

RÉPUBLIQUE DE CÔTE D'IVOIRE

Union - Discipline – Travail

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



Institut National Polytechnique Félix

Houphouët-Boigny (INP-HB)

N° d'ordre : 113/2022

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 :

**VARIATIONS CLIMATIQUES ET PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE PAR
RÉGRESSION LINÉAIRE MULTIPLE D'INDICES DE PRÉCIPITATIONS
NORMALISÉS : CAS DE LA CÔTE D'IVOIRE (AFRIQUE DE L'OUEST).**

Présentée et soutenue publiquement le 13 mai 2022 par :

KOUAO Jean-Muller

JURY

M. TOURE Kidjegbo Augustin	<i>Professeur Titulaire, I.N.P.H.B. Yamoussoukro</i>	Président
M. KOUAME Koffi Fernand	<i>Professeur Titulaire, U.F.H.B. Abidjan</i>	Rapporteur
M. KAMAGATE Bamory	<i>Professeur Titulaire, U.N.A. Abidjan</i>	Rapporteur
M. KOUADIO Zilé Alex	<i>Maître de Conférences, U.J.Lo.G. Daloa</i>	Examineur
M. KOUASSI Amani Michel	<i>Maître de Conférences, I.N.P.H.B. Yamoussoukro</i>	Directeur de thèse

DÉDICACE

Au

Seigneur Tout-Puissant

Je rends grâce à DIEU, Principal artisan de cette œuvre. IL l'a voulu et ce travail a pris forme. A DIEU, soit la gloire et l'honneur éternellement !

REMERCIEMENTS

Avant d'exposer les résultats de ce travail, nous tenons à rendre grâce à DIEU Tout-Puissant qui l'a rendu possible. Nous exprimons nos remerciements à tous ceux et toutes celles, qui par leurs soutiens scientifique, matériel, administratif et moral, leurs conseils ou leurs encouragements amicaux ont contribué à l'élaboration et à l'amélioration de ce mémoire. Nous disons merci :

- à tous les membres du jury d'avoir accepté de juger cette Thèse et pour leurs remarques constructives ;

- au Docteur KOUASSI Amani Michel, Maitre de Conférences et Directeur de cette Thèse, pour avoir accepté de nous encadrer. Vous avez facilité notre intégration au sein de l'EDP (Ecole Doctorale Polytechnique) de l'INP-HB (Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny de Yamoussoukro). Votre disponibilité, votre grande rigueur scientifique, mais aussi votre amabilité et votre dynamisme, joints à vos encouragements constants et vos précieux conseils et suggestions ont permis à ces recherches de progresser et d'aboutir à une fin utile. Vous êtes celui-là même, à qui nous avons pratiquement emboité le pas dans la recherche. En effet, depuis le DEA (Diplôme d'Etude Approfondie) à l'UFHB (Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan), nous avons régulièrement bénéficié de votre soutien et de votre guide. Nous vous sommes très reconnaissant pour nous avoir fait confiance et encadré tout au long de cette thèse;

- aux Professeurs BIEMI Jean et KOUAME Koffi Fernand de l'UFHB, qui sont les personnes qui ont guidé nos premiers pas dans le domaine de la recherche en acceptant respectivement notre encadrement et co-encadrement au DEA. Ils sont également à l'origine de notre collaboration avec le Docteur KOUASSI Amani Michel. Nous exprimons toute notre reconnaissance à ces éminences exceptionnellement chaleureuses et accueillantes.

Nos remerciements vont également à l'endroit des responsables académiques de l'EDP-INPHB pour leur accueil et leur disponibilité, notamment le Professeur DIABY Moussa, Directeur Général de l'INP-HB; le Professeur YAO Benjamin, Directeur de l'Ecole Doctorale Polytechnique de l'INP-HB et ses proches collaborateurs que sont les Docteurs SORO Doudjo et ABRO Désiré; le Professeur KONIN Athanas, Directeur de l'UMRI 68 (Unité Mixte de Recherche et d'Innovation) qui est celui du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques.

A ces remerciements, nous associons feu le Professeur LASM Théophile, les Docteurs AHOUSSEI Kouassi Ernest, YAO Blaise, OULARE Sékouba, DEKOULA Charles, DEH Serges, ATCHEREMY Dickens, KONATE Lassina de l'UFHB, les Docteurs KOUDOU Aimé, KOUADIO Zilé, GBANGBOT Jean de l'Université Jean Lorougnon Guédé (UJLoG) de Daloa et le Docteur KOUAKOU Koffi Eugène de l'INP-HB pour leurs encouragements, conseils et suggestions qui ont fortement contribué à l'amélioration de ce travail.

Nous n'oublions pas les responsables de la Société d'Exploitation et de Développement Aéroportuaire Aéronautique et Météorologique (SODEXAM) pour la mise à disposition des données pluviométriques et thermométriques. Cette Thèse n'aurait pu voir le jour sans ces données. Soyez en infiniment remercié.

A tous les doctorants de l'UMRI 68 et aux ingénieurs de conception de l'ESMG (Ecole Supérieure des Mines et de Géologie) de l'INP-HB dont les remarques et suggestions pertinentes sur certains aspects de ce travail ont contribué à son amélioration. Nous citons particulièrement les doctorants ASSOKO Victoire, NASSA Abdoul-Karim, YAO Léon, GNANGOUIN Joël, BOUBE Farida, EDIMO Ngomune et les ingénieurs ASSEUFI Boris, OUATTARA Souleymane, GBOLA Claudia, BOSSA Judith.

Nous adressons un sincère remerciement à Mme YAO née ADJOUA Antoinette et à tous nos amis, surtout à KACOU Félicien, KONATE Ismaël, KOUADIO David, BROU Hugues, YAO Michael pour leurs prières et appuis inestimables de tous les jours et pour nous avoir témoigné de leur guide dans la spiritualité et de leur amitié sans faille.

A ma fiancée BAO Esther et sa famille et à mes enfants (Charles Yvan, Christ Aymerick, Chance Marie) qui nous ont apporté leur soutien, nous leur disons grand merci. Enfin, à mes parents (feu KOUAO N'cho et YAPO Juliette) et à ma famille, à qui nous voulons dire un immense merci pour leur confiance en nous, leur soutien et leur encouragement tout au long de notre cursus scolaire et universitaire et au cours de ces travaux de recherche.

Encore MERCI à tous!

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xi
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES TABLEAUX	xx
RÉSUMÉ	xxiii
ABSTRACT	xxiv
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
 PREMIÈRE PARTIE: GÉNÉRALITÉS	
CHAPITRE 1 : ÉTAT DE L'ART	6
1.1 CONCEPTS ET DÉFINITIONS DES VARIATIONS CLIMATIQUES ET DE LA SÉCHERESSE	7
1.1.1. VARIATIONS CLIMATIQUES	7
1.1.2. SÉCHERESSE	8
1.1.2.1. Types de sécheresse	9
1.1.2.2. Indice de sécheresse.....	11
1.1.2.3. Prévision de la sécheresse.....	12
1.1.2.3.1. Définition et utilité.....	12
1.1.2.3.2. Système d'alerte précoce à la sécheresse (SAPS).....	14
1.2. ÉVOLUTION ET PRÉVISIONS CLIMATIQUES	15
1.2.1. ÉCHELLE GLOBALE.....	17
1.2.2. CAS DE L'AFRIQUE DE L'OUEST.....	18
1.2.3. CAS DE LA COTE D'IVOIRE.....	20
1.3. OUTILS ET MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DES VARIATIONS CLIMATIQUES ET DE PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE	22
1.3.1. OUTILS DE ZONAGE CLIMATIQUE.....	22
1.3.2. OUTILS DE CARACTÉRISATION DES VARIATIONS CLIMATIQUES ET D'ÉVALUATION DE LA SÉCHERESSE.....	26

1.3.2.1. Outils de caractérisation des variations climatiques et de la sécheresse.....	26
1.3.2.2. Outils d'évaluation de la sécheresse	28
1.3.3. OUTILS DE MODÉLISATION ET PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE.....	29
1.3.3.1. Modèles déterministes.....	30
1.3.3.2. Modèles empiriques.....	30
1.3.4. MÉTHODES DE CONSTRUCTION D'UN SYSTÈME D'ALERTE PRÉCOCE À LA SÉCHERESSE (SAPS).....	32
CONCLUSION PARTIELLE.....	35
CHAPITRE 2 : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	36
2.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	37
2.2. RÉGIMES CLIMATIQUES	39
2.3. COUVERT VÉGÉTAL.....	40
2.4. HYDROGRAPHIE.....	42
2.5. GÉOLOGIE	44
2.6. HYDROGÉOLOGIE	47
2.7. SOLS.....	49
2.8. POPULATIONS ET ACTIVITÉS SOCIO-ÉCONOMIQUES.....	49
2.8.1. DÉMOGRAPHIE.....	49
2.8.2. ACTIVITÉS SOCIO-ÉCONOMIQUES.....	51
CONCLUSION PARTIELLE.....	52
DEUXIÈME PARTIE: MATÉRIEL ET MÉTHODES	
CHAPITRE 3 : DONNÉES ET OUTILS.....	54
3.1. DONNÉES UTILISÉES.....	55
3.1.1. DONNÉES D'OBSERVATION <i>IN SITU</i>	55
3.1.2. DONNEES DE RÉANALYSES.....	55
3.2. CRITIQUE ET ANALYSE DES DONNÉES.....	57
3.2.1. CHOIX DES STATIONS PLUVIOMÉTRIQUES ET SYNOPTIQUES.....	57
3.2.2. ANALYSE DE LA FIABILITÉ DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES ET THERMOMÉTRIQUES.....	58
3.2.2.1. Comblement des lacunes dans les séries pluviométriques et thermométriques...	59

3.2.2.2. Contrôle des données après comblement : méthode des résidus et test statistique de Buishand.....	60
3.3. CARACTÉRISATION STATISTIQUE DES DONNÉES.....	67
3.3.1. STATISTIQUE DES SÉRIES DE DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES.....	67
3.3.2. STATISTIQUE DES SÉRIES DE DONNÉES DE TEMPÉRATURE.....	69
3.4. OUTILS DE TRAITEMENT DES DONNÉES.....	70
CONCLUSION PARTIELLE.....	71
CHAPITRE 4 : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	72
4.1. MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DE LA RÉGIONALISATION CLIMATIQUE.....	73
4.1.1. ANALYSES STATISTIQUES MULTIVARIÉES	73
4.1.1.1. Analyse en composantes principales normées.....	73
4.1.1.1.1. Statistiques descriptives.....	74
4.1.1.1.2. Matrice de corrélation.....	74
4.1.1.1.3. Nombres d'axes à retenir	74
4.1.1.1.4. Interprétation des résultats d'une ACPN.....	75
4.1.1.2. Classification ascendante hiérarchique.....	77
4.1.1.2.1. Choix des variables.....	77
4.1.1.2.2. Indices de dissimilarité.....	77
4.1.1.2.3. Critères d'agrégation.....	78
4.1.1.2.4. Nombre de classes à retenir.....	80
4.1.2. CARACTÉRISATION DES RÉGIMES CLIMATIQUES SAISONNIERS ET TYPES DE CLIMAT.....	81
4.1.2.1. Indice ombrothermique de Gaussen.....	81
4.1.2.2. Indice d'aridité de De Martonne.....	82
4.2. MÉTHODES D'ÉVALUATION DES VARIATIONS CLIMATIQUES ET DE LA SÉCHERESSE.....	83
4.2.1. ANALYSE DES TENDANCES CLIMATIQUES.....	83
4.2.1.1. Régression linéaire.....	83
4.2.1.2. Tests de détection de ruptures climatiques.....	84
4.2.1.2.1. Test de Pettitt.....	84
4.2.1.2.2. Procédure de segmentation de Hubert.....	85
4.2.1.2.3. Ecart de variation par rapport aux ruptures.....	86

4.2.2. ANALYSE DE LA DYNAMIQUE CLIMATIQUE.....	86
4.2.2.1. Indice d'aridité UNEP.....	87
4.2.2.2. Indice pluviométrique d'Angot.....	88
4.2.2.3. Indice saisonnier de Péguy.....	88
4.2.2.4. Indice pluviométrique de Moral.....	89
4.3. MODÉLISATION PRÉVISIONNELLE DE LA SÉCHERESSE.....	89
4.3.1. CALCUL ET INTERPRÉTATION DU SPI.....	89
4.3.2. ÉVALUATION DE LA SÉCHERESSE AUX DIFFÉRENTES ÉCHELLES DU SPI...	91
4.3.3. DESCRIPTION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE DE PRÉVISION.....	92
4.3.4. CONCEPTION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE DE PRÉVISION.....	93
4.3.5. PROCÉDURE DE MODÉLISATION.....	94
4.3.5.1. Calage du modèle.....	94
4.3.5.2. Validation du modèle.....	95
4.3.5.3. Critères d'évaluation du modèle.....	95
4.3.5.3.1. Coefficient de corrélation (R).....	96
4.3.5.3.2. Racine carrée de l'erreur quadratique (RMSE).....	96
4.3.5.3.3. Critère d'efficacité de Kling-Gupta (KGE).....	97
4.3.5.3.4. Évaluation de la robustesse du modèle.....	97
4.3.5.3.5. Critères de contingence	98
4.3.5.3.6. Critères graphiques.....	100
CONCLUSION PARTIELLE.....	101

TROISIÈME PARTIE: RÉSULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 5 : CARACTÉRISATION DE LA RÉGIONALISATION CLIMATIQUE EN CÔTE D'IVOIRE.....	102
5.1. RÉGIONALISATION CLIMATIQUE À PARTIR DE L'ANALYSE MULTIVARIÉE.....	103
5.1.1. RÉGIONALISATION CLIMATIQUE À PARTIR DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES NORMÉES (ACPN).....	103
5.1.1.1. Description statistique des variables.....	103
5.1.1.2. Analyse des corrélations.....	104
5.1.1.3. Valeurs propres et variances.....	104
5.1.1.4. Analyse du cercle des variables.....	105

5.1.1.5. Analyse dans l'espace des individus	107
5.1.2. RÉGIONALISATION CLIMATIQUE À PARTIR DE LA CLASSIFICATION ASCENDANTE HIÉRARCHIQUE (CAH).....	110
5.1.3. ANALYSE DE L'INFLUENCE DE LA SÉCHERESSE SUR LA RÉGIONALISATION CLIMATIQUE.....	115
5.1.3.1. Classification ascendante hiérarchique sur la période 1961-1970	115
5.1.3.2. Classification ascendante hiérarchique sur la période 1971-2016	116
5.2. RÉGIONALISATION CLIMATIQUE À PARTIR DE LA CARACTÉRISATION DES RÉGIMES CLIMATIQUES SAISONNIERS ET TYPES DE CLIMAT	118
5.2.1. CARACTÉRISATION DES RÉGIMES CLIMATIQUES SAISONNIERS À PARTIR DE L'INDICE DE GAUSSEN.....	118
5.2.1.1. Régime climatique unimodal à deux saisons	118
5.2.1.2. Régime climatique bimodal à deux saisons	120
5.2.1.3. Régime climatique bimodal à quatre saisons	123
5.2.1.4. Cas particuliers de régimes climatiques	124
5.2.2. CARACTÉRISATION DES TYPES DE CLIMAT À PARTIR DE L'INDICE DE DE MARTONNE.....	125
5.3. DISCUSSION	131
CONCLUSION PARTIELLE	134
CHAPITRE 6 : ÉVALUATION DES VARIATIONS CLIMATIQUES ET DE LA SÉCHERESSE EN CÔTE D'IVOIRE	136
6.1. ANALYSE DES TENDANCES CLIMATIQUES	137
6.1.1. ÉVOLUTION DES TENDANCE LINÉAIRE.....	137
6.1.2. STATIONNARITÉ DES DONNÉES CLIMATIQUES	145
6.2. ANALYSE DE LA DYNAMIQUE CLIMATIQUE MULTI-ÉCHELLE	148
6.2.1. DYNAMIQUE CLIMATIQUE ANNUELLE.....	148
6.2.2. DYNAMIQUE CLIMATIQUE SEMESTRIELLE.....	149
6.2.3. DYNAMIQUE CLIMATIQUE TRIMESTRIELLE.....	153
6.2.4. DYNAMIQUE CLIMATIQUE MENSUELLE.....	157
6.3. DISCUSSION	162
CONCLUSION PARTIELLE	166
CHAPITRE 7 : PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE EN CÔTE D'IVOIRE	167

7.1. TAUX DE VULNÉRABILITÉ AUX SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUE, AGROMÉTÉOROLOGIQUE ET HYDROMÉTÉOROLOGIQUE.....	168
7.2. PRÉVISION DES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUE ET AGROMÉTÉOROLOGIQUE.....	172
7.2.1. PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE MÉTÉOROLOGIQUE.....	172
7.2.1.1. Paramètres d'équations du modèle de prévision de la sécheresse météorologique	172
7.2.1.2. Performances du modèle de prévision de la sécheresse météorologique en calage.	174
7.2.1.3. Performances du modèle de prévision de la sécheresse météorologique en validation.....	174
7.2.2. PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE AGROMÉTÉOROLOGIQUE.....	177
7.2.2.1. Paramètres d'équations du modèle de prévision de la sécheresse agrométéorologique.....	177
7.2.2.2. Performances du modèle de prévision de la sécheresse agrométéorologique en calage.....	179
7.2.2.3. Performances du modèle de prévision de la sécheresse agrométéorologique en validation.....	180
7.2.3. ROBUSTESSE DES MODÈLES DE PRÉVISION DES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUE ET AGROMÉTÉOROLOGIQUE.....	184
7.2.4. PRÉVISION DES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUE ET AGROMÉTÉOROLOGIQUE AU-DELÀ DE 3 MOIS.....	185
7.3. PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE.....	189
7.3.1. PARAMÈTRES D'ÉQUATIONS DU MODÈLE DE PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE HYROMÉTÉOROLOGIQUE.....	189
7.3.2. PERFORMANCES DU MODÈLE DE PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN CALAGE.....	191
7.3.3. PERFORMANCES DU MODÈLE DE PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN VALIDATION.....	193
7.3.4. ROBUSTESSE DU MODÈLE DE PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE.....	198
7.4.CAS PRATIQUES DE PRÉVISION DES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUE, AGROMÉTÉOROLOGIQUE ET HYDROMÉTÉOROLOGIQUE.....	199
7.5. DISCUSSION.....	202
CONCLUSION PARTIELLE.....	207
CONCLUSION GÉNÉRALE RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....	209

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	214
ANNEXES	233

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACP	: Analyse en Composantes Principales
ACPN	: Analyse en Composantes Principales Normées
AGRHYMET	: Centre régional d'AGRoHYdrologie opérationnelle et METéorologique
AMJ	: Avril-Mai-Juin
ARIMA	: Modèle autorégressif moyenne mobile intégré
ASO	: Aout-Septembre-Octobre
CAH	: Classification Ascendante Hiérarchique
CCNUCC	: Convention-Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique
CDH	: Classification Descendante Hiérarchique
CEDEAO	: Communauté Économique Des États de l'Afrique de l'Ouest
CFAR	: Climate Forecasting for Agricultural Resources (Prévisions climatiques pour les ressources agricoles)
CILSS	: Comité Inter-Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
CMIP5	: Coupled Model Intercomparison Project, phase 5 (Projet d'intercomparaison de modèles couplés, phase 5)
CNO	: Centre Nord Ouest
CPP	: Classification Par Partition
CSIRO-MK2	: Modèle de circulation générale australien développé par le Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Organisation de Recherche Scientifique et industrielle du Commonwealth)
CV	: Coefficient de Variation
ECHAM5	: Modèle allemand de circulation générale du <i>Max Planck Institute for meteorology</i> , version 5
EM	: Equateur Météorologique
ENSO	: El-Niño Southern Oscillation (l'Oscillation Australe El-Niño)
ETP	: EvapoTranspiration Potentielle
FAO	: Food and Agriculture Organization (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture)
FAR	: Fausse Alerte
FIT	: Front Inter-Tropical
FMA	: Février-Mars-Avril

GIEC	: Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GR2M	: Génie Rural, modèle à 2 paramètres et au pas Mensuel
GWP	: Global Water Partnership (Partenariat mondial pour l'eau)
HadCM3	: Hadley Centre Coupled Model, version 3 (Modèle britannique de circulation générale du <i>Hadley Center</i> , version 3)
HIRHAM	: Modèle danois de circulation régionale du Danish Meteorological Institute
HSS	: Hit Skill Score (Score de compétence atteint)
ICF	: Classification internationale du fonctionnement du handicap et de la santé
INP-HB	: Institut National Polytechnique-Félix Houphouët Boigny
INS	: Institut National de la Statistique
IPCC	: Intergovernmental Panel on Climate Change (version Anglophone du GIEC)
JAS	: Juillet-Août-Septembre
JFM	: Janvier-Février-Mars
JJA	: Juin-Juillet-Août
KGE	: Kling-Gupta Efficiency (critère d'Efficacité de Kling-Gupta)
Ma	: Million d'année
MAE	: Mean Absolute Error (Erreur Absolue Moyenne)
MAM	: Mars-Avril-Mai
MINADER	: MINistère de l'Agriculture et du DEveloppement Rural
MINEDD	: MINistère de l'Environnement et du Développement Durable
MJJ	: Mai-Juin-Juillet
MSE	: Mean Square Error (Erreur quadratique moyenne)
NAO	: North Atlantic Oscillation (Oscillation de l'Atlantique Nord)
NIAKARA	: Niakaramandougou
ODD	: Objectifs de Développement Durable
OMM	: Organisation Mondiale Météorologique
OND	: Octobre-Novembre-Décembre
OSS	: Observation du Sahara et du sahel
OUANGOLO	: Ouangolodougou
PAM	: Programme Alimentaire Mondial
PIB	: Produit Intérieur Brut
PNUD	: Programme des Nations Unies pour le Développement
POD	: Probabilité de Détection
R	: Coefficient de corrélation

RACMO	: Regional Atmospheric Climate MOdel (MOdèle Régional de Climat Atmosphérique du Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, Pays-Bas)
RCP	: Representative Concentration Pathway (Trajectoire de concentration représentative)
RegCM3	: Regional Climate Model version 3 (Modèle climatique régional, version 3)
RL	: Régression Linéaire simple
RLM	: Régression Linéaire Multiple
RMSE	: Root Mean Square Error (Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne)
RNA	: Réseaux de Neurones Artificiels
SAPS	: Système d'Alerte Précoce à la Sécheresse
SARIMA	: Modèle autorégressif moyenne mobile intégré saisonnier
SASCA	: SASsandra-CAvally
SODEXAM	: Société d'Exploitation et de Développement Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique
SOI	: Southern Oscillation Index (Indice d'oscillation australe)
SON	: Septembre Octobre Novembre
SPI	: Standardized Précipitation Index (Indice de Précipitation Standardisée)
SRES	: Special Reports on Emission Scenarios (Rapport spécial sur les scénarios d'émission)
TC	: Taux de Coïncidence
TSM	: Température à la Surface de la Mer
TSO	: Température de Surface de l'Océan
UE	: Union Européenne
UMRI	: Unité Mixte de Recherche et d'Innovation
UNEP	: United Nations Environment Program (Programme des nations unies pour l'environnement)
USAID	: United States Agency for International Development (Agence des États- Unis pour le développement international)
WBM	: Water Balance Model (Modèle de bilan hydrique)
ZCIT	: Zone de Convergence Inter-Tropicale

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation schématique des liens entre les différents types de sécheresse et leurs impacts sur les ODD (OMM, 2006 modifié).....	11
Figure 2 : Evolution du forçage radiatif de l’atmosphère en fonction des familles de scénarii (GIEC, 2013)	16
Figure 3 : Différents indicateurs observés de l’évolution du système climatique mondial. Température à la surface du globe (a et b), étendue des glaces de mer dans l’Arctique (moyenne juillet-septembre) et dans l’Antarctique (février) (c), niveau moyen des mers à l’échelle du globe (d), précipitations moyennes sur les terres émergées (e) (GIEC, 2014).....	18
Figure 4 : Variation des températures (A) et des précipitations moyennes annuelles (B) en Côte d’Ivoire à l’horizon 2091-2100 par rapport à la période de référence 1991-2000 (Kouakou <i>et al.</i> , 2012).....	22
Figure 5 : Découpage climatique de la Côte d’Ivoire à partir d’une ACP (Kouadio <i>et al.</i> , 2003).....	24
Figure 6 : Régionalisation des stations pluviométriques ivoiriennes (Soro, 2011).....	25
Figure 7 : Carte des régions climatiques de la Côte d’Ivoire (Kouakou <i>et al.</i> , 2017, modifié)	26
Figure 8 : Résumé des aspects opérationnels d’une approche proactive de gestion de la sécheresse (PNUD, 2011).....	33
Figure 9 : Composantes intégrées d’un système d’alerte à la sécheresse où l’information circule entre toutes les composantes continuellement (cercle central rouge) (Didier <i>et al.</i> , 2017).....	34
Figure 10 : Localisation géographique de la Côte d’Ivoire (Mines, 1998 <i>in</i> Soro, 2011).....	38
Figure 11 : Carte des principales zones climatiques de la Côte d’Ivoire avec les régimes pluviométriques associés (Goula <i>et al.</i> , 2007, modifié).....	40
Figure 12 : Aperçu du couvert végétal de la Côte d’Ivoire (Brou, 2005).....	42
Figure 13 : Principaux bassins versants de la Côte d’Ivoire (Kouamé, 2011).....	44
Figure 14 : Aperçu géologique de la Côte d’Ivoire (Tagini, 1972, modifié <i>in</i> Ouattara et Koffi, 2014).....	47
Figure 15 : Carte de localisation des stations pluviométriques et synoptiques retenues	56
Figure 16 : Vérification de l’homogénéité des chroniques de pluies aux stations d’Adiaké et Agnibilékrou.....	62

Figure 17 : Vérification de l’homogénéité des chroniques de pluies aux stations de Ferké, et Katiola.....	63
Figure 18 : Vérification de l’homogénéité des chroniques de pluies aux stations de Danané et Vavoua.....	64
Figure 19 : Vérification de l’homogénéité des chroniques de températures aux stations de Bouaké et Daloa.....	65
Figure 20 : Vérification de l’homogénéité des chroniques de températures aux stations de Korhogo et Odienné.....	66
Figure 21 : Vérification de l’homogénéité des chroniques de températures à la station de Man.....	67
Figure 22 : Exemple de regroupements hiérarchiques possibles d’une CAH.....	81
Figure 23 : Entrées /sorties du modèle de prévision.....	94
Figure 24 : Espace des variables dans le plan factoriel F1-F2 (1961-2016).....	106
Figure 25 : Espace des variables dans le plan factoriel F1-F3 (1961-2016).....	107
Figure 26 : Espace des individus dans le plan factoriel F1-F2 (1961-2016).....	108
Figure 27 : Zonage climatique de la Côte d’Ivoire à partir des résultats de l’ACPN (1961-2016)....	110
Figure 28 : Classification hiérarchique des stations pluviométriques (1961- 2016).....	111
Figure 29 : Zonage climatique de la Côte d’Ivoire à partir des résultats de la CAH (1961-2016).....	112
Figure 30 : Synthèse des résultats du zonage obtenu à partir de l’ACPN (a) et de la CAH (b)..	114
Figure 31 : Classification hiérarchique des stations pluviométriques (1961-1970).....	116
Figure 32 : Classification hiérarchique des stations pluviométriques (1971-2016).....	117
Figure 33 : Diagrammes ombrothermiques du régime climatique unimodal du Nord (1961-2016).....	119
Figure 34 : Diagrammes ombrothermiques du régime climatique unimodal de l’Ouest (1961-2016).....	120
Figure 35 : Diagrammes ombrothermiques du régime climatique bimodal à deux saisons (1961-2016).....	121
Figure 36 : Diagrammes ombrothermiques du régime bimodal à deux saisons des stations de Touba, Séguéla, Mankono, Katiola et Dabakala (1961-2016).....	121
Figure 37 : Diagrammes ombrothermiques du régime climatique bimodal à deux saisons des stations de Bouaflé, Daloa, Toulépleu, Guiglo, Gagnoa et Soubré (1961-2016).....	122
Figure 38 : Diagrammes ombrothermiques du régime climatique bimodal à quatre saisons	

des stations du littoral (1961-2016).....	123
Figure 39 : Diagrammes ombrothermiques des stations traduisant le régime climatique équatorial de transition de l'intérieur (1961-2016).....	124
Figure 40 : Diagramme ombrothermique traduisant le régime climatique équatorial de transition du Sud-Ouest (Tabou) (1961-2016).....	125
Figure 41 : Zonage climatique de la Côte d'Ivoire.....	131
Figure 42 : Précipitations annuelles maximales et minimales (1961-2016).....	138
Figure 43 : Températures annuelles maximales et minimales (1961-2016).....	139
Figure 44 : Tendances à la baisse des précipitations annuelles au niveau des stations d'Odienné et Korhogo en climat soudanais (1961-2016).....	140
Figure 45 : Tendances à la baisse des précipitations annuelles au niveau de la station de Tabou en climat attiéen du Sud-Ouest (1961-2016).....	140
Figure 46 : Tendances à la baisse des précipitations annuelles au niveau des stations d'Abidjan, Adiaké et Sassandra en climat attiéen du littoral (1961-2016).....	141
Figure 47 : Tendances à la baisse des précipitations annuelles au niveau des stations de Bouaké, Bondoukou, Daloa et Gagnoa en climat baouléen (1961-2016).....	141
Figure 48 : Tendances à la baisse des précipitations annuelles au niveau des stations de Man en climat de montagnes (1961-2016).....	142
Figure 49 : Tendances à la baisse des précipitations annuelles au niveau de la station de Dimbokro en climat attiéen de l'intérieur (1961-2016).....	142
Figure 50 : Tendances à la hausse des températures annuelles au niveau des stations de Korhogo et Odienné en climat soudanais (1961-2016).....	143
Figure 51 : Tendances à la hausse des températures annuelles au niveau des stations de Bouaké, Bondoukou, Daloa et Gagnoa en climat baouléen (1961-2016).....	143
Figure 52 : Tendances à la hausse des températures annuelles au niveau de la station de Man en climat de montagnes (1961-2016).....	144
Figure 53 : Tendances à la hausse des températures annuelles au niveau des stations d'Abidjan, Adiaké et Sassandra en climat attiéen du littoral (1961-2016).....	144
Figure 54 : Tendances à la hausse des températures annuelles au niveau de la station de Dimbokro en climat attiéen de l'intérieur (1961-2016).....	145
Figure 55 : Tendances à la hausse des températures annuelles au niveau de la station de Tabou en climat attiéen du Sud-Ouest (1961-2016).....	145
Figure 56 : Modification après 1970 du caractère pluvieux des semestres froids et des semestres chauds au niveau d'Abidjan, Adiaké et Sassandra en climat attiéen du littoral.....	150

Figure 57 : Modification après 1970 du caractère pluvieux des semestres froids et des semestres chauds au niveau de Bouaké et Gagnoa en climat baouléen.....	151
Figure 58 : Modification après 1970 du caractère pluvieux des semestres froids et des semestres chauds au niveau de Dimbokro en climat attiéen de l'intérieur.....	151
Figure 59 : Modification après 1970 du caractère pluvieux des semestres froids et des semestres chauds au niveau de Tabou en climat attiéen du Sud-Ouest.....	152
Figure 60 : Modification après 1970 du caractère pluvieux des semestres froids et des semestres chauds au niveau d'Odienné en climat soudanais.....	152
Figure 61 : Modification après 1970 du caractère pluvieux des semestres froids et des semestres chauds au niveau de Man en climat de montagnes.....	152
Figure 62 : Modification après 1970 du trimestre le plus pluvieux au niveau des localités d'Abidjan, Sassandra, et Adiaké en climat attiéen du littoral.....	154
Figure 63 : Modification après 1970 du trimestre le plus pluvieux au niveau de la localité de Tabou en climat attiéen du Sud-Ouest.....	154
Figure 64 : Modification après 1970 du trimestre le plus pluvieux au niveau des localités de Bouaké et Gagnoa en climat baouléen.....	155
Figure 65 : Modification après 1970 du trimestre le plus pluvieux au niveau de la localité d'Odienné en climat soudanais.....	155
Figure 66 : Modification après 1970 du trimestre le plus pluvieux au niveau de la localité de Man en climat de montagnes.....	156
Figure 67 : Modification après 1970 du trimestre le plus pluvieux au niveau de la localité de Dimbokro en climat attiéen de l'intérieur.....	156
Figure 68 : Modification après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité de Sassandra en climat attiéen du littoral.....	157
Figure 69 : Modification après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité d'Abidjan en climat attiéen du littoral.....	158
Figure 70 : Evolution stationnaire après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité d'Adiaké en climat attiéen du littoral.....	158
Figure 71 : Modification après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité de Gagnoa en climat baouléen.....	159
Figure 72 : Evolution stationnaire après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité de Bouaké en climat baouléen.....	159
Figure 73 : Modification après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité d'Odienné en climat soudanais.....	160

Figure 74 : Evolution stationnaire après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité de Man en climat de montagnes.....	161
Figure 75 : Modification après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité de Dimbokro en climat attiéen de l'intérieur.....	161
Figure 76 : Modification après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité de Tabou en climat attiéen du Sud-Ouest.....	162
Figure 77 : Taux de vulnérabilité interannuels aux sécheresses météorologiques (SPI-3) et agrométéorologiques (SPI-6 et SPI-9) en Côte d'Ivoire (1971-2016).....	171
Figure 78 : Taux de vulnérabilité interannuels aux sécheresses hydrométéorologiques (SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48) en Côte d'Ivoire (1971-2016).....	172
Figure 79 : Prévion de la sécheresse météorologique (SPI-3) aux délais 1 mois (a et d), 2 mois (b et e) et 3 mois (c et f) en validation au niveau de l'attiéen de l'intérieur.....	176
Figure 80 : Prévion de la sécheresse météorologique (SPI-3) aux délais 1 mois (a et d), 2 mois (b et e) et 3 mois (c et f) en validation au niveau de l'attiéen du Sud-Ouest.....	177
Figure 81 : Prévion de la sécheresse agrométéorologique SPI-6 (a et c) et SPI-9 (b et d) au délai 1 mois en validation au niveau de l'attiéen de l'intérieur.....	182
Figure 82 : Prévion de la sécheresse agrométéorologique SPI-6 (a et c) et SPI-9 (b et d) au délai 2 mois en validation au niveau de l'attiéen de l'intérieur.....	183
Figure 83 : Prévion de la sécheresse agrométéorologique SPI-6 (a et c) et SPI-9 (b et d) au délai 3 mois en validation au niveau de l'attiéen du Sud-Ouest.....	183
Figure 84 : Prévion des sécheresses météorologique SPI-3 (a et c) et agrométéorologique SPI-6 (b et d) au délai 4 mois en validation au niveau de l'attiéen de l'intérieur.....	188
Figure 85 : Prévion de la sécheresse agrométéorologique (SPI-9) aux délais 4 mois (a et c) et 6 mois (b et d) en validation au niveau de l'attiéen de l'intérieur.....	188
Figure 86 : Prévion de la sécheresse hydrométéorologique (SPI-12) aux délais 1 mois (a et c) et 30 ans (b et d) en validation au niveau de l'attiéen du littoral.....	195
Figure 87 : Prévion de la sécheresse hydrométéorologique (SPI-12) aux délais 1 mois (a et c) et 30 ans (b et d) en validation au niveau du baouléen.....	196
Figure 88 : Prévion de la sécheresse hydrométéorologique (SPI-24) aux délais 1 mois (a et c) et 30 ans (b et d) en validation au niveau du soudanais.....	196
Figure 89 : Prévion de la sécheresse hydrométéorologique (SPI-36) aux délais 1 mois (a et c) et 30 ans (b et d) en validation au niveau de l'attiéen de l'intérieur.....	197
Figure 90 : Prévion de la sécheresse hydrométéorologique (SPI-48) aux délais 1 mois (a et c) et 30 ans (b et d) en validation au niveau du climat de montagnes.....	197

Figure 91 : Préviation de la sécheresse hydrométéorologique (SPI-48) aux délais 1 mois (a et c) et 30 ans (b et d) en validation au niveau de l'attién du Sud-Ouest..... 198

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I : Echelle de temps des différentes décisions agricoles concernées par les prévisions décennales (Meinke et Stone, 2004)	13
Tableau II : Principaux systèmes d’alerte précoce à la sécheresse en Afrique (OSS, 2013).....	14
Tableau III : Caractéristiques et limites des approches de gestion de la sécheresse (PNUD, 2011).....	32
Tableau IV : Taille de la population ivoirienne de 1965 à 2014 (INS, 2014).....	50
Tableau V : Taux de lacunes mensuelles des stations pluviométriques retenues (%).....	58
Tableau VI : Statistiques des données pluviométriques annuelles de la période 1941-2016.....	68
Tableau VII : Statistiques des données pluviométriques annuelles de la période 1961-2016.....	69
Tableau VIII : Statistiques des données de températures de la période 1941-2016.....	70
Tableau IX : Statistiques des données de températures de la période 1961-2016.....	70
Tableau X : Classification de l’indice de De Martonne.....	82
Tableau XI : Classification de l’indice SPI (McKee <i>et al.</i> , 1993).....	91
Tableau XII : Table de contingence pour le calcul des critères d’évaluation de la qualité de prévision d’un modèle (Hamatan <i>et al.</i> , 2004).....	98
Tableau XIII : Statistique descriptive des variables étudiées (1961-2016).....	103
Tableau XIV : Matrice de corrélation entre variables (1961-2016).....	104
Tableau XV : Valeurs propres et variances (1961-2016).....	105
Tableau XVI : Indices de De Martonne des stations étudiées (1961-2016).....	126
Tableau XVII : Classification des stations en fonction des valeurs de l’indice de De Martonne.	126
Tableau XVIII : Caractéristiques des régimes climatiques ivoiriens (1961-2016).....	128
Tableau XIX : Déficit et excédents pluvio-thermiques moyens observés aux différentes stations des zones climatiques par rapport aux dates de rupture des séries chronologiques (1961-2016).....	146
Tableau XX : Diminution du caractère humide du climat après 1970 au niveau des différentes zones climatiques étudiées.....	149
Tableau XXI : Taux des séquences sèches, normales et humides des sécheresses météorologique (SPI-3) et agrométéorologique (SPI-6, SPI-9) en Côte d’Ivoire (1971-2016).....	169
Tableau XXII : Taux des séquences sèches, normales et humides des sécheresses hydrométéorologiques (SPI-12, SPI-24, SPI-36, SPI-48) en Côte d’Ivoire (1971-2016).....	170
Tableau XXIII : Paramètres d’équations du modèle développé pour la prévision des SPI-3	

aux délais 1, 2 et 3 mois au niveau des différentes zones climatiques.....	173
Tableau XXIV : Performances du modèle de prévision de la sécheresse météorologique en calage (1971-2000).....	174
Tableau XXV : Performances du modèle de prévision de la sécheresse météorologique en validation (2001-2016).....	175
Tableau XXVI : Paramètres d'équations du modèle développé pour la prévision des SPI-6 aux délais 1, 2 et 3 mois au niveau des différentes zones climatiques.....	178
Tableau XXVII : Paramètres d'équations du modèle développé pour la prévision des SPI-9 aux délais 1, 2 et 3 mois au niveau des différentes zones climatiques.....	179
Tableau XXVIII : Performances du modèle de prévision de la sécheresse agrométéorologique en calage (1971-2000).....	180
Tableau XXIX : Performances du modèle de prévision de la sécheresse agrométéorologique en validation (2001-2016).....	181
Tableau XXX : Robustesse des modèles de prévision des sécheresses météorologiques et agrométéorologiques.....	185
Tableau XXXI : Paramètres d'équation du modèle développé pour la prévision des SPI-3, SPI-6 et SPI-9 aux délais 4, 5, 6 et 7 mois au niveau du climat attiéen de l'intérieur.....	186
Tableau XXXII : Performances des modèles de prévision des sécheresses météorologique et agrométéorologique au-delà de 3 mois en climat attiéen de l'intérieur.....	187
Tableau XXXIII : Robustesse des modèles de prévision des sécheresses météorologique et agrométéorologique au-delà de 3 mois en climat attiéen de l'intérieur.....	189
Tableau XXXIV : Paramètres d'équations du modèle développé pour la prévision des SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48 au délai 1 mois au niveau des différentes zones climatiques.....	190
Tableau XXXV : Paramètres d'équations du modèle développé pour la prévision des SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48 au délai 30 ans au niveau des différentes zones climatiques.....	191
Tableau XXXVI : Performances du modèle de prévision de la sécheresse hydrométéorologique en calage (1971-2000).....	192
Tableau XXXVII : Performances du modèle de prévision de la sécheresse hydrométéorologique en validation (2001-2016).....	193
Tableau XXXVIII : Robustesse du modèle de prévision de la sécheresse hydrométéorologique...	199
Tableau XXXIX : Types de SPI-3 observés et prévus au délai 1 mois en climat baouléen (2017-2019).....	200
Tableau XL : Types de SPI-6 observés et prévus au délai 2 mois en climat baouléen (2017-2019).....	201

Tableau XLI : Types de SPI-12 observés et prévus au délai 6 mois en climat baouléen (2017-2019).....	201
Tableau XLII : Types de SPI-12 prévus au délai 6 à 8 ans en climat baouléen (2023-2025).....	202
Tableau XLIII : Comparaison du modèle RLM de la présente étude et du modèle RLM de Boudad et <i>al.</i> (2015) au délai de prévision 1 mois des SPI-3, SPI-6 et SPI-12.....	204
Tableau XLIV : Comparaison du modèle RLM de la présente étude et des modèles RNA ou ondelettes-RNA des travaux antérieurs au délai de prévision 1 mois des SPI-3, SPI-6 et SPI-9.....	206
Tableau XLV : Comparaison du modèle RLM de la présente étude et des modèles RNA ou ondelettes-RNA des travaux antérieurs au délai de prévision 1 mois des SPI-12 et SPI-24.....	206

RÉSUMÉ

Titre : Variations climatiques et prévision de la sécheresse par régression linéaire multiple d'indices de précipitations normalisés : cas de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest).

L'objectif de ce travail est de développer des modèles mathématiques de prévision de la sécheresse de l'échéance saisonnière à l'échéance décennale en Côte d'Ivoire. Les données de pluie et de température utilisées sont au pas de temps mensuel et concernent 47 stations de mesures issues du réseau national de mesures météorologiques de la Côte d'Ivoire. Elles s'étendent globalement sur la période 1941-2016. La démarche méthodologique adoptée a consisté d'abord à la caractérisation du zonage climatique en actualisant le découpage connu depuis lors en Côte d'Ivoire. Elle s'est appuyée sur des méthodes d'analyses statistiques multivariées (ACPN, CAH) et des méthodes basées sur des indices climatiques (indices de Gaussen et de De Martonne). Ensuite, une évaluation des variations climatiques et de la sécheresse, à l'intérieur des zones climatiques préalablement définies, a été réalisée à partir de méthodes statistiques (régression linéaire, tests de Pettitt et procédure de segmentation de Hubert) et d'indices climatiques (indices d'Angot, de Péguy, de Moral et UNEP). Enfin, en utilisant l'indice SPI comme indicateur de sécheresse, des modèles de prévision basés sur les régressions linéaires multiples (RLM) ont été développés pour la prévision des sécheresses météorologiques, agrométéorologiques et hydrométéorologiques à l'intérieur des zones climatiques homogènes. Les différents modèles ont été évalués en calage (1971-2000) et en validation (2001-2016) puis testés sur les périodes passée (2017-2019) et future (2023-2025) à partir de critères numériques (R, RMSE, KGE, POD sèche, POD normale, FAR sèche, TC, HSS) et graphiques. L'analyse des résultats obtenus a permis de définir six (6) régions climatiques homogènes en Côte d'Ivoire qui sont : le climat tropical de transition ou soudanais au Nord, le climat tropical humide ou baouléen au Centre, le climat de Montagnes à l'Ouest et le climat subéquatorial ou Attiéen au Sud subdivisé en trois (3) sous zones [les climats subéquatoriaux 1 (ou Attiéen du littoral), 2 (ou Attiéen de l'intérieur) et 3 (ou Attiéen du Sud-Ouest)]. Certaines localités du baouléen ont connu une reprise des précipitations au cours des deux dernières décennies (2000 et 2010) malgré la tendance générale à la baisse et une amplification de la hausse de la température. Le modèle de prévision de la sécheresse développé a donné des résultats satisfaisants au regard des critères de performance utilisés. En effet, un délai de prévision allant d'un (1) mois à trente (30) ans a été atteint selon le type de sécheresse.

Mots clés : Variations climatiques, Sécheresse, Prévision, Régressions linéaires multiples, Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

Title: Climate variations and drought forecasting by multiple linear regression of normalized precipitation indices: Case of Côte d'Ivoire (West Africa).

The objective of this work is to develop mathematical models for predicting drought from seasonal to a decade periods in Côte d'Ivoire. The rainfall and temperature data used are monthly time intervals and concern 47 measurement stations from the national meteorological measurement network of Côte d'Ivoire. They extend globally over the period 1941-2016. The methodological approach adopted consisted first of characterizing the climatic zoning by updating the division known since then in Côte d'Ivoire. It relied on multivariate statistical analysis methods (ACPN, CAH) and methods based on climatic indices (Gausson and De Martonne indices). Then, an evaluation of climatic variations and drought, within previously defined climatic zones, was carried out using statistical methods (linear regression, Pettitt tests and Hubert segmentation procedure) and climatic indices (Angot, Péguy, Moral and UNEP indices). Finally, using the SPI index as an indicator of drought, prediction models based on multiple linear regressions (MLRs) have been developed for forecasting meteorological, agrometeorological and hydrometeorological droughts within homogeneous climatic zones. The different models were evaluated in calibration (1971-2000) and in validation (2001-2016) then tested on past (2017-2019) and future (2023-2025) periods from numerical criteria (R, RMSE, KGE, dry and normal POD, FAR dry, TC, HSS) and graphics. The analysis of the results obtained made it possible to define six (6) homogeneous climatic regions in Côte d'Ivoire which are: the tropical transitional or Sudanese climate in the North, the humid tropical or Baoulean climate in the Center, the mountain climate in the North. West and the subequatorial climate or Attiean in the South subdivided into three (3) sub zones [the subequatorial climates 1 (or Attiean of the littoral), 2 (or Attiean of the interior) and 3 (or Attiean of the South-West)]. Some localities in the Baoulean have experienced a resumption of rainfall over the past two decades (2000 and 2010) despite the general downward trend and an amplification of the rise in temperature. The drought forecasting models developed gave satisfactory results with regard to the performance criteria used. Indeed, a forecast period ranging from one (1) month to thirty (30) years has been reached depending on the type of drought.

Keywords : Climatic variations, Drought, Forecast, Multiple linear regressions, Côte d'Ivoire.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les variations climatiques sont l'un des défis les plus complexes du 21^{ème} siècle. Aucun pays n'est à l'abri de leurs effets et aucun pays ne peut, seul, faire face aux décisions politiques controversées, aux profondes transformations technologiques et autres enjeux indissociables et lourdes de conséquences à l'échelle de la planète. Ce phénomène et son influence sur l'environnement et la société, sont à l'heure actuelle au cœur des préoccupations politiques et scientifiques (Alexandre et Mering, 2018). Ainsi, les problèmes liés aux variations climatiques occupent une importante place parmi les préoccupations majeures contemporaines. Il y a donc un intérêt particulier des scientifiques à l'étude de ces problèmes. Les impacts des variations climatiques en Afrique de l'Ouest ont révélé une diminution des précipitations associée à un réchauffement (Kouakou *et al.*, 2012). Le déficit hydrique de ces dernières décennies a affecté négativement la production agricole, les réserves superficielles et souterraines des ressources en eau et même la production d'électricité. Ce déficit implique donc de nombreux problèmes socio-économiques dont les effets sont souvent difficiles à résorber.

La sécheresse est l'un des phénomènes important résultant des variations climatiques. Ses effets indirects dans le temps peuvent avoir des impacts économiques, agricoles, hydrologiques ou sociaux. L'occurrence, depuis les dernières décennies, de nombreuses sécheresses occupant de grands territoires sur tous les continents, souligne l'importance de ce phénomène (Soro *et al.*, 2014). Les pays en voie de développement tout comme les pays industrialisés en sont touchés. En effet, les sécheresses météorologiques et agricoles sont plus nombreuses depuis les années 1950 en Afrique de l'Ouest et en Europe du Sud (GIEC, 2014). Les conséquences associées à ces sécheresses, qui sont d'ordre économique, environnemental et social, peuvent être désastreux, voire mortels.

La sécheresse peut être définie comme un déséquilibre naturel temporaire de la disponibilité de l'eau et qui consiste à des précipitations persistantes inférieures à la normale (ou la moyenne), entraînant une diminution de la disponibilité des ressources en eau (Merabti, 2018). C'est l'une des catastrophes naturelles les plus coûteuses au monde, qui affecte plus de personnes que d'autres formes de catastrophes (Merabti, 2018). En effet, selon l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), de 1967 à 1991, 1,4 milliards de personnes à travers le monde ont été affectées par les sécheresses avec près de 1,3 milliards qui en sont mortes de causes directes ou indirectes (Soro *et al.*, 2014 ; Khoualdia, 2015). De nombreuses études se sont concentrées sur

les sécheresses en Afrique de l'Ouest (Bodian, 2014 ; Descroix *et al.*, 2015 ; Kaboré *et al.*, 2017 ; Kouassi *et al.*, 2017 ; Alexandre et Mering, 2018). De ces travaux, il ressort que l'Afrique de l'Ouest connaît une succession d'épisodes climatiques secs et pluvieux ponctués de périodes de sécheresses dont la fréquence, la durée, l'intensité et l'extension spatiale sont devenues exceptionnelles depuis 1970 (Bodian, 2014 ; Descroix *et al.*, 2015 ; Kouassi *et al.*, 2017). Les pays en bordure du Golfe de Guinée, là où le climat est plus humide, n'ont pas été épargnés par les effets de la sécheresse. Une diminution de 20% en moyenne de la pluviosité annuelle est notée dans cette zone (Bodian, 2014 ; Kouassi *et al.*, 2017).

La Côte d'Ivoire, à l'image des autres pays du monde en général et de l'Afrique de l'Ouest en particulier, n'est pas en reste (Kouassi *et al.*, 2010; Kouakou *et al.*, 2012 ; Ahoussi *et al.*, 2013 ; Fossou *et al.*, 2014a ; N'da *et al.*, 2016 ; Kouassi *et al.*, 2017). Ainsi, un déficit de 21% en moyenne des hauteurs de pluie annuelle a été observé en Côte d'Ivoire à partir du milieu de la décennie 1960 avec une période de rupture de stationnarité comprise entre 1966 et 2000. Ces anomalies pluviométriques constatées depuis plus de cinq décennies ont connu une résonance exceptionnelle dans les régions nord et centre du pays. Mais en réalité, l'ensemble du pays présente une vulnérabilité importante aux déficits pluviométriques. Les résultats des différents travaux ont mis en évidence quatre années ou périodes de sécheresse très marquée au cours du XX^e siècle en Côte d'Ivoire : l'année 1943, la période 1968-1970, la période 1982-1983 et l'année 1993 (Ardoin, 2004 ; Brou, 2005 ; Bigot *et al.*, 2005 ; Brou et chaléard, 2007). Egalement, au cours des années 1997 et 1998, une sécheresse a touché les régions du pays principalement le Centre, l'Est et le Littoral à des degrés divers (Coulibaly et Djè, 2009). Il ressort que, la sécheresse, quelle que soit son intensité, affecte la quasi-totalité des régions du pays. De récents travaux ont identifié une reprise des précipitations dans les années 2000 au niveau de certaines localités du bassin versant du Bandama (N'da *et al.*, 2016 ; Kouassi *et al.*, 2017). Au niveau de la température, durant ces cinq dernières décennies, la Côte d'Ivoire s'est réchauffée depuis la décennie 80 (Brou, 2005). Cette hausse des températures a été caractérisée par Kouakou *et al.* (2012) et Yao *et al.* (2013) au cours de leurs travaux effectués sur toute la Côte d'Ivoire.

Certains scénarios des changements planétaires indiquent que l'occurrence et l'impact des sécheresses risquent d'augmenter dans les années à venir (Kouakou *et al.*, 2014 ; Daki *et al.*, 2016). Les sécheresses ont un impact négatif sur l'agriculture, l'élevage et les ressources naturelles (Karimou *et al.*, 2015) qui sont des secteurs sur lesquels reposent l'essentiel des économies nationales ouest-africaines. A cet effet, elles constituent un facteur majeur de famine

et de malnutrition, ainsi qu'un obstacle à la croissance économique et au développement. Dans cette partie de l'Afrique, la sécheresse est la calamité climatique la plus fréquente. Les populations de ces régions ont toujours payé un très lourd tribut à la variabilité interannuelle des saisons des pluies en raison de la dépendance directe des modes de production agricole, des économies locales, et donc de la vie des gens, aux aléas climatiques. L'agriculture vivrière est souvent la plus affectée par la péjoration climatique. A titre d'exemple, les sécheresses majeures de 1970 et 1989 ont engendré de nombreuses pertes dans les récoltes de céréales (600 000 tonnes par an) et occasionné plus de 100 000 morts au Mali, au Niger et en Mauritanie, et plus de 750 000 personnes se sont retrouvées entièrement dépendantes de l'aide alimentaire pendant cette période (Fanta, 2010). En Côte d'Ivoire, l'économie repose essentiellement sur l'agriculture pluviale (90% des pratiques agricoles) (INS et ICF International, 2012). Ce qui rend ce pays vulnérable à des baisses pluviométriques importantes. En effet, plus de 60 % de la population active dépend de cette activité qui constitue en moyenne plus de 22% du produit intérieur brut (PIB) depuis 2012 et constitue la principale source de revenu et d'emploi (MINADER, 2017). Dans ce pays, le profil de risque de sécheresse présente actuellement, en moyenne 1,3 million de personnes (soit 5,7 % de la population par rapport au recensement de 2014) par an touchées par les sécheresses (MINADER, 2017). Ce chiffre devrait atteindre, à l'horizon 2025, 7,9 % soit 2,4 millions de personnes si l'on tient compte de la croissance démographique. De plus, la probabilité que des sécheresses se produisent, augmentera de 7,5 % sur la période 2051-2100 (MINEDD, 2020). Par ailleurs, le PIB affecté par les sécheresses est en moyenne 5,2 % par an. Ce pourcentage devrait augmenter de 55 % pour atteindre 8,1 % à l'horizon 2025, passant de 1,9 milliard à 2,9 milliards de dollars US par an (MINEDD, 2020). La population étant en forte croissance depuis quelques années (taux de croissance annuel moyen de 2,6% entre 1998 et 2014 selon l'INS, 2014), il peut être prévu que la demande intérieure de produits alimentaires augmente et que l'offre, déjà insuffisante (INS et ICF International, 2012), se dégrade s'il n'y a aucune intervention.

Afin d'atténuer les effets de la sécheresse, la connaissance au préalable (par anticipation) du comportement de la pluie est donc d'une importance capitale pour une meilleure gestion des activités socio-économiques et stratégiques. En effet, l'évaluation et la prévision de la sécheresse fournissent des renseignements précieux pour les planificateurs des ressources en eau et les décideurs politiques pour faire face aux conséquences de celle-ci (Soro *et al.*, 2014). L'information donnée par la prévision de la sécheresse peut alors moduler la conception et la durabilité de nombreuses activités socio-économiques : ressources en eau, agriculture, élevage, urbanisme, transport, tourisme, exploitation des infrastructures, etc. (Yaka, 2004). La prévision

est, ainsi, au service de la gestion des politiques d'adaptation. En effet, depuis l'année 2000, en partenariat avec le CFAR (Climate Forecasting for Agricultural Resources) de l'Université de Georgie et de Tuffts des Etats Unis d'Amérique, une vulgarisation et une application des résultats des prévisions saisonnières en milieu agropastoral Burkinabé a permis de constater une amélioration de leurs productions agricoles, pastorales, commerciales, etc. (Yaka, 2004).

Ainsi, il est nécessaire et urgent d'analyser continuellement les séquences de sécheresses et de les prévoir en vue de proposer aux populations des mesures d'atténuation ou d'adaptation au cas échéant. En effet, les travaux menés à l'échelle internationale, notamment ceux du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC, 2014), insistent sur le fait que, même si tout est mis en œuvre pour éviter les sécheresses par la réduction des émissions de gaz à effet de serre, ces sécheresses sont inévitables, du fait de l'inertie du système climatique, et demandent de notre part une atténuation ou une adaptation. Des actions urgentes sont donc particulièrement à mener dans la lutte contre les variations climatiques, notamment l'Objectif de Développement Durable (ODD) n° 13 : « *prendre d'urgence des mesures pour lutter contre les changements climatiques et leurs répercussions* » (ONU, 2015). Dans ce contexte, l'on s'interroge sur la capacité du modèle mathématique basé sur les régressions linéaires multiples (RLM) à prévoir la sécheresse sur toute l'étendue du territoire ivoirien, à partir uniquement de variables explicatives continentales. Pour répondre à toutes ces préoccupations, le présent travail a été initié et s'inscrit dans l'axe de recherche « Variations climatiques et Prévision hydroclimatique » du Laboratoire de Génie Civil, Géosciences et Sciences Géographiques de l'Unité Mixte de Recherche et d'Innovation 68 (UMRI-68) de l'Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro. Il porte sur le thème : « **Variations climatiques et prévision de la sécheresse par régression linéaire multiple d'indices de précipitations normalisés : cas de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest)** ». L'objectif principal assigné à ce travail de recherche est de développer des modèles mathématiques capables de prévoir la sécheresse de l'échéance saisonnière à l'échéance décennale en Côte d'Ivoire.

Pour atteindre cet objectif principal, trois objectifs spécifiques ont été définis:

- caractériser la régionalisation climatiques en actualisant le découpage connu depuis lors en Côte d'Ivoire ;
- évaluer les variations climatiques et la sécheresse au sein des zones climatiques préalablement définies;
- développer un modèle mathématique de prévision de la sécheresse à l'intérieur des zones

climatiques homogènes.

Pour répondre à ces objectifs, ce mémoire a été subdivisé en trois parties structurées autour de sept (7) chapitres.

La première partie, concernant le cadre général, s'organise en deux chapitres. Le chapitre 1 fait l'état des connaissances sur les thématiques abordées (variations climatiques, sécheresse, prévision). Le chapitre 2 précise les caractéristiques géographiques, géologiques, hydrogéologiques et socio-économiques de la zone d'étude.

L'approche méthodologique utilisée pour atteindre les objectifs, fait l'objet de la deuxième partie, structurée en deux chapitres. Elle présente les données et le matériel utilisé au chapitre 3. Les différentes méthodes appliquées, adaptées à la problématique à résoudre et à l'atteinte des objectifs fixés sont présentées au chapitre 4.

C'est dans la troisième partie, qui regroupe les chapitres 5 à 7, que sont présentés les résultats obtenus. Ces résultats sont analysés, interprétés puis discutés.

Ces trois parties sont suivies d'une conclusion générale qui fait une synthèse des principaux résultats obtenus et qui ouvre des recommandations et perspectives de recherche. Le mémoire se termine par une synthèse des références bibliographiques citées au cours de l'étude.

PREMIÈRE PARTIE:
GÉNÉRALITÉS

CHAPITRE 1:
ÉTAT DE L'ART

1.1. CONCEPTS ET DÉFINITIONS DES VARIATIONS CLIMATIQUES ET DE LA SÈCHERESSE

La sécheresse est une conséquence de la variabilité et du changement climatique. Beaucoup de phénomènes météorologiques sont soudains et éphémères, tandis que la sécheresse est plus insidieuse, car elle frappe progressivement une région et maintient son emprise au fil du temps. Dans les cas graves, elle peut durer de nombreuses années, envahir une grande partie d'un continent, anéantir l'agriculture et engendrer la famine. La sécheresse peut détruire les récoltes (partiellement ou totalement) et tuer les animaux d'élevage, et parfois sauvages. Elle devient alors un facteur de famine régionale et d'exode, souvent accompagnée de troubles sociaux puis de conflits armés, notamment dans les régions avec peu de ressources économiques (Belhadj, 2012).

1.1.1. VARIATIONS CLIMATIQUES

Par définition, le climat désigne l'ensemble des phénomènes (pression, température, humidité, précipitations, ensoleillement, vent, etc.) qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère et de son évolution en un lieu donné (Sighomnou, 2004 *in* Atchérémi, 2019). 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 due à la complexité à les dissocier. Vue donc la difficulté à les différencier par les institutions, comme on le verra par la suite, ces deux termes sont ramenés à la notion de variation climatique (Sighomnou, 2004 *in* Atchérémi, 2019). Cette notion de variation climatique englobe à la fois la définition de la variabilité climatique et la définition du changement climatique données par le GIEC et la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique (CCNUCC). Ainsi, la variation climatique se réfère, dans cette étude, à la variation des paramètres du système climatique.

La variabilité naturelle du climat se définit comme la fluctuation des valeurs saisonnières ou annuelles de ses différentes caractéristiques par rapport aux moyennes temporelles de référence. Elle est engendrée par les fluctuations dans le temps de l'énergie solaire ou venant d'autres éléments du système climatique, le positionnement des masses d'air, les éruptions volcaniques, les changements dans la distribution des courants océaniques ou des températures à la surface de la mer (TSM), dont l'une des expressions les plus importantes est le phénomène El-Niño

Southern Oscillation (ENSO), etc. (Sighomnou, 2004 *in* Soro, 2014).

Par contre, le terme changement climatique selon la CCNUCC adoptée en 1992, se réfère à des modifications du climat qui sont attribuées directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère globale et viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables. La CCNUCC fait ainsi une distinction entre les changements climatiques attribuables aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère et la variabilité du climat imputable à des causes naturelles (GIEC, 2007). Cependant, le GIEC établit clairement l'influence de l'homme sur le réchauffement climatique (GIEC, 2013). C'est donc un phénomène dû essentiellement à l'activité humaine qui augmente la concentration atmosphérique des gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), l'oxyde nitreux (N₂O), le dioxyde de soufre (SO₂), l'ozone troposphérique (O₃), etc. Le changement climatique peut être dû aussi au processus intrinsèque de la terre et aux influences extérieures (Sighomnou, 2004 *in* Soro, 2014). Par ailleurs, 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 plusieurs décennies (Sighomnou, 2004 *in* Atchérémi, 2019).

1.1.2. SÉCHERESSE

Les causes de la sécheresse sont essentiellement dues aux variations climatiques. La sécheresse n'est pas simplement synonyme de faibles précipitations (OMM, 2006). La pluie n'est pas équitablement répartie sur la planète, et certaines régions seront toujours moins arrosées que d'autres. La sécheresse correspond donc à une anomalie temporaire de déficit en eau qui peut survenir aussi bien dans des zones à fortes précipitations qu'à faibles précipitations, et doit, par conséquent, être considérée comme un état relatif plutôt qu'absolu (Camille, 2012). Elle est alors fondée sur la pluviométrie moyenne pour une zone donnée à un moment de l'année. Les périodes de sécheresse peuvent être accentuées du fait de l'activité humaine, mais ce sont des phénomènes naturels auxquels il faut toujours s'attendre (OMM, 2006). Par ailleurs, la sécheresse affecte tout aussi les zones urbaines que rurales.

La sécheresse est un phénomène récurrent du climat. Elle diffère des autres fluctuations climatiques par le fait qu'elle s'installe lentement. La surface affectée par une sécheresse sévère évolue graduellement et les régions touchées par une intensité maximale peuvent changer d'une

saison à une autre (OSS, 2006). Quand le phénomène se prolonge toute une saison, ou au cours d'une période plus longue encore, les précipitations sont insuffisantes pour répondre aux besoins de l'environnement et des activités humaines. En effet, les impacts de la sécheresse touchent différents secteurs, économiques, sociaux et environnementaux. Dans chaque région, le risque qui lui est associé est le produit de l'intensité de l'évènement, de l'exposition à l'aléa et de la vulnérabilité de la société à l'évènement (Belhadj, 2012). Cependant, il ne faut pas confondre la sécheresse et l'aridité. En effet, l'aridité qui est une caractéristique climatique d'une zone donnée, représente la situation permanente de faibles précipitations annuelles ou saisonnières (Chloé, 2013).

L'état de sécheresse peut être caractérisé comme un déficit hydrique marqué dans une ou plusieurs composante(s) du cycle hydrologique (Camille, 2012). Cependant, il existe deux types de définitions de la sécheresse, conceptuelle et opérationnelle (OSS, 2006) :

- les définitions conceptuelles sont formulées en terme général pour aider les gens à mieux comprendre le concept de la sécheresse. Ces définitions sont aussi importantes dans l'établissement des politiques de la sécheresse. Par exemple, la sécheresse peut être définie conceptuellement comme étant le prolongement de la période de déficit pluviométrique entraînant des dégâts importants sur les cultures, et par conséquent, des pertes de rendements ou un rabattement sévère de la nappe phréatique et donc un tarissement des puits qui sont la source de l'eau potable dans certaines régions ;
- les définitions opérationnelles renseignent sur la durée, la fréquence et le degré de sévérité de la sécheresse. En effet, elles permettent de définir le début, la fin, le taux et le degré d'intensité de la sécheresse. Ceci peut être réalisé par une comparaison des conditions en cours avec des données historiques du climat. Cette information peut aider à mieux se préparer pour d'éventuelles sécheresses.

1.1.2.1. Types de sécheresse

Si les précipitations sont trop faibles ou inexistantes sur une période prolongée, l'apport d'eau à la surface du sol et dans les couches de sol plus profondes est par conséquent amoindri et l'eau disponible dans les cours d'eau et/ou pour la végétation peut alors, elle aussi, être déficitaire. Pour cette raison, trois grands types de sécheresses identifiables au cours du cycle hydrologique ont été définies et sont aujourd'hui couramment utilisées par les climatologues et les hydrologues pour l'étude et le suivi des sécheresses (Camille, 2012) :

- **la sécheresse météorologique (ou atmosphérique)** est caractérisée par un déficit des

précipitations, solides et liquides. Ainsi, il s'agit d'une période, qui peut varier du mois à l'année, voire dans des cas extrêmes, à plusieurs années, durant laquelle les précipitations sont inférieures à la normale. Les sécheresses météorologiques sont souvent déclenchées par des anomalies persistantes de grande échelle des températures de surface de la mer ;

- **la sécheresse agricole (ou édaphique)** est caractérisée par un déficit lié à la réserve en eau du sol. Il s'agit d'une période durant laquelle l'humidité du sol est inférieure à sa valeur moyenne, ce qui a des conséquences directes sur la végétation, qu'elle soit naturelle ou cultivée. Ces sécheresses sont généralement provoquées par un cumul des précipitations inférieur à la normale, ou par une distribution temporelle plus irrégulière (c'est-à-dire des précipitations moins fréquentes mais plus intenses, phénomène souvent observé sur le pourtour méditerranéen), mais peuvent parfois être engendrées par des taux d'évapotranspiration plus élevés ou des processus de ruissellement plus intenses, en comparaison à la normale saisonnière. Les sécheresses agronomiques ont souvent de lourdes conséquences sur la production agricole ;

- **la sécheresse hydrologique** peut à la fois définir le débit d'un cours d'eau comme trop faible mais peut aussi représenter le fait qu'un réservoir du sol ou du sous-sol n'est pas suffisamment réalimenté. Ainsi, les sécheresses hydrologiques dépendent du degré d'approvisionnement en eaux de surface et en eaux souterraines des lacs, réservoirs, aquifères et cours d'eau. L'impact d'une sécheresse hydrologique est important sur les activités humaines, puisqu'elle va avoir de fortes conséquences sur l'irrigation, les activités touristiques, la production d'énergie hydroélectrique, les transports (dans certains pays), l'alimentation en eau domestique et la gestion/protection de l'environnement. La sécheresse hydrologique est d'ailleurs définie comme la période durant laquelle le débit des cours d'eau n'est pas suffisant pour répondre convenablement aux besoins en eau établis par le système de gestion de l'eau local.

Ces différents types de sécheresse qui interagissent entre eux, selon le diagramme présenté à la figure 1, ont des impacts sur les objectifs de développement durable (ODD) qui se déclinent en impacts environnementaux, sociaux et économiques. Cette représentation des interactions entre les différents types de sécheresses reste théorique et, pour un espace donné, la situation observée peut être différente (Chloé, 2013).

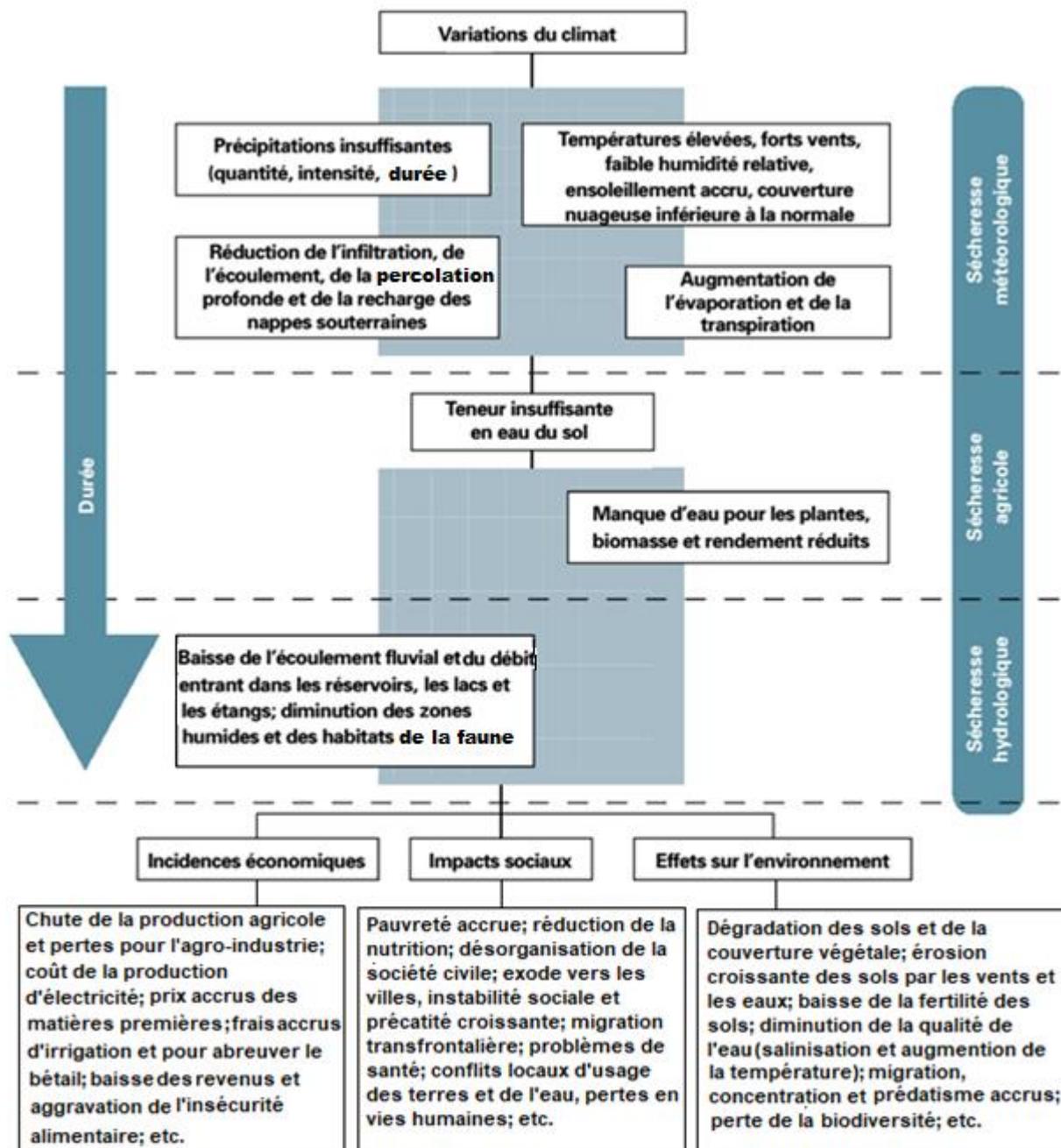


Figure 1 : Représentation schématique des liens entre les différents types de sécheresse et leurs impacts sur les ODD (OMM, 2006, modifié)

1.1.2.2. Indice de sécheresse

Le suivi et la gestion de la sécheresse reposent fréquemment sur des indicateurs ou indices statistiques pour décider quand commencer la mise en œuvre des mesures de conservation de l'eau ou d'atténuation (Khadr *et al.*, 2009 ; OMM et GWP, 2016). Les indices de sécheresse sont des représentations numériques de l'intensité des sécheresses, calculés à partir de valeurs climatiques ou hydrologiques (précipitation, température, écoulement fluvial, niveau des

nappes et des réservoirs, humidité du sol, etc.) (OMM et GWP, 2016). Ils mesurent l'état qualitatif d'une sécheresse à un emplacement donné pour une période donnée. Les informations tirées des indices sont utiles pour planifier et concevoir des applications (évaluations des risques, systèmes d'alerte précoce, outils d'aide à la décision en vue d'atténuer la menace dans les zones touchées) à condition de connaître le régime climatique et la climatologie des sécheresses dans la région étudiée (OMM et GWP, 2016). Les indices fournissent en fait des valeurs seuils utiles pour guider l'action des décideurs et des dirigeants en vue de prévenir les risques. La communauté scientifique a développé et étudié un certain nombre d'indicateurs de sécheresse au cours des soixante-dix dernières années afin d'anticiper, de suivre et de caractériser les différents épisodes extrêmes qui touchent diverses régions du globe. La plupart des indices de sécheresse ont été élaborés aux Etats-Unis, mais sont régulièrement employés sur les autres continents (Camille, 2012).

1.1.2.3. Prévision de la sécheresse

1.1.2.3.1. Définition et utilité

Le climat se révèle prévisible jusqu'à des échéances temporelles de quelques mois ; mais cette prévision peut s'étendre à des échéances parfois plus longues (André *et al.*, 2002). La prévision de la sécheresse est définie comme une prévision du climat, c'est-à-dire une prévision d'un état moyen d'une des composantes du système climatique d'un ou plusieurs mois à l'avance (Singla, 2013). Elle consiste, en effet, à prévoir la moyenne des paramètres météorologiques (température ou précipitation en général) pour des échéances allant d'un (1) à six (6) mois (prévision saisonnière), de trois (3) à trente (30) ans (prévision décennale). Entre ces deux échéances, se situe l'échéance interannuelle. La prévision est caractérisée par les éléments suivants (Djrbouai, 2016) :

- (i) la variable à prévoir et les variables explicatives (c'est-à-dire l'ensemble des données disponibles) ;
- (ii) l'horizon de prévision ;
- (iii) les méthodes de calcul ou d'estimation ;
- (iv) l'objectif de la prévision (alerte de crue, planification et gestion des réservoirs, des projets d'irrigation ou de navigation, etc.) ;
- (v) le type de résultats désirés (valeurs numériques, graphiques, distribution de probabilités).

L'adaptation et la résilience de notre société à ces sécheresses prévisibles implique de notre

part, d'être capable de convertir des données du climat passé et futur à l'échelle du mois, de l'année ou de la décennie en information utile et utilisable par les acteurs de nombreux secteurs socio-économiques (Goddard, 2016). La prévision de la sécheresse joue un rôle primordial dans les plans de gestion et de planification des ressources en eau. En effet, l'évaluation et la prévision de la sécheresse fournit des renseignements précieux pour les planificateurs des ressources en eau et les décideurs politiques pour faire face aux conséquences de celle-ci (Soro *et al.*, 2014). L'information donnée par la prévision de la sécheresse peut moduler la conception et la durabilité de nombreuses activités socio-économiques : ressources en eau, agriculture, élevage, électricité, urbanisme, transport, tourisme, exploitation des infrastructures, etc. (Yaka, 2004). La prévision est, ainsi, au service de la gestion des politiques d'adaptation. Les attentes sont particulièrement fortes en matière de prévision aux échelles saisonnières à décennales (Hewitt *et al.*, 2013; Soares *et al.*, 2018). En agriculture par exemple, les prévisions décennales peuvent être valorisées pour orienter le développement de nouvelles variétés, la construction d'infrastructures d'irrigation ou de stockage de l'eau, ou encore adapter les systèmes de culture (Tableau I). On passe ainsi d'un pilotage tactique de l'agriculture tel qu'il est connu, avec les prévisions qui vont de l'heure jusqu'au trimestre, à un pilotage stratégique (Meinke et Stone, 2004). Aussi, l'exemple de la production d'hydro-électricité montre l'importance économique potentielle très grande de la prévision climatique saisonnière qui fait l'objet d'une attention particulière (Yuan *et al.*, 2015). En agriculture, la prévision saisonnière est utilisée pour planifier certaines tâches comme les semis, l'irrigation, les récoltes, la fertilisation, le pâturage du bétail, etc. (Klemm et McPherson, 2017). La connaissance au préalable (par anticipation) du comportement de la pluie est donc d'une utilité capitale pour une meilleure gestion des activités socio-économiques et stratégiques.

Tableau I : Echelle de temps des différentes décisions agricoles concernées par les prévisions décennales (Meinke et Stone, 2004)

Décision agricole	Fréquence (en années)
Logistique (ex : programmation des opérations de semis, de récolte...)	Intra-saisonnière (< 0,2)
Gestion tactique des cultures (usage des intrants)	Intra-saisonnière (0,2 - 0,5)
Choix des cultures / Gestion du cheptel	saisonnière (0,5 - 1)
Succession des cultures (ex : durée de la jachère, taux de charge)	Interannuelle (0,5 - 2)
Rotation des cultures	Interannuelle (1 - 5)
Politique culturale (ex : céréales/grain ou fourrage, prairie naturelle ou améliorée)	Décennale (~ 10)
Politique agricole (ex : cultures ou pâturages)	Interdécennale (10 - 20)
Usage des terres (ex : agricoles ou naturelles)	Multidécennale (> 20)
Usage des terres et adaptation des systèmes actuels	Changement climatique (10 - 100)

Les résultats du suivi et de la prévision de la sécheresse peuvent intégrer un système d'alerte précoce à la sécheresse pour déclencher les mesures d'un plan de gestion des risques destinées à réduire les impacts potentiels au moment de la survenue d'une sécheresse.

1.1.2.3.2. Système d'alerte précoce à la sécheresse (SAPS)

C'est un système de collecte, d'analyse et de synthèse de données sur les paramètres et indicateurs climatiques et agro-économiques dans l'objectif de donner un avis, en temps opportun, sur la menace de périodes de sécheresse et donc de stimuler les réponses appropriées. Il doit donc fournir des informations, au moment propice, sur le début et la fin de la sécheresse, sa durée, son extension spatiale et son moment d'occurrence, et ce pour l'élaboration de plans et de mesures d'urgence permettant de faire face à la crise en un endroit précis (OSS, 2013). C'est donc un outil basé sur des indicateurs, qui aide à la prise de décision pour gérer le risque de la sécheresse à un stade précoce. Selon l'OSS (2013), un système d'alerte précoce à la sécheresse est idéalement basé sur les aspects que sont l'information météorologique, l'information agronomique, les estimations de production, les prix des produits alimentaires, la disponibilité des ressources en eau, la vulnérabilité, etc. Le tableau II présente les systèmes d'alerte précoce à la sécheresse reconnus en Afrique et les organismes gestionnaires.

Tableau II : Principaux systèmes d'alerte précoce à la sécheresse en Afrique (OSS, 2013)

Système	Lieu	Mission	Organisme
Réseau du système Alerte précoce contre la famine	Pays du Sahel (Tchad, Niger, Mali)	Fournir des informations sur la sécheresse, pour réduire l'incidence de la famine	USAID
Système mondial d'information et d'alerte rapide	Monde entier et pays du Sahel	Fournir des informations sur l'éminence des crises alimentaires	FAO
Analyse de vulnérabilité et cartographie	Afrique de l'Ouest	Fournir au Programme Alimentaire Mondial des informations fiables sur la nature de l'insécurité alimentaire et sur la vulnérabilité des populations	PAM
Système d'information et de cartographie sur l'insécurité alimentaire et la vulnérabilité	Afrique de l'Ouest	Faciliter les initiatives nationales et internationales en matière de gestion d'information pour une meilleure politique de sécurité alimentaire	FAO
Alerte précoce et prévision des productions agricoles	Pays membres du CILSS	Développement des méthodologies et des procédures d'analyse pour l'optimisation de l'information disponible	AGHRYMET
Harmonisation des prévisions climatiques pour l'atténuation de l'impact du changement global en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne	Mali	Contribuer à harmoniser les efforts pour réduire l'insécurité alimentaire par l'application des prévisions climatiques saisonnières	UE

1.2. ÉVOLUTION ET PRÉVISIONS CLIMATIQUES

L'ampleur du changement climatique et de ses conséquences sur les ressources en eau peuvent être évaluées aux moyens des modèles climatiques globaux (ECHAM5, HadCM3, CSIRO-MK2, etc.) et régionaux (HIRHAM, RegCM3, RACMO, etc.) (Kouakou *et al.*, 2012 ; Camara *et al.*, 2013 ; Sarr et Camara, 2017). Les simulations climatiques sont réalisées avec des scénarii qui décrivent les évolutions d'émissions des gaz à effet de serre jusqu'en 2100 selon diverses hypothèses. Ces scénarii d'émissions, représentent chacun différentes hypothèses sur l'évolution démographique et économique.

Un scénario d'émission est une représentation plausible et souvent simplifiée du climat futur. Les scénarii constituent un outil approprié pour analyser l'évolution du climat, notamment sa modélisation et l'évaluation des impacts, l'adaptation et l'atténuation. La possibilité qu'une seule trajectoire d'émission soit semblable à la description des scénarii est très incertaine (IPCC, 2000). Les premiers scénarii construits par le GIEC en 1992 comprennent six scénarii nommés IS92a-f. Mais une évaluation de ces scénarii par l'IPCC en 1995 a montré quelques faiblesses, surtout en raison de l'amélioration des connaissances sur l'atmosphère. Dans le rapport spécial sur les scénarii d'émissions (IPCC, 2001), un jeu de quarante (40) scénarii a alors été défini. Ces scénarii ont été regroupés en quatre grandes familles désignées sous le sigle SRES (Rapport spécial sur les scénarios d'émission) : A1, A2, B1 et B2 (GIEC, 2013). Chaque famille représente une évolution différente au plan démographique, social, économique et environnemental probable de nos sociétés.

Le canevas A1 décrit un monde caractérisé par une croissance économique très rapide, un pic de la population mondiale au milieu du siècle et l'adoption rapide de nouvelles technologies plus efficaces. Cette famille se répartit en trois groupes selon l'orientation de l'évolution technologique du point de vue des sources d'énergie : à forte composante fossile (A1FI), non fossile (A1T) et équilibrant les sources (A1B). Le canevas B1 décrit un monde convergeant qui présente les mêmes caractéristiques démographiques que le canevas A1, mais avec une évolution plus rapide des structures économiques vers une économie de services et d'information. Le canevas B2 décrit un monde caractérisé par des niveaux intermédiaires de croissance démographique et économique, privilégiant l'action locale pour assurer une durabilité économique, sociale et environnementale. Enfin, le canevas A2 décrit un monde très hétérogène, caractérisé par une forte croissance démographique, un faible développement économique et de lents progrès technologiques.

A titre indicatif, il faut noter qu'un nouvel ensemble de quatre scénarii nommés Profils

Représentatifs d'évolution de Concentration (RCP) est utilisé pour les nouvelles simulations de modèles climatiques réalisées dans le cadre de la cinquième phase du Projet d'inter-comparaison de modèles couplés (CMIP5) du Programme mondial de recherche sur le climat (GIEC, 2013). Ces scénarii, qui sont axés sur les émissions anthropiques, s'appuient sur une hypothèse chiffrée d'augmentation du bilan radiatif de l'atmosphère : différence entre le rayonnement descendant et le rayonnement montant au sommet de la troposphère (entre 9 et 16 km d'altitude) (Figure 2). Ils ne prennent pas en compte les évolutions des facteurs naturels, tels que le forçage solaire ou volcanique, ou les émissions naturelles, par exemple de CH₄ et de N₂O.

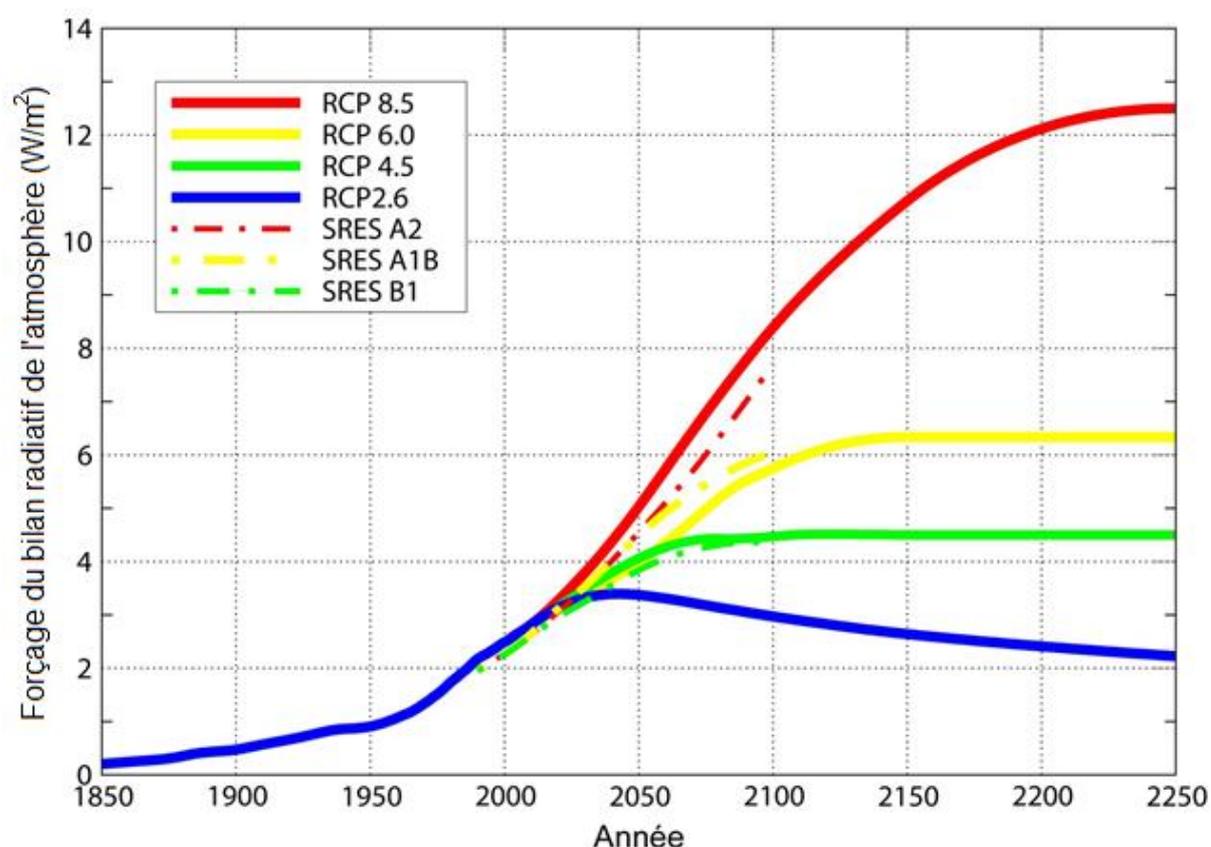


Figure 2 : Evolution du forçage radiatif de l'atmosphère en fonction des familles de scénarii (GIEC, 2013)

Ces quatre RCP contiennent un scénario d'atténuation conduisant à un niveau de forçage radiatif vers 2100 très bas (RCP2,6), deux scénarii de stabilisation (RCP4,5 et RCP6,0) et un scénario aux émissions de gaz à effet de serre très élevées entraînant un forçage important (RCP8,5). A des fins de comparaison en terme de modification du bilan radiatif de la planète, les évolutions correspondant aux anciens scénarii (SRES) ont été indiquées pour représenter le degré de rapprochement de ceux-ci aux nouveaux.

1.2.1. ÉCHELLE GLOBALE

Le réchauffement du système climatique est sans équivoque. Les effets à l'échelle du globe sont nombreux, allant de la modification des conditions climatiques (Figure 3) aux impacts sur la biodiversité et la santé. Il est noté à l'échelle du globe, une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer (GIEC, 2014). Les températures ont augmenté presque partout dans le monde (Figures 3a et 3b). La diminution observée de l'étendue des zones couvertes de neige et de glace concorde avec le réchauffement (Figure 3c). L'élévation du niveau de la mer concorde elle aussi avec le réchauffement (Figure 3d). Ce réchauffement s'est traduit par une augmentation du nombre et de la fréquence des événements extrêmes selon les endroits : précipitations intenses, sécheresses, vagues de chaleur (Figure 3e). Sur l'ensemble de la planète, le niveau moyen de la mer s'est élevé de 1,8 mm/an depuis 1961 et de 3,1 mm/an depuis 1993, sous l'effet de la dilatation thermique et de la fonte des glaciers, des calottes glaciaires et des nappes glaciaires polaires (Planton *et al.*, 2012). Les données-satellite disponibles depuis 1978 montrent que l'étendue annuelle moyenne des glaces a diminué de 2,7% par décennie dans l'océan Arctique, avec un recul plus marqué en été (7,4%). Les glaciers et la couverture neigeuse occupent une moins grande superficie dans les deux hémisphères (GIEC, 2014). Certains systèmes hydrologiques ont été perturbés par l'intensification du ruissellement et la précocité des crues de printemps dans de nombreux cours d'eau alimentés par la fonte des glaciers et de la neige ainsi que par la modification de la structure thermique et de la qualité de l'eau due au réchauffement des lacs et des rivières (GIEC, 2014).

Dans certains écosystèmes marins et d'eau douce, le déplacement des aires de répartition et les variations du degré d'abondance des algues, du plancton et des poissons sont liés à la hausse de la température de l'eau ainsi qu'aux modifications connexes de la couche de glace, de la salinité, de la teneur en oxygène et de la circulation de l'eau (GIEC, 2014).

Concernant les projections futures, les travaux du GIEC (2013) prévoient une augmentation de la température moyenne à la surface du globe à court terme (2016–2035) probablement entre 0,3 °C et 0,7 °C. Et à la fin du XXI^e siècle (2081-2100), une augmentation probablement supérieure à 1,5 °C par rapport à la référence 1850-1900 pour l'ensemble des RCP à l'exception du RCP2,6. Par ailleurs, le contraste des précipitations entre régions humides et régions sèches ainsi qu'entre saisons humides et saisons sèches augmentera (GIEC, 2013).

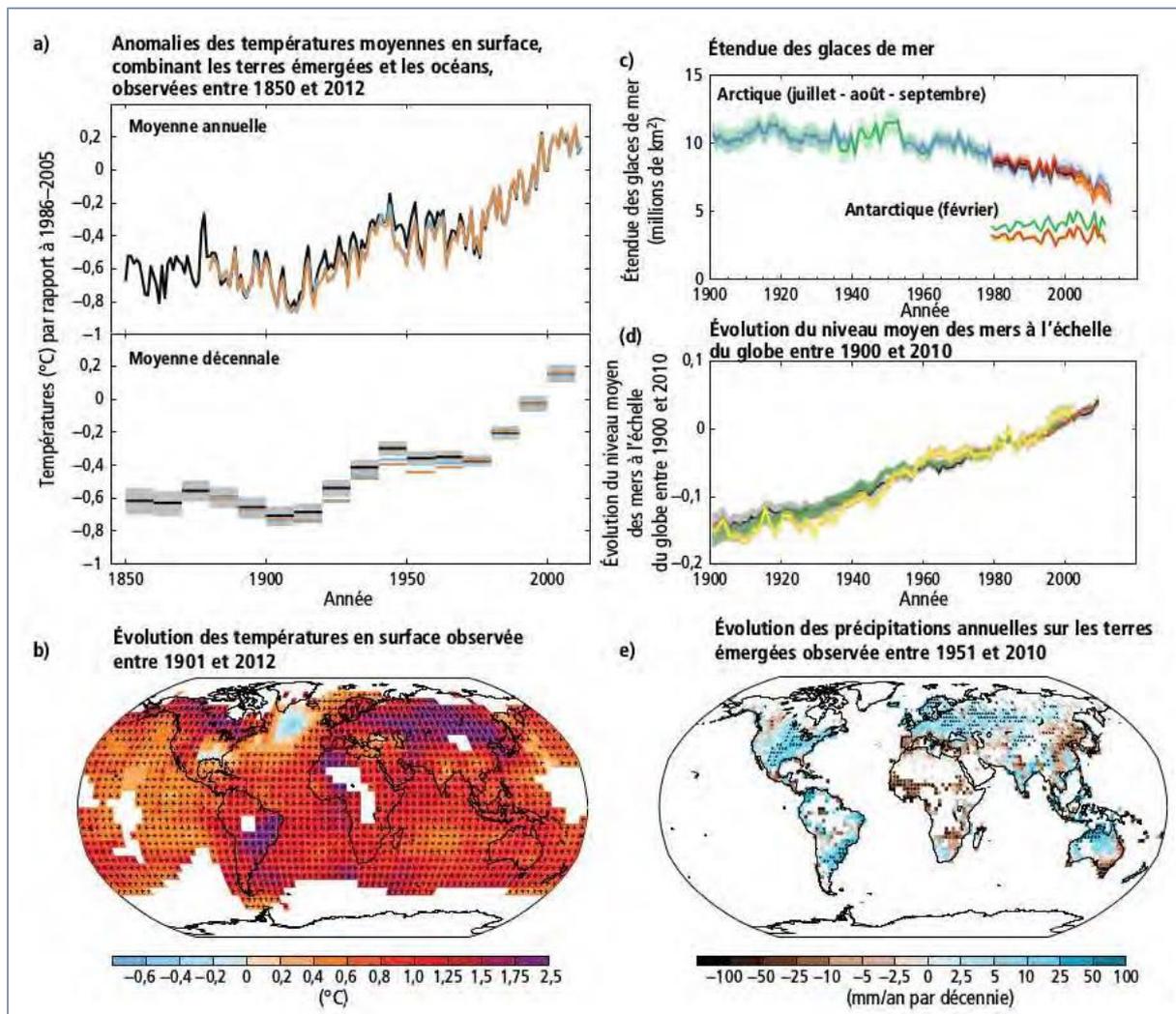


Figure 3: Différents indicateurs observés de l'évolution du système climatique mondial. Température à la surface du globe (a et b), étendue des glaces de mer dans l'Arctique (moyenne juillet-septembre) et dans l'Antarctique (février) (c), niveau moyen des mers à l'échelle du globe (d), précipitations moyennes sur les terres émergées (e) (GIEC, 2014)

1.2.2. CAS DE L'AFRIQUE DE L'OUEST

Depuis 1960, l'Afrique de l'Ouest a connu au moins une grande sécheresse tous les 10 ans (Fanta, 2010). De nombreuses études se sont penchées sur la question des variations climatiques en Afrique de l'Ouest (Kanohin, 2010 ; Kouassi *et al.*, 2012 ; Ahoussi *et al.*, 2013 ; Bodian, 2014 ; Descroix *et al.*, 2015 ; Kouassi *et al.*, 2017 ; Kouakou *et al.*, 2017 ; Kaboré *et al.*, 2017). De ces travaux, il ressort que l'Afrique de l'Ouest connaît une succession d'épisodes climatiques secs et pluvieux ponctués de périodes de sécheresses dont l'intensité et l'extension spatiale sont devenues exceptionnelles depuis 1970 (Kaboré *et al.*, 2017 ; Kouassi *et al.*, 2017).

