



ANALYSE DE LA RÉGIONALISATION CLIMATIQUE DE LA CÔTE D'IVOIRE DANS UN CONTEXTE DE CLIMAT CHANGEANT

ANALYSIS OF THE CLIMATE REGIONALIZATION OF THE IVORY COAST IN A CHANGING CLIMATE CONTEXT

KOUAO J.M.¹, KOUASSI A.M.², DEKOULA S.C.³, ASSEUFI B.D.⁴

- ¹ Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Ecole Doctorale Polytechnique (EDP), B.P. 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire),
- ² Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) ; Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi) ;
Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques ;
BP 1093 Yamoussoukro, (Côte d'Ivoire).
- ³ Université Félix Houphouët-Boigny d'Abidjan-Cocody, Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (UFR-STRM) ;
Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE) ; 22
BP 582 Abidjan 22 ; (Côte d'Ivoire).
- ⁴ Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro ;
Ecole Supérieure des Mines et de Géologie (ESMG) ; B.P. 1093 Yamoussoukro ;
(Côte d'Ivoire).

michel.a_kouassi@yahoo.fr

RÉSUMÉ

L'Afrique de l'Ouest en général et la Côte d'Ivoire en particulier connaît des problèmes de changements climatiques depuis près de cinq décennies. Ces changements climatiques affectent plusieurs domaines. La question essentielle que soulève cette étude est donc la suivante : les zones climatiques préalablement définies au niveau de la Côte d'Ivoire ont-elles connu des modifications sous l'influence des changements climatiques ? Ainsi, l'objectif de cette étude est d'analyser l'impact des changements climatiques sur la régionalisation climatique en Côte d'Ivoire à partir d'analyses multivariées (ACP et CHA) basées sur des variables afférentes à la pluviométrie et à la position géographique. De ce fait, des données de pluies mensuelles collectées sur la période 1961-2016 ont été utilisées. Ces données sont issues du réseau

national de mesures météorologiques de la Côte d'Ivoire. Un échantillon de 47 stations météorologiques disposant de données sur la période 1961-2016 a été utilisé. La méthodologie est basée sur la combinaison d'approches statistiques multivariées à savoir l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification hiérarchique ascendante (CHA). Quatorze (14) variables composées de pluie annuelle, cumuls trimestriels de pluies mensuelles et de coordonnées géographiques (longitude, latitude, altitude) ont été utilisées. Les principaux résultats obtenus ont permis d'identifier six (6) régions climatiques homogènes contrairement aux travaux antérieurs qui ont mis en évidence trois (3) à cinq (5) zones climatiques homogènes. Il a été constaté que le zonage climatique de la Côte d'Ivoire a connu des modifications sous l'influence des changements climatiques.

Mots clés : Changement climatique ; Régionalisation climatique ; Analyse en composantes principales ; Classification hiérarchique ascendante ; Pluviométrie ; Côte d'Ivoire.

ABSTRACT

West Africa in general and Ivory Coast in particular has experienced climate change issues for almost five decades. These climate changes affect several areas. The essential question that this study raises is therefore the following: have the climatic zones previously defined at the level of the Ivory Coast undergone modifications under the influence of climate change? Thus, the aim of this study is to analyze the impact of climate change on climate regionalization in Ivory Coast. As a result, monthly rain data collected over the 1961-2016 period was used. These data come from the national network of meteorological measurements of the Ivory Coast. A sample of 47 weather stations with data for the 1961-2016 period was used. The methodology is based on the combination of multivariate statistical approaches, namely principal component analysis (PCA) and ascending hierarchical classification (AHC). Fourteen (14) variables composed of annual rain, quarterly cumulative monthly rain and geographic coordinates (longitude, latitude, altitude) were used. The main results obtained made it possible to identify six (6) homogeneous climatic regions, unlike previous work which highlighted three (3) to five (5) homogeneous climatic zones. It has been noted that the climate zoning of Ivory Coast has undergone changes under the influence of climate change.

Key words: Climate change; Climate regionalization; Principal component analysis; Ascending hierarchical classification; Rainfall; Ivory Coast.

INTRODUCTION

Le changement climatique est l'un des défis les plus complexes du 21^{ème} siècle. Aucun pays n'est à l'abri de ses 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. En même temps que la planète se réchauffe, les régimes climatiques se modifient et des phénomènes extrêmes tels que les sécheresses, les inondations, les incendies de forêts, etc. deviennent plus fréquents. Ce phénomène tient son importance du fait qu'il touche des secteurs sensibles (sanitaire, social, agricole, etc.) dont les conséquences peuvent déboucher sur une catastrophe à l'échelle planétaire (Touhami, 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 (Ardoin et al., 2003 ; Ardoin, 2004 ; Kouakou et al., 2012 ; Soro et al., 2013 ; Bodian, 2014 ; Fossou et al., 2014 ; N'da et al., 2016 ; Kouassi et al., 2017). En Côte d'Ivoire, elle a d'abord affecté le Nord, puis progressivement s'est étendue vers le centre et enfin sur le littoral. Ces anomalies pluviométriques constatées depuis plus de quatre 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 périodes de sécheresse très marquée au cours du 20^{ème} siècle en Côte d'Ivoire : l'année 1943, les années 1968-1970, les années 1982-1983 et l'année 1993 (Mahé et al., 2001 ; Ouedraogo, 2001 ; Ardoin, 2004 ; Bigot et al., 2005 ; Brou, 2005). Le début de cette sécheresse est autour des années 1970. De récents travaux ont identifié une reprise des précipitations dans les années 2000 (Kouassi et al., 2017). Ainsi avec le contexte des changements climatiques observés, il est nécessaire aujourd'hui de reposer la problématique de la régionalisation climatique en Côte d'Ivoire. La question essentielle que soulève cette étude est donc la suivante : les zones climatiques préalablement définies au niveau de la Côte d'Ivoire ont-elles connu une modification sous l'influence des changements climatiques ?

