de référence actualisée (1981-2010) et les autres quantiles sont les plus faibles quelle que soit la période de retour. De façon générale, les écarts diminuent avec la durée de retour. Ces résultats montrent que les quantiles diffèrent plus aux faibles périodes de retour (2

ans, 5 ans). Cependant, pour les grandes périodes de retour, donc les pluies de fréquences rares voire très rares, la différence entre les quantiles n'est pas statistiquement significative. On peut conclure qu'en général, les quantiles sont beaucoup différents aux faibles périodes de retour (2, 5 et 10 ans). Cependant, ils restent statistiquement équivalents aux grandes périodes de retour (20, 50 et 100 ans). Ce fait est plus remarquable pour les quantiles des périodes de référence standard (1961-1990 ; 1981-2010).

Pour toujours apprécier l'impact des changements climatiques sur les normes, certains auteurs tels que Olivry et *al.* (1995) ont procédé à des prédéterminations des débits moyens journaliers maximums annuels du Niger à Koulikoro en scindant l'échantillon total des observations en deux parties, avant et après 1970. L'ajustement sur la période de 1971 à 1992 montre une sous-estimation de 24% par rapport aux résultats obtenus en considérant toute la période d'observation.

Pour l'étude de la non-stationnarité des normes, une analyse comparative des modules de trois cours d'eau de l'Afrique de l'Ouest (Ouédraogo, 2001) montre que les différences peuvent être très importantes dans certains cas. Ainsi, un rapport de 2,5 a été observé entre la norme calculée sur la période 1971-2000 et celle calculée sur la période 1951-1980, sur le Bani à Douna. Pour l'ensemble des trois cours d'eau étudiés, le débit millennial calculé sur la période 1971-2000 (période sèche) est inférieur au débit décennal de la période 1951-1980 (période humide).

Les résultats obtenus au cours de cette étude sont en accord avec ceux des travaux antérieurs (Olivry et *al.*, 1995 ; Ouédraogo, 2001 ; Sighomnou, 2004 ; Nassa, 2017 ; Kouassi et *al.*, 2019). En effet, les changements climatiques en cours ont affecté les normes hydrologiques en Afrique de l'Ouest et posent le problème du choix de la période de référence dans la définition des normes hydrologiques ; d'où la redéfinition des paramètres climatiques des méthodes empiriques de l'ORSTOM et du CIEH.

## 5.5. CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre s'est consacré à l'analyse de la stationnarité des normes hydrologiques dans un contexte de changement climatique en Afrique de l'Ouest, plus précisément en Côte d'Ivoire. En effet, il s'agissait de vérifier l'hypothèse de rupture en 1970, d'analyser la sensibilité des lois statistiques des extrêmes en fonction du contexte climatique de la série (période humide ou période sèche) en Côte d'Ivoire et d'analyser l'impact des changements climatiques sur la stationnarité des normes hydrologiques.

L'analyse des résultats du test de Student a montré que l'année 1970 peut être considérée comme une année de rupture pour les différentes séries de pluies annuelles étudiées (81%) en dehors de cinq stations (Abidjan, Agnibilékro, Dabakala, Mankono et Tabou). L'évaluation des écarts de variation par rapport à l'année 1970 a montré que tous les écarts sont déficitaires traduisant un déficit pluviométrique. Ces déficits fluctuent entre 1,81% (Agnibilékro) et 23,16% avec une moyenne de 10,81%. Les déficits pluviométriques diminuent lorsqu'on quitte le Sud pour le Centre et du Nord vers l'Ouest. Les indices standardisés de précipitation annuelles ont montré une prédominance de SPI positifs avant 1970 et une prédominance de SPI négatifs après 1970 donc une baisse pluviométrique après 1970. Au vu des différents résultats, la période 1931-1970 peut être considérée comme une période humide et la période 1971-2010, une période sèche.

Les résultats des tests préalables à l'analyse fréquentielle ont indiqué que les hypothèses d'application à l'analyse fréquentielle sont vérifiées sur la quasi-totalité des séries. Alors, les séries des pluies journalières maximales annuelles sont constituées par des valeurs indépendantes, homogènes et stationnaires. La modélisation des pluies extrêmes à partir des lois statistiques obtenues à l'aide du système SAD a mis en évidence l'ajustement judicieux de la loi Gumbel (54%), la loi Gamma (19%) et la loi Exponentielle (11%) pour la période humide (1931-1970). Quant à la période sèche (1971-2010), elle est dominée par la loi Gamma inverse (38%), la loi Gumbel (35%) et la loi Gamma (23%). L'analyse de la distribution des lois en fonction des zones climatiques a permis de ressortir trois meilleures lois. En effet, le climat équatorial de transition et le climat de montagnes sont dominés respectivement par la loi Gumbel, la loi Gamma et la loi Gamma inverse. Concernant le climat tropical humide et le climat subtropical, ils sont dominés respectivement par la loi Gumbel et la loi Gamma inverse. Au terme de ces analyses, les meilleures lois qui ajustent au mieux les sous séries pluviométriques 1931-1970 et 1971-2010 sont la loi Gumbel, la loi Gamma et la loi Gamma inverse. Les lois statistiques des extrêmes sont donc sensibles au contexte climatique de la série analysée.

L'analyse des normales des pluies annuelles et des pluies extrêmes montre que les caractéristiques statistiques des normales (minimum, maximum et moyenne) de la période humide (1931-1970) sont supérieures à celles de la période sèche (1971-2010). Les quantiles calculés sur les différentes périodes (1931-1970 ; 1971-2010) à partir de plusieurs périodes de retour (2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans) varient pour une période de retour donnée, de la période humide à la période sèche. Les quantiles calculés sur la période humide (1931-1970) restent

supérieurs à ceux déterminés sur la période sèche (1971-2010). L'analyse des matrices binaires des normales des pluies annuelles montre que 100% des valeurs sont supérieures à 1%. Pour ce qui concerne les normales des pluies extrêmes, 96,15% sont supérieures à 1%, par contre 3,85% restent inférieures. De façon générale, le pourcentage de valeurs supérieures à 1% étant prépondérant alors les écarts d'une part entre les normales des pluies annuelles et d'autre part entre les normales des pluies extrêmes sont significatifs. Il en résulte donc que les normales des pluies annuelles et les normales des pluies extrêmes (pluies journalières maximales annuelles) calculées d'une part sur la période humide (1931-1970) et d'autre part sur la période sèche (1971-2010) ne sont pas stationnaires. L'analyse des écarts relatifs absolus des quantiles des pluies journalières maximales annuelles a mis en évidence un taux de valeurs supérieures à 1% variant entre 88 et 100% quelle que soit la période de retour ( $T=2, 5, 10, 20, 50$  et  $100$  ans). La proportion de valeurs supérieures à 1% étant très importante alors la différence entre les différents quantiles est significative. Il convient de déduire que les quantiles des pluies journalières maximales annuelles calculés ne sont donc pas stationnaires.

Les normales des pluies annuelles, les normales des pluies extrêmes et les quantiles des pluies extrêmes étant non stationnaires, alors les normes étudiées sont non stationnaires eu égard à l'instabilité du climat. Les normes estimées étant un outil d'aide à la décision pour les concepteurs et Ingénieurs quant au dimensionnement des ouvrages hydrauliques, à l'étude des régimes climatiques, à la gestion des ressources en eau, etc. dans un contexte de changements climatiques, alors il se pose le problème du choix de la période de référence devant servir de base à la définition des normes hydrologiques en Afrique de l'Ouest. D'où le prochain chapitre qui traitera de l'actualisation des paramètres des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH en se basant sur une analyse de la sensibilité des lois d'ajustement des pluies extrêmes pour déterminer la période de données la plus stable possible pour la détermination des dites normes hydrologiques.

## CHAPITRE 6 : ACTUALISATION DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES DES MÉTHODES EMPIRIQUES DE L'ORSTOM ET DU CIEH

### 6.1. ANALYSE DE LA SENSIBILITÉ DES LOIS STATISTIQUES

#### 6.1.1. Analyse des hypothèses d'application

Le tableau XXXV met en exergue les résultats des tests effectués.

**Tableau XXXV** : Tests d'hypothèse de l'analyse fréquentielle

Stations	Test d'indépendance		Test de stationnarité		Test d'homogénéité	
	U	P	K	P	W	P
Abengourou	2,9	0,038	0,38	0,71	0,037	0,97
Abidjan	1,09	0,28	2,77	0,02	2,82	0,06
Aboisso	0,15	0,88	1,77	0,08	2,34	0,02
Agboville	0,01	0,1	1,81	0,07	2,2	0,03
Agnibilékro	2,88	<b>0,01</b>	0,66	0,51	0,42	0,68
Azaguié	0,36	0,72	2,52	0,01	2,1	0,04
Bouaflé	0,71	0,48	2,64	<b>0,01</b>	1,99	0,05
Bouaké	2,11	0,04	2,72	0,07	2,29	0,02
Bouna	2,11	0,04	0,8	0,43	0,09	0,93
Boundiali	1,96	0,05	2,18	0,03	0,87	0,39
Dabakala	0,83	0,41	1,17	0,24	0,82	0,40
Daloa	1,15	0,25	2,33	0,02	1,9	0,06
Dimbokro	0,8	0,05	0,03	0,978	0,41	0,69
Ferkessedougou	0,29	0,78	3,6	0,03	4,04	0,05
Gagnoa	2,46	0,01	0,03	0,98	0,84	0,40
Grand-Lahou	0,88	0,38	0,62	0,53	1,36	0,17
Guiglo	0,84	0,4	0,37	0,71	1	0,32
La Mé	0,72	0,47	0,20	0,04	2,49	0,01
Man	3,06	0,02	2,23	0,03	0,90	0,37
Mankono	2,68	0,07	3,08	0,02	2,55	0,01
Odienné	3,93	0,01	4,35	<b>0,01</b>	3,31	0,09
Sassandra	2,49	0,01	4,71	0,03	4,22	<b>0,01</b>
Séguéla	1,45	0,15	4,45	0,09	3,15	0,02
Tabou	3,96	<b>0,01</b>	3,86	0,01	2,46	0,01
Tiassalé	0,78	0,44	1,97	0,05	1,83	0,07
Toulepleu	0,72	0,48	1,39	0,17	0,42	0,68

Ces résultats permettent de constater que toutes les données des différentes stations vérifient au moins deux tests aux différents seuils (1% et 5%). Les villes d'Odienné, Agnibilékro, Sassandra, Bouaflé et Tabou vérifient uniquement deux tests aux différents seuils.

Le test d'indépendance est validé par 92% des stations dont dix-sept (17) au seuil de 5% et sept (7) au seuil de 1%. Pour le test de stationnarité, 92% des stations l'ont validé dont treize (13) au seuil de 5% et onze (11) au seuil de 1%. Quant au test d'homogénéité, il est validé par 96% des stations dont seize (16) au seuil de 5% et neuf (9) au seuil de 1%.

En somme, 81% des stations vérifient tous les tests d'hypothèse. Ainsi, il est donc possible de procéder à l'analyse fréquentielle.

### 6.1.2. Identification des meilleures classes de lois

Le résumé des différentes classes sélectionnées est présenté aux tableaux XXXVI et XXXVII.

**Tableau XXXVI : Meilleures classes pour les ajustements des lois des séries de 30 ans**

Stations / séries	1931-1960	1961-1990	1991-2020
Abengourou	C,E	C	C,E
Abidjan	C	C,E	C,E
Aboisso	C	C,E	C,E
Agboville	C	C,E	C
Agnibilékro	C,E	C,E	C,E
Azaguïé	C,E	C,E	C,E
Bouaflé	C	C,E	C,E
Bouaké	C	C,E	C
Bouna	C,E	C,E	C
Boundiali	C,E	C	C,E
Dabakala	C	C,E	E
Daloa	E	C	C
Dimbokro	C,E	C,E	C
Ferkéssédougou	C,E	C,E	C
Gagnoa	C,E	C,E	C
Grand-lahou	C,E	C,E	C,E
Guiglo	C,E	C,E	C
La Mé	C,E	C	C,E
Man	C	C	C,E
Mankono	C,E	C,E	C,E
Odienné	C	E	C,E
Sassandra	C	C,E	C,E
Séguéla	C,E	C,E	C
Tabou	C,E	C,E	C,E
Tiassalé	E	C,E	C,E
Toulepleu	C,E	C,E	C,E

**Tableau XXXVII** : Meilleures classes pour les ajustements des lois des séries de 60 et 90 ans

Stations / séries	1931-1990	1961-2020	1931-2020
Abengourou	C,E	C,E	C
Abidjan	C,E	D	E
Aboisso	C,E	D	C,E
Agboville	E	C,E	E
Agnibilékro	C,E	C,E	E
Azaguié	C,E	C,D	C,E
Bouaflé	C,E	C,E	C,E
Bouaké	C,E	C,E	C,E
Bouna	C,D	C	C,E
Boundiali	C,E	C,D	E
Dabakala	C,E	C,D	E
Daloa	C,E	C	C
Dimbokro	C,D	C,D	C,D
Ferkéssédougou	C,D	C,D	D
Gagnoa	E	C,E	C,E
Grand-Lahou	C,D	D	D
Guiglo	C,E	C,D	C,E
La Mé	C,E	C,E	E
Man	C,E	C,D	C,D
Mankono	C,D	C,D	C,D
Odienné	C,D	D	C,D
Sassandra	C,D	C,D	C,D
Séguéla	E	C,D	C,D
Tabou	E	C,D	C,D
Tiassalé	C,E	C,E	C,E
Toulepleu	C,E	C,E	C,E

L'analyse détaillée des pourcentages au niveau des périodes des différentes séries est présentée au tableau XXXVIII.

Les meilleures classes pour les séries de 30 ans sont les classes C avec un pourcentage d'apparition de 57,47% et E de pourcentage d'apparition de 42,53%. La classe C apparaît vingt-trois (23) fois seule comme meilleure classe contre quatre (4) fois pour la classe E.

Pour les séries de 60 ans, les meilleures classes sont les classes C, D et E. La classe C a un pourcentage d'apparition de 46,84%, la classe E a un pourcentage de 29,57% et la classe D 23,59%. La classe C apparaît 2 fois seule comme meilleure classe contre 4 fois pour chacune des classes E et D.

Quant à la série de 1931-2020, elle présente la classe D (distribution sub-exponentielle) en plus des classes C et E comme meilleures classes. Un taux de 42,86% d'apparition de la classe C est observé contre 35,71% pour la classe E et 21,43% pour la classe D. Les classes C, D et E apparaissent seules comme meilleures classes, respectivement, deux (2), six (6) et deux (2) fois. La loi log-normale par le biais du test de Jarque-Bera est inapplicable sur l'ensemble des données. En somme, la classe C prédomine sur les autres classes.

**Tableau XXXVIII** : Pourcentages de répartition des classes sur les différentes périodes

Taille série	Période	% C	% D	% E
30 ans	1931-1960	58,54	0	41,46
	1961-1991	54,35	0	45,65
	1991-2020	59,52	0	40,48
60 ans	1931-1990	45,84	14,58	39,58
	1961-2020	47,83	32,61	19,56
90 ans	1931-2020	42,86	21,43	35,71

Notons que les classes C, E et D désignent respectivement les distributions à variations régulières (Fréchet (EV2), Halphen B Inverse (HIB), Log-Pearson type 3 (LP3), Gamma Inverse (GI)), les distributions sub-exponentielles (Halphen type A (HA), Halphen type B (HB), Gumbel (EV1), Pearson type 3 (P3), Gamma (G)) et la distribution exponentielle (loi exponentielle).

### 6.1.3. Identification des meilleures lois

#### 6.1.3.1. Analyse graphique

L'identification des meilleures lois passe par l'ajustement des lois issues des différentes classes de distribution sélectionnées. L'élément préliminaire requis afin d'aboutir à cette identification

est l'analyse graphique. En effet, sur l'ensemble des graphes des différentes séries, les lois qui ajustent au mieux les pluies extrêmes sont les lois Gamma Inverse, Fréchet, Weibull, Gamma, Exponentielle, Log-pearson type 3, Pearson type 3 et Gumbel. Il ressort que la meilleure loi n'est pas uniquement Gumbel qui est supposée être la loi théorique ajustant au mieux les valeurs extrêmes. Les figures 39 à 44 illustrent quelques cas.

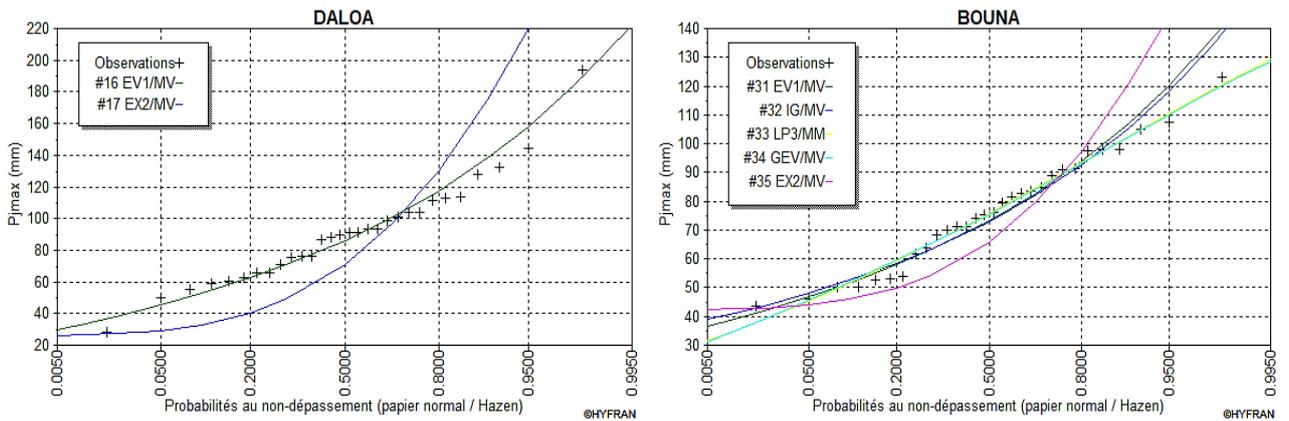


Figure 39 : Comparaison des lissages des lois d'ajustement sur la période 1931-1960

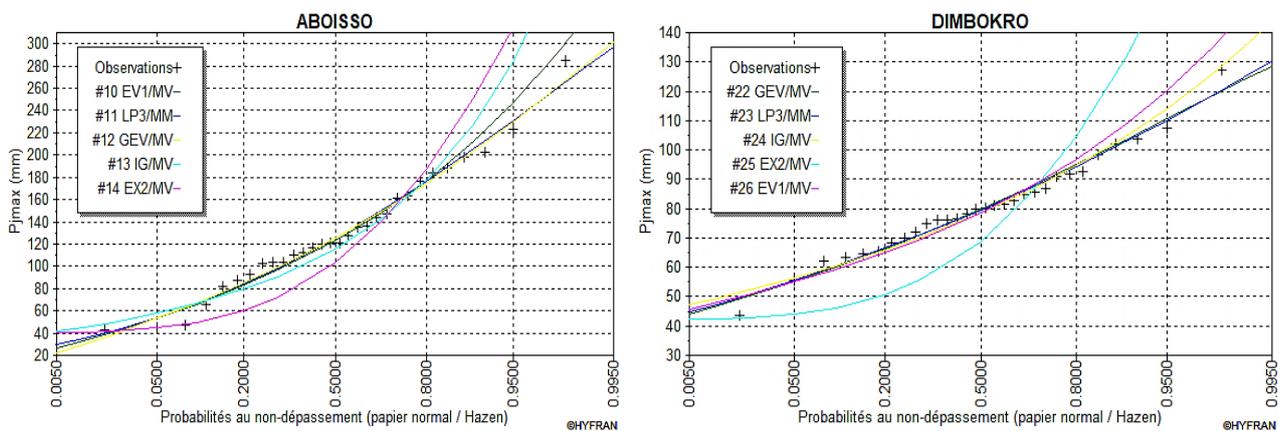
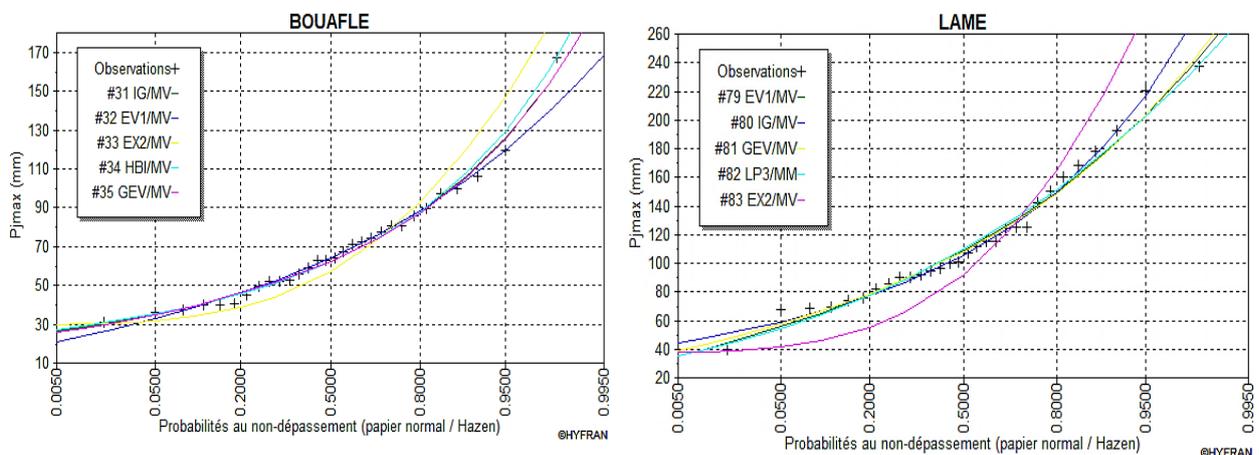
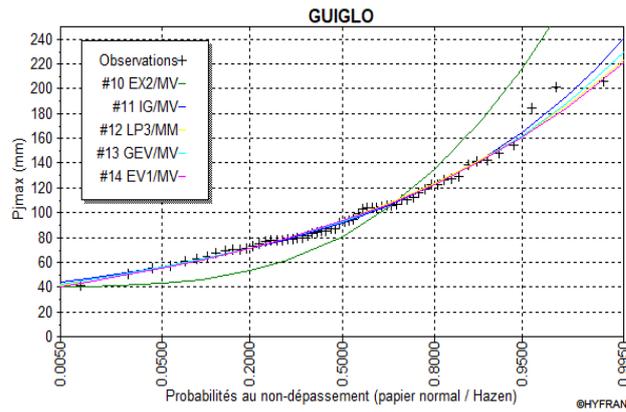
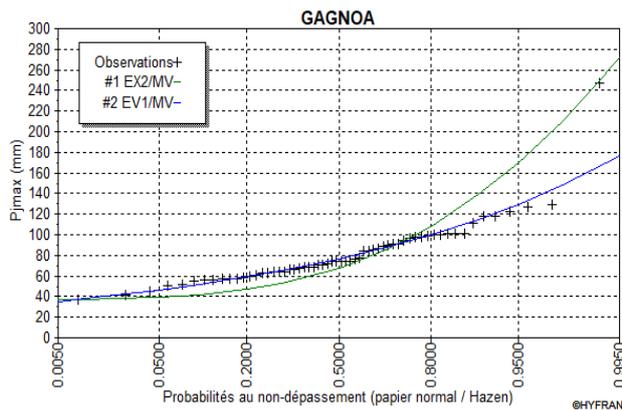
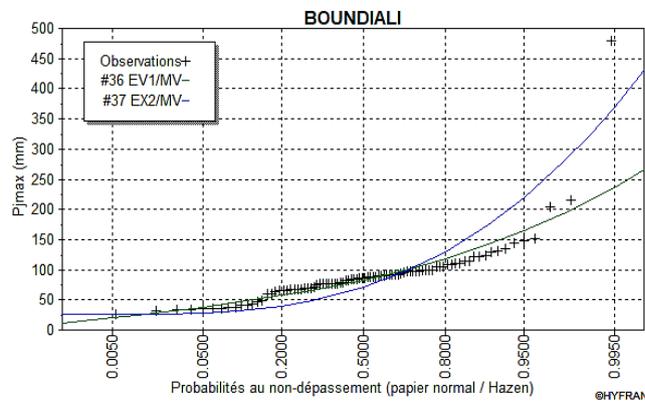
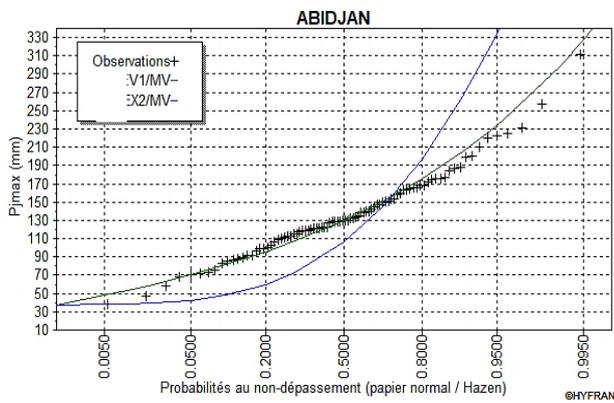


Figure 40 : Comparaison des lissages des lois d'ajustement sur la période 1961-1990

