

Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide

*L'exemple du Bénin,
diagnostic et modélisation*



Thèse présentée par

Constant HOUNDENOU

*pour l'obtention du Doctorat de Géographie
de l'Université de Bourgogne > spécialité Climatologie
sous la direction de Mme le Professeur Jocelyne Pérard
le 9 juillet 1999 à Dijon*

Université de Bourgogne
Centre de Recherches de Climatologie
UMR 5080 CNRS « Climatologie de l'Espace Tropical »

**Thèse présentée pour l'obtention du Doctorat de Géographie de
l'Université de Bourgogne**

(Arrêté ministériel du 30 mars 1992)

Spécialité : Climatologie

**VARIABILITÉ CLIMATIQUE ET MAÏSICULTURE EN
MILIEU TROPICAL HUMIDE : L'EXEMPLE DU BÉNIN
DIAGNOSTIC ET MODÉLISATION**

Par Constant HOUNDÉNOU

**Sous la direction de
Mme le Professeur Jocelyne PÉRARD**

Soutenue publiquement le 9 juillet 1999 à Dijon devant le jury composé de :

M. Michel BOKO	Rapporteur (Université Nationale du Bénin, LECREDE)
Mme Yamna DJELLOULI	Rapporteur (Université du Maine - Le Mans)
M. Bernard FONTAINE	Examineur (CNRS-CRC, Université de Bourgogne)
M. Pierre CAMBERLIN	Examineur (CRC, Université de Bourgogne-Dijon)
M. Florent MARAUX	Examineur (CIRAD-AMIS, Montpellier)
Mme Jocelyne PÉRARD	Examineur (CRC, Université de Bourgogne)

AVANT PROPOS ET REMERCIEMENTS

Cette thèse de Doctorat est réalisée dans le cadre de la convention qui existe entre l'Université Nationale du Bénin et l'Université de Bourgogne d'une part et entre le Centre de Coopération Internationale pour la Recherche Agronomique de Montpellier (CIRAD) et le Centre de Recherche de Climatologie de Dijon (CRC) d'autre part.

Le choix du présent sujet est le fruit de plusieurs années de réflexion relative à la lente mutation naturelle qui affecte l'Ouest africain en général et le golfe de Guinée en particulier où est situé le Bénin. Cette thèse est aussi la concrétisation de l'un des objectifs définis par les signataires de l'accord Dijon-Cotonou et s'inscrit dans le projet de réalisation de l'Atlas climatique du Bénin à des fins d'aménagement du territoire et de développement agricole.

N'eût été le précieux concours de M. le Professeur Michel Boko de l'Université Nationale du Bénin et de Madame le Professeur Jocelyne Pérard de l'Université de Bourgogne, le sujet n'aurait pas été défini. Ainsi, il y a lieu de signaler que cette thèse de Doctorat n'aurait abouti sans le concours de plusieurs personnes, institutions et structures à l'égard desquelles nous avons une grande dette de reconnaissance. Les mots que nous utiliserons ici ne seront jamais proportionnels par rapport à nos profonds sentiments suite aux divers entretiens, discussions avec plusieurs personnes durant à notre séjour au Centre de Recherches de Climatologie de l'Université de Bourgogne à Dijon, et nos passages répétés au Centre de Coopération Internationale pour le Recherche Agronomique et le Développement de Montpellier (CIRAD).

•

Nos sentiments de profonde gratitude s'adressent d'abord à Mme le Professeur Jocelyne Pérard, Président honoraire de l'Université de Bourgogne, responsable de notre Ecole Doctorale « Images des Objets Naturels » qui nous a accueilli et qui nous a permis d'atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés. Elle a accepté volontiers de diriger ce travail malgré ses multiples responsabilités administratives et académiques. Ses multiples remarques et son réconfort moral et

son attention toute particulière à notre égard nous ont permis de mener ce travail jusqu'au bout. Qu'elle retrouve ici, l'expression de nos sincères remerciements et de notre attachement permanent.

Le Professeur Michel Boko, Chef du Laboratoire d'Etude des Climats des Ressources en Eau et de la Dynamique des Ecosystèmes (LECREDE) de l'Université Nationale du Bénin a été d'un grand poids dans la réalisation de ce travail tant en amont qu'en aval. Malgré ses multiples responsabilités nationales et internationales il a accepté volontiers d'être rapporteur de cette thèse et de participer au jury de soutenance de ce travail. Aussi, nous a-t-il parrainé et a présenté notre candidature au titre de Reviewer au sein de l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) qui a été retenue. Qu'il en soit chaleureusement remercié et qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude manifeste et le fruit des efforts consentis pour son sens de la relève.

Mes remerciements s'adressent à M. Bernard Fontaine, Chargé de Recherche au CNRS, Directeur du Centre de Recherches de Climatologie et responsable de l'UMR 5080 CNRS « Climatologie de l'Espace Tropical », pour sa marque d'attention, et l'honneur qu'il nous a fait de participer au jury de soutenance de cette thèse.

Nos remerciements s'adressent également à Mme Yamna Djallouli, Chef du Département de Géographie de l'Université de Maine au Mans qui a accepté de participer au jury et de faire le rapport de cette thèse malgré ses occupations administratives.

Nous exprimons notre sentiment de reconnaissance et de profonde gratitude à M. Florent Maraux, chef du Programme Agronomie du CIRAD-AMIS de Montpellier qui nous a toujours accueilli et dirigé durant nos stages relatifs à la modélisation des termes du bilan de l'eau au sein de l'Ex Unité de Recherche de Gestion de l'Eau. Sa disponibilité sans faille, son sens d'écoute, ses qualités humaines, les multiples et sincères discussions que nous avons eues nous ont permis d'aborder et de traiter la partie agronomique de cette thèse. Aussi a-t-il accepté de participer à ce jury. Nous ne pourrions le remercier assez pour de multiples raisons.

Nous remercions également et chaleureusement M. Pierre Camberlin, Maître de Conférences à l'Université de Bourgogne et membre du jury pour sa disponibilité sans nom, son exceptionnelle et grande attention. Nous lui devons beaucoup. Il nous a aidé dans l'élaboration des programmes informatiques et statistiques des données météorologiques ainsi qu'à l'interprétation des résultats auxquels nous avons abouti.

Au Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) de Montpellier, nous adressons nos remerciements à Christian Baron, Alain Clopes, ingénieurs en informatique du l'ex URGE, Mrs. François-Noël Reyniers, Francis Forest, ingénieurs en chef, Jean-Leu Marchand, sélectionneur et Chef Programme Maïs, Bertrand Muller, Bruno Lidon, Nathalie Bonfiglio, avec qui nous avons travaillé et eu de fructueux débats.

Nous exprimons nos sincères remerciements à Mrs. Epiphane Ahlonsou, Isaac Igué et à leurs agents de l'ASECNA-Cotonou pour avoir mis à notre disposition les données météorologiques.

Que le Département de Géographie et d'Aménagement du Territoire et ses enseignants de la FLASH de l'Université Nationale du Bénin, le laboratoire de Climatologie de Cotonou, Mrs Vodouhê, Chef de la station de Recherche de Niaouli, Chabi Yallou, Chef de la station de Recherche d'Ina et sélectionneur maïs, Moutaharou Hamidou, responsable de la cellule Recherche et Développement/INA, M. Corneille de la station de Recherche sur le palmier de l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB) et les différents groupements villageois du Bénin soient sincèrement remerciés.

Merci à tous nos ami (e) s, et collègues du Centre de Recherches de Climatologie de l'Université de Bourgogne et à ses différentes structures. A Michèle Dalby qui a relu et corrigé plusieurs versions de notre texte, M'Baye Diop avec qui nous avons toujours écrit et publié des articles et qui nous a aidé à faire la mise en page du mémoire de thèse, nous tenons à leur témoigner notre profonde reconnaissance et notre amitié.

A ma grande, très chère et inoubliable amie Karine Hernandez, Sylvain Rigollet avec qui nous avons passé des nuits blanches pour la mise en forme et la multiplication du volume de thèse nous tenons à saluer leur grande cordialité et les prions de croire à la réciprocité. Que Corinne Quintar, Teddy Camberlin, Maryvonne Perrot soient pleinement associées à ces remerciements. Nous témoignons nos sincères et cordiaux remerciements à notre grand ami Laurent Besson du LE2I et du laboratoire de Cartographie de l'Université de Bourgogne qui nous a beaucoup appris en informatique et avec qui nous avons fait de la musique à tous les instants. Ces mots ne sont pas proportionnels à l'amitié qu'il nous a témoignée tout le temps. Ces mots s'adressent aussi à M. François Tainturier, et à Olivier Collinet de la Salle avec qui nous avons passé d'agréables moments. Nos remerciements s'adressent aussi M. Thierry Castel pour son aide dans la mise en page du document final pour la publication. Que mon Cher et Grand Rock Assogba et Jessica soient sincèrement remerciés pour leur maison qu m'a toujours été ouverte depuis près d'une décennie et la fraternité spontanée de tous les instants dont ils ont fait preuve à mon égard.

Nous ne remercierons jamais assez nos amis Rémy Guillaumot et Claire Delaye qui nous ont toujours témoigné leur franche collaboration et qui ont assuré la confection de la couverture de cette thèse. Les mots nous manquent pour adresser surtout nos sincères remerciements à nos meilleurs amis, Sylvain Bigot (alias Sbigot) actuellement Maître de Conférences à l'Université de Lille1, Valérie Bonnardot à Stellenbosch en Afrique du Sud, Vincent Moron, Maître de Conférence à l'Université d'Aix-en-Provence, Karine et Mohamed Laaidi du GDR 102 « Climat et Santé » du CNRS. Qu'ils reçoivent ici l'expression de notre gratitude. Aux familles Olympio, Houndénou-Montant, Zinsou-Guinnou, nous exprimons nos remerciements très particuliers.

A Zimé Amadou Chabi qui nous a accompagné pour traverser tout le Bénin en 1996 dans le cadre de nos travaux de terrain, nous disons un grand et chaleureux merci. A tous ceux qui nous ont témoigné une quelconque affection et marque d'attention de quelque manière durant la préparation de cette thèse nous les prions d'accepter nos cordiaux remerciements. A tous ceux que nous avons oubliés et offensés sans le savoir, nous leur demandons pardon.

Résumé :

A partir d'une approche systémique, on identifie la variabilité climatique sur la période 1931-1990 et on évalue ses conséquences agroclimatiques sur les indices de satisfaction des besoins en eau à chaque phénophase de deux variétés de maïs (cycle court de 90 jours et cycle long de 120 jours) à l'aide d'un modèle de simulation de bilan hydrique des cultures. Le découpage de la période 1931-1990 en deux normales 1930-1960 et 1961-1990 montre que le Bénin traverse une péjoration climatique depuis deux décennies et que le climat béninien du sud a beaucoup plus varié que le climat soudanien au nord du pays. Cette péjoration climatique se manifeste par une réduction de la durée des saisons agricoles, une diminution du potentiel pluviométrique accompagnée d'une réduction du nombre de jours de pluie et une hausse des températures. La baisse de la pluviométrie couplée au réchauffement thermique et à l'action anthropique induit une dégradation du milieu écologique, une modification du bilan hydrique des cultures et un désarroi au niveau du monde paysan qui se réfère à la métaphysique pour expliquer le phénomène climatique.

Le diagnostic agroclimatique de la culture du maïs dans ce contexte de péjoration climatique atteste une réduction des indices de satisfaction des besoins en eau du maïs précoce de 90 jours au cours de la deuxième saison des pluies au sud du Bénin. Ainsi, le risque de stress hydrique est permanent au sud-ouest du pays dans la zone littorale. Cette situation s'explique par le dérèglement du cycle pluviométrique saisonnier par rapport à la longueur du cycle végétatif du maïs à cycle court de 90 jours. En revanche, on ne note pas de modification importante des indices de stress agroclimatique pour le maïs de 120 jours sur les deux périodes. Au contraire cette variété de maïs se porte bien dans le Borgou car elle bénéficie surtout de l'arrière effet de la fumure du coton. Dans le sud, il bénéficie aussi de l'atténuation de la petite saison sèche intercalaire.

Le dérèglement pluviométrique saisonnier et son corollaire la réduction de l'indice de satisfaction des besoins en eau, met la campagne agricole du maïs de la deuxième saison dans une situation inconfortable. Pour surmonter la péjoration climatique et pallier ses conséquences agronomiques, les agriculteurs adoptent des stratégies anti-risques en accord avec les agents d'encadrement du développement rural. Cependant, les paysans demeurent parfois réticents aux innovations techniques et à certains cultivars à cause de leurs expériences. Cette situation est aggravée par la dévaluation monétaire du franc CFA et le passage de l'économie de type socialiste à une économie libérale. La hausse du prix de l'engrais ne permet plus à certains paysans d'accepter les variétés améliorées de maïs qui nécessitent la fumure. Dans le contexte actuel et outre les contraintes et les risques climatiques, la maïsiculture se trouve confrontée à des problèmes d'ordre démographique, pédologique, édaphique, social.

Mots Clés :

Variabilité climatique, péjoration climatique, agronomie, maïs, bilan hydrique, indice de satisfaction des besoins en eau, risques et contraintes climatiques, phénophase.

Abstract :

From a systemic approach, we identify the climate variability over the period 1931-1990 and we evaluate its agroclimatic consequences of water balance at each phenophasis for two varieties of maize (120 and 90 days) with the help of a simulation model of crop water balance. The splitting up of the period 1931-1990 into two normals (1931-1960 and 1961-1990) enables to show that for two decades Benin has undergone a climatic deterioration and that the beninian climate experienced in south Benin has varied a lot more than the soudanian climate of the north of the country. This climatic deterioration is characterised by a decrease in the length of farming seasons, a decrease in the rainfall potential followed by a decrease in the number of rainy days and a rise in temperatures. The decrease in rainfall coupled with higher temperatures and human pressure results in the deterioration of ecological environment, a modification of the water balance and disarray for the peasants who turn to parapsychology to explain climatic phenomena.

The agroclimatic diagnosis of maize crops in the context of climatic deterioration attests to a decrease in the water satisfaction index of the 90 days maize during the second rainy season in southern. The risk of water stress is permanent in the coastal zone of the south-west of the country. This situation results from a disorder of the seasonal rainfall cycle with respect to the length of the 90 days maize's vegetative cycle. On the other hand, we do not notice an important modification of water satisfaction index for the 120 days maize during the two periods. Furthermore, this variety of corn performs well in Borgou region because it benefits from the late impact of cotton manure. In the south, it also benefits from the increased rainfall of the little dry season.

The seasonal rainfall disorder and the accompanying reduction of the water satisfaction index lead the second rainy season maize cultivation campaign to an uncomfortable situation. In order to overcome the climatic deterioration and mitigate its agronomic consequences, the farmers adopt anti-risk strategies in agreement with the rural development agents. However, the farmers sometimes feel reluctant to technical improvements and new varieties of corn. This situation is worsed by the devaluation of the CFA franc and the change from socialist economy to free market economy. The rise of the price of fertilizers prevents certain farmers from accepting improved corn varieties wich necessitate the use of chemical fertilizers. In this context and besides the climatic constraints and risks, the corn-cultivation is faced to demographic, pedologic, edaphic and social problems.

Key words

Climatic variability, agronomy, maize, water balance, climatic risks and constraints, water satisfaction index, rainfall deterioration, phenophasis.

INTRODUCTION GENERALE

Le Bénin est un pays de l'Afrique de l'Ouest, situé dans le golfe de Guinée, entre 6°30' et 12° 30' de latitude nord, 1° et 3°40' de longitude est, avec une superficie de 112 622 km². Il se classe parmi les pays du Tiers-Monde, avec un revenu par habitant de 390 dollars US selon les statistiques du PNUD (1993) et un indice de développement humain égal à 0,33 (Le Courrier ACP-CEE, 1996). Malgré de nombreux efforts de restructuration, son économie demeure sous-développée et l'agriculture occupe 70% de la population. Elle constitue le maillon essentiel du développement du Bénin en fournissant 40% du PIB de 1990 à 1992 (Banque Mondiale, 1995).

Depuis son indépendance en 1960, le Bénin a toujours été ouvert aux innovations pour développer le monde rural, notamment l'agriculture. Mais les technologies s'intéressaient surtout au développement des cultures de rente, au détriment des cultures vivrières (Giri, 1986). La variabilité climatique et les disettes répétées qui en ont résulté, ont été des contraintes pour le développement du Bénin. Aussi, les problèmes de déficits alimentaires, liés en particulier aux fluctuations climatiques, ont-ils conduit la recherche agronomique béninoise à s'intéresser aux cultures vivrières et à s'affilier aux institutions internationales de recherche telles l'IITA (Institut International d'Agriculture Tropicale), l'ICRISAT (Institut International de Recherche sur les Cultures des Zones Tropicales Semi-arides), le CYMMIT (Centre International pour l'Amélioration du Maïs), le CIAT (Centre International d'Agriculture Tropicale), toutes rassemblées dans le groupe de consultation CGIAR (Consultative Group of International Agricultural Research) qui a lancé la révolution verte dans tous les pays de l'Afrique au sud du Sahara dans les années 70. Face à la persistance de la péjoration climatique et à ses conséquences, la promotion de la culture vivrière, et surtout celle du maïs, était devenue une priorité pour l'Etat. Malheureusement, le projet PDPV (Projet pour le Développement de la Production Vivrière), chargé de la promotion du maïs, n'a pas obtenu de résultats satisfaisants. Après plus de dix ans de politique d'innovation, le bilan paraît globalement négatif car très peu d'innovations (parmi lesquelles de nouvelles variétés de maïs) ont été acceptées par les paysans (Adégbidi, 1994). Leur résistance aux innovations est liée non

seulement au transfert de technologie et de compétence, mais aussi aux incertitudes dans la gestion des ressources du climat, notamment l'eau. Il se pose donc toujours la **question du développement de l'agriculture vivrière**. Il paraît alors nécessaire d'étudier le poids des différentes contraintes, surtout d'ordre climatiques, qui empêchent le développement harmonieux des cultures vivrières, dont le maïs.

En intitulant le sujet "**Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation**", nous abordons le problème du diagnostic d'un aspect du développement agricole qui vise à évaluer les risques et contraintes climatiques de la maïsiculture en milieu béninois. Ce travail de recherche se présente donc comme une contribution aux problèmes de développement agricole. Il demeure géographique dans sa recherche de liens entre le naturel et l'humain, et se veut être une étude **géoclimatique appliquée** car elle présente et analyse les conséquences de la variabilité climatique sur deux variétés de maïs. Avec démarche systémique, ce travail de recherche combine le raisonnement déductif géographique à la logique statistique, intègre les diverses composantes de la géographie (physique, humaine, quantitative) et présente les résultats de modélisation des termes du bilan des cultures pour des fins agronomiques. Il s'articule en trois parties.

La première partie présente les composantes naturelles et les facteurs humains du pays qui conditionnent la maïsiculture et qui contribuent à l'édification des différentes civilisations agraires et au PNB du Bénin. La géomorphologie et l'hydrographie qui conditionnent la mise en place du peuplement qui est un facteur de développement de la maïsiculture sont présentées. Ce volet du travail expose l'économie agricole du pays, met en exergue les facteurs d'introduction du maïs au Bénin. Cette partie présente également les aptitudes des différentes catégories de sols autour desquelles se sont développées les civilisations agraires maïsicoles et sur lesquelles reposent les différents paysages végétaux. La présentation des données (météorologiques, océanographiques et sociologiques) est faite et suivie d'une critique afin de valider leur fiabilité, car leur qualité conditionne les résultats. Ensuite nous présentons la démarche méthodologique, en justifiant les différentes techniques d'analyse utilisées et en montrant aussi leurs limites de validité.

La deuxième partie est consacrée au diagnostic climatique du Bénin sur 60 ans (1931-1990) et retrace de façon sommaire la dynamique atmosphérique et la circulation océanique qui définissent les différents types de climats du Bénin. A partir du découpage de la période 1931-1990 en deux normales 1931-1960 et 1961-1990, les divers modes de variabilité climatique dans le temps et dans l'espace sont identifiés. A l'aide d'outils statistiques, les facteurs scientifiques d'échelle régionale et empirico-ethnologiques qui expliquent la variabilité climatique sont mis en évidence, et des indices pluviométriques pour des programmes de développement agronomique et environnemental sont élaborés. Dans cette partie du travail, la variation temporelle d'autres paramètres climatiques comme l'humidité relative, la tension de vapeur, l'insolation et les températures maximales et minimales, essentiels pour le développement du maïs est analysée.

La troisième partie est consacrée aux études agroclimatologiques. Elle étudie les impacts de la péjoration climatique sur la maïsiculture au Bénin en présentant des résultats de simulation des termes de bilan de la culture du maïs. A partir d'un modèle de simulation du bilan hydrique, elle met en exergue les répercussions de la variabilité climatique sur les indices de satisfaction des besoins en eau à chaque phénopase du cycle, pour une variété de maïs à cycle long (120 jours) et une variété de maïs à cycle court (90 jours). Des coefficients culturaux sont calculés pour chaque variété de maïs et des cartes de situation agroclimatique sont établies à partir d'analyses fréquentielles afin d'identifier les milieux affectés par le stress hydrique. Elle montre aussi les vicissitudes climatiques vécues par les agriculteurs et les efforts d'adaptation paysanne à la variabilité et à la péjoration climatique.

Ce travail fait appel à des connaissances scientifiques spécialisées et variées comme l'agronomie, la botanique, l'écophysiologie, l'économie, l'ethno-sociologie. Cette approche pluridisciplinaire lui confère un caractère géographique. Tous les aspects qu'évoque cette problématique ne peuvent être abordés dans cette étude. Seules les grandes lignes d'un problème du monde rural sont analysées, avec l'accent mis sur la "ressource climatique" et sa valorisation. Ce travail contribue à l'amélioration de la connaissance du milieu éco-géographique dans lequel se déroulent les différents programmes de développement en général et les projets de développement agricole en particulier.

PREMIERE PARTIE

POSITION DU SUJET, FONDEMENTS DE LA MAÏSICULTURE AU BENIN, DONNEES ET METHODOLOGIE

Partie 1 . POSITION DU SUJET, CADRE GEOGRAPHIQUE, DONNEES ET METHODOLOGIE

Chapitre premier - Problématique : contextes, objectifs.

Chapitre deuxième - Présentation du domaine d'étude : les fondements de la maïsiculture au Bénin.

Chapitre troisième - Historique et enjeux de l'agriculture béninoise et place de la filière maïs dans l'économie du Bénin.

Chapitre quatrième - Le maïs, une culture pluviale à histoire controversée.

Chapitre cinquième - Les données, critique, fiabilité et validité.

Chapitre sixième - Méthodes d'étude diagnostique du climat et approches agroclimatologiques.

CHAPITRE I - PROBLEMATIQUE : CONTEXTES ET OBJECTIFS

Section 1. : Contextes et position du sujet

Depuis plusieurs années, on note un regain d'intérêt pour les études portant sur la variabilité climatique en Afrique tropicale. Plusieurs zones géographiques du continent ont été éprouvées par la crise climatique de ces dernières années. Il est à noter que la région du Sahel a été le point focal de la majorité des études, suite à la sécheresse récurrente et aux disettes qu'elle a connues depuis 1968. La bibliographie concernant cette zone est abondante. Mais ce n'est pas seulement cette région de l'Afrique qui est affectée par les effets de la variabilité pluviométrique, dont les signes manifestes sont les sécheresses, les famines, les changements d'habitudes alimentaires, les ruptures d'équilibre écologique et l'occurrence de différentes pathologies liées aux extrêmes climatiques.

L'est de l'Afrique (Kenya, Ethiopie et Somalie), dont le rythme pluviométrique et l'évolution des précipitations ont été étudiés par, Haile (1990), Beltrando (1990) Yeshanew (1993), et Camberlin (1994), a été, depuis plusieurs années inscrit parmi les régions sinistrées du monde, où l'aide alimentaire est une nécessité. Ces auteurs, dont Camberlin (1994), montrent que de vastes secteurs de cette partie orientale du continent sont médiocrement arrosés et que 50% de cet espace reçoivent moins de 400 mm de pluie par an. Ils affirment que les faits climatiques majeurs qui frappent cette région sont l'anomalie pluviométrique somalienne, la sécheresse, et que la guerre accentue les problèmes de la faim.

Les différents champs pluviométriques ouest-africains, sahéliens et subsahéliens, et la relation entre leurs modes de variabilité et les forçages océano-atmosphériques, ont été étudiés par Lamb (1966), Kraus (1977), Nicholson (1979, 1980, 1981), Hastenrath (1985), Shinoda (1986), Folland *et al.* (1987), Reed (1988), Janowiak (1988), Camberlin (1987), Druyan (1989), Fontaine (1990), Janicot (1990, 1992a, 1992b), Mahé (1991), Nicholson et Palao (1993), Moron (1994, 1996). La plupart de ces auteurs démontrent que l'Afrique sahélienne est confrontée à une

diminution des totaux pluviométriques, accentuée par une forte persistance des anomalies pluviométriques négatives.

La variabilité des précipitations en Afrique australe et ses relations avec la circulation océano-atmosphérique ont été étudiées par Richard (1993) à partir de 136 stations sur la période 1946-1979. Selon lui, les variations pluviométriques de ce domaine sont surtout liées aux champs thermiques de l'océan Indien. L'auteur montre aussi, après Hulme (1992), que l'Afrique australe tropicale est le domaine qui a connu les plus faibles variations pluviométriques de tout le continent entre 1931-1960 et 1961-1990, comparativement au Sahel, à l'Afrique de l'est et au golfe de Guinée.

Depuis les années 70, la région du golfe de Guinée, dont Bokonon-Ganta (1986) a étudié la climatologie subit comme le Sahel les effets de la sécheresse, mais pas avec la même intensité (Houndénou, 1992) et les conséquences de celle-ci sur les écosystèmes et l'économie rurale ont été généralement moins sévères (Paturel *et al.* 1995). Sircoulon (1986), à partir de 10 postes pluviométriques subsahéliens a montré l'extension de la sécheresse au-delà des limites du Sahel avec une persistance de 2 à 3 ans pour une période de retour située entre 20 et 100 ans.

Les études de Courel (1985) ont montré que des pays comme la Côte d'Ivoire, le Ghana, et même le Bénin, ont connu de grands déficits hydrométriques comme en témoignent les niveaux les plus bas des barrages de Kossou, d'Akossombo et de Nangbéto. Cette situation climatique a engendré des crises sociales, à tel point que les gouvernements de ces pays ont lancé un appel à l'aide internationale, aux organismes internationaux P.N.U.D. (Programme des Nations Unies pour le Développement), P.A.M. (Programme Alimentaire Mondial). La variabilité climatique que connaît l'Afrique tropicale, le contexte socio-économique et l'économie internationale ont largement bouleversé les espoirs de développement agricole des Etats de cette région.

En effet, la "traite" agricole, qui a fait suite à la traite négrière après 1884, a imposé d'autres modes de production agricole (Surret-Canale, 1968). On passa de

l'agriculture de subsistance à l'agriculture commerciale, qui nécessite de vastes terres, d'autres formes d'occupation de l'espace, et engendra un bouleversement des structures agraires traditionnelles de ces pays (Sierra-Léone, Libéria, Côte d'Ivoire, Ghana, Togo, Bénin, Nigéria) : ce sont les grandes plantations de cacao, d'hévéa, de café, de coton, etc., et l'implantation des grandes firmes multinationales à vocation agro-industrielle. Mais là encore, il faut se demander si la pluviométrie, la pédologie et les autres facteurs naturels de la zone guinéenne correspondaient aux exigences de ces cultures d'exportation. Certaines régions forestières, comme le sud de la Côte d'Ivoire, du Ghana et du Nigéria, ont su profiter de ces cultures et ont hissé ces pays parmi les grands producteurs de cultures de rente du monde.

Malgré cette évolution apparente, l'histoire des structures agraires et de l'économie agricole de ces Etats prouve aujourd'hui un déphasage d'adaptation aussi bien dans les conditions ethnosociologiques que politiques. Et l'Afrique se présente actuellement comme un continent en panne (Giri, 1986). Peu d'intérêt était accordé aux cultures vivrières et la plupart des projets de développement agricole et d'aménagement rural initiés à cette époque comme le programme du Grand Ghezira au Soudan, le projet d'Alokplégbé au Togo, la SONADER, la SONIAH au Bénin ont échoué. D'ailleurs, le cri d'alarme lancé par Dumont (1969), "L'Afrique Noire est mal partie", tant contesté par les classes dirigeantes d'alors, est devenu aujourd'hui une réalité incontestable, dans la mesure où les divers plans d'aménagement rural et les différents programmes d'ajustement structurel ont échoué, et il a fallu une dépréciation monétaire de 50% du franc CFA en 1994 pour tenter de juguler la crise, sans hélas y parvenir encore !

Le Bénin ne se situe pas en marge de la "course" commerciale. Ainsi, l'ex-Dahomey, actuelle République du Bénin, a développé la culture du palmier à huile, du café, et d'autres cultures fruitières et maraîchères dans le Bas-Bénin. Les récessions climatiques qu'a connues le pays, les décisions issues des accords ACP-CEE (Afrique Caraïbes Pacifique - Communauté Européenne) en fixant le STABEX (STABEX : Fonds de stabilisation des prix des matières premières, accords de Yaoundé I, II, III et de Lomé I, II, III, IV) ont poussé à l'abandon de la culture du palmier à huile et du café développée dans le Bas-Bénin, pour encourager dans le bassin du Niger, au nord du pays, la culture du coton dont les besoins en eau ne

sont pas aussi importants que ceux des premières cultures. De vastes plantations de caféiers et de palmier à huile sur les plateaux de Sakété-Pobè, dans le département de l'Ouémé au sud-est, d'Allada dans le département de l'Atlantique, d'Aplahoué dans le Mono au sud-ouest du pays, sont plus ou moins abandonnées. Pire encore, la quasi-totalité des grands projets d'aménagement rural et d'agro-industrie initiés au cours des années 60, n'ont pas atteint les résultats escomptés (Boko, 1988), car outre la mauvaise gestion due en partie à **"l'absence de l'amour et du respect de la chose publique"**, **les facteurs climatiques n'ont jamais été pris en compte de manière satisfaisante, et sont rarement soumis à une étude diagnostique afin de tester la viabilité de ces projets en termes éco-climatiques.** A cela sont venus se greffer les problèmes exogènes liés aux transferts de technologie, à la détérioration continue des termes de l'échange et les sécheresses récurrentes. Ainsi, la période 1960-1989, caractérisée par une tendance continue à la baisse de la pluviométrie, a suscité une désillusion totale à l'égard des expériences de modernisation agricole (Houndénou, 1992).

Face à la persistance du phénomène, le gouvernement marxiste de 1972 au Bénin a dû convoquer un séminaire sur la sécheresse et la "désertification" en 1985, afin de trouver des solutions pour pallier la crise climatique. Il s'agissait pour la plupart des participants et des cadres des ministères du développement rural, du plan et de la restructuration économique en particulier, à qui était confiée l'organisation du séminaire de Parakou, d'initier des projets de reboisement à grande échelle afin de maîtriser la variabilité pluviométrique et de renverser la tendance à la baisse des totaux pluviométriques. Ainsi, la Journée de l'Arbre a été instituée au Bénin. Mais la réalité était tout autre. Les résolutions issues des travaux sur "la sécheresse et la "désertification" n'ont jamais été prises en compte, mise à part la politique de reboisement. Pire, toutes les résolutions relatives au climat et ses conséquences étaient occultées. D'une façon générale, **les résultats de ce séminaire furent très lacunaires** : par exemple, ils ne présentaient pas les différents modes de variabilité à tous les pas de temps des divers champs pluviométriques, afin d'identifier des régions à comportement homogène sur le plan pluviométrique, pour les différents programmes d'aménagement du territoire. **C'est dire que l'espace agricole béninois est géré sans diagnostic climatique et agroclimatique suffisant.**

La baisse sensible, l'irrégularité et la mauvaise répartition des précipitations que connaît le Bénin, surtout dans sa partie méridionale, ont provoqué une diminution de la production des cultures vivrières, comme le manioc et le maïs (aliments de base de la région sud), le mil, le sorgho et l'igname (dans la partie nord du pays). Au cours des années 1963, 1968, 1977, 1981, 1983, 1984, le Bénin a vu ses productions céréalières chuter, et a été obligé d'importer du maïs et d'autres produits vivriers afin de juguler la crise alimentaire engendrée par la pénurie pluviométrique. Cette situation a occasionné des disettes et des changements d'habitudes alimentaires.

Depuis 1971, les importations de produits alimentaires, dont les céréales et produits assimilés (blé, maïs, malt, mil, sorgho), ont beaucoup augmenté par rapport à la période antérieure (Figure 1).

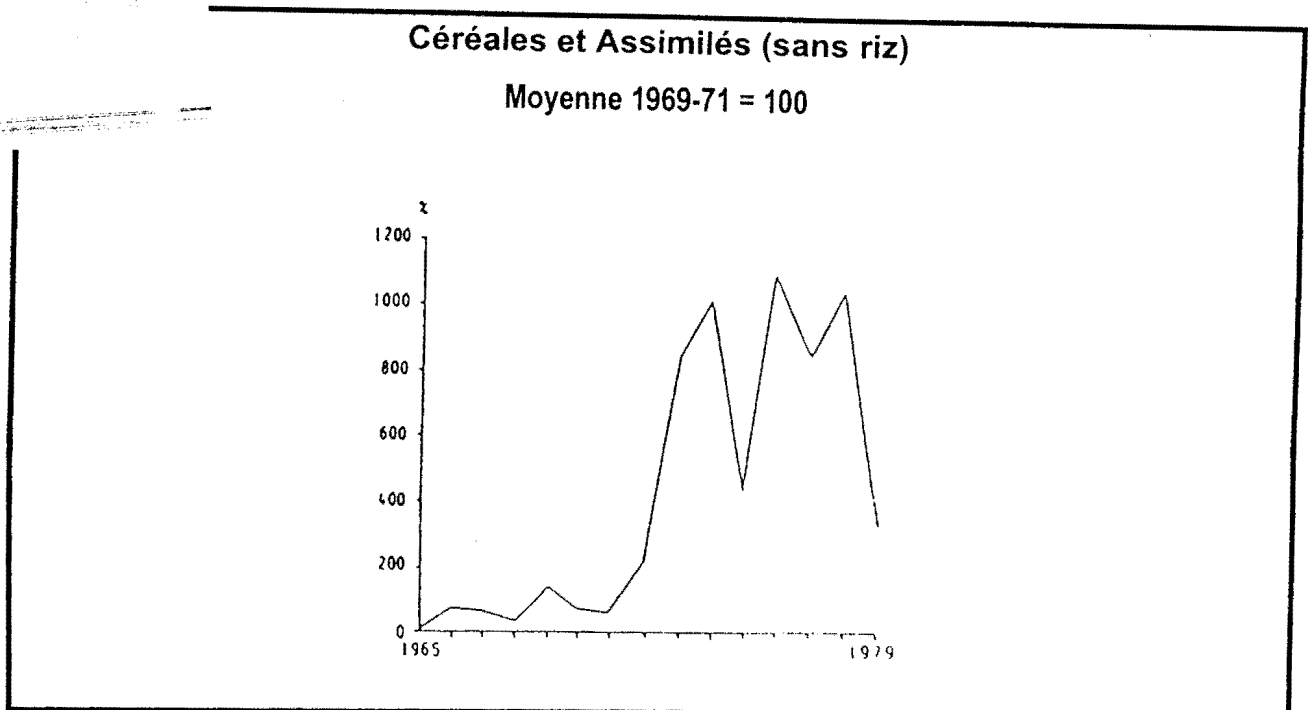


Figure 1 : Indices des importations de produits alimentaires au Bénin (d'après les données du Port Autonome de Cotonou, 1979 et Boko 1988).

Il faut signaler que la pénurie alimentaire consécutive aux insuffisances des précipitations ne se fait sentir qu'au cours de l'année suivante. Ainsi, les importations d'une année x_i ne serviront qu'à juguler le déficit vivrier dû au déficit de l'année pluviométrique antérieure x_{i-1} . Ce décalage est à prendre en compte pour l'interprétation de la courbe des nombres-indices qui décrit l'évolution temporelle des volumes d'importations de produits vivriers au Bénin. Ainsi, de 1972 à 1977, on a enregistré respectivement une augmentation de 554%, 1 318%, 1 413% et 1 081% par rapport au volume d'importation moyen. En 1987, 1988 et 1990, le volume des importations représentaient 131%, 77% et 50% du disponible domestique en céréales. Ces valeurs paraissent énormes et le Bénin se place dans une situation de sécurité alimentaire inconfortable.

Boko (1988), en analysant les disponibilités alimentaires au Bénin, a montré que la courbe d'évolution des nombres-indices de la production alimentaire par habitant a constamment baissé de 1972 à 1978, de 2 à 11%, et que l'année 1979, qui a été bien arrosée avec des précipitations bien réparties, a connu un nombre indice égal à 100.50. L'auteur montre qu'après 1979, les disponibilités alimentaires

du pays ont chuté de nouveau, avec la baisse et la mauvaise répartition des précipitations. Selon les analyses du Laboratoire d'Analyse Régionale et d'Expertise Sociale (LARES, 1992), le Bénin est devenu l'un des plus grands importateurs régionaux de produits alimentaires (Tableau 2) devant lesquels arrivent les céréales : sorgho, maïs, farine de blé, blé, riz (Tableau 1). Le blé et la farine de blé servent à la fabrication du pain dont la consommation de plus en plus répandue, a bouleversé le régime alimentaire des béninois depuis la crise pluviométrique de 1976-1977. Par contre, le sorgho beaucoup plus consommé dans le nord du Bénin est utilisé dans les brasseries.

Années-Produits	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Blé	31 829	53 318	56 063	4 5645	40 484	44 586	28 887	11 673	6 3883	14 683	6 1118
Farine de Blé	1 930	2 2283	10 105	13 630	7 811	5 704	4 215	11 662	6 2716	17 649	16 076
Sorgho	934	29 615	27 668	46	11 388	42562	1 377	3 983	985	796	5 807
Maïs	5 320	2 207	23 402	3 508	5 502	70 558	1 636	773	10 271	-	1 556
Riz	31 377	82 700	82 974	56 594	135 543	120 266	201467	389 291	22 2823	60 465	161 822
Total Général	71 390	190 123	200 212	11 9417	200 728	283676	237 582	41 7292	360 278	93 593	246 379

Tableau 1 : Evolution en tonnes des importations de céréales du Bénin (d'après le Port Autonome de Cotonou, 1992).

Années-Produits	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
Sel	30 649	26 313	34 218	31 288	46 420	30 725	29 263	13 190	6 214	7 118	15 834
Sucre	10 229	5 627	4 853	9 726	3 9825	46 818	57 666	22 282	9 950	5 586	11 342
Poissons congelés	8 006	7 410	8 814	6 481	2 966	5 997	10 339	11 183	7 075	4 389	6 838
Produits laitiers	4 552	6 048	52 255	5 366	7 906	11 247	95 76	8 250	3 527	2 646	3 296
Total Général	53426	45398	100134	52861	97117	94787	106844	54905	26766	19739	37310

Tableau 2 : Evolution en tonnes des importations alimentaires du Bénin autres que les céréales (d'après le Port Autonome de Cotonou, 1992).

Par rapport à la moyenne de la décennie 1980-1990, le volume des importations de céréales et produits alimentaires, excepté le riz, a augmenté de 46% en 1981, de 59% en 1982, de 121% en 1985, de 86% en 1988 (Figure 2).

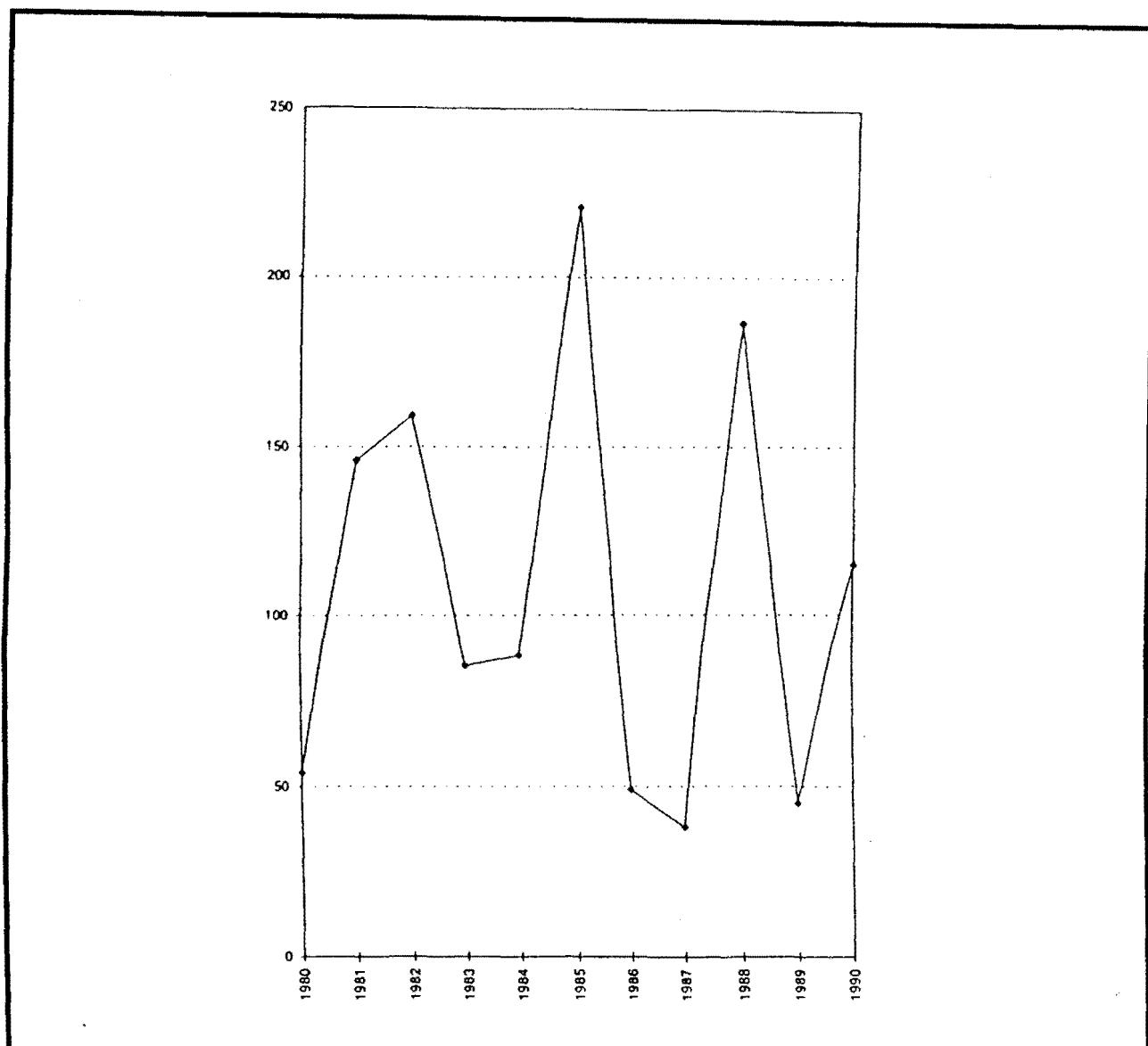


Figure 2 : Evolution des nombres-indices des importations de céréales et assimilés, sauf riz au Bénin (1980-1990). (Base 100 = 1980-1990).

Les plus importants volumes d'importations sont bien consécutifs aux périodes qui ont connu une mauvaise pluviométrie dans le temps et dans l'espace. De tels volumes d'importations apparentent le Bénin aux pays sahéliers (Igué, 1992). Cette situation est le résultat de la priorité accordée aux cultures d'exportation sur les produits vivriers. Ainsi, l'économie rurale béninoise demeure toujours tributaire de l'étranger.

Le Bénin a traversé des moments très difficiles, car ces sécheresses continues ont compromis les récoltes des cultures pluviales, dont celle du maïs, et ont accentué le caractère extraverti de son économie rurale. En effet, la production agricole vivrière est destinée à la consommation intérieure, tandis que les cultures de rente sont destinées à l'exportation qui procure des devises étrangères. Les devises acquises devraient permettre, d'une part, au pays d'importer des biens d'équipement et de promouvoir d'autre part, une politique d'investissement pour le développement économique et social. Si la part des importations de produits alimentaires augmente du fait des mauvaises récoltes et de la poussée urbaine, la part consacrée à l'importation des biens d'équipement diminuera d'autant. Par ailleurs, si les cultures d'exportation (comme le coton) prennent le pas sur les cultures vivrières destinées à la consommation intérieure, les recettes d'exportation serviront à l'importation de produits alimentaires. L'économie béninoise se trouvera en situation de rétroaction négative permanente, d'où :

- ❶ la nécessité d'accroître la production vivrière pour mieux utiliser les recettes d'exportation à l'acquisition de biens d'équipement pour un réel développement économique et social,
- ❷ la nécessité de maîtriser les effets des variations de la production vivrière dont celle du maïs consommé par 70% de la population depuis son expansion dans le golfe de Guinée.

En effet, le maïs constitue l'aliment le plus couramment consommé dans le sud du Bénin. Les conditions écoédaphiques de la région sublittorale du Bénin favorisent le développement de cette culture sur les plateaux de terre de barre et dans les vallées. Cependant, une mauvaise répartition spatio-temporelle de la pluviométrie, des séquences de déficit hydrique au cours du cycle végétatif, constituent des risques climatiques pour le maïs. La variabilité de la ressource pluviométrique modifie les prévisions de rendement à atteindre pour la réussite de la campagne agricole. L'enjeu est considérable et l'étude du climat et de ses éléments deviennent nécessaires pour le succès des programmes de développement agricole. Tel est l'un des objectifs de ce travail.

Section 2. : Les objectifs

Face à la baisse continue, à l'irrégularité et à la mauvaise répartition spatio-temporelle de la ressource pluviométrique, amorcées depuis la fin des années 60, il importe pour nous de faire le **diagnostic agroclimatique** de cette culture, dans le but d'apporter des solutions en accord avec les caractéristiques pluviométriques. **Ceci revient à caractériser, à partir de la région-test du Bas-Bénin, les effets de la péjoration climatique sur la maïsiculture, à évaluer les risques et contraintes pesant sur cette production et à examiner le rôle des facteurs socio-économiques qu'il faut améliorer pour développer et étendre la culture du maïs au Bénin.**

L'analyse de la variabilité de la ressource pluviométrique et de sa valorisation amène à :

- ❶ établir le diagnostic climatique du pays en relation avec les facteurs atmosphériques et océaniques d'échelle régionale à partir des différents champs pluviométriques sur les périodes **1931-1990, 1931-1960 et 1961-1990.**

- ❷ élaborer des indices et des scénarios réalistes en terme d'occurrence statistique et de risque physique à partir de la variabilité pluviométrique, afin de délimiter des zones à comportement homogène et à signal identique. Ces milieux ainsi définis seront soumis à une analyse agroclimatique. Les scénarios dégagés seront utilisés dans un modèle de bilan hydrique décrivant les besoins en eau de la culture du maïs et des rendements à espérer, afin d'étudier la part du climat dans les échecs répétés des différentes politiques d'aménagement rural, en tenant compte aussi des autres composantes non climatiques, d'ordre ethnique, social et économique ;

La présente recherche traite de tout le Bénin, avec une étude de cas sur sa partie méridionale. **Le Bas-Bénin** constitue la région-test sur laquelle portera notre recherche pour plusieurs raisons. D'une part, il représente le premier espace économique du pays et le milieu dans lequel le maïs est le plus consommé. D'autre part, il constitue l'espace géographique le plus peuplé du territoire national, avec plus

de 2/3 de la population sur 1/7 de la superficie totale du pays. A ce titre, il a bénéficié d'un plus grand nombre de projets agricoles par rapport aux autres régions du pays. Le potentiel humain et les conditions écologiques semblent présenter un cadre favorables aux différents projets.

Ce travail apporte des informations complémentaires au zonage de la maïsiculture dans l'espace francophone en Afrique de l'ouest, initié par les Etats du Comité des Réseaux de Recherches en Afrique (CORAF) et entrepris par le Technical Centre for Agricultural and Rural Cooperation (ACP-CEE) (Figure 3). La contribution de cette étude à l'identification des aires agroclimatiques favorables à la culture du maïs du Bénin s'explique par le fait que le Bénin ne faisait pas partie des Etats impliqués par ce projet.

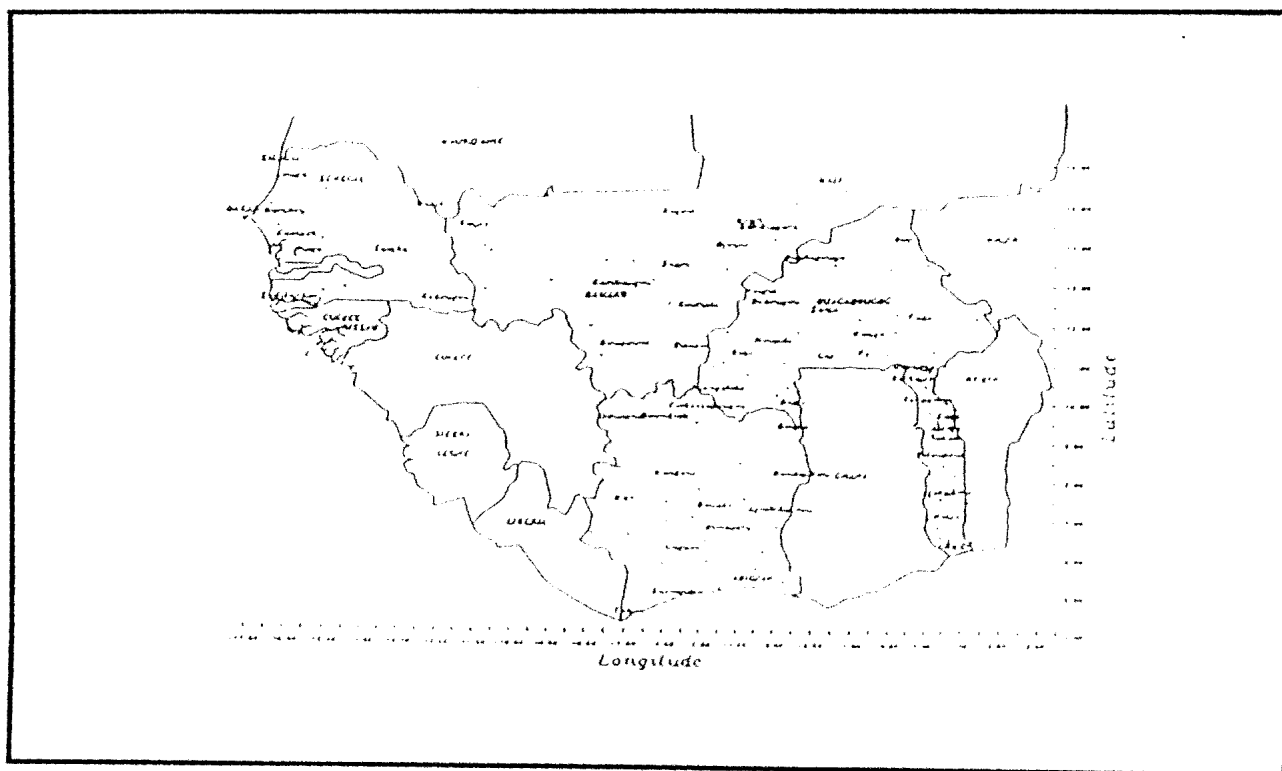


Figure 3 : Pays et localisation des stations du zonage de la maïsiculture en Afrique de l'ouest (d'après Technical Center For Agricultural in Rural Cooperation (ACP-CEE), Vol. 1).

En effet, le projet de zonage des potentialités de la maïsiculture pluviale en Afrique sub-sahélienne est réalisé dans le cadre d'un programme de recherche plus vaste, intitulé "Zonage des risques de sécheresse en Afrique soudano-sahélienne et conséquences sur les systèmes de culture". Il a pour objectif

d'identifier les aires géographiques pluviométriquement favorables à la pratique d'une culture vivrière performante, caractérisée par la durée de son cycle et ses différentes phases de développement pour lesquelles les besoins en eau ont été préalablement estimés (Forest, 1990). Le projet, sous l'égide de la CORAF et en collaboration avec les équipes de recherche des directions agronomiques du Sénégal, du Mali, du Burkina Faso, du Togo et de la Côte d'Ivoire, vise à minimiser le risque agroclimatique en agriculture pluviale, qui constitue une contrainte déterminante pour les agricultures des pays intéressés. Le programme doit aussi mettre à la disposition de chaque état un outil d'aide à la décision sur les potentialités agroclimatiques de la maïsiculture pluviale. Le principal paramètre pris en compte dans ce zonage est la satisfaction des besoins hydriques du maïs.

L'objectif final de cette thèse est d'étudier le comportement de la culture du maïs vis-à-vis des différents faciès pluviométriques du milieu béninois dans l'actuel contexte de péjoration climatique. Cette recherche pourra permettre aux agronomes et aux développeurs d'élargir leur champ d'investigation sur le Bénin.

CHAPITRE II : PRESENTATION DU DOMAINE D'ETUDE : LES FONDEMENTS DE LA MAÏSICULTURE AU BENIN

Section 1. : Les composantes naturelles du milieu : un atout maïsicole

L'étude des composantes naturelles (dont les éléments du climat) du Bénin, dans l'ordonnement ouest-africain est capitale. Celles-ci sont susceptibles d'influencer les différentes civilisations agraires et l'économie du pays.

Le Bénin est limité au nord par le fleuve Niger, au nord-ouest par le Burkina-Faso, à l'est par le Nigeria, à l'ouest par le Togo. Il s'allonge perpendiculairement au littoral (Figure 4)

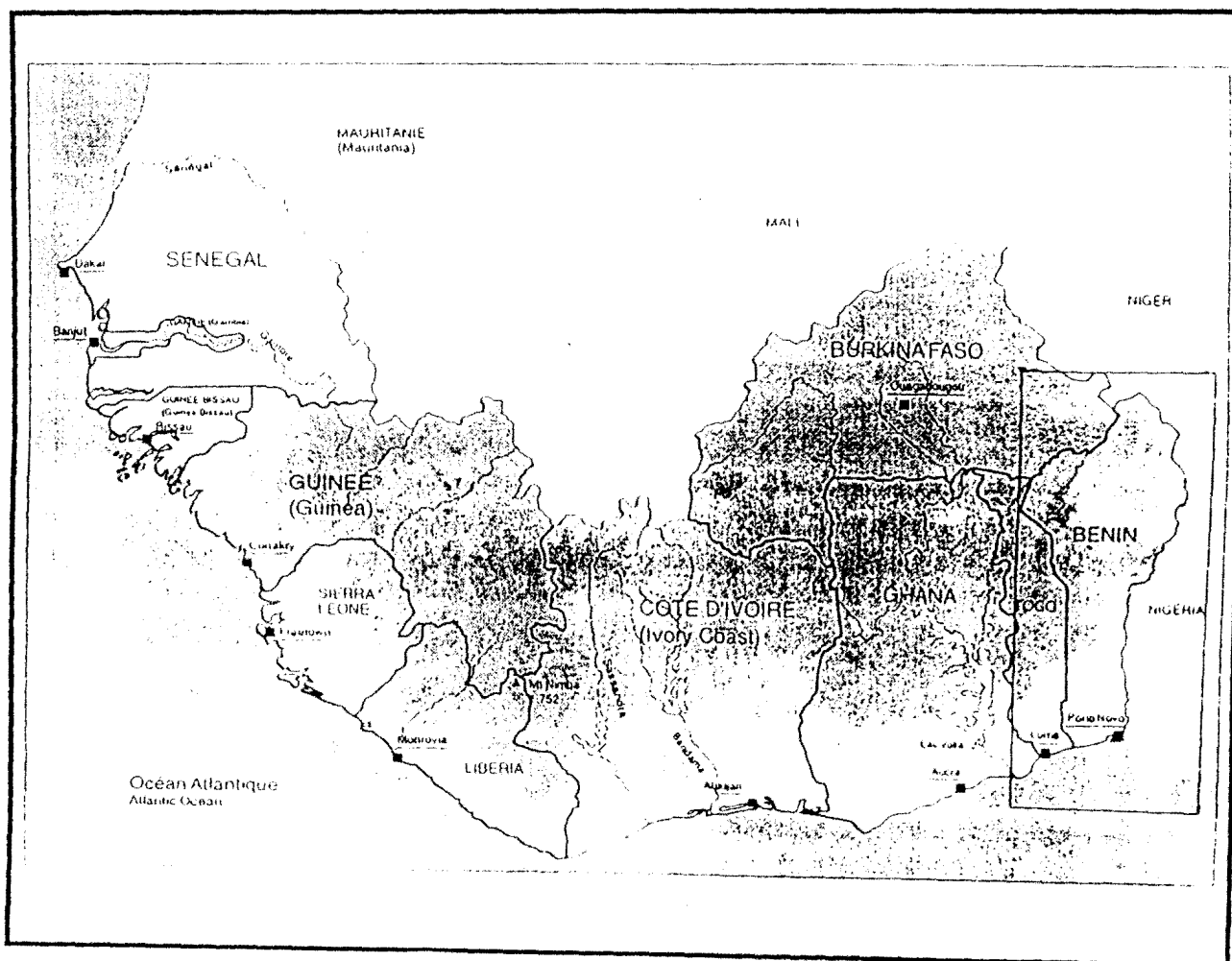


Figure 4 : Localisation du Bénin en Afrique (Tiré du CD-ROM Atlas Géographique base de la NASA)

Du nord au sud, le Bénin est un espace ouvert aux influences saharosahéliennes d'une part et aux influences de l'océan Atlantique d'autre part. Cette situation géographique lui confère les caractéristiques d'un pays côtier agricole qui appartient à la zone d'influence de la mousson ouest-africaine.

1.1. Les unités de relief et la structure géologique

1.1.1. Le relief

La topographie joue un rôle majeur dans les caractéristiques générales et locales des différents climats et dans le façonnement des paysages agraires. Sa place dans l'étude des climats n'est plus à démontrer et son intérêt dans la présentation du cadre d'étude revêt une grande importance. Les diverses formes de relief induisent des nuances dans l'ambiance climatique du pays. Le relief constitue alors un paramètre non négligeable dont on tient compte dans la classification des climats. Comment se présente le cadre géomorphologique béninois ? et quel est son incidence climatique ?

Le Bénin a un relief peu accidenté constitué de plusieurs unités topographiques. Ce sont : la plaine côtière, les plateaux de terre de barre, la dépression de la Lama, la pénéplaine précambrienne, le plateau de Kandi et la chaîne de l'Atakora (Figure 5).

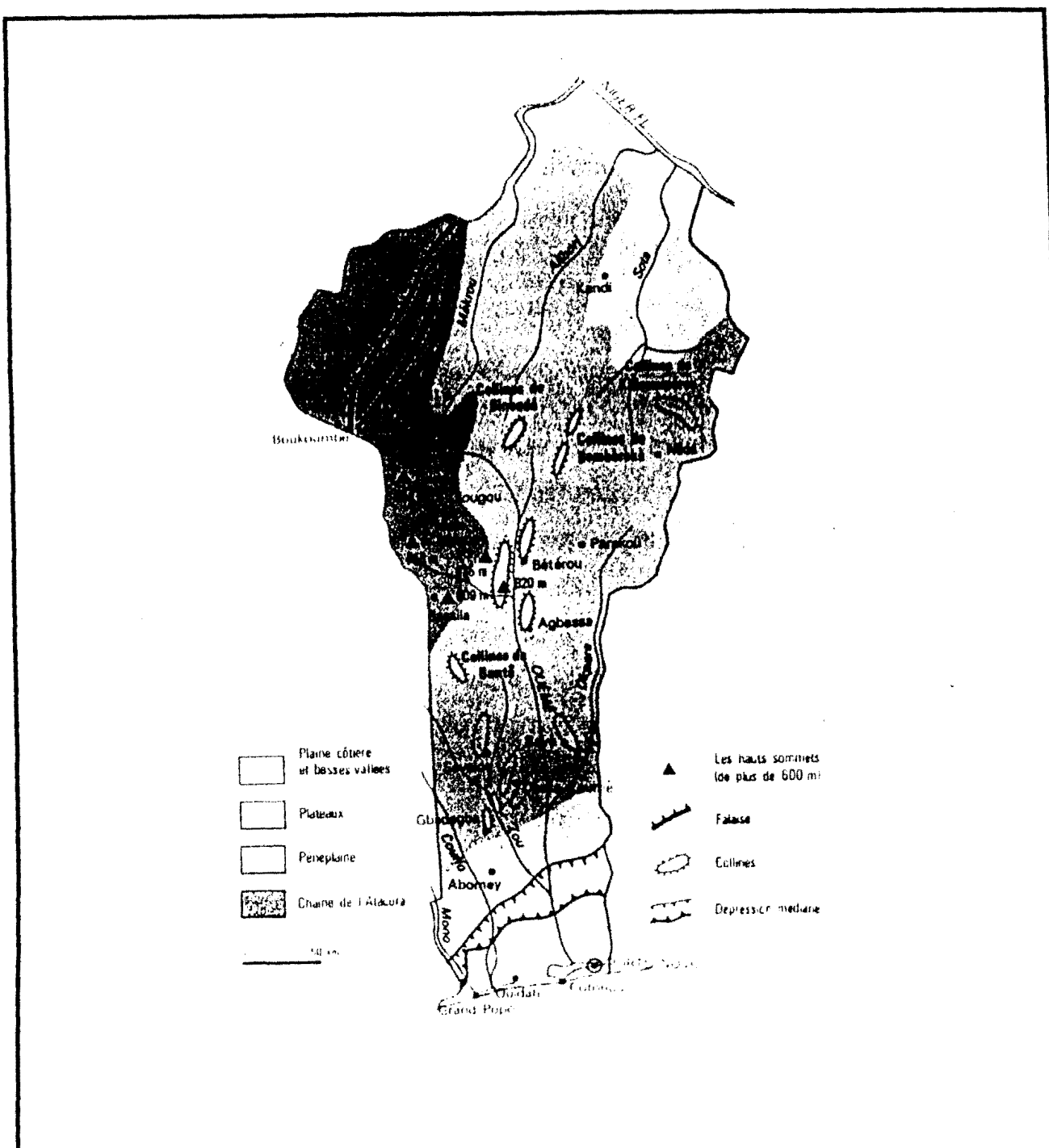


Figure 5 : Les grandes unités topographiques du Bas-Bénin (d'après Adam et Boko, 1993).

1.1.1.1. La plaine côtière et les plaines alluviales et deltaïques

Ces deux unités de relief constituent les régions les plus basses du Bénin. Elles représentent environ 1/5 de la superficie totale du pays. D'une façon générale, elles occupent des positions marginales. Les plaines alluviales sont celles de l'Oti et du Niger, au nord du pays. Elles sont soumises à des influences continentales

sahéliennes. Par contre, les plaines deltaïques sont celles de l'Ouémé et du système Mono-Couffo dans le sud du pays. Elles subissent les influences atlantiques.

De toutes ces unités topographiques de très basse altitude, la plaine côtière est la plus importante. Elle a été mise en place suite aux transgressions et régressions marines liées aux fluctuations climatiques qui ont affecté l'ouest africain (Houndénou, 1988). C'est le résultat du processus d'adjonction des différents cordons marins et de comblement des espaces interdunaires à partir de 5 000 ans B.P (Paradis, 1976, 1979, Lang et Paradis, 1982). A l'Holocène récent (3 500 ans B.P. à l'actuel), la mise en place de cette unité topographique s'acheva par la régularisation de la ligne de côte et des cordons littoraux parallèles (Lang et Paradis, 1984). La plaine côtière constitue la partie méridionale du Bas-Bénin et fait partie intégrante du bassin sédimentaire côtier du golfe du Bénin dont Slansky (1969) a étudié la géologie. Elle s'étend sur 125 km le long de la côte. Sa largeur est variable ; elle est très étroite à l'ouest et s'élargit vers l'est : 1 km à Hillacondji à la frontière togolaise, 2 km à Grand-Popo, 3 km à Ouidah et 10 km entre Sèmè et la lagune de Porto-Novo (Adam et Boko, 1993). Elle est basse, sableuse et son altitude ne dépasse pas 10 mètres. La platitude du modelé limite les convergences et les ascendances humides. Sur la plaine côtière, on distingue, du sud au nord, les cordons, les "bas-plateaux", les escarpements du rebord des plateaux.

● Les cordons littoraux

Ils constituent des formes d'accumulation marine. On distingue le cordon récent et le cordon ancien. D'une façon générale, ils sont rectilignes et parallèles au rivage actuel. Ils sont caractérisés par une relative dissymétrie et un sommet presque plat sur lequel se sont établies les populations *mina*, *hula* et *huéda*.

Le cordon récent n'a pas la même configuration d'est en ouest. Il est limité au nord par la lagune côtière et au sud par l'océan Atlantique. Il forme la bordure du bassin sédimentaire côtier dans sa partie émergée et se termine par une flèche littorale. La côte est rectiligne et, par endroits, parallèle aux flux humides de l'océan Atlantique. Ce parallélisme des côtes est à l'origine d'une situation pluviométrique particulière dans le Bas-Bénin.

Le tracé de la côte apparaît très mobile (Lang et Paradis, 1977) et se caractérise par deux embouchures : ce sont l'embouchure du fleuve Mono appelée la "Boca del Rio", située à l'ouest, qui est très mobile dans le temps et dans l'espace, et celui du fleuve Ouémé à l'est. Entre les deux séries de cordons (cordon ancien et cordon récent) et la façade côtière, un milieu à dominance marécageuse laisse apparaître des zones basses sableuses. Ces deux séries de cordons emprisonnent, au contact des plateaux, le lac Nokoué (*Nonxwé*) et le "lac" Ahémé (*Hen*).

Le cordon ancien se situe entre les zones de marais, les sables jaunes au nord et la lagune côtière au sud. Le cordon ancien est large à l'est du "lac" Ahémé. Il se réduit et se morcelle du nord-est au sud-ouest, vers Grand-Popo, pour se perdre entièrement dans les dépressions marécageuses en bordure des plateaux. Il résulte de ce morcellement des unités de relief dont l'altitude varie entre 3 mètres pour les plus importantes et 1 mètre environ pour les plus petites. Ce sont de micro-relief.

● **Les bas-plateaux**

La désignation de cette forme de relief ne fait pas l'unanimité chez les chercheurs et plusieurs vocables sont utilisés pour identifier cette unité : "cordons internes et médians" de Germain (1975), "bas-plateaux ogoliens" de Tastet (1975, 1977), "glacis ogoliens" de Adam (1984). Cette unité morphologique est constituée essentiellement de sables jaunes. Elle s'individualise au sud-est de Comé avec une altitude de 10 mètres, et s'étend de Ouidah à Godomey, à l'ouest de Cotonou. L'ensemble, un peu incliné, a une pente longitudinale constante et une pente latérale nulle. L'altitude générale est interrompue dans le sud par une dépression de 1 à 2 mètres de profondeur. Les caractéristiques morphologiques de ces "bas-plateaux" seraient probablement liés aux effets du climat (Tastet, 1975).

● **Les escarpements du rebord des plateaux**

Ils constituent la limite nord de la plaine côtière. Ce sont les escarpements du rebord du plateau de Porto-Novo à l'est, d'Allada au centre et ceux du plateau de Comé à l'ouest. Dans la partie occidentale de la plaine, le contact des bas-plateaux avec la terre de barre se fait par un talus abrupt de 15%. Après les escarpements, s'étendent deux séries de plateaux dans le Bas-Bénin séparées, par une dépression médiane, la pénéplaine et le massif de l'Atakora au nord-ouest du pays.

1.1.1.2. Les plateaux

Du sud au nord, nous distinguerons deux types de plateaux : ce sont les plateaux méridionaux sous climat béninien et le plateau de Kandi sous climat soudanien.

1.1.1.2.1. Les plateaux de terre de barre du Bas-Bénin

Ils sont situés au nord de la plaine côtière et constituent la partie septentrionale du bassin sédimentaire côtier. Cet espace à relief tabulaire est séparé par des vallées de direction nord-sud (Pougnnet et Slansky, 1957). D'une façon générale, ces plateaux se sont constitués sur la terre de barre et sont reliés à la plaine côtière par un talus. On distingue, de la latitude d'Abomey-Calavi jusqu'à la latitude de Dan, deux séries de plateaux isolés par la dépression médiane de la Lama. Il s'agit au sud des plateaux de Sakété-Pobè, Allada et Comé (Figure 6) et des plateaux de Kétou, Zagnanado, Abomey et Aplahoué au nord.

● Les plateaux du sud

D'est en ouest, on distingue, le plateau de Kétou-Zagnanado, Sakété-Pobè, d'Allada, et Comè.

① Le plateau de Sakété-Pobè

Il a une altitude moyenne de 100 mètres et est limité à l'est par la vallée de l'Okpara, à l'ouest par la vallée du fleuve Ouémé. Son rebord septentrional en cuesta domine le Hollidjè, tandis que le talus méridional à pente forte surplombe la lagune de Porto-Novo. Il est entaillé de vallons et parsemé de dépressions fermées.

② Le plateau d'Allada

Son altitude est de 100 mètres en moyenne ; cependant, il culmine à 160 mètres à Houègbo. Entaillé par des vallons encaissés, il est limité au sud par la plaine côtière, à l'ouest par le bas-Cofffo, à l'est par la vallée de la Sô. Le contact avec la plaine est parfois direct, par une surface de discordance visible sur le terrain ; parfois on trouve une ancienne lagune au pied du talus (Toho, Linhouin, Sodo ou Djou).

③ Le plateau de Comé

Il est limité à l'ouest par la vallée du fleuve Mono, à l'ouest par le lac Ahémé, au sud par une zone marécageuse et les "cordons internes et médians" (Germain, 1975). Le contact avec les "cordons internes et médians" se fait par un talus abrupt de 15% (Houndénou, 1988).

1.1.1.3. La dépression de la Lama

C'est une dépression médiane due à l'érosion. Elle est essentiellement formée de sédiments argilo-marneux d'âges crétacé et éocène. Orientée SW-NE, elle forme un vaste sillon entre les deux séries de plateaux qu'elle sépare. Elle mesure 130 km en longueur, avec une largeur de 5 à 25 km, et est encaissée de 40 mètres dans la région de Toffo par rapport aux plateaux du nord. Cette dénivellation apparaît modeste, mais est importante pour le Bas-Bénin. Vraisemblablement, elle pourrait jouer un rôle dans le climat local. Plusieurs noms sont attribués à cette dépression selon l'endroit où l'on se situe. A l'est, on l'appelle **dépression d'Issaba**, ou le **Hollidjè**, ou encore la **dépression du pays Holli**. Au centre, elle est appelée la **dépression de Kô**, et à l'ouest, dans le département du Mono, elle est connue sous le nom de **dépression de Tchi**.

Elle est reliée aux plateaux du sud par des cuestas à pente très forte. En revanche elle est rattachée aux plateaux du nord par un glacis (Figure 6).

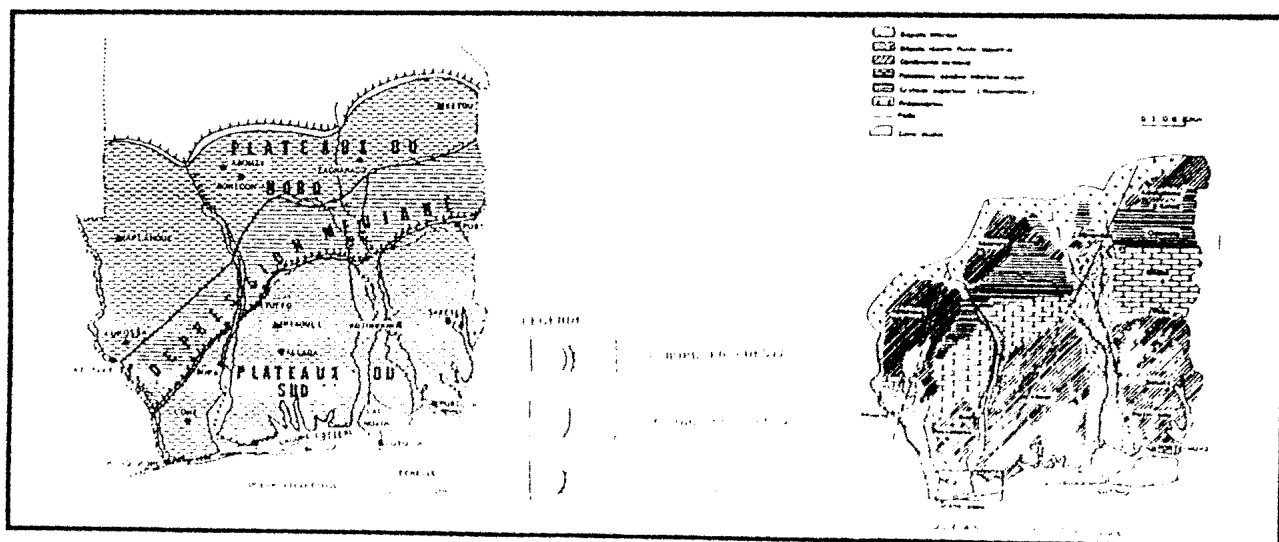


Figure 6 : Esquisse géomorphologique de la région du Bas-Bénin (d'après, Slansky, 1992)

1.1.1.4. Les plateaux au nord de la dépression de la Lama

Au nord de la dépression de la Lama, on distingue, d'est en ouest, le plateau de Kétou, de Zagnanado d'Abomey et d'Aplahoué.