Plusieurs méthodes de régionalisation existent, aussi bien quantitatives que qualitatives. Gregory (1975) cité par Salama (2010) a passé en revue différentes méthodes de classifications, englobant les caractéristiques temporelles du climat. Ces méthodes sont basées essentiellement sur l'ACP, les corrélations et/ou des méthodes de classification (Salama 2010). Dans cette optique, plusieurs auteurs ont utilisé l'ACP et/ou la classification hiérarchique

ascendante pour la régionalisation des paramètres climatiques en général et des précipitations en particulier (Salama, 2010 ; Soro, 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'objectif de cette étude est d'analyser l'impact du changement climatique sur la régionalisation climatique en Côte d'Ivoire à partir d'analyses multivariées (ACP et CHA) basées sur des variables afférentes à la pluviométrie et à la position géographique.

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La Côte d'Ivoire est située en Afrique de l'Ouest, dans la zone intertropicale, entre l'équateur et le tropique du cancer, précisément entre les latitudes 4°30' et 10°30' Nord et les longitudes 8°30' et 2°30' Ouest (Figure 1). Elle couvre une superficie de 322 462 Km² (environ 1% du continent africain) et fait frontière avec le Golfe de Guinée au Sud, le Ghana à l'Est, le Libéria et la Guinée à l'Ouest, le Mali et le Burkina-Faso au Nord. La figure 1 montre la situation de la Côte d'Ivoire en Afrique de l'Ouest.



Figure 1 : Localisation de la Côte d'Ivoire en Afrique de l'Ouest (Brou, 2005).

En Côte d'Ivoire, on distingue quatre grandes zones climatiques (Figure 2) : le régime tropical de transition ou climat soudanais dans le Nord, le régime équatorial de transition atténué ou climat baouléen dans le centre, le régime équatorial de transition ou climat attiéen dans le Sud et le régime montagnard ou climat de montagnes dans l'Ouest. Deux grands types de paysages végétaux sont présents sur le territoire ivoirien : un paysage forestier et un paysage de savane. Le premier couvre la moitié sud du pays et appartient au domaine guinéen. Le second occupe la moitié nord de la Côte d'Ivoire et se rattache au domaine soudanais (Brou, 2005). Le domaine guinéen a une végétation prépondérante de forêt dense humide. On y distingue 4 secteurs caractérisés par des groupements végétaux particuliers répondants à des conditions écologiques différentes (Brou, 2005). La Côte d'Ivoire est caractérisée par un relief peu élevé. Les terres sont constituées en majeure partie de plateaux et plaines. L'Ouest du pays, région montagneuse, présente toutefois quelques reliefs au-delà de mille mètres (le mont Nimba culmine à 1 752 m). Hormis cette région, les altitudes varient généralement entre 100 et 500 mètres, la plupart des plateaux se situant autour de 300 à 400 mètres. Ceux-ci présentent différents aspects. Les plateaux les plus élevés sont rigides dans leurs formes ainsi que dans leurs matériaux ; ceux de niveaux intermédiaires ont assez souvent des formes émoussées ; les plus bas présentent quant à eux une certaine rigidité, mais sont constitués de matériaux meubles. Des étendues énormes et verticales rigoureusement tabulaires et horizontales sont parfois présentes dans les régions de savanes, mais également sous les petits accrocs de savanes incluses dans la forêt dense.

L'élément dominant de ces plateaux est constitué par une cuirasse ferrugineuse visible en surface sous forme de dalles de teinte rouille, mais parfois voilées de sables, de gravillons ou produits plus fins.

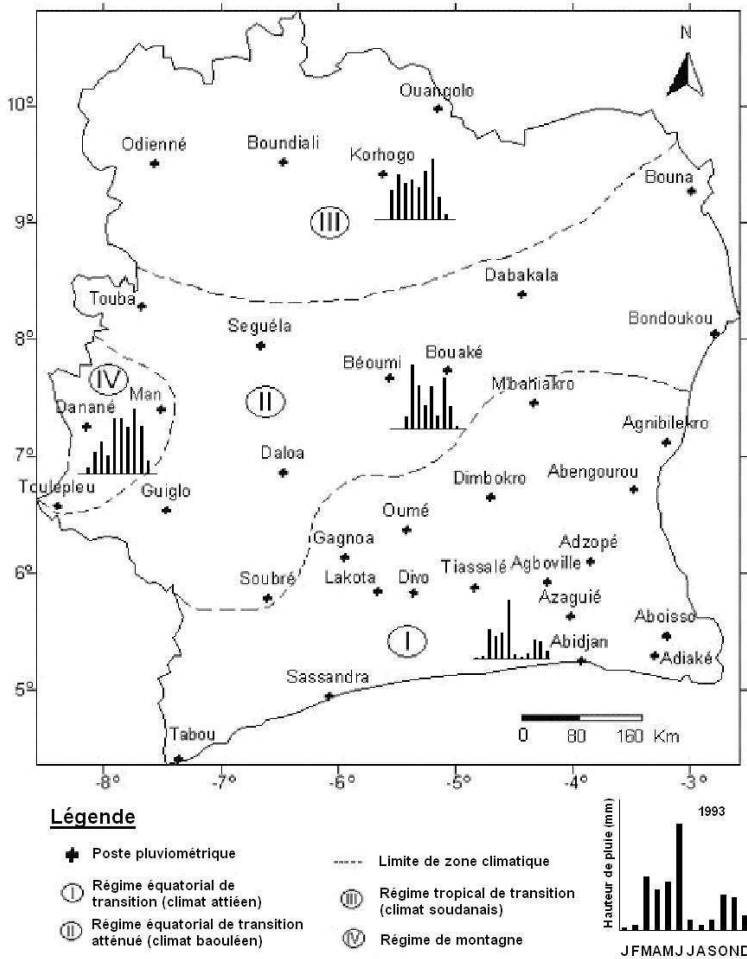


Figure 2 : Principales zones climatiques de la Côte d'Ivoire (Goula et al., 2007)