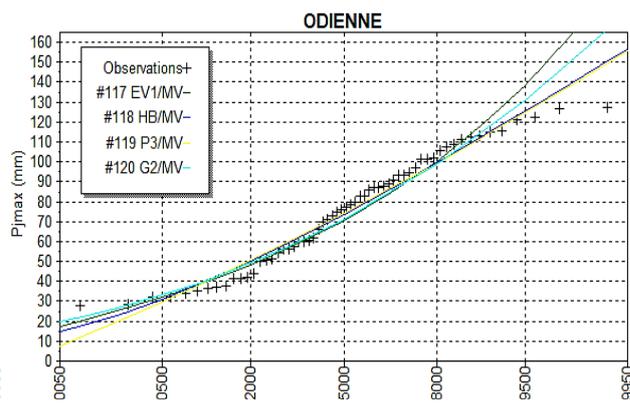
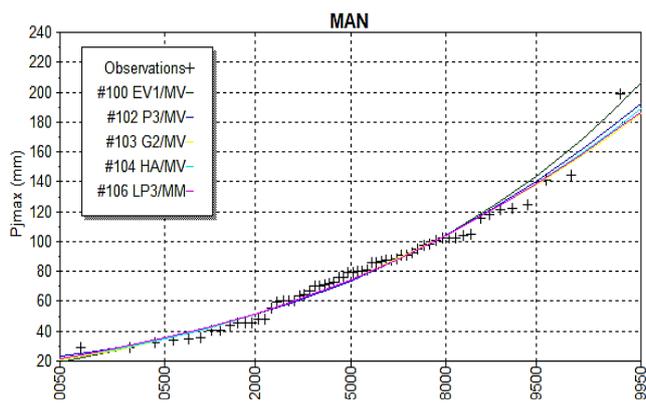




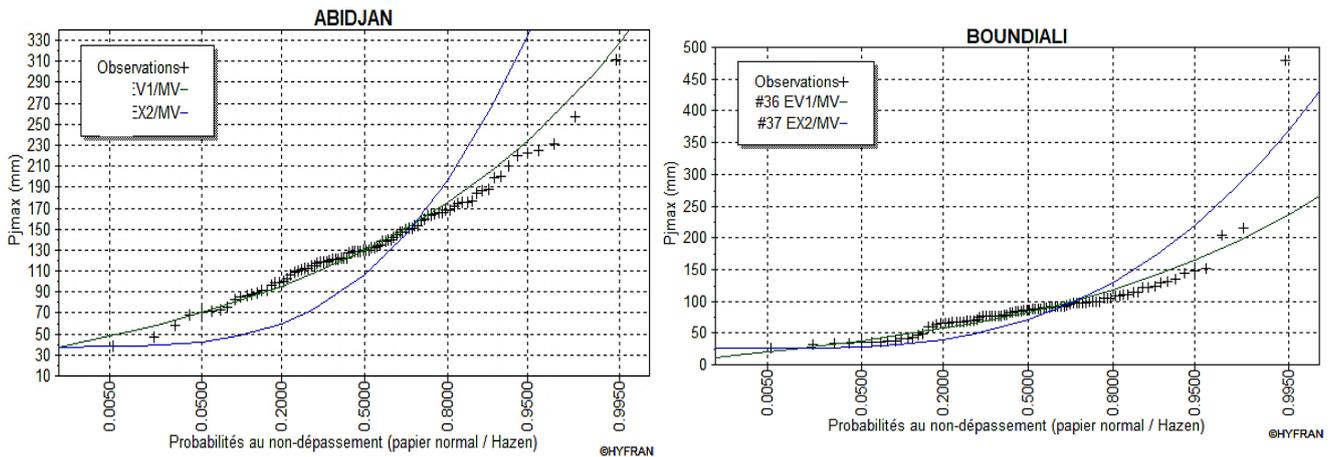
**Figure 41** : Comparaison des lissages des lois d'ajustement sur la période 1991-2020



**Figure 42** : Comparaison des lissages des lois d'ajustement sur la période 1931-1990



**Figure 43** : Comparaison des lissages des lois d'ajustement sur la période 1931-2020



**Figure 44** : Comparaison des lissages des lois d'ajustement sur la période 1961-2020

### 6.1.3.2. Analyse numérique des ajustements

Après les ajustements, le test numérique de Khi-deux de vérification de l'adéquation de ceux-ci a été appliqué pour mieux apprécier leur relative qualité. Le tableau XXXIX illustre quelques cas.

**Tableau XXXIX** : Test de  $\chi^2$  et critères AIC et BIC des meilleures lois de quelques stations

Séries	Stations	Lois	Nombre de paramètre	P	$\chi^2$	BIC	AIC
1931- 1960	Daloa	Gumbel	2	0,34	4,53	319,045	316,242
	Bouna	Inverse Gamma	2	0,94	0,80	278,751	275,948
1961-1990	Aboisso	Inverse Gamma	2	0,3	18,07	311,640	308,837
	Dimbokro	Inverse Gamma	2	0,54	3,13	304,796	301,994
1991-2020	Bouaflé	Log-Pearson type 3	3	0,02	10,13	317,400	313,196
	La Mé	Exponential	2	0,31	18,53	300,579	297,776
1931-1990	Gagnoa	Gumbel	2	0,5014	6,33	560,564	556,375
	Guiglo	Gumbel	2	0,7407	4,33	587,672	583,483
1961-2020	Man	Gamma	2	0,6194	5,33	587,716	583,527
	Odienné	Gamma	2	0,2527	9	581,501	577,313
1931-2020	Abidjan	Gumbel	2	0,71	6,27	949,422	944,422
	Boundiali	Gamma	2	0,44	8,93	803,766	798,766

L'application de ce test s'est révélée concluante pour la totalité des lois d'ajustement sur les pluies journalières maximales annuelles au seuil de signification de 5%. Le test d'adéquation statistique de « khi-deux » est accepté. Les résultats obtenus suite à l'application des critères d'Akaike (AIC) et Bayésien (BIC) présentent le classement des meilleures lois, avec leur nombre de paramètre et leurs valeurs des critères AIC et BIC. La meilleure loi retenue est celle qui a simultanément les plus faibles valeurs au niveau de ces deux critères. Cette analyse numérique confirme les résultats de l'analyse graphique.

Ainsi, au niveau des séries de 30 ans, il est observé les pourcentages suivants sur l'ensemble des stations :

- 1931-1960 : la loi de Weibull s'ajuste sur une (1) station soit 3,85%, les lois de Frechet et Exponentielle sur deux (2) stations chacune soit 7,69%, la loi Gamma Inverse sur sept (7) stations soit 26,92% et la loi de Gumbel sur quatorze (14) stations soit 53,85% ;
- 1961-1990 : la loi de Weibull s'ajuste sur une (1) station soit 3,85%, la loi de Frechet sur trois (3) stations soit 11,54%, la loi de Gumbel sur dix (10) stations soit 38,46% et la loi Gamma Inverse sur douze (12) stations soit 46,15% ;
- 1991-2020 : les lois de Frechet et Log pearson type 3 s'ajustent sur une (1) station chacune soit 3,85%, la loi Exponentielle sur six (6) stations soit 23,08%, la loi de Gumbel sur sept (7) stations soit 26,92% et la loi Gamma Inverse sur onze (11) stations soit 42,31%.

En ce qui concerne les séries de 60 ans, elles présentent les observations suivantes :

- 1931-1990 : les lois de Pearson type 3, Frechet et Weibull s'ajustent sur une station chacune soit (3,35%), la loi Gamma sur quatre (4) stations soit 15,38%, la loi Gamma Inverse sur huit (8) soit 30,77% et la loi de Gumbel sur onze (11) stations soit 42,31%.
- 1961-2020 : les lois de Pearson type 3 et Frechet s'ajustent sur une station chacune soit (3,35%), la loi de Gumbel sur quatre (4) stations soit 15,38%, la loi Gamma Inverse sur huit (8) stations soit 30,77% et la loi Gamma sur douze (12) stations soit 46,15%.

Quant à la série entière, la loi de Gamma Inverse s'ajuste sur quatre (4) stations soit 15,38%, la loi Gamma sur neuf (9) stations soit 34,62% et la loi de Gumbel sur treize (13) stations soit 50%.

En somme, les lois avec une forte représentativité sur l'ensemble des séries sont les lois de Gumbel, Gamma Inverse et Gamma. Les lois de Weibull, Frechet, Exponentielle, Log pearson type 3 et Pearson type 3 ont une faible représentativité.

Le tableau XL, présente une synthèse du classement des trois meilleures lois par période. En effet, il est noté une instabilité des trois meilleures lois au niveau des séries de taille normale ( $n = 30$  ans). La première normale historique de l'OMM, 1931-1960 a tendance à être bien ajustée par la loi de Gumbel, la deuxième historique normale 1961-1990 utilisée est ajustée au mieux par la loi Gamma Inverse suivie de la loi de Gumbel. L'actuelle normale 1991-2020 semble être similaire à la précédente avec une différence de la troisième meilleure loi. A partir de 60 ans, la première meilleure loi reste soit la loi de Gumbel (EV1) ou la loi Gamma (G2) et la loi Gamma Inverse (IG) demeure la seconde meilleure loi des séries de 60 ans. Ceci marque une certaine stabilité des lois pour les séries de taille moyenne ( $n = 60$  ans).

La chronique complète de 1931-2020 présente une suprématie notable de 50% de la loi des valeurs extrêmes de type 1 (Gumbel) sur les lois Gamma (34,62%) et Gamma Inverse (15,38%).

**Tableau XL** : Synthèse du classement des trois meilleures lois par période

Séries	Périodes	Meilleures lois
30 ans	1931-1960	Gumbel
		Gamma Inverse
		Exponentielle
	1961-1990	Gamma Inverse
		Gumbel
		Fréchet
	1991-2020	Gamma Inverse
		Gumbel
		Exponentielle
60 ans	1931-1990	Gumbel
		Gamma Inverse
		Gamma
	1961-2020	Gamma
		Gamma Inverse
		Gumbel
90 ans	1931-2020	Gumbel
		Gamma
		Gamma Inverse

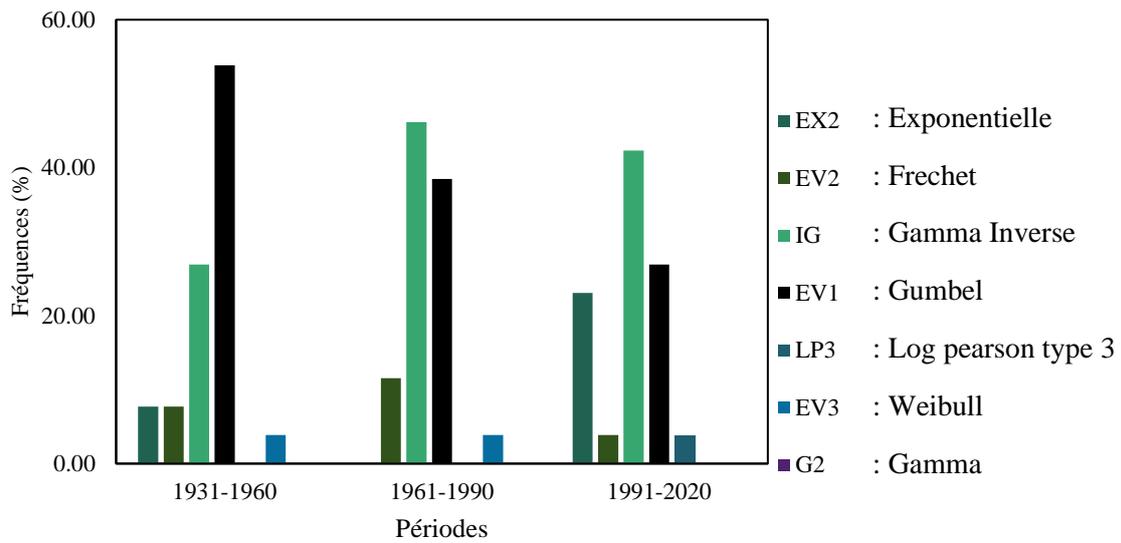
De façon générale, pour les séries de 30 ans la suprématie de la loi de Gumbel se dégrade avec une diminution du taux d'apparition de 53,85% (pour la première normale historique de 1931-1960) à 26,92% (pour l'actuelle normale 1991-2020) en passant par 38,46% d'apparition pour la deuxième normale historique de 1961-2020. Les deux dernières périodes trentenaires inversent la tendance de Gumbel au profit de Gamma Inverse avec une probabilité respective de 46,15% et 42,31%. On constate que les anciennes séries qui intègrent de très anciennes données telles que 1931-1960, 1931-1990 et 1931-2020 affichent Gumbel comme première loi pour la plupart des stations de l'étude, tandis que les plus récentes 1961-1990, 1991-2020 et 1961-2020 font montre d'une dominance des loi Gamma et gamma inverse. Cela pourrait signifier que la loi de Gumbel ajuste bien les extrêmes humides et les loi Gamma/Gamma Inverse se prêtent mieux aux extrêmes sèches. La représentativité des lois telles que Fréchet, Weibull et Log Pearson 3 et Pearson est très faible surtout lorsque la taille des séries est très importante.

Les figures de 45 à 47 suivantes présentent des histogrammes de répartition des meilleures lois respectivement sur les séries de 30, 60 et 90 ans. Ces histogrammes permettent d'apprécier l'évolution des lois en fonction de la taille de la période utilisée. L'on remarque une certaine évolution des lois sur chaque série de données.

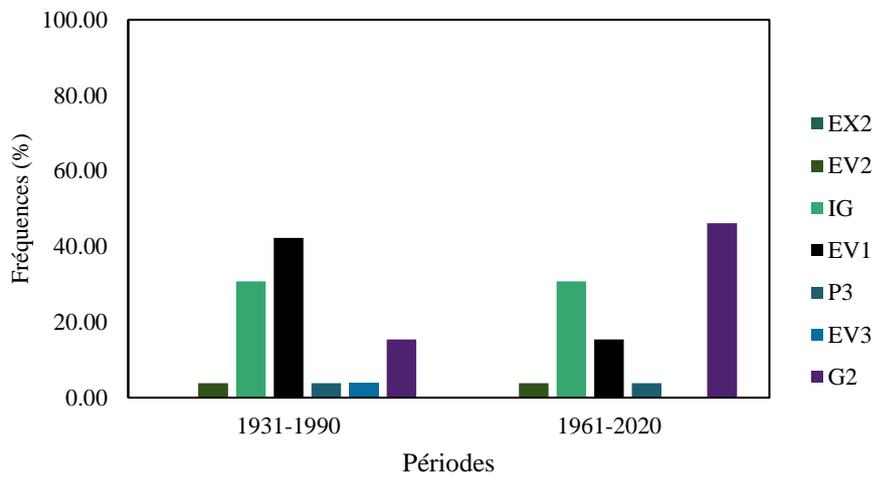
En effet, sur l'ensemble des périodes de la série de 30 ans, l'on remarque que les lois de Gumbel et Gamma Inverse sont celles qui s'ajustent le mieux (figure 45). Aussi, plus on se rapproche des périodes récentes plus la représentativité de la loi de Gumbel diminue et celle de la loi Gamma Inverse augmente. On observe donc une stabilité des deux dernières périodes de la série des lois de Gumbel et Gamma Inverse.

Sur les périodes de la série de 60 ans, les lois de Gumbel, Gamma Inverse et Gamma sont celles qui s'ajustent aux mieux (figure 46). Une certaine stabilité de la loi Gamma Inverse est observée. Il est constaté aussi que plus on se rapproche des données récentes plus la représentativité de la loi de Gumbel diminue et celle de la loi Gamma augmente. Une évolution inverse des lois de Gumbel et Gamma est donc mise en évidence.

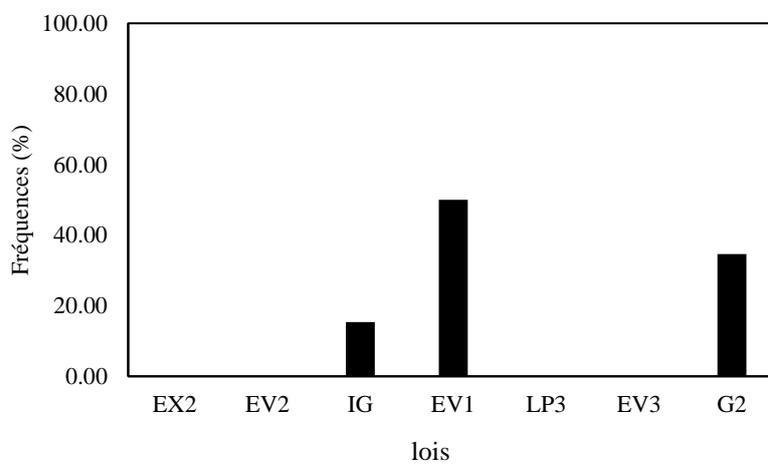
Concernant la série entière, les lois de Gumbel, Gamma Inverse et Gamma sont les seules qui s'ajustent aux données de pluies extrêmes étudiées. L'on observe une forte représentativité des lois de Gumbel (50%) et Gamma (34,62%) et une faible proportion de la loi Gamma Inverse (15,38%) (Figure 47).



**Figure 45** : Répartition des meilleures lois pour les séries de 30 ans



**Figure 46** : Répartition des meilleures lois pour les séries de 60 ans



**Figure 47** : Répartition des meilleures lois pour les séries de 90 ans

On constate que plus les données sont récentes plus la loi de Gumbel s'ajuste moins bien à ces données et plus les lois Gamma et Gamma Inverse s'ajustent au mieux. Par rapport à la taille des données, la fréquence d'apparition de la loi de Gumbel, Gamma et Gamma Inverse croît avec l'étendue de la série. Plus la taille est importante plus les ajustements se stabilisent aux lois Gamma, Gamma Inverse et Gumbel. On assiste à une stabilité des meilleures lois et une interchangeabilité des lois pour les séries de longueurs supérieures ou égales à 60 ans.

De tout ce qui précède, il ressort que la chronique la plus longue 1931-2020 demeure la plus stable vis-à-vis des effets des changements climatiques sur les lois statistiques servant à l'ajustement des extrêmes pluviométriques en Côte d'Ivoire.

## 6.2. REDÉFINITION DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES DES MÉTHODES EMPIRIQUES DE L'ORSTOM ET DU CIEH

### *6.2.1. Analyse des normales des pluies annuelles et extrêmes*

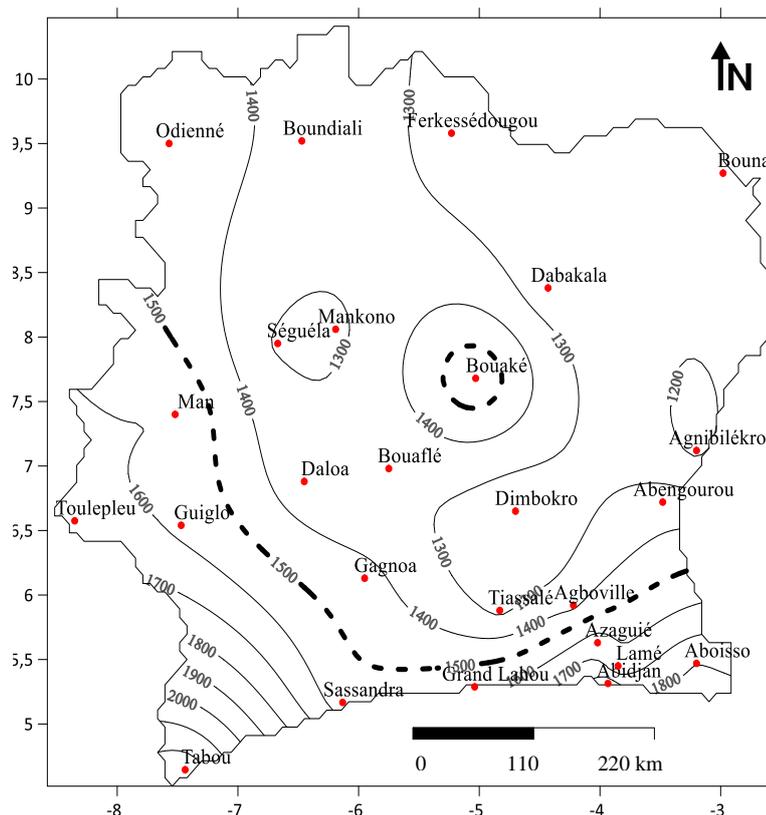
Les pluies annuelles et extrêmes des différentes stations et leurs caractéristiques statistiques (minimum, maximum et moyenne) sont présentées au tableau XLI.

Les normales des pluies annuelles évaluées sur la période 1931-2020 varient entre 1180,41 mm (Agnibilékro) et 1878,01 mm (Abidjan) avec une moyenne de 1457,4 mm. Pour ce qui est des normales des pluies annuelles évaluées sur la période 1931-2020, elles oscillent entre 73,61 mm (Agnibilékro) et 136,59 mm (Tabou) avec une moyenne de 94,57 mm.

**Tableau XLI** : Caractéristiques statistiques des normales de pluies annuelles et extrêmes (1931-2020)

<b>Stations</b>	<b>Normales des pluies annuelles 1931-2020 (mm)</b>	<b>Normales des pluies extrêmes 1931-2020 (mm)</b>
<b>Abengourou</b>	1352,77	83,45
<b>Abidjan</b>	1878,01	136,44
<b>Aboisso</b>	1801,71	132,77
<b>Agboville</b>	1376,09	87,11
<b>Agnibilékro</b>	1180,41	73,61
<b>Azaguié</b>	1663,75	97,42
<b>Bouaflé</b>	1301,12	80,22
<b>Bouaké</b>	1604,41	74,40
<b>Bouna</b>	1246,64	79,13
<b>Dabakala</b>	1226,57	82,12
<b>Boundiali</b>	1374,08	90,41
<b>Daloa</b>	1330,26	86,12
<b>Dimbokro</b>	1222,57	75,93
<b>Ferkéssédougou</b>	1273,21	75,59
<b>Gagnoa</b>	1440,21	81,57
<b>Grand-Lahou</b>	1584,39	136,59
<b>Guiglo</b>	1577,09	99,38
<b>La Mé</b>	1600,04	125,40
<b>Man</b>	1600,35	83,04
<b>Mankono</b>	1281,41	83,01
<b>Sassandra</b>	1544,22	119,86
<b>Séguéla</b>	1285,67	78,68
<b>Odienné</b>	1464,11	81,25
<b>Tiassalé</b>	1276,77	87,32
<b>Tabou</b>	1785,82	136,48
<b>Toulepleu</b>	1620,67	91,45
<b>Maximum</b>	1878,01	136,59
<b>Minimum</b>	1180,41	73,61
<b>Moyenne</b>	1457,4	94,57

Les normales des pluies annuelles de la période entière 1931-2020 ont été cartographiées et sont présentées sur la figure 48. L'isohyète 1500 mm est considéré sur ces cartes comme l'isohyète de référence afin de mieux cerner l'évolution des valeurs. En effet, l'isohyète de référence se situe au Centre et s'étend de l'Ouest vers le Sud-Est du pays. De manière générale, une diminution des normales est perceptible du Centre vers le Nord et le Nord-Est.



**Figure 48 :** Cartographie des normales des pluies annuelles

### 6.2.2. Analyse des quantiles décennaux et centennaux

Les quantiles décennaux et centennaux des différentes stations et leurs caractéristiques statistiques sont consignés dans le tableau XLII. En effet, les quantiles de période de retour de 10 ans évalués sur la période 1931-2020 oscillent entre 103 mm (Dimbokro) et 222 mm (Tiassalé) avec une moyenne de 143,6 mm. Quant aux quantiles centennaux, ils oscillent entre 132 mm (Dimbokro) et 326 mm (Tiassalé) avec une moyenne de 211,5 mm.

**Tableau XLII** : Caractéristiques statistiques des pluies décennales et centennales

<b>STATIONS</b>	<b>Pluies décennales 1931-2020</b>	<b>Pluies centennales 1931-2020</b>
<b>Abengourou</b>	130	219
<b>Abidjan</b>	205	300
<b>Aboisso</b>	205	306
<b>Agboville</b>	132	195
<b>Agnibilékro</b>	107	154
<b>Azagué</b>	144	210
<b>Bouaflé</b>	118	171
<b>Bouaké</b>	113	167
<b>Bouna</b>	121	181
<b>Dabakala</b>	142	215
<b>Boundiali</b>	124	183
<b>Daloa</b>	128	186
<b>Dimbokro</b>	103	132
<b>Ferkéssédougou</b>	116	164
<b>Gagnoa</b>	117	174
<b>Grand-Lahou</b>	206	286
<b>Guiglo</b>	156	266
<b>La Mé</b>	182	263
<b>Man</b>	126	174
<b>Mankono</b>	127	179
<b>Sassandra</b>	123	171
<b>Séguéla</b>	192	280
<b>Odienné</b>	125	180
<b>Tiassalé</b>	222	326
<b>Tabou</b>	129	188
<b>Toulepleu</b>	140	230
<b>Maximum</b>	222	326
<b>Minimum</b>	103	132
<b>Moyenne</b>	143,6	211,5

Les quantiles décennaux et centennaux ont été cartographiés et sont représentés respectivement par les figures 49 et 50. Pour les pluies décennales et centennales, respectivement les isohyètes 150 mm et 200 mm sont considérées comme les isohyètes de référence afin de mieux cerner l'évolution des valeurs. En effet, les pluies décennales sont élevées au Sud-Est du pays et une frange partie de l'Ouest (130 mm - 150 mm). Elles sont généralement faibles au Nord, à l'Est et au Centre et restent inférieures à 130 mm). Pour ce qui est des pluies centennales, elles sont élevées au Sud-Est et à l'Ouest du pays (200 mm – 300 mm). Elles sont faibles au Centre et au Nord du pays (inférieures à 200 mm).