Dans cette structure, la période de 1950 à 1970 est reconnue comme période humide et la période 1970-2010, celle des déficits pluviométriques (Kouakou, 2011 ; Descroix *et al.*, 2015 ; Kaboré *et al.*, 2017 ; Kouassi *et al.*, 2017). La plupart de ces études a montré que la pluviométrie a baissé de 10 à 30% selon les zones (Kouakou *et al.*, 2012 ; Ahoussi *et al.*, 2013 ; Bodian, 2014 ; Kaboré *et al.*, 2017 ; Kouassi *et al.*, 2017). Cette situation a pour conséquence la baisse des débits des cours d'eau et le niveau des aquifères (Kouassi *et al.*, 2013).

La longue période de sécheresse amorcée depuis la décennie 70 (marquée par son intensité, sa durée et son extension) trouve ses origines dans la dynamique océan-atmosphère pouvant être décrite par divers mécanismes. En effet, la bonne gestion des ressources en eau doit être entreprise à partir de solides connaissances et d'une bonne compréhension des phénomènes pluviogènes (Balme *et al.*, 2005 in Descroix *et al.*, 2015). Les conditions climatiques de l'Afrique de l'Ouest sont gouvernées par les fluctuations de l'équateur météorologiques (EM) qui déterminent les différentes saisons et définissent le fonctionnement du mécanisme des pluies (Assoma, 2013). Les précipitations en Afrique de l'Ouest sont liées à la circulation tropicale qui est dirigée par la cellule de Hadley dont l'importance et la situation méridienne varient considérablement au cours du cycle annuel (Tapsoba, 1997 in Assoma, 2013). Entre la cellule nord et la cellule sud de Hadley, se situe l'équateur météorologique (EM) qui est une zone de concentration de la vapeur d'eau, advectée par les alizés et les circulations de mousson dans les basses couches, et de libération de chaleur latente par ascendance et condensation. Cette zone (EM) est soumise à la confluence entre deux masses d'air à savoir la première appelée « mousson » qui est humide (relativement froid) et d'origine océanique de secteur Sud-Ouest, correspond à l'alizé de l'hémisphère austral dévié sur sa droite par la force de Coriolis après franchissement de l'équateur (Eldin, 1971 in Assoma, 2013). La seconde appelée « harmattan » qui est sèche (plus chaud) et d'origine continentale de secteur Nord-Est, correspond à l'alizé de l'hémisphère boréal. Ces deux masses d'air vont déterminer le cycle des saisons (le climat) en Afrique de l'Ouest et plus précisément celui de la Côte d'Ivoire suivant la Zone de Convergence Inter-Tropicale (ZCIT). Cette zone de convergence (ZCIT) désigne, soit la trace au sol du FIT (Front Inter-Tropical) qui est en fait la limite entre l'alizé continental et la mousson, soit l'alignement zonal de nuages convectifs pluviogènes à fort développement vertical (cumulo-nimbus) observable sur le domaine océanique par satellite. En ce lieu, les deux masses d'air n'étant pas animées d'une augmentation de leurs vitesses, naît un phénomène de convergence qui engendre à son tour une ascendance de l'air, formant des nuages à développement vertical. Ces formations nuageuses se traduisent, soit par des pluies abondantes si la convergence est seulement modérée, soit par des orages, des coups de vent ou des grains

si la convergence est forte. La ZCIT se caractérise par un déplacement lent soumis à l'effet principal des gradients de pression. Le mouvement zénithal du soleil commande la migration de la ZCIT (Ardoin *et al.*, 2005), ce qui explique la mise en place des différents régimes saisonniers : la ZCIT se déplace vers le Nord (20°N) en juin-juillet-août pour atteindre sa position septentrionale occasionnant des pluies en zone sahélienne et c'est la grande saison des pluies en zone tropicale ; le déplacement de la ZCIT se fait vers le Sud (5°N) en décembre-janvier-février pour atteindre sa position méridionale marquant la saison sèche.

En ce qui concerne les projections climatiques, les travaux réalisés sur l'Afrique (GIEC, 2007 Cantat *et al.*, 2010 ; Graham *et al.*, 2011 ; Chen *et al.*, 2012 ; Koutroulis *et al.*, 2013 ; Thompson *et al.*, 2013 ; Kouakou *et al.*, 2014 ; etc.) montrent de fortes incertitudes des modèles actuels avec parfois de fortes divergences dans les projections. Certains modèles prévoient des augmentations de précipitations et d'autres des diminutions (GIEC, 2007) en raison de la grande variabilité de la Mousson Ouest Africaine. Cependant, les projections climatiques sont unanimes sur l'augmentation de la température jusqu'en 2100. En effet, les études prévoient sur la base du scénario d'émission A1B une élévation des températures de 0,4 à 1,8°C à l'horizon 2031-2040 et de 3,2 à 5,8°C à l'horizon 2091-2100 par rapport à la période de référence 1991-2000 sur l'ensemble du territoire ouest-africain (Kouakou *et al.*, 2014 ; Sarr et Camara, 2017). Les précipitations pourraient baisser dans l'ensemble dans la zone et atteindre dans certaines localités 60% à l'horizon 2091-2100. Spécifiquement, les températures au Sahel connaîtraient des augmentations moyennes mensuelles et annuelles plus importantes que celles des régions du Golfe de Guinée (Kouakou *et al.*, 2014). Quant aux précipitations, une augmentation annuelle de 0,44% au Sahel contre une baisse de 3% dans le Golfe de Guinée à l'horizon 2031-2040 est prévue. A l'horizon 2091-2100, les précipitations diminueraient de 12,6% au Sahel et de 9,12% dans les régions du Golfe de Guinée (Sarr et Camara, 2017).

1.2.3. CAS DE LA COTE D'IVOIRE

Les études sur les variations pluviométriques indiquent qu'au cours du XX^e siècle, la Côte d'Ivoire a connu quatre années ou périodes très marquées de sécheresse : l'année 1943, la période 1968-1970, la période 1982-1983 et l'année 1993 (Ardoin, 2004 ; Brou, 2005 ; Bigot *et al.*, 2005 ; Brou et Chaléard, 2007). Ces années de sécheresse s'inscrivent dans le phénomène général de la sécheresse globale observée depuis 1970 en Afrique de l'Ouest. Le début de la longue période de sécheresse qui sévit depuis 1970 est identifiable par une rupture de la stationnarité des séries d'observations pluviométriques quasi générale entre 1966 et 1970

(Brou, 2005 ; Kouassi, 2007 ; Kouamé, 2011). La baisse de la pluviométrie est remarquable, même dans les zones à forte pluviométrie (supérieure à 1800 mm), plus particulièrement dans l'Ouest montagneux (Kouamé, 2011). Des études plus récentes (Yao *et al.*, 2012 ; Otchoumou *et al.*, 2012 ; Sorokoby *et al.*, 2013 ; Kouakou *et al.*, 2017 ; Kouassi *et al.*, 2017) confirment l'existence de cette variation importante des conditions climatiques depuis la décennie 60. La littérature enseigne que cette variation importante du climat ivoirien s'est faite de manière progressive d'une décennie à l'autre (Kouakou, 2011) avec des taux de baisse pluviométrique constatés qui se situent entre 10 et 31% (Kouakou *et al.*, 2012 ; Ahoussi *et al.*, 2013 ; Kouassi *et al.*, 2017). Au niveau des températures, la Côte d'Ivoire s'est réchauffée depuis la décennie 80 (Brou, 2005). Cette hausse des températures a été caractérisée par Kouakou *et al.* (2012) dans leurs études effectuées sur toute la Côte d'Ivoire avec des taux de hausse qui avoisinent +1°C sur la période 1960-2000.

Pour ce qui est des projections futures, il est noté les travaux de Ardoin *et al.* (2005) qui ont fait des prévisions des ressources en eau en Afrique occidentale et centrale au XXI^e siècle. En Côte d'Ivoire, l'étude s'est réalisée sur le bassin versant de Sassandra. Les auteurs ont utilisé le modèle climatique global HadCM3 et le scénario d'émission A2 pour les projections climatiques, et deux modèles hydrologiques (GR2M et WBM) pour les projections hydrologiques. La période future choisie est la période 2006-2095 composée de trois horizons (2020, 2050, 2080). Les résultats de cette étude ont montré que les taux de variations des précipitations sont maximums au milieu du siècle, c'est-à-dire à l'horizon 2050. Le débit annuel diminuerait sur l'ensemble de la période future. Les taux de variations des écoulements à l'horizon 2080 (-14% à +13%) sont plus faibles qu'à l'horizon 2050 (+10,6 % à +22,7%). Ardoin *et al.* (2005) indiquent que malgré cette tendance à l'augmentation, les écoulements ne semblent pas retrouver les niveaux observés avant l'avènement de la sécheresse à l'horizon 2050. Kouakou *et al.* (2012) ont appliqué le modèle climatique régional RegCM3 conduit par le modèle climatique global ECHAM5 et le scénario d'émission A1B pour simuler les températures et les précipitations sur l'ensemble de la Côte d'Ivoire. Les résultats de cette simulation prévoient une augmentation des températures moyennes annuelles de 3° à 4,2°C à la fin du XXI^e siècle avec une possibilité de diminution et/ou une augmentation des précipitations annuelles (Figure 4) par endroit. Il ressort de cette étude qu'à l'horizon 2091-2100, les régions d'Agnibilékrou, d'Abengourou et les zones montagneuses de l'Ouest avec notamment la région de Daloa pourraient devenir plus arrosées avec un excédent de 10% à 20%.

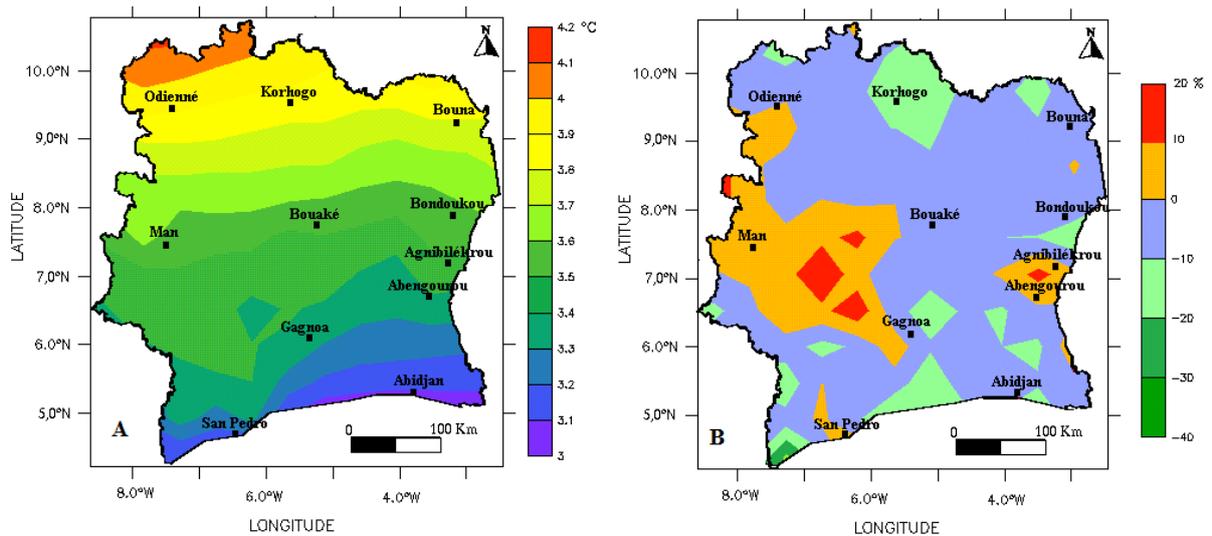


Figure 4: Variation des températures (A) et des précipitations moyennes annuelles (B) en Côte d'Ivoire à l'horizon 2091-2100 par rapport à la période de référence 1991-2000 (Kouakou *et al.*, 2012)

Il est constaté que les projections climatiques faites montrent que les ressources en eau sont vulnérables et peuvent être fortement affectées par les variations climatiques. La littérature scientifique est riche d'études qui ont permis de caractériser ces variations climatiques et de mettre en place différents indicateurs capables, à certaines échelles, de détecter les épisodes de sécheresses. Une description des outils les plus couramment utilisés, surtout dans des études en Afrique de l'Ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire, est présentée dans la section suivante.

1.3. OUTILS ET MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DES VARIATIONS CLIMATIQUES ET DE PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE

La sécheresse, qui n'est autre que la signature des variations climatiques, préoccupe en tout temps à travers le monde beaucoup de chercheurs et décideurs qui s'intéressent à la gestion de cette problématique. Cette préoccupation a produit diverses visions, méthodes et expériences pour lutter contre cette menace du bien-être et la sécurité alimentaire des humains. Dans ce contexte, on peut citer à titre d'exemples, quelques travaux scientifiques réalisés.

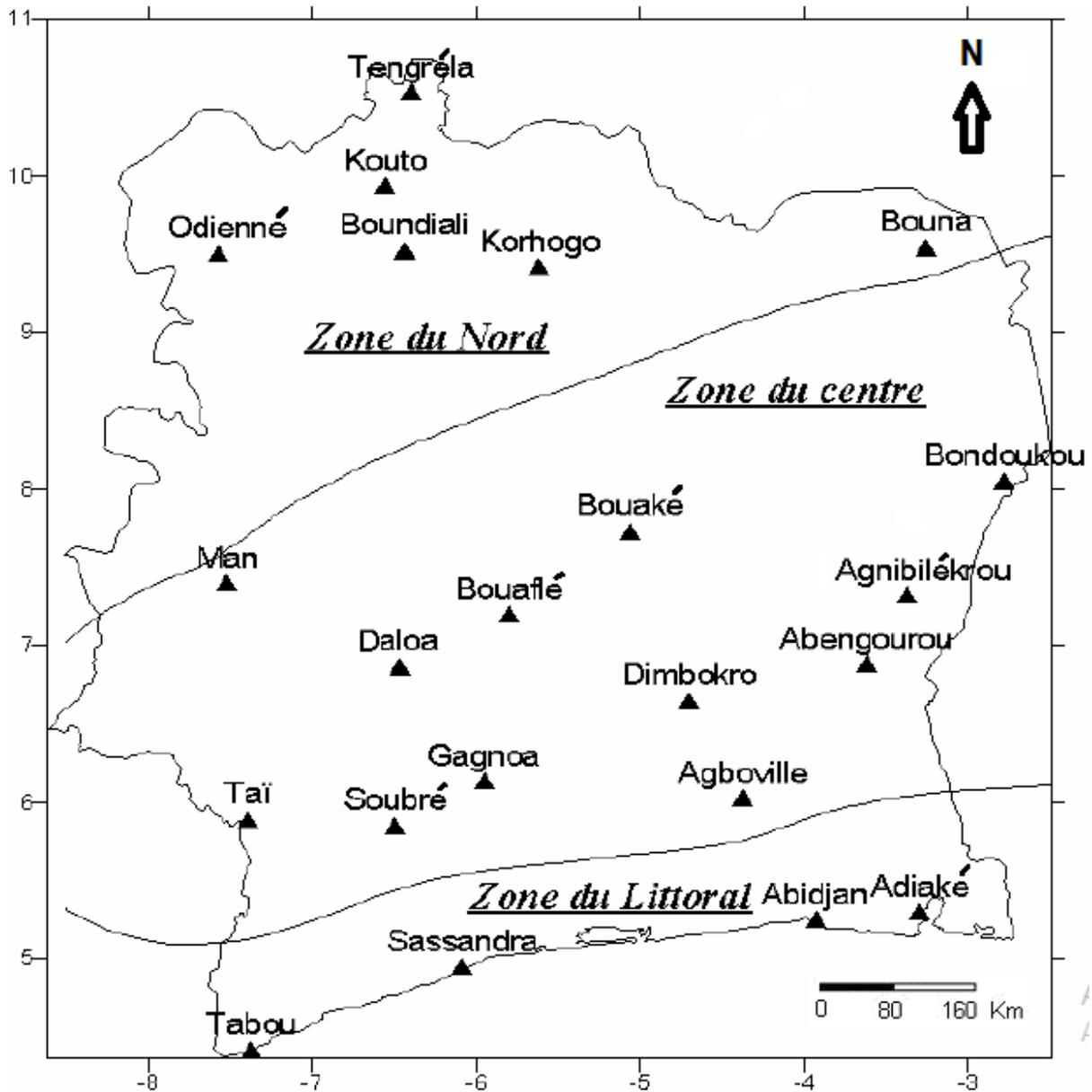
1.3.1. OUTILS DE ZONAGE CLIMATIQUE

Les variations climatiques, et partant les sécheresses observées en un lieu peuvent avoir un impact sur le zonage des paramètres climatiques.

Le zonage climatique est un outil d'analyse des données climatiques qui vise à regrouper en

classes homogènes un ensemble d'observations climatiques. Ces dernières années, les besoins d'analyse de données et en particulier de classification ont augmenté significativement. En effet, de plus en plus de domaines scientifiques nécessitent de catégoriser leurs données dans un but descriptif ou décisionnel (Touhami, 2017).

Plusieurs outils de régionalisation existent, aussi bien quantitatives que qualitatives. Gregory (1975) in Salama (2010) a passé en revue différents outils de classifications, englobant les caractéristiques temporelles du climat. Ces outils sont basés essentiellement sur l'analyse en composantes principales (ACP), les corrélations et/ou des méthodes de classification [la classification ascendante hiérarchique (CAH), la classification descendante hiérarchique (CDH), la classification par partition (CPP), la classification par la densité, la classification basée sur la quantification par grille] (Boubou, 2007 ; Salama, 2010). Dans cette optique, plusieurs auteurs ont utilisé l'ACP et/ou la CAH pour la régionalisation des paramètres climatiques en général et des précipitations annuelles en particulier (Kouadio *et al.*, 2003 ; Soro, 2011 ; Djoufack-Manetsa, 2011 ; Talia *et al.*, 2011 ; Goula *et al.*, 2012 ; Chibane *et al.*, 2015 ; Koudou *et al.*, 2015 ; Kouakou *et al.*, 2017 ; Touhami, 2017 ; etc.). L'ACP et la CAH ont démontré au cours de ces différents travaux leur capacité à mettre en évidence des régions pluviométriques homogènes. Par exemple, l'étude de Kouadio *et al.* (2003) a été faite à partir d'une analyse en composantes principales (ACP). Cette analyse est réalisée sur les données de pluviométrie de la période 1964-1997 de 22 stations météorologiques de la Côte d'Ivoire. Ainsi, Kouadio *et al.* (2003) ont mis en évidence trois zones climatiques comprenant la zone du Nord, la zone du Centre et la zone du littoral (Figure 5).



LEGENDE

▲ Station pluviométrique

— Limite de zone climatique

Figure 5 : Découpage climatique de la Côte d'Ivoire à partir d'une ACP (Kouadio *et al.*, 2003)

Soro (2011) s'est appuyé sur la classification ascendante hiérarchique. Cette classification, construite sur des chroniques allant de 1942 à 2002, a été réalisée en tenant compte de la latitude et des maxima mensuels observés sur 44 postes pluviométriques. Les résultats de Soro (2011) ont mis en évidence cinq régions climatiques homogènes en Côte d'Ivoire (Figure 6).

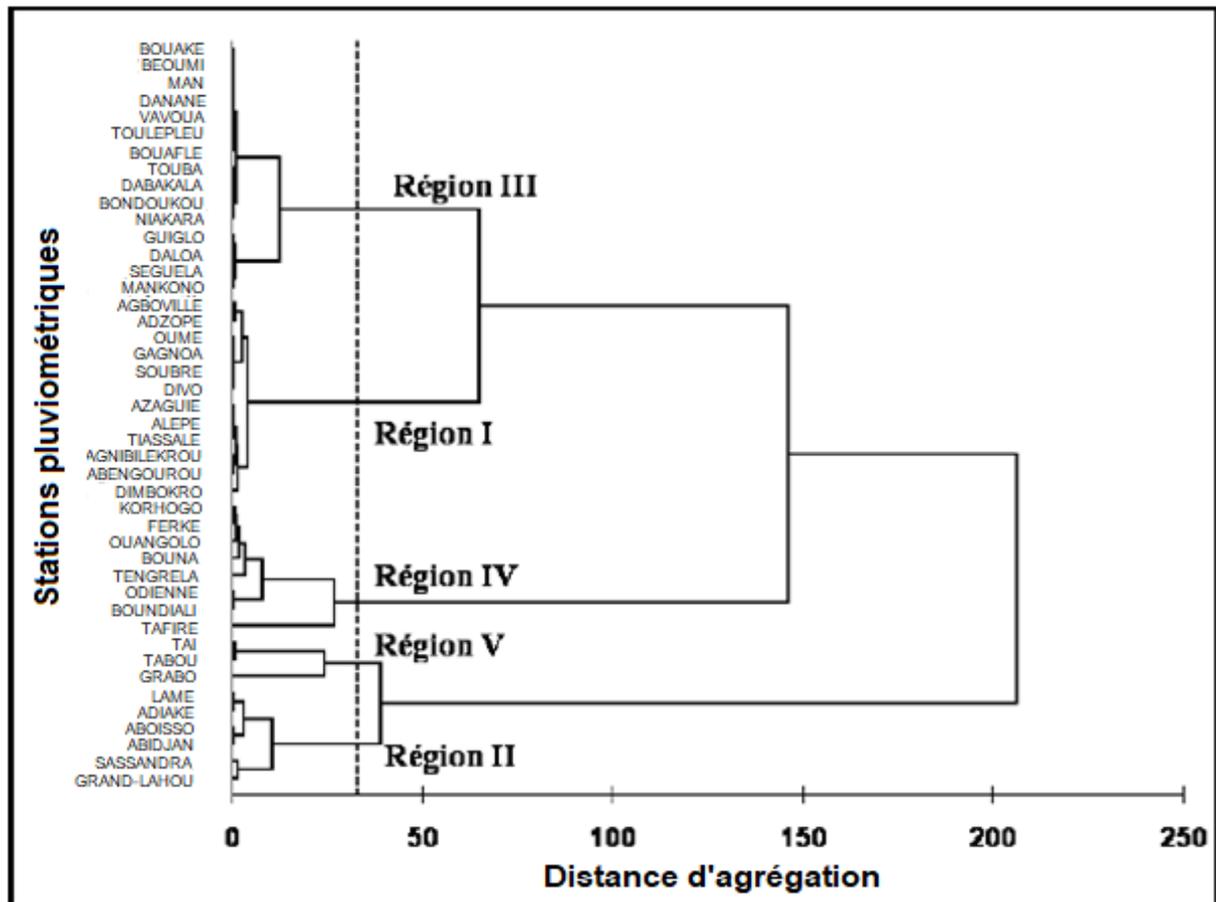


Figure 6 : Régionalisation des stations pluviométriques ivoiriennes (Soro, 2011)

La classification des climats se base aussi sur des indices dits climatiques et biogéographiques (Farah, 2014 ; Kouakou *et al.*, 2017). Plusieurs travaux ont, en effet, utilisé les indices de De Martonne et de Gaussen pour caractériser les régimes pluviométriques saisonniers et les types de climats et/ou délimiter spatialement les zones bioclimatiques (Bridi, 2012 ; Mokhtari *et al.*, 2013 ; Farah, 2014 ; Sebaibi, 2014 ; Kouakou *et al.*, 2017 ; etc.). Kouakou *et al.* (2017) ont, par exemple, utilisé l'indice de Gaussen et l'ACP sur la période 1980-2000 pour la classification de 44 stations météorologiques du territoire ivoirien. Ils ont mis en évidence quatre régions climatiques homogènes en Côte d'Ivoire (Figure 7).

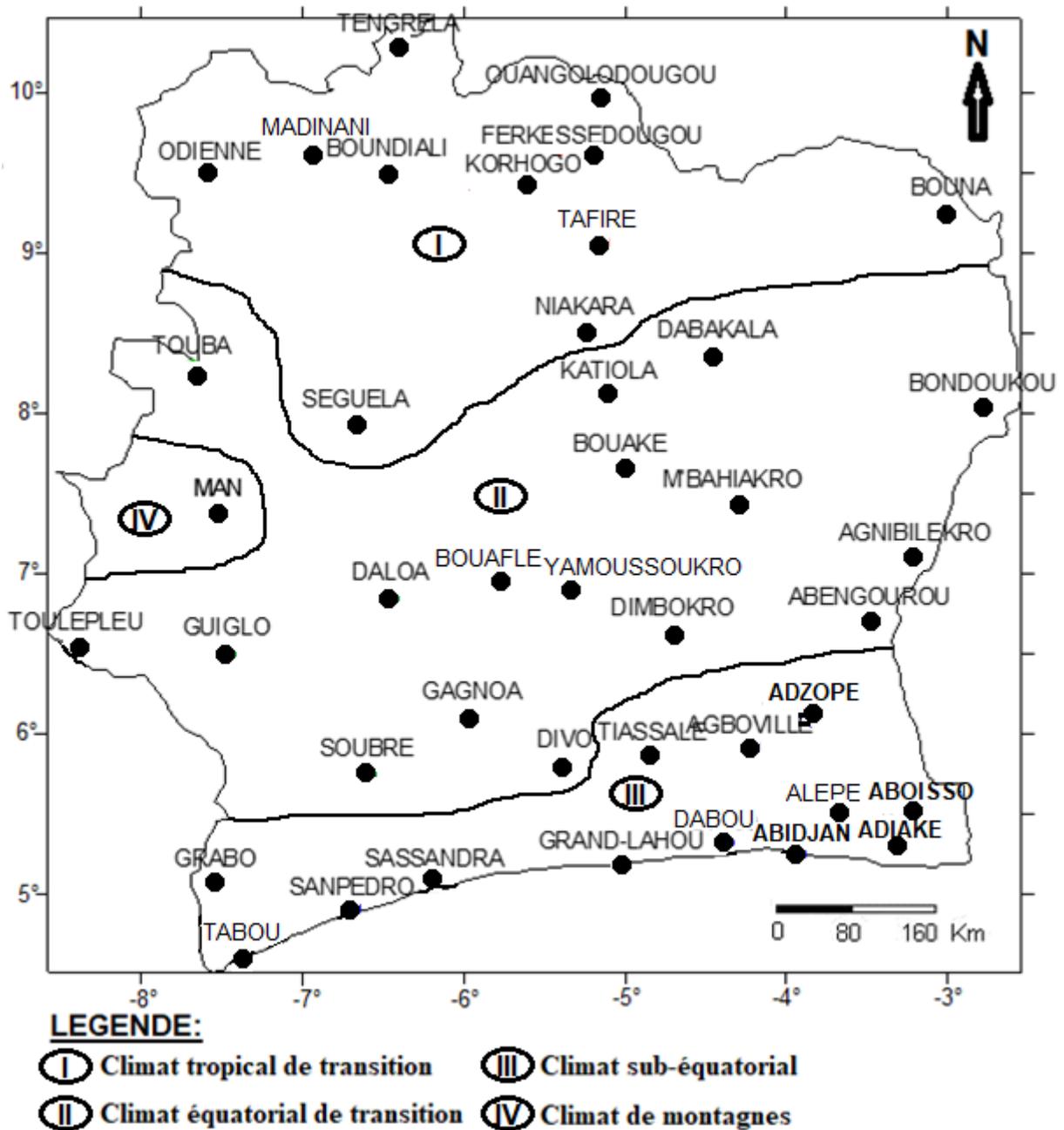


Figure 7 : Carte des régions climatiques de la Côte d'Ivoire (Kouakou *et al.*, 2017, modifié)

1.3.2. OUTILS DE CARACTÉRISATION DES VARIATIONS CLIMATIQUES ET D'ÉVALUATION DE LA SÉCHERESSE

1.3.2.1. Outils de caractérisation des variations climatiques et de la sécheresse

Les études sur les variations climatiques ne cessent de susciter d'intérêts au sein de la communauté scientifique (Ly *et al.*, 2013 ; Fayé *et al.*, 2015 ; Descroix *et al.*, 2015 ; Kaboré *et al.*, 2017 ; Kouassi *et al.*, 2017). Par ailleurs, c'est à travers les études des variations climatiques

qu'on arrive à caractériser la sécheresse. Ainsi, les outils utilisés pour les études des variations climatiques sont applicables à l'étude de la sécheresse. Ces études font de plus en plus appel à une grande diversité d'outils et procédés élaborés pour mettre en évidence un changement de moyenne (provoqué par une modification d'origine naturelle et/ou anthropique du processus physique de génération) au sein d'une série chronologique (Adja *et al.*, 2019). En Côte d'Ivoire, la caractérisation des variations climatiques et de la sécheresse a été menée à partir de plusieurs outils. Il s'agit entre autres :

- des indices pluviométriques ou indices de Nicholson (Koita, 2010 ; Kouakou, 2011 ; Kouamé, 2011 ; Assoma, 2013 ; Assémian, 2014 ; Soro, 2014 ; Yao, 2015 ; Kouassi *et al.*, 2017) pour la mise en évidence de la fluctuation interannuelle des précipitations et l'identification des grandes tendances climatiques (période sèche, période normale et période humide) ;
- du test de Pettitt et/ou de la procédure de segmentation de Hubert (Koita, 2010 ; Kouakou, 2011 ; Kouamé 2011 ; Assoma, 2013 ; Ahoussi *et al.*, 2013 ; Assémian, 2014 ; Soro, 2014 ; Yao, 2015 ; Kouassi *et al.*, 2017) pour la détection des ruptures dans les séries chronologiques de pluie;
- de la migration spatiale des isohyètes pour apprécier la variabilité spatiale des précipitations (Kouakou, 2011 ; Kouamé, 2011 ; Assoma, 2013 ; Koudou, 2013 ; Kouassi *et al.*, 2013 ; Soro, 2014) ;
- des régressions linéaires pour apprécier dans le temps les tendances évolutives des paramètres climatiques (Kouakou *et al.*, 2012 ; Yao *et al.*, 2013) ;
- des modalités de l'évolution des pluies pour identifier la fréquence du nombre de jours pluvieux (Brou, 2005 ; Kouassi *et al.*, 2010).

Il ressort de ces études que, globalement, les ruptures pluviométriques se sont signalées autour des années 1966, 1970 et 2000 et engendrée des déficits de l'ordre de 21% (Ahoussi *et al.*, 2013 ; Kouassi *et al.*, 2017).

Dans l'optique d'améliorer les connaissances sur les variations climatiques et la sécheresse, des indices climatiques peuvent être utilisés pour l'analyse de la dynamique du climat saisonnier et annuel. En effet, l'étude de la dynamique saisonnière et annuelle du climat se base sur des indices dits climatiques et biogéographiques (Mokhtari *et al.*, 2013). De ce fait, plusieurs indices bioclimatiques et d'aridité ont été conçus basés généralement sur la combinaison des précipitations (P), des températures (moyenne, maximum et minimum) et du pouvoir évapotranspirant de l'atmosphère (ETP) (Mokhtari *et al.*, 2013). De nombreux travaux ont, en particulier, utilisé de façon satisfaisante les indices d'Angot, de Péguy, de Moral et l'indice UNEP pour analyser la dynamique saisonnière et annuelle du climat (Bridi, 2012 ; Mokhtari *et*

al., 2013 ; Farah, 2014 ; Sebaibi, 2014, etc.).

1.3.2.2. Outils d'évaluation de la sécheresse

Plusieurs indices, liés à des variables hydrométéorologiques, ont été proposés par les chercheurs pour estimer l'effet de la sécheresse et pour définir les paramètres tels que l'intensité, la durée, la sévérité et l'ampleur spatiale de celle-ci. Parmi les indices de sécheresse les plus utilisés, on a (Soro *et al.*, 2014) : l'indice de Palmer, l'indice de l'approvisionnement en eau de surface, l'indice standardisé de précipitation, l'indice de sécheresse effective, l'indice de sécheresse des débits, l'indice hydrologique normalisé, l'indice normalisé de l'évapotranspiration maximale, l'indice régional de la zone de sécheresse et l'indice agricole de référence de la sécheresse. Chaque indice a ses propres forces et faiblesses. L'OMM et GWP (2016) ont fait un examen exhaustif des différents indices de sécheresse couramment employés dans les régions sujettes à la sécheresse, résumant leurs utilités et leurs limites.

Savoir quel indice de sécheresse serait le mieux adapté à tel ou tel climat et à telle ou telle application est une question qui alimente les débats au fil des ans. Certains auteurs se sont essayés à formuler des avis éclairés sur le sujet (OMM, 2012). Les spécialistes de la question ont pris conscience du fait qu'un indice devait être simple, facile à calculer et statistiquement adapté et significatif. En effet, la compréhension des différents effets que peuvent avoir les déficits de précipitations sur les eaux souterraines, sur le volume stocké dans les réservoirs, sur l'humidité du sol, sur le manteau neigeux et sur l'écoulement des cours d'eau a conduit McKee *et al.* (1993) à mettre au point l'indice de précipitations standardisé (indice SPI) (OMM, 2012). L'indice SPI est un indice à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer (Daki *et al.*, 2016). Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis (Daki *et al.*, 2016). Selon Merabti (2018), cet indice est le plus performant pour tous types de climat et pour différentes échelles de temps. En outre, l'indice SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs. L'indice de précipitations standardisé présente des avantages en termes de cohérence spatiale, et a la capacité de décrire à la fois à court terme et à long terme les impacts de la sécheresse à travers différentes échelles de temps. Cette cohérence spatiale de l'indice lui permet d'être comparable entre différents sites (Mirabbasia *et al.*, 2013). Il a été recommandé pour le suivi des sécheresses par l'Organisation Météorologique Mondiale, principalement pour sa souplesse d'utilisation (multiples échelles de temps de calcul), ce qui permet de détecter rapidement des situations de sécheresse et d'en évaluer la gravité (OMM, 2012 ; OMM et GWP, 2016). Un avantage

important est qu'il est fondé sur la probabilité de précipitation sur un laps de temps donné. Cette nature probabiliste du SPI le place dans un contexte historique, ce qui convient bien à la prise de décision. Cependant, il ne permet de quantifier que le déficit de précipitations. De plus, les valeurs basées sur des données préliminaires peuvent changer et les valeurs varient si la durée de la période des relevés s'allonge (OMM, 2012). Parmi tous les indices de sécheresse, l'indice standardisé de sécheresse (SPI) est le plus puissant et le plus robuste dans la caractérisation de la sécheresse météorologique (OMM, 2012 ; Soro *et al.*, 2014 ; Daki *et al.*, 2016 ; etc.). Cet indice est largement utilisé à travers le monde pour l'analyse de la sécheresse surtout météorologique (Ibrahim *et al.*, 2010; Tirandaz et Eslami, 2012; Jacobi et Perrone, 2013; Jouilil *et al.*, 2013 ; Soro *et al.*, 2014 ; Bedoum *et al.*, 2014 ; Boudad *et al.*, 2015 ; Djerbouai, 2016 ; etc.). Les responsables de la planification en matière de sécheresse sont nombreux à apprécier la souplesse d'utilisation de l'indice SPI. Ce dernier est utilisé aussi dans divers instituts de recherche, des universités et des services météorologiques et hydrologiques nationaux du monde entier, dans le cadre d'activités de suivi de la sécheresse et d'alerte précoce (Bodian, 2014). D'où la nécessité d'évaluer la sécheresse en Côte d'Ivoire, pays de l'Afrique de l'Ouest, à partir de l'indice SPI.

1.3.3. OUTILS DE MODÉLISATION ET PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE

L'une des conséquences des variations climatiques, la sécheresse frappe de plus en plus dans le monde et avec des intensités de plus en plus importantes.

Vu les impacts et les conséquences, il est donc très important d'avoir un outil qui permet de suivre et de prévoir la sécheresse. La persistance des années sèches depuis la fin des années 1960 a été le déclencheur d'une prise de conscience collective, faisant de la prévision des précipitations un enjeu majeur dans les régions ouest-africaines (Garric *et al.*, 2002). En effet, la prévision constitue un outil d'aide à la décision pour les organismes de gestion (services institutionnels, gestionnaires de barrage, agriculteurs, etc.) (Singla, 2013). L'étape préalable dans le processus de prévision de la sécheresse est la modélisation de celle-ci au travers d'un modèle.

Un modèle de prévision hydrologique est un ensemble d'équations mathématiques représentant l'état d'un système (une région) et l'évolution du cycle de l'eau par rapport à des conditions météorologiques spécifiées (Kouamé, 2017). Il s'agit d'un outil d'évaluation utilisé pour aider à la compréhension des phénomènes de transfert des eaux dans l'environnement. Le principe de la modélisation hydrologique se résume à transformer les données d'entrée en données de

sortie (Singh, 1995 *in* Atchérémi, 2019). Ainsi, le modèle est caractérisé par ses variables d'entrées (prédicteurs), sa structure et ses variables de sortie (prédicands).

Plusieurs auteurs ont proposé une classification des modèles (Juraj, 2003 ; Solomatine et wagner, 2011 ; Singla, 2013 ; Singh, 1995 *in* Atchérémi, 2019). La classification qu'on donne ici est grossière et insatisfaisante, mais elle a été choisie pour isoler et mieux situer le type de modèle auquel on va s'intéresser plus particulièrement dans cette étude. En effet, d'un point de vue mathématique, deux types d'approches sont utilisés dans la modélisation hydrologique : l'approche déterministe et l'approche empirique (Djrbouai, 2016).

1.3.3.1. Modèles déterministes

L'approche déterministe est basée sur la simulation physique du système. Dans un modèle déterministe les variables d'entrée et les paramètres du système sont supposés parfaitement déterminés ou déterminables (Kouamé, 2013). Dans de nombreux cas, cette approche s'avère peu réaliste, car les phénomènes naturels sont très aléatoires. Les modèles déterministes sont finalement tous limités par le grand nombre de paramètres à mesurer et par les limites des connaissances actuelles des systèmes naturels complexes (Djrbouai, 2016).

1.3.3.2. Modèles empiriques

Le modèle empirique est basé sur le traitement de séries chronologiques. Il ne fait intervenir aucune donnée sur la nature physique du système étudié. L'approche empirique permet donc de passer outre les limites des connaissances physiques du système. Elle prend seulement en compte l'aspect aléatoire des phénomènes. Contrairement aux modèles déterministes, les modèles empiriques fonctionnent comme des « boîtes noires », c'est-à-dire sans aucune considération de la structure interne de la région étudiée. Les modèles empiriques ont l'avantage de ne pas requérir d'importantes sources de calculs par rapport aux modèles déterministes. De plus, les prévisions ne sont pas biaisées comme celles des modèles déterministes. Par contre, elles sont limitées par la longueur des données observées et ne peuvent prétendre à représenter la complexité des interactions dans le système climatique, (Singla, 2013). En effet, les modèles empiriques sont basés sur de longues séries d'observations météorologiques et ont une représentation linéaire des processus hydrologiques (Kouamé, 2017). Parmi ces modèles, on distingue les modèles statistiques qui sont les plus couramment utilisés pour la prévision dans le domaine des sciences de l'eau (Singla, 2013 ; Kouassi *et al.*, 2016). Les modèles statistiques sont des modèles qui utilisent des variables, dite prédictives, pour prévoir des variables appelées

variables prédictands, à l'aide de relations mathématiques basées sur des observations historiques. La méthode statistique la plus couramment utilisée et la plus facile d'application est l'établissement de relations linéaires entre le prédicteur et le prédictand : régression, analyse discriminante, analyse en valeur singulière (Singla, 2013).

Les modèles statistiques les plus sollicités dans la résolution des problèmes de prévision de la sécheresse en général et la sécheresse météorologique en particulier, sont les modèles linéaires de base qui englobent la régression linéaire simple (RL), la régression linéaire multiple (RLM) ; les modèles linéaires généralisés qui englobent les modèles autorégressifs (ARIMA, SARIMA, etc.) ; les modèles non linéaires qui englobent les réseaux de neurones artificiels (RNA) et enfin les modèles hybrides (ondelettes-RNA, neuroflou, etc.) (Mishra et Desai, 2006 ; Han *et al.*, 2010 ; Marj et Meijerink, 2011 ; Belayneh *et al.*, 2014 ; Djerbouai, 2016 ; Kouassi *et al.*, 2016). Dans la littérature, plusieurs travaux appliqués aux processus de prévision de la sécheresse météorologique basés sur les SPI et/ou les RLM ont été effectués (Rezaeian-Zadeh et Tabari, 2012 ; Boudad *et al.*, 2015 ; Djerbouai, 2016 ; etc.). Par exemple, Rezaeian-Zadeh et Tabari (2012) se sont basés sur les RNA pour la prévision au délai un (1) mois des SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12 et SPI-24 dans les différentes régions climatiques de l'Iran. Boudad *et al.* (2015) ont, pour leur part, utilisés les RLM et les RNA pour la prédiction au délai un (1) mois des SPI-3, SPI-6 et SPI-12 dans le bassin d'Inaouène au Maroc. Ces travaux ont montré la robustesse des RLM à la prévision de la sécheresse.

Les variables d'entrée des modèles de prévision de la sécheresse dépendent du type de sécheresse à prévoir (Mishra et Singh, 2010). Les variables associées à la sécheresse incluent (Djerbouai, 2016) :

- (i) précipitation pour l'analyse de la sécheresse météorologique (un déficit de précipitation qui a mené à une période de sécheresse) ;
- (ii) débit, niveaux des lacs et des eaux souterraines pour l'analyse de la sécheresse hydrologique ;
- (iii) l'humidité du sol et les rendements des cultures pour la sécheresse agricole.

L'évaluation de la performance des modèles de prévision se base sur des critères numériques (ou quantitatifs) et des critères graphiques (ou qualitatifs). Les critères de performances les plus couramment utilisés dans le domaine des sciences de l'eau concernent, entre autres, le coefficient de corrélation (R), le coefficient de détermination (R^2), l'erreur absolue moyenne (MAE), l'erreur quadratique moyenne (MSE), le critère de Nash-Sutcliffe (Nash), la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE), le critère d'efficacité de Kling-Gupta (KGE), le critère de robustesse, les critères de contingence [le taux de coïncidence (TC), la probabilité

de détection d'une catégorie sèche, humide ou normale (POD), la fausse alerte du premier ordre (FAR), le Hit Skill Score (HSS)] et les critères graphiques (courbes de valeurs observées et simulées, diagrammes de dispersion des valeurs simulées en fonction des valeurs observées) (Yaka, 2004 ; Hamatan *et al.*, 2004 ; Pham, 2008 ; Rezaeian-Zadeh et Tabari, 2012 ; Singla, 2013 ; Boudad *et al.*, 2015 ; Osuch *et al.*, 2015 ; Kouassi *et al.*, 2016 ; Kouassi *et al.*, 2017 ; Kodja, 2018 ; etc.).

1.3.4. MÉTHODES DE CONSTRUCTION D'UN SYSTÈME D'ALERTE PRÉCOCE À LA SÉCHERESSE (SAPS)

Deux types d'approche sont utilisés dans la gestion de la sécheresse (PNUD, 2011) :

- l'approche réactive qui est basée sur la mise en place de mesures et d'actions après qu'un épisode de sécheresse ait commencé et soit perçu ;
- l'approche proactive ou préventive qui comprend toutes les mesures mises au point à l'avance, y compris l'alerte précoce, avec des outils de planification appropriés et la participation des acteurs (populations exposées).

L'approche proactive est considérée comme une approche pour gérer le risque de sécheresse. Les caractéristiques et les limites de ces deux approches sont résumées dans le tableau III.

Tableau III : Caractéristiques et limites des approches de gestion de la sécheresse (PNUD, 2011)

Approches de gestion de la sécheresse	Caractéristiques	Limites
Approche réactive	-Basée sur la mise en place d'actions après qu'une sécheresse soit survenue et soit perçue ; -Instaurée en situations d'urgence mais non basée sur un plan contre contingences.	-Résulte souvent en solutions techniques et économiques inefficaces car les actions sont prises en ayant peu de temps pour évaluer les actions optimales ; -Participation limitée des acteurs.
Approche proactive	-Actions conçues à l'avance, avec des outils de planification appropriés ; -Comprend la participation des acteurs ; -Prévoit des mesures à court et long terme et comprend des systèmes d'alerte précoce ; -Comprend un plan contre contingences pour les situations d'urgence.	Une coordination et une coopération inefficaces entre institutions, et le manque de politiques pour soutenir et réviser le plan proactif, peuvent mener à une planification inadéquate.

Il est toutefois admis d'utiliser une approche proactive dans la gestion de la sécheresse (OMM,2006 ; PNUD, 2011). La mise en place d'une approche proactive (Figure 8) implique de prévoir des plans dans lesquels les mesures d'atténuation soient clairement définies de même que les instructions pour leur mise en œuvre.

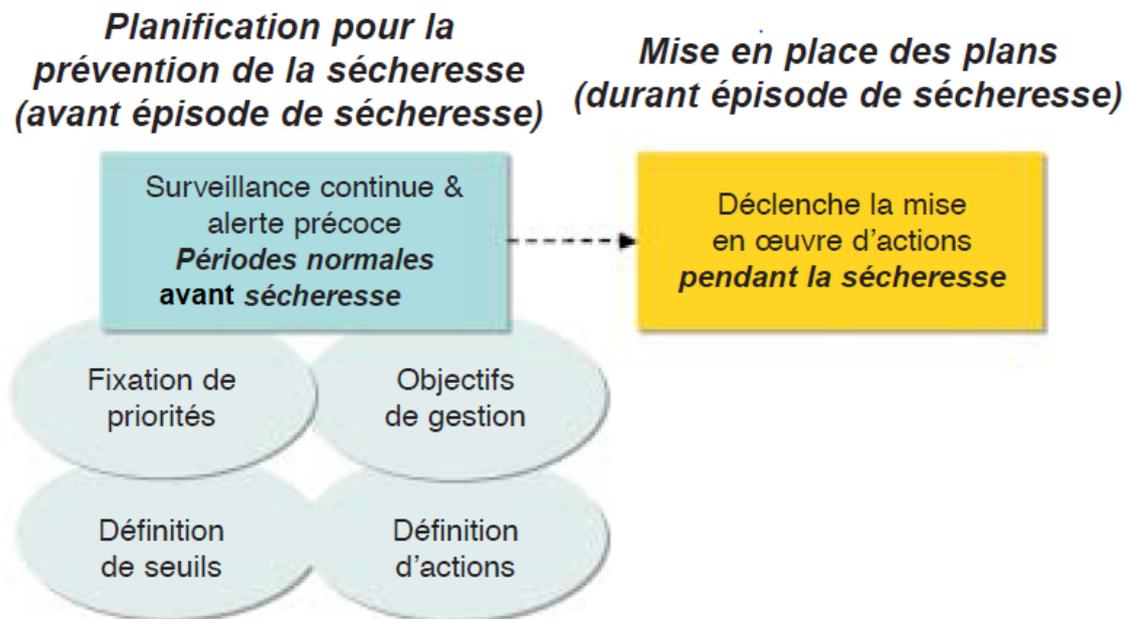


Figure 8 : Résumé des aspects opérationnels d'une approche proactive de gestion de la sécheresse (PNUD, 2011)

Pour qu'un système d'alerte précoce à la sécheresse (SAPS), qui fait partie intégrante de l'approche proactive de gestion de celle-ci, engendre une réaction adaptée, il doit être centré sur la population (c'est-à-dire ne pas consister seulement en une intervention technologique) et doit inclure dans la démarche méthodologique quatre éléments intégrés ou en étroites relations (Garcia et Fearnley, 2012 ; Kelman et Glantz, 2015 ; Neussner, 2015; Cools *et al.*, 2016 ; Didier *et al.*, 2017) (Figure 9) :

- (i) **connaissance du risque** : évaluation de l'aléa (sécheresse) et des vulnérabilités, en considérant leurs dynamiques et leurs variabilités. Cette tâche présinistre consiste à recenser les paramètres sur la sécheresse (intensité, fréquence, probabilité, répartition spatiale, cartographie, etc.) et à l'analyse de la vulnérabilité des communautés. L'ensemble forme l'évaluation du risque et les connaissances de base ;
- (ii) **suivi, prévision et alerte** : capacité à surveiller les signes précurseurs de la sécheresse, à prévoir son évolution et à émettre une alerte précise au moment opportun. Cet aspect englobe donc le suivi, la prévision ainsi qu'un service d'avertissement. Il s'agit de la base scientifique du SAPS qui permet de détecter la sécheresse ;

(iii) **diffusion et communication de l’alerte** : propagation de messages d’alerte, avec des informations préalables de préparation. Une fois le danger détecté, une alerte doit être communiquée et diffusée aux personnes concernées, soit les professionnels en charge des décisions et les personnes à risque. Le message doit être clair, compréhensible, utile, et doit se rendre aux personnes vulnérables. Le réseau de communication s’étend sur tous les paliers de gouvernance communautaire, régionale, nationale et internationale, mais l’alerte doit atteindre toutes les personnes, et rapidement ;

(iv) **capacité de réponse** : éducation systématique et programme de préparation pour les personnes à risques et les autorités. C’est l’élément qui assure que l’alerte soit reçue et qu’une réponse appropriée soit planifiée et mise en œuvre. La réponse est synonyme d’éducation de la communauté, en augmentant la perception publique sur les risques et en éduquant sur les comportements à adopter pour prévenir les dommages ou les pertes.



Figure 9 : Composantes intégrées d’un système d’alerte à la sécheresse où l’information circule entre toutes les composantes continuellement (cercle central rouge) (Didier *et al.*, 2017).

Ces quatre phases définissent un cadre complet du SAPS pour affronter la sécheresse à travers la mise au point et l’application de plans de gestion de celle-ci. Toutefois, chaque pays et chaque région présente ses propres caractéristiques, les plans contre la sécheresse devant s’y adapter (Kelman et Glantz, 2015). Ainsi cette démarche méthodologique pour la conception d’un SAPS n’est pas prescriptive et doit être considérée comme une référence à adapter à la réalité de la planification. Par ailleurs, les plans de gestion de la sécheresse sont toujours en cours de développement. Au fur et à mesure que les technologies évoluent, de nouveaux programmes

sont développés, donc ces plans doivent être révisés et actualisés. Par conséquent tous les aspects du SAPS sont nécessairement considérés comme étant dynamiques

CONCLUSION PARTIELLE

La sécheresse peut être caractérisée comme un déficit hydrique marqué dans une ou plusieurs composante(s) du cycle hydrologique. Ce qui permet de définir trois types de sécheresse : la sécheresse météorologique, la sécheresse agricole et la sécheresse hydrologique. La sécheresse est un phénomène qui est dû à la variabilité et aux changements climatiques qui sont une réalité en Afrique de l'Ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire. Le climat de l'Afrique de l'Ouest a subi des fluctuations ponctuées de périodes de sécheresses dont l'intensité et l'extension spatiale sont devenues exceptionnelles depuis 1970. Les impacts de ces fluctuations sur les régimes hydroclimatiques en Afrique de l'Ouest et particulièrement en Côte d'Ivoire montrent des déficits pluviométriques de l'ordre de 10 à 30% en moyenne. Les projections climatiques sur la Côte d'Ivoire annoncent une instabilité de la pluviométrie (hausse ou baisse selon les zones) pour les décennies à venir, avec augmentation de la température entre 3 et 4,2°C, jusqu'en 2100 sur la base du scénario d'émission A1B. L'impact des changements climatiques sur le zonage climatique met en évidence que la Côte d'Ivoire a été subdivisée en des régions climatiques homogènes allant de trois (3) à cinq (5) selon les auteurs. Le suivi et la gestion de la sécheresse reposent fréquemment sur des indices statistiques calculés à partir de valeurs climatiques ou hydrométéorologiques. Parmi les indices proposés pour quantifier la sévérité de la sécheresse, l'indice standardisé de sécheresse (SPI) est le plus puissant et le plus robuste dans la caractérisation de la sécheresse météorologique. La prévision de la sécheresse est définie comme une prévision d'un état moyen d'une des composantes du système climatique d'un ou plusieurs mois à l'avance. L'information donnée par la prévision de la sécheresse peut moduler la conception et la durabilité de nombreuses activités socio-économiques. Les modèles les plus sollicités dans la résolution des problèmes de prévision de la sécheresse en général et la sécheresse météorologique en particulier sont basés entre autres sur les modèles à boîte noire. Dans ce contexte de sécheresse en Côte d'Ivoire, il exige donc de faire recours aux outils comme la prévision pour la prise de décision afin de proposer aux populations des mesures d'adaptation ou d'atténuation aux effets de celle-ci pour un développement durable.

Ainsi présenté, ce chapitre permet de situer le contexte climatique général de notre étude. Le travail réalisé au cours de cette recherche a été effectué sur toute la Côte d'Ivoire dont les caractéristiques physiographiques et hydroclimatiques font l'objet du prochain chapitre (chapitre 2).

CHAPITRE 2 :
PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

La Côte d'Ivoire est un pays côtier de l'Afrique de l'Ouest. Elle a pour pays limitrophes à l'Ouest le Libéria et la Guinée Conakry, au Nord le Mali et le Burkina Faso et à l'Est le Ghana. Elle s'ouvre sur l'océan Atlantique au Sud ; bénéficiant ainsi de plus de 500 kilomètres de côte (Figure 10). Avec une superficie de 322 462 km², environ 1% du continent africain, le territoire ivoirien est situé entre les longitudes 2°30' et 8°30' Ouest et les latitudes 4°30' et 10°30' Nord.

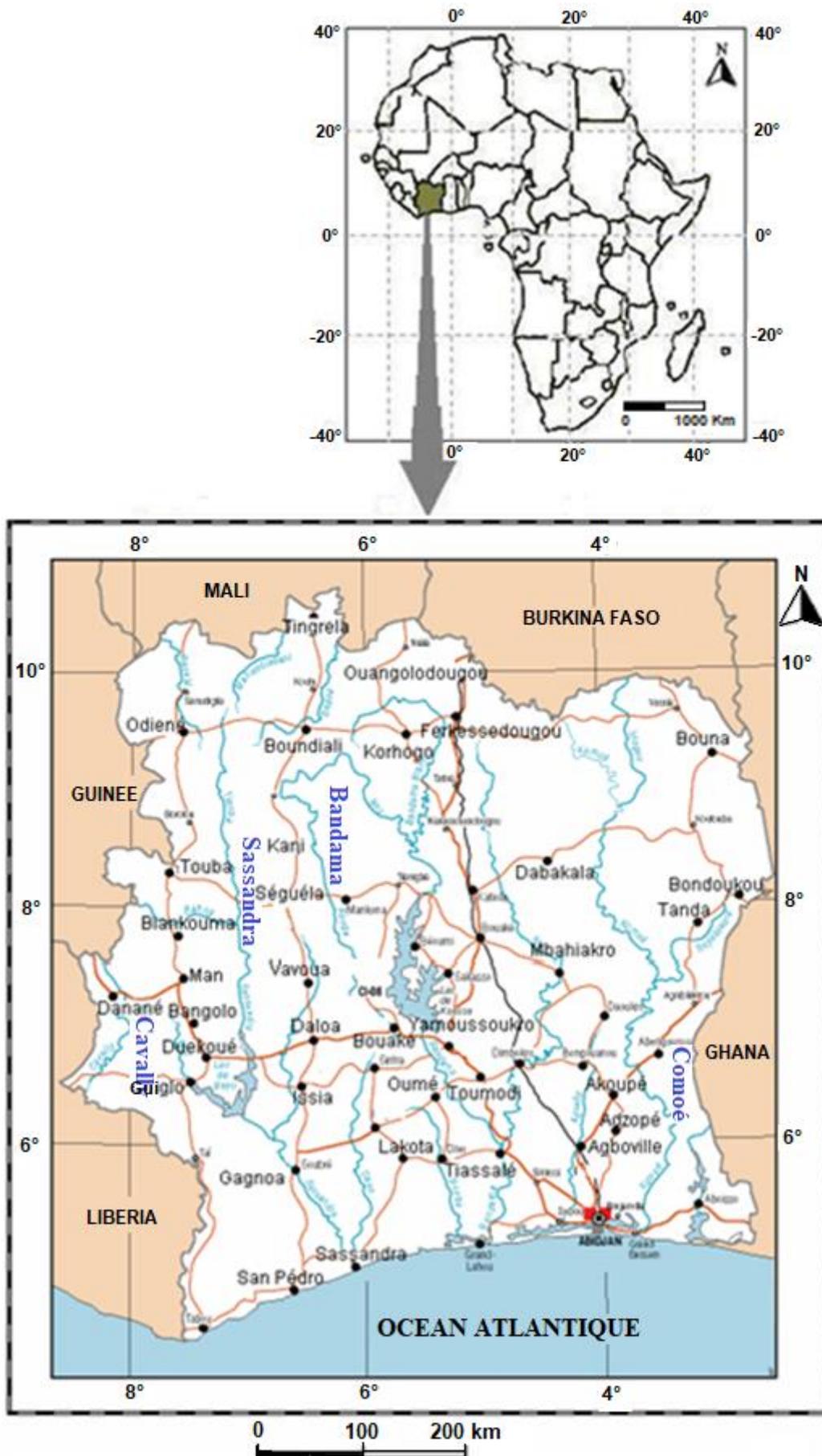


Figure 10: Localisation géographique de la Côte d'Ivoire (Mines, 1998 in Soro, 2011)

2.2. RÉGIMES CLIMATIQUES

En Côte d'Ivoire, le climat 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 entre le Nord et le Sud permettent de distinguer trois grands types de climat (le climat équatorial, le climat tropical et le climat de montagnes) qui se côtoient et qui subdivisent le territoire ivoirien en quatre régimes climatiques : le régime tropical de transition, le régime équatorial de transition, le régime équatorial de transition atténué et le régime de montagnes (Goula *et al.*, 2007) (Figure 11).

Le climat équatorial dans le Sud est caractérisé par un fort taux d'humidité qui est de 82% à Abidjan (Yao *et al.*, 2013), des températures qui tournent autour de 26 °C (1961-2016), et des précipitations abondantes qui atteignent à Abidjan 1806 mm et à Tabou 2233 mm (1961-2016). Ce climat est constitué de deux saisons sèches et deux saisons humides (Kouakou *et al.*, 2017). Le climat tropical, concerne les parties Nord (climat tropical pur) et Centre (climat tropical humide) du pays. Les températures annuelles tournent autour de 26,5 °C (1961-2016) au Nord et de 26 °C (1961-2016) au Centre avec des amplitudes thermiques quotidiennes relativement importantes que celles du Sud. Le taux d'humidité, inférieur à celui du Sud du pays, est de 63% à Korhogo et de 70% à Bouaké (Yao *et al.*, 2013). On relève dans ces zones deux saisons: l'une sèche, et l'autre pluvieuse (Kouakou *et al.*, 2017). Les précipitations moyennes annuelles enregistrées sont généralement inférieures à 1200 mm et atteignent 1149 mm à Korhogo (1961-2016) et 1102 mm à Bouaké (1961-2016). La région Nord est caractérisée, particulièrement, par la présence intermittente entre les mois de décembre et février d'un vent frais et sec, l'harmattan.

Le climat de montagnes est localisé à l'Ouest du pays avec des hauteurs pluviométriques annuelles importantes qui atteignent 1666 mm à Man et 2020 mm à Danané (1961-2016). Ce climat se caractérise par deux saisons, une pluvieuse et une autre sèche (Kouakou *et al.*, 2017). Les températures annuelles tournent autour de 25°C (1961-2016). L'humidité relative est très forte tout au long de l'année avec une valeur de 98% à Man (Kouamé, 2011).

Les variations climatiques entraînent, d'un point de vue climatique, une baisse de la pluviométrie, une hausse des températures, une faible humidité relative et un ensoleillement élevé (OMM, 2006). Ces dérèglements ont pour conséquence d'occasionner des sécheresses qui ont des impacts sur les régimes climatiques. Ces impacts se traduisent, entre autres, par une modification du nombre et du type de mois humides, donc du début, de la fin ou de la durée de la saison humide. Ce qui peut avoir des effets néfastes sur les activités agropastorales liées

directement à la pluie.

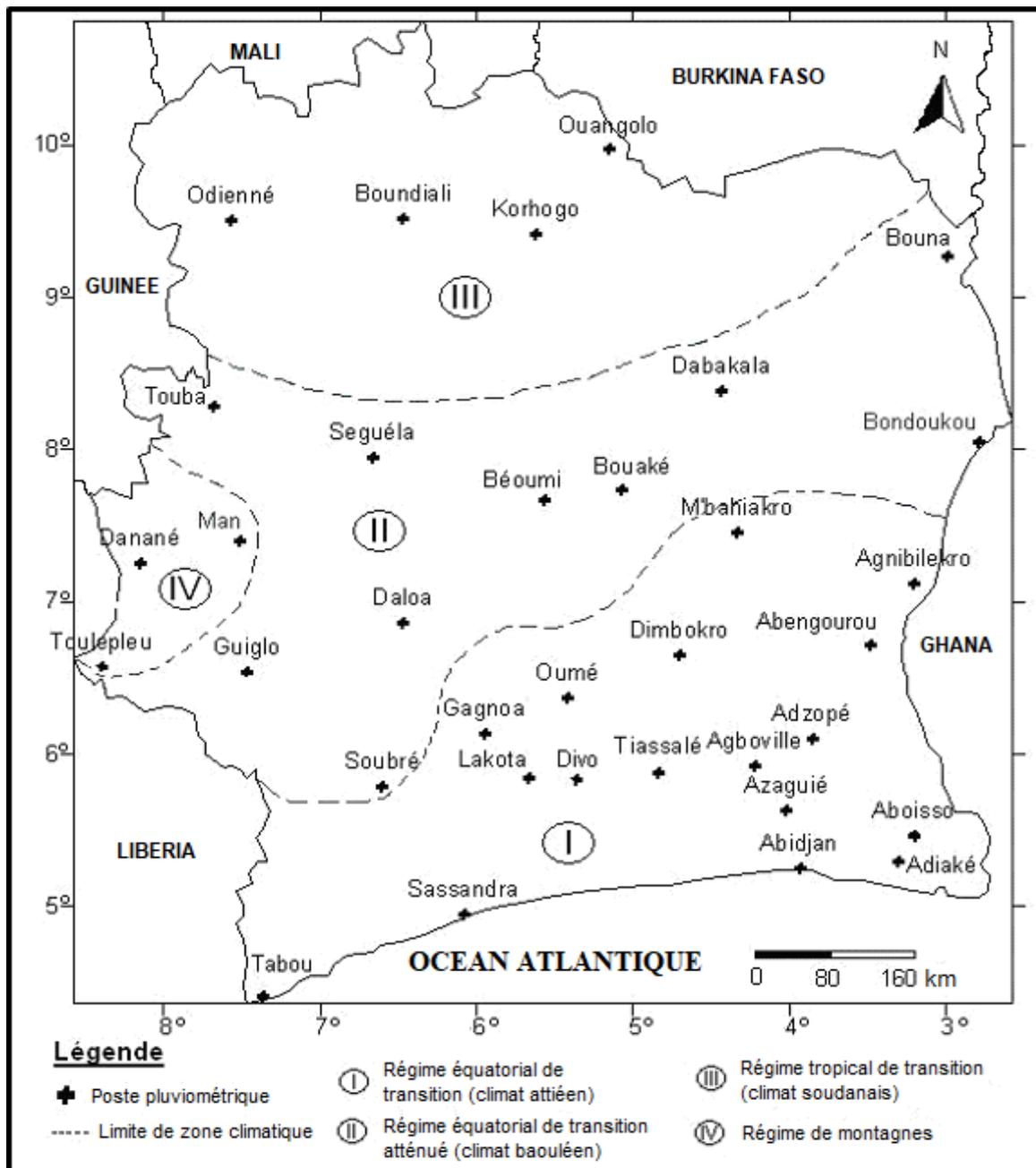


Figure 11 : Carte des principales zones climatiques de la Côte d'Ivoire avec les régimes pluviométriques associés (Goula *et al.*, 2007, modifié)

2.3. COUVERT VÉGÉTAL

En Côte d'Ivoire, deux grands types de paysages végétaux se partagent le territoire (Brou, 2005) (Figure 12) :

- un paysage forestier situé dans la moitié Sud du pays qui constitue le domaine guinéen. On y distingue quatre secteurs caractérisés par des groupements végétaux particuliers répondant à

des conditions écologiques différentes. Dans ce domaine guinéen, outre la forêt dense constituant la végétation primaire du littoral et de la région semi-montagneuse de Man, on trouve des prairies altimontaines (sommet du mont Nimba) et des savanes de basse côte entre Grand-Lahou et la lagune Aby ;

- un paysage de savane au Nord du pays qui constitue le domaine soudanais et qui est fait de forêt claire, de savane boisée, de savane arborée ou arbustive. Le domaine soudanais se subdivise en deux secteurs : le secteur sub-soudanais et le secteur soudanais. Le secteur sub-soudanais 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), Ferkessédougou, Nassian (au Sud de la réserve de Bouna), Farko.

Depuis le milieu du XX^e siècle, les massifs forestiers ivoiriens connaissent une dégradation fulgurante. La forêt dense humide, qui était évaluée à environ 16 millions d'hectares au début du siècle dernier (année 1900), est passée à 9 millions d'hectares en 1965, 3 millions d'hectares en 1991 et aujourd'hui, elle est estimée à environ 2,5 millions d'hectares (Traoré, 2018). La zone forestière est quasiment réduite à quelques lambeaux de forêts secondaires, isolés au sein d'une succession de plantations (villageoises ou industrielles) et de jachères. Il n'existe aucun secteur qui n'ait été touché par les activités humaines, y compris le domaine forestier permanent de l'État. Les travaux de Brou (2005) montrent que ce sont les activités anthropiques qui réduisent les surfaces végétales naturelles, par l'augmentation des surfaces cultivées ou exploitées. La déforestation s'est ralentie depuis une vingtaine d'années mais reste toujours largement supérieure aux possibilités de régénération de la forêt naturelle. De plus, le bois couvre une partie des besoins en énergie des ménages. L'utilisation domestique de combustibles ligneux, augmente avec l'accroissement de la population et constitue une cause majeure de déboisement, surtout en savane et au voisinage des centres urbains (Brou, 2005).

Les variations climatiques, et partant les sécheresses contribuent à l'aggravation de la dégradation forestière et donc de la modification de la couverture végétale par la provocation d'un stress hydrique des plantes, la réduction de la biomasse, la recherche de nouvelles terres cultivables, et par les phénomènes de feux de brousse. Ce qui a pour conséquence une baisse de la biodiversité végétale, et aussi animale quand la faune ne peut plus se nourrir. Certaines espèces de la pharmacopée et des systèmes de culture disparaissent progressivement (Bied-Charreton, 2009).

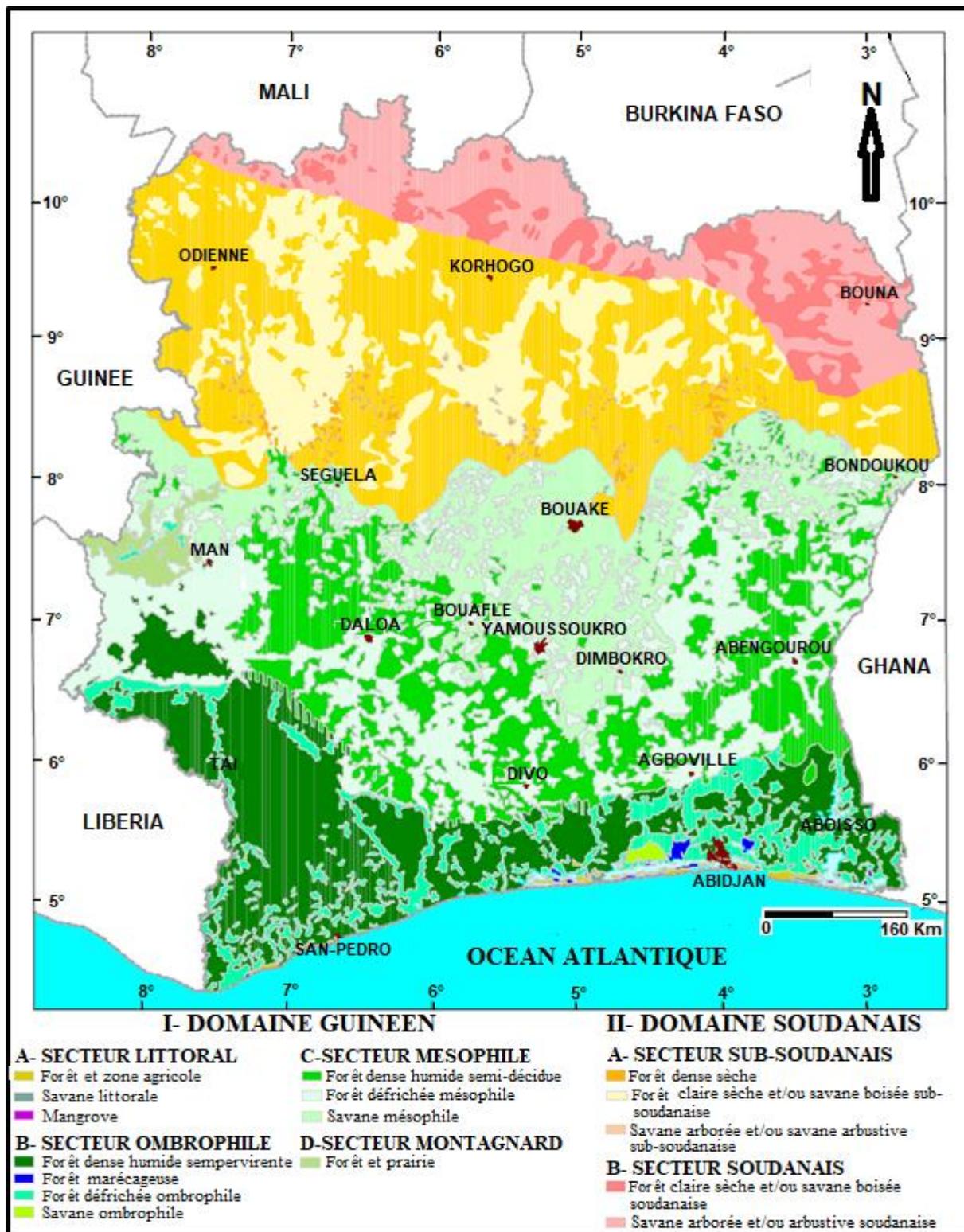


Figure 12 : Aperçu du couvert végétal de la Côte d'Ivoire (Brou, 2005)

2.4. HYDROGRAPHIE

Quatre grands fleuves de direction nord-sud irriguent le pays : la Comoé, le Bandama, le Sassandra et le Cavally. Le réseau hydrographique ivoirien est également constitué de plusieurs

petits fleuves côtiers à savoir le Tabou, le San-Pedro, le Niounirou, le Boubo, la Mé, la Tanoé, la Bia et l'Agneby, etc. Dans la partie côtière du pays, se développe également un important système lagunaire qui constitue une importante réserve en eau de surface : lagunes Aghien, Aby, Ebrié, etc. Il est aussi noté la présence de lacs qui se rencontrent sur l'ensemble du territoire dont certains sont artificiels. Les plus importants sont : le lac d'Ayamé à l'Est, le lac de Kossou au Centre, le lac de Buyo à l'Ouest, le lac de Soubré au Sud-Ouest. Des barrages hydroélectriques ont été installés sur ces lacs permettant le ravitaillement du pays en électricité et l'irrigation des localités environnantes pour les besoins agricoles. Le réseau hydrographique ivoirien est caractérisé par de grandes irrégularités saisonnières (Brou, 2005).

La Côte d'Ivoire compte onze (11) principaux bassins fluviaux (Figure 12) dont quatre (4) sont entièrement situés sur le territoire (Kouamé, 2011) : trois bassins côtiers (San Pedro, Boubo et Agnéby) et le bassin du Bandama (2^{ème} plus grand fleuve du pays dont le bassin a une superficie de 97 000 km² soit environ 30% de la superficie du pays). Les sept (7) autres bassins versants sont en partage avec les pays limitrophes (Figure 13):

- le Nuon et le Cavally sont en partage avec le Liberia et la Guinée ;
- le Sassandra est en partage avec la Guinée ;
- le Niger est en partage avec le Mali et la Guinée ;
- la Comoé et la Volta-Noire sont en partage avec le Burkina et le Ghana ;
- la Bia/Tanoé est en partage avec le Ghana.

À l'échelle du territoire ivoirien, les bassins fluviaux intérieurs (principaux et secondaires) drainent le plus souvent plusieurs régions administratives. Autrement dit, ils sont en partage entre différentes communautés. C'est l'exemple du bassin du Bandama qui draine six régions administratives à savoir les régions administratives du Denguélé, du N'zi, de l'Iffou, du Moronou, des Lacs et des Lagunes.

Les variations climatiques peuvent entraîner un déficit hydrique provoquant un tarissement des eaux de surface, une réduction des écoulements, une réduction du niveau des crues et une modification des régimes hydrologiques saisonniers des cours d'eau. Ces bouleversements ont des impacts significatifs dans la distribution saisonnière des périodes de basses eaux et de hautes eaux des cours d'eau et donc sur la disponibilité des ressources en eau (Kouamé, 2011). Cela affecte négativement la production agricole, les réserves superficielles et souterraines des ressources en eau et même la production d'électricité. Ce déficit hydrique implique donc de nombreux problèmes socio-économiques dont les effets sont souvent difficiles à résorber.

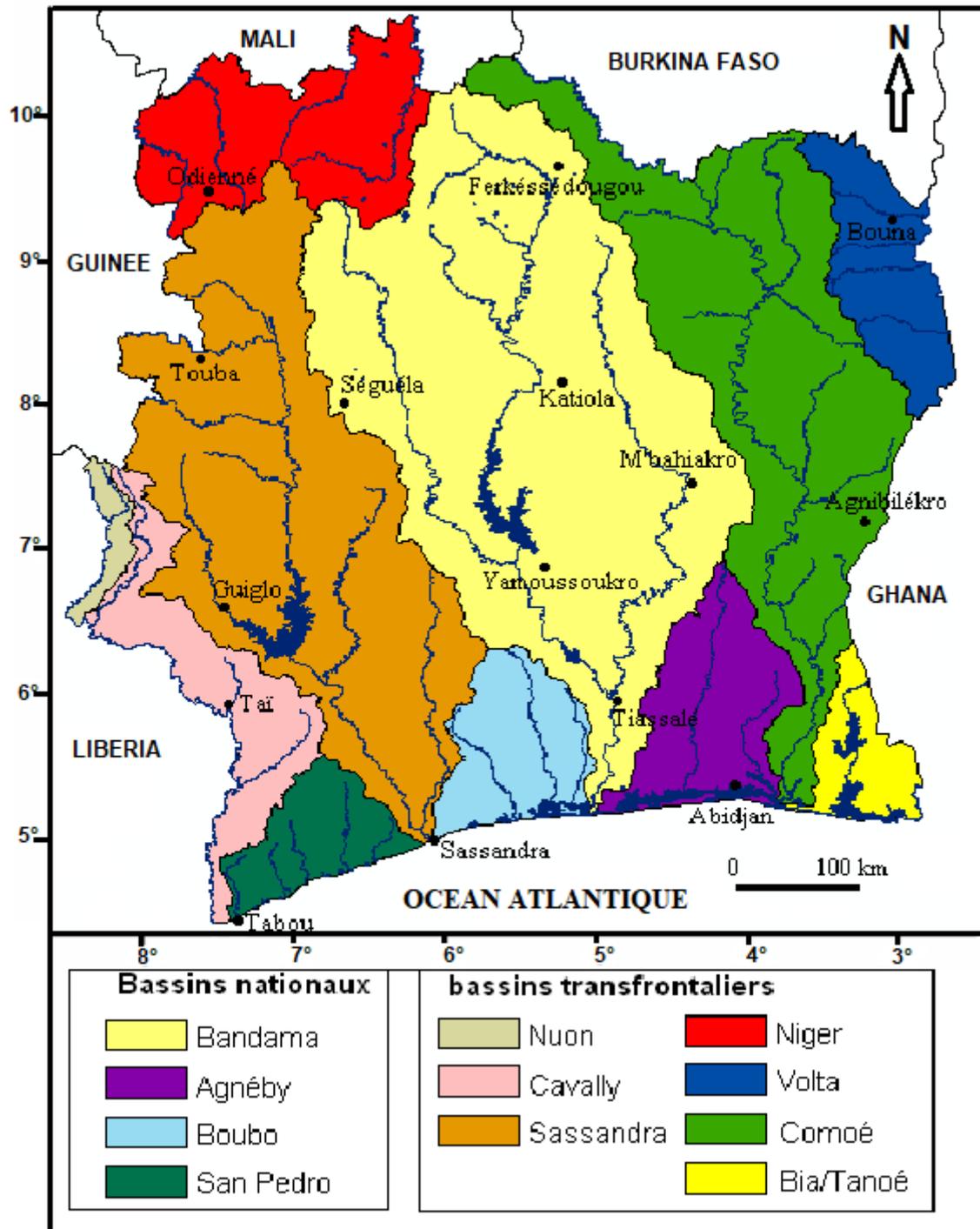


Figure 13 : Principaux bassins versants de la Côte d'Ivoire (Kouamé, 2011)

2.5. GÉOLOGIE

En Côte d'Ivoire, les premiers travaux à caractère géologique débutent en 1907 (Yacé, 2002). Ces travaux pionniers ont été suivis à partir de 1960, afin d'avoir une idée précise sur les grands traits de la géologie de la Côte d'Ivoire, par de nombreuses études et recherches géologiques, géochimiques, minières et géochronologiques dont les plus récentes sont celles de Houssou

(2013), Ouattara et Koffi (2014), Gnanzou, (2014), Ouattara (2015), Coulibaly *et al.* (2017), Adingra *et al.* (2018), etc. Située dans la partie centre-sud du craton Ouest Africain, la Côte d'Ivoire est limitée par le bassin de Taoudéni au Nord, l'Océan Atlantique au Sud, les Rockélides à l'Ouest et le bassin de la Volta à l'Est. La géologie de la Côte d'Ivoire est marquée par un ensemble formé de deux unités géologiques que sont le socle au Nord (97,5% de la superficie du territoire) et le bassin sédimentaire situé au Sud (2,5%) (figure 14).

L'architecture géologique du socle est caractérisée par deux domaines Précambriens d'âges, d'extensions, et de caractéristiques pétrographiques et structurales distincts. Ces deux domaines sont séparés par la zone faillée du Sassandra d'orientation N-S, qui est riche en mylonites. Il s'agit du domaine Archéen à l'Ouest appelé « Kénéma-Man », constitué de complexes granulites et de granites archéens et du domaine Paléo-protérozoïque dit « Baoulé-Mossi » à l'Est, composé de roches « Birimiennes » principalement des volcanites (tholéitiques et calco-alcalins), des granitoïdes, des volcano-sédiments et sédiments (Tagini, 1972 *in* Ouattara et Koffi, 2014 ; Gnanzou, 2014). Les formations géologiques du domaine archéen, structurées au cours des mégacycles Léonien (3500–2900 Ma) et Libérien (2900-2500 Ma), se trouvent essentiellement dans la région de Man et occupent 20% du socle. Celles du domaine Paléo-protérozoïque, dites formations Birimiennes et qui occupent le reste du socle (77,5%), ont été structurées au cours du mégacycle éburnéen (2500-1500 Ma) (Gnanzou, 2014).

Il existe un autre domaine où coexistent les formations géologiques des deux grands domaines (domaine Archéen et domaine Paléo-protérozoïque): c'est le domaine SASCA (SASSandra-CAvally). Ce domaine est situé dans le Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire depuis Toulepleu, Soubré, Sassandra, Taï jusqu'au fleuve Cavally et est drainé par les fleuves Sassandra et Cavally. Sa particularité est qu'on y trouve à la fois des roches issues de l'orogénèse Libérienne et des orogénèses les plus récentes (Burkinienne et Eburnéenne) (Tagini, 1972 *in* Ouattara et Koffi, 2014 ; Gnanzou, 2014). Les formations rencontrées sont regroupées en trois principales unités d'âges compris entre 1550 et 2100 Ma. Ce sont :

- l'unité de Hana-Lobo comportant des schistes, des micaschistes, des arkoses, des quartzites, des tufs métamorphiques, des métarhyolites, des amphiboles, etc.;
- l'unité de Davo constituée de roches métamorphiques, les micaschistes à deux micas et staurodites et les tufs métamorphiques;
- l'unité de Louga-Kounoukou comportant des métagabbros, des micaschistes à deux micas, des conglomérats, des tufs métamorphiques, des amphibolites.

Outre les formations de ces trois unités, on distingue trois autres ensembles antérieurs à 2500 Ma (cycle libérien):

- les formations de Grabo constituées de gneiss, de micaschistes et de migmatites ;
- les formations de Kabiadioké-Balmer comprenant essentiellement des quartzites ;
- les formations de Tabou-Djidoubaye renfermant des gneiss et des leptynites.

Le bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire, disposé le long de la façade atlantique, présente deux parties de taille inégale :

- une partie émergée, longue d'environ 400 Km sur une largeur de 40 Km, s'étend de Fresco (à l'est de la ville de Sassandra) à Axim au Ghana ;
- une partie immergée, représentant la plus grande partie du bassin sédimentaire, s'étend sur le plateau continental.

Le bassin sédimentaire, composé de formations post-éburnéennes d'âge crétacé-quaternaire, est marqué par d'importantes variations de faciès des formations lithologiques [(Tastet, 1979 ; Aka, 1991) *in* Kouamé, 2013]. Le Continental Terminal, formation d'âge mio-pliocène est caractérisé par une stratification lenticulaire, des sables grossiers, des argiles bariolées, des grès ferrugineux et des minerais de fer. Sur le plan paléogéographique, du Crétacé au Quaternaire actuel, trois épisodes de transgression sont bien connus. L'Albo-Aptien est constitué d'argiles et de grès du Crétacé inférieur. Le Maestrichtien-Eocène inférieur comprend les argiles glauconieuses, les argiles et les sables. Le Miocène inférieur est constitué de marnes noires à reliques de requins, d'argiles bariolées et de lignites. Les formations datant du Quaternaire sont des sables modérément argileux, azoïques et continentaux d'âge antéholocène (Tastet, 1979 *in* Kouamé, 2013). Ce sont des sables fins à grossiers de nature propre et plus homogène que ceux du Continental Terminal. Le bassin sédimentaire est, par ailleurs, traversé d'Ouest en Est par un accident très important appelé accident majeur ou la faille des lagunes avec un rejet de près de 3000 m (Aghui et Biémi, 1984 *in* Konaté, 2018).

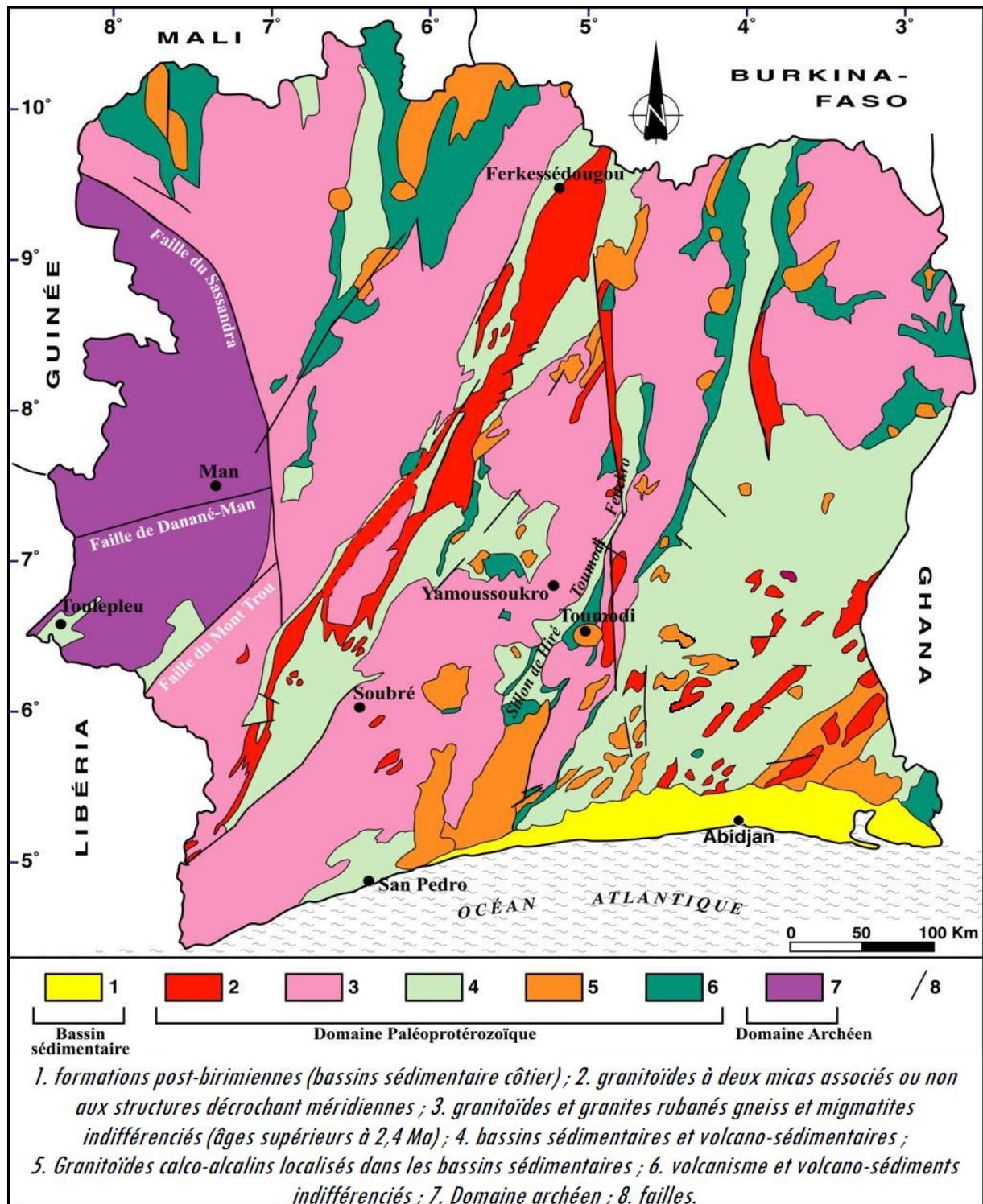


Figure 14 : Aperçu géologique de la Côte d'Ivoire (Tagini, 1972, modifié in Ouattara et Koffi, 2014)

2.6. HYDROGÉOLOGIE

En Côte d'Ivoire, les réservoirs d'eaux souterraines sont de deux types, à savoir les réservoirs de socle et les réservoirs de bassin sédimentaire. Les réservoirs de socle se rencontrent dans les

horizons d'altérites ainsi que dans les séries volcano-sédimentaires et granito-migmatitiques (Sorokoby *et al.*, 2010 ; Kouassi *et al.*, 2014). Les réservoirs d'altérites varient selon la nature du socle. Ainsi, sur les granitoïdes, ils sont composés, de haut en bas, de cuirasse latéritique, sables argileux et arènes grenues dont l'épaisseur peut atteindre 50 m. Les arènes grenues constituent les niveaux les plus productifs et donc les plus recherchés. Les réservoirs d'altérites des séries volcano-sédimentaires sont en général les plus épais et peuvent atteindre 100 m. Les séries volcano-sédimentaires sont des complexes schiste-gréseux très hétérogènes à nombreux plis isoclinaux, dont les flancs sont généralement redressés. Leur perméabilité est généralement faible et donc les ressources qu'elles renferment sont limitées. Cependant, dans les cas où la roche présente une intercalation détritique ou volcano-détritique jouant le rôle de drain, ces réservoirs peuvent acquérir une importante fonction capacitive en profondeur (Biémi, 1992 *in* Kouassi *et al.*, 2014). Les réservoirs des granito-migmatites sont caractérisés par un nombre élevé des arrivées d'eau dans les forages profonds réalisés directement dans le socle (Biémi, 1992 *in* Kouassi *et al.*, 2014). L'eau circule dans les roches cristallines à travers les réseaux de fractures à fonction drainante, généralement bien alimentés et capables de fournir des débits assez importants quand ils sont bien captés par les forages (Sorokoby *et al.*, 2010).

Le bassin sédimentaire côtier de la Côte d'Ivoire est composé d'un nombre important d'aquifères homogènes et perméables. Sur ce bassin, les réservoirs ayant un rôle important au niveau hydrogéologique sont au nombre de trois (Aghui et Biémi, 1984 *in* Konaté, 2018), à savoir les aquifères du Quaternaire, les aquifères du Continental Terminal d'âge mio-pliocène et les aquifères du Maestrichtien d'âge crétacé supérieur. Deux niveaux aquifères existent dans les sédiments du Quaternaire : les sables marins grossiers (nappe du Nouakchottien) et les sables fins à grossiers (nappe de l'Oogolien). Ces nappes libres sont très vulnérables à la pollution, car leurs surfaces piézométriques sont très proches de la surface du sol (NP : 0-1 m sous le sol). La perméabilité des nappes du Quaternaire varie de 10^{-5} à $4 \cdot 10^{-3}$ m/s avec un débit faible de $2 \text{ m}^3/\text{h}$ à $22 \text{ m}^3/\text{h}$ (Loroux, 1978 *in* Konaté, 2018). Les formations de sables grossiers fluviales et celles des argiles sableuses représentent l'essentiel de l'aquifère du Continental Terminal. La nappe du Continental Terminal présente des réserves moyennes estimées à 12 500 millions de m^3 avec un apport annuel par infiltration de 310 millions de m^3 (Loroux, 1978 *in* Konaté, 2018). C'est la plus importante réserve d'eau souterraine de la région d'Abidjan et de la Côte d'Ivoire avec des nappes qui affichent une perméabilité comprise entre 10^{-6} et 10^{-3} m/s avec un débit variant de 7 à $338 \text{ m}^3/\text{s}$ [(Loroux, 1978 ; Aghui et Biémi, 1984 ; Jourda, 1987) *in* Konaté, 2018]. L'aquifère du Maestrichtien est constitué de bancs de calcaires gréseux, peu fissurés, à gros grains de quartz roulés et surmonté de niveaux coquillés d'âge crétacé supérieur (Loroux, 1978

in Konaté, 2018). Le réservoir est un biseau qui s'insère du côté Nord de la faille de bordure du bassin sédimentaire côtier, entre le socle et les sables du Continental Terminal dont il n'est pas vraiment séparé (Jourda, 1987 *in Konaté, 2018*). La nappe du Maestrichtien est située à 200 m de profondeur dans les bancs calcaires du Maestrichtien.

Les variations climatiques provoquent une réduction de l'infiltration, de la percolation profonde et donc de la recharge de la nappe souterraine (Bied-Charreton, 2009). Ce qui entraîne un épuisement des réservoirs d'eau souterraine, et par conséquent a des impacts significatifs sur l'approvisionnement en eau des populations.

2.7. SOLS

Divers sols qui se résument en quatre types sont rencontrés en Côte d'Ivoire (Roose et Cheroux, 1966 *in Konaté, 2018* ; Perraud, 1971 *in Kouamé, 2011* ; Koudou, 2013 ; Soro, 2014 ; Balliet, 2018) (Figure 14) :

- (i) les sols ferralitiques, sur roches granitiques et schisteuses qui couvrent la majeure partie du territoire ivoirien. Ils sont notamment présents dans l'Est, l'Ouest, le Sud, les zones forestières, les zones de savanes soudanaises ou sub-soudanaises, les aires septentrionales;
- (ii) les sols ferrugineux à carapaces et cuirasses latéritiques qui se rencontrent sur des roches granitoïdes, ont leur extension majeure dans le Nord-Est du pays, autour de la localité de Bouna et dans l'interfluve entre le haut N'Zi et la haute Comoé;
- (iii) les sols bruns eutrophes sur roches basiques occupent principalement les chaînes de colline du complexe volcano-sédimentaire et sont fréquemment juxtaposés ;
- (iv) les sols hydromorphes dans les zones fluvio-lagunaires sont localisés dans les zones à écoulement difficile (bas-fonds), dans les plaines d'inondation des cours d'eau et dans les sables littoraux où la nappe phréatique peut varier.

La dénudation des sols, due en partie aux sécheresses, peut entraîner l'accroissement de leur sensibilité à l'érosion. Ce qui a pour impact la perte de capacité des sols à stocker l'eau aggravant ainsi les risques de crues et d'inondation (Bied-Charreton, 2009 ; Kouamé, 2011).

2.8. POPULATIONS ET ACTIVITÉS SOCIO-ÉCONOMIQUES

2.8.1. DÉMOGRAPHIE

La population ivoirienne, comme dans la quasi-totalité des pays en développement, connaît une

croissance rapide. De 1965 à 2014, la population ivoirienne a sensiblement augmenté (Tableau IV). Selon les statistiques, elle était estimée en 1965 à 4 100 000 âmes (INS, 2014). Elle a atteint 6 709 600 habitants en 1975, 10 815 694 habitants en 1988 et 15 366 672 habitants en 1998 (INS, 2014). Le dernier recensement officiel de 2014 (INS, 2014) a estimé cette population à 22 671 331 habitants avec une densité démographique moyenne de 70,3 habitants/km². L'analyse du tableau IV montre que, l'évolution temporelle de la population ivoirienne depuis l'indépendance connaît une croissance accélérée. Elle a, globalement, quintuplé en l'espace de cinq décennies avec un facteur multiplicateur de 5,5. Cet accroissement rapide est en partie imputable à l'immigration continue de populations étrangères provenant de toute l'Afrique et majoritairement des pays voisins membres de la Communauté Economique Des États de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO). À ceux-ci, s'ajoutent des libano-syriens, des asiatiques et des européens.

Tableau IV : Taille de la population ivoirienne de 1965 à 2014 (INS, 2014)

Indicateurs	Années					Facteur multiplicateur (50 ans)
	1965	1975	1988	1998	2014	
Population totale	4 100 000	6 709 600	10 815 694	15 366 672	22 671 331	5,5
Population urbaine	950 000	2 146 293	4 220 535	6 529 138	11 408 413	12
Population rurale	3 150 000	4 563 307	6 595 159	8 837 534	11 262 918	3,6

La population ivoirienne est en outre multiethnique. Les nationaux d'origine sont constitués d'une soixantaine d'ethnies regroupées en cinq grands groupes ethniques. Ces groupes sont localisés dans les régions du pays selon les proportions suivantes (INS, 2014) :

- au Centre et à l'Est, le groupe akan, représentant 28,9% de la population ;
- au Nord, le groupe voltaïque (Gur) ou sénoufos représentant 16,1% de la population ;
- au Nord-Ouest, le groupe mandé du Nord ou malinké représentant 14,5 % de la population ;
- au Sud-Ouest et au Centre-Ouest, le groupe krou, 8,5 % de la population ;
- à l'Ouest, le groupe mandé du Sud, 6,9 % de la population.

L'environnement humain est donc caractérisé par une population hétérogène et cosmopolite constituée de 51,7% d'hommes et 48,3% de femmes avec 75,8 % de nationaux et 24,2 %

d'étrangers (INS, 2014).