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Données

Les données utilisées pour réaliser la présente étude sont issues du réseau national de mesures météorologiques de la Côte d'Ivoire et ont été mises à notre disposition par la SODEXAM (Société de Développement et d'Exploitation

Aéronautique, Aéroportuaire et Météorologique). Les données de pluies mensuelles proviennent de quarante-sept (47) postes pluviométriques dont douze (12) stations synoptiques répartis sur toute l'étendue du territoire (Figure 3). Elles s'étendent globalement sur la période 1961-2016. Le choix de la période d'étude est lié au début de la manifestation du phénomène des changements climatiques en Afrique de l'Ouest en général et en Côte d'Ivoire en particulier. En effet, le phénomène des changements climatiques a été observé au cours de la décennie 1960. Quant au choix des stations, il a été guidé par la disponibilité et la qualité des données chronologiques. La constitution d'un vecteur régional ainsi que des données de réanalyse ont permis de reconstituer les données manquantes au sein des différentes séries pluviométriques. Les pluies annuelles de la période 1961-2016 varient entre 986,1 et 1984,4 mm avec une moyenne de 1262,7 mm.

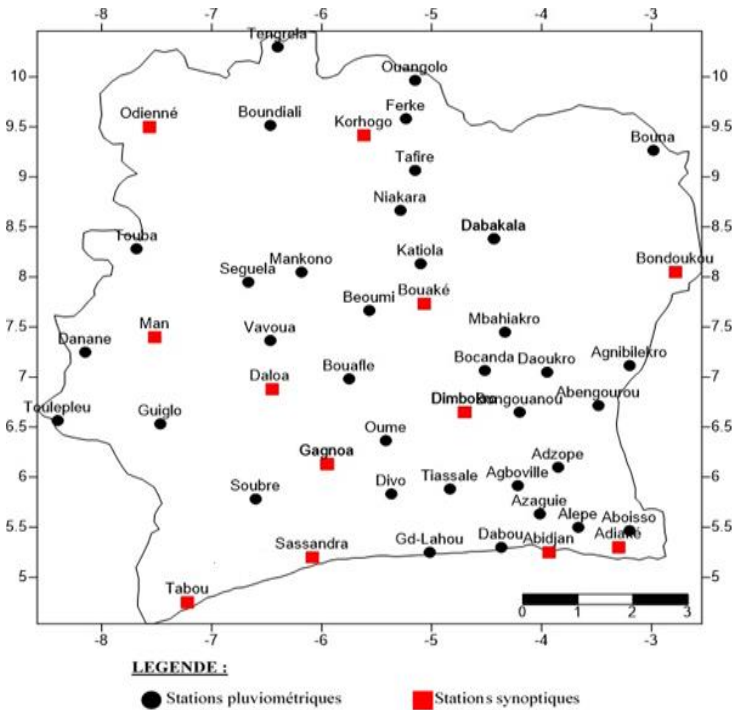


Figure 3 : Localisation des stations pluviométriques et synoptiques retenues

Méthodes de zonage climatique de la Côte d'Ivoire

Une combinaison de méthodes basée sur l'analyse multivariée a été utilisée pour l'analyse de la régionalisation climatique en Côte d'Ivoire. Les outils d'analyses multivariées utilisés sont l'analyse en composantes principales (ACP) et la classification hiérarchique ascendante (CHA).

L'ACP est une méthode statistique multidimensionnelle descriptive voire une technique de représentation des données sous certains critères algébriques et géométriques. Son objectif est d'extraire l'essentiel de l'information contenue dans des tableaux de données (principaux facteurs) qui sont à l'origine de l'évolution simultanée des variables et de leurs relations propres et d'en fournir une représentation simple et facile à interpréter compte tenu des corrélations entre les données (Dagnelie 1982 *in* Chibane et al., 2015). L'ACP permet de mettre en évidence les ressemblances et la position graphique que présenteraient deux ou plusieurs variables au cours de leur évolution. Les sorties de l'ACP interprétées sont basées sur l'interprétation des différents facteurs. Les valeurs et vecteurs propres de chaque matrice ont été extraits et analysés. Seules les valeurs propres supérieures ou égales à 1 ont été interprétées. Le choix des axes principaux tient compte de la réduction du nombre de facteurs. Ce nombre est tel que la somme cumulée des contributions est importante. Il a été adopté le seuil de 70% (Kouassi et al., 2010 ; Koudou et al., 2015). De plus au niveau des plans factoriels, des variables ne sont représentatives que lorsqu'elles sont proches de l'extrémité de ces facteurs. L'analyse en composantes principales a été effectuée à partir de variables de position et de variables afférentes à la pluviométrie (cumuls pluviométriques trimestriels glissants et pluie annuelle) et sont au nombre de quatorze (14). Les variables utilisées pour réaliser l'ACP 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}). Les unités statistiques (ou individus) sont représentées par les différentes stations (47).

La Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) 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 consiste à fournir un ensemble de partitions plus ou moins fines, obtenues par les regroupements successifs. La CHA utilise les différences ou distances entre objets lors de la formation des classes. La procédure du dendrogramme est un outil approprié pour montrer les résultats obtenus par une classification hiérarchique ascendante. En utilisant un dendrogramme vertical, on a en bas chaque objet individuel qui constitue sa propre classe. De plus en

plus d'objets sont regroupés dans des classes de plus en plus larges, constituées d'éléments de plus en plus dissemblables. Finalement, à la dernière étape, tous les objets forment un seul groupe. 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. Cette méthode a déjà été utilisée pour la régionalisation climatique en Côte d'Ivoire (Soro, 2011). La Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) est un outil puissant pour analyser des données numériques. La Classification Hiérarchique Ascendante a été réalisée à partir des mêmes variables que l'ACP et définies sur 47 stations pluviométriques.

Les différentes méthodes (ACP et CHA) ont été appliquées d'une part sur la période 1961-2016 afin de définir les différentes régions climatiques en Côte d'Ivoire et d'autre part, la classification hiérarchique ascendante a été appliquée sur les sous-périodes 1961-1970 et 1971-2016 pour analyser les modifications éventuelles des zonages climatiques 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.