❶ Le plateau de Kétou

Avec une altitude moyenne de 150 mètres, il est limité à l'ouest par la vallée du fleuve Ouémé, à l'est par la vallée de l'Okpara. Le rebord sud en pente douce le raccorde au Hollidjè ou dépression d'Issaba (autre nom de la dépression de la Lama).

❷ Le plateau de Zagnanado

Il est situé entre les vallées du Zou et de l'Ouémé. Son altitude est en moyenne de 150 mètres.

❸ Le plateau d'Abomey

Il est limité à l'est par la vallée du Couffo et à l'ouest par la vallées du Zou. Au nord, il domine la pénéplaine du Moyen-Bénin par une cuesta, tandis qu'au sud un glacis topographique fait le contact avec la dépression de la Lama. Son altitude est de 240 mètres, la plus élevée de toute la région.

❹ Le plateau d'Aplahoué

C'est le plateau Adja. Il est situé au sud-ouest du Bénin et a une altitude moyenne de 80 mètres. Il est limité à l'ouest par la vallée du Mono, à l'est par la vallée du Couffo, au sud par la dépression de Tchi (nom du secteur occidental de la Lama)

❺ Le plateau de Sakété-Pobè

Il a une altitude moyenne de 100 mètres et est limité à l'est par la vallée de l'Okpara, à l'ouest par la vallée du fleuve Ouémé. Son rebord en cuesta domine le *Hollidjè* tandis que le talus méridional à pente forte surplombe la lagune de Porto-Novo. Il est entaillé de vallons et parsemé de dépressions fermées.

1.1.1.5. La pénéplaine du Bénin

Elle s'étend de la latitude d'Adakplamè (à 10 km au nord de Kétou) à l'est, et de Lonkly, dans le département du Mono, jusqu'à la latitude du plateau de Kandi au

nord du pays. Au nord-ouest, cette pénéplaine est raccordée au massif de l'Atakora. La pénéplaine du Bénin occupe les 2/3 de la superficie du pays. C'est une vieille surface d'aplanissement, modelée dans des roches granitiques et gneissiques sur laquelle s'individualisent des formes de relief résiduelles qui caractérisent sa topographie. En effet, la pénéplaine granito-gneissique du Bénin a une structure vallonnée, monotone, et se singularise par un modelé de croupes modestes. Elle est caractérisée par une double inclinaison vers le sud et vers le nord à partir de la latitude de Bembéréké qui constitue la ligne de partage des eaux entre le bassin du Niger et les bassins côtiers. La plupart des formes de relief résiduelles, à savoir les collines en forme de dôme d'Agouna, de Paouignan, de Dassa-Zoumè (618 m), de Tchetti, de Savalou (463 m), de Savè (396 m), de Bantè (408 m) dans le sud, de Ouari-Maró (620 m) et ceux de Nikki, de Bembéréké, de Sinendé, de Kalalé et de Kidaroukpérou dans le nord sont orientées nord-sud. Ces collines influent sur les différents flux atmosphériques qui traversent la région, en accroissant l'échauffement diurne et en aggravant le phénomène de turbulence. Elles favorisent également l'effet d'ascendance des masses d'air et leur présence explique l'importance accrue des manifestations orageuses au sud de la ligne de partage des eaux.

1.1.1.6. Le plateau de Kandi

Contrairement aux plateaux de terre de barre du Bas-Bénin développés sur le Continental Terminal, le plateau de Kandi est essentiellement constitué de grès du Crétacé. Il est situé au nord-est du pays entre Ségbana et Kandi, et s'étend jusqu'aux limites du lit majeur du fleuve Niger (Adam et Boko, 1993). Avec une altitude moyenne de 350 mètres, il constitue une unité topographique uniforme. Il est légèrement incliné vers la plaine alluviale du Niger et porte une multitude de buttes à cuirasses ferrugineuses et de très faibles dénivellations. Le plateau de Kandi est entaillé de vallées plus ou moins encaissées au fond desquelles coulent des rivières au réseau relativement dense. L'écoulement de ces rivières se fait dans un sens sud-nord conforme au pendage quasi méridien (NNE-SSW) de ces formations géologiques (Agli, 1995).

Sur le plan géologique, le plateau de Kandi est une partie du bassin du paléomésozoïque du Niger qui prolonge au SW ceux des Iullemmeden au Niger et de Sokoto au Nigéria (Alidou et Lang, 1983). Il est marqué par une discordance majeure

sur le socle granito-gneissique précambrien rajeuni par l'orogénèse panafricaine (Alidou, 1983). Le bassin paléo-mézoïque du Niger au Bénin dans lequel se situe le plateau de Kandi constitue un vaste épandage détritico-terrigène mis en place probablement sous un climat froid durant le Paléozoïque inférieur. Sa mise en place s'est accompagnée de légers rejeux des compartiments faillés suite à une tectonique très modérée. Ces rejeux ont entraîné une modification sensible du profil du système fluvial anastomosé commandé par le fleuve Niger (Alidou, 1983).

1.1.1.7. La Chaîne de l'Atakora

Située au nord-ouest du Bénin, l'Atakora constitue la principale chaîne de montagne du pays. Elle se prolonge au Togo en un massif aux sommets tabulaires bordés de quelques reliefs résiduels isolés dont les plateaux de Dayes, de Klotô, de Hahohoté. La chaîne culmine à 986 m à Agou près de Palimé. Au Ghana, la chaîne de l'Atakora prend le nom de Akwapim Ranges. D'une largeur très variable au Bénin (5 km, à l'ouest de Kérékou, 45 km sur le méridien de Kouandé), le chaînon de l'Atakora s'abaisse à l'est vers la pénéplaine précambrienne. A l'ouest, l'Atakora domine la plaine de piedmont de Gourma par un escarpement subvertical. Composé de deux bourrelets parallèles séparés par une dépression dans laquelle coule la section amont de la Pendjari, l'Atakora est orienté NNE-SSW, et culmine au Bénin à Sagbarao au sud-ouest d'Aléjo à 658 mètres. La plupart des formations géologiques de l'Atakora datent de l'Ordovicien et du Précambrien (Faure 1977).

L'Ordovicien représente les formations sédimentaires et les formations géologiques du Précambrien sont des roches métamorphiques. L'Ordovicien repose sur le Voltaïen au nord-ouest de la chaîne et est représenté par des schistes argileux à pendage subhorizontal. En revanche, le Précambrien est représenté par les formations de Buem, les formations de l'Atakorien et les formations du Dahomeyen.

Les formations du Buem sont essentiellement constituées de micaschistes et de schistes quartzeux à pendage subvertical. Elles se localisent dans la région de Boukoumbé et de Tanguéta. Les grès quartziques et les jaspes constituent la deuxième unité pétrographique du Buem. Ce sont des affleurements sous forme de collines d'une centaine de mètres de commandement, parallèles à la chaîne de

l'Atakora, à la limite des schistes du Voltaïen. Les formations de l'Atakorien qui constituent l'essentiel du massif montagneux sont des quartzites et des micashistes granitisés.

Les formations du Dahomeyen constituent le socle granito-gneissique et sont constituées de gneiss à muscovite (région de Perma), à biotite (région de Kouandé, Ouassa-Péhunco et bassin du Mékrou). Les gneiss ferromagnésiens constituent le substrat de l'Alibori supérieur.

La chaîne de l'Atakora perturbe la tendance zonale du flux d'est continental et crée des nuances dans les faciès climatiques de la région par l'échauffement différentiel des différentes vallées. Vraisemblablement, le chaînon de l'Atakora accroît l'instabilité des masses d'air et génère ses propres courants en perturbant les courants allogènes et en renforçant les facteurs pluviogéniques. Il est le siège de nombreuses perturbations et manifestations orageuses. La conséquence majeure de ces particularités est l'organisation d'un cycle spécifique caractérisé par une forte perte d'eau par ruissellement (Afouda, 1990). Du point de vue pluviométrique, cette particularité du relief fait de l'Atakora une des régions naturelles les plus arrosées du Bénin. Aussi le massif de l'Atakora constitue-il le château d'eau du Bénin, car il abrite de nombreuses sources.

L'agencement de toutes ces formes de relief a conditionné la mise en place et le développement d'un réseau hydrographique bien marqué, le développement de plusieurs types de sols et la création de plusieurs différents terroirs maïsicoles.

1.2. L'hydrographie

Le réseau hydrographique constitue le troisième élément du paysage géographique ; la plupart des vallées abritent de fortes densités de populations et d'importantes zones de production maïsicole surtout dans le sud du pays.

1.2.1. Les cours d'eau du Bénin

La présentation des cours d'eau est indispensable car elle permet de caractériser le potentiel hydroagricole du pays.

On peut distinguer deux types de cours d'eau au Bénin. La première catégorie regroupe les cours d'eau qui coulent vers l'océan Atlantique au sud et la deuxième est constituée de ceux qui coulent vers le Niger au nord. Ces deux catégories de cours d'eau induisent **une ligne de partage des eaux** qui se situe vers 10°N, à la latitude de Bembéréké.

1.2.1.1. Les cours d'eau du bassin sud

1.2.1.1.1. L'Ouémé

De tout le réseau hydrographique, l'Ouémé est le fleuve le plus important. Il prend sa source au nord-ouest du pays, à 450 m d'altitude dans les environs d'Alédjo, dans la région de l'Atakora. A sa sortie et dans sa trajectoire méridienne, il reçoit la Donga et l'Alkpourou vers le 10ème parallèle. Il coule dans une vallée encaissée jusqu'à Bétérou où il reçoit le Yérou-Marou. Dans son bassin supérieur et médian, le réseau de l'Ouémé a un aspect dendritique, et les vallées sont en général encaissées. Cependant, certaines sections présentent des chenaux anastomosés, avec des dépôts alluviaux : tel est le cas de son cours, entre 7°45' et 7°35', et celui de son affluent Okpara, entre 8°23' et 8°55', et des méandres encaissés au nord d'Agbassa entre 9° et 8°50'. De ce fait, l'Ouémé n'est navigable que sur son cours inférieur (Boko, 1993). A la latitude de 7°20' nord, l'Ouémé draine tout le Bénin central depuis la région de Pira, avec une série de sous-affluents comme l'Agbado, l'Azokan, l'Agbla, etc. Il pénètre dans le bassin sédimentaire côtier par le nord-est du plateau de Zagnanado, où il reçoit le Zou près du village d'Agonkon. Il entaille une vallée assez profonde et maïsicole avant de se jeter dans le lac Nokoué et la lagune de Porto-Novo par un vaste delta intérieur. Il partage sa basse vallée avec la Sô, petite rivière côtière alimentée par les lacs Newi et Tossanhoué et le sous-affluent, le Wovi qui prend sa source dans le petit lac sacré "HLan".

Malgré l'extension de son bassin-versant dans les régions sous influence soudanienne et subéquatoriale, le fleuve Ouémé a un régime tropical. Il atteint son maximum en août-septembre. Dans son bassin-versant méridional dont le rythme climatique est caractérisé par un régime bimodal, son débit est de 900 m³ par seconde à Sagon et 463 m³ par seconde à Hétin-Sota au coeur de la saison de mousson (juillet). Pendant l'étiage, en novembre, le débit est de 53 m³/s à Hétin et 10 m³/s à Sagon. En début de saison d'hiver de l'hémisphère nord, l'écoulement est faible. Il est quasi interrompu entre février et juin, selon l'abondance et la répartition des pluies de la saison précédente (Aïfan, 1993). En cette période de l'année hydrologique, son lit laisse découvrir les affleurements rocheux du socle granitique à certains endroits de son cours.

1.2.1.1.2. Le Mono

Il naît au nord-ouest du Bénin dans les monts Alédjo, vers 650 m d'altitude. C'est un cours d'eau bénino-togolais, en ce sens que la plus grande partie de son cours se développe au Togo, sur 400 km environ. Ses affluents au Togo sont l'Ogou sur la rive gauche, l'Anié et l'Amou sur la rive droite. Il pénètre dans le bassin sédimentaire côtier par l'ouest du plateau d'Aplahoué où sa vallée est plus large avec des méandres encadrés par des levées de berge submergées lors des crues. Sur ses derniers kilomètres, il devient une frontière naturelle entre le Bénin et le Togo. Il se jette, au Bénin, dans l'océan Atlantique à Vodounoukodji, par l'intermédiaire de la lagune de Grand-Popo et par la passe de la "Boca del Rio". Les hautes eaux du Mono se produisent de juillet à octobre, ou d'août à novembre, selon les années. Les maxima et les crues s'observent en septembre, et coïncident avec le début de la petite saison des pluies.

1.2.1.1.3. Le Couffo

Le Couffo (190 km) est le fleuve le moins important du réseau hydrographique béninois. Il draine les plateaux du Bas-Bénin. Né dans les monts Djami au Togo, il longe les plateaux d'Abomey et d'Allada et se jette dans le "lac" Ahémé qui, par le biais du chenal Aho, évacue ses eaux dans l'océan Atlantique. La situation géographique de son bassin-versant en pleine zone subéquatoriale à régime bimodal lui confère un régime spécial caractérisé par des crues brutales et des étiages sévères.

1.2.1.1.4. Le Zou

Le Zou est un affluent de la rive droite de l'Ouémé. Il a une longueur de 150 km et subit l'influence du climat subéquatorial. Il atteint ses hautes eaux en août et en octobre. Sa vallée abrite une population dense qui pratique une agriculture céréalière et cultive aussi des cultures de rente.

1.2.1.2. Les cours d'eau du bassin nord

1.2.1.2.1. Le Pendjari

La Pendjari est un cours d'eau du département de l'Atakora au nord-ouest du pays. Il naît vers 550 mètres d'altitude au nord de Tagayé, au sud-ouest de Natitingou, et coule dans la combe anticlinale de l'Atakora. Il mesure 380 km de long. C'est un sous-affluent de la Volta au Ghana.

A 10°23' de latitude nord et 1°20' de longitude est, vers Torbou, la vallée de la Pendjari devient une bande marécageuse de 0,5 km de large, jusqu'à la latitude de Kokota au nord de Tempégré. Ses principaux affluents de la rive droite sont le Tigou et la Sanga. Sur sa rive gauche, elle reçoit le Porgou, le Tiadan et le Puna. Vers 11°24' de latitude nord, la Pendjari longe la frontière entre le Bénin et le Burkina Faso. Elle reçoit le Magou et fait son entrée au Togo (11° de latitude nord et 0°55' de longitude est) où elle prend le nom de Oti à sa confluence avec l'Aoulé. Elle se jette dans la Volta Blanche. Selon Boko (1993), la topographie du bassin-versant et le profil longitudinal de la Pendjari font de ce cours d'eau un fleuve qui offre de grandes potentialités hydro-agricoles. C'est ce qui explique l'implantation de la ferme de Tampégré et celle de l'ex-Société Nationale des Fruits et Légumes (SONAFEL) dans la vallée de la Pendjari, dès que celle-ci eût été débarrassée de l'onchocercose ou "cécité des rivières" causée par les simulies.

1.2.1.2.2. Le Koumagou et le Yéripao

Le Koumagou et le Yéripao sont des affluents de l'Oti. Le premier prend sa source à Koukoumantonkou. Il a une direction méridienne et reçoit le Niessi dans le mont Takiétouota. A cette latitude, il s'oriente vers le sud-ouest et conflue avec l'Oti

au Togo. Son affluent, le Niessi, coule dans une vallée encaissée, séparée de celle de la Pendjari supérieure par le crêt intermédiaire de Wansokou.

Le Yéripao prend sa source au sud de Pépériékou, dans la combe anticlinale. Sa vallée encaissée dans les quartzites est équipée d'un barrage hydroélectrique qui alimente les principales villes de l'Atakora depuis 1997.

1.2.1.2.3. Le Niger

Le Niger (4 500km) est le plus long fleuve de l'Afrique occidentale. Autour de sa boucle se sont développées de brillantes civilisations et plusieurs entités politiques depuis le V^{ème} siècle. Il naît à Faranah, en Guinée, au pied du mont Loma, traverse le Mali, le Niger, le Bénin et le Nigeria avant de se jeter dans l'océan Atlantique par un vaste delta.

Au Bénin, le Niger est le cours d'eau le plus important du bassin septentrional. Il sert de frontière entre la République du Niger et le Bénin sur 135 km. Dans son parcours au Bénin, il reçoit sur sa rive droite d'importants affluents qui sont d'est en ouest : le Mékrou, la Kompa Gourou, l'Alibori et la Sota.

Le Niger a un régime tropical, bien qu'il subisse les influences des climats soudanien et subéquatorial. Au Bénin, le Niger présente une autre caractéristique car son régime devient plus complexe avec deux modes (Le Barbé *et al.*, 1993). La première crue a lieu vers le mois de janvier et est connue sous le nom de "crue malienne". Cette période est caractérisée par un colmatage des eaux allochtones provenant du haut Niger (Guinée et Mali) en direction de Malanville au Bénin. Le second mode, appelé "crue soudanienne" se déroule fin septembre. Les averses de juin, juillet et août saturent le bassin. La crue se produit en septembre et Malanville accueille les apports "d'eaux locales" des rivières dont les bassins se trouvent au Burkina Faso, au Niger et au Bénin. Les défluent alimentent les bourgoutières, qui favorisent l'élevage et les cultures de décrue.

La fertilité de la vallée du Niger au Bénin a fait de cette entité un grand pôle régional d'activités piscicoles et agro-pastorales. Néanmoins, les grands périmètres rizicoles développés dans cette vallée du côté béninois ont échoué, faute de main

d'oeuvre (Bio Bigou, 1987, Boko, 1993.). Actuellement, les crues du fleuve Niger sont moins abondantes, et il y a un faible risque d'inondation et de destruction des récoltes dans son bassin au Bénin. Cette situation explique l'occupation humaine actuelle de son lit majeur.

1.2.1.2.4. Le Mékrou

Le Mékrou (500 km) est le plus long affluent du Niger au Bénin. Né dans les monts Birni à 640 mètres, il suit une direction SSW-NNE sur les dix premiers kilomètres et coule dans une vallée assez ouverte qui se resserre à partir de Babada (10°35') avec un profil transversal en fond de berceau et des méandres (Boko, 1995). A cette latitude, ses affluents de la rive gauche sont le Tikoudarou, le Yaorou et le Kourou. Vers 11° 10' de latitude nord, sa vallée s'ouvre à nouveau et le cours présente des méandres divaguants jusqu'à la cascade de Koudou où le fleuve recoupe la retombée périclinale du crêt oriental de l'Atakora par une cluse. Il sert de frontière entre le Bénin et le Burkina-Faso.

Le Mékrou connaît de façon générale un déficit hydrologique en période d'étiage. Tout programme de développement susceptible d'exploiter ce cours d'eau doit tenir compte de cette particularité hydrologique en saison sèche.

1.2.1.2.5. L'Alibori

L'Alibori (427 km) constitue le second affluent important du réseau hydrographique septentrional du Bénin. Il naît dans le massif granitique de Kika à 410 mètres et suit une direction SSW-NNE, en contournant la colline de Sinendé. Ses affluents sont le Suédarou, le Morokou, le Darou-Woka et le Pako. Ses bassins supérieur et moyen se développent dans une région très accidentée où se succèdent des buttes aux sommets cuirassés et des collines de quartzite et de migmatite. En amont de Pako, la vallée de l'Alibori s'élargit et on note une quasi-absence de versants malgré la présence d'un chenal d'écoulement qui transforme le paysage en plaine où sont pratiquées des cultures maraîchères. L'Alibori a un régime soudanien typique. La plus grande proportion (80%-90%) de son écoulement annuel se répartit entre les mois d'août, septembre et octobre, et la période des basses eaux a lieu de janvier à avril.

1.2.1.2.6. La Sota

La Sota constitue le plus petit affluent du Niger au Bénin. Il draine un bassin-versant qui occupe toute la moitié est du département du Borgou. Il naît à 400 m d'altitude, près de Bessassi, sur les flancs orientaux du plateau gréseux de Kalalé. Son cours se développe au milieu des buttes de grès cuirassées à l'image de celui de l'Alibori, dans un bassin-versant dont la topographie présente de médiocres potentialités hydro-agricoles. La Sota, au-delà de 11°40' de latitude nord, s'étale dans la plaine d'inondation du Niger, et se jette dans ce fleuve par un micro delta intérieur alluvionnaire sur lequel sont pratiquées des cultures maraîchères. Contrairement à l'Alibori, la Sota présente un régime beaucoup plus régulier à cause de son débit qui n'est quasiment jamais nul. Cette situation s'explique par la composition géologique de son bassin-versant qui est essentiellement composé de grès du Crétacé supérieur. Outre ces cours d'eau, le réseau hydrographique du Bénin est constitué de lacs et de lagunes.

1.2.2. Les lacs et lagunes du Bénin

La plupart de ces plans d'eau sont situés dans le Bas-Bénin et occupent 0,30% de la superficie totale du pays. Il s'agit de la lagune de Porto-Novo, de Djessin, de Wégba, des lacs Nokoué et Ahémé. Les lagunes se situent entre les rebords des plateaux sédimentaires du Continental Terminal et les cordons littoraux de la plaine côtière. D'orientation latitudinale, ils ont été mis en place au Quaternaire.

1.2.2.1. Le Djessin

La plus grande lagune du Bénin est le Djessin, avec une superficie de 55 km². Il s'étend de la partie occidentale de Cotonou jusqu'à Hlihoué sur le littoral du pays. Ce plan d'eau pérenne comprend deux sections qui sont : la section orientale, ou lagune de Ouidah, qui communique avec l'embouchure du fleuve Mono, et la section ouest qui constitue la lagune de Grand-Popo. La lagune de Djessin collecte les eaux des rivières côtières, du fleuve Mono, du défluent Sazué, du Couffo, et assure leur transport dans l'océan Atlantique à Vodounonkodji.

1.2.2.2. La lagune de Porto-Novo

La lagune de Porto-Novo, malgré sa superficie restreinte (35 km²), est la plus importante voie fluviale du pays, car elle joue un rôle important dans le commerce entre le Bénin et le Nigéria. C'est la principale voie de transport des produits du secteur informel et du commerce illicite.

La lagune de Porto-Novo coule vers l'est, parallèlement à l'océan Atlantique et se jete dans la lagune de Lagos au Nigeria. Elle communique avec le lac Nokoué par le chenal de Totché, et se prolonge vers l'ouest par une ancienne lagune dont les noms varient d'est en ouest.

1.2.2.3. La lagune Wégba

Située à l'ouest de Cotonou, entre Godomey et Nazoumê, elle est en voie d'assèchement. Selon les études de géomorphologie littorale, elle serait adaptée à une ancienne ligne de faille parallèle à la côte. Le phénomène de capture et le comblement de son lit au cours des mouvements eustatiques du Quaternaire ancien seraient sans doute à l'origine de son cours et de sa topographie peu marquée. En année de déficit pluviométrique accentué, le Wégba s'assèche complètement. Pourtant, elle a longtemps été navigable au 19^{ème} siècle après sa jonction avec la lagune côtière actuelle. Elle était reliée au lac Nokoué par deux profonds chenaux aujourd'hui remblayés, entre Gogomey et Kindonou d'une part, et à Houéyiho d'autre part (Boko, 1993).

1.2.3. Les "lacs"

Il convient de donner quelques précisions sur les "lacs" du Bénin. Par abus de terminologie, on les a qualifiés de lacs. En effet, selon la définition de Pierre George, *'un lac est une dépression fermée remplie d'eau'*. Mais les lacs, du Bénin communiquent avec la mer par des chenaux. Dès lors, on utilisera ici le mot lac mais entre guillemets.

1.2.3.1. Le "lac" Nokoué

Le "lac" Nokoué (Nonxwé) est, de par sa superficie (150 km²), le plus important "lac" du Bénin. Il est alimenté par les eaux de l'Ouémé et de la Sô. C'est le

résultat du surcreusement de la basse vallée de l'Ouémé au cours des transgressions marines quaternaires. Les techniques de pêche *acaja* pratiquée par les populations *toffins* de Ganvié et de Zogbo, ont largement modifié les conditions hydrodynamiques, physico-chimiques et écologiques du "lac".

1.2.3.2. Le "lac" Ahémé

Le "lac" Ahémé, formé dans un fossé d'effondrement subméridien à l'estuaire du Couffo qui l'alimente de ses eaux tumultueuses (Oyede, 1983). Il couvre une superficie de 78 km². Il communique avec la lagune côtière par le chenal Aho.

1.2.3.3. Les lacs secondaires

Il existe par ailleurs au Bénin de nombreux petits "lacs" dont les monographies n'ont pas encore été rédigées. Ce sont : Doukon, Togbadji, Déwé et Djèto, qui constituent des défluent du Mono, mis en place lors du processus de constitution de la plaine côtière. En pays Djigbé, on note la présence des petits "lacs" suivants : *Néwi, Hlan, Azili, Sélé, Tossanhoué et Létiou*.

Sur le plan hydrographique, en général le Bénin est un pays bien drainé, car du nord au sud se succèdent le bassin du Niger et le bassin sédimentaire côtier. Ainsi, le Bénin est un pays qui bénéficie d'importantes ressources en eaux superficielles. Ces plans d'eau jouent un rôle considérable dans le bilan d'énergie d'une part et, d'autre part, leurs vallées abritent des populations très diverses aux activités différentes.

Section 2.: Les principaux types de sols et leurs aptitudes agronomiques, supports des civilisations maïsicoles

L'étude des sols en agroclimatologie est capitale car ils constituent un élément fondamental de l'hydrosystème agricole (Reyniers, 1990). Face à l'eau atmosphérique, le sol est considéré comme un réservoir susceptible de retenir une quantité variable d'eau, dont une partie seulement est utilisable par les êtres vivants (Rognon, 1994).

La rétention de l'eau par les sols dépend largement de leur composition granulométrique. Ainsi, dans les sols argileux constitués de matériaux fins, une grande partie de l'eau retenue par le sol est inutilisable par les plantes. Au contraire, dans des sols à matériaux sableux, l'eau est faiblement retenue et sa mobilité est généralement trop grande pour assurer une réserve hydrique à long terme. Outre le potentiel matriciel, la disponibilité de l'eau dans le sol dépend aussi du potentiel osmotique (composition de la solution chimique du sol) et de la température. Ainsi, la pauvreté, la richesse, les propriétés physiques et hydrauliques conditionnent la répartition et le développement des différents taxons, espèces et cultures des différents paysages agraires. Le sol constitue un milieu complexe en constante évolution, soumis à l'action lente et prolongée de l'atmosphère et de la biosphère. Les sols sont différents selon les climats et selon les différentes zones phytogéographiques. Ainsi, la situation géographique du Bénin lui octroie une multitude de sols qui ont déjà fait l'objet d'études par Pougnet (1957), Volkoff et Willaime (1963), Azontonde, Youssouf, Lawani (1989), Lawani (1989) et Azontonde (1991). On note plusieurs types de sols dominants répartis en sols zonaux et sols azonaux (Figure 7).

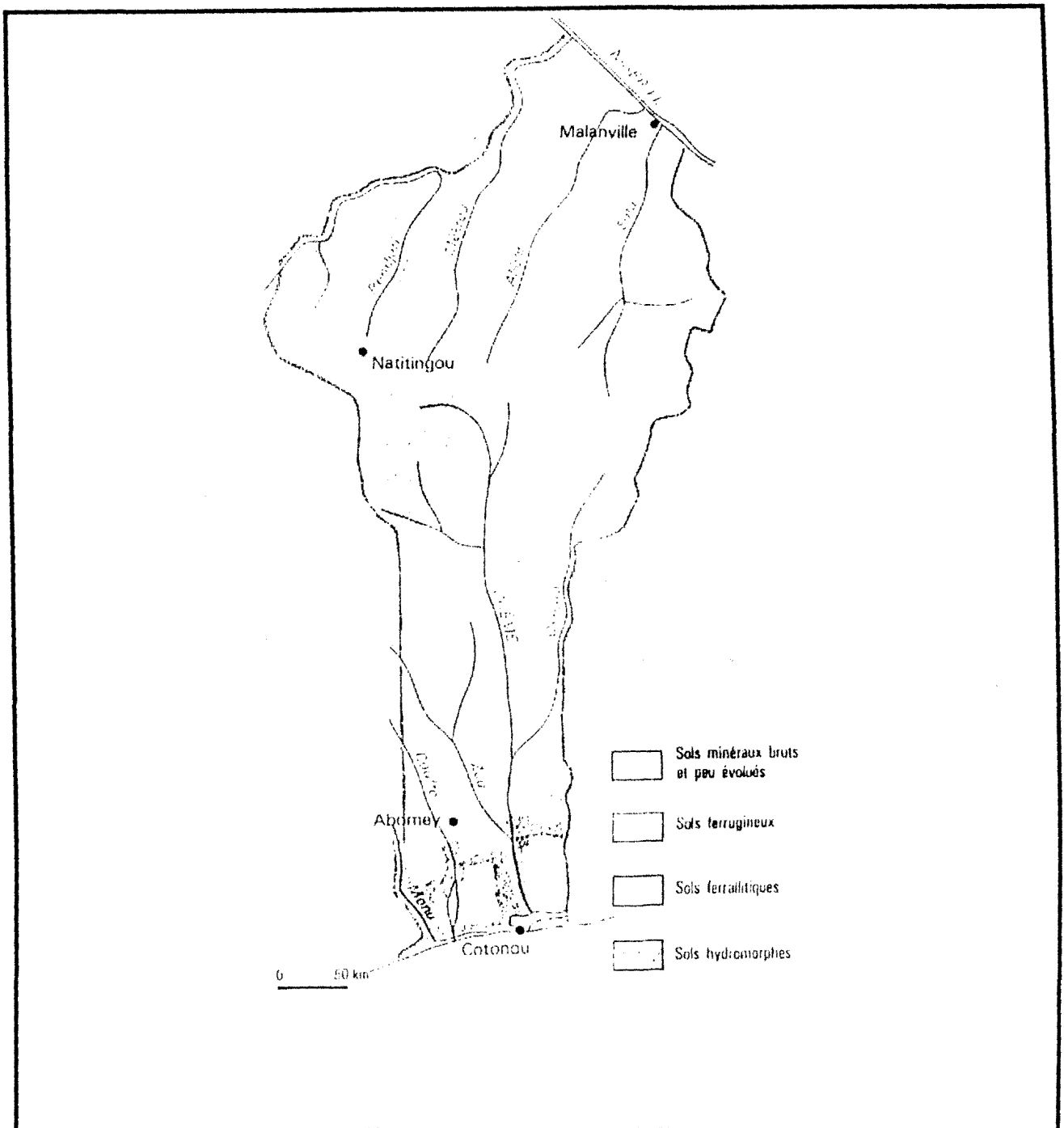


Figure 7 : Esquisse simplifiée des différentes catégories de sols du Bénin (d'après Adam et Boko, 1983).

Les sols zonaux regroupent les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux, tandis que les sols azonaux regroupent les sols bruts minéraux d'apport, les sols colluviaux et les sols hydromorphes. D'une façon générale, du nord au sud, on distingue :

- des sols minéraux bruts et peu évolués,
- des sols ferrallitiques,
- des vertisols,

- des sols alluviaux,
- des sols ferrugineux tropicaux.

2.1. Les sols minéraux bruts et peu évolués

On les rencontre dans la partie méridionale du Bas-Bénin sur les cordons littoraux. Sur le plan granulométrique, le matériau constitutif est essentiellement sableux. Ce sont des sols très perméables avec une conductivité hydraulique très élevée ($K > 25 \text{ cm h}^{-1}$) et une capacité de rétention en eau très faible. La réserve est de l'ordre de 40 mm à 30 cm, et 70 mm à 60 cm de profondeur. **En règle générale, ces sols de cordon sont peu fertiles et ne se prêtent pas à une agriculture pluviale susceptible de fournir de très bons rendements.**

En outre, on rencontre ce même type de sols développés sur le socle précambrien, notamment sur les dalles quartzitiques de la région de Boukoumbé au nord-ouest, et sur les cônes d'éboulis au pied des reliefs. Ces sols sont de faible épaisseur, d'une texture légère (sols sableux à 80-90% de sable, avec plus de 60% de sable grossier). Ils sont caractérisés par une forte érodibilité avec une conductivité, $K > 0,6$. Avec une structure très particulière, et une forte pierrosité, ils ont une réserve en eau de 50 mm à un mètre de profondeur et représentent 20% du total des sols du Bénin.

En général, les sols minéraux bruts développés sur matériaux durs ont une forte pierrosité et faible conductivité ($K = 0.15$). Ces caractéristiques physiques défavorables ne les prédisposent pas à une agriculture florissante.

Comparativement aux sols peu évolués développés sur le socle granito-gneissique et le massif quartzitique de l'Atakora, les sols bruts sur apports alluviaux ont une bonne structure : homogène, grumeleuse à polyédrique subangulaire, fine en surface (Azontonde, 1991). Ils ont une profondeur utile importante et présentent une possibilité d'irrigation. La réserve hydrique oscille entre 85 mm et 135 mm pour une profondeur de 30 à 60 cm.

2.2. Les sols fersialitiques

Ils occupent 10% des sols du Bénin et sont développés sur des matériaux variés. En général, ils sont caractérisés par une altération très poussée des minéraux primaires par des eaux chaudes qui arrivent sur un matériau primitif dans un milieu à drainance élevée (Azontondé, 1991). On distingue deux catégories de sols fersialitiques, selon le substratum géologique. Il s'agit des sols de terre de barre et des sols fersialitiques appauvris indurés sur grès.

2.2.1. Les sols sur terre de barre

Ils occupent la totalité des plateaux du Bas-Bénin. Ils sont formés sur les sédiments meubles argilo-sableux du Continental Terminal. Selon les pédologues, on distingue dans cette série de sols de "terre de barre", les sols rouges argileux, les sols rouges sablo-argileux et les sols jaunes sablo-argileux.

Les sols rouges argileux sont localisés sur les plateaux du nord sur une partie du plateau d'Allada et le sud du plateau de Kétou. Vers Illara, on trouve de vastes surfaces cuirassées. Les sols rouges sablo-argileux, avec une très bonne texture, présentent des qualités hydriques satisfaisantes car ils favorisent le développement d'un bon système racinaire en profondeur. Ils se localisent sur les pentes, ce qui leur donne une condition hydrique favorable car ils bénéficient d'une capacité de rétention des eaux provenant d'une nappe oblique (Mondjannangni, 1969).

En général, tous ces sols sont sableux en surface avec 5 à 15% d'argile. Ce taux passe rapidement à 35% entre 30 et 60 cm de profondeur, puis à 45% et même 50% au-delà de cette profondeur, selon Azontondé (1991). Ils présentent un bon indice d'érodibilité avec $K \cong 0.05$ en surface et 0.1 en profondeur. La perméabilité est aussi bonne et varie entre 5 et 8 cm h^{-1} en surface. En profondeur, la conductivité hydraulique de ces sols est moyenne et avoisine 3 à 6 cm h^{-1} . La réserve utile dans les sols de terre de barre est quasi constante et varie entre 40 et 50 mm à 30 cm. Elle se situe entre 60 et 70 mm à 60 cm.

Les meilleures propriétés physiques et hydrauliques de ces sols constituent, entre autres, les causes de la forte densité de population sur les plateaux de terre de

barre et le développement de plusieurs civilisations agraires et surtout de la maïsiculture. Soixante-dix pour cent de la production maïsicole nationale viennent des régions de plateaux de terre de barre. Cependant, la surexploitation actuelle de ces terres et la détérioration de la qualité de celles-ci constituent, depuis un moment, un handicap à l'intensification de la production agricole.

2.2.2. Les sols fersialitiques appauvris indurés sur grès

Comparativement aux sols développés sur terre de barre, les sols fersialitiques indurés sur grès ont une teneur en argile de 10 à 40 %. Ils ont un bon indice d'érodibilité de 0.07 en surface, mais qui devient moyen en profondeur (0.1 à 0.2). Avec une perméabilité moins bonne par rapport à celle des sols du Continental Terminal, ils ont une réserve hydrique qui est de l'ordre de 60 mm par mètre en profondeur. Ces sols sont assez peu profonds et cuirassés. Ils ont des contraintes physiques plus importantes que ceux de la terre de barre. Leurs propriétés physiques vis à vis de la rétention en eau ne sont pas compensées comme dans le cas des terres de barre par leur grande épaisseur (Azontonde, 1991).

2.3. Les vertisols (ou sols hydromorphes à gley)

Ce sont des sols noirs montmorillonitiques, très fertiles, sur les formations marneuses, argileuses ou calcaires du Paléocène et de l'Eocène de la dépression médiane de la Lama. On les rencontre aussi sur quelques formations alluviales des grands fleuves (Mono, Ouémé, Niger). On distingue deux catégories de vertisols : les vertisols sans drainage externe et les vertisols à drainage externe.

2.3.1. Les vertisols sans drainage externe

Ce sont les plus répandus au Bénin. Ils possèdent une faible perméabilité et une conductivité hydraulique qui varie entre 1 et 3 cm h⁻¹. L'indice d'érodibilité (Ψ) se situe entre 0.1 et 0.2. La réserve hydrique est faible et comprise entre 120 et 170 mm à 2 mètres et la teneur en eau au point de flétrissement (pF) oscille entre 20 et 30%.

2.3.2. Les vertisols à drainage externe

On les rencontre sur des bancs calcaires sub-affleurants de la dépression de Tchi. La réserve d'eau du sol est également faible, de l'ordre de 170 mm à 2 mètres,

et l'humidité au point de flétrissement est de 50%. Ici, la texture est argileuse avec un taux d'argile qui se situe entre 60 et 80%.

Avec une profondeur limitée à 1 m, les vertisols du Bénin sont médiocres du point de vue perméabilité et quantité d'eau réellement disponible pour les plantes. Par conséquent, il est très aléatoire de développer une agriculture sur ces types de sols.

2.4. Les sols hydromorphes ou sols à pseudogley

Ils sont localisés sur les anciens bourrelets de berges, dans les vallées de l'Ouémé, du Mono, du Couffo, du Zou, du Niger et de ses affluents au Bénin. De texture sableuse à sable grossier, ces sols sont grumeleux ou grumelo-polyédriques en surface avec un indice d'instabilité structurale < 1 . Cependant, au-delà de 20 cm de profondeur, cet indice est supérieur à 1.5. Ce sont en général des sols profonds (> 1 m) avec une perméabilité moyenne en surface de l'ordre de $4-5 \text{ cm h}^{-1}$. En profondeur, cette perméabilité est comprise entre 1 et 2 cm h^{-1} . L'érodibilité est moyenne avec une valeur comprise entre 0.1 et 0.2. Les sols hydromorphes à pseudogley du Bénin sont alluviaux et riches. Leur évolution dépend de l'eau pluviale, de la remontée de la nappe phréatique et des hautes eaux des différents organismes hydrographiques. Cependant, la réserve hydrique est de l'ordre de 75 ou 100 mm à un mètre de profondeur selon les sites.

Cette catégorie de sol a des propriétés physiques et hydrauliques moyennes et la réserve en eau est acceptable du point de vue agronomique.

2.5. Les sols ferrugineux tropicaux

Ils couvrent 60 à 70% de la superficie totale du territoire. Ils sont surtout localisés sur le socle au nord du bassin sédimentaire côtier (pénéplaine du Moyen-Bénin et du Borgou central), jusqu'au piémont oriental du massif de l'Atakora. Ils se sont développés sous un régime pluviométrique unimodal et sont caractérisés par un lessivage intense et une forte altération. Leurs propriétés hydrodynamiques sont moins bonnes que celles des sols fersialitiques. Ils sont peu profonds, souvent concrétionnés, avec des horizons bien différenciés et une couche humifère peu

épaisse. La faible épaisseur sur un substratum magmatique et cristallophillien, induit l'absence d'une nappe phréatique. Toutefois, des poches d'eau exploitables se situent sur les zones de broyage le long des fissures et des fractures de la roche-mère (Boko, 1995). Suivant leur capacité de drainage, on peut les classer en trois catégories :

- les sols ferrugineux tropicaux lessivés bien drainés sur granites leucocrates,
- les sols ferrugineux tropicaux lessivés à engorgement de profondeur,
- les sols ferrugineux tropicaux non lessivés.

2.5.1. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés bien drainés sur granites leucocrates

Ils sont localisés surtout dans la zone de transition climatique qui constitue la limite entre les régimes pluviométriques unimodal et bimodal.

Ils possèdent une texture légère (sableuse à tous les horizons) et leur teneur en argile varie de 5 à 25%. Ils présentent une structure particulière en surface, qui tend à devenir polyédrique subangulaire en profondeur. Par contre, ils sont d'une perméabilité élevée, caractérisée par une conductivité hydraulique variant de 5 à 10 cm h^{-1} . L'indice d'instabilité structurale est compris entre 0.8 et 3 de la surface vers la profondeur, et la réserve en eau est très faible (30 à 40 mm et à 1 mètre de profondeur).

2.5.2. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés à engorgement de profondeur

Ils couvrent tout le Bénin central jusqu'à la latitude de Dan. Ces types de sols sont caractérisés par une texture limono-sableuse en surface et argilo-sableuse en profondeur. Le taux d'argile passe de 6 ou 10% à 35 ou 40% de la surface en profondeur, et les teneurs en sable passent de 75 à 40%. Ces pourcentages de matériaux constitutifs leur confèrent une réserve hydrique variable qui va de 40 mm sur les 30 premiers centimètres et de 100 à 120 mm à un mètre de profondeur. La structure est polyédrique subangulaire avec un indice d'instabilité structurale de 0.8 en surface et de 2 en profondeur. Leur indice d'érodibilité se situe autour de 0.2. En

général, ils sont perméables en surface avec une conductivité hydraulique de 4-6 cm h⁻¹. Par contre, cette conductivité diminue en profondeur et se situe entre 2 et 9 cm h⁻¹.

2.5.3. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés mal drainés

Ces sols sont caractérisés par une proportion élevée de limons grossiers et de sables fins, ce qui leur confère une texture limoneuse à limono-sableuse en surface et limono-argileuse en profondeur. La structure est peu développée dans l'horizon A, et est de type polyédrique en profondeur. Ce sont des sols très peu profonds à cause de leur site caractérisé par l'hydromorphie et de la charge graveleuse importante. Les particularités physiques du manteau d'altération où se développent les actions de migrations de sesquioxydes ou d'hydroxydes de fer ajoutées à sa texture leur confèrent une réserve en eau faible de 70 à 90 mm à un mètre.

SYNTHESE

Le Bénin possède une diversité de sols qu'on peut classer en deux catégories en fonction du couplage climatologie/pédologie : il s'agit des sols développés sous régime bimodal et les sols localisés dans des milieux à régime unimodal.

Les sols développés sous le régime bimodal dans le Bas-Bénin sont très profonds, peu résistants à l'érosion et ayant une grande perméabilité.

Par contre, la deuxième catégorie de sols présente une perméabilité moyenne, une faible profondeur, une résistance moyenne à l'érosion, un indice d'instabilité structurale moyen et une faible capacité de rétention en eau, ce qui constitue une importante contrainte. Globalement, les sols du Bénin présentent une caractéristique commune dommageable à l'agriculture : il s'agit de leur faible réserve hydrique. En fonction des conditions hydrodynamiques de ceux-ci, s'est développée une variété de paysages végétaux.

Section 3. : Les paysages végétaux : le Bénin un pays en voie de savanisation accélérée ?

Monteny (1986) a montré que les forêts recyclent 60% à 75% des pluies annuelles dans le golfe de Guinée. Les paysages végétaux jouent un grand rôle dans la pluviogenèse, par la forte contribution à l'évapotranspiration et au recyclage de l'eau atmosphérique (voir cycle de l'eau). Hormis cette particularité, les paysages végétaux font partie des états de surface continentaux qui modifient la circulation atmosphérique générale. En Afrique occidentale humide et côtière, le Bénin présente une physionomie végétale différente de la Côte d'Ivoire et du Nigéria.

Bien que situé dans le golfe de Guinée, le Bénin actuel n'est pas un pays de forêt comme la Côte d'Ivoire ou le Nigéria. La forêt dense ouest-africaine s'interrompt au niveau de Takoradi au Ghana, du Togo et du Bénin. La particularité de cette partie de la végétation ouest-africaine est connue sous le nom de *'Dahomeyan Gap'* (Aubreville, 1937). Le *'Dahomeyan-Gap'* s'étend sur 300 km environ (Figure 8). Ses limites sont comprises entre la forêt guinéenne à l'ouest (Upper Guinea Forest Block) et la forêt guinéo-congolaise à l'est (Lower Guinea/Congo Forest Block).

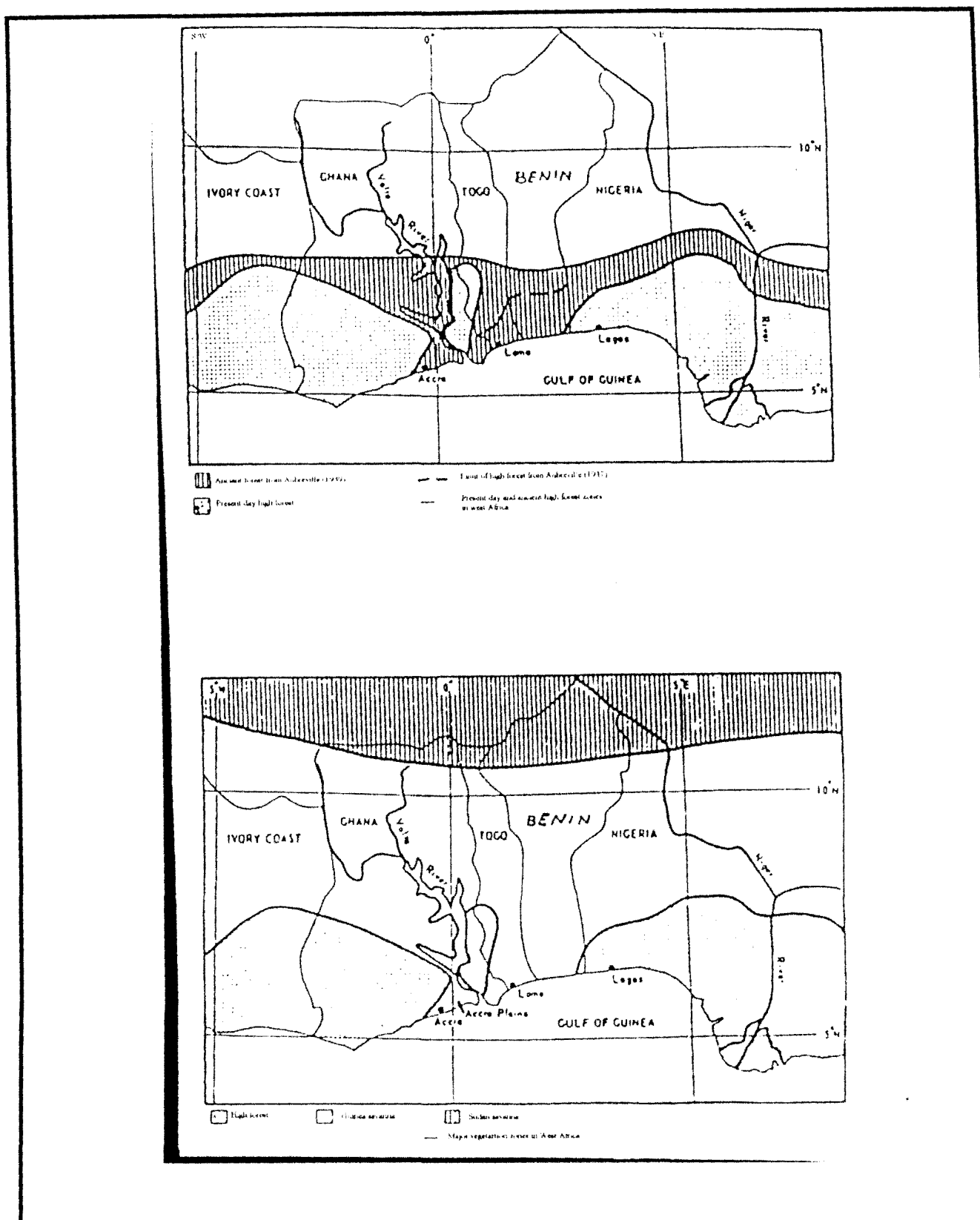


Figure 8 : Le Dahomeyan Gap (d'après Jenik, 1994).

Par sa situation géographique, le Bénin occupe la majeure partie du "Dahomeyan-Gap" et, par conséquent, il est un **pays de savane**. Selon la tradition orale et la toponymie locale, le Bénin fut, dans un passé récent, un pays de forêt. Le

débat relatif à ce sujet n'est pas simple, aussi ne l'aborderons-nous pas dans cette étude.

Les différentes causes de l'existence du "Dahomeyan-Gap" sont, selon Jenik (1994), d'ordre climatique (déficit de la diagonale pluviométrique), édaphique et anthropique, quoique ces raisons ne fassent pas l'unanimité chez tous les chercheurs. Les premières recherches relatives à la végétation du Bénin remontent au début du XX^{ème} siècle avec Hubert (1908), Chevalier (1909), Chevalier (1924), Aubreville (1937), Adjanohoun (1966), Mondjannagni (1969), Guinko (1973), Paradis (1977), Adjakidjè (1984), Akouègninou (1984), Essou (1991).

Toutes ces études ont montré que la végétation du Bénin répond à une *zonation pédoclimatique*. Cette réalité géographique est confirmée par les études toponymiques. Ainsi, à chaque catégorie de sols et type de climats, correspond une végétation particulière. De ce point de vue, cette étude des paysages végétaux se fera région par région.

3.1. Le couvert végétal de la plaine côtière

Le couvert végétal du Bénin en général et celui de la plaine côtière en particulier est constitué de paysages naturels anthropisés et des plantations proprement dites. Ainsi, l'exploitation des terres a complètement modifié la couverture végétale de la plaine côtière dominée par la prairie.

On distingue plusieurs formations végétales parmi lesquelles la mangrove et l'espèce *Coco nucifeira*. Le taxon *Elaeis guineensis* est largement dominant. Le bush arbustif, la savane herbeuse et la mangrove constituent les traits caractéristiques de la plaine côtière.

3.1.1. Le bush arbustif

Il existe partout et caractérise les plateaux du Continental Terminal et les cordons. L'espèce dominante de cette formation est *Elaeis guineensis*. Les espèces fréquemment rencontrées sont : *Fagara xanthoxcyloides*, *Dialium guineense*, *Rauwolfia vomitoria*, *Borassus flagellifer*, *Parkia biglobosa*, *Anarcadium occidentale*,

Lecaniodiscus cupanioides, *Albizzia sassa*, *Bridelia ferruginea*. Sur la plaine côtière, la palmeraie naturelle est réduite. Néanmoins, on en rencontre aussi quelques individus dans les zones légèrement humides et souvent intensément cultivées. Par endroits existent des colonies d'*Imperatra cylindrica*.

3.1.2. La savane herbeuse et la prairie aquatique

Au sud de la région des plateaux, la savane herbeuse est discontinue. Le tapis herbacé est constitué de *Schizachyrium nodulogum* et *Chloris pilosa*. Les savanes dominantes se situent sur les colluvions de terre de barre.

La prairie aquatique se rencontre sur certains cordons en aval de l'Aho du "lac" Ahémé, de la Sazué, du lac Nokoué, à Sèmè, Kétonou à l'est, et dans les marécages interdunaires, les andropogonées disparaissent et font place aux Cypéracées et au *Schizachyrium* uniquement. Dans les différentes plaines d'inondation des fleuves Mono et Ouémé, les espèces dominantes sont *Paspalum vaginatum*, *Cyrtosperma senegalensis* et *Cyperus articulatus*, *Typha australis* et *Cyperus stratus*.

3.1.3. La mangrove

La mangrove est le paysage des plans d'eaux saumâtres. Elle constitue une formation spéciale halophile qui peuple les rivages sur des sols vaseux, hydromorphes et asphyxiques (Toffi, 1991). Elle s'étend sur les rives des fleuves Mono, de la Sazué, du "lac" Ahémé, de l'Aho, et se localise surtout dans l'aire de balancement des chenaux de marées du milieu estuarien. Sa superficie est de 30 km² (Blasco, 1985). Parfois, cette forme de végétation est interrompue par l'homme en raison de l'utilisation du bois pour l'extraction du sel. Les espèces qui constituent le peuplement de ce milieu sont *Rhizophora racemosa*, *Avicennia africana*, *Avicennia nitida*, *Dalbergia ecastaphyllum*, *Laguncularia racemosa*, *Drepanocarpus lunatus* (Blasco, 1991). La mangrove longe une bonne partie de la lagune côtière sur les substrats sablo-vaseux. Du centre de la lagune vers la terre ferme, domine le taxon *Avicennia germinans*. Les zones défrichées sur les versants de cordons littoraux sont peuplées de *Paspalum vaginatum* et d'*Achrostiticum aureum*.

3.2. Les formations végétales des plateaux de terre de barre dans le Bas-Bénin

Elles correspondent à une zone d'espèces guinéo-congolaises, sur sols fersialitiques et à la limite sud des sols ferrugineux tropicaux.

En effet, sur les plateaux de terre de barre, entre 6°22 à 7°20 environ de latitude nord, le paysage végétal est très diversifié. Les forêts originelles ont disparu. Nous ne parlerons que des reliques qui peuvent être la signature de l'ancienne couverture végétale. De ce point de vue, le Bénin n'est pas originellement un pays de savane.

3.2.1. Les forêts semi-décidues

La faiblesse des totaux pluviométriques annuels et la durée de plus en plus courte de la saison des pluies ne permettent pas le développement de certaines espèces forestières au Bénin. L'actuelle variabilité climatique ne favorise pas non plus la reconstitution de la forêt dense. Les forêts semi-décidues peuvent être considérées comme des "variantes climatiques" des forêts denses humides sempervirentes (Mondjannagni, 1969) car elles se sont développées sous une pluviométrie assez faible (1 250 à 1 300 mm par an) et ont bénéficié d'une humidité atmosphérique élevée. Elles se localisent sur les sommets des plateaux. *Trilpochiton scleroxylon*, *Terminalia superba*, *Terminalia capata*, *Ceiba pentandra*, *Piptademastrum africanum*, *Cola cordofilia* sont les principales espèces d'arbres qui composent ces formations tropicales.

Dans le Bas-Bénin, la plupart des reliques de forêts semi-décidues sont sacrées et portent le nom local de "zoun". "Zoun" est un nom générique qui n'a aucun rapport avec le sacré. A chaque type de divinité ("vodoun") correspond une forêt. Ainsi, on distingue la forêt du Génie Serpent "Dan" ("*Danzoun*"), la forêt de la divinité "Lissa" maîtresse de la cosmogonie qui incarne la vie, la fécondation et le bonheur ("*Lissazoun*"), la forêt des "Abikou", archétypes du phénomène de la réincarnation des arts "vodoun" ("*Abikouzoun*"), la forêt sacrée du "Oro", Veilleur de nuit en milieu yorouba et nagot, appelée ("*Orozoun*" ou "*Igo-Oro*") en Yorouba. Ces forêts reliques sont souvent utilisées comme des couvents, des lieux de pèlerinage et

de rituel du culte "vodoun" dont le Bénin est le berceau. Elles sont spontanément sauvegardées par les populations, et les différentes espèces ne font pas objet d'abattage. En outre, des espèces particulières (notamment *Chlorophora excelsa* et *Antraris africana*) sont sacrées, car elles sont souvent le temple de divinités. Certaines forêts semi-décidues sont classées. Il s'agit par exemple des forêts plantées, comme celle de Ouidah sur le littoral, et celle de Zogbodomè sur les plateaux de terre de barre dans le Zou.

Les aires protégées couvrent environ 12% du territoire national. Les forêts classées sont plus étendues que les forêts-fétiches. Néanmoins, les lois qui régissent la conservation des forêts sont violées. Les populations occupent des portions plus ou moins grandes des aires protégées, et certaines forêts classées n'existent que sur la carte. **Il est alors important d'entreprendre une politique d'éducation du grand public en la matière et de respect de l'environnement et surtout de la loi, car le rôle de la forêt dans la pluviogenèse et la circulation atmosphérique est indéniable.**

3.2.2. Les forêts sèches

Elles apparaissent entre la dépression de la Lama, dans la région de Djigbé et sur le rebord sud du plateau d'Allada. L'espèce dominante est *Diospyros mespilifrimis*. Ces formations ont presque disparu et sont remplacées par des forêts claires, des savanes, des plantations de palmier à huile, des champs de maïs et de manioc, souvent en association avec d'autres cultures comme l'arachide ou les cultures maraîchères (la patate douce et diverses légumineuses).

3.3.2. La forêt de Penessoulou

La forêt de Penessoulou est encore une forêt naturelle et déclarée "classée". C'est l'extrémité du massif forestier occidental de la zone guinéenne. Elle se localise dans le fond des talwegs humides alors qu'il ne s'agit pas d'une véritable forêt-galerie. Floristiquement, le couvert végétal est dominé par *Khaya grandifolola*, *Cola gigantea*, *Diospyros monbuttensis*, *Antraris africana*.

3.2.3. Les galeries forestières

Les galeries forestières à *Pterocarpus santalinoïdes* et *Cola cordofolia* se localisent sur les rives des fleuves Mono, Ouémé, Couffo et leurs affluents. Certaines espèces de forêts denses humides semi-décidues profitent du topoclimat plus humide des galeries forestières pour remonter au nord dans les forêts sèches.

3.2.4. Les jachères arbustives et la palmeraie des plateaux du Bas-Bénin

Elles constituent les deux éléments prédominants des paysages végétaux sur sols fersialitiques du Bas-Bénin. Elles sont non stratifiées et composées d'arbustes de 2 à 5 mètres de hauteur et à cimes jointives (Mondjannagni, 1969). La densité du taillis est variable d'un plateau à l'autre ; les jachères sont beaucoup plus claires et plus aérées sur les plateaux du sud. La palmeraie à *Elaeis guineensis* marque tout le paysage végétal des plateaux du nord et du sud et occupe une place de choix dans l'économie nationale. Mais sa contribution au PNB a chuté de 80% à 30% entre 1975 et 1988. Les conditions de température et d'insolation ne sont pas des facteurs limitants pour la croissance du palmier à huile dans le Bas-Bénin (1 500 heures d'insolation par an, et des températures moyennes de 25 à 28°C) ; le facteur limitant demeure la pluviométrie. Le total pluviométrique ne dépasse pas 1300 mm, alors que les botanistes pensent qu'il faut entre 1 800 et 2 000 mm de précipitations annuelles pour que le palmier ait un bon rendement. Mais, le potentiel pluviométrique disponible et l'alimentation par la nappe souterraine subaffleurante ne permettent pas à la plante de puiser dans la réserve de survie pendant la saison sèche. Il ne nous revient pas de faire une étude détaillée sur le palmier à huile. Toutefois, il faut retenir qu'on distingue les palmeraies naturelles et les paysages récents de palmeraies sélectionnées. Les palmeraies naturelles existent partout et celles qui sont sélectionnées sont localisées sur les plateaux du sud : Pobè, Takon Dowa, Akassato Ouidah-nord, Hinvi, Houin-Agamè (Hodonou, 1976 ; Quenum, 1980 ; Dissou, 1983).

3.2.4. Les savanes des plateaux

Les savanes du Bas-Bénin sont des savanes guinéennes, en rapport étroit avec le climat béninien car leurs limites sont essentiellement climatiques (Mondjannagni, 1969). Néanmoins, l'observation permet de douter d'une telle

affirmation car les savanes du Bénin sont devenues, aujourd'hui, soit édaphiques, soit anthropiques. En réalité, les limites des savanes sont tout autant liées aux caractères hydrodynamiques des sols qu'aux éléments du climat.

Les savanes existent sur tous les plateaux qui, d'une façon générale, connaissent une saison sèche de 4 mois qui s'étend de décembre à mars. Tout comme certaines forêts, les savanes du Bas-Bénin ont subi des modifications profondes dues à leur exploitation par l'homme. On distingue les savanes arborées à *Daniellia oliverii*, *Borassus aethiopum* et *Adansonia digitata* sur les sols drainés, et les savanes herbeuses sur sols plus ou moins hydromorphes. Elles forment de vastes prairies herbeuses pauvres en espèces graminéennes. Elles sont parfois inondées au cœur et à la fin de la saison de mousson d'été et pendant la petite saison de pluie où se situe la pointe de l'optimum de végétation. La récession d'août a peu d'incidence sur le cycle végétatif de ces savanes. Les savanes sur substrats rocheux se rencontrent sur les cuirasses latéritiques des plateaux de Zagnanado, Pobè, Kétou. Elles sont verdoyantes et connaissent leur optimum de végétation en octobre-novembre.

Les savanes anthropiques occupent l'emplacement d'anciennes cultures sur sols plus ou moins dégradés dans les interruptions des galeries forestières ou dans les bas-fonds marécageux. Ce sont les savanes à *Pennisetum purperum*, *Imperata cylindrica*, *Andropogon gayanus* et *Panicum maximum*.

La plupart des paysages végétaux sont exploités à des fins commerciales et les produits récoltés sont insuffisants pour répondre à la demande de consommation. Ainsi, la forêt de la Lama, l'une des plus grandes forêts existantes, a été détruite à telle enseigne que son reboisement est en cours. Dans la vallée de l'Ouémé, les dernières forêts ont été détériorées pour l'utilisation du bois de feu. Sur les plateaux d'Allada, des jachères de quatre ou cinq ans que l'on trouvait il y a dix ans, sont détruites et ne produisent plus de bois de feu. La fabrication des "acajas" (parcs à poissons) a eu un impact sur l'environnement car elle nécessite la coupe des formations ligneuses périlagunaires et même lointaines. Ceci explique le degré de dégradation du milieu végétal sur les plateaux méridionaux du bassin sédimentaire côtier. Plusieurs études ont montré la responsabilité des populations des plateaux et

des basses vallées dans la modification de la flore entravant la dynamique naturelle des paysages végétaux en rapport avec les différentes ambiances géoclimatiques. Dans le Bas-Bénin, les forêts originelles ont déjà été éliminées. Les effets anthropiques combinés aux problèmes climatiques ont changé le visage du paysage végétal du Bas-Bénin.

3.3. Le paysage végétal du Moyen Bénin et du Borgou

3.3.1. La couverture végétale du Moyen-Bénin

Le paysage du Moyen Bénin est la trace au sol du climat de transition guinéo-soudanien. Ce milieu est caractérisé par une mosaïque de forêts claires, de quelques forêts sèches, de savanes arborées et arbustives et de forêts-galeries. Les taxons dominants du paysage végétal sont *Kaya senegalensis* (caïlcédrat), *Vittelaria paradoxa*, *Azelia africana* (lingué), *Anogeissus leiocarpus* (kakara), *Parkia biglobosa* (néré), *Adansonia digitata* (baobab), *Ceiba pentandra* (kapokier), *Isobertinia doka*, *Butyrospermum parkii* (karité). On rencontre des formations denses le long des cours d'eau et dans les parcs et réserves.

3.3.2. La couverture végétale de la zone soudanienne du Bénin

Le milieu soudanien du Bénin porte une végétation de savane qui est influencée par le flux d'est. C'est le domaine des arbres de plus petite taille recouvrant faiblement le sol. Les espèces dominantes du paysage végétal sont de la famille des Combretacées (*Combretum spp.*) et des Acacia (*Acacia pp.*). *Lanea acida*, *Pericopsis laxiflorus*, *Grewia mollis*, *Gardenia erubescens*, *Cissus quadrangularis*, *Crossopteryx febrifuga* sont des taxons de forte densité. Sur les sols gravillonnaires ou sur les dalles ferrugineuses, on rencontre des groupements à *Detarium micropum* et *Burkea africana*. Dans les milieux très secs, les espèces comme *Guira senegalensis*, *Sclerocarya birrea* peuvent être abondantes (Sinsin, 1995). Sur les levées de berge, les colonies de *Borassus aethiopum* constituent les espèces dominantes.

SYNTHESE

La Mission ACCT (Agence de Coopération Culturelle et Technique, 1989) a dénombré 3 200 espèces de plantes au Bénin contre 2 000 selon Sayer *et al.* (1992).

De nos jours, le Bénin est plus savanicole que forestier (46% de la superficie). Les causes sont à rechercher dans les facteurs humains et dans la variation du régime pluviométrique. Mais il se pose toujours un problème de datation pour retracer l'évolution paléoclimatique et phytogéographique du pays.

La forêt n'occupe que 4% du territoire. Cette contribution du couvert forestier béninois dans l'alimentation en vapeur d'eau de la basse couche atmosphérique ouest-africaine sera donc limitée. En effet, si la forêt réinjecte 60 à 75% de l'eau qu'elle reçoit dans l'atmosphère, la savane n'en réinjecte que 50 ou 55%. Actuellement, les paysages végétaux du Bénin sont soumis à une forte emprise humaine pour des raisons économiques, et la dégradation du milieu naturel est toujours continue.

Section 4. : Les groupes socio-culturels du Bénin

L'étude des composantes humaines dans cette étude est intéressante à plus d'un titre, car les hommes constituent des facteurs de production dans toute économie et la maïsiculture n'est pas encore mécanisée comme dans les pays des moyennes et hautes latitudes. Les différents modes de production agricole témoignent de leur histoire et de leur culture. Ainsi, à chaque ethnie du Bénin correspondent un mode de production, une civilisation agraire et une conception des faits naturels, dont la pluie qui est un élément essentiel de l'hydrosystème agricole.

L'histoire de la mise en place de ces groupes socio-culturels est encore peu connue. Les sources écrites laissées par les explorateurs et les missionnaires, et la tradition orale, ont permis de retracer certaines étapes du peuplement du Bénin. La mise en place de ces peuples date d'époques différentes mais a souvent des causes communes, d'ordres politique, économique et aussi climatique. Du sud au nord, on distingue plusieurs groupes socio-culturels.

4.1. Les groupes socio-culturels du Bénin méridional et central et leur mise en place

Le Bas-Bénin abrite une forte densité de population, soit les 2/3 de la population totale du pays, issue de l'aire culturelle Adja-Tado et de la Nok Figurine Culture du Nigéria. Dans le bas-Bénin vivent les *Adja*, les *Fon*, les *Aïzo*, les *Gun*, les *Hula*, les *Huéda*, les *Ouatchi*, les *Mina*, les *Tolli*, les *Yoruba*. Excepté les *Yoruba*, les *Guédévi* et les *Mina* qui constituent une branche des *Ewe* du Ghana, tous ces groupes socio-culturels sont des peuples assimilés et dérivés du groupe principal *Adja*, anciennement installé et originaire de Tado au Togo.

Au cours de leurs migrations vers le sud et l'est, ils ont donné naissance aux *Hula* et aux *Huéda*, sur le littoral. Vraisemblablement, ce sont les ancêtres des *Aïzo* du plateau d'Allada, et des *Gun* sur le plateau de Porto-Novo. Au centre, les *Adja* se sont mêlés aux *Guédévi* et aux *Yorouba*. Ils les ont organisés et ont donné naissance aux *Fon*, dont une partie a migré vers l'est (Covè) et vers le nord (Savalou).

Les *Fon* constituent un groupe socio-culturel important du Bénin méridional. Ils fondèrent un Etat-Nation, le célèbre royaume *Fon* du Danhomè ou d'Agbomè (Abomey), qui sous le règne du souverain Ghézo développa la culture du palmier à huile et favorisa l'introduction des cultures étrangères, dont le maïs (Djivo, 1977). Nous y reviendrons dans la suite de l'étude.

Les *Yoruba* occupent le sud-est et le centre du Bénin. en provenance du Nigeria et descendants d'*Oduduwa*. La mise en place du peuplement yorouba au Bénin date du XII^{ème} siècle. Cette mise en place s'est opérée en trois étapes. La première concerne le peuplement du Bénin central et est à l'origine de la création des entités politiques d'Ifita et d'Idjègèdè. Longtemps demeurés prospères, ces différents royaumes furent soumis à partir des XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles. L'éclatement de ces royaumes a donné naissance aux sous-groupes *Ica* et *Manigri*.

La seconde vague *Yorouba* s'installa dans le centre-est. Ils créèrent les royaumes de Kétou et de Savè. Selon la tradition orale, les fondateurs de Kétou

seraient venus d'Ifè au Nigeria via Oké-Odan, en traversant les régions de Nikki, de Parakou et de Tchaourou.

La troisième étape du peuplement yoruba correspond à la pénétration Oyo *Egba et Awori*. Le groupe Oyo fonda les localités d'Owori, d'Issalè-Ipobè ou Pobè et Ifangni. Quant aux Awori, ils créèrent les royaumes de Sakété, d'Akoro et d'Adjacè-Epo. Les *Egba* occupèrent Dassa-Zoumè et conquièrent l'ancien royaume d'Ifita.

En somme, le Bas-Bénin est dominé par deux grandes aires culturelles qui sont: l'aire culturelle Adja-Ewé-Fon et l'ère culturelle Yoruba.

4.2. Le peuplement du Bénin septentrional

Le peuplement du nord-est du Bénin s'est réalisé à des époques différentes à partir de la dislocation successive des divers empires du Ghana, du Mali et du Sonraï, qui se sont développés dans la boucle du Niger. Au nord du Bénin se sont implantés les *Batombou*, les *Dendi*, les *Mokolé*, les *Fulbé*, les *Tchenka*, les *Haoussa*, les *Bétamaribè*, les *Waba*, les *Natembe*, les *Yowa* et les *Lokpa*.

4.2.1. Le peuplement de la vallée du Niger au Bénin

Il s'agit des *Gourmantché* ou *Gulmancé*, les *Cenka* ou *Tchenga*. Originaires de l'ancienne Haute-Volta (actuel Burkina Faso), les *Gulmancé* occupent les terres fertiles de la vallée du Niger. Ils ont fondé les localités de Mamassy-Gulma, Kompati et Loumou-Loumbou. Les *Tchenga* occupent l'ouest de la vallée du Niger au Bénin. Ils sont originaires du Niger actuel. Vraisemblablement, leur migration remonterait aux XVIII^{ème} et XIX^{ème} siècles, selon les différents auteurs.

4.2.2. Les autres groupes socio-culturels du Bénin septentrional

- Les *Baatombou* ou *Bariba* sont originaires de Boussa au Nigeria et se sont installés au Bénin avant le XV^{ème} siècle. Peuple de guerriers, ils fondèrent le célèbre royaume Bariba de Nikki. Plus tard, ils étendirent leur hégémonie à la région de l'actuel Borgou en fondant la chefferie de Parakou et à l'Atakora en créant le royaume bariba de Kouandé

- Les *Dendi*, originaires du Mali, sont issus de l'éclatement de l'empire de Gao en 1591 à Tondibi. Ils ont migré le long du fleuve Niger vers l'aval, avant de s'installer dans les régions de Malanville, Kandi, Djougou.

- Les *Fulbe* ou *Peulh* constituent un récent groupe socio-culturel. Leur migration n'est pas organisée. Deux directions migratoires marquent l'arrivée des *Fulbé* au Bénin : l'axe Niger, l'axe nord du Nigeria. Ils sont constitués de peuples éleveurs nomades qui, aujourd'hui, commencent à se sédentariser.

- Le nord-ouest du Bénin abrite environ 17% du total de groupes ethniques (51) qui peuplent le Bénin. La liste est très longue et on ne peut faire une étude ethnologique de détail. Nous citerons seulement les ethnies dominantes du milieu car Houssou (1998) en a fait une description exhaustive. Le nord-ouest du Bénin est occupé par les *Bétamaribé* depuis des temps reculés (Boko et Adam, 1993). A ce groupe se sont mêlés les *Berba* et les *Yowa*, les *Lokpa*, venus tous du nord-Togo.

Tous ces peuples regroupés en communautés rurales constituent la nation béninoise, et ont développé des civilisations agraires différentes en rapport avec l'évolution de l'histoire agricole du pays et le contexte économique international.

Section 5. : Les civilisations agraires du Bénin par unités de paysages et les différentes formes d'occupation du sol

Plusieurs géographes dont Brasseur-Marion (1951), Pélissier (1963), Huraut (1966), Dissou (1983) ont décrit les paysages agraires du Bénin. Par exemple, Pélissier (1963), a mis l'accent sur les civilisations agraires du bas-Ouémé, compte tenu de l'importance de la vallée et du développement de la palmeraie dans le sud-est du pays. Ainsi, nous ne rentrerons pas dans les détails.

5.1. Le paysage agricole fon

La forte densité de population (185 hab/km²) sur les plateaux d'Abomey et de Zagnanado a entraîné le recul des formations arborescentes. Les plateaux d'Abomey et de Zagnanado sont devenus un domaine de savane humanisé. On note ainsi une

absence totale de plantations. En rapport avec les conditions climatiques, le pays fon se prête à la culture du maïs, du sorgho (*Sorghum vulgare*), de l'igname (*Discorea alata*), du coton (*Gossypium spp.*). La technique utilisée est celle de la culture sur billons avec le semis à plat et sur buttes. L'habitat est groupé. La culture attelée y fait une apparition encore timide et les outils de travail demeurent encore rustiques. Dans le nord du pays fon, le paysage agraire est aussi marqué par des plantations d'anarcadiers et d'agrumes.

5.2. Les paysages agraires *adja* et *aïzo*

Ils s'individualisent entre la vallée de l'Ouémé à l'est et celle du Mono à l'ouest. Ce domaine est favorable à la culture du maïs en culture associée. La technique utilisée est celle de la culture itinérante sur brûlis avec des jachères longues. On cultive aussi des légumineuses. La relative sécheresse de ces dernières années a permis de cultiver le coton Allen.

5.3. Les paysages agraires *mahi*, *nago* et *yorouba*

Ils sont développés autour de Savalou, sur les plateaux de Sakété-Pobè, de Kétou, de Bantè, de Ouéssè, de Tchaourou et dans la sous-préfecture de Bassila.