Les particularités naturelles à l'origine de fortes disparités dans la mise en valeur de l'espace rural ont entraîné une inégale répartition de cette population sur l'ensemble du pays. En effet, la population est très forte au niveau de la zone forestière au Sud avec 75,5% de la population totale et faible au niveau de la zone de savane au Nord avec 24,5% (INS, 2014). Cette situation s'explique par les migrations des populations des savanes vers les régions forestières à cause de l'économie de plantation (Brou, 2005). Les variations s'observent donc d'une région à l'autre, mais également entre les différentes zones du pays. Au détriment de la zone Nord, le Sud, l'Ouest et l'Est sont en effet, en plus des étrangers, fortement peuplés d'allogènes dont le déplacement est dicté par la recherche de terres arables ou propices au développement des cultures de rente comme le café et le cacao (Brou, 2005).

2.8.2. ACTIVITÉS SOCIO-ÉCONOMIQUES

La Côte d'Ivoire indépendante en 1960 a choisi, comme axe majeur pour son développement économique et social, la production agricole. Cette priorité apparaît clairement dans les différents plans quinquennaux de 1960 à 1985 où l'agriculture est présentée comme le premier pilier du développement (Brou, 2005). A l'heure actuelle, l'agriculture continue toujours de représenter l'activité économique dominante. En effet, elle représente en moyenne plus de 22% du PIB depuis 2012 et constitue la principale source de revenu et d'emploi pour plus de 60 % de la population active (MINADER, 2017). L'extraction d'or, de diamant, de nickel, de fer et autres minéraux, fait aussi partie des activités économiques présentes sur le territoire ivoirien. Le pays produit également le gaz et le pétrole qui contribuent pour environ 6 % au PIB (INS et ICF International, 2012). L'économie nationale semble assez bien diversifiée. Le secteur primaire qui a recourt directement aux ressources naturelles pour l'agriculture, la sylviculture et la pêche ou la chasse représente environ 30% du PIB national (MINEDD, 2020). Le secteur secondaire, qui comprend les activités industrielles, énergétiques et manufacturières qui produisent des biens finis, représente 21% du PIB. Le secteur tertiaire ou secteur des services représente 49% de l'économie. Près de la moitié du PIB de la Côte d'Ivoire (44%) repose sur l'exportation, dont le cacao est le principal produit. Tous les produits d'exportation de la Côte d'Ivoire sont directement ou indirectement liés aux ressources naturelles. Il existe trois principaux secteurs : l'agriculture, la foresterie et les industries extractives (MINEDD, 2020). L'agriculture en Côte d'Ivoire est formée de deux grandes composantes :

- l'agriculture d'exportation constituée principalement de cultures pérennes (café, cacao, hévéa,

palmier à huile, anacarde, etc.), de cultures annuelles (coton) et d'autres productions (noix de cola, etc.) ;

- l'agriculture vivrière composée de quatre grandes familles de produits agricoles qui sont les céréales (riz, maïs, sorgho, fonio, mil, etc.), les racines et tubercules (ignames, manioc, taro, gingembre, patate douce, etc.), les cultures protéagineuses et maraîchères (oignon, laitue, piment, gombo, etc.) et les fruits et légumes (poivron, ananas, coco, etc.).

L'économie ivoirienne repose essentiellement sur le binôme Café-Cacao. La Côte d'Ivoire est 1^{er} producteur mondial de cacao (41% de la production mondiale) et 3^{ème} producteur mondial de café. Selon le Programme national d'investissement agricole, la production vivrière commercialisée en Côte d'Ivoire représente plus de 10,7 millions de tonnes par an. En 2015, elle a atteint 15,9 millions de tonnes, y compris la production du riz paddy (MINADER, 2017). Avec de telles quantités de cultures diverses produites, la Côte d'Ivoire devrait atteindre l'autosuffisance alimentaire. Cependant, on note une mauvaise répartition de la production et de la disponibilité des cultures tout au long de l'année du fait de la dépendance au climat (INS et ICF International, 2012). En effet, l'économie de la Côte d'Ivoire repose essentiellement sur l'agriculture de type pluviale (90% des pratiques agricoles selon MINEDD, 2020) donc fortement tributaire des conditions climatiques, d'où sa vulnérabilité face à la sécheresse. L'impact agricole de cette sécheresse se traduit par l'appauvrissement des terres, la modification de l'écosystème et la disparition de l'humus (MINEDD, 2020).

CONCLUSION PARTIELLE

De par sa position géographique, la Côte d'Ivoire (située entre 4°30' et 10°30' de latitude Nord et 2°30' et 8°30' de longitude Ouest) a un climat sensible aux modifications de l'Océan Atlantique et du Front Inter Tropical. Le déplacement de ce Front, associé aux conditions orographiques locales, permet de distinguer trois types de climat qui se côtoient sur le territoire ivoirien, à savoir le climat tropical voire tropical humide au Nord et au Centre, le climat équatorial au Sud et le climat de montagnes à l'Ouest. La Côte d'Ivoire est couverte par deux grandes végétations : un paysage forestier et un paysage de savane. Le réseau hydrographique est constitué de plusieurs fleuves, lagunes et lacs repartis en quatre grands bassins : les bassins de la Comoé, du Cavaly, du Cassandra et du Bandama. Les formations géologiques sont dominées par les granitoïdes et des volcano-sédiments. Ces formations géologiques sont recouvertes par des sols essentiellement ferrallitiques. Du point de vue démographique, le peuplement actuel de la Côte d'Ivoire relève de facteurs historiques (migrations des différents

peuples) et de facteurs économiques qui ont engendré en partie le rythme accéléré de la croissance démographique du pays et la répartition spatiale de la population. L'économie ivoirienne repose essentiellement sur l'agriculture.

DEUXIÈME PARTIE:

MATÉRIEL ET MÉTHODES

CHAPITRE 3:
DONNÉES ET OUTILS

3.1. DONNÉES UTILISÉES

Les présents travaux s'appuient sur une importante base de données numériques couvrant l'ensemble de la zone d'étude. Ces données sont issues du réseau national de mesures météorologiques de la Côte d'Ivoire et de réanalyses. Deux fichiers différents de données climatiques, établis et mis à notre disposition par la direction de la Société de Développement et d'Exploitation Aéroportuaire, Aéronautique et Météorologique (SODEXAM), ont été utilisés dans cette étude. Un premier fichier de séries d'observation *in situ* et un second fichier de données issues de réanalyses.

3.1.1. DONNÉES D'OBSERVATION *IN SITU*

Les données de pluies mensuelles et de températures moyennes mensuelles utilisées concernent quarante-sept (47) postes de mesures dont trente-cinq (35) stations pluviométriques et douze (12) stations synoptiques réparties sur toute l'étendue du territoire (Figure 15).

Les données utilisées (pluies et températures) couvrent globalement la période 1941-2016. Du fait de la crise politico-militaire qu'a connu le pays, la période 2002-2012 a été sans observation dans les stations des ex-zones CNO (Centre, Nord et Ouest) (Figure 15). Quant aux autres stations, les données ont été normalement collectées.

3.1.2. DONNEES DE RÉANALYSES

Les données de réanalyses sont des données issues d'un modèle numérique de prévision du temps selon un système complexe d'assimilation de données provenant de différentes sources (stations, radio-sondages, observations par bateau et par avion, estimations satellitales, etc.) (Kalnay *et al.*, 1996 in Pham, 2008). Plusieurs travaux ont montré la cohérence de ces données sur l'Afrique de l'Ouest par rapport aux données d'observation *in situ* [(Mo et Higgins, 1996; Diedhiou *et al.*, 1999 et Janicot *et al.*, 2001) in Bouali, 2009].

Ces données qui concernent les pluies mensuelles et les températures moyennes mensuelles, sur la période 1983-2016 au niveau de l'ensemble des stations étudiées, ont été fournies par la SODEXAM. Elles ont été utilisées pour le comblement des lacunes sur la période 1983-2016 au sein des séries de pluies et de températures d'observation *in situ*, surtout pour les stations de l'ex zone CNO sur la période 2002-2012, permettant ainsi d'obtenir des séries complètes globalement sur la période 1941-2016. En effet, le taux de lacunes observé dans les différentes séries pluviométriques (présentant des lacunes) varie entre 0,3 et 23,2% (Tableau V). Pour les

températures, les lacunes sont observées uniquement au niveau des stations de l'ex zone CNO et concernent la période 2002-2012. Elles représentent 14,4% pour les séries qui s'étendent sur la période 1941-2016 (Bouaké, Man, Odienné) et 19,6% pour celles qui s'étendent sur la période 1961-2016 (Daloa, Korhogo). La fiabilité et l'intérêt à utiliser de telles données ont fait l'objet de nombreuses études en Côte d'Ivoire qui montrent que ces données sont très bien corrélées à celles mesurées au sol (Koffi, 2007 ; Konaté, 2018 ; etc.). La condition de taille d'échantillon climatique statistiquement admise d'au moins 30 années de données préconisées par l'OMM (2012) est satisfaite.

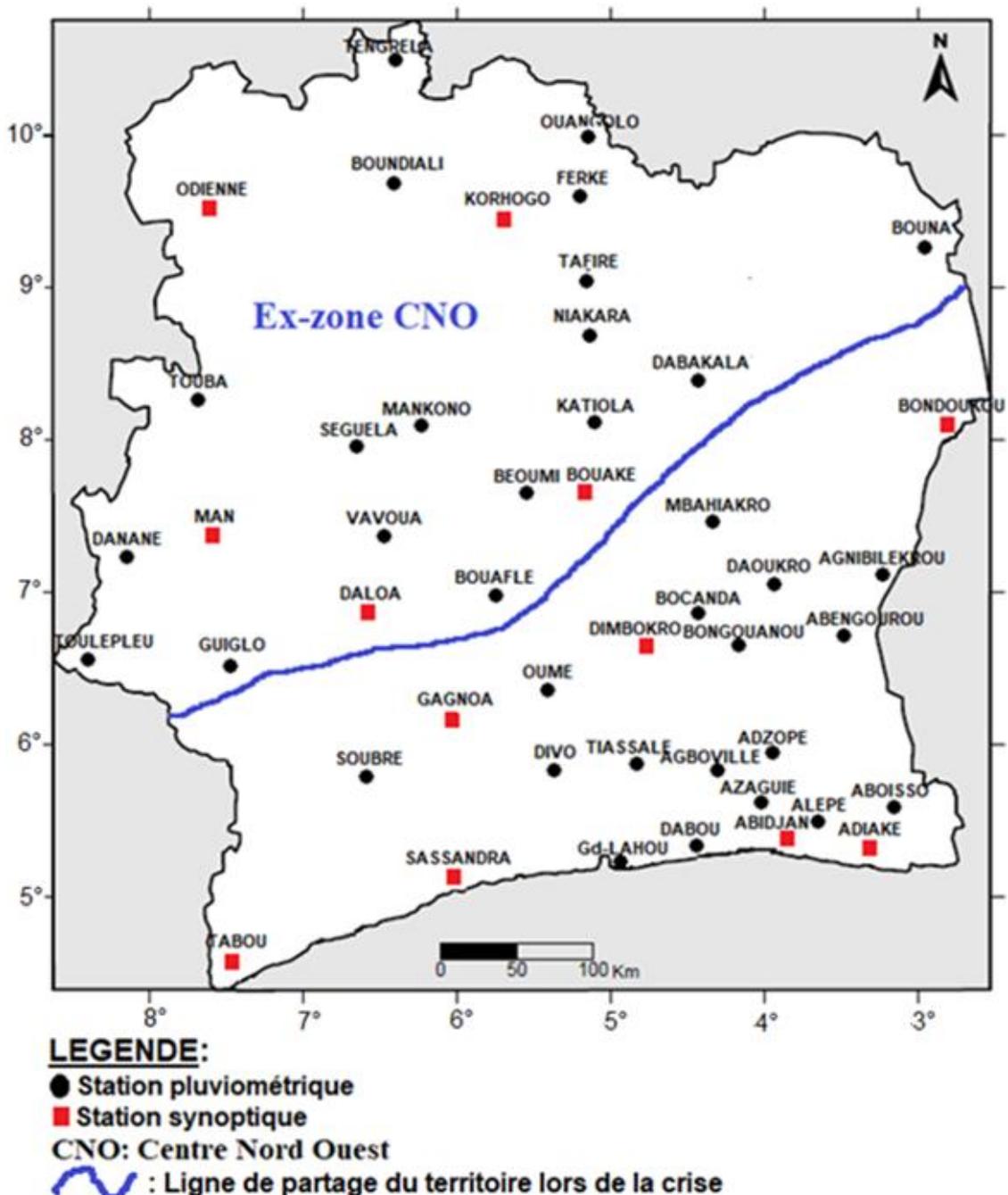


Figure 15 : Carte de localisation des stations pluviométriques et synoptiques retenues

3.2. CRITIQUE ET ANALYSE DES DONNÉES

À l'instar de la plupart des pays d'Afrique de l'Ouest, le manque de suivi permanent des postes météorologiques et la dégradation des appareillages de mesure au fil des années font apparaître de nombreuses années sans mesures. Aussi, les données recueillies sont-elles entachées d'erreurs, qui tiennent autant au système d'acquisition lui-même qu'au caractère individuel de la mesure ou de l'enquête, individualité éminemment propre à engendrer des hétérogénéités (Kouassi, 2007). Cette constatation impose une critique des données recueillies, suivie d'éviction quand elles sont jugées s'éloigner de la réalité (donc erronées) et de corrections prudentes quand la nature systématique des erreurs détectées l'autorise.

3.2.1. CHOIX DES STATIONS PLUVIOMÉTRIQUES ET SYNOPTIQUES

Le choix des stations pluviométriques et synoptiques a été dicté par la nécessité de disposer de données d'observation *in situ* de bonne qualité sur une longue période. Les stations retenues sont celles qui ont présenté un taux de lacunes relativement faible (moins de 25%), une bonne qualité de mesures et une disponibilité des données en terme de longueur des relevés couvrant la période 1961-2016 en général, et la période 1941-2016 en particulier (Tableau V). Ces stations ont également été sélectionnées en fonction de leur répartition sur l'ensemble du pays.

Tableau V : Taux de lacunes mensuelles des stations pluviométriques retenues (%)

STATIONS	PERIODE D'OBSERVATION	LACUNE MENSUELLE (%)
Adzopé (S1)	1961-2016	1,0
Aboisso (S2)	1961-2016	2,5
Alépe (S3)	1961-2016	3,1
Gagnoa (S4)	1941-2016	0,0
Tiassalé (S5)	1961-2016	0,0
Daloa (S6)	1961-2016	19,6
Bouaflé (S7)	1961-2016	19,8
Bocanda (S8)	1961-2016	0,0
Adiaké (S9)	1941-2016	0,0
Mankono (S10)	1961-2016	20,8
Azaguié (S11)	1961-2016	3,6
Vavoua (S12)	1961-2016	22,3
Dimbokro (S13)	1941-2016	0,0
Bongouanou (S14)	1961-2016	0,0
Bondoukou (S15)	1961-2016	0,0
Odienné (S16)	1941-2016	14,4
Korhogo (S17)	1961-2016	23,2
Bouake (S18)	1941-2016	14,4
Sassandra (S19)	1941-2016	0,0
Agnibilékrou (S20)	1961-2016	0,0
Man (S21)	1941-2016	14,4
Grand-lahou (S22)	1961-2016	3,3
Soubré (S23)	1961-2016	0,0
Agboville (S24)	1961-2016	9,0
Ouangolo (S25)	1961-2016	20,0
Abengourou (S26)	1961-2016	3,6
Abidjan (S27)	1941-2016	0,0
Guiglo (S28)	1961-2016	21,7
Katiola (S29)	1961-2016	19,6
Tafiré (S30)	1961-2016	20,0
Danané (S31)	1961-2016	19,6
Séguéla (S32)	1961-2016	22,9
M'bahiakro (S33)	1961-2016	6,4
Bouna (S34)	1961-2016	21,8
Boundiali (S35)	1961-2016	20,3
Tengrela (S36)	1961-2016	22,2
Dabou (S37)	1961-2016	7,0
Daoukro (S38)	1961-2016	9,7
Dabakala (S39)	1961-2016	19,6
Divo (S40)	1961-2016	0,3
Tabou (S41)	1941-2016	0,0
Touba (S42)	1961-2016	22,9
Niakara (S43)	1961-2016	19,6
Oumé (S44)	1961-2016	0,0
Ferké (S45)	1961-2016	19,6
Toulépleu (S46)	1961-2016	19,6
Béoumi (S47)	1961-2016	20,3

3.2.2. ANALYSE DE LA FIABILITÉ DES DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES ET THERMOMÉTRIQUES

Les études des variations climatiques à long terme doivent s'appuyer sur des séries exemptes de données manquantes et d'hétérogénéité (Bigot, 2002).

Cette affirmation constitue le fondement même sur lequel repose la crédibilité de toute analyse sur les variations climatiques. Comme il n'existe pas de série de données parfaitement fiables et continues, une part d'incertitude demeurera toujours dans la quantification des évolutions climatiques. Pour minimiser cette « inconnue », les statistiques permettent de construire des outils capables de vérifier la fiabilité des données et de corriger les valeurs aberrantes ou combler les lacunes d'observations. La validation statistique des séries temporelles est donc le préalable fondamental pour établir une recherche objective à partir des bases de données climatiques provenant d'origines diverses (Kouassi, 2007).

3.2.2.1. Comblement des lacunes dans les séries pluviométriques et thermométriques

Une des étapes préalables de l'étude a consisté au comblement des lacunes au pas de temps mensuel, des données pluviométriques et de température de certaines stations. En remontant dans le temps, le taux de remplissage des bases de données présente souvent des faiblesses qu'il faut combler artificiellement. La reconstitution s'effectue à partir de diverses procédures, fondées sur des lois mathématiques et les relevés des stations voisines, qui permettent ainsi d'analyser de longues séries de données et d'en tirer le maximum d'information (Laborde, 1998 *in* Kouame, 2011 ; Ribeiro *et al.*, 2016). La méthode de comblement utilisée dans la présente étude est basée d'une part sur les données de réanalyses pour combler les lacunes au sein des séries climatiques sur la période 1983-2016, et d'autre part sur les données de stations voisines utilisées pour le comblement sur la période avant 1983, surtout au niveau des séries pluviométriques, à travers la méthode du vecteur régional (Kouassi, 2007 ; Kouamé, 2011 ; Koudou, 2013). La méthode du vecteur régional, qui répond au double objectif de critique et de synthèse de l'information, s'applique à tout ensemble de séries d'observations d'une même variable, liées statistiquement entre elles par des rapports de proportionnalité (Kouamé, 2011). Elle s'applique en particulier à l'information climatique régionale (ensemble de séries chronologiques d'observations collectées en des stations voisines d'une même région géographique) (Kouassi, 2007). À partir de la moyenne de référence de chaque région climatique, appelée "*vecteur*", il devient possible de reconstituer les données manquantes au sein des séries climatiques. Ainsi, les données pluviométriques ont été reconstituées à travers la méthode du vecteur régional pour les mois des années 1967 et 1968 au niveau de la station de Korhogo, alors que pour les autres stations qui présentent des lacunes avant 1983, seules quelques mois (1 à 9 mois) de certaines années ont été comblés.

3.2.2.2. Contrôle des données après comblement : méthode des résidus et test statistique de Buishand

Depuis la mesure jusqu'au traitement de l'information climatique, des erreurs peuvent intervenir (erreurs liées aux instruments, erreurs liées à l'observateur, etc.). Il a donc été procédé, après comblement, à une analyse des données pluviométriques et thermométriques annuelles afin de juger de la qualité de celles-ci.

Les logiciels de détection des discontinuités temporelles s'appuient sur l'usage de divers tests que l'on peut classer en quatre groupes principaux : tests d'ajustement, de conformité, d'autocorrélation et d'homogénéité (Kouassi, 2007). Ces tests ne détectent pas des « erreurs » mais relèvent, en fonction d'un seuil de détection donné, des anomalies par rapport à des hypothèses de distribution statistique. Une approche basée sur la combinaison de deux tests statistiques d'homogénéité a été appliquée pour détecter d'éventuelles valeurs aberrantes dans les chroniques annuelles de pluies et de températures : la méthode des résidus et le test statistique de Buishand. Ces méthodes d'homogénéisation ont été utilisées afin de détecter et corriger les éventuelles irrégularités dans les séries climatiques. La période de référence est 1961-2016 pour la plupart des stations et, 1941-2016 pour les stations dont les séries commencent en 1941.

La méthode des résidus s'inspire de la méthode du cumul des résidus (Djerbouai, 2016) qui elle-même est une extension de la méthode du double cumul (Kouamé, 2011 ; Soro, 2014 ; Konaté, 2018). Pour une série double de x_i (série de base) et y_i (série à contrôler), l'idée de base consiste à étudier, non pas les cumuls mais directement les résidus ε_i (écarts entre les valeurs vraies et les valeurs estimées par régression) de la régression linéaire de y en x (équations 1 et 2):

$$y_i = a_0 + a_1 x_i + \varepsilon_i \quad (\text{Eq.1})$$

$$\varepsilon_i = y_i - (a_0 + a_1 x_i) = y_i - \bar{y}_i \quad (\text{Eq.2})$$

Pour un échantillon d'effectif n , le graphe des résidus ε_i devrait, pour une corrélation avérée entre x et y , montrer des points alignés suivant la droite $y = 0$ (l'axe des abscisses). Si l'un des points sort des ellipses de contrôle défini à partir de la méthode basée sur la statistique de Buishand, on peut conclure qu'une hétérogénéité est détectée (Fossou *et al.*, 2014b). La présence de valeurs aberrantes se manifeste donc par l'emplacement de points se trouvant hors des ellipses de confiance défini par la statistique de Buishand. La méthode de Buishand, test

d'homogénéité utilisé dans de nombreux travaux (Abdelali *et al.*, 2011 ; Fossou *et al.*, 2014b ; Acharki *et al.*, 2019, etc.), repose sur l'hypothèse de normalité de la série analysée (Lubès-Niel *et al.*, 1998 in Balah et Amarchi, 2016). En supposant une distribution uniforme pour la position du point de rupture t , la statistique U de Buishand est définie par (équation 3) :

$$U = \frac{\sum_{k=1}^{N-1} \left(\frac{S_k}{D_x}\right)^2}{N(N+1)} \quad (\text{Eq.3})$$

Où :

$$S_k = \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})$$

pour $k = 1, \dots, N$ et D_x désigne l'écart type de la série.

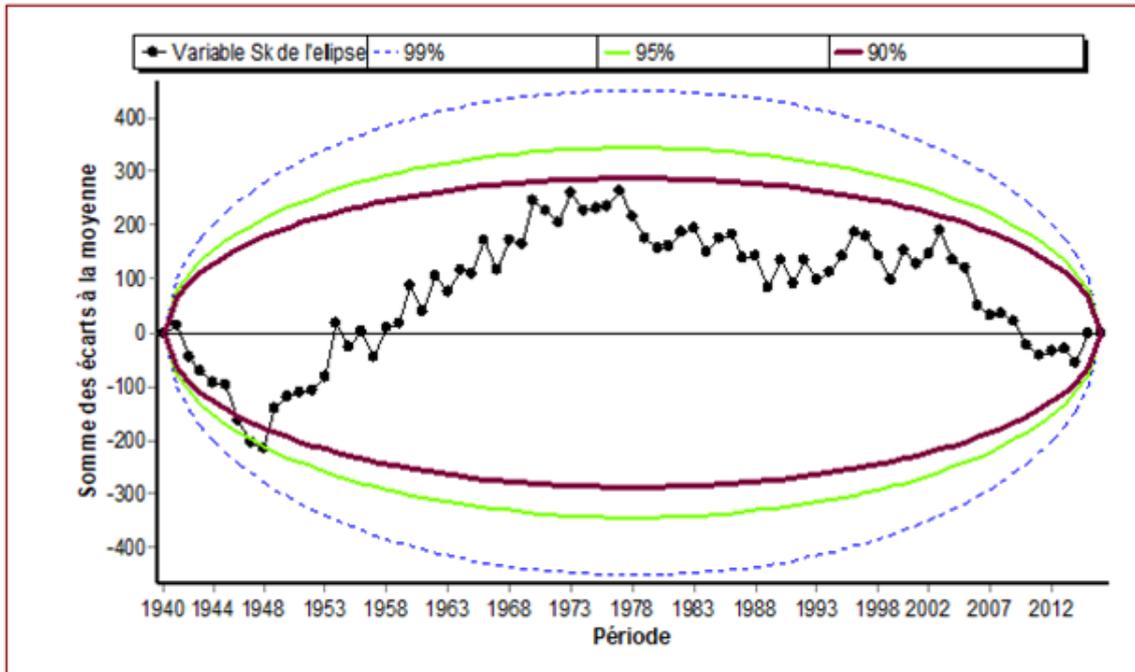
En cas de rejet de l'hypothèse nulle, aucune estimation de la date de rupture n'est proposée par le test (Lubès-Niel *et al.*, 1998 in Balah et Amarchi, 2016). Outre cette procédure, la construction d'une ellipse de contrôle permet d'analyser l'homogénéité de la série de (x_i) . La variable S_k définie ci-dessus, suit une distribution normale de moyenne nulle et de variance $K \times (N - K) \times N^{-1} \times \sigma^2$, $k = 0, \dots, N$ sous l'hypothèse nulle d'homogénéité de la série des (x_i) . Il est donc possible de définir une région de confiance dite ellipse de contrôle associée à un seuil de confiance contenant la série des S_k . Pour un seuil de confiance de $1 - \frac{\alpha}{2}$ (α , variable normale standard), la région de confiance est définie par (équation 4) (Fossou *et al.*, 2014b) :

$$\pm \frac{U_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{k(N-k)}}{\sqrt{N-1}} D_x \quad (\text{Eq.4})$$

Ainsi, des valeurs aberrantes ont été identifiées au sein de certaines séries climatiques. Les figures 16 à 21 montrent les exemples de contrôle d'homogénéité au niveau des séries de pluies et de températures. Ces exemples concernent pour la pluviométrie (Figures 16 à 18) les stations d'Adiaké, d'Agnibilékrou, Danané, Ferké, Katiola et Vavoua avec respectivement comme stations de référence (pour la simulation par régression linéaire) Abidjan, Abengourou, Man, Korhogo, Bouaké et Daloa. Pour la température (Figures 19 à 21), ce sont les stations de Bouaké, Daloa et Man avec comme stations de référence la station de Gagnoa, et les stations de Korhogo et Odienné avec comme stations de référence la station de Bondoukou. Ces stations de références ont été choisi à l'issue d'un test de corrélation des données entre stations. L'analyse montre que les chroniques de pluies des stations de Katiola (pour l'année 1968), de Vavoua (pour l'année 2001) et de Danané (sur la période 1995-2002) présentent des valeurs

aberrantes (Figures 17 et 18). Au niveau de la température, seule la station de Man (sur la période 1979-2012) fait observer des irrégularités (Figure 21). Ces valeurs aberrantes identifiées au niveau de ces différentes stations ont été, dans chaque cas, reconstituées à partir des régressions linéaires.

ADIAKÉ



AGNIBILÉKROU

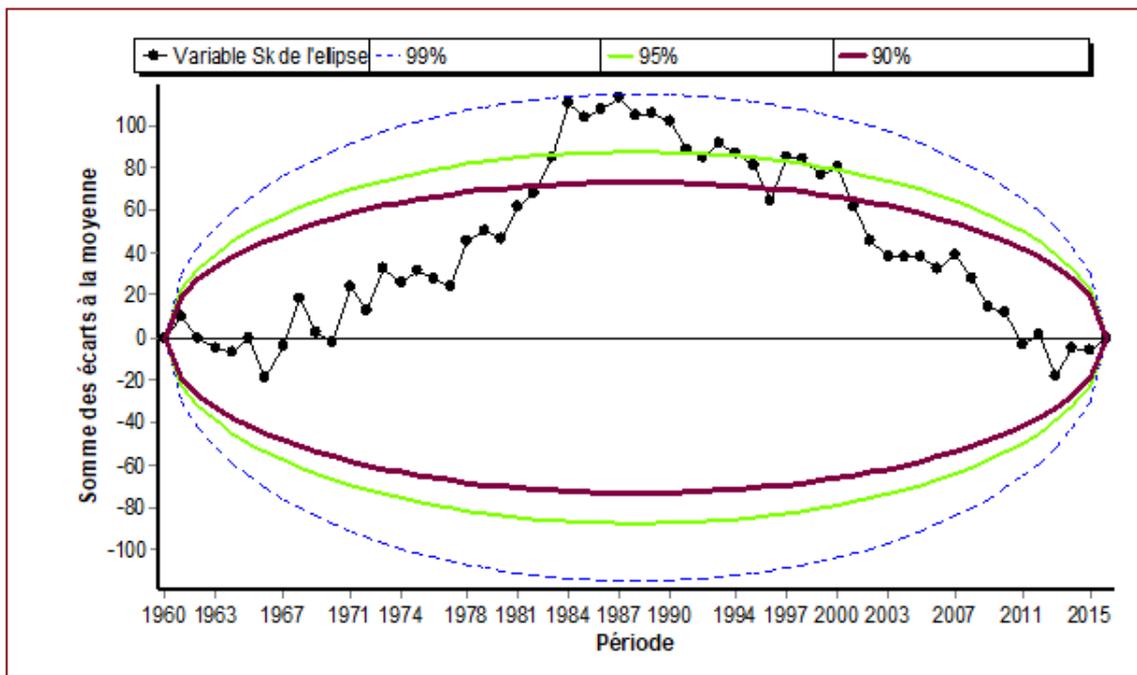
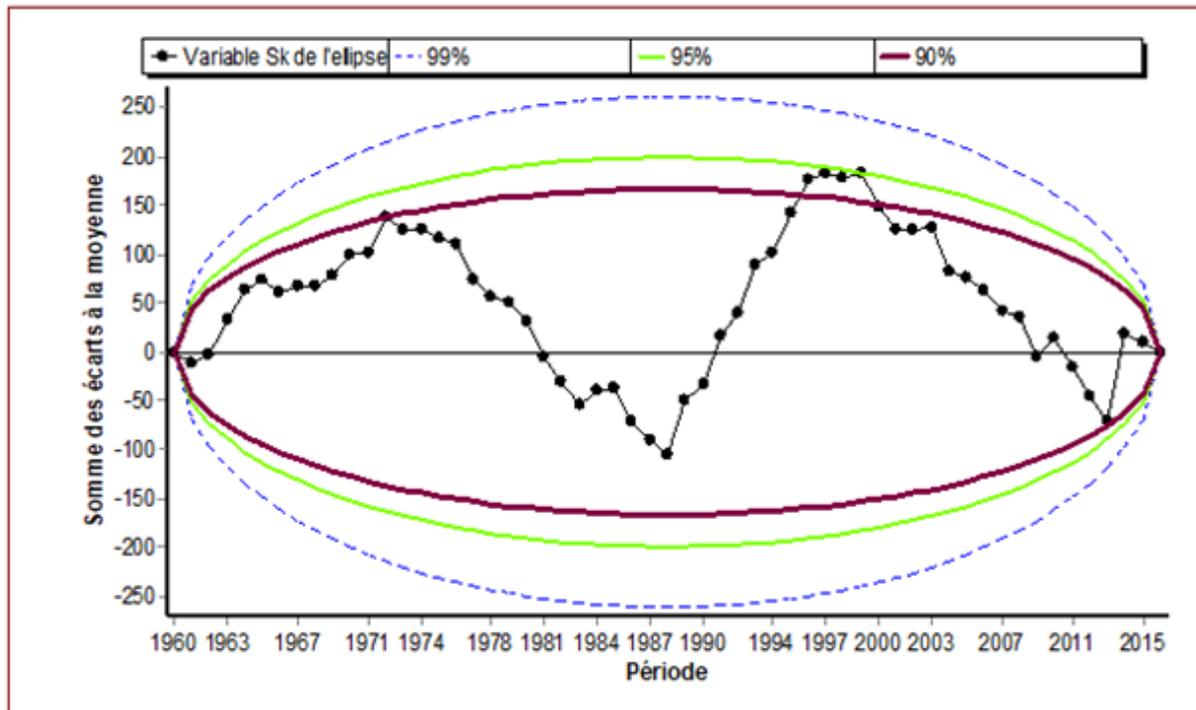


Figure 16 : Vérification de l'homogénéité des chroniques de pluies aux stations d'Adiaké et Agnibilékrou

FERKÉ



KATIOLA

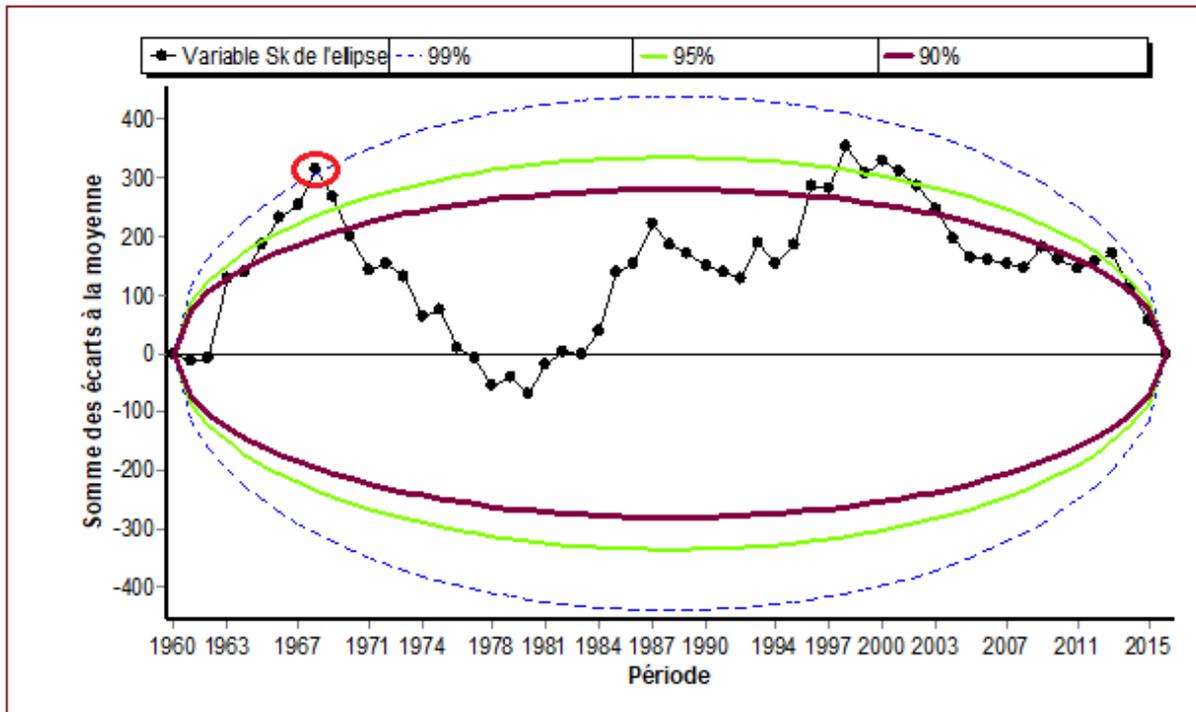
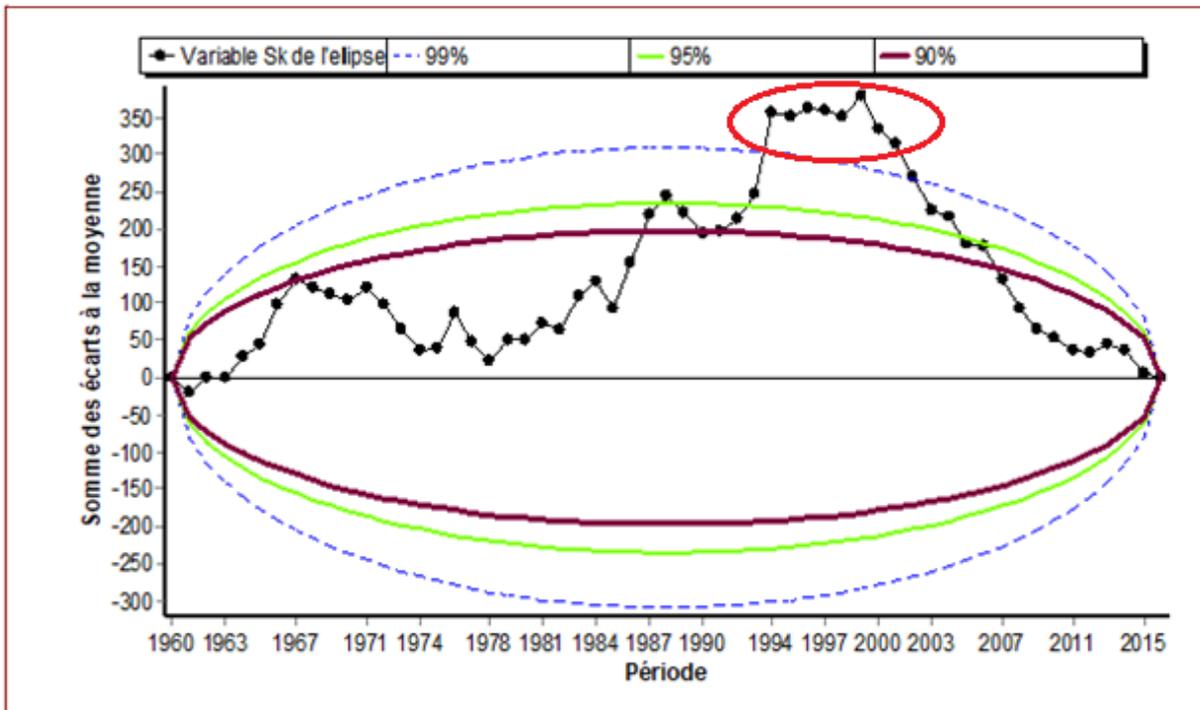


Figure 17 : Vérification de l'homogénéité des chroniques de pluies aux stations de Ferké, et Katiola

DANANÉ



VAVOUA

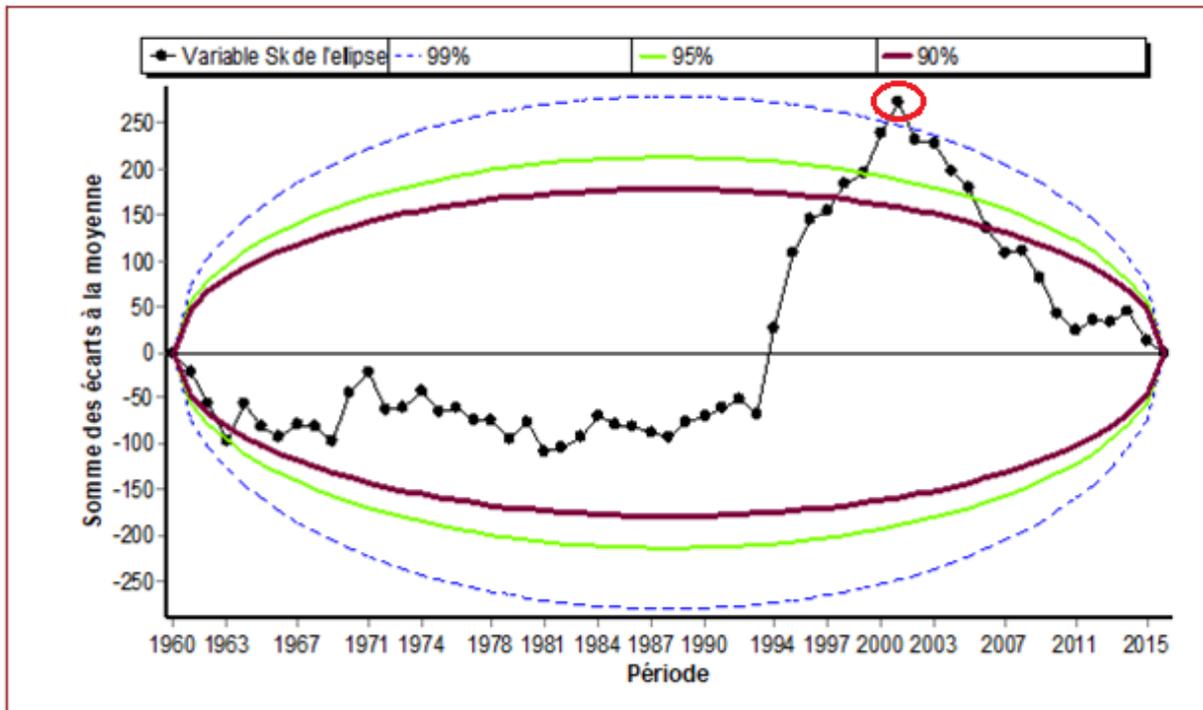
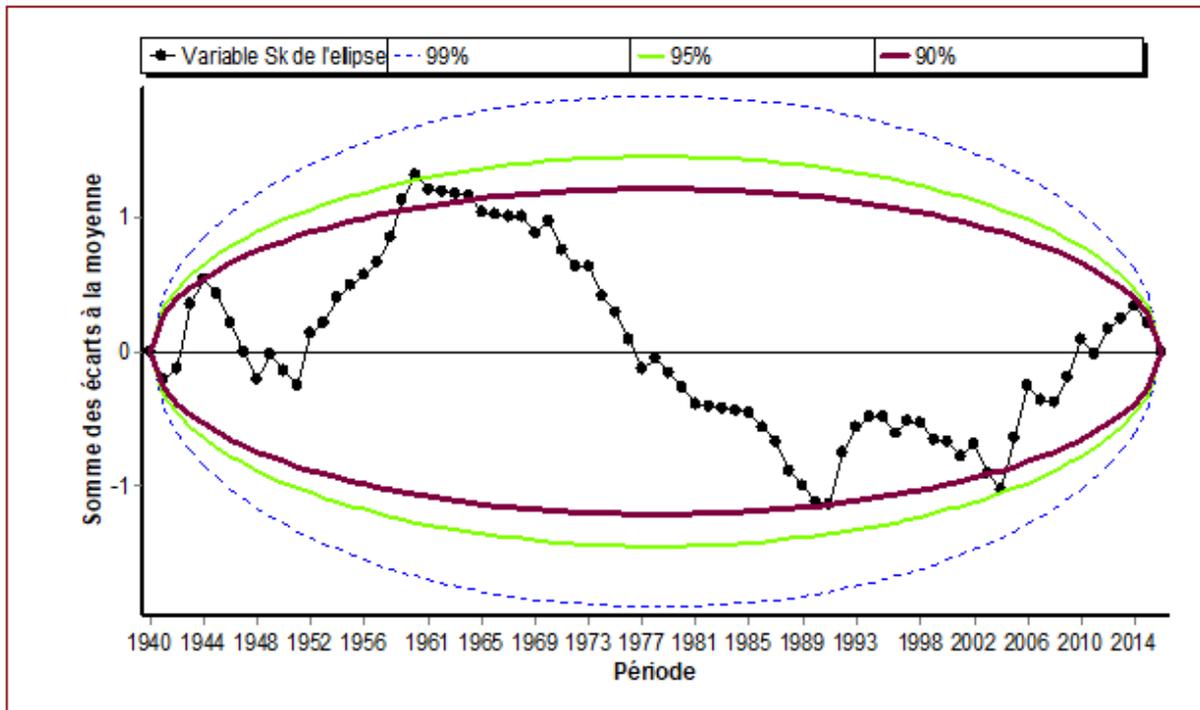


Figure 18 : Vérification de l'homogénéité des chroniques de pluies aux stations de Danané et Vavoua

BOUAKÉ



DALOA

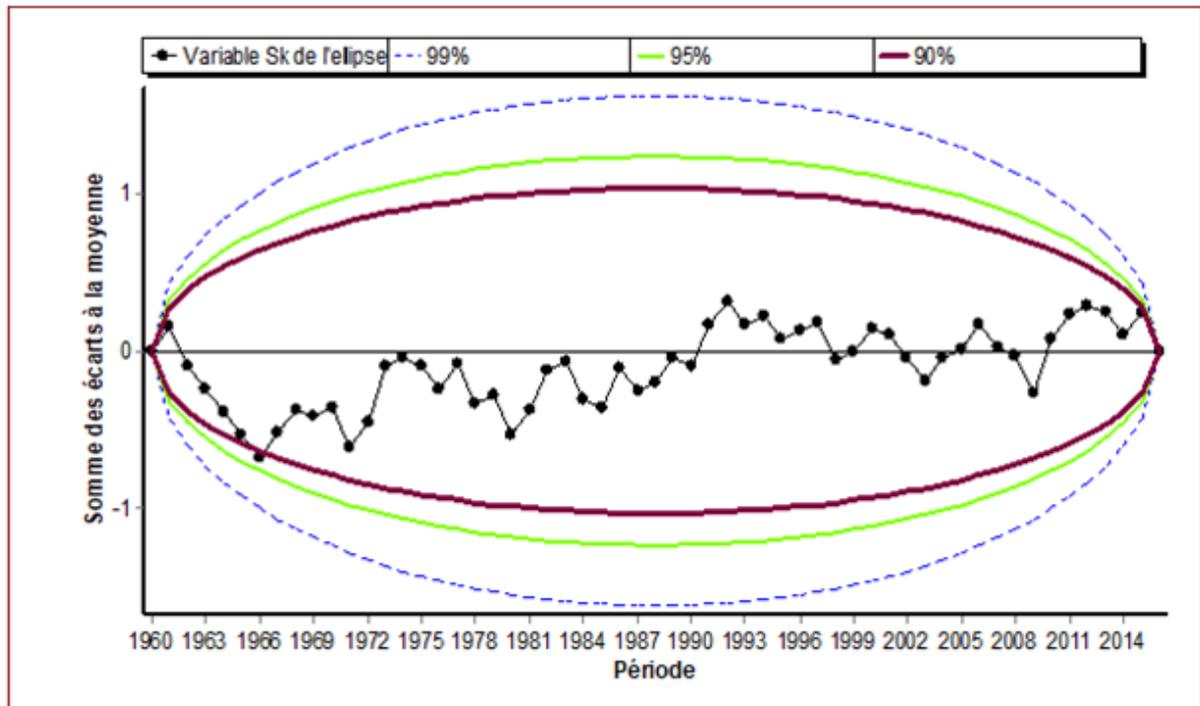
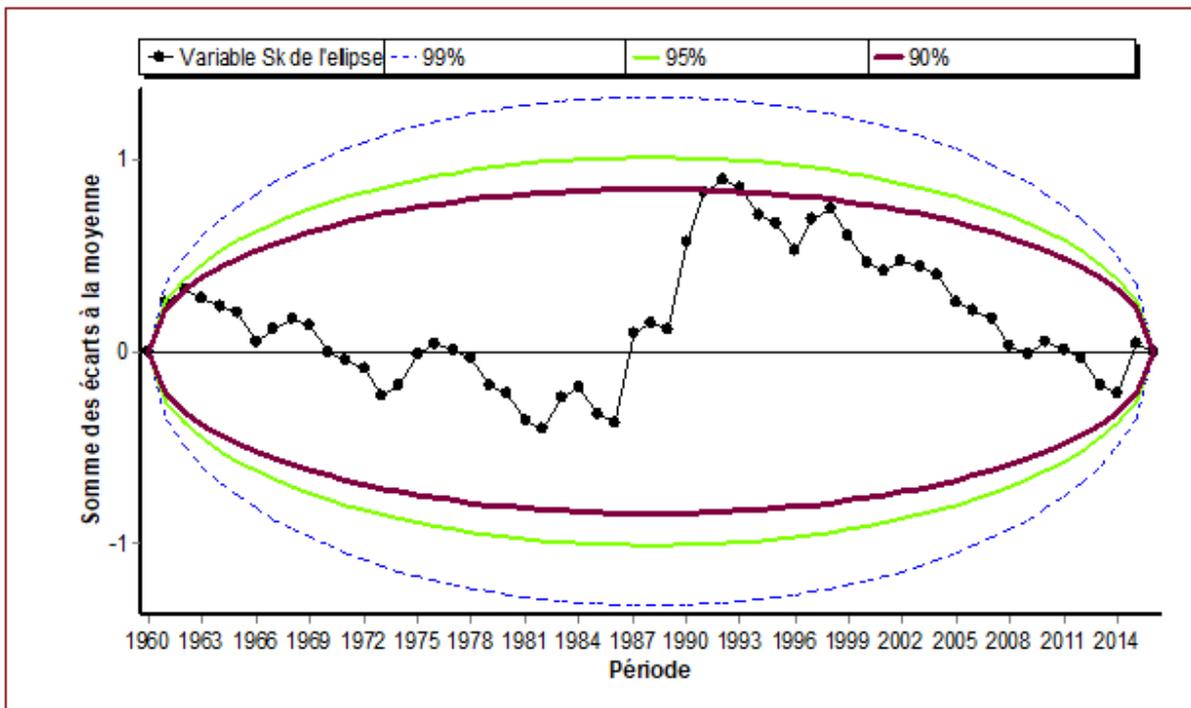


Figure 19 : Vérification de l'homogénéité des chroniques de températures aux stations de Bouaké et Daloa

KORHOGO



ODIENNÉ

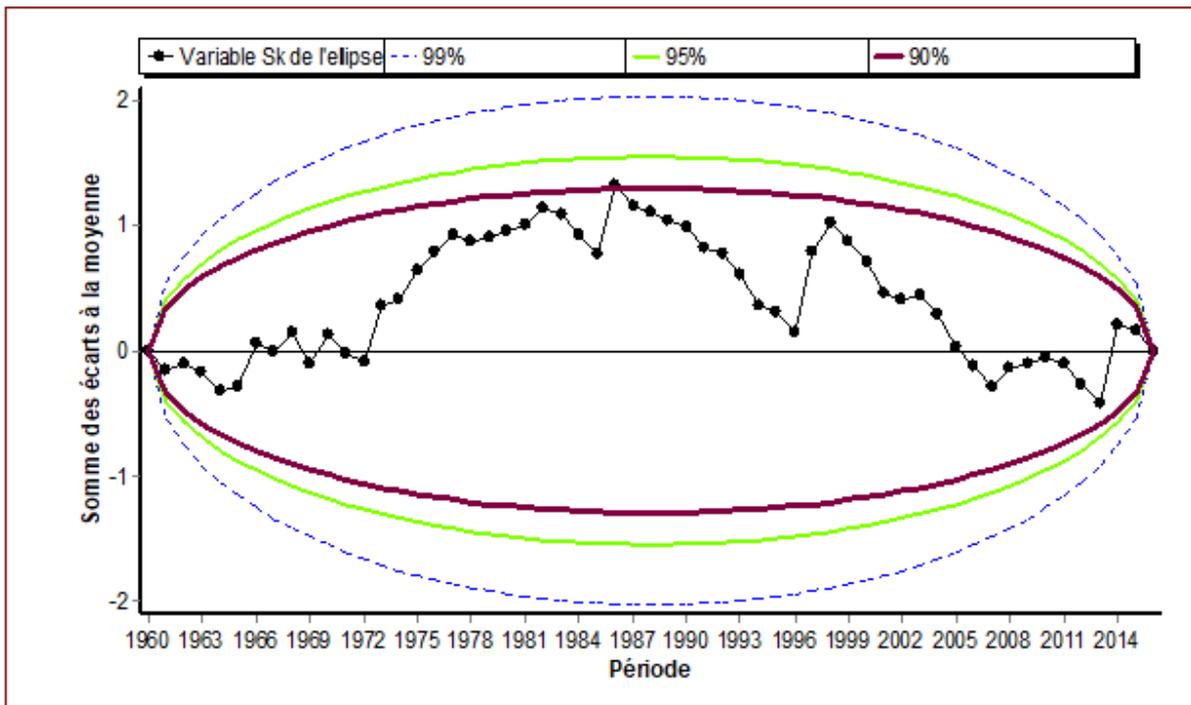


Figure 20 : Vérification de l'homogénéité des chroniques de températures aux stations de Korhogo et Odienné

MAN

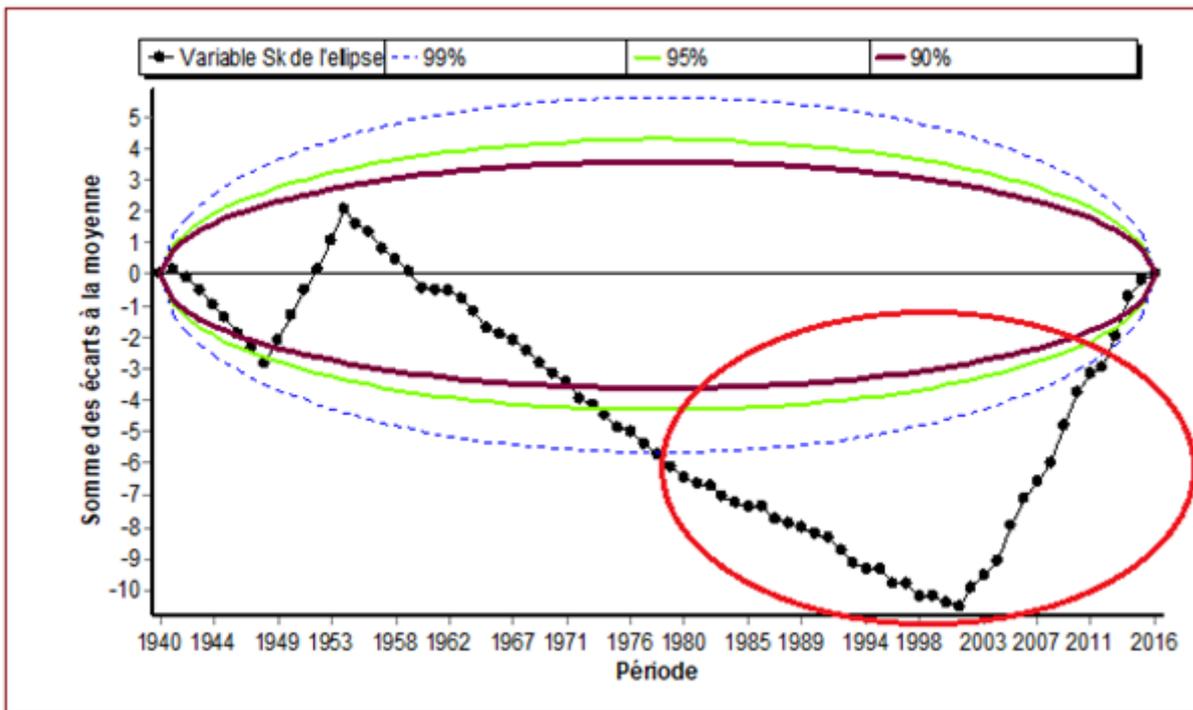


Figure 21 : Vérification de l'homogénéité des chroniques de températures à la station de Man

Cette opération préalable a permis de disposer de chroniques de bonne qualité globalement sur la période 1941-2016, constituant la banque de données opérationnelles utilisée pour la suite du travail. Les séries chronologiques peuvent donc faire l'objet d'un traitement statistique.

3.3. CARACTÉRISATION STATISTIQUE DES DONNÉES

Une variable statistique est une quantité ou paramètre susceptible de changer de valeur. Elle peut être chimique ou physique. Dans le cas de cette étude, les variables sont physiques (précipitation et température). Elles sont exprimées au niveau des stations par des valeurs numériques. L'objectif de cette analyse est de résumer l'information contenue dans les séries d'observation. Ainsi, il sera défini sur la période 1941-2016 et la sous période 1961-2016, les caractéristiques suivantes: le minimum, le maximum, la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation (CV) au niveau de chacune des stations retenues.

3.3.1. STATISTIQUE DES SÉRIES DE DONNÉES PLUVIOMÉTRIQUES

Les caractéristiques statistiques descriptives des pluies annuelles des différentes stations sont analysées afin de caractériser leur représentativité (Tableaux VI et VII). En effet, le diagnostic

précis de la variabilité pluviométrique est fonction de la représentativité des données en qualité, densité, étendue temporelle ; ceci sur un espace qui dépasse largement l'événement ponctuel (Kouamé, 2011). Les pluies moyennes interannuelles collectées sur neuf stations couvrant la période 1941-2016, varient entre 1124,2 et 2287,5 mm avec une moyenne de 1609,3 mm (Tableau VI). Quant au coefficient de variation (CV), il fluctue entre 16,2 et 24,4% avec une moyenne de 19,4%. La totalité des valeurs oscille entre 2% et 25%, ce qui montre l'homogénéité des données utilisées.

Les pluies moyennes interannuelles collectées sur l'ensemble des stations retenues et qui couvrent la période 1961-2016 varient entre 1010,3 et 2233,8 mm avec une moyenne de 1290,2 mm (Tableau VII). Les coefficients de variation (CV) sont globalement faibles et fluctuent entre 14,9 et 41,2% avec une moyenne de 22,5%. La quasi-totalité (85%) des valeurs de CV oscillent entre 2% et 25%, ce qui montre l'homogénéité des données utilisées sur la période 1961-2016. Ces données sont jugées fiables pour traduire les caractéristiques moyennes du régime climatique de la Côte d'Ivoire. Les résultats montrent que les données pluviométriques retenues pour l'étude sont assez homogènes et représentatives de la zone d'étude.

Tableau VI : Statistiques des données pluviométriques annuelles de la période 1941-2016

STATIONS	MOYENNE (mm)	ECART-TYPE (mm)	CV (%)
Gagnoa (S4)	1420,9	237,0	16,7
Adiaké (S9)	1892,7	404,8	21,4
Dimbokro (S13)	1139,3	215,7	16,2
Odienné (S16)	1509,1	258,4	17,1
Bouake (S18)	1124,2	207,9	18,5
Sassandra (S19)	1518,7	370,5	24,4
Man (S21)	1674,0	274,4	16,4
Abidjan (S27)	1917,5	434,8	22,7
Tabou (S41)	2287,5	492,4	21,5
CV= Coefficient de Variation			

Tableau VII : Statistiques des données pluviométriques annuelles de la période 1961-2016

STATIONS	MOYENNE (mm)	ECART-TYPE (mm)	CV (%)
Adzopé (S1)	1354,2	283,7	21,9
Aboisso (S2)	1574,1	339,9	21,6
Alépe (S3)	1424,6	312,5	21,9
Gagnoa (S4)	1236,7	237,2	17,9
Tiassalé (S5)	1222,9	272,6	22,3
Daloa (S6)	1157,6	255,2	22,0
Bouaflé (S7)	1179,3	298,0	27,1
Bocanda (S8)	1130,5	207,8	19,1
Adiaké (S9)	1837,1	385,6	22,7
Mankono (S10)	1175,4	259,2	24,1
Azaguié (S11)	1584,7	333,4	22,1
Vavoua (S12)	1137,7	264,4	23,2
Dimbokro (S13)	1172,8	223,4	18,8
Bongouanou (S14)	1170,6	252,1	22,2
Bondoukou (S15)	1101,8	242,0	22,0
Odienné (S16)	1221,2	311,7	24,1
Korhogo (S17)	1149,4	221,5	19,2
Bouake (S18)	1102,1	193,8	18,8
Sassandra (S19)	1441,0	328,8	23,6
Agnibilékrou (S20)	1145,6	267,5	24,1
Man (S21)	1666,0	239,2	14,9
Grand-lahou (S22)	1499,2	419,8	29,2
Soubré (S23)	1245,3	236,3	17,4
Agboville (S24)	1318,5	282,4	21,4
Ouangolo (S25)	1018,7	183,6	18,0
Abengourou (S26)	1203,4	312,9	26,0
Abidjan (S27)	1806,4	407,4	24,3
Guiglo (S28)	1219,1	312,5	20,0
Katiola (S29)	1105,7	261,4	23,6
Tafiré (S30)	1010,3	208,1	20,6
Danané (S31)	2020,9	328,7	16,6
Séguéla (S32)	1115,5	420,3	41,2
M'bahiakro (S33)	1046,1	239,3	24,0
Bouna (S34)	1040,6	222,6	21,4
Boundiali (S35)	1101,2	397,2	30,6
Tengrela (S36)	1078,6	247,4	22,9
Dabou (S37)	1654,1	421,3	27,6
Daoukro (S38)	1109,2	259,1	24,3
Dabakala (S39)	1046,1	250,6	24,4
Divo (S40)	1294,1	233,9	18,3
Tabou (S41)	2233,8	575,3	29,3
Touba (S42)	1181,3	248,3	22,0
Niakara (S43)	1039,0	212,9	20,5
Oumé (S44)	1217,9	251,8	20,3
Ferké (S45)	1066,7	213,1	20,0
Toulépleu (S46)	1702,0	291,2	16,5
Béoumi (S47)	1078,7	214,5	21,5

CV= Coefficient de Variation

3.3.2. STATISTIQUE DES SÉRIES DE DONNÉES DE TEMPÉRATURE

Les valeurs de température de la période 1941-2000 varient entre 24,7 et 26,8°C avec une moyenne de 26°C et un écart-type moyen de 0,6°C (Tableau VIII). Quant au coefficient de variation, il va de 1,1 à 5,1%. Il y a 56% de valeurs comprises entre 0 et 2%, ce qui montre

l'homogénéité des données utilisées. Les températures de la période 1961-2016 oscillent entre 25 et 26,8°C avec une moyenne de 26,1°C et un écart-type moyen de 0,4°C (Tableau IX). En ce qui concerne le coefficient de variation, il oscille entre 1,2 et 2,7%. La majeure partie de ces coefficients (58%) varie entre 0 et 2%, ce qui montre l'homogénéité des données de températures utilisées sur la période 1961-2016. Les températures utilisées sont, de ce fait, jugées de bonne qualité pour l'analyse des caractéristiques climatiques de la Côte d'Ivoire.

Tableau VIII: Statistiques des données de températures de la période 1941-2016

STATIONS	MOYENNE (°C)	ECART-TYPE (°C)	CV (%)
Gagnoa (S4)	25,7	0,6	2,2
Adiaké (S9)	26,1	0,4	1,4
Dimbokro (S13)	26,6	0,4	1,5
Odienné (S16)	26,8	0,4	1,7
Bouake (S18)	26,0	0,7	2,5
Sassandra (S19)	25,5	0,3	1,2
Man (S21)	24,7	0,6	2,4
Abidjan (S27)	26,8	1,4	5,1
Tabou (S41)	25,8	0,3	1,1

Tableau IX: Statistiques des données de températures de la période 1961-2016

STATIONS	MOYENNE (°C)	ECART-TYPE (°C)	CV (%)
Gagnoa (S4)	25,6	0,4	2,5
Daloa (S6)	25,9	0,4	1,5
Adiaké (S9)	26,1	0,4	1,5
Dimbokro (S13)	26,8	0,4	2,4
Bondoukou (S15)	26,1	0,5	2,0
Odienné (S16)	25,8	0,6	2,1
Korhogo (S17)	26,8	0,5	2,7
Bouake (S18)	26,1	0,5	2,0
Sassandra (S19)	25,9	0,3	1,3
Man (S21)	25,0	0,4	1,5
Abidjan (S27)	26,7	0,5	2,7
Tabou (S41)	26,0	0,3	1,2

3.4. OUTILS DE TRAITEMENT DES DONNÉES

Le traitement des données a été réalisé au moyen de logiciels spécialisés :

- Surfer 11 pour la cartographie des stations météorologiques ;
- XLSTAT-Premium pour la réalisation de l'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN) et la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) ;
- Khronostat™ 1.01 pour la réalisation des tests et procédures statistiques ;
- Programme SPI (SPI_SL_6.exe) de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) pour le

calcul des SPI sous Windows ;

- Excel 2016 pour la réalisation des calculs, des graphes et des régressions linéaires multiples pour la modélisation des SPI.

CONCLUSION PARTIELLE

Les données de pluies et de températures utilisées dans ce travail appartiennent globalement à la période 1941-2016. Il a été nécessaire d'avoir recours à des comblements de lacunes au sein de certaines séries climatiques. Ces lacunes, qui occupent des proportions allant de 0,3 à 23,2% au sein de certaines séries pluviométriques et de 14,4 à 19,6% au sein des chroniques de températures des stations de l'ex-zone CNO, ont été comblées à partir de données de réanalyses sur la période 1983-2016 et à partir de la méthode du vecteur régional sur la période avant 1983. Un contrôle des données après comblement a été effectué à partir d'une approche combinant la méthode des résidus et le test statistique de Buishand. A cet effet, des valeurs aberrantes ont été identifiées au sein de certaines séries climatiques. Ces valeurs erronées ont été reconstituées à partir des régressions linéaires, permettant ainsi de disposer de chroniques de bonne qualité globalement sur la période 1941-2016. Les pluies moyennes interannuelles obtenues varient entre 1124,2 et 2287,5 mm sur la période 1941-2016 et entre 1010,3 et 2233,8 mm sur la période 1961-2016 avec des coefficients de variation (CV) qui fluctuent entre 14,9 et 41,2%. Les températures moyennes interannuelles, quant à elles, varient entre 24,7 et 26,8°C sur la période 1941-2016 et entre 25 et 26,8°C sur la période 1961-2016 avec des coefficients de variation (CV) très faibles qui oscillent entre 1,1 et 5,1%.

Plusieurs outils de traitement ont été utilisés pour l'exploitation des différentes données. L'utilisation opérationnelle des différentes données, à partir des outils définis, nécessite des méthodes précises et rigoureuses.

CHAPITRE 4:
APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

4.1. MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DE LA RÉGIONALISATION CLIMATIQUE

La régionalisation climatique est approchée d'une part à partir de méthodes d'analyses statistiques multivariées [analyse en composantes principales normées (ACPN) et classification ascendante hiérarchique (CAH)] et d'autre part, par des méthodes de caractérisation des régimes climatiques saisonniers et types de climat (indice de Gaussen et indice de De Martonne). L'ACPN a été appliquée sur la période 1961-2016 afin d'identifier d'une part les variables pertinentes qui gouvernent la variation pluviométrique saisonnière, et d'autre part les régions climatiques homogènes en Côte d'Ivoire dans un contexte actuel de variations climatiques. La CAH a été utilisée pour confirmer les résultats de l'ACPN au sujet de la régionalisation climatique. Aussi, la CAH a été appliquée pour analyser l'impact des sécheresses sur la régionalisation climatique en Côte d'Ivoire. De ce fait, la CAH a été appliquée sur les sous-périodes 1961-1970 et 1971-2016 pour analyser les modifications éventuelles du zonage climatique de part et d'autre de 1970, qui constitue l'année de référence en ce qui concerne la manifestation des effets des changements climatiques en Afrique de l'Ouest en général et en Côte d'Ivoire en particulier. Les indices climatiques qui intègrent dans leur formulation, en plus de la pluviométrie, un autre paramètre climatique en l'occurrence la température viennent, par la caractérisation des régimes climatiques saisonniers (indice de Gaussen) et des types de climats (indice de De Martonne) sur la période 1961-2016, conforter les résultats de la régionalisation à partir des méthodes d'analyses multivariées mais aussi clarifier les points de divergences éventuels de celles-ci.

4.1.1. ANALYSES STATISTIQUES MULTIVARIÉES

4.1.1.1. Analyse en composantes principales normées

L'analyse en composantes principales normées (ACPN) est sans doute la technique de statistique multivariée la plus utilisée dans les sciences de l'atmosphère (Kouassi *et al.*, 2010). L'objectif de cette technique est de transformer une base de données contenant un grand nombre de variables en une autre qui ne contient plus qu'un nombre réduit de nouvelles variables, tout en conservant une grande part de la variabilité d'origine. Ceci facilite l'identification de facteurs pouvant expliquer un phénomène. En outre, l'analyse en composantes principales permet d'éliminer toute corrélation entre composantes, ce qui représente un atout non négligeable en climatologie, où l'on est souvent aux prises avec une situation de colinéarité. Ces nouvelles

variables sont nommées “composantes principales “ ou axes principaux. L’ACPN permet de visualiser de façon synthétique un ensemble de variables quantitatives mesurées sur un ensemble d’individus, et de voir comment les individus se positionnent dans les liens entre ces variables. De plus, elle peut contribuer à déterminer les facteurs qui influencent leur variabilité spatiale. L’analyse des données vise donc essentiellement à décrire les liens entre les variables et les observations de notre matrice de données. Cette matrice est constituée de p dimensions et N individus.

Le traitement des données de l’ACPN s’est fait selon la démarche suivante :

- une statistique sommaire des variables étudiées ;
- la matrice des corrélations des variables ;
- le tableau des valeurs propres fournissant les principaux facteurs ;
- un plan de projection des variables ;
- un plan de projection des individus.

4.1.1.1.1. Statistiques descriptives

Les statistiques descriptives (minimum, moyenne, maximum et écart-type) sont les premières étapes indispensables à l’analyse d’un corpus de données. Ces statistiques descriptives ont pour but de décrire les données en termes de tendance centrale et de dispersion.

4.1.1.1.2. Matrice de corrélation

Elle consiste en une analyse des relations linéaires pouvant exister entre les variables étudiées. Cette analyse est un préalable à l’analyse factorielle qui sera ensuite proposée. Le coefficient de corrélation linéaire indique la force de la liaison linéaire entre deux variables continues. Ce coefficient prend des valeurs comprises entre -1 et 1. Plus le coefficient prend, en valeur absolue, une valeur proche de 1, plus la liaison linéaire entre les deux variables est forte [corrélation positive (1) ou négative (-1) selon que le coefficient est positif ou négatif]. Si le coefficient prend une valeur proche de 0, cela indique qu’il n’y a pas de liaison linéaire entre les variables. Le seuil admis dans cette étude pour quantifier le lien entre les différentes variables est de 0,60 (Kouassi *et al.*, 2010).

4.1.1.1.3. Nombres d’axes à retenir

La qualité des estimations auxquelles conduit l’ACPN dépend, de façon évidente, du choix du

nombre de composantes retenues pour reconstituer les données, ou encore de la dimension du sous-espace de représentation. De nombreux critères de choix de dimension ont été proposés dans la littérature (Kouakou *et al.*, 2017) :

- la règle de Kaiser ;
- la règle de l'éboulis ;
- la part d'inertie.

La règle adoptée dans le cadre de cette étude est celle de Kaiser (Kouakou *et al.*, 2017) qui est basée sur une heuristique et repose sur une quantification de la stabilité du sous-espace de représentation. Elle consiste à retenir les axes pour lesquels les valeurs propres sont supérieures ou égales à 1 (1 étant la moyenne de l'ensemble des valeurs propres). Le choix des axes principaux tient compte de la réduction du nombre de facteurs. Ce nombre est tel que la somme cumulée des contributions, en terme de pourcentage d'inertie exprimée, est importante. Il a été adopté le seuil de 70% (Kouassi *et al.*, 2010 ; Koudou *et al.*, 2015).

4.1.1.1.4. Interprétation des résultats d'une ACPN

Un des points les plus délicats de l'ACPN est d'apprécier la perte d'information engendrée par la réduction de la dimension. La qualité de représentation du nuage dans le sous-espace factoriel est exprimée par le pourcentage d'inertie expliquée. Cette mesure globale doit être complétée par d'autres considérations comme la représentation des individus et des variables dans ce sous-espace factoriel. Il peut, en effet, arriver que les axes retenus, bien que représentant une part importante de l'inertie globale du nuage, ne suffisent pas à expliquer correctement certains individus ou variables : deux individus peuvent être proches en projection sur les axes factoriels retenus tout en étant très éloignés en réalité, si leurs représentations sur ces axes ne sont pas de bonne qualité. La qualité de représentation d'une variable sur un axe factoriel est exprimée par le coefficient de corrélation linéaire entre la variable initiale et la nouvelle variable (composante principale). La valeur de cette corrélation sera également très importante pour interpréter les nouveaux axes factoriels en fonction des variables initiales. Donc l'ACPN peut contenir deux études :

- l'étude des variables ;
- l'étude des individus.

L'étude des variables consiste à mettre en évidence les relations entre variables du fait de leurs corrélations. Cela consiste à rechercher les ressemblances entre variables, c'est-à-dire trouver les liaisons qui existent entre ces variables. Ces liaisons sont linéaires simples. La proximité

entre points variables n'est exploitable que si ces points sont proches de la circonférence appelée cercle des corrélations. Ce n'est pas la distance au centre qu'il faut interpréter, mais les angles entre les variables et les axes. Des variables qui forment un angle nul entre elles sont corrélées, celles qui font un angle droit ne le sont pas et celles qui présentent un angle plat sont corrélées négativement, car cela signifie que le cosinus de l'angle du vecteur joignant l'origine au point représentant la variable avec le plan est, en valeur absolue, proche de 1. Il est aussi utile d'étudier les corrélations entre les variables d'origine et les nouvelles variables. Les corrélations entre les axes factoriels et les variables initiales indiquent la qualité de représentation de la variable sur l'axe. Les coordonnées des variables sont égales aux corrélations avec les axes. Plus une corrélation entre une variable et un axe est forte, plus la variable est proche de l'axe. Il ne faut interpréter les axes qu'à partir des variables les mieux représentées, c'est-à-dire celles dont la corrélation est proche de 1 en valeur absolue. Autrement dit, les variables bien représentées dans le plan sont proches du cercle des corrélations. Plus une variable est corrélée avec un axe, plus elle est proche de celui-ci.

L'étude des individus consiste à exprimer les relations entre eux du fait de leur proximité. Cela consiste à définir la ressemblance des individus du point de vue de l'ensemble des variables, pour permettre d'identifier des sous-ensembles d'individus afin de constituer une classification, c'est-à-dire construire des groupes d'individus. Donc les individus appartenant à un même groupe seront très proches du point de vue des variables, et ils seront très éloignés des individus d'un autre groupe. Les proximités et les oppositions entre individus, par l'analyse de leurs points communs, aident aussi à la compréhension des nouveaux axes. Les individus proches ont des profils semblables. Une analyse typologique peut préciser ces regroupements. L'analyse est sensible aux individus très différents. On peut interpréter le graphe des individus grâce aux variables. De ce fait, on calcule la corrélation entre la variable et l'axe factoriel. Si la variable est très liée à l'axe factoriel, cela voudrait dire que les valeurs de la variable sont très liées aux coordonnées de l'axe, donc la corrélation est proche de 1. S'il y a une corrélation négative, cela voudrait dire que les individus qui prennent de faibles valeurs pour la variable prennent de fortes valeurs sur l'axe factoriel.

Les variables utilisées pour réaliser l'ACPN dans le cadre de cette étude sont la longitude, la latitude, l'altitude, la pluie annuelle (P_{AN}), les pluies trimestrielles calculées sur trois mois glissants de janvier à décembre (P-JFM, P-FMA, P-MAM, P-AMJ, P-MMJ, P-JJA, P-JAS, P-ASO, P-SON, P-OND) sur la période 1961-2016. Les cumuls trimestriels ont été utilisés pour tenir compte de la variation saisonnière des précipitations. Les individus concernés par ces variables sont, quant à eux, représentés par les stations pluviométriques (au nombre de 47).

4.1.1.2. Classification ascendante hiérarchique

La classification ascendante hiérarchique (CAH) est un outil puissant pour analyser des données numériques. C'est un système de classification qui utilise la distance pour des mesures de similitude qui produisent la classification la plus distinctive où chaque membre dans un groupe est plus semblable à ses collègues qu'à n'importe quel membre à l'extérieur du groupe (Güler *et al.*, 2002). La CAH est une méthode qui part des individus isolés. À chaque étape, les deux individus les plus proches sont recherchés et fusionnés jusqu'à ce qu'il n'y ait plus qu'une seule classe. Cette méthode utilise les différences ou distances entre objets lors de la formation des classes. La CAH s'opère en quatre (4) étapes (Carpentier, 2014) :

- le choix des variables représentant les individus ;
- le choix de la distance entre deux individus ou indice de dissimilarité ;
- le choix de la distance entre deux classes ou critère d'agrégation ;
- la détermination du nombre de classes à retenir.

4.1.1.2.1. Choix des variables

Dans le cas où les données observées sont les valeurs de p variables numériques sur n individus, on peut choisir d'effectuer une classification des individus, ou une classification des variables. Le choix des variables s'effectue sur certains "traits" des individus, c'est-à-dire certaines variables qui servent à les décrire. La classification se réalise donc sur les individus décrits par les variables retenues. Par exemple, la CAH des individus peut être réalisée (Carpentier, 2014) :

- à partir de p variables centrées réduites si on dispose de variables de dimensions différentes ;
- à partir des p facteurs obtenus à l'aide d'une ACP (ou d'une ACP normée) sur les variables retenues. Dans ce cas, la CAH est réalisée à partir des q premiers facteurs ($q < p$). Cela a pour effet d'éliminer une partie des variations entre individus, qui correspond en général à des fluctuations aléatoires, c'est-à-dire à un "bruit statistique".

Ainsi, dans le cadre de cette étude, la CAH a été réalisée à partir des mêmes variables que l'ACPN et définie sur 47 stations pluviométriques sur la période 1961-2016. Les stations ont été représentés à l'aide des variables centrées réduites associées aux variables de départ.

4.1.1.2.2. Indices de dissimilarité

De nombreux indices de mesures de la "distance" entre individus ont été proposés. Le choix de l'un ou l'autre d'entre eux est laissé à l'appréciation de l'utilisateur. Les plus connus de ces

indices sont [avec $d(I_i, I_j)$ la distance entre les individus I_i et I_j ; x_{ik} et x_{jk} les valeurs de la variable considérée représentant les individus I_i et I_j ; n le nombre de variables représentant les individus I_i et I_j] (Carpentier, 2014) :

-La distance euclidienne. Il s'agit d'une distance géométrique dans un espace multidimensionnel (équation 5) :

$$d(I_i, I_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (\text{Eq.5})$$

- La distance Euclidienne au carré. La distance euclidienne standard est élevée au carré afin de surpondérer les objets éloignés (équation 6) :

$$d(I_i, I_j) = \sum_{k=1}^n (x_{ik} - x_{jk})^2 \quad (\text{Eq.6})$$

- La distance City-block (équation 7) :

$$d(I_i, I_j) = \sum_{k=1}^n |x_{ik} - x_{jk}| \quad (\text{Eq.7})$$

- La distance de Tchebychev (équation 8) :

$$d(I_i, I_j) = \text{Max} |x_{ik} - x_{jk}| \quad (\text{Eq.8})$$

- La distance 1- r de Pearson. Cette distance est calculée à partir du coefficient de corrélation (r_{ij}) entre les individus I_i et I_j (équation 9) :

$$d(I_i, I_j) = 1 - r_{ij} \quad (\text{Eq.9})$$

L'indice de dissimilarité retenu, dans le cadre de cette étude, est basé sur la distance euclidienne. En effet, la méthode la plus directe pour calculer ces distances (dans un espace multidimensionnel) consiste à calculer les distances euclidiennes (Güler *et al.*, 2002).

4.1.1.2.3. Critères d'agrégation

L'application de la méthode de la CAH suppose également de faire le choix du critère de calcul de la distance entre classes (ou entre un individu et une classe). Les critères de calcul de cette distance permettent tous de calculer les distances entre les classes sans avoir à recalculer celles qui existent entre les individus composant chaque classe. De nombreux critères d'agrégation

ont été proposés. Les plus connus sont (Boubou, 2007 ; Carpentier, 2014) :

- Le critère du saut minimal (ou distance minimum). La distance entre deux (2) classes C_1 et C_2 est définie par la plus courte distance d séparant un individu x de C_1 et un individu y de C_2 (équation 10) :

$$D(C_1, C_2) = \min(\{d(x, y)\}, x \in C_1, y \in C_2) \quad (\text{Eq.10})$$

- Le critère du saut maximal (ou distance maximum). La distance entre deux (2) classes C_1 et C_2 est définie par la plus grande distance d séparant un individu x de C_1 et un individu y de C_2 (équation 11) :

$$D(C_1, C_2) = \max(\{d(x, y)\}, x \in C_1, y \in C_2) \quad (\text{Eq.11})$$

- Le critère de la moyenne. Ce critère consiste à calculer la distance moyenne entre tous les éléments de C_1 et tous les éléments de C_2 (équation 12) :

$$D(C_1, C_2) = \frac{1}{n_{c_1} \times n_{c_2}} \sum_{x \in C_1, y \in C_2} d(x, y) \quad (\text{Eq.12})$$

avec :

- n_{c_1} : le cardinal de C_1

- n_{c_2} : le cardinal de C_2

- Le critère de Ward. Ce critère ne s'applique que si on est muni d'un espace euclidien. Cette méthode utilise une analyse de la variance approchée afin d'évaluer les distances entre classes. Elle tente de minimiser la somme des carrés de tous les couples de classes pouvant être formés à chaque étape. Le critère de Ward consiste donc à choisir à chaque étape le regroupement de classes tel que l'augmentation de l'inertie intra-classe soit minimal. Selon la plupart des travaux effectués, le critère le plus couramment utilisé pour déterminer les distances entre classe est celui de Ward (Carpentier, 2014). Sa formulation est rendue par l'équation 13 :

$$D(C_1, C_2) = \frac{n_{c_1} \times n_{c_2}}{n_{c_1} + n_{c_2}} d^2(g_{c_1}, g_{c_2}) \quad (\text{Eq.13})$$

avec :

- g_{c_1} : le centre de gravité de C_1

- g_{c_2} : le centre de gravité de C_2

- Le critère des centres de gravité. La distance entre deux (2) classes C_1 et C_2 est définie par la distance entre leurs centres de gravité (équation 14) :

$$D(C_1, C_2) = d(gc_1; gc_2) \quad (\text{Eq.14})$$

La difficulté du choix du critère d'agrégation réside dans le fait que ces critères peuvent déboucher sur des résultats différents (Boubou, 2007).

Le critère d'agglomération utilisé dans le cadre de cette étude est celui de Ward. En effet, ce critère convient bien lorsque la distance entre les individus est la distance euclidienne (Carpentier, 2014).

4.1.1.2.4. Nombre de classes à retenir

La CAH permet de construire une hiérarchie entière des objets sous la forme d'un "arbre" hiérarchique (dendrogramme) dans un ordre ascendant qui permet de décrire de façon explicite la structure finale de la classification obtenue : plus les individus se regroupent dans l'arbre, plus ils se ressemblent (Figure 22). On commence en considérant chaque individu comme une classe et on forme de petites classes ne comprenant que des individus très semblables. Puis à partir de celles-ci, on construit des classes de moins en moins homogènes, jusqu'à ce que tous les individus se trouvent dans une même classe. Chaque niveau de hiérarchie représente une classe et l'arbre généré peut être coupé à différents niveaux pour obtenir un nombre de classes plus ou moins grand (Boubou, 2007).

La procédure du dendrogramme est un outil approprié pour montrer les résultats obtenus par une classification ascendante hiérarchique (Carpentier, 2014). Dans ces tracés, l'axe vertical représente la distance d'agrégation. C'est pourquoi, pour chaque nœud du graphique (le lieu de formation d'une nouvelle classe), on peut lire rapidement la distance du critère à laquelle les éléments sont agrégés dans un même groupe. Il faut noter que cette procédure ne donne aucune règle pour décider le nombre de groupes. La décision est habituellement subjective. Ainsi, le nombre de groupes provenant d'une classification ascendante hiérarchique est laissé au choix de l'utilisateur. Il doit donc être déterminé selon les objectifs de l'application et l'appréciation de l'analyste (Boubou, 2007). Cependant, il est généralement pertinent d'effectuer la coupure après les agrégations (nœuds) correspondant à des valeurs peu élevées du critère et avant les agrégations correspondant à des valeurs élevées (Carpentier, 2014).

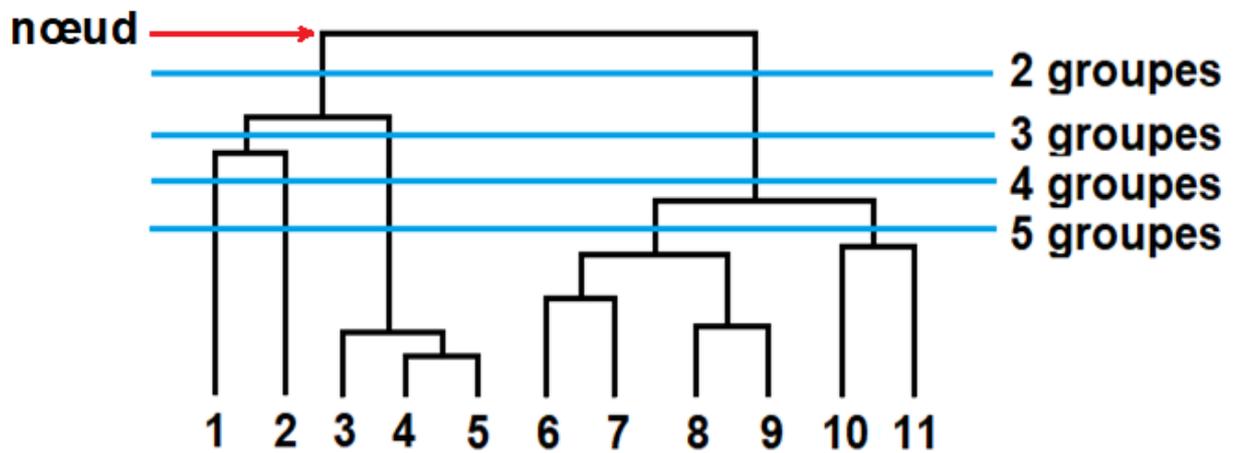


Figure 22 : Exemple de regroupements hiérarchiques possibles d'une CAH

4.1.2. CARACTÉRISATION DES RÉGIMES CLIMATIQUES SAISONNIERS ET TYPES DE CLIMAT

Deux indices climatiques ont été utilisés : indice de Gaussen et indice de De Martonne. La régionalisation climatique a été approchée par ces deux indices en étudiant le régime climatique saisonnier (indice de Gaussen) et le type de climat (indice de De Martonne) au niveau de chacune des stations retenues.

4.1.2.1. Indice ombrothermique de Gaussen

L'indice de Gaussen permet d'identifier pour chaque station, la durée de la période sèche et partant celle de la saison pluvieuse, en s'appuyant sur la comparaison des moyennes mensuelles des températures (T en °C) avec celles des précipitations (P en mm) (Bridi, 2012 ; Mokhtari *et al.*, 2013 ; Farah, 2014 ; Sebaibi, 2014). Un mois est dit sec lorsque P est inférieure ou égale à $2T$, c'est-à-dire quand les pertes en eau (supposées être causées par une température trop forte) sont supérieures aux apports (pluies). Inversement, quand P est supérieure à $2T$, le mois est considéré comme humide. Un mois est dit humide et à tendance sèche lorsque les pluies sont comprises entre deux (2) fois et trois (3) fois la température moyenne mensuelle, soit $2T < P < 3T$. Le principe de cette méthode consiste à représenter sur un même graphe la température et la pluviométrie en ordonnée, et les 12 mois de l'année en abscisse. Les échelles prises en ordonnée sont telles que 1°C correspond à 2 mm de précipitations. Une période est humide, à chaque fois que la courbe des pluies passe au-dessus de la courbe des températures et une période est dite sèche dans le cas inverse. Ce qui permet de définir une aire ombrothermique. Plus l'aire est importante et plus la saison est sèche. Ce diagramme a permis

de déterminer les régimes climatiques au niveau de la Côte d'Ivoire. L'intégration dans cet indice de deux paramètres de nature différente moyennant le coefficient multiplicatif deux (2), s'explique par le fait que la valeur de $2T$ a été assimilée à la demande évaporative de l'atmosphère (ETP) (Mokhtari *et al.*, 2013). En somme, l'indice d'aridité de Gaussen traduit la somme des déficits mensuels corrigés de leur concentration (intégrale de la courbe $2T - P$ corrigée de la concentration mensuelle).

4.1.2.2. Indice d'aridité de De Martonne

L'indice d'aridité annuel De Martonne est défini par l'équation 15 (Bridi, 2012 ; Mokhtari *et al.*, 2013 ; Farah, 2014 ; Sebaibi, 2014) :

$$I = \frac{P}{T+10} \quad (\text{Eq.15})$$

avec :

- I : indice annuel ;
- P : hauteur des précipitations annuelles (mm) ;
- T : température moyenne annuelle (°C).

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

Tableau X : Classification de l'indice de De Martonne

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

La combinaison de ces différentes approches a permis d'apporter des réponses à la problématique de la régionalisation climatique de la Côte d'Ivoire dans un contexte de climat changeant.

4.2. MÉTHODES D'ÉVALUATION DES VARIATIONS CLIMATIQUES ET DE LA SÉCHERESSE

L'évaluation des fluctuations climatiques et de la sécheresse, sur tout le territoire ivoirien, repose sur différentes méthodes mises en œuvre pour étudier les séries chronologiques des données pluviométriques et de température au niveau des stations retenues.

Ainsi, l'évaluation du climat et de la sécheresse est approchée à travers l'étude des tendances des précipitations et des températures et la caractérisation de la dynamique du climat saisonnier et annuel. Des méthodes statistiques (régression, tests de rupture) ont permis d'analyser, sur la période 1961-2016, les tendances du climat et la persistance ou non de la sécheresse à l'intérieur de chacune des régions climatiques préalablement définies en Côte d'Ivoire. Cette analyse a été réalisée à partir de quatre variables climatiques : températures minimales, températures maximales, températures annuelles et cumuls annuels de précipitations. Des indices climatiques (indice d'Angot, indice de Péguy, Indice UNEP, indice de Moral) ont été également utilisés pour l'étude de la dynamique climatique au plan saisonnier et annuel en passant de la période humide [avant 1970 (1941-1970)] aux périodes sèches [après 1970 (1971-2000 ; 1981-2010 ; 1971-2016)] au niveau de chaque région climatique.

4.2.1. ANALYSE DES TENDANCES CLIMATIQUES

Cette analyse a été effectuée à partir des régressions linéaires et des tests statistiques de ruptures (test de Pettitt et procédure de segmentation de Hubert), sur la période 1961-2016, uniquement au niveau des 12 stations synoptiques pour tenir compte du caractère représentatif de celles-ci de l'ensemble des régions climatiques de la Côte d'Ivoire.

4.2.1.1. Régression linéaire

L'analyse de l'évolution des températures et des précipitations est très importante. À l'échelle mondiale, de nombreux chercheurs s'intéressent au réchauffement de ces dernières années. L'analyse de l'évolution des températures permet de déterminer d'une part l'influence du réchauffement global sur le réchauffement local et, d'autre part, la concordance entre la tendance des températures et la tendance des précipitations dans la zone d'étude (Taibi, 2011). Cette méthode vise à déterminer, par régression linéaire, l'évolution de la pluviométrie et de la thermométrie. Elle consiste en une représentation graphique d'une droite de régression de type affine qui présente l'évolution linéaire et permet de déceler la tendance (Amoussou, 2010 ;

Taibi, 2011 ; Ibrahim, 2012 ; Kouakou *et al.*, 2012 ; Fayé *et al.*, 2015). L'équation de la droite de tendance est sous la forme (équation 16) :

$$y = ax + b \quad (\text{Eq.16})$$

où :

a est le coefficient directeur et représente la pente, et b une constante.

- Si $a > 0$, on a une augmentation ;

- Si $a < 0$, on a une diminution

4.2.1.2. Tests de détection de ruptures climatiques

Les données climatiques traduisent en général l'évolution spontanée du système naturel (Bigot, 2002). L'étude de leur homogénéité ou de leur stationnarité renseigne sur la climatologie d'une région donnée. Les ruptures révèlent, en effet, l'existence de dates charnières (Adja *et al.*, 2019) à l'intérieur des séries hydroclimatiques pour indiquer des changements dans le régime du climat de la région étudiée. Une rupture est définie comme un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées (Servat *et al.*, 1998 in Adja *et al.*, 2019). La détection des ruptures met en jeu plusieurs tests paramétriques et non-paramétriques. Les plus utilisés à savoir : le test de Pettitt et la segmentation de Hubert, réputés pour leur puissance et robustesse (Bigot, 2002 ; Kouamé, 2011 ; Ahoussi *et al.*, 2013 ; Kouassi *et al.*, 2017 ; Adja *et al.*, 2019), sont les tests retenus dans ce travail. Les différents tests statistiques, utilisés de façon complémentaire, ont été appliqués aux minima et maxima annuels de températures ainsi qu'aux pluies annuelles sur la période 1961-2016. Il s'agit, entre autres, de tester la capacité des températures extrêmes à mettre en évidence des tendances climatiques.

4.2.1.2.1. Test de Pettitt

Le test de Pettitt, déjà expérimenté dans de nombreux travaux (Koita, 2010 ; Kouamé, 2011 ; Ahoussi *et al.*, 2013 ; Assémian, 2014 ; Soro, 2014 ; Yao, 2015 ; Kouassi *et al.*, 2017 ; Adja *et al.*, 2019), consiste à découper la série principale de N éléments en deux sous séries à chaque instant t compris entre 1 et $N - 1$. La série principale présente une rupture à l'instant t si les deux sous-séries ont des distributions différentes. La variable de Pettitt ($U_{t,N}$) est définie par l'équation 17 :

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (\text{Eq.17})$$

- $D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j)$
- $\text{sgn}(X) = 1$ si $X > 0$;
- $\text{sgn}(X) = 0$ si $X = 0$;
- $\text{sgn}(X) = -1$ si $X < 0$

La probabilité de dépassement approximative d'une valeur k est définie et permet d'apprécier l'importance de la rupture (équation 18) :

$$\text{prob}(K > k) \cong 2\exp[-6k^2/(N^3 + N^2)] \quad (\text{Eq.18})$$

L'absence de rupture dans la série de taille N constitue l'hypothèse nulle. Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$. Ce test, sensible à un changement de moyenne de la série étudiée, est un test sur le rang (Kouassi *et al.*, 2017 ; Adja *et al.*, 2019).

4.2.1.2.2. Procédure de segmentation de Hubert

La procédure de segmentation fournit au moyen d'un algorithme spécifique une ou plusieurs dates de rupture (éventuellement aucune) qui séparent des segments contigus dont les moyennes sont significativement différentes. Cette approche définie par Hubert *et al.*, (1989) (Adja *et al.*, 2019) et expérimentée par plusieurs auteurs (Kouamé, 2011 ; Ahoussi *et al.*, 2013 ; Kouassi *et al.*, 2017 ; Adja *et al.*, 2019 ; etc.) convient pour la recherche d'une ou plusieurs ruptures dans une série temporelle. Dans la pratique, la série initiale est découpée en m segments ou sous-séries selon la technique des moindres carrés ($m > 1$) de telle sorte que la moyenne calculée sur tout segment soit significativement différente de la moyenne du/ou des segment(s) voisin(s). La partition de cette série en m segments est une segmentation d'ordre m . L'opération de segmentation se déroule comme suit :

Soit i_k , $k=1, 2, \dots, m$, le rang dans la série initiale de l'extrémité terminale du $k^{\text{ième}}$ segment ; \bar{X}_k la moyenne du $k^{\text{ième}}$ segment ; Dm , l'écart quadratique entre la série et la segmentation considérée s'obtient par la formule de l'équation 19 notée :

$$Dm = \sum_{k=1}^m d_k, \quad d_k = \text{écart quadratique} \quad (\text{Eq.19})$$

avec $d_k = \sum_{i=i_{k-1}-1}^{i=i_k} (X_i - \bar{X}_K)^2$ (d_k doit être minimum pour qu'une rupture soit détectée)

La segmentation retenue au terme de l'opération est telle que pour un ordre m de segmentation donné, l'écart quadratique Dm soit minimum et que les moyennes des deux segments contigus soient significativement différentes. La méthode est considérée comme un test de stationnarité; « la série étudiée est stationnaire » constitue l'hypothèse nulle de ce test. Si la procédure ne produit pas de segmentation acceptable d'ordre supérieur ou égal à deux, l'hypothèse de stationnarité de la série est acceptée. Cependant, il est difficile d'attribuer un niveau de signification à ce test (Hubert *et al.*, 1998 in Adja *et al.*, 2019).