RÉSULTATS

IDENTIFICATION DES ZONES CLIMATIQUES EN COTE D'IVOIRE

Résultats de l'analyse en composantes principales (ACP)

Description statistique des variables

Les caractéristiques statistiques des variables étudiées sont consignées dans le tableau 1. L'analyse du tableau 1 a révélé que la pluviométrie interannuelle sur la période 1961-2016 oscille entre 986,1 et 1984,4 mm avec une moyenne de 1262,7 mm. Quant à la pluviométrie obtenue sur les trois (3) mois glissants, elle fluctue entre 31 et 1082,6 mm avec une moyenne de 362,9 mm de pluie.

Tableau 1 : Statistique descriptive des variables étudiées

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Longitude	-8,4	-2,783	-5,297	1,453
Latitude	4,75	10,3	7,168	1,473
Altitude	1	494	218,383	133,576
P-AN	986,071	1984,394	1262,72	257,969
P-JFM	30,994	217,301	144,527	50,826
P-FMA	89,438	348,225	255,883	68,647
P-MAM	181,361	566,118	375,94	89,473
P-AMJ	288,221	987,689	494,496	168,957
P-MJJ	322,853	1082,591	502,3	175,358
P-JJA	313,061	914,726	468,858	147,341
P-JAS	235,401	1021,704	415,265	171,417
P-ASO	182,996	879,644	408,787	139,513
P-SON	261,723	592,964	344,991	76,867
P-OND	100,033	473,025	218,393	84,783

Valeurs propres et variances

Le tableau 2 présente respectivement les valeurs propres et les variances des différents facteurs au niveau de l’ACP 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 cinq (5) premières composantes remplissent cette condition. Les résultats montrent que les variances exprimées par les cinq premiers facteurs sont de 97,113%. En considérant les trois premières composantes principales, la variance exprimée est de 87% (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 2 : Valeurs propres et variances

	F1	F2	F3	F4	F5
Valeur propre	6,907	3,752	1,657	0,812	0,419
Cumul valeurs propres	6,907	10,659	12,316	13,128	13,547
Variabilité (%)	49,337	26,798	11,832	6,232	2,994
% cumulé	49,337	76,135	87,967	94,199	97,193

Analyse du cercle des variables

Seuls les plans factoriels F1-F2 et F1-F3 ont été présentés car ils rendent compte de manière satisfaisante des 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 4). 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 d'altitude, et est situé dans la partie positive. Le facteur F2 (26,80%) est défini également par deux regroupements.

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.

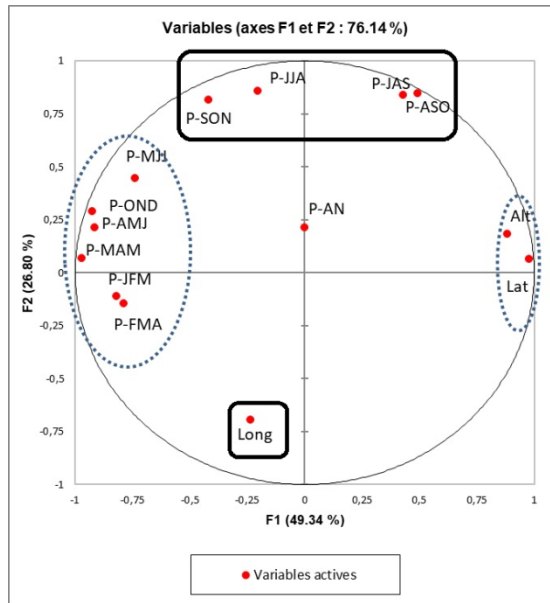


Figure 4 : Représentation des variables dans le plan factoriel F1-F2 (1961-2016)

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 5). Ce regroupement ne comprend que le cumul pluviométrique annuel (P_{AN}) et est situé dans sa partie positive.

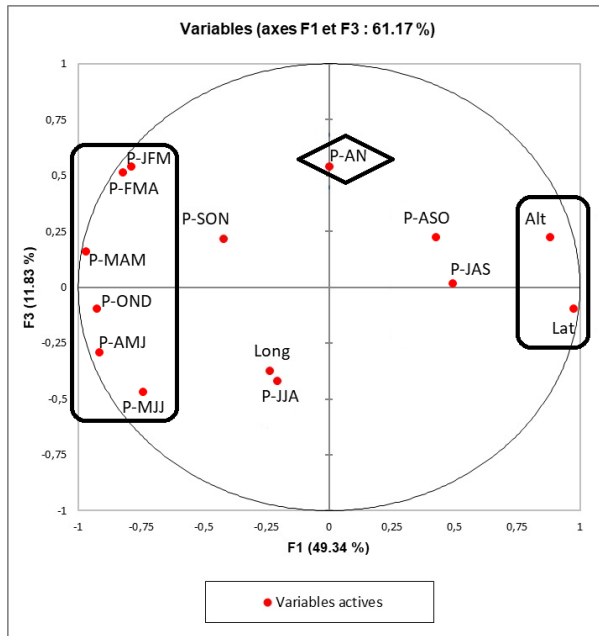


Figure 5 : Représentation des variables dans le plan factoriel F1-F3 (1961-2016)

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 6). Le premier regroupement renferme les stations pluviométriques situées aux basses altitudes et dont la pluviométrie est relativement élevée. Il s'agit des stations d'Abidjan, Adiaké, Aboisso, Alépé, Sassandra, Dabou, Daloa, Bocanda, Tiassalé, Gagnoa, Bouaflé, Agboville, Grand-lahou, Soubré, Oumé, Adzopé, Azaguié, Bongouanou, Daoukro, Dimbokro et Divo. Le deuxième regroupement comprend uniquement la station de Tabou qui est à basse altitude et à très faible latitude. Le troisième regroupement prend en compte les stations influencées situées aux moyennes latitudes. Ce sont les stations de Séguéla, Vavoua, Mankono, Bouaké, Béoumi, Dabakala, Bondoukou, M'bahiakro et Katiola.