Contrairement au pays ouémè, la technique utilisée ici est celle de la culture sur buttes, après brûlis, avec déplacement permanent des champs. La culture du coton est très importante ; le maïs fait partie aussi des céréales cultivées. Les méthodes culturales et les espèces cultivées présentent une plus grande similitude avec celles des domaines climatiques septentrionaux car, au nord de ces plateaux, nous sommes à la limite du régime pluviométrique bimodal (Boko, 1988).

5.4. Le paysage agraire *baatonou* ou *bariba*

Le paysage agraire *baatonou* est dominé par la culture du coton, de l'igname, du mil, et du sorgho. L'apparition du maïs dans le paysage agraire est récente. Les techniques culturales sont le billonnage, le sarclo-buttage, la culture itinérante sur brûlis et la rotation des cultures. Ici, la culture attelée est quasi généralisée, avec le développement de la culture cotonnière et de l'élevage bovin.

5.5. Le paysage agraire *dendi* et de la plaine de l'Oti

Le pays *dendi* est sous influence du climat subsahélien du Borgou septentrional, tandis que la plaine de l'Oti est soumise au climat atakorien. Bien que ces deux milieux aient un régime pluviométrique analogue, la structure de l'espace rural est différente.

En milieu *dendi*, le paysage agraire est dominé par la culture du mil, du sorgho, des légumineuses, surtout dans la vallée du Niger.

Dans la plaine de l'Oti, on cultive l'igname. Cependant, dans ces deux espaces, une priorité est accordée à l'arachide.

Dans les deux milieux, les cultures se font sur billons. Sur les pentes du massif de l'Atakora et des monadnocks semi-isolés, les labours sont faits parallèlement aux courbes de niveau de façon à empêcher l'érosion aréolaire.

5.6. Le paysage agraire *otamari*

Il se rencontre au nord-ouest du pays dans la région de l'Atakora. Dans ce milieu les paysans cultivent des espèces semi-arides à cycle végétatif court comme le fonio, le petit mil et diverses légumineuses. Ainsi donc le maïs bien que timidement présent dans le paysage agraire n'est pas souvent consommé par les populations pour des raisons culturelles.

En milieu *otamari* à habitat très dispersé, caractérisé par une architecture "*Tata-Somba*" (type de château construit en latérite et recouvert de chaume), on note une absence de jachère. Les mêmes parcelles sont remises en culture à chaque saison à cause des faibles étendues de terres cultivables au milieu des affleurements quartzitiques. L'outillage est rudimentaire et les cultures sont faites de façon perpendiculaires à la direction des pentes.

L'ensemble des composantes naturelles et des facteurs humains d'origine variées qui ont marqué le paysage en édifiant plusieurs civilisations agraires ont permis de développer au Bénin une économie agricole marquée par la maïsiculture dans le sud. Des facteurs historiques, politiques, économiques endogènes et exogènes ont fait que le maïs est devenu une des cultures vivrières très importantes du pays, culture qui occupe une place de choix dans la production agricole.

CHAPITRE III : HISTORIQUE ET ENJEUX DE L'AGRICULTURE BENINOISE , PLACE DE LA FILIERE MAÏS DANS L'ECONOMIE DU BENIN

Section 1. : Brefs historique et présentation de l'économie béninoise : du passé au présent

L'économie du Bénin a été marquée par plusieurs événements historiques et conjoncturels successifs comme le troc, la traite des nègres, la traite agricole, la détérioration continue des termes de l'échange, la mauvaise gestion, les détournements de deniers publics, la dévaluation du franc CFA. Ainsi, le visage actuel de l'économie du Bénin est le résultat de la combinaison des facteurs exogènes et endogènes du développement. Beaucoup de travaux dont ceux de Desanti (1945), Akindélé et Aguessy (1955), Suret-Canal (1964), Cornevin (1965, 1981), Akindjogbin (1967), Coquery-Vidrovitch (1971), Mondjannagni (1977), Adandé (1984), pour ne citer que ces auteurs, ont montré son évolution dans le passé en rapport avec le contexte colonial et néo-colonial. La Banque Mondiale, le FMI (Fonds Monétaire International), la BIRD (Banque Internationale pour la Reconstruction et le Développement), le FIDA (Fonds International pour le Développement Agricole), la BAD (Banque Africaine de Développement), la BADEA (Banque Arabe de Développement pour l'Afrique) en ont fait le diagnostic pour des programmes d'assainissement et de redressement. De ce point de vue, il ne s'agira pas pour nous de faire une présentation exhaustive de l'économie béninoise dans cette étude. Cependant, nous en dégagerons les lignes maîtresses, capables d'alimenter une réflexion plus profonde relative à l'agriculture béninoise en général et à la maïsiculture en particulier.

L'intégration officielle de l'économie béninoise remonte à l'époque du commerce triangulaire qui a marqué l'Europe, l'Afrique et l'Amérique. Depuis l'insertion du Bénin dans le commerce international après l'abolition de l'esclavage dans les colonies françaises en 1848, l'économie béninoise demeure toujours sous-développée, malgré les efforts d'adaptation des chefferies d'antan et des différents

gouvernements qui se sont succédés à la tête du pays depuis son indépendance en 1960. Le passage de l'économie de traite (soigneusement entretenue par les différents souverains du royaume du Danhomè et les négriers) à l'économie monétaire a fait du Bénin (ex-Dahomey) un pays essentiellement agricole avec l'introduction des cultures vivrières tels que le manioc, la tomate, le gombo et des cultures de rente comme le palmier à huile, le coton, le tabac. Le développement des palmeraies, initié par le roi Ghézo et poursuivi par les différents pouvoirs de l'époque néo-coloniale, a fait de l'*Elaeis guineensis* la principale culture de rente du pays jusque vers les années 80. Elle sera remplacée par la culture du coton suite à la dégradation des cours mondiaux et aux accords de Lomé II, aux aléas climatiques et à l'appauvrissement des sols.

Avec un produit national brut de 2,18 milliards de dollars US, un PNB par habitant égal à 426 dollars par an, une dette extérieure de 1,3 milliards de dollars, avec un PIB de 1,52 milliards de dollars en 1995, l'économie présente les caractéristiques d'un pays sous-développé. La structure du Produit National Brut (PNB) montre que l'agriculture y contribue pour 36%, les mines et industries y participent pour 16%, et les services ont un poids de 48% depuis 1992. Bien que l'économie du pays soit essentiellement basée sur la production agricole, le Bénin est devenu un pays de service avec un budget fiscal marqué par une grande fragilité. Cette situation s'explique par la proximité du Nigéria, première puissance économique de l'Afrique de l'Ouest, et par sa position géographique dans le golfe qui fait de lui un pays de transit pour les pays enclavés du Sahel, avec lesquels il entretient des relations commerciales par l'intermédiaire du port de Cotonou. Malgré tout, la situation économique béninoise n'est toujours pas prospère car elle subit les conséquences de la dégradation des cours mondiaux des matières premières et les fluctuations de l'activité économique du Nigéria, caractérisé par une instabilité socio-politique permanente et une dévaluation de sa monnaie, le naïra. Ainsi, avec de modestes potentialités minières et énergétiques encore inexploitées, comme l'or, le phosphate, le fer ou le gaz naturel, le Bénin constitue une "petite économie ouverte" (PEO) du groupe des pays les moins avancés de la planète dont l'activité économique subit les effets de la dette extérieure.

Le fardeau de la dette, qui marque la récente histoire économique et qui rend le pays débiteur vis-à-vis des institutions financières, est dû en grande partie au choix socialiste de développement de 1975 à 1989 et à la mauvaise gestion des finances publiques. Après le premier choc pétrolier de 1973 qui secoua tous les pays, l'économie béninoise connaîtra les "périodes noires" de son histoire économique récente dès 1983 ce qui l'obligea à signer le premier programme d'ajustement structurel qui devait augmenter le Produit Intérieur Brut (PIB) de 3,4%. La signature du Programme d'Ajustement Structurel (PAS) était incontournable, vu la situation de crise des finances et de l'économie. L'application de ce programme n'a pas eu le succès escompté et la dette extérieure s'est accrue ; elle s'élevait à 600 milliards de francs CFA en 1990. Les importants déficits de la balance commerciale et de la balance des paiements, le non-paiement des salaires, la faillite bancaire estimée à 120 milliards de francs CFA, ont poussé le pouvoir marxiste à entreprendre une négociation très difficile avec les bailleurs de fonds pour un deuxième programme d'ajustement structurel (PAS). Avec un endettement intérieur de 80 milliards francs CFA, une aggravation de la situation économique accompagnée de mouvements sociaux et une banqueroute évaluée à 120 milliards de francs CFA, le Bénin devait renoncer à l'option socialiste de développement pour une économie libérale qui devenait la condition *sine qua non* d'obtention d'aide au développement et de la signature du Programme d'Ajustement Structurel (PAS). Le Bénin passa alors, à partir de 1990, d'une économie marxiste à une économie libérale. Ce changement d'orientation politique et économique garantissait la crédibilité du pays qui négocia plus tard, et favorablement, le deuxième Programme d'Ajustement Structurel (PAS II) qui devait relever le Produit Intérieur Brut (PIB) de 4,2% en 1990-1991. Le Bénin obtint alors une annulation de 50% des arriérés de ses dettes auprès du Club de Paris jusqu'au 31 juillet 1993 et un remboursement du solde sur vingt trois ans dont six ans de différé (Marchés Tropicaux, 1995). Au total, le Bénin reçut une réduction de ses dettes à hauteur de 47 milliards de francs CFA. Les efforts de gestion et d'assainissement des finances publiques permirent à la nouvelle classe politique d'apurer la dette du pays à hauteur de 85 milliards de francs CFA de fin 1989 au 31 décembre 1990 et d'obtenir une croissance de 4,5% en 1994. Cependant, l'économie béninoise reste encore très fragile, avec la dévaluation de 50% du francs CFA intervenue le 11 janvier 1994. Tous les Programmes d'Ajustement Structurel ont mis un fort accent sur le développement du secteur

agricole, seule source de devises étrangères, notamment par la restructuration de la filière du coton et le développement des cultures vivrières. Ainsi, bien que ces dernières années, les services constituent 48% du Produit National Brut (PNB), le Bénin est toujours un pays à vocation agricole et les différents gouvernements continuent d'accorder une grande importance au secteur primaire de l'économie béninoise. Comment se présente l'agriculture béninoise?

Section 2. : L'agriculture béninoise et la filière maïs

L'histoire de l'agriculture béninoise a été déjà retracée par plusieurs chercheurs, le Ministère du Développement Rural, les organismes de développement comme l'Organisation Mondiale de la Faim et de l'Alimentation (FAO), le Fonds International pour le Développement Agricole (FIDA), les instituts de recherche comme l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA). De ce point de vue, nous ne rentrerons pas dans les détails. Nous retracerons de façon sommaire son évolution avec l'introduction des cultures vivrières, pour circonscrire la culture du maïs dans ce secteur de l'économie.

L'agriculture a toujours constitué la base du développement économique du Bénin depuis l'ère précoloniale. Elle a bénéficié de l'attention des différents souverains qui se sont succédé à la tête du royaume de Danhomè dont surtout Ghézo (1818-1848), suite aux difficultés croissantes de la traite négrière après son abolition par la Grande Bretagne dès 1815, dont la marine royale faisait la chasse aux bateaux négriers dans les eaux internationales. En même temps qu'elle était une agriculture de subsistance, elle devenait commerciale avec l'installation en 1841 des Compagnies de Commerce (comme Régis de Marseille) qui occupa l'ancien fort français à Ouidah. En 1842, Thomas Hutton occupa à son tour le fort anglais de Ouidah où il combinait le commerce des esclaves avec celui de l'huile de palme (Verger, 1968). La stratégie de développement du palmier à huile a modifié la structure agraire et a permis au royaume du Danhomè de dégager un surplus agricole pour financer ses dépenses militaires. La grande sécheresse des années 1847-1850 et la famine qui s'ensuivit prouvèrent que le système agraire demeurait fragile (Pfeiffer, 1988). Suite à cette sécheresse, le roi Ghézo développa une

politique agraire conséquente et directive des cultures vivrières et rendit obligatoire la culture du manioc. Dans le même temps, il encouragea surtout la culture du palmier à huile destinée à l'exportation pour des raisons stratégiques. L'exportation du palmier à huile était une nécessité car le pouvoir central du Danhomè en avait besoin pour accroître sa domination (Hopkins, 1973). Après la conquête française du royaume du Danhomè en 1894 par le Général Doods, l'administration coloniale structura et améliora l'encadrement technique en créant les Sociétés Indigènes de Prévoyance (SIP). Mais, l'action de cette structure d'encadrement était essentiellement limitée aux cultures de rente.

Après l'indépendance en 1960, l'Etat a décidé de continuer à contrôler le système d'encadrement du monde paysan et de commercialisation de la plupart des cultures, à travers l'initiation de la politique des filières. En ce qui concerne le maïs, c'est en 1965 que la filière fut créée avec l'Office de Commercialisation et de Crédit Agricole du Dahomey (OCAD). Le but de cette structure était de fixer les prix et d'assurer la distribution. L'inefficacité de cette structure a poussé le régime marxiste à créer, en 1974, les Régies d'Approvisionnement et de Commercialisation (RAC) qui ont échoué ; les Centres d'Action Régionaux pour le Développement Rural (CARDER), en 1975, qui existent toujours ; les Sociétés Provinciales de Commercialisation des Produits Agricoles (SOPROCA), en 1978, qui ont disparu ; l'Office National des Céréales (ONC), en 1983, qui est devenu l'Office National pour la Sécurité Alimentaire (ONASA) en 1992. En général, ces différentes structures ont été confrontées à la réticence des producteurs car ceux-ci n'y voyaient pas leur intérêt. Les paysans livraient leurs produits dans le secteur informel par des circuits privés. Les cours qui leur étaient proposés étaient meilleurs que ceux de l'Etat. Ces prix attractifs étaient liés à l'accroissement brutal du pouvoir d'achat des consommateurs nigériens à partir de 1975. Les difficultés financières pour assurer le fonctionnement de ces structures d'Etat de commercialisation, ajoutées à la réticence des producteurs ont sans doute été à l'origine de l'échec de la filière maïs. Le retour à un marché libre s'est imposé de lui-même après la faillite du système interventionniste et dirigiste, bien avant que les programmes d'ajustement structurel ne viennent l'exiger officiellement en 1990 (Pfeiffer, 1988). La plupart de l'approvisionnement des villes et des régions déficitaires est assurée par le secteur privé.

Depuis 1991, l'agriculture béninoise couvre à elle seule 40% du PIB et offre 70% des emplois à la population. Cette agriculture rapporte 60% des recettes d'exportation et fournit les matières premières à l'industrie. Elle demeure en grande partie vivrière. Le maïs, le sorgho le mil et le riz sont les principales céréales cultivées au Bénin. Malgré cette production, la balance agricole est toujours déficitaire et l'importance des cultures comme le maïs varie selon les différentes régions géographiques du pays. Cette culture nourrit des milliers d'habitants et est devenue une culture de première nécessité, vu son rôle dans la vie quotidienne, les superficies cultivées et l'intérêt qu'elle suscite auprès des institutions de recherche et du Ministère du Développement Rural.

SYNTHESE

Somme toute, la filière maïs n'existe que de nom parce qu'elle est inorganisée. Ceci explique en partie les faibles rendements et la production maïsicole insuffisante dans certaines régions du pays. La politique d'assainissement des finances menée de concert avec les bailleurs de fonds après le règne du régime militaro-socialiste (1972-1989) a permis de retrouver une certaine croissance. De ce point de vue, dans le programme de redressement agricole, depuis la restructuration économique entreprise par le gouvernement Soglo (mars 1990-mars 1996), les projections du rendement moyen pour la période 1993 à 1996 seraient de 911 kg/ha, contre 950 kg/ha pour 1997 et 1 000 kg/ha pour la période 1998-2000. Certes, il est bon de prévoir des rendements, mais si les contraintes d'ordres pédo-climatique, socio-économique et culturel ne sont pas surmontées, ces objectifs ne pourront pas être atteints.

CHAPITRE IV. LE MAÏS, UNE CULTURE PLUVIALE A HISTOIRE CONTROVERSEE

Section 1. : Le maïs, une culture à longue histoire : polémique sur son origine géographique et sa diffusion

Les origines lointaines du maïs ont toujours intéressé les chercheurs, compte tenu de l'importance et du rôle de cette culture dans l'alimentation mondiale. Les opinions relatives à son origine géographique sont nombreuses et différentes. Certains chercheurs estiment qu'il serait originaire de l'Europe, tandis que d'autres pensent qu'il proviendrait du Nouveau Monde. D'après les documents d'archives, la première référence du maïs date du 5 novembre 1492 et est mentionnée dans le journal de bord de Christophe Colomb. Le premier rapport de cette délégation colombienne qui a exploré Cuba fait état d'une sorte de grain appelé "*Ma-Hiz*". Par ailleurs, les explorateurs espagnols ont trouvé du maïs cultivé par les Indiens dans toutes les parties de l'Amérique, du Canada au Chili. Avant le XIV^{ème} siècle, aucun document d'archives n'a fait état de la culture du maïs. Ce n'est qu'au début du XV^{ème} siècle, que l'origine du maïs a été élucidée avec le retour de Christophe Colomb à Séville en 1494 où la première plantation de maïs a été créée. Vingt-cinq ans plus tard, cette culture gagna le sud de l'Europe. Au début du XVI^{ème} siècle, le maïs fut connu sous le nom de "blé turc". Cette appellation a duré plusieurs siècles. En 1542, on l'appelait "*Fromentum turcicum*" ou "Blé Sazzarin". Cette appellation d'essence historique donne l'idée d'une origine euro-asiatique et s'explique par le développement simultané de l'empire ottoman et de la culture du maïs, soit par contresens dans la traduction du terme anglais "Turkish Weat" ou "blé des dindons", eux aussi d'origine américaine. Cette appellation se rapporte, d'après les auteurs du XIX^{ème} siècle, par analogie, aux soies du maïs et aux moustaches des "mousquetaires turcs". Dans le Vieux Monde, l'herbier de Jérôme Bock fait état de la culture du maïs à partir de 1542. Mais ce n'est qu'au XVII^{ème} siècle que le maïs a été décrit dans les herbiers provenant d'Allemagne, des Pays-Bas, d'Italie, de Suisse, ou d'Angleterre. Aussi semblerait-il que des images de maïs ont été retrouvées sur les peintures rupestres des Tassilis du Sahara néolithique.

De toutes ces informations qui retracent les origines géographiques du maïs, la communauté scientifique, en l'état actuel de la recherche, s'accorde à affirmer que le maïs est une culture originaire de l'Amérique Centrale. (Figure 9).

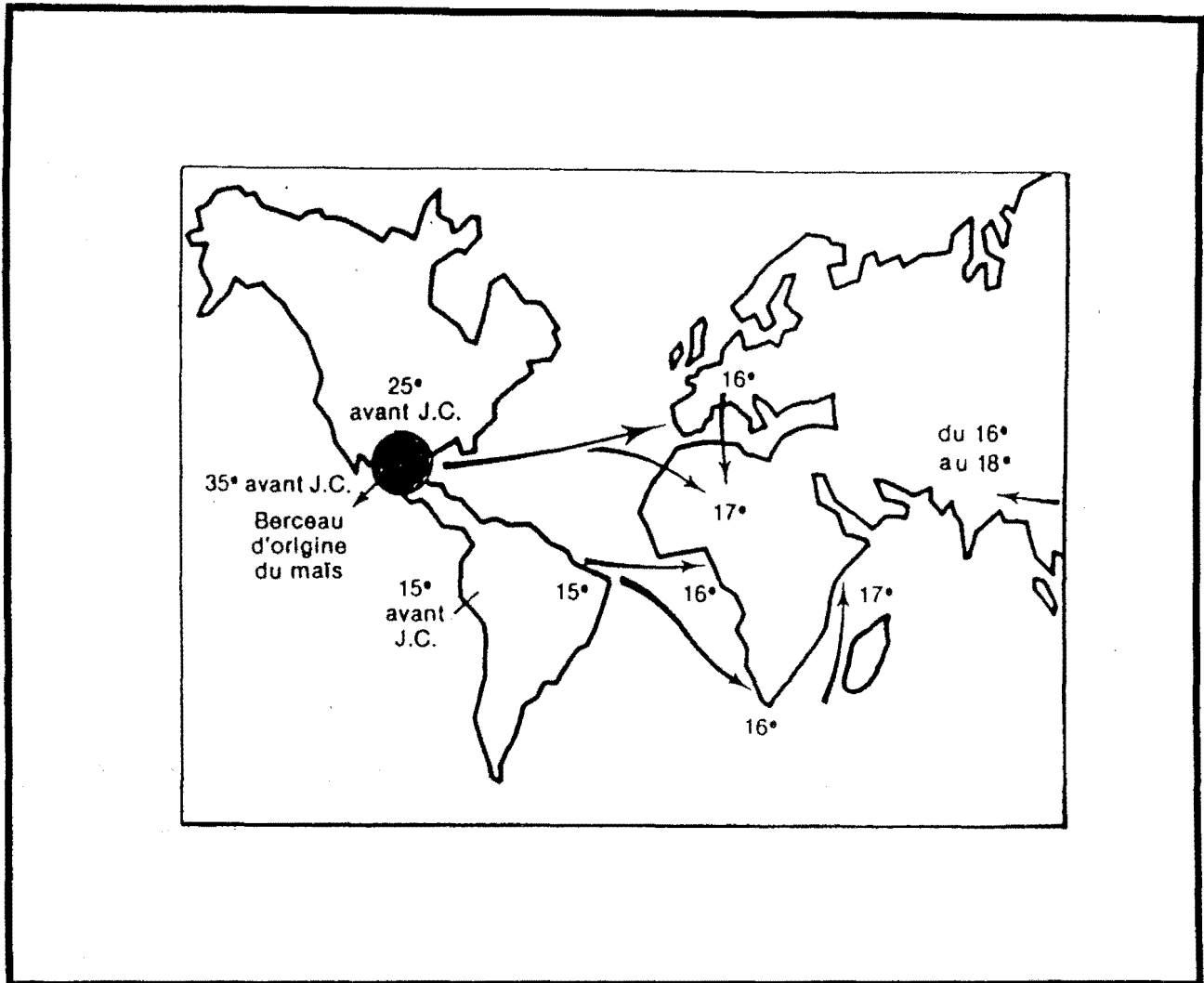


Figure 9 : Origine, expansion et diffusion du maïs dans le monde (d'après Rouanet, 1984 mais modifié).

Les statistiques du Programme Alimentaire Mondial (PAM, 1994) montrent que le maïs fait partie des céréales les plus consommées du monde et l'une des cultures vivrières les plus importantes chez les Indiens du Mexique, les Incas du Pérou et les Mayas du Guatemala. Tomety (1988) montre qu'en Afrique occidentale et centrale en 1979-1984, le maïs est plus consommé au Bénin qu'ailleurs, avec plus de 55 kg/habitants/an (Figure 10).

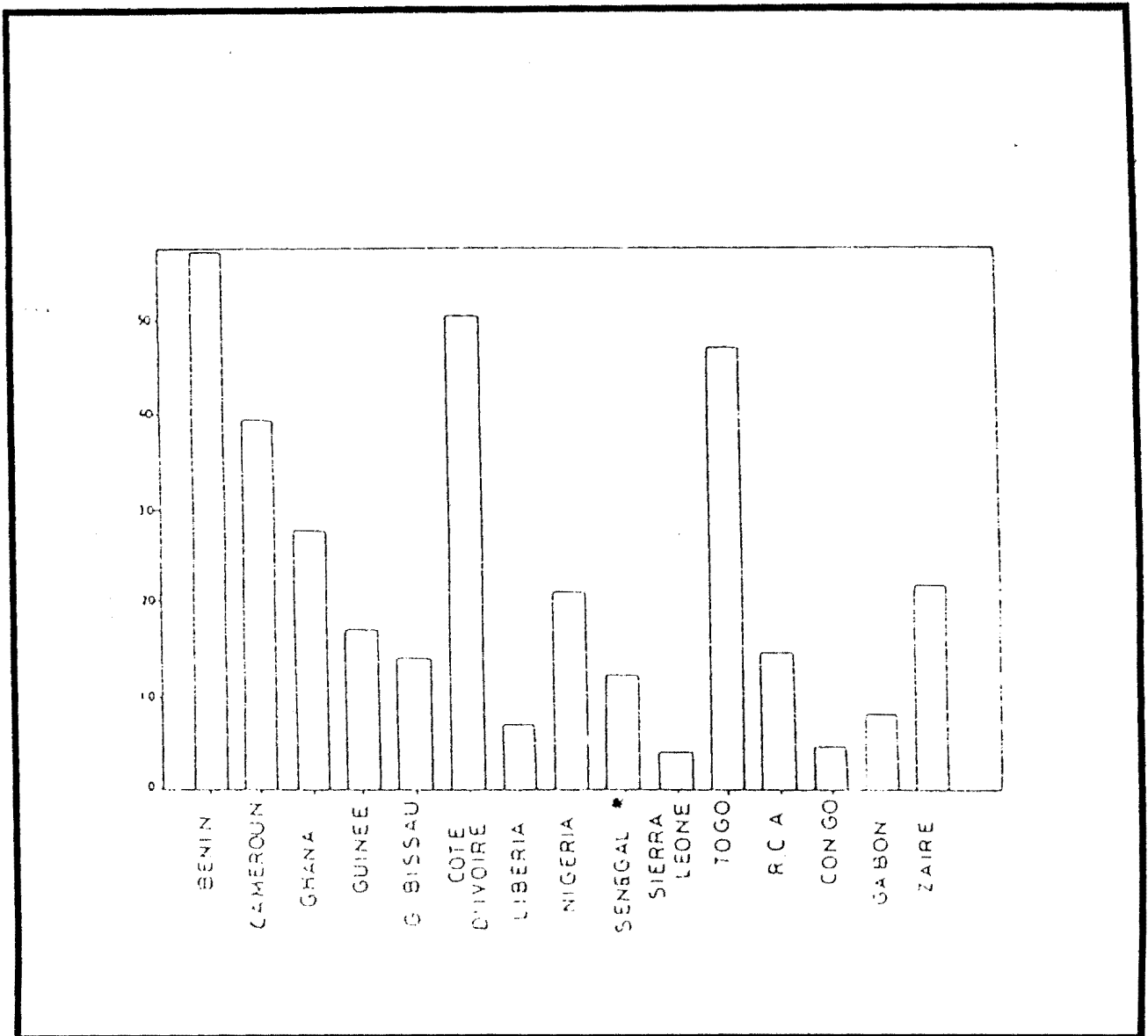


Figure 10 : Consommation de maïs par habitant en kg/an, période 1979-1984 (d'après Tomety, 1988).

Il ressort de la recherche bibliographique que le maïs que cultivaient les paysans de l'Amérique centrale ressemblait beaucoup au maïs actuel comme en témoignent de nombreux échantillons de grains et d'épis trouvés au Mexique et qui datent vraisemblablement, pour certains, de plus de 5 000 ans avant Jésus-Christ (Figure 9).

Mais sur le plan génétique, on ignore actuellement de quelle plante sauvage est issue le maïs avant sa domestication qui remonte vers 15 000 ans avant notre ère. Ainsi, il existe aussi une polémique sur les origines botaniques du maïs.

Section 2. : L'origine botanique du maïs, controverses scientifiques

A l'étape actuelle de la recherche, la communauté scientifique affirme que cette plante est d'origine américaine. Toutefois, les avis restent partagés quand il s'agit de son origine botanique. Il existe plus d'une dizaine de théories qui ont retracé l'origine botanique du maïs. De nos jours, la plupart d'entre elles sont frappées de caducité et la communauté scientifique ne retient que deux grandes hypothèses qui sont celles de Mangeldserf et de Beadle.

Selon Mangeldserf et *al.* (1940), Mangeldserf (1974), le maïs existait à l'état sauvage depuis 80 000 ans soit avant la première migration vers le Nouveau Monde. Par contre Beadle (1939), Galinat (1977) et Iltis (1978) estiment que le maïs est le résultat d'une manipulation génétique faite par l'homme à partir d'une plante sauvage appelée la *téosinte*.

Le maïs est une graminée dont le nom générique scientifique est *Zea mays ssp mays*. *Zea* est le genre, *mays* est le nom de l'espèce *ssp* et *mays* constitue le nom de la sous-espèce. Cette plante appartient à la famille des *Maydea* ou *Tripsacea* qui, elle aussi, est classée dans la sous famille des *Panicoïdea* Mangeldserf et *al* (1967). Il ne nous appartient pas de faire une étude complète sur la botanique du maïs. Mais quelques rappels paraissent nécessaires pour faire des analogies avec la téosinte, plante supposée être l'ancêtre génétique du maïs. Tout comme le maïs, la téosinte appartient au genre *Zea* car ils ont des caractéristiques anatomiques et physiologiques semblables. Le genre *Zea* est caractérisé par une distinction des inflorescences mâles et des inflorescences femelles. Ainsi, les épillets mâles sont regroupés en une inflorescence terminale appelée *panicule*, alors que les épillets femelles sont regroupés sur les inflorescences latérales appelés *épis* (Gay, 1984). Sur le plan génétique, la téosinte possède le même nombre de chromosomes que le maïs ($2n = 20$). Ainsi, l'hybridisme avec le maïs se réalise facilement.

La seule caractéristique qui permet de distinguer le maïs de la téosinte est la structure de l'épi femelle : la structure de l'épi femelle de la téosinte ressemble beaucoup plus à celle du *Tripasacum*. Par rapport à ces caractères génétiques, pour

certain auteurs, le maïs est la plante qui se rapproche le plus de la téosinte. Eu égard à cette grande ressemblance génétique, Ascherson (1875) a affirmé que la téosinte était l'ancêtre du maïs. Deux ans plus tard, en 1877, Vinson déclara, que selon les théories de l'évolution des espèces du règne végétal et du règne animal de Charles Darwin et par rapport aux caractères génétiques identifiés au sein du genre *Zea*, la téosinte était l'ancêtre du maïs, quoiqu'il existe des différences au niveau de la structure des inflorescences et des fleurs.

En revanche, pour d'autres comme Montgomery (1906), Weatherwax (1918), la téosinte et le maïs, et même le *Tripsacum* dérivent d'un ancêtre commun qui serait d'origine tropicale ou subtropicale. Par contre, pour d'autres, la téosinte et le maïs sont chacun le résultat distinct de deux évolutions parallèles ayant eu lieu à partir d'un ancêtre commun. Cette culture a connu une large expansion dans le monde. La culture d'Amérique Centrale s'est rapidement imposée dans le monde du fait de sa capacité à s'adapter aux différents climats. Sa plasticité génétique fait d'elle la culture la plus répandue dans la sous-région ouest-africaine, depuis la zone de forêt humide à la zone de savane soudanienne semi-aride et même jusqu'au Sahel et aux altitudes supérieures à 2 000 mètres. Le maïs est une plante qui se cultive à n'importe quel moment de l'année à cause de son insensibilité photopériodique. Le maïs a été importé en Afrique à la fois par le nord (*via* l'Égypte) et par le sud *via* le golfe du Bénin au XV^{ème} siècle lors des grands voyages entrepris par les Portugais.

De nos jours en Afrique de l'ouest, plus de 5 millions d'hectares sont cultivés, soit 4% de la superficie mondiale totale du maïs. Mais son introduction au Bénin est liée à une situation particulière.

Section 3. : Les causes de l'introduction du maïs au Bénin

L'introduction du maïs au Bénin est liée à la grande sécheresse de 1847-1850, accompagnée d'une famine exceptionnelle, à l'ouverture politique du royaume fon du Danhomè sous le règne du souverain Ghézo, suite à l'abolition de la traite des Noirs (Cornevin, 1981). En effet, la grande sécheresse des années 1847-1850 et la famine qui s'ensuivit mirent en évidence que le système agraire dans le sud du

royaume du Danhomè demeurait fragile et obligèrent le roi Ghézo, à développer une politique agraire conséquente et directive de cultures vivrières. Face à la crise climatique, Ghézo, avec l'aide de son ami portugais Chacha Félix de Souza installé sur la côte à Ouidah, apprit l'existence de la culture du maïs, ordonna son introduction et sa diffusion. Il rendit obligatoire sa production et celle du manioc. La plupart des cultures vivrières introduites à cette époque s'adaptèrent bien aux conditions climatiques, ce qui explique le succès du règne de ce roi de 1818 à 1858.

Par ailleurs dans ce pays qui est le berceau du "Vodou", la légende raconte que le maïs serait apparu sous le règne de "Métolofin" et résulterait du désir d'un homme de s'immortaliser par un fait remarquable (Adandé, 1984).

Très tôt, cette culture s'imposa uniquement au Bénin méridional et occupa une place de choix dans le paysage agraire et dans la vie quotidienne des paysans pendant deux siècles. Adandé, (1984), dans les Cahiers de l'Institut Français d'Afrique Noire (IFAN), a déjà montré la "place" du maïs dans les civilisations agraires du sud-Bénin. Il affirma à cet effet : *"Il est étonnant de constater que cette plante qui est d'origine américaine, ait non seulement conquis droit de cité au Bénin au point d'être considérée comme autochtone, mais encore soit passée dans les proverbes, les contes, voire les légendes"*. Une sociologie, une mythologie, et une histoire se sont créées autour de cette céréale (Devautour et Nago, 1989). Dans une chanson *yoruba* du sud-Bénin, il est écrit :

*"Chanceux est le maïs
Zui parti nu au champ,
En revient tout paré
De vêtement (les pathes),
Chanceux est le maïs !"*

Ainsi, dans la cosmogonie "Vodoun" au sud du Bénin, il est formellement interdit d'arroser ou d'apporter de l'eau au maïs. Le maïs ne peut bénéficier que de l'eau pluviale pour sa germination et son développement. Comparativement aux mondes aztèque et maya précolombiens, et même au Tibet où il existe le "dieu" du maïs, au Bénin, cette céréale n'est pas déifiée. Il n'existe pas non plus d'archétype "Vodoun" qui représente cette culture vivrière. Cependant, le maïs fait partie des

céréales nécessaires et importantes que l'on doit offrir nécessairement aux divinités en cas de sacrifice, ou "Vo", ou de rituel pour honorer les mânes des ancêtres en début de saison culturale autour de l'autel appelé "Assin". Le maïs est obligatoirement présent dans la panoplie des céréales à offrir à *Sakpata*, dieu de la terre, à «*Sègbo-Lissa*», gouverneur du cosmos, à «*Tchango ou Héviosso*», dieu de la pluie, à «*Avlékété-Dossou*», un des dieux de l'univers océanique au cours des rituels magiques. Ainsi, le maïs a une fonction magico-religieuse, et même thérapeutique car il est aussi utilisé dans la "pharmacopée Vodoun".

Au Bénin et dans une partie de l'aire culturelle Adja-Fon, de toutes les cultures vivrières, seule l'igname fait l'objet de cérémonies particulières avant sa consommation et après sa récolte. On parle même de la "fête de l'igname". Cette pratique est élargie à tout le golfe de Guinée, au Ghana, au Togo et même au Nigéria. Achebe (1976), Chognika (1982), en ont fait une grande description et ont montré le rôle de l'igname dans la civilisation de Nok. Au Bénin, la règle est que les divinités doivent être avisées et servies avant la consommation populaire.

Le maïs demeure la principale céréale du sud Bénin depuis sa diffusion au XVème siècle. Mais au nord-ouest du pays, dans la région de l'Atakora, la crise climatique des années 40, engendrée par la persistance des anomalies pluviométriques négatives et la sécheresse a été la cause fondamentale de l'introduction du maïs. Depuis toujours, il a été considéré comme une céréale de moindre importance. Mercier (1968) affirma à ce sujet : "L'importance du maïs comme produit de soudure a été sentie, et après quelques hésitations, la famine de 1942, conjurée par l'importation de maïs en provenance du Dahomey méridional, a emporté l'adhésion à la culture nouvelle. Une série de chants rappellent la gravité de la famine et le remède qui lui a été apporté" :

*" La faim est venue (au) Kuâmmadiqu,
la (faim) tient le fouet et frappe les hommes.
Et celui-là se vante (qui) dit (qu'il) est riche et possède la
nourriture (sur) la terre. "*

Ainsi, dans le nord-ouest, le maïs est considéré depuis 1942 comme une production d'appoint et est cultivé seulement et en petite quantité autour des maisons. Par contre, le sorgho et le fonio demeurent les céréales les plus cultivées et les plus consommées.

Le maïs a connu une délocalisation très marquée à partir des années 1975. Il est de nos jours plus cultivé dans le nord-est du Bénin, surtout dans la grande zone cotonnière en tant que culture de rente. Autrefois, cette culture était secondaire pour le paysan du Borgou et de l'Atakora, avec une importance limitée. Son usage dans l'alimentation intervenait en période de disette. Il servait durant la période où l'igname et le sorgho sont rares en début d'hivernage avant la récolte des premières ignames ou entre deux ignames, à savoir premières récoltes d'hivernage et grandes récoltes de décembre-janvier. C'est la raison fondamentale pour laquelle la culture du maïs se faisait autour de certaines habitations. En réalité, dans le passé, le maïs était une culture de case (Photo 1).

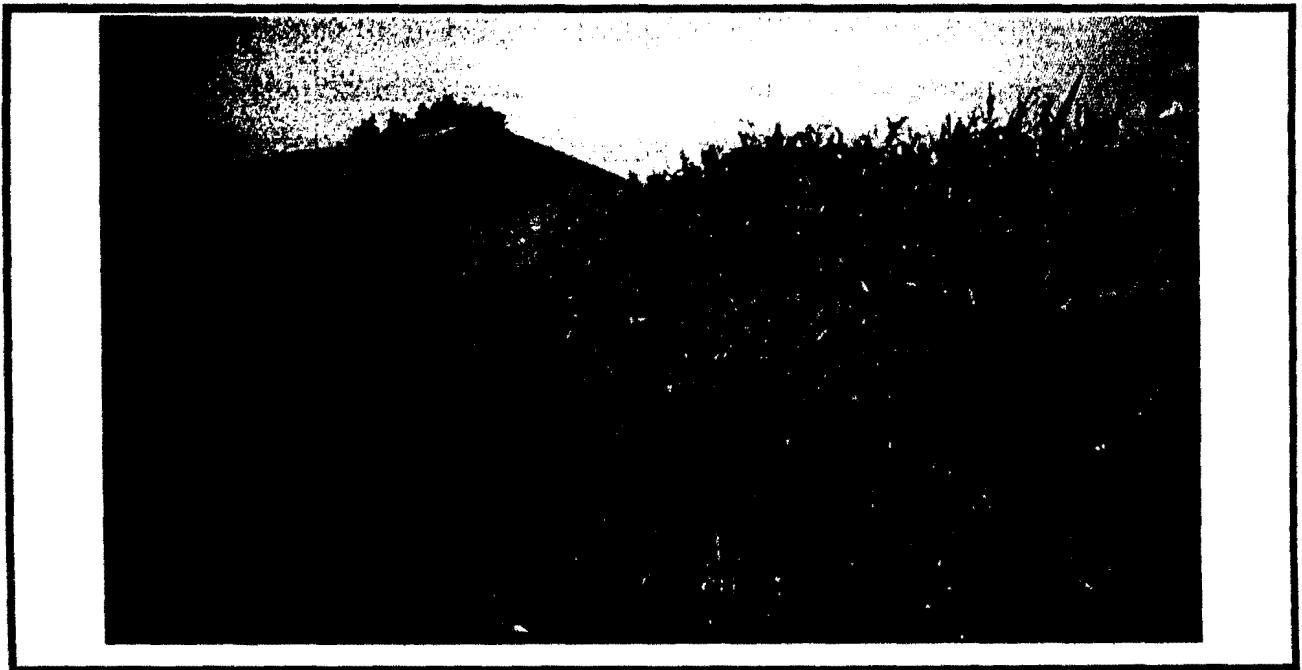


Photo 1: Culture de case dans le Borgou. Cette photo a été prise à Banikoara au nord-ouest en 1996.

Le but de la culture de case dans le Borgou est de fournir un aliment de soudure avant la maturité complète. Ce genre de culture chez les paysans du nord, est considéré comme un "passe-temps" pour occuper le paysan durant cette période. Les aléas climatiques des années 1975-1977, qui ont provoqué des disettes

généralisées dans le sud du Bénin, ont poussé le nord du Bénin à devenir une région productrice de maïs. La demande croissante des départements du sud et des pays limitrophes et le poids de l'économie internationale ont obligé les paysans borgolais à produire en quantité suffisante pour augmenter leur revenu monétaire. Ainsi donc, jadis une culture négligée le maïs est devenu actuellement au nord-est du Bénin, une culture de rente.

Les potentialités organiques et minérales des sols du Borgou, la traction animale, les arrières-effets des engrais conditionnent la fertilité des sols et les rendements élevés obtenus dans le milieu. Alors, non seulement le maïs est devenu une culture de rente, mais il est aussi une culture de substitution au sorgho. Ceci est remarquable par rapport aux habitudes alimentaires des populations en général et surtout des paysans.

Section 4. : Evolution et variabilité interannuelle des productions du maïs

Une classification réalisée à partir des statistiques agricoles sur la période 1970-1989 permet de distinguer au Bénin trois zones de production de maïs, qui correspondent bien aux régions climatiques : la première zone regroupe les départements de l'Atlantique, du Mono, de l'Ouémé et se situe en milieu béninien. La deuxième zone correspond au Zou dans le centre du pays et dans la région de transition climatique. La troisième zone regroupe les deux départements du nord (Borgou et Atakora) en milieu soudanien (Tableau 3).

Années	Production nationale (T)	Zone 1 (%) par rapport production nationale	Zone 2 (%) par rapport production nationale	Zone 3 (%) par rapport production nationale
1970	230 290	80	14.5	5.5
1971	176 600	67.5	23.5	9
1972	211 000	83.5	11.5	5
1973	245 020	69.5	27.5	4
1974	237 025	66.5	24.5	9
1975	228 820	77.5	19	3.5
1976	195 226	71	18	11
1977	242 042	65.5	21	13.5
1978	358 498	80	14	6
1979	321 679	75	17	7
1980	271 324	71	20	8
1981	287 885	72	18	9
1982	272 913	73	13	13
1983	281 895	72.5	17	10.5
1984	373 476.	74.5	14	11.5
1985	434 675	75.5	13	11.9
1986	352 849	71.1	12	16.9
1987	277 237	66	13.2	20.8
1988	423 490	70.2	12.5	17.3
1989	424 045	67.	13.1	19.9

Tableau 3 : Répartition régionale de la production du maïs (en milliers de tonnes et en %) de 1970 à 1989.

Chaque zone présente des caractéristiques particulières, aussi bien du point de vue de la quantité produite que des habitudes de consommation alimentaire. Le tableau montre que sur la période 1970-1989, les départements de l'Atlantique, du Mono et de l'Ouémé fournissent 65 à 85% de la production totale et constituent les zones de forte production de maïs au Bénin. Le minimum de la production est atteint en 1977, année qui correspond à une période de sécheresse climatique. Le pourcentage de production dans le centre du pays est nettement plus faible par

rapport à celui du bas-Bénin. La production maximale est enregistrée en 1973 avec 27%. Mais à partir des années 1982, le tonnage produit est resté entre 12 et 14%. Dans le nord du Bénin, la production du maïs reste encore bien faible. Cependant, on note une augmentation progressive dans le temps. Ainsi de 1970 à 1989, la production de maïs passa de 5 à 20% de la production nationale.

Cette culture d'origine polémique qui s'est développée dans cette partie du golfe de Guinée est soumise, sur le plan climatique, à la variabilité pluviométrique, et ses productions et rendements fluctuent selon la qualité de la saison agricole. Cette variabilité climatique constitue alors une contrainte à la culture et le paysan producteur est soumis à un risque de bonne ou mauvaise récolte.

SYNTHESE

Le Bénin est un pays d'Afrique tropicale qui s'étend essentiellement sur le craton ouest africain. De ce point de vue, l'ex-Dahomey est une vieille surface d'aplanissement avec des formations géologiques très anciennes recouvertes de roches sédimentaires récentes. Le Bénin est composé de deux grands bassins. Dans le sud, c'est le bassin sédimentaire côtier de structure monoclinale à très faible pendage en direction du sud-est. Il comprend un domaine margino-littoral caractérisé par une plaine côtière basse et sablonneuse. Au nord du bassin de la plaine côtière, s'individualisent les plateaux de terre de barre du Quaternaire ancien recouverts par endroits de Continental Terminal post-éocène et anté-quatenaire (Lang *et al.*, 1983). La dépression médiane de la Lama, ou le Hollidjè, constitué de marnes, sépare la plaine côtière de la région des plateaux.

Entre le bassin sédimentaire côtier et le bassin mésozoïque du Niger, s'étend la pénéplaine qui occupe la plus grande partie du pays avec de nombreux reliefs résiduels comme les collines de Dassa-Zoumè, de Savalou ou d'Agouna, de Savè au sud et celles de Bembéréké, de Kalalé, de Nikki, de Ouari-Marou au nord.

Le nord-ouest est caractérisé par les formations sédimentaires de l'Ordovicien et les roches métamorphiques du Primaire, et le bassin voltaïen du Primaire essentiellement composé de Buem et de roches de l'atakorien. L'élément

géographique majeur qui donne sa particularité à cette région où se développent les formations du voltaïen, est la chaîne de l'Atakora qui culmine à Sagbarao à 658 mètres. Ce relief de type appalachien est essentiellement constitué de quartzites et de micaschistes. C'est sur ces formations géologiques mises en place à des époques différentes que se sont développés plusieurs sols variés, des types de paysages végétaux qui suivent une répartition azonale, et les civilisations agraires.

On distingue des sols développés sous un régime pluviométrique bimodal et des sols azonaux. Dans le sud du Bénin, les sols ont de bonnes propriétés physiques et portent une végétation de bush arbustif dense (Azontonde, 1991). Sur le plan agronomique, ils sont caractérisés par une bonne texture sableuse, un bon drainage, une grande profondeur, et une faible résistance à l'érosion. Ces sols sont d'assez faible productivité, mais sont cependant capables de rentabiliser des fumures minérales moyennes (Volkoff, 1976).

La deuxième catégorie de sols développés essentiellement en milieu soudanien est de moins bonne qualité. Ils sont de faible profondeur avec une faible capacité de rétention.

De façon générale, les sols du Bénin ont une réserve hydrique moyenne qui varie selon les catégories de sols et les régions géographiques du pays. Sur le plan agropédologique, les propriétés hydrodynamiques des sols sont peu favorables par endroits et constituent l'une des causes des mauvais rendements des cultures.

Sur ces sols, cinquante et un groupes ethniques sont mises en place à des époques différentes et ont transformé le paysage naturel en imprimant une physionomie particulière en développant six grandes catégories de civilisations agraires en rapport avec le milieu éco-géographique et le contexte économique.

Après la présentation du contexte géomorphologique et humain, le diagnostic climatique du milieu dans lequel les populations rurales ont su s'adapter, développer les structures agraires et cultiver le maïs est indispensable pour compléter l'étude physique. La connaissance du contexte climatique dépendant pour l'essentiel de la collecte des données météorologiques et de la nature des relevés de terrain auprès

des communautés rurales, ce travail a été réalisé à partir de la collecte des données appartenant à des structures et institutions diverses. Les différents types de données recueillies ont été structurées sous forme de fichiers informatiques et soumis à des analyses statistiques avec des méthodes différentes.

CHAPITRE V - LES DONNEES : CRITIQUE, FIABILITE ET VALIDITE

Etudier la variabilité climatique actuelle au Bénin nécessite des données météorologiques sur une longue période. Au Bénin, en dehors des banques de données satellitales, seule l'ASECNA (Agence pour la Sécurité et la Navigation Aérienne) fournit les relevés de terrain. Cependant, la distribution géographique des postes d'observations météorologiques constitue un handicap dans la mesure où la densité spatiale du réseau limite quelques analyses statistiques multivariées.

Section 1.: Critique du réseau d'observations météorologiques et critères de choix des stations

1.1. Historique du réseau ASECNA en République du Bénin

L'historique du réseau d'observations météorologiques du Bénin a déjà été retracé par Boko (1988). Cependant, certains aspects n'ont pas été abordés et l'histoire de ce réseau a évolué et mérite réflexion, car sa configuration induit des biais dans certaines techniques d'analyse des données.

L'histoire de la création du réseau est étroitement liée à l'évolution de la colonie du Dahomey et à son insertion dans l'agriculture commerciale. La plupart des premières stations créées étaient situées sur la côte. Le développement de la traite agricole, à savoir la création des différentes plantations à travers le pays, a poussé les administrateurs coloniaux à créer d'autres postes météorologiques à l'intérieur du pays, au fur et à mesure que le Central, l'Ouest et l'Est dahoméens (réseaux de chemin de fer) se mettaient en place pour l'acheminement des cultures de rente vers le wharf de Cotonou. Ainsi, les premières stations créées se trouvaient dans les chefs-lieux de cercles de la colonie où résidaient les commandants qui avaient la responsabilité de la gestion de la colonie, et dans les zones de plantations agro-industrielles. C'est le cas de la station de Porto-Novo, dans la palmeraie, et de Pobè, station de recherche sur le palmier à huile et les oléagineux (IRHO).

La mise en place du réseau météorologique s'est faite progressivement à partir de 1921, à l'exception de la station de Porto-Novo dont les relevés remontent à 1896. Boko (1988) a distingué trois générations de stations, à savoir la génération 1921, la génération 1922-1950 et enfin la génération 1951-1960. Actuellement, il existe une quatrième génération (1961-1990), car le réseau d'observations météorologiques est constitué aujourd'hui de 76 stations réparties sur le territoire, au lieu des 63 postes d'observation dénombrés en 1988. Les stations n'étant pas de la même génération, les relevés ne couvrent pas des périodes identiques ; on note aussi beaucoup de lacunes, ce qui constitue un handicap majeur pour l'analyse des données en statistique multivariée. Bien que le réseau soit densifié par une série de postes d'observations créés par la Direction de l'Agriculture et intégrés au parc ASECNA, il se pose toujours le problème de la répartition spatiale de ces postes sur l'ensemble du territoire et de leur entretien par les pouvoirs publics béninois. Pour une superficie de 112 622 km², nous avons six stations synoptiques **soit une station pour 20 000 km²**. Le nombre de stations synoptiques n'a pas évolué depuis la deuxième génération. Par contre, il y a eu des créations de postes pluviométriques.

Sur le plan spatial, le réseau méridional (bas et moyen-Bénin) est le plus dense avec 39 stations. Il englobe 57% des postes d'observations. Dans le département du Borgou, qui s'étend au nord jusqu'aux confins du fleuve Niger sur une superficie de 51 082 km², soit les départements de l'Atlantique, du Mono, de l'Ouémé réunis, on ne recense que 15 postes d'observations dont 2 stations synoptiques, soit 22% des stations pour 42% de la superficie du pays. Dans l'Atakora, au nord-ouest du pays, on note 11 stations réparties sur 31 200 km² soit 14% pour 25% de la superficie. D'une manière générale, l'information disponible est concentrée surtout dans le sud du pays et le réseau météorologique béninois est caractérisé par une anisotropie spatiale des données (Figure 11), qui constitue un paramètre important à prendre en compte dans l'interprétation des résultats de l'analyse des données. Au-delà du maillage du réseau et l'anisotropie spatiale, se pose aussi le problème de la qualité et de la fiabilité des observations.

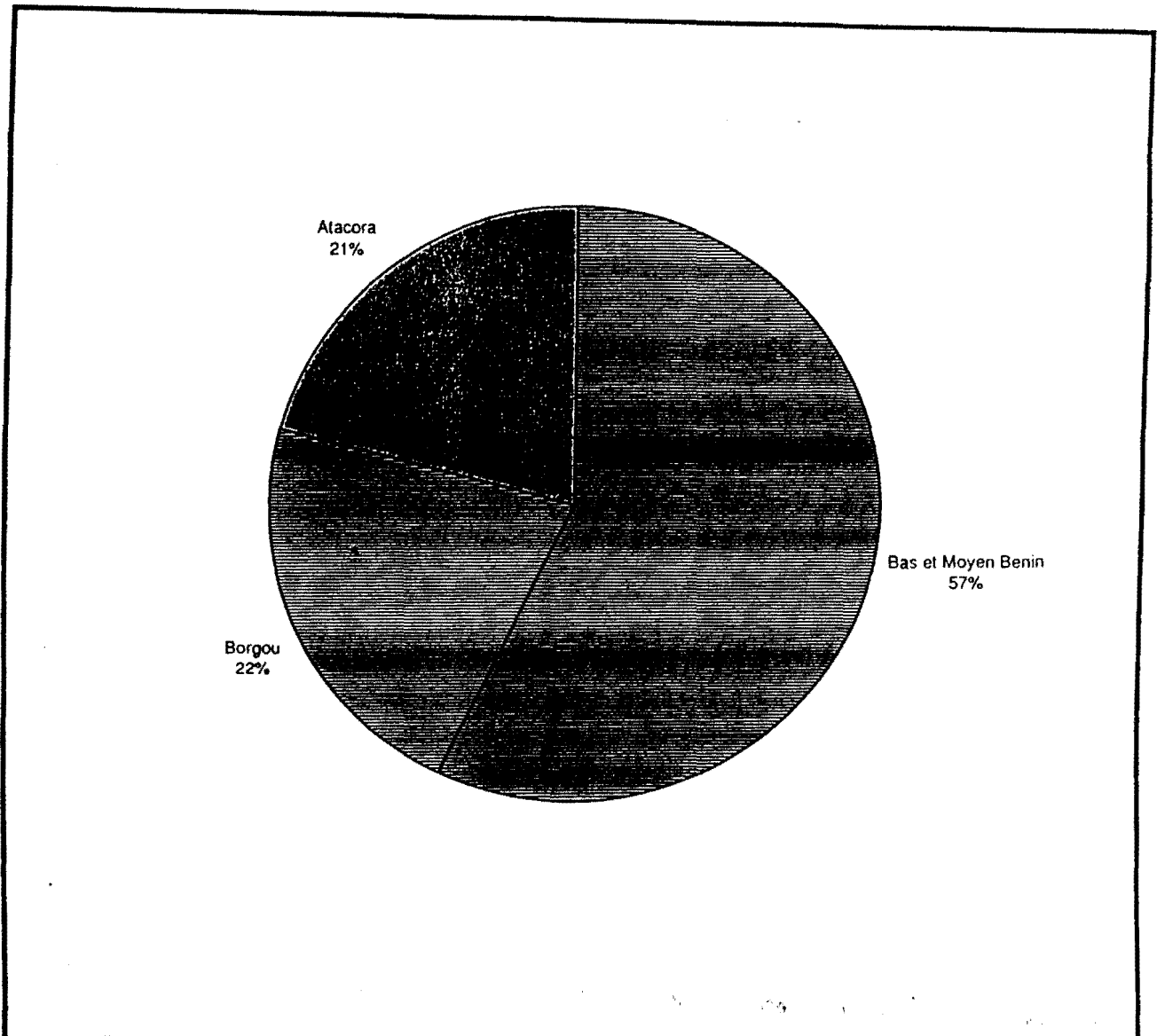


Figure 11 : Distribution des stations météorologiques par rapport aux régions du Bénin : Situation en 1990

❶ La qualité des données est à prendre avec précautions car les relevés ne sont pas toujours effectués par des agents formés par l'ASECNA et dans les conditions recommandées par l'Organisation Météorologique Mondiale. Certains postes d'observations ne sont pas bien entretenus (tel est le cas de la station de Porga), ce qui pose, par endroits, le problème de la **fiabilité** des données.

❷ L'explosion urbaine et la densité de la population modifient aussi la qualité des données mesurées sur certaines stations. La station de Natitingou, par exemple, au nord-ouest du Bénin, se trouve actuellement au coeur du marché qui

s'anime tous les quatre jours. Les pouvoirs publics n'ont pas encore songé à trouver une solution pour cette station synoptique.

Au total, le réseau d'observations est constitué essentiellement des relevés effectués par l'ASECNA. On note une évolution timide du parc météorologique depuis la colonisation et le maillage du réseau d'observation est irrégulier. Le problème fondamental qui se dégage de l'analyse du parc d'observations est l'anisotropie spatiale dans le sud du pays, la fiabilité de certains relevés météorologiques et les lacunes dans certaines séries pluviométriques. Pour une meilleure connaissance de l'assiette climatique du pays, la multiplication des postes d'observations et surtout du type synoptique doit être une priorité pour l'Etat. Dans cette étude, nous n'avons pas utilisé toutes les données recueillies depuis la création des stations. Pour des raisons que nous développerons dans la section suivante, nous avons choisi la période 1931-1990.

1.2. Justification du choix de la période d'étude et des stations étudiées

1.2.1. Les raisons du choix des séries 1931-1960, 1961-1990 et 1931-1990.

Nous avons retenu, dans cette étude, les séries 1931-1960, 1961-1990 et 1931-1990. Le choix de ces périodes répond à des objectifs et à des normes météorologiques internationales.

❶ Ces trois séries ont été retenues par l'Organisation Météorologique Mondiale comme des périodes standards. Elles ont été recommandées comme "normales", sur lesquelles porteront les études météorologiques ou climatologiques quoiqu'elles ne soient pas systématiquement utilisées dans toutes les études météorologiques et climatologiques. D'ailleurs, certains chercheurs dont Todorov (1985) ont critiqué l'utilisation des données trentenaires en Afrique occidentale.

② Nous avons choisi ce découpage temporel des séries pluviométriques afin de rendre comparables les résultats de notre étude sur le plan international. D'autre part, une période de 30 ans est le compromis à partir duquel on peut calculer une distribution statistique des variables climatiques (Choisnel, 1992).

③ **La normale 1931-1960** a été une période anormalement humide à l'échelle du siècle en Afrique, et de nombreuses études et atlas sont fondés sur celle-ci. Notre objectif est de voir le comportement du Bénin au cours de ces trente premières années.

④ Par contre, **la normale 1961-1990** est caractérisée par une tendance à la baisse de la pluviométrie, au tarissement des sources, à des déficits hydrométriques au Bénin, à l'accentuation de la "désertification", et enfin à la multiplication d'années sèches en bordure du golfe de Guinée après 1969, comme l'ont montré Bokonon-Ganta (1987), Camberlin (1987,1990) et Fontaine (1990 b) sur la période 1955-1984.

⑤ **La normale 1931-1990** nous permettra de voir le comportement, sur une longue période (60 ans), de la variabilité intermensuelle sur un espace à régimes pluviométriques variés.

1.2.2. Les raisons du choix des stations

La sélection des stations est motivée par le souci d'obtenir la distribution spatiale la plus cohérente possible et d'utiliser surtout les stations pluviométriques à séries complètes. Le maillage des stations retenues repose sur des critères statistiques et géographiques. Les critères de sélection des stations sont le **site et la situation**.

Du point de vue du critère géographique, nous avons choisi, dans la région de l'Atakora, des stations à séries complètes situées au vent, sous le vent et au coeur du massif. Dans le Borgou, nous avons tenu compte de la ligne de partage des eaux et des limites du bassin du Niger pour opérer notre choix. Dans le sud et dans le centre du pays, nous avons retenu des stations représentatives des différentes unités géomorphologiques du bassin sédimentaire côtier et de la pénélaine précambrienne (Figure 12).

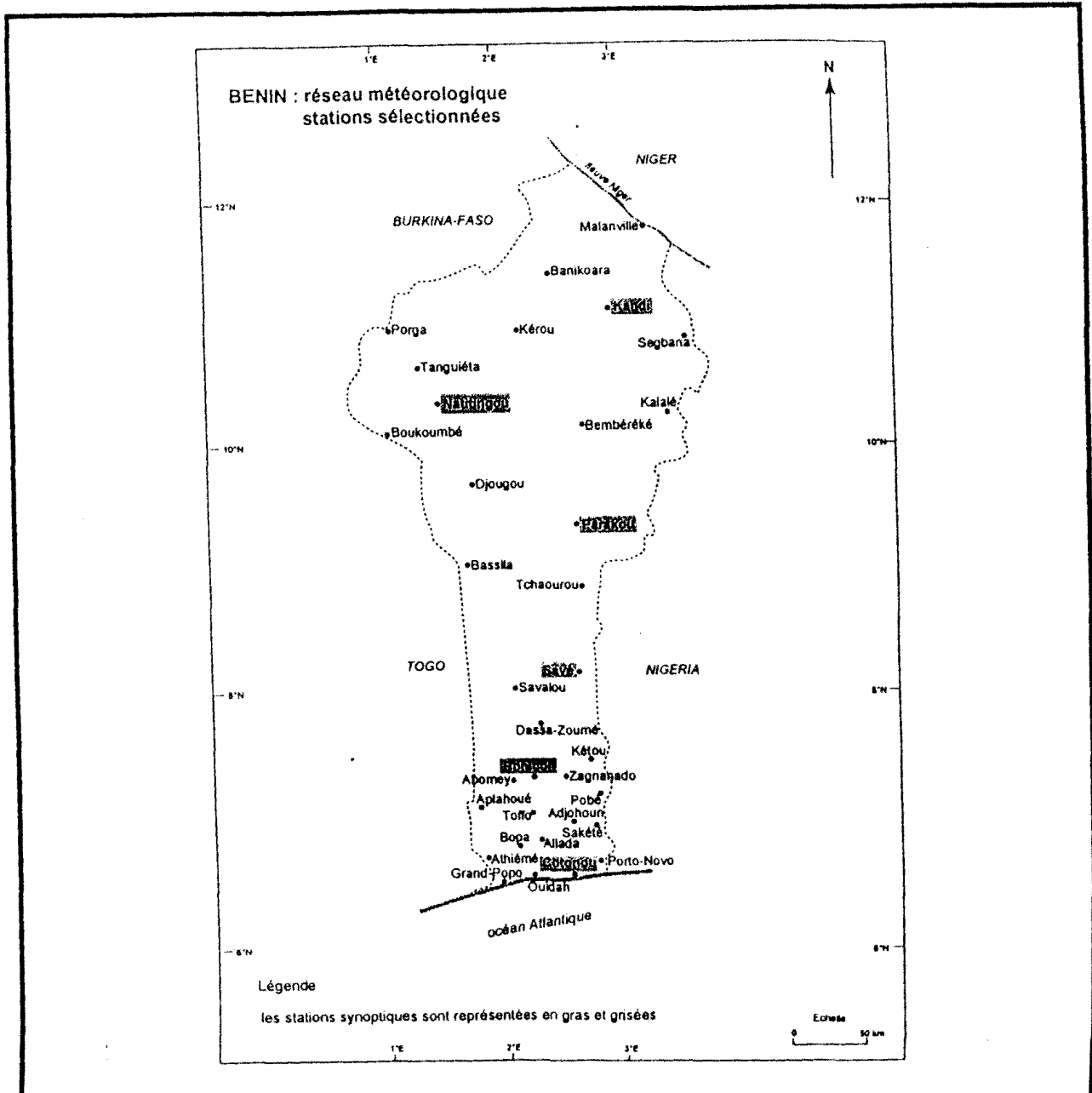


Figure 12 : Réseau météorologique du Bénin (stations sélectionnées dans ce travail toutes périodes confondues ; les stations synoptiques sont représentées en gras et grisées).

1.3. Le fichier pluviométrique

Le fichier pluviométrique a été constitué à partir des données recueillies à l'ASECNA de Cotonou, sous format **CLICOM** pour la période 1931-1990. Elles ont été complétées par celles publiées par le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques, en collaboration avec l'ORSTOM en 1989. Un dépouillement et un prétraitement du fichier originel nous ont permis de mettre au point une nouvelle base de données. Ainsi, le fichier pluviométrique est composé de données journalières de **34 stations** de séries inégales (Tableau 4).

Stations du Bénin Méridional					
ORDRE	STATIONS	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE	TYPE DE STATIONS
1	Abomey *	7° 11 nord	1° 59 est	260 m	Pluviométrique
2	Adjohoun	6° 42 nord	2° 29 est	60 m	Pluviométrique
3	Allada	6° 39 nord	2° 08 est	92 m	Pluviométrique
4	Aplahoué	6° 55 nord	1° 40 est	153 m	Pluviométrique
5	Athiémé	6° 34 nord	1° 40 est	11 m	Pluviométrique
6	Bohicon*	7° 10 nord	2° 04 est	166 m	Synoptique
7	Bopa	6° 34 nord	1° 58 est	50 m	Pluviométrique
8	Cotonou-Aéro	6° 21 nord	2° 23 est	4 m	Synoptique
9	Dassa-Zoumè	7° 45 nord	2° 10 est	155 m	Pluviométrique
10	Dogbo	6° 45 nord	1°47 est	70 m	Pluviométrique
11	Niaouli	6° 42 nord	2° 07 est	105 m	Pluviométrique
12	Grand-Popo	6° 17 nord	1° 49 est	5 m	Pluviométrique
13	Ouidah	6° 22 nord	2° 05 est	10 m	Pluviométrique
14	Pobè	6° 56 nord	2° 40 est	129 m	Pluviométrique
15	Porto-Novo	6° 29 nord	2° 37 est	20 m	Pluviométrique
16	Sakété	6° 43 nord	2° 40 est	69 m	Pluviométrique
17	Savalou*	7° 56 nord	1° 59 est	174 m	Pluviométrique
18	Savè*	7° 59 nord	2° 26 est	199 m	Synoptique
19	Sèmè	6° 22 nord	2°38 est	4 m	Pluviométrique
20	Tchaourou*	8° 52 nord	2° 36 est	325 m	Pluviométrique
21	Toffo	6° 50 nord	2° 03 est	60 m	Pluviométrique
22	Zagnanado*	7° 15 nord	2° 20 est	102 m	Pluviométrique
Stations du Bénin Septentrional					
ORDRE	STATIONS	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE	TYPE DE STATIONS
23	Banikoara	11° 18 nord	2° 26 est	310 m	Pluviométrique
24	Bassila	9° 01 nord	1°40 est	984 m	Pluviométrique
25	Bemberéké	10° 12 nord	2° 40 est	491 m	Pluviométrique
26	Boukoubé	10° 11 nord	1° 06 est	247 m	Pluviométrique
27	Djougou	9° 42 nord	1° 40 est	439 m	Pluviométrique
28	Kalalé	10° 18 nord	3° 23 est	410 m	Pluviométrique
29	Kandi	11° 08 nord	2° 56 est	290 m	Synoptique
30	Malanville	11° 52 nord	3° 24 est	160 m	Pluviométrique
31	Natitingou	10° 19 nord	1° 23 est	460 m	Synoptique
32	Parakou	9° 21 nord	2° 36 est	392 m	Synoptique
33	Ségbana	10° 56 nord	3° 42 est	277 m	Pluviométrique
34	Tanguiéta	10° 37 nord	1° 16 est	225 m	Pluviométrique

Tableau 4 : Stations utilisées dans cette étude sur la période 1961-1990 (Bénin sud et Bénin nord). Les stations accompagnées d'une astérisque sont celles situées au centre.

Quelques stations du réseau météorologique sélectionnées pour la période d'étude 1931-1990					
ORDRE	STATIONS	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE	TYPE DE STATIONS
1	Abomey	7° 11 nord	1° 59 est	260 m	Pluviométrique
2	Adjohoun	6° 42 nord	2° 29 est	60 m	Pluviométrique
3	Allada	6° 39 nord	2° 08 est	92 m	Pluviométrique
4	Aplahoué	6° 55 nord	1° 40 est	153 m	Pluviométrique
5	Athiémé	6° 34 nord	1° 40 est	11 m	Pluviométrique
6	Bemberéké	10° 12 nord	2° 40 est	491 m	Pluviométrique
7	Bopa	6 34 nord	1° 58 est	50 m	Pluviométrique
8	Boukoumbé	10° 11 nord	1° 06 est	247 m	Pluviométrique
9	Djougou	9° 42 nord	1° 40 est	439 m	Pluviométrique
10	Grand-Popo	6° 17 nord	1° 49 est	5 m	Pluviométrique
11	Kandi	11° 08 nord	2° 56 est	290 m	Synoptique
12	Natitingou	10° 19 nord	1° 23 est	460 m	Synoptique
13	Ouidah	6° 22 nord	2° 05 est	10 m	Pluviométrique
14	Parakou	9° 21 nord	2° 36 est	392 m	Synoptique
15	Pobé	6° 56 nord	2° 40 est	129 m	Pluviométrique
16	Porto-Novo	6° 29 nord	2° 37 est	20 m	Pluviométrique
17	Sakété	6° 43 nord	2° 40 est	69 m	Pluviométrique
19	Savalou	7° 56 nord	1° 59 est	174 m	Pluviométrique
20	Savé	7° 59 nord	2° 26 est	199 m	Synoptique
21	Sèmè	6° 22 nord	2° 38 est	4 m	Pluviométrique
22	Toffo	6° 50 nord	2° 03 est	60 m	Pluviométrique
23	Zagnanado	7° 15 nord	2° 20 est	102 m	Pluviométrique

Tableau 5 : Stations à données complètes de la période 1931-1990 ; (ce sont pour nous les stations dites principales).

Sur les 76 postes d'observations que comprend le réseau météorologique du Bénin, 34 sites (stations synoptiques, climatologiques, postes pluviométriques) ont été retenus après le traitement des données journalières (voir section méthodologie) sous SAS (Statistical Analysis System), soit 55% du total des stations du parc. Le fichier de données comprend 13 stations au nord, 6 stations au centre, 15 stations au sud. Cependant, toutes les stations retenues n'ont pas des séries de longueur identique, car elles ne sont pas toutes de la même génération. Ainsi, nous ne travaillerons pas sur une période unique. Nous distinguerons des stations principales et des stations secondaires (Tableau 4). Les stations dites "principales" ne sont pas pour nous les stations synoptiques, mais les postes d'observations qui ont des séries

complètes sur toute la période 1931-1990 (Tableau 5). Les stations "secondaires" sont celles dont les données ne remontent pas jusqu'à 1931 (Tableau 4).

Les données des stations secondaires ne seront pas utilisées pour toutes les analyses statistiques. Par exemple, elles ne seront pas soumises à des analyses factorielles, mais elles seront traitées avec des méthodes statistiques simples et classiques. Cependant, elles permettront de densifier le réseau d'observations pour la période 1961-1990.

Du point de vue géographique, le fichier constitué paraît représentatif car il a une structure latitudinale et zonale, et les stations de toutes les régions géographiques y sont représentées, même si la densité des stations du centre et du nord paraît faible.

A partir du fichier originel (précipitations journalières), nous avons pu mettre au point le fichier des données décennales qui seront utilisées à des fins d'études agronomiques. Un autre fichier pluviométrique a été mis à jour à l'échelle mensuelle pour la suite de l'analyse des données. En effet, sur les 34 stations sélectionnées (stations principales et secondaires), 21 avaient des données manquantes dans des proportions variées. Nous avons procédé à une reconstitution des valeurs manquantes après homogénéisation au moyen d'une régression linéaire.

1.4. Le fichier Focal

Le fichier Focal (Français Océan et Climat dans l'Atlantique Tropical) contient les données de températures de surface océanique de l'océan Atlantique. Cependant, il paraît important de faire une mise au point sur le mot Focal afin d'en faire un bon usage. On a tendance à confondre le fichier de données océanographiques et le nom Focal, qui est un programme de recherche conçu par différents organismes français (ORSTOM, CNRS, IFREMER-CNEXO, UNIVERSITES, LOPMNH), et qui s'inscrit dans le Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat (PNDEC).

FOCAL est le Programme Français Océan et Climat dans l'Atlantique Tropical dont l'objectif est d'étudier la variabilité basse fréquence (annuelle et interannuelle) de la réponse thermique de l'océan tropical à l'action du vent. Ce fichier a été mis au point par Jacques Servain au moment où le programme de recherche se déroulait. Normalement, il devrait être baptisé fichier Servain et non pas Focal. Mais pour des raisons de conformisme avec d'autres études qui ont utilisé la dénomination Focal, nous ne l'appellerons pas Servain dans cette étude.

Le fichier Focal des données de températures de surface océanique couvre le fuseau atlantique. Il a une résolution spatiale de $2^\circ \times 2^\circ$, meilleure que celle du fichier UKMO (United Kingdom Meteorological Office) - version 4 de l'Océan Mondial dont le maillage des points de grille est de $5^\circ \times 5^\circ$.

Nous avons privilégié l'utilisation des données du fichier Focal à cause de sa résolution spatiale. Sa structure et son maillage en points de grille convient bien aux champs pluviométriques du bas-Bénin et du centre Bénin dans la mesure où l'étude diagnostique des éléments du climat (dont la pluviométrie) se fait à une échelle fine. Cette démarche nous permet d'avoir une réponse océanique plus précise. L'espace océanique couvert par ce fichier s'étend de 30° de latitude nord à 20° de latitude sud, et s'étire de 60° de longitude ouest à 10° de longitude est. Toutefois, il ne couvre pas tout l'espace atlantique tropical entre le Brésil et l'Afrique. Le sud-ouest est mal documenté et il a fallu une estimation et une interpolation par une méthode statistique objective afin de combler les lacunes du réseau Focal. Deux pour cent des points de grille ont été traités de cette manière (Servain *et al.*, 1985).

Les données de température de surface océanique de ce fichier sont mensuelles. L'étude des relations pluies/TSO au pas de temps quotidien a un intérêt limité car la variabilité océanique se fait sur des pas de temps relativement longs. Dans ce travail, les connexions entre TSO et précipitations seront étudiées aux pas de temps mensuel, saisonnier et annuel.

1.5. Le fichier ETP et le fichier Climato du Bénin

1.5.1. Le fichier ETP

Le fichier d'évapotranspiration potentielle a été mis au point à partir des données de l'ASECNA/Cotonou. Ce fichier SYNOPETP comprend les données décennales d'ETP PENMANN calculées à partir d'un algorithme Pascal sur la période **1970-1989** pour les 6 stations synoptiques du réseau d'observations météorologiques.