Cette méthode présente l'avantage de pouvoir rechercher des changements multiples de moyenne dans une série hydrométéorologique contrairement à celle de Pettitt.

4.2.1.2.3. Ecart de variation par rapport aux ruptures

L'influence climatique des ruptures identifiées dans les séries pluviométriques et thermométriques est rendue par le calcul de l'écart de variation qui permet d'apprécier s'il s'agit d'un déficit ou d'un excédent noté (D). Ainsi, cet écart est évalué en appliquant la formule de l'équation 20 notée (Kouamé, 2011 ; Ahoussi *et al.*, 2013) :

$$D = \frac{X_j}{X_i} - 1 \quad (\text{Eq.20})$$

X_j est la moyenne des variations du paramètre climatique après la rupture et X_i la moyenne des variations du paramètre climatique avant la rupture.

Les conditions d'analyse de l'écart de variation s'expriment comme suit :

- si $D > 0$, on a un excédent au niveau de la période après rupture;
- si $D < 0$, on a un déficit au niveau de la période après rupture.

4.2.2. ANALYSE DE LA DYNAMIQUE CLIMATIQUE

Une combinaison de méthodes s'appuyant uniquement sur des indices climatiques a été utilisée pour l'analyse des impacts des variations climatiques sur le climat saisonnier et annuel. Les indices climatiques utilisés sont de plusieurs natures. D'abord, il y a les indices basés uniquement sur les précipitations (indice de Péguy), ensuite les indices basés sur la combinaison des précipitations et des températures (indice d'Angot et indice de Moral), et enfin, les indices basés sur la combinaison des précipitations et des évapotranspirations (indice UNEP). Ces

indices expriment chacun un aspect climatique différent. L'évolution climatique est appréciée sur plusieurs échelles de temps à savoir l'année (indice UNEP), le semestre (indice d'Angot), le trimestre (indice de Péguy) et le mois (indice de Moral). Ces indices ont été appliqués sur plusieurs sous-périodes d'au moins trente (30) ans (1941-1970 ; 1971-2000 ; 1981-2010 ; 1971-2016) et à des zones climatiques différentes pour analyser la dynamique du climat saisonnier et annuel en passant de la période humide [avant 1970 (1941-1970)] aux périodes sèches [après 1970 (1971-2000 ; 1981-2010 ; 1971-2016)].

4.2.2.1. Indice d'aridité UNEP

L'indice d'aridité UNEP (United Nations Environment Program) est un indicateur du degré d'aridité du climat à un endroit donné par rapport à la demande évaporative de l'atmosphère (Mokhtari *et al.*, 2013). Il est défini comme suit (équation 21) :

$$U = \frac{P}{ETP} \quad (\text{Eq.21})$$

où :

- P : précipitation annuelle moyenne en mm ;
- ETP : évapotranspiration potentielle annuelle moyenne en mm.

L' ETP a été calculée à partir de la méthode de Thornthwaite rendue par l'équation 22 :

$$ETP = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a F \quad (\text{Eq.22})$$

avec :

- $I = \sum_{j=1}^{12} I_j$; $i_j = \left(\frac{t_j}{5} \right)^{1,514}$
- $a = 0,49239 + 1,79 \cdot 10^{-2}I - 7,71 \cdot 10^{-5}I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7}I^3$

et :

- t_j : température moyenne mensuelle en °C ;
- I : indice thermique annuel ;
- i_j : indice thermique mensuel ;
- F : coefficient correcteur, fonction de la latitude et du mois donné (Annexe 1).

Cet indice est largement utilisé (Mokhtari *et al.*, 2013) pour l'évaluation de la qualité du climat et traduit le déficit annuel entre la quantité des précipitations reçue (P) par rapport à la demande

évaporative de l'atmosphère (*ETP*) ; ce qui implique que plus l'indice est faible plus l'aridité est élevée et permet de classer les climats de l'hyperaride à l'humide selon les valeurs suivantes:

- hyperaride : $I < 0,05$;
- aride : $0,05 < I < 0,20$;
- semi-aride : $0,21 < I < 0,50$;
- subhumide sec : $0,51 < I < 0,65$;
- subhumide et humide : $I > 0,65$.

4.2.2.2. Indice pluviométrique d'Angot

L'indice d'Angot étudie l'évolution des précipitations au cours d'une année ainsi que leur répartition saisonnière (Farah, 2014). Cet indice étudie, en fait, le rapport entre les précipitations du semestre chaud et celui du semestre froid au cours d'une année (ou période) (Farah, 2014 ; Ionac *et al.*, 2015). Pour cela, il fait intervenir les sommes des précipitations mensuelles en fonction des conditions de température qu'il calcule selon la formule suivante (équation 23):

$$Ia = \frac{\sum P(6 \text{ mois les plus chauds})}{\sum P(6 \text{ mois les plus froids})} \quad (\text{Eq.23})$$

où P : précipitations mensuelles en mm.

Les critères de décision se présentent comme suit :

- $Ia < 1$: le semestre froid est plus arrosé que le semestre chaud ;
- $Ia > 1$: le semestre chaud est plus arrosé que le semestre froid.

4.2.2.3. Indice saisonnier de Péguy

L'indice saisonnier de Péguy permet de vérifier la pertinence des saisons. Il permet de faire ressortir, pour la pluviométrie, les trois mois les plus pluvieux (Anser, 2012). Le plus simple est de rechercher quels sont les trois mois consécutifs dont la somme des hauteurs d'eau est la plus grande possible, indépendamment de toute définition a priori d'une saison et à exprimer le rapport de ce total trimestriel au total annuel (Sebaibi, 2014). Donc, il s'agit de faire la somme des précipitations au pas de temps trimestriel de manière à avoir un classement décroissant de ces trimestres. Le trimestre le plus pluvieux est celui qui présente la valeur d'indice la plus élevée.

4.2.2.4. Indice pluviométrique de Moral

L'indice pluviométrique de Moral (I_m) est un indice qui est bien adapté pour la classification des climats dans la zone intertropicale et la détermination des mois secs et des mois humides (Farah, 2014). Il se calcule selon la formule suivante (équation 24) :

$$I_m = \frac{P'}{\frac{t^2}{10} - t + 20} \quad (\text{Eq.24})$$

où :

- P' : précipitations mensuelles en mm
- t : température moyenne mensuelle en °C.

L'analyse de cet indice est faite par rapport à sa valeur annuelle (équation 25) :

$$I_M = \frac{P}{T^2 - 10T + 200} \quad (\text{Eq.25})$$

où :

- P : les hauteurs annuelles des précipitations en mm ;
- T : les températures moyennes annuelles en °C

Le mois est considéré comme :

- sec, lorsque $I_m < I_M$;
- humide, lorsque $I_m > I_M$.

4.3. MODÉLISATION PRÉVISIONNELLE DE LA SÉCHERESSE

La démarche suivie au cours de cette étude, afin de modéliser la sécheresse en Côte d'Ivoire, est basée sur la méthode des Régressions Linéaires Multiples (RLM) et l'utilisation de l'Indice des Précipitations Standardisé (SPI) comme indicateur de sécheresse. L'indice SPI a été appliqué aux échelles intra-annuelle (SPI-3, SPI-6 et SPI-9 mois), annuelle (SPI-12 mois) et interannuelle (SPI-24, SPI-36 et SPI-48 mois) et à des zones climatiques homogènes.

4.3.1. CALCUL ET INTERPRÉTATION DU SPI

Pour calculer l'indice SPI, il faut disposer idéalement de relevés mensuels s'étalant sur au moins 20 à 30 ans, mais de préférence sur 50 à 60 ans, voire plus ; ce qui constitue la période optimale (Guttman, 1998 *in* OMM, 2012). Le SPI compare les précipitations sur une certaine période à

la moyenne des précipitations à long terme observée sur le même site (OMM, 2012). Les valeurs de l'indice SPI sont déterminées par une normalisation des précipitations pour une station (ou zone) donnée après ajustement d'une densité de probabilité (Anctil *et al.*, 2002 ; Boudad *et al.*, 2015). L'ajustement se fait séparément pour les 12 mois de l'année afin de conserver la saisonnalité. Ensuite, chaque densité de probabilité cumulée est transformée en une distribution normale standardisée en appliquant la loi normale inverse de moyenne nulle et d'écart-type unitaire. La distribution qui représente le mieux l'évolution des séries de pluies est la distribution Gamma (Boudad *et al.*, 2015). Le SPI pour un total de précipitations de x mm est le quantile gaussien (Q_σ) de la valeur de la fonction de répartition de la loi statistique (F) s'ajustant aux données, prise en x (équation 26) :

$$SPI(x) = Q_\sigma[F(x)] \quad (\text{Eq.26})$$

La fonction de probabilité cumulative de la distribution de gamma est modifiée comme suit (Boudad *et al.*, 2015) (équation 27):

$$F(x) = q + (1 - q) * G(x) \quad (\text{Eq.27})$$

Avec q , le rapport du nombre de zéros et du nombre d'observations (probabilité sur chaque station d'avoir une précipitation nulle sur toute la période considérée). $G(x)$ est la fonction de distribution cumulée des valeurs non nulles. Puisque $G(x)$ est bornée par 0 et 1, $F(x)$ est borné par q et 1; les valeurs $x = 0$ ne sont pas ajustées spécifiquement. Il est donc impossible d'attribuer un SPI aux événements nuls. Par exemple, pour $q = 0,1$, le SPI est partiellement indéfini, sa valeur minimale atteignant -1,28. Plus la période de temps sur laquelle est calculée le SPI s'allonge, plus le pourcentage de zéros est faible, ce qui tend à réduire le nombre de valeurs indéfinies.

La probabilité des précipitations observées est transformée en un indice. Cet indice est exprimé mathématiquement sous la forme suivante (OMM, 2012 ; Soro *et al.*, 2014 ; Konaté, 2018) (équation 28) :

$$SPI = \frac{P - P_m}{\sigma} \quad (\text{Eq.28})$$

avec :

- P : précipitation totale d'une saison (mm) ;
- P_m : précipitation moyenne historique de la saison considérée (mm) ;
- σ : écart-type historique des pluies de la saison considérée (mm).

L'intensité des épisodes de sécheresse en fonction de la valeur de l'indice est définie par McKee *et al.* (1993) qui ont utilisé le système de classification présenté dans le tableau XI. En pratique, quelle que soit l'échelle temporelle du SPI considérée, une sécheresse sévit quand l'indice présente de façon continue une valeur inférieure ou égale à -1 et se termine lorsque l'indice devient positif (OMM, 2012). Une valeur positive du SPI décrit une période humide. Par conséquent, on distingue pour chaque épisode de sécheresse une durée, avec un commencement et une fin, et une intensité pour chaque mois durant lequel l'épisode se poursuit. Il faut remarquer que le SPI évolue entre 2 et -2 (Tableau XI). Les événements en dehors de cet intervalle ne sont pas retirés de la série chronologique. Ils sont plutôt désignés < -2 ou > 2 pour montrer que l'événement est extrême, mais qu'ils ne peuvent pas être quantifiés avec précision (Konaté, 2018).

Tableau XI : Classification de l'indice SPI (McKee *et al.*, 1993)

SPI	Classification	Probabilité (%)
2,0>	Extrêmement humide	2,3
1,5 à 1,99	Sévèrement humide	4,4
1,0 à 1,49	Modérément humide	9,2
-0,99 à 0,99	Proche de la normale	68,2
-1,0 à -1,49	Modérément sec	9,2
-1,5 à -1,99	Sévèrement sec	4,4
-2,0 <	Extrêmement sec	2,3

4.3.2. ÉVALUATION DE LA SÉCHERESSE AUX DIFFÉRENTES ÉCHELLES DU SPI

L'indice SPI peut être calculé pour de nombreuses échelles de temps, ce qui est un réel avantage, qui permet de l'appliquer aux différents types de sécheresses (météorologique, agricole, hydrologique). Le laps de temps pour lequel il est possible de calculer l'indice SPI varie de 1 à 72 mois (OMM, 2012). La possibilité de calculer l'indice SPI sur des échelles de temps multiples offre une souplesse temporelle dans l'évaluation des conditions de précipitations par rapport à l'approvisionnement en eau. Les échelles temporelles retenues pour une étude donnée sont donc fonction des types de sécheresse qui feront l'objet des analyses et applications envisagées. Les conditions météorologiques et l'humidité du sol (agriculture) réagissent relativement vite aux anomalies de précipitations, à une échelle pouvant aller jusqu'à 9 mois (sécheresse météorologique : SPI-1, SPI-3 ; sécheresse agricole : SPI-6, SPI-9), tandis que les eaux souterraines, le débit des cours d'eau et les volumes stockés dans les réservoirs sont sensibles aux anomalies de précipitations à plus long terme, c'est-à-dire à des échelles de temps de l'ordre de 6 à 24 mois voire plus (sécheresse hydrologique : SPI-12, SPI-24, SPI-36,

SPI-48) (OMM, 2012). L'indice SPI évalué sur « x » mois (SPI_x) établit la comparaison entre les précipitations sur la période de « x » mois examinée et les totaux des précipitations pour cette même période de « x » mois de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. Par exemple, l'indice SPI-3 établit la comparaison entre les précipitations sur une période de 3 mois consécutifs et celles enregistrées sur la même série de 3 mois consécutifs de toutes les années étudiées. Le SPI à l'échelle intra-annuelle fournit une indication sur les tendances des précipitations sur une saison et jusqu'à moyenne échéance. Aux échelles annuelle et interannuelle, l'indice SPI fournit une représentation des régimes de précipitations à longue échéance (OMM, 2012).

4.3.3. DESCRIPTION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE DE PRÉVISION

Le modèle mathématique utilisé dans le cadre de cette étude est basé sur la méthode de régression linéaire multiple. Cette méthode peut être utilisée pour prévoir les valeurs d'une variable dépendante à partir de variables explicatives ou indépendantes. En effet, les régressions linéaires multiples sont utilisées pour déterminer la relation linéaire la plus satisfaisante pour prévoir la valeur dépendante qui produit l'erreur-type la plus faible (Kouassi *et al.*, 2016). Chaque variable indépendante est pondérée afin que la valeur des coefficients de régression maximise l'influence de celle-ci dans l'équation finale. Il est possible de manipuler plusieurs variables indépendantes à partir des régressions linéaires multiples, mais seulement une variable dépendante. La régression linéaire multiple est une variante de la méthode de régression simple qui peut aider à faire face à la colinéarité en choisissant itérativement les variables avec la plus grande valeur explicative. Dans une régression linéaire multiple, l'équation est sous la forme suivante (équation 29) (Kouassi *et al.*, 2016) :

$$Y = C_1X_1 + C_2X_2 + \dots + C_nX_n + C_0 \quad (\text{Eq.29})$$

avec :

- Y : variable expliquée ;
- X_i : variable explicative ;
- C_0 : constante ;
- C_i ($1 \leq i \leq N$) : coefficients de pondération de la variable explicative X_i .

En effet, Y est un vecteur de valeurs observées, X_i est une matrice de variables indépendantes ou explicatives, C_i est un coefficient de régression à estimer, et C_0 est un vecteur des résidus ou des perturbations aléatoires (Kouassi *et al.*, 2016).

4.3.4. CONCEPTION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE DE PRÉVISION

Le choix de l'échelle temporelle du SPI est en relation directe avec le type d'application que l'on souhaite réaliser. Lloyd-Hughes et Saunders (2002) ont ainsi rassemblé les résultats de plusieurs études et ont conclu que le SPI peut être utilisé de manière efficace pour la plupart des types de sécheresse. Les cours d'eau, le stockage des réservoirs et les eaux souterraines reflètent les anomalies à plus long terme de précipitation. Pour ces raisons, McKee *et al.* (1993) ont à l'origine calculé le SPI pour 3, 6, 12, 24 et 48 mois. Dans une perspective opérationnelle, il a été opté le calcul des SPI sur les échelles temporelles de 3, 6, 9, 12, 24, 36 et 48 mois (Rezaeian-Zadeh et Tabari, 2012 ; Soro *et al.*, 2014 ; Boudad *et al.*, 2015 ; Djerbouai, 2016). En effet, dans un contexte climatique de plus en plus perturbé par les activités anthropiques, il est indispensable d'analyser les épisodes secs à diverses échelles temporelles en vue de proposer aux populations des mesures d'atténuation ou d'adaptation en matière de gestion de l'eau (Soro *et al.*, 2014). Les sécheresses modélisées concernent donc les sécheresses météorologique (SPI-3), agrométéorologique (SPI-6 et SPI-9) et hydrométéorologique (SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48). Ainsi, dans le cadre de cette étude, les échéances de prévision de la sécheresse vont de l'échéance saisonnière à l'échéance décennale (c'est-à-dire de 1 mois de prévision à 30 ans de prévision à l'avance).

Le choix des variables explicatives pertinentes en entrée du modèle s'est appuyé sur les travaux antérieurs (Rezaeian-Zadeh et Tabari, 2012 ; Boudad *et al.*, 2015 ; Rezaeian-Zadeh *et al.*, 2016 ; etc.). Ces travaux ont, en effet, utilisé comme prédicteurs pertinents, en entrée des modèles développés lors de ces études, des variables continentales (pluie, indice SPI) et des variables océaniques [indice NAO (North Atlantic Oscillation), indice SOI (Southern Oscillation Index)] pour la prévision de l'indice SPI. Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés uniquement qu'aux variables explicatives continentales : la précipitation et l'indice SPI, présageant la capacité de celles-ci, à elles seules, à prévoir l'indice SPI pour un délai d'un (1) mois et plus. La détermination de ces variables s'est effectuée à partir de l'approche de régression descendante (Rezaeian-Zadeh et Tabari, 2012 ; Boudad *et al.*, 2015 ; Djerbouai, 2016). Ainsi, la structure de modèle de régression linéaire multiple utilisée est rendue par la formule de l'équation 30.

$$SPI_j(t + d) = f[SPI_j(t - 3), SPI_j(t - 2), SPI_j(t - 1), SPI_j(t), P_j(t)] \quad (\text{Eq.30})$$

avec :

- j : nombre de mois du SPI ou de P ;
- d : délai de prévision ;

- $SPI(t + d)$: indice SPI prévu au délai d ;
- $SPI(t - 3)$: indice SPI à $t - 3$;
- $SPI(t - 2)$: indice SPI à $t - 2$;
- $SPI(t - 1)$: indice SPI à $t - 1$;
- $SPI(t)$: indice SPI à t ;
- $P(t)$: cumul des pluies à t calculé sur le nombre de mois du SPI .

La figure 23 montre l'exemple des entrées/sorties du modèle de prévision développé.

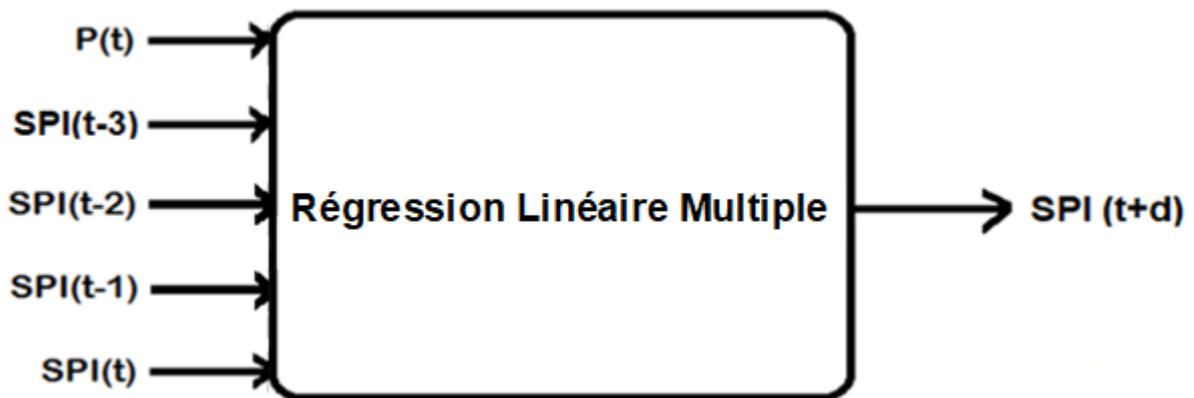


Figure 23 : Entrées /sorties du modèle de prévision

Dans le but d'avoir le même ordre de grandeur, toutes les variables d'entrée du modèle ont été normées (Rezaeian-Zadeh et Tabari, 2012 ; Boudad *et al.*, 2015 ; Djerbouai, 2016) entre 0,05 et 0,95 à partir de la relation suivante (équation 31) :

$$Fi = 0,05 + 0,95 \times \left(\frac{X_i - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \right) \quad (\text{Eq.31})$$

avec :

- Fi : valeur normalisée ;
- X_i : valeur à normaliser;
- X_{min} : valeur minimale sur toute la période d'observation;
- X_{max} : valeur maximale sur toute la période d'observation.

4.3.5. PROCEDURE DE MODÉLISATION

4.3.5.1. Calage du modèle

Le calage d'un modèle permet de l'ajuster aux conditions hydrologiques de la période à l'étude. Dans la pratique, tous les modèles statistiques contiennent des paramètres à estimer.

L'estimation de ces paramètres, qui fait ici référence à l'étape de calage encore appelé calibration, constitue l'une des étapes les plus délicates dans le développement d'un modèle. Selon Hingray *et al.* (2012), les méthodes d'estimation sont multiples et il n'y a aucune méthode d'estimation globalement satisfaisante. L'estimation implique de faire des choix pour établir une stratégie de calibration. Les stratégies sont fonction de l'objectif visé par le modèle. Ainsi, elles visent à identifier le jeu de paramètres optimal pour le modèle et les données considérées. Le calage des modèles s'est fait sur la période de référence 1971-2000. Le calage a été réalisé de façon automatique avec le logiciel Excel 2016. L'estimation des coefficients de pondération des variables retenues a été réalisée par calage automatique avec le solveur du logiciel Excel 2016. Elle a consisté à ajuster les valeurs numériques attribuées aux paramètres des modèles pour reproduire au mieux la réponse observée.

4.3.5.2. Validation du modèle

La validation d'un modèle consiste à établir qu'il donne une représentation raisonnable de la réalité adaptée à l'objectif pour lequel il a été développé. En fait, quelle que soit la capacité d'un modèle à reproduire la réponse observée pour un jeu d'observations donné, il ne peut jamais être conclu que le modèle est juste. Vérifier qu'un modèle est juste est donc impossible. Il est en revanche possible de conclure qu'il n'est pas juste dès qu'il n'arrive pas à expliquer une ou plusieurs observations. Par contre, il est en principe possible de valider un modèle, c'est-à-dire de s'assurer qu'il est raisonnable pour l'objectif visé. Il n'existe cependant pas de méthode universelle pour cette validation.

La validation des modèles s'est appuyé sur le principe du « split-sample test » qui consiste à faire le calage sur les deux tiers (2/3) de l'échantillon des données disponibles et la validation sur le tiers (1/3) restant (Kouassi *et al.*, 2016). Ainsi, la validation des modèles a été effectuée sur la période 2001-2016. Elle a été réalisée de façon manuelle avec le logiciel Excel 2016 en utilisant les coefficients de régression obtenus lors du calage.

4.3.5.3. Critères d'évaluation du modèle

Les critères utilisés afin d'évaluer la performance du modèle sont à la fois des critères numériques et des critères graphiques. En effet, outre l'évaluation numérique, le diagnostic graphique s'avère aussi important car c'est un outil puissant pour valider une modélisation (Kouassi *et al.*, 2016). Ces critères regroupent le coefficient de corrélation, l'erreur quadratique, le critère de KGE, le critère de robustesse, les critères de contingence [le taux de coïncidence

(TC), la probabilité de détection d'un mois sec, humide ou normal (POD), la fausse alerte du premier ordre (FAR), le Hit Skill Score (HSS)] et les critères graphiques (courbes de valeurs observées et simulées, diagrammes de dispersion des valeurs simulées en fonction des valeurs observées). En effet, plusieurs auteurs (Yaka, 2004 ; Hamatan *et al.*, 2004 ; Pham, 2008 ; Kouassi *et al.*, 2012 ; Singla, 2013 ; Kouassi *et al.*, 2016 ; Kodja, 2018 ; Adja *et al.*, 2019) ont utilisé ces critères, dans des études dans le domaine des sciences de l'eau, pour rendre compte de la performance des modèles.

4.3.5.3.1. Coefficient de corrélation (R)

Le coefficient de corrélation (R) est utilisé pour mesurer la corrélation linéaire entre la variable réelle ou mesurée et la variable calculée (Kouassi *et al.*, 2016). Sa formule est (équation 32) :

$$R = \frac{\sum_i(SPI_i - \overline{SPI}) \times (SPI'_i - \overline{SPI'})}{\sqrt{\sum_i(SPI_i - \overline{SPI})^2 - \sum_i(SPI'_i - \overline{SPI'})^2}} \quad (\text{Eq.32})$$

avec :

- SPI_i : indice de précipitations observé ;
- SPI'_i : indice de précipitations prévu ;
- \overline{SPI} : moyenne des indices de précipitations observées ;
- $\overline{SPI'}$: moyenne des indices de précipitations prévus.

Le seuil de corrélation a été fixé à 0,6 (Kouassi *et al.*, 2016).

4.3.5.3.2. Racine carrée de l'erreur quadratique (RMSE)

La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est utilisée comme la mesure de la performance globale du modèle. Le modèle est bien optimisé si la valeur de RMSE est proche de zéro ; ce qui tend vers une prévision parfaite (Kling *et al.*, 2012 ; Rezaeian-Zadeh et Tabari, 2012 ; Boudad *et al.*, 2015 ; Hong *et al.*, 2015 ; Djerbouai, 2016 ; Kouassi *et al.*, 2016 ; Scarpari, 2019). Sa formulation mathématique est donnée par la relation suivante (équation 33):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (SPI_i - SPI'_i)^2}{n}} \quad (\text{Eq.33})$$

avec :

- SPI_i : indice de précipitations observées au pas de temps i;
- SPI'_i : indice de précipitations prévus pour le pas de temps i;
- n : nombre d'observations.

4.3.5.3.3. Critère d'efficacité de Kling-Gupta (KGE)

Pour une évaluation objective d'un modèle hydrologique, Gupta *et al.* (2009) ont indiqué que le critère KGE [Kling-Gupta Efficiency (critère d'efficacité de Kling-Gupta)] est un bon indicateur pour la performance d'un modèle hydrologique (Lobligeois, 2014; Osuch *et al.*, 2015 ; Garcia *et al.*, 2017 ; Kodja, 2018 ; Lee *et al.*, 2020). Pour Gupta *et al.* (2009) et Kling *et al.* (2012), le KGE est une mesure de qualité d'ajustement développée pour fournir une décomposition diagnostique intéressante de l'efficacité de Nash-Sutcliffe, ce qui facilite l'analyse dans le contexte de la modélisation hydrologique (Kodja, 2018). Le KGE permet une meilleure pondération du coefficient de corrélation, du biais et de la mesure de la variabilité relative (Melsen *et al.*, 2019). Le calcul du KGE est implicitement basé sur les hypothèses de normalité et linéarité des données, ainsi que sur l'absence de valeurs aberrantes dans le modèle (Pool *et al.*, 2018). Le KGE varie entre $-\infty$ et 100%. Plus il est proche de 100%, plus les valeurs simulées sont proches des valeurs observées. Sa formule est (équation 34) :

$$KGE = 100 \times \left[1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \right] \quad (\text{Eq.34})$$

avec :

- r : coefficient de corrélation de Pearson entre les valeurs observées et les valeurs prévues ;
- α : rapport entre l'écart-type des valeurs prévues et l'écart-type des valeurs observées;
- β : rapport entre la moyenne des valeurs prévues et la moyenne des valeurs observées.

Les performances du critère de KGE peuvent être classées comme suit (Andersson *et al.*, 2017 ; Fowler *et al.*, 2018 ; Knoben *et al.*, 2018 ; Siqueira *et al.*, 2018 ; Towner *et al.*, 2019 ; Scarpari, 2019) :

- $KGE \geq 75\%$: très bonnes performances ;
- $75\% > KGE \geq 50\%$: bonnes performances ;
- $50\% > KGE > 0\%$: mauvaises performances (performances non satisfaisantes) ;
- $KGE \leq 0\%$: très mauvaises performances.

4.3.5.3.4. Evaluation de la robustesse du modèle

L'une des techniques les plus utilisées pour évaluer la robustesse d'un modèle est la technique du double échantillon. Cette technique permet de tester l'adaptabilité du modèle quelle que soit sa complexité (Kouassi *et al.*, 2011).

Le critère de robustesse (R') du modèle a été évalué par la différence entre le KGE en validation

($KGE_{validation}$) et le KGE en calage (KGE_{calage}). Le modèle est dit robuste si le critère de robustesse, pris en valeur absolu, est inférieur ou égal à 10% (Kouassi *et al.*, 2016).

L'expression du critère de robustesse est (équation 35) :

$$R' = KGE_{validation} - KGE_{calage} \quad (\text{Eq.35})$$

4.3.5.3.5. Critères de contingence

Les critères de contingence sont calculés par rapport aux trois catégories « sèche », « normale » et « humide » obtenues en fonction des valeurs prises par les indices SPI observés ou prévus. Les limites de ces trois catégories sont déterminées à partir de la classification des indices SPI définie par McKee *et al.* (1993) (voir Tableau XI, paragraphe 4.3.1). En effet, la catégorie « sèche » regroupe les indices SPI appartenant aux classes "modérément sec", "sévèrement sec" ou "extrêmement sec". Concernant la catégorie « humide », elle regroupe les indices SPI appartenant aux classes "modérément humide", "sévèrement humide" ou "extrêmement humide". La catégorie normale, quant à elle, prend en compte les indices SPI appartenant à la classe "proche de la normale".

Pour chacune des deux séries de SPI (observés et prévus), on classe les indices par ordre croissant afin de faciliter la définition de ces trois catégories « sèche », « normale » et « humide ». Ayant identifié la catégorie de chaque mois de chaque année (à partir des prévisions et des observations), on construit une table de contingence (Tableau XII) qui permet de déterminer les effectifs de chacun des neuf croisements possibles (Hamatan *et al.*, 2004).

Tableau XII: Table de contingence pour le calcul des critères d'évaluation de la qualité de prévision d'un modèle (Hamatan *et al.*, 2004)

		Prévision			Total
		Sèche	Normale	Humide	
Observations	Sèche	N11	N12	N13	a
	Normale	N21	N22	N23	b
	Humide	N31	N32	N33	c
Total		d	e	f	N
$a = \sum_{j=1}^3 N1_j$, $b = \sum_{j=1}^3 N2_j$, $c = \sum_{j=1}^3 N3_j$, $d = \sum_{i=1}^3 N_i1$, $e = \sum_{i=1}^3 N_i2$, $f = \sum_{i=1}^3 N_i3$					

À partir des effectifs de ces croisements on peut évaluer la qualité des prévisions du modèle à partir du calcul d'un certain nombre de critères :

- **la probabilité de détection (POD)** : elle exprime le pouvoir de détection d'une catégorie donnée. Si on s'intéresse à une catégorie sèche (humide ou normale), la POD sèche (humide ou normale) est le nombre de mois secs (humides ou normaux) correctement prévus par le modèle, rapporté au nombre total de mois secs (humides ou normaux) observés. Elle varie de 0 (mauvaise) à 100% (meilleure) (Yaka, 2004 ; Hamatan *et al.*, 2004 ; Singla, 2013). Sa formulation mathématique est rendue par les relations suivantes (équations 36, 37 et 38) :

$$POD(sèche) = \frac{N11}{a} = \frac{N11}{\sum_{j=1}^3 N1j} \quad (\text{Eq.36})$$

$$POD(normale) = \frac{N22}{b} = \frac{N22}{\sum_{j=1}^3 N2j} \quad (\text{Eq.37})$$

$$POD(humide) = \frac{N33}{c} = \frac{N33}{\sum_{j=1}^3 N3j} \quad (\text{Eq.38})$$

- **la fausse alerte (FAR)** : c'est le nombre prévu d'une catégorie donnée alors que c'est le contraire qui a été observé, rapporté au nombre total prévu de cette catégorie (Hamatan *et al.*, 2004). Ainsi défini, ce critère ne concerne que les catégories sèche et humide. En effet, en s'intéressant à la catégorie sèche (humide), la FAR sèche (humide) est le nombre de mois prévus secs (humides) alors qu'ils ont été observés humides (secs), divisé par le nombre total de mois secs (humides) prévus par le modèle. Elle varie de 0 (meilleure) à 100% (mauvaise) (Yaka, 2004 ; Hamatan *et al.*, 2004 ; Singla, 2013). Sa formule est donnée par les relations suivantes (équations 39 et 40) :

$$FAR(sèche) = \frac{N31}{d} = \frac{N31}{\sum_{i=1}^3 N_{i1}} \quad (\text{Eq.39})$$

$$FAR(humide) = \frac{N13}{f} = \frac{N13}{\sum_{i=1}^3 N_{i3}} \quad (\text{Eq.40})$$

- **Taux de coïncidence (TC)** : C'est le pourcentage des catégories correctement prévues par rapport à la taille de l'échantillon (nombre total de mois) (Yaka, 2004 ; Hamatan *et al.*, 2004 ; Singla, 2013). Il est défini comme suit (équation 41) :

$$TC = \frac{\sum_{i=j=1}^3 N_{ij}}{N} = \frac{N11+N22+N33}{N} \quad (\text{Eq.41})$$

- **le Hit Skill Score (HSS)** : C'est la valeur ajoutée du modèle par rapport à une prévision faite

au hasard (Yaka, 2004 ; Hamatan *et al.*, 2004). Il est rendu par la formule suivante (équation 42) :

$$HSS(\%) = 100 \times \frac{H-t}{N-t} = 100 \times \frac{\sum_{i=j=1}^3 N_{ij} - \frac{N}{3}}{N - \frac{N}{3}} = 100 \times \left(\frac{3}{2} \times TC - \frac{1}{2} \right) \quad (\text{Eq.42})$$

avec :

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

Un modèle parfait à un HSS de 100%, alors qu'un HSS de 0% correspond à une prévision aléatoire (Yaka, 2004 ; Hamatan *et al.*, 2004).

Ainsi, la prévision d'un modèle est dite de bonne qualité si le Skill, la POD et le TC obtenus sont grands, et si les valeurs de FAR obtenues sont faibles (Yaka, 2004 ; Hamatan *et al.*, 2004 ; Singla, 2013).

4.3.5.3.6. Critères graphiques

La performance d'un modèle peut aussi être évaluée qualitativement en comparant visuellement, sur la base d'une même représentation graphique, les valeurs observées et les valeurs prévues d'une variable donnée (Rezaeian-Zadeh et Tabari, 2012 ; Boudad *et al.*, 2015 ; Djerbouai, 2016 ; Kouassi *et al.*, 2016 ; etc.). Dans la pratique, l'évaluation de la performance d'un modèle sur la base de fonctions mathématiques numériques doit toujours être complétée par une évaluation graphique. Elle permet de détecter certaines anomalies non décelables par les critères numériques. Le tracé des diagrammes de dispersion des valeurs prévues en fonction des valeurs observées peut aussi permettre d'apprécier la qualité des simulations effectuées. En pratique, si la prévision était parfaite, c'est-à-dire, si chacune des valeurs prévues par le modèle était égale à la valeur observée, le nuage de points constitué serait aligné et confondu à la droite d'équation $y = x$. Cependant, comme la modélisation n'est pas parfaite, l'évaluation qualitative de la performance des différents modèles consiste à apprécier la dispersion du nuage de points autour de la première diagonale (droite d'équation $y = x$).

CONCLUSION PARTIELLE

Trois approches ont été utilisées pour caractériser la régionalisation climatique en Côte d'Ivoire. Les deux premières (ACPN et CAH) sont basées sur des méthodes statistiques d'analyses multivariées tandis que la troisième (combinaison des indices de Gaussen et de De Martonne) est basée sur des méthodes de caractérisation des régimes climatiques saisonniers et les types de climats. Les différentes méthodes (ACPN et CAH) ont été appliquées sur la période 1961-2016 afin d'actualiser le découpage climatique connu depuis lors en Côte d'Ivoire. Les indices climatiques qui s'appuient sur la pluviométrie et la température viennent conforter les résultats de la régionalisation à partir des méthodes d'analyses multivariées mais aussi clarifier les points de divergences éventuels de celles-ci.

L'évaluation des variations climatiques et de la sécheresse repose sur des méthodes statistiques variées [régression linéaire, tests de ruptures (Pettitt et segmentation de Hubert) et des indices climatiques (indices d'Angot, de Péguy, de Moral, UNEP). Les méthodes statistiques ont permis d'analyser les tendances du climat et la sécheresse, sur la période 1961-2016, à l'intérieur de chacune des régions climatiques préalablement définies en Côte d'Ivoire. Les indices climatiques ont été utilisés pour l'étude de la dynamique climatique au plan saisonnier et annuel en passant de la période humide [avant 1970 (1941-1970)] à la période sèche [après 1970 (1971-2016)] au niveau de chaque région climatique.

La démarche de modélisation de la sécheresse est basée sur la méthode de régression linéaire multiple (RLM) et l'utilisation de l'Indice SPI comme indicateur de la sécheresse. Les sécheresses modélisées concernent, à l'intérieur de chacune des régions climatiques homogènes, les sécheresses météorologique, agrométéorologique et hydrométéorologique. Ainsi, dans le cadre de cette étude, les échéances de prévision de la sécheresse vont de l'échéance saisonnière à l'échéance décennale (c'est-à-dire de 1 mois de prévision à 30 ans de prévision à l'avance). Les variables explicatives pertinentes utilisées en entrée du modèle conçu sont la précipitation et l'indice SPI. Le modèle a été évalué à partir de critères de performances numériques (R, RMSE, KGE, POD sèche, POD normale, FAR sèche, TC, HSS) et graphiques. La mise en œuvre de toutes les méthodes présentées a permis d'obtenir plusieurs résultats. L'exploitation de ces résultats fait l'objet de la troisième partie du mémoire.

TROISIÈME PARTIE:

RÉSULTATS ET

DISCUSSION

CHAPITRE 5 :

CARACTÉRISATION DE LA

RÉGIONALISATION CLIMATIQUE

EN CÔTE D'IVOIRE

5.1. RÉGIONALISATION CLIMATIQUE À PARTIR DE L'ANALYSE MULTIVARIÉE

Cette section présente les résultats de l'étude de l'impact de la sécheresse sur la régionalisation climatique en Côte d'Ivoire à partir de l'analyse statistique multivariée.

5.1.1. RÉGIONALISATION CLIMATIQUE À PARTIR DE L'ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES NORMÉES (ACPN)

5.1.1.1. Description statistique des variables

Les caractéristiques statistiques des variables étudiées, en considérant l'ensemble des stations, sont consignées dans le tableau XIII. L'analyse du tableau XIII a révélé que la pluviométrie moyenne interannuelle sur la période 1961-2016 oscille entre 1010,3 et 2233,8 mm avec une moyenne de 1290,2 mm. Quant à la pluviométrie obtenue sur les trimestres glissants, elle fluctue entre 30,99 et 1082,59 mm avec une moyenne de 362,94 mm de pluie.

Tableau XIII : Statistique descriptive des variables étudiées (1961-2016)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Longitude	2°78 O	8°30 O	5°29 O	1°45 O
Latitude	4°75 N	10°30 N	7°17 N	1°47 N
Altitude (m)	1,00	494,00	218,38	133,58
P-AN (mm)	1010,30	2233,80	1300,70	284,71
P-JFM (mm)	30,99	217,30	144,53	50,83
P-FMA (mm)	89,44	348,23	255,88	68,65
P-MAM (mm)	181,36	566,12	375,94	89,47
P-AMJ (mm)	288,22	987,69	494,49	168,96
P-MJJ (mm)	322,85	1082,59	502,30	175,36
P-JJA (mm)	313,06	914,73	468,86	147,34
P-JAS (mm)	235,40	1021,70	415,27	171,42
P-ASO (mm)	182,99	879,64	408,79	139,51
P-SON (mm)	261,72	592,96	344,99	76,87
P-OND (mm)	100,03	473,02	218,39	84,78

5.1.1.2. Analyse des corrélations

Le tableau XIV présente la matrice de corrélation exprimant les différentes corrélations entre les variables. Le but de cette analyse est de vérifier le caractère redondant de ces variables. Il ressort de ce tableau que l'ensemble des valeurs de corrélation est relativement faible. En effet, plus de 80% des coefficients de corrélation sont inférieurs à 0,70. Il s'en suit que les variables analysées ne sont pas fortement corrélées entre elles. Ce qui réduit significativement la redondance de l'information et justifie du même coup la pertinence dans le choix de ces variables pour mener l'étude. Les fortes corrélations constatées lient des variables de même classe, c'est-à-dire d'une part, les variables liées aux précipitations et d'autre part, les variables liées aux facteurs définissant les conditions géographiques.

Tableau XIV : Matrice de corrélation entre variables (1961-2016)

	P-JFM	P-FMA	P-MAM	P-AMJ	P-MJJ	P-JJA	P-JAS	P-ASO	P-SON	P-OND	Long	Lat	Alt	P-AN
P-JFM	1													
P-FMA	0,99	1												
P-MAM	0,88	0,86	1											
P-AMJ	0,55	0,51	0,86	1										
P-MJJ	0,29	0,24	0,67	0,94	1									
P-JJA	-0,14	-0,18	0,18	0,50	0,75	1								
P-JAS	-0,46	-0,46	-0,41	-0,30	-0,01	0,63	1							
P-ASO	-0,3	-0,3	-0,31	-0,31	-0,08	0,52	0,97	1						
P-SON	0,38	0,35	0,5	0,45	0,53	0,64	0,51	0,62	1					
P-OND	0,67	0,61	0,89	0,92	0,84	0,45	-0,23	-0,18	0,64	1				
Long	0,11	0,14	0,15	0,15	0,02	-0,38	-0,63	-0,67	-0,44	0,05	1			
Lat	-0,85	-0,82	-0,95	-0,86	-0,65	-0,1	0,55	0,47	-0,36	-0,87	-0,18	1,00		
Alt	-0,61	-0,57	-0,77	-0,81	-0,66	-0,12	0,59	0,58	-0,16	-0,78	-0,4	0,85	1	
P-AN	0,11	0,11	0,04	-0,02	-0,05	0,03	0,13	0,18	0,15	0	-0,33	-0,04	0,07	1

5.1.1.3. Valeurs propres et variances

Le tableau XV présente respectivement les valeurs propres et les variances des différents facteurs au niveau de l'ACPN réalisée. Seules les composantes principales dont les valeurs

propres sont supérieures ou égales à 1 et dont le cumul pour une ACP donnée vaut au moins 70% ont été considérées comme significatives. Seulement les quatre (4) premières composantes remplissent cette condition. Les résultats montrent que les variances exprimées par les quatre premiers facteurs sont de 94,2%. En considérant les trois premières composantes principales, la variance exprimée est près de 88% (plus de 70%), soit près de la totalité des variances exprimées. Les trois premiers facteurs contiennent donc l'essentiel des informations relatives aux matrices des données. Ainsi, les composantes principales retenues pour l'analyse sont au nombre de 3 (F1, F2 et F3).

Tableau XV : Valeurs propres et variances (1961-2016)

	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	6,91	3,75	1,66	0 ,81
Cumul valeurs propres	6,91	10,66	12,32	13,13
Variabilité (%)	49,34	26,79	11,83	6,23
% cumulé	49,34	76,14	87,97	94,20

5.1.1.4. Analyse du cercle des variables

Seuls les plans factoriels F1-F2 et F1-F3 ont été présentés car ils rendent compte de manière satisfaisante les structures des données. L'analyse dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F2 montre que ce plan factoriel est le plus important et représente 76,14% de la variance exprimée, soit plus de la moitié de la variance. Le facteur F1 est le plus important avec 49,34% de la variance exprimée. Celui-ci est déterminé par deux regroupements (Figure 24). Dans la partie négative, on a un regroupement défini uniquement par des variables afférentes aux cumuls pluviométriques (P-JFM, P-FMA, P-MAM, P-AMJ, P-OND). Ces cumuls concernent en général les mois de saison sèche ou d'intersaison. Ce premier regroupement s'oppose à un second formé par des variables de position géographique (latitude et altitude) et est situé dans la partie positive. Le facteur F2 (26,8%) est défini également par deux regroupements (Figure 24). Le premier regroupement situé dans la partie positive est composé uniquement par des variables afférentes aux cumuls pluviométriques (P-JJA, P-ASO, P-SON, P-JAS) des mois les plus arrosés de l'année. Le deuxième regroupement ne comprend qu'une variable de position géographique (longitude) dans la partie négative.

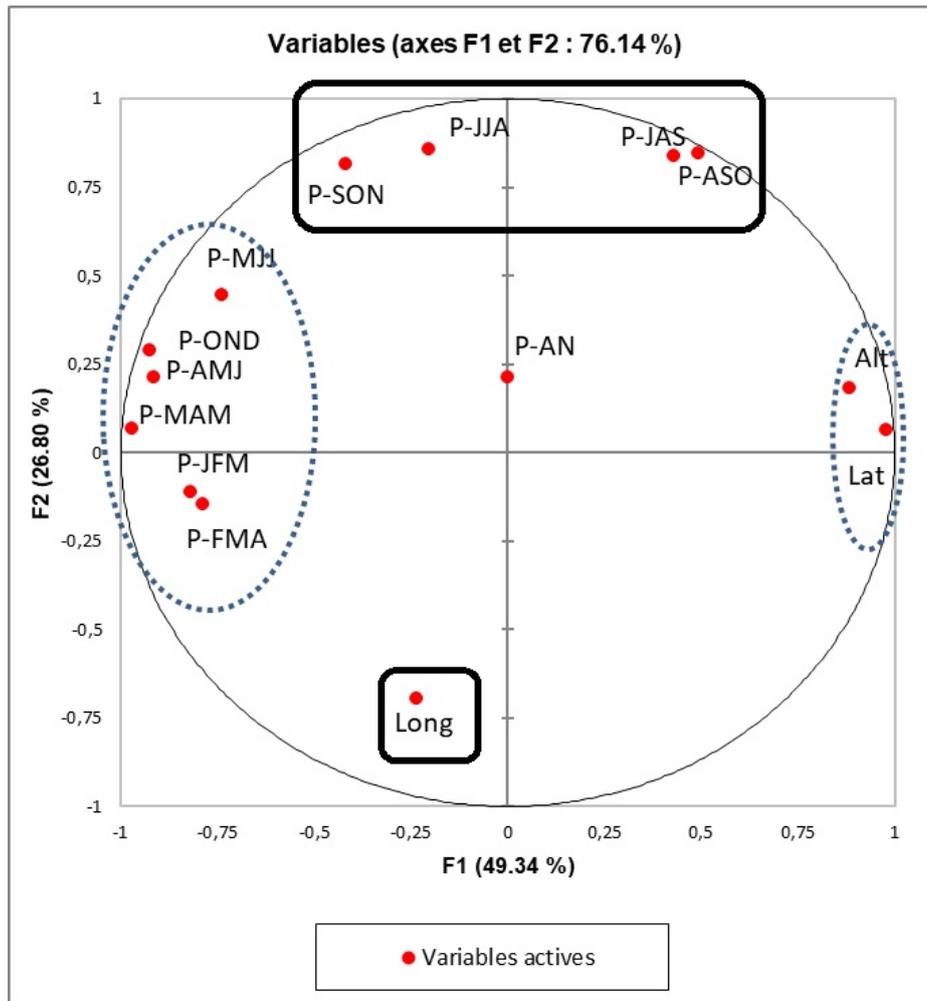


Figure 24: Espace des variables dans le plan factoriel F1-F2 (1961-2016)

L'analyse dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F3 (61,17% de l'inertie cumulée) met en évidence un nouveau regroupement significatif défini par le facteur F3 (11,83% de la variance totale) (Figure 25). Ce regroupement ne comprend que le cumul pluviométrique annuel (P-AN) et est situé dans sa partie positive. Ce résultat traduit l'importance de la pluviométrie annuelle dans la définition d'un régime climatique.

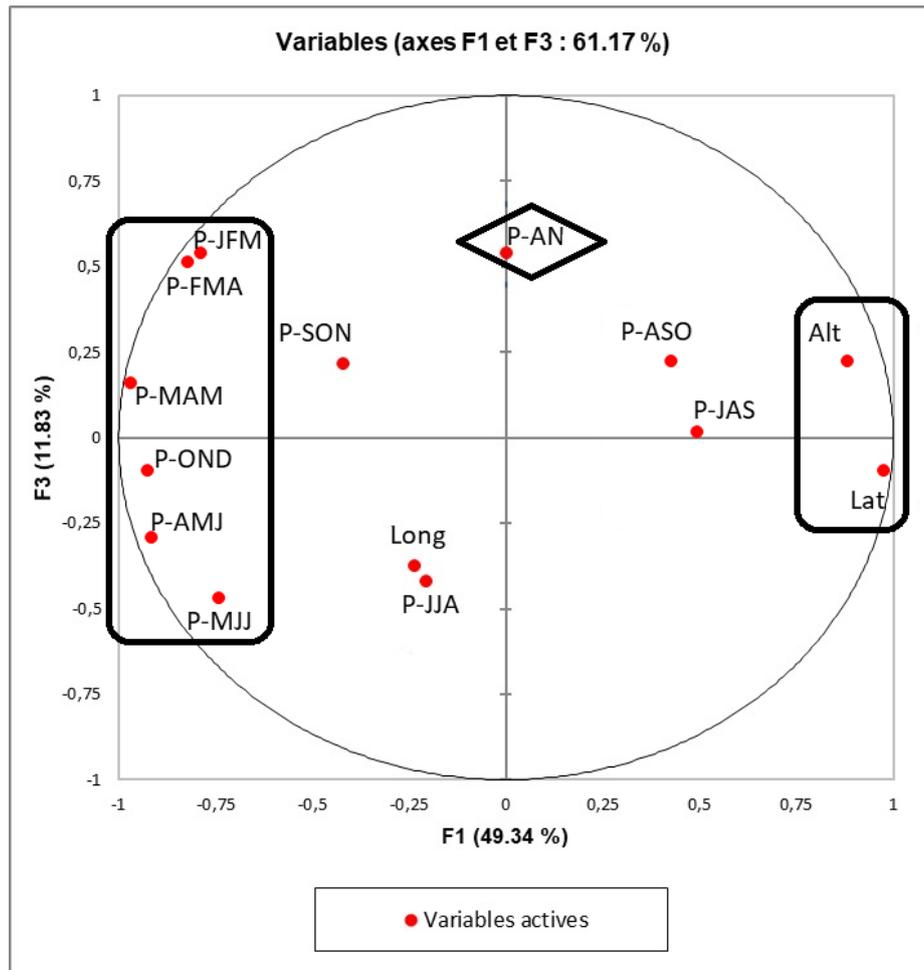


Figure 25 : Espace des variables dans le plan factoriel F1-F3 (1961-2016)

5.1.1.5. Analyse dans l'espace des individus

L'analyse dans l'espace des individus du plan factoriel F1-F2 permet d'identifier cinq grands regroupements des stations pluviométriques en Côte d'Ivoire (Figure 26). Le premier regroupement (R1) renferme les stations pluviométriques situées aux basses altitudes et dont la pluviométrie est relativement élevée. Il s'agit des stations d'Abidjan, Abengourou, Adiaké, Aboisso, Alépé, Sassandra, Dabou, Daloa, Bocanda, Tiassalé, Gagnoa, Bouaflé, Agboville, Grand-lahou, Soubré, Oumé, Agnibilékrou, Adzopé, Azaguié, Bongouanou, Daoukro, Dimbokro et Divo. Le deuxième regroupement (R2) comprend uniquement la station de Tabou qui a une pluviométrie très élevée et qui est à basse altitude et à très faible latitude. Le troisième regroupement (R3) prend en compte les stations situées aux moyennes latitudes. Ce sont les stations de Séguéla, Vavoua, Mankono, Bouaké, Béoumi, Dabakala, Bondoukou, M'bahiakro et Katiola. Le regroupement 4 (R4) comprend les stations influencées par une forte pluviométrie, situées aux latitudes moyennes et aux altitudes les plus élevées. Ce sont les

stations de Man, Guiglo, Danané et Toulépleu, qui sont toutes situées à l’Ouest de la Côte d’Ivoire. Enfin, le cinquième regroupement (R5) est constitué des stations se situant aux hautes latitudes et à relativement faibles pluviométries. Ce groupe renferme la majeure partie des stations situées dans la zone Nord de la Côte d’Ivoire. Ce sont les stations d’Odienné, Boundiali, Tengrela, Korhogo, Ferké, Niakara, Touba, Ouangolo, Tafiré et de Bouna.

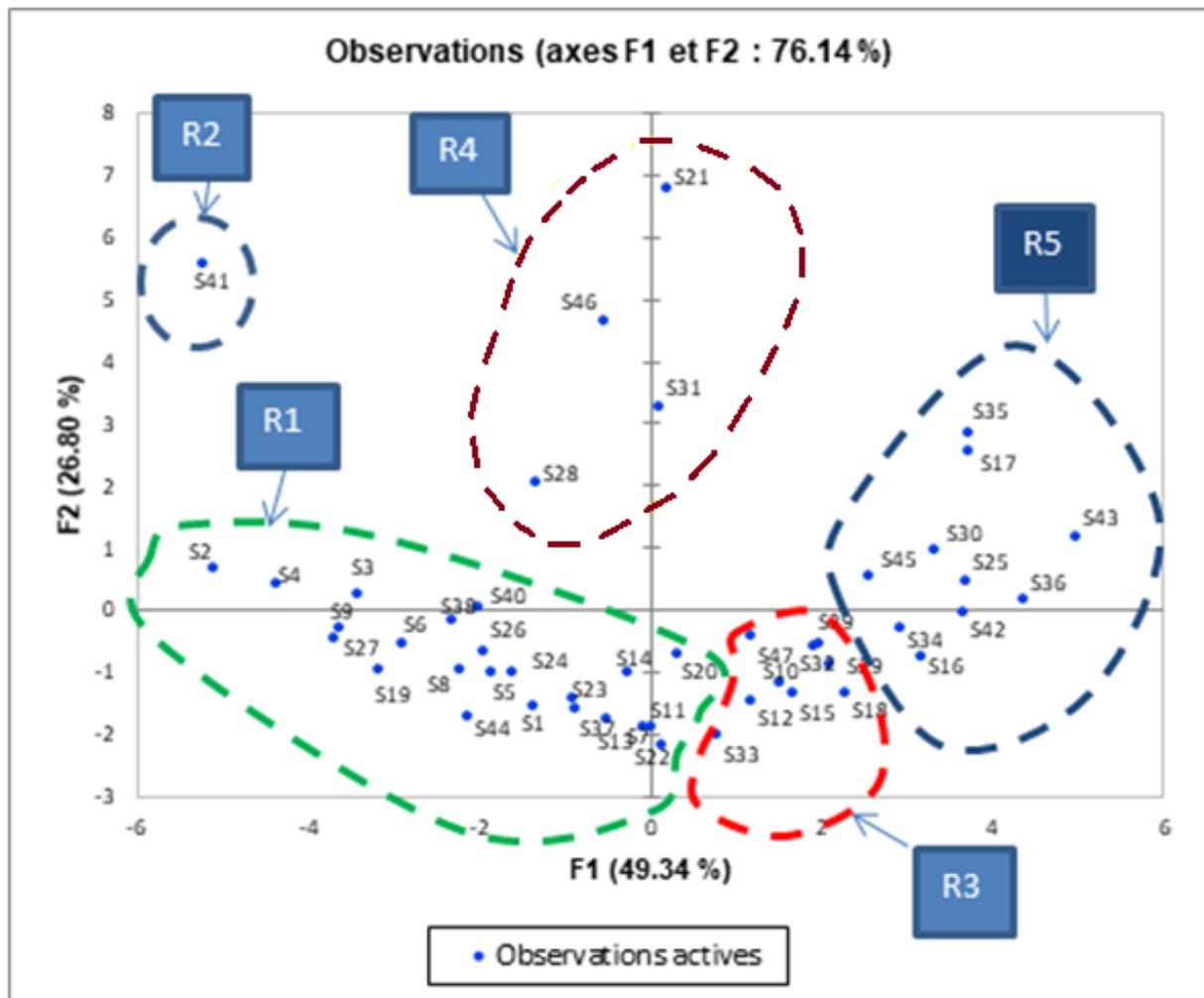


Figure 26 : Espace des individus dans le plan factoriel F1-F2 (1961-2016)

Une synthèse cartographique des résultats obtenus à partir de l’analyse en composantes principales normées (ACPN) a été réalisée (Figure 27). Cette synthèse montre que la Côte d’Ivoire peut être subdivisée en cinq (5) zones climatiques homogènes :

- la première zone est représentée par les stations du climat subéquatorial 1 (Z₁). Cette région, qui englobe les stations situées relativement aux basses altitudes et latitudes et dont les cumuls pluviométriques saisonniers sont relativement élevés, couvre le Sud-intérieur et le littoral (Attéen de l’intérieur et Attéen du littoral) à l’exception de la station de Tabou. La forte pluviométrie constatée dans cette zone peut être expliquée par le fait que, d’une part, les zones

du littoral situées au Sud sont en contact direct avec l'océan atlantique et donc à proximité des régions génératrices des perturbations. D'autre part, de par leur position géographique, elle se retrouvent sur la trajectoire des masses d'air humide venant de l'océan atlantique et de la mousson Ouest Africaine. En remontant plus haut, toujours dans la même zone, on constate une baisse relative de la pluviométrie qui est liée d'une part à l'éloignement de l'océan atlantique au fur et à mesure qu'on avance dans le Nord et d'autre part, au front intertropical ;

- la deuxième zone correspond au climat subéquatorial 2 (Z_2) et qui couvre la côte sud-ouest ivoirienne. Elle est constituée de la station de Tabou (Attié du Sud-Ouest) qui est la station la plus basse en termes d'altitude et de latitude. Les cumuls pluviométriques saisonniers sont ici relativement très élevés ;

- la troisième zone regroupe les stations du climat tropical humide (Z_3). Elle est localisée dans la partie centrale du territoire (climat baouléen) et regroupe les stations situées relativement aux moyennes latitudes et altitudes. La pluviométrie dans cette zone étant influencée par le front intertropical, les cumuls pluviométriques saisonniers sont relativement moins élevés ;

- la quatrième zone comprend les stations du climat de Montagnes (Z_4). Elle couvre la zone ouest montagneuse de la Côte d'Ivoire et renferme les stations situées aux latitudes moyennes et aux altitudes relativement les plus élevées. Les cumuls pluviométriques enregistrés dans cette zone sont relativement les plus élevés. La forte pluviométrie enregistrée dans cette zone est liée au caractère montagneux de celle-ci. En effet, les chaînes de montagnes étant un obstacle devant les masses d'air obligent celles-ci à s'élever, ce qui rend le plus grand nombre de noyaux de condensation très actifs. Par conséquent, les diamètres des gouttelettes grossissent par effet de coalescence ;

- la cinquième zone est celle du climat tropical de transition (Z_5). Cette zone englobe les stations situées relativement aux altitudes élevées et aux latitudes les plus élevées. Les cumuls pluviométriques enregistrées dans cette zone sont relativement les plus faibles. Elle couvre la majeure partie du Nord de la Côte d'Ivoire (climat soudanais). En effet, cette zone subit plus l'influence de l'harmattan. En effet, les masses d'air venant de l'océan pacifique et descendant vers la zone soudanaise ivoirienne s'échauffent, ce qui fait disparaître les condensations et baisser l'humidité relative et entraîne une augmentation de la température.

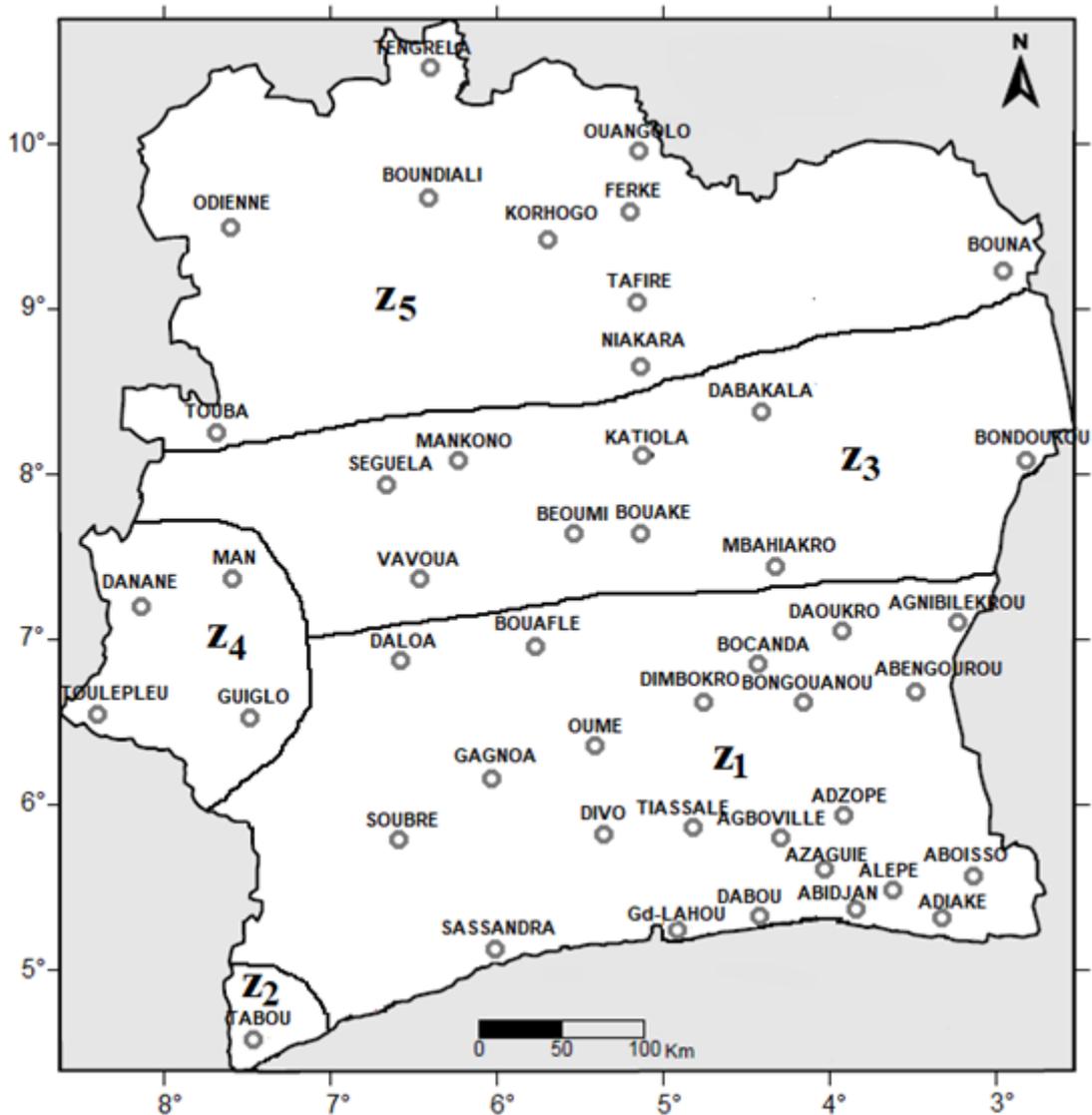


Figure 27 : Zonage climatique de la Côte d'Ivoire à partir des résultats de l'ACPN (1961- 2016)

5.1.2. RÉGIONALISATION CLIMATIQUE À PARTIR DE LA CLASSIFICATION ASCENDANTE HIÉRARCHIQUE (CAH)

Les résultats de la classification ascendante hiérarchique sur la période 1961-2016 permettent, avec une distance de coupure considérée d'environ 33 (inférieure à 50), d'identifier cinq (5) grandes classes homogènes des stations pluviométriques en Côte d'Ivoire (Figure 28) :

- la première classe (C₁) renferme les stations pluviométriques situées globalement au Sud, au Centre et à l'Est du territoire. Il s'agit des stations d'Abengourou, Aboisso, Adzopé, Agboville, Agnibilékrou, Alépé, Azaguié, Bocanda, Bongouanou, Bouaflé, Daloa, Daoukro, Dimbokro, Divo, Gagnoa, Oumé, Soubré et Tiassalé ;
- la deuxième classe (C₂), constituée des stations pluviométriques situées sur le littoral, comprend les stations d'Abidjan, Adiaké, Dabou, Grand-Lahou, Sassandra et Tabou ;

- la troisième classe (C_3) est formée des stations pluviométriques situées globalement au Centre, au Nord et au Nord-Est. Cette classe est constituée des stations de Béoumi, Bondoukou, Bouaké, Bouna, Dabakala, Ferké, Katiola, Korhogo, Mankono, M'bahiakro, Niakara, Séguéla, Tafiré, Touba et Vavoua ;
- la quatrième classe (C_4) contient essentiellement des stations pluviométriques du Nord. Ce sont les stations de Boundiali, Odienné, Ouangolo et Tengrela ;
- la cinquième classe (C_5) renferme les stations situées à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Cette classe est composée des stations de Danané, Guiglo, Man et Toulépleu.

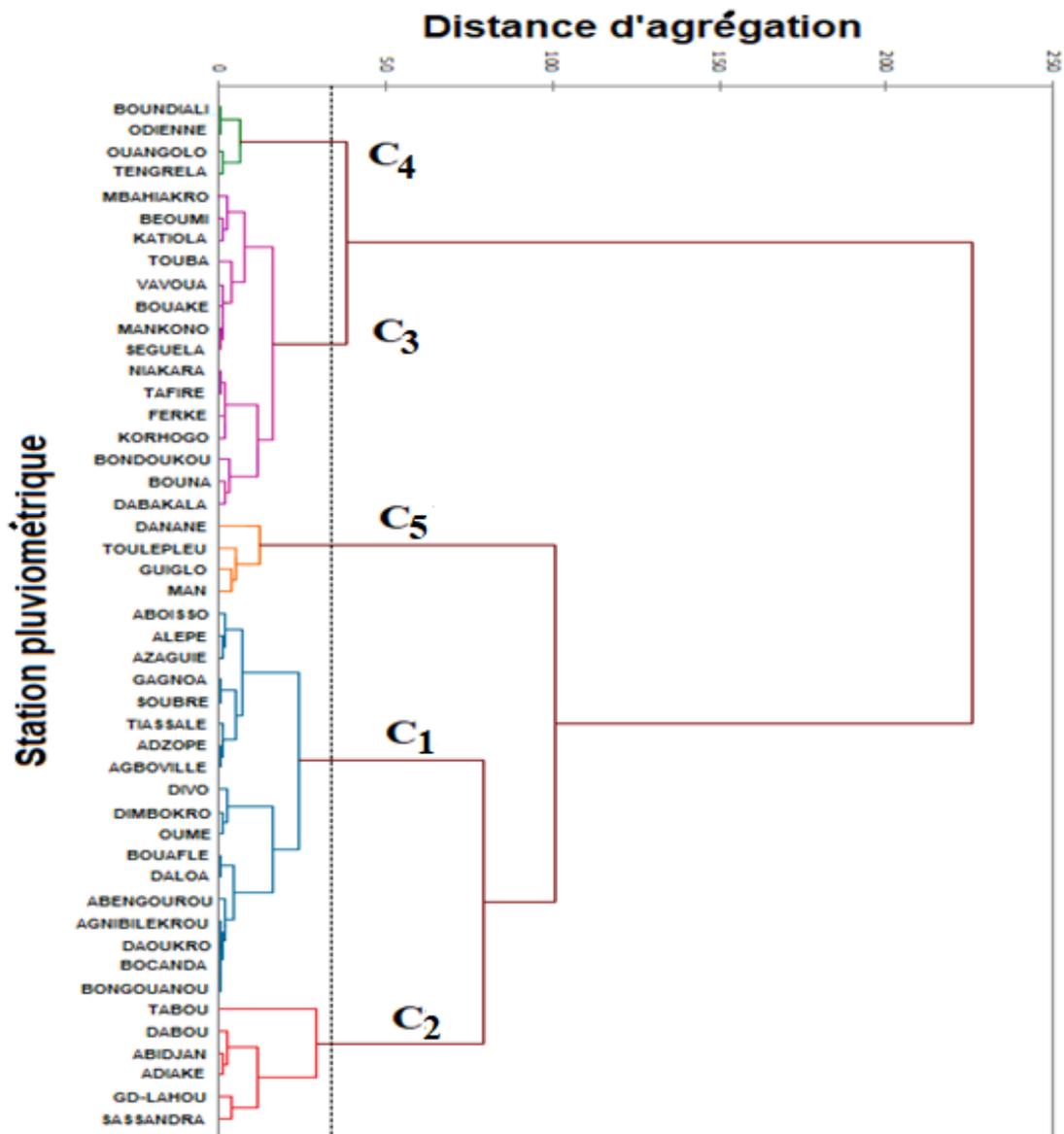


Figure 28 : Classification hiérarchique des stations pluviométriques (1961- 2016)

La Figure 29 montre la configuration spatiale des régions climatiques homogènes issues de la classification ascendante hiérarchique. Cette configuration montre que la Côte d'Ivoire peut

être subdivisée en cinq (5) régions climatiques homogènes :

- la première région (R₁) correspond au climat subéquatorial 1. Cette région couvre le Sud-intérieur (Attéen de l'intérieur) ;
- la deuxième région (R₂) représente le climat subéquatorial 2 qui englobe toute la frange littorale (Attéen du littoral) ;
- la troisième région (R₃) met en évidence le climat tropical humide qui couvre le Centre, le Nord-Est et le Centre-Nord (climat baouléen) ;
- la quatrième région (R₄) traduit le climat tropical de transition. Elle s'étale sur une partie du Nord ivoirien (climat soudanais) ;
- la cinquième région (R₅) est le reflet du climat de Montagnes. Elle englobe la région ouest semi-montagneuse.

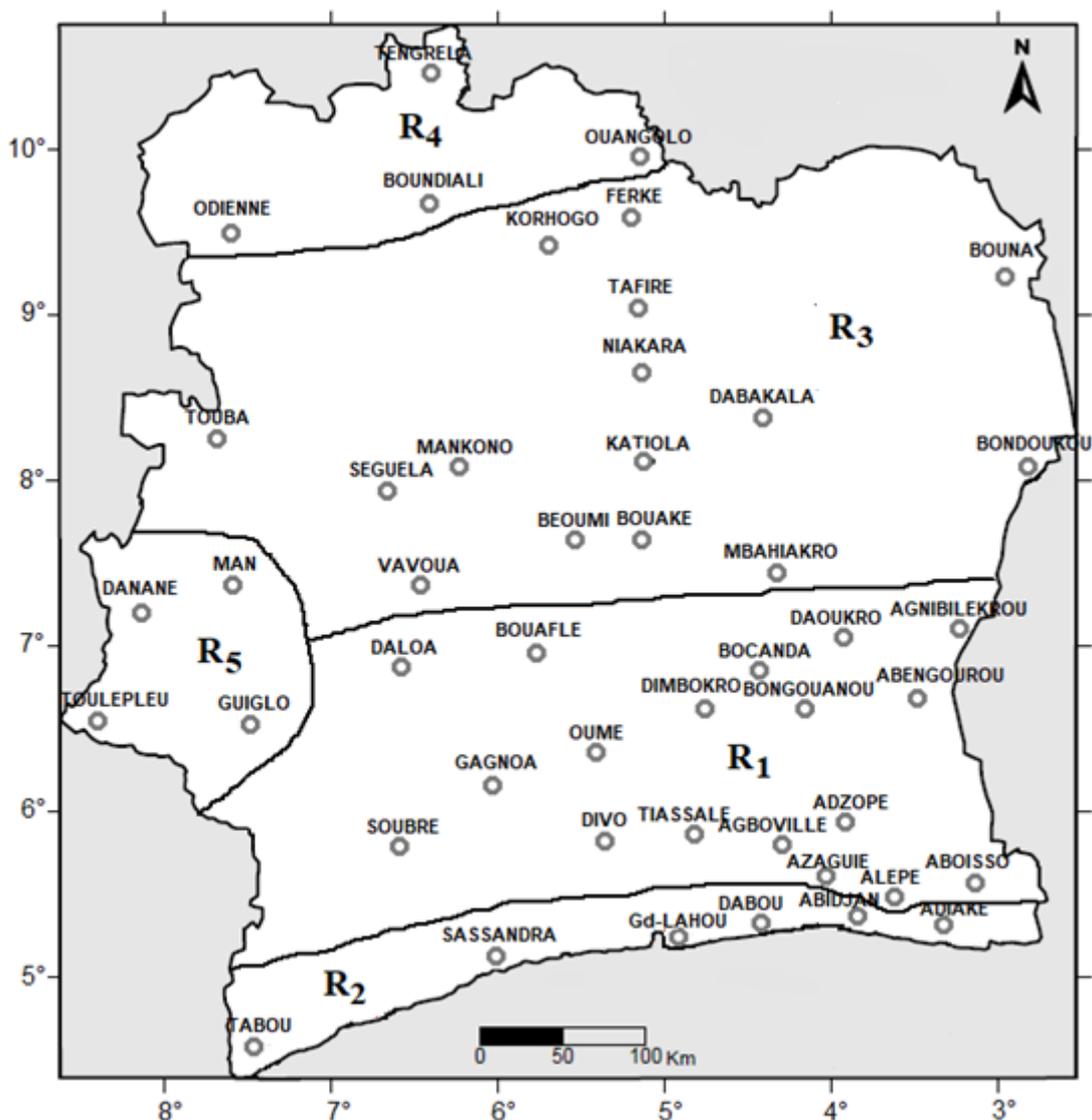


Figure 29 : Zonage climatique de la Côte d'Ivoire à partir des résultats de la CAH (1961-2016)

Une comparaison des résultats de l'ACPN et de la CAH sur la période 1961-2016 a été effectuée. Des points de convergence et de divergence sont mis en évidence. L'ACPN et la CAH sont parvenues aux mêmes résultats en ce qui concerne la région climatique des montagnes qui regroupent quatre (4) stations (Man, Danané, Guiglo et Toulépleu). Pour ce qui concerne les autres régions climatiques, les deux méthodes sont parvenues à des résultats avec des points de convergence et des points de divergence.

La CAH identifie le climat soudanais seulement aux stations de Tengrela, Odienné, Boundiali et Ouangolo alors qu'en plus de ces quatre stations, l'ACPN prend en compte les stations de Bouna, Ferké, Korhogo, Niakara, Tafiré et Touba. En effet, la CAH a classé ces stations au sein du climat baouléen. Les deux méthodes s'accordent sur l'appartenance des stations de Séguéla, Mankono, Katiola, Dabakala, Vavoua, Béoumi, Bouaké, M'bahiakro et Bondoukou, au climat baouléen. Elles s'accordent également sur l'appartenance des stations d'Abengourou, Aboisso, Agnibilékrou, Alépé, Adzopé, Daloa, Bocanda, Tiassalé, Gagnoa, Bouaflé, Agboville, Soubré, Oumé, Bongouanou, Daoukro, Dimbokro et Divo à une même région climatique. Alors que l'ACPN prend en compte les stations d'Abidjan, Adiaké, Dabou, Grand-Lahou et Sassandra comme des stations appartenant à la même région climatique que celle citée ci-dessus, la CAH les isole comme appartenant à une autre région climatique. En effet, la régionalisation définie par l'ACPN correspond au climat attiéen de façon générale. Cependant, la CAH a pu scinder ce climat attiéen en deux zones climatiques à savoir le climat attiéen de l'intérieur et le climat attiéen du littoral (Abidjan, Adiaké, Dabou, Grand-Lahou et Sassandra). La CAH a ajouté au climat attiéen du littoral la station de Tabou alors que celle-ci a été érigée en une autre région climatique selon l'ACPN. Cette région climatique correspond au climat attiéen du Sud-Ouest. En somme, les deux méthodes (ACPN et CAH) se sont accordées parfaitement sur la définition de la région climatique des Montagnes. Cependant, des confusions ont été constatées dans la définition d'une part, des climats soudanais et baouléen, et d'autre part, dans la subdivision du climat attiéen. La CAH n'a pas été assez performante à classer les stations telles que celles de Ferké, Korhogo, Tafiré, Niakara, Bouna dans la zone climatique soudanaise. L'ACPN n'a pas pu isoler le climat attiéen de l'intérieur du climat attiéen du littoral. Cependant, elle a permis de définir la région climatique de l'attiéen du Sud-Ouest. Quant à la CAH, elle a permis de dissocier le climat attiéen de l'intérieur du climat attiéen du littoral. Cependant, elle n'a pas permis de définir la région climatique de l'attiéen du Sud-Ouest représentée par la station de Tabou. A partir de la figure 28, il est observé que la station de Tabou présente une particularité. En effet, au niveau de la région R_2 (classe C_2), en descendant d'un niveau dans l'agrégation, il est constaté que la station de Tabou pourrait à elle seule constituer une zone climatique

homogène. Cette particularité serait due à la distribution saisonnière des précipitations au niveau de Tabou qui est différente de celle des autres stations appartenant à ce groupe du littoral, avec des totaux saisonniers et annuels dans l'ensemble relativement plus élevés à Tabou.

Au plan de la régionalisation, il ressort synthétiquement que six (6) zones climatiques ont été mises en évidence, à savoir (Figure 30) :

- une première région représentée par les stations du climat tropical de transition (Z_1). Cette région couvrirait la partie nord ivoirienne (climat soudanais) ;
- une deuxième région correspondant au climat tropical humide (Z_2). Elle s'étalerait au niveau de la frange centrale du territoire (climat baouléen) ;
- une troisième région qui correspond au climat de Montagnes (Z_3). Elle s'étendrait sur la région ouest montagneuse du pays.
- une quatrième région qui regroupe les stations du climat subéquatorial 1 (Z_4). Elle couvrirait le Sud-intérieur (Attéen de l'intérieur) ;
- une cinquième région qui est celle du climat subéquatorial 2 (Z_5). Elle engloberait toute la frange littorale (Attéen du littoral) à l'exception du Sud-Ouest;
- la sixième région comprend les stations du climat subéquatorial 3 (Z_6). Elle couvrirait la côte sud-ouest ivoirienne (Attéen du Sud-Ouest) ;

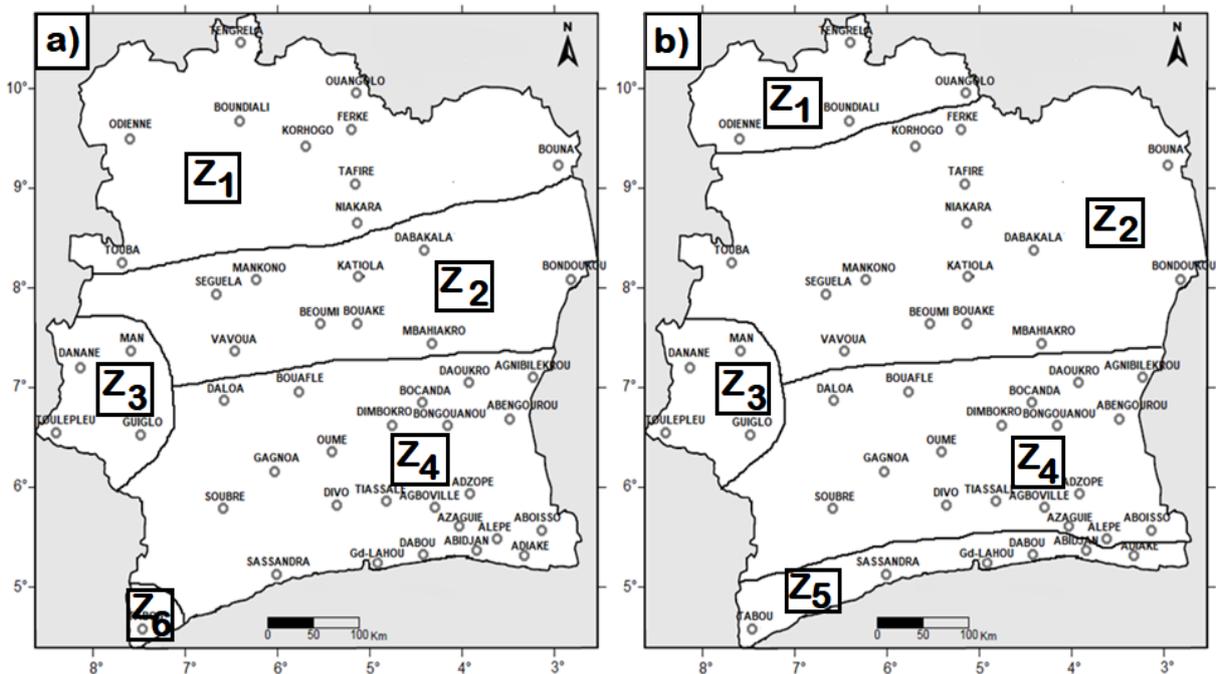


Figure 30 : Synthèse des résultats du zonage obtenu à partir de l'ACP (a) et de la CAH (b)

Les différentes analyses permettent de se rendre compte du caractère pertinent de la CAH à la définition de régions homogènes, et de ce fait, elle se présente comme une bonne complémentarité à l'ACP dans la régionalisation climatique. Ainsi, la CAH a été utilisée pour

l'analyse comparative de la régionalisation en passant de la période avant 1970 (1961-1970) à la période après 1970 (1971-2016).

5.1.3. ANALYSE DE L'INFLUENCE DE LA SÉCHERESSE SUR LA RÉGIONALISATION CLIMATIQUE

5.1.3.1. Classification ascendante hiérarchique sur la période 1961-1970

Les résultats de la classification hiérarchique ascendante sur la période 1961-1970 ont permis, avec une distance de coupure considérée d'environ 33 (inférieure à 50), d'obtenir cinq régions climatiques homogènes (Figure 31) :

- la première région (C₁) est représentée par les stations du climat subéquatorial 1 (Attiéen de l'intérieur). Elle renferme vingt (20) stations pluviométriques. Il s'agit des stations d'Abengourou, Aboisso, Adzopé, Agboville, Agnibilékrou, Alépé, Azaguié, Bocanda, Bongouanou, Bouaflé, Daloa, Daoukro, Dimbokro, Divo, Gagnoa, M'bahiakro, Oumé, Soubré, Tiassalé et Vavoua ;
- la deuxième région (C₂) correspond au climat subéquatorial 2 (Attiéen du littoral). Elle comprend six (6) stations que sont les stations pluviométriques d'Abidjan, Adiaké, Dabou, Grand-lahou, Sassandra et Tabou ;
- la troisième région (C₃) regroupe les stations du climat tropical humide (climat baouléen). Elle est composée de onze (11) stations qui concernent les stations pluviométriques de Béoumi, Bondoukou, Bouaké, Bouna, Dabakala, Katiola, Mankono, Niakara, Séguéla, Tafiré et Touba ;
- la quatrième région (C₄) est celle du climat tropical de transition (climat soudanais). Elle affiche six (6) stations. Cette région renferme les stations de Boundiali, Ferké, Korhogo, Odienné, Ouangolo et Tengrela ;
- la cinquième région (C₅) comprend les stations du climat de Montagnes. Elle est constituée de quatre (4) stations pluviométriques que sont les stations de Danané, Guiglo, Man et Toulépleu.

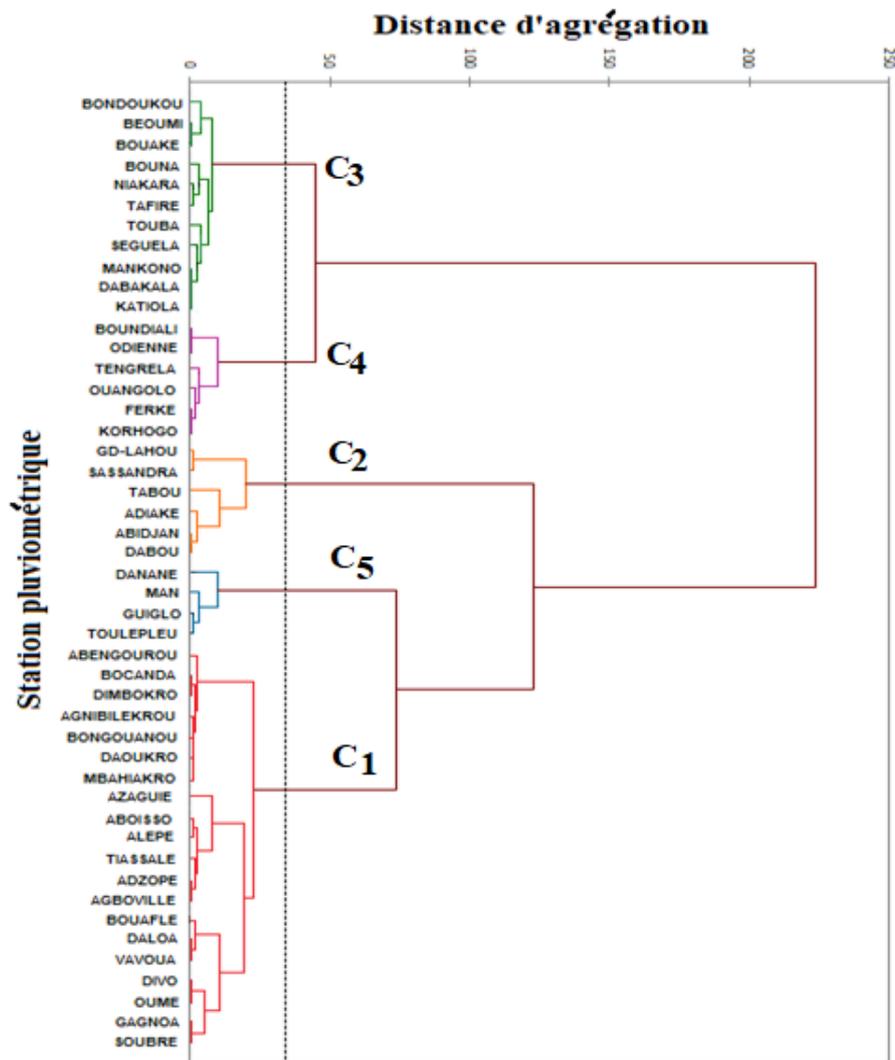


Figure 31 : Classification hiérarchique des stations pluviométriques (1961-1970)

5.1.3.2. Classification ascendante hiérarchique sur la période 1971-2016

La figure 32 montre les résultats de l'application de la classification hiérarchique ascendante sur la période 1971-2016. Ces résultats ont permis également, avec une distance de coupure considérée d'environ 37 (inférieure à 50), d'obtenir cinq régions climatiques homogènes en Côte d'Ivoire (Figure 32) :

- la première région (C₁) est représentée par les stations du climat subéquatorial 1 (Attéen de l'intérieur). Elle englobe treize (13) stations pluviométriques qui sont : Abengourou, Adzopé, Agboville, Agnibilékrou, Bocanda, Bongouanou, Daoukro, Dimbokro, Divo, Gagnoa, Oumé, Soubré et Tiassalé ;
- la deuxième région (C₂) correspond au climat subéquatorial 2 (Attéen du littoral). Elle renferme neuf (9) stations comprenant les stations pluviométriques d'Abidjan, Aboisso, Adiaké, Alépé, Azaguié, Dabou, Grand-lahou, Sassandra et Tabou ;

- la troisième région (C₃) regroupe les stations du climat tropical humide (climat baouléen). Elle est composée de douze (12) stations. Les stations pluviométriques concernées sont : Béoumi, Bondoukou, Bouaflé, Bouaké, Dabakala, Daloa, Katiola, Mankono, Mbahiakro, Séguéla, Touba et Vavoua ;
- la quatrième région (C₄) est celle du climat tropical de transition (climat soudanais). Elle est représentée par neuf (9) stations. Cette région contient les stations de Bouna, Boundiali, Ferké, Korhogo, Niakara, Odienné, Ouangolo, Tafiré et Tengrela ;
- la cinquième région (C₅) comprend les stations du climat de Montagnes. Elle est formée de quatre (4) stations pluviométriques constituées des stations de Danané, Guiglo, Man et Toulépleu.

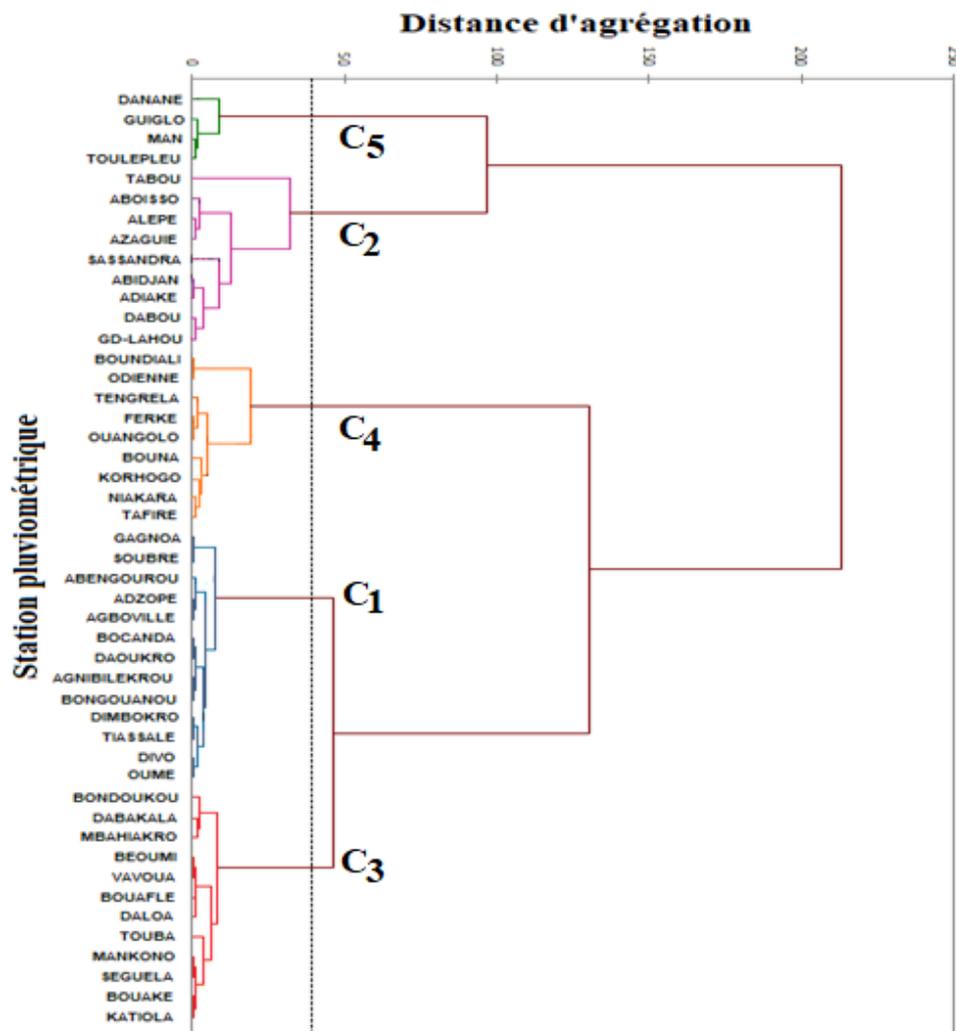


Figure 32 : Classification hiérarchique des stations pluviométriques (1971-2016)

Ces résultats montrent que de la période avant 1970 à la période après 1970, des modifications ont été constatées au niveau de certaines régions climatiques. En effet, les stations d'Aboisso, Alépé et Azaguié sont passées du climat Attiéen de l'intérieur (avant 1970) au climat Attiéen

du littoral (après 1970). Il en est de même pour les stations de Bouaflé, Daloa, Mbahiakro et Vavoua qui sont passées du climat attiéen de l'intérieur (avant 1970) au climat baouléen (après 1970). Quant à la station de Tabou, elle est bien ancrée dans le régime climatique de l'attiéen du littoral avant 1970. Après 1970, elle tend à se dissocier du climat attiéen du littoral. Les stations de Bouna, Niakara et Tafiré, quant à elles, sont passées du climat baouléen (avant 1970) au climat soudanais (après 1970). Le climat de montagne n'a subi aucune modification. Le zonage climatique de la Côte d'Ivoire a donc subi des modifications dues à l'influence de la sécheresse en passant de la période avant 1970 à la période après 1970.

5.2. RÉGIONALISATION CLIMATIQUE À PARTIR DE LA CARACTÉRISATION DES RÉGIMES CLIMATIQUES SAISONNIERS ET TYPES DE CLIMAT

Cette section présente les résultats de l'étude de la régionalisation climatique en Côte d'Ivoire à partir d'indices climatiques.

5.2.1. CARACTÉRISATION DES RÉGIMES CLIMATIQUES SAISONNIERS À PARTIR DE L'INDICE DE GAUSSEN

L'application de l'indice de GausSEN à chaque station a permis de distinguer trois (3) régimes climatiques qui subdivisent les stations climatiques en six (6) groupes en Côte d'Ivoire :

- le régime climatique unimodal à deux saisons ;
- le régime climatique bimodal à deux saisons ;
- le régime climatique bimodal à quatre saisons.

5.2.1.1. Régime climatique unimodal à deux saisons

Les stations qui reflètent le régime climatique unimodal sont celles de Tengréla, Odienné, Korhogo, Boundiali, Ferké, Tafiré, Ouangolo, Man, Danané, Bouna et Niakara. Ce régime est localisé dans les parties nord, ouest, nord-est et nord-ouest du pays. L'observation des diagrammes ombrothermiques obtenus pour chaque station a permis de distinguer un régime climatique unimodal à deux (2) saisons (Figures 33 et 34). Il est caractérisé par une saison sèche et une saison humide (pluvieuse).

Au niveau des stations du Nord, la saison pluvieuse dure sept (7) mois (Figure 33). Elle débute en avril et prend fin en octobre. Les hauteurs maximales de pluie sont observées au mois d'août. La saison sèche, quant à elle, avec une durée moyenne de cinq (05) mois se manifeste de

novembre à mars. Des mois humides à tendance sèche (mois d'avril) ont été mis en évidence au niveau des stations de Tafiré, Ouangolo, Tengrela et Odienné.

Au niveau des stations de l'Ouest (Danané et Man), la saison pluvieuse dure huit (8) à neuf (9) mois (Figure 34). Elle débute en mars et prend fin en octobre ou novembre. Les hauteurs maximales de pluie sont observées au mois de septembre. La saison sèche quant à elle dure trois (3) à quatre (4) mois, de novembre ou décembre à février. Le mois de novembre est un mois humide à tendance sèche au niveau de Danané.

Ces résultats montrent que les stations appartenant à ce régime peuvent être subdivisées en deux groupes. Un premier groupe qui concerne les stations localisées au Nord, Nord-Est et Nord-Ouest (Tengréla, Odienné, Korhogo, Boundiali, Ferké, Tafiré, Ouangolo, Bouna, Niakara) avec une saison pluvieuse qui dure sept (7) mois et dont le mois le plus pluvieux est août. Un second groupe qui renferme les stations de Man et Danané localisées à l'Ouest avec une saison des pluies qui dure huit (8) à neuf (9) mois selon les localités et dont le mois le plus pluvieux est septembre.