Le regroupement 4 comprend les stations influencées par une forte pluviométrie, des latitudes moyennes et les altitudes les plus élevées. Ce sont les stations de Man, Guiglo, Duekoué et Toulepleu, qui sont toutes situées à l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Enfin, le cinquième regroupement est constitué des stations

se situant aux hautes latitudes. Ce groupe renferme la majeure partie des stations situées dans la zone Nord de la Côte d'Ivoire. Ce sont les stations d'Odiénné, Boundiali, Tengrela, Korhogo, Ferké, Niakaramandougou (Niakara), Touba, Ouangolo, Tafiré et de Bouna.

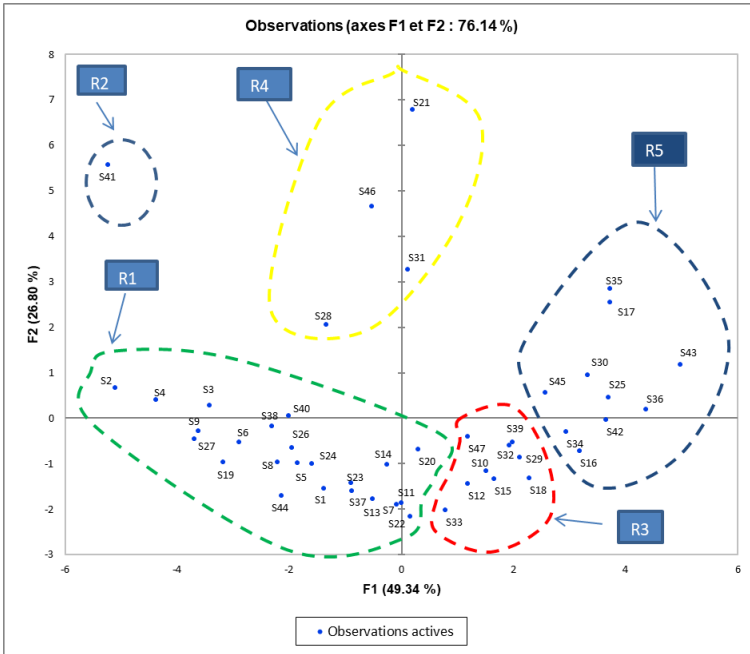


Figure 6 : Espace des individus

Une synthèse cartographique des résultats obtenus à partir de l'analyse en composantes principales normées (ACPN) a été réalisée (Figure 7). 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 (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 (Attiéen de l'intérieur et Attiéen du littoral) à l'exception de la station de Tabou. La forte pluviométrie constatée dans cette zone peut être expliquée par le fait que les zones du littoral situées au Sud sont en contact direct avec le bassin sédimentaire de l'océan atlantique et à proximité des régions génératrices des perturbations et 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 (Z2) et couvre la côte sud-ouest ivoirienne. Elle est constituée de la station de Tabou (Attiéén 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 (Z3). 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 (Z4). 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 (Z5). 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. 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.

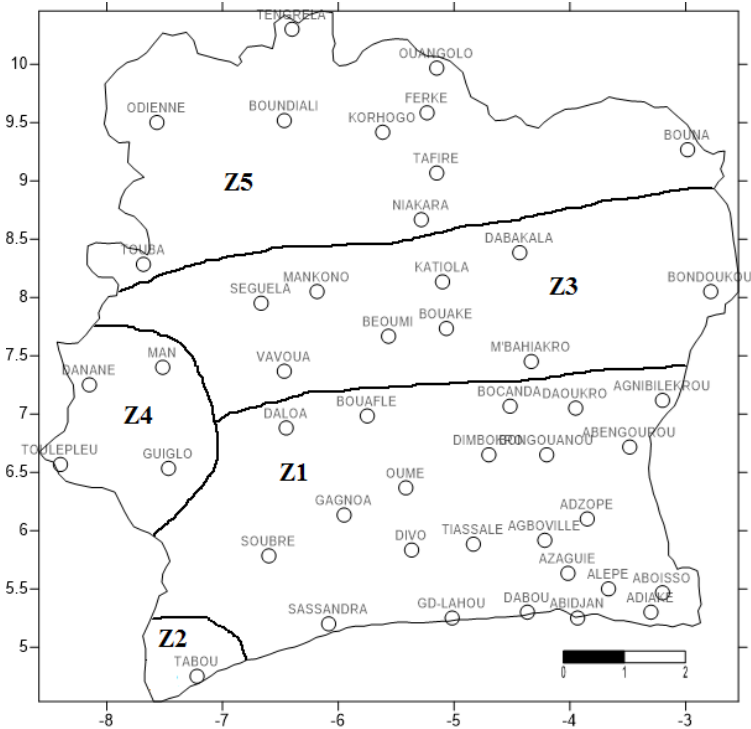


Figure 7 : Zonage climatique de la Côte d'Ivoire à partir des résultats de l'ACPN (1961-2016)

Résultats de la classification hiérarchique ascendante (CHA)

Les résultats de la classification ascendante hiérarchique sur la période 1961-2016 permettent d'identifier cinq (5) grandes classes homogènes des stations pluviométriques en Côte d'Ivoire (Figure 8). 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 homogène (C2), constituée des stations pluviométriques situées sur le littoral, comprend les stations d'Abidjan, Adiaké, Dabou, Grand-Lahou, Sassandra et Tabou. La troisième classe homogène (C3) 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 homogène (C4) contient essentiellement des stations pluviométriques du Nord. Ce sont les stations de Boundiali, Odiénné, Ouangolo et Tengrela. Enfin, la cinquième classe (C5) renferme les stations situées à l’Ouest de la Côte d’Ivoire. Cette classe est composée des stations de Danané, Guiglo, Man et Toulépleu.