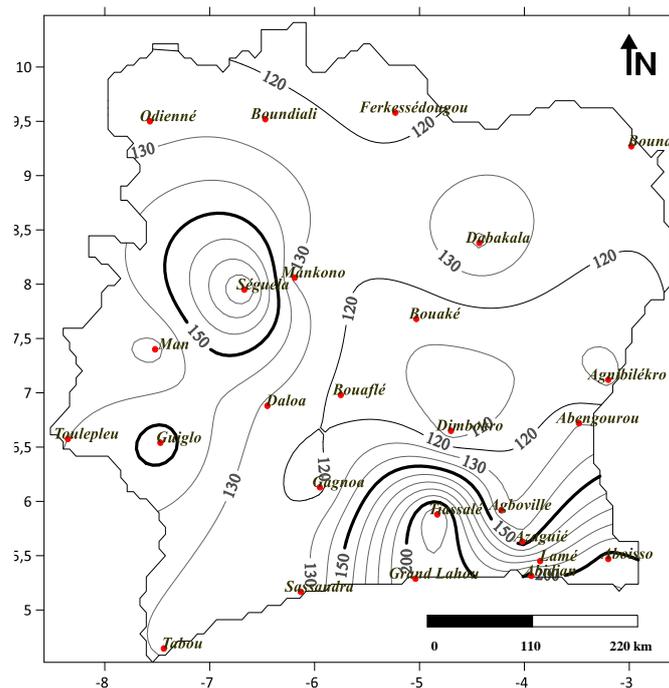


Figure 49 : Cartographie des pluies décennales (1931-2020)

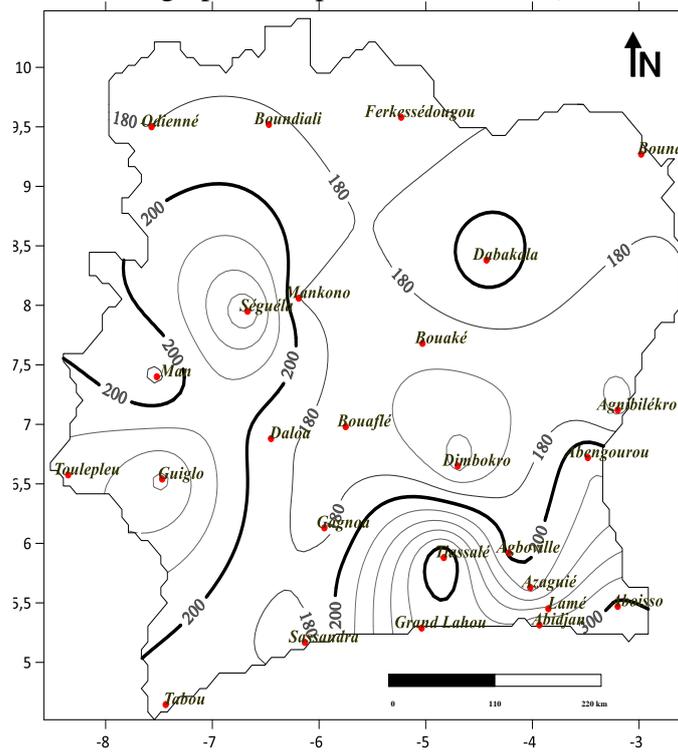


Figure 50 : Cartographie des pluies centennales (1931-2020)

### 6.2.3. Coefficient de Gradex ( $\lambda$ )

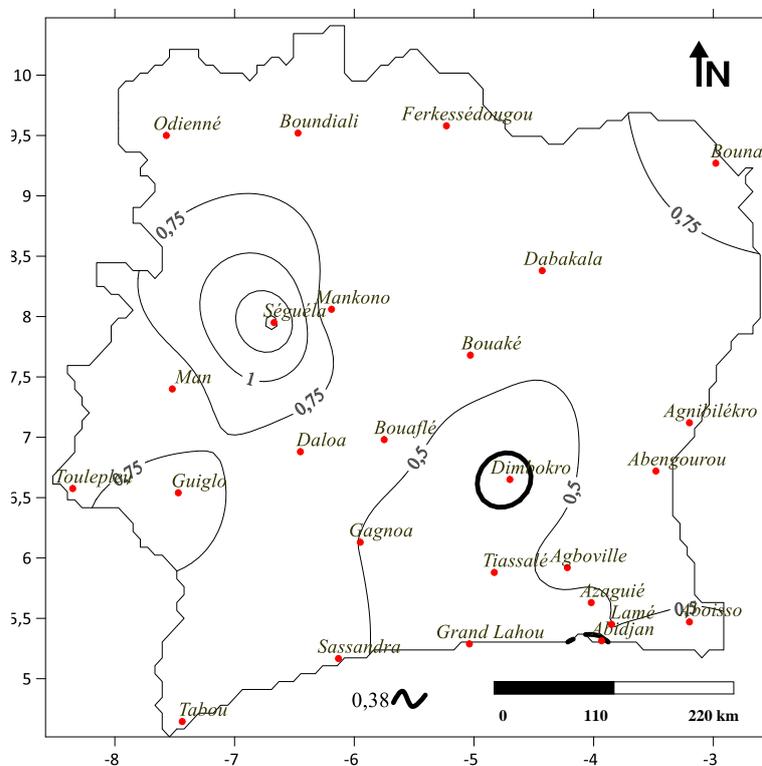
Les différentes valeurs du coefficient de gradex ( $\lambda$ ) des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH évaluées sur la chronique complète 1931-2020 et les écarts relatifs des coefficients de gradex locaux par rapport à la valeur régionale du coefficient de gradex sont consignées dans le tableau XLIII. Ces valeurs varient entre 0,28 (Dimbokro) et 0,71 (Guiglo). Les coefficients de gradex déterminés sont tous supérieurs à la valeur régionale de 0,38 définie par l'ORSTOM exceptée la station de Dimbokro (0,28). Les valeurs de l'écart-type (0,09) et du coefficient de variation (18,69%) montrent une homogénéité des valeurs du coefficient de gradex. La valeur moyenne du gradex en Côte d'Ivoire est de 0,47.

Les biais du coefficient de gradex calculés sont tous positifs (+) sauf celui de Dimbokro (-26,32%). L'utilisation de la valeur régionale de 0,38 traduit un sous dimensionnement des valeurs du coefficient de gradex sur l'ensemble du pays excepté la station de Dimbokro. L'estimation du gradex de cette étude coïncide avec la valeur régionale de 0,38 pour la station de Man (0% de biais) et reste proche pour les stations de Ferkessedougou et Mankono (+7,89%). Les stations de Grand Lahou et Odienné affichent un biais faible de 2,63%. Ces villes présentent une différence non-significative (biais inférieur à 10%) par rapport à la valeur régionale de 0,38.

**Tableau XLIII : Coefficients de gradex et biais par rapport à la valeur régionale**

<b>STATIONS</b>	<b>Gradex 1931-2020</b>	<b>Biais de gradex par rapport à 0,38</b>
Abengourou	0,68	78,95
Abidjan	0,46	21,05
Aboisso	0,49	28,95
Agboville	0,48	26,32
Agnibilékro	0,44	15,79
Azagué	0,46	21,05
Bouaflé	0,45	18,42
Bouaké	0,48	26,32
Bouna	0,50	31,58
Boundiali	0,51	34,21
Dabakala	0,48	26,32
Daloa	0,45	18,42
Dimbokro	0,28	-26,32
Ferkéssédougou	0,41	7,89
Gagnoa	0,49	28,95
Grand-Lahou	0,39	2,63
Guiglo	0,71	86,84
La Mé	0,45	18,42
Man	0,38	0
Mankono	0,41	7,89
Odienné	0,39	2,63
Sassandra	0,46	21,05
Séguéla	0,44	15,79
Tabou	0,47	23,68
Tiassalé	0,46	21,05
Toulepleu	0,64	68,42
Maximum	0,71	86,84
Minimum	0,28	-26,32
Moyenne	0,47	24,09
Ecart-type	0,09	
CV (%)	18,69	

Les valeurs du coefficient de gradex sont représentées à la figure 51, de façon spatiale sur l'ensemble de la Côte d'Ivoire. Ces valeurs sont plus élevées à l'Ouest vers Guiglo et Séguéla et au Nord-Est vers Bouna. La valeur inférieure à 0,38 est observée à Dimbokro (0,28).



**Figure 51** : Cartographie du coefficient de gradex (1931-2020)

### 6.3. DISCUSSION

Les principaux résultats ont montré que les séries de 30 ans sont mieux ajustées par les lois Gumbel (26,92-53,85%) et Gamma inverse (26,92- 46,15%). La suprématie de la loi de Gumbel se dégrade de la période humide (1931-1960) avec un taux d'apparition de 53,85% à la période sèche (1991-2020) (26,92%) au profit de la loi Gamma Inverse avec des probabilités respectives de 46,15% (1961-1990) et 42,31% (1991-2020). Concernant les séries de 60 ans, elles sont mieux ajustées par les lois Gamma inverse (30,77%), Gamma (15,38-46,15%) et Gumbel (15,38-42,31%). La loi Gumbel est prédominante sur la première période relativement humide (1931-1960) avec un taux d'apparition de 42,31%. Quant à la deuxième période relativement moins humide (1991-2020), elle est dominée par les lois Gamma (46,15%) et Gamma Inverse (30,77%). La chronique complète de 1931-2020 présente une suprématie

notable de 50% de la loi Gumbel sur les lois Gamma (34,62%) et Gamma Inverse (15,38%). Il est constaté que la loi Gumbel est la loi la plus dominante dans l'ensemble et plus singulièrement en périodes humides. Les données des périodes à tendances normales et sèches ont été mieux ajustées par les lois Gamma et Gamma inverse. Les lois utilisées pour l'ajustement des données de pluies journalières maximales annuelles sont donc sensibles à la taille des échantillons et au contexte climatique des séries. En effet, les lois sont plus stables lorsque la taille des séries de données devient importante (au moins 60 ans) et quand la série prend en compte une composante humide (avant 1970) et une composante sèche (après 1970).

La sensibilité des lois statistiques appliquées aux pluies extrêmes a montré que toutes les distributions de probabilité des pluies journalières maximales annuelles en Côte d'Ivoire ne pouvaient pas être uniquement assimilées à une seule loi quelle que soit la taille et le contexte climatique de la série de données. L'utilisation de l'outil SAD (système d'aide à la décision) pour l'analyse fréquentielle a permis de dévoiler certaines lois telles que les lois Gamma et Gamma Inverse qui sont rarement utilisées pour l'ajustement des maximas pluviométriques. Ces résultats traduisent une sensibilité des modèles statistiques d'ajustement des valeurs extrêmes à la taille des échantillons de données et au contexte climatique.

Plusieurs auteurs ayant travaillé avec des séries de pluies journalières maximales annuelles de différentes tailles sont parvenus à des conclusions contradictoires. Selon le premier groupe, pour des séries de grande taille (47-81 ans), les auteurs sont parvenus à la conclusion selon laquelle la loi de Gumbel est prédominante par rapport aux autres lois (Lognormale, Fréchet, Weibull, GEV, etc.). Cependant, selon le deuxième groupe, la loi Gumbel n'est pas prédominante devant les autres lois pour les séries de grande taille.

Dans le premier cas, plusieurs études ont été réalisées. Ainsi, les travaux de Goula et *al.* (2007, 2010) basés sur l'analyse fréquentielle de pluies maximales journalières annuelles d'une part de 34 postes pluviométriques de la Côte d'Ivoire couvrant la période 1947-1995 (49 ans) et d'autre part sur 47 postes pluviométriques ivoiriens avec des données de pluies maximales annuelles couvrant la période 1947-1993 (47 ans), sont parvenus à la même conclusion selon laquelle la loi de Gumbel et la loi Lognormale ajustent au mieux les pluies maximales annuelles. Selon les travaux de Soro (2011), réalisés en Côte d'Ivoire sur les pluies maximales journalières annuelles au cours de la période 1942-2002 (61 ans), les meilleures lois retenues sont respectivement la loi de Gumbel (34,1%), la loi de Fréchet (29,5%), la loi Lognormale (22,7%) et la loi Weibull (13,6%). Selon l'étude de Kouassi et *al.* (2018) à partir des données

de pluies journalières maximales annuelles qui couvrent la période allant de 1961 à 2014 (54 ans) sur la station d'Abidjan (Port-Bouët), la loi qui ajuste le mieux ces données est la loi de Gumbel. Les résultats des travaux de Agué et Afouda (2015) réalisés à partir des données de 35 stations couvrant globalement la période de 1921 à 2001 (81 ans), ont montré une prédominance des lois Gumbel (51,43%) et Lognormale (28,57%). Les travaux de Koumassi et *al.* (2014) réalisés au Bénin (bassin de la Sota) à partir de données de hauteurs de pluies journalières allant de 1965 à 2008 (44 ans) de huit (8) stations ont montré que la loi de Gumbel et la loi log-Pearson Type III sont les lois prédominantes.

Dans le deuxième cas de figure, plusieurs études ont été également menées. Selon Habibi et *al.* (2013), une analyse fréquentielle de séries annuelles de pluies maximales journalières a été réalisée sur les données de 27 stations pluviométriques de la période 1970 et 2005 (35 ans) du bassin du Chott Chergui (Algérie). La loi GEV a montré une bonne adéquation aux séries des pluies journalières maximales du bassin du Chott Chergui (Algérie). Muller (2006) est parvenu à la même conclusion que Habibi et *al.* (2013) quant à la suprématie de la loi GEV. Dans une étude sur la longue série pluviométrique d'Athènes (136 années), Koutsoyiannis (2004) a constaté que la loi Gumbel n'est pas adaptée aux maximas annuels de la série de 136 années, tandis qu'elle paraissait appropriée si l'on ne considère, par exemple, que les 34 dernières années. Les résultats des travaux de Benkhaled (2007) dans la région du Cheliff ont montré à partir d'une analyse comparative entre les méthodes GEV et Gumbel basée sur quatre échantillons de données échelonnées sur une durée comprise entre 21 et 30 ans, que les méthodes GEV et Gumbel ont fourni des résultats semblables.

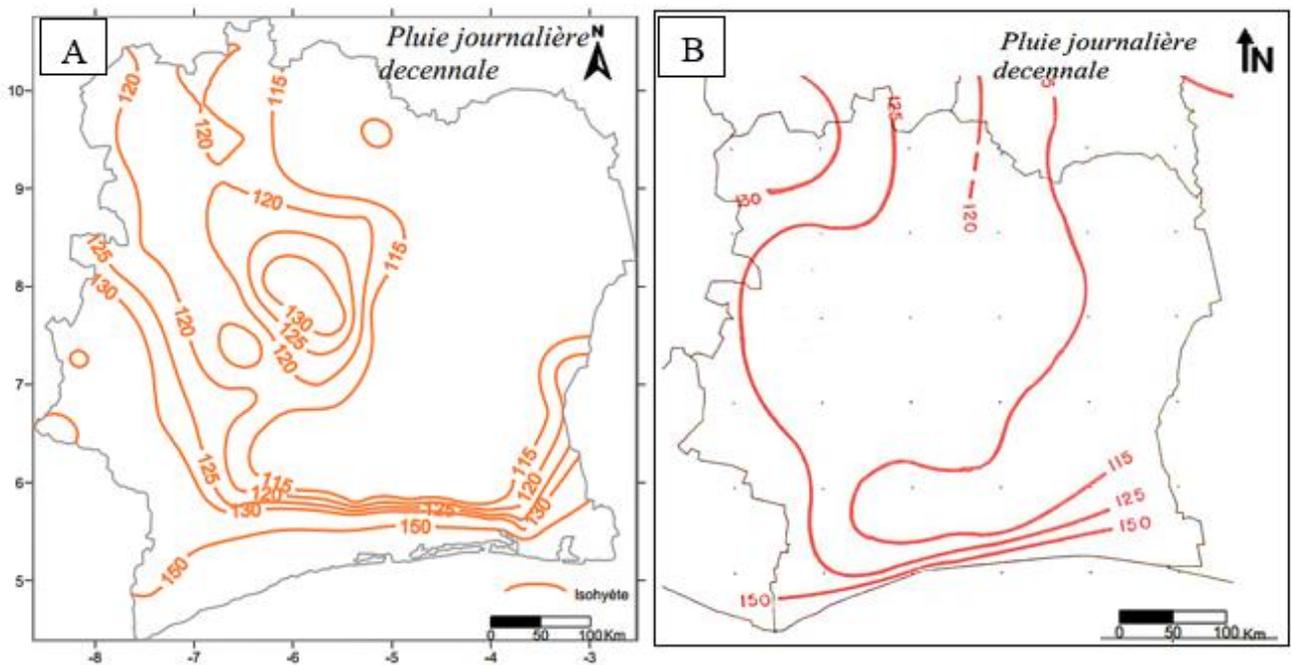
Les résultats obtenus au cours de ce travail sont plus en accord avec les résultats du premier groupe. Au-delà de la taille, la différence des résultats pourrait être due au contexte climatique. Ces résultats soulèvent également le débat sur le scepticisme de la prédominance du modèle de Gumbel au niveau de l'estimation des pluies journalières maximales annuelles. On peut affirmer que la loi Gumbel n'est donc pas toujours le meilleur modèle dans l'ajustement des pluies extrêmes.

Les isohyètes des pluies journalières décennales et centennales élaborées dans cette étude, ont été comparées à celles actuellement utilisées pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques en Côte d'Ivoire, c'est-à-dire à celles du CIEH et Soro (2011). La figure 52 présente les cartes des isohyètes décennales du CIEH et de celles de Soro (2011). Ensuite vient la carte de la série 1931-2020 de ce travail (figures 53). Ces isohyètes sont les 115 mm, 120

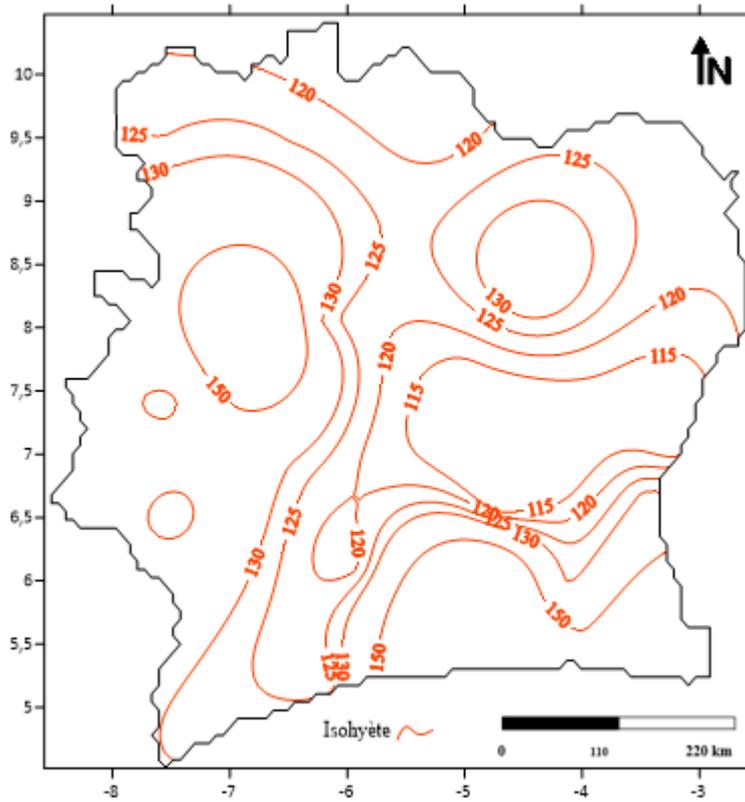
mm, 125 mm, 130 mm et 150 mm. La répartition spatiale de ces isohyètes diffère sur chaque carte. Celles de la carte du CIEH ne couvrent pas tout le pays. Elles sont plus resserrées au Sud et vont vers le Nord en passant par le Centre et l'Ouest. Les isohyètes de la carte de Soro (2011) quant à elles sont aussi resserrées au Sud et sont plus concentrées à l'Ouest. Par contre, celles de cette présente étude occupent pratiquement tout le pays.

L'isohyète 150 mm couvre uniquement toute la bande côtière sur les cartes du CIEH et de Soro (2011), alors qu'elle s'étend sur une partie de la bande côtière (surtout vers le Sud-Est) sur la carte de cette étude. De plus, elle englobe une partie de l'Ouest sur la carte de la période 1931-2020. Notons que l'isohyète 120 mm n'a pu être tracée par le CIEH alors qu'elle apparaît clairement dans cette présente étude et sur la carte de Soro (2011).

Sur les cartes de Soro (2011) et du CIEH, l'isohyète 115 mm couvre une partie du Sud et se rapproche du Nord-Est pour celle du CIEH et du Nord-Ouest pour celle de Soro (2011) en passant par le centre. En ce qui concerne la carte de cette étude, cette isohyète se présente dans une petite zone de l'Est.

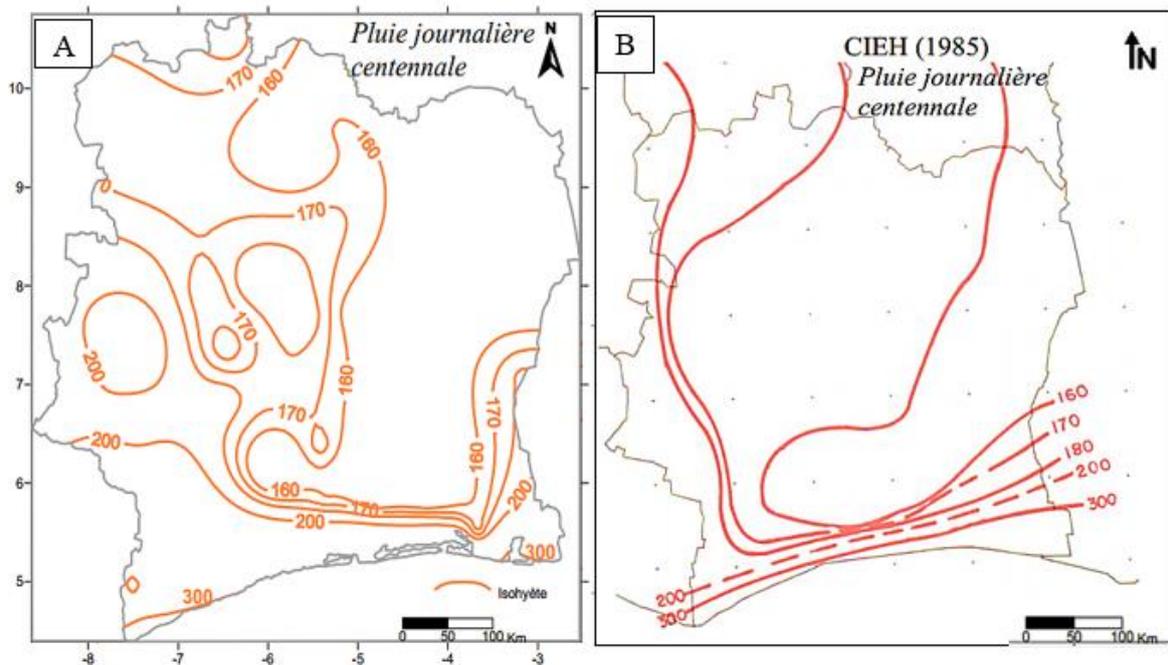


**Figure 52 :** Isohyètes de pluies journalières décennales de Soro (2011) (A) et du CIEH (1985) (B)

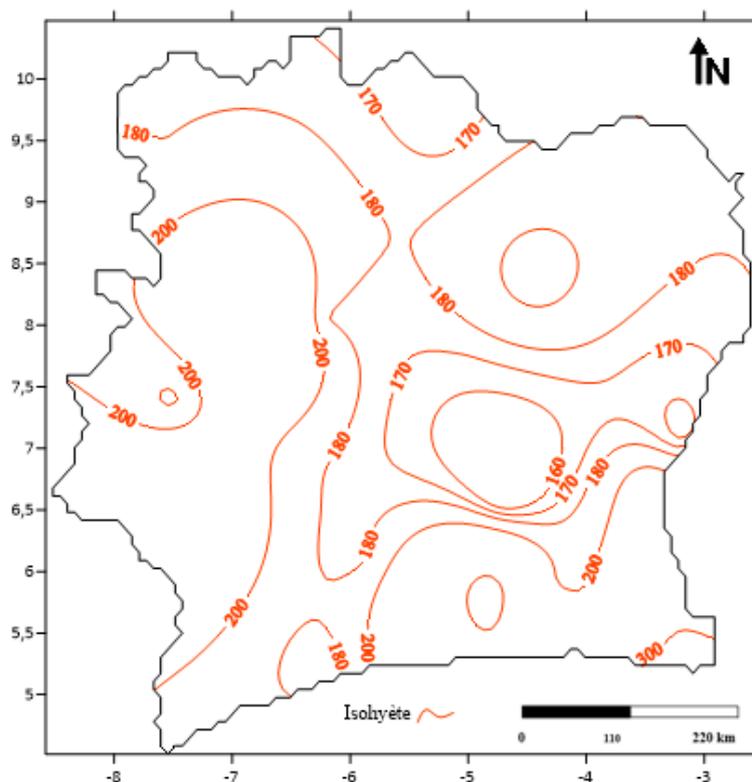


**Figure 53** : Isohyètes de pluies journalières décennales de la présente étude (1931-2020)

Les figures 54 et 55 montrent la répartition spatiale des isohyètes spécifiques des pluies centennales.