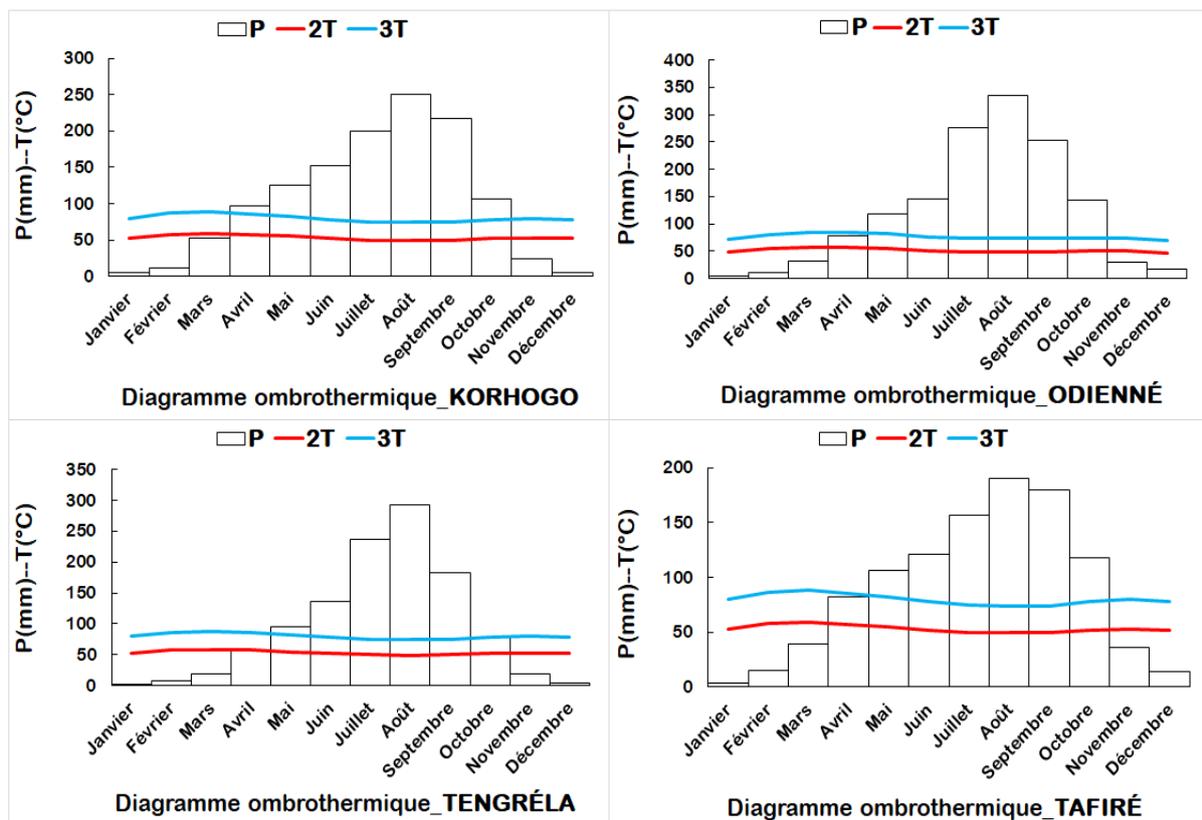


Figure 33 : Diagrammes ombrothermiques du régime climatique unimodal du Nord (1961-2016)

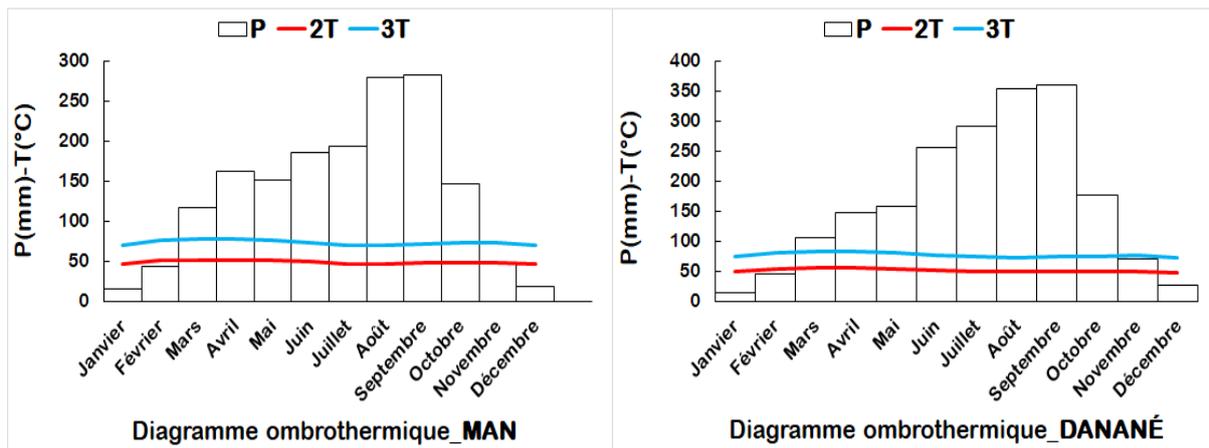


Figure 34 : Diagrammes ombrothermiques du régime climatique unimodal de l'Ouest (1961-2016)

5.2.1.2. Régime climatique bimodal à deux saisons

Ce régime est localisé généralement dans la partie centrale de la Côte d'Ivoire (Centre-Nord, Nord-Ouest, Centre, Est et Ouest). La construction des diagrammes ombrothermiques a permis de déterminer les stations qui reflètent ce type de régime climatique. Il s'agit des stations de Katiola, Dabakala, Touba, Séguéla, Mankono, Bouaké, Béoumi, M'bahiakro, Bouaflé, Bondoukou, Daloa, Gagnoa, Soubré, Vavoua, Guiglo et Toulépleu. Les diagrammes ombrothermiques construits sont bimodaux à une seule saison des pluies qui débute généralement en mars et s'achève en octobre (Figure 35). Elle dure en moyenne 8 mois avec une légère dépression en juillet. Il est mis en évidence deux pics. Le premier est généralement obtenu en mai-juin et le second en septembre. Cependant, le mois de juillet ne peut être qualifié de mois sec étant donné l'importance de la hauteur d'eau mensuelle recueillie, atteignant parfois des valeurs de plus de 150 mm et supérieures à deux fois la température moyenne mensuelle. Quant à la saison sèche, elle couvre généralement quatre (4) mois à savoir les mois de janvier, février, novembre et décembre.

Des spécificités ont été constatées au niveau des stations telles que Touba, Séguéla, Mankono, Katiola et Dabakala (Figure 36). Il est remarqué au niveau de ces stations que le mois de mars est humide à tendance sèche.

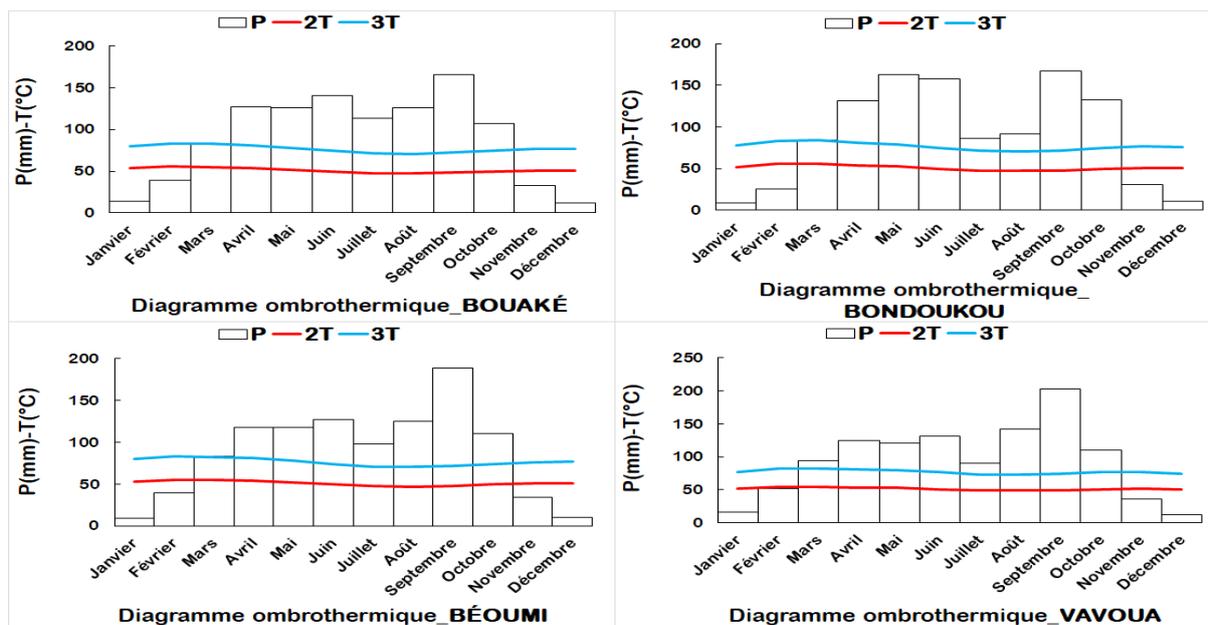


Figure 35 : Diagrammes ombrothermiques du régime climatique bimodal à deux saisons (1961-2016)

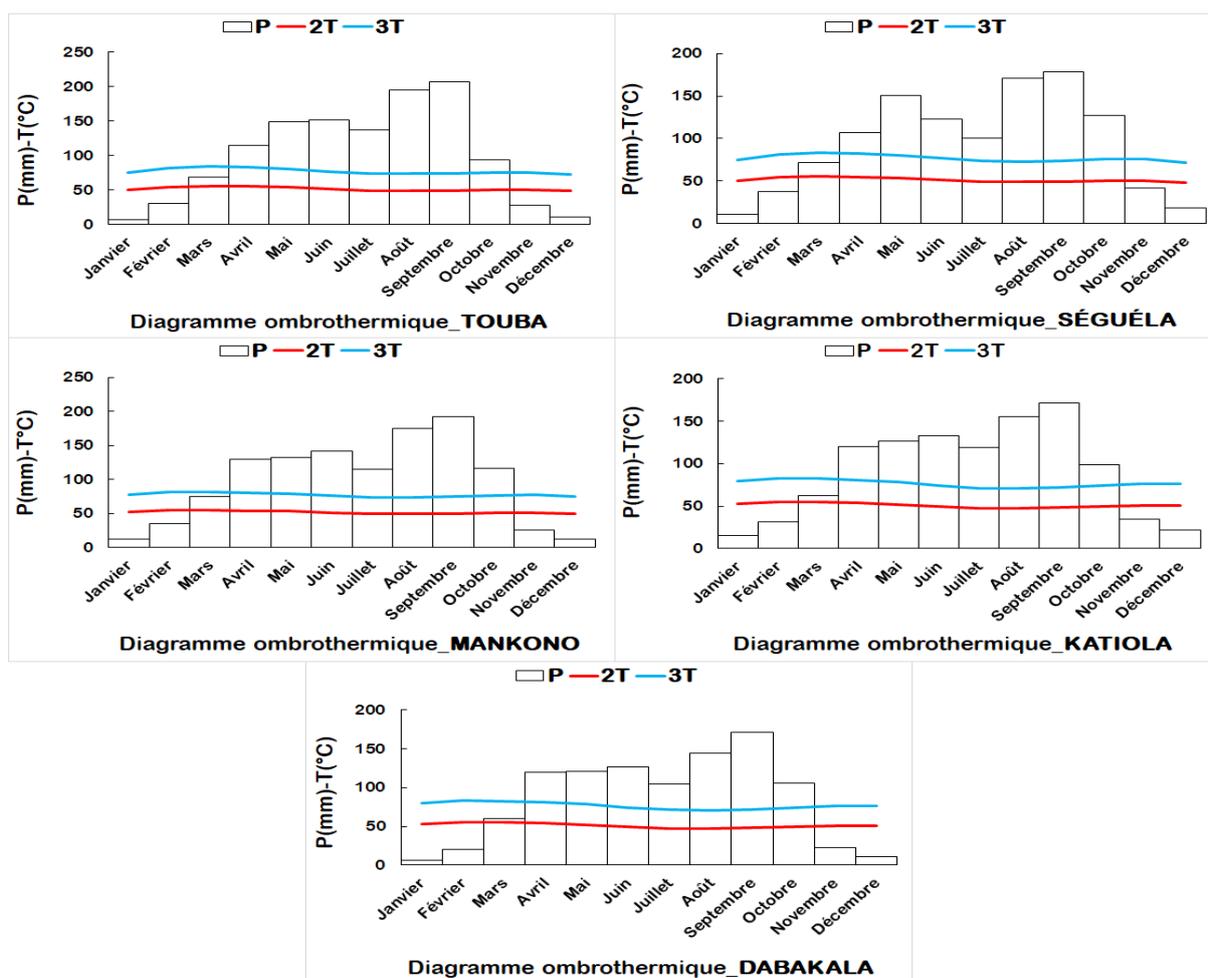


Figure 36 : Diagrammes ombrothermiques du régime bimodal à deux saisons des stations de Touba, Séguéla, Mankono, Katiola et Dabakala (1961-2016)

Au niveau des stations de Bouaflé, Daloa et Toulépleu, la saison pluvieuse dure neuf (9) mois généralement de février à octobre sauf à Toulépleu où la saison des pluies s'étend de mars à novembre avec le mois de novembre qui est humide à tendance sèche (Figure 37). A Daloa, le mois de février est humide à tendance sèche. La saison sèche dure trois (3) mois (novembre-janvier ou décembre-février). Les pics pluvieux sont observés respectivement en juin et septembre. Les stations de Gagnoa, Soubré et Guiglo présentent quant à elles une saison pluvieuse qui dure dix (10) mois et s'étend de février à novembre avec le mois de février humide à tendance sèche (Figure 37). La station de Guiglo enregistre le mois de novembre comme étant un mois humide à tendance sèche. Les pics pluvieux sont observés en juin et septembre. La saison sèche dure deux (2) mois (décembre et janvier).

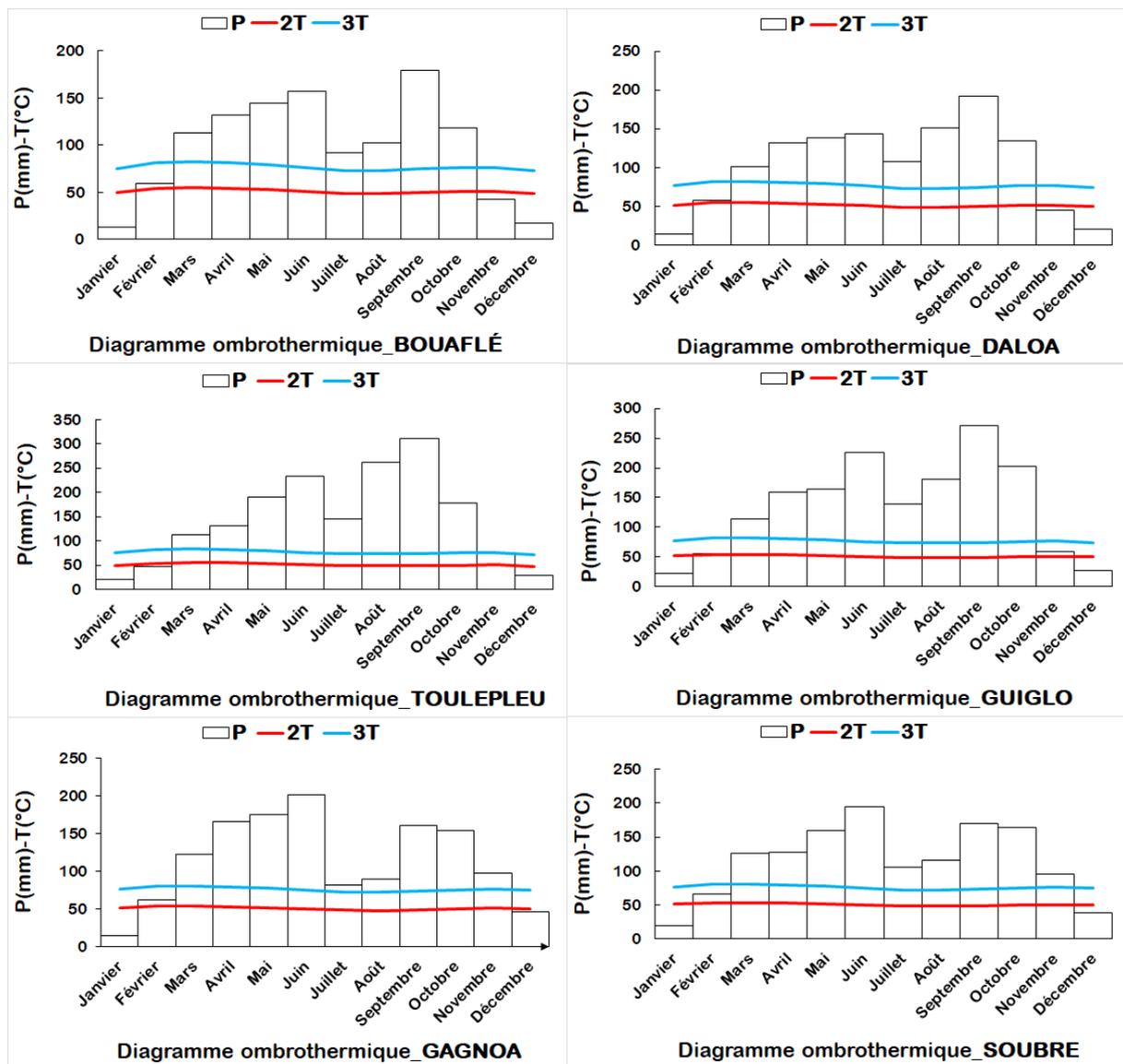


Figure 37 : Diagrammes ombrothermiques du régime climatique bimodal à deux saisons des stations de Bouaflé, Daloa, Toulépleu, Guiglo, Gagnoa et Soubré (1961-2016)

5.2.1.3. Régime climatique bimodal à quatre saisons

La construction des diagrammes ombrothermiques a permis de mettre en évidence des stations qui reflètent le régime climatique bimodal à quatre saisons. Ce sont les stations d'Abidjan, Adiaké, Dabou, Sassandra et de Grand-Lahou (Figure 38). En effet, pour ces stations $P < 2T$ au mois d'août. Il s'agit des stations situées généralement dans la zone littorale. Au niveau des saisons des pluies, la première saison des pluies commence généralement, en mars pour s'achever au mois de juillet et dure globalement cinq (5) mois. La deuxième, quant à elle, est moins longue et dure trois (3) mois (septembre, octobre et novembre). Les saisons des pluies sont séparées par deux saisons sèches dont la plus grande démarre en décembre et prend fin en février, soit une durée de trois mois. La petite saison sèche appelée inter-saison est très courte et centrée sur le mois d'août.

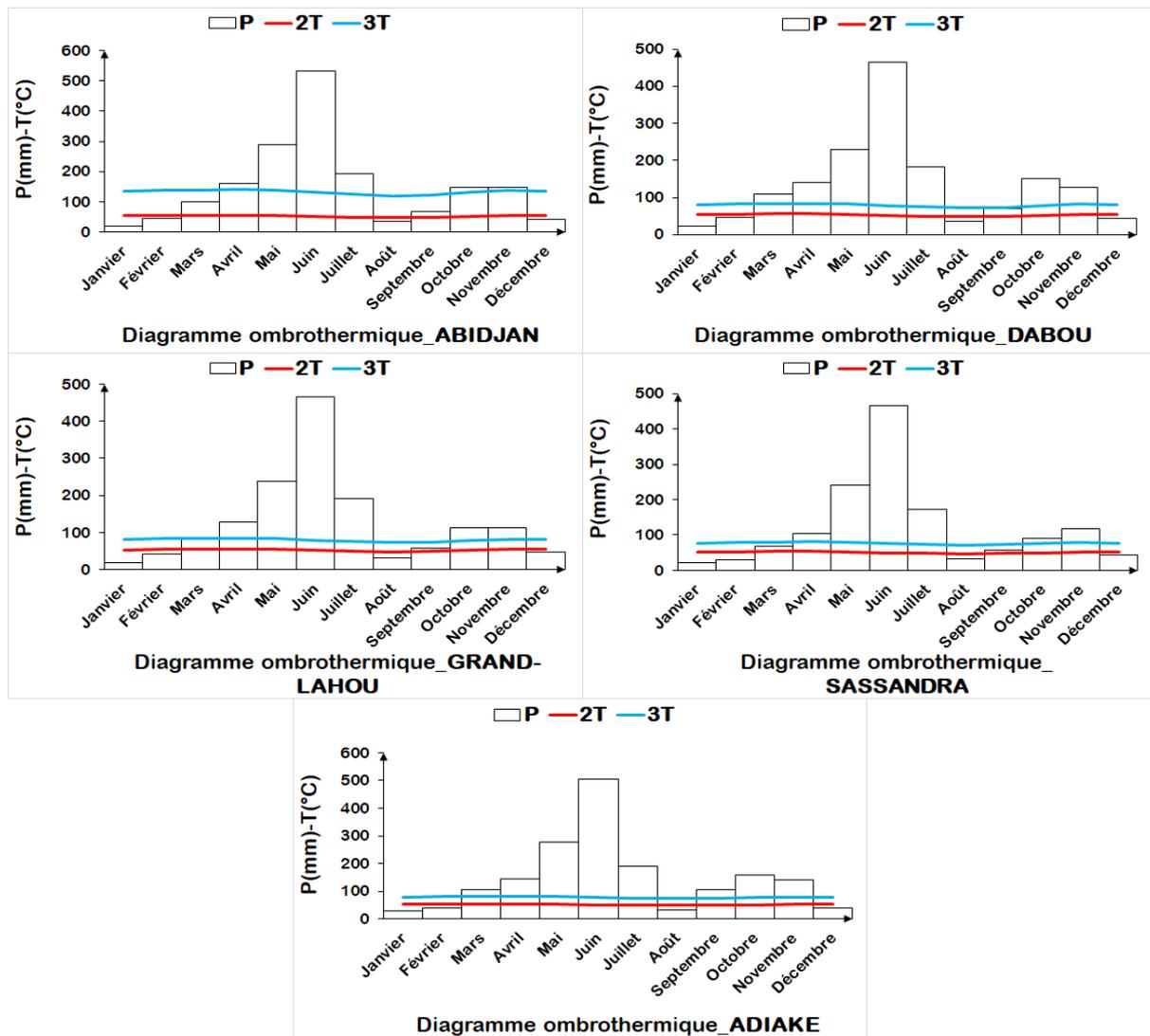


Figure 38 : Diagrammes ombrothermiques du régime climatique bimodal à quatre saisons des stations du littoral (1961-2016)

5.2.1.4. Cas particuliers de régimes climatiques

La particularité des stations rangées dans ce groupe est liée, en plus du caractère bimodal à deux saisons, au caractère du mois d'août. Le premier cas particulier concerne les stations où le mois d'août est humide à tendance sèche. Il s'agit des stations d'Abengourou, Aboisso, Agnibilékrou, Dimbokro, Bongouanou, Bocanda, Daoukro, Divo, Oumé, Tiassalé, Agboville, Adzopé, Alépé et Azaguié. La figure 39 illustre quelques une de ces stations. Ces stations sont localisées généralement dans la partie sud-intérieur de la Côte d'Ivoire. Il est constaté une seule saison pluvieuse qui débute en mars et s'achève en octobre ou novembre. Elle dure en moyenne huit (8) à neuf (9) mois selon les localités avec une dépression en août. Il est observé aussi une seule saison sèche qui est très brève et couvre généralement trois (3) à quatre (4) mois, soit de novembre ou décembre à février. L'analyse du diagramme révèle en effet deux pics, le premier en juin et le second en octobre.

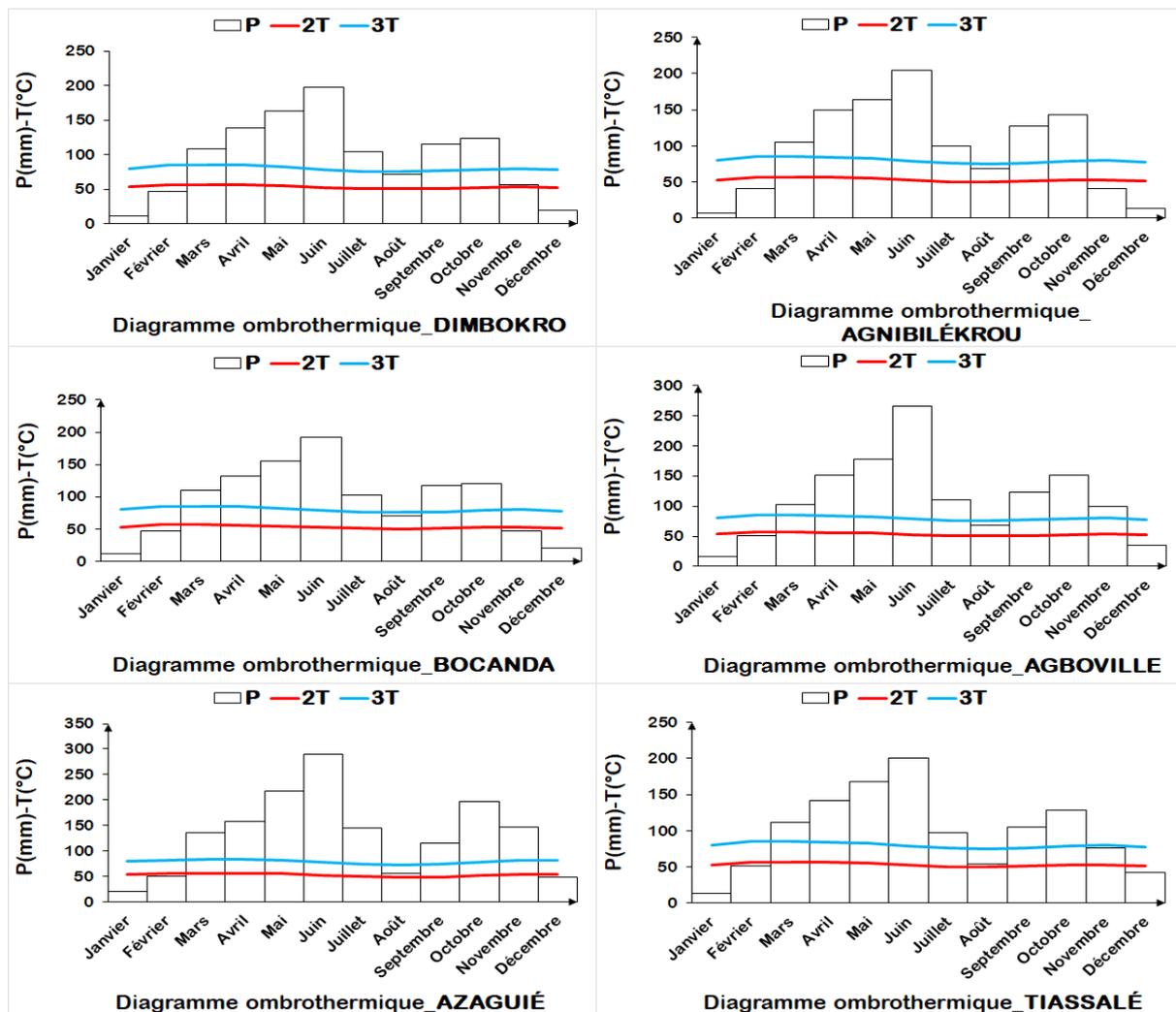


Figure 39 : Diagrammes ombrothermiques des stations traduisant le régime climatique équatorial de transition de l'intérieur (1961-2016)

Le second cas particulier concerne les stations où le mois d'août est humide. Il s'agit du régime climatique de la station de Tabou qui est caractérisé par deux saisons et par deux modes. La saison pluvieuse dure dix (10) mois (mars à décembre). La saison sèche dure deux (2) mois (janvier-février) (Figure 40). Le mois le plus pluvieux du premier mode est le mois de juin. Le mois le plus pluvieux du deuxième mode est celui de septembre.

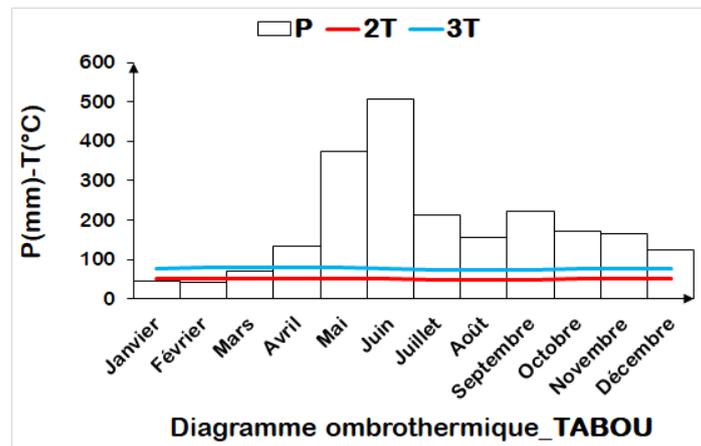


Figure 40 : Diagramme ombrothermique traduisant le régime climatique équatorial de transition du Sud-Ouest (Tabou) (1961-2016)

Sur l'ensemble des résultats, il est constaté que les mois d'avril, mai, juin, juillet, septembre et octobre sont pluvieux sur toute l'étendue du territoire ivoirien. Le climat équatorial de transition (attiéen) est caractérisé par trois regroupements.

Ainsi, sur la base de l'indice de Gaussen, il peut être défini six (6) zones climatiques homogènes:

- zone climatique homogène 1 : climat tropical de transition ou soudanais ;
- zone climatique homogène 2 : climat équatorial de transition atténué ou baouléen ;
- zone climatique homogène 3 : climat de montagnes ;
- zone climatique homogène 4 : climat équatorial de transition 1 ou attiéen du littoral ;
- zone climatique homogène 5 : climat équatorial de transition 2 ou attiéen de l'intérieur ;
- zone climatique homogène 6 : climat équatorial de transition 3 ou attiéen du Sud-Ouest.

5.2.2. CARACTÉRISATION DES TYPES DE CLIMAT À PARTIR DE L'INDICE DE DE MARTONNE

Les résultats de l'indice de De Martonne pour les stations étudiées, sont consignés dans le tableau XVI. Les valeurs de l'indice varient entre 27,45 (Tafiré) et 62,05 (Tabou) avec une moyenne de 35,71. La classification des valeurs des indices de De Martonne de chaque station

(Tableau XVII) a permis de constater ce qui suit :

- 10 stations ont des valeurs de l'indice de De Martonne comprises entre 20 et 30, soit 21,3% des stations ; le climat en présence est un climat semi-humide ou climat tropical ;
- 26 stations ont des valeurs comprises entre 30 et 40, soit 55,3% des stations ; le climat en présence est un climat humide ou climat tropical humide ;
- 11 stations ont des valeurs supérieures à 40, soit 23,4% des stations, le climat en présence est dit climat très humide (climat équatorial ou climat de montagne).

Tableau XVI : Indices de De Martonne des stations étudiées (1961-2016)

Stations	Indice	Stations	Indice	Stations	Indice	Stations	Indice
Bouna	28,58	Odienné	34,11	Tabou	62,05	Oumé	34,21
Niakara	28,23	Boundiali	29,92	Abengourou	32,70	Tiassalé	33,83
Séguéla	31,87	Korhogo	31,23	Aboisso	43,60	Soubré	34,98
Touba	33,37	Ferké	28,98	Adzopé	36,90	Vavoua	31,69
Béoumi	29,88	Tengrela	29,30	Agboville	35,93	Grand-Lahou	41,32
Bondoukou	30,52	Ouangolo	27,68	Agnibilékrou	31,43	Sassandra	40,14
Bouaflé	32,85	Tafiré	27,45	Alépé	39,14	Gagnoa	34,74
Bouake	30,53	Danané	57,74	Azaguié	43,18	M'bahiakro	28,69
Dabakala	28,98	Man	47,60	Bocanda	30,72	Mankono	32,56
Daloa	32,24	Toulépleu	48,63	Bongouanou	31,81	Dabou	45,07
Guiglo	34,83	Abidjan	49,22	Daoukro	30,14	Divo	36,35
Katiola	30,63	Adiaké	50,89	Dimbokro	31,87		

Tableau XVII : Classification des stations en fonction des valeurs de l'indice de De Martonne

Indice	Type de climat	Stations
$20 < I < 30$	climat semi-humide (climat tropical de transition)	Niakara, Boundiali, Tengréla, Bouna, Dabakala, Béoumi, Ouangolo, Ferké, Tafiré, M'bahiakro
$30 < I < 40$	climat humide (climat tropical humide)	Odienné, Séguéla, Touba, Bondoukou, Bouaké, Daloa, Katiola, Korhogo, Adzopé, Agboville, Alépé, Bocanda, Abengourou, Agnibilékrou, Bongouanou, Daoukro, Guiglo, Dimbokro, Oumé, Tiassalé, Soubré, Vavoua, Gagnoa, Mankono, Divo, Bouaflé
$I > 40$	climat très humide (climat équatorial ou climat montagnard)	Danané, Man, Toulépleu, Abidjan, Adiaké, Tabou, Aboisso, Azaguié, Grand-Lahou, Sassandra, Dabou

Selon les résultats de l'indice de De Martonne, il est possible de diviser le climat ivoirien en quatre zones climatiques homogènes :

- zone climatique homogène 1 : le climat équatorial voire équatorial de transition situé au Sud sur le littoral (indice de De Martonne supérieur ou égal à 40) ;

- zone climatique homogène 2 : le climat de montagnes situé à l'Ouest (indice de De Martonne supérieur ou égal à 40) ;
- zone climatique homogène 3 : le climat tropical de transition situé au Nord du pays (indice de De Martonne généralement compris entre 20 et 30) ;
- zone climatique homogène 4 : le climat équatorial de transition voire de transition atténué situé au Sud intérieur et au Centre (indice de De Martonne généralement compris entre 30 et 40).

La confrontation des résultats de ces deux indices (indices de Gaussen et indices de De Martonne) amène à dire que les stations de M'bahiakro, Dabakala, Béoumi, Guiglo, Gagnoa et Soubré pourraient être classées dans le climat équatorial de transition atténué. Conformément aux caractéristiques du climat tropical de transition et du climat équatorial de transition atténué, il est aussi possible de classer les stations de Korhogo et Odienné dans le climat tropical de transition. La station de Toulépleu, au regard de sa forte valeur de l'indice de De Martonne, pourrait être classée dans le climat de montagnes bien que son allure graphique semble s'apparenter à celle du climat équatorial de transition atténué. Quant aux stations d'Aboisso, d'Azaguié et de Tabou, au regard également de leurs fortes (voire relativement fortes) valeurs de l'indice de De Martonne, pourraient être classées dans le domaine équatorial de transition. Cependant, on peut séparer Tabou d'Aboisso et Azaguié au regard de leurs valeurs de De Martonne et leurs situations géographiques. Ainsi, l'équatorial de transition 1 ou l'attiéen du littoral est assimilé aux stations du littoral et est composé des stations d'Abidjan, Dabou, Grand-Lahou, Sassandra et Adiaké. Le climat équatorial de transition 2 ou attiéen de l'intérieur est composé des autres stations du climat équatorial de transition en dehors de la station de Tabou qui a un caractère très particulier. En effet, la valeur de l'indice de De Martonne a un caractère particulier vis-à-vis des stations voisines. Le régime climatique de Tabou ne reflète pas celui du climat équatorial de transition 1 ni celui du climat équatorial de transition 2. La valeur de De Martonne (62) est la plus forte et reflète un régime équatorial. De ce fait, la station de Tabou ne peut être classée parmi les stations du littoral bien qu'elle soit située sur le littoral, ni appartenir au climat équatorial de transition 2. Cette station appartient donc à la zone équatoriale de transition 3 ou Attiéen du Sud-Ouest. Les stations d'Aboisso et d'Azaguié ont été considérées comme appartenant à la zone équatoriale de transition 2 ou l'Attiéen de l'intérieur au regard de leurs allures graphiques et de leurs situations géographiques.

La synthèse des résultats obtenus à partir des deux indices (Tableau XVIII) montre que le climat de montagnes ivoirien est un climat complexe caractérisé par l'influence des climats tropical de transition et équatorial de transition atténué et entretenu par le relief montagneux de l'Ouest

de la Côte d'Ivoire. En effet, il est constaté la cohabitation de deux régimes climatiques à savoir le régime climatique unimodal à deux saisons (une saison pluvieuse et une saison sèche) et le régime pluviométrique bimodal à deux saisons (une saison pluvieuse et une saison sèche).

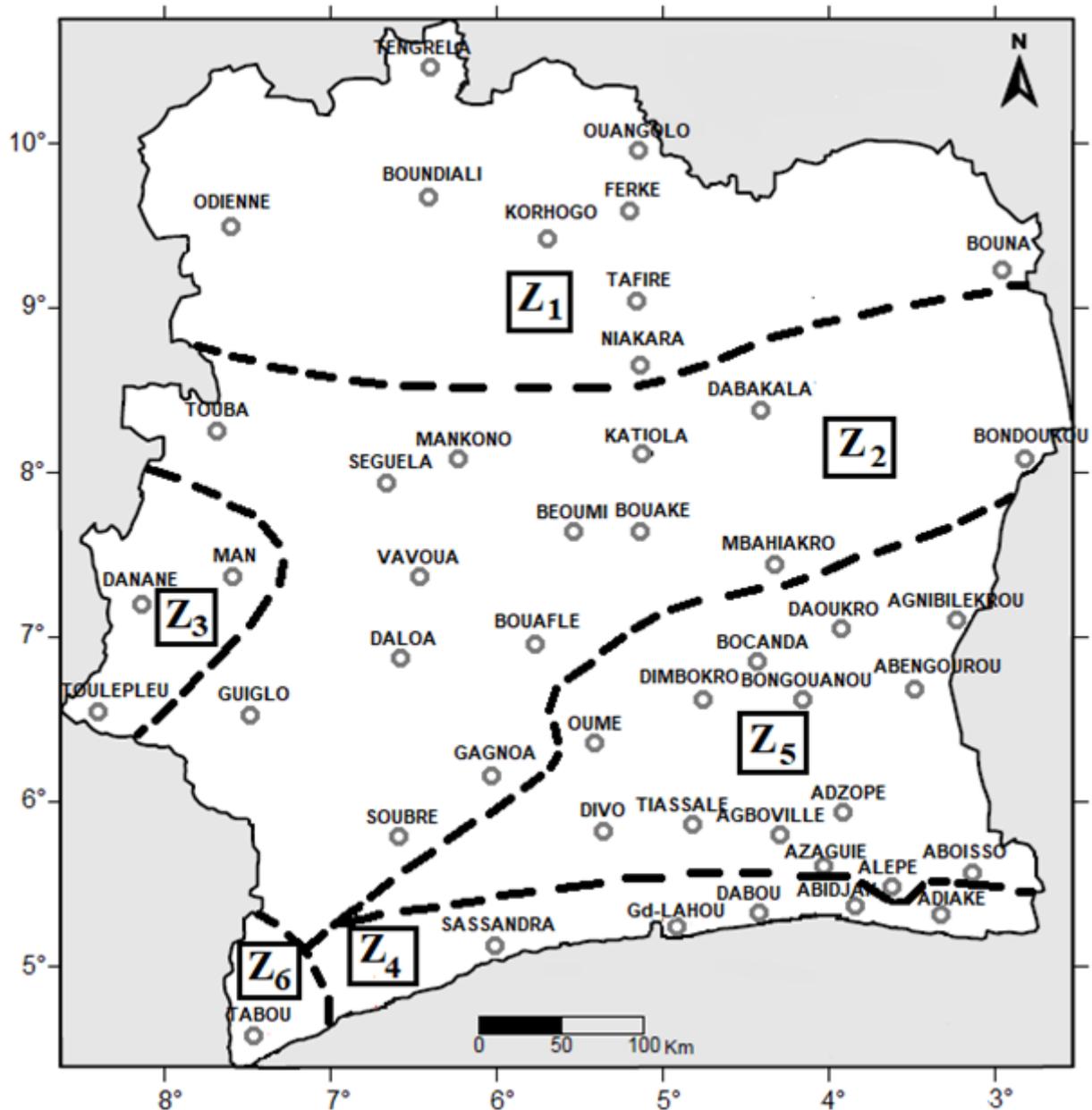
Tableau XVIII : Caractéristiques des régimes climatiques ivoiriens (1961-2016)

Zone climatique	Indice de Gaussen		Indice de De Martonne		Stations
	Régime climatique	Durée de la saison pluvieuse	Valeur de l'indice moyen	Type de climat	
Zone 1	Unimodal à 2 saisons	7	29	Climat tropical de transition	Tafiré, Ferké, Bouna Odienné, Ouangolo, Tengréla, Korhogo, Boundiali, Niakara,
Zone 2	Bimodal à 2 saisons	8 à 10	32	Climat équatorial de transition atténué	Dabakala, Mankono, Séguéla, Béoumi, Katiola, Bouaké, Vavoua, Touba, , Guiglo, Gagnoa, Soubré, Bouaflé, Daloa, Bondoukou, M'bahiakro
Zone 3	Unimodal à 2 saisons ou Bimodal à 2 saisons	8-9	51	Climat de montagnes	Man, Toulépleu Danané
Zone 4	Bimodal à 4 saisons	Saison 1 : 5 Saison 2 : 3	45	Climat équatorial de transition 1	Dabou, Sassandra, Abidjan, Adiaké, Grand-Lahou
Zone 5	Bimodal à 2 saisons	8-9	35	Climat équatorial de transition 2	Dimbokro, Bocanda, Alépé, Oumé, Divo, Agboville, Adzopé, Aboisso, Tiassalé, Daoukro, Azaguié, Agnibilékrou, Abengourou, Bongouanou
Zone 6	Bimodal à 2 saisons	10	62	Climat équatorial de transition 3	Tabou

Une confrontation des résultats de zonage climatique réalisé à partir des indices climatiques (indice de Gaussen et indice de De Martonne) et des méthodes d'analyses multivariées (ACPN et CAH) a été faite. Les indices climatiques ont confirmé les résultats de l'ACPN au niveau de l'appartenance des stations de Tengrele, Odienné, Boundiali, Ouangolo, Ferké, Korhogo,

Tafiré, Niakara et Bouna au régime tropical de transition (climat soudanais). Cependant, la station de Touba a été identifiée comme appartenant au climat tropical humide (climat baouléen), ce qui confirme les résultats de la CAH contrairement à l'ACPN qui l'a intégré dans le climat soudanais. Au niveau du régime montagnard, alors que les différentes méthodes d'analyses multivariées s'accordent sur l'appartenance des quatre (4) stations retenues (Man, Guiglo, Danané et Toulépleu) au régime de Montagnes, les indices climatiques classent la station de Guiglo dans le régime tropical humide (climat baouléen). Les indices climatiques ont pu dissocier la station de Tabou qui représente une particularité du climat équatorial de transition (climat attiéen du Sud-Ouest) du climat attiéen du littoral (Abidjan, Adiaké, Dabou, Grand-Lahou et Sassandra), ce qui confirme les résultats de l'ACPN contrairement à la CAH qui l'a intégré dans ce dernier. Les indices climatiques ont permis de préciser le contour du climat baouléen en incluant les stations de Bouaflé, Daloa, Gagnoa et Soubré qui ont été considérées comme appartenant au climat attiéen de l'intérieur par les analyses statistiques multivariées. Les indices climatiques utilisés ont donc été pertinents dans le zonage climatique de la Côte d'Ivoire et se présentent comme une bonne complémentarité aux méthodes multivariées. Cette confrontation des résultats obtenus a permis de montrer que la Côte d'Ivoire peut être subdivisée en six (6) zones climatiques homogènes. La première zone, située au Nord, est confondue à celle du climat tropical de transition (climat soudanais) et se traduit du point de vue climatique par une pluviométrie moyenne interannuelle sur la période 1961-2016 qui varie entre 1010 et 1221 mm avec une moyenne de 1080 mm. Le régime climatique qui règne dans cette zone est un régime unimodal à deux saisons avec une saison pluvieuse qui dure 7 mois (d'avril à octobre) et une saison sèche qui dure 5 mois de novembre à mars. Les stations appartenant à cette zone sont : Tengréla, Odienné, Korhogo, Boundiali, Ferké, Tafiré, Ouangolo, Bouna et Niakara. La deuxième zone, localisée au Centre, correspondant au climat tropical humide (climat équatorial de transition atténué ou climat baouléen) se caractérise par une pluviométrie moyenne interannuelle allant de 1046 à 1245 mm avec une moyenne de 1142 mm. Le régime climatique qui y règne est un régime bimodal à deux saisons avec une saison des pluies qui dure 8 à 10 mois (globalement de février à novembre) et une saison sèche qui dure 2 à 4 mois (globalement de novembre à février). Les stations appartenant à cette zone sont : Katiola, Dabakala, Touba, Séguéla, Mankono, Bouaké, Béoumi, M'bahiakro, Gagnoa, Soubré, Guiglo, Bouaflé, Bondoukou, Daloa et Vavoua. La troisième zone climatique homogène, située à l'Ouest, est le climat de montagnes qui est définie par une hauteur pluviométrique moyenne interannuelle qui oscille entre 1666 et 2020 mm avec une moyenne de 1796 mm. Deux régimes climatiques cohabitent dans cette zone. Il s'agit du régime unimodal

à deux saisons et du régime bimodal à deux saisons. La saison pluvieuse dure 8 à 9 mois (globalement de mars à novembre) et la saison sèche dure 3 à 4 mois (globalement de novembre à février). Les stations appartenant à cette zone sont Man, Danané et Toulépleu. La quatrième zone climatique homogène, située au Sud, s'identifie au climat subéquatorial 1 (climat équatorial de transition 1 ou climat attiéen du littoral) est caractérisée par une pluviométrie moyenne interannuelle variant entre 1441 et 1837 mm avec une moyenne de 1647 mm. Le régime climatique qui y règne est un régime bimodal à quatre saisons avec deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches. La première saison des pluies dure 5 mois (février-juillet) et la seconde 3 mois (septembre-novembre). Les saisons pluvieuses sont séparées par deux saisons sèches dont la plus grande dure 3 mois (décembre-février) et la petite un mois (août). Les stations appartenant à cette zone sont celles d'Abidjan, Adiaké, Dabou, Sassandra et de Grand-Lahou. La cinquième zone climatique homogène, localisée au Centre-Sud, qui correspond au climat subéquatorial 2 (climat équatorial de transition 2 ou climat attiéen de l'intérieur) est caractérisée par une pluviométrie moyenne interannuelle variant entre 1109 et 1584 mm avec une moyenne de 1280 mm. Le régime climatique défini dans cette zone est un régime bimodal à deux saisons avec une saison pluvieuse qui dure 8 à 9 mois (globalement de mars à novembre) et une saison sèche qui dure 3 à 4 mois (globalement de novembre à février). Les stations appartenant à cette zone sont celles d'Abengourou, Aboisso, Agnibilékrou, Dimbokro, Bongouanou, Bocanda, Daoukro, Divo, Oumé, Tiassalé, Agboville, Adzopé, Alépé et Azaguié. La sixième zone, localisée au Sud-Ouest, est le climat subéquatorial 3 (climat équatorial de transition 3 ou climat attiéen du Sud-Ouest) qui est marquée par des précipitations interannuelle fluctuant autour de 2233 mm. Le régime climatique régnant dans cette zone est un régime bimodal à deux saisons avec une saison pluvieuse qui dure 10 mois (mars-décembre) et une saison sèche qui dure 2 mois (janvier-février). Cette zone est représentée par la station de Tabou. Une synthèse des résultats des méthodes d'analyses multivariées et des indices climatiques a permis de reproduire la carte du zonage climatique de la Côte d'Ivoire (Figure 41).



LEGENDE:

- | | |
|--|--|
| Z₁ Climat tropical de transition ou soudanais | Z₄ Climat équatorial de transition 1 ou attiéen du littoral |
| Z₂ Climat équatorial de transition atténué ou baouléen | Z₅ Climat équatorial de transition 2 ou attiéen de l'intérieur |
| Z₃ Climat de montagnes | Z₆ Climat équatorial de transition 3 ou attiéen du Sud-Ouest |

Figure 41 : Zonage climatique de la Côte d'Ivoire

5.3. DISCUSSION

Les principaux résultats obtenus ont permis de montrer que la Côte d'Ivoire peut être subdivisée en six (6) zones climatiques homogènes. La première zone, située au Nord, est confondue à celle du climat tropical de transition (climat soudanais). Les stations appartenant à cette zone

sont : Tengréla, Odienné, Korhogo, Boundiali, Ferké, Tafiré, Ouangolo, Bouna et Niakara. La deuxième zone, localisée au Centre, correspondant au climat tropical humide (climat équatorial de transition atténué ou climat baouléen). Les stations appartenant à cette zone sont : Katiola, Dabakala, Touba, Séguéla, Mankono, Bouaké, Béoumi, M'bahiakro, Guiglo, Gagnoa, Soubré, Bouaflé, Bondoukou, Daloa et Vavoua. La troisième zone climatique homogène, située à l'Ouest, est le climat de montagnes. Les stations appartenant à cette zone sont Man, Danané et Toulépleu. La quatrième zone climatique homogène, située au Sud, s'identifie au climat subéquatorial 1 (climat équatorial de transition 1 ou climat attiéen du littoral). Les stations appartenant à cette zone sont celles d'Abidjan, Adiaké, Dabou, Sassandra et de Grand-Lahou. La cinquième zone climatique homogène, localisée au Centre-Sud, qui correspond au climat subéquatorial 2 (climat équatorial de transition 2 ou climat attiéen de l'intérieur). Les stations appartenant à cette zone sont celles d'Abengourou, Aboisso, Agnibilékrou, Dimbokro, Bongouanou, Bocanda, Daoukro, Divo, Oumé, Tiassalé, Agboville, Adzopé, Alépé et Azaguié. La sixième zone, localisée au Sud-Ouest, est le climat subéquatorial 3 (climat équatorial de transition 3 ou climat attiéen du Sud-Ouest). Cette zone est représentée par la station de Tabou.

Les résultats obtenus ont été confrontés aux travaux antérieurs. Par exemple, l'étude de Kouadio *et al.* (2003) a été faite à partir d'une analyse en composantes principales (ACP). Cette analyse a été réalisée sur les données de pluviométrie de la période 1964-1997 de 22 stations météorologiques de la Côte d'Ivoire. Ainsi, Kouadio *et al.* (2003) ont mis en évidence trois zones climatiques comprenant la zone du Nord, la zone du Centre et la zone du littoral. D'abord, la zone du Nord prend en compte entièrement le climat tropical de transition et une partie des climats montagnard et tropical humide. Ensuite, la zone du Centre occupe les parties restantes des climats tropical humide et montagnard ainsi que la partie supérieure du climat subéquatorial. Enfin, la zone du littoral se confond avec le climat subéquatorial et le climat subéquatorial pur. Les résultats obtenus s'apparentent à ceux de Kouadio *et al.* (2003) si on considère que le climat subéquatorial et le climat tropical humide forment une seule zone homogène. Le point de divergence est le fait que l'ACP n'a pas pu mettre en évidence le climat de montagnes dans le cas des travaux de Kouadio *et al.* (2003).

Les résultats obtenus ont été aussi comparés à ceux de Soro (2011). Il ressort que le zonage réalisé pourrait être compatible avec les résultats de la régionalisation faite au niveau de la Côte d'Ivoire sur la période 1942-2002 par Soro (2011). En effet, Soro (2011) s'est appuyé sur la classification ascendante hiérarchique qui a été construite en tenant compte de la latitude et des maxima mensuels observés sur 44 postes pluviométriques utilisés. Les résultats de Soro (2011)

ont mis en évidence cinq régions climatiques homogènes. On peut cependant relever quelques dissemblances. En effet, la classification ascendante hiérarchique appliquée par Soro (2011) n'a pas pu dissocier les stations du climat de Montagnes de celles du climat tropical humide bien que le premier soit une intrusion dans le deuxième. Aussi, la station de Niakara, classée dans le climat tropical humide par Soro (2011), a été reclassée dans le climat tropical de transition dans la présente étude. Il en est de même pour la station de d'Aboisso, classée dans le climat équatorial de transition 1 (attiéen du littoral) par Soro (2011), a été reclassée dans le climat équatorial de transition 2 (attiéen de l'intérieur). La région V selon Soro (2011) comprend les stations de Tabou, Taï et Grabo. Il y a une convergence des résultats à ce niveau. Les différences constatées de façon générale pourraient se justifier par le choix des critères, c'est-à-dire les variables utilisées (Soro, 2011).

Les résultats obtenus ont été également confrontés à ceux de Kouakou *et al.* (2017). Ainsi, selon les travaux de Kouakou *et al.* (2017) réalisés sur la période 1980-2000 à partir de l'indice de Gaussen et de l'ACP, les stations de M'bahiakro, Dimbokro, Daoukro, Divo, Abengourou, Agnibilékrou, Soubré et Gagnoa, anciennement dans le climat équatorial de transition auraient basculées dans le climat équatorial de transition atténué. Des points de convergence ont été constatés au niveau des stations de M'bahiakro, Soubré et Gagnoa. Cependant, des divergences demeurent en ce qui concerne les autres stations. Ces divergences sont liées au fait que Kouakou *et al.* (2017) se sont limités, en utilisant l'indice de Gaussen, au seuil de 2T alors que ce seuil ainsi que le seuil de 3T ont été pris en compte dans ce travail. En effet, en considérant le seuil de 2T, les conclusions sont les mêmes. Des points d'accord ont été obtenus au niveau des stations de Bouna et de Niakara qui ont basculé dans le climat tropical de transition. Des points de désaccord ont été également observés au niveau de la station de Séguéla qui a basculé dans le climat tropical de transition selon Kouakou *et al.* (2017) alors qu'elle est considérée comme appartenant au climat équatorial de transition atténué selon cette étude et celle de Goula *et al.* (2007). Il en est de même pour la station de Toulépleu, considérée comme station du climat de montagne alors que Kouakou *et al.* (2017) l'ont déclaré comme station du climat équatorial de transition atténué.

Il a été constaté au regard des résultats obtenus et de la confrontation de ces résultats aux travaux antérieurs, que le zonage climatique de la Côte d'Ivoire a connu de légères modifications sans disparition de zone climatique. Ces modifications qui ont permis d'obtenir six (6) zones pourraient être affectées au phénomène de la sécheresse. Au-delà de l'influence de la sécheresse, les résultats obtenus sont dus au fait que la présente étude a utilisé une combinaison

de plusieurs méthodes intégrant celles utilisées par les travaux antérieurs. Ce travail a donc apporté une précision dans le zonage climatique de la Côte d'Ivoire.

CONCLUSION PARTIELLE

La régionalisation climatique de la Côte d'Ivoire réalisée à partir de la statistique multivariée (ACPN et CAH) et des indices climatiques (indice de Gaussen et indice de De Martonne), au cours de la période 1961-2016, a permis de mettre en évidence six (6) zones climatiques correspondants aux différentes zones climatiques antérieurement définies en Côte d'Ivoire. La première zone, située au Nord, est confondue à celle du climat tropical de transition (climat soudanais) et se traduit du point de vue climatique par une pluviométrie qui varie entre 1010 et 1221 mm avec une moyenne de 1080 mm. Le régime climatique qui règne dans cette zone est un régime unimodal à deux saisons avec une saison pluvieuse qui dure 7 mois (d'avril à octobre) et une saison sèche qui dure 5 mois de novembre à mars. La deuxième zone, localisée au Centre, correspondant au climat tropical humide (climat équatorial de transition atténué ou climat baouléen) se caractérise par une pluviométrie allant de 1046 à 1245 mm avec une moyenne de 1142 mm. Le régime climatique qui y règne est un régime bimodal à deux saisons avec une saison des pluies qui dure 8 à 10 mois (globalement de février à novembre) et une saison sèche qui dure 2 à 4 mois (globalement de novembre à février). La troisième zone climatique homogène, située à l'Ouest, est le climat de montagnes qui est définie par une hauteur pluviométrique qui oscille entre 1666 et 2020 mm avec une moyenne de 1796 mm. Deux régimes climatiques cohabitent dans cette zone. Il s'agit du régime unimodal à deux saisons et du régime bimodal à deux saisons. La saison pluvieuse dure 8 à 9 mois (globalement de mars à novembre) et la saison sèche dure 3 à 4 mois (globalement de novembre à février). La quatrième zone climatique homogène, située au Sud, s'identifie au climat subéquatorial 1 (climat équatorial de transition 1 ou climat attiéen du littoral) et est caractérisée par une pluviométrie variant entre 1441 et 1837 mm avec une moyenne de 1647 mm. Le régime climatique qui y règne est un régime bimodal à quatre saisons avec deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches. La première saison des pluies dure 5 mois (février-juillet) et la seconde 3 mois (septembre-novembre). Les saisons pluvieuses sont séparées par deux saisons sèches dont la plus grande dure 3 mois (décembre-février) et la petite un mois (août). La cinquième zone climatique homogène, localisée au Centre-Sud, correspond au climat subéquatorial 2 (climat équatorial de transition 2 ou climat attiéen de l'intérieur) et est distinguée par une pluviométrie variant entre 1109 et 1584 mm avec une moyenne de 1280 mm. Le régime climatique défini

dans cette zone est un régime bimodal à deux saisons avec une saison pluvieuse qui dure 8 à 9 mois (globalement de mars à novembre) et une saison sèche qui dure 3 à 4 mois (globalement de novembre à février). La sixième zone, localisée au Sud-Ouest, est le climat subéquatorial 3 (climat équatorial de transition 3 ou climat attiéen du Sud-Ouest) qui est marquée par des précipitations fluctuant autour de 2233 mm. Le régime climatique régnant dans cette zone est un régime bimodal à deux saisons avec une saison pluvieuse qui dure 10 mois (mars-décembre) et une saison sèche qui dure 2 mois (janvier-février). Il a été constaté au regard des résultats obtenus et de la confrontation de ces résultats aux travaux antérieurs, que le zonage climatique de la Côte d'Ivoire a connu de légères modifications sans disparition de zone climatique. Ces modifications pourraient être affectées au phénomène de la sécheresse.

Les résultats obtenus peuvent servir de base à la l'évaluation des variations climatiques et de la sécheresse à l'intérieur de chacune de ces régions climatiques définies en Côte d'Ivoire.

CHAPITRE 6 :
ÉVALUATION DES VARIATIONS
CLIMATIQUES ET DE LA
SÉCHERESSE EN CÔTE D'IVOIRE

L'étude a été réalisée à partir des six zones climatiques homogènes définies, au chapitre précédent, au niveau de la Côte d'Ivoire à savoir :

- Zone 1 : le climat soudanais (climat tropical de transition) au Nord;
- Zone 2 : le climat baouléen (climat équatorial de transition atténué) au Centre ;
- Zone 3 : le climat de Montagnes (Ouest);
- Zone 4 : le climat attiéen du littoral (climat équatorial de transition 1) au Sud ;
- Zone 5 : le climat attiéen de l'intérieur (climat équatorial de transition 2) au Centre-Sud ;
- Zone 6 : le climat attiéen du Sud-Ouest (climat équatorial de transition 3) au Sud-Ouest.

6.1. ANALYSE DES TENDANCES CLIMATIQUES

6.1.1. ÉVOLUTION DES TENDANCES LINÉAIRES

Les figures 42 et 43 montrent les précipitations annuelles minimales et maximales et les températures annuelles minimales et maximales obtenues sur la période 1961-2016 au niveau des douze stations synoptiques étudiées. Les précipitations annuelles minimales sont arrivées plus fréquemment (50%) entre 2001 et 2005 et concernent les localités situées au niveau des climats soudanais (zone 1) (Korhogo, Odienné), baouléen (zone 2) (Bouaké, Daloa, Gagnoa) et attiéen de l'intérieur (zone 5) (Dimbokro) (Figure 42). 25% sont apparues entre 2006 et 2009 et concernent les climats baouléen (Bondoukou), de montagnes (zone 3) (Man) et attiéen du littoral (zone 4) (Abidjan). Au niveau du climat attiéen du Sud-Ouest (zone 6) (Tabou) et des autres localités du climat attiéen du littoral (Sassandra, Adiaké), les valeurs minimales sont apparues souvent entre 2012 et 2013. Les précipitations annuelles maximales sont généralement observées (92%) entre 1962 et 1968 donc avant 1970 sur l'ensemble des zones climatiques. Cependant, à la localité d'Odienné (climat soudanais), la pluie annuelle maximale a été observée en 1976 donc après 1970.

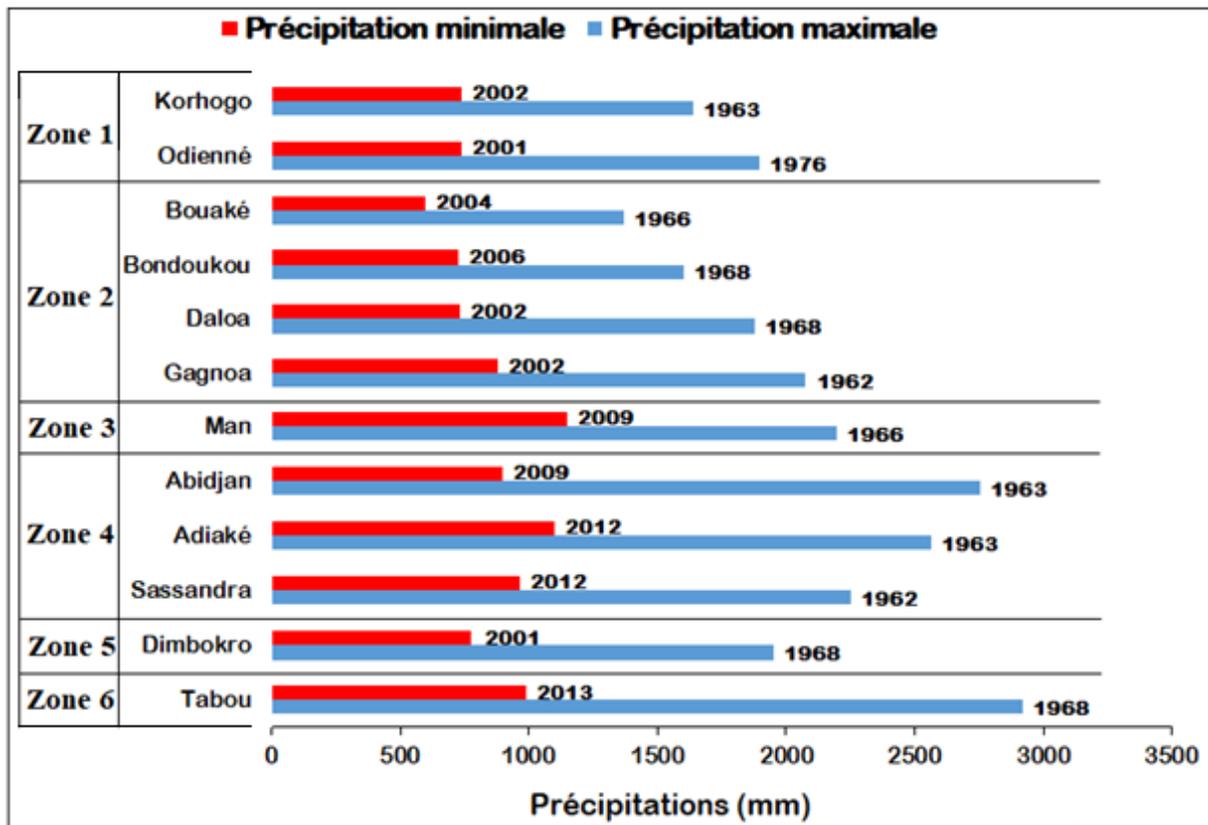


Figure 42 : Précipitations annuelles maximales et minimales (1961-2016)

Au niveau des températures, les valeurs annuelles minimales ont été observées fréquemment (50%) en 1976 (après 1970) dans les localités situées au niveau des climats soudanais (Korhogo), attiéen de l'intérieur (Dimbokro), attiéen du Sud-Ouest (Tabou) et attiéen du littoral (Adiaké, Abidjan, Sassandra) (Figure 43). Au niveau du climat de montagnes (Man), la température annuelle minimale a également été observée après 1970 (1975). Toutes les localités situées dans le climat baouléen (Bouaké, Bondoukou, Gagnoa, Daloa) ainsi que la localité d'Odienné (climat soudanais) font observer leurs températures minimales avant 1970, entre 1964 et 1967. Les températures annuelles maximales sont souvent arrivées (58%) entre 2010 et 2014 et concernent les climats soudanais (Korhogo, Odienné), baouléen (Bouaké, Bondoukou, Daloa), de montagnes (Man) et attiéen du littoral (Adiaké). 25% ont été observées entre 2002 et 2005 et concernent la localité de Tabou (climat attiéen du Sud-Ouest), la majorité des localités du climat attiéen du littoral (Sassandra, Abidjan) et 17% sont apparues en 1998 au niveau de certaines localités du climat baouléen (Gagnoa) et du climat attiéen de l'intérieur (Dimbokro).

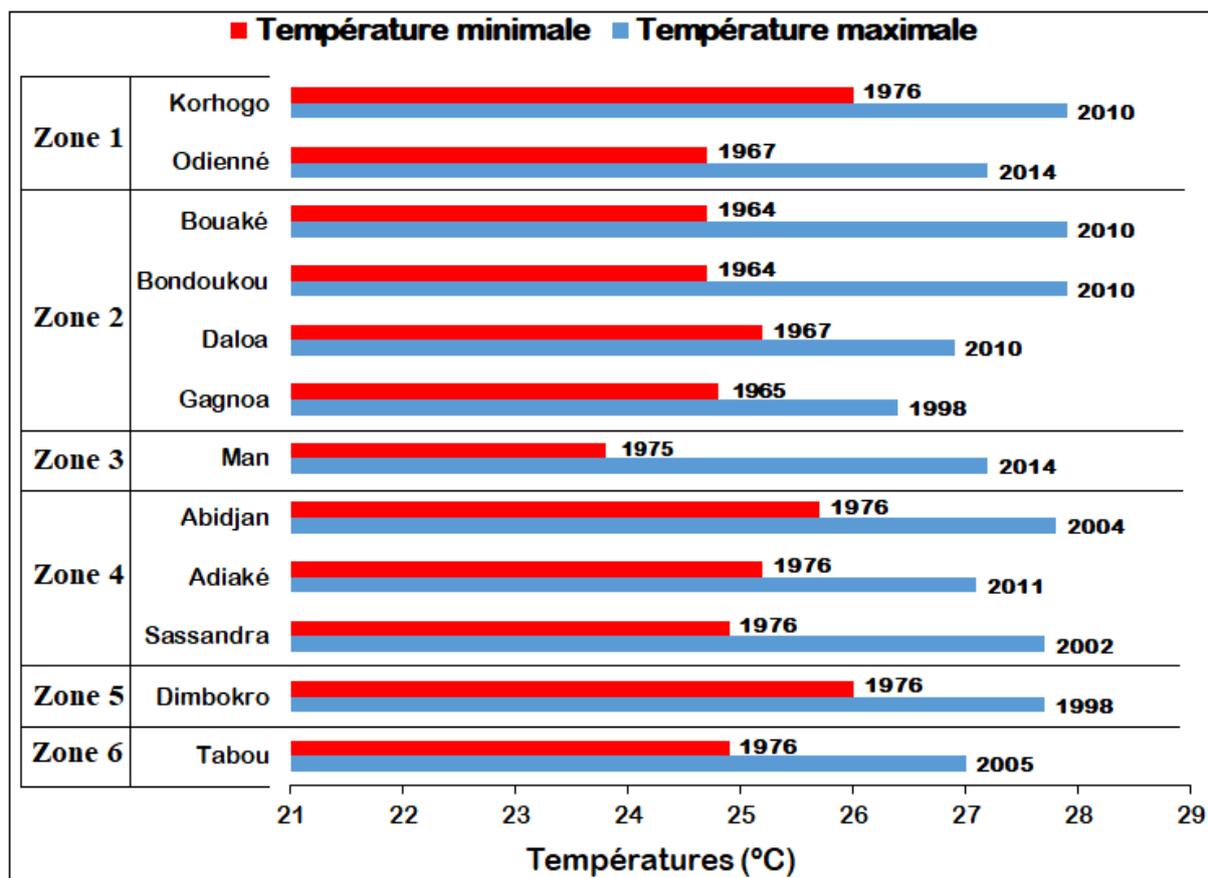


Figure 43 : Températures annuelles maximales et minimales (1961-2016)

Il est constaté, dans l'ensemble et pour chaque paramètre climatique, que les années d'apparition des valeurs annuelles minimales ou maximales ne sont pas uniformes à l'intérieur des régions climatiques de la Côte d'Ivoire. Ces résultats traduiraient un bouleversement climatique observé sur la période 1961-2016 à l'intérieur de chacune des régions climatiques du territoire ivoirien.

Ce bouleversement dans l'évolution annuelle des précipitations et des températures sur l'ensemble des régions climatiques, comme le montre les figures 44 à 55, met en évidence deux phases par rapport à la moyenne interannuelle au niveau de chaque paramètre climatique :

- une première phase généralement comprise entre 1961 et le milieu de la décennie 1980 qui apparaît comme une période moins chaude et de forte pluviométrie;
- une deuxième phase qui se situe entre la fin de la décennie 1980 et 2016 et qui est une période relativement plus chaude et de faible pluviométrie.

La tendance des précipitations et des températures est respectivement à la baisse et à la hausse pour toutes les localités au niveau de l'ensemble des régions climatiques étudiées (Figures 44 à 55). Ces tendances climatiques s'étendent sur près de trois décennies. La baisse pluviométrique est accentuée au niveau des climats soudanais (Korhogo, Odienné), attien du

Sud-Ouest (Tabou) et attiéen du littoral (Abidjan, Adiaké, Sassandra) avec des R^2 qui se situent entre 0,3 (Sassandra, climat attiéen du littoral) et 0,58 (Odienné, climat soudanais) (Figures 44, 45 et 46). La régression pluviométrique est relativement moins importante au niveau des climats baouléen (Bouaké, Bondoukou, Daloa, Gagnoa), de montagnes (Man) et attiéen de l'intérieur (Dimbokro) avec des R^2 qui fluctuent entre 0,03 (Man, climat de montagnes) et 0,29 (Daloa, climat baouléen) (Figures 47, 48 et 49). La régression constatée du cumul annuel des précipitations sur la période 1961-2016 est comprise entre -223 mm/décennie (Tabou, climat attiéen du Sud-Ouest) et -26 mm/décennie (Man, climat de montagnes) avec une moyenne de -103 mm/décennie.

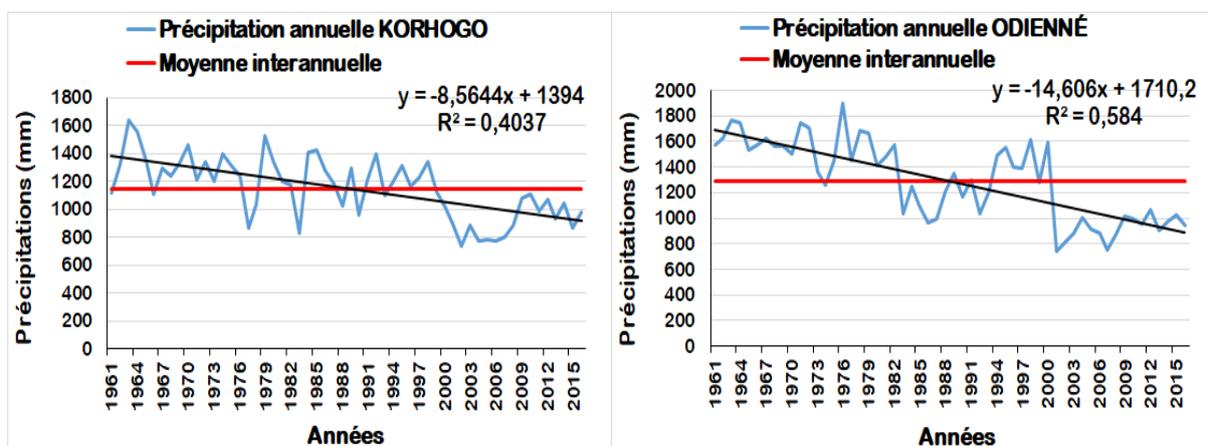


Figure 44 : Tendence à la baisse des précipitations annuelles au niveau des stations d'Odienné et Korhogo en climat soudanais (1961-2016)

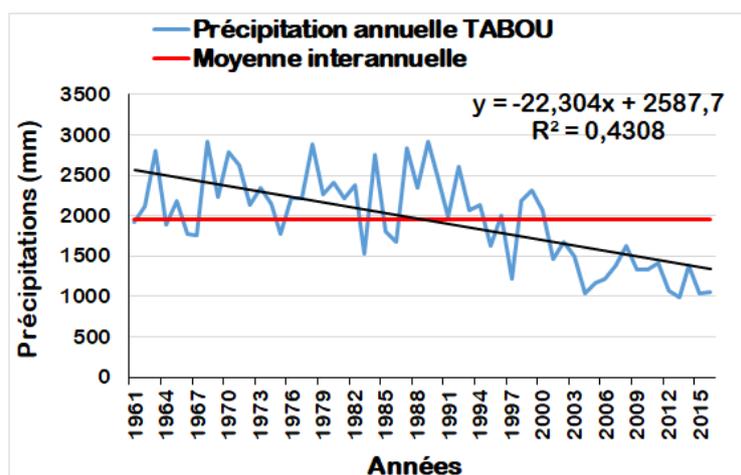


Figure 45 : Tendence à la baisse des précipitations annuelles au niveau de la station de Tabou en climat attiéen du Sud-Ouest (1961-2016)

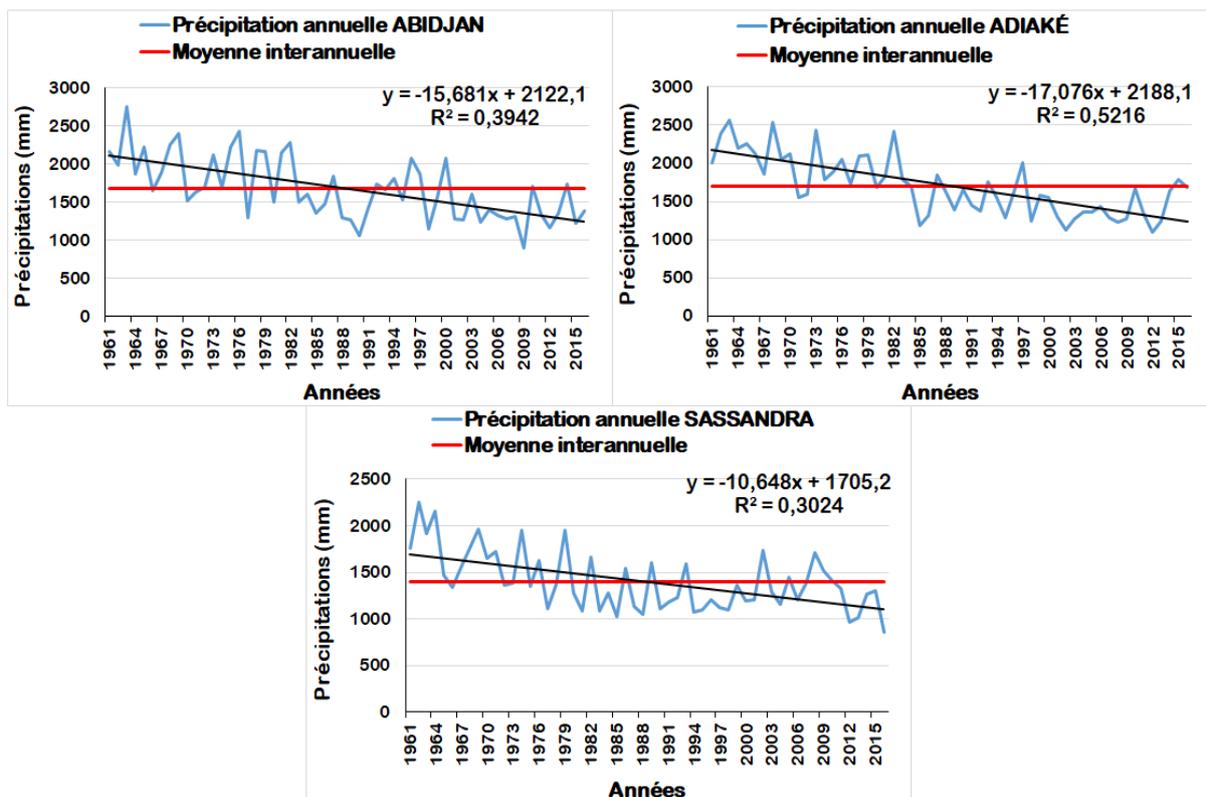


Figure 46 : Tendance à la baisse des précipitations annuelles au niveau des stations d'Abidjan, Adiaké et Sassandra en climat attién du littoral (1961-2016)

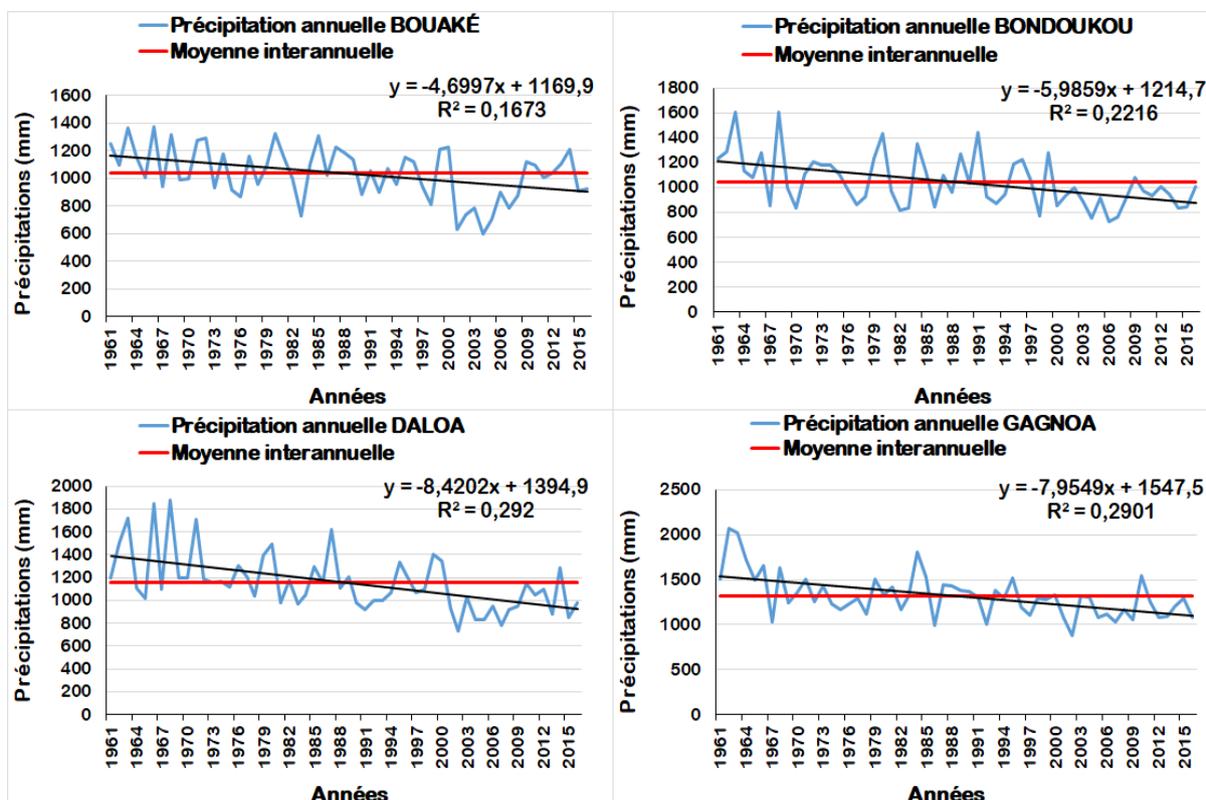


Figure 47 : Tendance à la baisse des précipitations annuelles au niveau des stations de Bouaké, Bondoukou, Daloa et Gagnoa en climat baouléen (1961-2016)

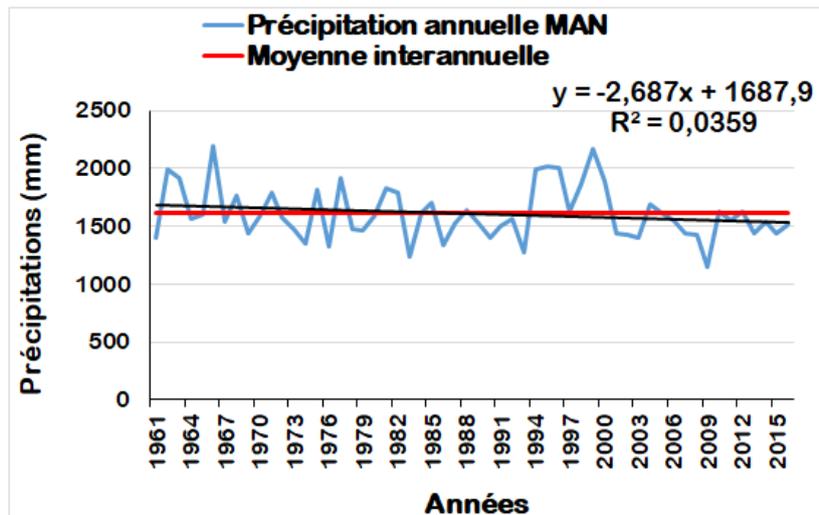


Figure 48 : Tendence à la baisse des précipitations annuelles au niveau de la station de Man en climat de montagnes (1961-2016)

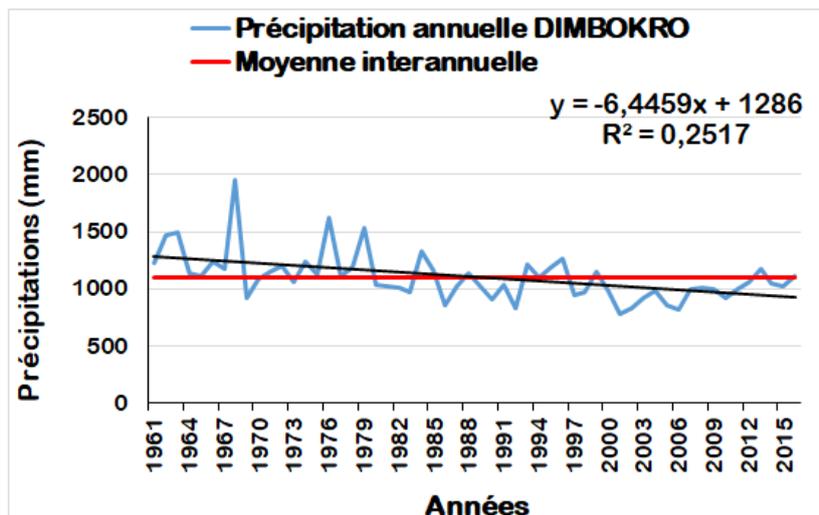


Figure 49 : Tendence à la baisse des précipitations annuelles au niveau de la station de Dimbokro en climat attiéen de l'intérieur (1961-2016)

Au niveau des températures, la progression de celles-ci est cependant prononcée sur l'ensemble des zones climatiques du territoire ivoirien avec des R^2 qui oscillent entre 0,32 (Daloa, climat baouléen) et 0,84 (Bouaké, climat baouléen) pour des hausses comprises entre $+0,1^\circ\text{C}/\text{décennie}$ (Daloa, climat baouléen ; Dimbokro, climat attiéen de l'intérieur) et $+0,5^\circ\text{C}/\text{décennie}$ (Bouaké, climat baouléen ; Man, climat de montagnes) avec une moyenne de $0,2^\circ\text{C}/\text{décennie}$ sur la période 1961-2016 (Figures 50, 51, 52, 53, 54 et 55).

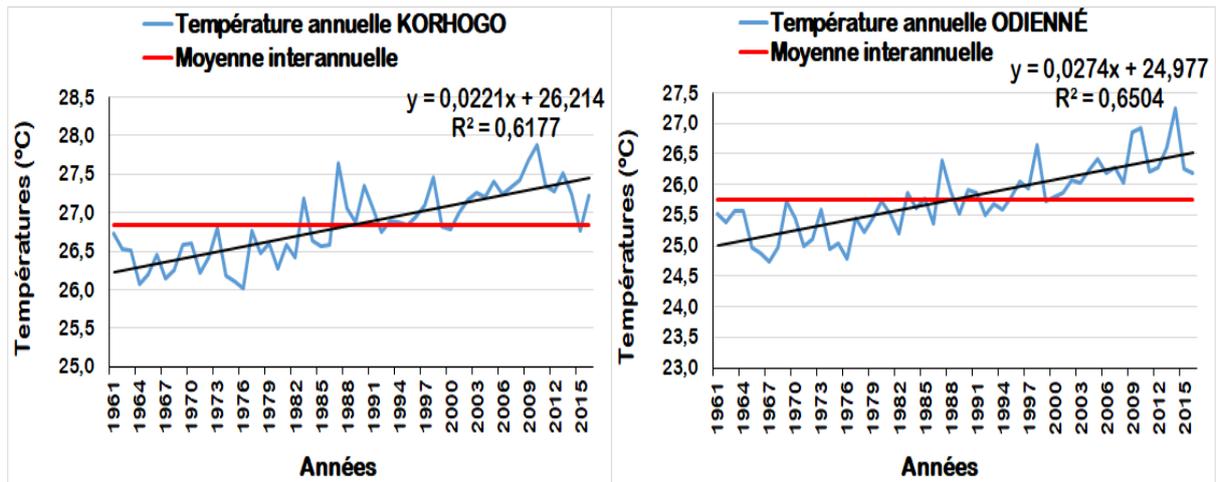


Figure 50 : Tendence à la hausse des températures annuelles au niveau des stations de Korhogo et Odienné en climat soudanais (1961-2016)

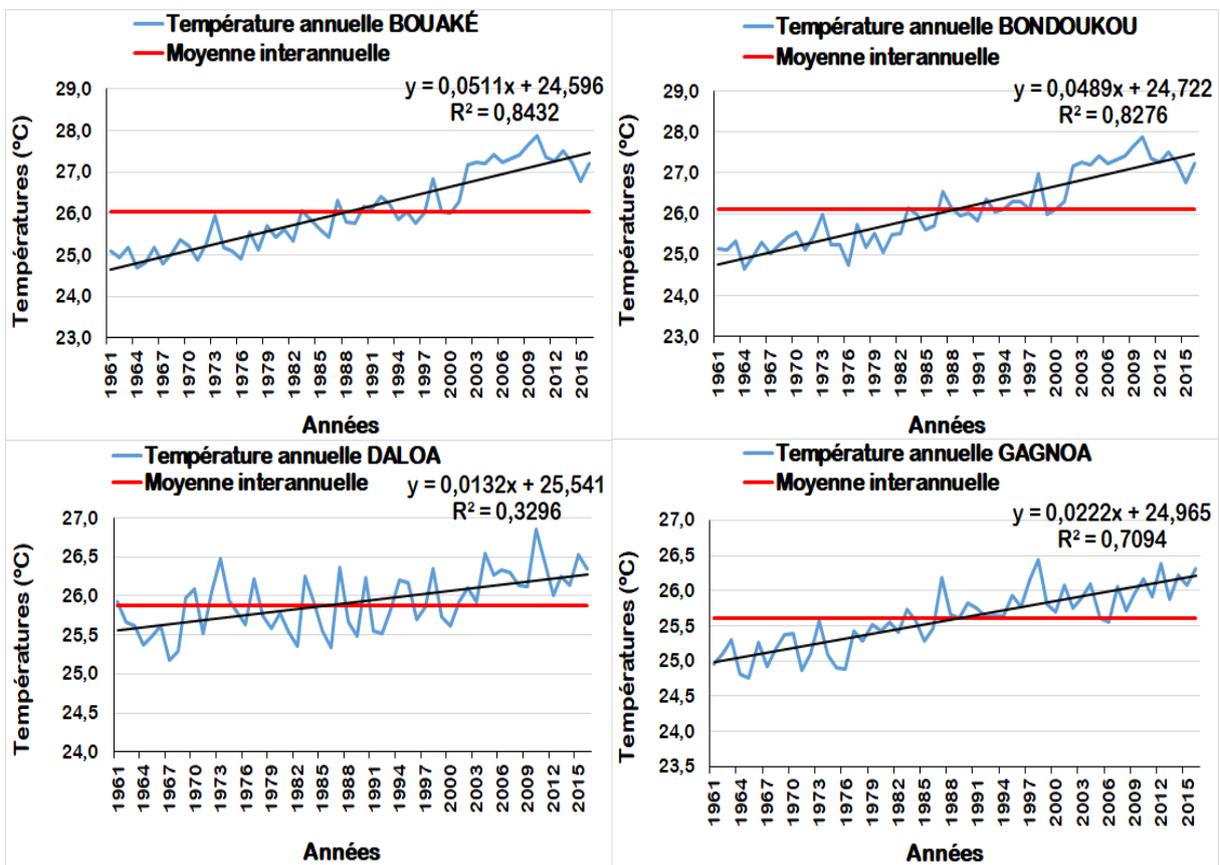


Figure 51 : Tendence à la hausse des températures annuelles au niveau des stations de Bouaké, Bondoukou, Daloa et Gagnoa en climat baouléen (1961-2016)

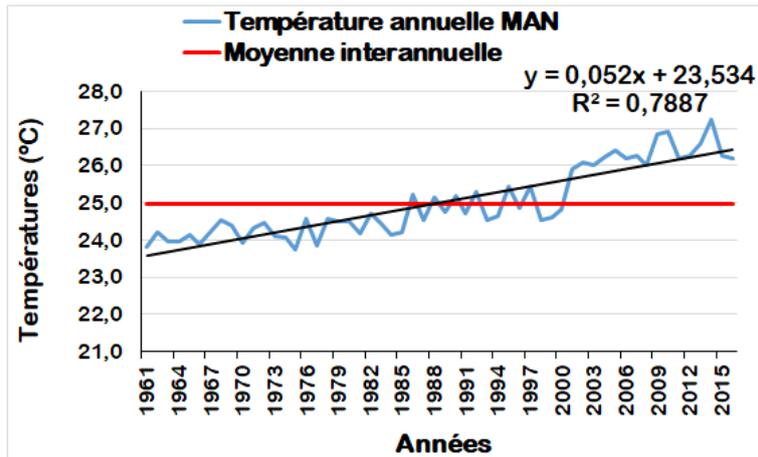


Figure 52 : Tendence à la hausse des températures annuelles au niveau de la station de Man en climat de montagnes (1961-2016)

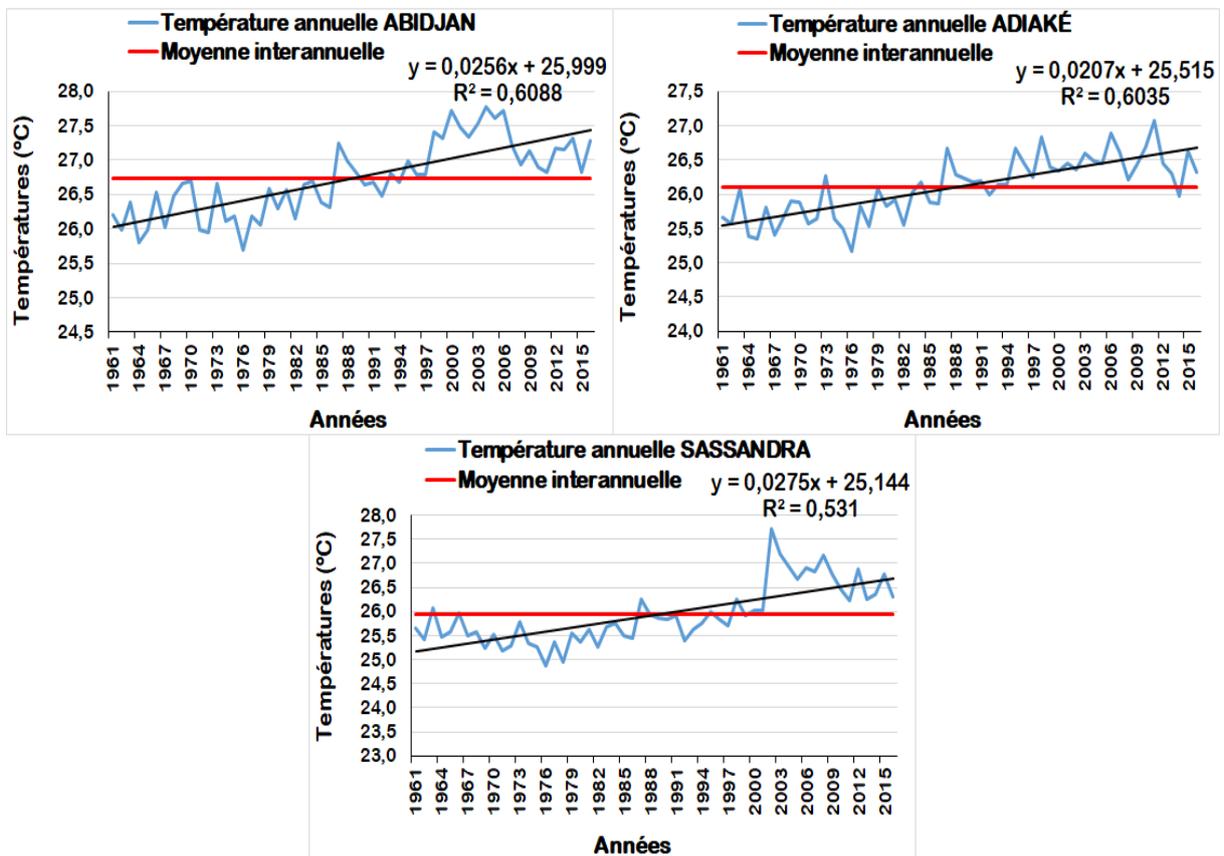


Figure 53 : Tendence à la hausse des températures annuelles au niveau des stations d'Abidjan, Adiaké et Sassandra en climat attién du littoral (1961-2016)

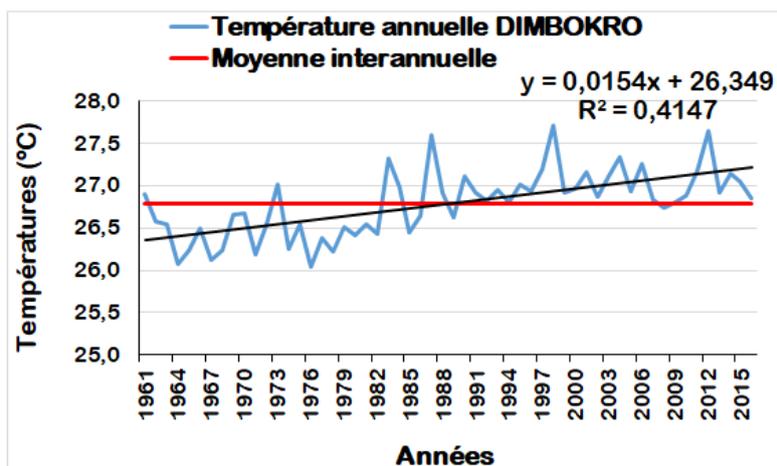


Figure 54 : Tendence à la hausse des températures annuelles au niveau de la station de Dimbokro en climat attiéen de l’intérieur (1961-2016)

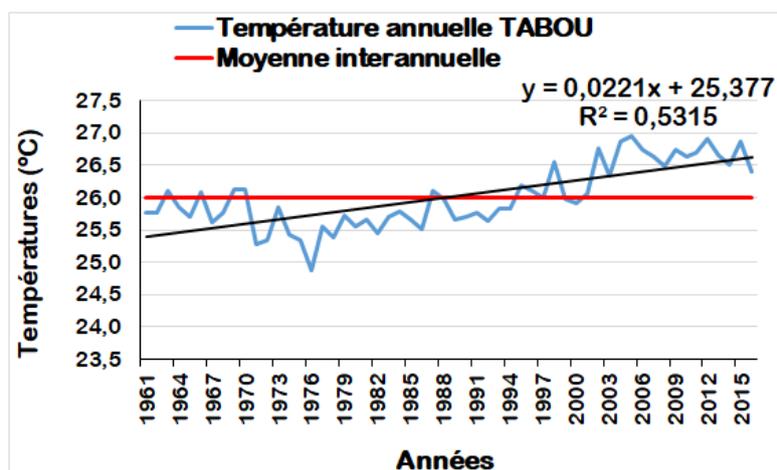


Figure 55 : Tendence à la hausse des températures annuelles au niveau de la station de Tabou en climat attiéen du Sud-Ouest (1961-2016)

6.1.2. STATIONNARITÉ DES DONNÉES CLIMATIQUES

Le bouleversement climatique constaté, au niveau de l’ensemble des régions climatiques, sur la période 1961-2016 est aussi traduit par des ruptures de stationnarité dans l’évolution des paramètres climatiques étudiés. Les résultats des tests statistiques de Pettitt et de Hubert appliqués aux séries de températures extrêmes [température minimale (T_{\min}) et température maximale (T_{\max})] et aux cumuls pluviométriques annuels (P_{an}) de la période 1961-2016, sont présentés dans le tableau XIX. Les écarts de variation mentionnés dans ce tableau ont été calculés à partir des ruptures mises en évidence par les deux tests dans le cas de dates de ruptures identiques détectées. Dans le cas contraire, le test de Pettitt qui exprime, contrairement à la

segmentation de Hubert, un changement brutal dans la série chronologique a été privilégié. Les hypothèses du test de Pettitt sont rejetées aux seuils de probabilité (ou seuils de confiance) de 90 à 99% et confirment la présence de ruptures significatives au sein des différentes séries des variables analysées. Sur l'ensemble des régions climatiques, les deux tests permettent de déceler une période de rupture, globalement à la baisse de la pluviométrie et à la hausse de la thermométrie, située généralement entre 1970 et 2000 (Tableau XIX). Les premières ruptures ont été observées autour de l'année 1970, les secondes autour de l'année 1980 et les dernières autour de l'année 2000. Ces ruptures sont comprises majoritairement entre 1970 et 1989 au niveau des séries de température minimale et de température maximale, et entre 1982 et 2000 pour ce qui concerne les séries pluviométriques. Cependant, des ruptures ont été détectées au sein des séries pluviométriques vers la fin de la décennie 2000 [2007 à Bondoukou et 2008 à Bouaké, climat baouléen (zone 2)] et au début de la décennie 2010 (2013 à Bondoukou, climat baouléen).