Nous avons aussi utilisé le fichier RESETP qui contient les données moyennes d'ETP de tout le réseau d'observations météorologiques du Bénin, sur la période 1965-1983. Ce fichier contient les valeurs d'ETP moyennes décennales interpolées de 103 stations. Les données de fichiers SYNOPETP et RESETP seront utilisées pour la caractérisation des différentes données de l'hydrosystème agricole (Reyniers, 1995) et la caractérisation des indices de satisfaction des besoins en eau de la culture du maïs et le risque de stress agronomique.

1.5.2. Le fichier Climato

Il contient des données de vent, de températures maximales et minimales, d'évaporation bac, de tension de vapeur, d'insolation et d'humidité maximale et minimale pour la période 1970-1990, pour 6 stations synoptiques. Ces données sont journalières avec des codes de qualité, et archivées sous CLICOM. Ces données limiteront nos investigations car les autres postes pluviométriques et climatologiques qui nous ont permis de densifier notre réseau d'étude ne sont pas pourvus d'installations pouvant permettre des observations de type synoptique. Nous nous contenterons donc des données des stations synoptiques pour spatialiser nos résultats de modélisation du bilan hydrique.

1.6. Le fichier des productions agricoles

Le fichier des données de productions agricoles a été constitué à partir des données extraites du compendium du Service de Documentation du Ministère du Développement Rural du Bénin à Cotonou et des Services de la Division de la Programmation et du Contrôle des Centres d'Action Régionale pour le

Développement Rural (**CARDER**), implantés dans les 6 anciens départements du pays.

Les données concernent les statistiques de productions agricoles de maïs local et des variétés améliorées, de rendements et de superficies cultivées. La plupart des données sont des séries courtes car la création des Centres d'Action Régionale pour le Développement Rural date de 1975, période où la plupart des pays africains au sud du Sahara avaient initié la "**Révolution Verte**" pour trouver des solutions à la dépendance alimentaire.

Le fichier n'a pas de structure homogène car il est formé de données sectorielles, départementales et nationales. Les archives n'étant pas à jour dans tous les départements et secteurs agricoles, nous n'avons pas pu recueillir tout l'éventail des données afin de constituer un fichier uniforme.

1.7. Les données de terrain et l'enquête

Les données de terrain n'ont pas pu être retenues dans un fichier de données car les informations à recueillir ont des caractères plus qualitatifs que quantitatifs. Celles-ci ont été rassemblées lors des enquêtes en milieu paysan et dans les stations de recherche sur les cultures vivrières à Niaouli dans le sud et à Ina dans le nord. Pour des raisons pratiques, concernant le renseignement du modèle de simulation du bilan hydrique l'enquête est présentée dans la troisième partie de la thèse réservée aux questions agronomiques.

Le dépouillement du questionnaire d'enquête a été fait à partir d'un choix raisonné et les séries d'observations météorologiques ont été analysées par des méthodes statistiques classiques et factorielles.

CHAPITRE VI - METHODES D'ETUDE DIAGNOSTIQUE DU CLIMAT ET APPROCHES AGROCLIMATOLOGIQUES

Les méthodes d'étude diagnostique du climat utilisées dans ce travail sont essentiellement statistiques. L'ensemble de ces méthodes permet d'analyser l'organisation de l'espace géographique sur le plan climatologique. Ces techniques statistiques donnent une idée globale des paramètres météorologiques et mettent en évidence les liaisons, les ressemblances ou les différences qui existent entre les stations (Bouroche et Saporta, 1980). Elles vont de l'analyse statistique classique à l'analyse des données dont l'originalité est l'approche multidimensionnelle grâce à l'outil informatique. Les approches agroclimatologiques seront présentées sommairement dans ce chapitre et mieux développées dans la rubrique "modélisation et simulation des termes du bilan hydrique de la culture du maïs" de la troisième partie de thèse.

Section 1. : L'analyse statistique des séries stationnelles

Le but de cette analyse est de vérifier, d'une part la qualité des séries pluviométriques et de quantifier le degré de variabilité à l'échelle stationnelle d'autre part. Les lacunes décelées dans les chroniques pluviométriques ont été comblées par la méthode des moindres carrés et la variabilité a été quantifiée à partir de la moyenne et des paramètres de dispersion (comme l'écart-type, le coefficient de variation, les quartiles et les quintiles).

1.1. Le comblement des manques et la validation des données pluviométriques : la méthode des moindres carrés

Sur les 34 postes météorologiques sélectionnés, 21 avaient des données manquantes dans des proportions variées. Nous avons procédé à une reconstitution des valeurs mensuelles manquantes après avoir éliminé toutes les données non comprises dans l'intervalle de confiance à 99,9% (c'est à dire entre $\pm 3 \sigma$).

La méthode utilisée est celle des moindres carrés. Elle est basée sur le calcul de régression multiple entre séries lacunaires et séries complètes des stations situées dans un environnement géographique semblable et immédiat. Cette méthode consiste à considérer comme première variable explicative celle dont le coefficient de corrélation avec la variable à expliquer est le plus élevé. On introduit chaque fois la variable qui fait le plus augmenter la valeur du coefficient de détermination R^2 afin d'obtenir une corrélation R^2 élevée pour un minimum de variables explicatives. L'interpolation des données a été faite séparément pour les différents mois afin de prendre en compte la variation saisonnière des processus climatiques. Elle n'a concerné que les totaux mensuels dans la mesure où les échelles de temps plus petites (pas de temps journalier) ne permettent pas de faire des interpolations satisfaisantes, à moins d'avoir un réseau de stations très dense (Camberlin, 1994), ce qui n'est pas le cas ici. Le calcul de la régression pour la période 1931-1990 nous a permis de combler 121 lacunes, soit 3,54%, ce qui est très peu par rapport au nombre total d'observations mensuelles. De plus, ces valeurs ne sont concentrées ni dans le temps ni dans l'espace.

1.2. La moyenne arithmétique : paramètre de tendance centrale, représentativité et signification

La moyenne arithmétique est l'outil statistique le plus fréquemment utilisé dans les études de climatologie. Dans cette étude, nous l'avons utilisée d'abord sous forme de normale. Elle a été calculée sur des séries de 30 ans et 60 ans, et elle demeure représentative du climat sur une longue période (Choisnel, 1991). Elle s'obtient en faisant la somme des valeurs distinctes qui ont été observées, chacune d'elles étant affectée d'un poids égal à sa fréquence (Vassereau, 1988). Elle s'exprime de la façon suivante : (avec n le nombre d'observations) :

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

La moyenne \bar{X} nous a permis d'identifier les différents rythmes pluviométriques, de caractériser le climat moyen d'une part, et de mettre au point certains indices régionaux d'autre part.

1.3. Les paramètres de dispersion

Les paramètres de dispersion sont calculés à partir du paramètre fondamental de tendance centrale qu'est la moyenne. Ces paramètres de dispersion sont **l'écart-type et le coefficient de variation**.

L'écart-type est utilisé pour évaluer la dispersion absolue des valeurs autour de la valeur centrale. Il s'exprime par la formule suivante :

$$\sigma(x) = \sqrt{v} \text{ où } v \text{ est la variance de la série.}$$

Le degré de variabilité entre les différentes normales est ensuite testé à partir du test "**F**" de Fisher qui permet de comparer les variances sur la période 1961-1990 et 1931-1960.

A partir du calcul de l'écart-type, nous avons pu quantifier les anomalies pluviométriques dans les séries pluviométriques par une technique de standardisation. La standardisation nous a permis de donner à chaque variable le même poids statistique et de calculer les anomalies centrées réduites sur chaque station. Elle se calcule de la façon suivante :

$$x'_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma(x)}$$

x'_i = anomalie centrée réduite pour l'année i

\bar{x} = moyenne de la série

$\sigma(x)$ = écart-type de la série

Les degrés de variabilité de la pluviosité aux différents pas de temps (décadaire, mensuel, annuel) ont été également mesurés grâce au coefficient de variation et au coefficient d'irrégularité.

Le coefficient de variation est le moyen le plus utilisé pour tester et quantifier la variabilité d'une réalité ou d'un phénomène statistique. C'est le rapport de l'écart-type à la moyenne, exprimé en pourcentage. Il s'écrit de la manière suivante :

$$cv = \frac{\sigma(x)}{\bar{x}} \times 100$$

$\sigma(x)$ = écart type de la série

\bar{x} = moyenne

Le coefficient de variation est d'usage facile, simple et permet, en le cartographiant, d'établir des comparaisons des degrés de variabilité de la pluviosité dans l'espace. Mais il ne peut s'appliquer à toutes les régions, surtout dans les milieux désertiques ou subarides car parfois il exagère et amplifie la variabilité. Cette méthode a été utilisée par Bokonon-Ganta (1987), sur la période 1955-1984 pour montrer la variabilité pluviométrique dans la région du golfe de Guinée. Boko (1988) en a fait usage pour identifier la variabilité des précipitations sur tout le Bénin de 1951 à 1980. Afouda (1990) s'est servi aussi du coefficient de variation pour étudier les relations entre l'eau et les cultures dans le Bénin septentrional et central. Mais ces auteurs n'ont pas évoqué les raisons du choix de cet indice comme outil-test de la variabilité dans ce domaine. **Si nous faisons usage du coefficient de variation dans cette étude, c'est parce que, dans les régions homogènes où les pluies sont soutenues, le coefficient de variation décrit fidèlement la notion de variabilité proprement dite.**

Les quartiles et les quintiles permettent de mesurer le degré de variabilité par rapport à la médiane. Ils nous ont permis d'évaluer les probabilités d'apparition des séquences sèches et de quantifier les risques de déficit hydrique auxquels sont confrontées les deux variétés de maïs. Les paramètres de dispersion ne suffisent pas à eux seuls pour mesurer la variabilité proprement dite, car ils ne décrivent pas l'évolution temporelle des séries météorologiques.

Section 2. : Les outils de caractérisation de l'évolution temporelle : l'analyse spectrale et la recherche de tendances

L'analyse du signal temporel dans les séries climatiques et la recherche de tendances ont été réalisées à partir de l'analyse spectrale, du test de Mann-Kendall et des moyennes mobiles.

2.1. L'analyse spectrale

Cette analyse a permis de mettre en évidence la présence ou l'absence de cycles ou de périodicités dans les séries pluviométriques interannuelles de chaque station, et sur les composantes (CP) issues des analyses factorielles.

Cette technique a pour but de rechercher les bandes spectrales qui correspondent à une proportion significative de la variance. Dans cette procédure, nous avons d'une part fait un filtrage en travaillant sur des **valeurs centrées réduites** interannuelles afin d'éliminer la composante saisonnière. La technique de filtrage utilisée est le **Fast Fourier Transform** du logiciel Statistical Analysis System (SAS). Nous avons préféré cette méthode à celle de Blackman-Tukey (1958) qui se base sur les autocorrélations, et à celle du Maximum Entropy Method (MEM) qui utilise le filtrage de moyenne mobile à 3 points. D'autre part, nous avons aussi éliminé la tendance par la méthode de régression linéaire afin d'avoir un meilleur résultat.

La méthode transformée de Fourier a l'avantage d'être plus rapide en temps-calcul et les coefficients de Fourier de la série sont plus simples à tester. En analyse spectrale, les tests de signification doivent toujours être adaptés à la série en présence. En effet, si la corrélation sériale d'ordre 1 n'existe pas, l'hypothèse nulle H_0 est celle d'un "bruit blanc" (Mitchell *et al.*, 1966). Dans le cas contraire, c'est à dire si "r", le coefficient de corrélation d'ordre 1, est significatif, on retient l'hypothèse de "bruit rouge").

L'affirmation de l'existence réelle de cycles dans une série est subordonnée à la présence d'un nombre élevé de réalisations au cours de la période. Ainsi, on ne peut conclure à l'existence de cycle de 10 ans sur une série de 30 ans, même en présence d'une densité significative. On ne peut, de même, accorder une importance exagérée à un cycle local pour un signal pluriannuel. *"En réalité, un signal valable pour une station devra être vérifié pour un champ suffisamment important avant toute explication"* (Moron, 1994), car le climat en lui même est fluctuation quelle que soit l'échelle de temps et d'espace considérée. Cette méthode doit s'appliquer avec un esprit critique car le climat peut connaître des oscillations non périodiques mais bien

structurées dans le temps, qu'il est donc difficile de mettre en évidence par la seule analyse spectrale.

La formule de l'analyse spectrale peut se définir de la façon suivante : soient $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$ qui désignent les valeurs extrêmes d'une série chronologique. Celles-ci sont ramenés à la moyenne de la série chronologique ramenées à la moyenne, et un coefficient de corrélation d'ordre k , entre les termes x_i et x_{i+k} ainsi définis :

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^{n-k} x_i x_{i+k}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^{n-k} x_i^2 + k}}$$

On calcule r_k pour $k=0, 1, 2, \dots, n$. Cette valeur est projetée dans un repère orthonormé sur l'axe x des abscisses r_k sur l'axe y des ordonnées pour obtenir un corrélogramme. Moins l'allure du corrélogramme s'amortit, plus l'amplitude se maintient même pour les valeurs de k . Ainsi, on peut conclure à l'existence d'un ou plusieurs phénomènes cycliques dans la série. Mais la procédure d'analyse spectrale basée sur les corrélogrammes n'a de sens que si elle s'applique à de longues séries statistiques. Ainsi, nous n'identifierons les éventuelles périodicités que dans les séries longues complètes qui remontent à l'origine des stations, soit depuis 1931.

2.2. Identification des tendances

Les paramètres de dispersion donnent une idée de la variabilité. Mais ils ne donnent pas assez d'informations statistiques dans le temps. En climatologie, il existe toujours des tendances qui sont dans certains cas, en réalité, une partie d'un cycle avec une tendance linéaire continue. Cette observation de la tendance dépend de la fenêtre d'observation de l'oscillation. De ce point de vue, la tendance a été mise en évidence ici par une droite de régression de type affine $y = at+b$ qui prend en compte la variable à étudier dans le temps. L'obtention de la droite de régression passe par la détermination du coefficient directeur ou pente (a). Il se calcule de la façon suivante :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})(t - \bar{t})}{\sum_{i=1}^n (t - \bar{t})^2}$$

Si $a > 0$, on a une tendance à la hausse ; si $a < 0$, on a une tendance à la baisse. Toutefois, la confirmation de la tendance passe par l'application des tests aux résultats obtenus. Ici, le degré de signification des éventuelles tendances a été testé en calculant le **coefficient de corrélation des rangs R_s de Spearman (1904)** et le **coefficient (t) de Mann-Kendall (1948)**.

Le coefficient R_s de Spearman a la propriété de déceler une éventuelle dépendance monotone entre deux variables x et y (Lebart *et al.*, 1982) à partir d'une distribution fishérienne $Q = \sum X_i Y_i$, se basant sur une hypothèse nulle d'équiprobabilité des n appariements possibles des n couples (x_i, y_i) . Cette distribution de Fisher ne dépendra que de n si on remplace les x_i par leurs rangs R_i et les y_i par leurs rangs S_i .

R_i et S_i prennent leurs valeurs dans la suite $\{1, 2, \dots, n\}$. Les observations dans nos séries ont été classées et remplacées par leur rang S_i par ordre croissant. Le coefficient s'obtient de la manière suivante :

$$R_s = 1 - \frac{6}{n(n^2 - 1)} \sum_{i=1}^n (S_i - 1)^2$$

si $R_s > 0$ donc la tendance est positive ; si $R_s < 0$ la tendance est négative.

- **Le test de Mann-Kendall (1948)** est un test non paramétrique qui permet de déceler une éventuelle dépendance entre deux variables (x_i, y_i) (Lebart *et al.*, 1979). Il a été repris par Sneyers (1975) dans "Notes techniques de l'Organisation Météorologique Mondiale". Il est utilisé ici pour mesurer le degré de significativité de la tendance et les ruptures de stationnarité dans les séries pluviométriques.

Le test de Mann-Kendall a été déjà utilisé par Démarée et Nicolis (1990) pour caractériser la sécheresse sahélienne et son évolution dans le temps. Nicolis (1990) l'a également utilisé pour montrer un aspect du changement climatique sur les séries d'observations météorologiques de la Belgique. Boko et Adjovi (1994) en ont fait usage dans une étude de recherche de tendance dans les séries pluviométriques du sud Bénin à partir de 10 stations.

Le test de Mann-Kendall s'applique aux données classées ou classables. Dans une série de longueur n , les observations originales x_i avec $i = 1, 2, \dots, n$ sont remplacées par le rang y_i qui leur est attribué lorsqu'on les range par ordre de grandeur croissante. On calcule pour chaque élément y_i le nombre n_i d'éléments

y_j tels que ($i > j$) et $y_i > y_j$. La statistique t du test est donnée par la relation

suivante : $t = \sum_{i=1}^n n_i$. Cette valeur est ensuite normalisée à partir des moyennes et des

variances suivantes :

$$E = \frac{n(n-1)}{4} \quad \text{et} \quad \text{var} = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$

$$\text{Sa formule réduite est } u = \frac{(t - E)}{\text{var}}$$

Pour permettre une analyse progressive, le test est répété sur une série S de longueur N , les séries S_k , décrivant les observations 1 à k , avec k variant de 1 à N . Pour chaque série S_k , on détermine la statistique u_k . Les valeurs u_k sont reportées sur un graphique et forment la courbe directe. Le principe de la courbe rétrograde u'_k du test est identique à celui de la courbe directe, sauf que l'on part de N pour remonter à 1. L'intersection graphique de u_k , ou courbe directe et de la courbe rétrograde u'_k permet de situer le début du phénomène climatique que l'on se propose d'étudier. La valeur du coefficient obtenu est ensuite testée aux seuils de 99 et 95% à partir de la table de Student. Ici, l'hypothèse nulle, ou absence de tendance, est rejetée pour les fortes valeurs absolues de u_k . Lorsque les valeurs de u_k sont significatives, on conclut à une tendance croissante ou décroissante selon que $u_k > 0$ ou $u_k < 0$ (Sneyers, 1975).

Dans ce travail, le test de Mann-Kendall a été utilisé, d'une part pour mesurer le degré de signification de la tendance et la position des ruptures de stationnarité dans les indices régionaux de la saison de mousson d'été, de la récession d'août, de la petite saison des pluies en milieu béninien et de la grande et unique saison des pluies dans le nord du Bénin. D'autre part, il nous a permis d'étudier les comportements des débuts et des fins d'hivernage pour chaque station.

Cette recherche de tendance a été faite aussi par le calcul des moyennes mobiles centrées à base 5, qui a permis d'avoir des séries pluviométriques lissées à l'échelle stationnelle et temporelle. La base 5 est choisie ici pour lisser les variations rapides interannuelles du climat et pour être en conformité avec la durée de la plupart des programmes quinquennaux de vulgarisation des nouveaux cultivars introduits par la recherche agronomique béninoise et les essais de nouvelles variétés de maïs en milieu paysan.

Cette technique de moyenne mobile permet de pondérer les événements extrêmes et introduit une organisation artificielle sur la moyenne oscillatoire. Chaque valeur ou observation est remplacée par une moyenne arithmétique calculée sur la valeur de cette observation et de celles qui l'encadrent. On utilise 5 valeurs, et x_i est

remplacé dans la série par :
$$x'_i = \frac{x_{i-2} + x_{i-1} + x_i + x_{i+1} + x_{i+2}}{5}$$

Cette méthode élimine l'effet des fluctuations de très courte durée, efface le mouvement cyclique si la période sur laquelle porte le calcul de chaque moyenne est un multiple de la durée du cycle et que l'amplitude de la durée de ce cycle est constante. Or, en réalité, les phénomènes climatiques ne sont jamais stables dans le temps car on peut avoir des variations interdécennales, saisonnières et interannuelles. **Cette technique est donc à utiliser avec prudence.**

2.3. La mise en évidence du phénomène de persistance climatique: les auto-corrélations

La persistance dans les séries pluviométriques sur les trois normales sélectionnées 1931-1990, 1931-1960, 1961-1990 a été étudiée par le **coefficient**

d'autocorrélation. Il mesure la corrélation linéaire qui existe entre une série donnée et la même série décalée d'une ou n années selon le critère choisi.

Son but est de vérifier si la pluviométrie d'une année est influencée par celle(s) de l'année ou des années précédentes (rang 1 ou rang 2.....rang n). Il a été calculé à partir des données annuelles brutes. Mais le coefficient d'autocorrélation de rang 1 est le plus intéressant, car c'est lui qui nous donne la mesure de la persistance d'une année sur l'autre dans les séries pluviométriques de nos fichiers. Les coefficients d'autocorrélation ont été calculés de la manière suivante :

$$\text{Auto-covariance d'ordre } P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_{i-p} - \bar{X})(x_i - \bar{X}) \Rightarrow AR_p = \frac{AR}{\text{var}(x)}$$

avec p= ordre ; \bar{X} = moyenne de la série xi ; var(x) = variance . AR = autocorrélation

Section 3. : La recherche de la dépendance statistique : les coefficients de corrélation linéaire

Le coefficient de corrélation linéaire sert à mesurer les liaisons de dépendance statistique entre deux ou plusieurs variables. Il servira ici à caractériser l'homogénéité ou l'hétérogénéité des séries pluviométriques d'une part, et à mettre en évidence les éventuelles téléconnexions entre les facteurs océano-atmosphériques d'échelle régionale et la pluviométrie d'autre part. Les coefficients de corrélation linéaire sont obtenus par la formule suivante :

$$r = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\sigma(x)} - \frac{\bar{x}}{\sigma(x)} \right) \times \left(\frac{y_i}{\sigma(y)} - \frac{\bar{y}}{\sigma(y)} \right)$$

x_i et y_i représentent les valeurs des séries x et y pour l'année i ; \bar{X} et \bar{Y} désignent la pluviométrie moyenne de la chronique (1931-1990), $\sigma(x)$ et $\sigma(y)$ les écarts-types des valeurs des séries x et y. Les variables sont standardisées afin de leur donner a priori le même poids statistique. "r" mesure le degré de "similitude statistique" des stations dans leurs variations interannuelles.

Les coefficients de corrélation obtenus sont testés pour des seuils de signification de 5 et 1%, le nombre de degrés de liberté utilisés dans le test étant

égal au nombre de paires d'observations moins 2, soit $\gamma = N - (2 + k)$, k étant le nombre de variables de liaison ou corrélation sériale. Mais une corrélation peut être significative à partir d'un seul événement exceptionnel, tirant arbitrairement la distribution fréquentielle d'une variable dans un sens ou dans un autre. Il perd alors une partie de son sens, car la distribution de cette variable n'est pas proche d'une loi normale. Un coefficient de corrélation non-significatif peut aussi masquer une relation linéaire, dans le cas, là encore, d'une distribution non-gaussienne de la série. Le contrôle d'une telle situation statistique passe par la réalisation du nuage de points associé à ces différentes variables pour tester la non-sensibilité de la relation à l'anomalie. Pour résoudre ces problèmes, il peut être utile de recourir à l'analyse composite pour affiner les résultats et de les tester en vue de leur validation

Section 4. : Le test de Student et les analyses composites

Le test de Student et les analyses composites sont utilisés pour comparer les hauteurs pluviométriques sur les différentes normales. Ces deux méthodes nous ont permis de caractériser et de valider les changements pluviométriques sur les périodes 1931-1960, 1961-1990 et 1931-1990.

4.1. Le test de Student

Par son principe, le test de Student est un test paramétrique qui permet de caractériser et d'évaluer la différence entre deux moyennes \bar{x}_1 et \bar{x}_2 de deux échantillons supposés indépendants, avec n_1 et n_2 représentant les effectifs respectifs des deux échantillons. La statistique "t" du test de Student s'écrit de la façon suivante :

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{s^2 \times (1/n_1 + 1/n_2)}}$$

avec s^2 qui désigne la variance pondérée du groupe entier des deux échantillons

$$\text{soit : } s^2 = \frac{((n_1 - 1)s_1 + (n_2 - 1)s_2)}{n_1 + n_2 - 2}$$

s_1 représente la variance du premier échantillon et s_2 correspond à la variance du deuxième échantillon. La valeur "t" obtenue est comparée à une valeur tirée de la table de Student, pour un nombre de degrés de liberté ν , tel que $\nu = n_1 + n_2 - 2$.

4.2. L'analyse composite

L'analyse composite est une méthode qui s'utilise fréquemment en climatologie diagnostique globale pour la mise en évidence de téléconnexions. **Elle consiste à comparer entre elles les moyennes de deux échantillons extraits d'une même série chronologique par rapport à la moyenne de la série complète.** La différence entre les deux échantillons est évaluée puis validée par le test en "t" de Student. L'utilisation de la moyenne d'un certain nombre d'années présélectionnées permet de diminuer le "bruit" de fond de la variabilité (Ward, 1992).

Le principe est le suivant : soient \bar{x}_1 et \bar{x}_2 les valeurs moyennes calculées

respectivement sur les deux périodes distinctes composées chacune de N observations. On calcule d'abord la différence qui se définit de la manière suivante :

$$d = \bar{x}_1 - \bar{x}_2.$$
 Ensuite, on cherche l'écart-type par rapport au nombre total

d'observations soit $\sigma(d) = \sigma(x) \times \sqrt{\left(\frac{2}{N}\right)}$; $\sigma(x)$ est l'écart-type estimé sur l'ensemble

de total de l'échantillon; N représente le nombre d'observations.

L'analyse composite possède deux qualités majeures, à savoir la simplicité de calcul et la souplesse d'utilisation. Cette méthode d'analyse de données demeure complémentaire des corrélations linéaires qui sont basées sur des moments d'ordre 2.

Section 5. : L'analyse fréquentielle

L'analyse fréquentielle nous a permis de déterminer le rythme d'apparition ou de répétitivité d'un phénomène ou d'un risque climatique. L'analyse fréquentielle est utilisée dans ce travail, tant dans la partie diagnostique que dans la partie agroclimatologique. Les analyses fréquentielles permettent aussi de rendre compte de la durée de retour des événements exceptionnels. A ce titre, les analyses fréquentielles demeurent un outil privilégié pour la quantification des risques climatiques dans plusieurs domaines.

En agronomie, par exemple, la connaissance des seuils de pluviométrie annuelle ou mensuelle de faibles à très faibles fréquences (0,1 à 0,01 %) permet de préciser les éventuels besoins en irrigation. Franquin (1969) a utilisé cette méthode pour comparer les précipitations décadales et l'ETP afin de définir le début de la saison humide et les meilleures chances de succès pour les semis (Ouattara *et al.*, 1982). Ainsi, prévoir la probabilité des précipitations ou d'un risque climatique est d'autant plus nécessaire que les récoltes et les importations dépendent des aléas climatiques. De même, dans le cadre de notre étude, pour une bonne planification, il est important de déterminer les probabilités d'apparition des périodes critiques pour la culture du maïs, par exemple cinq ou huit années sur dix. On a pu, ainsi, grâce aux analyses fréquentielles, déterminer à partir d'un seuil objectif la probabilité d'avoir des décades sèches préjudiciables au développement de la culture du maïs pendant la saison des pluies. Cette technique nous a permis aussi de montrer qu'il faudra semer le maïs de telle sorte que les phénophases dites critiques ne coïncident pas avec les périodes de sécheresse.

L'analyse statistique de séries stationnelles, la recherche de dépendances, l'analyse fréquentielle ne suffisent pas à elles seules à analyser la variabilité climatique, car elles ne décrivent pas suffisamment la répartition spatio-temporelle des éléments du climat. Aussi, avons-nous aussi utilisé la méthode de l'analyse multivariée avec ses méthodes factorielles qui permettent de mieux identifier un signal climatique sur une région

Section 6. : Les méthodes factorielles

Les méthodes factorielles ont permis de dégager les modes spatio-temporels de variation du climat. Les techniques utilisées sont celles des analyses en composantes principales et de la classification automatique.

6.1. Les analyses en composantes principales (ACP)

L'analyse en composantes principales facilite l'étude des variations des paramètres climatiques, notamment la pluviométrie. C'est une procédure d'analyse des données qui synthétise l'information dans l'espace et dans le temps, en résolvant la variabilité en composantes orthogonales, non corrélées deux à deux (Fontaine, 1990 b). La réduction du nombre de caractères ne se fait pas par une simple sélection de certains d'entre eux, mais par la construction de nouveaux caractères synthétiques (facteurs) obtenus en combinant les caractères initiaux (Saporta et Bourouche, 1988). L'ACP décrit les données contenues dans un tableau individus-caractères (par exemple : années-stations). Elle nous a permis :

- ❶ d'identifier les principaux modes de variabilité pluviométrique et de cartographier les différentes configurations spatio-temporelles
- ❷ de cartographier la variabilité de l'indice de satisfaction des besoins en eau de la culture du maïs;

Dans une ACP, les composantes sont hiérarchisées : la première composante principale exprime plus de variance que la seconde, elle-même plus que la troisième et ainsi de suite. A un stade difficile à déterminer, on dit qu'il y a dégénérescence des composantes (Janicot, 1990). Pour faire face à ce problème, plusieurs techniques de rotation peuvent accompagner les ACP.

La rotation est une transformation linéaire qui cherche à maximiser la variance prise en compte par un facteur. Elle permet de mieux discriminer les composantes en renforçant les groupements régionaux de stations sur des axes distincts. La méthode de rotation Varimax a déjà été utilisée avec succès par de nombreux chercheurs sur l'espace ouest-africain (Fontaine, 1990 ; Janicot, 1990 ; Moron, 1994). Dans cette étude sur le Bénin, nous avons choisi d'appliquer la solution orthogonale Varimax aux ACP pivotées, pour plusieurs raisons :

- ① elle conserve l'orthogonalité entre les vecteurs propres.
- ② elle optimise un moment statistique d'ordre 2 en cherchant à rapprocher de 0 ou de 1 les corrélations entre les variables et chacun des vecteurs propres (Moron, 1994). Ceci permet une meilleure discrimination entre les vecteurs propres pour une variable donnée (Richman, 1986). La rotation Varimax s'exprime de la manière suivante :

$$v = \sum_{k=1}^r \frac{P \sum_{i=1}^p \left(\frac{L_{ik}}{h_i^2} \right)^2 - \left[\sum_{i=1}^p \left(\frac{L_{ik}}{h_i^2} \right) \right]^2}{P^2}$$

où r désigne le nombre de vecteurs propres sélectionnés. Ici, les différents facteurs sont pivotés deux à deux jusqu'à ce que la valeur de la rotation V soit maximisée à un critère de convergence donné. Cette valeur sert à définir une nouvelle matrice de poids factoriel pour chaque vecteur propre E_k .

De ce point de vue, la rotation Varimax s'appliquera aux analyses portant sur l'ensemble du réseau météorologique du Bénin car, à cette échelle, les stations ne réagissent pas de la même façon et présentent des régimes pluviométriques différents. Une ACP soumise à une rotation passe nécessairement par la sélection d'un nombre de facteurs sur lesquels l'information sera dérivée. Il existe plusieurs méthodes de détermination du nombre final de composantes à conserver. Il s'agit des méthodes de Kaiser (1972), de Cathell (1966), d'Overland et Preisendorfer (1982). Compte tenu de la facilité d'utilisation, le **scree-test** de Cathell, méthode graphique, est utilisé pour sélectionner les différentes composantes pour la régionalisation de la pluviométrie.

Elle repose sur la sélection des écarts de pallier de la courbe représentant la variance cumulée des différentes composantes principales. On retient alors comme seuil, le début d'observation des faibles pourcentages de variance exprimés sur les composantes. Cette méthode de rotation Varimax a déjà été utilisée avec succès par de nombreux chercheurs sur l'espace ouest-africain (Fontaine, 1988 ; Janicot, 1990 ; Moron, 1994).

Par contre, les ACP réalisées à partir des données pluviométriques du Bas-Bénin sont sans rotation à cause de la dimension de l'espace (11 200 km²) et du nombre limité de stations (15). En effet, le Bénin méridional soumis à cette analyse factorielle réagit avec **effet de masse** car la part la plus importante de la variance totale est exprimée par la première composante.

Dans cette étude, les ACP concernent la variable **pluie** aux pas de temps décadaire, mensuel, saisonnier et annuel et l'indice de satisfaction des besoins en eau de la culture du maïs. Les données ont été standardisées afin d'affecter le même poids à chaque variable (station) dans la matrice d'inertie factorielle. Cette technique revient à utiliser la matrice de corrélation, au lieu de la matrice de covariance qui met surtout l'accent sur les milieux plus arrosés. **Le choix de la matrice de corrélation se justifie par l'appartenance du Bénin à la zone d'influence de la mousson ouest-africaine où la concentration pluviométrique est élevée et le relief peu accidenté.**

La fiabilité de l'interprétation des résultats dépend beaucoup du pourcentage d'inertie porté par les composantes jugées significatives. Plus le pourcentage de variance exprimée par chaque composante est élevé, plus les résultats sont représentatifs.

6.2. La classification automatique

Dans la série des méthodes factorielles, la procédure de classification automatique hiérarchique a été utilisée pour l'analyse typologique. Cette analyse a été appliquée au classement des années en fonction des totaux annuels, saisonniers, mensuels et décadaires des différentes stations. La méthode retenue est celle de la classification hiérarchique ascendante qui regroupe deux à deux les variables à analyser et les groupes de variables. Cette technique décrite par Saporta (1990) utilise pour le regroupement des variables la distance euclidienne basée sur les barycentres. Soient k et l les barycentres des classes K et L (variables ou groupe de variables). Considérons N_k et N_l les effectifs des deux classes et d la distance euclidienne entre k et l . La distance entre les deux classes se définit par :

$$D_{KL} = d(k,l) + \frac{W_K}{N_K} + \frac{W_L}{N_L} \quad \text{avec} \quad W_K = \sum_{i=1}^{N_K} d(i,k) \quad \text{et} \quad W_L = \sum_{i=1}^{N_L} d(i,l)$$

La structure des regroupements successifs est décrite dans un arbre de classification que l'on tronque selon le nombre de classes choisi.

Si les outils d'analyse diagnostique du climat nous ont permis de dégager les différents modes de variabilité et d'identifier les rythmes climatiques, ils paraissent cependant insuffisants pour évaluer les risques climatiques auxquels est soumise la culture du maïs. Aussi ont-ils été complétés par des méthodes agroclimatologiques.

Section 7. : Les approches agroclimatologiques

Cette section fait un inventaire des concepts qui seront utilisés dans la partie agroclimatologique de la thèse essentiellement consacrée à la modélisation des termes du bilan des cultures. Elle définit les termes qui seront utilisés dans l'analyse du comportement du maïs par rapport aux besoins hydriques de la culture sans décrire le modèle utilisé.

La détermination du bilan hydrique des cultures demeure la méthode qui permet d'apprécier l'influence du climat sur la production, et sa dynamique dépend essentiellement de la variabilité des précipitations. Il passe par la prise en compte de l'évaporation et de l'évapotranspiration. Le calcul du bilan de l'eau et des cultures fait intervenir presque tous les paramètres météorologiques de caractérisation des climats. L'importance du bilan de l'eau des cultures dans le diagnostic climatique de la maïsiculture au Bénin est capitale et sa caractérisation doit prendre en compte tout le cycle de développement de la plante qui passe par :

- ❶ une phase de semis pendant laquelle les besoins en eau sont réduits,
- ❷ un stade de développement du système racinaire et de la mise en place de l'appareil végétatif,
- ❸ une phase de croissance active caractérisée par l'activité photosynthétique maximale et des besoins en eau très importants,
- ❹ une phase de maturation qui est celle de la migration des réserves. A ce stade du cycle végétatif de la plante, les températures, l'humidité et l'ensoleillement

deviennent des facteurs importants et modifient l'aspect du végétal. Alors, le bilan évaporatoire devient déterminant.

L'évapotranspiration potentielle a une place importante dans le cycle de l'eau et peut se définir comme la restitution d'eau dans l'atmosphère dans les conditions naturelles du milieu physique. Ainsi, outre la pluviométrie, l'ETP servira à faire la simulation du bilan hydrique de la culture du maïs.

De nombreuses formules ont été élaborées pour l'estimation de l'ETP notamment par Turc (1954), Penman (1962), Papadakis (1965, Riou (1975). De toutes ces formules, nous retiendrons celle de Penman car elle s'adapte mieux à notre région pour plusieurs raisons :

- son calcul intègre la plupart des paramètres météorologiques. Elle se fonde surtout sur les bilans d'énergie et évalue les transferts de masse à l'interface. Elle prend en compte les phénomènes advectifs, le flux vertical de chaleur latente et le vent, ce qu'on ne retrouve pas toujours dans les autres formules.

Ainsi, la formule de Penman que nous utiliserons est la suivante :

$$ETP_{mm} = J \frac{\Delta RN + \gamma Ea}{\Delta \gamma}$$

RN : rayonnement net; *Ea* : pouvoir évaporant de l'air libre; γ = constante psychrométrique.

$$RN = Iga(1 - a)(0.18 + 0.62 \frac{n}{N}) - \delta T^4 [0.56 - 0.08 \sqrt{ed}] (0.10 + 0.90 \frac{n}{N})$$

Iga : radiation solaire directe en l'absence d'atmosphère (cal/cm²) ; *a* : albédo de la surface évaporante ; *b* : coefficient de la formule de Dalton ; *n* : durée effective de l'insolation (heures et dixièmes) ; *N* : durée théorique du jour (heures et dixièmes) ; *n/N* : fraction d'insolation ; *T* : température de l'air en degrés Kelvin ; δ : constante de Stephan-Boltzman = $1.19.10^{-7}$ cal/cm²/j ; *Ea* = 0.26 (ew - ed)(0.5 + 0.54v) ; *ew* : tension de la vapeur d'eau saturante en hPa correspondant à la température moyenne en degrés Celsius ; *ed* : tension de la vapeur d'eau mesurée sous abri en hPa ; *v* : vitesse moyenne du vent en mètre par seconde, mesurée à 2 m au-dessus du sol.

Avec les valeurs d'ETP Penman nous avons calculé le **bilan climatique** des six stations synoptiques pour mesurer la durée de la saison des pluies. Il s'exprime de la façon suivante : $B_C = P - ETP$, avec B_C = bilan climatique ; P = précipitations ; ETP = évapotranspiration potentielle. Quand $B_C > 0$ le bilan climatique est positif ; lorsqu'il $B_C < 0$ le bilan climatique est négatif.

Le bilan de l'eau calculé avec l'ETP Penman nous permettra de classer les périodes sèches et humides. Alors, il sera synonyme de **bilan agroclimatique** et sera appliqué à la production agricole. Les termes du bilan sont :

P = précipitations, en mm

ETP = évapotranspiration potentielle, en mm

ETR = évapotranspiration réelle, en mm

RU = réserve utile du sol, en mm

La réserve utile RU est la proportion des eaux superficielles utilisables par les racines des plantes (Tessier, 1994). C'est la réserve totale après ressuyage. Ici, elle sera fixée en fonction de la nature des sols (sols argileux, sols hydromorphes, vertisols, etc.). Il existe aussi la RFU (réserve facilement utilisable). Son épuisement crée des difficultés au développement de la plante. Dans le cas où la RFU est épuisée, le reste est appelé *réserve de survie* RS avec $RU = RFU + RS$. Quand il ne reste dans le sol que la réserve de survie, le seuil de flétrissement est atteint. Si le seuil de flétrissement est atteint et qu'il n'y a pas de reprise des pluies, les plantes à système racinaire superficiel périssent. Les autres espèces sont obligées pour survivre, de puiser l'eau dans les profondeurs du sol. Le point de flétrissement est la limite au-delà de laquelle la plante ne peut plus pomper l'eau du sol.

Si la variabilité du bilan des cultures dépend de la variabilité des précipitations, il est important de dégager la variabilité des termes du bilan agroclimatique et de les situer dans le cadre des différentes saisons. Il s'agira pour nous de voir pour quelles saisons les termes ETR, ETM et surtout ETR/ETM (%) présentent la plus forte variabilité. En effet, l'ETM ou évapotranspiration maximale est la valeur maximale de l'évaporation d'une culture à un stade végétatif donné et dans des conditions climatiques données. Elle se définit par rapport à l'ETP.

$$ETM = K_c \times ETP$$

K_c est le coefficient cultural. Il dépend de la plante et est fonction de son stade de développement (semis, levée, floraison, maturation) et des conditions climatiques. D'une façon générale, on dégage deux périodes : la période de grande et la période de moindre sensibilité. C'est à la floraison que K_c est très élevé : il varie de 0.5 à 1, voire 1.1 pour certaines cultures, dont le maïs. Les K_c utilisés sont ceux recommandés par la FAO. Mais ils ont été recalculés à partir du référentiel de la FAO (voir troisième partie).

L'évapotranspiration réelle (ETR) d'une culture est l'évapotranspiration qui a lieu dans des conditions d'alimentation naturelles, en tenant compte de ce que la plante peut subir lors de certaines périodes d'approvisionnement en eau qui ne sont pas toujours à l'optimum. Les termes du bilan ainsi définis seront utilisés dans le modèle développé par le **CIRAD dans son ancien département de Cultures Annuelles (CIRAD-CA) au sein de l'UR Gestion de l'Eau (UR-GE)**. Le principal outil utilisé est **S.A.R.R.A.** (Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques). Pour des raisons pratiques, la description et le fonctionnement du modèle de simulation du bilan hydrique sont présentés dans la partie agroclimatologie de l'étude en même temps que les résultats.

Le rapport ETR/ETM (%) nous permet d'évaluer l'indice de satisfaction des besoins de la culture et peut être considéré comme l'indice de stress agronomique. **Nous retiendrons le seuil de Dancette (1983) : un ETR/ETM (%) supérieur à 80% exprime un confort agronomique et hydrique. Quand ETR/ETM (%) est inférieur à ce seuil, la plante est en situation de stress hydrique.**

Les aspects des ces différents indicateurs du bilan hydrique sont plus explicités dans la partie agronomique de la thèse (troisième partie).

C'est à partir des différents rythmes de variabilité pluviométrique et des bilans à identifier par le modèle que nous verrons, à l'échelle saisonnière et en fonction des dates de semis et des calendriers culturaux, si l'évolution phénologique coïncide

avec les décades de forte ou de faible variabilité des précipitations et des termes du bilan de l'eau.

L'ensemble de toutes ces techniques statistiques et des approches agroclimatologiques nous ont permis de faire le diagnostic climatique du Bénin et de caractériser ses effets sur la culture du maïs.

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Le Bénin est un pays de savane du golfe de Guinée. Avec une économie essentiellement rurale, il appartient au groupe des Etats les moins avancés du globe. La production agricole occupe plus de 60% des divers groupements socio-culturels qui ont développé des civilisations agraires différentes en fonction de la géomorphologie du paysage. Dans le contexte actuel de la mondialisation et de globalisation de l'économie, la culture qui fait essentiellement l'essor économique du Bénin n'est pas le maïs, mais le coton avec 12% du PIB.

Sur le plan céréalier, le maïs demeure la denrée vivrière la plus consommée dans le sud. De nos jours, cette céréale commence à être développée au nord et surtout dans le Borgou à cause des conditions écologiques dégradantes dans le Bas-Bénin et de la disponibilité et de la qualité des terres dans le nord-est du pays. Cette culture supposée être d'origine latino-américaine a été introduite dans l'ex-royaume du Danhomè à la demande du souverain Ghézo suite à la sécheresse de 1847-1848 et à l'abolition de la traite des noirs. Les conditions climatiques et édaphiques d'antan favorables à cette culture et les différentes politiques agraires menées par les pouvoirs successifs ont fait du sud-Bénin un espace maïsicole.

Les exigences des bailleurs de fonds (Fonds Monétaire International, Banque Mondiale, etc...) finançant les différents programmes d'ajustement structurel obligent le Bénin à mettre davantage l'accent sur la production cotonnière au détriment du secteur vivrier. Cette exigence du PAS (Programme d'Ajustement Structurel) affaiblit les efforts des pouvoirs publics béninois qui ont toujours mis l'accent sur la promotion des produits vivriers. Ainsi, le Bénin jadis diffuseur de maïs dans le golfe du Bénin

vers les années 1910-1920 se trouve dans la situation d'importer cette céréale pour nourrir sa population.

Malgré ses atouts naturels et le dynamisme de sa population, le développement agricole du Bénin reste toujours compromis faute surtout d'un bon diagnostic du milieu écologique et de la sous-estimation de la dimension climatique dans les projets de développement agricole.

Dans le contexte actuel de globalisation de l'économie, ce travail se veut un outil de réflexion et d'aide à la décision car il propose une amélioration de la connaissance agroclimatologique du milieu pour des stratégies de sécurité alimentaire maïsicole.

Il pose dans un sens large une problématique de développement agricole en mettant surtout l'accent sur la négligence de la ressource climatique dans les projets de développement rural. Dans cette partie de la thèse, on justifie le titre de la thèse tout en annonçant les articulations du travail.

Ce travail a pour objectif de fournir des éléments pour l'élaboration d'un atlas climatique, outil indispensable pour l'aménagement du territoire et la planification agricole.

Un des résultats importants de cette première partie est la création d'une mini base originale des données météorologiques à différents pas de temps sur le Bénin. Ceci a permis d'avoir des fichiers des données traitées disponibles et actualisables pour toute consultation.

L'utilisation des méthodes statistiques permet d'extraire les modes de variabilité spatio-temporelle du climat, et la recherche des téléconnexions entre les précipitations et les facteurs atmosphériques et océaniques d'échelle régionale.

La simulation des termes du bilan de la culture du maïs à partir d'hypothèses réalistes et d'une enquête de terrain permet d'analyser les conséquences de la

variabilité climatique à chaque phénophasse de la principale céréale cultivée au sud Bénin.

DEUXIEME PARTIE

DIAGNOSTIC DU CLIMAT DU BENIN

PARTIE 2. LE DIAGNOSTIC DU CLIMAT DU BENIN DE 1931-1990

**Chapitre premier – Le climat moyen du Bénin de 1931 à 1990 :
Un des facteurs fondamentaux de la maïsiculture**

**Chapitre deuxième – La variabilité climatique au Bénin de 1931 à
1990**

CHAPITRE I - LE CLIMAT MOYEN DU BENIN DE 1931-1990 : UN DES FACTEURS FONDAMENTAUX DE LA MAÏSICULTURE

INTRODUCTION

Le soleil constitue la principale source d'énergie de la circulation atmosphérique et les climats régionaux et locaux dépendent de la répartition de son rayonnement. Compte tenu, des propriétés des différents états de surface et de leur distribution, la répartition du rayonnement solaire n'est pas égale pour le système terre-océan-atmosphère. Ainsi, le bilan radiatif au sommet de l'atmosphère est largement positif dans la bande tropicale entre 35°N et 35° S à laquelle appartient le Bénin. Il est déficitaire aux moyennes et hautes latitudes. Il résulte de cette répartition différentielle du bilan radiatif, un transfert méridien et vertical des flux des basses latitudes vers les hautes latitudes par le biais des courants aériens et des courants marins qui déterminent la circulation atmosphérique. Les processus de ces transferts méridiens et verticaux sont expliqués par plusieurs modes cellulaires, telles les cellules de Ferrel, de Hadley et de type Walker (est-ouest) largement décrits par Dhonneur (1978). Ces transferts d'énergie associés aux mécanismes de l'atmosphère et combinés aux différents états de surface déterminent l'ambiance climatique dont celle de l'Afrique de l'Ouest. Aux basses latitudes et en Afrique Occidentale où est situé le Bénin, ce sont les cellules de Hadley et la circulation divergente est-ouest de type Walker qui expliquent une part importante de ces différents transferts.

La climatologie du Bénin s'inscrit dans celle de l'Afrique Occidentale. Les différents comportements de l'atmosphère associés à ceux de l'océan Atlantique déterminent l'ambiance climatique de la région, laquelle est modifiée par la géographie de chaque unité de paysage du milieu naturel et par l'action anthropique. La dynamique atmosphérique ouest-africaine a été déjà largement décrite et documentée par de nombreux chercheurs, dont Dhonneur (1971, 1974, 1985, 1988), Leroux, (1970, 1983), Fontaine (1981, 1985, 1990), Janicot (1985, 1990, 1992a, 1992b). Nous ne ferons donc pas une étude exhaustive et détaillée de la circulation atmosphérique afin d'éviter la redondance.

Section 1. : Environnements atmosphérique et océanique régionaux

1.1. Rappels sur les centres d'action atmosphérique impliqués dans la climatologie du Bénin

Les centres d'action qui commandent la circulation atmosphérique ouest-africaine et qui déterminent les climats du Bénin ont déjà été étudiés par de nombreux auteurs et repris dans la plupart des manuels et précis didactiques de climatologie tropicale. Seuls seront indiqués ici les différents flux qu'ils dirigent sur le Bénin.

Dans les basses couches de l'hémisphère nord, deux centres de pressions gouvernent la circulation atmosphérique ouest-africaine et caractérisent le climat du Bénin : l'anticyclone des Açores et l'anticyclone semi-permanent égypto-libyen (Figure 13). Le premier draine vers l'Afrique Occidentale et le Bénin des flux océaniques et continentaux et définit les types de temps sur la façade ouest du continent. L'anticyclone semi-permanent égypto-libyen dirige sur le Bénin l'alizé continental sec du nord-est, connu sous le nom d'harmattan.

Dans l'hémisphère sud, l'anticyclone de Sainte-Hélène dirige sur le Bénin le flux de mousson.

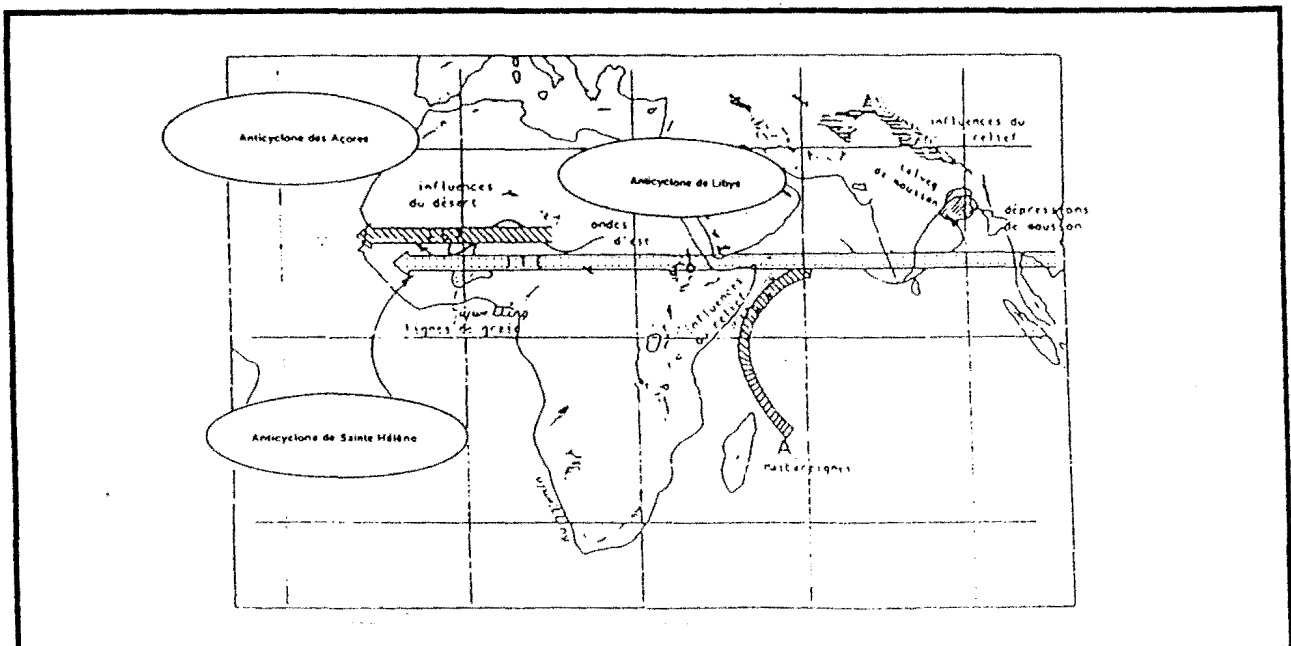


Figure 13 : Eléments fondamentaux de la circulation atmosphérique en domaine de mousson pluvieuse déterminant les climats du Bénin

Dans les hautes couches de l'atmosphère entre 200 et 100 hPa, le Jet Tropical d'Est, (JTE) dans sa branche supérieure dirige en juillet-août sur le Bénin des vents forts de l'ordre de 16-17 m/s (Krishnamurti, 1971; Chen, 1982). Le Jet d'Est Africain (JEA) entre 600 et 700 hPa, atteint sa plus forte intensité dans le golfe de Guinée à la latitude du Bénin en avril-mai d'une part et en octobre d'autre part.

Entre ces deux ceintures anticycloniques hémisphériques, les migrations de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) associées à la circulation océanique atlantique dans le golfe de Guinée, déterminent les saisons pluviométriques du Bénin et le calendrier cultural paysan.

1.2. Le Bénin et l'océan Atlantique

Le comportement de l'océan Atlantique est essentiel pour deux raisons :

- ❶ les TSO et leur variabilité constituent un élément de caractérisation de la petite saison sèche dans le sud du Bénin. ;
- ❷ la description de l'Océan Atlantique dans cette section se justifie par rapport aux futures téléconnexions que nous effectuerons pour quantifier de façon statistique la contribution de l'océan Atlantique dans la variabilité climatique au Bénin.

La proximité de l'océan Atlantique joue un rôle prépondérant dans la climatologie du Bénin, car les températures de surface océanique et la vapeur d'eau sont des éléments qui influencent les régimes pluviométriques du pays. La position géographique du Bénin fait de lui un espace ouvert aux influences atlantiques qui sont responsables de la forte tension de vapeur et du fort taux d'humidité relative de 90 à 95% selon les années (Cadet et Houston, 1984, Cadet et Nnoli, 1987). Au Bénin, le transfert de ce potentiel pluviogénique atlantique s'effectue dans les basses couches de l'atmosphère ; il est assuré par la branche inférieure de la cellule de Hadley sud (Nicholson, 1981).

La circulation océanique autour de l'Afrique de l'ouest en général et dans le golfe du Bénin en particulier, est associée d'une part à la dynamique des cellules des anticyclones des Açores et de Sainte Hélène, et à la circulation thermohaline d'autre part (Dhonneur, 1980). Les différentes intensités rotationnelles et la tension de

surface selon les mois et l'ampleur de la circulation thermohaline engendrent des courants marins de surface qui modifient la pluviométrie saisonnière du Bénin. Il s'agit essentiellement du contre-courant de Guinée qui est un dérivé par friction du courant nord-équatorial atlantique, et de l'alternance des piling-ups et upwellings (Quilfen, 1987).

De tous les courants océaniques, seul le contre-courant de Guinée véhicule sur les côtes du Bénin des eaux chaudes dont les températures varient entre 25 et 28° C selon les saisons (Figure 14).

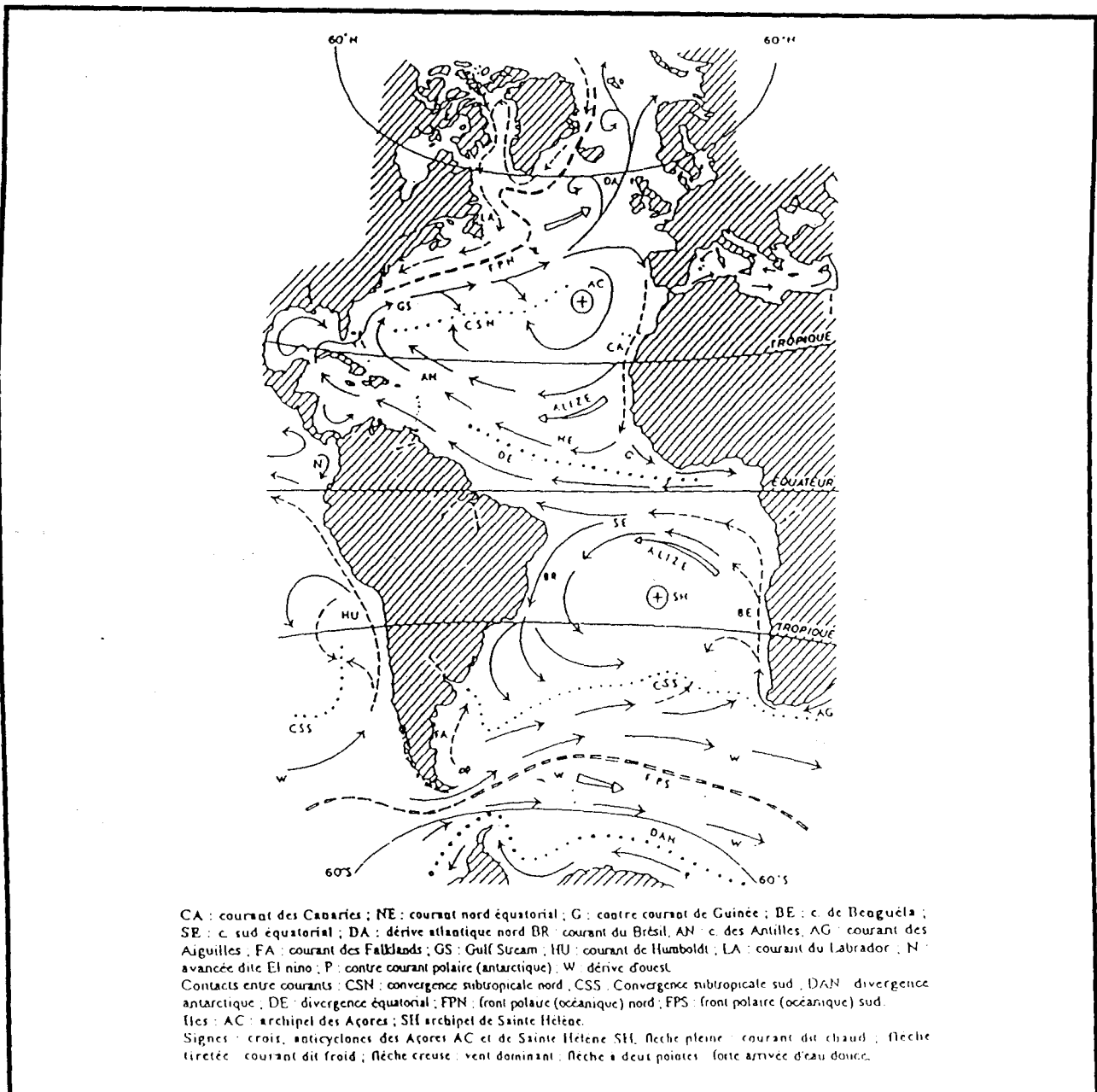


Figure 14 : Configuration de la circulation océanique atlantique (d'après Demangeot, 1992).

Le phénomène de piling-up sur le littoral du Bénin se produit quand le vent souffle parallèlement à la côte en laissant le continent à sa droite avec une accumulation d'eau chaude à sa gauche. Par contre, les upwellings se produisent au moment où le vent souffle parallèlement à la côte, mais en laissant à sa gauche le continent. Dans le golfe de Guinée, au cœur de la saison de mousson d'été, le Bénin méridional est sous l'effet des upwellings. Leur apparition et leur intensité conditionnent la gestion du calendrier agricole car leur variabilité et leurs anormales intensités peuvent être parfois dommageables aux récoltes et aux cultures pluviales de la deuxième saison agricole au sud du Bénin.

Les causes du phénomène d'upwelling dans le golfe du Bénin à la fin de la saison d'été de l'hémisphère nord varient selon les auteurs. Les upwellings se produisent dans le golfe du Bénin au moment où on assiste à un renforcement anormal des alizés au large du Brésil (Picaut, 1983). Pour Bokonon-Ganta (1984), ce phénomène d'upwelling observé dans cette partie de l'Afrique occidentale humide et côtière est lié à la topographie des fonds océaniques du Golfe du Bénin. Dans le Golfe du Bénin, le déclenchement de l'upwelling est la conséquence de l'intensification de l'alizé du sud-ouest (Boill *et al.*, 1989). Pour Fontaine (1990), l'upwelling côtier du golfe de Guinée ne s'explique pas directement par la théorie d'Ekman. Son existence dépend surtout de la profondeur de la thermocline, de la remontée du contre-courant équatorial et la saisonnalité du phénomène est surtout liée au déplacement vers l'est des ondes de Kelvin et à la configuration particulière en L renversé du continent africain. Selon Citeau (1992), c'est la propagation de l'onde de Kelvin vers l'est qui crée l'upwelling côtier du golfe du Bénin. Les études menées par Colin (1991), montrent que l'action éloignée du vent est bien couplée au refroidissement des températures de surface de l'océan Atlantique dans le golfe du Bénin avec une forte corrélation ($r = 0.85$). Par ailleurs, la divergence du vent local explique aussi la genèse des upwellings (Philander et Pacanowski, 1981). Ces auteurs ont montré que le vent local est fortement associé au refroidissement des températures de surface océanique atlantique avec une corrélation égale à 0.82, avec un décalage de 2 mois. La diffusion océanique turbulente contribue pour 45% au refroidissement total des eaux du golfe de Guinée (Citeau, 1992).

En somme, l'upwelling côtier du golfe de Guinée résulte de la combinaison de plusieurs facteurs, dont la forte remontée de la bande de fréquence maximale de convection, l'augmentation du géopotential (Dhonneur, 1983), le renforcement et la migration de l'anticyclone de Sainte-Hélène (Citeau, 1992), et la géométrie de la côte ouest africaine (Fontaine, 1990).

Sur les côtes béninoises, le rythme thermique marin caractérisé par le phénomène d'upwelling est bimodal. Le premier maximum a lieu en février-avril et le deuxième se produit en octobre-décembre (Figure 15). Le minimum a lieu en août. Toutes les stations météorologiques du Bénin, jusqu'à 7°N, ont leur rythme pluviométrique calqué sur ce régime thermique.

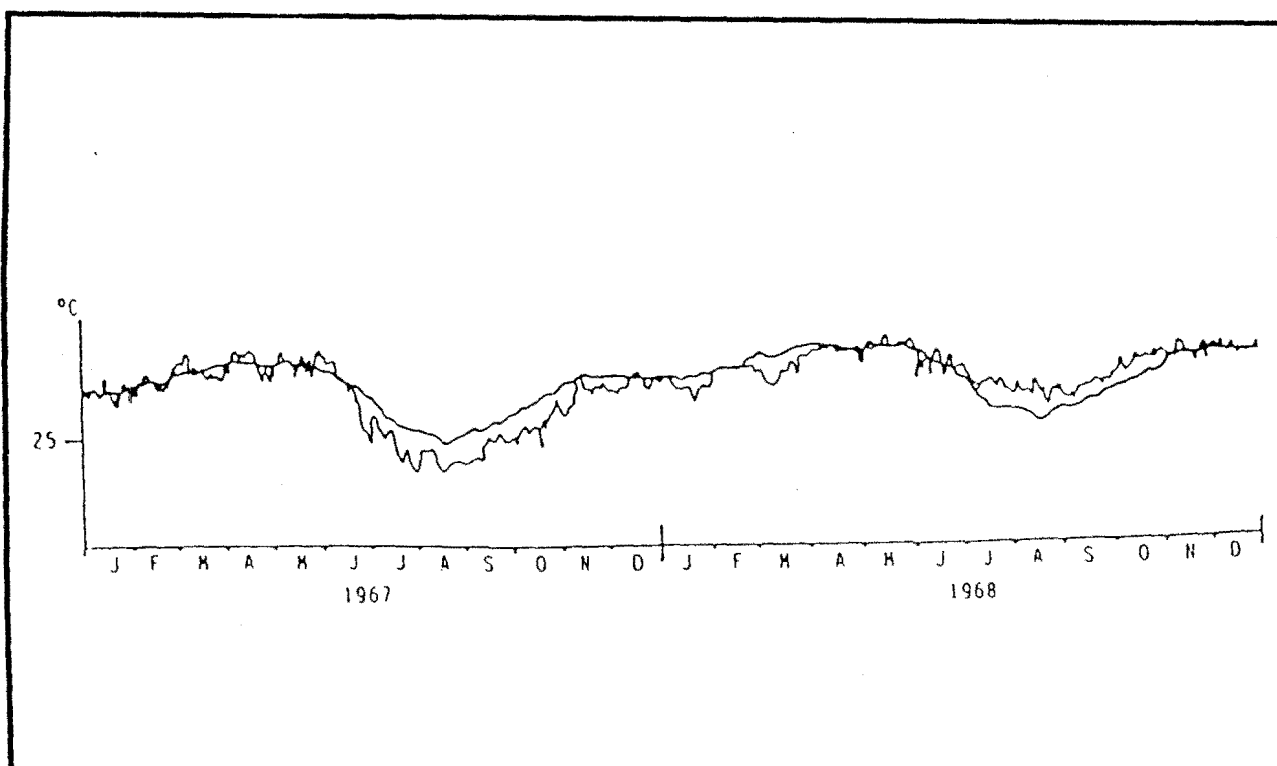


Figure 15 : Régime thermique marin de l'océan atlantique à proximité de Cotonou (d'après Deneau, 1956).

1.3. Les mécanismes de la pluviogenèse et les perturbations atmosphériques au Bénin

Les mécanismes de la pluviogenèse en Afrique occidentale ont déjà été étudiés par plusieurs chercheurs, dont Leroux (1970, 1983, 1988), Dhonneur (1978), Fontaine (1985) etc. Les conditions structurelles (nature et stratification de la masse d'air pluviogène,

épaisseur suffisante de la couche d'air humide, tension de vapeur) ajoutées aux conditions efficaces qui déclenchent et entretiennent les phénomènes de condensation, d'ascendance et de refroidissement sont, selon Suchel (1988), les paramètres nécessaires de la pluviogenèse.

En effet, au Bénin, le potentiel précipitable disponible dépend en grande partie de l'apport hydrique de la mousson atlantique. La contribution du potentiel de l'océan Indien dans les couches moyennes en mai-juin et octobre est moins importante que celle de l'océan Atlantique en raison de l'appauvrissement du flux en vapeur d'eau lors de la traversée de l'Afrique de l'est (Cadet *et al.*, 1987). Le déplacement du Front Intertropical (FIT) conditionne l'occurrence des précipitations au Bénin. Les pluies de certaines périodes de l'année sont liées à la convergence des flux humides de la mousson. Elles se déversent au sud de la trace du FIT qui n'a pas d'activité frontale (Bokonon-Ganta, 1987). Ainsi, la convergence au sud de la trace au sol du FIT et la présence de l'air chaud et humide venu du SW sont les facteurs essentiels de la convection. Celle-ci dépend de la vitesse avec laquelle s'effectue la migration du FIT, les processus convectifs majeurs se produisant dans des secteurs privilégiés de la ZCIT (Fontaine, 1990). Cette convection génère des nuages à fort développement vertical (cumulonimbus) qui sont responsables des précipitations saisonnières au Bénin dans le golfe de Guinée.

Les perturbations majeures qui affectent le Bénin sont les pluies de mousson, les lignes de grain, les ondes d'est, les perturbations zonales et les cellules thermoconvectives locales.

Les pluies de mousson constituent la plus importante forme de perturbations qui gouverne les saisons agricoles du pays. Elles interviennent au Bénin au moment où l'anticyclone de Sainte-Hélène se renforce et lorsque le flux de mousson s'épaissit vers 6° et 8°Nord. La ZCIT, avec ses nuages pluviogènes à fort développement vertical entame alors sa migration sur le continent. Elle déverse des pluies abondantes et continues de mai à juillet sur le Bénin. Les pluies de mousson s'individualisent par leur occurrence plus élevée la nuit et le matin, lorsque le fléchissement thermique entraîne une augmentation de la condensation (Moron, 1994).

Les lignes de grain ne concernent le Bénin qu'à partir de 10 à 12° de latitude nord. Elles sont responsables des averses orageuses de mai, juin, juillet et septembre et constituent plus de 70% des précipitations.

Les ondes d'est sont différentes des lignes de grain par leurs manifestations à l'échelle temporelle et spatiale. Elles servent souvent à renforcer la convection et à destabiliser l'atmosphère. Elles se manifestent au Bénin par des précipitations qui sont soit importantes soit quasi absentes. Parfois, elles sont remplacées par des tornades sèches et interviennent au nord du Bénin en fin d'hiver boréal et en été de l'hémisphère nord.

Les perturbations zonales correspondent aux lignes de pulsations repérées sur le bas-Bénin (Leroux, 1980). Ces « surges » qui naissent au cœur de la mousson en juin sont, semble-t-il, à l'origine des précipitations diurnes lorsque l'échauffement crée des conditions propices à l'instabilité, ou lorsqu'il n'existe pas, par ailleurs, de facteurs inhibiteurs comme un substratum froid ou refroidi (Boko, 1988).

Les cellules thermoconvectives locales affectent le Bénin pendant la grande saison sèche. Leur naissance dépend de l'effet du bilan d'énergie différentiel, car durant la saison d'hiver de l'hémisphère nord (ou grande saison sèche), la capacité de stockage du sol en énergie est faible à cause des charges solides de l'alizé continental du nord-est. En fin de saison sèche, le pouvoir calorifique du sol est très élevé. C'est cette différence d'énergie qui explique le processus de développement des cellules thermoconvectives au Bénin au cours de la saison d'harmattan. Toutefois, ces cellules ne sont pas tout le temps génératrices de pluie à cause de la faible épaisseur de la mousson et de son niveau d'inversion très bas.

Section 2.: Les composantes du climat du Bénin: champs pluviométriques moyens annuels et rythmes saisonniers

Les champs pluviométriques moyens du Bénin ont été déjà étudiés par plusieurs chercheurs et sur des séries différentes. Parfois, ces séries ne sont pas des normales recommandées par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM).

De ce point de vue, une analyse des précipitations annuelles moyennes sans une norme internationale ne permet pas une comparaison de la pluviométrie du Bénin avec celle d'autres pays du continent, surtout que depuis quelques décennies l'Afrique traverse une période de sécheresse et des politiques communes d'Etats sont en cours d'élaboration pour pallier la crise climatique. La plupart des travaux relatifs aux totaux annuels moyens sont très descriptifs et ne présentent pas un caractère analytique. Ces études réalisées à l'échelle stationnelle donnent toutefois une idée générale de la distribution des totaux pluviométriques annuels et mensuels au Bénin. Ce fut le cas des publications coloniales de Chevalier (1911) et néo-coloniales de Cornevin (1962), et de l'étude de Hounkannounon (1979) qui présente une monographie des précipitations du Bénin sur la période 1961-1970. Bokonon Ganta (1987), dans son étude sur les climats de la région du golfe de Guinée, a mis en exergue la différenciation des totaux annuels moyens selon un gradient est-ouest sur la côte atlantique, entre Accra et Lagos. Cependant, Boko (1988), à partir de 25 stations réparties sur tout le territoire et sur la période 1951-1990 a montré que la pluviométrie diminuait du sud au nord. Afouda (1990) a identifié la particularité des précipitations du nord-ouest du Bénin à partir de 10 stations du Bénin septentrional et central, sans quantifier la part de variance expliquée par l'altitude dans la pluviosité de la région. Aïfan (1993), en étudiant les risques et contraintes climatiques dans le Bénin central de 1950 à 1989 a décrit les totaux pluviométriques, mais sans montrer leur contribution respective dans la variabilité d'échelle régionale. Agli (1994), dans son étude du bassin du Niger au Bénin a présenté le schéma descriptif des totaux soudaniens en rapport avec l'évolution actuel du climat.

Dans ces différents travaux, le rôle du relief a été évoqué en partie pour expliquer la répartition des totaux annuels. Cependant, ils ne quantifient pas les effets de l'altitude et de la latitude dans la distribution spatiale des précipitations au Bénin. C'est ce vide que veut combler la sous-section suivante.

2.1. Les champs pluviométriques moyens annuels du Bénin et l'ordonnement des coordonnées géographiques

Au Bénin les précipitations moyennes annuelles varient selon la position géographique, l'exposition par rapport aux flux pluviogènes et la trajectoire des perturbations atmosphériques.

Le Bénin méridional s'individualise dans la sous-région ouest-africaine car il subit les influences de la **diagonale sèche**. En effet, les totaux pluviométriques moyens annuels sont modestes et sont caractérisés par une diminution de la pluviométrie de l'est vers l'ouest, plus sensible sur la plaine côtière. Pour la période 1931-1990, les totaux moyens oscillent entre 900 et 1 400 mm. Grand-Popo, dans le sud-ouest, enregistre 920 mm alors que Porto-Novo bénéficie de 1 871 mm de pluie. Cette diagonale sèche qui caractérise l'extrême sud-ouest du Bénin méridional a déjà fait l'objet de plusieurs recherches et les hypothèses varient selon les auteurs et les écoles. Plusieurs vocables sont utilisés pour caractériser l'anomalie climatique de cette région du golfe du Bénin. Pour Cornevin (1962), c'est le climat **togo-dahoméen**. Péliissier (1963) le désigne sous le nom de **climat équatorial tempéré**. Boko (1975) le dénomma **climat équatorial béninien**. Pour Addra (1978), c'est le **quadrilatère de sécheresse** qui jouit d'un climat tropical sec. Donou (1978), le qualifia de **couloir de sécheresse**. Domingo (1979), en s'intéressant au cadre physique du Bénin méridional, constata aussi l'existence d'une anomalie climatique, qu'il désigna sous le nom de **climat subéquatorial dégradé de transition entre les 7° et 7°50' latitude nord**. Bien que Bokonon-Ganta (1984) inclût les plateaux d'Allada et de Sakété dans la diagonale de déficit pluviométrique, comme d'autres auteurs, cette diminution de la pluviométrie très remarquable sur la région littorale n'affecte pas avec grande acuité la région des plateaux du Bas-Bénin (Houndénou, 1992).