**Figure 54** : Isohyètes de pluies journalières centennales de Soro (2011) (A) et du CIEH (1985) (B)



**Figure 55** : Isohyètes de pluies journalières centennales de la présente étude (1931-2020)

Ces isohyètes sont les 160 mm, 170 mm, 180 mm, 200 mm et 300 mm. La répartition spatiale de ces isohyètes diffère sur chaque carte. Leur aspect général est quasiment pareil que celui des pluies décennales au niveau de toutes les cartes. L'isohyète 300 ne couvre que la région de Tabou sur la carte de Soro (2011) et une infime partie du Sud-Est, alors qu'elle couvre toute la bande côtière sur la carte du CIEH. La carte de la série entière présente l'isohyète 300 sur une infime partie du Sud-Est. Cependant, cette dernière affiche cette isohyète au Nord-Ouest et dans une infime partie du Nord-Est. L'isohyète 200 qui entoure la région montagneuse de Man sur la carte de Soro, n'apparaît pas au niveau de la carte proposée par le CIEH (1985). Mais, elle est très étendue sur tout le territoire sur les cartes de cette étude. En ce qui concerne l'isohyète 160, elle est présente de manière restreinte sur la carte de cette étude. Par contre, elle apparaît et s'étend largement du Sud vers le Nord sur les cartes de Soro (2011) et du CIEH (1985).

#### 6.4. CONCLUSION PARTIELLE

L'objectif de ce chapitre est l'actualisation des paramètres des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH en se basant sur une analyse de la sensibilité des lois d'ajustement des pluies extrêmes pour la détermination des dites normes hydrologiques.

Les résultats des tests préalables à l'analyse fréquentielle ont indiqué que les hypothèses d'application à l'analyse fréquentielle sont vérifiées sur la quasi-totalité des séries. Alors, les séries des pluies journalières maximales annuelles sont constituées par des valeurs indépendantes, homogènes et stationnaires. En effet, le test d'indépendance est validé par 92% des stations dont dix-sept (17) au seuil de 5% et sept (7) au seuil de 1%. Pour le test de stationnarité, 92% des stations l'ont validé dont treize (13) au seuil de 5% et onze (11) au seuil de 1%. Quant au test d'homogénéité, il est validé à 96% des stations dont seize (16) au seuil de 5% et neuf (9) au seuil de 1%. En somme, 81% des stations vérifient tous les tests d'hypothèse. Ainsi, il est donc possible de procéder à l'analyse fréquentielle.

Selon le système d'aide à la décision (SAD), les meilleures classes pour les séries de 30 ans sont les classes C (57,47%) et E (42,53%). La classe C apparaît vingt-trois (23) fois seule comme meilleure classe contre quatre (4) fois pour la classe E. Pour les séries de 60 ans, les meilleures classes sont les classes C (46,84%), D (29,57%) et E (23,59%). Quant à la série de 1931-2020, elle présente respectivement comme meilleures classes les classes C (42,86%), E (35,71%) et D (21,43%). La loi log-normale est inapplicable sur l'ensemble des données.

Les principaux résultats de la sensibilité des lois statistiques ont montré que les séries de 30 ans sont mieux ajustées par les lois Gumbel (26,92-53,85%) et Gamma inverse (26,92-46,15%). La suprématie de la loi de Gumbel se dégrade de la période humide (1931-1960) avec un taux d'apparition de 53,85% à la période sèche (1991-2020) (26,92%) au profit de la loi Gamma Inverse avec des probabilités respectives de 46,15% (1961-1990) et 42,31% (1991-2020). Concernant les séries de 60 ans, elles sont mieux ajustées par les lois Gamma inverse (30,77%), Gamma (15,38-46,15%) et Gumbel (15,38-42,31%). La loi Gumbel est prédominante sur la première période relativement humide (1931-1960) avec un taux d'apparition de 42,31%. Quant à la deuxième période relativement moins humide (1991-2020), elle est dominée par les lois Gamma (46,15%) et Gamma Inverse (30,77%). La chronique complète de 1931-2020 présente une suprématie notable de 50% de la loi Gumbel sur les lois Gamma (34,62%) et Gamma Inverse (15,38%). Il est constaté que la loi Gumbel est la loi la plus dominante dans l'ensemble et plus singulièrement en périodes humides. Les données des

périodes à tendances normales et sèches ont été mieux ajustées par les lois Gamma et Gamma inverse. Les lois utilisées pour l'ajustement des données de pluies journalières maximales annuelles sont donc sensibles à la taille des échantillons et au contexte climatique des séries. En effet, les lois sont plus stables lorsque la taille des séries de données devient importante (au moins 60 ans) et quand la série prend en compte une composante humide (avant 1970) et une composante sèche (après 1970).

Les différents résultats obtenus ont montré que les périodes de référence de calcul des quantiles que choisissent les concepteurs des ouvrages hydrauliques connaissent une instabilité due à la non-stationnarité du climat pendant la période d'étude considérée. Par conséquent, la période entière 1931-2020 a été retenue dans ce travail pour déterminer les normes hydrologiques telles que les normales des pluies annuelles et pluies journalières maximales ainsi que les quantiles des pluies extrêmes (décennaux et centennaux) et le gradex des pluies extrêmes. Le gradex généralement utilisé pour le calcul des débits de projet doit être revu. En considérant la série entière (1931-2020), on se rapproche plus de la réalité. En effet, les valeurs du coefficient de gradex obtenues à l'issue de cette étude varient sur l'ensemble du pays. Les valeurs généralement utilisées au niveau du coefficient de gradex sont de l'ordre de 0,45 pour les zones sahéliennes et 0,38 pour les zones tropicales. En considérant les effets du changement climatique, ces valeurs sont devenues donc obsolètes. Ces nouveaux coefficients varient entre 0,28 (Dimbokro) et 0,71 (Guiglo). Les coefficients de gradex déterminés sont tous supérieurs à la valeur régionale de 0,38 définie par l'ORSTOM exceptée la station de Dimbokro (0,28). Les valeurs de l'écart-type (0,09) et du coefficient de variation (18,69%) montrent une homogénéité des valeurs du coefficient de gradex. La valeur moyenne du gradex en Côte d'Ivoire est de 0,47. Vu les effets démontrés des changements climatiques sur les normes hydrologiques, il sera judicieux de se prononcer sur les normes futures dans un but d'anticipation et d'adaptation pour le dimensionnement des ouvrages futurs. D'où l'analyse prospective des normes hydrologiques qui sera développée dans le prochain chapitre.

## CHAPITRE 7 : ANALYSE PROSPECTIVE DES NORMES HYDROLOGIQUES

### 7.1. ANALYSE RÉGIONALE DES INDICATEURS DE NORMES HYDROLOGIQUES PASSÉES

#### 7.1.1. Analyse régionale des normales des pluies extrêmes passées

Le tableau XLIV présente les caractéristiques descriptives des hauteurs de pluies journalières maximales sur la période 1931-2020 au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire. L'analyse de ces données montre que les hauteurs de pluies journalières maximales enregistrées varient entre 29,83 (région soudanaise) et 230,45 mm (région des montagnes) avec des moyennes allant de 81,59 mm à 115,52 mm. Les valeurs des écart-types oscillent entre 16,36 mm et 28,68 mm.

Quant au coefficient de variation (CV), il est généralement inférieur à 25% excepté la zone des Montagnes et du Soudanais. Ce qui traduit une homogénéité des valeurs au niveau des climats Baouléen, Attiéen du littoral et de l'intérieur et une dispersion des pluies journalières maximales dans le temps pour le climat Soudanais et le climat des montagnes.

Le coefficient d'asymétrie est positif pour les régions des Montagnes, pour l'Attiéen de l'Intérieur et pour le Soudanais et est négatif pour le Baouléen et l'Attiéen du littoral. Pour les coefficients d'asymétrie positifs, la distribution est étalée à droite de la moyenne. Pour celles qui sont négatives, la distribution est étalée à gauche de la moyenne.

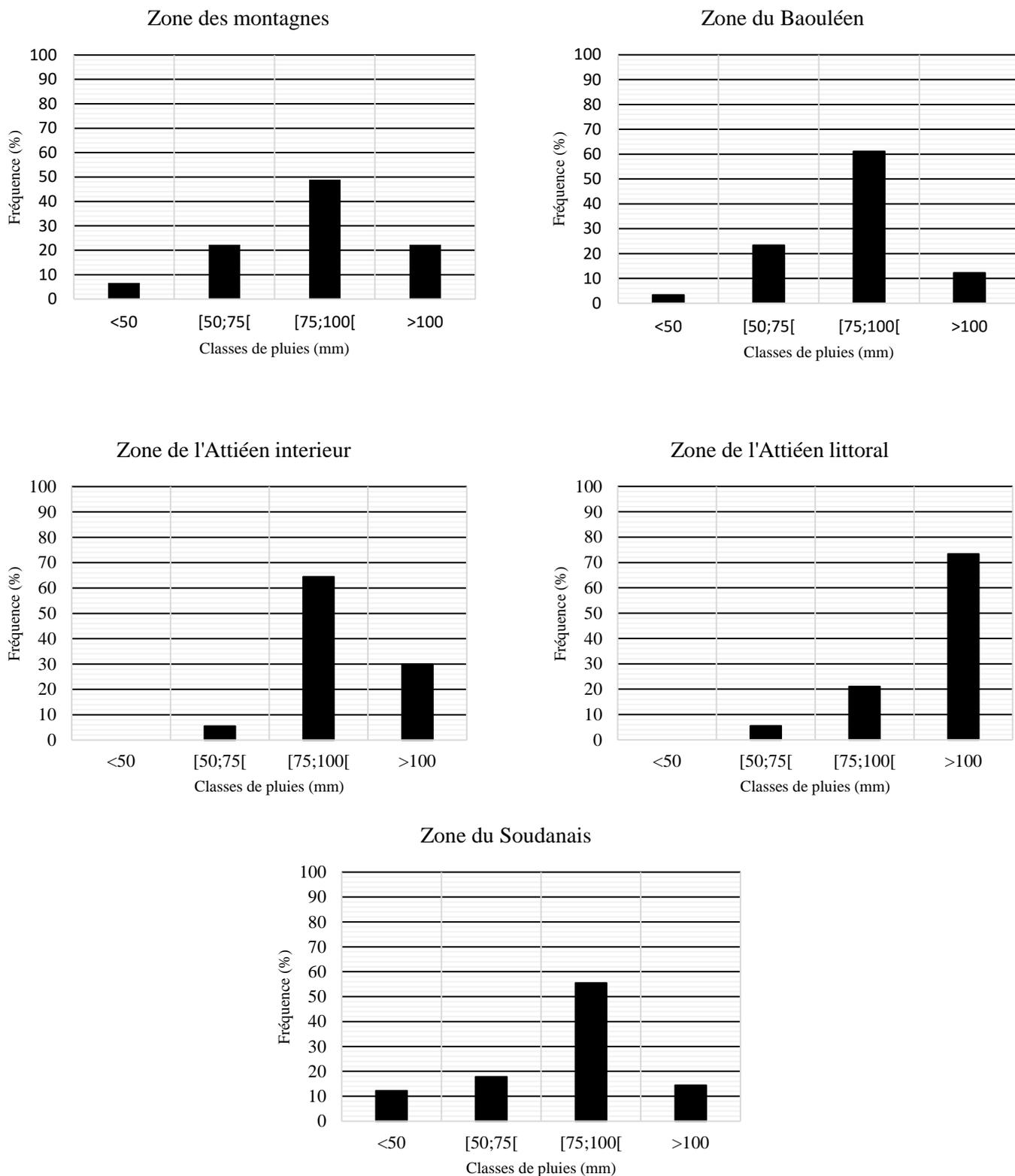
Les coefficients d'aplatissement sont généralement supérieurs à 0 à l'exception de la région de l'Attiéen du littoral. Ces coefficients indiquent une distribution avec un pic moins plat et des extrémités plus épaisses par rapport à la distribution normale. Ceci serait dû au fait que la zone littorale est la plus arrosée.

**Tableau XLIV :** Caractéristiques descriptives des pluies journalières maximales (1931-2020) au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire

	Min	Max	Moyenne	Ecart-type	CV	Asymétrie	Aplatissement
<b>Montagnes</b>	33,42	230,45	87,25	28,68	33%	1,46	5,60
<b>Baouléen</b>	43,82	125,42	83,19	16,36	20%	-0,02	0,40
<b>Attiéen littoral</b>	70,58	166,05	115,52	22,97	20%	-0,42	-0,64
<b>Attiéen intérieur</b>	57,7	157,63	95,37	19,18	20%	1,23	1,81
<b>Soudanais</b>	29,83	197,55	81,59	24,13	30%	1,00	4,84

Ainsi, la figure 56 illustre la distribution des fréquences de pluies journalières maximales annuelles observées dans les différentes zones pour la période 1931-2020. L'analyse de ce graphe montre que la classe des hauteurs de pluies journalières maximales annuelles la plus remarquable est celle couvrant l'intervalle [75 mm - 100 mm] [avec un pourcentage de 48,88%, 61,11%, 64,44% et 55,55% respectivement pour les zones des Montagnes, du Baouléen, de l'Attiéen de l'Intérieur et du Soudanais. L'Attiéen du Littoral fait exception à cette règle avec des hauteurs de pluies journalières maximales remarquables pour l'intervalle >100%.

Cette classe [75 mm -100 mm] [représente la classe modale de la série. À côté de cette classe dominante, on a les classes [50 mm - 75 mm] [et [>100 mm] qui ont des fréquences de valeur oscillant entre 10 et 20%. Ces deux classes sont suivies de la classe de pluies journalières maximales annuelles < 50 mm. La dernière classe enregistre pour toutes les zones, des taux très bas.



**Figure 56** : Histogramme des pluies journalières maximales sur la période 1931-2020 au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire

### 7.1.2. Analyse régionale des normales de pluies annuelles passées

Le tableaux XLV met en évidence les caractéristiques descriptives des pluies annuelles passées de la période 1931-2020. L'analyse de ces données montre que les hauteurs de pluies passées varient entre 1022,75 mm (Baouléen) et 2058,28 mm (Montagnes) avec des moyennes allant de 1339,51 mm (Soudanais) à 1698,11 mm (Attiéén du littoral). Les valeurs des écart-types oscillent entre 324,14 mm (Baouléen) et 417,75 mm (Attiéén du littoral). Quant au coefficient de variation (CV) des différentes régions climatiques, il est inférieur à 25% pour toutes les zones (variant entre 12,49% pour le Baouléen et 20,31% pour l'Attiéén du littoral). Ce qui traduit une bonne homogénéité des valeurs au niveau des zones et une faible dispersion des pluies journalières maximales annuelles prévues pour la période 1931-2020 dans le temps.

**Tableau XLV** : Statistique descriptive des pluies annuelles 1931-2020 au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
Montagnes	1126,68	2058,28	1610,51	385,09	18,71
Baouléen	1022,75	1874,96	1380,84	234,14	12,49
Attiéén littoral	1226,55	2056,91	1698,11	417,75	20,31
Attiéén intérieur	1069,72	1969,45	1434,26	291,48	14,80
Soudanais	1023,88	1817,58	1339,51	238,10	13,10

### 7.1.3. Analyse régionale des quantiles des pluies extrêmes passées

#### 7.1.3.1. Ajustement des pluies extrêmes régionales

Les résultats obtenus à la suite de l'application des critères d'Akaiké et Bayésien sont consignés dans le tableau XLVI. Il est constaté que la loi Gamma affiche les paramètres AIC et BIC les plus minimales pour les zones des Montagnes, Baouléen et le Soudanais. Ceci justifie sa suprématie dans ces trois précédentes zones, tandis que le domaine Attiéén (intérieur et littoral) privilégie respectivement la loi Gamma inverse et Halphen type B pour la série 1931-2020. La loi Gamma est suivie par la loi de Gumbel pour la région des montagnes avec une différence absolue très faible de 0,25 pour les deux paramètres numériques AIC et BIC. Les résultats AIC et BIC confirment la réalité avec une convergence de la Halphen de type B vers la loi Gamma et une convergence de la loi Halphen Inverse type B vers la loi Gamma Inverse (tableau LXXIII).

Les deux paramètres AIC et BIC convergent vers la même loi quelle que soit la zone climatique.

**Tableau XLVI :** Critères AIC et BIC appliqués aux lois de probabilité utilisées pour la série 1931-2020 des différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire

Zones	Lois statistiques	BIC	AIC
Montagnes	<b>Gamma</b>	<b>855,65</b>	<b>850,65</b>
	Gumbel	855,90	850,89
	Halphen type A	860,08	852,58
	Pearson type 3	860,10	852,60
Baouléen	<b>Gamma</b>	<b>770,98</b>	<b>765,99</b>
	Halphen de type B	771,96	766,46
	Gumbel	783,89	778,89
	Pearson type 3	784,85	779,87
Attiéen Intérieur	<b>Inverse Gamma</b>	<b>778,46</b>	<b>773,46</b>
	Halphen de type B inverse	781,67	774,17
	Log-Pearson type 3	783,51	776,02
	Weibull	810,86	805,86
	Exponentiel	844,24	839,24
Attiéen Littoral	<b>Halphen type B</b>	<b>832,92</b>	<b>825,42</b>
	Gamma	834,67	829,67
	Pearson type 3	835,23	831,56
	Gumbel	847,45	842,45
Soudanais	<b>Gamma</b>	<b>833,94</b>	828,94
	Halphen of type B	838,25	830,75
	Gumbel	839,36	834,36
	Weibull	843,29	838,29
	Log-Pearson type 3	846,58	839,08
	Inverse Gamma	847,36	842,36
	Pearson type 3	849,53	844,85

### 7.1.3.2. Quantiles de pluies journalières extrêmes régionales

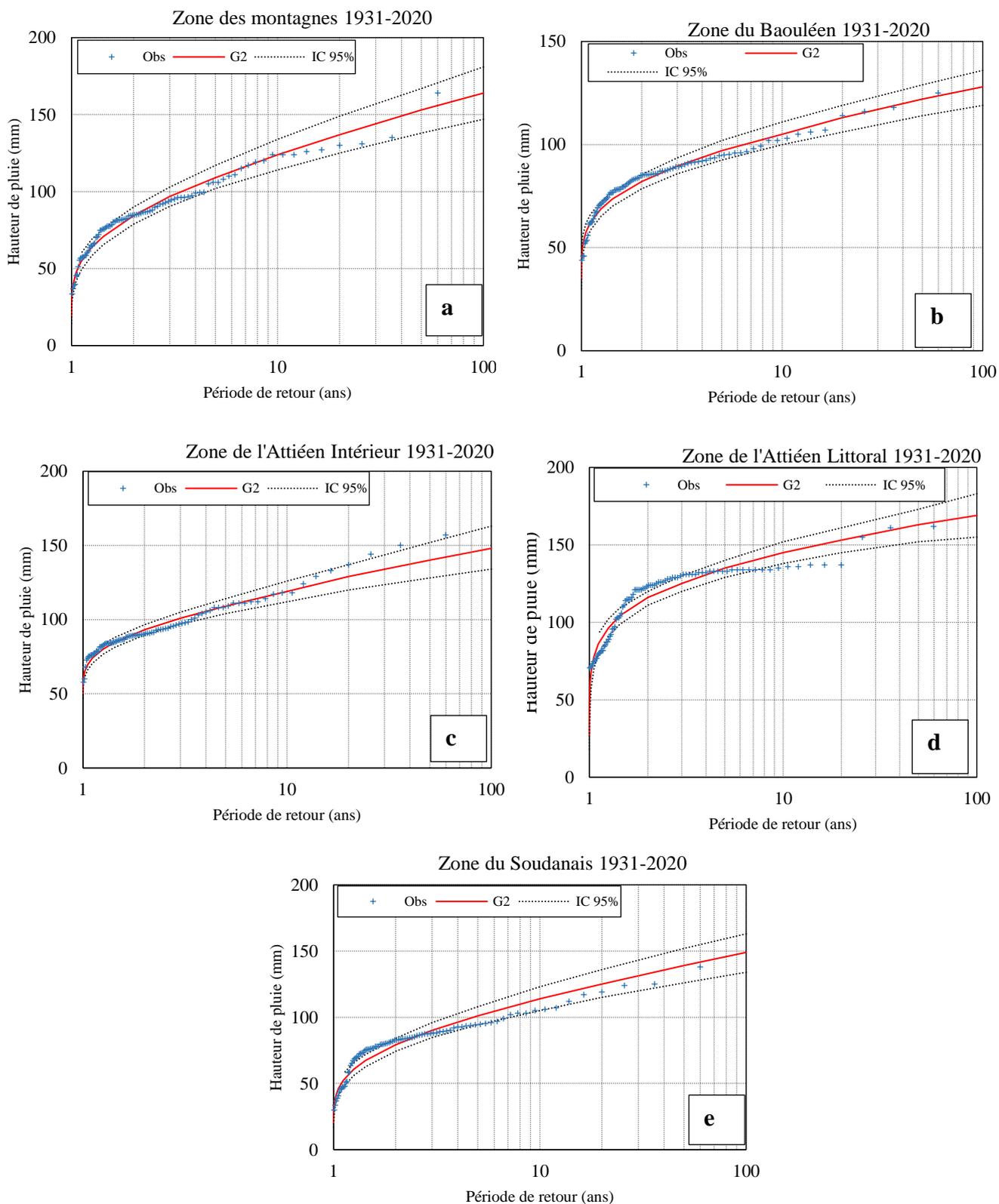
Les quantiles calculés à partir des distributions des pluies journalières maximales annuelles de la série de 90 ans (1931-2020) au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire sont présentés dans le tableau LXVII. Les périodes de retour retenues sont celles de 100 ans, 50 ans, 20 ans, 10 ans, 5 ans et 2 ans.

De façon générale, les valeurs de quantiles les plus élevées se rencontrent au niveau de la zone littorale, suivie de la zone montagneuse et de l'Attéen de l'intérieur. Les valeurs de quantiles les plus faibles se situent au niveau du Baouléen suivi du Soudanais.

**Tableau XLVII :** Quantiles des pluies journalières maximales journalières de 1931-2020 des différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire

Zones	Lois	Quantiles					
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Montagnes	G	84,4	109	112	137	153	164
Baouléen	G	75	85	98	113	117	140
Attéen intérieur	IG	81	98	109	129	140	160
Attéen littoral	HB	101	118	130	153	163	195
Soudanais	G	76	89	102	125	139	142

Pour quantifier l'incertitude liée aux données d'entrée des modèles statistiques, l'on a construit un intervalle de confiance à 95 %. Pour les petites périodes de retour (inférieures à 10 ans), l'intervalle de confiance à 95 % est très étroit (Figure 57). Les quantiles de ces périodes de retour présentent une très faible variabilité autour de la valeur de dimensionnement attendue. Pour les grandes périodes de retour (supérieures à 20 ans), la largeur de l'intervalle de confiance (IC) devient de plus en plus importante. Les intervalles de confiance restent stables autour des quantiles recherchés pour les lois d'ajustement de la série complète 1931-2020. (Figure 58). Ces quantiles sont estimés grâce aux lois Gamma et Halphen type B. La largeur de l'intervalle de confiance montre bien la forte incertitude liée à l'estimation des quantiles (Figure 58).



**Figure 57** : Ajustements des meilleures lois et intervalles de confiance de la série 1931-2020 au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire

### 7.1.3.2. Analyse du coefficient régional de gradex des méthodes de l'OSTORM et du CIEH

Les différentes valeurs du gradex ( $\lambda$ ) des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH évaluées en fonction de la chronique complète (1931-2020) ainsi que les biais relatifs par rapport à la valeur régionale du coefficient de gradex (0,38) sont consignés dans le tableau XLVIII Les différentes valeurs du gradex évaluées à partir des quantiles de période de retour de 10 ans et 100 ans pour la chronique entière varient entre 0,43 (Attiéen de l'intérieur) et 0,32 (Montagnes). Le coefficient de gradex croît du centre de la Côte d'Ivoire vers le Sud ainsi que du centre vers l'Ouest. Les valeurs de biais du coefficient de gradex fluctuent entre 3,20% (Baouléen) et 31,58% (Montagnes).

**Tableau XLVIII :** Gradex régional des méthodes de l'OSTORM et du CIEH et biais relatifs

Zones climatiques	Coefficient de gradex	Biais de gradex (%)
Attiéen Littoral	0,46	22,18
Attiéen Intérieur	0,43	12,78
Soudanais	0,47	23,13
Montagnes	0,50	31,58
Baouléen	0,39	3,20

## 7.2. ANALYSE DE L'ÉTAT PROSPECTIF DES NORMES HYDROLOGIQUES

### 7.2.1. Évaluation du modèle Markovien

Les tableaux XLIX et L mettent en exergue les résultats des critères numériques permettant d'évaluer la performance du modèle markovien conçu pour les pluies journalières maximales et les pluies annuelles des zones climatiques homogènes.