Tableau XIX : Déficits et excédents pluvio-thermiques moyens observés aux différentes stations des zones climatiques par rapport aux dates de rupture des séries chronologiques (1961-2016)

	STATIONS	T _{min}			T _{max}			P _{an}		
		T P	T H	D (%)	T P	T H	D (%)	T P	T H	D (%)
Zone 1	Korhogo	1997*	-	+9,1	1982*	-	+8,3	1998***	1999	-25,7
	Odienné	1987*	-	-6,6	1982*	1983 1988	+11,2	1982***	1982 1993 2000	-29,8
Zone 2	Bouaké	1972*	-	+10,3	1976*	-	+16,8	1989**	2000 2008	-14
	Bondoukou	1996**	1989	+9,6	1989***	-	+21,2	2007*	2013	+27,6
	Daloa	1997*	1997	+3,8	1972*	-	+18,2	1989***	1979 2000	-19,8
	Gagnoa	1983*	-	-4,9	1980*	-	+16,9	1995***	1964 1995	-15,5
Zone 3	Man	1977*	-	+26,6	1973*	1997	+16,5	2000*	-	-8,1
Zone 4	Abidjan	1970*	1968	+24,3	1979**	1975	+20,7	1998***	1999	-22,8
	Adiaké	1987*	-	+25	1975*	-	+15,5	1984***	1970 1985	-28,4
	Sassandra	1997*	1997	+4,1	1976*	-	+9,4	1979***	1964 1979	-25
Zone 5	Dimbokro	1976*	-	+10,9	1976*	-	+17,1	1979***	1968	-15,6
Zone 6	Tabou	1970*	-	-10,2	1997*	-	-29,2	1994***	1994 2002	-36,2

-T P= Test de Pettitt -T H= Test de Hubert -D= Ecart de variation
- Les signes *, ** et *** signifient que la rupture est respectivement significative à 90, 95 et 99% selon le résultat du test de Pettitt

Il est constaté une baisse générale des précipitations sur l'ensemble des régions climatiques du territoire ivoirien marquée par la rupture historique du début des années 1970 suivie des ruptures autour des années 1980 et 2000. Seule la station de Bondoukou (climat baouléen) présente un excédent pluviométrique (+27,61%) (Tableau XIX). L'ensemble des stations affichent un excédent de températures minimales et maximales en dehors de celles des climats soudanais (zone 1) (Odienné : -6,65% au niveau des T_{min}), baouléen (Gagnoa : -4,96% au niveau des T_{min}) et attiéen du Sud-Ouest (zone 6) (Tabou : -10,17% et -29,18% respectivement au niveau des T_{min} et des T_{max}) qui montrent un déficit de température (Tableau XIX). On note en moyenne sur la période 1961-2016 une baisse pluviométrique et une hausse thermométrique respectivement de 27,8% et 5,5% au niveau du climat soudanais, de 5,4% et 11,5% au niveau du climat baouléen et de 25,4% et 16,5% au niveau du climat attiéen de l'intérieur (zone 5). Concernant les climats de montagnes (zone 3) et attiéen de l'intérieur (zone 5), la baisse pluviométrique et la hausse thermométrique est respectivement de 8,1% et 21,5% et de 15,6% et 14%. Pour le climat attiéen du Sud-Ouest, il est constaté plutôt une baisse au niveau des deux paramètres climatiques qui est de 36,2% pour la pluviométrie et 19,7% pour la température. Dans l'ensemble, les régions climatiques affichent un déficit pluviométrique moyen et un excédent thermométrique moyen respectivement de 21,2% et 8,9%. Ces résultats montrent ainsi que la sécheresse amorcée depuis la fin des années 1960 continue de frapper l'ensemble des régions climatiques du territoire ivoirien.

Les précipitations annuelles ont évolué à la hausse globalement sur la période 2009-2016 au niveau de certaines localités du climat baouléen (Bouaké et Bondoukou). L'application du test de Hubert permet de déceler une période de rupture située globalement entre 2000 et 2013 au niveau de ces localités (Tableau XIX). Les ruptures concernent l'année 2013 et les années 2000 et 2008 respectivement pour les localités de Bondoukou et de Bouaké qui enregistrent une reprise de la pluviométrie. Les périodes 2009-2016 et 2014-2016 correspondent à des périodes humides respectivement à Bouaké et à Bondoukou. Ces résultats montrent un retour de la pluviométrie, à la fin de la décennie 2000 et vers le milieu de la décennie 2010, qui semble avoir affecté seulement certaines localités situées au niveau du climat baouléen. Cette hausse pluviométrique est plus prononcée à Bouaké (39,8 %) qu'à Bondoukou (25,3%) où les pluies ont tardé relativement à se réinstaller. La reprise des pluies semble n'avoir pas été dans les mêmes proportions partout dans le climat baouléen.

Par contre, la procédure de segmentation de Hubert décèle des points de rupture en 2000 à Daloa (climat baouléen) et en 1993 et 2000 à Odienné (climat soudanais) (Tableau XIX), traduisant des baisses respectives de 15,8% et 35,7% des pluies annuelles sur la période 2001-

2016 au niveau de ces localités. L'application de la méthode de segmentation de Hubert sur la série pluviométrique de Tabou (climat attiéen du Sud-Ouest) détecte un point de rupture en 2002 (Tableau XIX), traduisant également une baisse pluviométrique de 31,1% sur la période 2003-2016. Ces résultats traduisent une persistance de la sécheresse dans certaines localités au niveau des climats soudanais, baouléen et attiéen du Sud-Ouest.

Des ruptures synchrones ou quasi-synchrones entre les températures extrêmes (T_{\min} et T_{\max}) et les pluviométries ont été mises en évidence par les deux tests de détection de rupture au niveau des stations de Korhogo et Odienné (climat soudanais), Adiaké et Sassandra (climat attiéen du littoral), Daloa (climat baouléen), Dimbokro (climat attiéen de l'intérieur) et Tabou (climat attiéen du Sud-Ouest) (soit 58% des stations) (Tableau XIX). On considère que deux ruptures sont dites synchrones si elles se situent dans un intervalle de plus ou moins trois années. Les cas les plus marquants concernent les ruptures détectées par le test de Pettitt à la station de Dimbokro pour ce qui est des températures (T_{\min} , T_{\max}) et de la précipitation, à la station de Korhogo pour ce qui est de la température minimale et de la précipitation, et enfin les ruptures détectées par les deux tests à la station d'Odienné pour ce qui est de la température maximale et de la précipitation. Les résultats obtenus montrent que les ruptures détectées par les tests statistiques au niveau des séries de températures extrêmes concordent globalement avec celles des pluies annuelles. Les températures extrêmes sont de ce fait capables de mettre en évidence des tendances climatiques.

6.2. ANALYSE DE LA DYNAMIQUE CLIMATIQUE MULTI-ÉCHELLE

Cette analyse concerne uniquement les stations dont les séries d'observations collectées couvrent la période 1941-2016. A cet effet, les stations synoptiques de Bondoukou, Daloa et Korhogo n'ont pas été utilisées.

6.2.1. DYNAMIQUE CLIMATIQUE ANNUELLE

Les résultats relatifs à l'indice d'aridité UNEP sont consignés dans le tableau XX. Il est observé, sur l'ensemble des zones climatiques, que les valeurs de l'indice UNEP obtenues indiquent au niveau des localités étudiées un climat subhumide et humide sur les périodes avant et après 1970. En effet, l'indice UNEP est supérieur au seuil définissant l'humidité du climat ($I > 0,65$) sur toutes les périodes au niveau des localités de toutes les zones climatiques. Globalement, la période avant 1970 présente les valeurs les plus grandes de l'indice d'aridité tandis que les périodes après 1970 enregistrent les valeurs les plus faibles. La localité de Man [climat de

montagnes (zone 3)] enregistre la plus grande valeur de l'indice sur la période avant 1970. Cependant, la localité de Tabou [climat attiéen du Sud-Ouest (zone 6)] enregistre, sur la période avant 1970, la valeur la plus petite de l'indice d'aridité UNEP. Ces résultats montrent que le caractère climatique des régions de la Côte d'Ivoire, selon l'indice d'aridité UNEP, n'a pas changé en passant de la période antérieure à la période postérieure à 1970. Cependant, il est constaté globalement des modifications dans le caractère climatique après 1970. En effet, une diminution du caractère humide du climat après 1970 est mise en évidence sur l'ensemble des zones climatiques du territoire ivoirien (valeurs de l'indice globalement faibles après 1970), à l'exception du climat attiéen du Sud-Ouest où il est observé une augmentation du caractère humide après 1970 (valeurs de l'indice plus fortes après 1970).

Tableau XX: Diminution du caractère humide du climat après 1970 au niveau des différentes zones climatiques étudiées

	Stations	1941-1970	1971-2000	1981-2010	1971-2016
Zone 1	Odienné	1,44	1,23	0,99	1,05
Zone 2	Bouaké	1,45	0,94	0,83	0,87
	Gagnoa	1,47	1,18	1,12	1,13
Zone 3	Man	1,65	1,64	1,59	1,59
Zone 4	Abidjan	1,39	1,37	1,19	1,26
	Adiaké	1,45	1,44	1,25	1,34
	Sassandra	1,44	1,16	1,10	1,15
Zone 5	Dimbokro	1,31	0,87	0,82	0,87
Zone 6	Tabou	1,47	1,96	1,66	1,67

6.2.2. DYNAMIQUE CLIMATIQUE SEMESTRIELLE

Il est mis en évidence, au niveau du climat attiéen du littoral, une croissance monotone de l'indice d'Angot dont les valeurs restent inférieures ou égales à 1, avec les valeurs des périodes après 1970 (1971-2000, 1981-2010 et 1971-2016) supérieures à celle de la période 1941-1970 au niveau des localités d'Abidjan et Adiaké (Figure 56). Pour ces deux localités, les semestres froids ont été plus arrosés que les semestres chauds quel que soit la période considérée. À Sassandra, toujours au niveau du climat attiéen du littoral, la valeur de l'indice la plus faible a été observée sur la période 1971-2000 (après 1970) et reste inférieure à celle d'avant 1970 (1941-1970) (Figure 56). Cependant, l'indice prend des valeurs supérieures à 1 sur les périodes 1981-2010 et 1971-2016. Ce qui montre que les semestres chauds ont été plus arrosés que les semestres froids au cours de ces périodes au niveau de la localité de Sassandra.

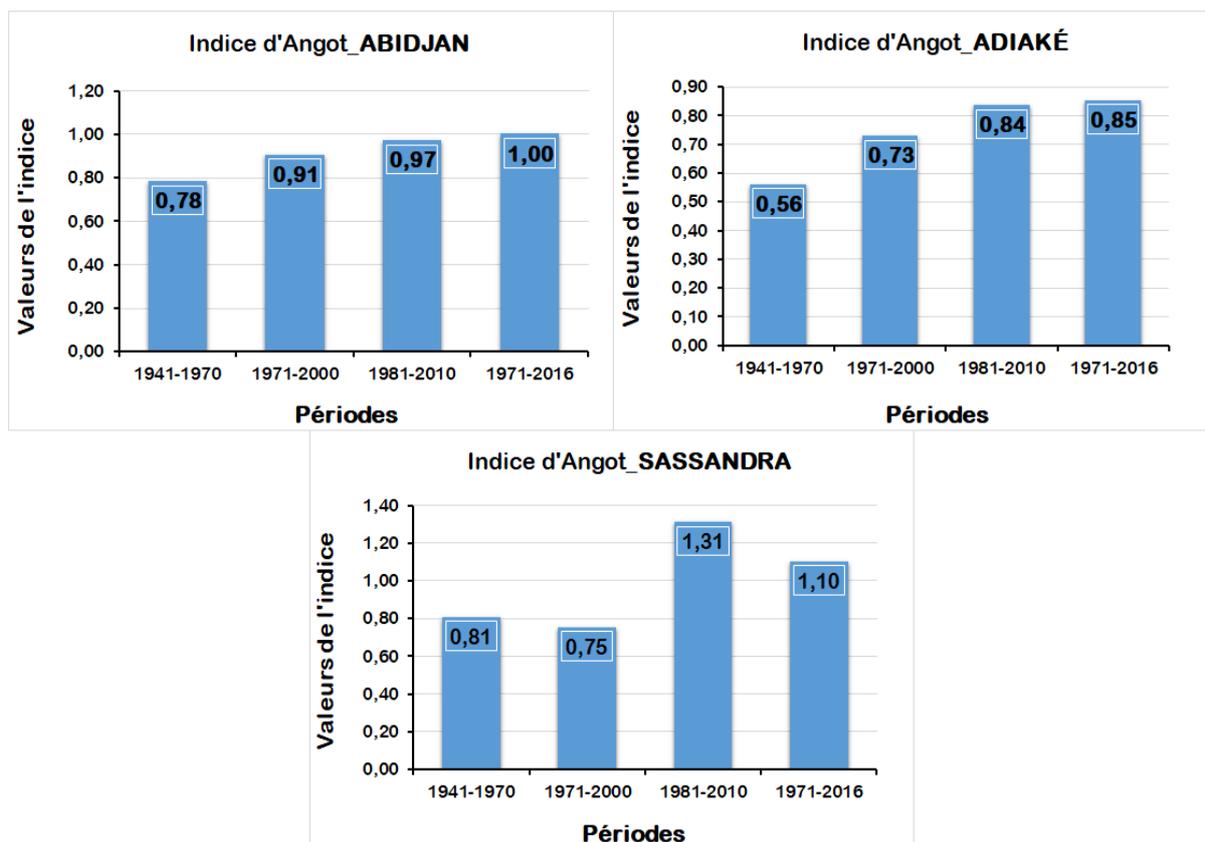


Figure 56 : Modification après 1970 du caractère pluvieux des semestres froids et des semestres chauds au niveau d'Abidjan, Adiaké et Sassandra en climat attién du littoral

Concernant le climat baouléen (Bouaké, Gagnoa), les valeurs de l'indice d'Angot les plus faibles ont été observées sur la période 1971-2000 (après 1970) et sont inférieures aux valeurs de l'indice de la période avant 1970 (Figure 57). L'indice d'Angot a des valeurs inférieures à 1 sur toutes les périodes à Bouaké. Les périodes avant et après 1970 affichent donc un semestre froid plus arrosés que le semestre chaud dans la localité de Bouaké. A Gagnoa, l'évolution de l'indice est caractérisée par une valeur d'indice sur la période avant 1970 (1,20) supérieure à celles obtenues sur les périodes après 1970 qui sont inférieures à 1 (Figure 57). Ce qui montre que la période avant 1970 présente un semestre chaud plus arrosé que le semestre froid à Gagnoa alors que les périodes après 1970 font observer un semestre froid plus arrosé que le semestre chaud

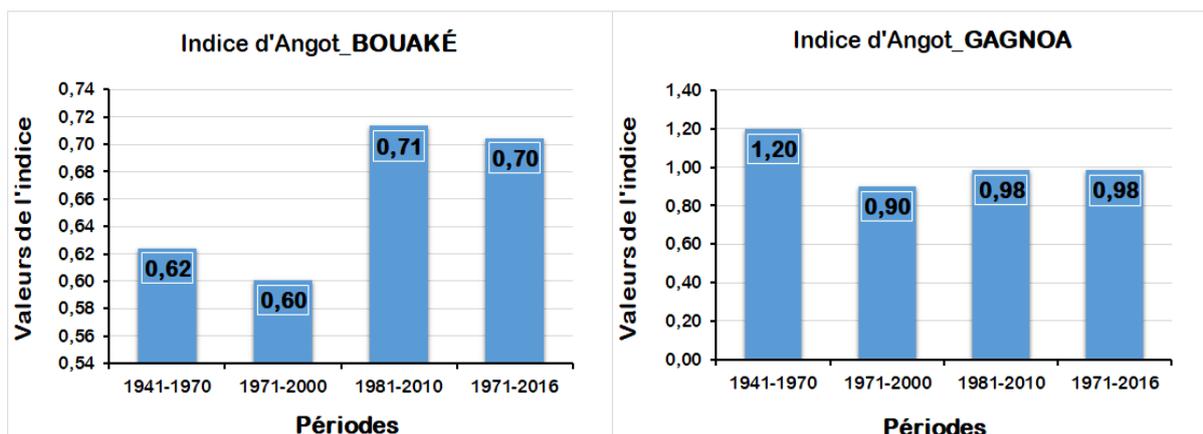


Figure 57 : Modification après 1970 du caractère pluvieux des semestres froids et des semestres chauds au niveau de Bouaké et Gagnoa en climat baouléen

En ce qui concerne les climats Soudanais (Odienné), de montagnes (Man), attiéen de l'intérieur (Dimbokro) et attiéen du Sud-Ouest (Tabou), les valeurs de l'indice d'Angot restent inférieures à 1 sur toutes les périodes (avant et après 1970) (Figures 58 à 61). Le semestre froid est donc plus arrosé que le semestre chaud sur l'ensemble de ces régions climatiques quel que soit la période considérée. Au niveau des localités de Dimbokro (Figure 58) et Tabou (Figures 59), la plus faible valeur de l'indice a été observée au cours de la période 1971-2000. Les valeurs de l'indice d'Angot des périodes 1981-2010 et 1971-2016 sont supérieures à celles de la période 1941-1970. Les localités d'Odienné (Figure 60) et Man (Figure 61), quant à elles, affichent des valeurs de l'indice d'Angot de la période 1971-2000 supérieures à celles de la période 1941-1970. A Odienné, la valeur la plus élevée est observée sur la période 1981-2010 ; tandis qu'à Man, c'est plutôt au cours de la période 1971-2016.

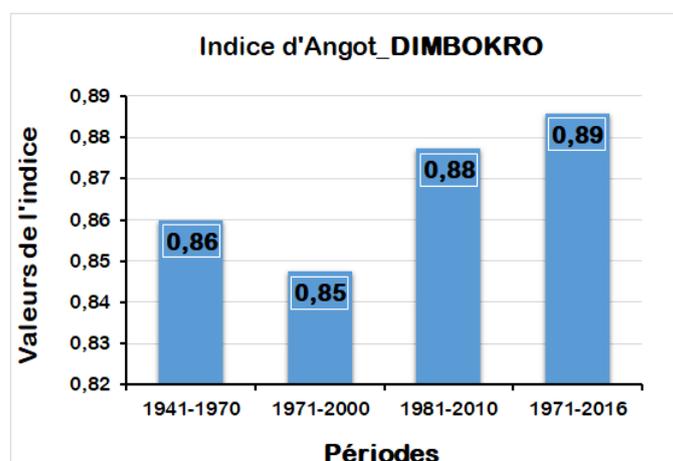


Figure 58 : Modification après 1970 du caractère pluvieux des semestres froids et des semestres chauds au niveau de Dimbokro en climat attiéen de l'intérieur

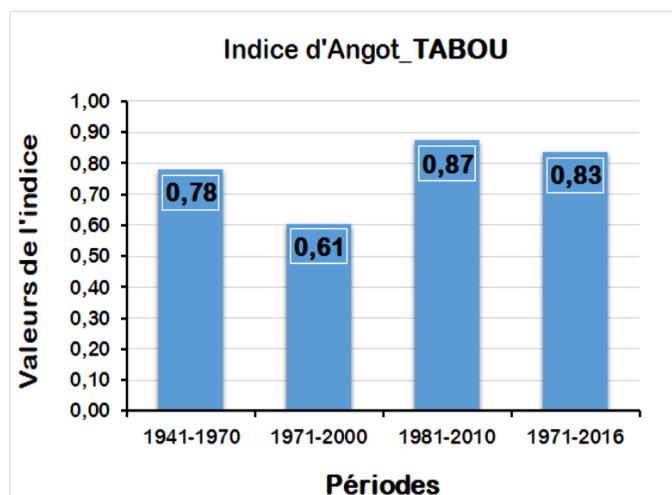


Figure 59 : Modification après 1970 du caractère pluvieux des semestres froids et des semestres chauds au niveau de Tabou en climat attiéen du Sud-Ouest

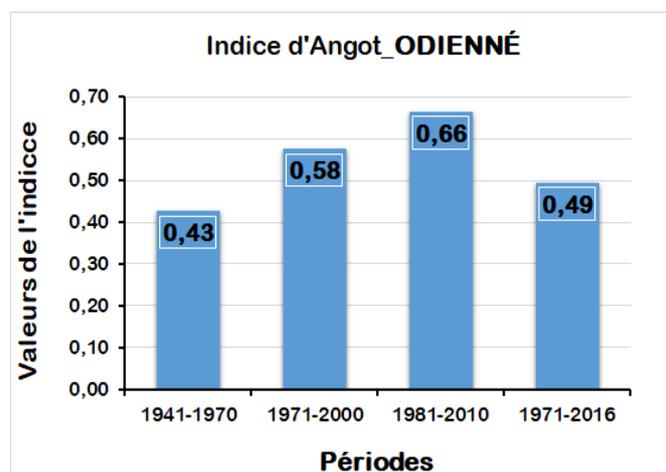


Figure 60 : Modification après 1970 du caractère pluvieux des semestres froids et des semestres chauds au niveau d'Odienné en climat soudanais

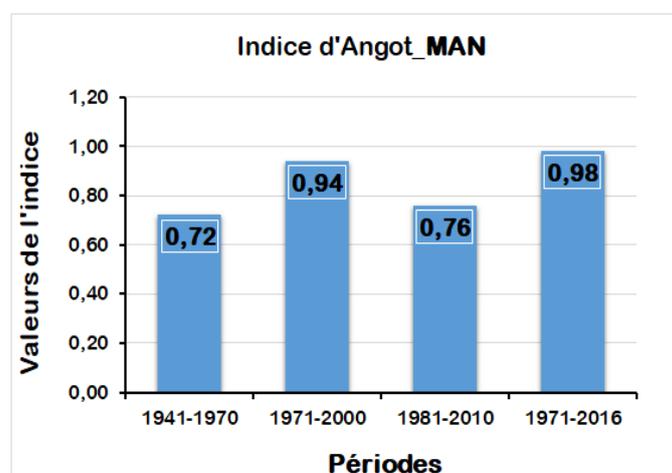


Figure 61 : Modification après 1970 du caractère pluvieux des semestres froids et des semestres chauds au niveau de Man en climat de montagnes

L'analyse de l'indice d'Angot sur quatre différentes périodes (1941-1970, 1971-2000, 1981-2010, 1971-2016) a permis de montrer qu'au niveau des différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire, les semestres froids sont généralement plus arrosés que les semestres chauds avec les valeurs de l'indice d'Angot inférieures à 1 sur l'ensemble des périodes et des localités considérées. Ces résultats traduisent que le bouleversement climatique constaté sur la période 1961-2016 a modifié le caractère « semestre froid plus arrosé que le semestre chaud » qui est plus prononcé sur la période avant 1970 que sur les périodes après 1970 sur l'ensemble des régions climatiques (valeurs de l'indice globalement plus faible sur la période avant 1970). Cependant, la localité de Gagnoa (climat baouléen) montre une valeur de l'indice d'Angot supérieure à 1 sur la période avant 1970. Pour ce qui concerne les périodes après 1970, seule la localité de Sassandra (climat attiéen du littoral) présente les périodes 1981-2010 et 1971-2016 qui ont des valeurs de l'indice d'Angot supérieures à 1. Ces résultats montrent que pour ces cas, les semestres chauds sont plus arrosés que les semestres froids. En considérant l'ensemble des régions climatiques, 55,5% des localités affichent l'indice d'Angot de la période 1971-2000 qui a une valeur inférieure à celui de la période 1941-1970. Dans près de 89% des cas, l'indice d'Angot de la période 1941-1970 est inférieur à ceux des périodes 1981-2010 et 1971-2016. Si sur l'ensemble des régions climatiques du territoire ivoirien, les semestres froids sont plus arrosés que les semestres chauds, on peut cependant constater que les semestres chauds ont tendance à être relativement plus arrosés après 1970 dans certaines localités du pays, notamment au niveau de la région climatique de l'attiéen du littoral.

6.2.3. DYNAMIQUE CLIMATIQUE TRIMESTRIELLE

L'application de l'indice saisonnier de Péguy, au niveau des différentes régions climatiques étudiées, indique que globalement la période avant 1970 (1941-1970) enregistre les cumuls pluviométriques trimestriels les plus importants par rapport aux périodes après 1970 (1971-2000, 1981-2010 et 1971-2016). Le niveau de baisse des précipitations, sur les périodes après 1970, est parfois très considérable avec la période 1981-2010 enregistrant dans l'ensemble les plus faibles cumuls pluviométriques trimestriels. L'analyse de l'indice de Péguy a été effectuée en se basant sur le trimestre le plus pluvieux au cours de la période 1941-1970 pour chacune des localités à l'intérieur de la région climatique considérée. Au niveau des climats attiéen du littoral et attiéen du Sud-Ouest, le trimestre le plus pluvieux avant 1970 est Mai-Juin-Juillet (MJJ) (Figures 62 et 63). Cependant, il est constaté au niveau des localités d'Abidjan et Sassandra (climat attiéen du littoral) (Figure 62) et Tabou (climat attiéen du Sud-Ouest) (Figure

63) que le trimestre le plus pluvieux a changé après 1970 en passant de Mai-Juin-Juillet (MJJ) à Avril-Mai-Juin (AMJ). La localité d'Adiaké (climat attién du littoral) (Figure 62), quant à elle n'a pas connu de modification de trimestre le plus pluvieux, mais le caractère pluvieux du trimestre MJJ a diminué après 1970 (les valeurs de l'indice des périodes après 1970 sont inférieures à la valeur d'avant 1970).

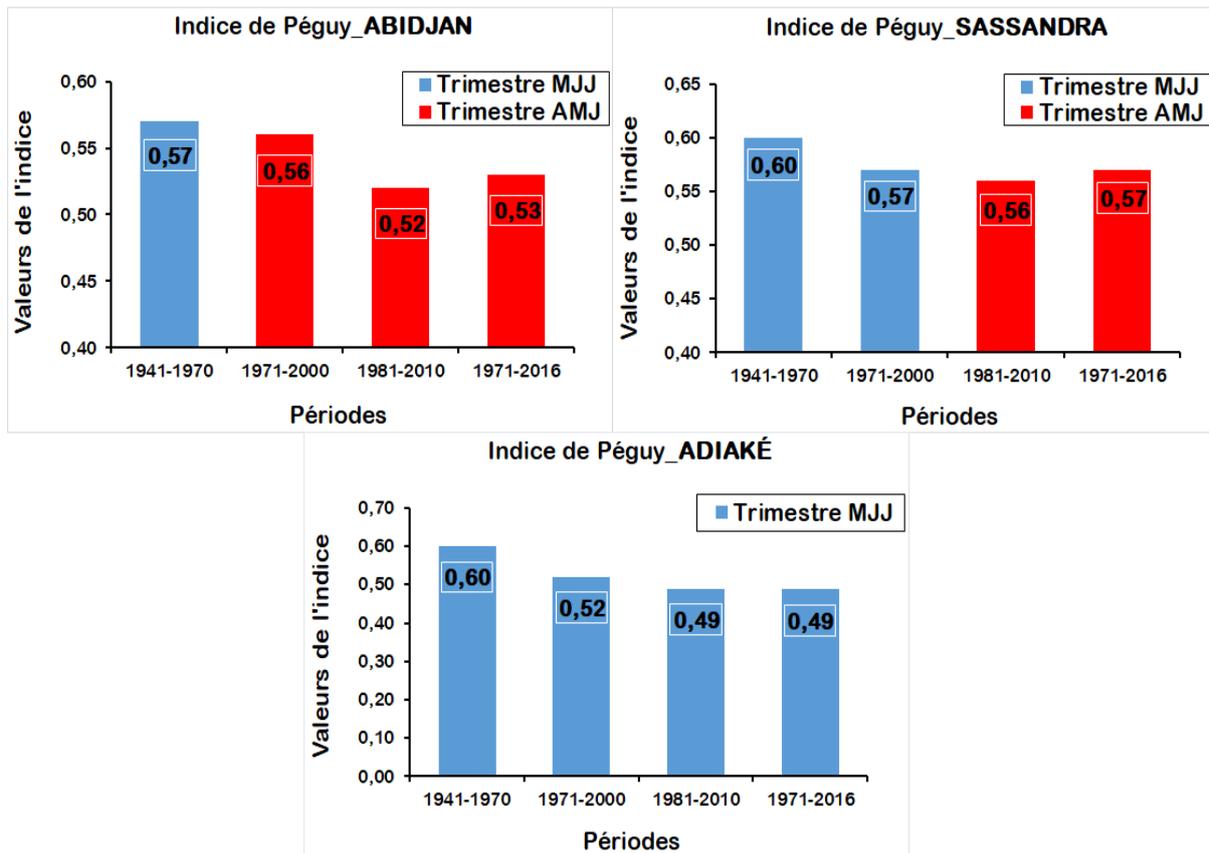


Figure 62 : Modification après 1970 du trimestre le plus pluvieux au niveau des localités d'Abidjan, Sassandra, et Adiaké en climat attién du littoral

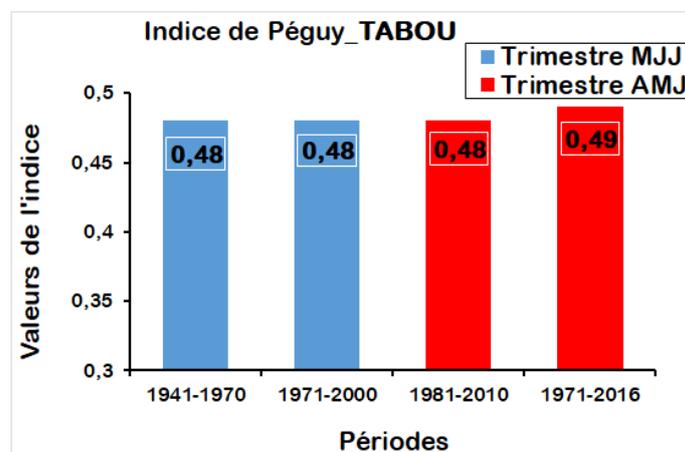


Figure 63 : Modification après 1970 du trimestre le plus pluvieux au niveau de la localité de Tabou en climat attién du Sud-Ouest

Au niveau du climat baouléen, le trimestre de cumul pluviométrique le plus élevé avant 1970 est Août-Septembre-Octobre (ASO) à Bouaké et Avril-Mai-Juin (AMJ) à Gagnoa (Figure 64). A Bouaké, il est constaté que le trimestre le plus pluvieux a changé après 1970 en passant d’Août-Septembre-Octobre (ASO) à Juillet-Août-Septembre (JAS). Cependant, à Gagnoa le trimestre Avril-Mai-Juin (AMJ) reste le plus pluvieux, avec une hausse du caractère pluvieux de ce trimestre, sur toutes les périodes après 1970.

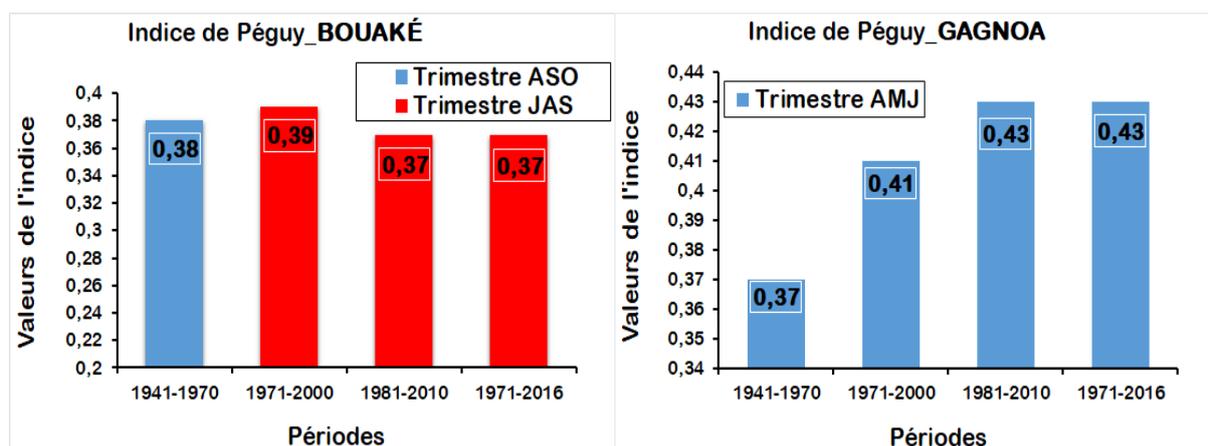


Figure 64 : Modification après 1970 du trimestre le plus pluvieux au niveau des localités de Bouaké et Gagnoa en climat baouléen

Concernant les climats soudanais et de montagnes, le trimestre le plus pluvieux avant 1970 est Juillet-Août-Septembre (JAS) (Figures 65 et 66). Le trimestre le plus pluvieux n’a pas changé après 1970. Cependant, le caractère pluvieux de ce trimestre a subi une hausse sur la période 1971-2000 et sur toutes les périodes après 1970 respectivement à Odienné (climat soudais) (Figure 65) et à Man (climat de montagnes) (Figure 66). Par contre, le caractère pluvieux du trimestre JAS a diminué sur les périodes 1981-2010 et 1971-2016 à Odienné.

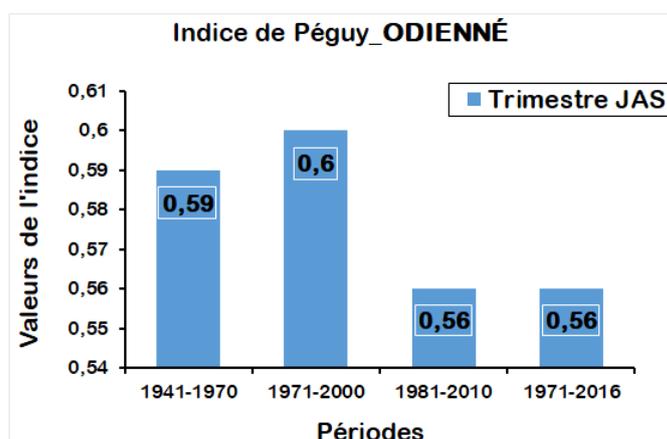


Figure 65 : Modification après 1970 du trimestre le plus pluvieux au niveau de la localité d’Odienné en climat soudanais

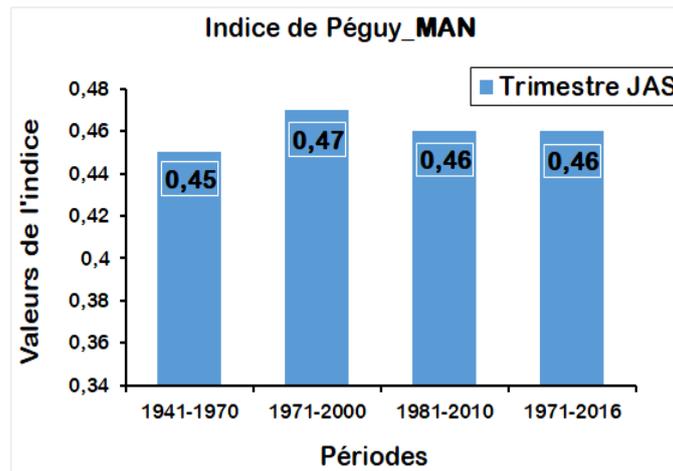


Figure 66 : Modification après 1970 du trimestre le plus pluvieux au niveau de la localité de Man en climat de montagnes

La région climatique de l'attién de l'intérieur (Dimbokro), quant à elle, présente le trimestre Avril-Mai-Juin (AMJ) comme étant le trimestre le plus pluvieux au cours de la période 1941-1970 (Figure 67). Le trimestre Avril-Mai-Juin (AMJ) reste le plus pluvieux, avec une hausse du caractère pluvieux de ce trimestre, sur toutes les périodes après 1970.

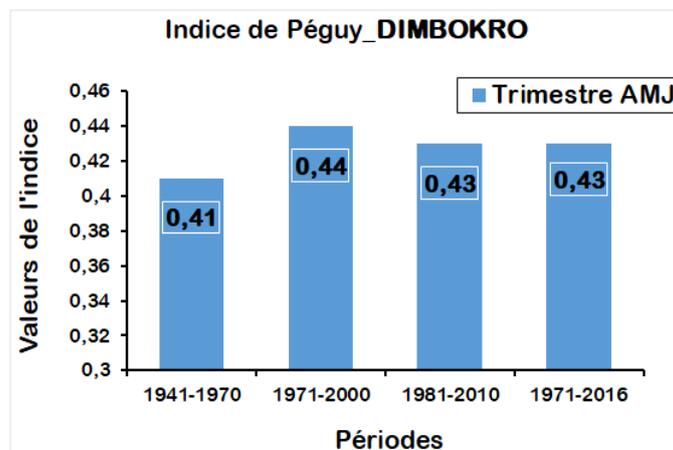


Figure 67 : Modification après 1970 du trimestre le plus pluvieux au niveau de la localité de Dimbokro en climat attiéen de l'intérieur

Les résultats de l'indice de Péguy traduisent un glissement du trimestre le plus pluvieux après 1970 dans certaines zones climatiques de la Côte d'Ivoire, surtout dans les régions représentant les climats baouléen et attiéen du littoral. Ils traduisent aussi une modification du caractère pluvieux du trimestre le plus pluvieux après 1970 dans d'autres localités sur l'ensemble des régions climatiques étudiées.

6.2.4. DYNAMIQUE CLIMATIQUE MENSUELLE

L'indice de Moral a été utilisé pour caractériser l'évolution climatique mensuelle au niveau des six (6) régions climatiques de la Côte d'Ivoire. Les valeurs de l'indice obtenues montrent qu'au niveau du climat attién du littoral, les localités d'Abidjan et Sassandra présentent des mois humides qui passent selon le cas de six ou sept avant 1970 à des mois humides compris entre six et huit après 1970 (Figure 68 et 69). Ces localités montrent que le mois de mars qui était un mois sec (en rouge) avant 1970 est devenu un mois humide (en vert) sur les périodes 1981-2010 et 1971-2016 à Sassandra (Figure 68) et sur toutes les périodes après 1970 à Abidjan (Figure 69). Le mois de décembre est passé d'un mois humide (en vert) avant 1970 à un mois sec (en rouge) sur toutes les périodes après 1970 au niveau de Sassandra. Le mois de septembre est passé de mois sec (en rouge) avant 1970 à un mois humide (en vert) au niveau de la localité d'Abidjan sur les périodes 1981-2010 et 1971-2016. Toujours au niveau du climat attién du littoral, la localité d'Adiaké présentent cependant des mois humides inchangés (types et nombre) en passant de la période avant 1970 aux périodes après 1970 (Figure 70). Les mois humides sont au nombre de huit (8) au niveau de cette localité.

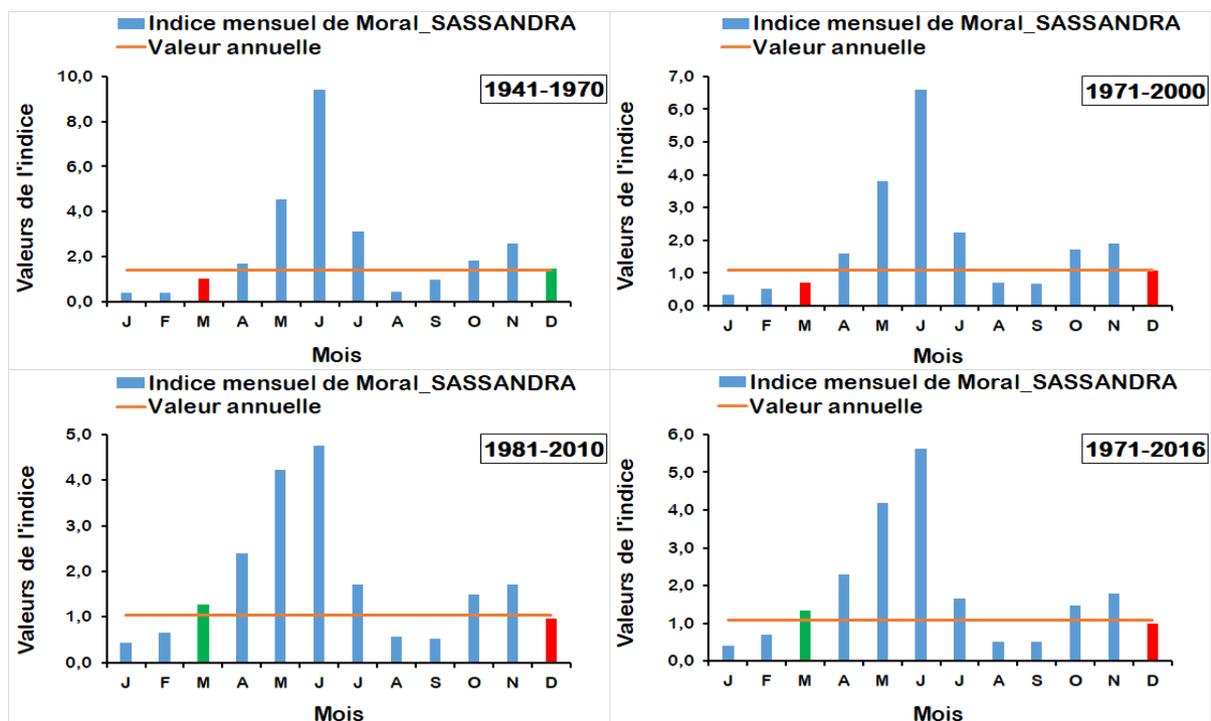


Figure 68 : Modification après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité de Sassandra en climat attién du littoral

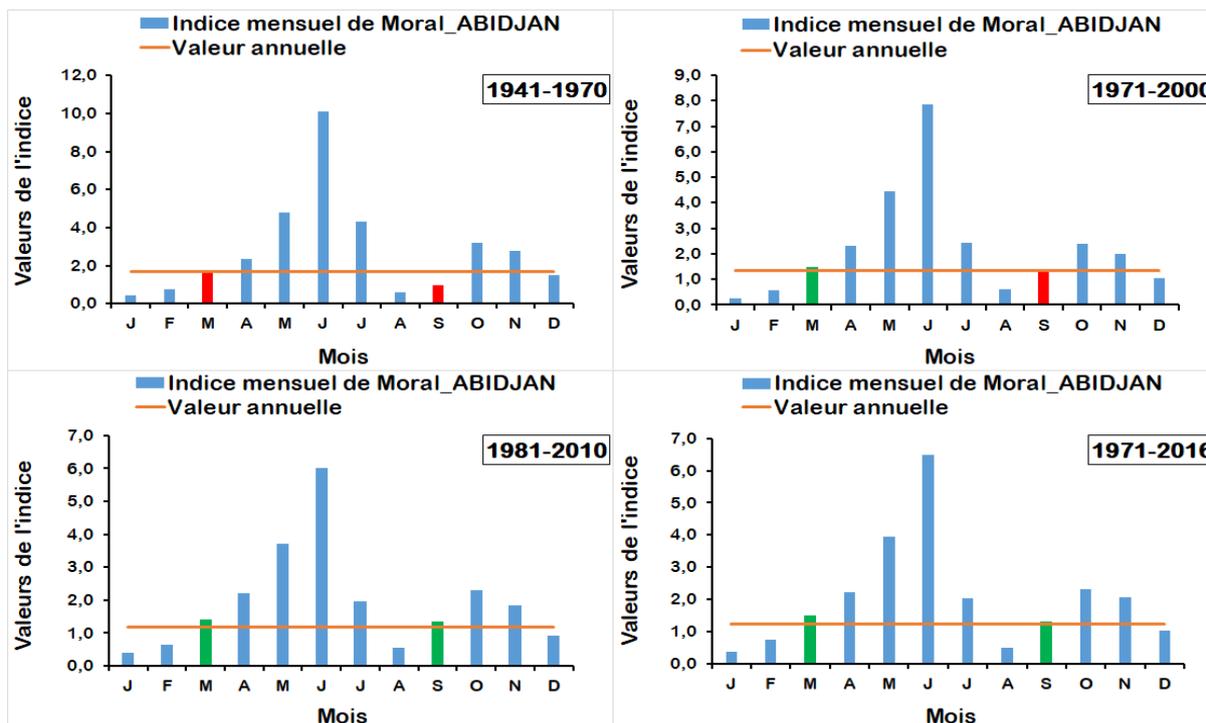


Figure 69 : Modification après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité d'Abidjan en climat attiéen du littoral

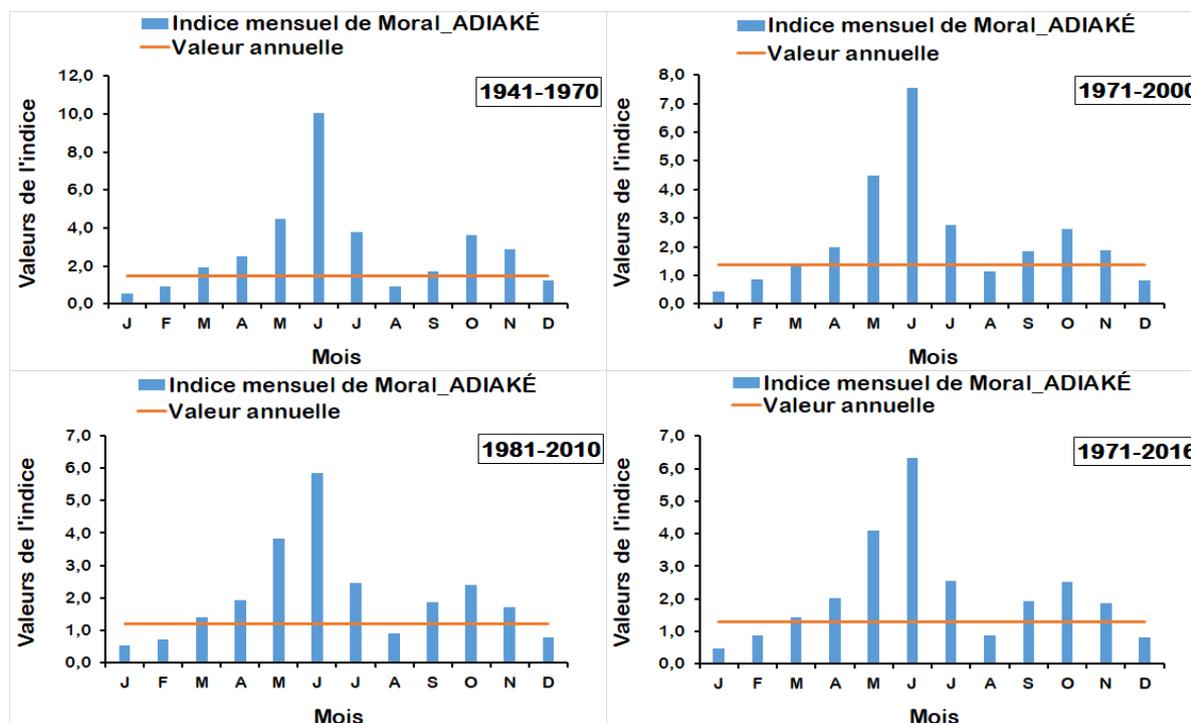


Figure 70 : Evolution stationnaire après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité d'Adiaké en climat attiéen du littoral

Concernant le climat baouléen, la localité de Gagnoa montre le mois de décembre qui est passé d'un mois humide (en vert) avant 1970 à un mois sec (en rouge) sur toutes les périodes après

1970 (Figure 71). On est passé de dix mois humides avant 1970 à neuf mois humides après 1970. Cependant, à Bouaké, il n'y a pas de modification dans la distribution des saisons en termes de mois secs (4 mois) et humides (8 mois) sur les périodes avant et après 1970 (Figure 72).

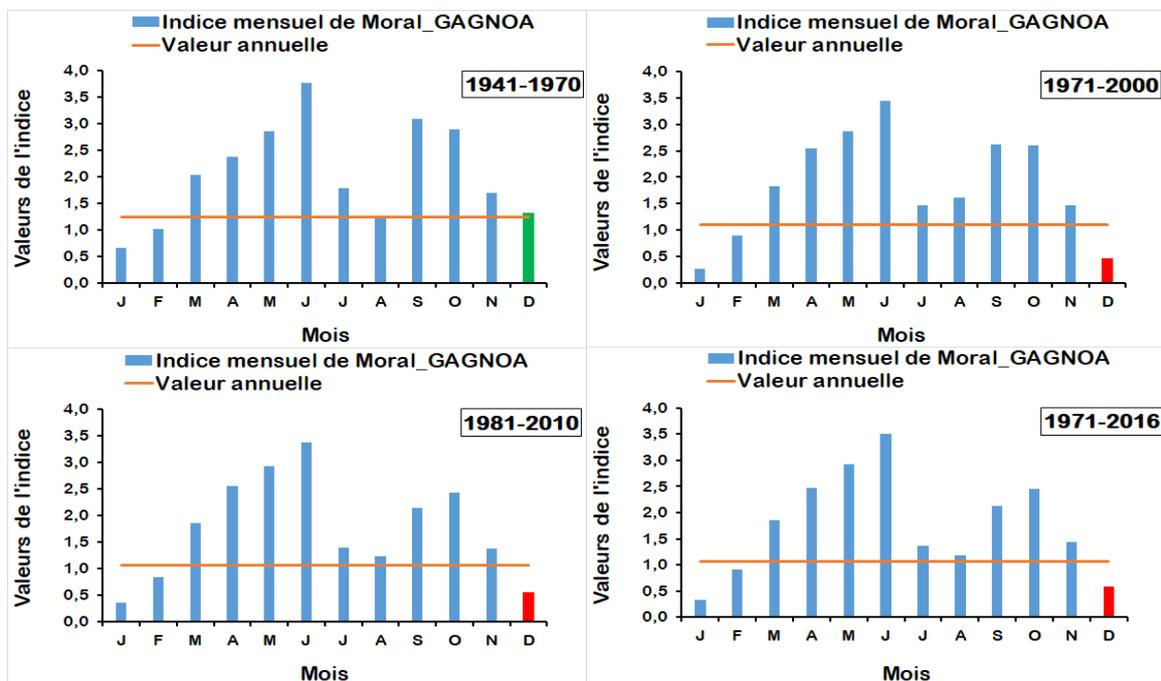


Figure 71 : Modification après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité de Gagnoa en climat baouléen

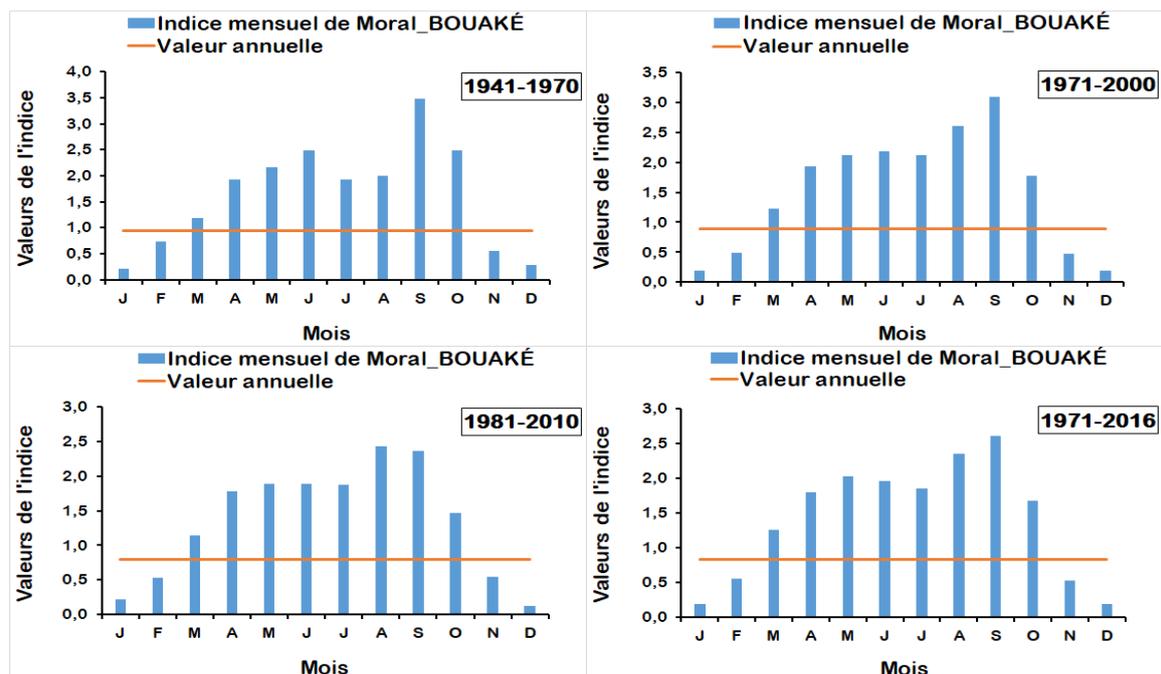


Figure 72 : Evolution stationnaire après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité de Bouaké en climat baouléen

Au niveau du climat soudanais (Odienné), le mois d'avril qui était un mois sec (en rouge) avant 1970 et sur la période 1971-2000, est devenu un mois humide (en vert) sur les périodes 1981-2010 et 1971-2016 (Figure 73). Ainsi, on passe de six (6) à sept (7) mois humides.

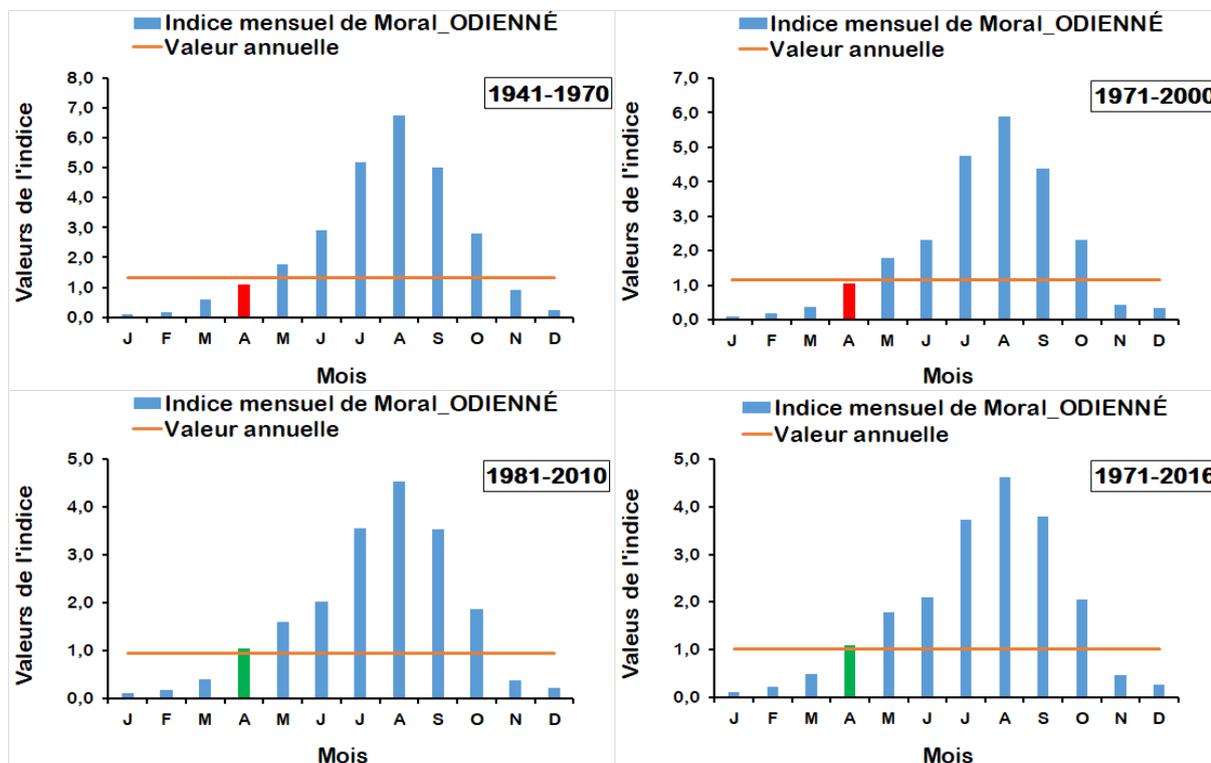


Figure 73 : Modification après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité d'Odienné en climat soudanais

Pour le climat de Montagnes (Man), les mois humides restent inchangés (types et nombre) en passant de la période avant 1970 aux périodes après 1970 (Figure 74). Le nombre de mois humides est de huit (8) au niveau de la localité de Man.

En ce qui concerne le climat attiéen de l'intérieur, la localité de Dimbokro, fait observer un passage de huit (8) mois humides sur la période avant 1970 à neuf (9) mois humides sur toutes les périodes après 1970 (Figure 75). En effet, le mois de novembre est passé d'un mois sec (en rouge) avant 1970 à un mois humide (en vert) sur toutes les périodes après 1970.

Au niveau du climat attiéen du Sud-Ouest, la localité de Tabou présente des mois humides qui passent de huit (8) avant 1970 à des mois humides qui sont au nombre de neuf (9) ou dix (10) après 1970 (Figure 76). En effet, le mois de mars qui était un mois sec (en rouge) avant 1970 est devenu un mois humide (en vert) sur la période 1971-2016. Les mois d'août et septembre sont passés de mois secs (en rouge) avant 1970 à des mois humides (en vert) sur toutes les périodes après 1970.

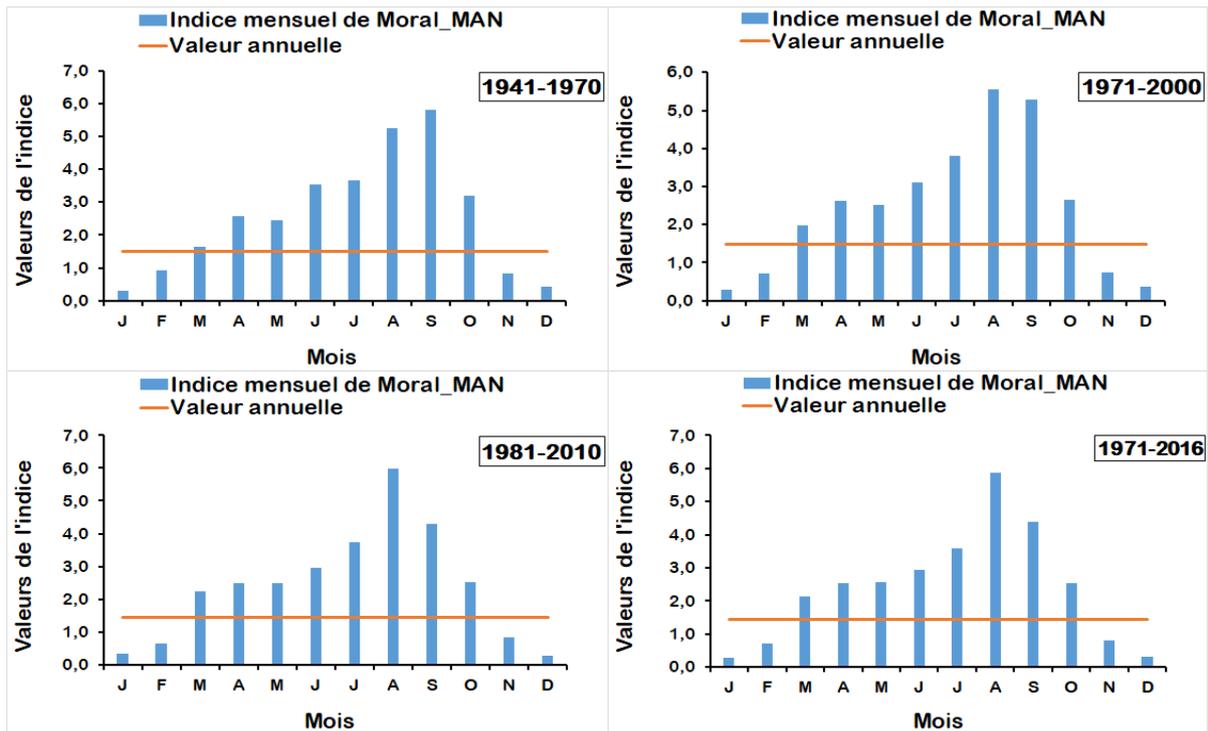


Figure 74 : Evolution stationnaire après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité de Man en climat de montagnes

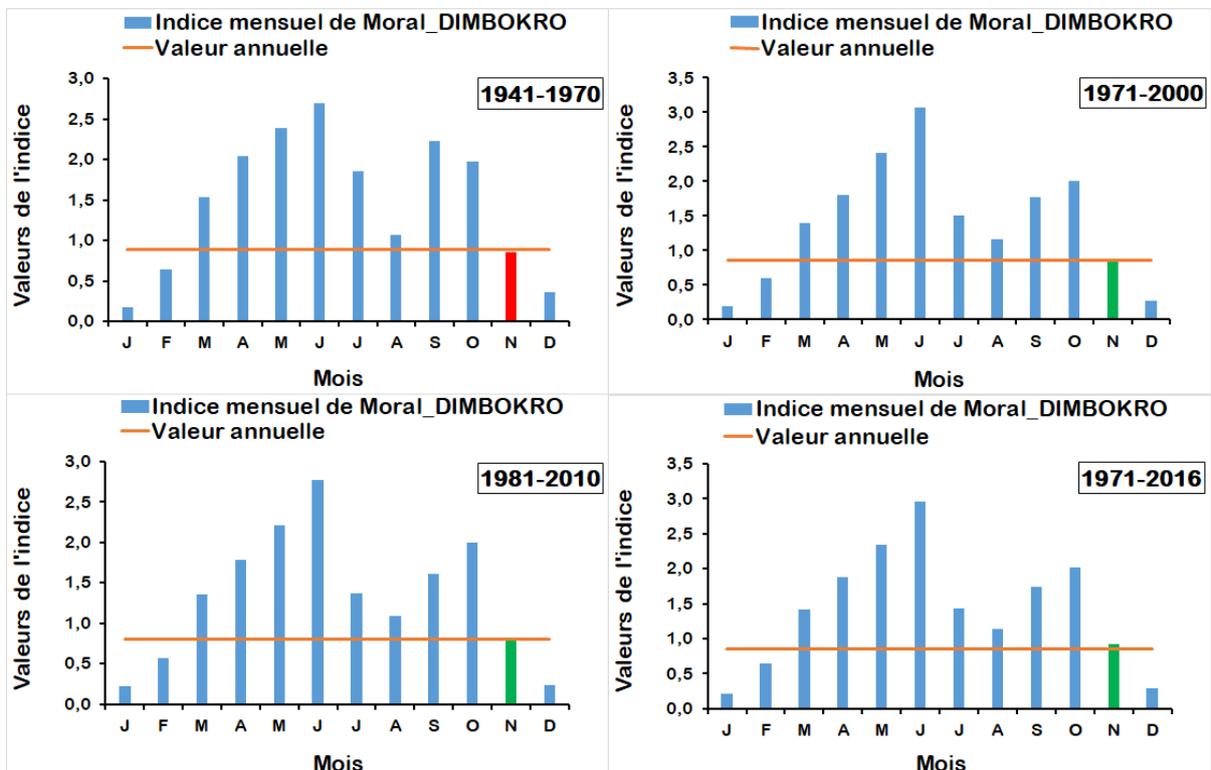


Figure 75 : Modification après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité de Dimbokro en climat attiéen de l'intérieur

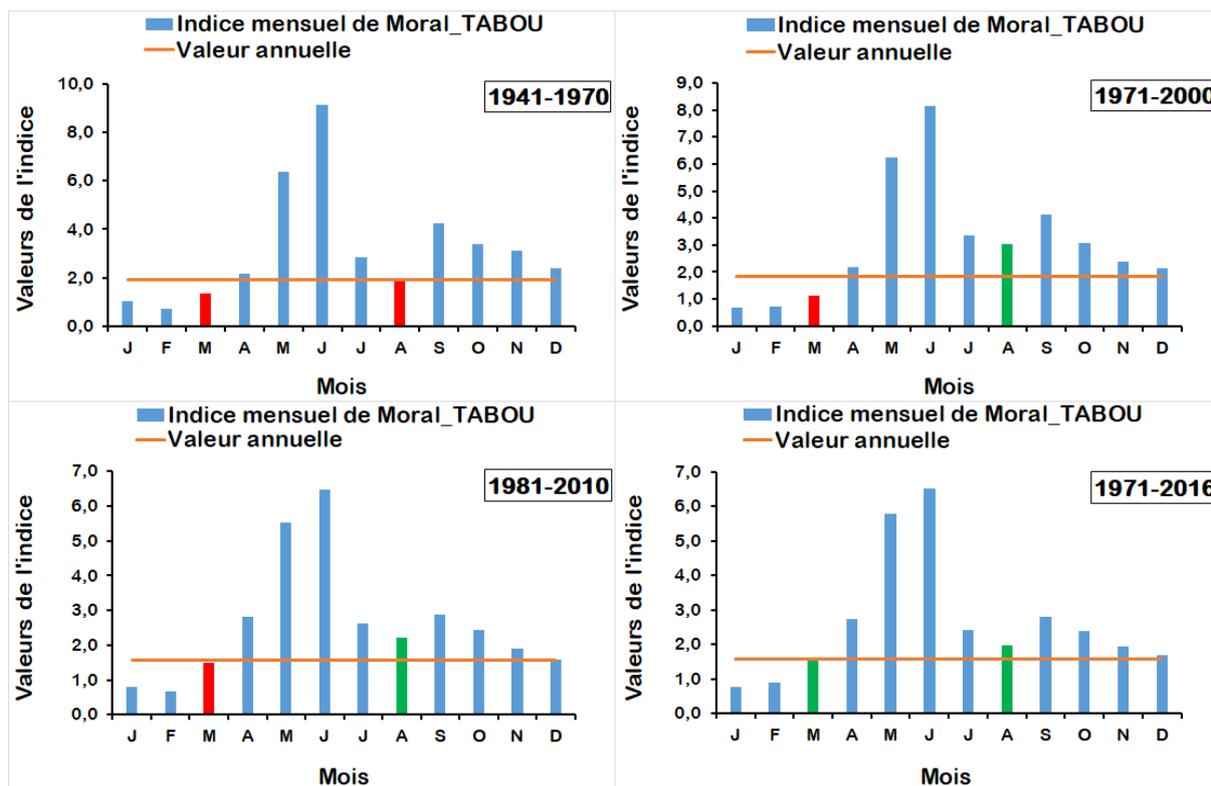


Figure 76 : Modification après 1970 du nombre de mois humides au niveau de la localité de Tabou en climat attiéen du Sud-Ouest

Les résultats obtenus à partir de l'indice de Moral montrent que certaines localités sur l'ensemble des régions climatiques du territoire ivoirien ont connu une modification de la saison humide après 1970.

6.3. DISCUSSION

Les méthodes statistiques (tendance linéaire, tests de rupture) et les indices climatiques sont concordants sur la réalité de changements importants dans l'évolution des régimes pluviométrique et thermométrique moyens, globalement entre 1941 et 2016, sur l'ensemble des régions climatiques du territoire ivoirien. Ces changements, qui s'étendent sur au moins trois décennies, se traduisent par une baisse de la pluviométrie et une hausse de la température sur la période 1961-2016. La baisse pluviométrique est accentuée au niveau des climats soudanais, attiéen du littoral et attiéen du Sud-Ouest alors que la croissance de la température semble être amplifiée sur l'ensemble des régions climatiques. La chute des pluies et la hausse des températures sont en moyenne respectivement de 103 mm/décennie et de 0,2°C/décennie sur l'ensemble des régions climatiques. Le bouleversement opéré est marqué par trois ruptures qui se situent autour des années 1970, 1980 et 2000. Ce changement s'est donc traduit par une

baisse générale des précipitations et une hausse des températures extrêmes à partir de l'année 1970 sur l'ensemble des régions climatiques. L'amenuisement des précipitations a été accentué au début de la décennie 1980. Ainsi, sur l'ensemble de la Côte d'Ivoire, la modification interannuelle de la pluviométrie sur la période 1961-2016 s'organise grossièrement entre une période humide (1961-1970) marquée par une abondance pluviométrique et des années exceptionnellement humides et une période sèche (1971-2016) caractérisée par des épisodes de sécheresses continues et sévères. Les résultats obtenus au cours de ce travail sont en accord avec les conclusions des travaux antérieurs réalisés sur les chroniques hydroclimatiques en Afrique de l'Ouest en général (Descroix *et al.*, 2015 ; Kaboré *et al.*, 2017) et en Côte d'Ivoire en particulier (Kouassi *et al.*, 2010 ; Ahoussi *et al.*, 2013 ; Fossou *et al.*, 2014a ; Kouassi *et al.*, 2017 ; Soro *et al.*, 2017) qui montrent une diminution significative des ressources en eau depuis la fin de la décennie 1960 et le début de la décennie 1970. Les déficits pluviométriques et les excédents thermométriques, qui en ont résulté en référence aux ruptures identifiées, tournent respectivement autour de 21% et 8% sur l'ensemble des régions climatiques. Ils sont, pour la pluviométrie, pratiquement de même ordre de grandeur que ceux obtenus en Afrique de l'Ouest qui sont en moyenne de 20% (Ahoussi *et al.*, 2013 ; Kaboré *et al.*, 2017). En effet, les conclusions des travaux de Kouakou *et al.* (2012) réalisés sur l'ensemble du territoire ivoirien pour des chroniques de pluie comprises globalement entre 1920 et 2000, montrent un taux de baisse pluviométrique variant de 12 à 31%. Ces auteurs montrent aussi que la hausse de la température avoisine +1°C sur la période 1960-2000 sur l'ensemble du territoire ivoirien. Les travaux de Yao *et al.* (2013), effectués dans les quatre régions agroclimatiques de la Côte d'Ivoire, ont également mis en évidence une baisse pluviométrique comprise entre 7,7 et 28,9% globalement sur la période 1940-2010 et une hausse de la température qui est en moyenne de +1,6°C sur la période 1961-2010. Cette baisse de la pluviométrie peut en effet s'expliquer par une dérégulation dans la migration saisonnière du Front Intertropical (FIT) vers le Nord. Ce déplacement du FIT est sous la dépendance du contraste thermique entre le continent et les océans (Fossou *et al.*, 2014a). Bigot *et al.* (2005) à travers leurs travaux montrent qu'une part importante de la baisse généralisée des précipitations ivoiriennes après 1970, est due à un réchauffement anormal des TSO (Températures de Surface de l'Océan) de l'Atlantique sud-ouest alors que les TSO au large des Guyanes se refroidissent. Cette relation est particulièrement significative en hiver nord hémisphérique. La baisse de la pluviométrie pourrait aussi s'expliquer par les activités humaines qui ont vraisemblablement contribué à accentuer le phénomène. Selon Brou (2005), la baisse de la pluviométrie dans le sud de la Côte d'Ivoire coïncide avec la déforestation et la mise en culture de cette région. Cette dégradation

et disparition de la forêt entraînent des modifications ou des perturbations au niveau des cycles hydrologiques (Balliet, 2018).

Cette étude met en évidence une reprise de la pluviométrie dans certaines localités situées au niveau du climat baouléen depuis la fin des années 2000, surtout durant la période 2009-2016 pour la localité de Bouaké, et 2014-2016 pour celle de Bondoukou. Cependant, les cumuls pluviométriques restent toujours inférieurs à ceux de la période humide 1961-1970. La reprise des pluies est plus prononcée à Bouaké qu'à Bondoukou. Ces résultats sont en accord avec des travaux réalisés en Afrique de l'Ouest en général (Descroix *et al.*, 2013 ; Bodian, 2014 ; Kaboré *et al.*, 2017) et en Côte d'Ivoire en particulier (N'da *et al.*, 2016 ; Kouassi *et al.*, 2017) qui montrent un retour à des conditions humides amorcées au cours des décennies 1990 et 2000. L'amélioration de la pluviométrie est due à une augmentation des événements pluvieux quotidiens de forte intensité (Frappart *et al.*, 2009 ; Ly *et al.*, 2013 ; Descroix *et al.*, 2013 ; Hangnon *et al.*, 2015 ; Bamba *et al.*, 2015 ; Kaboré *et al.*, 2017). Malgré ce retour de la période humide dans certaines localités, on note une persistance de la sécheresse dans d'autres, comme les baisses de 15,8% et 35,7% respectivement à Daloa (climat baouléen) et à Odienné (climat soudanais) sur la période 2001-2016 et la baisse de 31,1 % à Tabou (climat attiéen du Sud-Ouest) sur la période 2003-2016, révélant la forte variabilité spatiale de la pluviométrie annuelle sur l'ensemble du territoire ivoirien. Kaboré *et al.* (2017) et Kouassi *et al.* (2017) évoquent également une persistance de la sécheresse respectivement au Centre-Nord du Burkina Faso et dans le bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire globalement entre 2000 et 2015.

Le bouleversement climatique constaté a mis en évidence que le climat saisonnier et annuel, sur l'ensemble des régions climatiques en Côte d'Ivoire, a subi des modifications en passant de la période avant 1970 à la période après 1970. Les indices climatiques appliqués, qui expriment chacun un aspect différent du régime climatique, a montré que le caractère « semestre froid plus arrosé que le semestre chaud » est plus prononcé sur la période avant 1970 que sur les périodes après 1970 avec une tendance des semestres chauds à être relativement plus arrosés après 1970 dans certaines régions climatiques. La période avant 1970 enregistre les trimestres les plus pluvieux sur l'ensemble des régions climatiques étudiées. Un glissement du trimestre le plus pluvieux est constaté sur les périodes après 1970 dans certaines localités, surtout au niveau des climats baouléen, attiéen du littoral et attiéen du Sud-Ouest. Au niveau des localités d'Abidjan et Sassandra (climat attiéen du littoral) et Tabou (climat attiéen du Sud-Ouest), le trimestre le plus pluvieux est passé de Mai-Juin-Juillet (MJJ) sur la période avant 1970 au trimestre Avril-Mai-Juin (AMJ) après 1970. A Bouaké (climat baouléen), le passage s'est effectué d'Août-Septembre-Octobre (ASO) sur la période avant 1970 à Juillet-Août-Septembre (JAS) après

1970. Ainsi, certaines localités sur l'ensemble des régions climatiques du territoire ivoirien ont connu une modification de la saison humide après 1970 en termes de mois de début et de fin donc de durée. Le mois de Décembre est passé d'un mois humide avant 1970 à un mois sec après 1970 (sur toutes les périodes considérées) au niveau des localités de Gagnoa (climat baouléen) et Sassandra (climat attiéen du littoral). Les mois de Mars, Avril, Août, Septembre et Novembre sont plutôt passés de mois secs avant 1970 à des mois humides après 1970 au niveau de l'une ou l'autre des localités d'Abidjan et Sassandra (climat attiéen du littoral), Tabou (climat attiéen du Sud-Ouest), Dimbokro (climat attiéen de l'intérieur) et Odienné (climat soudanais). Ces résultats sont en accord pour le mois de Décembre et en désaccord pour les mois de Mars, Avril, Août, Septembre et Novembre avec les travaux de Servat *et al.* (1999) sur l'Afrique de l'Ouest et Centrale, de Diomandé (2011) sur le Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire et de Yao *et al.* (2012) sur le bassin versant de la Lobo (Ouest de la Côte d'Ivoire). Servat *et al.* (1999) ont montré que sur l'ensemble des pays étudiés, seuls 3 pays de l'Afrique de l'Ouest bordant le Golfe de Guinée (Côte d'Ivoire, Togo et Bénin) ont connu des modifications notables au niveau des régimes pluviométriques saisonniers sur la période après rupture (1971-1989). En effet, le déroulement des saisons des pluies semble dorénavant un peu différent de ce qui était observé précédemment (pendant la phase humide). Un raccourcissement des saisons des pluies a été constaté. Plus précisément, en Côte d'Ivoire, la seconde saison des pluies a une durée plus courte qu'auparavant. La première saison des pluies connaît la même tendance, mais de manière moins importante. Au Togo comme au Bénin, le raccourcissement de la durée touche surtout la première saison des pluies ; au Cameroun, c'est l'inverse. La comparaison des moyennes pluviométriques mensuelles des données des stations du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire sur les périodes 1951-1960 (période humide) et 2001-2008 (période sèche) effectuée par Diomandé (2011), a montré d'une façon générale, en raison de l'inégale répartition des quantités de pluie, que les mois de mars et octobre ont basculé parmi les mois secs. Cet auteur a aussi observé une accentuation du caractère unimodal qui tend à se limiter à un nombre réduit de mois humides dans l'année. Les travaux de Yao *et al.* (2012) sur le bassin versant de la Lobo (Ouest de la Côte d'Ivoire) portant sur la variation moyenne mensuelle interannuelle des précipitations avant et après rupture (1966) ont montré que la différence notable réside dans le fait que les quantités d'eau précipitées après la rupture sont relativement en baisse quelles que soient les saisons. L'observation générale montre que les mois les plus pluvieux (Septembre et Octobre) sont les plus affectés par la baisse de la pluviométrie. Les mois secs sont plus ou moins affectés par la baisse de la pluviométrie. Toutefois, le bouleversement constaté n'a pas affecté le type de climat sur l'ensemble des régions climatiques du territoire ivoirien. Il est demeuré

humide malgré la diminution du caractère humide après 1970.

CONCLUSION PARTIELLE

Sur l'ensemble des régions climatiques du territoire ivoirien, les régimes pluviométrique et thermométrique moyens ont connu d'importants changements dans leurs évolutions avec une tendance générale respectivement à la baisse et à la hausse entre 1961 et 2016. Le pays a connu une modification de son régime climatique à partir de l'année 1970. Les déficits pluviométriques et les excédents thermométriques, qui en ont résulté, tournent respectivement autour de 21% et 8% sur l'ensemble des régions climatiques. L'étude a permis de constater que la baisse pluviométrique est accentuée au niveau des climats soudanais, attiéen du littoral et attiéen du Sud-Ouest alors que la croissance de la température semble être amplifiée sur l'ensemble des régions climatiques. La fin des années 2000 et surtout la décennie 2010 marque une reprise de la pluviométrie vers des années plus humides dans certaines localités au niveau du climat baouléen. Malgré cette tendance à l'augmentation de la pluviométrie dans certaines localités, on note une persistance de la sécheresse dans d'autres, comme les baisses de 15,8% et 35,7% respectivement à Daloa (climat baouléen) et à Odienné (climat soudanais) depuis les années 2001 et la baisse de 31,1 % à Tabou (climat attiéen du Sud-Ouest) depuis l'année 2003. Le bouleversement climatique constaté a montré que le climat saisonnier et annuel sur l'ensemble des régions climatiques en Côte d'Ivoire a subi des modifications après 1970. Le caractère « semestre froid plus arrosé que le semestre chaud » est plus prononcé sur la période avant 1970 que sur les périodes après 1970 avec une tendance des semestres chauds à être relativement plus arrosés après 1970 dans certaines localités. La période avant 1970 enregistre les trimestres les plus pluvieux avec un basculement du trimestre le plus pluvieux qui est constaté sur les périodes après 1970 dans certaines localités au niveau des climats baouléen, attiéen du littoral et attiéen du Sud-Ouest. Sur l'ensemble des régions climatiques du territoire ivoirien, certaines localités ont connu une modification de la saison humide après 1970, surtout au niveau des climats soudanais, baouléen, attiéen du littoral, attiéen de l'intérieur et attiéen du Sud-Ouest. Toutefois, le bouleversement observé n'a pas affecté le type de climat sur l'ensemble des régions climatiques en Côte d'Ivoire. Il est demeuré subhumide et humide, malgré la diminution du caractère humide après 1970. Les résultats obtenus interpellent sur l'influence de ces modifications climatiques et peuvent, de ce fait, servir de base pour la prévision de la sécheresse en Côte d'Ivoire.

CHAPITRE 7 :
PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE
EN CÔTE D'IVOIRE

Dans ce chapitre, il a été question dans un premier temps de l'évaluation des taux de vulnérabilité à la sécheresse aux plans météorologique (SPI-3), agrométéorologique (SPI-6 et SPI-9) et hydrométéorologique (SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48) sur la période 1971-2016 au niveau de chacune des régions climatiques de la Côte d'Ivoire. Dans un second temps, des régressions linéaires réalisées sur la période 1971-2016, pour chaque échéance (saisonnière et décennale respectivement aux délais 1 à 7 mois et 30 ans), ont permis d'établir des modèles de prévision de l'indice SPI pour chacune des sécheresses considérées au niveau des différentes zones climatiques définies :

- Zone 1 : le climat soudanais (climat tropical de transition) au Nord;
- Zone 2 : le climat baouléen (climat équatorial de transition atténué) au Centre ;
- Zone 3 : le climat de Montagnes (Ouest);
- Zone 4 : le climat attiéen du littoral (climat équatorial de transition 1) au Sud ;
- Zone 5 : le climat attiéen de l'intérieur (climat équatorial de transition 2) au Centre-Sud ;
- Zone 6 : le climat attiéen du Sud-Ouest (climat équatorial de transition 3) au Sud-Ouest.

7.1. TAUX DE VULNÉRABILITÉ AUX SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUE, AGROMÉTÉOROLOGIQUE ET HYDROMÉTÉOROLOGIQUE

Les tableaux XXI et XXII présentent les taux des séquences sèches, normales et humides obtenues à partir des SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48 au niveau des différentes régions climatiques. Il est constaté au niveau de chacune des régions que la période 1971-2016 enregistre dans l'ensemble, quel que soit le type de SPI, des sécheresses modérées à extrêmes, à l'exception des SPI-36 et SPI-48 au niveau du climat baouléen (Zone 2) où aucune sécheresse extrême n'a été observée. Les taux extrêmement secs sont compris entre 0,0 (SPI-36 et SPI-48, climat attiéen baouléen) et 15% [SPI-36, climat attiéen du sud-ouest (Zone 6)] avec une moyenne de 4,4, 4,7 et 7% respectivement au niveau des sécheresses météorologique (SPI-3), agrométéorologique (SPI-6 et SPI-9) et hydrométéorologique (SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48) (Tableaux XXI et XXII). Concernant les séquences de sécheresse sévère (très sèche), il est observé des taux qui varient de 4,5 [SPI-3, climat attiéen du littoral (Zone 4) et SPI-6, climat attiéen de l'intérieur (Zone 5)] à 16,8% [SPI-36, climat de montagnes (Zone 3)] avec une moyenne de 7,3, 8,5 et 10% respectivement au niveau des sécheresses météorologique, agrométéorologique et hydrométéorologique. Les pourcentages de sécheresse modérée, quant à eux, varient entre 0,9 (SPI-48, climat de montagnes) et 29,3% (SPI-36, climat baouléen) avec une moyenne de 11,1% au niveau des sécheresses météorologiques et de 14% au niveau des

sécheresses agrométéorologique et hydrométéorologique. Il est aussi constaté que les taux des séquences humides (pris dans leur totalité) fluctuent entre 0,0 (SPI-24, climat attién de l'intérieur ; SPI-36 et SPI-48, climats de montagnes, attién du littoral et attién de l'intérieur) et 12,7% (SPI-24, climat attién du littoral) et restent inférieures aux taux des séquences sèches (18,7-36,2%) quel que soit la région et le type de SPI considérés. La période reste, cependant, dominée par des séquences normales qui présentent des taux qui varient entre 50,4 [SPI-36, climat soudanais (Zone 1)] et 72,8% (SPI-9, climat attién du littoral) avec une moyenne de 68,2, 66,6% et 65,2% respectivement au niveau des sécheresses météorologique, agrométéorologique et hydrométéorologique sur l'ensemble des régions climatiques (Tableaux XXI et XXII).

Tableau XXI : Taux des séquences sèches, normales et humides des sécheresses météorologique (SPI-3) et agrométéorologique (SPI-6, SPI-9) en Côte d'Ivoire (1971-2016)

	Descripteurs (%)	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
SPI-3	Extrêmement sec	4,5	3,8	6,2	2,9	4,5	4,2
	Très sec	7,8	9,1	7,1	4,5	5,6	9,6
	Modérément sec	13,9	12,5	11,1	11,2	8,5	9,4
	Proche de la normale	65,4	67,6	70,1	70,7	71,0	64,3
	Modérément humide	6,0	4,7	4,0	7,2	4,5	8,9
	Très humide	1,6	2,4	1,3	2,7	3,1	2,9
	Extrêmement humide	0,7	0,0	0,4	0,7	2,7	0,7
SPI-6	Extrêmement sec	2,9	6,3	5,6	2,9	4,7	6,0
	Très sec	10,7	11,1	7,4	5,8	4,5	8,3
	Modérément sec	16,8	12,3	15,2	13,6	12,1	13,4
	Proche de la normale	65,2	65,9	65,9	72,1	68,3	63,2
	Modérément humide	4,0	3,4	4,0	3,4	4,0	6,7
	Très humide	0,2	0,9	1,3	1,6	3,4	1,4
	Extrêmement humide	0,2	0,0	0,5	0,5	2,9	0,9
SPI-9	Extrêmement sec	3,1	9,6	4,3	2,0	3,1	6,9
	Très sec	12,0	11,6	9,8	5,3	5,8	10,0
	Modérément sec	17,8	10,5	16,3	14,5	13,8	11,4
	Proche de la normale	64,1	65,2	64,9	72,8	67,9	63,4
	Modérément humide	3,1	3,1	3,8	3,8	3,4	5,4
	Très humide	0,0	0,0	0,9	1,6	3,4	2,0
	Extrêmement humide	0,0	0,0	0,0	0,0	2,5	0,9

Tableau XXII : Taux des séquences sèches, normales et humides des sécheresses hydrométéorologiques (SPI-12, SPI-24, SPI-36, SPI-48) en Côte d'Ivoire (1971-2016)

	Descripteurs (%)	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
SPI-12	Extrêmement sec	4,3	9,4	5,3	2,2	2,5	8,9
	Très sec	10,9	15,4	8,5	5,3	6,2	9,6
	Modérément sec	18,7	7,2	15,8	16,3	16,1	10,5
	Proche de la normale	65,8	65,2	67,9	71,6	65,9	61,8
	Modérément humide	0,4	2,5	2,5	4,2	2,5	7,4
	Très humide	0,0	0,2	0,0	0,5	3,8	1,4
	Extrêmement humide	0,0	0,0	0,0	0,0	2,9	0,4
SPI-24	Extrêmement sec	12,5	7,2	0,9	4,2	6,3	13,6
	Très sec	14,3	10,7	5,1	6,3	8,5	9,8
	Modérément sec	6,9	13,8	25,5	20,3	15,6	7,8
	Proche de la normale	63,9	67,8	65,8	56,5	69,6	62,3
	Modérément humide	2,4	0,5	2,5	3,6	0,0	6,5
	Très humide	0,0	0,0	0,2	6,7	0,0	0,0
	Extrêmement humide	0,0	0,0	0,0	2,4	0,0	0,0
SPI-36	Extrêmement sec	4,2	0,0	12,5	9,1	5,8	15,0
	Très sec	8,9	6,7	16,8	7,6	8,9	12,3
	Modérément sec	23,2	29,3	1,8	12,1	16,5	2,5
	Proche de la normale	50,4	61,8	68,8	71,2	68,8	64,5
	Modérément humide	8,3	2,2	0,0	0,0	0,0	5,6
	Très humide	4,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Extrêmement humide	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SPI-48	Extrêmement sec	0,7	0,0	14,5	9,4	4,3	14,1
	Très sec	14,1	8,3	13,9	6,5	12,5	12,5
	Modérément sec	21,4	27,5	0,9	11,6	13,2	1,3
	Proche de la normale	53,8	61,6	70,7	72,5	69,9	67,2
	Modérément humide	5,6	2,5	0,0	0,0	0,0	4,9
	Très humide	3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Extrêmement humide	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Les figures 77 et 78 présentent les taux secs interannuels des sécheresses météorologique (SPI-3), agrométéorologique (SPI-6 et SPI-9) et hydrométéorologique (SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48) obtenues au niveau de chaque région climatique. Au niveau de la sécheresse météorologique, les taux secs varient de 18,7 (climats attiéen du littoral et attiéen de l'intérieur) à 26,3% (climat soudanais) avec 2/3 des régions climatiques présentant des taux supérieurs à la moyenne qui est de 22,8 % (Figure 77a). Concernant la sécheresse agrométéorologique, les

fréquences sèches interannuelles varient entre 21,4 (SPI-6, climat attiéen de l'intérieur) et 32,8% (SPI-9, climat soudanais) avec, pour chaque SPI, 2/3 des régions climatiques présentant des taux supérieurs à la moyenne qui est de 26,6 % et 27,9% respectivement au niveau des SPI-6 et SPI-9 (Figure 77b et 77c). La sécheresse hydrométéorologique, quant à elle, fait observer des taux secs qui fluctuent entre 23,7 (SPI-12, climat attiéen du littoral) et 36,2 % (SPI-36 et SPI-48, climat soudanais) avec 1/3 des régions climatiques présentant des taux supérieurs à la moyenne qui est de 31,6, 32,2 et 31,2% respectivement au niveau des SPI-24, SPI-36 et SPI-48 (Figure 78). Au niveau des SPI-12, il est observé 2/3 des régions climatiques qui montrent des fréquences sèches supérieures à la moyenne qui est de 28,8 %.