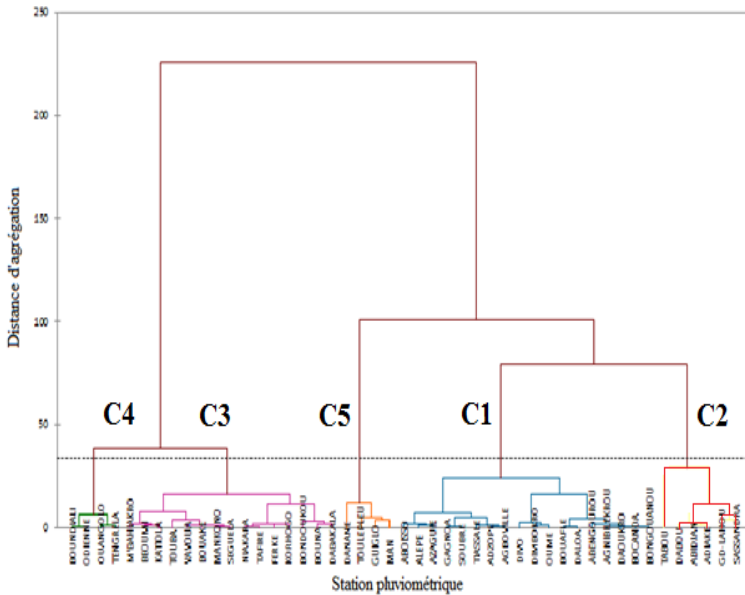


Figure 8 : Classification hiérarchique ascendante des stations pluviométriques pour la période 1961-2016

La Figure 9 montre la configuration spatiale des régions climatiques homogènes issues de la classification hiérarchique ascendante. Cette configuration montre que la Côte d’Ivoire peut être subdivisée en cinq (5) régions climatiques homogènes :

- la première classe (C1) correspond au climat subéquatorial 1 (R1). Cette région couvre le Sud-intérieur (Attéen de l’intérieur) ;
- la deuxième classe (C2) représente le climat subéquatorial 2 (R2) qui englobe toute la frange littorale (Attéen du littoral) ;
- la troisième classe (C3) met en évidence le climat tropical humide (R3) qui couvre le Centre, le Nord-Est et le Centre-Nord (climat baouléen) ;

- la quatrième classe (C4) traduit le climat tropical de transition (R4). Elle s'étale sur une partie du Nord ivoirien (climat soudanais) ;
- la cinquième classe (C5) est le reflet du climat de Montagnes (R5). Elle englobe la région ouest semi-montagneuse.

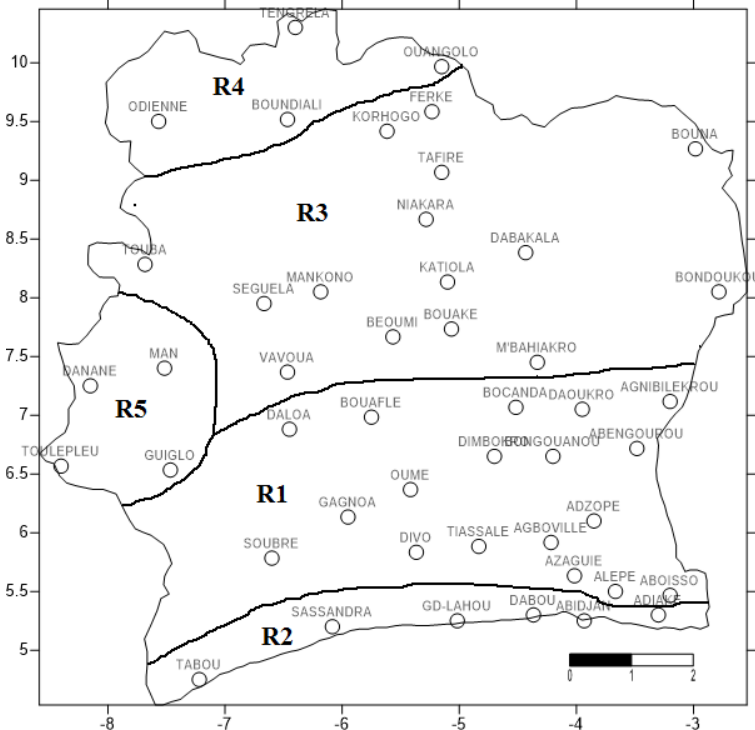


Figure 9 : Zonage climatique de la Côte d'Ivoire à partir des résultats de la CHA (1961-2016)

Analyse de l'influence des changements climatiques sur la régionalisation climatique en Côte d'Ivoire

A cet effet, la classification hiérarchique ascendante a été utilisée pour la mise en évidence d'une éventuelle évolution de la régionalisation en passant de la période humide (1961-1970) à la période sèche (1971-2016).

Classification hiérarchique ascendante sur la période 1961-1970

Les résultats de la classification hiérarchique ascendante sur la période 1961-1970 ont permis d'obtenir cinq régions climatiques homogènes (Figure 10) :

- 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 homogène (C2) correspond au climat subéquatorial 2 (Attéen 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 homogène (C4) est celle du climat tropical de transition (climat soudanais). Elle affiche six (6) stations. Cette région renferme les stations de Boundiali, Ferké, Korhogo, Odiénné, 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.

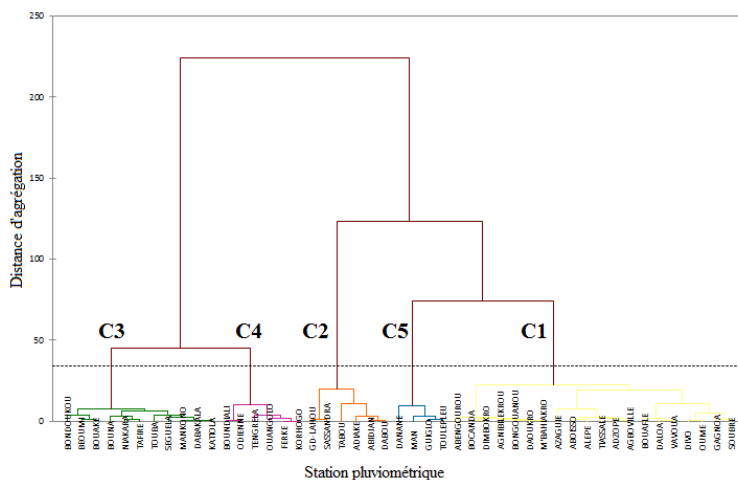


Figure 10 : Classification hiérarchique des stations pluviométriques pour la période 1961-1970