En ce qui concerne les pluies journalières maximales annuelles, il est constaté que les valeurs de Nash-Stucliffe oscillent entre 94,56% (Attiéen Intérieur) et 97,36% (Soudanais), tandis que le modèle Markovien à l'échelle annuelle a été très concluant avec des performances très satisfaisantes allant de 97,15% (Baouléen) à 98,83% (Montagnes). Ces valeurs sont toutes supérieures à 60% et sont très proches de 100%, traduisant ainsi une bonne adéquation entre les valeurs observées et les valeurs simulées. En d'autres termes, les valeurs observées et le modèle sont cohérents. Ces résultats très satisfaisants permettent de certifier de la performance du modèle conçu.

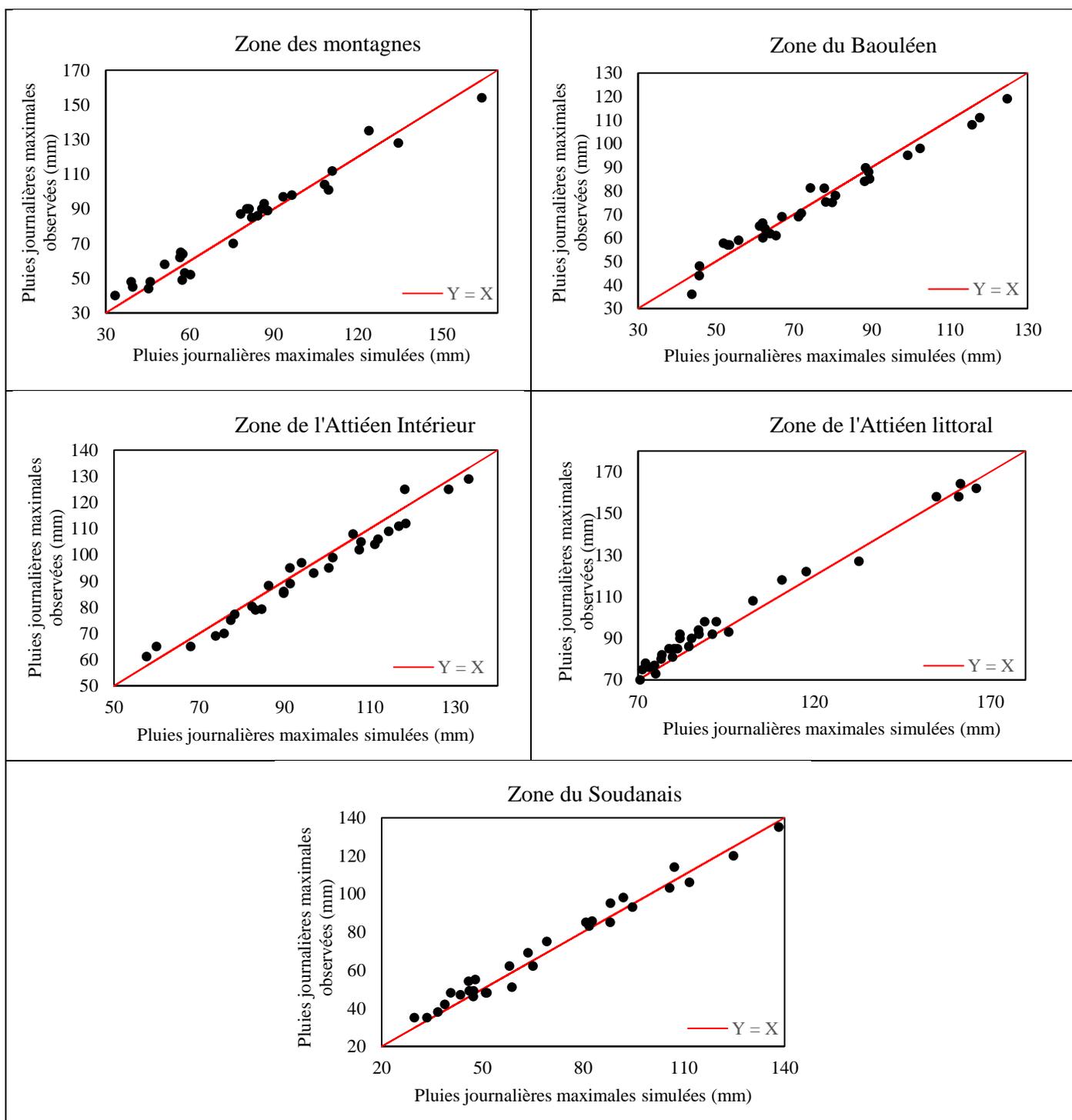
**Tableau XLIX :** Performances en phase de validation du modèle Markovien pour les pluies maximales journalières

<i>Zones</i>	<i>Montagnes</i>	<i>Baouléen</i>	<i>Attiéen Intérieur</i>	<i>Attiéen Littoral</i>	<i>Soudanais</i>
Nash-Stucliffe (%)	95,43	96,1	94,56	97,04	97,36

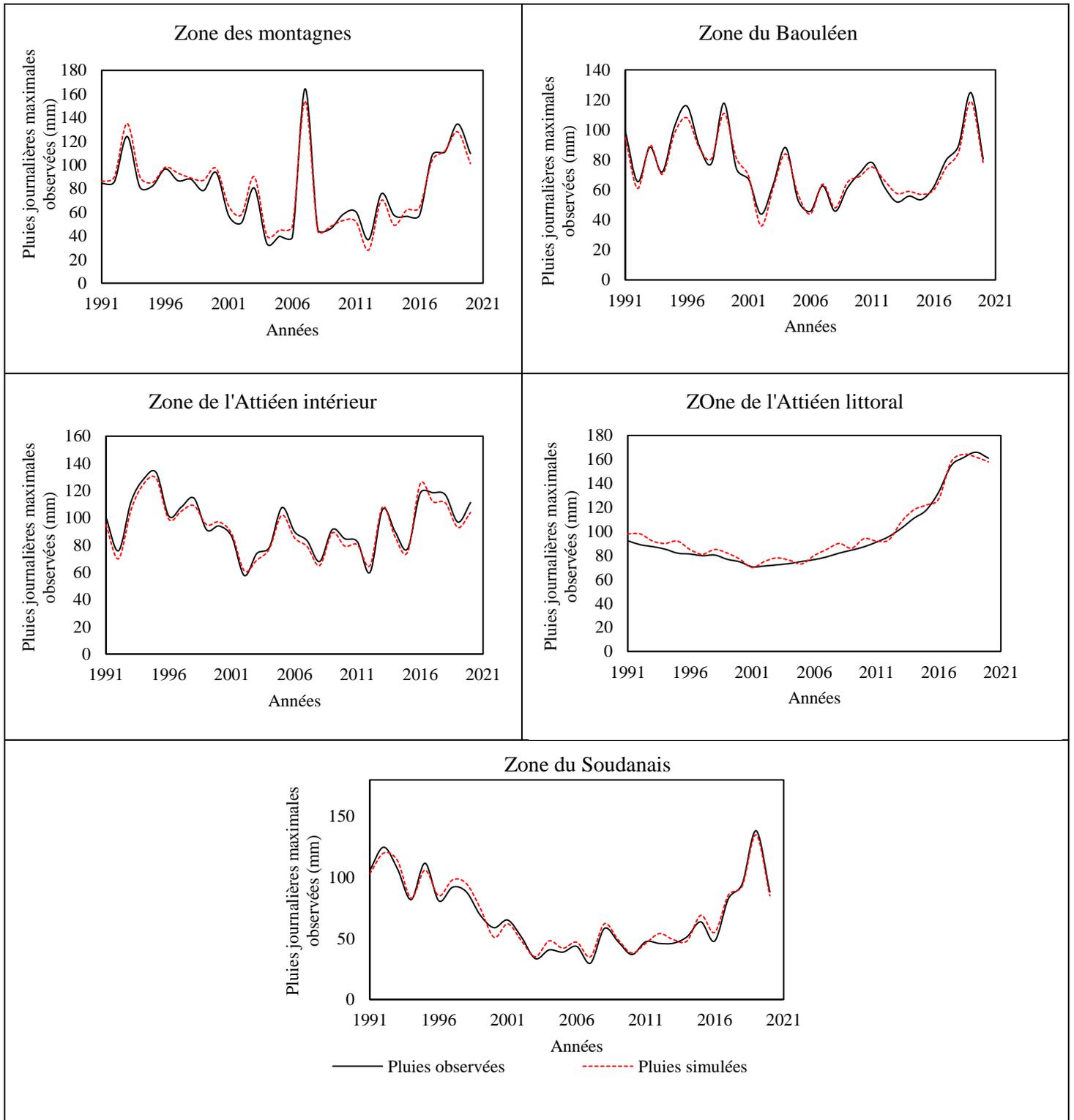
**Tableau L :** Performances en phase de validation du modèle Markovien pour les pluies annuelles

<i>Zones</i>	<i>Montagnes</i>	<i>Baouléen</i>	<i>Attiéen Intérieur</i>	<i>Attiéen Littoral</i>	<i>Soudanais</i>
Nash-Stucliffe (%)	98,83	97,15	98,17	98,07	98,63

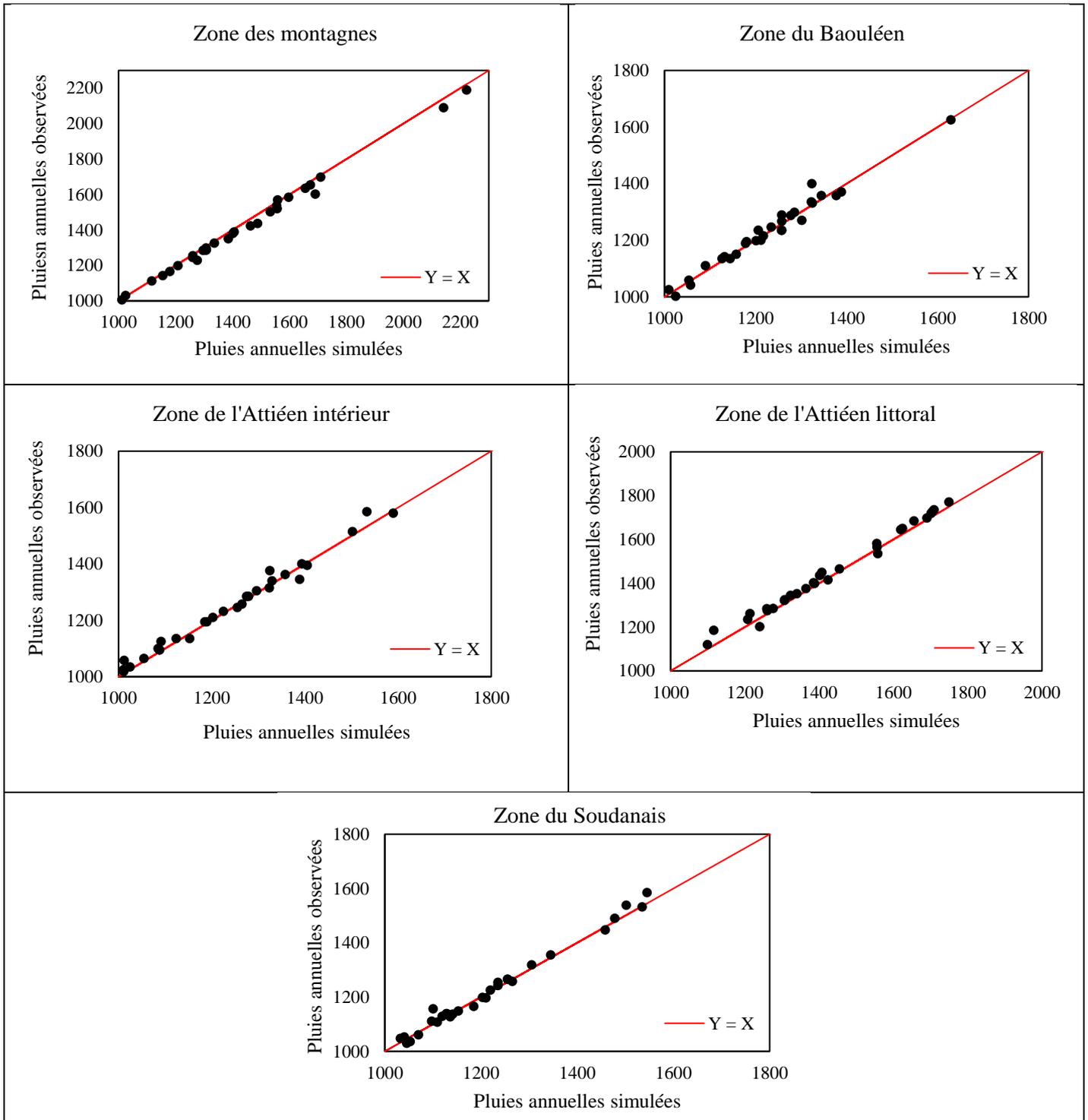
Les figures 58 à 61 mettent en relief la comparaison des pluies journalières maximales annuelles ainsi que les pluies annuelles observées et simulées sur la période de validation (1991-2020). En effet, les valeurs observées et simulées sont moins dispersées autour de la droite  $Y = X$ . Les points du graphe sont très proches de la droite. Ce résultat traduit le fait que le modèle a une tendance à représenter fidèlement les valeurs observées. Néanmoins, il est constaté que pour le régime climatique de l'Attiéen du Littoral, une partie des valeurs des pluies simulées est sous-estimée par le modèle. Ce constat peut s'expliquer par le fait que la zone est très arrosée, donnant ainsi des valeurs observées relativement grandes (jusqu'à 164,3 mm comme pluie journalière maximale annuelle).



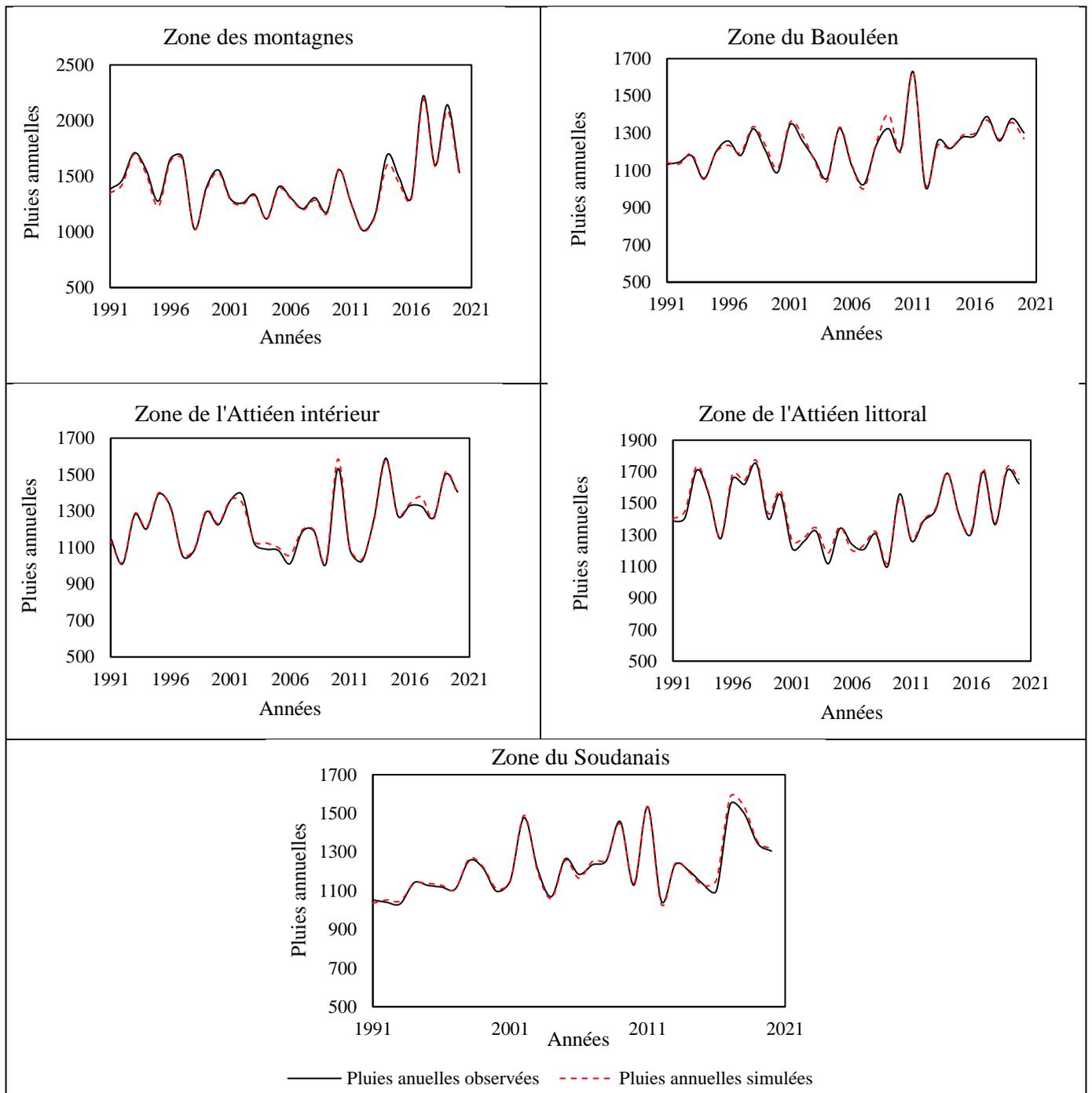
**Figure 58 :** Pluies journalières maximales observées et simulées au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire en phase de validation (1991-2020)



**Figure 59 :** Courbes des pluies journalières maximales observées et simulées au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire en phase de validation (1991-2020)



**Figure 60** : Pluies annuelles observées et simulées au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire en phase de validation (1991-2020)



**Figure 61** : Courbes des pluies annuelles observées et simulées au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire en phase de validation (1991-2020)

Au vu des observations faites, les critères visuels nous permettent de vérifier les conclusions envisagées à partir des indicateurs de performances numériques.

On peut donc conclure que le modèle est performant et peut simuler de façon raisonnable les pluies extrêmes des périodes 2031-2060 et 2071-2100. Néanmoins des méthodes de correction ont été appliquées en tenant en compte des écarts observés entre les valeurs observées et simulées de la période de validation 1991-2020.

### **7.2.2. Analyse des normales de pluies extrêmes prévues**

Les tableaux LI et LII mettent en évidence les caractéristiques descriptives des pluies extrêmes prévues des périodes 2031-2060 et 2071-2100. L'analyse de ces données montre que les hauteurs de pluies prévues varient entre 52,95 mm (Baouléen) et 244,10 mm (Attiéen du littoral) avec des moyennes allant de 69,41 mm (Baouléen) à 160,78 mm (Attiéen du littoral) pour la période 2031-2060. Les valeurs des écart-types oscillent entre 18,74 mm (Soudanais) et 39,18 mm (Attiéen du littoral). Quant au coefficient de variation (CV) des données des différentes régions, il est inférieur à 25% pour toutes les zones. Ce qui traduit une homogénéité des valeurs au niveau des zones et une faible dispersion des pluies journalières maximales annuelles prévues pour la période 2031-2060. Pour la période 2071-2100, les hauteurs de pluies extrêmes simulées varient entre 44,46 mm (Baouléen) et 222,9 mm (Attiéen du littoral) avec des moyennes allant de 70,85 mm (Baouléen) et 222,9 mm (Attiéen du littoral) et des écart-types de 14,21 mm (Baouléen) et 43,41 mm (Attiéen du littoral). Les coefficients de variation de cette série partent de 20,05% (Baouléen) à 30,80% (Attiéen du littoral). Ce dernier coefficient étant supérieur à 25%, on peut conclure que les hauteurs de pluies extrêmes connaîtront une dispersion dans le temps pendant la période 2071-2100 dans l'Attiéen du littoral.

Le tableau LIII met en exergue les différents biais entre les pluies journalières maximales annuelles passées (1931-2020) et celles du milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (2031-2060) et celles de la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2071-2100). Ces valeurs de biais pour la période 2031-2060 varient de -16,56% (Attiéen de l'intérieur) à +36,74% (Attiéen du littoral). Celles de la période 2071-2100 fluctuent entre -34,13% (Montagnes) et +37,89% (Attiéen du littoral). Ces biais sont significatifs et traduisent une augmentation des pluies extrêmes à venir. Les années 2031-2060 connaîtront alors une hausse des pluies journalières extrêmes dans les domaines de l'Attiéen du littoral, le Soudanais du milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (2031-2060) à fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2071-

2100), tandis que l'on enregistrera des baisses des pluies extrêmes au niveau de l'Attiéen de l'intérieur et du domaine des montagnes.

**Tableau LI** : Statistique descriptive des pluies extrêmes de la période 2031-2060

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
<b>Montagnes</b>	81,89	201,30	119,31	29,51	24,73
<b>Baouléen</b>	52,95	106,90	69,41	13,77	19,84
<b>Attiéen littoral</b>	109,60	244,10	160,78	39,18	24,37
<b>Attiéen intérieur</b>	57,83	125,10	80,08	15,10	18,86
<b>Soudanais</b>	61,23	133,20	87,50	18,74	21,41

**Tableau LII** : Statistique descriptive des pluies extrêmes de la période 2071-2100

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
<b>Montagnes</b>	68,15	205,3	120,31	30,41	24,73
<b>Baouléen</b>	44,46	109,6	70,85	14,21	20,05
<b>Attiéen littoral</b>	73,68	222,9	140,96	43,41	30,80
<b>Attiéen intérieur</b>	47,56	108,5	72,36	14,71	20,33
<b>Soudanais</b>	59,89	135,3	85,77	17,97	20,95

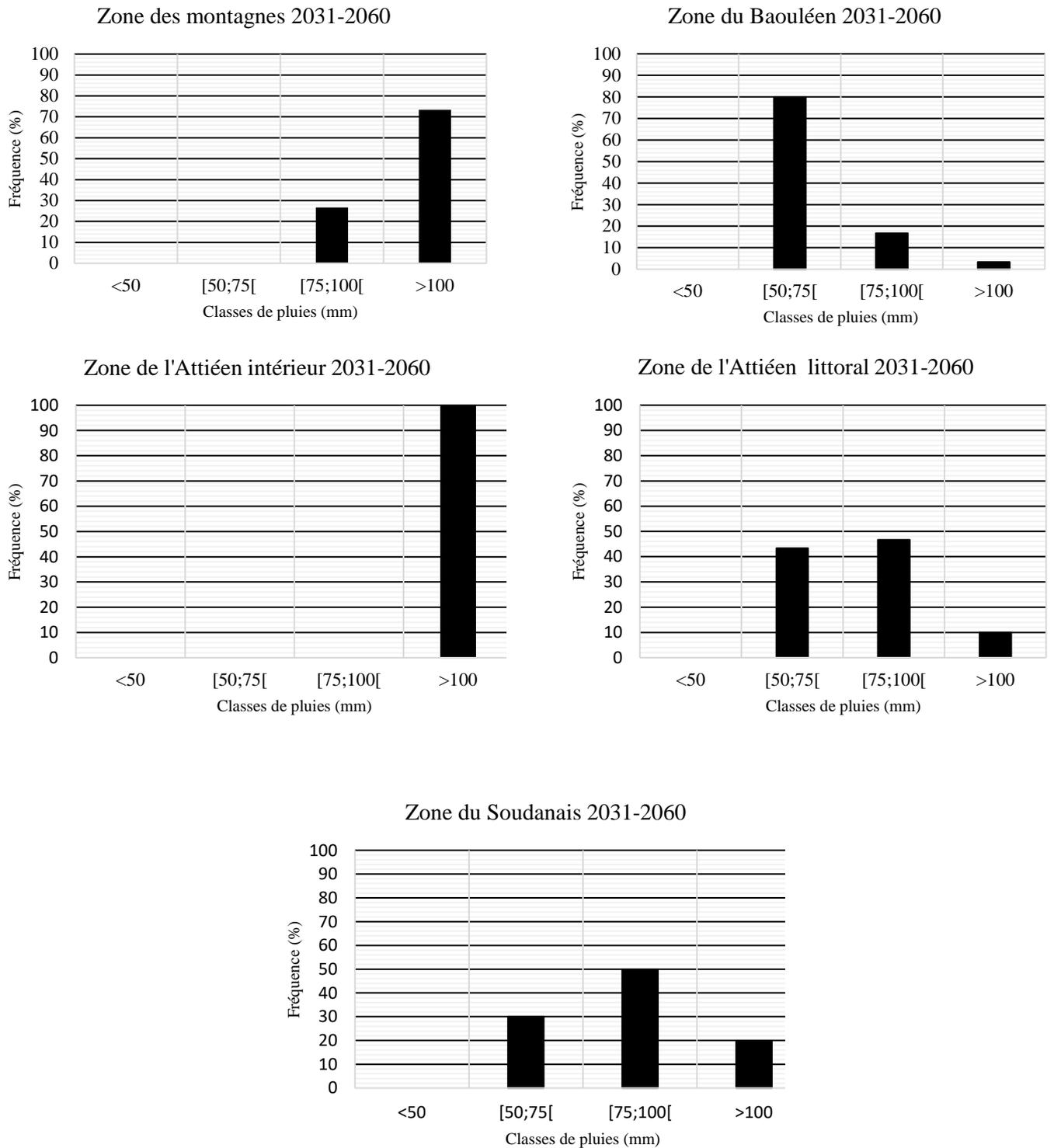
**Tableau LIII** : Biais des pluies extrêmes des périodes 2031-2060 et 2071-2100