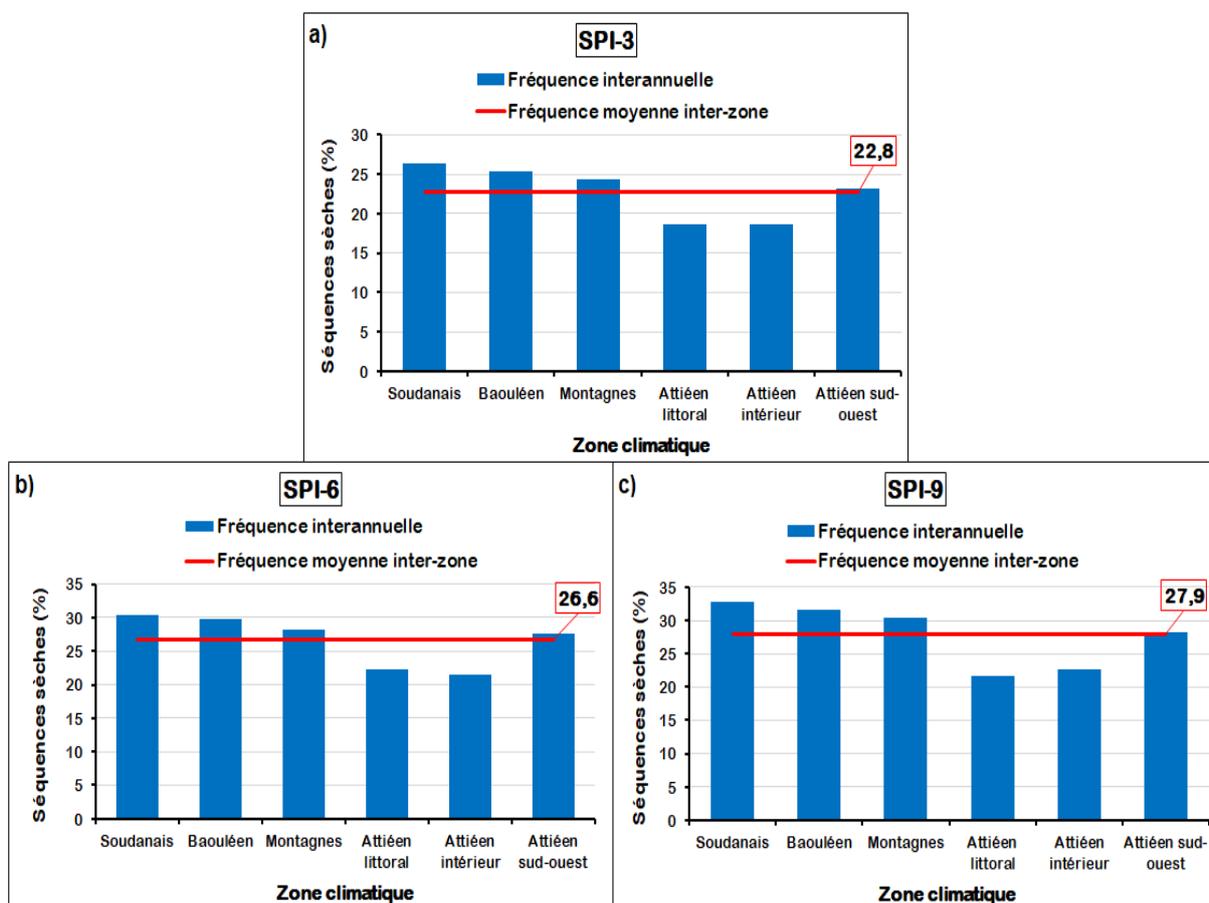


Figure 77 : Taux de vulnérabilité interannuels aux sécheresses météorologiques (SPI-3) et agrométéorologiques (SPI-6 et SPI-9) en Côte d'Ivoire (1971-2016)

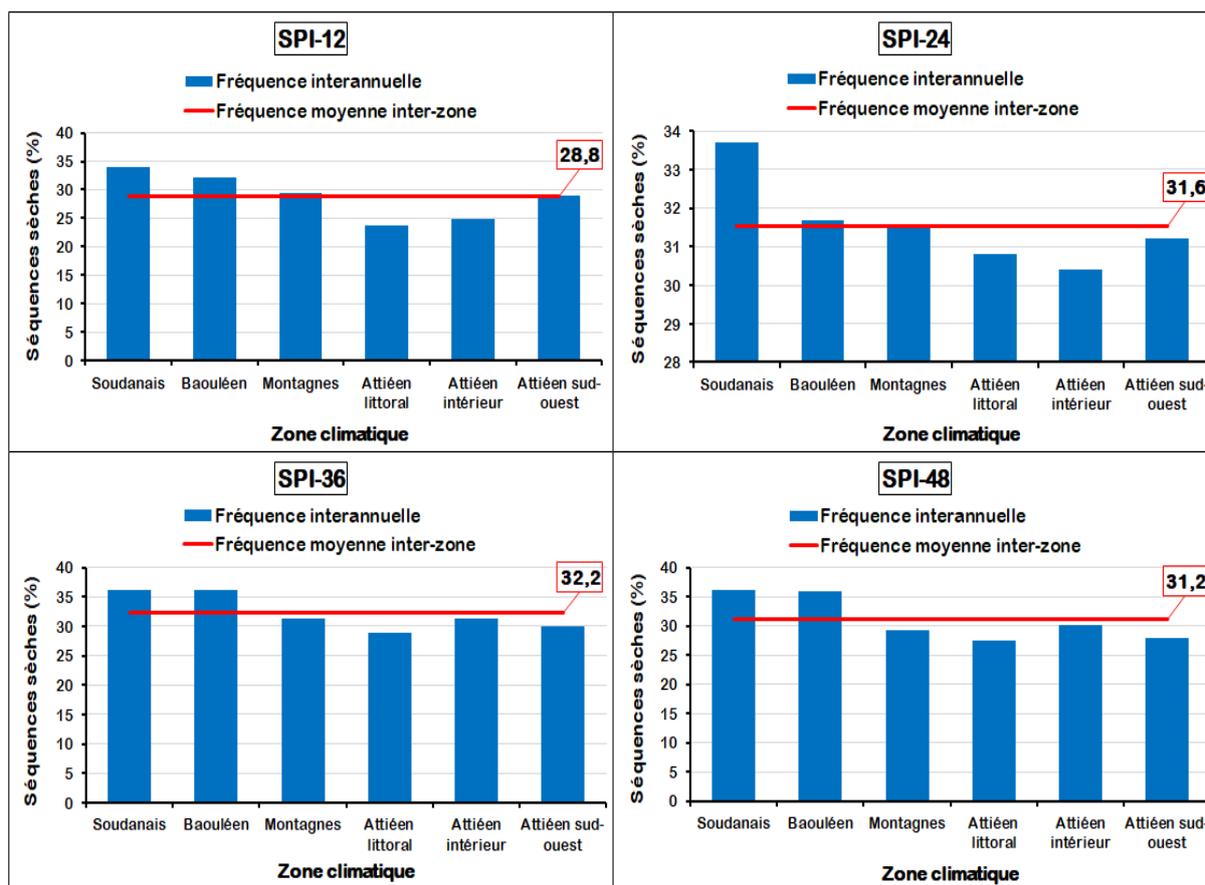


Figure 78 : Taux de vulnérabilité interannuels aux sécheresses hydrométéorologiques (SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48) en Côte d'Ivoire (1971-2016)

Ces résultats montrent ainsi que l'ensemble du territoire ivoirien est vulnérable aux sécheresses météorologique, agrométéorologique et hydrométéorologique. Cependant, les régions climatiques du Soudanais et du Baouléen restent les plus vulnérables.

7.2. PRÉVISION DES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUE ET AGROMÉTÉOROLOGIQUE

7.2.1. PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE MÉTÉOROLOGIQUE

7.2.1.1. Paramètres d'équations du modèle de prévision de la sécheresse météorologique

Le tableau XXIII présente les coefficients de régressions et les erreurs-types des régressions linéaires effectuées en calage (1971-2000) au niveau des SPI-3 aux délais 1, 2 et 3 mois. Les erreurs-types relatives aux différentes variables enregistrées au niveau des différentes régions climatiques et pour les trois délais considérés, varient de 0,036 à 0,304 avec une moyenne de

0,085 (Tableau XXIII). Les erreurs-types relatives aux constantes, quant à elles, fluctuent entre 0,050 et 0,093 avec une moyenne de 0,071. Les erreurs-types obtenues sont, globalement faibles et dans l'ordre de 10^{-2} à 10^{-1} . Ces erreurs-types sont donc relativement proches de 0. Ces résultats témoignent d'une bonne qualité des coefficients de régression des différentes variables d'entrée utilisées pour développer le modèle de prévision de la sécheresse météorologique (SPI-3), à l'échéance saisonnière et aux délais 1, 2 et 3 mois, au niveau des différentes zones climatiques de la Côte d'Ivoire.

Tableau XXIII : Paramètres d'équations du modèle développé pour la prévision des SPI-3 aux délais 1, 2 et 3 mois au niveau des différentes zones climatiques

		Délai 1 mois		Délai 2 mois		Délai 3 mois		
		Cr	Et	Cr	Et	Cr	Et	
SPI-3	Zone 1	Co	-0,402	0,088	-0,544	0,093	-0,528	0,092
		SPI _{t-3}	0,112	0,062	0,039	0,066	0,039	0,066
		SPI _{t-2}	-0,054	0,071	-0,020	0,076	0,021	0,076
		SPI _{t-1}	-0,307	0,071	-0,035	0,076	-0,023	0,076
		SPI _t	0,453	0,062	-0,024	0,067	-0,040	0,067
		P _t	0,334	0,285	0,511	0,304	0,503	0,304
	Zone 2	Co	-1,039	0,086	-1,253	0,086	-1,254	0,085
		SPI _{t-3}	0,257	0,057	0,130	0,060	-0,030	0,060
		SPI _{t-2}	0,009	0,071	0,079	0,076	0,156	0,075
		SPI _{t-1}	-0,372	0,071	0,001	0,076	0,077	0,076
		SPI _t	0,444	0,060	-0,013	0,061	-0,015	0,060
		P _t	2,176	0,195	2,620	0,198	2,617	0,198
	Zone 3	Co	-0,520	0,056	-0,634	0,056	-0,836	0,059
		SPI _{t-3}	0,104	0,036	0,083	0,037	0,166	0,041
		SPI _{t-2}	0,025	0,044	0,034	0,045	-0,046	0,051
		SPI _{t-1}	0,265	0,044	0,014	0,045	0,022	0,051
		SPI _t	0,213	0,037	0,401	0,039	0,287	0,042
		P _t	1,782	0,160	2,130	0,161	2,749	0,170
	Zone 4	Co	-0,731	0,079	-0,893	0,082	-0,916	0,082
		SPI _{t-3}	0,074	0,062	0,020	0,067	-0,067	0,067
		SPI _{t-2}	-0,042	0,078	-0,033	0,085	0,056	0,085
		SPI _{t-1}	-0,299	0,079	-0,063	0,085	-0,041	0,085
		SPI _t	0,492	0,064	0,092	0,067	-0,002	0,067
		P _t	2,213	0,247	2,685	0,258	2,727	0,258
Zone 5	Co	-0,426	0,057	-0,598	0,052	-0,681	0,060	
	SPI _{t-3}	0,553	0,036	0,444	0,036	0,126	0,041	
	SPI _{t-2}	-0,013	0,048	0,089	0,047	0,262	0,054	
	SPI _{t-1}	-0,056	0,048	-0,002	0,047	0,057	0,054	
	SPI _t	0,450	0,038	0,404	0,036	0,373	0,041	
	P _t	0,930	0,130	1,381	0,122	1,519	0,139	
Zone 6	Co	-0,417	0,056	-0,526	0,050	-0,444	0,060	
	SPI _{t-3}	0,389	0,040	0,408	0,037	0,126	0,044	
	SPI _{t-2}	0,085	0,047	0,035	0,043	0,185	0,052	
	SPI _{t-1}	0,150	0,048	0,082	0,043	0,058	0,052	
	SPI _t	0,288	0,041	0,472	0,037	0,429	0,044	
	P _t	1,765	0,156	2,084	0,139	1,873	0,165	

-Cr= Coefficients de régression -Et= Erreurs-types -Co= Constante

7.2.1.2. Performances du modèle de prévision de la sécheresse météorologique en calage

Le tableau XXIV présente les performances du modèle de prévision de la sécheresse météorologique obtenues lors des procédures de calage pour les délais de prévision 1, 2 et 3 mois au niveau des six (6) régions climatiques de la Côte d'Ivoire. L'analyse du tableau montre que le calage aux différents délais de prévision est globalement satisfaisant. À l'exception du climat baouléen (zone 2) (pour les délais 2 et 3 mois) et des climats soudanais (zone 1) et attiéen du littoral (zone 4) (pour les trois délais) où les résultats sont dans l'ensemble insatisfaisants avec un KGE < 50% et qui enregistre même parfois des valeurs négatives. Les coefficients de corrélation entre valeurs observées et valeurs prévues sont, dans l'ensemble, forts et varient entre 10,70 (délai 2 mois, climat soudanais) et 85,40% [délai 2 mois, climat attiéen de l'intérieur (zone 5)] avec une moyenne de 62,21%. Les valeurs de la RMSE sont globalement dans l'ordre de 10^{-1} donc faibles (proches de 0) et vont de 0,39 [délai 1 mois, climat de montagnes (zone 3)] à 0,82 (délais 2 et 3 mois, climat attiéen du littoral) avec une moyenne de 0,60. Le KGE, quant à lui, est dans l'ensemble supérieur à 50 % et varie entre -26,34 (délai 2 mois, climat soudanais) et 79,34% (délai 2 mois, climat attiéen de l'intérieur) avec une moyenne de 46,52%. Les résultats montrent que le modèle de régression linéaire multiple développé pour la prévision de la sécheresse météorologique a été performant en calage pour les délais 1, 2 et 3 mois de prévision au niveau de l'ensemble des régions climatiques, à l'exception des climats baouléen (au niveau des délais 2 et 3 mois), soudanais et attiéen du littoral (au niveau des trois délais définis).

Tableau XXIV : Performances du modèle de prévision de la sécheresse météorologique en calage (1971-2000)

	Délai	CRITÈRES	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
SPI-3	1	RMSE	0,75	0,66	0,39	0,76	0,43	0,47
		R (%)	37,20	65,10	82,20	59,80	84,90	77,40
		KGE (%)	11,18	50,61	74,78	43,12	78,61	68,05
	2	RMSE	0,81	0,70	0,40	0,82	0,43	0,43
		R (%)	10,70	58,50	80,70	50,10	85,40	81,30
		KGE (%)	-26,34	41,24	72,55	29,32	79,34	73,52
	3	RMSE	0,80	0,70	0,45	0,82	0,49	0,52
		R (%)	10,90	58,50	75,20	49,90	80,20	71,80
		KGE (%)	-25,95	41,28	64,92	29,08	71,91	60,07

7.2.1.3. Performances du modèle de prévision de la sécheresse météorologique en validation

Les performances du modèle de prévision de la sécheresse météorologique obtenues lors de la

validation, pour les délais de prévision 1, 2 et 3 mois, sont présentées dans le tableau XXV. Il est constaté que les opérations de validation effectuées aux différents délais de prévision sont dans l'ensemble insatisfaisants, sauf au niveau du climat attién de l'intérieur (zone 5) où les résultats sont satisfaisants pour 1, 2 et 3 mois de prévision avec un KGE>50%. Dans l'ensemble, les coefficients de corrélation sont moyens et fluctuent entre 2,60 [délai 2 mois, climat attién du littoral (zone 4)] et 88,20% [délai 1 mois, climat attién de l'intérieur (zone 5)] avec une moyenne de 47,99%. La RMSE présente globalement de faibles valeurs (de l'ordre de 10⁻¹) qui oscillent entre 0,39 (délai 1 mois, climat attién de l'intérieur) et 1,09 [délai 2 mois, climat soudanais (zone 1)] avec une moyenne de 0,72. Les valeurs du KGE restent dans l'ensemble inférieures à 50% et sont parfois négatives. Elles varient entre -713,52 (délai 3 mois, climat soudanais) et 67,66% (délai 2 mois, climat attién de l'intérieur) avec une moyenne de -89,22%. Ces résultats traduisent que pour les délais 1, 2 et 3 mois de prévision de la sécheresse météorologique, la qualité de prévision du modèle est acceptable uniquement au niveau du climat attién de l'intérieur.

Tableau XXV : Performances du modèle de prévision de la sécheresse météorologique en validation (2001-2016)

	Délai	CRITÈRES	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
SPI-3	1	RMSE	0,99	0,71	0,59	0,66	0,39	0,69
		R (%)	41,80	37,00	75,40	34,50	88,20	72,90
		KGE (%)	-547,86	18,27	42,94	17,22	65,20	41,37
	2	RMSE	1,09	0,80	0,65	0,73	0,41	0,63
		R (%)	32,30	11,20	65,10	2,60	86,80	74,50
		KGE (%)	-743,00	-6,14	34,60	-17,29	67,66	47,53
	3	RMSE	1,08	0,80	0,75	0,72	0,47	0,72
		R (%)	35,30	11,50	38,40	5,50	81,70	69,10
		KGE (%)	-713,52	-5,98	12,60	-16,66	60,26	36,87

Les résultats obtenus sont confirmés par les graphes des figures 79 et 80, qui montrent les exemples des indices SPI-3 observés et prévus sur la période 2001-2016, respectivement au niveau des climats attién de l'intérieur et attién du Sud-Ouest (zone 6). Au niveau du climat attién de l'intérieur, pour 1, 2 et 3 mois de prévision des indices SPI-3, les graphes réalisés à partir des prévisions et des observations sont de bonne qualité avec un KGE égal respectivement à 65,20, 67,66 et 60,26% (Figure 79). La dynamique des indices est assez bien reproduite par le modèle de prévision, même si des écarts relativement faibles sont par moments observés entre les deux courbes (Figure 79a, 79b et 79c). Le nuage de points présente une bonne répartition des points le long de la droite d'équation $y=x$, malgré que ceux-ci ne soient pas resserrés autour d'elle (Figure 79d, 79e et 79f). Les indices SPI-3 sont, en effet, dans leur grande

majorité soient surestimés ou soient sous-estimés par le modèle de prévision par rapport à leur position respectivement au-dessus ou en dessous de la première diagonale ($y=x$). Concernant le climat attiéen du Sud-Ouest, pour 1, 2 et 3 mois de prévision de la sécheresse météorologique, les graphes réalisés à partir des prévisions et des observations sont relativement de mauvaise qualité avec un KGE égal respectivement à 41,37, 47,53 et 36,87 (Figure 80). La dynamique des indices SPI-3 est mal reproduite par le modèle de prévision. Une surestimation ou une sous-estimation relativement importante des indices SPI-3, par le modèle de prévision, est observée sur toute la période de validation (Figure 80a, 80b et 80c). Une dispersion importante du nuage de points autour de la première diagonale ($y = x$) est observée (Figure 80d, 80e et 80f).

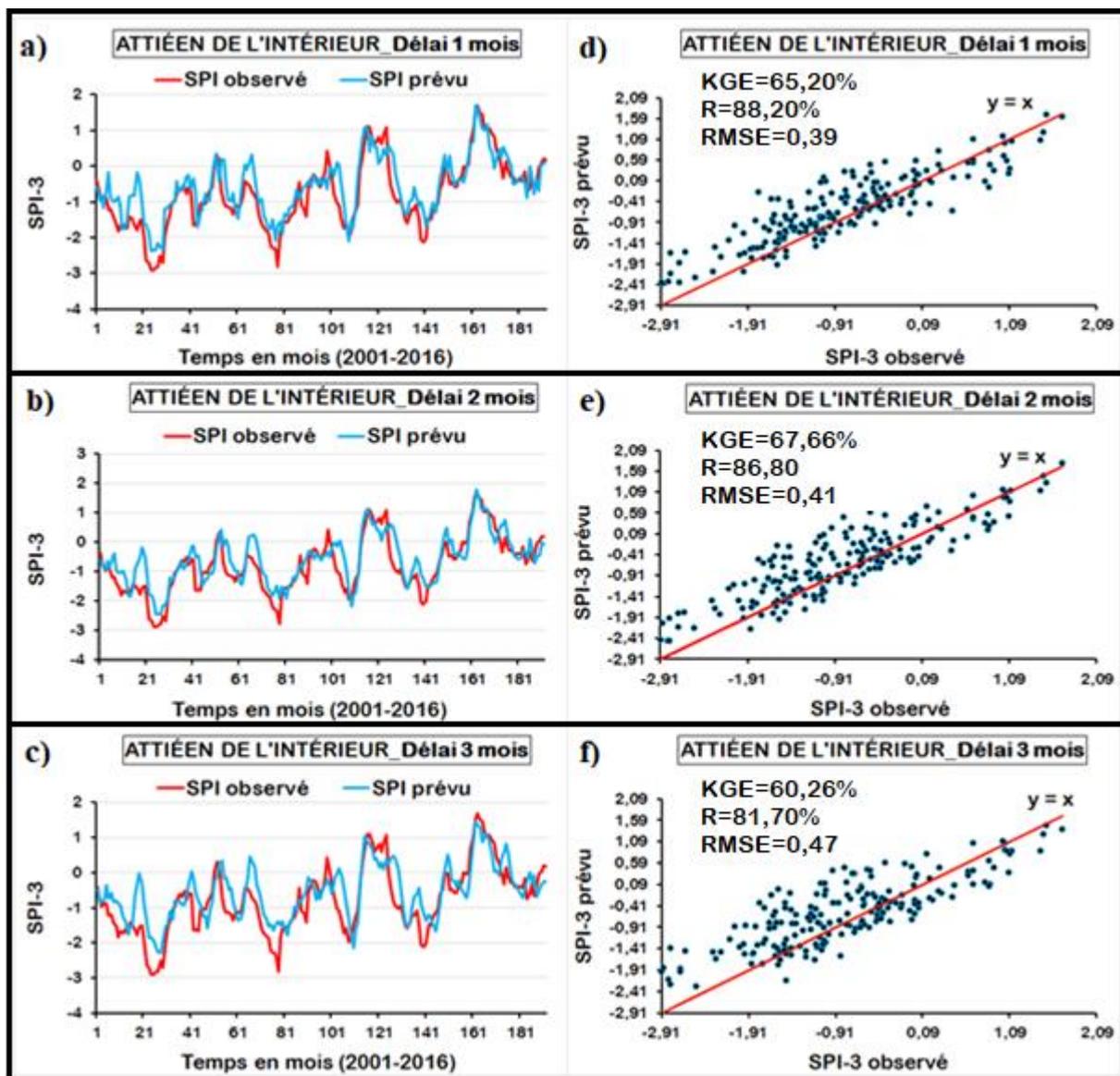


Figure 79 : Prédiction de la sécheresse météorologique (SPI-3) aux délais 1 mois (a et d), 2 mois (b et e) et 3 mois (c et f) en validation au niveau de l'attiéen de l'intérieur

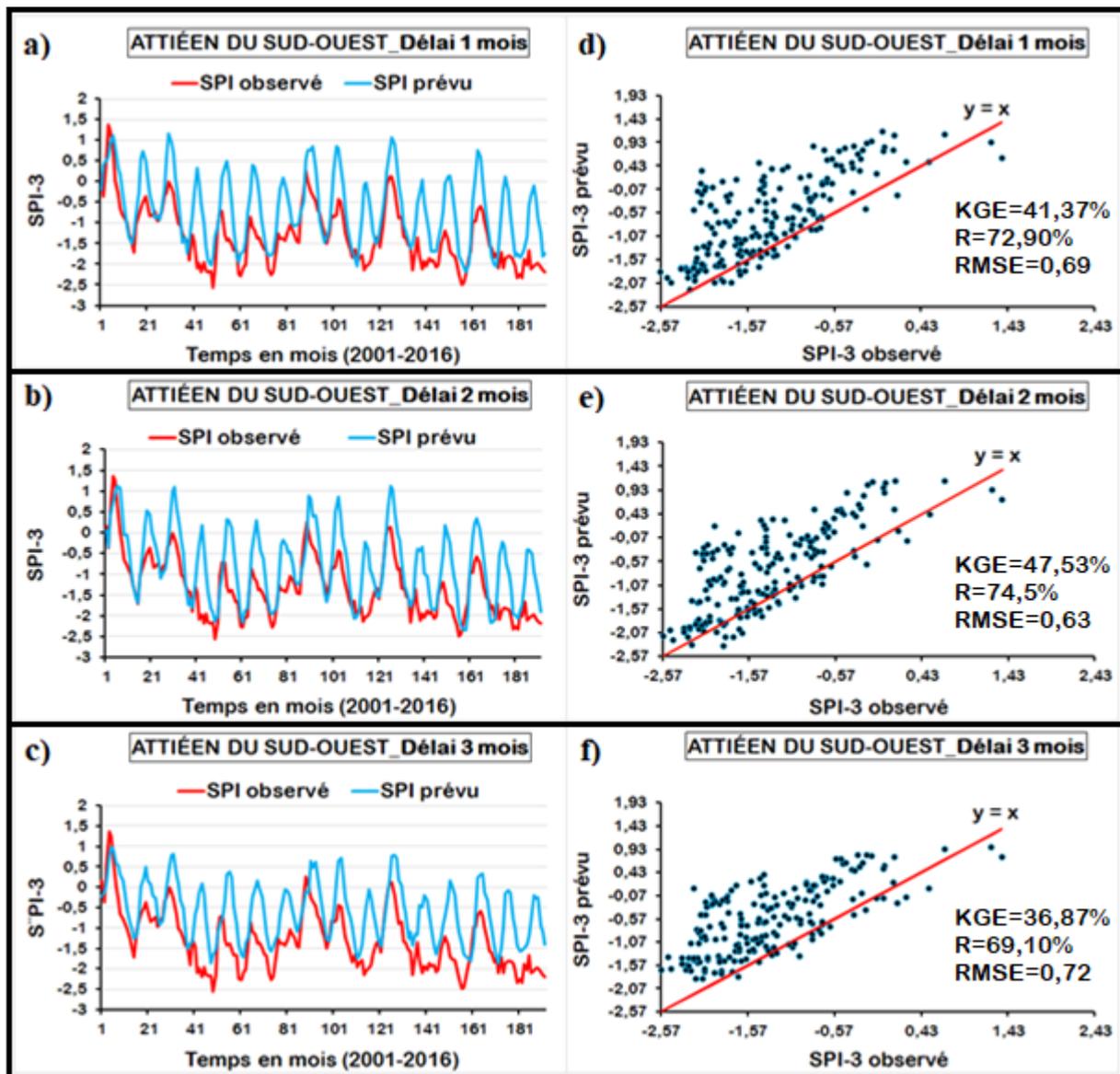


Figure 80 : Prédiction de la sécheresse météorologique (SPI-3) aux délais 1 mois (a et d), 2 mois (b et e) et 3 mois (c et f) en validation au niveau de l’attiéen du Sud-Ouest

7.2.2. PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE AGROMÉTÉOROLOGIQUE

7.2.2.1. Paramètres d’équations du modèle de prédiction de la sècheresse agrométéorologique

Les coefficients de régressions et les erreurs-types, des différentes variables d’entrée du modèle de prédiction des SPI-6 et des SPI-9 aux délais 1, 2 et 3 mois, évalués au cours du calage (1971-2000) sont présentés dans les tableaux XXVI et XXVII. Les erreurs-types relatives aux différentes variables varient de 0,05 à 0,237 avec une moyenne de 0,099 au niveau des SPI-6 (Tableau XXVI) et de 0,054 à 0,258 avec une moyenne de 0,109 au niveau des SPI-9 (Tableau

XXVII). Concernant les constantes, les erreurs-types relatives à celles-ci fluctuent entre 0,059 et 0,092 avec une moyenne de 0,074 au niveau des SPI-6 (Tableau XXVI) et entre 0,063 et 0,107 avec une moyenne de 0,086 au niveau des SPI-9 (Tableau XXVII). Les erreurs-types enregistrées sont dans l'ordre de 10^{-2} à 10^{-1} et donc globalement très faibles (très proches de 0). Il en ressort que de bons coefficients de régression ont été obtenus et pourraient permettre de prévoir la sécheresse agrométéorologique (SPI-6, SPI-9) à l'échéance saisonnière et aux délais 1, 2 et 3 mois au niveau des différentes zones climatiques de la Côte d'Ivoire.

Tableau XXVI : Paramètres d'équations du modèle développé pour la prévision des SPI-6 aux délais 1, 2 et 3 mois au niveau des différentes zones climatiques

		Délai 1 mois		Délai 2 mois		Délai 3 mois		
		Cr	Et	Cr	Et	Cr	Et	
SPI-6	Zone 1	Co	-0,303	0,080	-0,426	0,088	-0,528	0,092
		SPI _{t-3}	-0,099	0,069	-0,189	0,076	0,100	0,081
		SPI _{t-2}	-0,010	0,090	0,049	0,099	-0,281	0,105
		SPI _{t-1}	-0,017	0,090	-0,061	0,099	0,020	0,105
		SPI _t	0,636	0,069	0,513	0,076	0,366	0,081
		P _t	0,096	0,203	0,141	0,224	0,280	0,237
	Zone 2	Co	-0,870	0,070	-1,060	0,069	-1,198	0,071
		SPI _{t-3}	-0,150	0,063	-0,207	0,066	-0,026	0,070
		SPI _{t-2}	0,114	0,087	0,072	0,093	-0,174	0,099
		SPI _{t-1}	0,002	0,087	0,017	0,093	0,010	0,098
		SPI _t	0,514	0,066	0,459	0,069	0,446	0,071
		P _t	1,992	0,174	2,406	0,175	2,721	0,179
	Zone 3	Co	-0,769	0,060	-0,874	0,059	-0,933	0,059
		SPI _{t-3}	0,035	0,058	-0,043	0,060	0,043	0,060
		SPI _{t-2}	0,130	0,076	0,110	0,079	-0,061	0,081
		SPI _{t-1}	-0,003	0,076	0,086	0,079	0,087	0,081
		SPI _t	0,328	0,061	0,259	0,061	0,304	0,061
		P _t	2,451	0,175	2,786	0,171	2,975	0,169
	Zone 4	Co	-0,907	0,077	-1,127	0,081	-1,233	0,083
		SPI _{t-3}	-0,095	0,066	-0,162	0,073	-0,045	0,076
		SPI _{t-2}	0,037	0,096	0,054	0,106	-0,133	0,112
		SPI _{t-1}	-0,200	0,096	-0,136	0,106	-0,051	0,111
		SPI _t	0,634	0,069	0,427	0,074	0,304	0,077
		P _t	2,160	0,186	2,664	0,196	2,900	0,201
	Zone 5	Co	-0,460	0,063	-0,643	0,065	-0,908	0,076
		SPI _{t-3}	0,084	0,050	0,103	0,055	-0,124	0,067
		SPI _{t-2}	-0,038	0,076	-0,040	0,083	0,223	0,102
		SPI _{t-1}	0,297	0,076	-0,116	0,083	-0,259	0,101
		SPI _t	0,441	0,053	0,766	0,057	0,711	0,068
		P _t	0,982	0,147	1,402	0,152	1,963	0,180
Zone 6	Co	-1,202	0,079	-1,317	0,080	-1,375	0,082	
	SPI _{t-3}	-0,013	0,054	-0,096	0,057	-0,087	0,059	
	SPI _{t-2}	0,061	0,075	0,093	0,079	-0,004	0,082	
	SPI _{t-1}	-0,074	0,076	-0,046	0,079	0,008	0,081	
	SPI _t	0,360	0,057	0,258	0,058	0,202	0,058	
	P _t	3,281	0,189	3,619	0,190	3,796	0,193	

-Cr= Coefficients de régression -Et= Erreurs-types -Co= Constante

Tableau XXVII : Paramètres d'équations du modèle développé pour la prévision des SPI-9 aux délais 1, 2 et 3 mois au niveau des différentes zones climatiques

			Délai 1 mois		Délai 2 mois		Délai 3 mois	
			Cr	Et	Cr	Et	Cr	Et
SPI-9	Zone 1	Co	-0,433	0,090	-0,620	0,101	-0,763	0,105
		SPI _{t-3}	0,097	0,070	0,021	0,080	-0,014	0,086
		SPI _{t-2}	-0,038	0,095	0,076	0,109	0,035	0,116
		SPI _{t-1}	-0,100	0,095	-0,075	0,109	0,047	0,116
		SPI _t	0,751	0,071	0,569	0,082	0,431	0,087
		P _t	0,692	0,215	1,008	0,244	1,245	0,258
	Zone 2	Co	-1,199	0,085	-1,457	0,081	-1,567	0,077
		SPI _{t-3}	0,066	0,064	-0,034	0,068	-0,183	0,068
		SPI _{t-2}	0,144	0,095	0,150	0,101	0,189	0,102
		SPI _{t-1}	-0,210	0,096	0,001	0,101	0,011	0,102
		SPI _t	0,489	0,071	0,263	0,072	0,290	0,070
		P _t	2,712	0,198	3,296	0,191	3,526	0,182
	Zone 3	Co	-0,966	0,070	-1,114	0,066	-1,180	0,063
		SPI _{t-3}	0,113	0,060	0,009	0,062	-0,102	0,061
		SPI _{t-2}	0,153	0,084	0,150	0,087	0,136	0,087
		SPI _{t-1}	-0,077	0,084	0,088	0,087	0,078	0,088
		SPI _t	0,335	0,066	0,207	0,065	0,294	0,063
		P _t	2,708	0,185	3,121	0,173	3,310	0,165
	Zone 4	Co	-0,999	0,081	-1,246	0,084	-1,368	0,083
		SPI _{t-3}	-0,012	0,067	-0,070	0,074	-0,206	0,076
		SPI _{t-2}	0,100	0,101	0,121	0,112	0,197	0,115
		SPI _{t-1}	-0,254	0,101	-0,135	0,112	-0,086	0,115
		SPI _t	0,638	0,071	0,412	0,077	0,321	0,079
		P _t	2,418	0,195	3,010	0,203	3,292	0,200
	Zone 5	Co	-1,385	0,105	-1,791	0,107	-1,964	0,104
		SPI _{t-3}	-0,022	0,070	-0,121	0,078	-0,270	0,080
		SPI _{t-2}	0,148	0,112	0,190	0,125	0,251	0,128
		SPI _{t-1}	-0,371	0,113	-0,194	0,125	-0,119	0,128
		SPI _t	0,728	0,076	0,450	0,083	0,357	0,083
		P _t	2,913	0,229	3,757	0,235	4,092	0,230
Zone 6	Co	-1,173	0,077	-1,369	0,080	-1,465	0,080	
	SPI _{t-3}	0,045	0,054	0,015	0,059	-0,093	0,061	
	SPI _{t-2}	-0,047	0,074	0,025	0,080	0,097	0,083	
	SPI _{t-1}	-0,068	0,074	-0,071	0,080	0,005	0,083	
	SPI _t	0,464	0,058	0,311	0,062	0,192	0,063	
	P _t	2,829	0,169	3,306	0,172	3,554	0,169	
-Cr= Coefficients de régression			-Et= Erreurs-types		-Co= Constante			

7.2.2.2. Performances du modèle de prévision de la sécheresse agrométéorologique en calage

Les performances du modèle de prévision des SPI-6 et celui des SPI-9, obtenues lors des procédures de calage pour les délais 1, 2 et 3 mois au niveau des six (6) régions climatiques sont consignées dans le tableau XXVIII. Le calage aux différents délais est globalement

satisfaisant, à l'exception du climat soudanais (zone 1) au niveau du SPI-6 (pour les trois délais) et du SPI-9 (pour le délai 3 mois) où les résultats sont insatisfaisants avec un KGE<50%. Les coefficients de corrélation entre valeurs observées et valeurs prévues sont, dans l'ensemble, forts et varient de 32,70 (SPI-6_délai 3 mois, climat soudanais) à 88,40% [SPI-6_délai 1 mois, climat attien de l'intérieur (zone 5)] avec une moyenne de 75,13%. La RMSE présente des valeurs qui sont dans l'ordre de 10^{-1} donc faibles (proches de 0) et qui oscillent entre 0,32 [SPI-9_délai 1 mois, climat de montagnes (zone 3)] et 0,68 (SPI-6_délai 3 mois, climat soudanais) avec une moyenne de 0,49. Quant au KGE, dans l'ensemble, il présente des valeurs supérieures à 50 % (88,89% des valeurs) et varie entre 4,79 (SPI-6_délai 3 mois, climat soudanais) et 83,50% (SPI-6_délai 1 mois, climat attien de l'intérieur) avec une moyenne de 63,97%. Les résultats montrent que le modèle de régression linéaire multiple développé pour la prévision de la sécheresse agrométéorologique a été performant en calage pour les délais 1, 2 et 3 mois de prévision au niveau de l'ensemble des régions climatiques, à l'exception du climat soudanais au niveau du SPI-6 (pour les trois délais) et du SPI-9 (pour le délai 3 mois).

Tableau XXVIII : Performances du modèle de prévision de la sécheresse agrométéorologique en calage (1971-2000)

		CRITÈRES	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
Délai 1 mois	SPI-6	RMSE	0,58	0,48	0,43	0,57	0,38	0,52
		R (%)	58,90	78,80	77,30	76,00	88,40	78,20
		KGE (%)	41,86	70,01	67,83	65,98	83,50	69,12
	SPI-9	RMSE	0,45	0,42	0,32	0,47	0,44	0,39
		R (%)	75,40	82,40	84,60	82,10	84,50	85,20
		KGE (%)	65,16	67,33	78,05	74,64	77,99	79,08
Délai 2 mois	SPI-6	RMSE	0,64	0,51	0,45	0,64	0,42	0,54
		R (%)	45,20	75,40	75,30	69,50	86,10	75,50
		KGE (%)	22,50	65,25	65,00	56,87	80,26	65,37
	SPI-9	RMSE	0,52	0,43	0,33	0,52	0,49	0,42
		R (%)	65,80	80,60	88,30	77,50	80,20	82,20
		KGE (%)	51,62	72,54	76,33	68,19	71,91	74,87
Délai 3 mois	SPI-6	RMSE	0,68	0,54	0,46	0,66	0,51	0,55
		R (%)	32,70	71,80	73,80	66,00	78,10	74,10
		KGE (%)	4,79	60,02	62,93	51,91	69,11	63,34
	SPI-9	RMSE	0,55	0,48	0,33	0,53	0,50	0,44
		R (%)	59,60	76,50	82,90	76,00	79,00	80,90
		KGE (%)	42,78	51,68	75,81	66,04	70,35	73,05

7.2.2.3. Performances du modèle de prévision de la sécheresse agrométéorologique en validation

Le tableau XXIX présente les performances du modèle de prévision des SPI-6 et celui des SPI-9 obtenues lors de la validation aux délais de prévision 1, 2 et 3 mois. Il est observé que les performances enregistrées aux différents délais de prévision sont dans l'ensemble

insatisfaisants, à l'exception du climat attiéen de l'intérieur (zone 5) au niveau des SPI-6 et SPI-9 (pour les délais 1, 2 et 3 mois de prévision) et des climats baouléen (zone 2), de montagnes (zone 3) et attiéen du Sud-Ouest (zone 6) au niveau du SPI-9 (pour les délais 1 et 2 mois de prévision) où les résultats sont satisfaisants avec un KGE > 50%. Les coefficients de corrélation sont globalement forts et varient de 24,10 [SPI-6_délai 3 mois, climat attiéen du littoral (zone 4)] à 91,80% (SPI-6_délai 1 mois, climat attiéen de l'intérieur) avec une moyenne de 62,20%. La RMSE, quant à elle, présente globalement de faibles valeurs (de l'ordre de 10⁻¹) qui fluctuent entre 0,32 (SPI-6_délai 1 mois, climat attiéen de l'intérieur) et 1,09 [SPI-6_délai 3 mois, climat soudanais (zone 1)] avec une moyenne de 0,60. Les valeurs du KGE sont globalement inférieures à 50% (66,67% des valeurs) et sont même par moment négatives. Elles varient de -254,73 (SPI-6_délai 3 mois, climat soudanais) à 76,24% (SPI-6_délai 1 mois, climat attiéen de l'intérieur) avec une moyenne de 18,30%. Ces résultats traduisent que la qualité de prévision du modèle est acceptable au niveau du climat attiéen de l'intérieur pour les délais 1, 2 et 3 mois de prévision de la sécheresse agrométéorologique (SPI-6, SPI-9). La qualité de prévision du modèle est aussi acceptable au niveau des climats baouléen, de montagnes et attiéen du Sud-Ouest pour un délai de prévision de 2 mois maximum de la sécheresse agrométéorologique (SPI-9).

Tableau XXIX : Performances du modèle de prévision de la sécheresse agrométéorologique en validation (2001-2016)

		CRITÈRES	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
Délai 1 mois	SPI-6	RMSE	0,96	0,55	0,65	0,49	0,32	0,59
		R (%)	57,70	62,00	46,80	53,90	91,80	65,20
		KGE (%)	-127,41	49,31	27,38	40,38	76,24	45,33
	SPI-9	RMSE	0,70	0,42	0,42	0,43	0,35	0,38
		R (%)	77,50	78,40	74,20	56,50	88,90	83,60
		KGE (%)	9,65	53,43	55,85	48,68	75,99	65,43
Délai 2 mois	SPI-6	RMSE	1,03	0,64	0,72	0,57	0,36	0,67
		R (%)	52,60	48,00	32,20	35,70	89,20	58,30
		KGE (%)	-210,19	35,72	14,01	20,79	73,34	33,23
	SPI-9	RMSE	0,81	0,42	0,46	0,48	0,41	0,46
		R (%)	69,60	69,70	68,00	43,90	84,70	81,10
		KGE (%)	-25,56	59,05	50,11	33,78	68,74	52,51
Délai 3 mois	SPI-6	RMSE	1,09	0,68	0,75	0,61	0,45	0,70
		R (%)	46,30	38,10	24,20	24,10	82,20	56,30
		KGE (%)	-254,73	24,40	5,24	7,22	62,71	25,14
	SPI-9	RMSE	0,86	0,57	0,49	0,48	0,45	0,50
		R (%)	66,10	63,70	65,00	42,40	82,20	80,40
		KGE (%)	-52,70	29,01	46,8	29,21	63,16	45,97

Les résultats obtenus sont confirmés par les graphes des figures 81, 82 et 83 qui montrent les exemples des indices SPI-6 et SPI-9 observés et prévus, aux délais 1 et 2 mois au niveau du climat attiéen de l'intérieur et au délai 3 mois de prévision au niveau du climat attiéen du Sud-

Ouest, sur la période 2001-2016.

Concernant le climat attiéen de l'intérieur, les graphes réalisés à partir des prévisions et des observations, pour les indices SPI-6 et SPI-9, au niveau des délais 1 et 2 mois de prévision sont de bonne qualité (Figures 81 et 82). Le KGE est égal à 76,24 et 75,99% respectivement au niveau des SPI-6 et SPI-9 pour le délai 1 mois, et égal à 73,34 et 68,74% respectivement au niveau des SPI-6 et SPI-9 pour le délai 2 mois de prévision. La dynamique des indices SPI-6 et SPI-9 est bien reproduite dans ces cas. Cependant, des écarts relativement réduits sont par moments observés entre les deux courbes (Figures 81a, 81b et 82a, 82b). Le nuage de points montre que les points sont dans l'ensemble sensiblement bien répartis le long de la première diagonale ($y=x$) (Figures 81c, 81d et 82c, 82d).

Pour le climat attiéen du Sud-Ouest, les graphes réalisés à partir des prévisions et des observations, pour les indices SPI-6 et SPI-9, au niveau du délai 3 mois de prévision sont de mauvaise qualité (Figure 83). Le KGE est égal à 25,14 et 45,97% respectivement au niveau des SPI-6 et SPI-9. L'évolution des indices SPI-6 et SPI-9 est mal reproduite par le modèle de prévision (Figure 83a et 83b). Une dispersion importante du nuage de points autour de la première diagonale ($y = x$) est observée (Figure 83c et 83d). Les indices observés sont largement surestimés ou sous-estimés par le modèle.

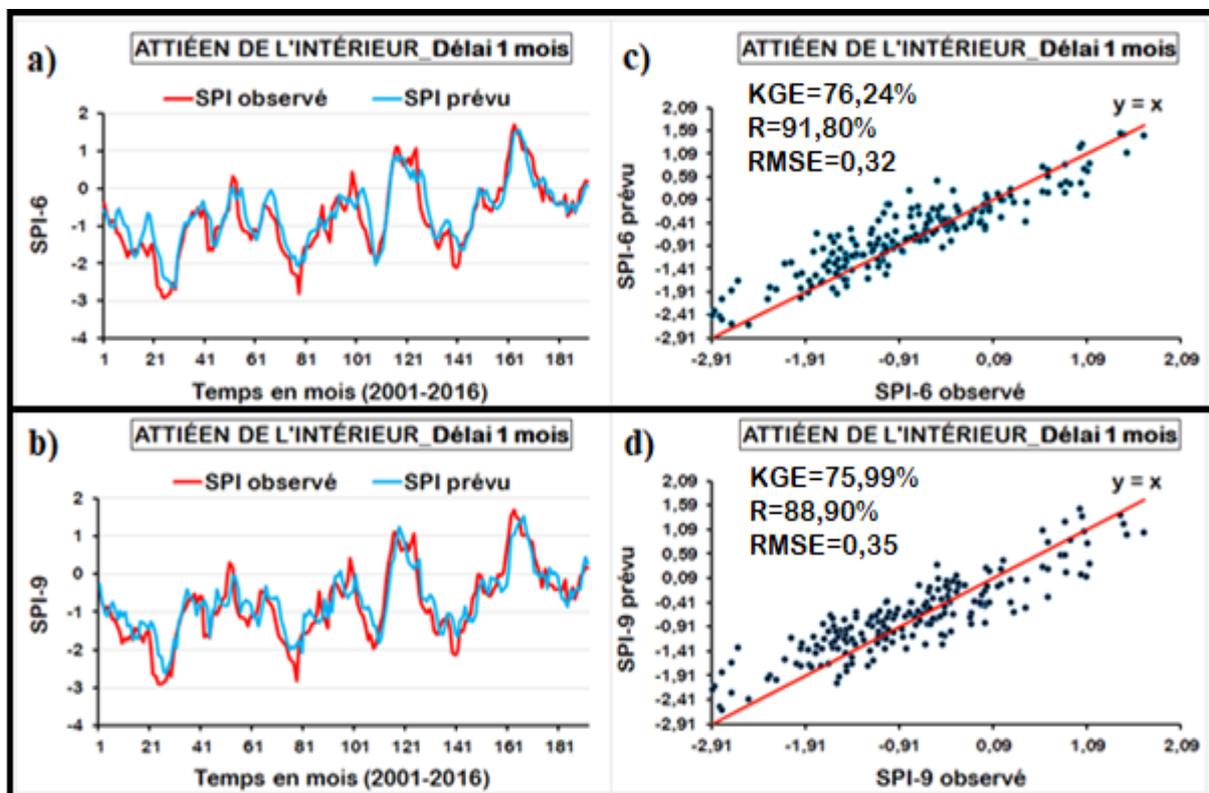


Figure 81 : Prévion de la sécheresse agrométéorologique SPI-6 (a et c) et SPI-9 (b et d) au délai 1 mois en validation au niveau de l'attiéen de l'intérieur

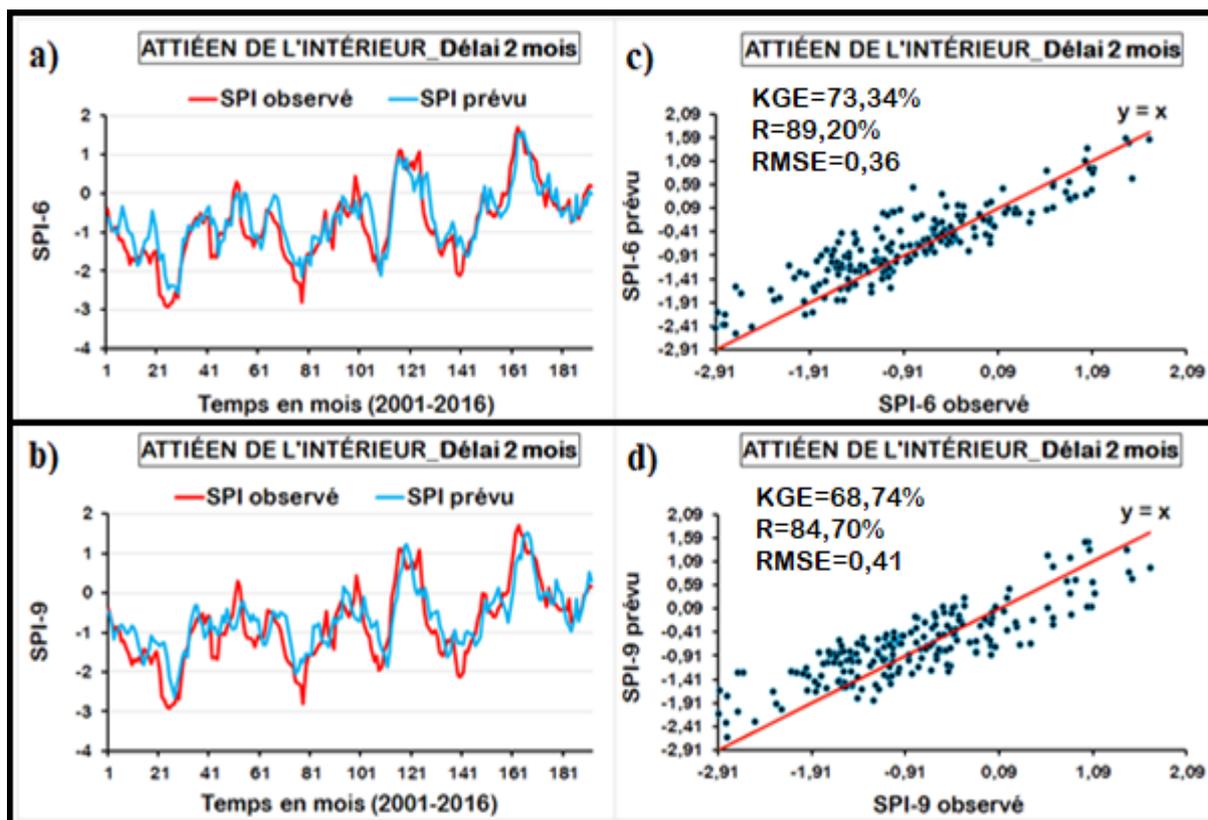


Figure 82 : Prédiction de la sécheresse agrométéorologique SPI-6 (a et c) et SPI-9 (b et d) au délai 2 mois en validation au niveau de l'attiéen de l'intérieur

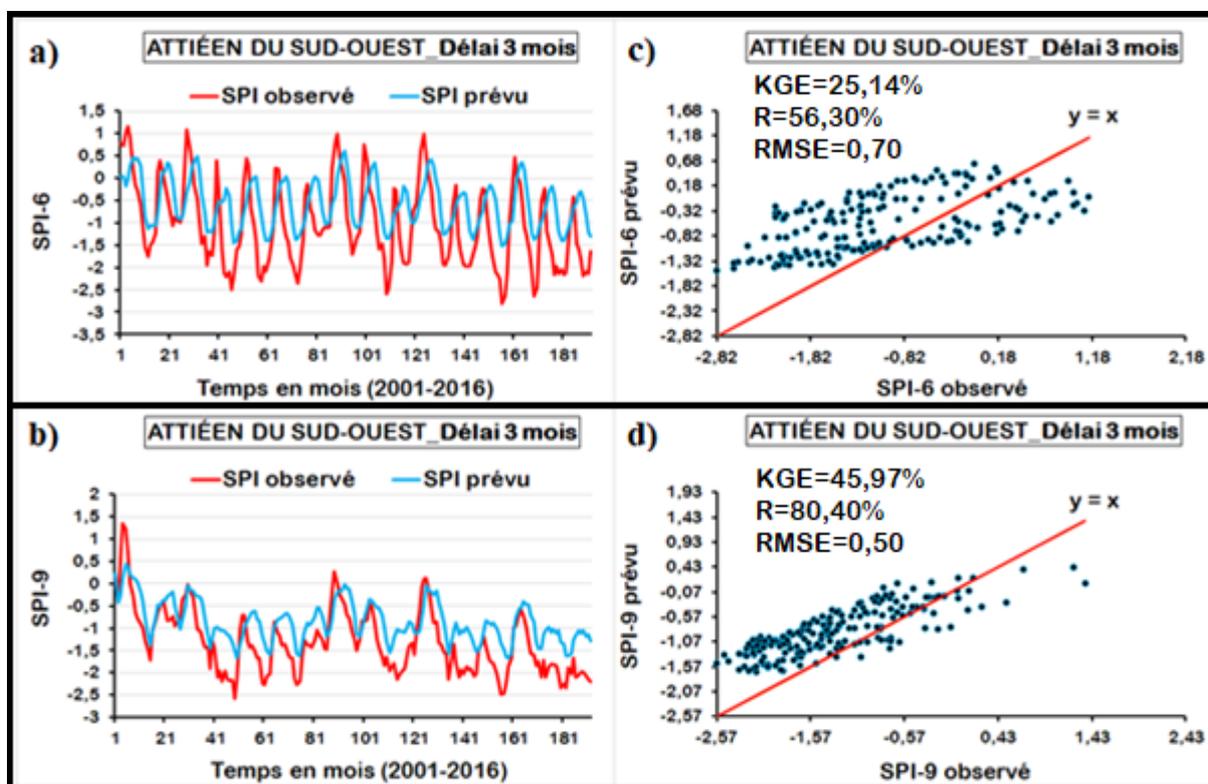


Figure 83 : Prédiction de la sécheresse agrométéorologique SPI-6 (a et c) et SPI-9 (b et d) au délai 3 mois en validation au niveau de l'attiéen du Sud-Ouest

7.2.3. ROBUSTESSE DES MODÈLES DE PRÉVISION DES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUE ET AGROMÉTÉOROLOGIQUE

Les dégradations (ou augmentations) enregistrées par le critère de KGE en validation vis-à-vis du calage, et qui définissent le critère de robustesse du modèle de prévision des sécheresses météorologiques et agrométéorologiques sont, au niveau des délais 1, 2 et 3 mois, présentées dans le tableau XXX. Les valeurs du critère de robustesse pour le climat soudanais (zone 1) varient entre -716,66 (SPI-3, délai 2 mois) et -55,51% (SPI-9, délai 1 mois) avec une moyenne de -316,99%. Pour le climat baouléen (zone 2), le critère oscille entre -47,38 (SPI-3, délai 2 mois) et -13,49% (SPI-9, délai 2 mois) avec une moyenne de -29,21%. Au niveau du climat de montagnes (zone 3), les pertes enregistrées fluctuent entre -57,69 (SPI-6, délai 3 mois) et -22,20% (SPI-9, délai 1 mois) avec une moyenne de -38,74%. Le climat attiéen du littoral (zone 4) fait observer des dégradations qui vont de -46,61 (SPI-3, délai 2 mois) à -25,60% (SPI-6, délai 1 mois) avec une moyenne de -35,76%. Concernant le climat attiéen de l'intérieur (zone 5), le critère de robustesse varie de -13,41 (SPI-3, délai 1 mois) à -2% (SPI-9, délai 1 mois) avec une moyenne de -7,74%. Le climat attiéen du Sud-Ouest (zone 6), quant à lui, enregistre un critère de robustesse qui fluctue entre -38,20 (SPI-6, délai 3 mois) et -13,65% (SPI-9, délai 1 mois) avec une moyenne de -25,90%.

Le critère de robustesse a obtenu des valeurs inférieures à -10% (supérieures à 10% prises en valeurs absolues), sur l'ensemble des délais de prévision et des régions climatiques, à l'exception du climat attiéen de l'intérieur au niveau du SPI-6 et du SPI-9 quel que soit le délai considéré. Cependant, les écarts constatés par référence aux performances obtenues en validation sont négligeables pour le modèle de prévision au niveau du SPI-9 pour les délais 1 et 2 mois de prévision au niveau des climats baouléen, de montagnes et attiéen du sud-ouest. Ces écarts de performance sont aussi négligeables pour le modèle de prévision au niveau du SPI-3 pour les délais 1, 2 et 3 mois de prévision au niveau du climat attiéen de l'intérieur. Le modèle est donc robuste et possède de ce fait une précision suffisante pour la prévision des sécheresses météorologiques et agrométéorologiques pour un délai de prévision de 1, 2, et 3 mois au niveau du climat attiéen de l'intérieur, et pour un délai de prévision de 1 et 2 mois au niveau du SPI-9 uniquement concernant les climats baouléen, de montagnes et attiéen du Sud-Ouest.

Tableau XXX : Robustesse des modèles de prévision des sécheresses météorologiques et agrométéorologiques

	Délai (mois)	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
SPI-3	1	-559,04	-32,34	-31,84	-25,90	-13,41	-26,68
	2	-716,66	-47,38	-37,95	-46,61	-11,68	-25,99
	3	-687,57	-47,26	-52,32	-45,74	-11,65	-23,20
SPI-6	1	-169,27	-20,70	-40,45	-25,60	-7,26	-23,79
	2	-232,69	-29,53	-50,99	-36,08	-6,92	-32,14
	3	-259,52	-35,62	-57,69	-44,69	-6,40	-38,20
SPI-9	1	-55,51	-13,90	-22,20	-25,96	-2	-13,65
	2	-77,18	-13,49	-26,22	-34,41	-3,17	-22,36
	3	-95,48	-22,67	-29,01	-36,83	-7,19	-27,08
	Moyenne	-316,99	-29,21	-38,74	-35,76	-7,74	-25,90

7.2.4. PRÉVISION DES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUE ET AGROMÉTÉOROLOGIQUE AU-DELÀ DE 3 MOIS

Cet aspect a été effectué uniquement au niveau du climat attiéen de l'intérieur qui présente encore de bonnes performances au délai de prévision 3 mois.

Les coefficients de régressions et les erreurs-types, des différentes variables d'entrée du modèle de prévision des SPI-3, SPI-6 et SPI-9 aux délais 4, 5, 6 et 7 (SPI-9 uniquement) mois, évalués au cours du calage (1971-2000) sont présentés dans le tableau XXXI. Les erreurs-types relatives aux variables obtenues sont dans l'ordre de 10^{-2} à 10^{-1} et varient de 0,046 à 0,231 avec une moyenne de 0,117. Concernant les constantes, les erreurs-types relatives à celles-ci fluctuent entre 0,066 et 0,102 avec une moyenne de 0,091. Les erreurs-types enregistrées sont globalement faibles (proches de 0). Il en ressort que de bons coefficients de régression ont été obtenus et pourraient permettre de prévoir les sécheresses météorologiques (SPI-3) et agrométéorologiques (SPI-6 et SPI-9) à l'échéance saisonnière et aux délais 4, 5, 6 et 7 (SPI-9 uniquement) mois au niveau du climat attiéen de l'intérieur.

Tableau XXXI: Paramètres d'équation du modèle développé pour la prévision des SPI-3, SPI-6 et SPI-9 aux délais 4, 5, 6 et 7 mois au niveau du climat attiéen de l'intérieur

			Délai 4 mois		Délai 5 mois		Délai 6 mois		Délai 7 mois	
			Cr	Et	Cr	Et	Cr	Et	Cr	--Et
Attiéen de l'intérieur	SPI-3	Co	-0,720	0,066	-0,726	0,072	-0,735	0,084	-	-
		SPI _{t-3}	0,032	0,046	-0,002	0,050	0,102	0,058	-	-
		SPI _{t-2}	0,033	0,060	-0,035	0,066	-0,191	0,076	-	-
		SPI _{t-1}	0,217	0,060	-0,017	0,066	-0,094	0,076	-	-
		SPI _t	0,388	0,046	0,554	0,050	0,485	0,058	-	-
		P _t	1,522	0,155	1,424	0,169	1,316	0,195	-	-
	SPI-6	Co	-1,119	0,083	-1,256	0,085	-1,292	0,091	-	-
		SPI _{t-3}	-0,301	0,075	-0,324	0,077	-0,028	0,083	-	-
		SPI _{t-2}	0,181	0,114	0,043	0,118	-0,323	0,126	-	-
		SPI _{t-1}	-0,020	0,114	-0,039	0,118	-0,113	0,126	-	-
		SPI _t	0,514	0,076	0,551	0,078	0,592	0,083	-	-
		P _t	2,376	0,197	2,622	0,202	2,639	0,216	-	-
	SPI-9	Co	-2,047	0,100	-2,112	0,100	-2,201	0,101	-2,286	0,102
		SPI _{t-3}	-0,345	0,081	-0,234	0,082	0,038	0,083	-0,005	0,086
		SPI _{t-2}	0,192	0,128	-0,022	0,129	-0,243	0,133	0,075	0,137
		SPI _{t-1}	-0,061	0,128	-0,068	0,129	-0,173	0,133	-0,409	0,138
		SPI _t	0,344	0,082	0,380	0,082	0,391	0,085	0,303	0,087
		P _t	4,222	0,224	4,324	0,224	4,501	0,227	4,667	0,231

-Cr= Coefficients de régression -Et= Erreurs-types -Co= Constante

Les performances du modèle de prévision des SPI-3, SPI-6 et SPI-9, obtenues lors des procédures de calage et validation pour les délais allant de 4 à 7 mois au niveau du climat attiéen de l'intérieur sont consignées dans le tableau XXXII.

Le calage aux différents délais est globalement satisfaisant, à l'exception du délai 6 mois au niveau des SPI-3 et SPI-6 où les résultats sont dans l'ensemble insatisfaisants avec un $KGE < 50\%$. Les coefficients de corrélation entre valeurs observées et valeurs prévues sont forts et varient de 54,20 (SPI-3, délai 6 mois) à 79,00% (SPI-9, délai 4 mois) avec une moyenne de 71,82%. La RMSE affiche des valeurs qui sont dans l'ordre de 10^{-1} donc faibles (proches de 0) et qui oscillent entre 0,50 (SPI-9, délai 4 mois) et 0,69 (SPI-3, délai 6 mois) avec une moyenne de 0,57. Quant au KGE, dans l'ensemble, il présente des valeurs supérieures à 50 % et varie entre 35,23 (SPI-3, délai 6 mois) et 70,30% (SPI-9, délai 4 mois) avec une moyenne de 60,12%. Les résultats montrent que le modèle de régression linéaire multiple développé a été globalement performant en calage pour les délais définis au niveau du climat attiéen de l'intérieur, à l'exception du délai 6 mois au niveau des SPI-3 et SPI-6.

En phase de validation, les performances du modèle se dégradent dans l'ensemble. Le KGE reste même inférieur à 50% pour les délais 5 et 6 mois au niveau des SPI-3 et SPI-6 et pour le délai 7 mois au niveau du SPI-9. Les coefficients de corrélation sont forts et vont de 63,80 (SPI-

6, délai 6 mois) à 80,30% (SPI-9, délai 4 mois) avec une moyenne de 73,65%. Les valeurs de la RMSE sont faibles (de l'ordre de 10^{-1}) et fluctuent entre 0,47 (SPI-9, délai 4 mois) et 0,66 (SPI-3, délai 6 mois) avec une moyenne de 0,55. Quant aux valeurs du KGE, elles varient de 19,73 (SPI-3, délai 6 mois) à 58,09% (SPI-9, délai 4 mois) avec une moyenne de 43,45%. Ces résultats montrent que la qualité de prévision du modèle est acceptable au niveau du climat attién de l'intérieur pour un délai de prévision de 4 mois maximum des SPI-3 et SPI-6, et pour un délai de prévision de 6 mois maximum des SPI-9.

Dans la zone climatique définie par le climat attién de l'intérieur, la sécheresse météorologique peut donc être efficacement prévue jusqu'à un délai de quatre (4) mois. Quant à la sécheresse agrométéorologique, elle peut être prévue jusqu'à un délai de six (6) mois.

Tableau XXXII : Performances des modèles de prévision des sécheresses météorologique et agrométéorologique au-delà de 3 mois en climat attién de l'intérieur

	Délai	CRITÈRES	Calage			Validation		
			SPI-3	SPI-6	SPI-9	SPI-3	SPI-6	SPI-9
Attiéen de l'intérieur	4	RMSE	0,54	0,57	0,50	0,52	0,53	0,47
		R (%)	74,90	71,60	79,00	77,10	74,80	80,30
		KGE (%)	64,36	59,84	70,30	50,38	50,78	58,09
	5	RMSE	0,60	0,59	0,51	0,64	0,57	0,49
		R (%)	68,60	69,00	78,40	68,60	69,00	78,60
		KGE (%)	55,63	56,06	69,43	22,30	41,63	53,66
	6	RMSE	0,69	0,64	0,52	0,66	0,63	0,51
		R (%)	54,20	63,30	76,90	64,10	63,80	77,70
		KGE (%)	35,23	48,08	67,34	19,73	31,34	50,73
	7	RMSE	-	-	0,54	-	-	0,53
		R (%)	-	-	75,30	-	-	76,60
		KGE (%)	-	-	65,07	-	-	47,57

Les résultats obtenus sont confirmés par les graphes présentés par les figures 84 et 85 qui montrent les exemples des indices SPI-3 et SPI-6 observés et prévus au délai 4 mois, et des indices SPI-9 observés et prévus aux délais 4 et 6 mois sur la période 2001-2016. Les graphes réalisés à partir des prévisions et des observations, dans ces cas, sont de bonne qualité. Le KGE est égal à 50,38 et 50,78% respectivement au niveau des SPI-3 et SPI-6, et égal à 58,09 et 50,73% respectivement au niveau des SPI-9 (délai 4 mois) et SPI-9 (délai 6 mois). La dynamique des indices observés, dans ces différents cas, est bien reproduite par le modèle (Figures 84a, 84b et 85a et 85b). Le nuage de points semble, dans ces différents cas, bien épouser la direction de la droite d'équation $y=x$ (Figure 84c, 84d et 85c, 85d).

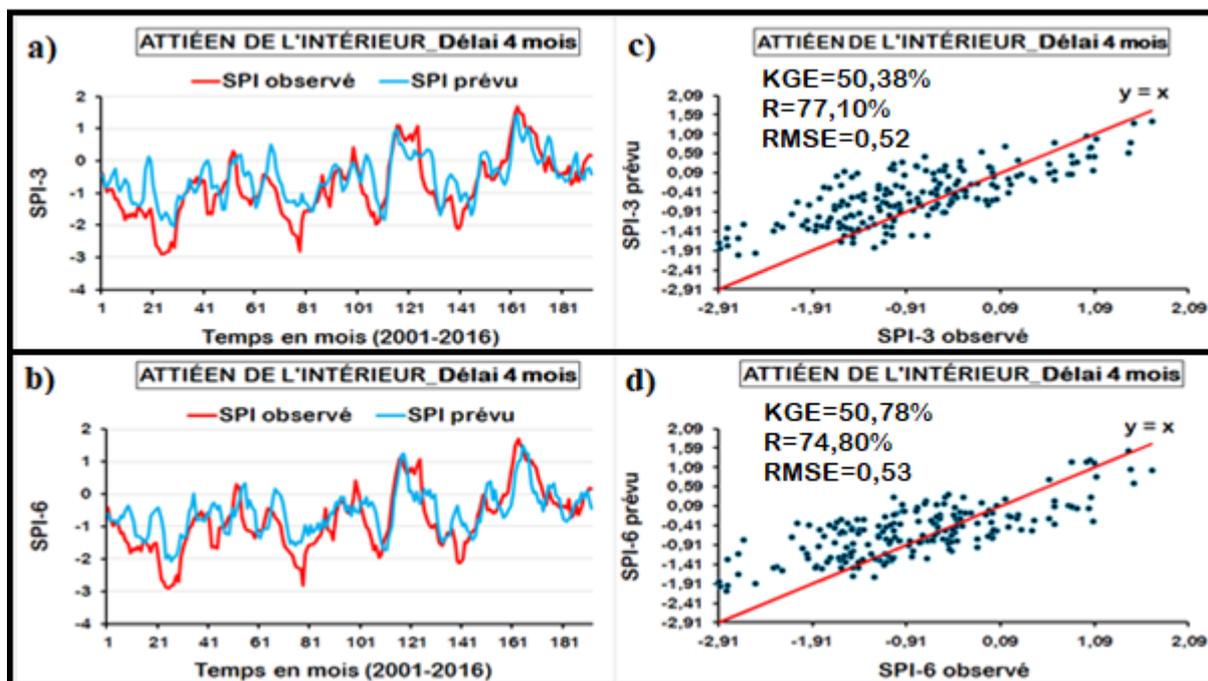


Figure 84 : Prédiction des sécheresses météorologique SPI-3 (a et c) et agrométéorologique SPI-6 (b et d) au délai 4 mois en validation au niveau de l'attiéen de l'intérieur

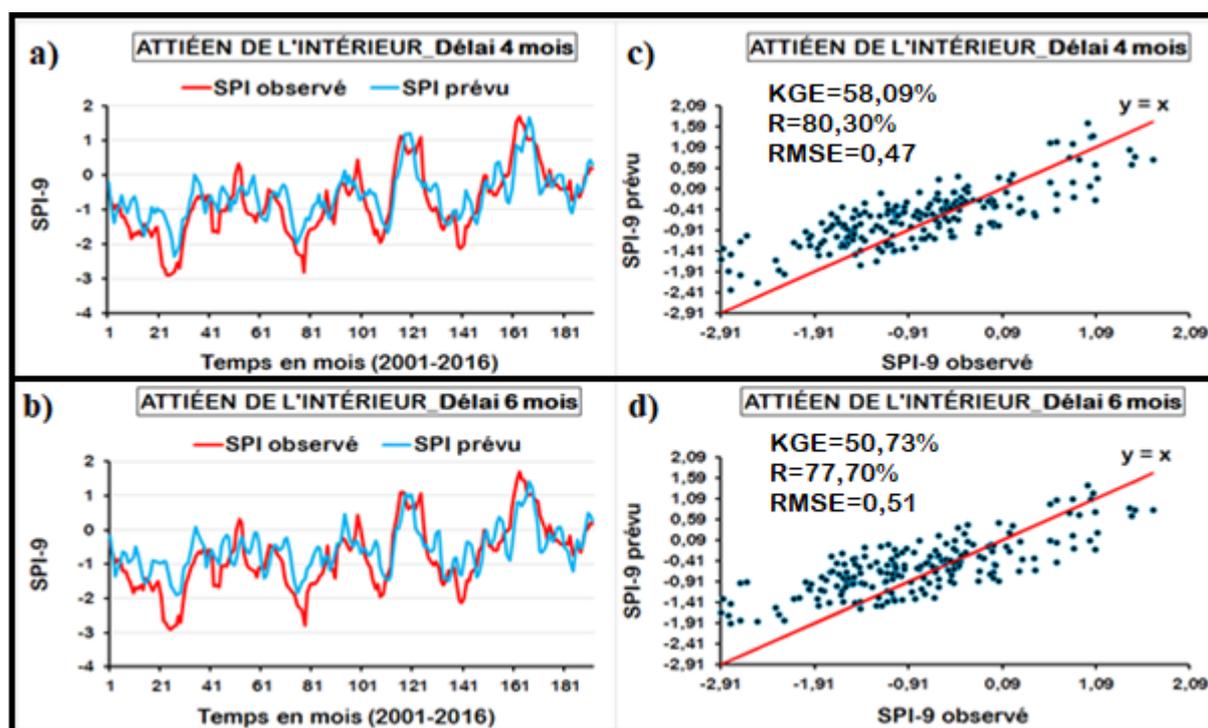


Figure 85 : Prédiction de la sécheresse agrométéorologique (SPI-9) aux délais 4 mois (a et c) et 6 mois (b et d) en validation au niveau de l'attiéen de l'intérieur

Les valeurs du critère de robustesse, obtenues au niveau des SPI-3, SPI-6 et SPI-9 pour les délais de prévision 4, 5, 6 et 7 mois en climat attiéen de l'intérieur, sont présentées dans le tableau XXXIII. Ces valeurs sont comprises entre -33,33 (SPI-3, délai 5 mois) et -9,06% (SPI-

6, délai 4 mois) avec une moyenne de -16,68%. Les valeurs du critère de robustesse restent dans l'ensemble inférieures à -10%, sauf au niveau du SPI-6 pour le délai 4 mois. Cependant, les pertes de performance inférieures à -10% sont négligeables pour le modèle, par rapport aux performances obtenues en validation, au niveau des SPI-3 et SPI-9 (délai 4 mois) et au niveau du SPI-9 (délai 5 et 6 mois). Ces résultats montrent que le modèle est robuste et possède donc une précision suffisante pour la prévision des sécheresses météorologiques (SPI-3) et agrométéorologiques (SPI-6) pour un délai de prévision de 4 mois, et des sécheresses agrométéorologiques (SPI-9) pour des délais de prévision de 4, 5 et 6 mois en climat attiéen de l'intérieur.

Tableau XXXIII : Robustesse des modèles de prévision des sécheresses météorologique et agrométéorologique au-delà de 3 mois en climat attiéen de l'intérieur

	Délai	SPI-3	SPI-6	SPI-9	Moyenne
Attiéen de l'intérieur	4	-13,98	-9,06	-12,21	-11,75
	5	-33,33	-14,43	-15,77	-21,18
	6	-15,50	-16,74	-16,61	-16,28
	7	-	-	-17,50	-17,50
				Moyenne	-16,68

7.3. PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE

7.3.1. PARAMÈTRES D'ÉQUATIONS DU MODÈLE DE PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE HYROMÉTÉOROLOGIQUE

Les tableaux XXXIV et XXXV présentent les coefficients de régressions et les erreurs-types des régressions linéaires effectuées en calage (1971-2000) respectivement au délai 1 mois et au délai 30 ans. Les erreurs-types relatives aux différentes variables enregistrées au niveau des différentes régions climatiques, varient de 0,007 à 0,071 avec une moyenne de 0,020 pour le délai 1 mois (Tableau XXXIV) et de 0,007 à 0,035 avec une moyenne de 0,014 pour le délai 30 ans (Tableau XXXV). Les erreurs-types relatives aux constantes, quant à elles, fluctuent entre 0,009 et 0,028 avec une moyenne de 0,018 pour délai 1 mois (Tableau XXXIV) et entre 0,003 et 0,012 avec une moyenne de 0,008 pour le délai 30 ans (Tableau XXXV). Les erreurs-types obtenues sont, globalement très faibles et dans l'ordre de 10^{-3} à 10^{-2} . Ces erreurs-types sont donc très proches de 0. Ces résultats témoignent d'une bonne qualité des coefficients de régression des différentes variables d'entrée utilisées pour développer le modèle de prévision de la sécheresse hydrométéorologique, aux échéances saisonnière (délai 1 mois) et décennale

(délai 30 ans), au niveau des différentes zones climatiques de la Côte d'Ivoire.

Tableau XXXIV : Paramètres d'équations du modèle développé pour la prévision des SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48 au délai 1 mois au niveau des différentes zones climatiques

		SPI-12		SPI-24		SPI-36		SPI-48	
		Cr	Et	Cr	Et	Cr	Et	Cr	Et
Zone 1	Co	-3,486	0,028	-2,843	0,022	-2,564	0,019	-2,337	0,019
	SPI _{t-3}	-0,008	0,012	-0,006	0,012	-0,009	0,011	-0,009	0,012
	SPI _{t-2}	0,008	0,016	0,001	0,017	-0,003	0,017	-0,006	0,017
	SPI _{t-1}	-0,002	0,017	0,009	0,018	0,014	0,017	0,009	0,018
	SPI _t	0,017	0,014	0,009	0,015	0,004	0,014	0,012	0,015
	P _t	8,548	0,071	6,310	0,050	5,570	0,042	5,241	0,042
Zone 2	Co	-2,708	0,017	-2,444	0,017	-2,388	0,014	-2,326	0,015
	SPI _{t-3}	-0,002	0,010	-0,001	0,010	-0,008	0,009	-0,007	0,010
	SPI _{t-2}	0,009	0,014	0,004	0,016	0,004	0,014	0,006	0,016
	SPI _{t-1}	-0,013	0,015	-0,005	0,016	-0,003	0,014	-0,011	0,016
	SPI _t	0,008	0,012	0,016	0,013	0,016	0,011	0,022	0,013
	P _t	5,655	0,037	4,913	0,034	4,559	0,027	4,407	0,028
Zone 3	Co	-2,369	0,022	-2,349	0,027	-2,354	0,023	-2,304	0,028
	SPI _{t-3}	-3,5.10 ⁻⁴	0,012	-0,016	0,017	-0,013	0,014	-0,027	0,017
	SPI _{t-2}	-0,002	0,017	0,007	0,026	0,006	0,020	-0,011	0,024
	SPI _{t-1}	-0,001	0,018	-0,006	0,026	-0,006	0,020	0,002	0,024
	SPI _t	0,037	0,015	0,057	0,021	0,037	0,017	0,062	0,020
	P _t	5,728	0,051	4,520	0,052	4,139	0,041	3,941	0,047
Zone 4	Co	-2,310	0,019	-2,212	0,009	-1,959	0,018	-1,755	0,016
	SPI _{t-3}	-0,013	0,013	0,006	0,007	0,001	0,014	0,012	0,014
	SPI _{t-2}	0,001	0,020	-0,002	0,011	0,010	0,023	-0,002	0,023
	SPI _{t-1}	-0,003	0,020	-0,001	0,011	-0,016	0,023	-0,015	0,023
	SPI _t	0,028	0,016	-2,4. 10 ⁻⁴	0,007	0,031	0,018	0,035	0,018
	P _t	5,498	0,046	5,237	0,020	4,811	0,043	4,507	0,040
Zone 5	Co	-2,973	0,017	-2,855	0,014	-2,631	0,012	-2,553	0,010
	SPI _{t-3}	-0,003	0,009	-0,002	0,008	0,001	0,007	-0,005	0,007
	SPI _{t-2}	0,010	0,015	0,001	0,013	3,5. 10 ⁻⁴	0,012	-3,4. 10 ⁻⁴	0,011
	SPI _{t-1}	-0,003	0,015	0,005	0,013	-3,2. 10 ⁻⁴	0,013	0,005	0,011
	SPI _t	0,008	0,012	0,013	0,010	0,007	0,010	0,005	0,009
	P _t	6,257	0,037	5,379	0,027	5,028	0,023	5,145	0,021
Zone 6	Co	-2,059	0,018	-2,354	0,016	-2,214	0,019	-2,287	0,020
	SPI _{t-3}	0,022	0,012	0,001	0,009	0,001	0,012	0,012	0,013
	SPI _{t-2}	-0,011	0,017	2,3. 10 ⁻⁴	0,013	0,002	0,017	0,004	0,019
	SPI _{t-1}	-0,008	0,017	0,001	0,013	1,6.10 ⁻⁵	0,017	-0,005	0,019
	SPI _t	0,023	0,014	0,012	0,011	0,027	0,014	0,029	0,015
	P _t	4,644	0,039	4,674	0,031	4,202	0,035	4,188	0,037

-Cr= Coefficients de régression -Et= Erreurs-types -Co= Constante

Tableau XXXV : Paramètres d'équations du modèle développé pour la prévision des SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48 au délai 30 ans au niveau des différentes zones climatiques

		SPI-12		SPI-24		SPI-36		SPI-48	
		Cr	Et	Cr	Et	Cr	Et	Cr	Et
Zone 1	Co	-3,531	0,012	-2,877	0,007	-2,569	0,005	-2,332	0,004
	SPI _{t-3}	0,006	0,011	0,015	0,012	0,008	0,011	-0,007	0,010
	SPI _{t-2}	0,006	0,015	0,017	0,016	0,008	0,016	0,008	0,014
	SPI _{t-1}	-0,015	0,015	-0,018	0,016	-0,015	0,016	-0,004	0,014
	SPI _t	-0,002	0,011	-0,017	0,012	-0,008	0,011	-0,009	0,010
	P _t	8,662	0,035	6,386	0,018	5,582	0,013	5,230	0,011
Zone 2	Co	-2,715	0,008	-2,465	0,007	-2,407	0,004	-2,343	0,004
	SPI _{t-3}	-0,003	0,010	3,7.10 ⁻⁴	0,012	0,018	0,008	-0,003	0,010
	SPI _{t-2}	0,006	0,015	-0,001	0,017	0,002	0,011	-0,002	0,016
	SPI _{t-1}	0,012	0,015	0,002	0,017	-0,003	0,011	0,005	0,016
	SPI _t	-0,019	0,010	-0,013	0,012	-0,016	0,008	-0,006	0,010
	P _t	5,675	0,019	4,975	0,013	4,596	0,009	4,448	0,008
Zone 3	Co	-2,454	0,011	-2,457	0,011	-2,416	0,008	-2,373	0,008
	SPI _{t-3}	0,003	0,009	0,029	0,015	-4,7.10 ⁻⁴	0,012	-0,008	0,014
	SPI _{t-2}	0,011	0,014	0,006	0,022	-0,005	0,017	0,011	0,021
	SPI _{t-1}	0,002	0,014	-0,017	0,022	1,4.10 ⁻⁵	0,017	-0,008	0,021
	SPI _t	-0,003	0,009	-0,016	0,015	0,010	0,012	0,010	0,014
	P _t	5,914	0,024	4,723	0,018	4,242	0,012	4,054	0,012
Zone 4	Co	-2,340	0,010	-2,219	0,009	-2,004	0,008	-1,819	0,008
	SPI _{t-3}	0,010	0,015	-0,011	0,010	-0,022	0,013	-0,001	0,013
	SPI _{t-2}	0,005	0,022	-0,002	0,015	0,001	0,018	-7,4.10 ⁻⁵	0,018
	SPI _{t-1}	0,006	0,022	0,001	0,015	-1,2.10 ⁻⁴	0,018	0,010	0,018
	SPI _t	-0,026	0,015	0,013	0,011	0,018	0,013	-0,005	0,013
	P _t	5,579	0,025	5,254	0,018	4,924	0,016	4,664	0,015
Zone 5	Co	-3,007	0,009	-2,902	0,007	-2,647	0,004	-2,552	0,003
	SPI _{t-3}	0,006	0,009	0,018	0,009	0,001	0,007	-0,010	0,007
	SPI _{t-2}	-0,001	0,014	-0,009	0,015	0,004	0,010	0,002	0,011
	SPI _{t-1}	0,013	0,014	0,008	0,015	0,003	0,010	0,004	0,011
	SPI _t	-0,014	0,009	-0,014	0,009	-0,010	0,007	-0,004	0,007
	P _t	6,321	0,019	5,464	0,013	5,061	0,008	5,152	0,007
Zone 6	Co	-2,096	0,012	-2,380	0,008	-2,281	0,007	-2,373	0,007
	SPI _{t-3}	-0,006	0,012	2.10 ⁻⁵	0,009	-0,004	0,012	2,7.10 ⁻⁴	0,011
	SPI _{t-2}	0,004	0,018	0,002	0,013	0,003	0,017	0,003	0,017
	SPI _{t-1}	-4,4.10 ⁻⁴	0,018	-0,004	0,014	-0,001	0,017	-0,001	0,017
	SPI _t	0,006	0,012	0,011	0,009	0,023	0,012	0,014	0,011
	P _t	4,730	0,024	4,722	0,014	4,316	0,012	4,335	0,011

-Cr= Coefficients de régression -Et= Erreurs-types -Co= Constante

7.3.2. PERFORMANCES DU MODÈLE DE PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE EN CALAGE

Le tableau XXXVI présente les performances du modèle de prévision obtenues lors du calage aux délais 1 mois et 30 ans au niveau des six (6) régions climatiques de la Côte d'Ivoire.

Tableau XXXVI : Performances du modèle de prévision de la sécheresse hydrométéorologique en calage (1971-2000)

		CRITÈRES	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
Délai 1 mois	SPI-12	RMSE	0,05	0,04	0,04	0,06	0,04	0,06
		R (%)	99,70	99,80	99,70	99,70	99,80	99,60
		KGE (%)	99,58	99,63	99,53	99,49	99,75	99,07
	SPI-24	RMSE	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03
		R (%)	99,90	99,90	99,80	99,90	99,90	99,80
		KGE (%)	99,60	99,77	99,62	99,72	99,86	99,09
	SPI-36	RMSE	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03
		R (%)	99,90	99,90	99,90	99,90	99,99	99,90
		KGE (%)	99,88	99,81	99,54	99,85	99,87	99,63
	SPI-48	RMSE	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
		R (%)	99,99	99,90	99,90	99,90	99,99	99,90
		KGE (%)	99,93	99,88	99,61	97,10	98,64	99,83
Délai 30 ans	SPI-12	RMSE	0,05	0,04	0,04	0,06	0,04	0,07
		R (%)	99,70	99,80	99,70	99,70	99,80	99,60
		KGE (%)	99,58	99,62	99,58	99,51	99,72	99,32
	SPI-24	RMSE	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03
		R (%)	99,90	99,90	99,80	99,90	99,90	99,80
		KGE (%)	99,80	99,82	99,59	99,60	99,51	99,05
	SPI-36	RMSE	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03
		R (%)	99,90	99,90	99,90	99,90	99,99	99,90
		KGE (%)	99,87	99,77	99,67	99,75	99,87	99,82
	SPI-48	RMSE	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02
		R (%)	99,99	99,90	99,90	99,90	99,99	99,90
		KGE (%)	99,88	99,87	99,82	99,88	99,86	99,80

Au niveau du délai 1 mois, le critère de KGE fluctue entre 97,10 [SPI-48, climat attiéen du littoral (zone 4)] et 99,93% [SPI-48, climat soudanais (zone 1)] avec une moyenne de 99,51%. Les valeurs de la RMSE sont dans l'ordre de 10^{-2} donc très faibles (très proches de 0) et vont de 0,01 [SPI-48, climats attiéen de l'intérieur (zone 5) et baouléen (zone 2)] à 0,06 [SPI-12, climats attiéen du littoral et attiéen du Sud-Ouest (zone 6)] avec une moyenne de 0,03. Le R, quant à lui, est très fort et varie entre 99,60 (SPI-12, climat attiéen du Sud-Ouest) et 99,99% (SPI-36, climat attiéen de l'intérieur ; SPI-48, climats soudanais et attiéen de l'intérieur) avec une moyenne de 99,86%.

Pour le délai 30 ans, les valeurs du KGE oscillent entre 99,05 (SPI-24, climat attiéen du Sud-Ouest) et 99,88% (SPI-48, climat soudanais et climat attiéen du littoral) avec une moyenne de 99,69%. Les valeurs de la RMSE sont très faibles et s'échelonnent sur l'ordre 10^{-2} . Ces valeurs sont très proches de 0 et vont de 0,01 (SPI-48, climat attiéen de l'intérieur) à 0,07 (SPI-12, climat attiéen du Sud-Ouest) avec une moyenne de 0,03. Quant au R, il est très fort et varie

entre 99,60 (SPI-12, climat attiéen du Sud-Ouest) et 99,99% (SPI-36, climat attiéen de l'intérieur ; SPI-48, climats soudanais et attiéen de l'intérieur) avec une moyenne de 99,86%. Les différents résultats obtenus montrent que le modèle de régression linéaire multiple développé pour la prévision de la sécheresse hydrométéorologique à travers les SPI choisis (SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48) a été très performant en calage, pour les délais 1 mois et 30 ans de prévision, sur toutes les zones climatiques selon les différents critères utilisés.

7.3.3. PERFORMANCES DU MODELE DE PREVISION DE LA SECHERESSE HYDROMETEOROLOGIQUE EN VALIDATION

Les performances du modèle de prévision obtenues lors de la validation aux délais 1 mois et 30 ans sont présentées dans le tableau XXXVII.

Tableau XXXVII : Performances du modèle de prévision de la sécheresse hydrométéorologique en validation (2001-2016)

		CRITÈRES	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6
Délai 1 mois	SPI-12	RMSE	0,24	0,07	0,19	0,06	0,06	0,23
		R (%)	99,60	99,70	99,40	99,70	99,70	99,30
		KGE (%)	53,45	90,59	75,17	88,02	96,37	69,44
	SPI-24	RMSE	0,15	0,07	0,21	0,06	0,05	0,25
		R (%)	99,90	99,90	99,40	99,80	99,90	99,50
		KGE (%)	66,77	88,91	78,01	87,31	94,48	72,57
	SPI-36	RMSE	0,11	0,07	0,22	0,05	0,05	0,24
		R (%)	99,90	99,99	99,60	99,90	99,90	99,70
		KGE (%)	75,62	87,91	77,41	86,86	93,52	74,66
	SPI-48	RMSE	0,09	0,08	0,23	0,06	0,06	0,24
		R (%)	99,99	99,99	99,60	99,70	99,90	99,80
		KGE (%)	79,65	86,37	77,27	85,6	91,81	74,97
Délai 30 ans	SPI-12	RMSE	0,24	0,07	0,19	0,06	0,06	0,25
		R (%)	99,60	99,70	99,40	99,70	99,70	99,40
		KGE (%)	51,57	90,44	74,84	87,34	96,51	67,91
	SPI-24	RMSE	0,16	0,08	0,21	0,06	0,06	0,25
		R (%)	99,90	99,90	99,30	99,80	99,90	99,50
		KGE (%)	66,22	88,02	77,07	87,24	94,24	72,34
	SPI-36	RMSE	0,12	0,08	0,23	0,06	0,06	0,25
		R (%)	99,90	99,99	99,50	99,80	99,90	99,70
		KGE (%)	74,82	87,7	77,01	86,39	93,29	73,85
	SPI-48	RMSE	0,09	0,09	0,23	0,05	0,05	0,26
		R (%)	99,90	99,99	99,60	99,80	99,90	99,70
		KGE (%)	78,69	85,96	76,97	86,43	92,49	73,64

Au niveau du délai 1 mois, les valeurs du critère de KGE restent supérieures à 50% et fluctuent

entre 53,45 [SPI-12, climat soudanais (zone 1)] et 96,37% [SPI-12, climat attiéen de l'intérieur (zone 5)] avec une moyenne de 81,36%. La RMSE présente de faibles valeurs (10^{-2} - 10^{-1}) qui oscillent entre 0,05 (SPI-24, climat attiéen de l'intérieur ; SPI-36, climats attiéen du littoral et attiéen de l'intérieur) et 0,25 [SPI-24, climat attiéen du Sud-Ouest (zone 6)] avec une moyenne de 0,13. Les valeurs du R sont très fortes et varient de 99,30 (SPI-12, climat attiéen du Sud-Ouest) à 99,99% [SPI-36, climat baouléen (zone 2) ; SPI-48, climats soudanais et baouléen) avec une moyenne de 99,74%.

Pour le délai 30 ans, le critère de KGE demeure supérieur à 50 % et varie de 51,57 (SPI-12, climat soudanais) à 96,51% (SPI-12, climat attiéen de l'intérieur) avec une moyenne de 80,87%. La RMSE affiche de faibles valeurs qui fluctuent entre 0,05 [SPI-48, climats attiéen du littoral (zone 4) et attiéen de l'intérieur] et 0,26 (SPI-48, climat attiéen du Sud-Ouest) avec une moyenne de 0,14. Le R, quant à lui, est très fort et oscille entre 99,30 [SPI-24, climat de montagnes (zone 3)] et 99,99% (SPI-36 et SPI-48, climat baouléen) avec une moyenne de 99,73%.

Ces résultats traduisent une très bonne performance en phase de validation du modèle de régression linéaire multiple conçu et testé aux délais de prévision 1 mois et 30 ans selon les différents SPI et les zones climatiques définies.

A partir des valeurs moyennes des différents critères sur les différentes zones climatiques, il est observé différents classements des SPI. Au niveau du délai de prévision 1 mois, la RMSE et le R ont classé de façon convergente, respectivement du premier rang à la quatrième place, les SPI-48, SPI-36, SPI-24 et SPI-12. Cependant, à partir du KGE, le classement est différent. Ainsi, on obtient le classement de décroissance de la performance comme suit : SPI-36, SPI-48, SPI-24 et SPI-12. Les SPI-24 et SPI-12 conservent respectivement la troisième et la quatrième place quel que soit le critère. Le SPI-48 et le SPI-36 occupent les deux premiers rangs sur l'ensemble des trois critères. Une synthèse des différents résultats montre que les SPI dont les performances ont été les meilleures sur l'ensemble des zones climatiques, au délai 1 mois, sont le SPI-48 et le SPI-36. Les trois critères convergent vers les climats attiéen de l'intérieur, baouléen et attiéen du littoral comme les zones où les performances ont été les plus satisfaisantes dans l'ensemble. Concernant le délai de prévision 30 ans, il est observé que les trois critères ont obtenu le même classement des différents SPI : SPI-48, SPI-36, SPI-24 et SPI-12. Les SPI dont les performances ont été les meilleures sur l'ensemble des zones climatiques sont donc, pour le délai 30 ans, le SPI-48 et le SPI-36. Les trois critères convergent vers les climats attiéen de l'intérieur, baouléen et attiéen du littoral comme les zones où les performances ont été les plus satisfaisantes dans l'ensemble. Ce classement correspond au

classement obtenu au délai de prévision 1 mois. Il est constaté une variation de la performance du modèle en fonction de l'échelle de calcul du SPI. En effet, au fur et à mesure que l'échelle de calcul du SPI est importante, la performance du modèle augmente quel que soit le délai de prévision.

Les résultats obtenus sont confirmés par les graphes des figures 86 à 91 qui montrent les exemples des sécheresses hydrométéorologiques observées et prévues, aux délais 1 mois et 30 ans au niveau des climats attiéen du littoral (SPI-12), baouléen (SPI-12), soudanais (SPI-24), attiéen de l'intérieur (SPI-36), de montagnes (SPI-48) et attiéen du Sud-Ouest (SPI-48) sur la période 2001-2016. Les graphes réalisés à partir des prévisions et des observations, dans ces différents cas, sont de bonne qualité. Le KGE est égal, respectivement aux délais de prévision 1 mois et 30 ans, à 88,02 et 87,34% (SPI-12, climat attiéen du littoral), 90,59 et 90,44% (SPI-12, climat baouléen), 66,77 et 66,22% (SPI-24, climat soudanais), 93,52 et 93,29% (SPI-36, climat attiéen de l'intérieur), 77,27 et 76,97% (SPI-48, climat de montagnes) et 74,97 et 73,64% (SPI-48, climat attiéen du Sud-Ouest). La dynamique des indices observés est dans l'ensemble très bien reproduite dans ces différents cas. Cependant, il est observé parfois de légères surestimations ou sous-estimations par le modèle de prévision. Les nuages de points montrent que les points sont dans l'ensemble très bien répartis le long de la première diagonale ($y=x$).