Classification ascendante hiérarchique sur la période 1971-2016

L'application de la classification hiérarchique ascendante sur la période 1971-2016 a permis également d'obtenir cinq régions climatiques homogènes en Côte d'Ivoire (Figure 11) :

- la première région (C1) est représentée par les stations du climat subéquatorial 1 (attiéen de l'intérieur). Elle englobe treize (13) stations pluviométriques qui sont : Abengourou, Adzopé, Agboville, Agnibilékrou, Bocanda, Bongouanou, Daoukro, Dimbokro, Divo, Gagnoa, Oumé, Soubre et Tiassalé ;
- la deuxième région homogène (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 homogène (C4) est celle du climat tropical de transition (climat soudanais). Elle présente neuf (9) stations. Cette

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'ACP prend en compte les stations d'Abidjan, Adiaké, Dabou, Grand-Lahou et Sassandra comme des stations appartenant à la même région climatique que celles citées ci-dessus, la CHA les isole comme appartenant à une autre région climatique. En effet, la régionalisation définie par l'ACP correspond au climat attiéen de façon générale. Cependant, la CHA 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 CHA 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'ACP. Cette région climatique correspond au climat attiéen du Sud-Ouest.

En somme, les deux méthodes (ACP et CHA) 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 CHA 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'ACP 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 CHA, 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 5, il est observé que la station de Tabou présente une particularité.

En effet, au niveau de la classe C2, 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 que six (6) zones climatiques ont été mises en évidence. 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 CHA a été utilisée pour l'analyse

comparative de la régionalisation en passant de la période humide (1961-1970) à la période sèche (1971-2016).

Ces résultats montrent que, de la période humide (avant 1970) à la période sèche (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 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. Il ressort donc que le zonage climatique de la Côte d'Ivoire a connu des modifications. Ces modifications pourraient être affectées au phénomène de changements climatiques.

Une confrontation des résultats de zonage climatique réalisé à partir de l'ACP et de la CHA à d'autres auteurs a été faite (Figure 12). 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. D'abord, la zone du Nord prend en compte entièrement le climat tropical de transition et des parties des climats tropical humide et montagnard. Ensuite, la zone du Centre occupe les parties restantes du climat 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 montagne dans le cas des travaux de Kouadio et al. (2003).

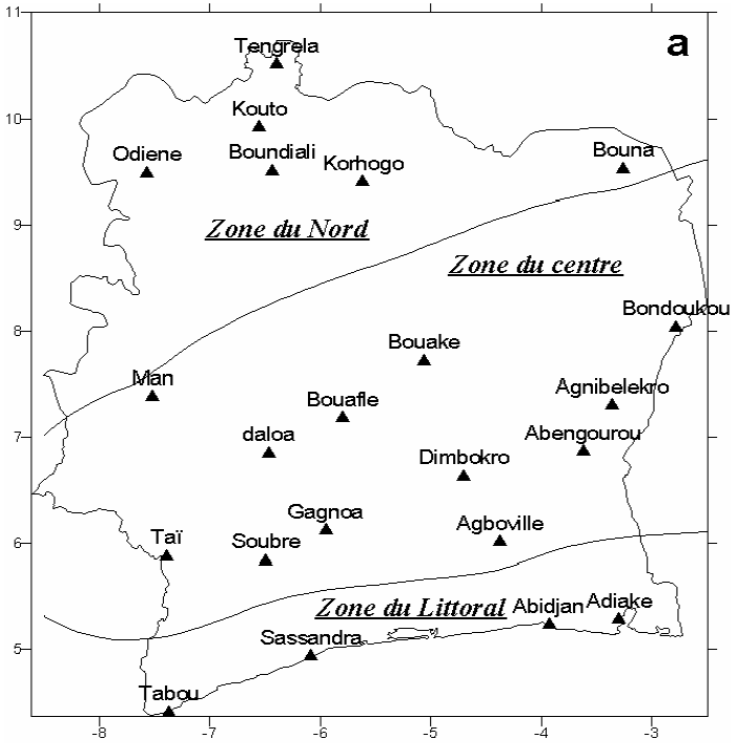


Figure 12 : Découpage climatique de la Côte d'Ivoire à partir d'une ACP (Kouadio et al., 2003)

Les résultats obtenus ont été aussi comparés à ceux de Soro (2011) (Figure 13). Il ressort que la régionalisation réalisée 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 hiérarchique ascendante. Cette classification a été construite en tenant compte de la latitude et des maxima mensuels observés dans les différents 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 hiérarchique ascendante 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 inclusion dans le deuxième. Aussi, la station de Soubré, préalablement classée dans le climat tropical humide (Goula et al., 2007), pourrait être reclassée dans le climat subéquatorial. Il en est de même pour la

station de Bouna, qui préalablement classée dans le climat tropical humide (Goula et al., 2007) pourrait être reclassée dans le climat tropical de transition selon Soro (2011). 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).