Sur les plateaux du sud du pays, la pluviométrie oscille entre 1 000 et 1 400 mm. L'altitude intervient peu dans la répartition des précipitations dans ce milieu, car Sakété (1 225 mm) situé à 69 mètres enregistre le maximum des précipitations sur la période 1961-

1990, alors que Ouidah, localisée au sud, à 10 mètres au-dessus du niveau de la mer, ne reçoit pas plus de précipitations. Quant à Bopa, à 50 mètres d'altitude, elle n'atteint pas 1 000 mm en moyenne.

Sur le littoral, le plus fort total annuel a été enregistré à Sèmè, en 1968 avec 3 344 mm de pluie. Sur les plateaux du sud, à Sakété 1963, le maximum pluviométrique s'évalue à 2 150 mm. Dans la région des plateaux septentrionaux, c'est à Bohicon que le maximum est atteint (1 873 mm en 1963). Au total, cette région présente deux caractéristiques :

- une grande homogénéité car on ne note pas de différenciation majeure dans le champ pluviométrique moyen même par rapport au littoral.
- une absence de relation précipitation/altitude dans la mesure où l'altitude est très modeste et n'exprime que 2% de la variance de la pluviométrie. De même, au sud et au moyen Bénin, la latitude n'intervient pas dans la distribution des totaux annuels moyens.

Au Bénin central, sur la période 1931-1990, on a enregistré en moyenne 1 177 mm de pluie. A partir de 8°N, l'altitude explique près de 40% de la répartition des pluies. En effet, Dassa et Savè ont des orientations différentes par rapport à la direction des flux d'humidité. Ce facteur géographique peut vraisemblablement expliquer les différences des apports pluviométriques. Dassa est ceinturé par une série de collines, mais exposé aux flux du nord-est sur sa façade nord. Par contre, Savè se trouve en position d'abri et est orienté de façon parallèle aux flux dominants de direction NE-SW.

Dans le nord-est et dans le bassin du Niger au Bénin, les précipitations sont plus modestes. En situation moyenne, les pluies n'excèdent nulle part 1 200 mm par an et on note un gradient latitudinal des précipitations. Au nord de la ligne de partage des eaux à Bembéréké, les hauteurs pluviométriques se situent entre 700 et 950 mm pour la période 1931-1990. C'est le cas de Banikoara (943 mm) et Malanville (787 mm). Cette situation s'explique par l'absence de relief majeur et la latitude.

Au sud de la ligne de partage des eaux, la partie méridionale du bassin du Niger au Bénin est plus humide. Les pluies sont comprises entre 1 000 et 1 160 mm (Parakou : 1 158 mm par an) ; (Bembéréké, 1 001 mm par an). Les forts totaux

pluviométriques enregistrés par rapport à ceux des stations situées dans le lit mineur du fleuve Niger au Bénin s'expliquent par l'orographie. Le sud du bassin du Niger au Bénin est un milieu de reliefs résiduels dont l'altitude moyenne est de 500 mètres environ. Ces crêtes augmentent le réchauffement diurne, perturbent les flux, favorisent la turbulence, l'ascendance des masses d'air et la convection. Dans le Borgou et dans le bassin du Niger au Bénin, les précipitations sont caractérisées par un gradient méridien. Par rapport au sud du pays, l'altitude explique 69% de la variance des totaux pluviométriques annuels (Figure 17). La latitude intervient pour 55% dans la distribution de pluies au nord du Bénin. La décroissance du total pluviométrique du sud vers le nord s'explique par la diminution de l'épaisseur du flux de mousson et le raccourcissement de l'hivernage.

Au nord-ouest du Bénin, le schéma pluviométrique des totaux annuels est nettement différent de celui des autres régions du pays. Les champs pluviométriques moyens annuels sont caractérisés par des totaux compris entre 800 et 1 300 mm. Natitingou reçoit 1 283 mm de pluie en moyenne durant la période 1931-1990. Bien que située à une latitude supérieure à celle de certaines stations de l'Afrique de l'ouest comme Siguiri en Guinée, Dimbokro et Korogho en Côte d'Ivoire, Kété-Krachi au Ghana, Atakpamé au Togo, la région de l'Atakora au Bénin enregistre les mêmes hauteurs pluviométriques moyens, soit 1 300 mm/an. Ainsi, la région de l'Atakora appartient aux aires arrosées de l'Afrique de l'Ouest soudanienne qui enregistrent plus de 1 000 mm de pluie par an (Leroux, 1988). En effet, la région de l'Atakora bénéficie d'une bonne exposition et reçoit un fort rayonnement solaire par unité de surface. Cet apport radiatif favorise la convection qui est un facteur pluviogénique. L'orientation NNE-SSW de la chaîne de l'Atakora et sa perpendicularité par rapport aux flux d'est et au flux de mousson favorisent les fortes précipitations et perturbent le schéma zonal classique des précipitations.

La relation entre la position géographique (pluie/altitude et pluie/latitude) et la distribution de la pluviométrie montre que le schéma pluviométrique est caractérisé par deux gradients : un gradient méridien et un gradient vertical. Les précipitations du nord-Bénin sont significativement corrélées avec l'altitude et la latitude qui expliquent respectivement à elles seules 69 et 55% de variance (Figure 16). Par

contre, les stations du Bénin méridional sont complètement décorréées de ces facteurs géographiques (Figure 17).

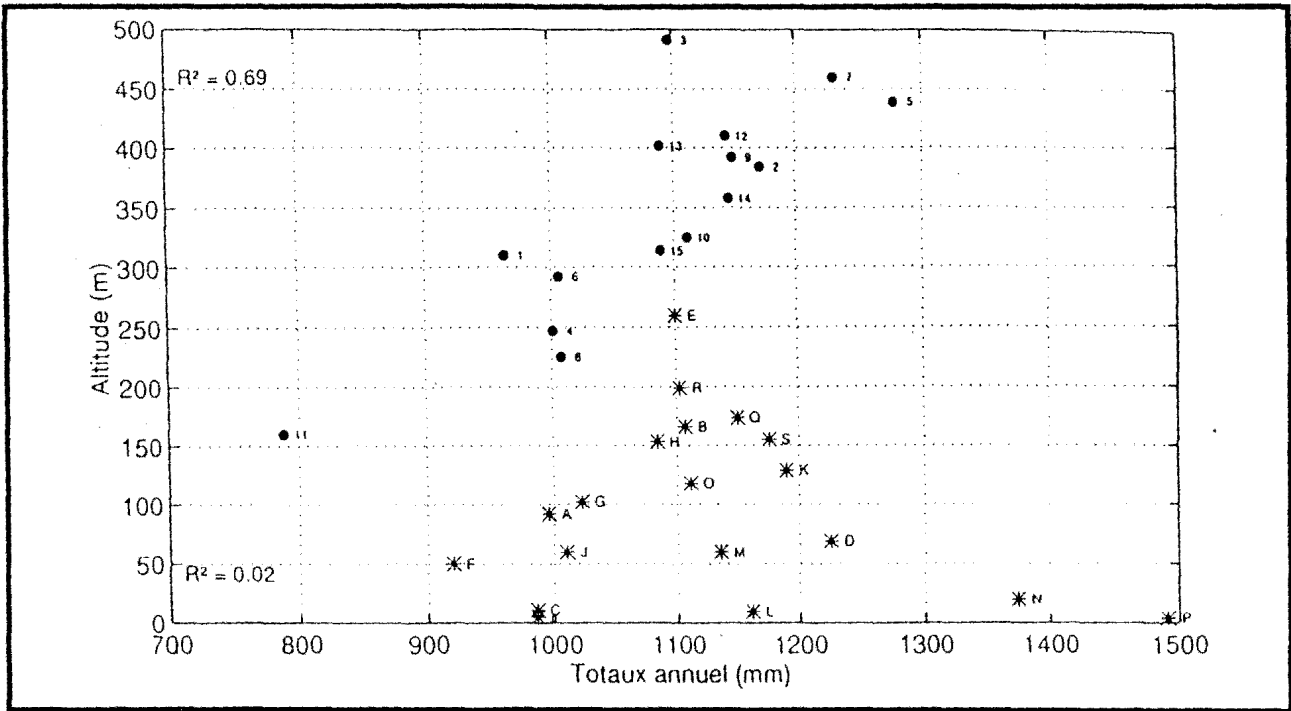


Figure 16 : Relation totaux pluviométriques annuels et altitude au Bénin. (Les stations du nord sont représentées par des points et celles du sud sont matérialisées par des croix).

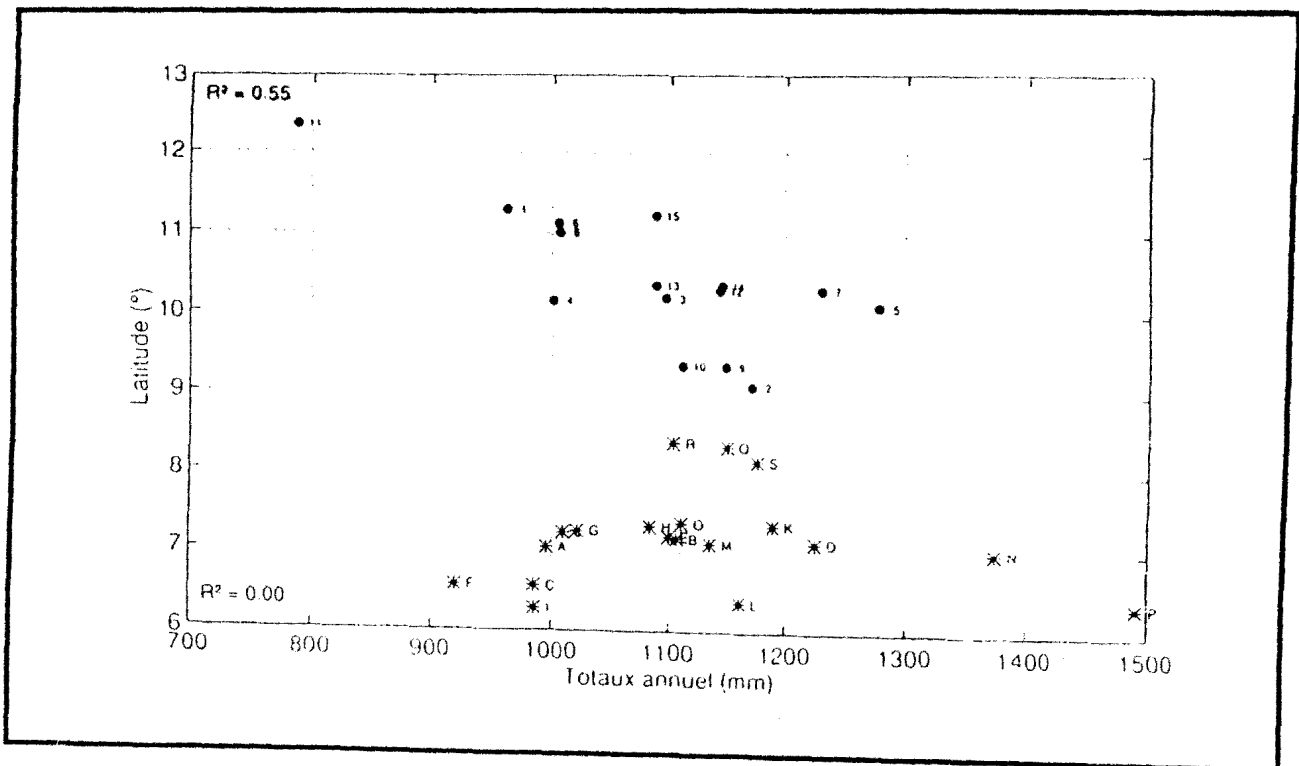


Figure 17: Relation totaux pluviométriques annuels et latitude au Bénin. (Les stations du nord sont représentées par des points et celles du sud sont matérialisées par des croix).

La situation latitudinale du pays par rapport aux différents flux atmosphériques, la circulation océanique atlantique font que le Bénin présente des régimes pluviométriques variés et des totaux moyens saisonniers différents.

2.2. Les champs moyens saisonniers du Bénin (1931-1990)

Les champs pluviométriques moyens saisonniers du Bénin seront présentés de façon temporelle dans une perspective agroclimatique. Nous caractériserons les apports pluviométriques moyens saisonniers qui favoriseraient ou gêneraient la croissance et le développement de la culture du maïs durant tout son cycle végétatif et dans les proportions fréquentielles de 5 et 8 années sur 10. L'articulation de la pluviométrie favorise deux saisons de culture de durées différentes dans le sud et une unique saison agricole dans le nord du pays.

2.2.1. Les champs pluviométriques moyens saisonniers du sud-Bénin

Les migrations du Front Intertropical (FIT) et les conditions océaniques du mois d'août ont pour conséquence dans le sud Bénin l'établissement de deux saisons des pluies bien distinctes et de deux saisons sèches de durées inégales.

La grande saison des pluies englobe les mois d'avril, mai, juin, juillet et représente à elle seule 55% des totaux annuels. L'indice saisonnier calculé montre que le volume moyen d'eau précipitée est de 616 mm en moyenne. Huit années sur dix le total pluviométrique enregistré dépasse 750 mm. La faiblesse de l'apport pluviométrique saisonnier à l'échelle de cet espace peut constituer un handicap majeur pour une variété de maïs de 120 jours car les variétés tardives exigent au moins 900 mm d'eau bien répartie pour une bonne croissance et un développement optimal de la culture. D'une station à une autre, dans le sud du Bénin, la pluviométrie moyenne saisonnière oscille entre 400 et 900 mm sur le littoral, mais sur du matériel sableux dont la composition et les propriétés chimico-organiques ne sont pas favorables au développement de la culture du maïs.

Les valeurs saisonnières stationnelles sont très variables et sont fonction des sites et des situations. Ainsi, Adjohoun, dans la vallée de l'Ouémé, enregistre 800

mm durant la grande saison des pluies, alors que Bopa ne bénéficie que de 494 mm d'eau d'avril à juin, durant la période 1931-1990. A partir de la deuxième décennie du mois de juillet, le volume de pluies saisonnières diminue et on note une accalmie des abats pluviométriques quotidiens. C'est le début de la petite saison sèche.

La petite saison sèche a lieu en août-septembre. Elle représente 18% des totaux annuels avec 210 mm de pluies en moyenne ; Huit années sur dix au cours de cette saison, le Bas-Bénin enregistre 240 mm de pluie.

La petite saison pluvieuse dure d'octobre à novembre et enregistre en moyenne 169 mm de précipitation (soit 15% des totaux pluviométriques annuels). Les plus faibles valeurs saisonnières sont surtout enregistrées à l'ouest du bas-Bénin, à Grand-Popo (83 mm), tandis que les plus fortes valeurs s'observent de façon générale à l'est, sur le plateau de Porto-Novo (215 mm) ; Huit années sur dix, le paysan peut s'attendre à au moins 150 mm de pluie pour les cultures de deuxième saison.

La grande saison sèche, de décembre à février, représente 12% des totaux annuels moyens avec une valeur indiciaire de 130 mm de pluie en situation moyenne sur la période 1931-1990. L'examen temporel des champs pluviométriques saisonniers moyens montre qu'il pleut presque toute l'année, même durant la grande saison sèche. Au total, en milieu margino-littoral au Bénin, l'articulation pluviométrique saisonnière est caractérisée par un gradient pluviométrique est-ouest et une absence de sécheresse absolue.

2.2.2. Les champs pluviométriques moyens saisonniers du nord-Bénin

Au-delà de 7° de latitude nord au Bénin, l'espace géographique est caractérisé par une concentration des pluies (96% des totaux annuels moyens) sur 6 mois (mai-octobre), à l'image de la structure pluviométrique saisonnière des pays soudano-sahéliens. L'ensemble du nord-Bénin enregistre en moyenne 1 100 mm de pluie et les apports saisonniers sont caractérisés par un gradient latitudinal, tant dans

l'Atakora que dans le Borgou ; huit années sur dix, les apports pluviométriques atteignent 1 000 mm.

Dans le nord-Bénin, d'une station à une autre, les précipitations varient entre 973 et 1 244 mm et huit années sur dix, cette le Bénin septentrional enregistre 975 mm de pluie. Dans la région de l'Atakora, au nord-ouest, Boukoumbé et son arrière-pays enregistrent le plus faible volume de précipitations moyennes saisonnières (973 mm).

2.3. Les rythmes moyens des autres paramètres climatiques du Bénin

La présentation des champs moyens des autres paramètres climatiques du Bénin est importante car ils permettent :

- d'évaluer l'évapotranspiration potentielle (ETP);
- de mieux quantifier la variabilité climatique pour identifier d'éventuels changements climatiques préjudiciables à la culture du maïs.

2.3.1. Le rythme saisonnier moyen des températures minimales au Bénin

Le rythme moyen des températures minimales est commun à toutes les régions géographiques du pays. Le maximum se produit en avril et le minimum a lieu en décembre ou janvier, au moment où l'alizé du nord-est souffle sur le pays (Figure 18).

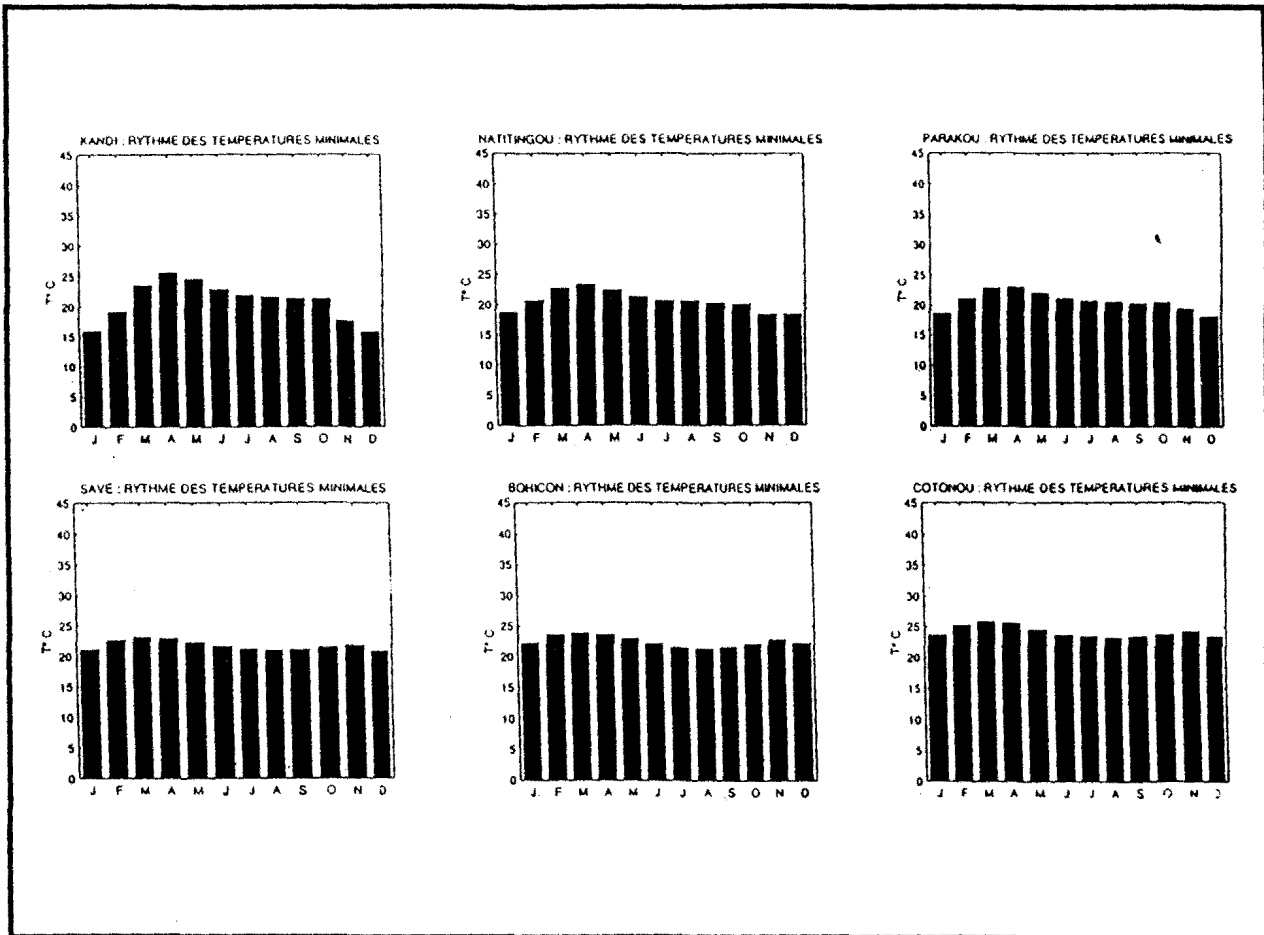


Figure 18 : Rythme des températures minimales des six stations synoptiques du Bénin (1971-1990). (Kandi représente la station du climat soudanien dans le Haut Borgou ; Parakou représente le sud du Borgou ; Natitingou représente le climat soudanien du nord-ouest ; Savè représente le climat de transition ; Bohicon représente le climat béninien sur les plateaux de terre de barre Cotonou représente le climat béninien sur le littoral.)

Les valeurs des températures minimales les plus élevées varient entre 21 et 26°C et les minima oscillent entre 15 et 18°C. Les minima les plus faibles sont enregistrés au delà de 9° de latitude nord. A Natitingou, dans l'Atakora, aucun minimum n'est cependant inférieur à 15°C. De même, à Kandi dans le Borgou, les plus faibles valeurs des températures minimales sont de l'ordre de 15°C. Au Bénin central, sur la pénéplaine cristalline, à Savè et à Bohicon sur le plateau de terre de barre, les minima sont compris entre 20 et 23°C (Figure 18).

2.3.2. Le rythme saisonnier moyen des températures maximales au Bénin

Les températures maximales sont toujours inférieures à 40°C en moyenne sur la période 1971-1990. Au Bénin, le régime thermique des maxima est bimodal, quel que soit le milieu climatique. Les maxima thermiques ont lieu en saison sèche et les minima des températures s'observent en juillet-août (Figure 19).

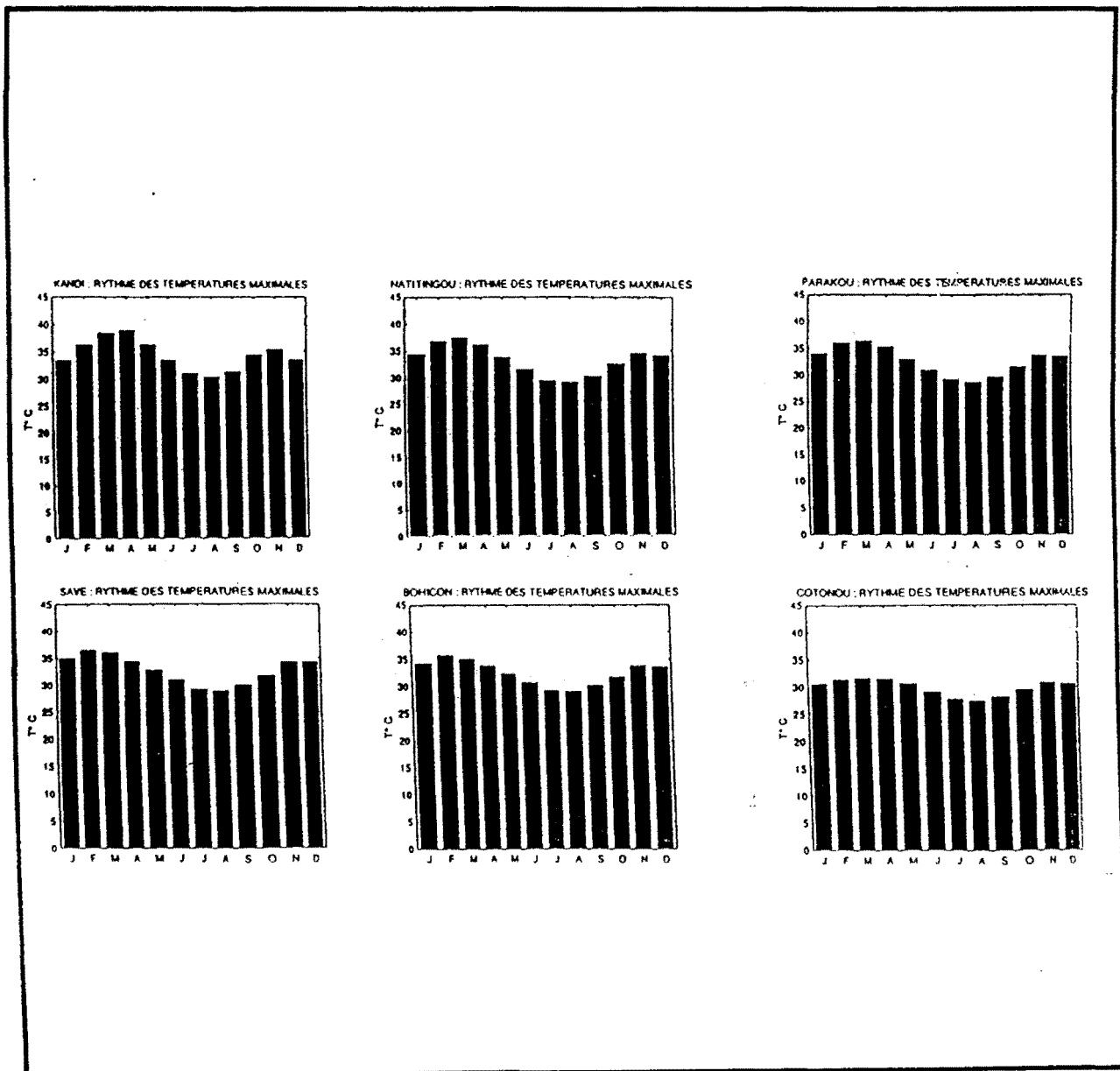


Figure 19 : Rythme des températures maximales des six stations synoptiques du Bénin (1971-1990). Kandi représente la station du climat soudanien dans le Haut Borgou ; Parakou représente le sud du Borgou ; Natitingou représente le climat atakorien ; Savè

représente le climat de transition ; Bohicon représente les climat béninien sur les plateaux de terre de barre ; Cotonou représente le climat côtier en milieu

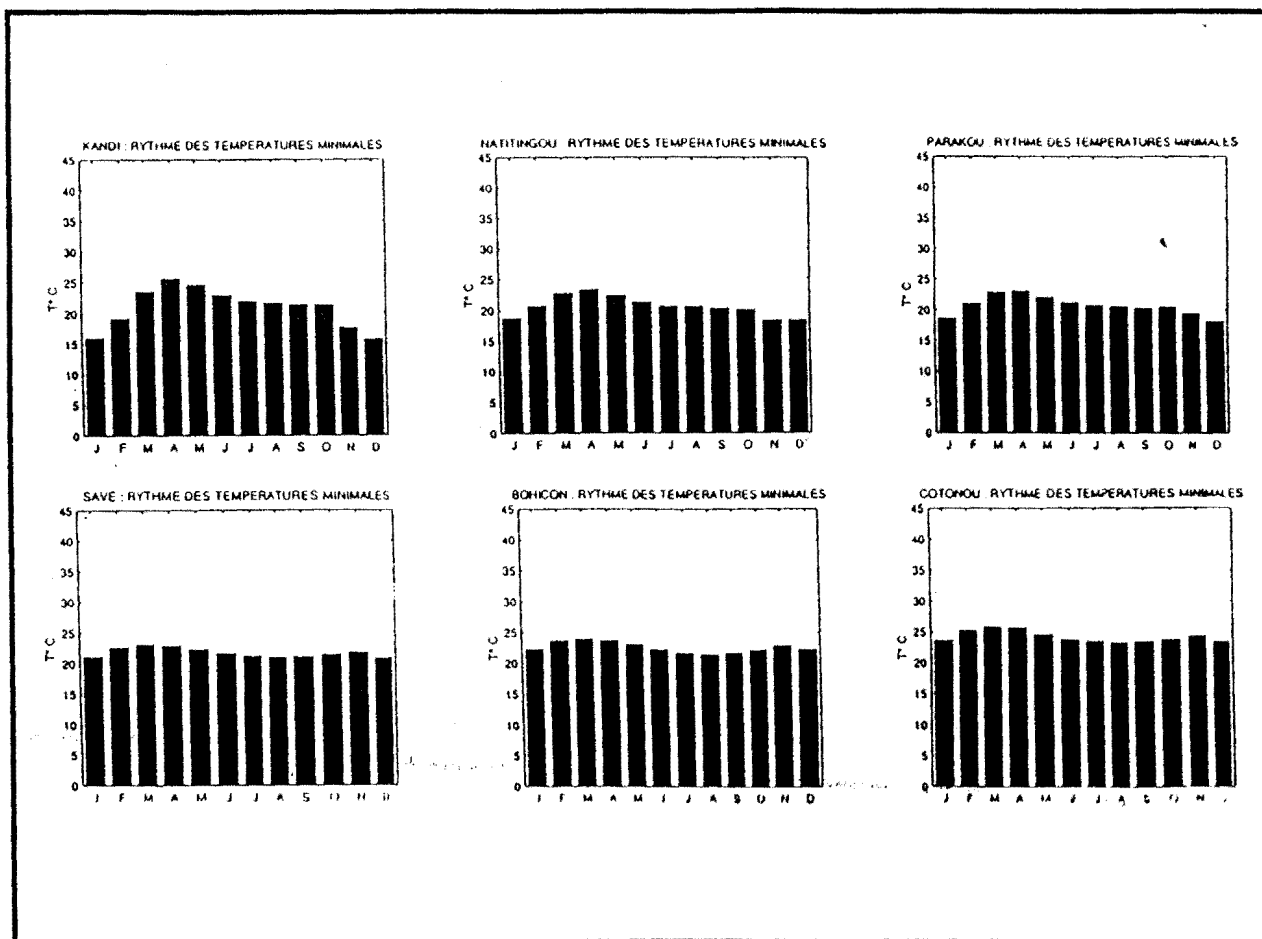


Figure 18 : Rythme des températures minimales des six stations synoptiques du Bénin (1971-1990). (Kandi représente la station du climat soudanien dans le Haut Borgou, Parakou représente le sud du Borgou, Natitingou représente le climat soudanien du nord-ouest, Savè représente le climat de transition, Bobiçon représente le climat béninois sur les plateaux de terre de barre Cotonou représente le climat béninois sur le littoral.)

Les valeurs des températures minimales les plus élevées varient entre 24 et 26°C et les minima oscillent entre 15 et 18°C. Les minima les plus faibles sont enregistrés au-delà de 9° de latitude nord. A Natitingou, dans l'Atakora, aucun minimum n'est cependant inférieur à 15°C. De même, à Kandi dans le Borgou, les plus faibles valeurs des températures minimales sont de l'ordre de 15°C. Au Bénin central, sur la péninsule cristalline, à Savè et à Bobiçon sur le plateau de terre de barre, les minima sont compris entre 20 et 23°C (Figure 18).

2.3.2. Le rythme saisonnier moyen des températures maximales au Bénin

Les températures maximales sont toujours inférieures à 40°C en moyenne sur la période 1971-1990. Au Bénin, le régime thermique des maxima est bimodal, quel que soit le milieu climatique. Les maxima thermiques ont lieu en saison sèche et les minima des températures s'observent en juillet-août (Figure 19).

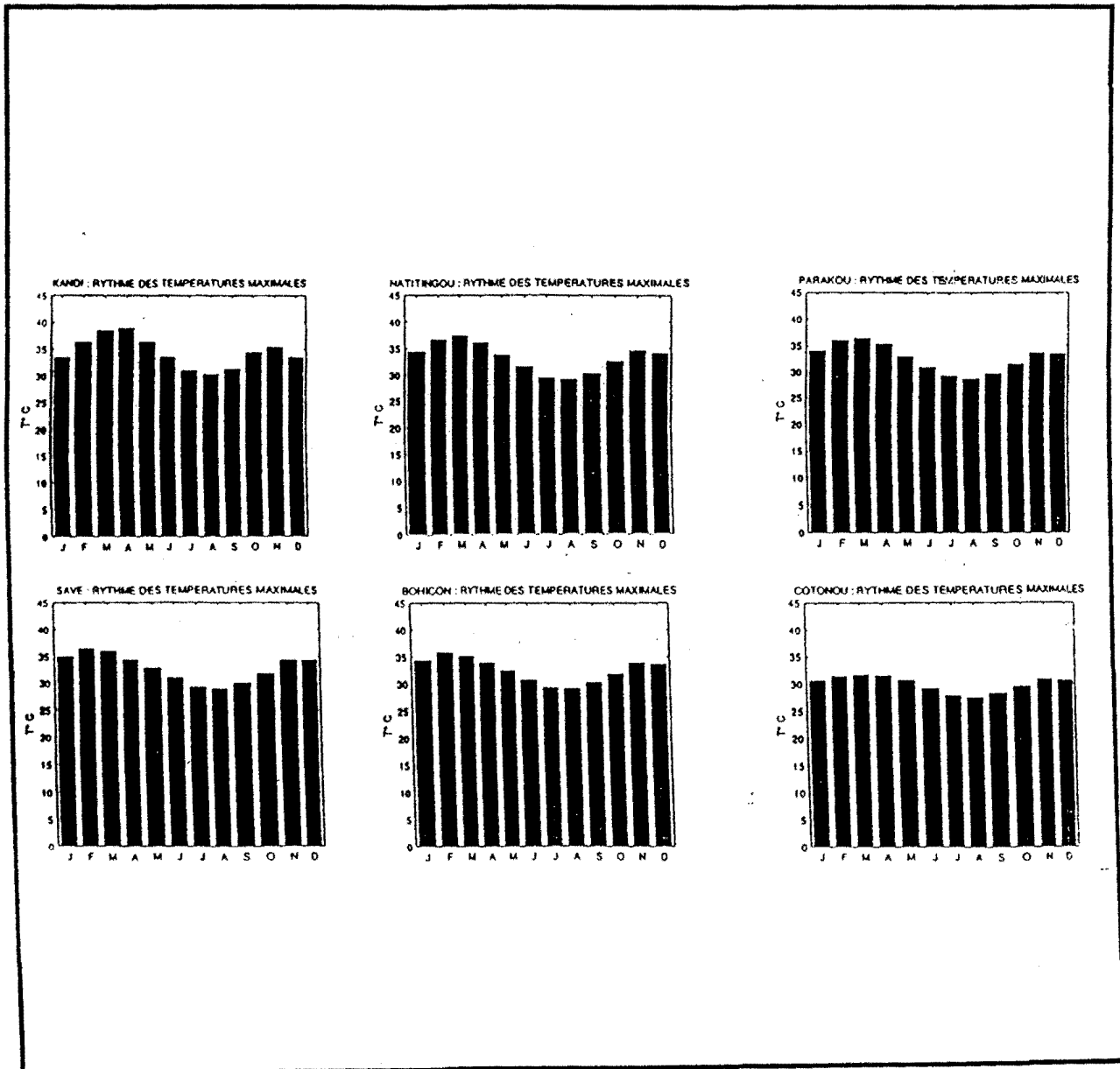


Figure 19 : Rythme des températures maximales des six stations synoptiques du Bénin (1971-1990). Kandi représente la station du climat soudanien dans le Haut Borgou ; Parakou représente le sud du Borgou ; Natitingou représente le climat atakorien ; Savè

représente le climat de transition ; Bohicon représente les climat béninien sur les plateaux de terre de barre ; Cotonou représente le climat côtier en milieu

Cependant, la position précise dans le temps et dans l'espace des maxima varie d'une station à une autre. En milieu soudanien à Kandi, le maximum a lieu en avril avec 39,6°C, alors qu'à Parakou le maximum est enregistré en mars (36,6° C). Au nord-ouest du Bénin, à Natitingou, mars est le mois le plus chaud avec 37,8°C.

Dans la zone de transition climatique, à Savè, et en milieu béninien, sur le plateau d'Abomey à Bohicon, février est le mois de plus grande chaleur, avec une moyenne de 35,3° C.

Sur le littoral, à Cotonou, la température moyenne maximale est toujours inférieure à 35°C sur la période 1971-1990, et le maximum a lieu en mars.

L'étude du rythme thermique des maxima montre que, dans le nord du Bénin, le régime thermique est différent du régime pluviométrique, alors qu'en milieu béninien le régime pluviométrique a un profil voisin de celui des températures.

2.3.3. Le rythme saisonnier moyen de l'insolation au Bénin

L'insolation est fonction de la durée du jour et de la nébulosité au-dessus d'un lieu. Au Bénin, le régime d'insolation est bimodal, quelle que soit la latitude. Pour l'ensemble du pays, l'insolation moyenne annuelle pour la période 1971-1990 est inférieure à 8 000 heures. Les plus fortes durées d'insolation s'observent à partir de 10°N en milieux soudanien et atakorien (Figure 20).

Au sud le rythme moyen d'insolation suit l'évolution de la pluviométrie en situation moyenne à l'échelle mensuelle. En revanche, dans le nord du pays où le régime pluviométrique est unimodal, le régime d'insolation est bimodal. Le rayonnement solaire au sol est faible pendant la grande saison sèche durant l'harmattan pour les stations situées au-delà de 9° de latitude nord, malgré la siccité de l'alizé continental (Tableau 6). Ceci est dû aux nombreuses particules solides en suspension que transporte l'alizé du nord-est et à la brièveté du jour. En revanche, à la fin de la saison sèche, en mars, le Bénin reçoit de fortes quantités d'énergie.

	J	F	M	A	M	J	Jt.	At.	S	O	N	D	Moy par an	Tot/an
Kandi	4 868	5 587	6 081	5 893	5 470	5 524	5 129	4 701	5 548	5 574	5 295	4 592	5 432	6 5192
Bohicon	3 450	4 076	3 843	4 705	4 373	3 783	3 207	-	-	3 685	3 421	3 399	-	-
Cotonou	4 016	4 814	5 007	5 310	4 630	3 544	4 049	4 351	4 691	5 187	4 901	4 186	4 557	54 686

Tableau 6 : Répartition de l'énergie solaire reçue sur le sol horizontal pour trois stations (D'après Boko, 1988, extrait du projet FICU) ; (moy = moyenne; Tot = total en watts/m²).

Les durées maximales d'insolation correspondent à la saison sèche et les minimales sont atteintes dans le nord en août au cœur de l'hivernage. En revanche, au sud du Bénin, les minima se produisent durant la petite saison sèche (Figure 20). Le minimum observé au cours de juillet, correspond à la forte nébulosité liée à la présence de la position de la ZCIT sur le pays.

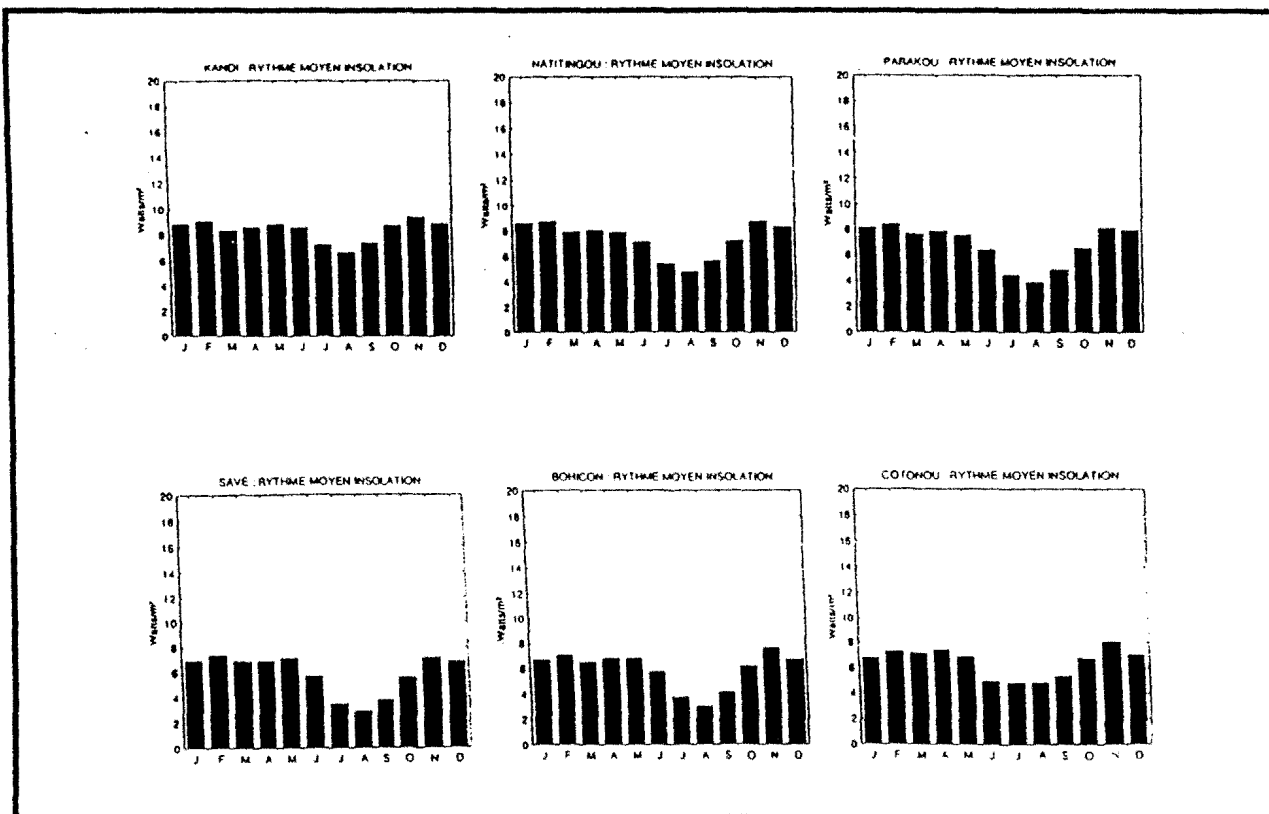


Figure 20 : Rythme moyen de l'insolation au Bénin (1971-1990).

A partir du mois d'octobre, on assiste à une augmentation de la durée de l'insolation. La période novembre-mars correspond en général au maximum de la durée de l'insolation. La hausse de l'insolation durant ces mois généralement secs est liée à l'influence de l'alizé du nord-est en provenance du désert du Sahara.

2.3.5. Le rythme saisonnier de la tension de vapeur au Bénin

Le rythme moyen de tension de vapeur est analogue à celui de la pluviométrie. Il est bimodal dans le sud en milieu béninien, et unimodal dans les régions du Borgou et de l'Atakora (Figure 21).

Dans les stations méridionales comme Cotonou et Bohicon, le maximum a lieu en mars-avril pour la première saison des précipitations alors que le maximum pluviométrique a lieu en juillet. Pour la seconde saison, le maximum de tension de vapeur est enregistré en octobre-novembre. Le minimum a lieu en juillet-août et l'amplitude est faible (Figure 21)

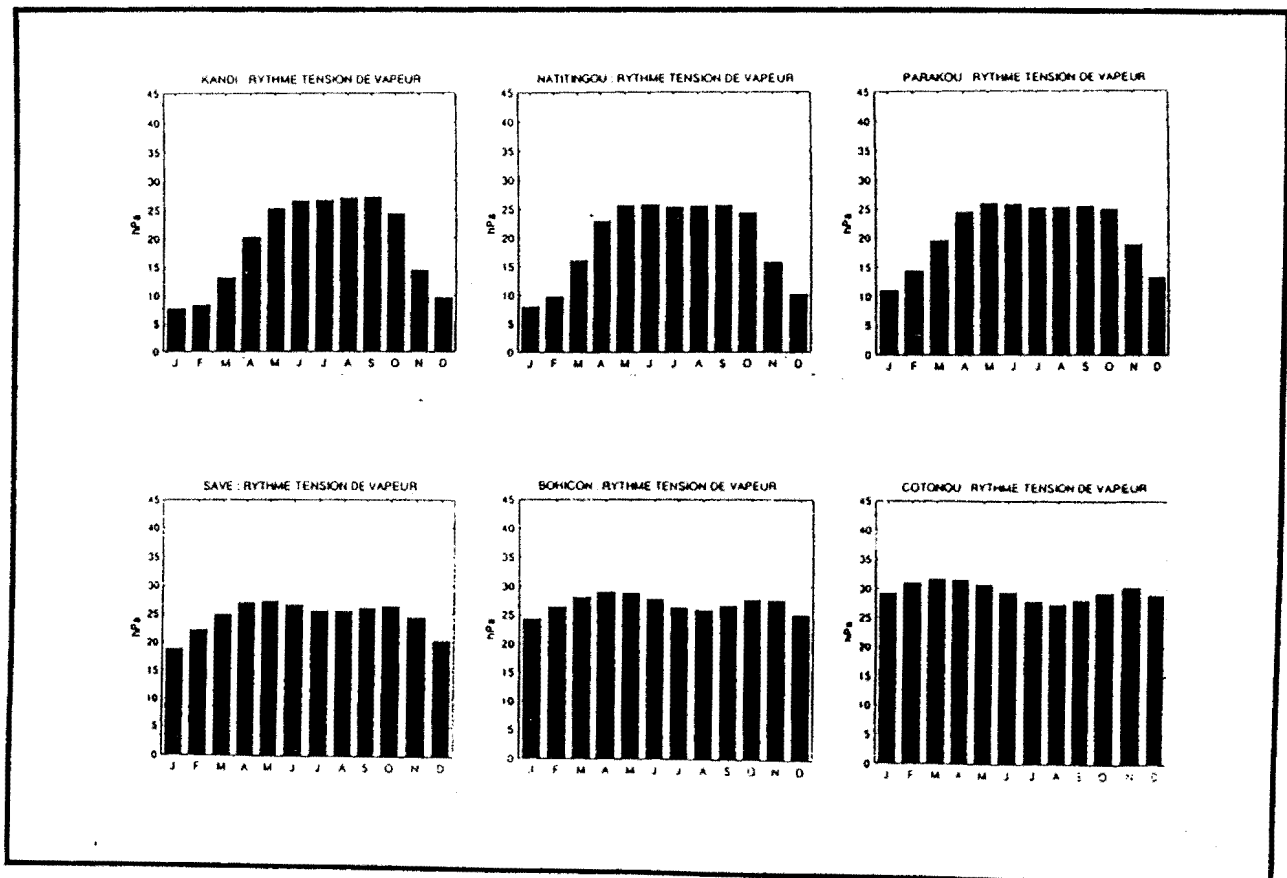


Figure 21 : Rythme annuel moyen de la tension de vapeur au Bénin (1971-1990)

Comparativement à Bohicon, à l'intérieur des terres, la tension de vapeur est plus élevée sur le littoral à Cotonou. Elle est toujours supérieure à 25 hPa et inférieure à 35 hPa. Dans la zone de transition climatique, à Savè, le rythme bimodal s'atténue et il est quasi unimodal avec un minimum de 18 hPa en décembre ou janvier selon les années. Au nord, le minimum de tension de vapeur a lieu en janvier. A Kandi, sur la période 1971-1990, le maximum de tension de vapeur a lieu en septembre comme à Natitingou ; il est atteint en juillet-septembre à Parakou.

Section 3. : Les types climatiques et les saisons agri-pluviométriques

L'extension latitudinale du pays et la diversité des régimes pluviométriques confère au pays deux grands types de climats : le climat béninien et le climat soudanien.

3.1. Le climat béninien : caractérisation et originalité

Le climat béninien concerne tout le sud du Bénin jusqu'à Savè, vers 8° de latitude nord. Cette région appartient au domaine affecté par la mousson atlantique et ne connaît véritablement pas de saison vraiment dépourvue de précipitations. Cette situation climatologique est liée aux deux passages du FIT, en mai-juin et en octobre-novembre. **C'est ce balancement du FIT associé à la remontée de la thermocline qui créent, d'une part une réduction du volume des pluies de mousson en août, et d'autre part déterminent le régime bimodal et les quatre saisons pluviométriques.** Ce phénomène atmosphérique couplé au phénomène océanique atlantique constituent le fait climatique majeur qui donne une originalité et une particularité géographique à cette partie du Bénin.

Le régime pluviométrique étant un élément essentiel de caractérisation des climats tropicaux, nous le présenterons afin de faire ressortir l'articulation des pluies mensuelles et le déroulement de la saison agricole.

Le climat béninien est caractérisé par quatre saisons dont deux agri-pluviométriques. Il pleut presque toute l'année sur la plupart des stations. Le premier maximum a lieu au mois de juin et correspond au cœur de la saison de mousson

d'été boréal. Le second maximum se produit en septembre ou en octobre selon les postes pluviométriques (Figure 22).

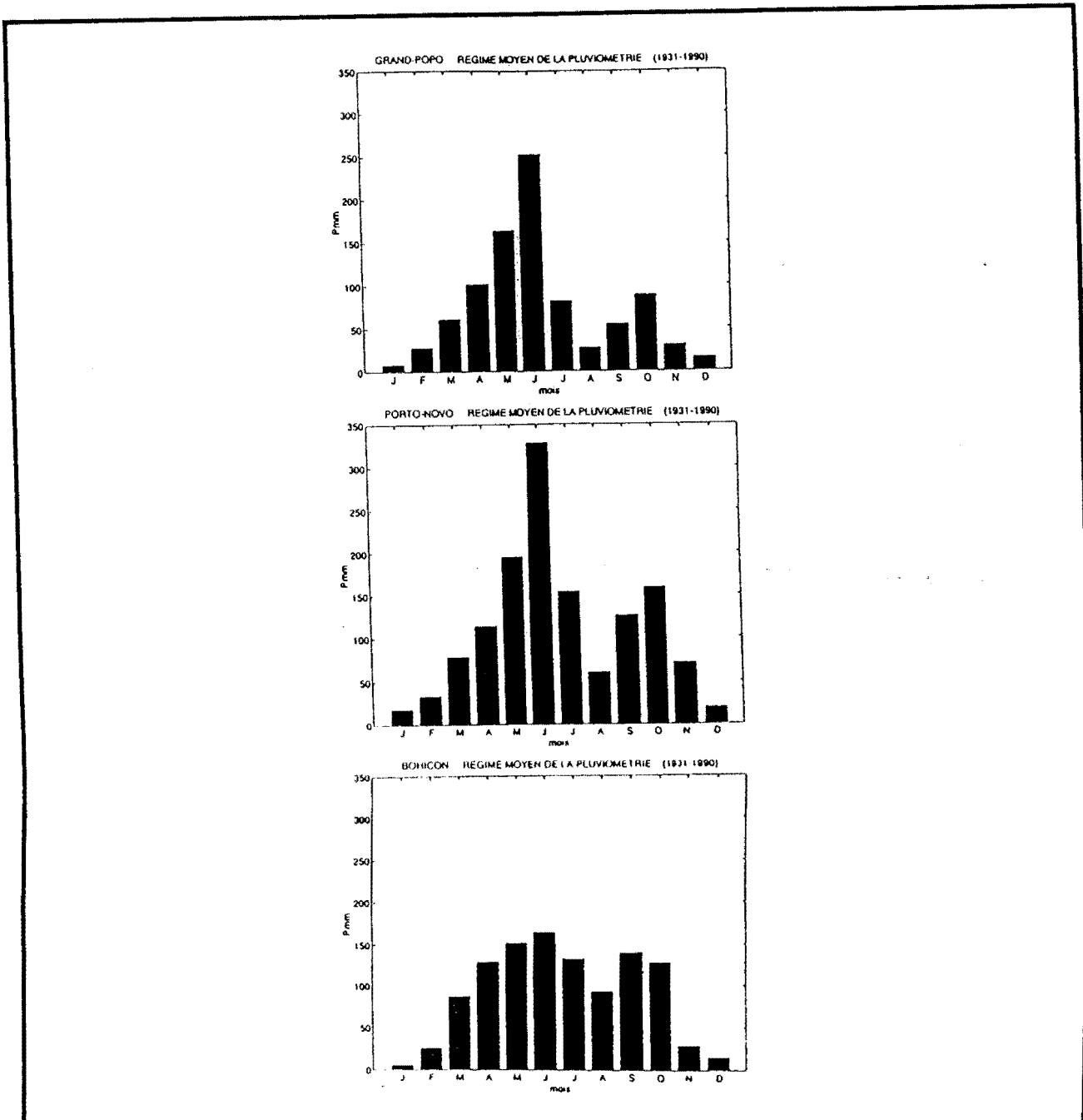


Figure 22 : Le rythme pluviométrique moyen du climat béninien durant la période 1931-1990. Grand-Popo est situé sur le littoral au sud-ouest à 6°17 N ; Porto-Novo est situé au sud-est à 6°29 N ; Bohicon est situé sur le plateau de terre de barre à 7°10 N.

Le mois de janvier est le moins arrosé, avec des précipitations comprises entre 3 et 10 mm. En février, les hauteurs pluviométriques sont supérieures à celles de janvier et se situent entre 10 et 70 mm selon les postes pluviométriques. En mars, on constate une nette augmentation des hauteurs pluviométriques par rapport à

celles du mois de février dans toutes les stations. Mars peut être considéré comme le mois de transition pluviométrique. A partir du mois d'avril, et jusqu'à juillet, le seuil pluviométrique de 100 mm est dépassé et les pluies mensuelles sont comprises entre 100 et 250 mm. Sur le littoral, les hauteurs de pluie varient entre 200 et 300 mm, tandis qu'à l'intérieur des terres sur les plateaux d'Allada, d'Aplahoué, elles atteignent rarement 200 mm, à l'exception de Sakété par exemple. A partir du mois de juillet, on enregistre une diminution des précipitations. Le mois d'août, pour toutes les stations littorales, est caractérisé par une régression momentanée des pluies au coeur de la saison de mousson lorsque s'établissent les upwellings béniniens (Pérard, 1992). La diminution des totaux pluviométriques moyens est plus accentuée au sud-ouest et les hauteurs sont généralement inférieures à 50 mm. Sur la côte, cette diminution est très nette et le total pluviométrique du mois d'août est inférieur à 25 mm, comme à Grand-Popo, au sud-ouest. Porto-Novo, au sud-est, enregistre 51 mm (Figure 22). A l'intérieur des terres, sur les plateaux, comme à Abomey, le total pluviométrique du mois d'août sur la période 1931-1990 est de 75 mm. En septembre ou en octobre, sur toutes les stations, on enregistre un second maximum. De novembre à décembre les pluies diminuent nettement et les moyennes sont généralement inférieures à 50 mm. **En somme, l'étude du régime pluviométrique montre que :**

Le climat du domaine margino-littoral au Bénin est caractérisé par une diminution des précipitations d'est en ouest, une absence absolue de sécheresse et une humidité relative qui varie entre 75 et 90%. Plusieurs éléments expliquent le degré hygrométrique élevé de l'air (80 à 90%) dans ce milieu. La première source est d'origine océanique. L'océan Atlantique constitue incontestablement la source hygrométrique la plus proche car il demeure la limite naturelle méridionale du Bénin. L'océan Indien peut être considéré comme une source lointaine (Citeau, 1994). La deuxième source qui explique la forte humidité relative dans le sud du Bénin est continentale. Il s'agit de la vapeur d'eau recyclée au-dessus des végétaux (évapotranspiration) et au dessus des "lacs" (Toho, Ahémé, Nokoué), lagunes (Djessin, Grand-Popo, Cotonou, Porto-Novo), rivières (Gbagha au sud-ouest, Sazué etc.).

Sur le plan thermométrique, de façon générale les températures sont élevées et peu variables selon les mois et les saisons. Les maxima se situent autour de 32°C

au coeur de la saison sèche, et les minima oscillent entre 22 et 24°C en août, au milieu de la petite saison sèche. L'amplitude thermique annuelle est faible, inférieure à 8°C.

Comparativement à la région septentrionale, l'originalité du bas et moyen Bénin s'explique par ses saisons qui, elles-mêmes, dérivent du régime pluviométrique. Les effets induits par l'alternance de l'alizé continental à vecteur NE (harmattan) et du flux océanique de vecteur SW (mousson) déterminent au sud du Bénin une alternance de quatre saisons de durée inégale : une grande saison des pluies, une petite saison sèche, une petite saison pluvieuse, et une grande saison sèche.

3.1.1. La grande saison des pluies (saison de mousson d'été boréal)

Elle s'étend d'avril à juillet et débute par des orages sur le Bas-Bénin avec des vents humides de direction SW en avril oscillant entre 15 et 25 m/s, de façon croissante de la côte vers les plateaux de l'intérieur. Les phénomènes orageux annonciateurs de la saison de mousson sont favorisés par la présence, en arrière de la ligne côtière, des plaines alluviales inondables et de plans d'eau (fleuves Ouémé, Mono), de vastes "lacs" et lagunes (Nokoué, Ahémé, Towo) qui sont de véritables "pièges à orages" qui naissent en grappes et se succèdent autour des étendues d'eau (Pérard, 1992). Au début de la saison, en mars-avril, selon les années dans les basses couches de l'atmosphère, entre 1 000 et 1 500 mètres, la pression et l'effet du vent continental empêchent la détente maximale de la mousson et les premières pluies sont peu abondantes, moins durables de l'ordre de 7% par rapport au volume pluviométrique saisonnier (Figure 23).

En mai, le sud Bénin est alors sous l'influence de la ceinture dépressionnaire (Figures 23, 24). En juin, l'anticyclone de Sainte-Hélène s'intensifie et dirige le flux de mousson sur le continent. Dans sa trajectoire transéquatoriale, il se charge d'humidité. Le flux de mousson s'épaissit et atteint 2 000 mètres sur le sud du Bénin, alors qu'il reste pelliculaire vers le nord du pays (Leroux, 1988). L'étude physiologique des précipitations montre que la grande saison pluvieuse est alors caractérisée par des pluies de fortes intensités, avec une fréquence relative élevée des précipitations supérieures à 40 mm.

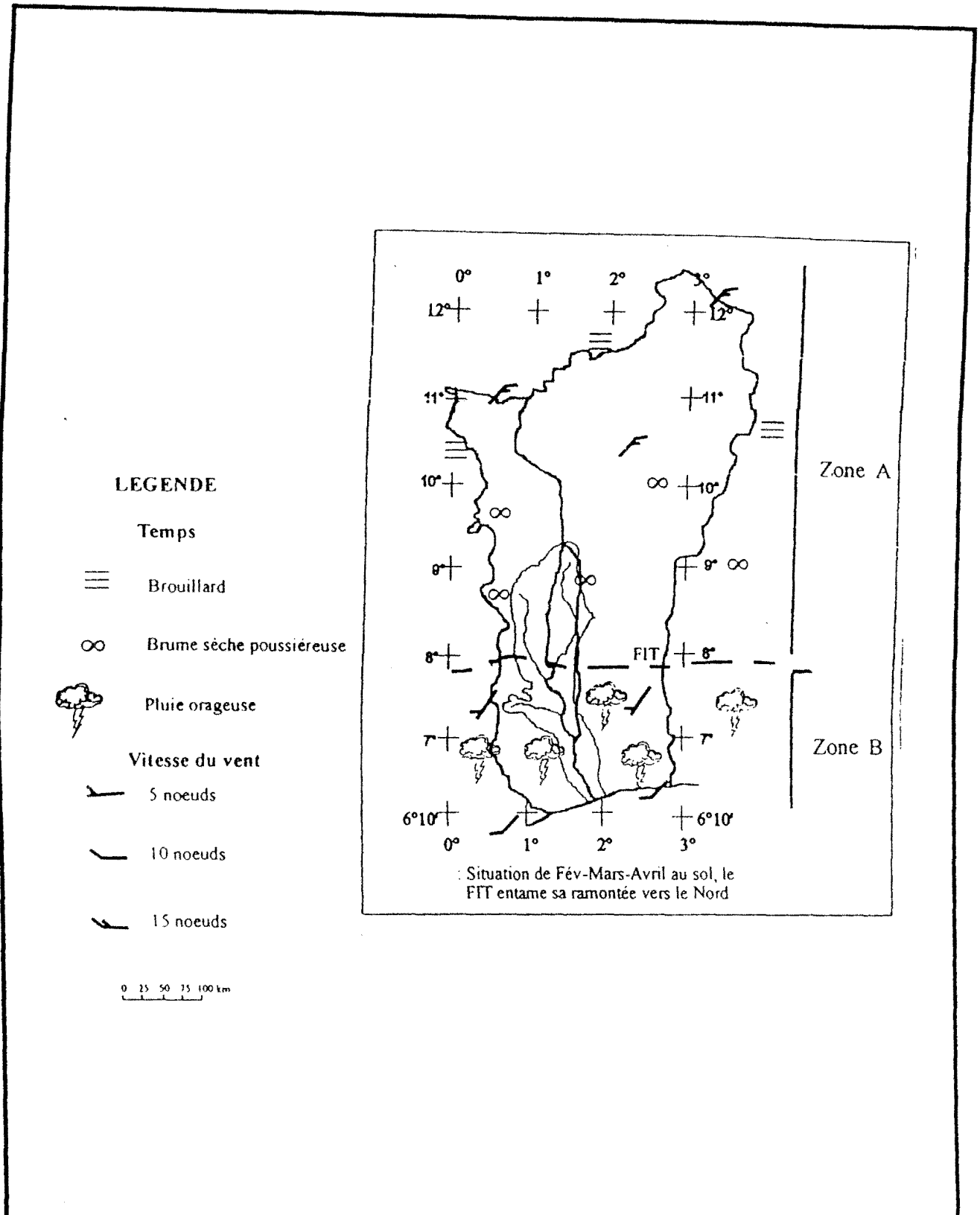


Figure 23 : Ambiance atmosphérique du début de la saison de mousson au Bénin-Togo : situation au sol (d'après Klassou, 1996).

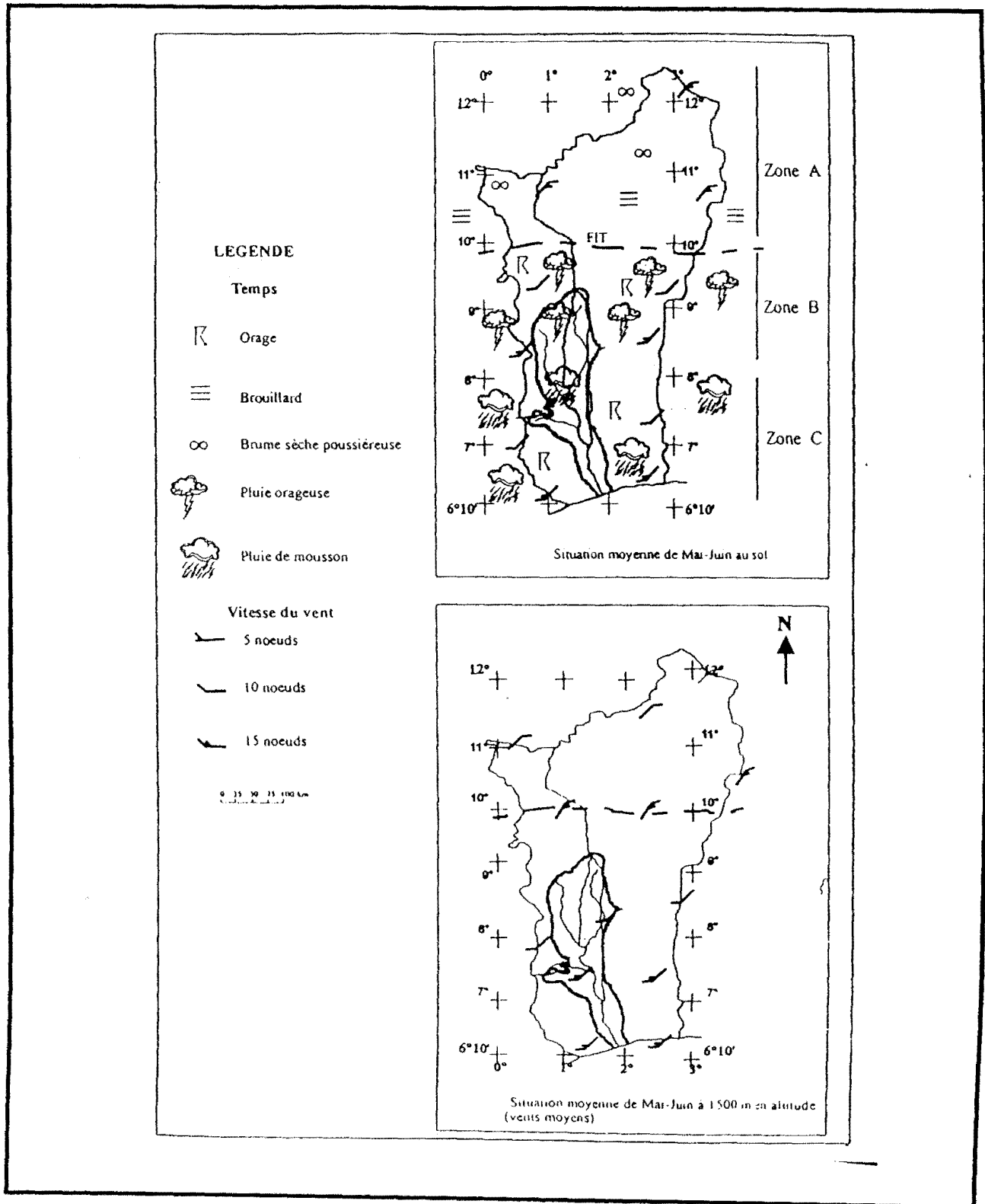


Figure 24 : Situation météorologique moyenne de mai-juin au sol et en altitude (d'après Klassou, 1996).

Dans le même temps, le FIT poursuit et accélère sa migration vers le nord. La cellule de Hadley sud augmente localement d'intensité et l'atmosphère présente une structure verticale favorable aux ascendances et à la convection. Par contre, la cellule de Hadley nord s'affaiblit localement. Dans les couches supérieures de

l'atmosphère, la composante zonale du vent à 700 hPa est renforcée au dessus de la couche de mousson et les jets subtropicaux sont moins intenses. Cependant, les températures de surface de l'océan Atlantique restent chaudes (26 à 27°C) le long des côtes béninoises. On assiste à l'établissement des pluies de mousson. **Dans le sud du pays, elles représentent plus de 70% des totaux pluviométriques saisonniers et concernent la classe des pluies journalières de 1 à 10 mm sur la période 1931-1990. En somme, la pluviosité de la grande saison des pluies est liée à la fréquence des perturbations au sein du flux de mousson et à la persistance de l'activité de la ZCIT sur le Bénin méridional et central.** A partir de la deuxième décennie du mois de juillet, on observe une diminution des précipitations, avec une baisse sensible des températures de surface de la mer. Elles passent de 25/26°C à 21/23°C (Bokonon-Ganta, 1987). Ainsi apparaissent les premières brumes annonçant la petite saison sèche.

3.1.2. La petite saison sèche : l'arrêt momentané des pluies, déroulement et mécanismes physiques

La petite saison sèche est associée, à l'échelle régionale, à l'avancée maximale vers le nord du FIT dans les basses couches et du flux de mousson entre Parakou et Malanville (9 et 12°N) (Figure 25) et (Figure 26). En réalité, la petite saison sèche correspond à la récession pluviométrique d'août qui est caractérisée par une diminution brutale de la pluviométrie (de l'ordre de 75%) sur le littoral. La caractéristique fondamentale de cette saison au Bénin est qu'elle débute généralement sans transition, en quelques jours avec l'absence de perturbations dans le régime général, et la teneur en humidité reste toujours élevée (89%).

Le climat béninien se caractérise aussi pendant cette saison par de fréquents brouillards d'advection. Le ciel reste couvert de nuages du type cumulus (8 octas en moyenne), dont le pouvoir pluviogène reste limité (Figure 25). Parfois, la présence de stratocumulus explique les précipitations qui interviennent sous forme de bruines. En général, la vitesse du vent au sol est réduite.

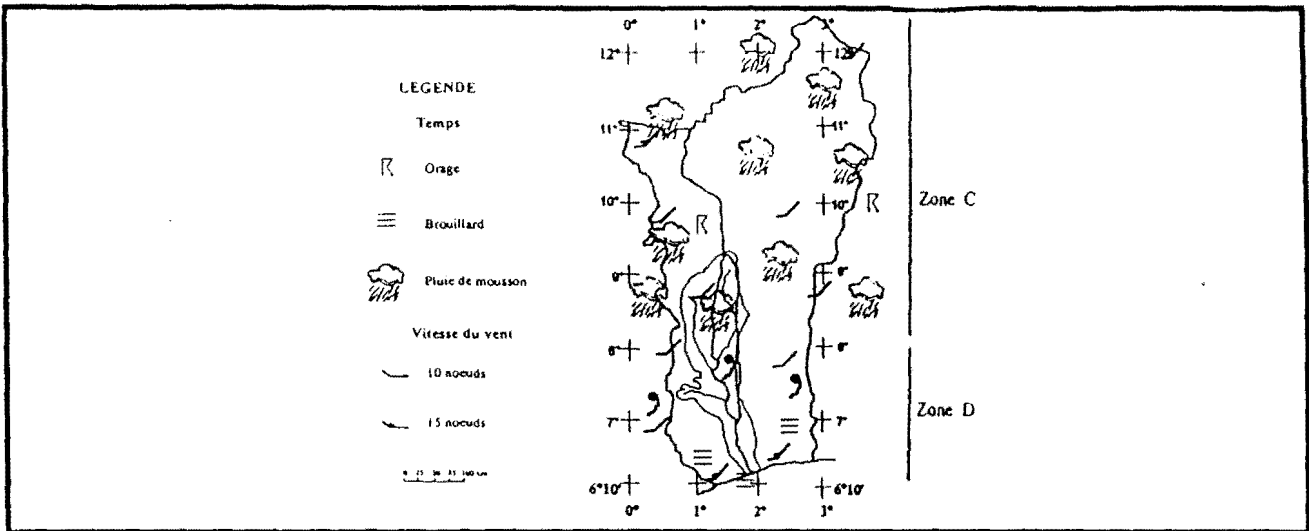


Figure 25 : Situation atmosphérique moyenne de juillet-août au sol : le FIT atteint sa position la plus septentrionale (d'après Klassou, 1996).

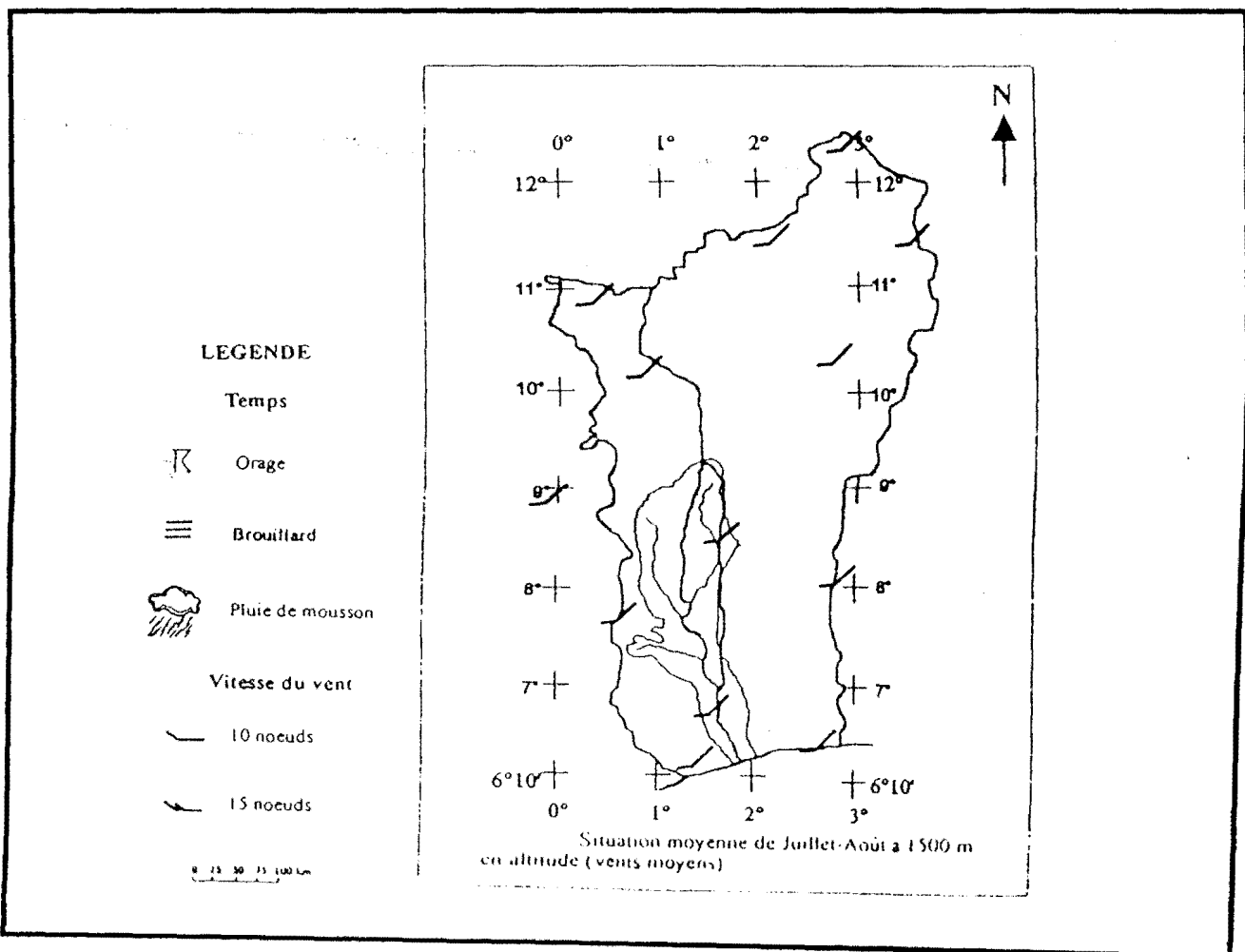


Figure 26 : Situation atmosphérique moyenne de juillet-août en altitude à 1500 mètres, (d'après Klassou, 1996).