Zones	Biais (2031-2060 / 1931-2020)	Biais (2071-2100 / 1931-2020)
<b>Attiéen Littoral</b>	36,74%	37,89%
<b>Attiéen Intérieur</b>	-16,56%	-14,83%
<b>Soudanais</b>	39,18%	22,02%
<b>Montagnes</b>	-16,03%	-24,13%
<b>Baouléen</b>	7,24%	5,12%

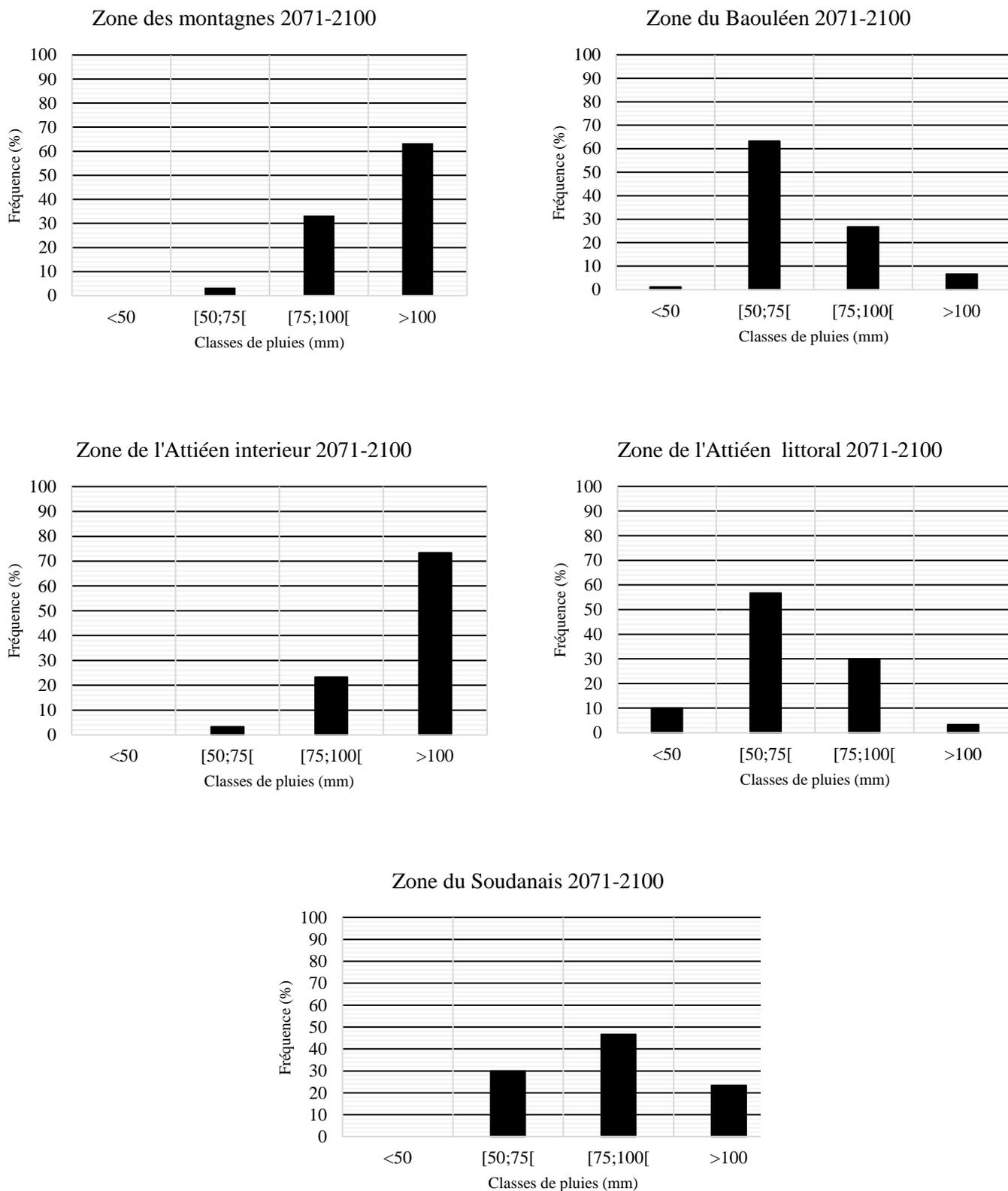
Les figures 63 et 64 illustrent la distribution des fréquences de pluies journalières maximales annuelles observées dans les différentes zones pour les périodes 2031-2060 et 2071-2100.

Pour la période 2031-2060, l'analyse des graphes de la figure 62 montre que la classe des hauteurs de pluies journalières maximales annuelles la plus remarquable pour les zones de Montagnes et Attiéen de l'Intérieur est celle couvrant l'intervalle  $> 100$  mm avec des pourcentages respectifs de 73,33% et 100%. Pour les zones des Montagnes et du Baouléen, c'est plutôt la classe [50 mm - 75 mm] qui est dominante et l'Attiéen du Littoral et le Soudanais observent des distributions de pluies journalières plutôt uniformes sur les trois dernières classes avec une légère prédominance de la classe [75 mm - 100 mm]. La figure 63 relative à la période 2071-2100 affiche pratiquement le même constat que la distribution de la période 2031-2060.

Les classes [50 mm-75 mm [et celle > 100 mm, semblent être les classes prédominantes sur les deux périodes.



**Figure 62** : Histogrammes de distribution des pluies journalières maximales de la période 2031-2060



**Figure 63** : Histogrammes des pluies journalières maximales de la période 2071-2100

### 7.2.3. Analyse des normales de pluies annuelles prévues

Les tableaux LIV et LV mettent en évidence les caractéristiques descriptives des pluies annuelles prévues des périodes 2031-2060 et 2071-2100. L'analyse de ces données montre que les hauteurs de pluies prévues varient entre 1003 mm (Soudanais) et 1155,84 mm (Attiéen du littoral) avec des moyennes allant de 1240,51 mm (Soudanais) à 1630,21 mm (Montagnes) pour la période 2031-2060. Les valeurs des écart-types oscillent entre 196,64 mm (Baouléen) et 259,33 mm (Montagnes). Quant au coefficient de variation (CV) des pluies annuelles des différentes régions, il est inférieur à 25% pour toutes les zones (variant entre 15,87% pour l'Attiéen du littoral et 17,51% pour l'Attiéen de l'intérieur). Ce qui traduit une bonne homogénéité des valeurs au niveau des zones et une faible dispersion des pluies journalières maximales annuelles prévues pour la période 2031-2060. Pour la période 2071-2100, les hauteurs de pluies annuelles simulées varient entre 1007 mm (Attiéen de l'intérieur) et 2179,66 mm (Attiéen littoral) avec des moyennes allant de 1214,07 mm (Baouléen) à 1570,35 mm (Attiéen du littoral) et des écart-types de 161,58 mm (Baouléen) à 275,48 mm (Attiéen du littoral). Les coefficients de variation de cette série partent de 13,31% (Baouléen) à 17,54% (Attiéen du littoral). Ces coefficients étant inférieurs à 25%, donc les hauteurs de pluies extrêmes connaîtront une distribution homogène dans le temps pendant la période 2071-2100. Le tableau LVI quant à lui met en exergue les différents biais entre les pluies annuelles passées 1931-2020 et celles du milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (2031-2060) et celles de la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2071-2100). Ces valeurs de biais pour la période 2031-2060 varient de -10,72% (Attiéen de l'intérieur) à +1,22% (Attiéen du littoral). Celles de la période 2071-2100 fluctuent entre -12,08% (Attiéen de l'intérieur) et -0,24% (Attiéen du littoral). Les années 2031-2060 connaîtront alors une baisse des pluies annuelles excepté le domaine de l'Attiéen du littoral qui enregistrera une faible hausse des précipitations annuelles, tandis que dans la période 2071-2100, l'on assistera à une baisse plus accentuée de ces pluies annuelles sur l'étendue du territoire ivoirien.

**Tableau LIV :** Statistique descriptive des pluies annuelles de la période 2031-2060

Zones	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
Montagnes	1079,80	2070,96	1630,21	259,33	15,91
Baouléen	1031,06	1738,08	1232,75	196,64	15,95
Attiéen littoral	1155,84	2076,00	1622,61	257,46	15,87
Attiéen intérieur	1028,00	1911,73	1353,97	237,02	17,51
Soudanais	1003,00	1737,57	1240,51	200,94	16,20

**Tableau LV** : Statistique descriptive des pluies annuelles de la période 2071-2100

Zones	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV (%)
Montagnes	1204,74	1981,70	1606,71	234,50	14,60
Baouléen	1022,00	1627,27	1214,07	161,58	13,31
Attiéen littoral	1231,83	2179,66	1570,35	275,48	17,54
Attiéen intérieur	1007,00	1753,74	1298,93	190,83	14,69
Soudanais	1025,00	1679,16	1229,63	186,73	15,19

**Tableau LVI** : Biais des pluies annuelles des périodes 2031-2060 et 2071-2100

Zones	Biais (2031-2060 / 1931-2020)	Biais (2071-2100 / 1931-2020)
Attiéen Littoral	1,22%	-0,24%
Attiéen Intérieur	-10,72%	-12,08%
Soudanais	-4,45%	-7,52%
Montagnes	-5,60%	-9,44%
Baouléen	-7,39%	-8,20%

#### 7.2.4. Analyse des quantiles de pluies extrêmes prévues

Les quantiles des pluies journalières maximales ont été déterminés suivant les lois définies par l'ajustement de la normale 1931-2020 (tableau LVII à LXI). Il a été constaté que les quantiles varient entre 115 mm et 217 mm pour la zone des Montagnes, entre 66,9 mm et 110 mm pour le Baouléen, entre 70 mm et 131 mm pour l'Attiéen de l'Intérieur, entre 153 mm et 291 mm pour l'Attiéen du Littoral et enfin entre 82,6 mm et 149 mm pour le Soudanais. Les valeurs des quantiles déterminés pour les périodes futures sont généralement à la hausse par rapport aux quantiles observés pour la période de référence 1931-2020. Cependant, de la période 2031-2060 à 2071-2100, l'on assistera à une hausse des quantiles pour les domaines des Montagnes et du Baouléen et une baisse des quantiles des pluies extrêmes pour l'Attiéen de l'intérieur, du littoral et le Soudanais.

**Tableau LVII : Quantiles des pluies extrêmes du régime climatique des Montagnes**

<b>Loi : Gamma (G)</b>			
	Période de retour	Quantile	Intervalle de confiance
<b>2031-2060</b>	100	201	159 - 243
	50	187	153 - 222
	20	169	144 - 194
	10	143	136 - 173
	5	139	126 - 153
	2	115	106 - 124
<b>2071-2100</b>	100	213	183 - 263
	50	197	157 - 237
	20	176	148 - 204
	10	150	139 - 181
	5	142	127 - 157
	2	116	106 - 125

**Tableau LVIII : Quantiles des pluies extrêmes du régime climatique du Baouléen**

<b>Loi : Gamma (G)</b>			
	Période de retour	Quantile	Intervalle de confiance
<b>2031-2060</b>	100	115	102 - 124
	50	101	86,6 - 115
	20	92,9	82,1 - 104
	10	82	78,0 - 94,8
	5	76	73,0 - 85,6
	2	67,8	63,4 - 72,2
<b>2071-2100</b>	100	130	92,1 - 142
	50	105	89,1 - 121
	20	96,1	84,3 - 108
	10	91	80,0 - 102
	5	81,4	74,7 - 88,2
	2	69,1	64,4 - 73,8

**Tableau LIX : Quantiles des pluies extrêmes du régime climatique de l'Attiéen de l'Intérieur**

<b>Loi : Inverse Gamma (IG)</b>			
	Période de retour	Quantile	Intervalle de confiance
<b>2031-2060</b>	100	145	136-156
	50	121	94,5 - 148
	20	109	92,0 - 125
	10	99,4	88,1 - 111
	5	90,1	82,4 - 97,9
	2	77,1	72,1 - 82,0
<b>2071-2100</b>	100	130	101 - 144
	50	105	92,2 - 117
	20	97,9	88,5 - 107
	10	91,8	84,0 - 105,6
	5	84,5	77,8 - 91,2
	2	71,4	65,8 - 77,0

**Tableau LX : Quantiles des pluies extrêmes du régime climatique de l'Attiéen du Littoral**

<b>Loi : Halphen type B (HAB)</b>			
	Période de retour	Quantile	Intervalle de confiance
<b>2031-2060</b>	100	297	203 - 392
	50	272	203 - 341
	20	239	195 - 283
	10	214	184 - 265
	5	189	168 - 211
	2	153	139 - 167
<b>2071-2100</b>	100	285	201 - 320
	50	240	196 - 283
	20	217	186 - 249
	10	201	173 - 232
	5	175	155 - 195
	2	155	137 - 173

**Tableau LXI** : Quantiles des pluies extrêmes du régime climatique du Soudanais

<b>Loi : Gamma (G)</b>			
	Période de retour	Quantile	Intervalle de confiance
<b>2031-2060</b>	100	158	116 - 181
	50	134	112 - 157
	20	122	105 - 138
	10	108	99,5 - 135
	5	102	92,4 - 111
	2	85	78,8 – 91,2
<b>2071-2100</b>	100	155	113 - 174
	50	130	109 - 151
	20	118	103 - 134
	10	109	97,3 - 121
	5	99,3	90,5 - 108
	2	83,4	77,4 – 89,4

#### 7.2.5. Calcul du biais des quantiles futurs

Les tableaux LXII et LXIII mettent en évidence les valeurs de biais des quantiles des pluies prévues (2031-2060 et 2071-2100). Ces valeurs sont généralement négatives pour le Baouléen et l'Attiéen intérieur quelle que soit la période de retour. Ce qui signifierait que les valeurs des quantiles pour les périodes futures (2031-2060 et 2071-2100) seraient inférieures par rapport à celles de la normale 1931-2020. Ce qui devrait être pris en compte dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques futurs pour plus d'exactitude et d'optimisation des coûts des ouvrages. Cependant au niveau de la région des Montagnes et l'Attiéen du littoral, ont été observés des biais positifs, tandis que nous enregistrons des biais négatifs traduisant des quantiles futurs inférieurs à ceux de la période de référence 1931-2020 dans les domaines du Baouléen et de l'Attiéen de l'intérieur quelle que soit la période considérée (2031-2060 et 2071-2100). Ces biais varient de 22,22% à 36,26% pour le domaine des montagnes et de 52,31% à 66,87% pour l'Attiéen du littoral au niveau de la période 2031-2060. Quant à la période 2071-2100, les biais fluctuent de 28,47% et 37,44% en zone montagneuse et de 41,83% à 54,62% pour l'Attiéen du littoral.

**Tableau LXII** : Biais des quantiles de la période 2031-2060

Zones	Biais (%)					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Montagnes	36,26	27,52	27,68	23,36	22,22	22,56
Baouléen	-9,6	-10,59	-16,33	-17,79	-13,68	-17,86
Attiéen intérieur	-4,81	-8,06	-8,81	-15,5	-13,57	-9,38
Attiéen littoral	51,49	60,17	64,62	56,21	66,87	52,31
Soudanais	11,84	-13,56	5,88	-2,40	-3,60	11,27

**Tableau LXIII** : Biais des quantiles de la période 2071-2100

Zones	Biais (%)					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Montagnes	37,44	30,28	33,93	28,47	28,76	29,88
Baouléen	-7,87	-4,24	-7,14	-14,96	-10,26	-7,14
Attiéen intérieur	-11,85	-13,78	-15,78	-24,11	-25,00	-18,75
Attiéen littoral	53,47	48,31	54,62	41,83	47,24	46,15
Soudanais	9,74	-15,85	6,86	-5,60	-6,47	9,15

### 7.2.6. Détermination du coefficient de Gradex futur des méthodes de l'OSTROM et du CIEH

Les différentes valeurs du coefficient de gradex ( $\lambda$ ) des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH évaluées en fonction des périodes de 30 ans sont consignées dans les tableaux LXIV. Ces valeurs du gradex évaluées à partir des quantiles de période de retour de 10 ans et 100 ans pour la chronique 2031-2060 varient entre 0,39 (Attiéen du littoral) et 0,46 (Soudanais). Sur la période 2071-2100, le coefficient de gradex fluctue entre 0,41 (Attiéen du littoral) et 0,43 (Baouléen). Cependant, il y a une légère dominance du gradex de la période 2031-2060 sur celui de la période 2071-2100 pour l'Attiéen de l'intérieur et le Soudanais.

**Tableau LXIV** : Coefficient de Gradex futurs des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH au niveau des différentes zones climatiques

Zones	Séries	
	2031-2060	2071-2100
<b>Attiéen Littoral</b>	0,39	0,41
<b>Attiéen Intérieur</b>	0,45	0,42
<b>Soudanais</b>	0,46	0,42
<b>Montagnes</b>	0,41	0,42
<b>Baouléen</b>	0,4	0,43

### 7.2.7. Calcul du biais du coefficient de Gradex des méthodes de l'OSTORM et du CIEH

Le tableau LXV met en évidence les valeurs de biais du coefficient de gradex. Une analyse du gradex a mis en évidence des valeurs généralement inférieures à 5% à l'exception des biais de gradex pour la période 2071-2100. Les valeurs du coefficient de gradex pour les périodes futures sont supérieures à la valeur de référence régionale de 0,38 dans toutes les zones climatiques homogènes. En effet, ces biais varient entre 0,4% (Attiéen du littoral) et 3% (Soudanais) pour la période 2031-2100 et oscillent entre 8% (Attiéen du littoral) à 13% (Baouléen).

**Tableau LXV** : Biais du coefficient de gradex (%) des périodes futures

Zones	Biais (2031-2060 / 1931-2020)	Biais (2071-2100 / 1931-2020)
<b>Attiéen Littoral</b>	0.4%	8%
<b>Attiéen Intérieur</b>	2.7%	11%
<b>Soudanais</b>	3.0%	11%
<b>Montagnes</b>	1.1%	11%
<b>Baouléen</b>	0.8%	13%

### 7.3. DISCUSSION

Le modèle Markovien pour la simulation des pluies journalières maximales annuelles donne des coefficients de Nash-Stucliffe oscillant entre 94,56% (Attiéen Intérieur) et 97,36% (Soudanais), tandis que le modèle Markovien à l'échelle annuelle a été très concluant avec des performances très satisfaisantes allant de 97,15% (Baouléen) à 98,83% (Montagnes). Ces valeurs traduisant ainsi une grande capacité du modèle à simuler les pluies. Le modèle markovien a permis donc de simuler les pluies journalières des périodes futures 2031-2060 et 2071-2100.

Dans cette étude, le modèle des chaînes de Markov a été déterminant. Son utilisation a nécessité uniquement l'ajustement des données historiques contrairement aux autres études qui se basent sur des scénarii climatiques, nécessitant, parfois, un downscaling sur la région d'intérêt. Les chaînes de Markov ont depuis longtemps servi à la génération de nombreuses séries chronologiques de données météorologiques, même si la difficulté réside dans le choix de l'ordre (Konaté, 2018). Le choix de l'ordre pour cette étude se base sur les études antérieures. Selon Shukla (2009), la prise en compte de la dépendance à l'intérieur des séries temporelles conduit à l'utilisation dans la plupart de cas, de chaînes de Markov d'ordre 1, pour la modélisation. Alors une grande variété de modèles de simulations d'événements météorologiques a été étudiée par chaîne de Markov (Konaté, 2018).

Plusieurs auteurs ont produit des données, à partir des chaînes de Markov, pour l'étude et la prévention de certaines catastrophes naturelles hydroclimatiques. Mearns et *al.* (1984) ont utilisé de longues séries météorologiques synthétiques de températures pour examiner l'impact des sécheresses sévères sur le comportement des cultures au centre des Etats Unis, tandis que Favis-Mortlock et *al.* (1997) étudient les taux à long terme de l'érosion des sols au Royaume Unis et concluent à un impact important. De plus, de nombreuses études ont-elles démontré que le modèle de chaîne de Markov était en général indiqué pour des séries temporelles de précipitations synthétiques. Les travaux conduits par de Dlamini et *al.* (2015) en Malaisie sur les données pluviométriques en relation avec la production rizicole, conforte l'utilisation des chaînes de Markov pour la simulation des données pluviométriques futures. En effet, le modèle de générateur météorologique stochastique WGEN, basé sur les Chaînes de Markov, a montré que l'ordre 1 décrivait mieux les caractéristiques des pluies, après comparaison des paramètres statistiques, des pluies simulées et pluies historiques sur les mêmes années de couvertures des données.

Dans cette même optique, en Israël, Gabriel et Neumann (1962) ont noté, à la suite de leurs travaux, que les occurrences des précipitations quotidiennes de la ville de Tel Aviv en Israël, s'ajustaient avec succès au modèle des chaînes de Markov d'ordre 1. De plus, Kottegoda et *al.* (2004) ont rapporté que le modèle des chaînes de Markov d'ordre 1 était celui qui s'ajustait le mieux aux données de pluies historique en Italie. En Afrique, au Nigeria, des études prévisionnelles sur la pluviométrie et son impact sur la production agricole ont été menées par Abubakar et *al.* (2014) à partir des chaînes de Markov d'ordre 1. Ces auteurs ont indiqué une tendance à la baisse de la pluviométrie dans la région de Minna. Le modèle des Chaînes de Markov se base surtout sur l'hypothèse qu'il existe une dépendance entre l'occurrence des pluies journalières à celles de la veille. Stern et Coe (1984) ont déclaré que les caractéristiques les plus intéressantes des modèles des chaînes de Markov sont liées à leur capacité à identifier aisément la saisonnalité dans les précipitations journalières. Dans la plupart des cas, le modèle des chaînes de Markov de premier ordre peut décrire l'occurrence quotidienne des précipitations. Les hauteurs de pluies journalières maximales enregistrées pendant la période 1931-2020 varient entre 29,83 (région soudanaise) et 230,45 mm (région des montagnes) avec des moyennes allant de 81,59 mm à 115, 52 mm. Les pluies extrêmes prévues varient entre 52,95 mm (Baouléen) et 244,10 mm (Attéen du littoral) avec des moyennes allant de 69,41 mm (Baouléen) à 160,78 mm (Attéen du littoral) pour la période 2031-2060. Pour la période 2071-2100, les hauteurs de pluies extrêmes simulées varient entre 44,46 mm (Baouléen) et 222,9 mm (Attéen du littoral) avec des moyennes allant de 70,85 mm (Baouléen) et 222,9 mm (Attéen du littoral). Les biais entre les pluies journalières maximales annuelles passées 1931-2020 et celles du milieu 21<sup>ème</sup> siècle (2031-2060) varient de -16,56% (Attéen de l'intérieur) à +36,74% (Attéen du littoral). Celles de la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2071-2100) fluctuent entre -34,13% (Montagnes) et +37,89% (Attéen du littoral). Ces biais sont significatifs et traduisent une augmentation des pluies extrêmes à venir. Les années 2031-2060 connaîtront alors une hausse des pluies journalières extrêmes dans les domaines de l'Attéen du littoral, le Soudanais du milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (2031-2060) à fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2071-2100), tandis que l'on enregistrera des baisses des pluies extrêmes au niveau de l'Attéen de l'intérieur et du domaine des montagnes.

La distribution des fréquences de pluies journalières maximales annuelles observées dans les différentes zones pour la période 1931-2020 montre que la classe des hauteurs de pluies journalières maximales annuelles la plus remarquable est celle couvrant l'intervalle [75 mm – 100 mm [avec un pourcentage de 48,88% ; 61,11% ; 64,44% et 55,55% respectivement pour

les zones des Montagnes, du Baouléen, de l'Attéen de l'Intérieur et du Soudanais. L'Attéen du Littoral fait exception à cette règle avec des hauteurs de pluies journalières maximales remarquables pour l'intervalle  $>100\%$ . Cette classe [75 mm -100 mm [représente la classe modale de la série. Pour la période 2031-2060, la classe des hauteurs de pluies journalières maximales annuelles la plus remarquable pour les zones de Montagnes et Attéen de l'Intérieur est celle couvrant l'intervalle  $> 100$  mm avec des pourcentages respectifs de 73,33% et 100%. Pour les zones des Montagnes et du Baouléen, c'est plutôt la classe [50 mm - 75 mm [qui est dominante et l'Attéen du Littoral et le Soudanais observent des distributions de pluies journalières plutôt uniformes sur les trois dernières classes avec une légère prédominance de la classe [75 mm - 100 mm [. La période 2071-2100 affiche pratiquement le même constat que la distribution de la période 2031-2060. Les classes [50 - 75 mm [et celle  $> 100$  mm, semblent être les classes prédominantes sur les deux périodes. Les résultats de la distribution des fréquences annoncent une amplification des pluies extrêmes intenses.