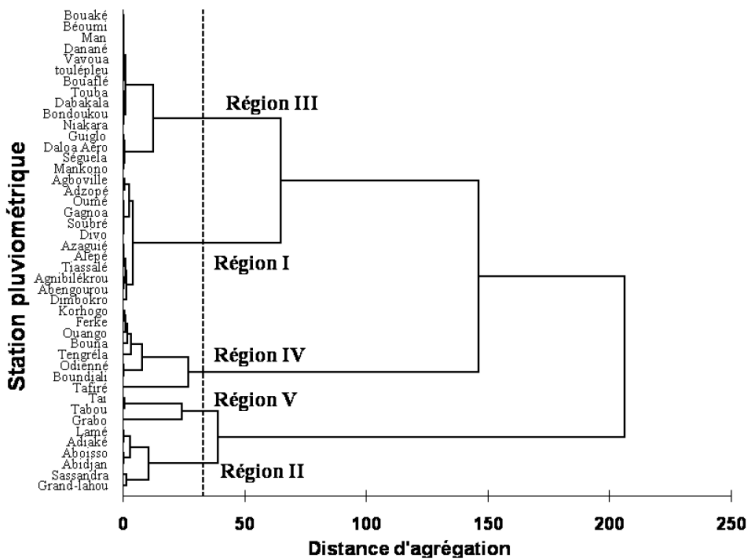


Figure 13 : Classification hiérarchique de stations pluviométriques ivoiriennes (Soro, 2011)

CONCLUSION

La combinaison de l'analyse en composantes principales et de la classification hiérarchique ascendante a permis d'apporter des réponses à la problématique de la régionalisation climatique de la Côte d'Ivoire dans un contexte de climat changeant. Les principaux résultats obtenus ont permis d'identifier six (6) régions climatiques homogènes. La première zone est confondue à celle du climat tropical de transition (climat soudanais). La deuxième zone correspondant au climat tropical humide (climat équatorial de transition atténué ou climat baouléen). La troisième zone climatique homogène est le climat de montagnes. La quatrième zone climatique homogène s'identifie au climat subéquatorial 1 (climat équatorial de transition 1 ou climat attiéen du littoral).

La cinquième zone climatique homogène correspond au climat subéquatorial 2 (climat équatorial de transition 2 ou climat attiéen de l'intérieur). La sixième zone est le climat subéquatorial 3 (climat équatorial de transition 3 ou climat attiéen du Sud-Ouest). 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 des modifications. Ces modifications pourraient être affectées au phénomène de changements climatiques. Bien que la pluviométrie présente un intérêt majeur comme signature au-delà de son apport pour la définition du climat, cette étude ne peut pas permettre de conclure de façon absolue quant à la modification des zones climatiques vu qu'elle a été réalisée qu'avec un seul paramètre climatique (pluie) alors qu'une telle problématique nécessiterait de faire intervenir plusieurs paramètres climatiques (pluie, température, humidité relative, insolation, etc.). L'étude menée serait plus objective et la dynamique de régionalisation climatique serait plus perceptible si d'autres paramètres de natures morphologique, pédologique, lithologique, végétative, etc. sont ajoutés aux paramètres climatiques à travers sans doute d'autres approches méthodologiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient les instructeurs dont les critiques et les suggestions ont permis d'améliorer le présent article. Ils remercient également la SODEXAM pour leur avoir fourni les données de pluie utilisées dans cette étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARDOIN B.S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. Thèse de l'Université de Montpellier II, France, 330 p.
- ARDOIN S., LUBES-NIEL H., SERVAT E., DEZETTER A., BOYER J.F. (2003). Analyse de la persistance de la sécheresse en Afrique de l'Ouest : caractérisation de la situation de la décennie 1990. IAHS Publication, n°278, pp.223-228.
- BIGOT S., BROU Y.T., OSZWAID J., DIEDHOU A. (2005). Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. Sécheresse, Vol. 16, n°1, pp.5-13.

- BODIAN A. (2004). Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo*, n°8, pp.297-312.
- 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 technologies de Lille, France, 226p.
- 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, pp.213-229.
- FOSSOU R.M.N., LASM T., SORO N., SORO T., SORO G., DE LASME O.Z., BAKA D., ONETIE O.Z., OROU R. (2014). Variabilité climatique et son impact sur les ressources en eaux souterraines: cas des stations de Bocanda et de Dimbokro au Centre-Est de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *Larhyss Journal*, n°21, pp.87-110.
- 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, pp.49-67.
- GOULA B.T.B., 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, pp.1067-1080.
- KOUADIO K.Y., OCHOU D.A., SERVAIN J. (2003). Etude de la prédictibilité de la pluviométrie en Côte d'Ivoire durant. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, n°10, pp.117-134.
- KOUAKOU K.E., GOULA B.T.A., KOUASSI A.M. (2012). Analyze of climate variability and change impacts on hydro-climate parameters: case study of Côte d'Ivoire. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol. 8, n°3, pp.1-8.
- KOUAKOU K.E., MOUSSA H., KOUASSI A.M., GOULA B.T.A., SAVANE I. (2017). Redefinition of homogeneous climatic zones in Cote d'Ivoire in a context of climate change. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Vol.8, n°11, pp.453-462.
- 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 Heath & Territorial Intelligence*, Vol.1, n°2, pp.47-59.

- 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. *Cybergeogeo: European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*, mis en ligne le 07 décembre 2010. URL : <http://cybergeogeo.revues.org/index23388.html>2010.
- 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, pp.156-172.
- MAHÉ G., L'HOTE Y., OLIVRY J.C., WOTLING G. (2001). Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa – 1951-1989. *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 46, n°2, pp.211-226.
- 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. *Revue des Sciences Sociales-Programme d'Appuis Stratégique à la Recherche Scientifique (RSS-PASRES)*, n°2, pp.86-104.
- OUEDRAOGO M. (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest, Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante : normes hydrologiques et modélisation régionale, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, France, 257p.
- SALAMA H. (2010). Régionalisation pluviométrique du bassin Tensift (Maroc). *Larhyss Journal*, n°9, pp.111-119.
- SORO G. (2011). Modélisation statistique des pluies extrêmes en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat, Université Nangui-Abrogoua, Côte d'Ivoire, 172 p.
- SORO T.D., SORO N., OGA Y.M.S., LASM T., SORO G., AHOUSSE K.E., BIEMI J. (2013). La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de Grand-Lahou (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *Physio-Géo*, n°5, pp.55-73.
- 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, pp.149-58.
- TOUHAMI M. (2017). Régionalisation et variabilité pluviométrique dans le Nord-Centre Ouest de Algérie (Approche statistique). Mémoire pour l'obtention du Master en Sciences de la Nature et de la Vie, Université Djilali Bounama Khemis, 87p.