L'anticyclone des Açores diminue localement d'intensité alors que celui de Sainte-Hélène se renforce. La circulation transéquatoriale favorise, dans les basses couches, la pénétration du flux de mousson vers le nord. La cellule de Hadley sud

renforce régionalement la subsidence sur le Bénin et le golfe de Guinée. Dans les basses couches atmosphériques, le FIT progresse vers le nord et se situe bien au-delà de 12°N. Dans les hautes couches atmosphériques selon les radiosondages, le jet tropical d'est s'intensifie et devient bien perceptible à 200 hPa en se décalant vers le nord. Dans le golfe du Bénin, la thermocline amorce sa remontée en même temps que les upwellings se développent. Cette remontée est liée aux variations des vents du champ atlantique. L'air de mousson refroidi et stabilisé par les remontées d'eaux froides pénètre sur le continent et la petite saison sèche s'installe dans le sud du pays (Figure 25) L'inhibition pluviométrique qui résulte de ce refroidissement persiste jusqu'à ce que le bilan d'énergie sur les terres parcourues devienne favorable au déclenchement des processus convectifs

En somme, la diminution de la pluviométrie de cette saison est liée à la subsidence de la cellule de Hadley sud, aux courants marins froids et à la concavité tournée vers la mer des terres littorales du Bénin qui favorise la divergence et donc la subsidence.

Sur les plateaux du Bénin méridional, le minimum pluviométrique de la saison est compris entre 50 et 100 mm. Par contre, sur le littoral, il se situe entre 0 et 125 mm. La petite saison sèche dans le golfe du Bénin n'est donc qu'un « **break pluviométrique** » et non une véritable sécheresse. Au début du mois d'octobre pluies redeviennent importantes. C'est la petite saison pluvieuse.

3.1.3. La petite saison des pluies

Elle est la conséquence de la lente migration du FIT et de sa zone C au sud du 8^{ème} parallèle et de l'affaiblissement de l'upwelling guinéen. Elle dure d'octobre à novembre. Les températures de surface océanique deviennent plus élevées en septembre, et sont de l'ordre de 28°C. La thermocline amorce sa descente vers sa position initiale. La cellule de Hadley sud s'affaiblit alors que celle du nord se renforce et l'ascendance s'observe dans les basses couches de l'atmosphère. D'une façon générale, les précipitations sont à caractère orageux, diurnes, et sont liées aussi au passage des lignes de grains de trajectoire NE-SW. Ceux-ci les lignes de grains sont sous l'influence des flux que dirige l'anticyclone semi-permanent de

Libye, sur sa façade équatoriale. Les "surges" expliqueraient aussi les violents orages et quelques pluies très localisées et brèves, selon Bokonon-Ganta (1987). Cependant, la faiblesse du flux en écoulement subsident empêche la formation de gros nuages et on note la manifestation des premières poussées d'harmattan annonçant la saison sèche.

3.1.4. La grande saison sèche dans le sud du Bénin

La grande saison sèche en milieu béninien est la conséquence du retrait du FIT sur la côte dans le golfe de Guinée. Elle dure de décembre à mars et se caractérise par la faiblesse des précipitations sur tout le pays, avec 7% des précipitations moyennes annuelles sur la période 1931-1990.

Les ondes d'est constituent l'une des perturbations majeures de cette saison. Elles sont plus manifestes vers la fin de la saison.

La grande saison sèche est surtout marquée par les phénomènes de brise et par le flux d'harmattan provenant de l'anticyclone de Libye. A ce moment de l'année, accélérations et turbulences dans les basses couches caractérisent l'atmosphère ouest-africain. L'anticyclone des Açores augmente d'intensité et accentue la subsidence sur le Bénin. Le FIT est sur le littoral vers 6°N et la fréquence des vents est faible, de l'ordre de 5 nœuds.

L'harmattan, se manifeste sur la côte entre fin novembre et fin février, avec des brouillards peu durables le matin. Les températures de surface de la mer restent élevées (28-29°C) et la température de l'air sous abri atteint 20°C. Cette situation thermique explique la présence des premiers nuages cumuliformes de la saison de mars sur l'océan Atlantique, alors que la côte reste dégagée (Bokonon-Ganta, 1987). Cependant, grâce aux brises de mer, le bas-Bénin est en permanence sous l'effet de l'air maritime, avec un degré hygrométrique de l'air constamment élevé, de l'ordre de 85 à 95%.

La grande saison sèche s'articule en de trois phases : la phase préliminaire, la phase de sécheresse presque absolue et la phase de fortes chaleurs et d'humidité.

La première phase concerne la deuxième moitié de novembre : les pluies sont rares, avec une fréquence relative de séquences sèches égale à 89%. C'est l'intersaison entre la petite saison pluvieuse et le régime d'harmattan avec quelques pluies localisées. La phase de sécheresse presque absolue peut durer de décembre à début février et la plupart des cours d'eau du réseau hydrographique du sud sont à l'étiage. Elle est caractérisée par de grandes amplitudes thermiques journalières, de l'ordre de 10°C. La phase de fortes chaleurs et d'humidité est annonciatrice de la saison de mousson d'été. La température de surface de la mer est élevée, tandis que celle de l'air sous abri est en baisse en fin de nuit ou aux premières heures de la journée. Ce régime thermique favorise la formation des premiers nuages cumuliformes en mer en fin de nuit en février-mars, tandis que la côte reste dégagée. Les manifestations orageuses et la forte nébulosité de fin mars et début avril marquent la fin de cette saison sèche et le début de la grande saison des pluies.

3.2. Le climat soudanien du Bénin : présentation et articulation

Il constitue une transition entre le climat béninien, au sud et le climat sahélien. Il se manifeste entre 8 et 12° de latitude nord et se caractérise par un régime pluviométrique unimodal avec deux saisons bien distinctes : une saison pluvieuse et une saison sèche.

3.2.1. Une unique saison des pluies

En milieu soudanien, au Bénin la saison des pluies s'étend d'avril à octobre. Les mois de janvier-février correspondent à la sécheresse absolue. Dans ce milieu à régime unimodal, avril constitue le mois de « présaison » avec des valeurs élevées d'évapotranspiration potentielle décadaire oscillant entre 50 et 70 mm. Le champ pluviométrique mensuel moyen est marqué par des totaux très variables selon les stations : Boukoumbé, 54 mm ; Kandi, 34 mm ; Parakou et Natitingou (84 mm). Partout, les totaux pluviométriques sont inférieurs à 100 mm car la mousson est encore peu épaisse (0 à 1 000-1 500 m).

Sur le plan atmosphérique, cette période de « présaison » se caractérise par un début de « rapprochement » de l'alizé continental sec et du flux de mousson issu, de l'hémisphère sud, qui instaure des types de temps très variables et instables

propices aux orages qui éclatent un peu partout (Afouda, 1990). La présence des reliefs résiduels de Sinendé et d'Angarédébou favorise l'ascendance et amorce les processus pluviogènes. Les vents jusque-là de secteur nord-est changent de direction et deviennent des flux de sud-ouest jusqu'à la troisième décennie du mois d'octobre. Cette période de « présaison » très instable s'achève avec le mois d'avril lorsque les flux du sud et du sud-ouest s'installent partout avec une fréquence relative égale à 88%.

Le mois de mai marque un début aléatoire d'installation de la saison pluvieuse sur le plan agricole avec une concentration pluviométrique saisonnière égale à 20%. Les modes varient entre 150 et 350 mm à Kandi dans le Borgou et à Natitingou dans l'Atakora. Ceci a été corroboré par nos enquêtes de terrain auprès des paysans qui estiment qu'à ce moment précis, la pluviométrie est généralement suffisante pour démarrer les semis.

Cette période de l'année est marquée par un ciel peu nuageux, avec des pluies orageuses de courte durée liées à la structure du Front InterTropical. Juin est le mois d'installation réelle des précipitations avec des vents de SW et des ETP variant entre 50 et 60 mm. Toutes les stations enregistrent plus de 12% de leurs totaux pluviométriques annuels. C'est la pleine saison agricole et les pluies sont continues, avec des modes variant entre 150 et 350 mm à Kandi dans le Borgou et à Natitingou dans l'Atakora. La plupart des cultures sont soit en fin de période végétative, soit en début de floraison selon les dates de semis. Le FIT est dans sa plus grande extension verticale, avec son axe centré entre 12 et 13°N avec des cumulo-nimbus pouvant couvrir 7 octas.

Les mois de juillet août et septembre sont les plus humides de l'année et concentrent 75% des pluies saisonnières. Partout, les pluies sont supérieures à 150 mm et inférieures à 200 mm, sauf à Kandi

Au mois d'août ou septembre, toutes les stations présentent leur maximum pluviométrique : 206 mm à Boukoumbé, 283 mm à Natitingou, 276 mm à Kandi et 225 mm à Parakou. Les ETP mensuelles moyennes sont proches de 40 mm. Le paroxysme pluviométrique s'explique par l'extension du FIT, au moment où se

développent de grands contrastes méridiens entre l'espace saharien et l'océan Atlantique. Ceux-ci renforcent les gradients de température et de géopotential au-dessus de la couche limite de l'atmosphère, et accentuent la composante thermique du vent. Cette ambiance météorologique fait apparaître le Jet d'Est Africain (JEA) à 600 hPa au-dessus de la région.

A partir du mois d'octobre, les ETP mensuelles moyennes varient entre 40 et 55 mm dans toute la région, et on observe une chute brutale des totaux pluviométriques avec des hauteurs inférieures à 100 mm et des médianes égales à 3 mm à Kandi et 10 mm à Nikki dans le Borgou au nord-est. La rapide diminution de la pluviométrie en octobre met en doute la validité de la zone D marquée sur le schéma de l'ASECNA sur le nord du Bénin, car à Malanville dans le bassin du Niger au Bénin, la pluviosité chute de septembre à octobre de 88%, et de 75% à Tanguiéta et Djougou dans le nord-ouest. Cette interruption brutale des pluies s'explique par la position de la partie active du FIT et sa migration vers la zone sahéenne (13°N). Le voyage « retour » du FIT par le milieu soudanien au Bénin est très rapide et le flux de mousson est repoussé par l'alizé continental du nord-est. Cette confrontation des masses d'air favorables aux orages, bloque le FIT et empêche l'instauration d'une situation atmosphérique de type D (Afouda, 1990). Ainsi, la fin de l'unique saison des pluies est caractérisée par une fréquence élevée (70%) des jours orageux une hausse des pressions en octobre et une légère hausse de l'ETP au cours de la troisième décennie à Kandi avec 56 mm.

A partir de la fin du mois de novembre et durant la deuxième décennie de décembre, on assiste à un renversement du gradient de pression qui se maintiendra dans le sens méridien jusqu'à la fin du mois de janvier et à la deuxième quinzaine de février ; la direction du vent dominant est de NE-SW. C'est la fin de l'unique saison des pluies en milieu soudanien au Bénin.

Au total, les pluies de début de saison dans le nord du Bénin sont dues essentiellement à la thermoconvection locale, tandis que les précipitations du cœur de la saison sont liées à la dynamique de la haute et de la basse troposphère.

3.2.2. La saison sèche soudanienne au nord-Bénin

Elle se déroule de fin novembre à avril et est marquée surtout par les influences continentales. Cette saison est caractérisée par une extrême rareté des pluies, une alternance de fraîcheur et de chaleur, et surtout par le changement de la direction du vent dominant qui, durant la saison des pluies, était de sud-ouest.

Le principal type de temps parfois brumeux de la saison s'explique par l'intensité des cellules des Açores et de Libye, et par les facteurs locaux. Le centre d'action semi-permanent de Libye se décale vers le continent à partir de novembre et la pression augmente au sein de celui des Açores qui déborde aussi sur le continent en créant un phénomène de subsidence sur la région. Le nord du Bénin est sous l'isobar 1 012 et le FIT est dans sa position méridionale, vers 6°N. Ainsi les pluies sont rares sur la région. Pour la période 1931-1990, la lame d'eau écoulée durant la saison n'atteint pas 8% du total annuel et l'humidité relative moyenne de la région est de 30% en février, avec une tension de vapeur moyenne de 11 hPa. Durant cette saison, l'anticyclone de Libye dirige un flux d'alizé de NE continental sec, appelé harmattan, au moment où celui de Sainte-Hélène se décale vers le centre de l'Atlantique sud. Le flux d'harmattan s'accompagne de fraîcheur, de brumes sèches et de minimales saisonnières variant entre 14°C à Kandi, 16,5 à Kérou et Malanville en janvier, et 27°C en avril sur ces mêmes stations. La moyenne de température minimale saisonnière s'élève à 20°C pour toute la région. Les maxima dépassent parfois 40°C en avril pour les stations situées en milieu tropical soudanien, vers 10°N.

L'harmattan souffle de décembre à mars et véhicule sur tout le Bénin des masses de poussières d'origine saharienne. Ceci constitue le trait caractéristique de la saison. En effet, à partir de la 3^{ème} décennie du mois d'octobre, les vents de NE pénètrent dans la région de Gaya au Niger, de Malanville et Kandi au Bénin, avec une vitesse moyenne de 2 m par seconde. Vers la deuxième décennie de novembre ils gagnent la région de Parakou (9°N) avec une vitesse moyenne de 2,5 m par seconde.

En décembre-janvier, au moment où l'anticyclone de Libye s'étend vers 12°N, les vents atteignent le sud du pays avec une vitesse moyenne variant entre 3 et 4,5 mètres par seconde. La composante méridienne du vent se caractérise par une

différence en haute atmosphère. La pression au sol enregistrée à Kandi est de 1 010 hPa. La dynamique de l'atmosphère en cette période de l'année fait que le climat soudanien est caractérisé par une baisse de la tension de vapeur d'eau de l'ordre de 85%, un faible taux d'humidité atmosphérique de 20 à 40% à Kandi, 30 à 60% à Parakou et à Natitingou.

Le faible taux d'humidité relative saisonnière (46%), l'augmentation de l'évaporation maximale qui est de l'ordre de 80% (soit 12 mm/jour), et les fortes amplitudes journalières des températures minimales et maximales constituent également les traits caractéristiques de cette saison. L'insolation journalière est de 10,5 watts/m² en février. La combinaison de tous ces paramètres climatiques fait que l'évapotranspiration potentielle mensuelle est de 5 mm par jour en janvier et de 8,5 mm par jour en avril.

Remarques

Bien que le régime unimodal soit propre à toutes les stations météorologiques, les dates de passage du soleil au zénith, la continentalité du nord-Bénin et la ligne de partage des eaux à la latitude de Bembéréké permettent de distinguer au nord-Bénin un climat subsoudanien et un climat tropical soudanien. Cette différenciation est manifeste si l'on considère le gradient pluviométrique.

Le climat subsoudanien règne depuis la latitude de Savè jusqu'à la hauteur de Bembéréké (vers 10° de latitude nord) et correspond au Bas-Borgou. Il est caractérisé par des totaux pluviométriques annuels moyens compris entre 1 000 et 1 300 mm. Les stations concernées par ce climat sont celles situées au sud de la ligne de partage des eaux, dans la région d'Angaradébou comme la station de Parakou. Les températures sont plus élevées que celles enregistrées au sud du Bénin, et l'amplitude thermique journalière atteint 10°C. Les minima thermiques se situent en juillet-août tandis que les maxima se produisent en mars, en pleine saison sèche.

Le climat tropical nord soudanien, se rencontre au-delà de 10° de latitude nord dans le Haut Borgou. Il se caractérise par :

- ❶ de faibles totaux pluviométriques annuels moyens, de l'ordre de 787 mm à Malanville (1961-1990),

- ② de fortes amplitudes thermiques journalières en saison sèche (15°C)
- ③ la présence manifeste de l'alizé du nord-est qui affecte aussi tout le reste du pays avec une vitesse de l'ordre de 15 nœuds (25 à 30 km/h).
- ④ l'arrivée tardive (fin juin, début juillet) et le retrait précoce du front de mousson (mi-septembre, début octobre),
- ⑤ la faible épaisseur du flux de mousson (1000 m)

Au Bénin, le climat soudanien a une autre variante dans le nord-ouest, avec un régime pluviométrique unimodal. Bokonon-Ganta (1987), et Afouda (1990) dans leurs travaux respectifs sur la climatologie du Bénin, n'ont pas élucidé la spécificité climatique de cette région. Bien que caractérisée par la continentalité, la région de l'Atakora fait partie des milieux arrosés du pays à cause de l'orographie et de la chaîne de l'Atakora qui modifie le schéma zonal des précipitations. La différence est de type quantitatif et se situe au niveau des totaux pluviométriques élevés (1 300 mm/an). Dans toute la région de l'Atakora, les totaux pluviométriques sont nettement supérieurs à 1 000 mm, excepté à Porga (899 mm) située à 11° latitude nord. La forte pluviométrie de Djougou (1 280 mm) semble être liée à sa proximité avec les forêts classées, au relief et à sa situation par rapport aux flux de mousson et aux flux d'est. La particularité de cette variante du climat se caractérise aussi par des orages fréquents, des températures plus fraîches (les minima sont en moyenne de l'ordre de 19°C et 16 °C parfois à Kérou) et des effets localisés de foehn. Les maxima moyens calculés à partir des stations de Kérou, Natitingou, et Djougou se situent autour de 33°C. Dans ce milieu montagneux, la présence de brise de vallée favorisée par l'échauffement différentiel des vallées génère l'ascendance de l'air et accentue la pluviosité.

Conclusion sur le climat moyen du Bénin

La présentation du climat moyen du Bénin en rapport avec les éléments fondamentaux de la circulation océano-atmosphérique générale a permis d'une part d'identifier les différentes saisons agri-pluviométriques dans leur déroulement et de présenter d'autre part l'environnement climatique dans lequel plusieurs variétés de maïs sont cultivées.

Situé au nord de l'équateur, le Bénin appartient au domaine des climats chauds et humides de l'Afrique de l'ouest car, les moyennes thermiques sont constamment élevées (27°C en moyenne). La situation géographique du Bénin par rapport aux flux océano-atmosphériques fait de lui un pays de mousson.

On distingue globalement deux types de climats à cause de l'allongement latitudinal du pays :

❶ - le climat béninien à quatre saisons (deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses d'inégale durée), caractérisé par des températures élevées mais jamais excessives avec des maxima en mars de 32°C et des minima en août de 26°C ainsi qu'une forte humidité relative (75 à 90%).

❷ - le climat soudanien à deux saisons bien distinctes avec des amplitudes thermiques journalières très élevées. Dans le nord-est, l'action des reliefs résiduels et la présence de la ligne de partage des eaux induisent des nuances pluviométriques. On distingue ainsi : le climat subsoudanien à la latitude de Parakou jusqu'à Bembéréké, et le climat tropical nord soudanien au-delà de 10°N.

Dans le nord-ouest, la chaîne de l'Atakora par sa position et son orientation NNE-SSW par rapport aux flux porteurs de pluie modifie le schéma zonal des précipitations en accentuant la pluviosité et en créant ainsi une nuance du climat soudanien au nord du Bénin.

L'articulation saisonnière est la conséquence des migrations du Front InterTropical, et de la variation des températures de surface de l'océan Atlantique associée aux actions régionales des grandes cellules commandant la circulation atmosphérique générale.

Sur le plan aérologique, de décembre à mars, toutes les régions climatiques du pays sont sous l'influence de l'alizé du nord-est qui est beaucoup plus manifeste au delà de 8°N qu'au sud, en climat béninien.

Les pluies de mousson constituent un apport pluviométrique commun à tous les espaces climatiques et conditionnent les activités maïsicoles car le balancement du FIT n'épargne aucune région du pays. Ces différentes formes de climats modulent les genres de vie et déterminent les périodes d'intenses activités culturelles selon les régions du Bénin.

L'étude des champs pluviométriques moyens annuels et saisonniers, l'évaluation fréquentielle des précipitations moyennes annuelles et saisonnières huit années sur dix présentent les potentiels hydriques du milieu rural dans lesquels se sont développées plusieurs civilisations agraires, dont la culture du maïs.

Cette présentation du climat moyen permettra de mieux évaluer la variabilité pluviométrique saisonnière du milieu dans lequel est cultivé la culture du maïs. Elle constitue ainsi la première étape d'établissement du diagnostic du climat.

Chapitre II : La variabilité climatique au BENIN de 1931 A 1990

INTRODUCTION

L'histoire climatique récente de l'Afrique demeure marquée par la forte variabilité spatio-temporelle des précipitations depuis le début du XX^{ème} siècle. Si, d'une façon générale, la variabilité climatique se caractérise par une succession d'anomalies, parfois elle prend des proportions inquiétantes car elle se manifeste par des sécheresses absolues, une modification des rythmes pluviométriques avec par exemple une diminution de la durée des saisons des pluies.

Depuis plus de deux décennies, l'Afrique occidentale connaît une baisse généralisée de ses totaux pluviométriques accentuée par une forte persistance interannuelle des anomalies dont le signe manifeste est la sécheresse sahélienne. Ce phénomène avait été déjà remarqué par Tanaka *et al.* (1975) qui montraient, à partir des séries annuelles, les configurations spatio-temporelles des précipitations sahéliennes. Cette situation pluviométrique inquiétante a retenu l'attention de la communauté scientifique internationale, des pouvoirs publics et des organismes internationaux, qui se sont intéressés à la cause de la calamité. Ainsi, la variabilité pluviométrique sahélienne et guinéenne a fait l'objet de nombreuses études.

Motha *et al.* (1980) montrent l'existence d'une opposition de phase entre anomalies pluviométriques du Sahel et celles du golfe de Guinée à partir des séries pluviométriques du Nigeria. Fontaine (1981, 1985), à travers une étude de la pluviométrie sahélienne, met en évidence la persistance des anomalies de précipitations et la tendance à la baisse des totaux annuels dans un champ pluviométrique relativement homogène. Nicholson (1981) montre que la décennie 1951-1960 a été humide et que la période (1968-1973), a été sèche pour tout le continent africain, mais avec une accentuation de l'indigence pluvieuse au Sahel. En notant l'homogénéité de la zone guinéenne à laquelle appartient le Bénin, Nicholson montre que cette zone est décorrélée avec le Sahel. Les années déficitaires qu'a connues la zone guinéenne seraient liées à la migration importante du FIT vers le nord et les anomalies négatives seraient dues à une moindre intensité de l'hivernage.

Janicot (1990), en analysant le champ pluviométrique de l'ouest africain et le nord de l'Afrique centrale, met en évidence, certaines années, une variabilité en phase sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest (anomalies de même signe) et, pour d'autres années, une variabilité en opposition de phase de part et d'autre du 10° de latitude nord. A la suite de Nicholson (1981), il distingue 4 types de situations selon le signe des anomalies dans les deux zones identifiées de part et d'autre de 10° N : déficit sur toute la région, excédent général, déficit au sud et excédent au nord, ou encore excédent au sud et déficit au nord.

L'identification du phénomène de sécheresse dans le golfe de Guinée été récemment effectuée par Paturol *et al.* (1995) à partir d'indices pluviométriques de la Côte d'Ivoire, du Togo et du Bénin sur la période 1950-1979. Les auteurs confirment la chute brutale de la pluviométrie à la fin des années 1960 et montrent l'important glissement vers le sud et le sud-ouest des isohyètes, et l'apparition de zones extrêmement déficitaires. Ils ont lancé un appel aux aménageurs et gestionnaires par rapport aux risques de défaillances prévisibles pour les équipements conçus dans un contexte climatique favorable. Camberlin (1987) montre qu'à une année arrosée au Sahel correspond le plus souvent une petite saison sèche nettement marquée le long du golfe de Guinée, alors que dans le cas d'un déficit sahélien, on note parfois une disparition de la petite saison sèche. Bokonon-Ganta (1987), en étudiant les climats de la région du golfe de Guinée note, entre 1955 et 1984, une variabilité moyenne à forte pendant la saison sèche de novembre à février sur toute la région, une faible variabilité pendant la saison des pluies du sud au nord, et enfin une très forte variabilité surtout au sud du 7^{ème} parallèle, en juillet, août, septembre (été de l'hémisphère boréal). Boko (1988) montre que, singulièrement, au Bénin, les stations des régions littorales et sublittorales sont plus nettement affectées par la variabilité pluviométrique, avec un coefficient de variation interannuelle oscillant entre 25 et 30%. Tout le reste du pays a le plus souvent un coefficient de variation interannuelle compris entre 15 et 20%, à l'exception de la bande sublatitudinale comprise entre 10° et 11° de latitude nord et la région de la plaine de l'Oti. Toutes ces études relatives à la climatologie du Bénin ont été réalisées à des échelles spatio-temporelles différentes et ne concernent pas la normale 1931-1990 comme c'est le cas dans notre étude. Il n'existe pas non plus d'études comparatives des deux normales recommandées par l'OMM afin de mesurer le degré de variabilité du

climat et d'identifier un changement climatique depuis que la sécheresse s'est généralisée à l'Afrique occidentale humide et côtière. C'est ce vide que veut combler le présent chapitre.

Présenter le diagnostic des différents climats au Bénin consiste à déterminer les modes de variabilité et à analyser l'évolution spatio-temporelle des différents éléments du climat qui conditionnent et règlent la vie économique du pays en général, et la maïsiculture en particulier. De ce point de vue, l'analyse des cumuls pluviométriques des périodes 1931-1960 et 1961-1990, l'étude comparée des types de régimes pluviométriques, l'identification des modes de variabilité et la quantification des séquences sèches constituent des méthodes de caractérisation d'un éventuel changement climatique.

Section 1. : Comparaison des normales pluviométriques 1931-1960 et 1961-1990

Les différences entre les totaux pluviométriques des normales 1931-1960 et 1961-1990 sont quantifiées grâce à des analyses composites et validées par le test de Student. Dans cette étude, cette approche statistique se justifie par rapport aux vicissitudes climatiques vues et vécues par les communautés rurales béninoises ces dernières années.

1.1. Les cumuls annuels

Entre 6 et 8° N dans le Bas-Bénin, durant la période 1961-1990, les totaux moyens annuels oscillent entre 920 et 1 491 mm. En revanche, sur la normale 1931-1960, ils sont compris entre 868 et 1 600 mm. Les résultats du test de student à 58 degrés de liberté montrent qu'il n'existe pas de différence significative au seuil de 5% entre les totaux moyens des normales 1931-1960 et 1961-1990, sauf à Allada et à Grand-Popo (Tableau 7).

Numéros	Stations	1931-1960 (mm)	1961-1990 (mm)	Différence (1961-90)-(1931-1960)
1	Allada	1 128	996	
2	Sakété	1 194	1 107	-
3	Abomey	1 049	1 100	+
4	Bopa	868	920	+
5	Zagnanado	1 069	1 022	-
6	Aplahoué	1 105	1 084	-
7	Grand-Popo	852	986	
8	Toffo	1 020	1 010	-
9	Pobè	1 196	1 190	-
10	Ouidah	1 089	1 161	+
11	Adjohoun	1 038	1 135	+
12	Porto-Novo	1 358	1 374	+

Tableau 7 : Précipitations moyennes comparées des périodes 1931-1960 et 1961-1990 sous climat béninien. Les différences significatives au seuil de 5% sont marquées en gris.

Au Bénin central, seules les stations de Savalou et de Savè ont des séries dont les origines remontent aux années 30 et ont fait l'objet d'une étude comparative. A Savalou, sur la période 1931-1960, la pluviométrie est de 1177 mm en moyenne alors qu'à Savè à 84 km, la hauteur de pluie annuelle était de 1 359 mm. Mais, de 1961 à 1990, le total moyen de la pluviométrie à Savalou est de 1 150 mm, alors qu'il était de 1 103 mm à Savè. L'analyse composite montre que la différence pluviométrique enregistrée entre ces deux normales à n'est significative qu'à Savè au seuil de 5%.

Au delà de 8°N, en milieux soudanien et atakorien, les différences entre les cumuls annuels ne sont pas significatives bien que les totaux aient diminué sur la période 1961-1990.

L'application des analyses composites aux cumuls annuels des périodes 1931-1960 et 1961-1990 montre qu'il existe des différences entre les totaux pluviométriques. Cependant, dans l'ensemble, elles restent non significatives.

1.2. Variabilité des régimes pluviométriques au Bénin : comparaison des normales 1931-1960 et 1961-1990

La considération de la variabilité des régimes pluviométriques est importante car, à quantité annuelle de pluie et à variabilité interannuelle équivalente, une plus grande instabilité des régimes pluviométriques d'une année sur l'autre est préjudiciable à l'agriculture.

L'étude comparative des régimes pluviométriques moyens sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 est incontournable et nécessaire, car le calendrier cultural maïsicole dépend du rythme pluviométrique. Toute modification du rythme pluviométrique nécessite une réadaptation des systèmes de culture et des modes de production agricole. L'étude analytique s'efforce, dans les paragraphes suivants, de quantifier le degré de variabilité des 2 types fondamentaux de climats mis en évidence. L'étude comparative ne concerne pas toutes les stations en raison de la brièveté de certaines séries météorologiques et de l'appartenance de certaines stations à la troisième génération de postes météorologiques (cf. partie méthodologique).

L'IRD (ex ORSTOM) et plusieurs auteurs ont déjà abordé l'étude des régimes pluviométriques dans le golfe de Guinée et au Bénin. La plupart des publications ont un caractère monographique et ne concernent qu'une normale climatologique en général. Elles n'abordent pas l'étude de la variabilité des régimes pluviométriques sur une longue période à des fins agronomiques afin de proposer des outils d'aide à la décision.

1.2.1. Variabilité des régimes pluviométriques bimodaux

Au sud du Bénin, la variabilité pluviométrique se manifeste par un important changement du rythme pluviométrique moyen et par une mobilité des maxima pluviométriques.

Durant les deux normales 1931-1960 et 1961-1990, les stations littorales présentent une stabilité de la position des maxima au cours des deux saisons humides avec des différences dans leurs totaux pluviométriques moyens.

Sur les plateaux septentrionaux du Bas-Bénin, la période 1961-1990 est caractérisée par un décalage du maximum pluviométrique comparativement à la période 1931-1960. En effet, les stations d'Abomey, d'Aplahoué, de Zagnanado, ont leur maximum en octobre au cours de la période 1931-1960. Le pic pluviométrique s'observe en septembre sur la période 1961-1990. La station de Zagnanado est caractérisée par un décalage des deux maxima pluviométriques. Au cours de la période 1931-1960, le pic est en mai. Mais sur la deuxième normale, le maximum pluviométrique se situe en juin pour la grande saison des pluies.

Sur les plateaux du sud du Bas-Bénin, les pics de la grande saison pluvieuse ont lieu en juin pour toutes les stations sur les deux normales, sauf pour Pobè dont le maximum se situe en mai au cours de la normale 1931-1960. Les seconds maxima ont tous lieu en octobre à Adjohoun, à Allada, à Niaouli, à Sakété, à Toffo. Seule la station de Bopa a son second maximum de petite saison pluvieuse en septembre.

En milieu béninien mais un peu plus au nord (7°N), on note une variabilité du régime pluviométrique sur les deux normales. Quoique le mois de janvier d'été boréal corresponde au minimum de la saison de mousson, la différence de ce mois sur les normales 1961-1990 et 1931-1960 est marquée par une importante diminution significative au seuil de 1%. **Le mois d'août se caractérise par une augmentation de sa pluviométrie. Cette différence est significative au seuil de 5%.** En revanche, les mois d'octobre et novembre qui constituent la petite saison pluvieuse sont affectés par une baisse sensible de leur pluviométrie significative au seuil de 1%. Sur les plateaux septentrionaux du Bas-Bénin, la variabilité affecte de façon significative (1 et 5%) la petite saison pluvieuse et surtout le mois d'octobre (Tableau 9). Adjohoun, dans vallée de l'Ouémé, connaît une situation analogue. En effet, on note une baisse significative au seuil de 5% de la pluviométrie aux mois d'octobre et novembre. Par contre, sur la période 1961-1990, le mois d'août est devenu plus pluvieux avec une différence positive de 45 mm significative au seuil de 5%. Les

mois de janvier; février mars sont devenus plus secs par rapport à la normale 1931-1960. A Allada exceptionnellement, la variabilité concerne la quasi-totalité des mois. On note une diminution des totaux pluviométriques mensuels moyens de juin à novembre. Toute la saison de mousson est affectée par une diminution de la pluviométrie. Elle est surtout sensible en mai, avec une différence significative au seuil de 5%. La petite saison pluvieuse a, elle aussi, connu une baisse de sa pluviométrie, significative au seuil de 1%

Dans le sud-ouest, à Grand-Popo, sur le littoral, le mois de juin est caractérisé par une augmentation significative de la pluviométrie au seuil de 1%. En revanche, l'augmentation de la pluviométrie de juillet n'est pas significative. Mais la petite saison sèche (août) reste toujours marquée par une augmentation des précipitations significative au seuil de 5%. Ce qui crée une situation de risque climatique pour la maïsiculture et pour le paysan.

Dans le Moyen-Bénin, à Savè, on note des baisses sur tous les mois, à l'exception du mois d'août dont le total pluviométrique est à la hausse. La petite saison pluvieuse reste marquée par une baisse de son total moyen sur la période 1961-1990. Cette baisse est significative au seuil de 1%. Il en est de même pour le mois de novembre. Au Bénin central, on a du mal à cerner et identifier la récession du mois d'août, excepté la station de Dassa-Zoumè qui présente les caractéristiques bien tranchées du régime bimodal, avec une inflexion du total pluviométrique au mois d'août. Par contre, les stations de Savè et de Savalou présentent une physionomie différente sur les deux normales. **Dans le Moyen Bénin, le coeur de la seconde saison pluvieuse est plus arrosé que celui de la saison de mousson d'été boréal au cours de la période 1931-1960. Puis c'est l'inverse sur la période 1961-1990. Les mois d'août ont été plus pluvieux sur la série 1961-1990, alors qu'ils le furent moins sur la première série trentenaire (Figure 27).**

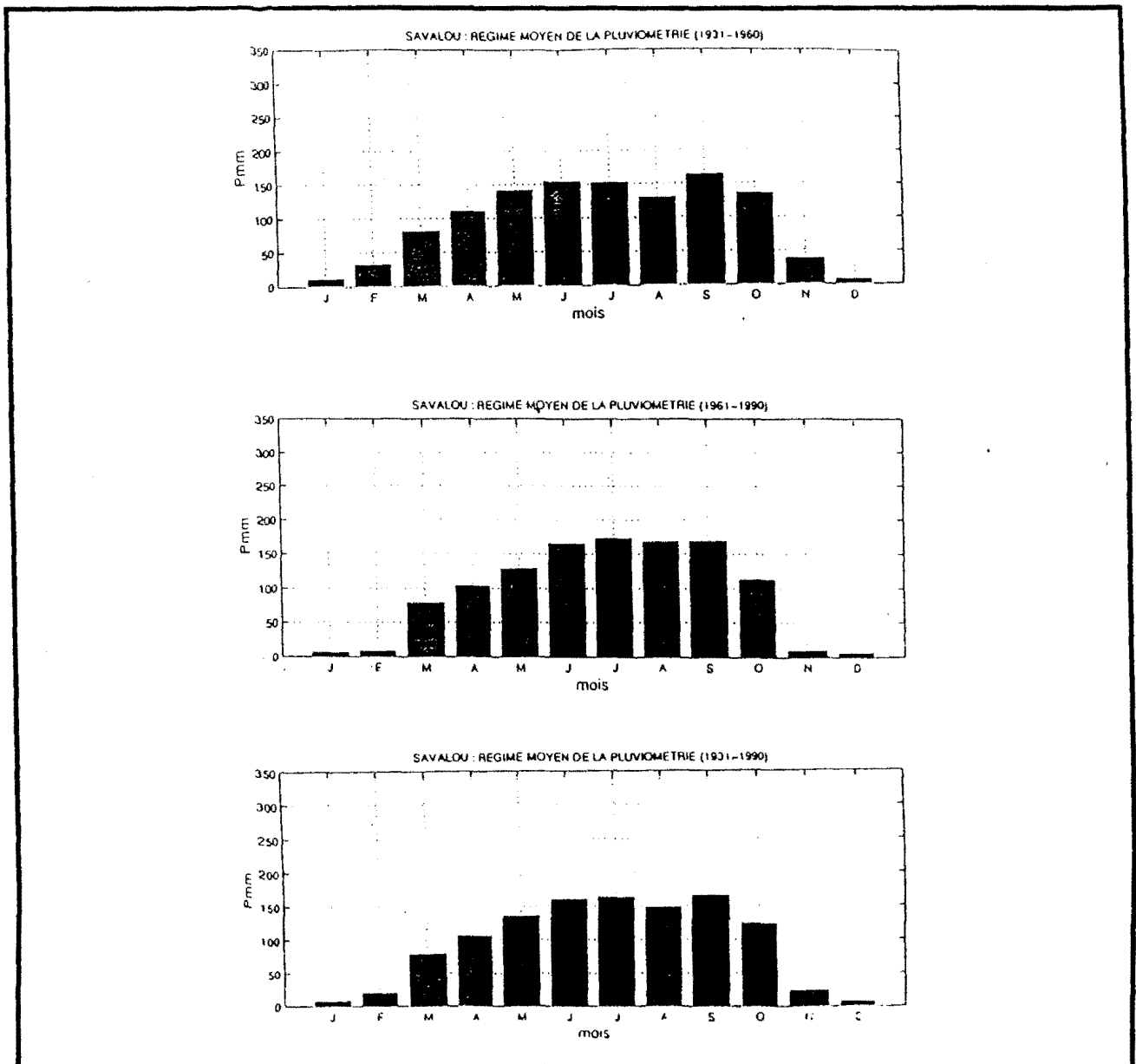


Figure 27 : Régimes pluviométriques de transition au Bénin central sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 et 1931-1990.

En effet, au cours de la période 1931-1960 Savè et Savalou enregistrent respectivement 134 et 131 mm de précipitations. En 1961-1990, ces mêmes stations ont enregistré 175 et 179 mm en moyenne. L'apport pluviométrique élevé du mois d'août dans le total saisonnier constitue le facteur d'unification des deux saisons auquel on assiste ces dernières années. Le rythme subéquatorial tropical subit une lente métamorphose. Il est supplanté par un rythme soudanien dans la mesure où on ne note plus de transition pluviométrique. En somme, depuis une décennie, le Moyen Bénin est confronté à la mobilité des saisons pluvieuses et le régime pluviométrique bimodal devient unimodal. Cette situation constitue un handicap

majeur pour les paysans qui, sont en situation de risque pluviométrique. Les maxima de la grande saison pluvieuse ont lieu en juillet pour la période 1961-1990 et non en juin comme c'est le cas au cours de la période 1931-1960. Paradoxalement, les mois de septembre ont été plus pluvieux que le mois de juin qui constitue le coeur de la grande saison pluvieuse de 1931 à 1960.

1.2.2. Variabilité des régimes pluviométriques unimodaux

Au mois d'août, toutes les stations du nord-Bénin enregistrent leur maximum. Cependant, au nord-ouest, les stations sur le versant au vent de l'Atakora, comme Tanguiéta, atteignent leur maximum au mois de septembre, quelle que soit la période. Les stations de Parakou, de Natitingou, présentaient leur maximum en septembre durant la normale 1931-1960. En revanche, durant la période 1961-1990, les maxima se produisent en août avec des totaux inférieurs par rapport à ceux de la période 1931-1990. **Au total, l'étude comparative des régimes pluviométriques moyens en milieu soudanien au Bénin montre un déplacement du pic de la saison pluvieuse.** Le bassin du Niger au Bénin n'est pas seulement affecté par une baisse significative de la pluviométrie, mais il connaît un rétrécissement de la saison pluvieuse accompagné par un glissement du maximum pluviométrique. Dans le nord-ouest par exemple, le régime pluviométrique à Boukoumbé est caractérisé par une diminution significative des totaux mensuels : Huit mois sur douze voient leurs totaux fléchir. A Natitingou, la baisse des totaux mensuels de septembre et novembre est significative à 1%. A Djougou, une diminution significative au seuil de 5% de la pluviométrie s'observe en septembre. A Parakou, dans le sud du Borgou, l'étude comparative du régime pluviométrique sur les normales 1961-1990 et 1931-1960 révèle une différence positive de son maximum pluviométrique en août. Cette différence est significative au seuil de 5%. A la latitude de la ligne de partage des eaux à Bembéréké, (10°N) en milieu soudanien, la variabilité est marquée par un recul de la pluviométrie. Aucun mois ne connaît d'augmentation des précipitations, à l'exception du mois d'avril. Le mois de septembre enregistre une diminution significative au seuil de 1%.

1.2.3. Bilan de la variabilité des régimes pluviométriques au Bénin 1961-1990-1931-1960

L'étude des régimes pluviométriques moyens sur la période 1931-1990 montre une importante variabilité des totaux mensuels moyens et une modification des rythme des précipitations. La petite saison des pluies en milieu béninien est caractérisée par une baisse du total pluviométrique significative au seuil de 1% au cours de la période 1961-1990 (Tableau 7). **Cette saison est marquée par une mobilité du maximum pluviométrique qui est passé d'octobre à septembre.**

La petite saison sèche est caractérisée par une hausse de 29% de sa pluviométrie durant la période 1961-1990 : l'arrêt momentané de la saison des pluies au sein de la saison de mousson tend à disparaître. La petite saison pluvieuse tend à s'unifier avec la grande saison des pluies.

En milieu soudanien, le coeur de la saison des pluies et surtout le mois de septembre sont marqués par une diminution significative au seuil de 1% des hauteurs pluviométriques durant la période 1961-1990.

Au total, la normale 1961-1990 plus que marquée par une tendance à la diminution de la pluviométrie, est surtout caractérisée par une réduction manifeste de la durée de la petite saison pluvieuse en milieu béninien et de l'unique saison des pluies en climat soudanien (Tableau 8).

STATIONS	J	F	M	A	M	J	Jt	At	S	O	N	D	
CLIMAT BENINIEN													
				GSP				PSS		PSP			
ABOMEY	-		-	+	-	+	+	+	+	-	-	-	
ADJOHOUN	-	-	-	+	+	+	+		+	-		+	
ALLADA	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	
APLAHOUE	-	-	-	+	-	+	+	+	-			-	
BOPA	-	-	+	+	-	+	+	+	+	-		-	
GRAND-POPO	-	-	-	+	-	+	+		+		-		
POBE	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	-	
OUIDAH	-	-	-	+	-		+	+	+	-	-	-	
PORTO-NOVO	-	-	-	-		+	+		+	-	-	+	
SAKETE	-	-	-	+	-	+	+	+	+	-	-	+	
TOFFO	-		-	-	-	+	+		+	-	-	-	
ZAGNANADO	-	-	-	+	-	+	+		+	-		-	
SAVE	-	-	-	-		-	-	+	-	-	-	-	
SAVALOU	-		-	-	-	+	+	+	+	-	-	-	
CLIMAT SOUDANIEN													
				USP									
KANDI		+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	
PARAKOU	+	-		+		+	+	+		-	-	+	
BEMBEREKE	-	-	-	+	-	-	-	-			-	-	
CLIMAT SOUDANIEN DANS L'ATAKORA													
				USP									
DJOUGOU	-	-	-	+	+	-	+	+		-		-	
NATITINGOU	-	-	+	+	-	-	+	+		-	-	-	
BOUKOUMBE		-	+	-	-	-	+		-	-	-	-	
TANGUIETA	-	-	+	-	-	-		-	-	-	-	-	

Tableau 8 : Variabilité des régimes pluviométriques moyens au Bénin entre les périodes 1961-1990 et 1931-1960. (La significativité des résultats est testée aux seuils de 1 et 5 % selon le Test en t de Student).

	Significativité au seuil de 5%
	Significativité au seuil de 1%
GSP	Grande Saison des Pluies, Mousson d'été
PSS	Petite Saison Sèche, ou Récession d'Août
PSP	Petite Saison des Pluies
USP	Unique Saison des Pluies

Dans l'ensemble, on peut dire qu'au Bénin il existe un « problème » climatique qui se traduit au pas de temps mensuel par une modification du régime pluviométrique. Cependant, cette baisse de la pluviométrie observée dans les séries mensuelles et saisonnières ne doit pas, en principe, constituer un handicap pour le développement de la culture du maïs au cours de sa période végétative car les totaux mensuels moyens sont supérieures à 100 mm, seuil pluviométrique recommandé pour cette culture. **Donc au niveau du potentiel pluviométrique saisonnier, le Bénin se prête bien à la maïsiculture.** Mais la variabilité dans le temps et dans l'espace de la ressource pluviométrique et des autres paramètres climatiques ajoutées aux diverses caractéristiques des faciès pédologiques peuvent être dommageables et modifier les rendements espérés. Toutefois, l'étude comparative des régimes pluviométriques à l'échelle stationnelle permet mal de faire ressortir les modes de variabilité à l'échelle mensuelle. Or, ceci est important et peut servir d'outil d'aide à la décision pour les dates de semis de début de saison agricole.

1.3. Les modes de variabilité intermensuelle au Bénin

L'importante variabilité qui marque les régimes pluviométriques mérite d'être affinée par l'étude de la variabilité au pas de temps intermensuel à des fins de climatologie appliquée. Elle permet de tenir compte de la persistance d'un mois sur l'autre des anomalies de précipitations qui pourrait compromettre la culture du maïs, en deuxième saison notamment. Cette approche vise aussi à contrôler la structuration de la saison des pluies.

Le caractère complexe des régimes pluviométriques et la configuration du réseau météorologique ne permettent pas de dégager de façon immédiate les différents modes de variabilité au pas de temps mensuel à l'échelle de tout le Bénin. Plusieurs publications ont déjà abordé la variabilité pluviométrique au pas de temps intermensuel au Bénin. Il s'agit de Cornevin (1960), Mondjannagni (1969), Hounkannounoun (1979), Bokonon-Ganta (1984), Boko (1988), Houssou (1991). Ces études n'ont été faites qu'à l'échelle stationnelle et ne montrent pas l'organisation régionale des modes de variabilité climatique. **Dans leurs méthodologies respectives, elles n'ont jamais pris en compte, dans l'espace et**

dans le temps et de façon simultanée, les deux types de régimes pluviométriques du Bénin pour faire ressortir la variabilité intermensuelle.

L'étude de la variabilité intermensuelle pose un problème méthodologique car l'extension latitudinale confère au pays des régimes pluviométriques variés : bimodal au sud, de transition au centre et unimodal au nord. Les saisons n'ont pas les mêmes durées et cependant l'analyse doit se faire sur les mois pluvieux, car analyser des variations pluviométriques durant la saison sèche n'a pas de sens. Or, si les mois secs dans au moins une des régions du Bénin sont éliminés, on occulte alors totalement les variations pluviométriques au cours de ces mêmes mois dans les autres régions (non sèches) du Bénin. L'analyse des cumuls annuels libère de cette contrainte, mais pour autant il n'est pas aussi évident que les configurations spatiales soient les mêmes toute l'année. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé une variante de l'EEOF (Extended Empirical Orthogonal Function Analysis) encore appelée ACP étendue.

L'EEOF a été déjà utilisée par Barnett (1977) pour dégager les modes spatiaux de variabilité des champs de vents du Pacifique et leur évolution récurrente dans le temps. Weare (1977) a identifié, à partir de cette technique, les relations entre les températures de surface océanique et la mousson indienne. En 1982, le même auteur a fait usage de cette méthode pour montrer que le phénomène El Niño était étroitement lié aux températures de surface de l'océan Pacifique à partir des mois de décembre. Richman et Walsh (1981) ont démontré que l'EEOF reste une méthode d'usage assez simple qui permet de dégager les modes de variabilité des phénomènes physiques à un pas de temps intermensuel. L'EEOF permet de prendre en compte à la fois les liens (corrélations) entre stations (structure spatiale) et entre les mois (structuration saisonnière). Elle permet aussi d'éliminer les mois secs dans chaque station individuellement. La matrice de données analysée comprend en tant que variables les séries pluviométriques mensuelles (hors mois secs) de chacune des stations (Tableaux 9 et 10).

Tableau 9 : Matrice de départ

ACP CLASSIQUE					
Ans	Mois	Stations 1 2 3 4 5			
		15 20 etc....			
1931	1				
"	2				
"	3				
"	4				
"	"				
"	12				
"	1				
1990	1				

Tableau 10 : Matrice finale

EEOF ou ACP ETENDUE								
Ans	Station1				Station2			
	m1	m2	m.	m12	m4	m5	m6	m11
1931								
1932								
1933								
1934								
"								
"								
1990								

Pour le Bénin, nous appliquons l'EEOF sur 60 ans (1931-1990) pour faire ressortir la cohérence des stations du Bénin et dégager les différents modes de variabilité pluviométrique au pas de temps intermensuel à partir de l'effet de persistance.

Nous générons à partir de la matrice de départ (Tableau 9) une autre matrice de données qui intègre à la fois dans le temps et dans l'espace toutes les stations septentrionales et méridionales (Tableau 10). Cette matrice est soumise à une ACP classique avec rotation selon la méthode Varimax. Les corrélations utilisées décrivent à la fois les liens dans le temps et dans l'espace (corrélations entre stations pour un même mois; corrélations entre un mois x et un mois y pour une même station). Cette méthode permet d'extraire les composantes qui décrivent à la fois la structuration spatiale des variations interannuelles et leur structuration saisonnière. Nous avons retenu après rotation et à partir du scree-test cinq composantes. D'une façon générale, on note un mélange des modes de variabilité à cause du caractère anisotrope du domaine d'étude avec beaucoup plus de stations au sud, comme nous l'avons souligné dans la méthodologie générale.

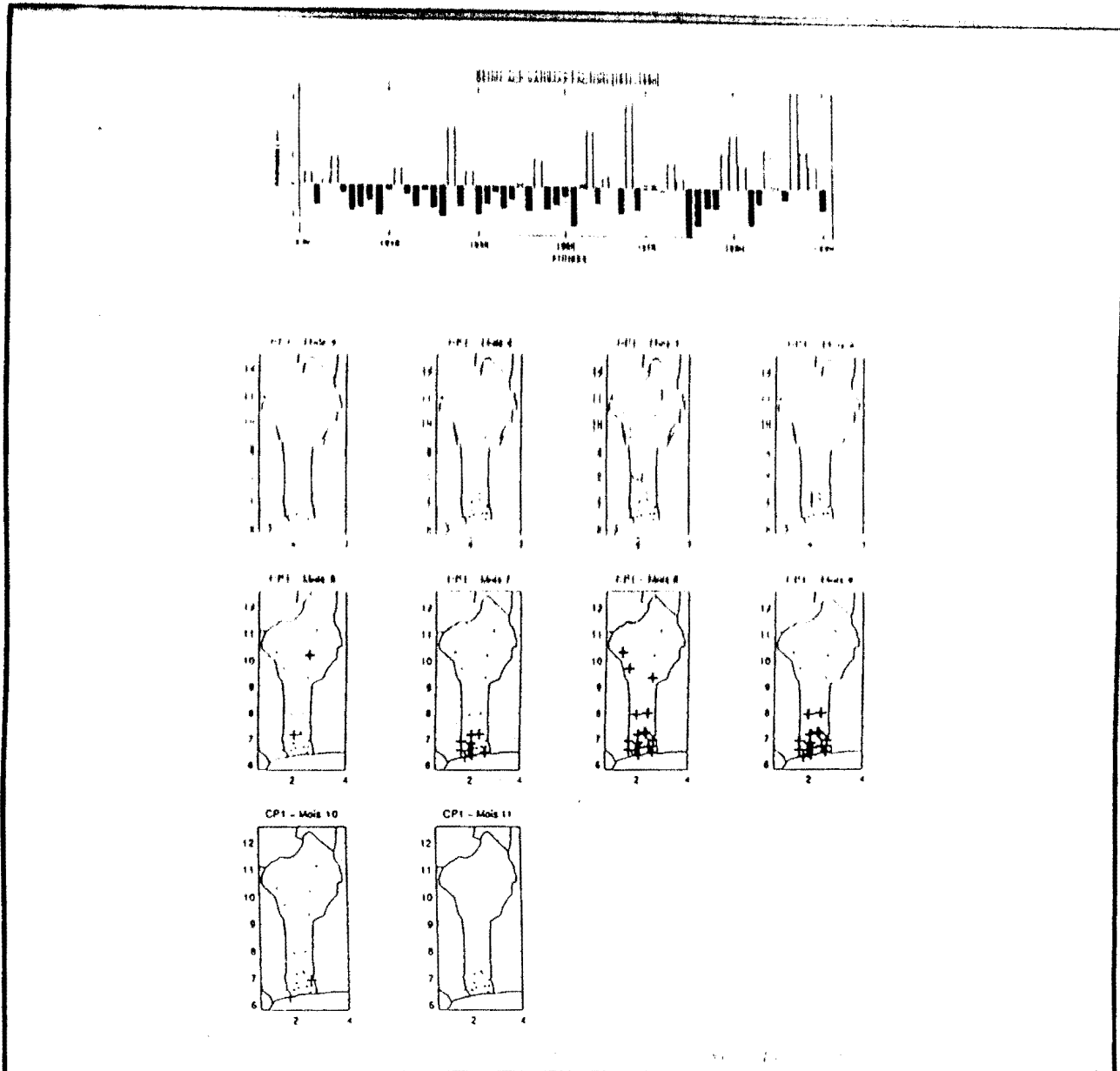


Figure 28 : Premier mode de variabilité intermensuelle identifié au Bénin à partir des EEOF sur la période 1931-1990 ; CP1 = 21% de la variance. Les signes + (en gras) montrent les corrélations positives significatives. Les signes + montrent les corrélations positives non significatives. Les petits cercles montrent les corrélations négatives non significatives. Les doubles cercles montrent les corrélations négatives significatives.

Par ailleurs, les quatrième et cinquième composantes, bien qu'expliquant au total 17% de la variance, ne représentent pas de véritable cohérence régionale. Elles ne seront donc pas présentées.

- **Le mode 1 appelé Méridional 1** de l'EEOF décrit une variation climatique qui se manifeste principalement dans le sud du Bénin (Figure 28). Exprimant 21% de la variance, il montre que c'est cette partie du Bénin au cours des mois de juillet,

août, septembre, qui présente les structures spatiales les plus cohérentes, car les anomalies d'une station sont reliées à celles d'une autre, et sont plus persistantes dans le temps. De juillet à septembre, toutes les stations du sud du Bénin présentent des variations pluviométriques interannuelles assez semblables, avec par exemple des anomalies positives en 1947, 1963, 1968, 1980, et 1987. La chronique temporelle associée au mode 1 est marquée par quelques anomalies positives et de nombreux anomalies négatives. Les anomalies positives repérées sur cette chroniques coïncident avec celles détectées sur l'équateur atlantique de juillet à septembre en 1947, 1949, 1963, 1968, 1973, 1984 et 1987 par Moron (1994). D'une façon générale, les pluies sont faibles sur la période 1931-1960.

- **Le mode 2 appelé Méridional 2** exprime 14% de la variance et identifie la durée de la grande saison des pluies, sans persistance véritable du signal d'un mois sur l'autre. Celui-ci ne s'observe qu'en avril et surtout juillet, mais de façon peu stable. Sur le plan spatial, le mode Méridional 2 montre que dans tout le centre et le sud du Bénin, les mois de juillet des années 1935, 1963, 1968 et 1975 ont connu des anomalies positives exceptionnelles (Figure 29).

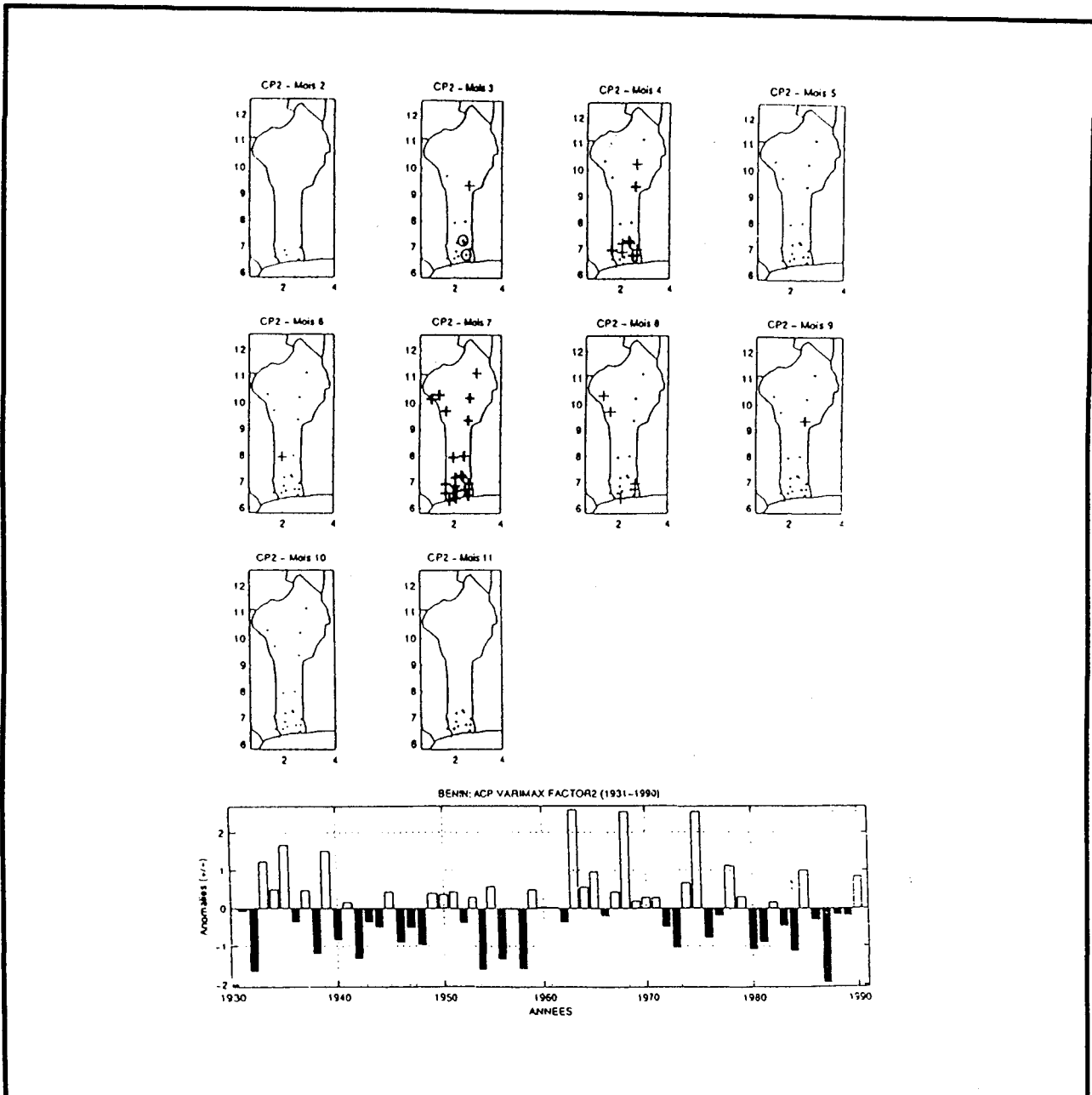


Figure 29 : Le mode 2 de la variabilité pluviométrique intermensuelle au Bénin : les EEOFs sur la période 1931-1990 ; (CP2 = 14% de la variance). Les signes + (en gras) montrent les corrélations positives significatives. Les signes + montrent les corrélations positives non significatives. Les petits cercles montrent les corrélations négatives non significatives. Les doubles cercles montrent les corrélations négatives significatives.

● **Le mode 3**, avec 12% de la variance, montre surtout une persistance des anomalies au cours de la petite saison pluvieuse, avec un glissement du signal du nord (septembre) au sud (novembre) du Bénin. La chronique temporelle associée à cette troisième composante montre qu'au cours des mois d'octobre et de novembre, le champ pluviométrique est marqué par des anomalies pluviométriques positives de 1951 à 1963 (Figure 30). De 1964 à 1967 et de 1971 à 1990, les mois d'octobre

et de novembre sont confrontés à des déficits pluviométriques sévères et récurrents (Figure 30). Au total, durant cette saison, les précipitations sont caractérisées par une forte cohérence intra-saisonnnière et par une persistance interannuelle des anomalies.

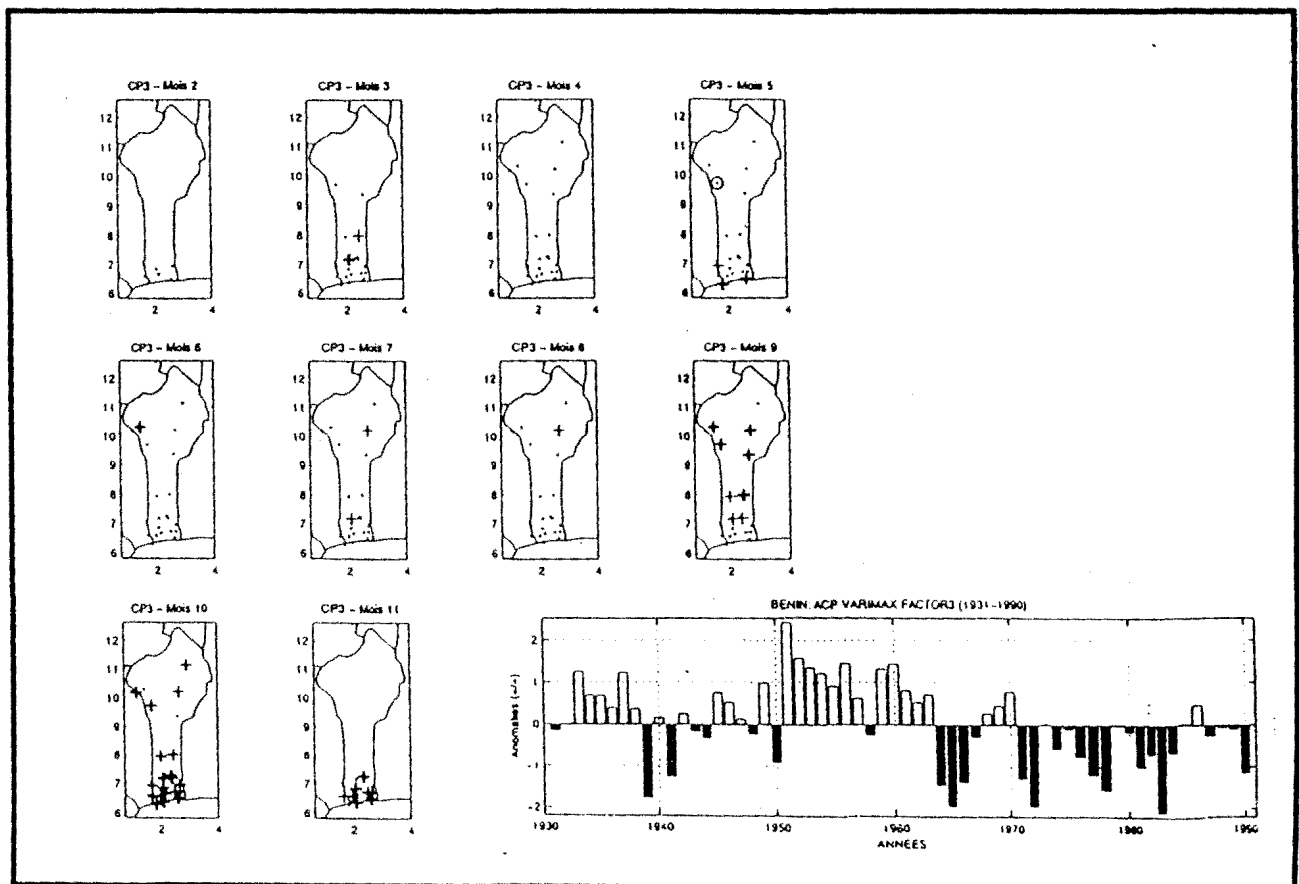


Figure 30 : Le mode 3 de la variabilité pluviométrique intermensuelle au Bénin : les EEOFs 1931-1990. (CP3 = 12% de la variance). Les signes + (en gras) montrent les corrélations positives significatives. Les signes + montrent les corrélations positives non significatives. Les petits uniques cercles montrent les corrélations négatives non significatives. Les doubles cercles montrent les corrélations négatives significatives.

SYNTHESE

En conclusion, la variabilité intermensuelle des précipitations est surtout marquée par le mode 1 qui décrit les variations interannuelles communes aux mois de juillet, août et septembre dans le sud du Bénin.

Le mode 2 décrit essentiellement la variabilité du mois de juillet et le mode 3 exprime la variabilité des mois d'octobre et de novembre dans le centre et le sud du pays avec une forte persistance interannuelle des anomalies.

A l'échelle intermensuelle, sur la période 1931-1990, les signaux les plus importants sont localisés surtout dans le sud avec une forte persistance à partir des mois de juillet, août et septembre, et au cours de la seconde saison des pluies (octobre- novembre). **Cependant, on note un artefact en raison de la forme rectangulaire du domaine et surtout du caractère anisotropique de l'information dû à la densité du réseau pluviométrique des stations dans le sud du Bénin.**

1.4. La variabilité relative au Bénin

La variabilité relative permet d'appréhender l'ampleur de la variabilité à des fins agronomiques car les bilans hydriques saisonniers sont établis à l'échelle de la parcelle avant leur spatialisation.

Pour le sud du Bénin, l'évaluation du degré de variabilité à l'échelle stationnelle entre 1931-1960 et 1961-1990 est réalisée aux pas de temps annuel et saisonnier. Le pas de temps annuel a été retenu car, dans ce milieu à régime bimodal, il pleut presque toute l'année. Pour comparer le degré de variabilité entre les deux séries, nous utilisons le test "F" de Fisher-Snedecor. Cependant, il se pose un problème méthodologique car une étude comparative du degré de variabilité à l'aide de ce test nécessite une distribution normale des individus de l'échantillon. Pour résoudre ce problème, nous normalisons les moyennes annuelles et saisonnières de toutes les stations. Le test "F" de Fisher appliqué aux données normalisées des deux séries montre qu'il existe des différences de variabilité, quoiqu'elles ne soient pas significatives sur toutes les stations (Tableau 11).

1.4.1. Situation au pas de temps annuel dans le Bas-Bénin

Sur le littoral, la variabilité du cumul annuel des précipitations est comprise entre 23 et 25% pour la période 1931-1960. En revanche, elle est comprise entre 33 à 38 % pour la période 1961-1990. Cette différence est significative au seuil de 5% (test de Fisher-Snedecor).

Pour la période 1931-1960, la variabilité sur les plateaux de terre de barre est faible et se situe entre 17 et 26%. Seule la vallée de l'Ouémé connaît une plus forte variabilité, avec 32%. Cependant, au cours de la période trentenaire 1961-1990, sur les plateaux du Bas-Bénin, région jadis propice à la culture du maïs, les coefficients de variation sont compris entre 22 et 35%. Le plateau d'Allada qui connaît la plus faible variabilité pluviométrique du Bas-Bénin avec 15 à 20% sur la normale 1951-1980 (Boko, 1989), a connu une nette augmentation du degré de variabilité pour la période 1961-1990 se situant entre 21 et 28%. La variabilité des pluies a donc récemment augmenté en climat béninien.

A la latitude de la dépression médiane de la Lama, de 1931 à 1960, la variabilité est de l'ordre de 18% à 19% (Toffo et Pobè). Par contre, durant la période 1961-1990, on note une nette augmentation du degré de variabilité de l'ordre de 25% pour Toffo et 23% à Pobè. Au Bénin central (8° de latitude nord), les coefficients de variation sont marqués par des grandes différences significatives au seuil de 5% : 28% à Savalou mais 45% à Savè.

Au pas de temps annuel, d'importantes augmentations significatives de la variabilité ont marqué l'évolution du climat sur les zones littorales et sublittorales.

1.4.2. La variabilité relative saisonnière au Bénin

Au sud du Bénin, au cours de la grande saison des pluies, la variabilité a augmenté de façon positive au seuil de 5% sur la côte et à l'intérieur des terres sur les plateaux (Bopa, Aplahoué, Porto-Novo) (Tableau 11).

Au cours de la période 1961-1990, la petite saison sèche dans le Bénin méridional est caractérisée par une augmentation des totaux pluviométriques qui tend à masquer le régime pluviométrique bimodal. Cette augmentation des totaux pluviométriques est doublée d'une augmentation de la variabilité entre les périodes 1931-1960 et 1961-1990. Seules les stations de la dépression de la Lama, des plateaux du sud et du littoral connaissent des différences de variance significatives aux seuils de 1% (Tableau 11).

Au pas de temps saisonnier, dans le Bénin central, c'est à Savè uniquement qu'on enregistre une différence significative au seuil de 1% entre les degrés de

variabilité des séries 1931-1960 et 1961-1990. Cette différence de variabilité ne concerne que la petite saison des pluies.

La même analyse appliquée aux stations du Nord-Bénin montre qu'il existe des différences dans les degrés de variabilité mais non significatives sur quelques stations (résultats non présentés).

	Pluies annuelles	Grande saison des pluies	Petite saison sèche	Petite saison des pluies
	"F" Fisher	"F" Fisher	"F" Fisher	"F" Fisher
	1%	1%	1%	1%
Abomey	+	+	+	+
Adjohoun	-	-	+	+
Allada	+	+	-	-
Aplahoué	+	+	+	-
Bopa	+	+	+	+
Gd-Popo	+	+	+	+
Ouidah	+	+	+	+
Pobè	+	+	+	+
Porto-Novo	+	+	+	+
Sakété	+	+	+	-
Toffo	+	+	+	+
Zagnanado	+	+	+	-

Tableau 11 : Différences entre les variances de 1931-1960 et de 1961-1990. En grisé, différence de variance significative au seuil de 1% selon le test de Fischer. Le signe + indique une augmentation de la variance. Le signe - indique une diminution de la variance.

L'analyse des variances montre qu'il existe une forte variabilité aussi bien à l'échelle de l'année qu'à l'échelle de la saison et de la station sur les périodes 1961-1990 et 1931-1990.

Le climat béninien, durant le trentenaire 1931-1960 a été marqué par des coefficients de variation modestes par rapport à la normale 1961-1990 durant laquelle les coefficients de variation annuels et saisonniers sont élevés et compris entre 25 et 40%. Les stations des plateaux du nord sont affectées par de faibles coefficients de variation par rapport aux stations des plateaux du sud. La forte variabilité des stations littorales s'explique par la conjugaison des contraintes océaniques et atmosphériques. Le sud du Bénin connaît une influence maritime et une remontée périodique d'upwellings pendant la récession d'août au coeur de la saison d'été boréal. Ces upwellings rafraîchissent les températures de surface océanique et entraînent d'une part la faiblesse de l'évaporation et d'autre part la stabilisation verticale dans les basses couches.

En milieu soudanien, les différences de variabilité sur les deux normales existent, mais sont non significatives dans le nord-est. Par contre, dans la région de l'Atakora, la variabilité augmente significativement au seuil de 5% dans les sous-régions de Djougou et de Boukoumbé. En somme, le Bénin connaît depuis les années 60 une forte variabilité pluviométrique accentuée par des poches de sécheresse durant la saison culturale et le déroulement des stades végétatifs de la culture du maïs.

1.5. La variabilité temporelle intra-saisonnière des séquences sèches au Bénin

La quantification de la variabilité et du déficit pluviométrique donne une idée de la sécheresse sans en montrer l'organisation intrasaisonnière. Il est indispensable de faire un diagnostic de la sécheresse afin de déceler les périodes d'absence ou de rareté de pluie nécessaire pour la croissance des plantes au cours des saisons pluvieuses. Cette démarche s'inscrit dans la stratégie d'évaluation des risques de sécheresse.

1.5.1. Justification et concept de sécheresse

Le phénomène de sécheresse a toujours retenu l'attention des hommes à cause de son ampleur, de son intensité et de ses conséquences. En Afrique, les résolutions des deux conférences "Drought in Africa" en 1973 et "Drought and Hunger in Africa : denying famine a future" sur la sécheresse en Afrique de l'ouest en 1987, soulignent la nécessité d'analyser les séries historiques des données météorologiques pour mieux comprendre la durée des périodes sèches, leur fréquence et leurs probabilités (Sivakumar, 1991). De ce point de vue, connaître les sécheresses en vue d'une meilleure gestion des écosystèmes et de la prévision des rendements devient une nécessité. Toutefois, le phénomène de sécheresse est très complexe et définir ce concept n'est pas aisé. Ainsi, la définition de la sécheresse varie selon la méthodologie, les pas de temps et les objectifs. Définir des périodes de sécheresse ou des séquences sèches est très relatif, car il n'existe pas véritablement de norme académique internationale dans la mesure où les conditions géographiques et atmosphériques telles que les états de surface, la tension de vapeur, la nébulosité etc..., diffèrent d'une région à une autre. Il existe alors autant de définitions que d'auteurs. Les périodes d'installation et de fin de sécheresse sont souvent difficiles à préciser, par manque d'une distinction nette entre période sèche et sécheresse (Glantz, 1987).

Palmer (1965) a proposé des indices de sécheresse à partir des valeurs hydrologiques intégrant les paramètres tels que l'humidité du sol, le ruissellement, les précipitations et l'évapotranspiration. Crowe (1971) considère comme période sèche, une séquence d'au moins 15 jours consécutifs sans pluie journalière d'une hauteur de 1 mm durant la saison pluvieuse. Il définit la sécheresse absolue comme la période qui débute le 16^{ème} jour consécutif sans une hauteur de pluie journalière équivalente à 0.25 mm. Hills et Morgan (1981), se basent sur la distribution *gamma* du temps d'attente jusqu'au prochain jour humide au cours duquel la pluviométrie est supérieure à un taux d'évaporation déterminé. Rasmusson (1987) se base sur les écarts normalisés par rapport à la moyenne des séries pluviométriques de l'Afrique de l'ouest pour déterminer des périodes de sécheresse. Dans ces définitions du concept, **la pluviométrie demeure le meilleur indicateur de la sécheresse ou de**

séquences sèches. Cette même remarque a été faite par Gibbs et Maher (1967) qui ont fait des prévisions à court terme sur l'installation de la sécheresse en Australie. D'ailleurs, Nicholson (1980, 1981, 1983), s'est servi de la fluctuation du paramètre pluviométrie pour décrire les sécheresses climatiques interannuelles en Afrique de l'ouest dans le temps et dans l'espace. La plupart de ces critères de détermination de la sécheresse climatique ont été appliqués au Sahel.