Les hauteurs de pluies annuelles passées (1931-2020) varient entre 1022,75 mm (Baouléen) et 2058,28 mm (Montagnes) avec des moyennes allant de 1339,51 mm (Soudanais) à 1698,11 mm (Attéen du littoral). Les hauteurs de pluies prévues varient entre 1003 mm (Soudanais) et 1155,84 mm (Attéen du littoral) avec des moyennes allant de 1240,51 mm (Soudanais) à 1630,21 mm (Montagnes) pour la période 2031-2060. Pour la période 2071-2100, les hauteurs de pluies annuelles simulées varient entre 1007 mm (Attéen de l'intérieur) et 2179,66 mm (Attéen littoral) avec des moyennes allant de 1214,07 mm (Baouléen) à 1570,35 mm (Attéen du littoral). Les différents biais entre les pluies annuelles passées 1931-2020 et celles du milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (2031-2060) et celles de la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2071-2100) varient de -10,72% (Attéen de l'intérieur) à +1,22% (Attéen du littoral). Celles de la période 2071-2100 fluctuent entre -12,08% (Attéen de l'intérieur) et -0,24% (Attéen du littoral). Les années 2031-2060 connaîtront alors une baisse des pluies annuelles excepté le domaine de l'Attéen du littoral qui enregistrera une faible hausse des précipitations annuelles, tandis que dans la période 2071-2100, l'on assistera à une baisse plus accentuée de ces pluies annuelles sur l'étendue du territoire ivoirien.

Le GIEC (2019), à travers une étude de projections des précipitations dans cinq pays de l'Afrique de l'Ouest (Gambie, Mali, Sierra Leone, Tchad et Togo), montrent que les projections découlant des expériences de modélisations climatiques régionales et mondiales sont très variables, et ne présentent souvent aucun consensus quant au sens, et d'autant plus quant à l'ampleur, des changements potentiels en termes de précipitations. Parmi l'ensemble des

résultats des modèles mondiaux décrits dans le RE5 du GIEC, des hausses et des baisses importantes sont escomptées pour une grande partie de la région. Ceci est également le cas pour les projections des modèles climatiques régionaux dans certaines zones des cinq pays du projet, bien qu'il existe aussi dans d'autres zones un consensus quant aux hausses ou aux baisses des précipitations.

Danumah (2016) a généré, pour le District d'Abidjan, à partir du modèle LARS-WG des données pluviométriques s'étalant de 2011 à 2100. Ces données générées mettent en relief une élévation des pluies de 4% à 10% et une tendance à la hausse des indices d'extrêmes pluviométriques que sont les jours consécutifs humides et des pluies supérieures à 10 mm, ce qui pourrait accroître le nombre d'inondations. Cependant, Oga et *al.* (2016) prévoient, grâce au même modèle climatique LARS-WG, une baisse de la pluviométrie d'ici à 2050 au niveau de la zone côtière ivoirienne au Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Les projections des pluies pour la prévision ont également été l'objet d'étude en Afrique. Dans ce sens, Bayoko et *al.* (2003), à partir du modèle MAGICC-SENGEN, indiquerait une diminution de la pluviométrie durant les années 2025 à 2100 au Mali. En outre, Chen et *al.* (2012) notent une diminution de la pluie au Soudan mais une tendance à la hausse pour le Soudan du Sud à partir du modèle LARS-WG, d'ici à 2100, ce qui aura un impact négatif respectivement sur la production agricole (risque de famine) et sur l'environnement (inondations, glissement de terrains). Aux Etats-Unis, dans l'Etat du Texas, le bassin de Headlines de Brazos connaîtra de grandes diminutions dans les précipitations jusqu'à 5,2% et 6,8% dans les années 2055 et 2090, respectivement selon les données de simulation du modèle LARS-WG obtenus par Awal et *al.* (2016). Pendant qu'au Brésil, Favis-Mortlock et Guerra (1999) ont noté une croissance des pluies dans les années futures, après utilisation du même modèle. Cette hausse aura pour conséquence une érosion importante et un impact sur l'agriculture dans ces régions. Ces données générées permettent, donc, de prévoir l'évolution du climat ou une variable climatique afin de faire des prédictions.

En ce qui concerne la modélisation des pluies extrêmes, la loi Gamma affiche les paramètres AIC et BIC les plus minimes pour les zones des Montagnes, Baouléen et le Soudanais. Ceci justifie sa suprématie dans ces trois précédentes zones, tandis que le domaine Attiéen (intérieur et littoral) privilégie respectivement la loi Gamma inverse et Halphen type B pour la série 1931-2020. La loi Gamma est suivie par la loi de Gumbel pour la région des montagnes avec une différence absolue très faible de 0,25 pour les deux paramètres numériques AIC et BIC. Les résultats AIC et BIC confirment la réalité avec une convergence de la Halphen de type B vers la loi Gamma et une convergence de la loi Halphen Inverse type B vers la loi Gamma Inverse.

L'analyse statistique a montré que toutes les distributions de probabilité des pluies journalières maximales annuelles ne pouvaient pas être assimilées à une loi de Gumbel, mais plutôt aux lois Gamma, Inverse Gamma, Halphen type B qui les ajustent au mieux. Ces résultats montrent le scepticisme de certains auteurs (Koutsoyiannis, 2004 ; Bacro et Chaouche, 2006 ; Veneziano et *al.*, 2009 ; Soro, 2011 ; Kouassi et *al.*, 2018) quant à la prédominance du modèle de Gumbel au niveau de l'estimation des pluies journalières maximales annuelles surtout à l'échelle régionale. Les pluies maximales journalières annuelles de 34 postes pluviométriques de la Côte d'Ivoire ont été analysées sur la période 1947-1995 (48 ans) par Goula et *al.* (2007). Ces auteurs ont ajusté les pluies maximales journalières annuelles à une loi de valeur extrême sélectionnée parmi les lois Lognormale et de Gumbel suivant le test d'Anderson. Cette étape a permis d'identifier la zone d'application des deux lois et d'évaluer l'impact de l'utilisation exclusive de la loi de Gumbel lors des études de génie civil sur l'ensemble du territoire. La cartographie des quantiles de période de retour de 2-100 ans à l'aide du krigeage indique que la loi Lognormale convient mieux aux séries des régimes climatiques de type équatorial de transition et équatorial de transition atténué, surtout dans les parties ouest et centrale du pays. Ce qui reste différent des résultats de ce travail où le domaine Attiéen (intérieur et littoral) privilégie respectivement la loi Gamma inverse et Halphen type B pour la série 1931-2020. Aussi il est constaté que la loi Gamma affiche les paramètres AIC et BIC les plus minimes pour le Baouléen. Ceci justifie sa suprématie dans cette zone. D'après Goula et *al.* (2007), la loi de Gumbel paraît bien adaptée aux régimes de montagne, équatorial de transition et équatorial de transition atténué surtout dans sa partie nord et une petite portion de sa zone sud. Aussi dans cette étude, la loi de Gumbel reste l'une des meilleures lois après la loi Gamma pour la zone montagneuse, mais la différence se situe au niveau des régimes équatorial de transition (Attiéen) et équatorial de transition atténué (Baouléen) avec le monopole des lois Gamma et Gamma inverse. Ces différences pourraient être justifiées par la présélection optimale des classes des lois par l'outil d'aide de décision de Hyfran Plus dans la mesure où Goula et *al.* (2007) n'ont comparés que deux lois (Gumbel et Lognormale) parmi plusieurs lois possibles. La taille des données et du caractère climatique pourrait justifier cette différence.

De façon générale, les valeurs de quantiles de la période 1931-2020 les plus élevées se rencontrent au niveau de la zone littorale (101 à 195 mm), suivie de la zone montagneuse (84,4 à 164 mm) et de l'Attiéen de l'intérieur (81 à 160 mm). Les valeurs de quantiles les plus faibles se situent au niveau du Soudanais (75 à 140 mm) suivie du Baouléen (76 à 142 mm). Les quantiles futurs varient entre 115 mm et 217 mm pour la zone des Montagnes, entre 66,9 et

110 mm pour le Baouléen, entre 70 mm et 131 mm pour l'Attiéen de l'Intérieur, entre 153 et 291 mm pour l'Attiéen du Littoral et enfin entre 82,6 et 149 mm pour le Soudanais. Les valeurs des quantiles déterminés pour les périodes futures sont généralement à la hausse par rapport aux quantiles observés pour la période de référence 1931-2020. Cependant, de la période 2031-2060 à 2071-2100, l'on assistera à une hausse des quantiles pour les domaines des Montagnes et du Baouléen et une baisse des quantiles des pluies extrêmes pour l'Attiéen de l'intérieur, du littoral et le Soudanais. Les valeurs de biais des quantiles des pluies prévues (2031-2060 et 2071-2100) sont généralement négatives pour le Baouléen et l'Attiéen intérieur quelle que soit la période de retour. Ce qui signifierait que les valeurs des quantiles pour les périodes futures (2031-2060 et 2071-2100) seraient inférieures par rapport à celles de la normale 1931-2020. Ce qui devrait être pris en compte dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques futurs pour plus d'exactitude et d'optimisation des coûts des ouvrages. Cependant au niveau de la région des Montagnes et l'Attiéen du littoral, ont été observés des biais positifs, tandis que nous enregistrons des biais négatifs traduisant des quantiles futurs inférieurs à ceux de la période de référence 1931-2020 dans les domaines du Baouléen et de l'Attiéen de l'intérieur quelle que soit la période considérée (2031-2060 et 2071-2100). Ces biais varient de 22,22% à 36,26% pour le domaine des montagnes et de 52,31% à 66,87% pour l'Attiéen du littoral au niveau de la période 2031-2060. Quant à la période 2071-2100, les biais fluctuent de 28,47% et 37,44% en zone montagneuse et de 41,83% à 54,62% pour l'Attiéen du littoral.

Les différentes valeurs du gradex ( $\lambda$ ) des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH évaluées en fonction de la chronique complète (1931-2020) varient entre 0,45 (Baouléen) et 0,39 (Montagnes). Le coefficient de gradex croît du centre de la Côte d'Ivoire vers le Sud ainsi que du centre vers l'Ouest. Les valeurs de biais du coefficient de gradex fluctuent entre 3,20% (Baouléen) et 31,58% (Montagnes). Celles de la chronique 2031-2060 oscillent entre 0,39 (Attiéen du littoral) et 0,46 (Soudanais). Sur la période 2071-2100, le coefficient de gradex fluctue entre 0,41 (Attiéen du littoral) et 0,43 (Baouléen). Cependant, il y a une légère dominance du gradex de la période 2031-2060 sur celui de la période 2071-2100 pour l'Attiéen de l'intérieur et le Soudanais. Les valeurs du coefficient de gradex pour les périodes futures sont supérieures à la valeur de référence régionale de 0,38 dans toutes les zones climatiques homogènes. En effet, ces biais varient entre 0,4% (Attiéen du littoral) et 3% (Soudanais) pour la période 2031-2100 et oscillent entre 8% (Attiéen du littoral) à 13% (Baouléen) pour la période 2071-2100. Les valeurs de gradex déduites des quantiles extrêmes de la période future 2031-2060 sont très proches de celles proposées par l'ORSTOM et le CIEH, 1985. Kouassi et

*al.* (2019), recommandent d'utiliser la valeur du coefficient de gradex de 0,44 en lieu et place de la valeur régionale de 0,38 au niveau de la ville d'Abidjan. Cette valeur recommandée reste semblable à celles déterminées dans cette étude à travers les différentes zones climatiques de la Côte d'Ivoire.

#### 7.4. CONCLUSION PARTIELLE

L'objectif de ce chapitre était l'analyse prospective des normes hydrologiques dans un contexte de changements climatiques.

La modélisation des pluies extrêmes à partir des lois a mis en évidence un ajustement judicieux des lois Inverse Gamma, Fréchet et Weibull. Les quantiles calculés sur différentes périodes à partir de plusieurs périodes de retour (2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans), varient pour une durée de retour donnée.

En ce qui concerne les pluies journalières maximales annuelles, il est constaté que les valeurs de Nash-Stucliffe oscillent entre 94,56% (Attiéen Intérieur) et 97,36% (Soudanais), tandis que le modèle Markovien à l'échelle annuelle a été très concluant avec des performances très satisfaisantes allant de 97,15% (Baouléen) à 98,83% (Montagnes). Ces valeurs sont toutes supérieures à 60% et sont très proches de 100%, traduisant ainsi une bonne performance du modèle markovien. Le modèle markovien parvient donc à simuler les pluies journalières des périodes futures 2031-2060 et 2071-2100.

Les résultats de la caractérisation ont montré que les pluies extrêmes les plus probables sont celles couvrant les intervalles [50 mm -75 mm] et >100 mm correspondant respectivement aux séries des pluies journalières maximales annuelles des périodes de 2031-2060 et 2071-2100. Au regard des résultats ultérieurs sur la stationnarité des normes hydrologiques, la période 1931-2020 a été retenue pour la détermination des dites normes hydrologiques à l'échelle des zones climatiques homogènes.

Les normes hydrologiques futures 2031-2060 et 2071-2100 (normales des pluies annuelles et extrêmes et quantiles des pluies extrêmes) les plus élevées se rencontrent au niveau de la zone littorale, suivie de la zone montagneuse et de l'Attiéen de l'intérieur. Les valeurs de quantiles les plus faibles se situent au niveau du Baouléen suivie du Soudanais. Les valeurs des indicateurs de normes hydrologiques déterminées pour les périodes futures sont généralement à la hausse par rapport aux quantiles observés pour la période de référence 1931-2020. Cependant, du milieu du 21<sup>ème</sup> siècle (2031-2060) à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle (2071-2100), l'on assistera à une hausse des quantiles pour les domaines des Montagnes et du Baouléen et une

baisse des quantiles des pluies extrêmes pour l'Attiéen intérieur, littoral et le soudanais. Donc les quantiles des périodes futures 2031-2060 et 2071-2100 connaîtront respectivement des augmentations allant jusqu'à +37,4% dans le domaine des montagnes et 33,62% dans l'Attiéen du littoral.

Une analyse du coefficient de gradex des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH à partir des quantiles de période de retour de 10 ans et 100 ans pour les différentes zones, a mis en évidence une différence entre les valeurs de gradex simulées et la valeur de 0,38 dictée par l'ORSTOM et CIEH. Les valeurs du coefficient de gradex pour les périodes futures sont supérieures à la valeur de référence régionale de 0,38 dans toutes les zones climatiques homogènes. En effet, ces biais varient entre 0,4% (Attiéen du littoral) et 3% (Soudanais) pour la période 2031-2100 et oscillent entre 8% (Attiéen du littoral) à 13% (Baouléen).

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

Cette étude s'est consacrée à l'analyse des normes hydrologiques dans un contexte de climat changeant en Côte d'Ivoire.

L'analyse de la distribution des lois en fonction des zones climatiques a mis en évidence trois meilleures lois. En effet, le climat équatorial de transition et le climat de montagnes sont dominés respectivement par la loi Gumbel, la loi Gamma et la loi Gamma inverse. Concernant le climat tropical humide et le climat subtropical, ils sont dominés respectivement par la loi Gumbel et la loi Gamma inverse. Au terme de ces analyses, les meilleures lois qui ajustent au mieux les sous séries pluviométriques 1931-1970 et 1971-2010 sont la loi Gumbel, la loi Gamma et la loi Gamma inverse. Les lois statistiques des extrêmes sont donc sensibles au contexte climatique de la série analysée.

L'analyse des normales des pluies annuelles et des pluies extrêmes montre que les caractéristiques statistiques des normales (minimum, maximum et moyenne) de la période humide (1931-1970) sont supérieures à celles de la période sèche (1971-2010). Les quantiles calculés sur les différentes périodes (1931-1970 ; 1971-2010) à partir de plusieurs périodes de retour (2, 5, 10, 20, 50 et 100) varient pour une période de retour donnée, de la période humide à la période sèche. Les quantiles calculés sur la période humide (1931-1970) restent supérieurs à ceux déterminés sur la période sèche (1971-2010). L'analyse des matrices binaires des normales des pluies annuelles montre que 100% des valeurs sont supérieures à 1%. Pour ce qui concerne les normales des pluies extrêmes, 96,15% sont supérieures à 1%, cependant, 3,85% restent inférieures. De façon générale, le pourcentage de valeurs supérieures à 1% étant prépondérant alors les écarts d'une part entre les normales des pluies annuelles et d'autre part entre les normales des pluies extrêmes sont significatifs. Il en résulte donc que les normales des pluies annuelles et les normales des pluies extrêmes (pluies journalières maximales annuelles) calculées d'une part sur la période humide (1931-1970) et d'autre part sur la période sèche (1971-2010) ne sont pas stationnaires. L'analyse des écarts relatifs absolus des quantiles des pluies journalières maximales annuelles a mis en évidence un taux de valeurs supérieures à 1% variant entre 88 et 100% quelle que soit la période de retour ( $T = 2, 5, 10, 20, 50$  et 100 ans). La proportion de valeurs supérieures à 1% étant très importante alors la différence entre les différents quantiles est significative. Il convient de déduire que les quantiles des pluies journalières maximales annuelles calculés ne sont donc pas stationnaires.

Les normales des pluies annuelles, les normales des pluies extrêmes et les quantiles des pluies extrêmes étant non stationnaires, alors les normes étudiées sont non stationnaires eu égard à l'instabilité du climat.

Les principaux résultats de la sensibilité des lois statistiques ont montré que les séries de 30 ans sont mieux ajustées par les lois Gumbel (26,92-53,85%) et Gamma inverse (26,92-46,15%). La suprématie de la loi de Gumbel se dégrade de la période humide (1931-1960) avec un taux d'apparition de 53,85% à la période sèche (1991-2020) (26,92%) au profit de la loi Gamma Inverse avec des probabilités respectives de 46,15% (1961-1990) et 42,31% (1991-2020). Concernant les séries de 60 ans, elles sont mieux ajustées par les lois Gamma inverse (30,77%), Gamma (15,38-46,15%) et Gumbel (15,38-42,31%). La loi Gumbel est prédominante sur la première période relativement humide (1931-1960) avec un taux d'apparition de 42,31%. Quant à la deuxième période relativement moins humide (1991-2020), elle est dominée par les lois Gamma (46,15%) et Gamma Inverse (30,77%). La chronique complète de 1931-2020 présente une suprématie notable de 50% de la loi Gumbel sur les lois Gamma (34,62%) et Gamma inverse (15,38%). Il est constaté que la loi Gumbel est la loi la plus dominante dans l'ensemble et plus singulièrement en périodes humides. Les données des périodes à tendances normales et sèches ont été mieux ajustées par les lois Gamma et Gamma inverse. Les lois utilisées pour l'ajustement des données de pluies journalières maximales annuelles sont donc sensibles à la taille des échantillons et au contexte climatique des séries. En effet, les lois sont plus stables lorsque la taille des séries de données devient importante (au moins 60 ans) et quand la série prend en compte une composante humide (avant 1970) et une composante sèche (après 1970).

Les différents résultats obtenus ont montré que les périodes de référence de calcul des quantiles que choisissent les concepteurs des ouvrages hydrauliques connaissent une instabilité due à la non-stationnarité du climat pendant la période d'étude considérée. Par conséquent, la période entière 1931-2020 a été retenue dans ce travail pour déterminer les normes hydrologiques telles que les normales des pluies annuelles et pluies journalières maximales ainsi que les quantiles des pluies extrêmes (décennaux et centennaux) et le gradex des pluies extrêmes. Ces derniers indicateurs ont été cartographiés pour la Côte d'Ivoire et serviront d'outils d'aide aux concepteurs et Ingénieurs pour les éventuels dimensionnements des ouvrages hydrauliques.

Les nouveaux coefficients de gradex varient entre 0,28 (Dimbokro) et 0,71 (Guiglo). Ces coefficients sont tous supérieurs à la valeur régionale de 0,38 définie par l'ORSTOM exceptée la station de Dimbokro (0,28). Les valeurs de l'écart-type (0,09) et du coefficient de variation

(18,69%) montrent une homogénéité des valeurs du coefficient de gradex. La valeur moyenne du gradex en Côte d'Ivoire est de 0,47.

Les normes hydrologiques futures (normales des pluies annuelles et extrêmes et quantiles des pluies extrêmes) les plus élevées se rencontrent au niveau de la zone littorale, suivie de la zone montagneuse et de l'Attién de l'intérieur. Les valeurs de quantiles les plus faibles se situent au niveau du Baouléen suivi du Soudanais. Les valeurs des indicateurs de normes hydrologiques déterminées pour les périodes futures sont généralement à la hausse par rapport aux quantiles observés pour la période de référence 1931-2020. Cependant, de la période 2031-2060 à 2071-2100, l'on assistera à une hausse des quantiles pour les domaines des Montagnes et du Baouléen et une baisse des quantiles des pluies extrêmes pour l'Attién de l'intérieur, du littoral et le Soudanais. Donc les quantiles des périodes futures 2031-2060 et 2071-2100 connaîtront respectivement des augmentations allant jusqu'à +36,26% et +37,4% dans le domaine des montagnes, +31,90% et 33,62% dans l'Attién du littoral.

Une analyse du gradex à partir des quantiles de période de retour de 10 ans et 100 ans pour les différentes zones, a mis en évidence une différence entre les valeurs de gradex simulées et celles observées par endroit. Les valeurs du coefficient de gradex pour les périodes futures sont supérieures à la valeur de référence régionale de 0,38 dans toutes les zones climatiques homogènes. En effet, ces biais varient entre 0,4% (Attién du littoral) et 3% (Soudanais) pour la période 2031-2100 et oscillent entre 8% (Attién du littoral) à 13% (Baouléen). Ce qui devrait être pris en compte dans le dimensionnement des ouvrages hydrauliques futurs pour plus d'exactitude et d'optimisation des coûts des ouvrages.

Les normes estimées constituent un important outil d'aide à la décision dans les processus de recherche des stratégies de lutte contre les risques hydrologiques en général et les inondations en particulier.

Il apparaît donc judicieux de considérer les nouvelles propositions pour garantir une sécurité des ouvrages hydrauliques dans le contexte actuel de changements climatiques.

Ce travail suscite certaines perspectives de recherche. Il s'agit de :

- i) l'amélioration des méthodes de l'ORSTOM et du CIEH à travers l'étude des composantes en rapport avec la relation pluie-débit (coefficient de ruissellement, temps de base, etc), qui selon Kouassi et *al.* (2012) est non stationnaire au regard des changements globaux ;

- ii) l'actualisation des indicateurs de normes impactés par l'instabilité du climat pour les autres méthodes de dimensionnement des ouvrages hydrauliques hormis les méthodes de l'ORSTOM et du CIEH ;
- iii) l'utilisation des séries seuillées de pluies extrêmes dans le but d'apprécier l'apport de ces séries de données dans l'actualisation des normes hydrologiques.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**ABDELNOUR R., BONARDET P., BOTTA A., ENRIONE D., PLANE G. (2002).** Événements extrêmes et changement climatique : causes, impacts et moyen de lutte. Rapport Atelier Changements Climatique. Département Ville, Environnement, Transport, École des Ponts Paris Tech, 63p.

**ABUBAKAR U.Y., LAWAL A. and MUHAMMED A. (2014).** The Use of Markov Model in Continuous Time for the Prediction of Rainfall for Crop Production. *International Organization for Scientific Research, (IOSR)* Vol. 7, Issue 1, pp. 38–45.

**AERTS JCJHŽ ET DROOGERS. (2004).** Climate change in contrasting river basins: adaptation strategies for water, food, and environment. Biddles ltd. king's lynn, 306p.

**AGOH C.H. (2016).** Analyse statistique des durées de pluies en Côte d'Ivoire. Mémoire pour l'obtention du diplôme de master en Science et Gestion de Environnement, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, 106p.

**AGUE A.I, AFOUDA A. (2015).** Analyse fréquentielle et nouvelle cartographie des maxima annuels de pluies journalières au Bénin. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 9, N° 1, pp.121-133.

**ALEXANDER L., ZHANG X., PETERSON T., CAESAR J., GLEASON B., KLEIN-TANK A., HAYLOCK M., COLLINS D., TREWIN B., RAHIMZADEH F., TAGIPOUR A., AMBENJE P., RUPA KUMAR K., REVADEKAR J., GRIFFITHS G., VINCENT L., STEPHENSON D., BURN J., AGUILAR E., BRUNET M., TAYLOR M., NEW M., ZHAI P., RUSTICUCCI M. AND VAZQUEZ-AGUIRRE J. (2006).** Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 111, 18p.

**ARDOIN B.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, 330p.

**AWAL R., BAYABIL H. K. and FARES A. (2016).** Analysis of Potential Future Climate and Climate Extremes in the Brazos Headwaters Basin, Texas. *Water*, Vol. 8, 603p.

**BACRO J-N. et CHAUCHE A. (2006).** Incertitude d'estimation des pluies extrêmes du pourtour Méditerranéen : illustration par des données de Marseille. *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 51, N°3, pp. 389-405.

**BAYOKO A., TRAORE F. et KONATE S. (2003).** Elaboration d'un scenario climatique pour le Mali. Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique, Bamako, 5p.

**BENISTON M., STEPHENSON D. (2004).** Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Global and Planetary Change*, Vol. 44, N°12, pp. 1-9.

**BENKHALED A. (2007).** Distributions statistiques des pluies maximales annuelles dans la région du Cheliff : comparaison des techniques et des résultats. *Courrier du Savoir*, Vol.32, N°8, pp.83-91.

**BOBÉE B. and ASHKAR F. (1991).** The gamma family and derived distributions applied in hydrology. *Water Resources Publications*, 11p.

**BODIAN., DACOSTA H., DEZETTER A. (2011).** Caractérisation spatio-temporelle du régime pluviométrique du haut bassin du fleuve Sénégal dans un contexte de variabilité climatique. *Géographie Physique et Environnement*, Vol 5, pp.10-24.