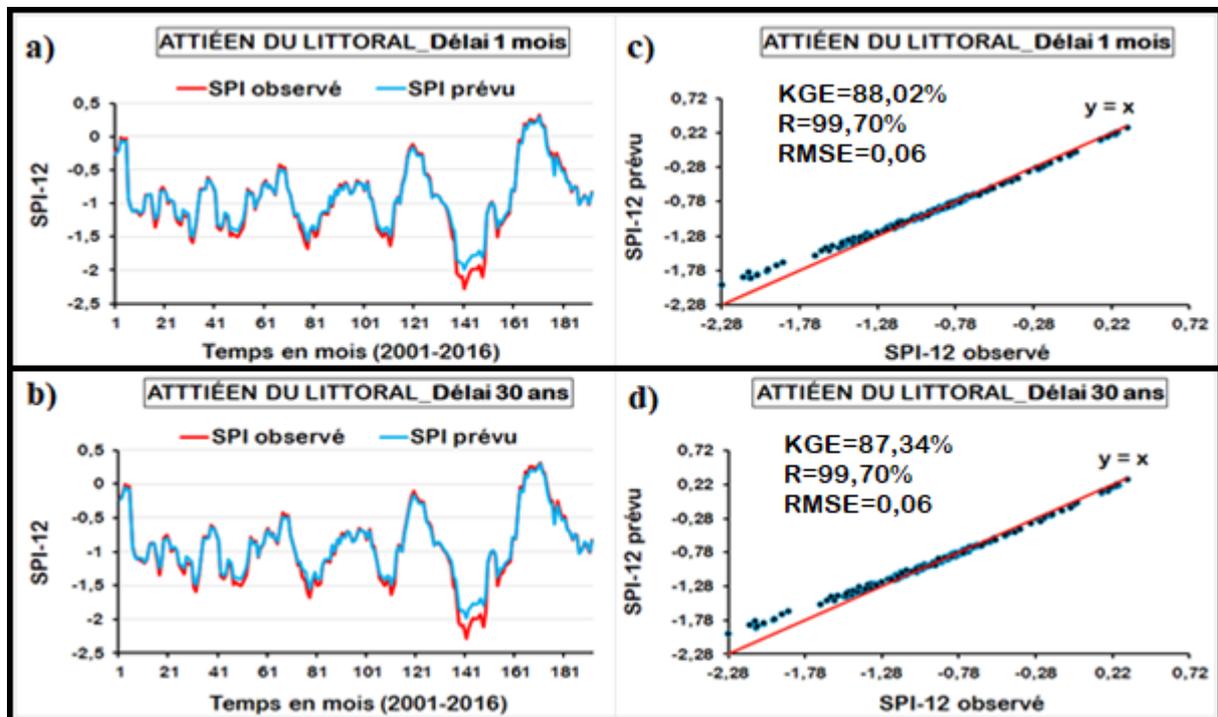


Figure 86 : Prédiction de la sécheresse hydrométéorologique (SPI-12) aux délais 1 mois (a et c) et 30 ans (b et d) en validation au niveau de l'attiéen du littoral

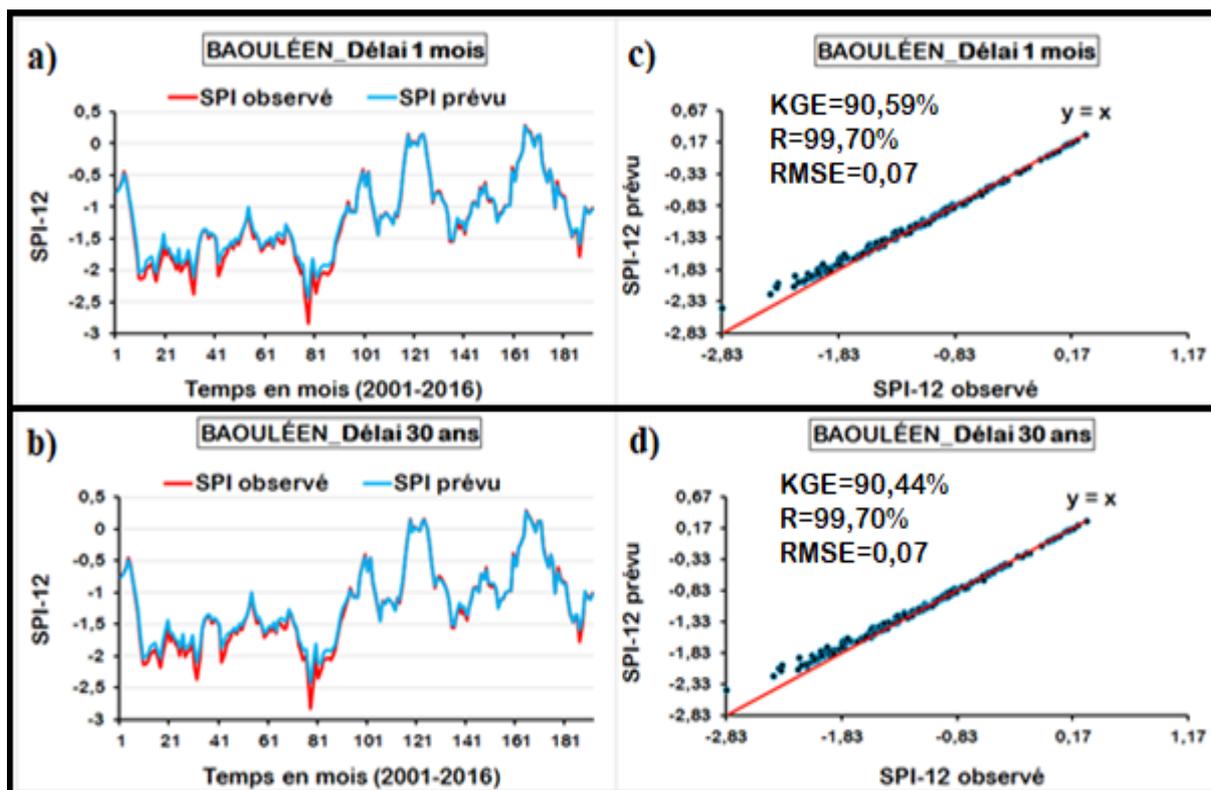


Figure 87 : Prédiction de la sécheresse hydrométéorologique (SPI-12) aux délais 1 mois (a et c) et 30 ans (b et d) en validation au niveau du baouléen

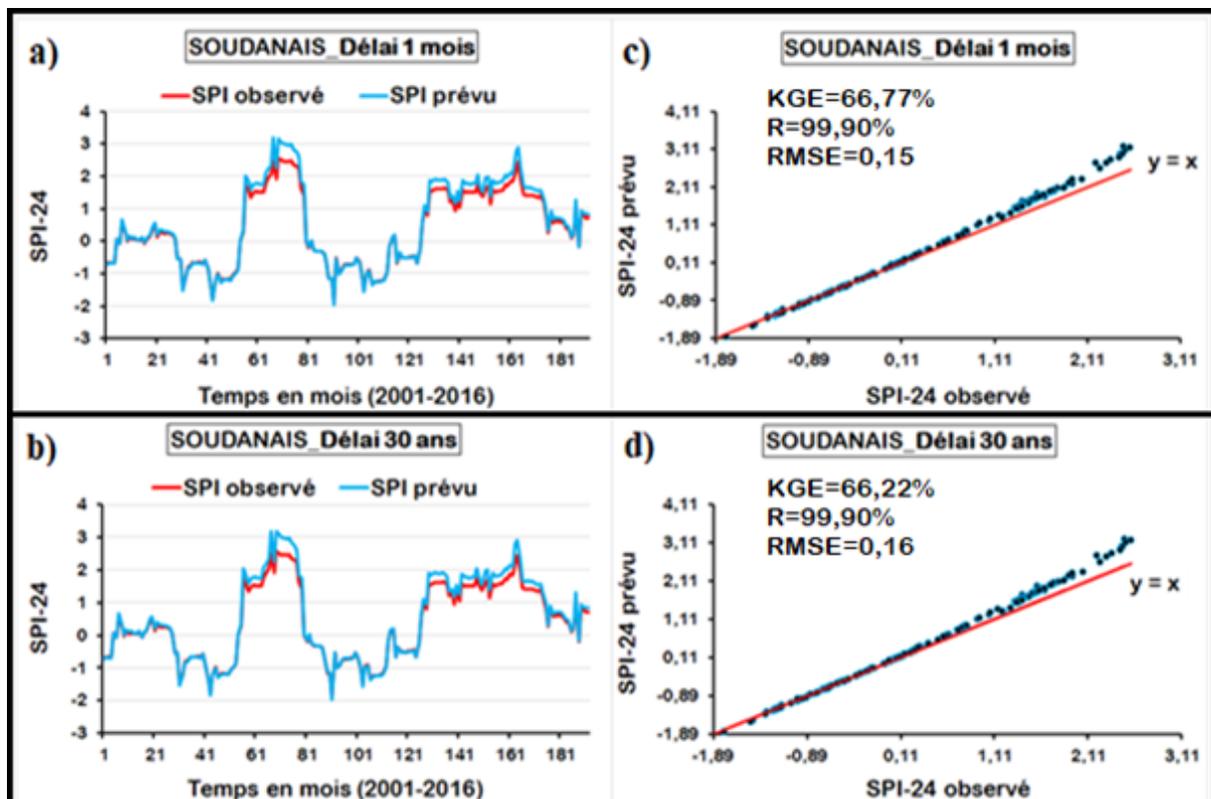


Figure 88 : Prédiction de la sécheresse hydrométéorologique (SPI-24) aux délais 1 mois (a et c) et 30 ans (b et d) en validation au niveau du soudanais

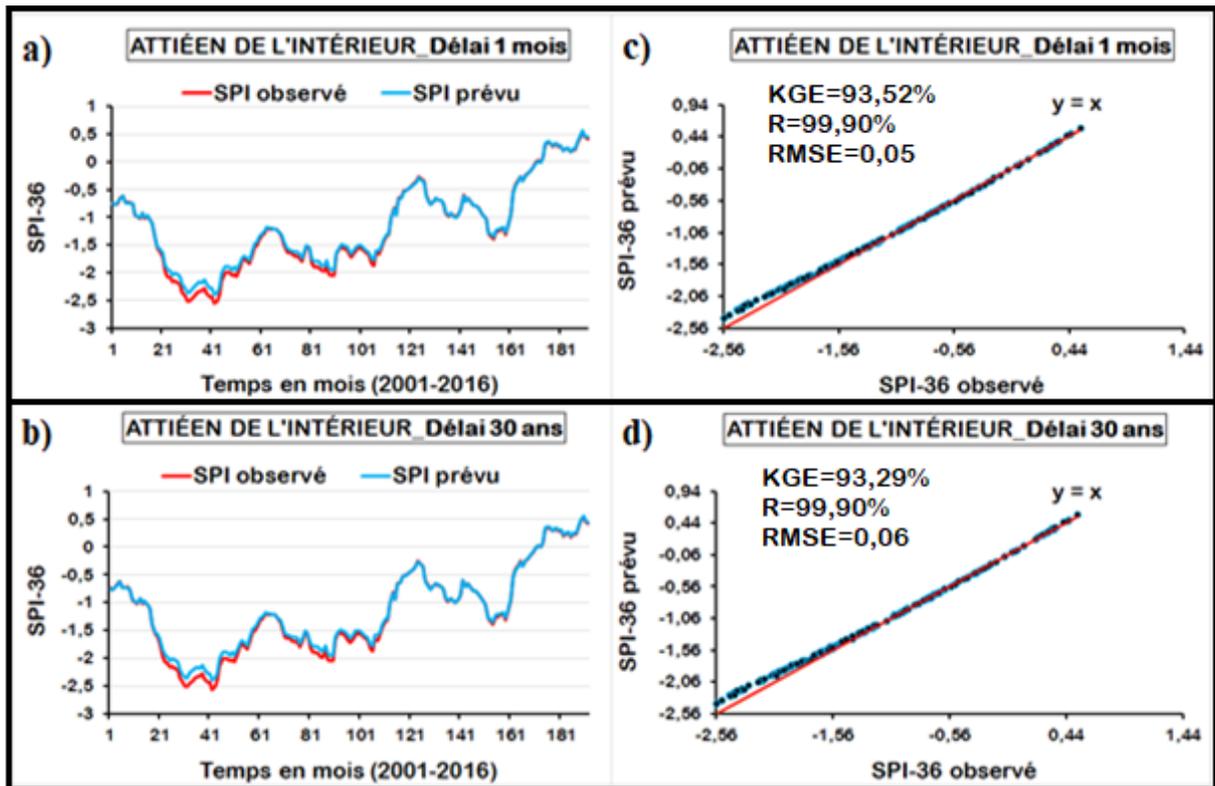


Figure 89 : Prédiction de la sécheresse hydrométéorologique (SPI-36) aux délais 1 mois (a et c) et 30 ans (b et d) en validation au niveau de l’attiéen de l’intérieur

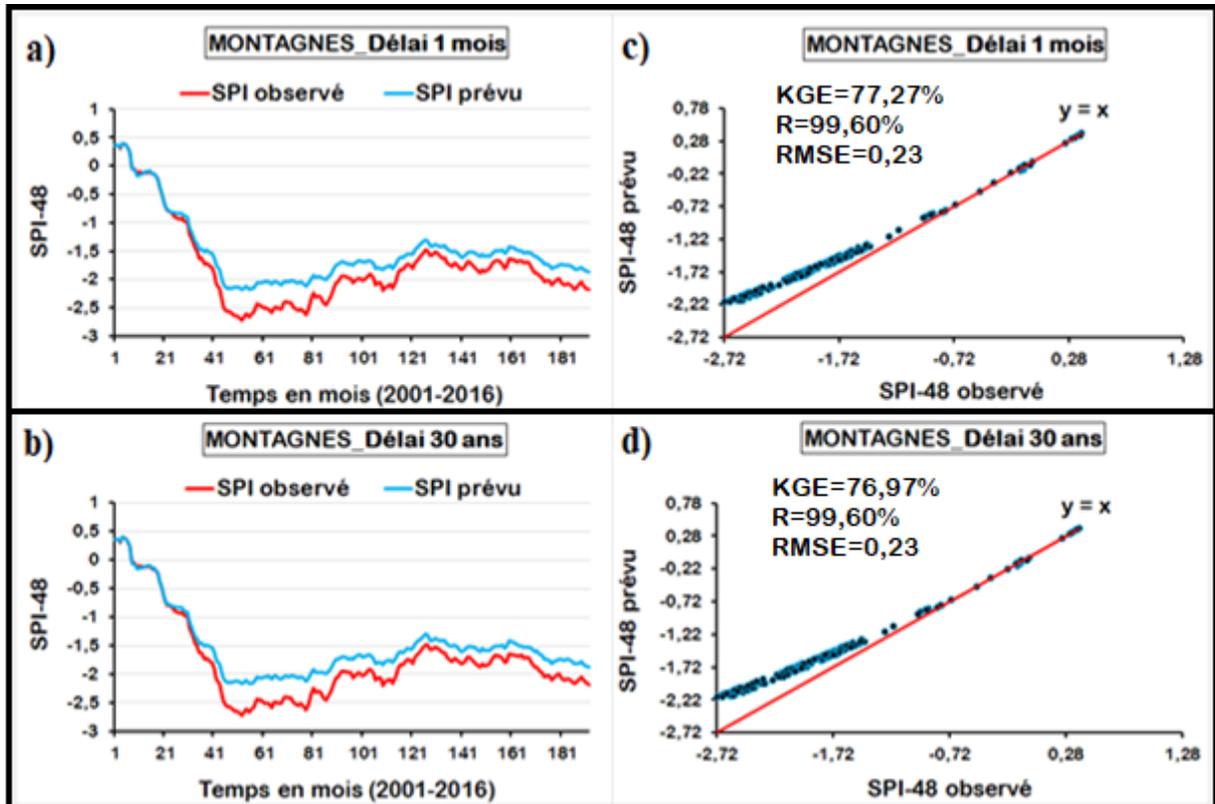


Figure 90 : Prédiction de la sécheresse hydrométéorologique (SPI-48) aux délais 1 mois (a et c) et 30 ans (b et d) en validation au niveau du climat de montagnes

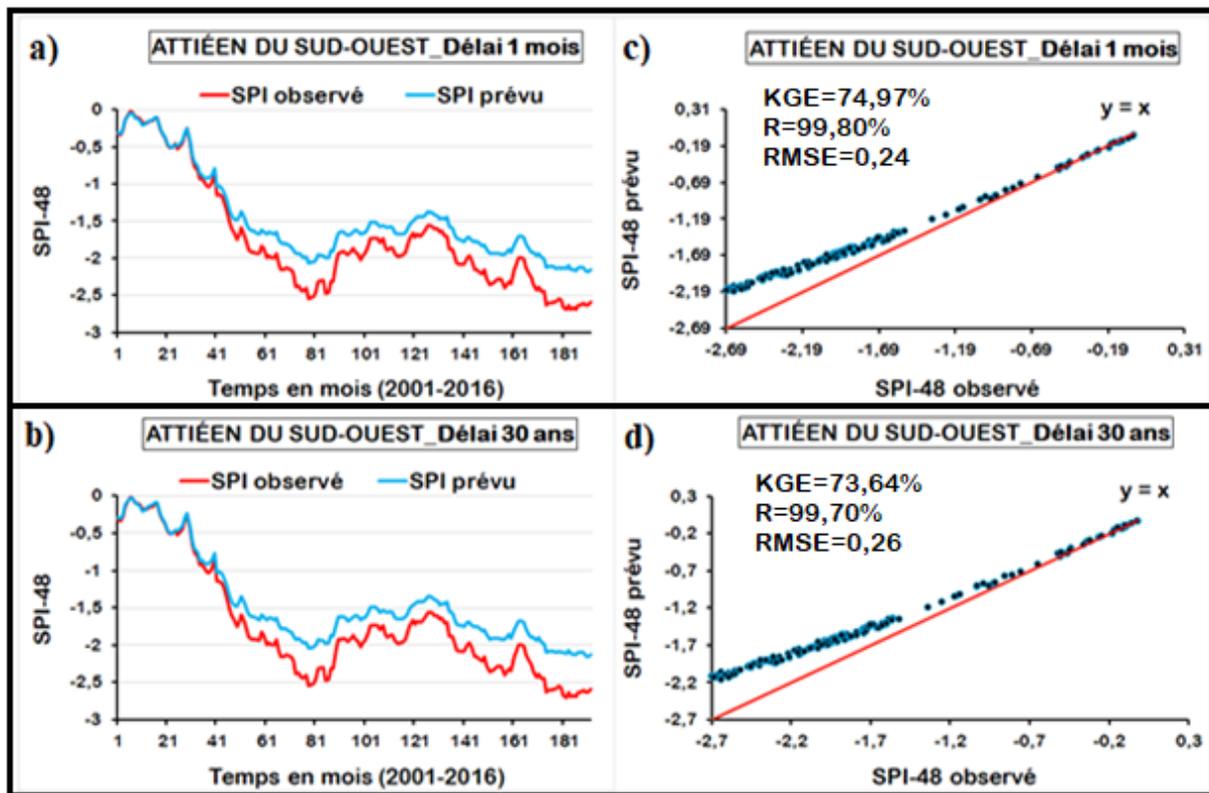


Figure 91 : Prédiction de la sécheresse hydrométéorologique (SPI-48) aux délais 1 mois (a et c) et 30 ans (b et d) en validation au niveau de l’attiéen du Sud-Ouest

7.3.4. ROBUSTESSE DU MODÈLE DE PRÉVISION DE LA SÉCHERESSE HYDROMÉTÉOROLOGIQUE

Les valeurs du critère de robustesse, obtenues par le modèle de prévision de la sécheresse hydrométéorologique pour les délais de prévision 1 mois et 30 ans, sont présentées dans le tableau XXXVIII.

Les valeurs du critère de robustesse pour le climat soudanais (zone 1) varient entre -48,01 (SPI-12, délai 30 ans) et -20,28% (SPI-48, délai 1 mois) avec une moyenne de -31,42%. Pour le climat baouléen (zone 2), le critère oscille entre -13,91 (SPI-48, délai 30 ans) et -9,04% (SPI-12, délai 1 mois) avec une moyenne de -11,53%. Au niveau du climat de montagnes (zone 3), les pertes enregistrées fluctuent entre -24,74 (SPI-12, délai 30 ans) et -21,61% (SPI-24, délai 1 mois) avec une moyenne de -22,90%. Le climat attiéen du littoral (zone 4) fait observer des dégradations qui vont de -13,45 (SPI-48, délai 30 ans) à -11,47 % (SPI-12, délai 1 mois) avec une moyenne de -12,46. Concernant le climat attiéen de l’intérieur (zone 5), le critère de robustesse varie de -7,37 (SPI-48, délai 30 ans) à -3,21% (SPI-12, délai 30 ans) avec une moyenne de -5,55%. Le climat attiéen du Sud-Ouest (zone 6), quant à lui, enregistre un critère

de robustesse qui fluctue entre -31,41 (SPI-12, délai 30 ans) et 24,86% (SPI-48, délai 1 mois) avec une moyenne de -27,03%.

Le critère de robustesse a obtenu des valeurs inférieures à -10% (supérieures à 10% prises en valeurs absolues) au niveau de l'ensemble des régions climatiques, à l'exception du climat attiéen de l'intérieur (quel que soit le SPI considéré) et du climat baouléen (au niveau du SPI-12). Cependant, les écarts constatés par référence aux performances obtenues en validation sont négligeables pour le modèle. Le modèle mathématique de prévision de la sécheresse hydrométéorologique appliqué aux SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48 a donc été robuste dans l'ensemble. Ces résultats traduisent la capacité du modèle à simuler des valeurs sur des données en dehors de celles utilisées pour le calage qui se rapprochent des valeurs observées, sur l'ensemble des régions climatiques de la Côte d'Ivoire, pour un délai de prévision atteignant 30 ans. En se basant sur les valeurs moyennes obtenues par le critère de robustesse, le modèle de prévision a été plus robuste respectivement au niveau des climats attiéen de l'intérieur, baouléen, attiéen du littoral, de Montagnes, attiéen du Sud-Ouest et soudanais. Au niveau des SPI, le SPI-48 a été l'indice le plus robuste et le SPI-12 a été l'indice le moins robuste, avec le SPI-36 et le SPI-24 respectivement au deuxième et au troisième rang quel que soit le délai considéré.

Tableau XXXVIII : Robustesse du modèle de prévision de la sécheresse hydrométéorologique

		Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5	Zone 6	Moyenne
Délai 1 mois	SPI-12	-46,13	-9,04	-24,36	-11,47	-3,38	-29,63	-20,67
	SPI-24	-32,83	-10,86	-21,61	-12,41	-5,38	-26,52	-18,27
	SPI-36	-24,26	-11,90	-22,13	-12,99	-6,35	-24,97	-17,10
	SPI-48	-20,28	-13,51	-22,34	-11,50	-6,83	-24,86	-16,55
Délai 30 ans	SPI-12	-48,01	-9,18	-24,74	-12,17	-3,21	-31,41	-21,45
	SPI-24	-33,58	-11,80	-22,52	-12,36	-5,27	-26,71	-18,71
	SPI-36	-25,05	-12,07	-22,66	-13,36	-6,58	-25,97	-17,62
	SPI-48	-21,19	-13,91	-22,85	-13,45	-7,37	-26,16	-17,49
	Moyenne	-31,42	-11,53	-22,90	-12,46	-5,55	-27,03	

7.4. CAS PRATIQUES DE PRÉVISION DES SÉCHERESSES MÉTÉOROLOGIQUE, AGROMÉTÉOROLOGIQUE ET HYDROMÉTÉOROLOGIQUE

Les tableaux XXXIX, XL et XLI montrent des exemples de cas pratiques de prévision des sécheresses météorologique (SPI-3), agrométéorologique (SPI-6) et hydrométéorologique (SPI-12) en climat baouléen, qui est l'une des zones climatiques les plus vulnérables à la

sécheresse. Ces cas pratiques concernent la prévision de la sécheresse sur la période passée de 2017 à 2019 aux délais 1 mois, (SPI-3), 2 mois (SPI-6) et 6 mois (SPI-12). Ces cas pratiques concernent aussi, toujours en climat baouléen, la prévision de la sécheresse sur la période future de 2023 à 2025 aux délais 6 ans, 7 ans et 8 ans (à partir de l'année 2016) uniquement au niveau de la sécheresse hydrométéorologique (SPI-12) qui présente un pas de prévision (atteignant 30 ans) qui prend en compte ces délais. On observe, sur la période passée de 2017 à 2019, que les types de SPI-3, SPI-6 et SPI-12 observés et prévus affichent des taux de coïncidence respectifs de 75% (Tableau XXXIX), 66,67% (Tableau XL) et de 100% (Tableau XLI) avec une absence d'évènements météorologiques, agrométéorologiques et hydrométéorologiques humides observés et prévus exprimés respectivement par les indices SPI-3, SPI-6 et SPI-12. On observe aussi que La POD sèche obtenue pour ces prévisions est de 57,14%, 45,45% et 100% respectivement au niveau des SPI-3, SPI-6 et SPI-12. La POD normale, quant à elle, est de 79,31% (SPI-3), 76% (SPI-6) et de 100% (SPI-12) pour une FAR sèche de 0% (quel que soit le type de SPI analysé) et un HSS de 62,5% (SPI-3), 50% (SPI-6) et 100% (SPI-12). Ces résultats traduisent une bonne prévision du modèle des sécheresses météorologique, agrométéorologique et hydrométéorologique en climat baouléen.

Tableau XXXIX : Types de SPI-3 observés et prévus au délai 1 mois en climat baouléen (2017-2019)

		Mois											
Année	SPI-3	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
2017	Observé	N	N	N	N	S	S	S	N	N	N	N	N
	Prévu	S	N	N	N	S	S	N	N	N	N	S	S
2018	Observé	S	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N	N
	Prévu	S	S	N	N	N	N	N	N	N	S	N	N
2019	Observé	N	N	N	N	S	S	N	N	N	N	N	N
	Prévu	S	N	N	N	S	N	N	N	N	N	N	N

N = Normal S = Sec
TC = 75%
POD Sèche = 57,14%
POD Normale = 79,31%
FAR Sèche = 0%
HSS = 62,5%

Tableau XL : Types de SPI-6 observés et prévus au délai 2 mois en climat baouléen (2017-2019)

		Mois											
Année	SPI-6	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
2017	Observé	N	N	N	N	S	S	S	S	S	S	N	S
	Prévu	S	S	N	N	S	S	S	N	N	N	S	N
2018	Observé	N	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N	N
	Prévu	N	S	S	N	N	S	N	N	N	N	N	N
2019	Observé	N	N	N	N	S	S	N	N	N	N	N	N
	Prévu	N	N	N	N	S	N	N	N	N	S	N	N

N = Normal S = Sec
TC = 66,67%
POD Sèche = 45,45%
POD Normale = 76%
FAR Sèche = 0%
HSS = 50%

Tableau XLI : Types de SPI-12 observés et prévus au délai 6 mois en climat baouléen (2017-2019)

		Mois											
Année	SPI-12	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
2017	Observé	S	N	N	N	S	S	S	S	S	S	S	S
	Prévu	S	N	N	N	S	S	S	S	S	S	S	S
2018	Observé	S	S	S	S	S	N	N	N	N	N	N	N
	Prévu	S	S	S	S	S	N	N	N	N	N	N	N
2019	Observé	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	Prévu	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

N = Normal S = Sec
TC = 100%
POD Sèche = 100%
POD Normale = 100%
FAR Sèche = 0%
HSS = 100%

Sur la période future de 2023 à 2025, les types de sécheresse hydrométéorologiques prévus font observer un taux de sécheresse de 41,66% avec une absence d'évènements hydrométéorologiques humides prévus exprimée par l'indice SPI-12 sur cette période en climat baouléen (Tableau XLII).

Tableau XLII : Types de SPI-12 prévus au délai 6 à 8 ans en climat baouléen (2023-2025)

Année	SPI-12	Délai	Mois												
			Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec	
2023	Prévu	6 ans	S	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S	S	S
2024	Prévu	7 ans	S	S	S	S	S	S	S	N	N	N	N	N	N
2025	Prévu	8 ans	N	S	N	N	N	N	N	N	N	N	S	S	S
N = Normal S = Sec															
Taux sec prévu = 41,66%															

Le modèle développé démontre ainsi sa capacité de prévision de la sécheresse à l'échelle saisonnière et décennale dans un contexte climatique ivoirien marqué par une vulnérabilité à la sécheresse.

7.5. DISCUSSION

Les principaux résultats obtenus montrent que le territoire ivoirien est vulnérable à la sécheresse avec des taux de séquences sèches qui tournent, sur l'ensemble des régions climatiques du pays, autour de 23, 27 et 31% respectivement au niveau des sécheresses météorologique (SPI-3), agrométéorologique (SPI-6 et SPI-9) et hydrométéorologique (SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48). Les régions climatiques du Soudanais et du Baouléen restent cependant les plus vulnérables à la sécheresse. Le modèle de régressions linéaires multiples (RLM) qui a été conçu pour la prévision de ces sécheresses, a donné des résultats de prévision des sécheresses météorologiques (SPI-3) et agrométéorologiques (SPI-6 et SPI-9) satisfaisants au niveau du climat attéen de l'intérieur où le modèle ne peut être utilisé que pour un délai de prévision de 4 mois maximum avec les SPI-3 et SPI-6 et de 6 mois maximum avec les SPI-9. Au niveau des SPI-9, les résultats sont également satisfaisants pour un délai de prévision de 2 mois maximum au niveau des climats baouléen, de montagnes et attéen du Sud-Ouest. Les prévisions des sécheresses hydrométéorologiques (SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48) ont donné des résultats très performants sur l'ensemble des régions climatiques. Un délai de prévision de 30 ans a été atteint.

En se basant sur les performances obtenues par le modèle, il est constaté sur l'ensemble des régions climatiques que les performances décroissent des SPI-48 au SPI-3. Cette décroissance de performances des pas de temps les plus élevés aux pas de temps les plus faibles a également été constatée lors des travaux de Rezaeian-Zadeh et Tabari (2012) et Boudad *et al.* (2015). En

effet, ce constat peut être expliqué par la manière dont les séries chronologique SPI ont été calculées. Contrairement à la série des précipitations, SPI suit la distribution normale standard. Cette conversion supprime les pics soudains laissant une courbe lisse lentement variable qui est plus difficile à prédire, en utilisant les modèles de prédiction, au fur et à mesure que le pas du SPI se réduit (Boudad *et al.*, 2015). Aussi, cela peut être dû à la forte complexité, la non-linéarité et la non-stationnarité des séries du SPI (Djrbouai, 2016).

Plusieurs auteurs ont utilisé les régressions linéaires multiples ou d'autres méthodes [les modèles stochastiques (ARIMA, SARIMA), les réseaux de neurones artificiels (RNA), les modèles hybrides ondelettes-RNA] pour la prévision des indices de sécheresse SPI.

Boudad *et al.* (2015) ont effectué des travaux sur la prédiction au délai 1 mois des SPI-3, SPI-6 et SPI-12 dans le bassin d'Inaouène (Maroc) globalement sur la période 1971-2012. Pour cela, ils ont utilisé la régression linéaire multiple et les réseaux de neurones artificiels. Les variables d'entrées des modèles développés comportent l'indice SPI calculé, les valeurs de précipitations mensuelles et l'indice NAO (North Atlantic Oscillation) pour estimer l'effet de l'Oscillation Nord Atlantique sur la sécheresse dans la région. Ils fondent leur analyse des performances des modèles sur le coefficient de corrélation (R), le coefficient de détermination (R^2), l'erreur moyenne absolue (MAE) et l'erreur quadratique moyenne (MSE). Selon les auteurs, le modèle utilisant en entrée la combinaison des trois variables (précipitations, indices SPI et indices NAO) est le plus apte à la prédiction de la sécheresse, avec les meilleures performances enregistrées, surtout au niveau des SPI-12.

Rezaeian-Zadeh et Tabari (2012), ont pour leur part utilisé les réseaux de neurones artificiels pour la prévision au délai 1 mois des SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12 et SPI-24 dans les différentes régions climatiques de l'Iran sur la période 1965-2010. Les variables d'entrée des modèles développés sont constituées de paramètres continentaux (indices SPI et précipitations) et de paramètres océaniques [indices NAO et indices SOI (Southern Oscillation Index)]. Ces auteurs analysent la performance des modèles à partir des critères que sont le coefficient de détermination (R^2) et la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Selon eux, le modèle utilisant en entrée la combinaison des quatre variables (précipitations, indices SPI, indices NAO et indices SOI) est le plus performant pour la prévision de la sécheresse, avec les meilleures performances obtenues, surtout au niveau des SPI-12 et SPI-24.

Djrbouai (2016), quant à lui, a effectué des travaux sur la prévision des SPI-3, SPI-6 et SPI-12 dans le bassin versant de l'Algérois (Algérie) pour des délais de prévision allant de 1 à 36 mois sur la période 1936-2008. Il s'est basé sur les modèles stochastiques ARIMA et SARIMA, les réseaux de neurones artificiel (RNA) et les modèles hybrides ondelettes-RNA. Les variables

explicatives des modèles développés sont l'indice SPI. Il analyse la performance des modèles à partir du critère de Nash-Sutcliffe (NSE), de l'erreur moyenne absolue (MAE) et de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE). Selon cet auteur, les modèles hybrides ondelettes-RNA sont les plus aptes à la prévision de la sécheresse, avec les meilleures performances enregistrées, surtout au niveau des SPI-12 pour un délai de prévision qui atteint 36 mois.

En comparant les résultats obtenus dans cette étude avec ceux de ces auteurs, il est remarqué que les résultats obtenus ici avec le modèle développé au délai de prévision 1 mois sont dans l'ensemble forts satisfaisants (Tableaux XLIII, XLIV et XLV). En considérant le même type de modèle utilisé (RLM), les coefficients de corrélation obtenus en validation avec le modèle développé, au délai de prévision 1 mois, varient de 34,5 à 88,2% avec une moyenne de 58,18% et un écart-type de 23,12% et de 46,8 à 91,8% avec une moyenne de 62,90% et un écart-type 15,55% respectivement au niveau SPI-3 et SPI-6 (Tableau XLIII). Au niveau des SPI-12, les coefficients de corrélation obtenus en validation varient de 99,60 à 99,80% avec une moyenne de 99,72 et un écart-type de 0,08%. Ces résultats sont meilleurs dans l'ensemble (eu égard aux performances maximales atteintes par le modèle dans la présente étude qui sont les plus fortes) comparés à ceux obtenus, en validation pour la prévision des SPI-3, SPI-6 et SPI-12 au délai de prévision 1 mois, par Boudad *et al.* (2015) à partir des régressions linéaires multiples (RLM).

Tableau XLIII : Comparaison du modèle RLM de la présente étude et du modèle RLM de Boudad *et al.* (2015) au délai de prévision 1 mois des SPI-3, SPI-6 et SPI-12

Délai de prévision	SPI	Critère de performance	Indicateurs d'analyse	Boudad <i>et al.</i> (2015)	Présente étude
				RLM	RLM
1 mois	SPI-3	R (%)	Minimum	67,00	34,50
			Maximum	70,00	88,20
			Moyenne	68,50	58,18
			Ecart-type	2,12	23,12
	SPI-6	R (%)	Minimum	79,00	46,80
			Maximum	81,00	91,80
			Moyenne	80,00	62,90
			Ecart-type	1,41	15,55
	SPI-12	R (%)	Minimum	92,00	99,60
			Maximum	94,00	99,80
			Moyenne	93,00	99,72
			Ecart-type	1,41	0,08

Les tableaux XLIV et XLV montrent la comparaison des performances obtenues, en validation au délai de prévision 1 mois, avec le modèle développé dans la présente étude (RLM) à celles

des meilleurs modèles développés par ces auteurs à partir d'autres méthodes [les réseaux de neurones artificiels (RNA) ou les modèles hybrides ondelettes-RNA]. Il est constaté, au niveau des échelles intra-annuelles (SPI-3, SPI-6, SPI-9) que les coefficients de corrélation (R) obtenus dans la présente étude sont globalement meilleurs comparés à ceux obtenus par ces auteurs avec les RNA (Tableau XLIV). Quant aux RMSE, elles sont dans l'ensemble meilleures que celles enregistrées par ces auteurs avec les RNA et relativement moins bonnes que celles enregistrées avec les modèles hybrides ondelettes-RNA (Tableau XLIV). En effet, au niveau de la prévision des SPI-3 et SPI-6, les coefficients de corrélation obtenus dans cette étude sont, au niveau des performances maximales atteintes, meilleurs comparés à ceux obtenus par Boudad *et al.* (2015) avec les RNA. Les RMSE enregistrées à ces échelles (SPI-3 et SPI-6) montrent que la présente étude a, avec les RLM, atteint des performances minimales inférieures (donc meilleures) à celles obtenues par Rezaeian-Zadeh et Tabari (2012) avec les RNA. Toujours au niveau des SPI-3 et SPI-6, la présente étude a atteint des performances minimales de la RMSE supérieures (donc moins bonnes) à celles atteintes par Djerbouai (2016) avec les ondelettes-RNA. Concernant la prévision des SPI-9, les résultats enregistrés avec la RMSE montrent que la présente étude a atteint des valeurs minimales de la RMSE inférieures (donc meilleures) à celles atteintes par Rezaeian-Zadeh et Tabari (2012) avec les RNA (Tableau XLIV).

Aux échelles annuelle (SPI-12) et interannuelle (SPI-24), les coefficients de corrélation et les RMSE obtenus sont globalement meilleurs comparés à ceux enregistrés par ces auteurs avec les RNA et relativement moins bon que ceux enregistrés avec les modèles hybrides ondelettes-RNA (Tableau XLV). En effet, au niveau de la prévision des SPI-12, les coefficients de corrélation minimal et maximal ainsi que la moyenne des coefficients de corrélation obtenus dans cette étude sont supérieurs à ceux obtenus par Boudad *et al.* (2015) avec les RNA (Tableau XLV). Aussi, les résultats enregistrés avec la RMSE montrent que Rezaeian-Zadeh et Tabari (2012) ont obtenu avec les RNA des valeurs minimale et maximale ainsi qu'une moyenne de la RMSE supérieures (donc moins satisfaisantes) à celles obtenues dans la présente étude (Tableau XLV). Par contre Djerbouai (2016) a obtenu, au délai de prévision 1 mois à partir des ondelettes-RNA, des valeurs minimale et maximale ainsi qu'une moyenne de la RMSE inférieures (donc plus satisfaisantes) à celles obtenues dans la présente étude pour le même délai de prévision considéré. Au niveau de la prévision des SPI-24 pour un délai de 1 mois, Rezaeian-Zadeh et Tabari (2012) ont obtenu des valeurs de la RMSE qui varient de 0,35 à 0,58 avec une moyenne de 0,45 et un écart-type de 0,05 avec les RNA (Tableau XLV). Ces valeurs sont supérieures et donc moins satisfaisantes que celles obtenues avec le modèle développé dans la présente étude (Tableau XLV).

Tableau XLIV : Comparaison du modèle RLM de la présente étude et des modèles RNA ou ondelettes-RNA des travaux antérieurs au délai de prévision 1 mois des SPI-3, SPI-6 et SPI-9

Délai de prévision	SPI	Critères de performance	Indicateurs d'analyse	Rezaeian-Zadeh et Tabari (2012)	Boudad <i>et al.</i> (2015)	Djrbouai (2016)	Présente étude
				RNA	RNA	Ondelettes-RNA	RLM
1 mois	SPI-3	R (%)	Minimum	-	68,00	-	34,50
			Maximum	-	77,00	-	88,20
			Moyenne	-	72,50	-	58,18
			Ecart-type	-	6,36	-	23,12
		RMSE	Minimum	0,85	-	0,15	0,39
			Maximum	0,94	-	0,21	0,99
			Moyenne	0,90	-	0,17	0,67
			Ecart-type	0,03	-	$2,6 \times 10^{-2}$	0,19
	SPI-6	R (%)	Minimum	-	80,00	-	46,80
			Maximum	-	83,00	-	91,80
			Moyenne	-	81,50	-	62,90
			Ecart-type	-	2,14	-	15,55
		RMSE	Minimum	0,75	-	0,05	0,32
			Maximum	0,82	-	0,08	0,96
			Moyenne	0,79	-	0,07	0,59
			Ecart-type	0,03	-	9×10^{-3}	0,21
	SPI-9	RMSE	Minimum	0,58	-	-	0,35
			Maximum	0,71	-	-	0,70
			Moyenne	0,65	-	-	0,45
			Ecart-type	0,05	-	-	0,13

Tableau XLV : Comparaison du modèle RLM de la présente étude et des modèles RNA ou ondelettes-RNA des travaux antérieurs au délai de prévision 1 mois des SPI-12 et SPI-24

Délai de prévision	SPI	Critères de performance	Indicateurs d'analyse	Rezaeian-Zadeh et Tabari (2012)	Boudad <i>et al.</i> (2015)	Djrbouai (2016)	Présente étude
				RNA	RNA	Ondelettes-RNA	RLM
1 mois	SPI-12	R (%)	Minimum	-	96,00	-	99,60
			Maximum	-	97,00	-	99,80
			Moyenne	-	96,50	-	99,72
			Ecart-type	-	0,71	-	0,08
		RMSE	Minimum	0,47	-	8×10^{-3}	0,04
			Maximum	0,57	-	0,04	0,06
			Moyenne	0,51	-	0,02	0,05
			Ecart-type	0,04	-	0,01	0,01
	SPI-24	RMSE	Minimum	0,35	-	-	0,02
			Maximum	0,46	-	-	0,03
			Moyenne	0,41	-	-	0,03
			Ecart-type	0,04	-	-	4×10^{-3}

Des différentes comparaisons, il ressort qu'avec seulement des variables explicatives continentales (SPI et Pluie), le modèle développé dans la présente étude est, dans l'ensemble,

plus performant que ceux de certains auteurs ayant utilisé en plus des variables explicatives continentales (SPI et Pluie), des variables explicatives océaniques (NAO et SOI). Ce qui veut dire que les données continentales sont capables, à elles seules, de prévoir la sécheresse. Par ailleurs, les résultats des travaux de Djerbouai (2016) qui a également utilisé des variables continentales (SPI) montrent que les modèles hybrides ondelettes-réseaux de neurones sont légèrement plus performants que ceux développés dans la présente étude à partir des régressions linéaires multiples, même si ces derniers semblent plus efficaces (robustes) avec un délai de prévision atteignant 30 ans (360 mois). Les ondelettes-réseaux de neurones ont, en effet, atteint un délai de prévision maximum de 36 mois.

CONCLUSION PARTIELLE

Le territoire ivoirien est vulnérable à la sécheresse avec des taux de séquences sèches qui tournent, sur l'ensemble des régions climatiques du pays, autour de 23, 27 et 31% respectivement au niveau des sécheresses météorologique (SPI-3), agrométéorologique (SPI-6 et SPI-9) et hydrométéorologique (SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48). Cependant, les régions climatiques du soudanais et du baouléen restent les plus vulnérables. Un modèle basé sur les régressions linéaires multiples pour la prévision de la sécheresse, présentant différents types de variables explicatives (SPI et précipitations), a été conçu pour chacune des régions climatiques préalablement définies de la Côte d'Ivoire. Ce modèle développé a été calé et validé respectivement sur les périodes 1971-2000 et 2001-2016. Le modèle de régressions linéaires multiples (RLM) conçu a donné des résultats de prévision des sécheresses météorologiques (SPI-3) et agrométéorologiques (SPI-6 et SPI-9) satisfaisants au niveau du climat attiéen de l'intérieur où le modèle ne peut être utilisé que pour un délai de prévision de 4 mois maximum avec les SPI-3 et SPI-6 et de 6 mois maximum avec les SPI-9. Au niveau des SPI-9, les résultats sont également satisfaisants pour un délai de prévision de 2 mois maximum au niveau des climats baouléen, de montagnes et attiéen du Sud-Ouest. Les prévisions des sécheresses hydrométéorologiques (SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48) ont donné des résultats très performants sur l'ensemble des régions climatiques. Un délai de prévision de 30 ans a été atteint. En validation, sur l'ensemble des régions climatiques et des délais de prévision 1 mois et 30 ans, les performances obtenues sont en moyenne pour le KGE de 78,47 ; 81,10 ; 82,42 et 82,49% respectivement au niveau des SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48. Il est observé que le climat attiéen de l'intérieur est la zone climatique où les performances du modèle de prévision sont meilleures quel que soit le type de sécheresse (SPI) étudié. Malgré qu'il a été constaté des

limites dans le délai de prévision (4 mois maximum au niveau de la sécheresse météorologique et 6 mois maximum au niveau de de la sécheresse agrométéorologique), le modèle développé et testé lors de cette étude a démontré sa capacité de prévision de la sécheresse à l'échelle saisonnière et décennale dans un contexte climatique ivoirien marqué par une vulnérabilité à la sécheresse. Il constitue donc un outil de prévision très performant qui peut être utilisé dans les systèmes de suivi et d'annonce précoce à la sécheresse. Ce qui permettra aux décideurs d'établir des plans d'action visant à diminuer l'impact de la sécheresse sur l'ensemble des régions climatiques de la Côte d'Ivoire.

CONCLUSION GÉNÉRALE RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis de développer un modèle de régression linéaire multiple de prévision de la sécheresse appliqué au territoire ivoirien en vue d'une meilleure gestion des effets de cette dernière. Ainsi, cette étude a consisté d'abord à caractériser et actualiser la régionalisation climatique en Côte d'Ivoire. Ensuite, à évaluer les variations climatiques et la sécheresse et leurs répercussions sur le climat saisonnier et annuel en Côte d'Ivoire. Et enfin, à prévoir la sécheresse en Côte d'Ivoire en vue de proposer aux populations des mesures d'atténuation ou d'adaptation au cas échéant. Au terme de cette étude, l'ensemble des résultats obtenus permet de mettre le point sur les faits suivants :

Caractérisation et actualisation de la régionalisation climatique en Côte d'Ivoire

La régionalisation climatique de la Côte d'Ivoire réalisée à partir de la statistique multivariée (ACPN et CAH) et des indices climatiques (indice de Gaussen et indice de De Martonne), au cours de la période 1961-2016, a permis de mettre en évidence six (6) zones climatiques correspondants aux différentes zones climatiques antérieurement définies en Côte d'Ivoire. La première zone, située au Nord, est confondue à celle du climat tropical de transition (climat soudanais) et se traduit du point de vue climatique par une pluviométrie qui varie entre 1010 et 1221 mm avec une moyenne de 1080 mm. Le régime climatique qui règne dans cette zone est un régime unimodal à deux saisons avec une saison pluvieuse qui dure 7 mois (d'avril à octobre) et une saison sèche qui dure 5 mois de novembre à mars. La deuxième zone, localisée au Centre, correspondant au climat tropical humide (climat équatorial de transition atténué ou climat baouléen) se caractérise par une pluviométrie allant de 1046 à 1245 mm avec une moyenne de 1142 mm. Le régime climatique qui y règne est un régime bimodal à deux saisons avec une saison des pluies qui dure 8 à 10 mois (globalement de février à novembre) et une saison sèche qui dure 2 à 4 mois (globalement de novembre à février). La troisième zone climatique homogène, située à l'Ouest, est le climat de montagnes qui est définie par une hauteur pluviométrique qui oscille entre 1666 et 2020 mm avec une moyenne de 1796 mm. Deux régimes climatiques cohabitent dans cette zone. Il s'agit du régime unimodal à deux saisons et du régime bimodal à deux saisons. La saison pluvieuse dure 8 à 9 mois (globalement de mars à

novembre) et la saison sèche dure 3 à 4 mois (globalement de novembre à février). La quatrième zone climatique homogène, située au Sud, s'identifie au climat subéquatorial 1 (climat équatorial de transition 1 ou climat attiéen du littoral) et est caractérisée par une pluviométrie variant entre 1441 et 1837 mm avec une moyenne de 1647 mm. Le régime climatique qui y règne est un régime bimodal à quatre saisons avec deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches. La première saison des pluies dure 5 mois (février-juillet) et la seconde 3 mois (septembre-novembre). Les saisons pluvieuses sont séparées par deux saisons sèches dont la plus grande dure 3 mois (décembre-février) et la petite un mois (août). La cinquième zone climatique homogène, localisée au Centre-Sud, correspond au climat subéquatorial 2 (climat équatorial de transition 2 ou climat attiéen de l'intérieur) et est distinguée par une pluviométrie variant entre 1109 et 1584 mm avec une moyenne de 1280 mm. Le régime climatique défini dans cette zone est un régime bimodal à deux saisons avec une saison pluvieuse qui dure 8 à 9 mois (globalement de mars à novembre) et une saison sèche qui dure 3 à 4 mois (globalement de novembre à février). La sixième zone, localisée au Sud-Ouest, est le climat subéquatorial 3 (climat équatorial de transition 3 ou climat attiéen du Sud-Ouest) qui est marquée par des précipitations fluctuant autour de 2233 mm. Le régime climatique régnant dans cette zone est un régime bimodal à deux saisons avec une saison pluvieuse qui dure 10 mois (mars-décembre) et une saison sèche qui dure 2 mois (janvier-février). Il a été constaté au regard des résultats obtenus et de la confrontation de ces résultats aux travaux antérieurs, que le zonage climatique de la Côte d'Ivoire a connu de légères modifications sans disparition de zone climatique. Ces modifications pourraient être affectées au phénomène de la sécheresse.

Variations climatiques et sécheresse et leurs répercussions sur le climat saisonnier et annuel en Côte d'Ivoire

La Côte d'Ivoire a connu une modification de son régime climatique à partir de l'année 1970. Plusieurs approches différentes et complémentaires ont été utilisées pour évaluer les variations climatiques et la sécheresse. Ces méthodes basées sur des régressions linéaires, des tests de rupture (Pettitt et Hubert) et sur des indices climatiques (indices d'Angot, de Péguy, de Moral et d'aridité UNEP) confirment les résultats des variations climatiques déjà révélés sur l'ensemble de la Côte d'Ivoire. Ainsi, sur l'ensemble des régions climatiques du territoire ivoirien, les régimes pluviométrique et thermométrique moyens ont connu d'importants changements dans leurs évolutions avec une tendance générale respectivement à la baisse et à la hausse entre 1961 et 2016. Les déficits pluviométriques et les excédents thermométriques, qui en ont résulté, tournent respectivement autour de 21% et 8% sur l'ensemble des régions

climatiques. L'étude a permis de constater que la baisse pluviométrique est accentuée au niveau des climats soudanais, attiéen du littoral et attiéen du Sud-Ouest alors que la croissance de la température semble être amplifiée sur l'ensemble des régions climatiques. La fin des années 2000 et surtout la décennie 2010 marque une reprise de la pluviométrie vers des années plus humides dans certaines localités au niveau du climat baouléen. Malgré cette tendance à l'augmentation de la pluviométrie dans certaines localités, on note une persistance de la sécheresse dans d'autres, comme les baisses de 15,8% et 35,7% respectivement à Daloa (climat baouléen) et à Odienné (climat soudanais) depuis les années 2001 et, la baisse de 31,1 % à Tabou (climat attiéen du Sud-Ouest) depuis l'année 2003. Le bouleversement climatique constaté a montré que le climat saisonnier et annuel sur l'ensemble des régions climatiques en Côte d'Ivoire a subi des modifications après 1970. Le caractère « semestre froid plus arrosé que le semestre chaud » est plus prononcé sur la période avant 1970 que sur les périodes après 1970 avec une tendance des semestres chauds à être relativement plus arrosés après 1970 dans certaines localités. La période avant 1970 enregistre les trimestres les plus pluvieux avec un basculement du trimestre le plus pluvieux qui est constaté sur les périodes après 1970 dans certaines localités au niveau des climats baouléen, attiéen du littoral et attiéen du Sud-Ouest. Sur l'ensemble des régions climatiques du territoire ivoirien, certaines localités ont connu une modification de la saison humide après 1970, surtout au niveau des climats soudanais, baouléen, attiéen du littoral, attiéen de l'intérieur et attiéen du Sud-Ouest. Toutefois, le bouleversement observé n'a pas affecté le type de climat sur l'ensemble des régions climatiques en Côte d'Ivoire. Il est demeuré subhumide et humide, malgré la diminution du caractère humide après 1970.

Prévision de la sécheresse en Côte d'Ivoire

Le territoire ivoirien est vulnérable à la sécheresse avec des taux de séquences sèches qui tournent, sur l'ensemble des régions climatiques du pays, autour de 23, 27 et 31% respectivement au niveau des sécheresses météorologique (SPI-3), agrométéorologique (SPI-6 et SPI-9) et hydrométéorologique (SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48). Cependant, les régions climatiques du soudanais et du baouléen restent les plus vulnérables. Un modèle basé sur les régressions linéaires multiples pour la prévision de la sécheresse, présentant différents types de variables explicatives (SPI et précipitations), a été conçu pour chacune des régions climatiques préalablement définies de la Côte d'Ivoire. Ce modèle développé a été calé et validé respectivement sur les périodes 1971-2000 et 2001-2016. Le modèle de régressions linéaires multiples (RLM) conçu a donné des résultats de prévision des sécheresses météorologiques

(SPI-3) et agrométéorologiques (SPI-6 et SPI-9) satisfaisants au niveau du climat attiéen de l'intérieur où le modèle ne peut être utilisé que pour un délai de prévision de 4 mois maximum avec les SPI-3 et SPI-6 et de 6 mois maximum avec les SPI-9. Au niveau des SPI-9, les résultats sont également satisfaisants pour un délai de prévision de 2 mois maximum au niveau des climats baouléen, de montagnes et attiéen du Sud-Ouest. Les prévisions des sécheresses hydrométéorologiques (SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48) ont donné des résultats très performants sur l'ensemble des régions climatiques. Un délai de prévision de 30 ans a été atteint. En validation, sur l'ensemble des régions climatiques et des délais de prévision 1 mois et 30 ans, les performances obtenues sont en moyenne pour le KGE de 78,47 ; 81,10 ; 82,42 et 82,49% respectivement au niveau des SPI-12, SPI-24, SPI-36 et SPI-48. Il est observé que le climat attiéen de l'intérieur est la zone climatique où les performances du modèle de prévision sont meilleures quel que soit le type de sécheresse (SPI) étudié. Malgré qu'il a été constaté des limites dans le délai de prévision (4 mois maximum au niveau de la sécheresse météorologique et 6 mois maximum au niveau de de la sécheresse agrométéorologique), le modèle développé et testé lors de cette étude a démontré sa capacité de prévision de la sécheresse à l'échelle saisonnière et décennale dans un contexte climatique ivoirien marqué par une vulnérabilité à la sécheresse. Il constitue donc un outil de prévision très performant qui peut être utilisé dans les systèmes de suivi et d'annonce précoce à la sécheresse. Ce qui permettra aux décideurs d'établir des plans d'action visant à diminuer l'impact de la sécheresse sur l'ensemble des régions climatiques de la Côte d'Ivoire.

Recommandations

Il faut rappeler que les taux de vulnérabilité à la sécheresse constatés, dans les différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire, constituent une réalité très préoccupante aussi bien pour la recherche que pour les pouvoirs publics. Par conséquent, vu les résultats de cette étude et par rapport aux difficultés rencontrées pour les atteindre, nous recommandons à la communauté scientifique, aux autorités compétentes particulièrement celles en charge de la gestion de la sécheresse et des collectivités locales (SODEXAM, conseils régionaux, etc.) :

- de gérer la sécheresse en tenant compte du découpage en six (6) zones du territoire ivoirien en raison des réalités climatiques différentes d'une zone à l'autre ;
- d'intégrer les résultats de ce travail dans un système de suivi et d'alerte précoce à la sécheresse afin d'aider les populations ivoiriennes à se préparer à d'éventuelles sécheresses dans l'exercice de leurs activités socio-économiques ;
- de diffuser très largement les résultats de ces travaux de recherche ;

- de faciliter l'accès aux données, surtout aux données de mers (anomalies de températures de surface des mers, pressions au niveau de la mer, etc.) pour un diagnostic plus poussé en ce qui concerne la prévision de la sécheresse;
- d'intensifier le réseau de mesure des paramètres climatiques par la transformation de toutes les stations de mesure en stations synoptiques afin d'approfondir les connaissances sur les variations climatiques et aussi, de disposer d'une diversité de variables qu'on pourrait utiliser en entrée des modèles de prévision de la sécheresse.

Perspectives

Il faut retenir que ce présent travail, a apporté une contribution à l'étude des variations climatiques et de la sécheresse par la mise à disposition d'un outil d'aide à la décision pour la surveillance des sécheresses. Les résultats obtenus pourraient être approfondis par d'autres études sur ce même phénomène. Dans l'avenir et pour une gestion efficiente de la sécheresse, il est préconisé les suggestions suivantes :

- l'intégration des variables océaniques, en entrée du modèle, dans un souci de rechercher un outil le plus performant possible. Il s'agit de prendre en compte d'autres variables explicatives des indices SPI telles que les données de mer (anomalies de températures de surface des mers, pressions, etc.) ;
- l'application de l'intelligence artificielle dans la prévision de la sécheresse, en l'occurrence les modèles hybrides (Ondelettes-réseaux de neurones artificiels, neuroflou, etc.) pour tester la pertinence de l'apport de ceux-ci à prévoir la sécheresse dans les différentes régions climatiques de la Côte d'Ivoire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACHARKI S., AMHARREF M., RACHID E., H., BERNOUSSI A. (2019). Évaluation par approche statistique de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau : application au périmètre du Gharb (Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol.32, N°3, 291-315.

ABDELALI S., WADI B., HASSAN F., MOHAMMED H., ABDELMALIK S. (2011). Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004). *Revue Sécheresse*, Vol.22, N°3, 139-148.

ADINGRA M. P. K., COULIBALY Y., OUATTARA Z., COULIBALY I. (2018). Caractéristiques pétrographiques et géochimiques des métasédiments de la partie sud-est du bassin de la comoé (nord d'alépé-sud est de la Côte d'Ivoire). *Revue Ramres*, Vol. 06, N°2, 28-35.

ADJA M.G., DJEMIN E.J., N'DRI O.F.A., TOHOURI P., KOUAME K.J., JOURDA J.P. (2019). Apport de l'Analyse Hydrologique et de la Modélisation de la Relation Pluie-Débit dans le Suivi Quantitatif des Ressources en Eau dans un Contexte de Variabilité Climatique: Cas du Sous-Bassin Versant du Kouto (Nord de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, Vol. 154, N°2, 192-212.

AHOUSSE K. E., KOFFI Y. B., KOUASSI A. M., SORO G., SORO N., BIEMI J. (2013). Étude de la variabilité hydroclimatique et de ses conséquences sur les ressources en eau du Sud forestier et agricole de la Côte d'Ivoire : cas de la région d'Abidjan-Agboville. *International Journal of Pure & Applied Bioscience*, Vol.1, N°6, 30-50.

ALEXANDRE F. et MERING C. (2018). Changements socio-environnementaux et dynamiques rurales en Afrique de l'Ouest. *Espace géographique*, Vol.3, Tome 47, 193-200.

AMOUSSOU E. (2010). Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvial lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest). Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, France 313 p.

ANCTIL F., LAROUCHE W., VIAU A. A., PARENT L. E. (2002). Interprétation de l'indicateur standardisé de précipitation à l'aide d'une analyse statistique régionale. *Canadian Journal of Soil Science*, Vol.82, N°1, 115-125.

ANDERSSON J. C. M., ARHEIMER B., TRAORÉ F., GUSTAFSSON D., ALI A. (2017). Process refinements improve a hydrological model concept applied to the Niger River basin. *Hydrological Processes*, N°31, 4540–4554,

ANDRE J. C., CANEILL J.-Y., DEQUE M., ROGEL P., TERRAY L., TOURE Y. (2002). La prévision du climat : de l'échelle saisonnière à l'échelle décennale. *Comptes Rendus Géoscience*, Tome 334, 1115-1127.

ANSER A., (2012). Guide pratique pour l'utilisation des indices et coefficients climatologiques. Éd. Office des Publications Universitaire, Alger, 117 p.

ARDOIN B. S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II, France, 437 p.

ARDOIN B. S., BOYER F.-J., DEZETTER A., DIEULIN C., MAHE G., PATUREL J.-M., SERVAT E. (2005). Prévision des ressources en eau en Afrique au 21ème siècle. International Hydrological Programme. *Documents Techniques en hydrologie*, N°80, 155-162.

ASSEMIAN A.S. (2014). Étude des potentialités en eau souterraine du département de Bongouanou (Centre-Est de la Côte d'Ivoire) par télédétection et SIG. Thèse de Doctorat, Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 208 p.

ASSOMA T.V. (2013). Variabilité hydroclimatique et évaluation des ressources en eau du bassin côtier de l'Agnéby au Sud-est de la Côte d'Ivoire : apport des outils statistiques, de la modélisation et de la télédétection optique et radar. Thèse de Doctorat, Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 197 p.

ATCHEREMI K. N. D. (2019). Effet du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la rivière Davo (sud-ouest de la Côte d'Ivoire) et analyse des mesures endogènes d'adaptation : apport de la modélisation hydrologique avec le logiciel HYDROTEL. Thèse de Doctorat, Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 117 p.

BALAH B. et AMARCHI H. (2016). Variabilité des séries pluviométriques du bassin versant de la Seybouse du Nord Est-Algérien. *Revue Sciences et Technologies*, Synthèse 32, 86 -97.

BALLIET R. (2018). Impacts du changement climatique et de la pression anthropique sur l'environnement naturel et humain dans la région du gôh (centre-ouest de la côte d'ivoire) :

analyse de mesures d'adaptation endogène. Thèse de Doctorat, Université Félix HOUPOUËT- BOIGNY de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 201 p.

BAMBA A., DIEPPOIS B., KONARE A., PELLARIN T., BALOGUN A., DESSAY N., KAMAGATE B., SAVANE I., DIEDHIOU A. (2015). Changes in vegetation and rainfall over West Africa during the last three decades (1981-2010). *Atmospheric and climate Sciences*, N°5, 367-379.

BEDOUM A., BOUKA BIONA C., ALLADOUM M., ADOUM I., BAOHOUTOU L. (2014). Impact de la variabilité pluviométrique et de la sécheresse au sud du Tchad : effets du changement climatique. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, N°23, 13-30.

BELAYNEH A., ADAMOWSKI J., KHALIL B., OZGA-ZIELINSKI B. (2014). Long-term SPI drought forecasting in the Awash River Basin in Ethiopia using wavelet neural networks and wavelet support vector regression models. *Journal of Hydrology*, N°508, 418-429.

BELHADJ L. B. (2012). Evaluation de la sécheresse météorologique et la qualité des eaux du barrage de Sidi Yacoub (Bassin versant de l'oued Sly, Chlef). Master, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, Algérie. 121p.

BIED-CHARRETON M. (2009). Sécheresse, désertification et développement en Afrique. Cours de master 2, Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines, France, 44p

BIGOT S. (2002). Détection des anomalies et discontinuités dans une base de donnée (Détection des discontinuités temporelles au sein des séries climatiques : point méthodologique et exemples d'application). Actes des « Journées de Climatologie » de la Commission « Climat et Société » du Comité National Français de Géographie, Strasbourg, 21-23 mars 2002, <http://cnfg.univ-paris1.fr/com/clima1.htm>

BIGOT S., BROU Y. T., OSZWALD J., DIEDHIOU A. (2005). Facteurs de la variabilité climatique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Revue Sciences et Changements Planétaires/Sècheresse*, Vol.16, N°1, 5-13.

BODIAN A. (2014). Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo*, N°8, 297-312.

BOUALI L. (2009). Prévisibilité des précipitations ouest africaines (échelles intrasaisonnières et saisonnières) au travers des simulations type DEMETER et des observations. *Climatologie*.

Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, France, 156 p.

BOUBOU M. (2007). Contribution aux méthodes de classification non supervisée via des approches prétopologiques et d'agrégation d'opinions. Thèse de Doctorat, Université Claude Bernard - Lyon I, France 190p.

BOUDAD B., SAHBI H., MANSSOURI I., MANSSOURI T., BOUDEBBOUZ B. (2015). Prédiction de la sécheresse dans le bassin d'Inaouène en utilisant les réseaux de neurones et la régression linéaire multiple. *Journal of SAWIS*, Vol.1, N°2, 13-18.

BRIDI K. (2012). Impact des changements climatiques sur l'environnement du bassin du Tensift. Master, Université Sidi Mohammed Ben Abdallah, Maroc, 78 p.

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, 226 p.

BROU Y. T. et CHALEARD J. L. (2007). Visions paysannes et changements environnementaux en Côte d'Ivoire. *Annales de géographie*, Vol.1 N° 653, 65-87.

CAMARA M., DIEDHIOU A., SOW B., A., DIALLO M., D., DIATTA S., MBAYE I., DIALLO I. (2013). Analyse de la pluie simulée par les modèles climatiques régionaux de CORDEX en Afrique de l'Ouest. *Sécheresse*, Vol.24 N° 1, 14-28.

CAMILLE S. (2012). Hydrologie spatiale pour le suivi des sécheresses du bassin méditerranéen. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 179 p.

CANTAT O., LE GOUEE P., BENSALD A., SAVOURET E. (2010). Une méthode originale de spatialisation d'échelle fine des bilans hydriques. Actes du Colloque international de l'AIC, « Risques et changement climatique », Rennes, 101-106.

CARPENTIER F. G. (2014). Analyses multidimensionnelles et applications informatiques. Document de cours, Université de Brest, France, 140p.

CHEN H., XU C-Y, GUO S. (2012). Comparison and evaluation of multiple GCMs, statistical downscaling and hydrological models in the study of climate change impacts on runoff. *Journal of hydrology*, N°434-435, 36-45.

CHIBANE B., BENTCHAKAL M., MEDJERAB A., BENFARES B. (2015). De la variabilité et de la structure de pluie annuelle dans une région semi-aride: cas du bassin versant

de la MACTA (Nord-Ouest algérien). *Larhyss Journal*, N°23, 213-229.

CHLOE L. (2013). Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne. Géographie. Thèse de Doctorat, Université Rennes 2, France, 259 p.

COOLS J.D., INNOCENTI, O'BRIEN S. (2016). Lessons from flood early warning systems. *Environmental Science & Policy*, N°58, 117-122.

COULIBALY A. et DJE B. (2009). Characterization of drought with climate indices in Africa: Case of Ivory Coast. World Meteorological Organization Commission for Agricultural Meteorology, Workshop on drought. Présentation, Beijing (CHINE), 35p.

COULIBALY I., KOUAMELAN A. N., DJRO S. C., COULIBALY Y. (2017). Pétrographie des volcanites et plutonites de la partie Sud du sillon volcano-sédimentaire de Toumodi-Fetekro (Côte d'Ivoire). *European Scientific Journal*, Vol.13, N°30, 199-221.

DAKI Y., ZAHOUR G., LACHGAR R., EL HADI H. (2016). Caractérisation de la sécheresse climatique du bassin versant d'Oum Er Rbia (Maroc) par le biais de l'indice de précipitation standardisé (SPI). *European Scientific Journal*, Vol.12 N°14, 198-209.

DESCROIX L., DIONGUE NIANG A., DACOSTA H., PANTHOU G., QUANTIN G., DIEDHIOU A. (2013). Evolution des pluies de cumul élevé et recrudescence des crues depuis 1951 dans le bassin du Niger Moyen (Sahel). *Climatologie*, N°10, 37-49.

DESCROIX L., DIONGUE N. A., PANTHOU G., BODIAN A., SANE Y., DACOSTA H., MALAM ABDOU M., VANDERVAERE J.-P., QUANTIN G. (2015). Evolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest à travers deux régions : La SénéGambie et le bassin du Niger Moyen. *Climatologie*, N°12, 25-43.

DIDIER D., BERNATCHEZ P., DUMONT D. (2017). Systèmes d'alerte précoce pour les aléas naturels et environnementaux : virage ou mirage technologique ? *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 30, N° 2, 115-146

DIOMANDE B.I. (2011). Evolution climatique récente dans les régions Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire et ses impacts environnementaux et socio-économiques. Thèse de Doctorat Unique, Université CHEIKH ANTA DIOP de DAKAR, Sénégal, 181 p.

DJERBOUAI S. (2016). Méthodes de l'intelligence artificielle pour la prévision des sécheresses. Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Algérie, 141p.

DJOUFACK-MANETSA V. (2011). Étude multi-échelles des précipitations et du couvert végétal au Cameroun : Analyses spatiales, tendances temporelles, facteurs climatiques et anthropiques de variabilité du NDVI. Thèse de Doctorat, Universités de Bourgogne et de Yaoundé I, France-Cameroun, 294p.

FANTA M. (2010). Développement et analyse des critères de vulnérabilité des populations sahéliennes face à la variabilité du climat: le cas de la ressource en eau dans la vallée de la sirba au Burkina Faso. Thèse de doctorat, Université du Québec à Montréal, Canada, 196p.

FARAH A. K. (2014). Changement climatique ou variabilité climatique dans l'Est algérien. Master, Université Constantine 1, Algérie, 113 p.

FAYE C., SOW A. A., NDONG J. B. (2015). Étude des sècheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : caractérisation et cartographie de la sécheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. *Physio-Géo*, N°9, 17-35.

FOSSOU R. M. N., LASM T., SORO N., SORO T., SORO G., DE LASME O., Z., BAKA D., ONETIE O.Z., OROU R. (2014a). Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines: cas des stations de Bocanda et de Dimbokro au Centre-Est de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *Larhyss Journal*, N°21, 87-110.

FOSSOU R. M. N., SORO N., TRAORE V. B., LASM T., SAMBOU S., SORO T., OROU K. R., CISSE M. T., KANE A. (2014b). Variabilité climatique et son incidence sur les ressources en eaux de surface : cas des stations de Bocanda et de Dimbokro, Centre-Est de la Côte d'Ivoire en Afrique de l'Ouest. *Révue Afrique Science*, Vol. 10, N°4, 118-134.

FOWLER K., COXON G., FREER J., PEEL M., WAGENER T., WESTERN A., WOODS R., ZHANG, L. (2018). Simulating Runoff Under Changing Climatic Conditions: A Framework for Model Improvement. *Water Resources Research*, N°54, 9812–9832.

FRAPPART F., HIERNAUX P., GUICHARD F., MOUGIN E., KERGOAT L., ARJOUNIN M., LAVENU F., KOITE M., PATUREL J.-E., LEBEL T. (2009). Rainfall regime across the Sahelian band in the Gourma region, Mali. *Journal of Hydrology*, N°375, 128-142.

GARCIA C. et FEARNLEY C.J. (2012). Evaluating critical links in early warning systems for natural hazards. *Environmental Hazards*, Vol. 11, N°2, 123-137.

GARCIA F., FOLTON N., OUDIN L. (2017). Which objective function to calibrate rainfall–

runoff models for low-flow index simulations. *Hydrological Sciences Journal*, Vol.62, N°7, 1149-1166.

GARRIC G., DOUVILLE H., DÉQUÉ M. (2002). Prospects for improved seasonal predictions of monsoon precipitation over West-Africa. *International Journal of Climatology*, N°22, 331-345.

GIEC-Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du GIEC, Genève, Suisse, 103p.

GIEC-Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (2013). Changements climatiques 2013. Les éléments scientifiques. *OMM/PNUE*, 34 p.

GIEC-Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (2014). Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des groupes de travail i, ii et iii au cinquième rapport d'évaluation du GIEC, Genève, Suisse, 161 p.

GNANZOU A. (2014). Etude des séries volcano-sédimentaires de la région de Dabakala (Nord-Est de la Côte d'Ivoire) : genèse et évolution magmatique. Contribution à la connaissance de la minéralisation aurifère de Bobosso dans la série de la Haute-Comoé. Thèse de doctorat, Université Paris-Sud Orsay, France et Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 303p.

GODDARD L. (2016). From science to service. *Revue Science*, Vol.353, N°6306, 1366–1367.

GOULA B. T. A., KONAN B., BROU Y. T., SAVANE I., FADIKA V., 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. *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol.52, N°2, 49-67.

GOULA B.T.A., SORO G.E., KOUASSI W., SROHOUROU B. (2012). Tendances et ruptures au niveau des pluies journalières extrêmes en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *Hydrological Sciences Journal*, Vol.57, N°6, 1067-1080.

GRAHAM L.P., ANDERSSON L., HORAN M., KUNZ R., LUMSDEN T., SCHULZE R., WARBURTON M., WILK J., YAN W. (2011). Using multiple climate projections for assessing hydrological response to climate change in the Thukela River Basin, South Africa. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 36, N°14-15, 727-735.

- GÜLER C., THYNE G. D., MCCRAY J. E., TUNER A. K. (2002).** Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, N°10, 455-474.
- GUPTA H. V., KLING H., YILMAZ K. K., MARTINEZ G. F. (2009).** Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, N°377, 80–91,
- HAMATAN M., MAHE G., PATUREL J. E. (2004)** - Synthèse et évaluation des prévisions saisonnières en Afrique de l’Ouest. *Sécheresse*, Vol. 15, N° 3, 279-286.
- HAN P., WANG P. X., ZHANG S. Y., ZHU D. H. (2010).** Drought forecasting based on the remote sensing data using ARIMA Models. *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 54, N°11-12, 1398-1403.
- HANGNON H., DE LONGUEVILLE F., OZER P. (2015).** Précipitations extrêmes et inondations à Ouagadougou : Quand le développement urbain est mal maîtrisé. XXVIII^e Colloque de l’Association Internationale de Climatologie, Liège, 497-502.
- HEWITT C., BUONTEMPO C. NEWTON P. (2013).** Using climate predictions to better serve society’s needs. *Eos, Transactions American Geophysical Union* Vol.94, N°11, 105–107.
- HINGRAY B., PICOUET C., MUSY A. (2012).** Hydrologie: une science pour l’ingénieur. Edition Presse Polytechniques et Universitaires, Romandes 2^{ème} édition, 600 p.
- HONG L., STEIN B., CHONG-YU X. (2015).** Stability of model performance and parameter values on two catchments facing changes in climatic conditions. *Hydrological Sciences Journal*, Vol.60, N°7-8, 1317-1330.
- HOUSSOU N. (2013).** Etude pétrologique, structurale et métallogénique du gisement aurifère d’Agbahou, Divo, Côte d’Ivoire. Thèse de doctorat, Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Cocody-Abidjan, Côte d’Ivoire, 177 p.
- IBRAHIM B. (2012).** Caractérisation des saisons de pluies au Burkina Faso dans un contexte de changement climatique et évaluation des impacts hydrologiques sur le bassin du Nakanbé. Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 245p.
- IBRAHIM K., WAN ZIN W., JEMAIN A. (2010).** Evaluating the dry conditions in Peninsular Malaysia using bivariate copula. *Anziam Journal*, N°51, 555-569.

INS-Institut National de la Statistique (2014). Recensement Général des Populations et Habitats 2014, 91 p.

INS et ICF International-Institut National de la Statistique et Classification internationale du fonctionnement du handicap et de la santé (2012). Enquête démographique et de santé et à indicateurs multiples de Côte d'Ivoire 2011-2012. Calverton, Maryland, USA, 378p.

IONAC N., GRIGORE E., CONSTANTIN D.M. (2015). Évaluation des phénomènes de dessèchement et de sécheresse dans la zone continentale du plateau de la Dobroudja du Sud. *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège 2015, 269-274.

IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change (2000). Emission Scenarios. Special Report of the IPCC, *Cambridge University Press*, UK, 570 p.

IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change (2001). Climate Change 2001. Impacts, adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC. *Cambridge University Press*, UK, 1032 p.

JACOBI J. et D. PERRONE D. (2013). A tool for calculating the Palmer drought indices. *Water Resources Research*, Vol.49, N°9, 6086-6089.

JOUILIL I., BITAR K., SALAMA H., AMRAOU I., MOKSSIT A., TAHIRI M. (2013). Sécheresse météorologique au bassin hydraulique OUM ER RBIA durant les dernières décennies. *Larhyss Journal*, N°12, 109-127.

JURAJ M. (2003). Hydrological model selection for the CFCAS project: Assessment of water resources risk and vulnerability to changing climatic conditions. Project report 1, 40 p.

KABORE P. N., OUEDRAOGO A., SANON M., YAKA P., SOME L. (2017). Caractérisation de la variabilité climatique dans la région du centre-nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015. *Climatologie*, N°14, 82-95.

KANOHIN F. (2010). Evolution des ressources en eau de surface et souterraine dans un contexte de variabilité climatique dans la région de Daoukro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de Doctorat, Université Abobo-Adjamé d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 146 p.

KARIMOU B. M., AMBOUTA K., SARR B., TYCHON B. (2015). Analyse des phénomènes climatiques extrêmes dans le Sud-Est du Niger. *XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège, 537-542.

- KELMAN I. et GLANTZ M.H. (2015).** Analyzing the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction. *International Journal of Disaster Risk Science*, Vol. 6, N°2, 105-106.
- KHADR M., MORGENSCHWEIS G., SCHLENKHOFF A. (2009).** Analysis of meteorological drought in the Ruhr basin by using the standardized precipitation index. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, N°57, 607-616.
- KHOUALDIA W. (2015).** Contribution à l'étude de la variabilité climatique et son impact sur les ressources hydriques « cas d'oued Medjerda Nord-Est Algérie ». Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algérie, 159p.
- KLEMM T. et MCPHERSON R. A. (2017).** The development of seasonal climate forecasting for agricultural producers. *Agricultural and forest meteorology*, N°232, 384–399.
- KLING H., FUCHS M., PAULIN M. (2012).** Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, N°424, 264-277.
- KNOBEN W. J. M., WOODS R. A., FREER, J. E. (2018).** A Quantitative Hydrological Climate Classification Evaluated with Independent Streamflow Data. *Water Resources Research*, N°54, 5088–5109.
- KODJA D. J. (2018).** Indicateurs des événements hydroclimatiques extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en Afrique de l'Ouest. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, France, 288 p.
- KOFFI Y. B. (2007).** Modélisation pluie-débit en région tropicale humide : application des réseaux de neurones sur quatre stations hydrométriques du Bandama Blanc (Bada, Marabadiassa, Tortiya et Bou) situées au Nord de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 219p.
- KOITA M. (2010).** Caractérisation et modélisation du fonctionnement hydrodynamique d'un aquifère fracturé en zone de socle. Région de Dimbokro-Bongouanou (Centre Est de la Côte d'Ivoire). Thèse unique de Doctorat, Université de Montpellier II et Sciences et Techniques du Languedoc, France, 220 p.
- KONATE L. (2018).** Contribution des indices climatiques et des modèles de pluies à la surveillance et prévention des inondations pluviales en milieu urbain : cas du district d'Abidjan (sud de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 199p.

KOUADIO K.Y., OCHOU D. A., SERVAIN J. (2003). Tropical Atlantic and rainfall variability in Côte d'Ivoire". *Geophysical Research Letters*, N°30, 1-15.

KOUAKOU K. E. (2011). Impacts de la variabilité climatique et du changement climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : Cas du bassin versant de la Comoé. Thèse Unique de Doctorat, Université Abobo-Adjamé d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 186 p.

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*, N°3, 1-8.

KOUAKOU K. E., KOUADIO Z. A., KOUASSI F. W., GOULA B. T. A., SAVANE I. (2014). Modélisation de la température et de la pluviométrie dans un contexte de changement climatique : cas de l'Afrique de l'Ouest. *Revue Afrique Science* Vol.10, N°1, 145-160.

KOUAKOU K. E., MOUSSA H., KOUASSI A. M., GOULA B. T. A., SAVANE I. (2017). Redefinition of homogeneous climatic zones in Côte d'Ivoire in a context of climate change. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol.8, N°11, 453-462.

KOUAMÉ K. A. (2013). Application du modèle hydrologique distribué HYDROTEL à la simulation des écoulements des eaux en milieu tropical humide soumis aux pressions anthropiques : cas du bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 168 p.

KOUAME K. F. (2011). Influence de la variabilité climatique et de la dégradation environnementale sur le fonctionnement de l'hydrosystème du N'zo dans la région guinéenne et semi-montagneuse de la Côte d'Ivoire. Contribution de la télédétection, des systèmes d'Informations Géographiques et du modèle hydrologique HYDROTEL. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 379 p.

KOUAME Y. M. (2017). Impacts des changements climatiques et de la dynamique d'occupation du sol sur les eaux de surface dans le bassin versant de la Davo, Côte d'Ivoire. Thèse de doctorat, Université Nangui ABROGOUA d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 195 p.

KOUASSI A. M. (2007). Caractérisation d'une modification éventuelle de la relation pluie-débit et ses impacts sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest : cas du bassin versant du N'zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 210 p.

KOUASSI A. M., ASSOKO A. V. S., DJE K. B., KOUAKOU K. E., KOUAME 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, 47-59.

KOUASSI A. M., KOUAKOU K. E., KADIO K. K. R., BIEMI J. (2014). Conception de modèles statistiques à variables hydrogéologiques pour la prévision de la profondeur limite d'arrêt de forage d'eau en milieux de socle en Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, Vol. 11, N°1, 181-197.

KOUASSI A.M., KOUAME K.F., AHOUSSE K. E., OULARE S., BIEMI J. (2012). 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 Technologies*, N°20, 124 – 146.

KOUASSI A. M., KOUAME K. F., KOFFI Y. B., DJE K. B., PATUREL J. E., SEKOUBA O. (2010), Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en Afrique de l'Ouest: cas du bassin versant du N'Zi (Bandama) en Côte d'Ivoire. *Cybergeo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, mis en ligne le 07 décembre 2010, URL: <http://cybergeo.revues.org/index23388.html2010>.

KOUASSI A.M., KOUAME K.F., KOFFI Y.B, KOUAME K.A., OULARE S., BIEMI J. (2011). Modélisation des débits mensuels par un modèle conceptuel: application à la caractérisation de la relation pluie-débit dans le bassin versant du N'Zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Journal Africain de Communication Scientifique et Technologique*, N°11, 1377-1391.

KOUASSI A.M., KOUAME K.F., SALEY M.B., BIEMI J. (2013). Impacts des changements climatiques sur les eaux souterraines des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien en Afrique de l'ouest: cas du bassin versant du N'zi-Bandama (Côte d'Ivoire). *Larhyss Journal*, N°16, 121-138.

KOUASSI A. M., N'ZAI R K. S. A., KOFFI Y. B., BIEMI J. (2016). Application of multiple linear regression models for predicting drilling water flow in the hard rock aquifers: Example of N'zi-Comoé area (Central-East of Ivory Coast), a review. *The Journal of Water Sciences and Environment Technologies*, Vol.2, N°1, 130-141.

KOUDOU A. (2013). Conception d'outils d'aide à la décision pour la gestion intégrée des ressources en eau dans un contexte de variabilité climatique : application à la sélection des zones à potentialité aquifère et moins vulnérables à la pollution du bassin versant du N'zi. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 211 p.

KOUDOU A., KOUAME K. A., NIAMKE K. H., KOUAME K. F., SALEY M. B., ADJA M.G. (2015). Contribution de l'analyse en composantes principales à la régionalisation des pluies du bassin versant du N'zi, de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, N°26, 156-172.

KOUTROULIS A.G., TSANIS I.K., DALIAKOPOULOS I.N., JACOB B. (2013). Impact of climate change on water resources status: A case study for Crete Island, Greece. *Journal of hydrology*, N°479, 146-158

LEE J.-Y., SHIH Y.-T., LAN C.-Y., LEE T.-Y., PENG T.-R., LEE C.-T., JR-CHUAN HUANG J.-C. (2020). Rainstorm Magnitude Likely Regulates Event Water Fraction and Its Transit Time in Mesoscale Mountainous Catchments: Implication for Modelling Parameterization. *Water*, Vol.12, N°1169, 1-18.

LLOYD-HUGHES B. et SAUNDERS M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*., N°22, 1571-1592.

LOBLIGEIS F. (2014). Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ? Diagnostic sur 181 bassins versants français. Thèse de Doctorat, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech), France, 272p.

LY M., TRAORE S. B., ALHASSANE A., SARR B. (2013). Evolution of some observed climate extremes in the west African Sahel. *Weather and Climate Extremes*, N°1, 19-25.

MARJ A. F. et MEIJERINK A. M. (2011). Agricultural drought forecasting using satellite images, climate indices and artificial neural network. *International journal of Remote Sensing*, Vol.32, N°24, 9707-9719.

MCKEE T. B., DOESKEN N. J., KLEIST J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. American Meteorological Society, 8th Conference on applied climatology, 17-22 January, Anaheim, CA, 179-184.

MEINKE et STONE (2004). Prévisions météorologiques, anticiper à dix ans les variations du

climat. *Revue L'observatoire*, N° 444, 10-12.

MELSEN L. A., TEULING A. J., TORFS P. J. J. F., ZAPPA M., MIZUKAMI N., MENDOZA P. A., CLARK M. P., UIJLENHOET R. (2019). Subjective modeling decisions can significantly impact the simulation of flood and drought events. *Journal of Hydrology*, N°568, 1093-1104.

MERABTI A. (2018). Caractérisation, variabilité et prévision de la sécheresse dans le Nord-est Algérien. Thèse de Doctorat, Ecole nationale supérieure d'Hydraulique Abdellah Arbaoui, Algérie, 200p.

MINADER-Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural (2017). Synthèse des volumes du Recensement des Exploitants et Exploitations Agricoles (REEA) 2015/2016. Rapport provisoire, Vol.1, 52p.

MINEDD-Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (2020). Plan national sécheresse de Côte d'Ivoire 2021-2025. Rapport final, 131p.

MIRABBASIA R., ANAGNOSTOUB E. N., FAKHERI-FARDA A. DINPASHOHA Y., ESLAMIANC S. (2013). Analysis of meteorological drought in northwest Iran using the Joint Deficit Index. *Journal of Hydrology*, N°492, 35-48.

MISHRA A.K. et DESAI V. R. (2006). Drought forecasting using feed-forward recursive neural network. *Ecological Modelling*, Vol.198, N°1-2, 127-138.

MISHRA A.K. et SINGH V.P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, N°391, 202-216.

MOKHTARI N., MRABET R., LEBAILLY P., BOCK L. (2013). Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. *Revue marocaine des sciences agronomiques et vétérinaire*, Vol.2, N°1, 50-66.

N'DA K.C., DIBI-KANGAH P., DJIBRIL D.N., DJE K.B., ZUELI K.B. (2016). Changements climatiques : quelques aspects de la variabilité climatique dans le bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire. Programme d'Appuis Stratégique à la Recherche Scientifique (PASRES), 86-104.

NEUSSNER O. (2015). Early warning-Some recent developments. *Planet@Risk*, Vol. 3, N°1, 24-32.

OMM-Organisation Mondiale Météorologique (2006). Suivi de la sécheresse et alerte précoce: principes, progrès et enjeux futurs, OMM-N°1006, Genève, Suisse, 26 p.

OMM-Organisation Mondiale Météorologique (2012). Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé, OMM-N°1090, Genève, Suisse, 17 p.

OMM et GWP-Organisation Mondiale Météorologique et Global Water Partnership (2016). Manuel des indicateurs et indices de sécheresse, OMM et GWP, n°1173, Genève, Suisse, 52 p.

ONU-Organisation des Nations Unis (2015). Transformer notre monde : le Programme de développement durable à l'horizon 2030. Document final de la 70^{ème} session de l'assemblée générale, New York, Etats Unis, 38 p.

OSS-Observation du Sahara et du sahel (2006). Mise en place d'un système d'alerte précoce à la sécheresse dans 3 pays de la rive sud de la méditerranée : l'Algérie, le Maroc et la Tunisie. 60p

OSS-Observation du Sahara et du sahel (2013). Vers un système d'alerte précoce à la sécheresse au Maghreb, collection synthèse N 04, P15-16-33-36.

OSUCH M., ROMANOWICZ R. J., BOOIJ M. J. (2015). The influence of parametric uncertainty on the relationships between HBV model parameters and climatic characteristics. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 60, N°7-8, 1299-1316.

OTCHOUMOU K.F., SALEY M.B., AKE G.E., SAVANE I., DJE K.B. (2012). Variabilité climatique et production de café et cacao dans la zone tropicale humide: Cas de la région de Daoukro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol.1, N°2, 194-215.

OUATTARA G. et KOFFI G., B. (2014). Typologie des granitoïdes de la région de Tiassalé (Sud de la Côte d'Ivoire - Afrique de l'Ouest) : Structurologie et Relations Génétiques. *Revue Afrique Science*, Vol.10, N°2, 258 – 276.

OUATTARA Z. (2015). Caractères lithostratigraphique, structural, géochimique et métallogénique du gisement d'or de Bonikro, sillon birimien de Fettekro, centre-sud de la Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Félix HOUPHOUET-BOIGNY de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 256 p.

PHAM X. T. (2008). Etude climatique de la mousson vietnamienne et applications à la prévision saisonnière. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, France, 163 p.

PLANTON S., CAZENAVE A., DELECLUSE P., DORFLIGER N., GAUFRES P., IDIER D., JAMOUS M., LE COZANNET G., LE TREUT H., PEINGS Y., JOUZEL J. (2012). Changement climatique et niveau de la mer: de la planète aux côtes françaises. Le Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement (MEDDTL) de la France, 49p.

PNUD-Programme des Nations Unis pour le Développement (2011). Intégration de la gestion du risque sécheresse. Manuel introductif. Document du programme de développement intégré des zones arides (IDDP), Nairobi, Kenya, 73p.

POOL S., VIS M., SEIBERT J. (2018). Evaluating model performance: towards a non-parametric variant of the Kling-Gupta efficiency. *Hydrological Sciences Journal*, Vol.63, N°13-14, 1941-1953.

REZAEIAN-ZADEH M., STEIN A., COX J. P. (2016). Drought Forecasting using Markov Chain Model and Artificial Neural Networks. *Water Resource Manage*, N°30, 2245–2259.

REZAEIAN-ZADEH M. et TABARI H. (2012). MLP-based drought forecasting in different climatic regions. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 109, N° 3-4, 407-414.

RIBEIRO S., CAINETA J., COSTA A. (2016). Review and discussion of homogenisation methods for climate data. *Physics and Chemistry of the Earth*, N°94, 167-179.

SALAMA H. (2010). Régionalisation pluviométrique du bassin Tensift (Maroc), *Larhyss Journal*, N°09, 111-119.

SARR A., B. et CAMARA M. (2017). Evolution des indices pluviométriques extrêmes par l'analyse de modèles climatiques régionaux du programme CORDEX : Les projections climatiques sur le Sénégal. *European Scientific Journal*, Vol.13, N°17, 206-222.

SCARPARI E.S.J. (2019). Evaluation de la valeur ajoutée des données physiographiques à haute résolution dans la modélisation hydrologique distribuée: cas d'application de la plateforme physitel-hydrotel sur le bassin de la rivière St-charles, Québec, Canada. Mémoire de Maitrise, Institut National de la Recherche Scientifique, Université du Québec, Canada, 113p.

SEBAIBI A. (2014). Potentialités agro-climatiques de la région de Zenata et de Maghnia. Étude

d'une longue série climatique. Mémoire d'Ingéniorat, Université ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEM, Algérie, 166p.

SERVAT E., PATUREL J.E., LUBÈS-NIEL H., KOUAMÉ B., MASSON J.M., TRAVAGLIO M., MARIEU B. (1999). De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol.12, N°2, 363-387.

SINGLA S. (2013). Prévisibilité des ressources en eau à l'échelle saisonnière en France. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 234 p.

SIQUEIRA V. A., PAIVA R. C. D., FLEISCHMANN A. S., FAN F. M., RUHOFF A. L., PONTES P. R. M., PARIS A., CALMANT S., COLLISCHONN W. (2018). Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*, N°22, 4815–4842.

SOARES M.B., ALEXANDER M., DESSAI S. (2018). Sectoral use of climate information in Europe: A synoptic overview. *Climate Services* N°9, 5–20.

SOLOMATINE D.P. et WAGENER T., (2011). Hydrological Modeling. *Treatise on Water Science*, N°2, 435–457

SORO G. E. (2011). Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Abobo-Adjamé d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 172 p.

SORO G., AHOUSI K.E., TRAORE A., SORO N. (2017). Impacts de la variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le « V » Baoulé (centre de la Côte d'Ivoire) au cours de la période 1966-2000 sur les ressources en eau. *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement*, Vol.2, N°3, 7-10.

SORO G.E., ANOUMAN D.G.L., GOULA BI T.A., SROHOROU B., SAVANE I. (2014). Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique à diverses échelles de temps en climat de type soudanais : cas de l'extrême nord-ouest de la Côte d'Ivoire. *Larhyss Journal*, N°18, 107-124.

SORO T.D. (2014). Evolution des ressources en eau du bassin versant du Haut Bandama à Tortiya (Nord de la Côte d'Ivoire) dans un contexte de variabilité et de changement climatiques: impacts hydrologiques, hydrogéologiques et hydrochimiques. Thèse de Doctorat, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 243 p.

SOROKOBY V.M., SALEY M.B., KOUAME K.F., DJAGOUA M.E.V., BERNIER M., AFFIAN K., BIEMI J. (2010). Utilisation des images Landsat ETM+ et du SIRS pour la cartographie lineamentaire et thematique de Soubre-Meagui (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire): contribution à la gestion des ressources en eau souterraine. *Téledétection*, Vol.9, N°3-4, 209-223.

SOROKOBY V. M., SALEY M. B., KOUAME K.F., DJAGOUA E. M. V., AFFIAN K., BIEMI J. (2013). Variabilité spatio-temporelle des paramètres climatiques et son incidence sur le tarissement dans les bassins versants de Bô et Debo (département de Soubré au Sud-ouest de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 2, N°3, 287-299.

TAIBI S. (2011). Analyse du régime climatique au Nord de l'Algérie. Master, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie El Harrach Alger, Algérie, 149 p.

TALIA A., MEDDI M., BEKKOUSSA B. S. (2011). Etude de la variabilité de la pluviométrie dans les hauts plateaux et le Sahara algériens. *Sécheresse*, N°22, 149-58.

THOMPSON J.R., GREEN A.J., KINGSTON D.G., GOSLING S.N. (2013). Assessment of uncertainty in river flow projections for the Mekong River using multiple GCMs and hydrological models. *Journal of hydrology*, N°486, 1-30.

TIRANDAZ M. et ESLAMI A. (2012). Zoning droughts and wetness trends in north of Iran: A case study of Guilan province. *African Journal of Agricultural Research*, Vol.7, N°15, 2320-2327.

TOUHAMI M. (2017). Régionalisation et variabilité pluviométrique dans le Nord-Ouest algérien (Approche statistique). Master, Université Djilali Bounama Khemis, Miliana, Algérie, 87p.

TOWNER J., CLOKE H. L., ZSOTER E., FLAMIG Z., HOCH J. M., BAZO J., COUGHLAN DE PEREZ E., STEPHENS E. M. (2019). Assessing the performance of global hydrological models for capturing peak river flows in the Amazon basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, N°23, 3057–3080.

TRAORE K. (2018). Le couvert forestier en Côte d'Ivoire : une analyse critique de la situation de gestion des forêts (classées, parcs et réserves). *International Journal of Social Sciences and Humanities Invention*, Vol. 5, N°2, 4387-4397.

YACE I. (2002). Initiation à la géologie. L'exemple de la Côte d'Ivoire et de l'Afrique de l'Ouest. Pétrologie, Géologie régionale. Edition CEDA, 183p.

YAKA D. P. A. (2004). Les prévisions saisonnières des pluies au Burkina Faso et en Afrique de l'Ouest : applications et impacts dans le domaine socio-économique et stratégique pour un développement durable. Document, Direction de la Météorologie Nationale, Burkina Faso, 13p.

YAO A. B. (2015). Evaluation des potentialités en eau du bassin versant de la Lobo en vue d'une gestion rationnelle (centre-ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse Unique de Doctorat, Université Nangui ABROGOUA d'Abidjan, Côte d'Ivoire, 193 p.

YAO A. B., GOULA B. T. A., KOUADIO Z. A., KOUAKOU K. E., KANE A., SAMBOU S. (2012). Analyse de la variabilité climatique et quantification des ressources en eau en zone tropicale humide : cas du bassin versant de la Lobo au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologie*, N°19, 136-157.

YAO N. R., OULÉ A. F., N'GORAN, K. D. (2013). Etude de vulnérabilité du secteur agricole face aux changements climatiques en Côte d'Ivoire. MEDD-PNUD, Rapport final, 92 p.

YUAN X., WOOD E. F., MA Z. (2015). A review on climate-model-based seasonal hydrologic forecasting: physical understanding and system development. Wiley Interdisciplinary Reviews. *Water*, Vol.2, N°5, 523–536.

ANNEXES

ANNEXE 1: Coefficient de correction $F(\lambda)$ en fonction de la latitude (formule de Thornthwaite)

N°	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	1.04	0.94	1.04	1.04	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.02	0.93	1.03	1.06	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.98	1.02
10	1.00	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
15	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
25	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
26	0.92	0.88	1.03	1.06	1.15	1.15	1.17	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
27	0.92	0.88	1.03	1.07	1.16	1.15	1.18	1.13	1.02	0.99	0.90	0.90
28	0.91	0.88	1.03	1.07	1.16	1.16	1.18	1.13	1.02	0.98	0.90	0.90
29	0.91	0.87	1.03	1.07	1.17	1.16	1.19	1.13	1.03	0.98	0.90	0.89
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
31	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
32	0.89	0.86	1.03	1.08	1.19	1.19	1.21	1.15	1.03	0.98	0.88	0.87
33	0.88	0.86	1.03	1.09	1.19	1.20	1.22	1.15	1.03	0.97	0.88	0.86
34	0.88	0.85	1.03	1.09	1.20	1.20	1.22	1.16	1.03	0.97	0.87	0.86
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
36	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84
37	0.86	0.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	0.97	0.85	0.83
38	0.85	0.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	0.96	0.84	0.83
39	0.85	0.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	0.96	0.84	0.82
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
41	0.83	0.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	0.96	0.82	0.80
42	0.82	0.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	0.95	0.82	0.79
43	0.81	0.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	0.95	0.81	0.77
44	0.81	0.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	0.95	0.80	0.76
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
46	0.79	0.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	0.94	0.79	0.74
47	0.77	0.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	0.93	0.78	0.73
48	0.76	0.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	0.93	0.77	0.72
49	0.75	0.79	1.02	1.14	1.32	1.34	1.35	1.24	1.05	0.93	0.76	0.71
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

ANNEXE 2 : ARTICLES TIRÉS DE LA THÈSE ET PUBLIÉS

Article 1 : KOUAO J.-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, N°41, 233-259.

Article 2 : KOUAO J-M., KOUASSI A.M., KOUDOU A., GBOLA A.C.F. (2021). Apport des indices climatiques à la redéfinition de la régionalisation climatique de la Côte d'Ivoire dans un contexte de climat changeant. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, Vol. 34, N°1, 102-114.

ANNEXE 3 : ARTICLES TIRÉS DE LA THÈSE, ACCEPTÉS ET NON ENCORE PUBLIÉS

<p>GÉOGRAPHES FRANÇAIS SIÈGE SOCIAL CENTRE DE GÉOGRAPHIE DES UNIVERSITÉS PARIS I, PARIS IV, PARIS VII</p> <p>191, RUE SAINT JACQUES, 75005 PARIS TEL - FAX : 01 45 29 13 40 e-mail : assogco@wanadoo.fr</p> <p>N° TVA : FR 25 331 914 184</p>	<p>PARIS, le 25 juillet 2021</p>
<p>Je soussignée, Edith FAGNONI, Directrice de publication du Bulletin de l'Association de Géographes Français, atteste que l'article "Caractérisation intra-annuelle de la variabilité climatique en Côte d'Ivoire" de KOUASSI Amani Michel, KOUAO Jean-Muller, KOUAKOU Koffi Eugène a été accepté pour être publié dans un prochain numéro du BAGF.</p>	
<p>Édith FAGNONI</p>  <p>ASSOCIATION de Géographes Français 191, Rue Saint-Jacques PARIS-V^e</p>	