On entend par sécheresse climatique, la probabilité d'avoir une pluviosité insuffisante ou quasi nulle au cours d'une saison pluvieuse. Or, la pluviosité conditionne le succès de la campagne agricole. Dans ce cas, le risque de sécheresse climatique induit le risque de perte de la totalité ou d'une partie de la récolte (Eldin, 1989). Les publications de la GTZ (1990) montrent aussi qu'en milieu de savane de l'Afrique de l'ouest, le risque de périodes prolongées de sécheresse pendant la période de croissance des plantes existe toujours, ce qui peut affecter considérablement les rendements. D'où l'importance de l'étude de séquences sèches au cours de la campagne agricole à des fins de planification. Le critère retenu pour définir une période de sécheresse est : **deux décades consécutives avec un total pluviométrique inférieur à 30 mm.** Steiner (1990) l'a utilisé pour mettre en évidence la fréquence des périodes de sécheresse à Nyankpala, au Ghana, sur la normale 1953-1982, et a proposé une adaptation des dates de mise en place des cultures par rapport à la sécheresse climatique. De toutes les définitions, nous retiendrons celle proposée par Steiner (1990), car le Bénin est localisé en milieu de savane, dans la diagonale du déficit pluviométrique, comme le Ghana.

1.5.2. Etude comparée des séquences sèches sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au Bénin.

La quantification comparée de la variabilité des séquences sèches a été réalisée en terme de fréquences. Les résultats sont exprimés en pourcentages. Les pourcentages représentent le nombre total de séquences sèches rapporté au nombre d'années et à l'échelle saisonnière. Le pas de temps saisonnier a été choisi car des fréquences élevées de séquences sèches au cours de la saison sont préjudiciables à la culture du maïs selon certaines phénophases.

Au sud du Bénin, 1931-1960, reconnue comme normale humide par l'OMM, est marquée par des fréquences relatives élevées de séquences sèches au cours des deux saisons des pluies. Le début de la grande saison des pluies est caractérisé par des séquences sèches fréquentes (entre 12 et 60%). Les périodes de sécheresse les plus fréquentes sont enregistrées sur le littoral au sud de la dépression médiane de la Lama (Grand-Popo, 50%, Ouidah, 37% et Bopa, 57%). Dans cette dépression, les fréquences sont généralement faibles, de l'ordre de 12%. Sur les plateaux, les fréquences sont moins importantes et varient entre 20 et 40%. En mai-juin, au cœur de la grande saison des pluies, les fréquences se situent entre 12 et 30% dans le sud-ouest : Grand-Popo, 30% et Bopa, 27%. Au sud-est du pays, les séquences sèches sont rares. La fin de la grande saison des pluies est marquée partout par des fréquences très élevées des séquences sèches, allant de 40 à 90%. En somme, le mois de juillet est généralement sec sur la plupart des stations.

Le début de la petite saison des pluies connaît de faibles fréquences de séquences sèches sur la majeure partie des stations. En revanche, on enregistre dès la mi-octobre une forte fréquence des périodes de sécheresse allant de 40 à 90%. **Durant la période 1931-1960, les risques de sécheresse sont fréquents surtout au début de la grande saison des pluies et à la fin de la saison de mousson d'été. Cependant, ce phénomène de sécheresse est aussi important à la fin de la petite saison des pluies.**

En revanche, le début de la grande saison des pluies de la période 1961-1990 connaît peu de séquences sèches, avec un maximum de 47% à Allada et un minimum de 13% à Pobè et Abomey. Le cœur de la saison de mousson reste humide, les risques de sécheresse sont moins importants que durant la période 1931-1960. De même, la fin de la saison a enregistré de faibles fréquences de poches de sécheresse par rapport à la période 1931-1960. Elles sont de l'ordre de 20 à 70%. Entre 1961-1990, la petite saison des pluies enregistre des fréquences élevées de séquences sèches. Comparativement à la grande saison des pluies, les risques de sécheresse climatique sont très importants, tant au début qu'à la fin de cette saison agricole (60 et 97%).

Cette situation de risque climatique est préjudiciable aux cultures comme celle du maïs qui nécessite au moins 25 mm d'eau pour le démarrage des semis. Les fortes fréquences de périodes de sécheresse enregistrées au début et à la fin de la saison pluvieuse constituent une contrainte à la production agricole. Sachant que le semis du maïs est subordonné à une terre mouillée avec 25 mm d'eau, la fréquence très élevée de séquences sèches au début de la saison crée, d'une part un problème de démarrage des semis, et d'autre part les cultures risquent d'être soumises à un stress hydrique dans la mesure où la répartition de ces séquences sèches est aussi très variable.

L'étude comparative des deux normales souligne une importante variabilité pluviométrique mais plus accentuée sur la période 1961-1990. L'ampleur de cette variabilité récente doit être caractérisée à l'échelle interannuelle.

Section 2. La variabilité interannuelle récente des précipitations (1961-1990)

La caractérisation de la variabilité interannuelle récente des précipitations se justifie par rapport à nos enquêtes de terrain auprès des paysans qui estiment que le climat et les conditions écologiques ont changé ces dernières années. Afin de confirmer ce constat paysan, l'analyse des données pluviométriques de la période 1961-1990 devient incontournable, car l'agriculture béninoise est essentiellement pluviale. L'ampleur de la variabilité interannuelle des précipitations sur cette période sera caractérisée avec des analyses statistiques séparées à cause de la diversité des saisons pluviométriques, de leur articulation et de leur inégale durée dans le sud et dans le nord du Bénin. A partir des ACP sans ou avec rotation de type Varimax, nous mettrons en évidence au pas de temps annuel et saisonnier les structures spatiales de la variabilité au Bénin. Ensuite, nous identifierons l'existence d'une péjoration climatique à partir de l'étude des tendances sur les nombres de jours de pluie (NJP) et les totaux pluviométriques saisonniers par la méthode de Man Kendall et la recherche de la composante cyclique de la variabilité.

2.1. Les structures spatiales de la variabilité au pas de temps annuel de 1961 à 1990

Le diagnostic spatio-temporel des précipitations est réalisé à partir des Analyses en Composantes Principales. Les deux premières composantes issues de l'ACP décrivent 87% de la variance expliquée pour la période 1961-1990. La première composante (CP1) représente à elle seule 78% de la variance et traduit une grande homogénéité. Cette première composante traduit un effet de masse statistique (Figure 31). Du fait de cette caractéristique, les analyses en composantes principales permettant de mettre en évidence les différents modes de variabilité du sud Bénin sont sans rotation sur la matrice de corrélation.

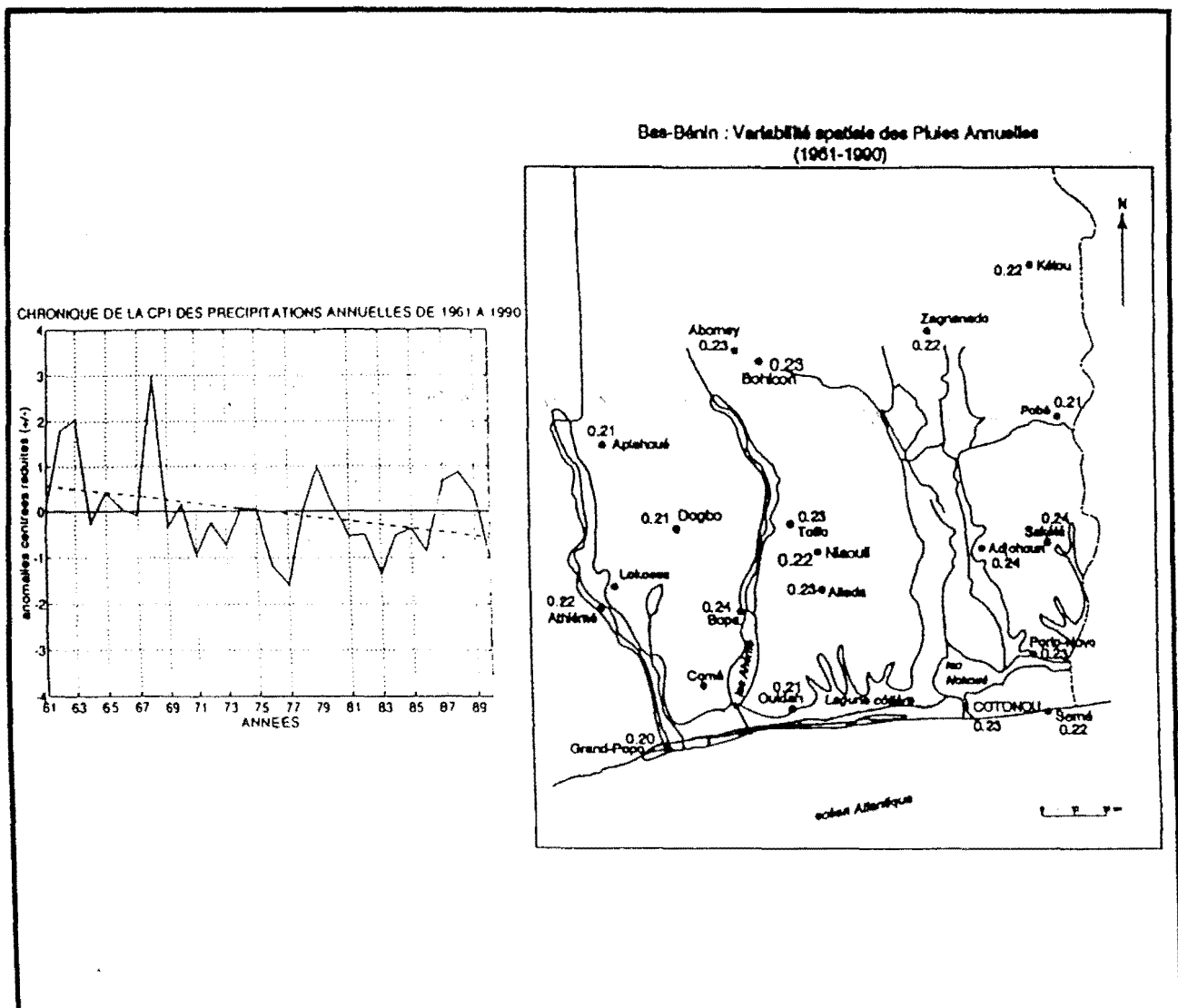


Figure 31 : Variabilité spatio-temporelle au sud du Bénin au pas de temps annuel (1961-1990). (Obtenu par ACP sans rotation ; CP1 = 78% de la variance expliquée).

Les années 1961, 1963, 1968, 1979, 1980 et 1987, ont été excédentaires durant la période 1961-1990. En revanche, les années 1964, 1967, 1969, 1971 à 1973, 1977, 1981 à 1986 ont été globalement des années déficitaires dans le sud du Bénin. 1962, 1963, et 1968 sont les années les plus humides.

On note une tendance à la baisse des précipitations sur la CP1 (Figure 31). Dans le cadre de la sécheresse qui s'est amorcée depuis 1970 dans le sud du Bénin, les années 1977, 1976 et 1983 ont été les plus sèches. La station la plus sèche au cours de ces trente dernières années est Bopa en 1983, avec 419 mm. Quoique 1977 apparaisse globalement comme une année très sèche, elle ne l'est pas partout avec la même intensité. De toutes les années à pluviométrie excédentaire, 1968 apparaît la plus exceptionnelle. L'année 1963 l'a été, mais sur seulement 84% des stations.

La deuxième composante explique 9% de la variance ; c'est une pondération de la première composante avec un dipôle nord-sud (Figure 32).

Il existe une opposition entre les stations des plateaux du nord et les stations du domaine littoral de part et d'autre de la dépression de la Lama. La chronique temporelle associée à la deuxième composante montre que le nord a été moins arrosé que le sud au début de la période (Figure 33). En 1963, 1978, 1984 et 1987, les stations situées au sud de la dépression de la Lama connaissent des anomalies négatives, contrairement aux stations du nord.

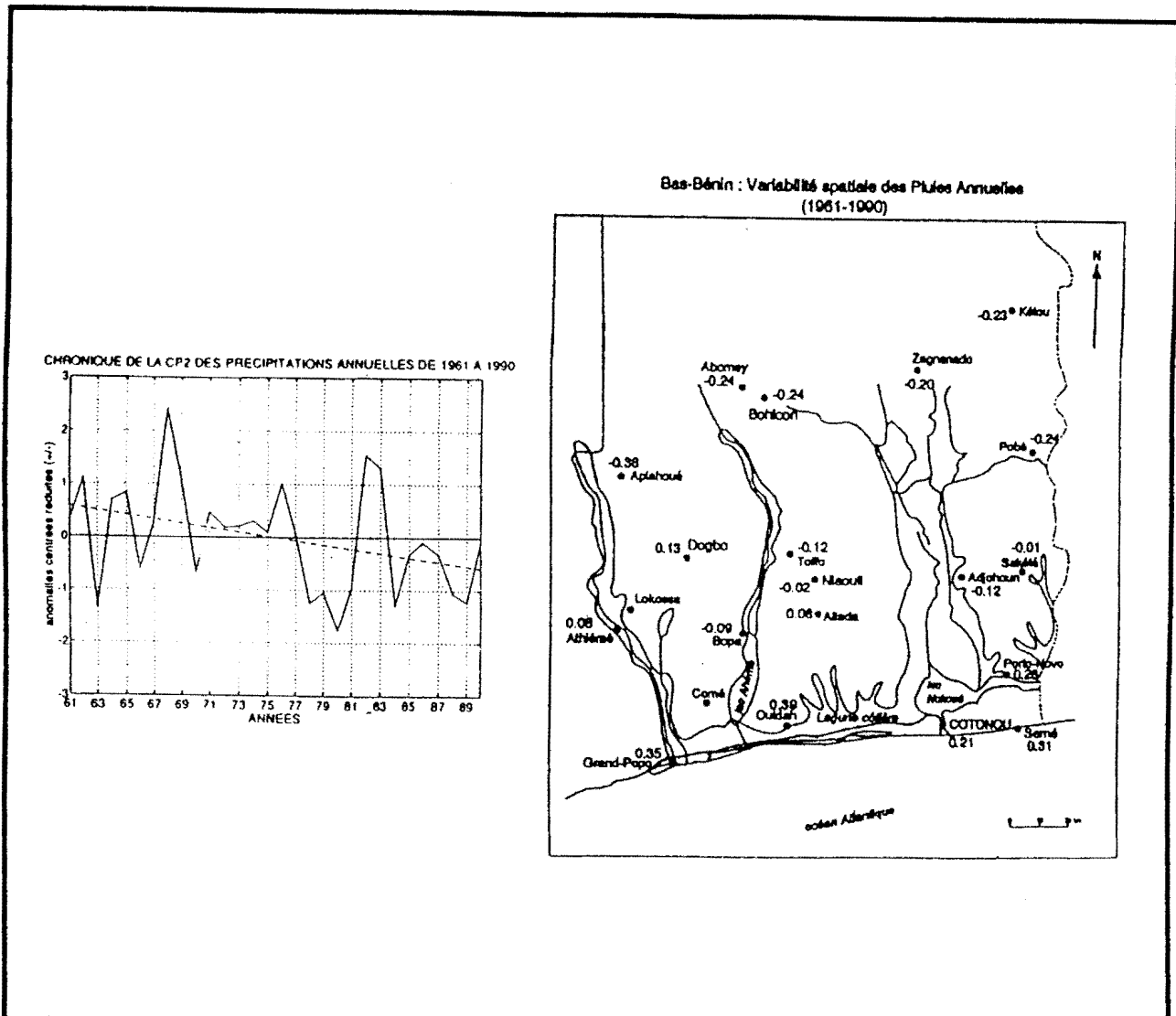


Figure 32 : Variabilité spatio-temporelle des pluies au sud Bénin au pas de temps annuel (1961-1990) (obtenu à partir d'une ACP sans rotation) ; (CP2 = 9% de la variance expliquée).

2.1.2. La variabilité pluviométrique interannuelle des saisons au sud du Bénin

2.1.2.1. Les structures spatiales de la variabilité de la grande saison des pluies du climat béninien

Le premier facteur représente 66% de la variance expliquée et traduit une homogénéité spatiale car toutes les stations réagissent de la même façon. La chronique temporelle associée à la première composante est surtout marquée par

une tendance à la baisse, comme le montre la droite de régression linéaire. Il ressort de l'observation du champ pluviométrique associé à la première composante, que les stations situées au nord de la dépression de la Lama réagissent en phase par rapport à celles du sud. Les années 1962, 1968, 1975, 1979 et 1988 sont les plus excédentaires de la série pluviométrique, tandis que 1971, 1973, 1976, 1977, 1983, 1984 et 1987 apparaissent comme les plus déficitaires (Figure 33).

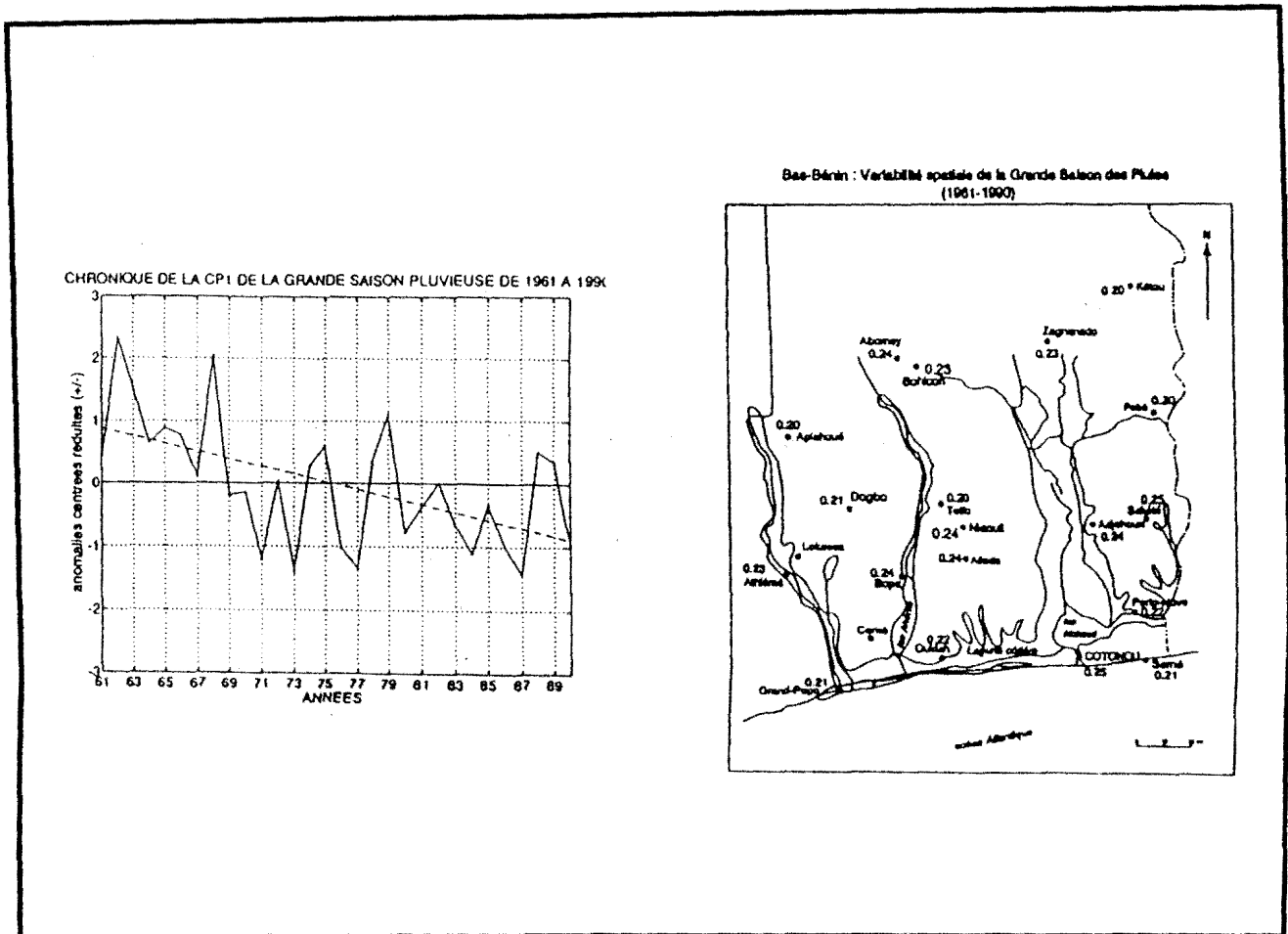


Figure 33 : Structures spatio-temporelles de la variabilité de la grande saison des pluies au sud du Bénin (CP1 = 66% à partir d'une ACP sans rotation).

La deuxième composante, ne représente que 8% de la variance, avec une opposition nord-sud. La discontinuité entre le dipôle coïncide avec la situation géographique de la dépression du Hollidjè. La deuxième composante montre, en 1978 par exemple, un dipôle bien marqué avec des excédents au nord et des déficits au sud. 1968, 1977, 1978, 1982 et 1988 apparaissent comme les années exceptionnelles (Figure 34)

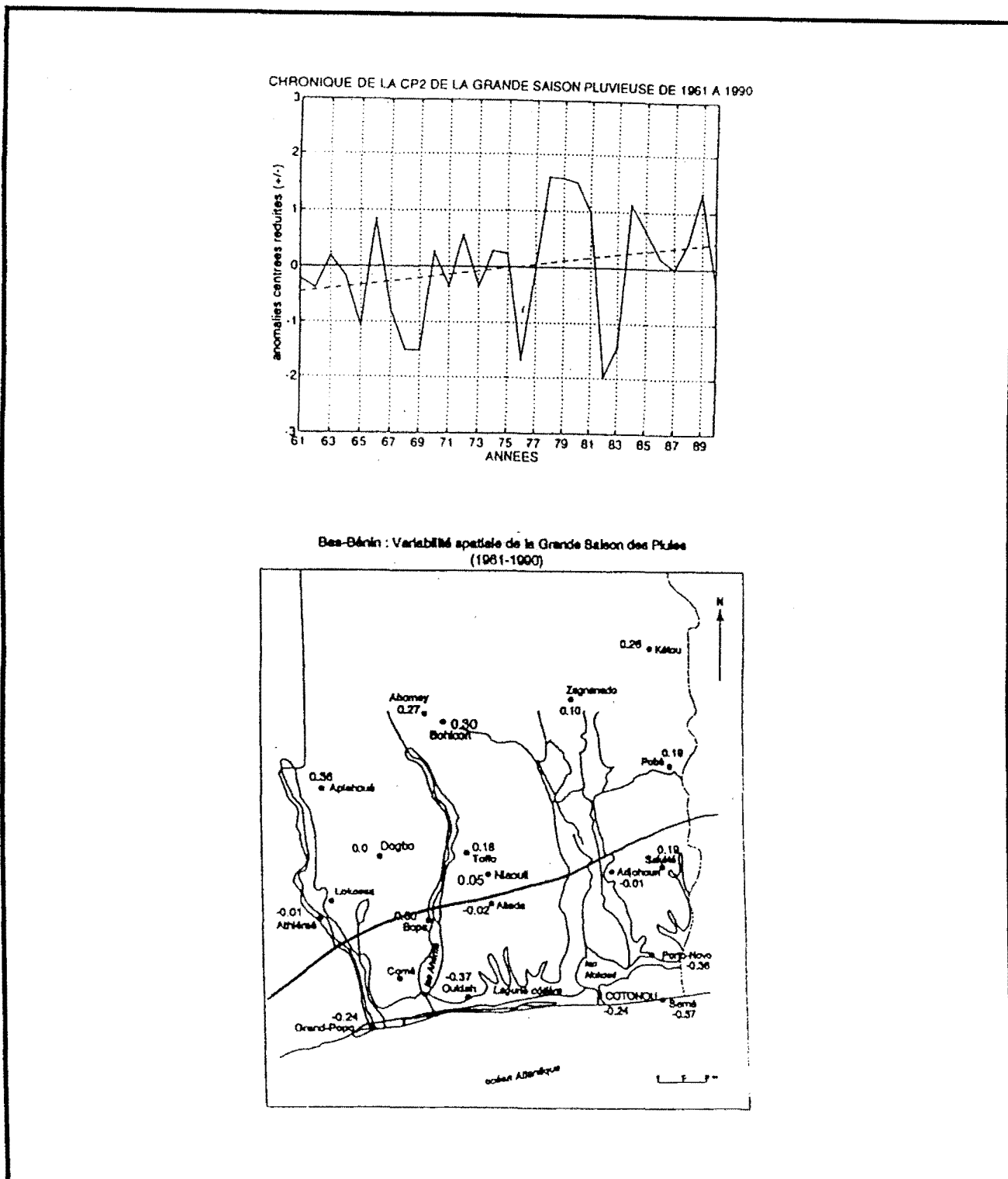


Figure 34: Structures spatio-temporelles de la variabilité de la grande saison des pluies au sud du Bénin ; (CP2 = 8% à partir d'une ACP sans rotation).

2.1.2.2. La variabilité du champ pluviométrique du Bénin méridional pendant la récession d'août

La première composante représente 84% de la variance. Elle est associée à une très forte homogénéité du champ pluviométrique (Figure 35). Cette situation peut s'expliquer par la rareté des perturbations à effets locaux (orages, lignes de grains) durant cette saison. L'allure de la chronique temporelle associée à cette composante décrit une tendance à la hausse non significative depuis 1960, contrairement à celles des deux saisons des pluies (Figure 36). Quelques événements très excédentaires sont enregistrés en 1963, 1968 et 1987. Les anomalies négatives sont beaucoup moins accentuées que les anomalies positives. 1976, 1982, apparaissent comme les années les plus sèches de la période 1961-1990.

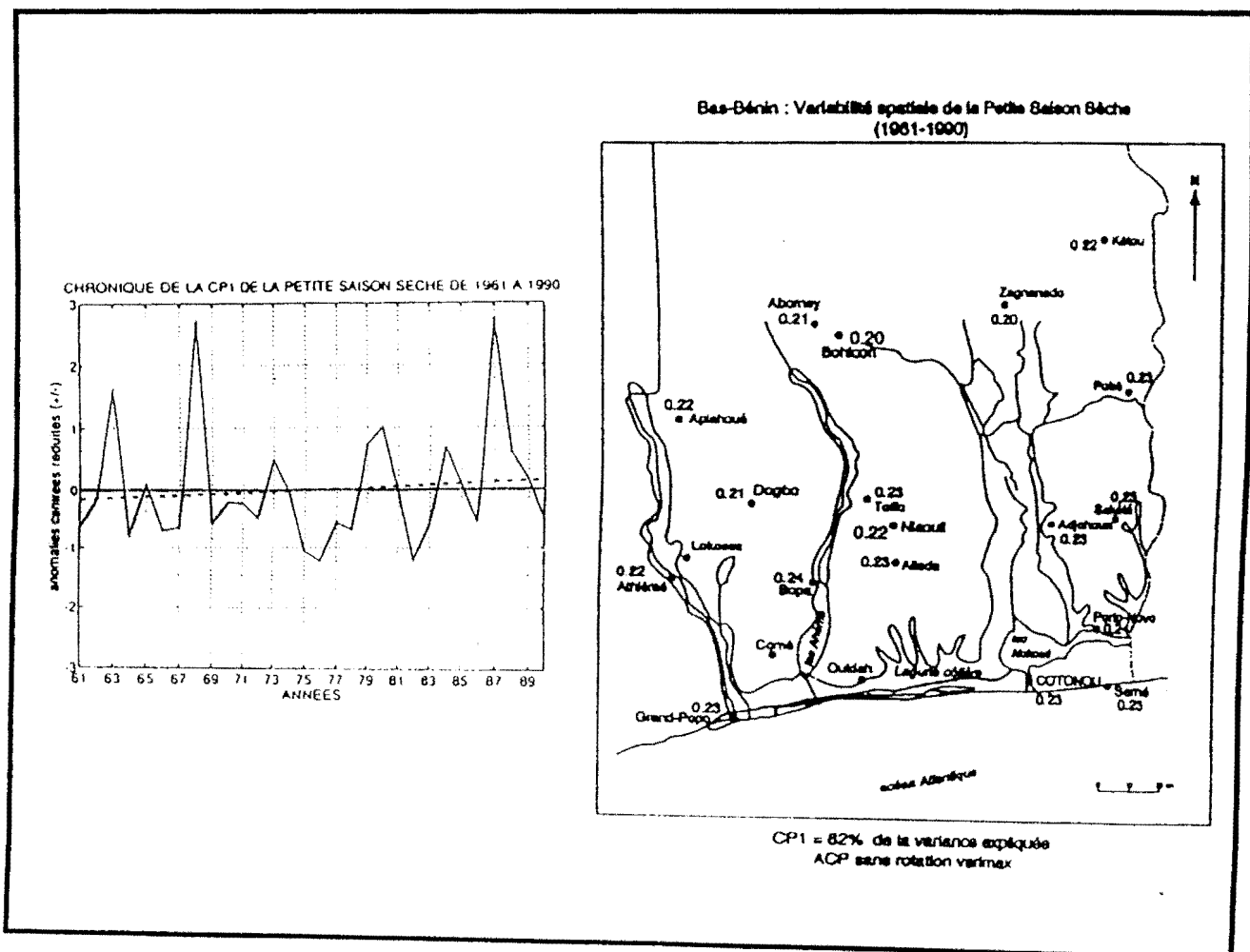


Figure 35 : Structures spatio-temporelles de la variabilité de la récession d'août au sud du Bénin ; (CP1 = 84% à partir d'une ACP sans rotation)

2.1.2.3. Les structures spatiales de la variabilité de la petite saison des pluies au sud du Bénin.

La première composante (CP1) de l'ACP de la petite saison des pluies représente 66% de la variance. La chronique temporelle associée à cette composante montre une tendance à la baisse. 1962 et 1979 se présentent comme les années les plus déficitaires (Figure 36).

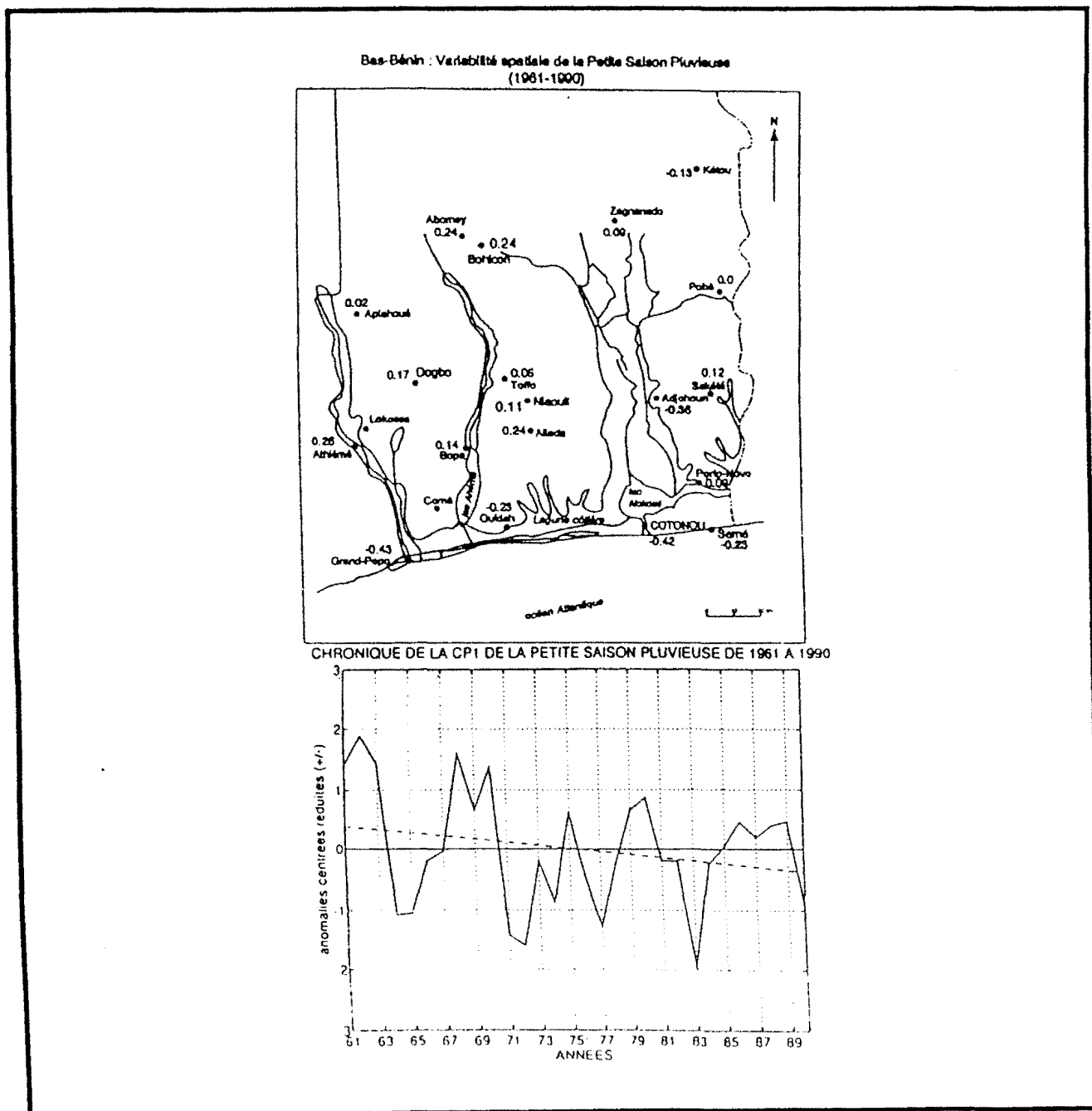


Figure 36 : Structures spatio-temporelles de la variabilité de la petite saison des pluies au sud du Bénin ; (CP1 = 66% à partir d'une ACP sans rotation)

2.1.3. Les modes de variabilité de la saison des pluies du climat soudanien

Pour le nord Bénin, les structures spatio-temporelles ont été mises en évidence à partir d'une ACP avec rotation Varimax sur la matrice de corrélation car, contrairement au sud du Bénin, le champ pluviométrique de ce milieu ne réagit pas avec un effet de masse (Figure 37).

Par rapport au Bas-Bénin, l'originalité climatique du nord-Bénin est la forte concentration de la pluviométrie sur une unique saison des pluies. Ainsi, ne sont pas présentés les structures spatio-temporelles du cumul au pas de temps annuel afin d'éviter une redondance de l'information. Trois modes de variabilité caractérisent le climat soudanien du nord-Bénin avec des particularités régionales (Figure 37).

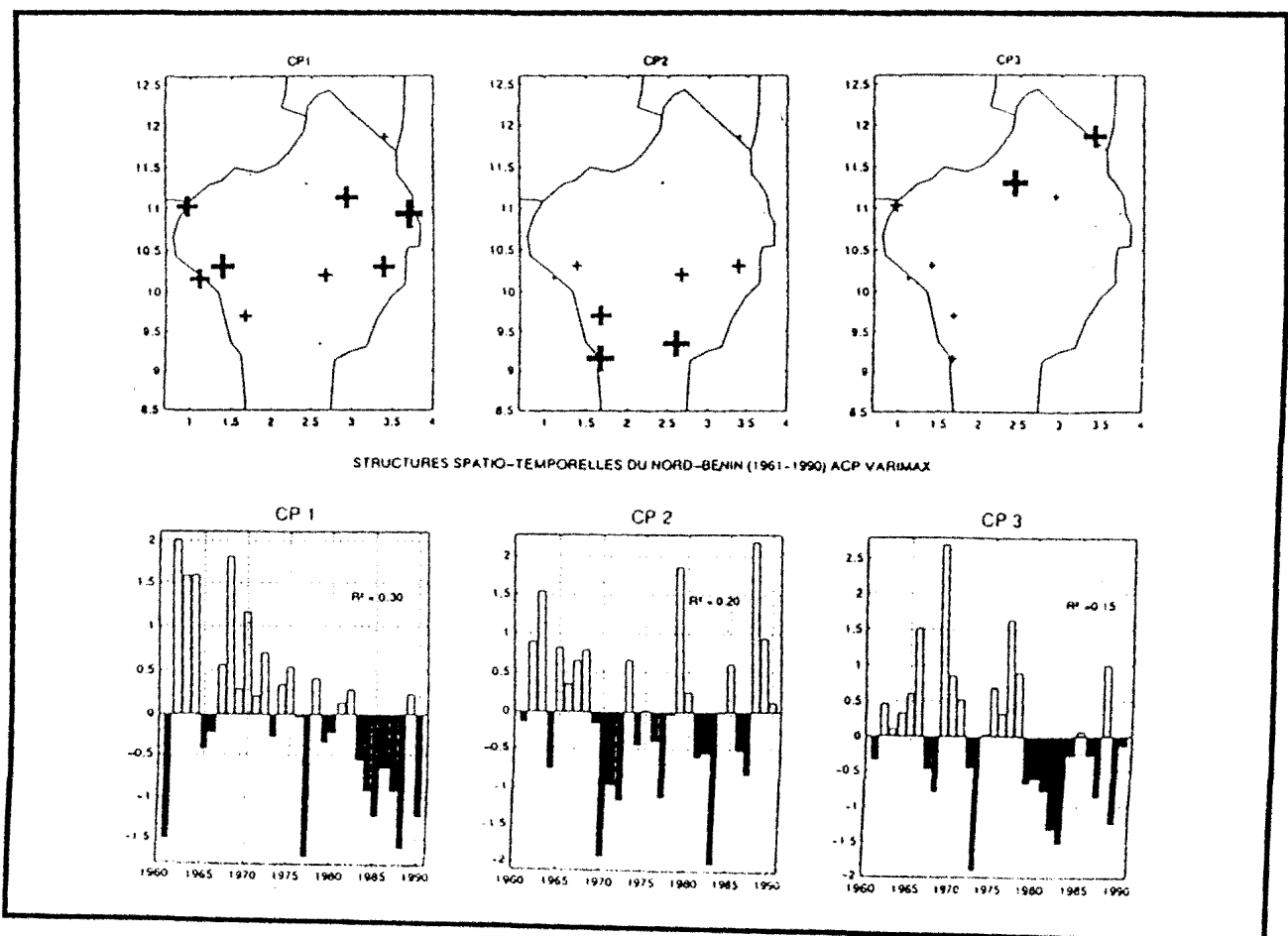


Figure 37: Les modes de variabilité spatio-temporelle de l'unique saison des pluies du climat soudanien au nord du Bénin (1961-1990) à partir d'une ACP avec rotation Varimax (CP1 = 30% de la variance expliquée ; CP2 = 20% de la variance expliquée; CP3 = 15% de la variance expliquée).

La première composante explique 30% de l'inertie factorielle et exprime la variabilité des stations situées autour de 10° et 11° de latitude nord, zone de prédilection de passage des lignes de grains. La zonalité qui caractérise ce mode de variabilité montre que l'influence de la chaîne de l'Atakora n'est pas manifeste dans la variabilité interannuelle des précipitations liées aux lignes de grains, car le nord-ouest ne s'identifie pas particulièrement. Au nord-ouest du Bénin, les mécanismes de variabilité interannuelle sont d'échelle régionale (front de mousson, lignes de grains). La chronique temporelle montre une tendance régulière qui isole deux périodes bien distinctes qui sont 1961-1982 et 1983-1990 (Figure 37). La première période représente les années à pluviométrie excédentaire. Le début de cette période est marqué par une succession d'années extrêmement humides (1962, 1963 et 1964). Cependant, au cours de cette période, la bande comprise entre 9° et 11° de latitude nord a connu en 1961, 1965, 1966, 1973 et 1975, des pluviométries déficitaires avec une année de sécheresse en 1977. De 1967 à 1972, le nord-Bénin a connu de façon consécutive des anomalies excédentaires. De toutes ces années, 1963 demeure la plus arrosée (+2 σ). La CP1 atteste qu'au cours des années 80, le milieu est confronté à un déficit généralisé. C'est donc toute la région de l'Atakora, le Borgou et une partie du bassin du Niger au Bénin sont confrontés à une diminution de leurs totaux saisonniers depuis 1979. Cette tendance à la baisse de la pluviométrie est à mettre en parallèle avec celle observée dans les régions sahélienne et subsahélienne par Nicholson (1986), Lamb (1985), Todorov (1985), Janicot (1990), Moron (1994).

La deuxième composante exprime 20% de la variance totale. Elle décrit les stations du sud (piedmont de l'Atakora et sud du Borgou) situées entre 9° et 10° de latitude nord jusqu'à la ligne de partage des eaux au nord-est. La chronique temporelle associée à cette composante montre qu'en 1963, 1979 et 1988, les stations situées entre 9° et 10° de latitude nord ont connu des anomalies positives exceptionnelles (Figure 37). En revanche, de 1969 à 1973 et de 1981 à 1984, cette bande zonale est confrontée à un déficit pluviométrique. Les records de déficit généralisé à cette latitude se sont produits en 1969, 1970, 1972 et 1983.

Avec 15% de la variance, la troisième composante met en évidence les stations de l'extrême nord et du haut Borgou, situées entre 11° et 12° de latitude

nord. Cependant, sur cette composante, seules deux stations du bassin du Niger au Bénin présentent des poids factoriels élevés. L'extrême nord du Bénin a été beaucoup plus arrosé en 1962, 1963, 1964, 1965 et 1966. De 1969 à 1971, le champ pluviométrique a connu une situation analogue. De 1974, à 1978 le haut Borgou a été plus arrosé que la région de l'Atakora et le bas-Borgou. Par contre, de 1979 à 1990, (excepté en 1988), le milieu a été confronté à un déficit généralisé avec une récurrence des anomalies négatives.

L'étude des structures spatiales du nord Bénin montre trois grands modes de variabilité selon une disposition latitudinale : le mode 1 (central) qui caractérise les stations situées entre 10° et 11° de latitude nord, le mode 2 (sud) qui individualise les stations comprises entre 9° et 10° de latitude nord et enfin le mode 3 (extrême nord) qui identifie les stations localisées au-delà de 11° de latitude nord (Figure 37).

Au total, toutes les structures spatiales du Bénin ont été marquées dans le temps surtout par des anomalies négatives récurrentes qui traduisent un problème climatique, voire une péjoration climatique

2.2. Vers une péjoration climatique ?

La péjoration climatique que connaît l'Afrique de l'ouest en bordure du golfe de Guinée a déjà été identifiée par plusieurs chercheurs avec des méthodes statistiques différentes. La plupart des études se basent sur des indices pluviométriques pour évaluer l'ampleur de la péjoration : Motha *et al.* (1980), Adejuwon *et al.* (1990) sur le Nigéria, Lhomme (1981) sur la Côte d'Ivoire. En ce qui concerne l'espace béninois, Camberlin (1987) et Fontaine (1990) ont mis au point deux indices (Bénin-nord et Bénin-sud) à partir des valeurs moyennées du champ pluviométrique. Ce sont des indices zonaux qui ne sont pas à l'échelle intermensuelle et ne peuvent donc pas servir à l'aménagement agricole comme la maïsiculture.

Les indicateurs statistiques de péjoration climatique que nous mettons au point sont des composantes principales issues des analyses factorielles avec ou sans rotation Varimax et concernent les pluies décennales, saisonnières et annuelles

des climats béninien et soudanien pour la période 1961-1990. Contrairement à l'indice « classique » qui est un signal statistique rendant compte de la variabilité spatio-temporelle et qui synthétise toute l'information contenue dans un champ pluviométrique, les composantes principales à l'échelle de notre cadre d'étude traduisent mieux la variabilité temporelle. Celles-ci sont des coefficients temporels de vecteurs propres et mettent en évidence un espace homogène qui réagit par un effet de masse statistique (comme le cas du bas-Bénin). Ainsi, les composantes principales peuvent être considérées comme des formes d'indices spatiaux temporels à partir desquels se feront les recherches de corrélations avec les autres facteurs océano-atmosphériques, et les identifications d'éventuels changements climatiques.

2.2.1. La péjoration climatique au sud du Bénin

2.2.1.1. Identification des tendances dans l'évolution temporelle des précipitations

Le test de Man-kendall appliqué sur la cp1 de la grande saison des pluies de mousson d'été montre une tendance à la baisse de la pluviométrie après les inondations exceptionnelles de 1963. dans l'ensemble, la diminution de la pluviométrie s'est opérée de façon progressive car l'évolution temporelle n'est pas marquée par une rupture de stationnarité. Depuis 1971 jusqu'à nos jours, cette diminution est restée significative au seuil de 95% (Figure 39).

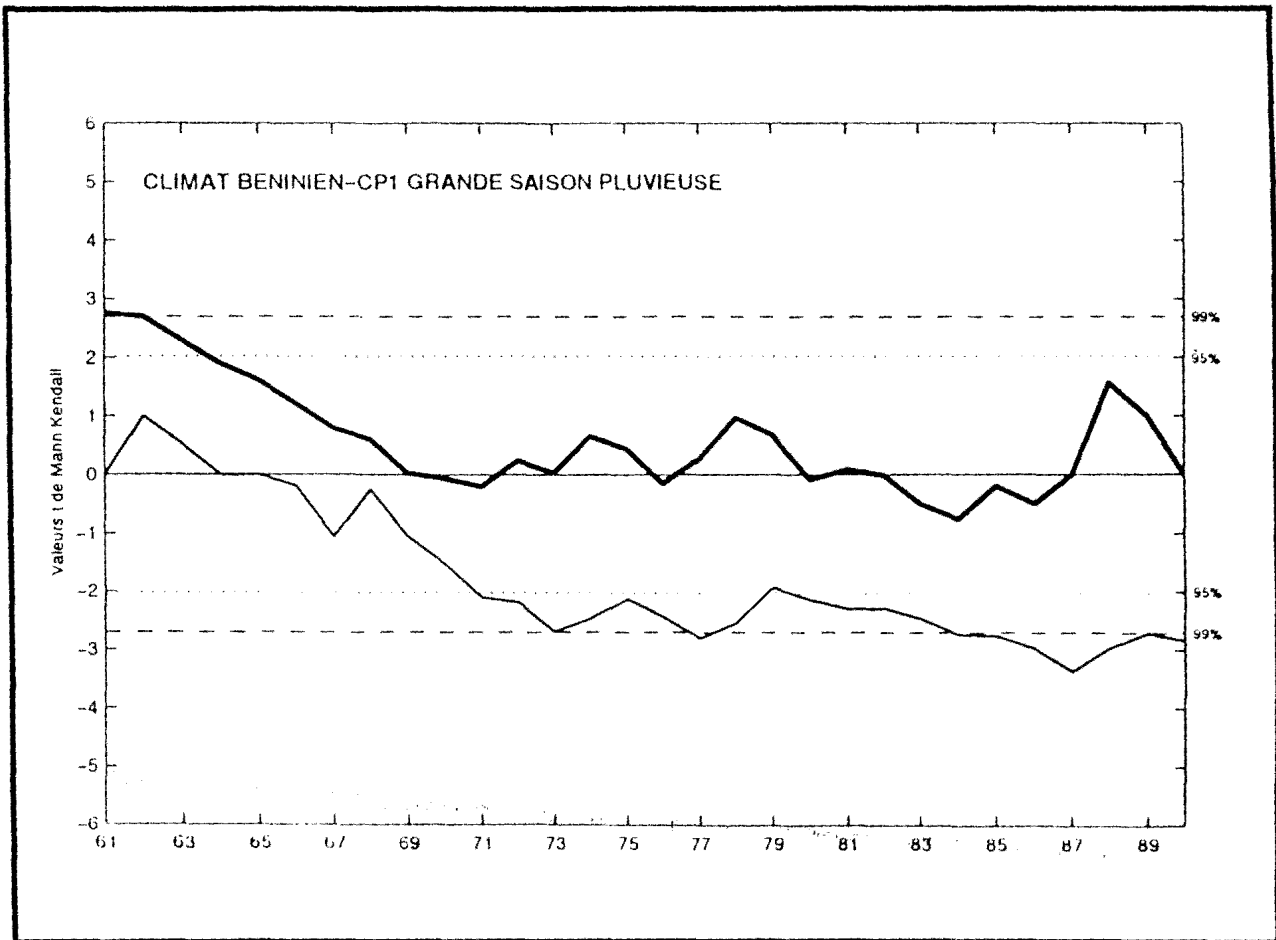


Figure 38 : Evaluation de la tendance sur la CP1 de la saison de mousson en milieu béninien (1961-1990) par la méthode de Man-Kendall. (La courbe directe est en trait fin ; la courbe rétrograde est représentée en gras ; le seuil de signification de 95% est en pointillés ; le seuil de signification de 99% est matérialisé par un point-tiret).

Contrairement à la première saison des pluies dans le sud du Bénin, la petite saison sèche connaît une augmentation de sa pluviométrie depuis 1978 à l'échelle interannuelle (Figure 39). Mais cette tendance à la hausse n'est pas significative. L'ensemble de la période 1961-1990 est toutefois plus que la normale précédente.

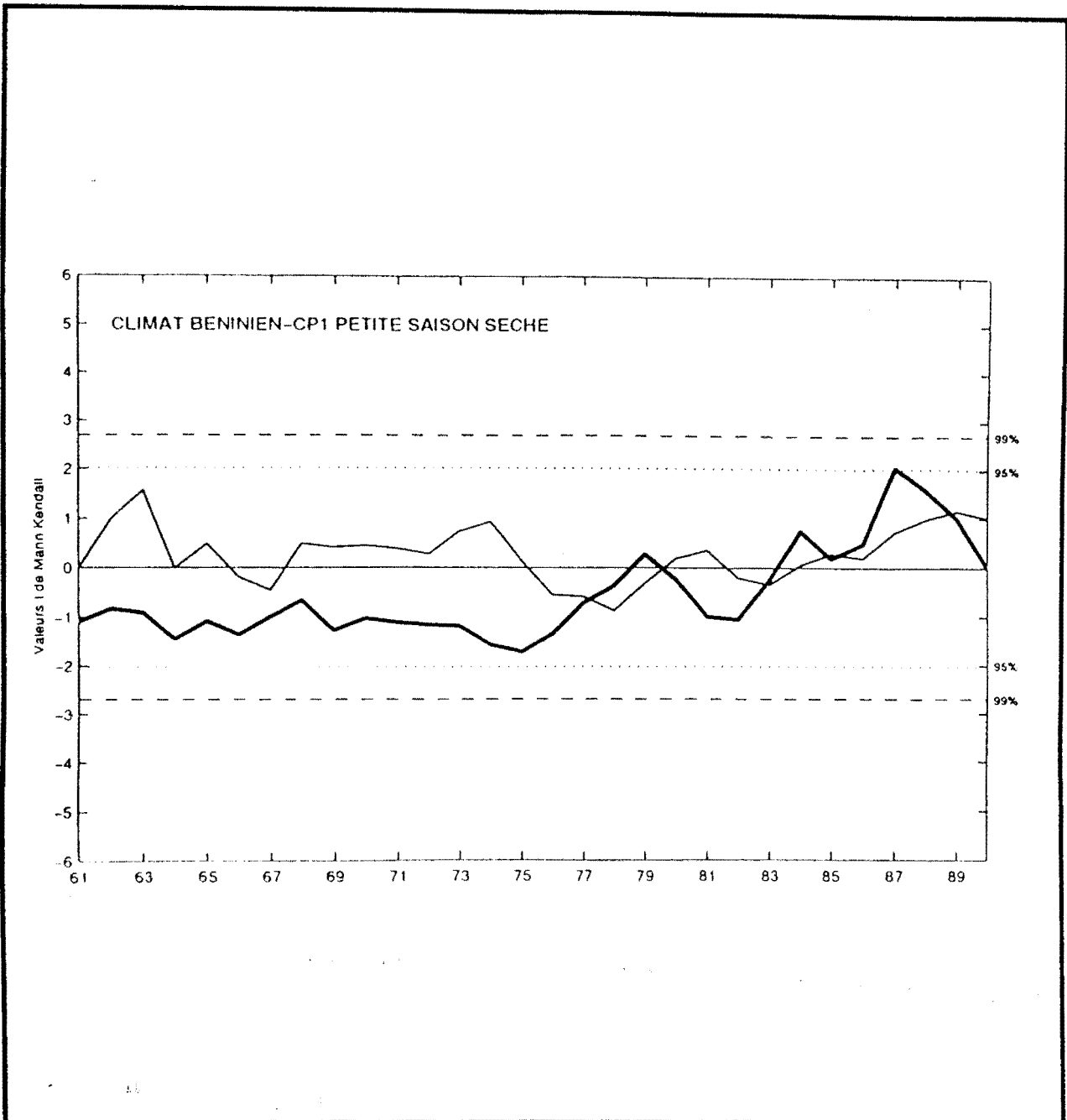


Figure 39 : Evaluation de la tendance sur la CP1 de la petite saison sèche en milieu béninien (1961-1990) par la méthode de Man-Kendall. (La courbe directe est en trait fin ; la courbe rétrograde est représentée en gras ; le seuil de signification de 95% est en pointillés ; le seuil de signification de 99% est matérialisé par un point tiret).

La pluviométrie régionale de la deuxième saison des pluies est marquée par une nette tendance à la baisse, mais qui, jusque-là n'est pas encore significative (Figure 40).

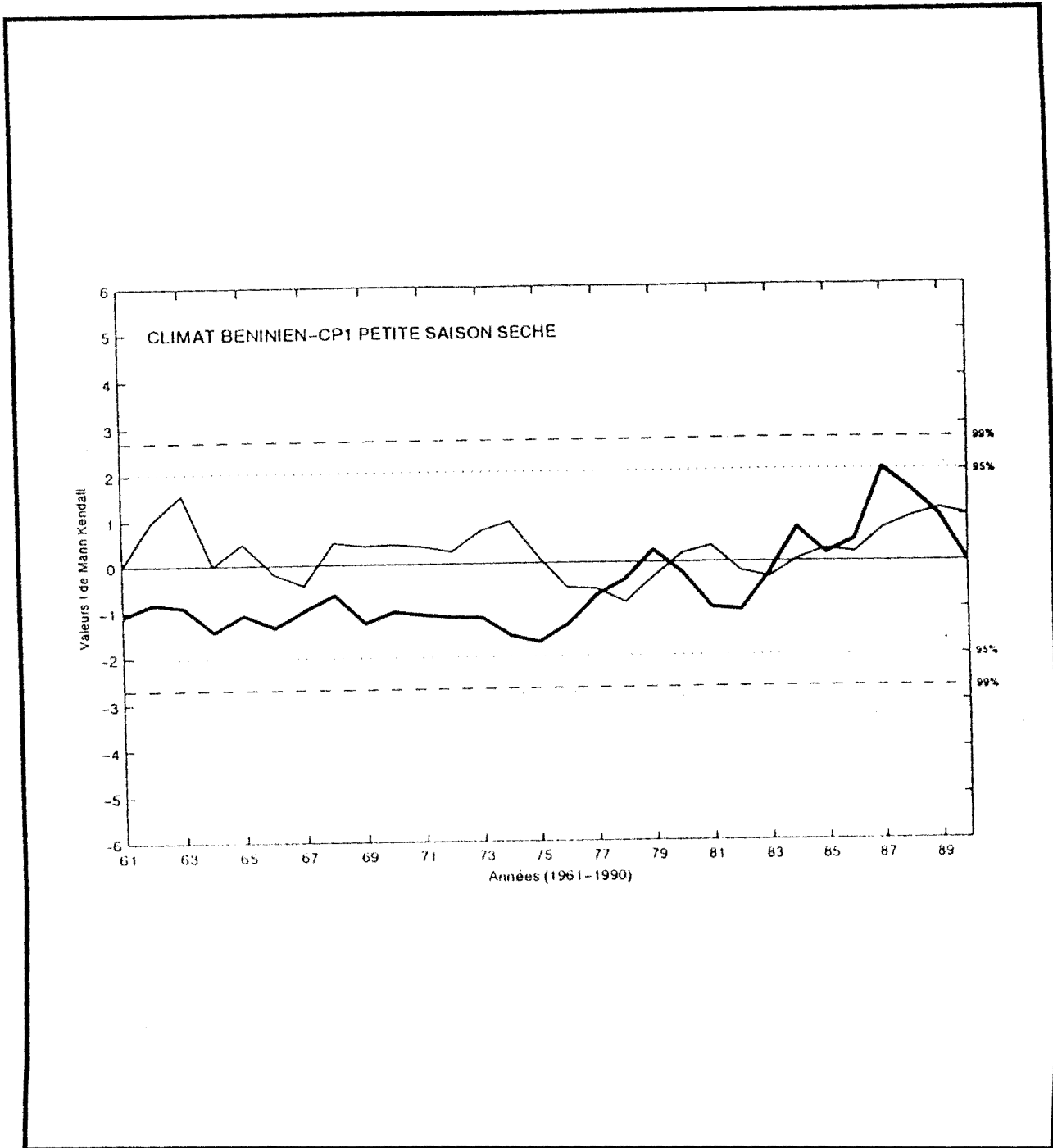


Figure 40 : Evaluation de la tendance sur la CP1 de la deuxième saison de culture en milieu béninien (1961-1990) par la méthode de Man-Kendall. (La courbe directe est en trait plein; la courbe rétrograde est représentée en gras ; le seuil de signification au seuil de 95% est en pointillés ; le seuil de signification au seuil de 99% est matérialisé par un point-tiret).

Au pas de temps annuel, le phénomène climatique se traduit par une diminution presque continue des pluies qui a atteint le seuil de signification de 99% en 1977, puis à nouveau en 1983 (Figure 41).

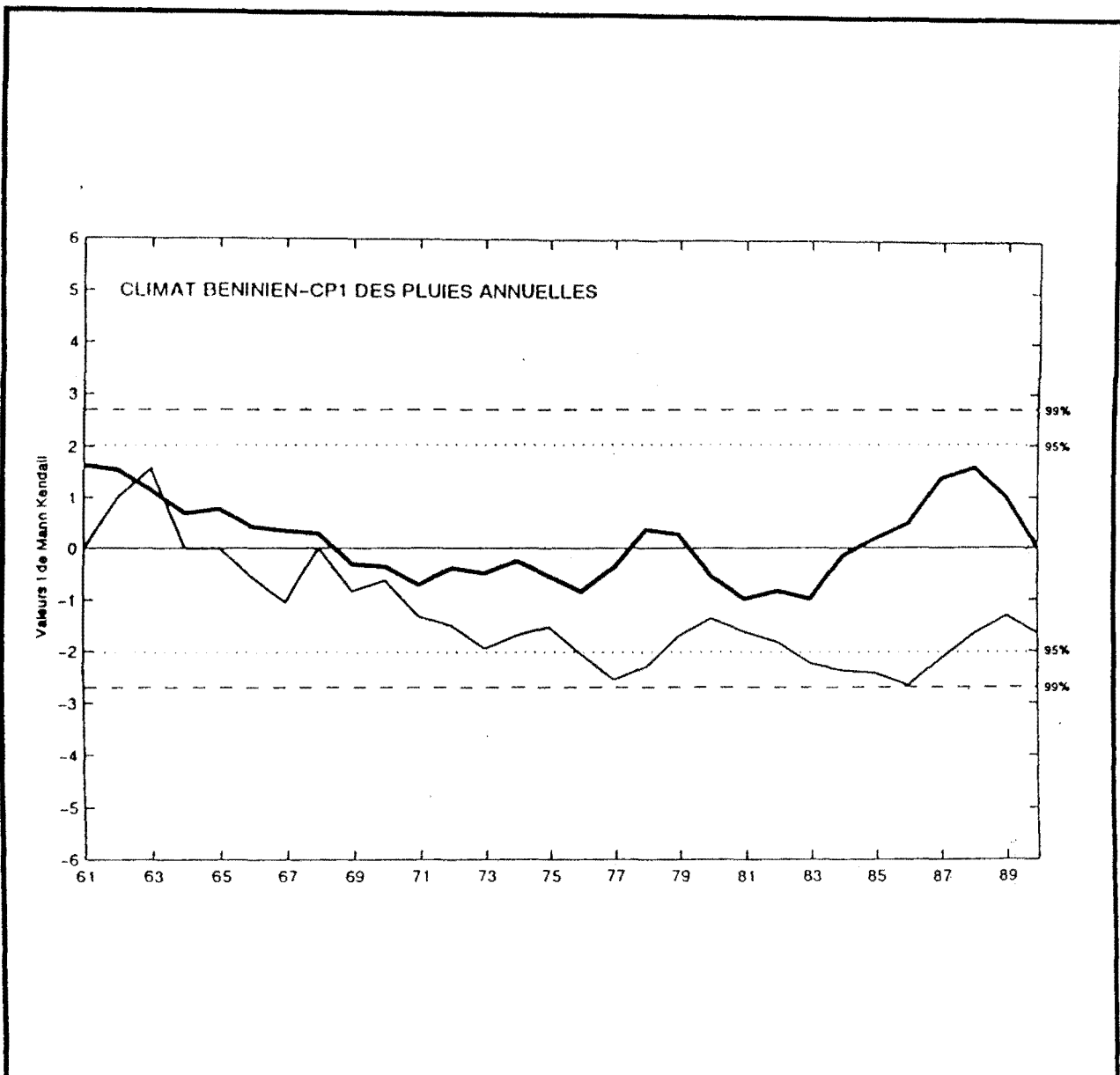


Figure 41 : Bas-Bénin : Evaluation de la tendance sur la CP1 au pas de temps annuel en milieu béninien à partir du test de Man Kendall. (La courbe directe est en trait fin ; la courbe rétrograde est représentée en gras; le seuil de signification au seuil de 95% est en pointillés; le seuil de signification au seuil de 99% est matérialisé par un point accompagné d'un tiret).

Au sud du Bénin, la tendance à la baisse de la pluviométrie se manifeste également par une récurrence des sécheresses comme entre 1980 et 1985, quoique

sur quelques stations elle ait commencé depuis les années 70 (Figure non montrée). La péjoration se manifeste par d'importants scores d'anomalies négatives avec des écart-types élevés (Figure non montrée).

Cette tendance générale à la baisse de la ressource pluviométrique des saisons agricoles durant la période 1961-1990 s'est accompagnée de la diminution du nombre de jours de pluie.

2.2.1.2. Variabilité du nombre de jours de pluie en milieu béninien : un indicateur de péjoration climatique pour la production agricole

Nous considérons comme jour de pluie, un jour où le pluviomètre a enregistré au moins 1 mm de pluie. Pour identifier le phénomène climatique, et caractériser le degré de sécheresse, nous avons comparé l'évolution interannuelle du nombre de jours de pluie à partir du test de Mann-Kendall. Dans le sud Bénin, la période 1961-1990 témoigne d'une grande variabilité, avec une importante réduction du nombre de jours de pluie par rapport à la période 1961-1990.

Sur le littoral la diminution du nombre de jours de pluie est remarquable au sud-ouest (Grand-Popo). Cette diminution progressive est ponctuée par une rupture de stationnarité en 1974 qui marque un déficit de nombre de jours de pluie devenu significatif au seuil de 1% en 1977 et en 1983. A Ouidah et Cotonou, (Porto-Novo depuis 1971), l'évolution temporelle du NJP est caractérisée par une baisse continue et significative à partir de 1977 (Figure 42).

A l'intérieur des terres, sur le plateau d'Allada et dans la dépression de la Lama, la réduction du nombre de jours de pluie est précoce. Elle s'est amorcée dès 1969 après l'événement exceptionnel de 1968. A Toffo, une rupture de stationnarité significative à 99% en 1971 marque le début d'une péjoration climatique car la réduction du nombre de jours de pluie s'est accentuée.

Sur le plateau d'Abomey (7° N), la tendance à la décroissance du nombre de jours de pluie exprime 28% de la variabilité pluviométrique alors qu'à Savè, (8°N), elle explique 51% de la variance. Cette diminution du NJP amorcée en 1963 est

devenue significative en 1984 en pays « Fon », et en 1982-83 en pays « idatcha » (Savè).

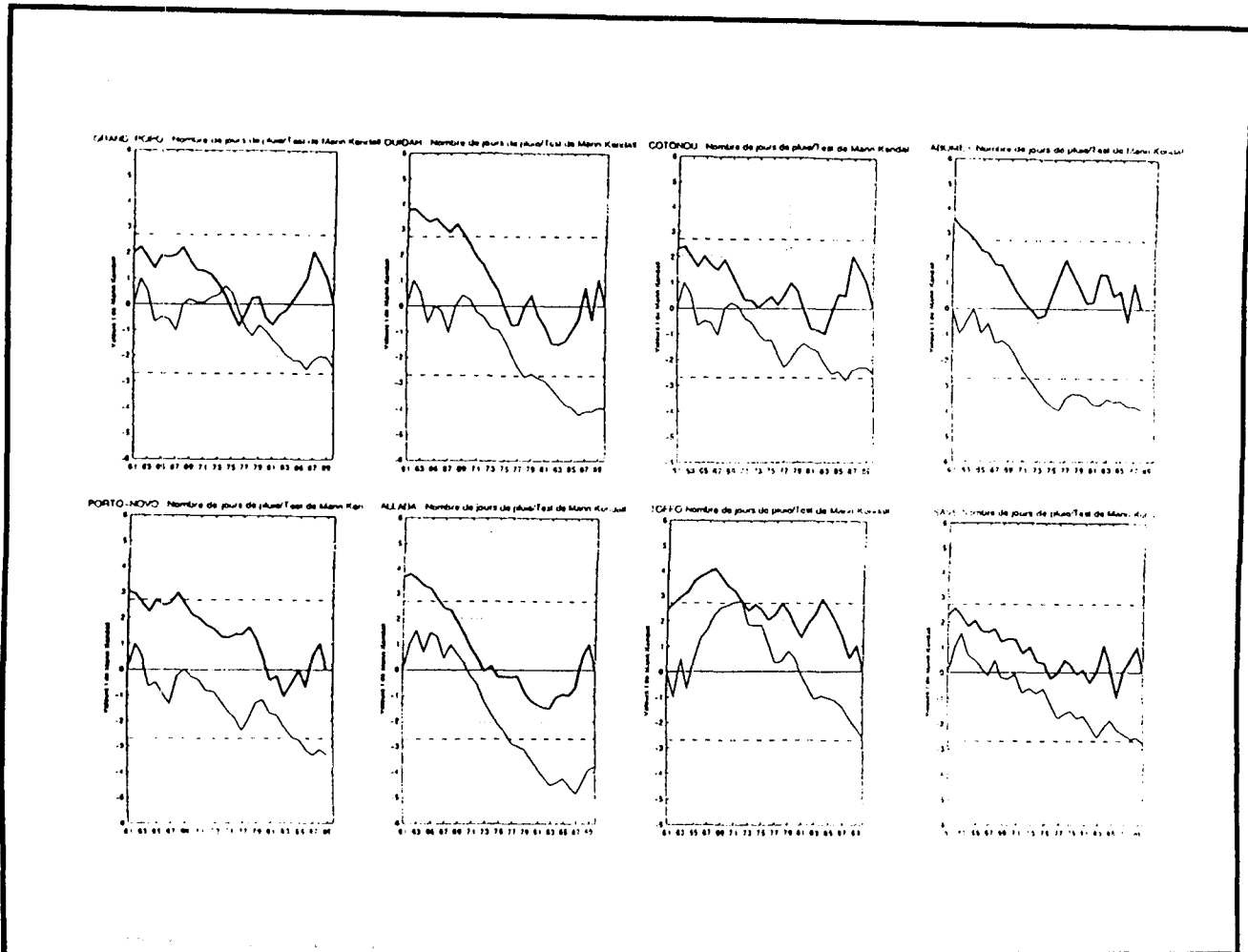


Figure 42 : Variabilité du nombre de jours de pluie en milieu béninien (1961-1990) avec test de Man-Kendall. (La courbe directe est en trait plein; la courbe rétrograde est représentée en gras; le seuil de signification de 95% est en pointillés; le seuil de signification de 99% est matérialisé par un point-tiret).

2.2.2. Variabilité temporelle du nombre de jours de pluie en milieu soudanien.

Au delà de 8°N, en milieu soudanien, de 1931 à 1960 l'évolution interannuelle du nombre de jours de pluies a été à la hausse comme en milieu béninien (résultats non montrés). En raison de l'approche agroclimatologique caractérisée par l'étude à l'échelle de la parcelle, nous présenterons quelques études de cas stationnels. A partir de 1960, sur

toutes les stations, on note une tendance à la baisse et une nette réduction du nombre de jours de pluie au cours de l'unique saison des pluies après les années 70 (Figure 43). Dans le Bas-Borgou (nord-est), l'évolution est un peu différente d'une station à une autre (Parakou et Tchaourou). A Tchaourou, la réduction du nombre de jours de pluie est plus précoce car elle a commencé en 1962 et est devenue significative depuis 1972, tandis qu'à Parakou le phénomène existe mais demeure non significatif. A Kandi, la péjoration date de 1968 et est devenue significative en 1979.

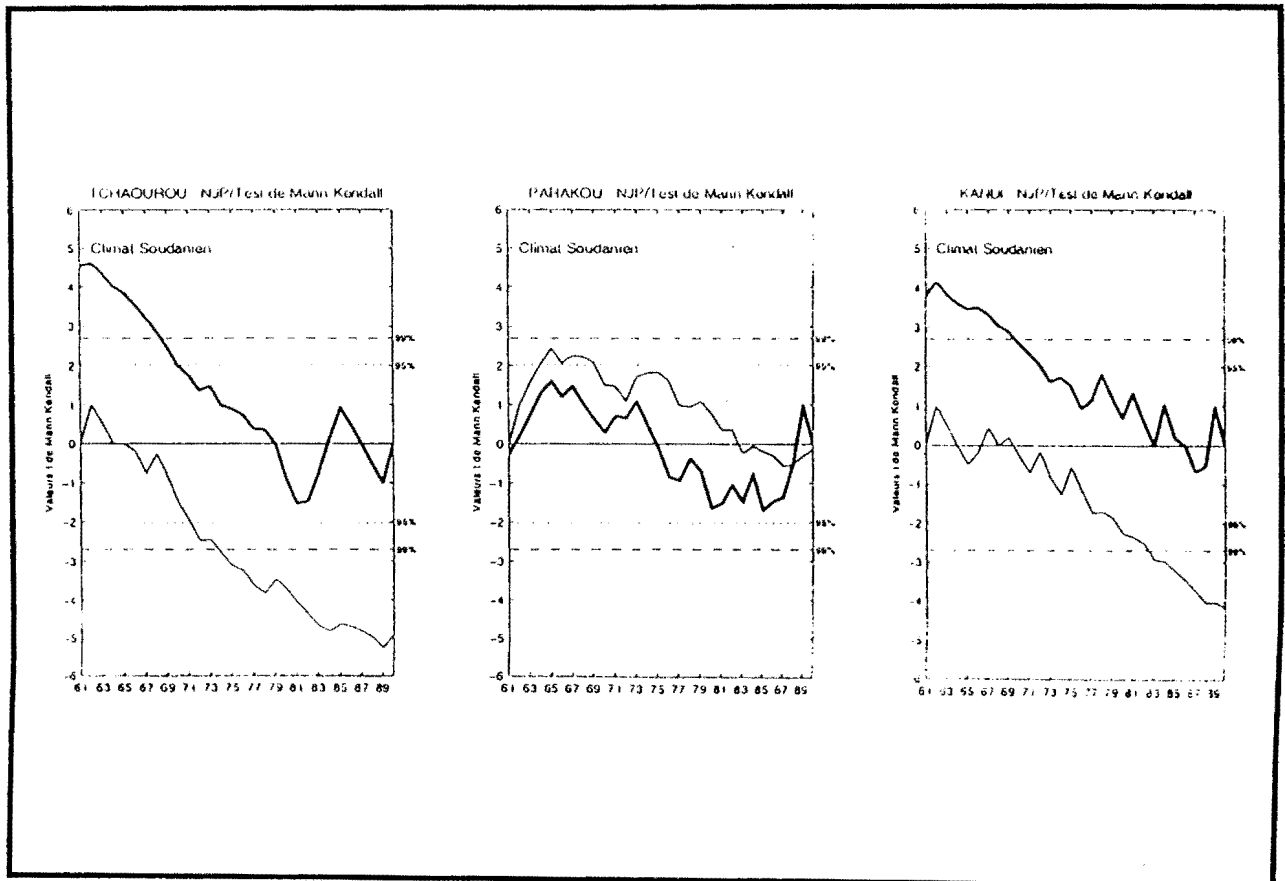


Figure 43 : Variabilité du nombre de jours de pluie en milieux soudanien et atakorien (1961-1990) avec test de Mann-Kendall. (La courbe directe est en trait plein; la courbe rétrograde est représentée en gras; le seuil de signification de 95% est en pointillés; le seuil de signification de 99% est matérialisé par un point-tiret).

Au nord-ouest, les baisses sont significatives depuis la sécheresse de 1977. A Djougou, on note une rupture de stationnarité significative dans l'évolution temporelle des nombres des jours de pluie en 1979 (Figure 43).

Le test de Mann-Kendall appliqué à la première composante temporelle (CP1) de l'unique saison des pluies du nord-Bénin sur la période 1961-1990 témoigne d'une péjoration climatique qui se manifeste par une lente et progressive diminution

du nombre de jours de pluie devenue significative au seuil de 95% à partir de 1983 pour le champ pluviométrique (Figure 44).