**BROU Y. T. (2005).** Climat, mutations socio-économiques 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, Université des Sciences et Techniques de Lille (France), 212p

**BROU Y. T., SERVATE. ET PATUREL JE. (2005).** Contribution à l'analyse des inter-relations entre activités humaines et variabilité climatique : cas du sud-forestier ivoirien. *CR Acad Sei*, Vol. 14, N°6, pp. 833-852.

**BRUNET-MORET Y. (1967).** Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique Occidentale. République du Dahomey. ORSTOM, Paris, France.

**BUISHAND T. A. (1977).** Stochastic Modeling of Daily Rainfall Sequences. Medidlingen Landbouwhoge school. *Wageningen*, Vol. 77, 15p.

**CAMPBELL G.S. (1990).** CLIMGEN, A program that Generates Weather Data (Precipitation,

**CANELLAS C., GIBELIN A. L., LASSEGUES P., KERDONCUFF M., DANDIN P., SIMON P. (2014).** « Les normales climatiques spatialisées Aurelhy 1981-2010 : température et précipitation. » Direction de la climatologie. *Météo-France*, Vol. 7, pp. 47-55.

**CHEN H., GUO J., ZHANG Z., XU C. Y. (2012).** Prediction of temperature and precipitation in Sudan and South Sudan by using LARS-WG in future. *Theoretical Applied Climatologie*, Vol. 113, pp. 363-375.

**CHEN Y., ZHAI P. (2013).** Persistent extreme precipitation events in China during 1951-2010. State Key Laboratory of Severe Weather. *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, Beijing, P. R. China, Vol. 57, 13p.

**CIEH. (1985).** Étude des pluies journalières de fréquence rare dans les États membres du CIEH : Rapport de synthèse. Série hydrologique, Ouagadougou, Burkina Faso, 20p.

**COLES S. (2001).** An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer-Verlag, London, United Kingdom, 208p.

**COX D. R., ISHAM V. (1994).** Stochastic Models of Precipitation: Statistics for the Environment 2. *Water Issues*, Wiley, New York, pp.3-18.

**DABIEN. (1960).** Carte pédologique de la Côte d'Ivoire au 1/ 2 000 000. Secrétariat d'Etat à l'agriculture, Direction des sols, 39p.

**DANUMAH H. J. (2016).** Assessing urban flood risks under changing climate and land use in Abidjan District, South Côte d'Ivoire. Thesis of Doctor of Philosophy, Kwame N'Krumah university of science and technology, Ghana, 197p.

**DASH PRIYARANJAN R. (2012).** A Markov chain modeling of daily precipitation occurrences of Odisha (India). *International Journal of Advanced Computer and Mathematical Sciences*, Vol. 3, Issue 4, pp. 482-486.

**DLAMINI N. S., ROWSHONA M. K., SAHAB Ujjwal., FIKRIA A., LAIC S. H. and 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.

**EI ADLOUNI S., BOBÉE B. and OUARDA T. B. M. J. (2008).** On the tails of extreme event distributions. *Journal of Hydrology*, Vol. 355, pp. 16-33.

**EL ADLOUNI, SALAHEDDINE, BERNARD BOBÉE ET OUEJDENE SAMOUD. (2006).** Guide pour les méthodes du système d'aide à la décision (SAD) de Hyfran-Plus. 40p.

**EL GHACHI M., MORCHID F.Z. (2015).** Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Khénifra dans un contexte de variabilité climatique (Rainfall trend analysis in Khenifra city in a context of climate variability). *J. Mater. Environ. Sci.* ; Vol 6, N°11, pp. 3346-3358.

**EMBRECHTS P., KLÜPPELBERG C., MIKOSCH T. (2003).** Modelling Extremal Events for Insurance and Finance Applications of Mathematic. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 648p.

**ENDRENY T.A., IMBEAH N. (2009).** Generating Robust Rainfall Intensity-Duration-Frequency Estimates with Short Record Satellite Data, *Journal of Hydrology*, Vol. 371, No. 1-4, 2009, pp. 182-191.

exponential model for rainfalls in different climatic conditions. Thesis for the Graduate and

**FAVIS-MORTLOCK D. T., BOARDMAN J., BELL M. (1997).** Modeling long-term anthropogenic erosion of a loess cover: South Downs, UK. *The Holocene*, Vol.7, pp79–89.

**FAVIS-MORTLOCK D.T., GUERRA A. J. T. (1999).** The implications of general circulation model estimate of rainfall for future erosion: a case study from Brazil. *Catena*, N° 37, pp. 329-354.

**GABRIEL K. R., NEUMANN J. (1962).** A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*, Vol. 88, pp. 90-95.

**GARRIDO M. (2002).** Modélisation des événements rares et estimations des quantiles extrêmes, méthodes de sélections des modèles pour les queues de distributions. Thèse de Doctorat de sciences, Université Joseph Fourier (France), 244p.

**GIEC. (2007).** Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et ID au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur L'Evolution du Climat, Genève, Suisse, 103p.

**GIEC. (2012).** Summary for Policymakers, in Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation, Cambridge University Press. USA, 19p.

**GIEC. (2013).** Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au 5<sup>ème</sup> 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, 24p.

**GOBIET. (2015).** The effect of empirical-statistical correction of intensity-dependent model errors on the climate change signal. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, Vol.12, pp.2589–2590.

**GOUBANOVA K. (2007).** Une étude des événements climatiques extrêmes sur l'Europe et le bassin Méditerranéen et de leur évolution future. Thèse de Doctorat ès science, Université Paris VI (France), 121p.

**GOULA A.B.T., KONAN B., BROU Y., SAVANE I., VAMORYBA F., SROHOUROU B. (2007).** Estimation des pluies exceptionnelles journalières en zone tropicale : cas de la Côte d'Ivoire par comparaison des lois Lognormale et de Gumbel. *Hydrological Sciences Journal*, Vol 52, N° 1, pp.49-67.

**GOULA B. T. A., SORO G. EVT DAO KOUASSI F. W., SROHOUROU B., (2010).** Frequency analysis and new cartography of extremes daily rainfall events in Côte d' Ivoire. *Journal of Applied Sciences*, Vol 25, N° 10, pp.1684-1694.

**GOULA B. T. AIT KOUASSI F.W., FADIKA V., KOUAKOU K. E. KOUADIO G. B., KOM K, BAMORY K, DOUMOYA I. ET SAVANÉ L. (2009).** Impacts du changement et de la variabilité climatique sur les eaux souterraines en zone tropicale humide Cas de la Côte d'Ivoire. *ASH Publication*, Vol 22, N° 334, pp.190-202.

**GREENWOOD J.A., DURAND D. (1960).** Aids for Fitting the Gamma Distribution by Maximum Likelihood. *Technometrics*, Vol. 2, N°1, pp. 55-65.

**GRINGORTEN, I. I. (1996).** A stochastic model of the frequency and duration of weather events. *J. Appl. Meteor*, Vol. 5, pp. 606-624.

**GROISMAN P. Y., KNIGHT R. W., EASTERLING D. R. AND KARL T. R. (2005).** Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, Vol. 188, pp. 1326-1349.

**GUDMUNDSSON L., BREMNES J.B., HAUGEN J.E., ENGEN SKAUGEN T. (2012).** Downscaling RCM precipitation to the station scale using quantile mapping – a comparison of methods. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, Vol.9, pp.6185–6201.

**HAAN C.T., ALLEN D. M., STREET J. O. (1976).** A Markov chain model of daily rainfall. *Water Resources Research*, Vol. 12, pp. 443-449.

**HABIBI B., MEDDIA M., BOUCEFIANE A. (2013).** Analyse fréquentielle des pluies journalières maximales : Cas du Bassin-Chergui. *Revue Nature & Technologie, Sciences de l'Environnement*, Vol.15, N° 08, pp. 41-48.

**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. 6p.

**HAYLOCK M.R., GOODESS C. M. (2004).** Interannual Variability of Extreme European Winter Rainfall and Links with Mean Large-Scale Circulation. *International Journal of Climatology*, Vol.24, pp. 759-776.

**HIEZ G. (1977).** L'homogénéité des données pluviométriques, Cahiers ORS TOM. *Série Hydrologie*, Vol.14, N°2, pp. 129-172.

**HUBERT P., CARBONEL J.P., CHAUCHE A. (1989).** Segmentation des séries hydrométéorologiques. Application à des séries de pluies et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, Vol.110, N° 10, pp. 349-367.

**HUSSAIN A. (2008).** Stochastic Modeling of Rainfall Processes: A Markov chain, mixed

**KAMAGATE A. (2015).** Analyse statistique du nombre des épisodes pluvieux en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat à l'université Nangui Abrogoua, Géosciences et Environnement, 74p.

**KATZ R. W. (1977).** Precipitation as a Chain dependant process. *Journal of applied Meteorology*, Vol. 16, pp. 671-676.

**KIEFFER-WEISS A. (1998).** Etudes des pluies exceptionnelles de pas de temps courts en relief accidenté (Alpes Française). Méthode de cartographie des pluies extrêmes. Relation avec le contexte topographie. Utilisation de l'information au pas de temps de la journée. Thèse de doctorat ès science, Institut National Polytechnique de Grenoble (France), 469p.

**KIM D. AND OLIVERA F. (2010).** Improving Stochastic Rainfall Generators. Improving Stochastic Rainfall Generators World Environmental and Water Resources Congress. Providence, 16-20, 4p.

**KIM D. AND OLIVERA F. (2012).** Relative Importance of the Different Rainfall Statistics in the Calibration of Stochastic Rainfall Generation Models. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 17, pp. 368-376.

**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 unique de l'université Félix Houphouët-Boigny de Cocody en sciences de la terre, Géorisques et Insécurité Géoclimatique. 227p.

**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 unique de l'université Félix Houphouët-Boigny de Cocody en sciences de la terre. Côte d'Ivoire, 227p.

**KONATÉ L., KOUADIO B.H., DJÈ B., AKÉ G., VAMI H., GNAGNE L., KOFFI M., BIEMI J. (2016).** Caractérisation des pluies journalières intenses et récurrences des inondations : apport des totaux glissants trois (3) jours à la détermination d'une quantité seuil d'inondation (District d'Abidjan au Sud-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 17, N° 3, pp.990-1003.

**KONE B., DAO A., FADIKA V., DABISSI NOUFE D., KAMAGATE B. (2019).** Effet de la Variabilité Pluviométrique sur les Écoulements de Surface dans le Bassin Versant de l'Agnéby au Sud-Est de la Côte d'Ivoire, Laboratoire Géosciences et Environnement, Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire, Vol.15, No 27, pp. 383-401.

**KOTTEGODA N. T., NATAEL L. and RAITERI E. (2004).** Some considerations of periodicity and persistence in daily rainfalls, *Journal of hydrology*, Vol. 296, pp. 23-37.

**KOUAKOU K.E., GOULA B.T.A., 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 & Engineering Research*, Vol. 3, N° 15, pp.1-8.

**KOUAO M., KOUASSI A.M., DEKOULA S.C., ASSEUFI B.D. (2020).** Analyse de la régionalisation climatique de la Côte d'Ivoire dans un contexte de climat changeant. *Larhyss journal* ; 17 (1) : 235-261.

**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 pour obtenir le titre de docteur à l'université de cocody, 234p.

**KOUASSI A.M., ASSOKO A.V.S., DJÈ K.B., KOUAKOU K.E., KOUAMÉ K.F., BIEMI J. (2017).** 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.

**KOUASSI A.M., BI T., KOUAME K., KOUAME A., OKAINGNI J.C., 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 Geoscience*, Vol.344, N°2, pp.288-296.

**KOUASSI A.M., KOUAMÉ K.F., AHOUSSE K.E., OULARÉ S., BIEMI J. (2010).** Impacts conjugués des changements climatiques et des pressions anthropiques sur les modifications de la couverture végétale dans le bassin versant du N'Zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, Vol. 20, N°21, pp.124-146.

**KOUASSI A.M., NASSA R.A.K., KOFFI B.Y., BIEMI J. (2018).** Modélisation statistique des pluies maximales annuelles dans le district d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 31, N°2, 147-160.

**KOUASSI A.M., NASSA R.A.K., KOUAKOU K.E., KOUAME F.K., BIEMI J., (2019).** Analyse des impacts des changements climatiques sur les normes hydrologiques en Afrique de l'Ouest : cas du district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 32, N°3, 207-220.

**KOUMASSI D., TCHIBOZO A.E., VISSIN E., HOUSSOU E. (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.

**KOUTSOYIANNIS D. (2004c).** On the appropriateness of the Gumbel distribution for modelling extreme rainfall. In Brath A., Montanari A. & Toth E. (Eds.): recent advances in peak river flow modelling, prediction and real-time forecasting. Assessment of the impacts of land-use and climate changes. *Hydrological Sciences Journal*, Vol.50, N°1, pp.303-319.

**LENDERINK G., BUISHAND A., VAN DEURSEN W. (2007).** Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union*, Vol.11, pp.1145-1159.

**LUBÈS-NIEL H., MASSON J.M., PATUREL J.E., SERVAT E. (1998).** Variabilité climatique et statistiques. Étude par simulation de la puissance et de la robustesse de quelques tests utilisés pour vérifier l'homogénéité de chroniques. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol 5, N°3, pp.383-408.

**MARTINEZ M.P. (2008).** Modélisation des comportements extrêmes en ingénierie. Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Orsay (France), 252p.

Maximum and Minimum Temperature), 30p.

**MEARNS O. L., KATZ R. W. and SCHNEIDER H. S. (1984).** Extreme high-temperature events: Changes in their probabilities with changes in mean temperature. *American meteorological Society*, Vol. 23, pp. 1601-1613.

**MIN S.K., ZHANG X., ZWIERS F.W., HEGERL G.C. (2011).** Human contribution to more-intense precipitation extreme. *Nature*. Vol. 470. no. 7334, pp. 378–381.

**MINES. (1998).** L'Archéen, l'aube des temps géologiques a plus de 2 milliards d'années : c'est vieux la Terre ? [http:// www.mines98.com/country/lr/3.htm](http://www.mines98.com/country/lr/3.htm), 65p.

**MOHYMONT B., DEMAREE G. R., FAKA D. N. (2004).** “Establishment of IDF-curves for precipitation in the tropical area of Central Africa-comparison of techniques and results. *Natural Hazards and Earth System Science*. Vol. 4. no. 3, pp. 375–387.

**MOHYMONT B., DEMAREE G.R. (2006).** “Courbes intensité - durée - fréquence des précipitations à Yangambi, Congo, au moyen de différents modèles de type Montana. *Hydrological Sciences Journal*. Vol. 51(2), p. 239–253.

**MOUNIS H., MANSONGI M. (1974).** Note provisoire sur les pluies exceptionnelles de faible durée en Afrique occidentale et centrale. Comité interafricain d'études hydrauliques (CIEH).

**MULLER A. (2006).** Comportement asymptotique de la distribution des pluies extrêmes en France. Thèse de doctorat ès science, Université Montpellier II (France), 246p.

**N'TCHA M. (2018).** Evaluation de l'impact des changements climatiques et des changements d'utilisation / occupation des terres sur les ressources en eau du bassin de l'Ouémé à Bétérou à l'horizon 2050. Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique Houphouët-Boigny (INP-HB), Côte d'Ivoire, 197p.

**NASSA R.A.K. (2017).** « Analyse de l'influence des changements climatiques sur les quantiles des pluies extrêmes : cas du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire). » Mémoire de fin de Cycle Ingénieur de conception. Ecole supérieure des Mines et Géologie. Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (Côte d'Ivoire), 120 p.

**NASSA R.A.K., KOUASSI A.M., BOSSA S.J. (2021).** « Analysis of climate change impact on the statistical adjustment models of extreme rainfall case of Ivory Coast. » *Larhyss Journal*, n°46, pp. 21-48.

**NEW M., HEWITSON B., STEPHENSON D.B., TSIGA A., KRUGER A., MANHIQUE A., GOMEZ B., COELHO C.A.S, MASISI D.N, KULULANGA E. (2006).** “Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa”. *J. Geophys. Res.* Vol. 111, pp. D14102.

**OGA Y.M.S., ADJA M., YAPI A. F., KPAN J. G., BAKA D., YAO K. T. et BIÉMI J. (2016).** Projection de la variabilité climatique à l'horizon 2050 dans la zone côtière au sud-est de la Côte d'Ivoire (d'Abidjan à Aboisso). *Larhyss journal*, N°25, pp. 67-81.

**OKONKWO G. I., MBAJIORGU C.C. (2010).** Rainfall intensity-duration-frequency analysis for Southeastern Nigeria. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, Vol.12, N°1, pp.22–30.

**OLIVRY J.C., MAHE G. (1995).** Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, Vol.6, pp. 109-117.

**OMM. (2006).** Déclaration de l'OMM sur l'Etat du climat mondial, 46p.

**ONIBON H., OUARDA T., BOBÉE B., BARBET M., SAINT-HILAIRE A. & BRUNEAU P. (2004).** Regional frequency analysis of annual maximum daily precipitation in Quebec. *Hydrological Sciences Journal*, Vol.49, N°4, pp.717-735.

**ONPC. (2014).** Inondations en Côte d'Ivoire, Département des Opération Sécuritaire (DOS). Rapport annuel, 7p.

**OUATTARA G. (1998).** Structure du batholite de Ferkéssédougou (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, 291p.

**OUEDRAOGO M. (2001).** Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, 257p.

**OYEGOKE S.O., OYEBANDE L. (2008).** "A new technique for analysis of extreme rainfall for Nigeria". *Environmental Research Journal*. Vol. 2. no. 1, p. 7–14.

**PAETH H., FINK A.H., POHLE S., KEIS F., MACHEL H., SAMIMI C. (2010).** "Meteorological characteristics and potential causes of the 2007 flood in sub-Saharan Africa". *International Journal of Climatology*. n/a– n/a.

**PANTHOU G. (2013).** Analyse des extrêmes pluviométriques en Afrique de l'Ouest et de leur évolution au cours des 60 dernières années. Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble, Terre Univers Environnement, 282p.

**PATUREL J. E., BOUBACAR I. & L'AOUR A. (1995).** Evolution de la pluviométrie annuelle en Afrique de l'Ouest et Centrale au XXème. *Sud Sciences et Technologies*, Vol.13 N°8, pp.40-46.

**PATUREL J.E., OUÉDRAOGO M., SERVAT E., MAHÉ G., DEZETTER A., BOYER J.F. (2003).** The concept of hydropluviometric normal in West and Central Africa in a context of climatic variability. *Hydrological Science Journal*, Vol. 48, N° 1, pp.125-137.

**PICKANDS J. (1975).** Statistical inference using extreme order statistics. *Annals of statistics*, Vol. 3, pp. 119-131.

Postdoctoral Studies office, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics McGill

**PUECH C., CHABI-GONNI D. (1984).** “Courbes hauteur de pluie-durée-fréquence en Afrique de l’Ouest pour des pluies de durée 5 mn à 24 heures”. Série hydrologique (CIEH).

**R.G.PH. (2014).** Recensement General de la Population et de l’habitat : principaux résultats préliminaires. Institut National de la Statistique (INS), Abidjan, 26p.

**RAGGAR B. (2009).** Fondements de la théorie des valeurs extrêmes, ses principales applications et son apport à la gestion des risques du marché pétrolier. *Mathematics and Social Sciences*, Vol.186, N° 2, pp.29-63.

**RASCKO P., SZEIDL L. AND SEMENOV M. (1991).** A Serial Approach to Local Stochastic Weather Models. *Ecological Modelling*, Vol. 57, pp. 27-41.

**RICHARDSON C. W. (1981).** Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation. *Water Resources Research*. Vol. 17, N°1, pp. 182-190.

**RICHARDSON C.W., WRIGHT. D.A. (1984).** WGEN: A Model for Generating Daily Weather Variables. *Agriculture Research Service*, Vol. 8, 15p.

**SAFOUANE M., SAIDA N., SIHEM J., 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.

**SALAS J.D., DELLEUR J.W., YEVJEVICH V. AND LANE W. L. (1980).** Applied Modeling of Hydrological Time Series. *Water Resources Publications*, Littleton, Colorado, 15p.

**SAMIMI C., FINK A., PAETH H. (2012).** The 2007 flood in the Sahel: Causes, characteristics and its presentation in the media and FEWS NET. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 12, N°2, pp. 313–325.

**SARR M. A., ZOROMÉ M., SEIDOU O., BRYANT C. R. AND GACHON P. (2013).** Recent trends in selected extreme precipitation indices in Senegal: A change point approach. *Journal of Hydrology*, Vol.55, pp. 326-334.

**SEMENOV M. A. and BARROW E. M. (1997).** Use of a Stochastic Weather Generator in the Development of Climate Change Scenarios. *Climatic Change*, Vol. 35, N°4, pp. 397-414.

**SERVAT E., PATUREL J. E., LUBES-NIEL H., KOUAMÉ B., MASSON J.M., TRAVAGLIO M. ET MARIEU B. (1999).** Différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de L'Ouest et centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, Vol.2, N° 2, pp. 363-387.

**SIGHOMNOU D. (2004).** Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Yaoundé 1, Cameroun, 279p.

**SIRIWARDENA L., SRIANTHAN R., MCMAHON T.A. (2002).** Evaluation of two daily rainfall data generation models. Technical Report, 11p.

**SORO G. (2011).** Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat de l'Université Nangui-Abrogoua, Sciences et Gestion de l'Environnement, 193p.

**SORO G. E., GOULA B. T. A., KOUASSI F. W. & SROHOUROU B. (2010).** Update of intensity duration-frequency curves for precipitation of short durations in tropical area of West Africa (Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Sciences*, Vol.10, N° 9, pp.1-12.

**SORO G.E., GOULA B.T.A., KOUASSI F.W., KOFFI K., KAMAGATE B., DOUMOUYA I., SAVANE I., SROHOUROU B. (2011).** Courbes Intensité Durée Fréquence des Précipitations en climat Tropical Humide : Cas de la région d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, Vol. 21, N°5, pp.394-405.

**SORO G.E., GOULA B.T.A., KOUASSI F.W., KOFFI K., KAMAGATE B., DOUMOUYA I., SAVANE I., SROHOUROU B. (2008).** Courbes Intensité Durée Fréquence des Précipitations En climat Tropical Humide : Cas de la Région D'Abidjan (Côte D'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, Vol. 21, N°3, pp. 394–405.

**SORO T.D., SORO N., OGA Y.M.S., LASM T., SORO G., AHOUSI K.E., BIEMI J. (2013).** 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*, Vol.5, pp. 55-73.

**SORO, G. E., NOUFE, D., GOULA Bi, T. A. et SHOROHOU, B. (2016).** Trend Analysis for Extreme Rainfall at Sub-Daily and Daily Timescales in Côte d'Ivoire. *Climate*. pp. 4-37. *Statistics Society A*, Vol. 147, N°1, pp 1-34.

**STERN R. D. and COE R. (1984).** A model fitting analysis of daily rainfall data. *Journal of Royal Statistics Society A*, Vol. 147, N°1, pp. 1-34.

**TAGINI, B. (1971).** Esquisse structurale de la Côte d'Ivoire. Essai de géotectonique régionale. Thèse de Doctorat, Université de Lausanne, Suisse, 302 p.

**TIROGO J.M.T. (2008).** Analyse technico-économique du choix de la crue de projet pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques routiers. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de l'équipement rural, 93p.

**TODOROV A. V. (1985).** Sahel, the changing rainfall and the 'normals' used for its assessment. *Journal of climate and Applied Meteorology*, Vol.10, N°24, pp. 97-107.

**TODOROVIC P. AND WOOLHISER D. A. (1975).** A Stochastic Model of n-day Precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 14, pp. 17-24.

**TOULEMONDE G. (2008).** Estimation et tests en théorie des valeurs extrêmes. Thèse de Doctorat, Université de Paris VI (France), 141p.

**TSCHAKERT P., SAGOE R., OFORI-DARKO G. & CODJOE S.N. (2010).** Floods in the Sahel: an analysis of anomalies, memory, and anticipatory learning. *Climatic Change*, Vol. 103. no. 3-4, p. 471–502.

**UNAL N., AKSOY H. AND AKAR T. (2004).** Annual and Monthly Rainfall Data Generation Schemes. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment Journal*, Vol. 18, pp. 245-257. University, Montreal, 123p.

**VAN DE VYVER H., DEMAREE G.R. (2010).** Construction of Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves for precipitation at Lubumbashi, Congo, under the hypothesis of inadequate data. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 55, N°4, pp. 555–564.

**VENEZIANO D., LANGOUSIS A. & LEPORE C. (2009).** New asymptotic and pre asymptotic results on rainfall maxima from multifractal theory. *Water Resources Research*, Vol.45, N° 11, pp. 11-21.

**WETTERHALL F. (2012).** Conditioning model output statistics of regional climate model precipitation on circulation patterns. No2012. *Nonlin.Processes Geophys*, Vol.19, pp.623–633.

**WILBY R.L., CHARLES SP., ZORITA E., TIMBAL B., WHETTON P., MEARNES LO. (2004).** Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Environment Agency of England and Wales, UK. 27p.

**YUE S., 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., LABORDE J.P. (2007).** Modélisation statistique et synthèse cartographique des pluies journalières extrêmes de Tunisie. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol.20, N° 4, pp.409 -424.