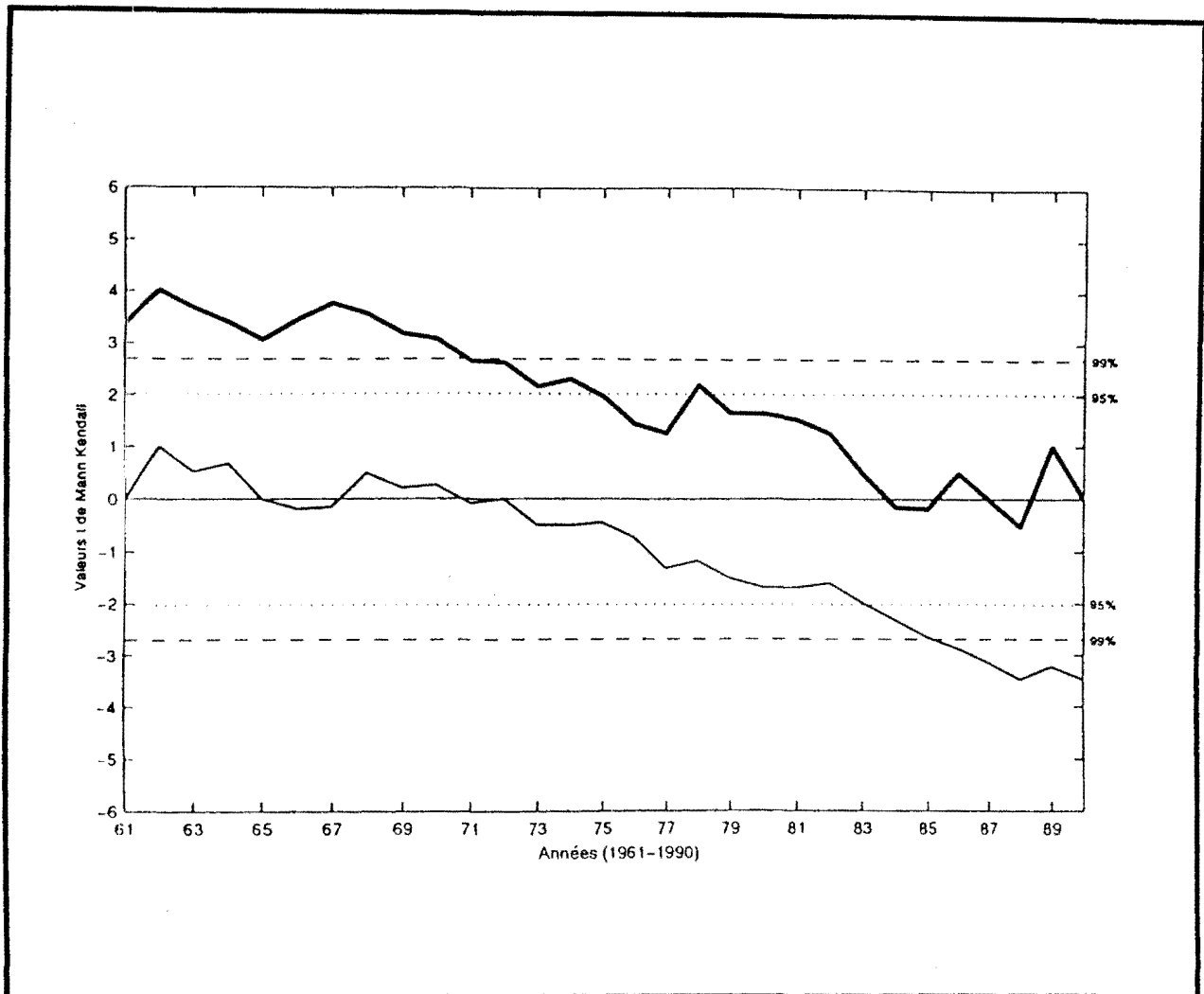


Figure 44 : Variabilité du nombre de jours de pluie à partir de la CP1 de l'unique saison des pluies en milieux soudanien et atakorien (1961-1990) avec test de Mann-Kendall. (La courbe directe est en trait fin ; la courbe rétrograde est représentée en gras; le seuil de signification de 95% est en pointillés; le seuil de signification de 99% est matérialisé par un point-tiret).

La diminution du nombre de jours de pluies dans les séries soudaniennes est accompagnée d'importants déficits pluviométriques. Dans le bassin du Niger au Bénin, la diminution de la ressource pluviométrique explique 23% de la variabilité à Bembéréké et 17% à Kandi (Figure 45).

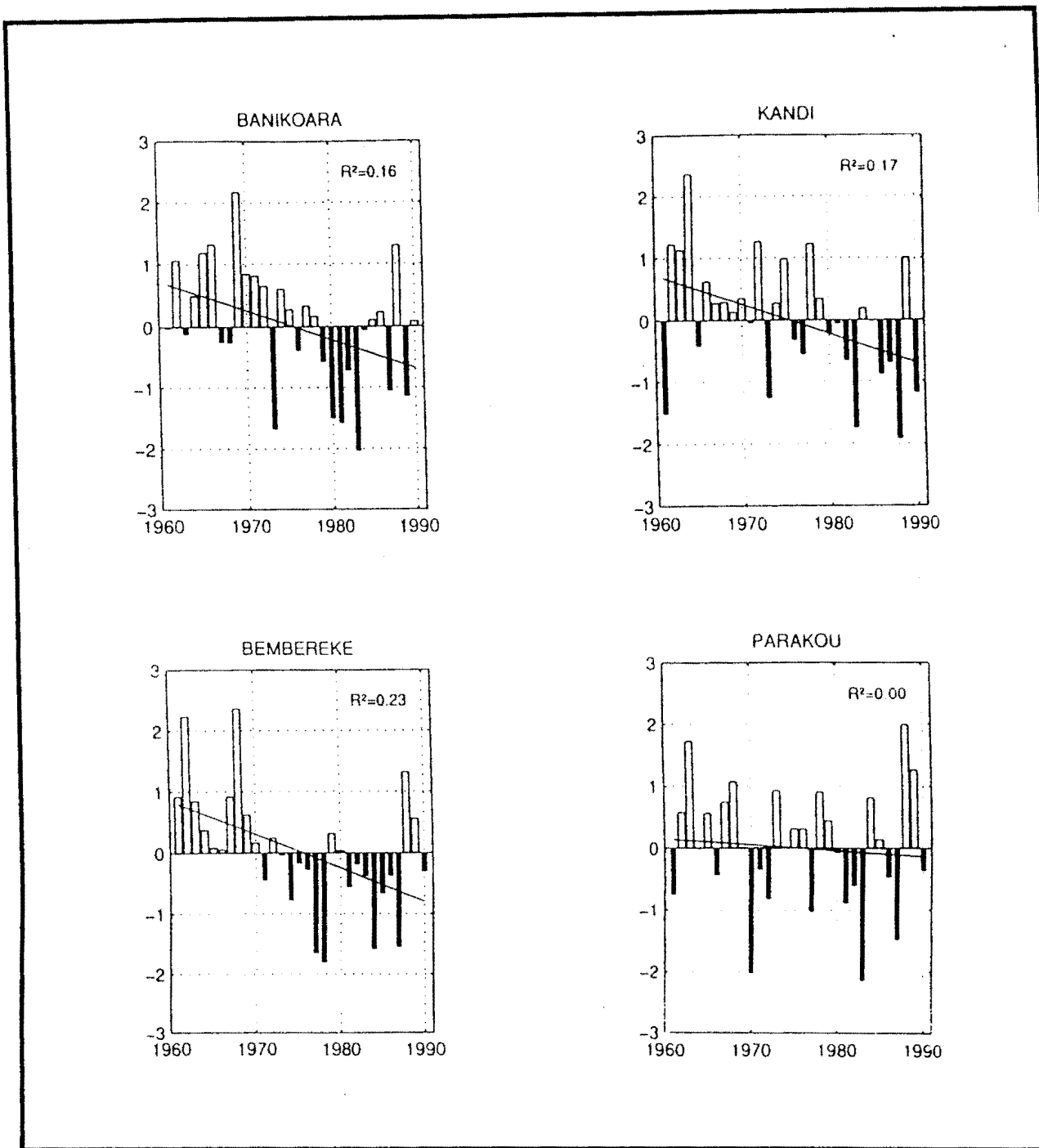


Figure 45 : Anomalies pluviométriques dans le bassin du Niger au Bénin de 1961 à 1990. (La droite de régression linéaire donne l'allure de la tendance des précipitations ; les histogrammes en noir foncé représentent les anomalies pluviométriques négatives; les histogrammes clairs indiquent les anomalies positives).

Au nord-ouest (Boukoubé, Djougou, Natitingou, Tanguiéta), la péjoration climatique et l'évolution temporelle des précipitations sont caractérisées par des

sécheresses échelonnées. Les tendances à la réduction de la ressource pluviométrique expliquent 29 et 34% de la variabilité (Figure 46)

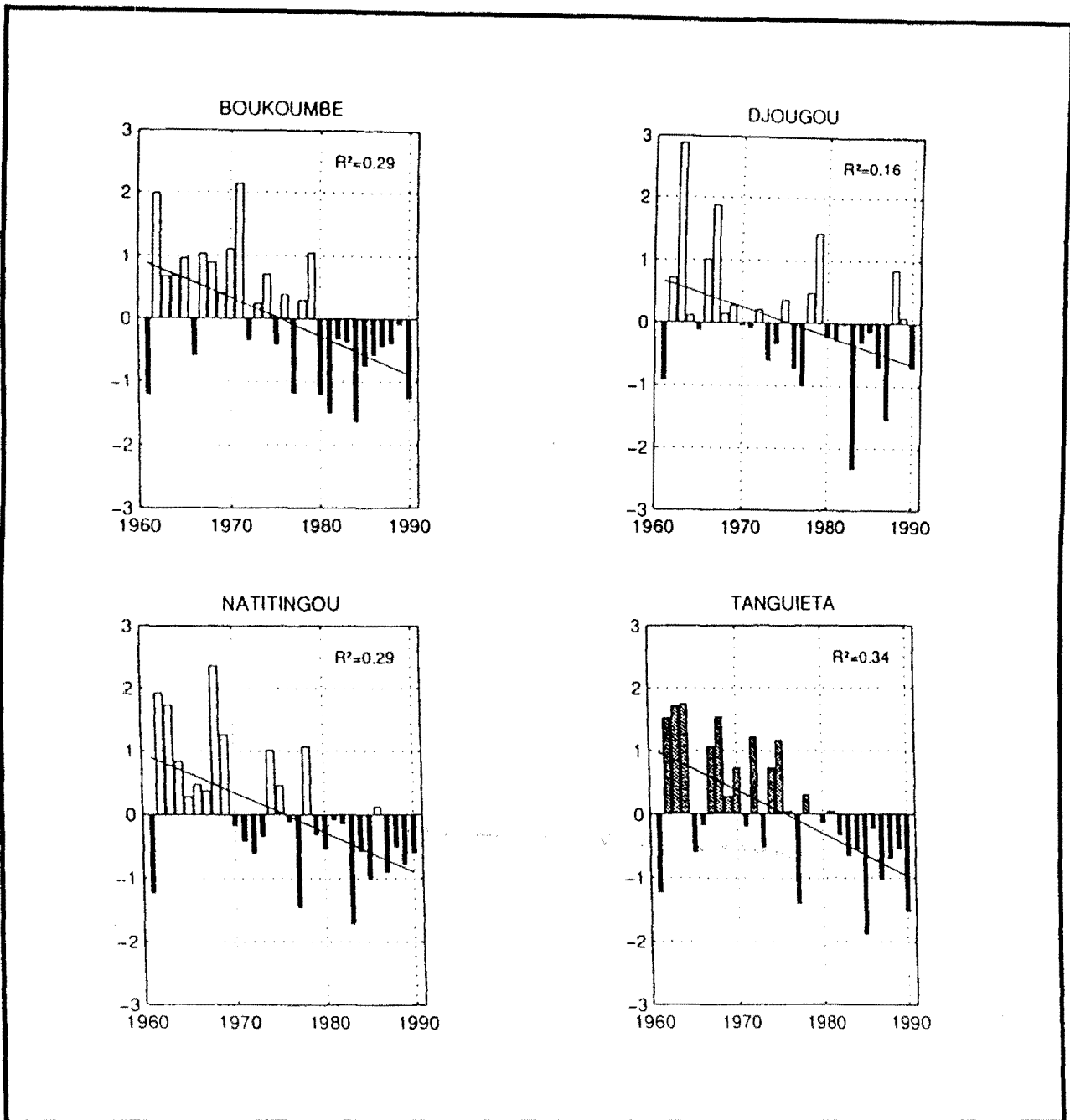


Figure 46 : Anomalies pluviométriques dans la région de l'Atakora de 1961 à 1990. (La droite de régression donne l'allure de la tendance des précipitations ; les histogrammes en noir foncé représentent les anomalies pluviométriques négatives ; les histogrammes clairs indiquent les anomalies positives).

SYNTHESE

De 1961 à 1990, la diminution des totaux pluviométriques et du nombre de jours de pluie à l'échelle interannuelle est le fait climatique majeur.

La péjoration climatique sur la période 1961-1990 s'est manifestée à partir des années 1970 avec une diminution significative du nombre de jours de pluie dans les séries pluviométriques. Pour la plupart des stations, le phénomène est persistant, car la réduction des nombres de jours de pluie ne cesse d'être significative. La situation de sécheresse de 1977 pour certaines sous-régions du pays et celle de 1983-1984 élargie à tout le golfe de Bénin confirme l'histoire pluviométrique de l'Afrique de l'ouest guinéenne. On note aussi des particularités à l'échelle de quelques stations.

La tendance générale à la baisse du nombre de jours de pluie et des totaux pluviométriques, et la persistance des anomalies demeurent sans doute le phénomène climatique le plus remarquable de ces décennies au Bénin et en Afrique de l'ouest comme l'ont remarqué plusieurs auteurs dont Fontaine (1981, 1985), Suchel (1983) Chamard et Courel (1985), Carbonnel et Hubert (1985), qui ont qualifié cette situation de nouvelle *phase climatique* ou de *rupture climatique* à compter des années 1966-1970. Nous retiendrons ici le terme de *péjoration climatique*, comme Saar (1988) car depuis 1987, la tendance semble s'amorcer vers un retour à la hausse de la pluviométrie dans le sud Bénin. Cependant, dans l'Atakora, la pluviométrie ne cesse de diminuer et la tendance générale semble confirmer une sécheresse continue.

2.3. La composante cyclique de la variabilité pluviométrique au Bénin

Dans le contexte d'évaluation des risques et des contraintes climatiques et pour l'étude des impacts du climat sur la maïsiculture, la recherche de cycles pourrait donner une idée de périodicité de la variabilité pluviométrique. Elle peut servir à la planification agricole et à la conception d'une politique de sécurité alimentaire qui tient compte de la composante climatique. Plusieurs auteurs dont Ogallo (1979), Kane *et al.* (1986), Nicholson et Entekhabi (1986), Olaniran (1986), et Moron (1990), Oladjiré *et al.* (1991) ont déjà abordé l'étude des périodicités dans les séries

pluviométriques de l'Afrique tropicale. Leurs travaux montrent l'**absence de cycles marqués** dans les séries pluviométriques de l'Afrique de l'ouest caractérisées par la prééminence de la tendance (Fontaine, 1990a).

A l'échelle du Bénin, la recherche de cycles ou de périodicités est faite aux pas de temps annuel et saisonnier. Le degré de signification statistique des différents pics est testé aux seuils de 1 et 5% par la technique de Monte Carlo (1982). Les décompositions spectrales des séries stationnelles sur la période 1931-1990 laissent apparaître des signaux dans les hautes fréquences (Figure 47).

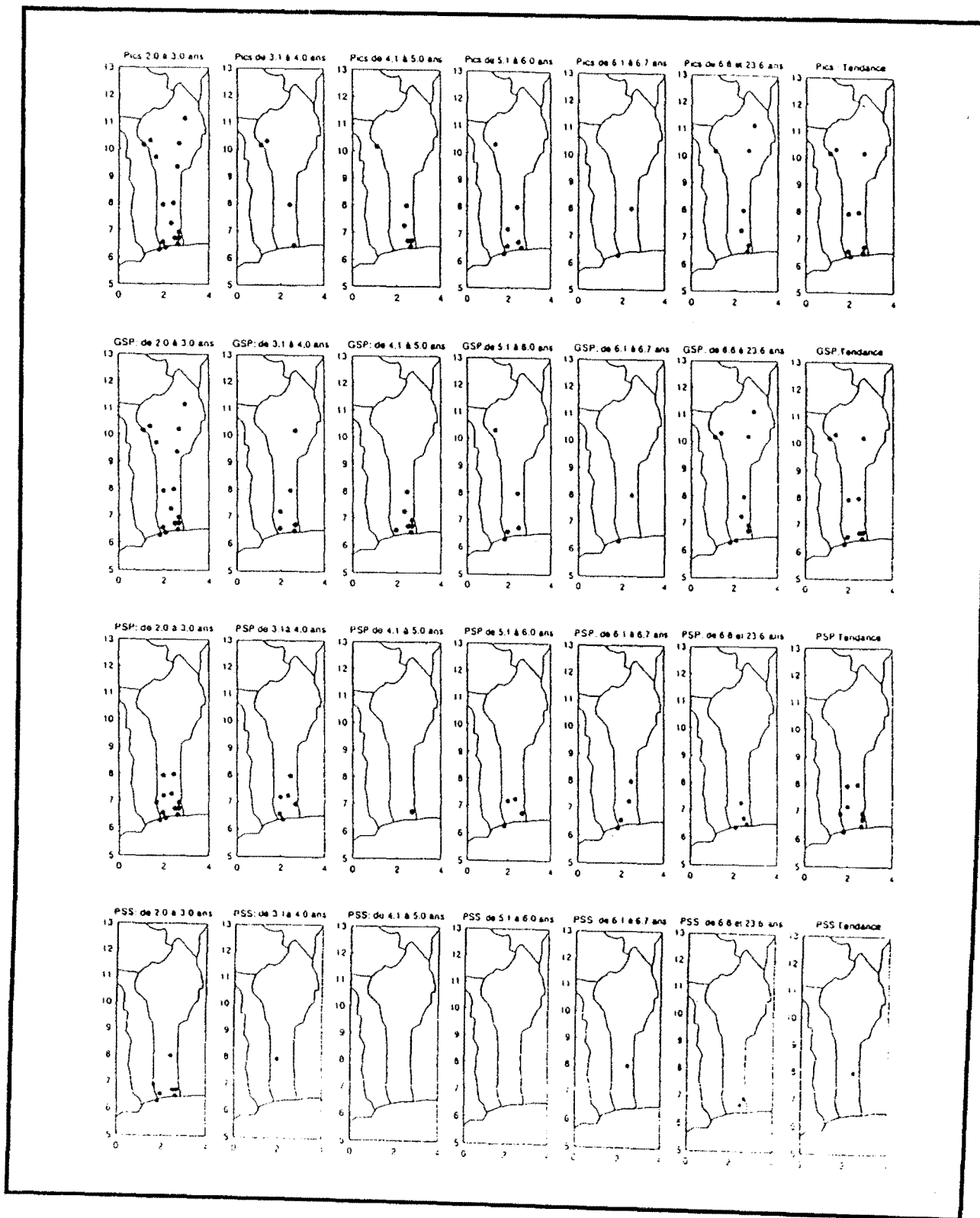


Figure 47: Les cycles et périodicités au Bénin au pas de temps annuel et saisonnier (1931-1990) ; (La première ligne = cumul annuel ; deuxième ligne = grande saison des pluies (GSP) ; troisième ligne = la petite saison des pluies (PSP) ; quatrième ligne = petite saison sèche (PSS°). Les points (●) indiquent les stations du réseau pluviométrique qui présentent des pics selon les pas de temps annuel et saisonnier.

Une périodicité de 2 à 3 ans caractérise l'évolution temporelle de la série pluviométrique 1931-1990 (Figure 49). Elle correspond au signal de l'Oscillation Quasi Biennale (OQB) elle même composante du signal ENSO qui représente le premier mode de variabilité climatique à l'échelle planétaire. Ceci confirme certains résultats (Moron, 1996) sur la fréquence bien marquée de l'OQB sur l'espace tropical et sur le pourtour du golfe de Guinée.

On note aussi un signal vers 3 à 5 ans au cours de la grande saison des pluies et de la petite saison pluvieuse (Figure 47). Cette périodicité de 3 à 5 ans qui marque l'évolution interannuelle des précipitations donne une idée du phénomène de retour des anomalies pluviométriques au Bénin susceptibles d'être préjudiciables à la production agricole vu que la période 1961-1990 est marqué par une péjoration climatique. Cette périodicité, quoique statistique, doit servir d'indicateur et de guide pour la planification agricole et les politiques de stratégie alimentaire à titre préventif pour l'approvisionnement céréalier.

Cette composante cyclique de la variabilité qui marque la péjoration climatique au Bénin reste gravée dans la mémoire paysanne. Ce constat est confirmé par nos enquêtes de terrain. La persistance de la péjoration et la récurrence des sécheresses ces dernières années créent le désarroi dans le monde rural béninois qui cherchent en vain les causes de la crise climatique.

Section 3. Eléments d'explication de la variabilité pluviométrique

Dans cette section nous aborderons la question de deux façons. Dans un premier temps nous donnerons la conception basée sur un savoir endogène des paysans. Dans un second temps, nous présenterons des hypothèses scientifiques d'explication de la variabilité climatique, sur la base des résultats de nos analyses statistiques.

3.1. Les essais d'explication populaire de la variabilité pluviométrique au Bénin : déterminisme ou fatalité ?

Bien que la variabilité climatique ait un déterminisme scientifique, au Bénin pays fondateur du *vodoun*, où les croyances sont encore très fortes, les paysans se réfèrent à la cosmogonie et à l'irréel pour expliquer le dérèglement climatique. que nous venons de caractériser et de quantifier. Face à la persistance de la péjoration climatique qui entraîne de mauvaises récoltes, disettes et crises économiques, les communautés rurales béninoises deviennent fatalistes. Au sud du Bénin, fortement animiste, les paysans ont toujours donné une explication métaphysique à la variabilité pluviométrique et à la crise climatique. Ainsi, le Dieu *Xéviosso* (dieu de la foudre) en pays *fon, mahi, mina, popo, houéda*, ou *Shango* en pays *yorouba* à l'est des plateaux tient une place importante dans le déroulement de l'année agricole au Bénin méridional. A chaque début de saison pluvieuse et agricole et par l'intermédiaire de la géomancie divinatoire, dont Maupoil (1937), Alapini (1980) ont décrit les grandes lignes, le *Fa* (géomancie divinatoire) est consulté et est l'objet d'offrandes et de sacrifices (*Vo*) afin d'obtenir la grâce du dieu de la pluie. Le grand rituel populaire *Tchonhoin* (fête sacrée) s'organise sous le commandement des chefs de village et des responsables de couvents au cours duquel sont posées des questions à ces dieux. C'est le *Tô Fa*, (consultation divinatoire élargie) dans toutes les localités administrées par le chef du village ou de la sous-préfecture. Les attitudes à adopter et recommandations à suivre durant la saison pluvieuse sont conformes à l'apparition du *Doun* et du *Kpoli*, signes géomantiques de la cosmogonie *Fa*. Les offrandes sont fonction de la nature du *Doun* ou *Kpoli* qui présage une bonne ou mauvaise saison. La divinité *Lègba* (gardien du *Fétômé*, royaume du *Fa*) est aussi associée sans oublier le dieu de la Terre *Sakpata*, ou *Ayinon*, qui reçoit généralement son hôte de la pluie *Xéviosso*. Par d'autres rituels, des sacrifices sont aussi offerts aussi à *Avlékété-Dossou*, un autre génie de la mer qui commande les ambiances océaniques. Ceci traduit vraisemblablement et de façon analogique une idée empirique du système-terre-océan-atmosphère.

Les crises agricoles qu'a connues le Bénin en 1962, 1968 et 1987, provoquées par des inondations, ont été attribuées à un mécontentement de

Xèviosso et de ses anges *Sogbo* et *Gbadè*, dans la mesure où certaines règles morales et interdits auraient été violés. En revanche, les sécheresses des années 1847-1848 sous le règne du roi Ghézo ont été attribuées à la colère des *vodun Ayinon, Xèviosso, Sègbo Lissa* par le doun « *Sao Gbé* ». Celles de 1976, 1977, 1983 et 1984, caractérisées par des déficits pluviométriques marqués comme nous l'avons présenté dans la deuxième partie ont été interprétées par la population comme la sanction du dieu *Sakpata* contre l'Etat marxiste-léniniste qui, a déclenché une lutte sans merci contre la féodalité en rasant les forêts sacrées, en détruisant les couvents et en interdisant les cérémonies religieuses, coutumières et traditionnelles courant 1977-1978. Des troubles sociaux et quelquefois des coups de force politiques se développent après chaque épisode de sécheresse grave au Bénin. En 1977, après l'accentuation des problèmes d'eau et de disette qui ont généré des troubles populaires, le Président Kérékou s'entoura de conseillers-féticheurs afin de mettre fin à la calamité climatique (Pérard, 1991).

Au sud-ouest du Bénin, en pays *Guin* ou *Mina* et *Popo*, la cérémonie de *Yèkèyèkè* ou de *Kpéssosso* joue un grand rôle dans la prévision des saisons pluvieuses à venir. Cette cérémonie populaire a lieu à Glidji, au Togo, dans la forêt sacrée à *Kpodji* où les adeptes ou personnes se réclamant descendants des différentes divinités du pays *guin* ou *popo* sont conviés. Cette cérémonie sous-régionale a lieu un jeudi du mois de septembre de chaque année après les séances sacrées « d'expédition du vent d'aôut », communément appelé *Afô* dans toutes les localités, depuis le Ghana jusqu'au Bénin. Elle est placée sous la direction du *Fio* (roi) de la dynastie Agbannon de Glidji et des autorités togolaises de haut niveau. La cérémonie consiste à aller à la recherche d'une pierre sacrée appelée *Ekpé* en dialecte *mina*. La couleur de la pierre retrouvée indique la qualité de l'année agricole et présage soit une année pluviométrique bienfaisante, soit une mauvaise année culturale. Des comportements à suivre par rapport aux révélations des oracles pour une bonne année agricole sont alors dictés. Aujourd'hui dans le golfe de Guinée en général et au Bénin en particulier où le *Vodoun* et la tradition ont un poids indéniable dans la gestion du quotidien, la connaissance du patrimoine culturel paysan doit servir à mieux comprendre et admettre les niveaux d'estimation des contraintes climatiques. La dimension sacrée de la pluie et quelques savoirs endogènes sont à prendre en considération dans l'élaboration des projets agricoles (Houndénou, 1992). Mieux encore, les modèles scientifiques de simulation de climat à élaborer sur

le Bénin doivent prendre en compte les composantes ethno-sociologiques, car l'ex-Dahomey demeure un pays où la forte croyance religieuse conditionne la perception des phénomènes météorologiques et climatologiques (Pérard, 1992).

Mais par rapport à la conception des modèles, il se pose un problème méthodologique et technique. Comment convertir des données qualitatives de terrain recueillies auprès des paysans dans un langage informatique afin de renseigner ou de caler un modèle de simulation du bilan agroclimatique ou météorologique ? Quel type d'algorithme faudra-t-il mettre au point ? Dans un pays comme le Bénin, comment traduire en équation l'art de faire de la pluie, de la retarder ou de la repousser ? Mieux encore, comment peut-on expliquer de façon scientifique la manière dont certaines personnes font appel à la pluie uniquement dans leurs champs en cas de graves sécheresses ? Le débat n'est pas simple. Et répondre à cette question c'est passer du rationnel à l'irrationnel, de la physique à la métaphysique. A l'étape actuelle de cette recherche d'explication de la variabilité climatique par les communautés paysannes du Bénin et dans le cadre de cette thèse, on ne peut expliquer de façon rationnelle les mécanismes d'appel volontaire de la pluie au pays du *Vodoun*. Ceux-ci font appel à un savoir qui relève du divin, d'un être supérieur. Le code du *Vodoun* étant basé sur la personnalisation du savoir, sur la grande discrétion incarnée et symbolisée par le pacte du sang, cette connaissance est réservée à quelques initiés qui n'ont pas aussi le droit d'en faire usage à volonté car, paraît-il, ceci ressort des lois naturelles. Selon eux, la nature est régie par des lois qu'il ne faut pas du tout perturber de peur de subir des représailles. Toutefois, sur le plan rationnel, la dynamique océanique couplée aux comportements atmosphériques et les actions anthropiques sont des éléments qui peuvent servir à expliquer la péjoration climatique.

3.2. Les téléconnexions avec les champs océaniques

A l'étape actuelle de la recherche scientifique, les Températures de Surface Océanique (TSO), la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT), le Jet Tropical d'Est (JTE) sont les facteurs qui interviennent pour expliquer la variabilité pluviométrique en Afrique de l'ouest en climats de mousson. Les facteurs locaux, liés

à chaque aire géographique déterminent la spatialisation des anomalies pluviométriques.

La recherche de relations entre la pluviométrie africaine et les températures de Surface de l'Océan Atlantique (TSO) a déjà retenu l'attention de plusieurs chercheurs dont Lamb (1978), Hastenrath (1982), Lough (1986), Guillot (1986), Camberlin (1987), Quilfen (1987), Nicholson (1989), Desbois (1990), Servain (1991), Lahuec (1995), Moron (1995), Marec (1995), Fontaine et Janicot (1996), Bigot (1997), Roucou (1997). Les fenêtres spatio-temporelles de ces travaux diffèrent d'un auteur à l'autre. Compte tenu de la superficie du Bénin et de sa position dans le golfe par rapport au champ atlantique, nous ne travaillerons que sur la fenêtre 20°N - 20°S.

Cette recherche de téléconnexions entre la pluviométrie du Bénin et les TSO atlantiques se justifie par la position géographique du Bénin par rapport au parcours maritime du flux de mousson du sud-ouest qui conditionne les précipitations du pays. Nous chercherons à dégager les modes de variabilité saisonnière des TSO et les corrélations avec celles des pluies saisonnières.

3.2.1. Les modes de variabilité des températures de surface océaniques atlantiques (1964-1990)

A partir d'une ACP avec rotation Varimax sur les anomalies des TSO saisonnières dans le bassin de l'Atlantique tropical, nous avons identifié les principaux modes de variabilité. La régionalisation montre cinq modes de variabilité spatio-temporelle (Tableau 12). Les deux premiers expriment 21% de l'inertie factorielle et sont représentatifs du mode principal de la variabilité thermique atlantique, avec une structure quasi-dipolaire (atlantique nord et atlantique sud), déjà décrit par Servain (1986).

MODES	DENOMINATION	R² (%)
Mode 1	Atlantique nord-ouest (ATL-NW)	10.84
Mode 2	Atlantique sud (ATL-SUD)	10.74
Mode 3	Atlantique nord-est (ATL-NE)	9.11
Mode 4	Golfe de Guinée (GOLFGUI)	7.34
Mode 5	Equateur (EQUAT)	6.96

Tableau 12 : Les 5 premiers modes de variabilité saisonnière de l'Océan Atlantique (fenêtre spatiale 20°N -20°S) sur la période 1964-1990 d'après une ACP avec rotation Varimax données du fichier Focal).

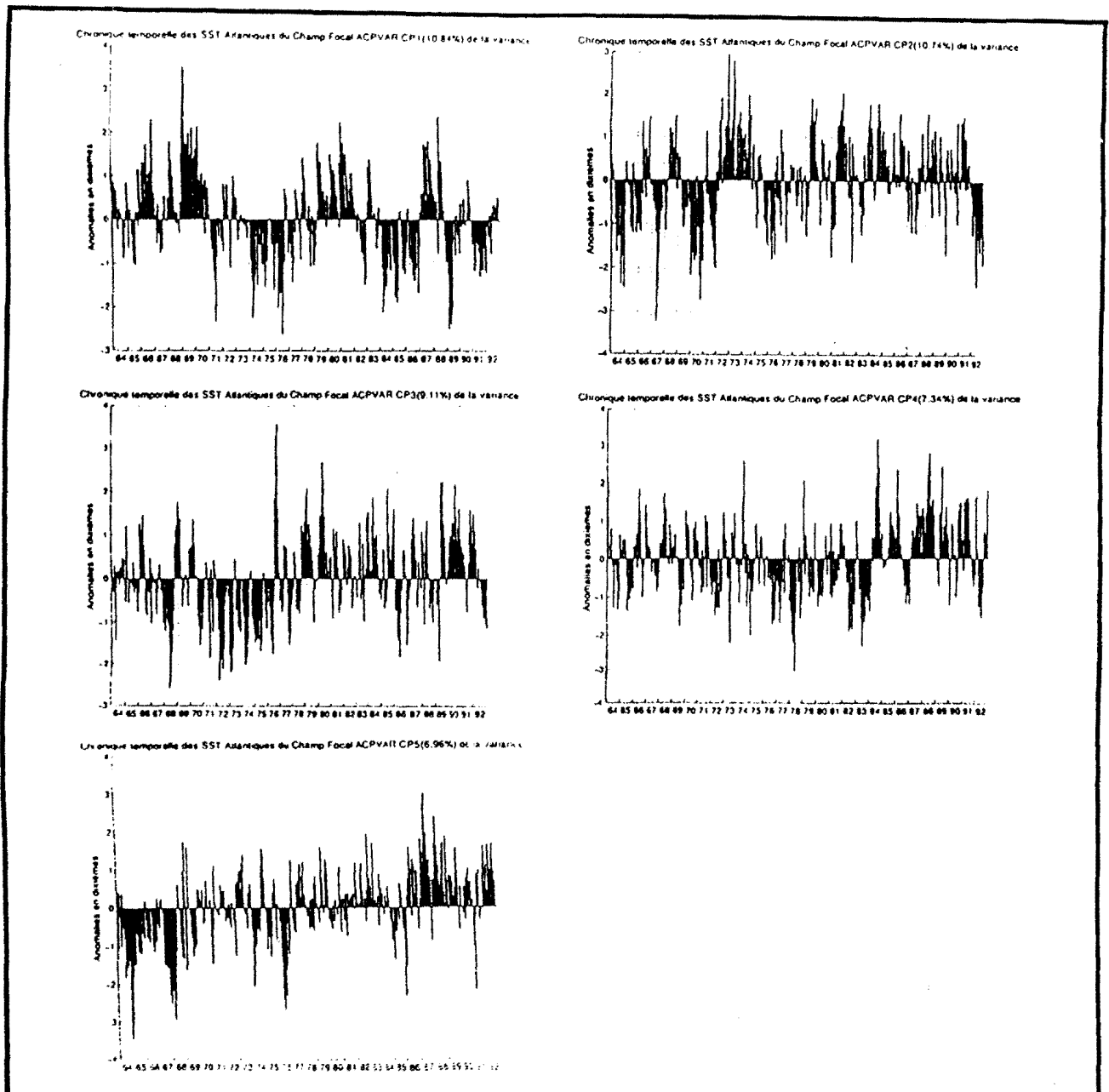


Figure 48 : Modes de variabilité spatio-temporelle des TSO sur la période 1964-1990 dans le bassin atlantique Focal (20°N-20°S).

La première composante exprime 11% de la variance et représente l'homogénéité thermique de l'Atlantique nord-ouest (ATL-NW) au large du Cap-Vert jusqu'aux Guyanes (Figure 48). La chronique associée à cette composante montre qu'au cours des années 1964, 1966, 1968 et 1970, le bassin atlantique NW a été plus chaud par rapport à la normale. A partir de 1973 jusqu'en 1978, cette partie du bassin a été marquée par une succession d'anomalies négatives avec un maximum de refroidissement en 1976. De 1979 à 1981, les eaux sont redevenues plus chaudes. A partir de 1983, on assiste à un nouveau refroidissement anormal des

eaux dans le nord-ouest de l'Atlantique, avec une persistance des anomalies négatives jusqu'en 1987. En 1989 et en 1991, les températures sont redevenues plus froides. Le mode ATL-NW est ainsi caractérisé par une forte variabilité temporelle, avec un maximum thermique en 1969 et un minimum de température en 1976.

La deuxième composante représente 10.74% de la variance (Tableau 12). Ce mode est représentatif de l'Atlantique sud (ATL-SUD). Il correspond à l'espace océanique non côtier au centre de l'Atlantique sud. La période 1964-1971 est caractérisée par des eaux froides. A partir de 1972 et jusqu'en 1975, les eaux de l'océan redeviennent plus chaudes, avec un paroxysme thermique en 1973. De 1975 à 1990, l'ambiance thermique est caractérisée par une persistance d'anomalies chaudes.

Le troisième mode, Atlantique nord-est (ATL-NE) peut être associé à l'upwelling des Canaries. Il décrit 9% de la variance et est notamment responsable de l'ambiance thermique sur les côtes sénégal-mauritaniennes. Les plus fortes saturations sont situées à proximité des côtes. La chronique associée au champ spatial montre que, durant la période 1964-1976, le champ océanique a été plus froid que sur la période 1978-1990. Les températures les plus froides par rapport à la moyenne ont été enregistrées en 1968.

Le quatrième mode de variabilité (GOLFGUI) exprime 7% de la variance et est représentatif du golfe de Guinée. Les plus fortes corrélations sont localisées sur les côtes du Congo-Gabon et de l'Angola. Ce signal peut être associé à la présence des upwellings équatorial et angolais et au courant froid de Benguela. La chronique temporelle associée à cette composante décrit une grande variabilité intermensuelle. Cependant, durant toute l'année 1983, le bassin a connu des anomalies de températures négatives. A partir de 1984, la tendance thermique est caractérisée par un réchauffement général du bassin.

La CP5 exprime 7% de la variance et correspond au mode équateur (EQUA), centré le long des côtes ouest africaines, depuis le Nigéria dans le golfe du Bénin en passant par les îles du Cap Vert, le Rocher de Saint-Paul jusqu'aux confins des

côtes brésiliennes. De 1964 à 1969, excepté quelques événements isolés, le bassin de l'Atlantique équatorial a été marqué par des températures anormalement froides, avec un minimum en 1965. Vers la fin de la période 1968/69, 1973/74, 1986/87 et 1988/89, l'Atlantique équatorial a été anormalement chaud.

3.2.2. Corrélations entre les champs océaniques et les champs pluviométriques

Les résultats sont consignés sur le tableau 13 ci-dessous.

	CP1-Focal	CP2-Focal	CP3-Focal	CP4-Focal	CP5-Focal
	GRANDE SAISON DES PLUIES (GSP)				
CP1-Bénin-sud	0.30	0.06	-0.33	0.26	-0.48*
	PETITE SAISON SECHE (PSS)				
CP1 Bénin-sud	0.31	0.26	-0.21	0.49*	0.56*
	PETITE SAISON DES PLUIES (PSP)				
CP1 Bénin-sud	0.11	-0.23	-0.10	0.35*	0.05

Tableau 13 : Corrélations des TSO atlantiques et CP1 des saisons de pluies dans le Bas-Bénin. (Les corrélations significatives sont suivies d'une astérisque et sont grisées).

- **La grande saison des pluies** au Bénin est liée à plusieurs modes du champ des TSO d'avril-juillet. Les précipitations de cette saison peuvent s'expliquer en partie par les ambiances thermiques du mode 5 (EQUA) avec une corrélation négative ($r = -0.48$) significative au seuil de 1% (Tableau 13). Les excédents pluviométriques de la grande saison agricole du sud du Bénin sont associés aux

anomalies négatives des Températures de Surface du bassin de l'Atlantique équatorial.

● Les excédents pluviométriques observés durant la **petite saison sèche** sur la période 1961-1990 dans le sud du Bénin s'expliquent par le réchauffement anormal des TSO dans le Golfe de Guinée en août septembre ($r = 0.49$, significatif au seuil de 1%), par le bassin équatorial de l'Atlantique plus chaud ($r = 0.56$, significatif au seuil de 1%) (Tableau 13).

La corrélation entre les pluies du mois d'août et les 5 composantes des TSO montre que les importants excédents pluviométriques qui caractérisent régulièrement ce mois sont liés aux fortes anomalies de températures de surface enregistrées respectivement pour les modes atlantique sud ($r = 0.42$, significatif à 1%) et équateur ($r = 0.49$, significatif à 1%). En revanche, la persistance des anomalies pluviométriques au mois de septembre est plutôt liée au réchauffement anormal dans le golfe de Guinée ($r = 0.40$ significatif au seuil de 1%) et tout au long de l'atlantique équatorial ($r = 0.66$). On peut affirmer avec Janicot et Fontaine (1996), que l'évolution interannuelle des précipitations de la petite saison sèche est liée à une structure localisée dans le golfe de Guinée et dans l'Atlantique sud. La modification du climat qui se caractérise par la disparition progressive du régime bimodal qui entraîne la fusion des deux saisons pluviométriques pendant certaines années au Bénin peut s'expliquer par le réchauffement anormal des TSO dans l'Atlantique équatorial et surtout dans le golfe de Guinée.

Les cas d'excédents pluviométriques enregistrés au cours de la **petite saison des pluies** (octobre-novembre) sont en partie liés au réchauffement anormal d'une partie des marges nord tropicales de l'océan Atlantique.

Ces résultats confirment ceux de Fontaine et Janicot (1996) qui ont montré que la seconde saison des pluies est associée à une structure spatiale des TSO différente de celle liée à la grande saison des pluies de mousson d'été. La baisse des précipitations de la petite saison des pluies est associée aux variations des Températures de Surface Océanique des bassins situés au-delà de 25° de latitude nord (non décrit).

3.3. Téléconnexions avec les champs atmosphériques

La recherche de téléconnexions entre les pluies du Bénin et le champ de vent est faite à partir des corrélations pour deux niveaux standards, à savoir 200 et 850 hPa sur la période 1964-1989. La situation à 200 hPa correspond au niveau où s'observe le Jet Tropical d'Est. Le niveau 850 hPa correspond au sommet de la mousson.

Remarques

Les corrélations entre les composantes principales de la petite saison sèche (PSS), de la petite saison pluvieuse (PSP) avec le vent à 850 hPa sont généralement non significatives. Ainsi, les anomalies pluviométriques observées dans le sud du Bénin ne sont pas associées à des mouvements et ambiances dans les basses couches de l'atmosphère. Ce qui paraît paradoxal car le Bénin appartient au domaine de la mousson permanente en Afrique de l'ouest. Ces résultats statistiques posent dès lors un problème qui soulève deux hypothèses, à savoir : la qualité des données de vent et le niveau d'échelle. D'une part, il n'y a pas de radio-sondage centré exactement sur le Bénin et nous travaillons sur un espace restreint de 112 600 km² qui s'étire sur 750 km de long (entre 6-12°N) et 125 km de large sur la côte atlantique dans le golfe de Guinée. Les données de radio-sondage que nous utilisons sont celles qui couvrent les pays avoisinants comme le Niger. Par contre, la corrélation entre le vent et la GSP donnent un résultat intéressant.

3.3.1. Relations entre la grande saison des pluies (GSP) du Bas-Bénin et la dynamique de l'atmosphère à 850 hPa

A 850 hPa, les anomalies positives de la grande saison des pluies sont associées à des anomalies d'ouest du vent sur ,car les corrélations sont positives et significatives sur l'espace gabono-camerounais (Figure 49). Or, la mousson qui arrose le Bénin s'explique par un renforcement du flux d'ouest. Alors se pose le problème d'échelle énoncé dans le paragraphe ci-dessus.

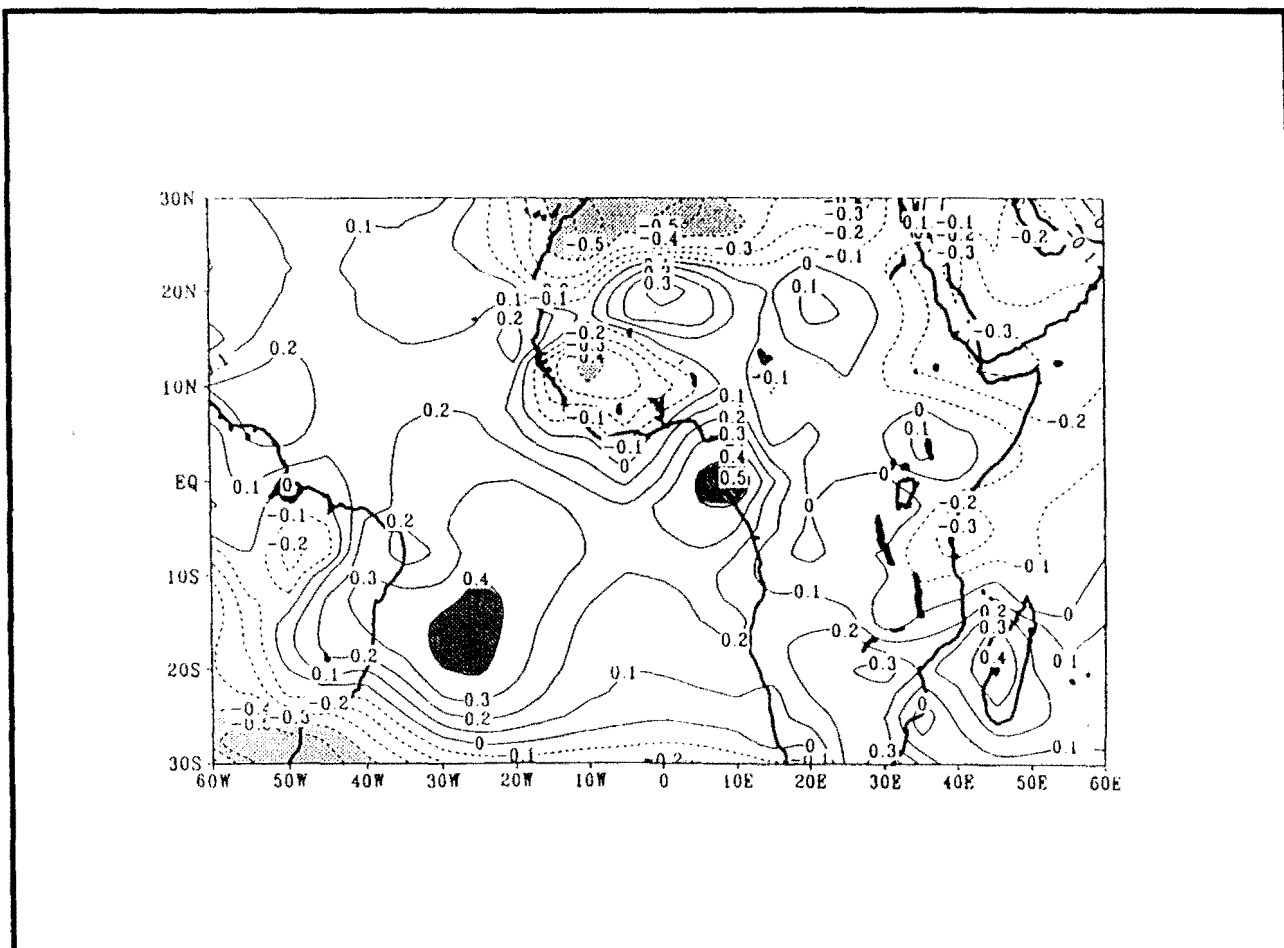


Figure 49 : Relation entre les pluies de la grande saison des pluies au sud du Bénin (avril-juillet) et le champ de vent 1964-1989 à U850 hPa. (Les corrélations significatives aux seuils de 90 et 99% sont représentées en gris clair et en gris foncé ; les corrélations négatives sont indiquées par des isolignes en tiretés ; les liens positifs sont marqués par des traits pleins).

3.3.2 Relations entre la grande saison des pluies (GSP) du bas-Bénin et la dynamique de l'atmosphère à 200 hPa

En avril-juillet, le vent méridien est faible et un flux d'est s'individualise à 200 hPa au niveau de l'équateur. Les corrélations négatives entre la CP1 de la GSP et la composante zonale du vent à 200 hPa sont significatifs. Ainsi, les anomalies positives de la grande saison des pluies sont associées, d'une part : à un renforcement du flux d'est dans le golfe de Guinée (Figure 50), d'autre part au renforcement du jet tropical d'est à V200 hPa (Figure 51).

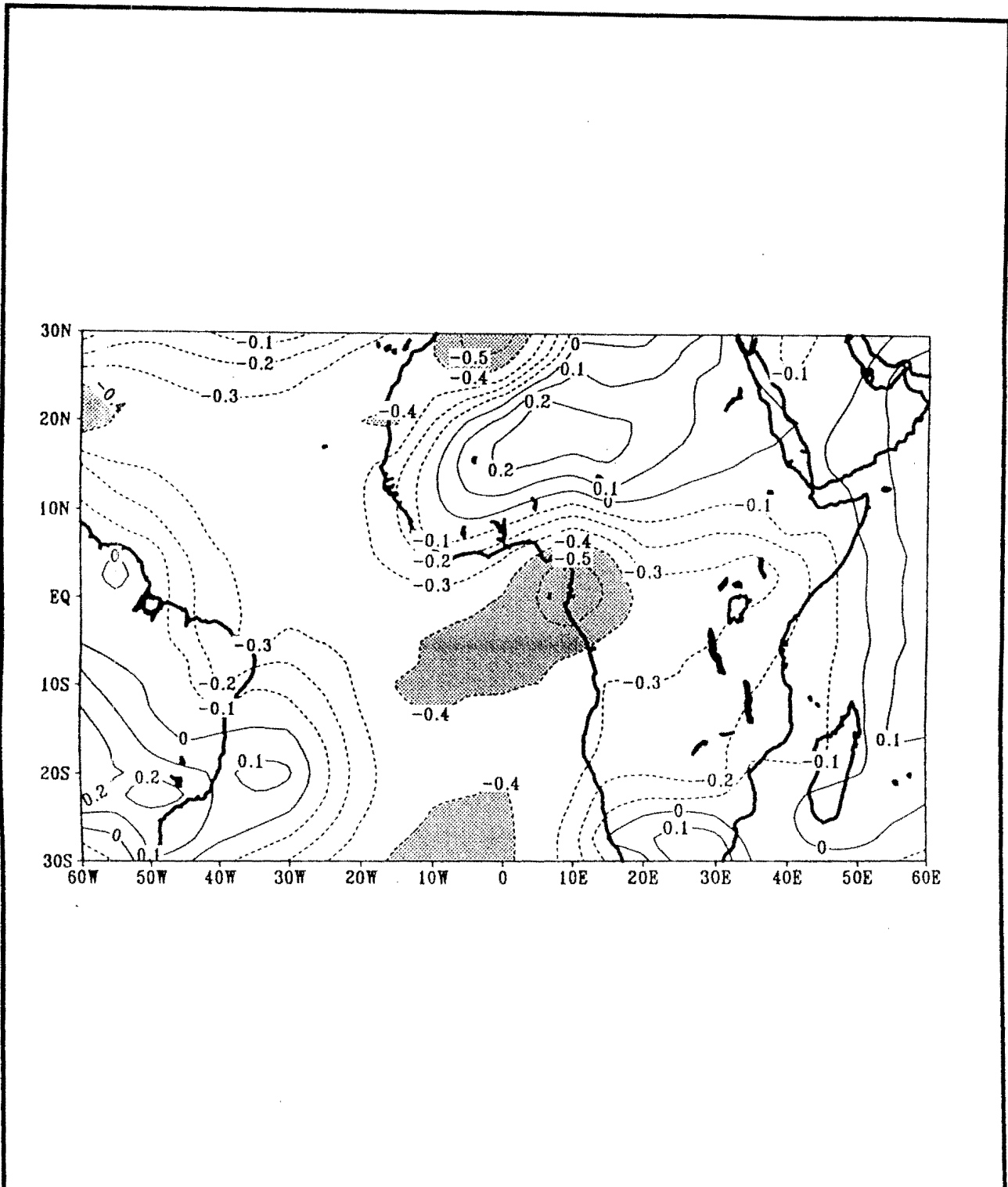


Figure 50 : Relation entre les pluies de la grande saison des pluies au sud du Bénin (avril-juillet) et le champ de vent zonal (U200 hPa) durant la période 1964-1989. (Les corrélations significatives aux seuils de 90 et 99% sont représentées en gris clair et en gris foncé ; les corrélations négatives sont indiquées par des isolignes en tiretés ; les liens positifs sont marqués par des traits pleins).

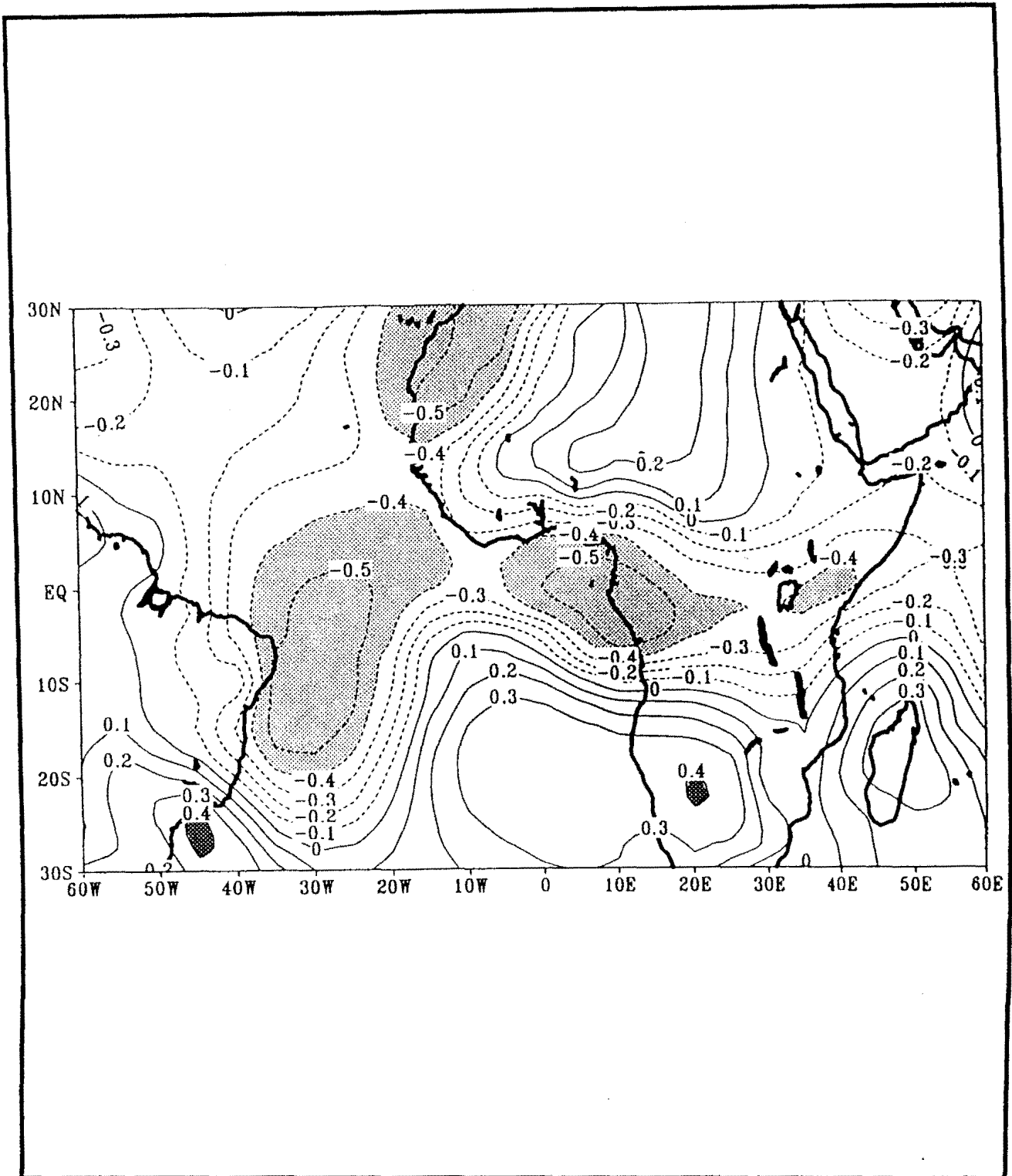


Figure 51 : Relation entre les pluies de la grande saison des pluies au sud du Bénin (avril-juillet) et le champ de vent méridien (V200 hPa) durant la période 1964-1989 ; (Les corrélations significatives au seuils de 90 et 99% sont représentées en gris clair et en gris foncé ; les corrélations négatives sont indiquées par des isolignes en tiretés ; les liens positifs sont marqués par des traits pleins).

3.3.2. Les précipitations de la petite saison sèche et le vent à 200 hPa

Durant la petite saison sèche, on note une forte corrélation positive significative entre la composante zonale du vent dans les hautes couches de l'atmosphère à 200 hPa et les pluies de la récession d'août (Figure 52). Les excédents des précipitations saisonnières (août-septembre) sont associés au ralentissement du Jet Tropical d'Est sur le Sahel. Or, de manière courante, on constate que les pluies sont d'autant plus abondantes sur le Sahel que l'intensité du Jet Tropical d'Est est forte et inversement dans le golfe de Guinée. Ceci justifie à l'échelle du Bénin les travaux de Janicot (1990).

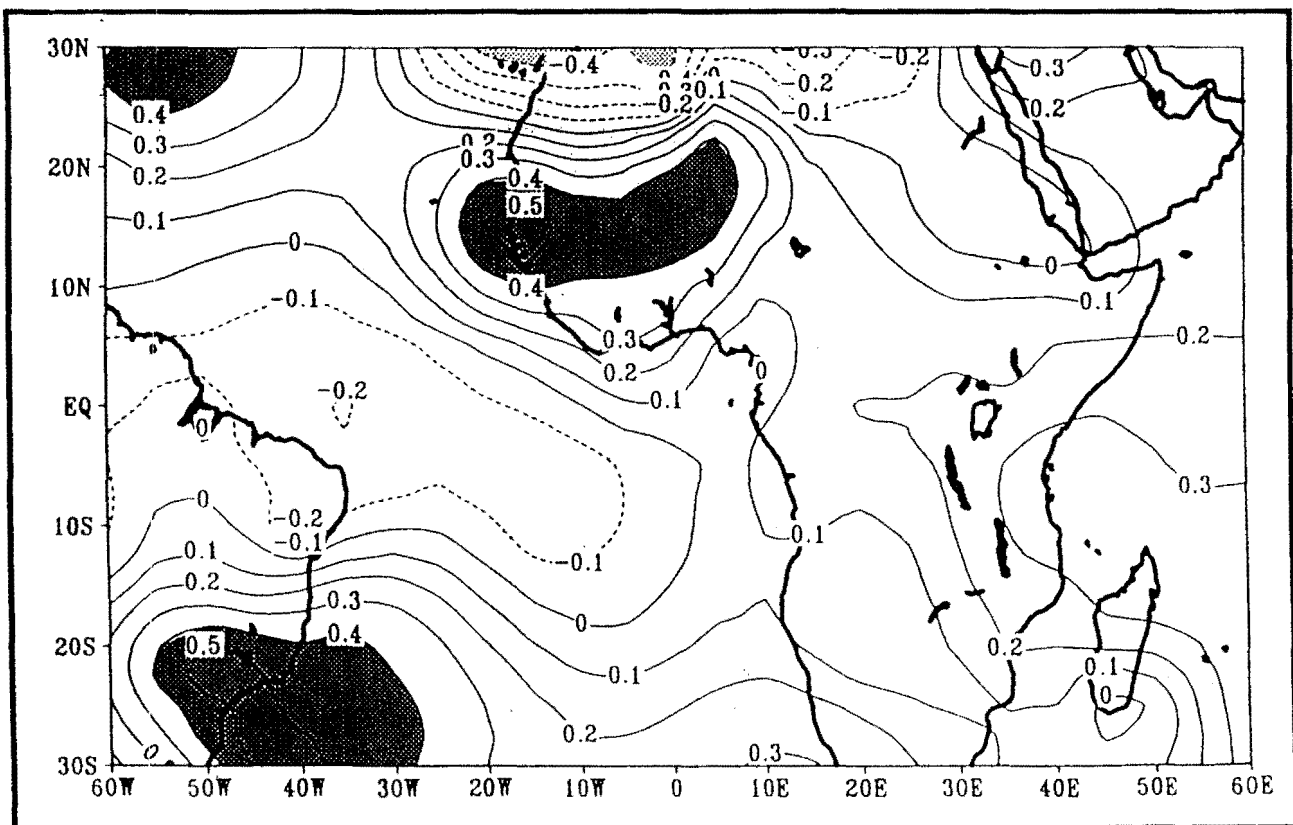


Figure 52 : Relation entre le champ de vent zonal (U_{200} hPa) et la petite saison sèche au Bénin (1964-1989) ; (Les corrélations significatives aux seuils de 90 et 99% sont représentées en gris clair et en gris foncé; les corrélations négatives sont indiquées par des isolignes en tiretés ; les liens positifs sont marqués par des traits pleins).

Les corrélations entre la CP1 des pluies et la composante méridienne du vent sont négatives et significatives sur le golfe de Guinée (Figure 53). Ainsi, les déficits pluviométriques de cette saison sont associés à un renforcement du flux du nord.

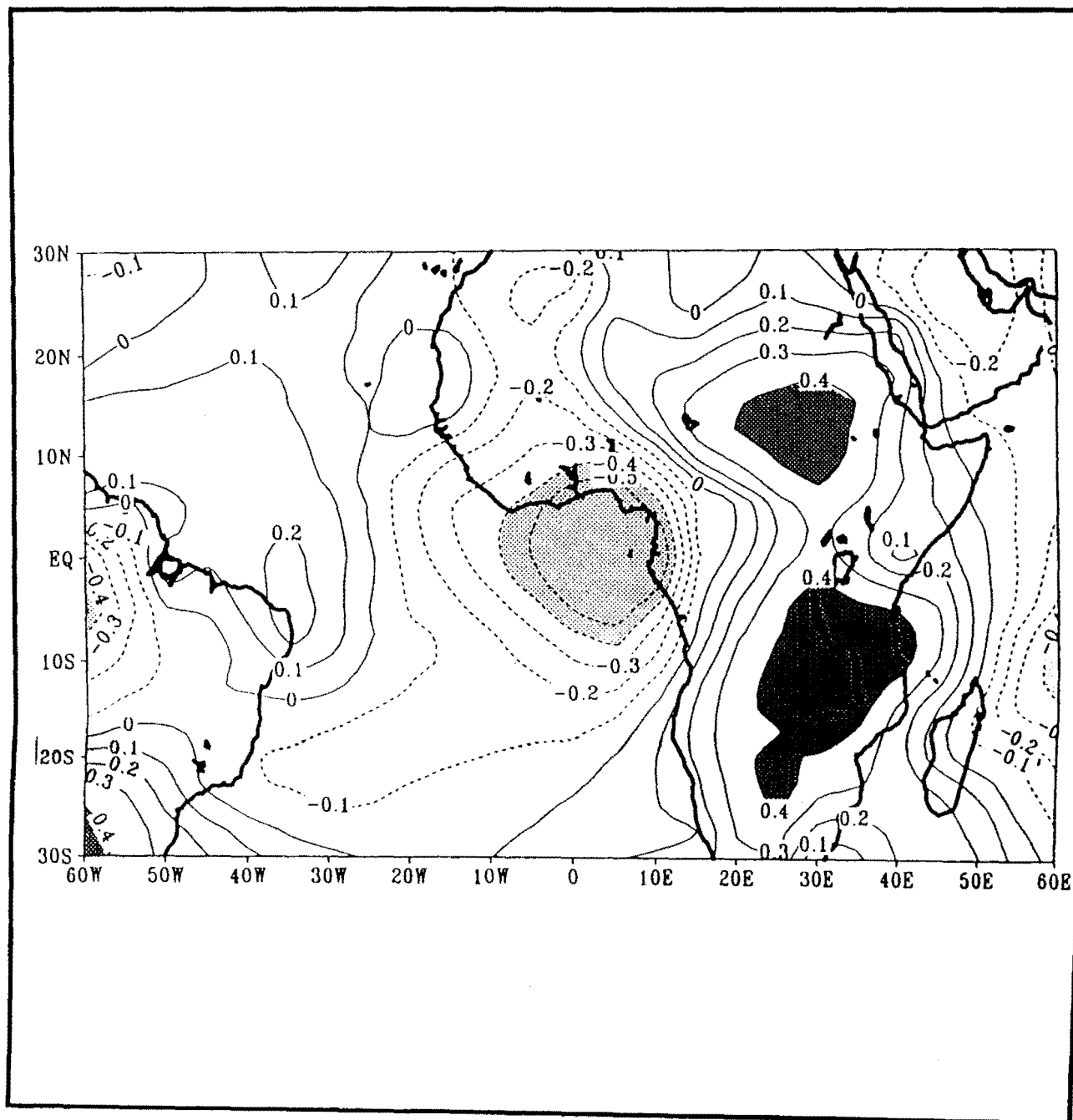


Figure 53 : Relation entre le champ du vent méridien (V200 hPa) et la petite saison sèche au Bénin (1964-1989) ; (Les corrélations significatives aux seuils de 90 et 99% sont représentées en gris clair et en gris foncé ; les corrélations négatives sont indiquées par des isolignes en tiretés ; les liens positifs sont marqués par des traits pleins).

SYNTHESE

Les excédents de la grande saison des pluies se produisent quand le bassin de l'Atlantique équatorial est anormalement froid. Les anomalies positives de cette saison sont associées au renforcement du Jet Tropical d'Est.

Les excédents de la petite saison sèche qui modifie progressivement le régime pluviométrique sont liés à la fois au réchauffement anormal des TSO dans le golfe de Guinée, au ralentissement du Jet Tropical d'Est sur le Sahel et à un renforcement de la composante méridienne du vent dans le Golfe du Bénin.

Les anomalies de la petite saison des pluies sont associées au réchauffement des marges septentrionales de l'Atlantique tropical. Tels sont les facteurs scientifiques (covariations des corrélations) qu'on peut associer à la péjoration climatique au Bénin. Toutefois, dans l'esprit des communautés rurales animistes du Bénin, les facteurs explicatifs de la péjoration climatique sont d'essence métaphysique et les paysans deviennent fatalistes face à la multiplication des années sèches malgré le recours aux divinités et aux mânes de leurs ancêtres.

Section 4. Variabilité des autres composantes du climat

Dans cette section, nous n'analysons que certaines composantes du climat qui interviennent dans la détermination de l'évapotranspiration potentielle (ETP) calculée selon la formule de Penman. Plusieurs études relatives à la description du climat du Bénin ont déjà montré que les températures, l'insolation et tous les autres paramètres climatiques qui interviennent dans le calcul de l'ETP Penman varient moins que la variable pluie car sous les tropiques, ce sont les précipitations qui déterminent les saisons.

4.1. La variabilité des températures de surface

Au Bénin, les températures sont élevées à cause de la situation tropicale du pays, du passage du soleil au zénith et de la proximité des rayons solaires de la verticale. Ces facteurs astronomiques et géographiques expliquent la température moyenne annuelle de 27°C pour l'ensemble du pays. Les caractéristiques géographiques propres au Bénin, comme sa façade atlantique dans le sud et son ouverture sur les bordures méridionales du Sahel, introduisent une variabilité selon la latitude. Mais, les facteurs locaux induisent des nuances à l'échelle stationnelle. Sur l'ensemble du pays, les températures sont élevées au mois de mars (fin de la saison sèche) et plus basses au mois d'août.

Les travaux réalisés par Akouègninou (1984), à partir de la série 1956-1981 montrent que les températures sont élevées durant toute l'année. Les températures maximales varient entre 36°C en février et 26°C en juillet sur la côte à Ouidah et Savè à 7° 59 N. La période la plus chaude s'étend de novembre à mars, et la plus fraîche de juillet à septembre. La plupart des études relatives aux températures se fondent sur le régime thermique moyen pour caractériser la variabilité. Cependant, elles ne présentent pas la variabilité interannuelle de ce paramètre climatique. C'est ce vide que veut combler cette section. Pour l'étude de la variabilité en situation hors contrainte de la culture du maïs, nous procédons à l'évaluation des anomalies par la technique des écarts centrés.

4.1.1. Les températures minimales

La variabilité des températures minimales en milieu soudanien (Kandi, 11°08' N) est marquée par deux périodes bien distinctes : 1971-1979 et 1980-1990 (Figure 54). La première est caractérisée par une succession d'anomalies négatives, avec des écarts à la moyenne de l'ordre de 0,5°C. 1974 et 1980 ont toutefois été des années exceptionnellement chaudes. Le réchauffement du début des années 80 s'est accentué entre 1986 et 1989 avec des anomalies positives de plus de 0,5°C.

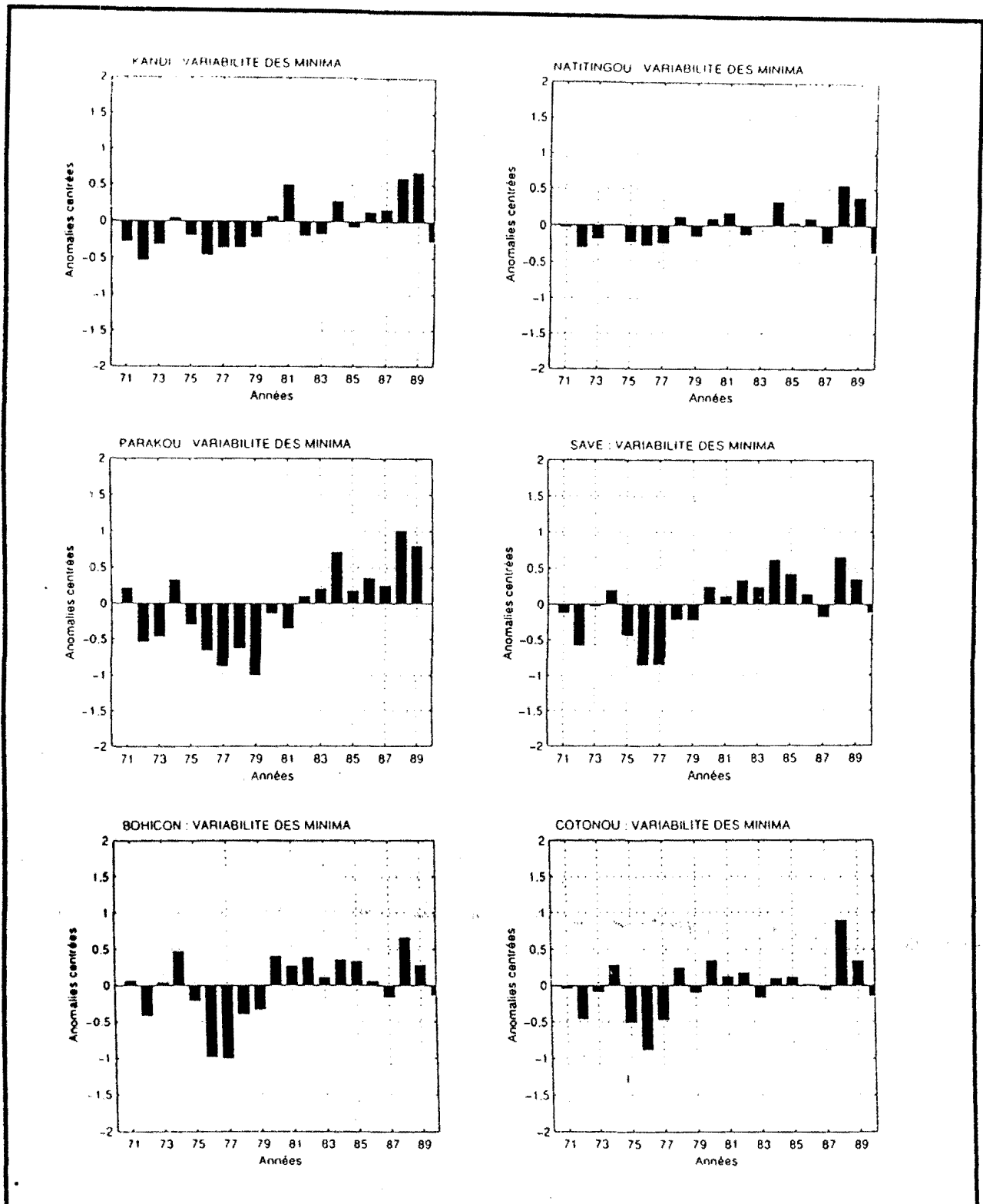


Figure 54 : Variabilité interannuelle des anomalies de températures minimales au Bénin de 1970 à 1990. (Kandi représente la station du climat soudanien dans le haut-Borgou ; Parakou représente le sud du Borgou ; Natitingou représente le climat atakorien ; Savé représente le climat de transition ; Bohicon représente les climat béninien sur les plateaux de terre de barre ; Cotonou est représentative du climat côtier)

Dans le sud du Borgou (Parakou) de 1975 à 1981, la situation est peu différente de celle des autres stations, mais avec des anomalies marquées par une importante amplitude. Par contre, depuis 1982, on assiste à un réchauffement. Les écarts de température par rapport à la normale varient entre 0,1 et +1°C. En milieu atakorien, les températures minimales ont été anormalement faibles durant la période 1971-1977 (Figure 56).

De 1980 à 1990, le moyen-Bénin est anormalement chaud. En milieu béninien, sur le plateau de terre de barre à Bohicon, de 1975 à 1980, la tendance est à la baisse des températures minimales avec des records de -1°C en 1976 et 1977. A partir de 1980, on assiste à un changement de rythme de la variabilité avec une multiplication des écarts de températures positives par rapport à la normale. Le maximum d'anomalies positives est atteint en 1988. Sur le littoral, l'évolution interannuelle des anomalies de température est en dents de scie. Les années d'anomalies négatives sont 1975, 1976 et 1977. Le maximum d'excédent thermique a lieu en 1988. **Pour tout le Bénin, la tendance générale est au réchauffement.**

4.1.2. Variabilité des températures maximales au Bénin

La distribution temporelle des maxima par rapport à la moyenne est très différente selon les régions climatiques sur la période 1970-1990 (Figure 55). La variabilité est supérieure à celle des températures minimales, avec une amplitude souvent supérieure à 1°C. Cette situation ajoutée à de longues séquences sèches au cours de la saison agricole peut-être dommageable pour la culture du maïs à des phénophases critiques.

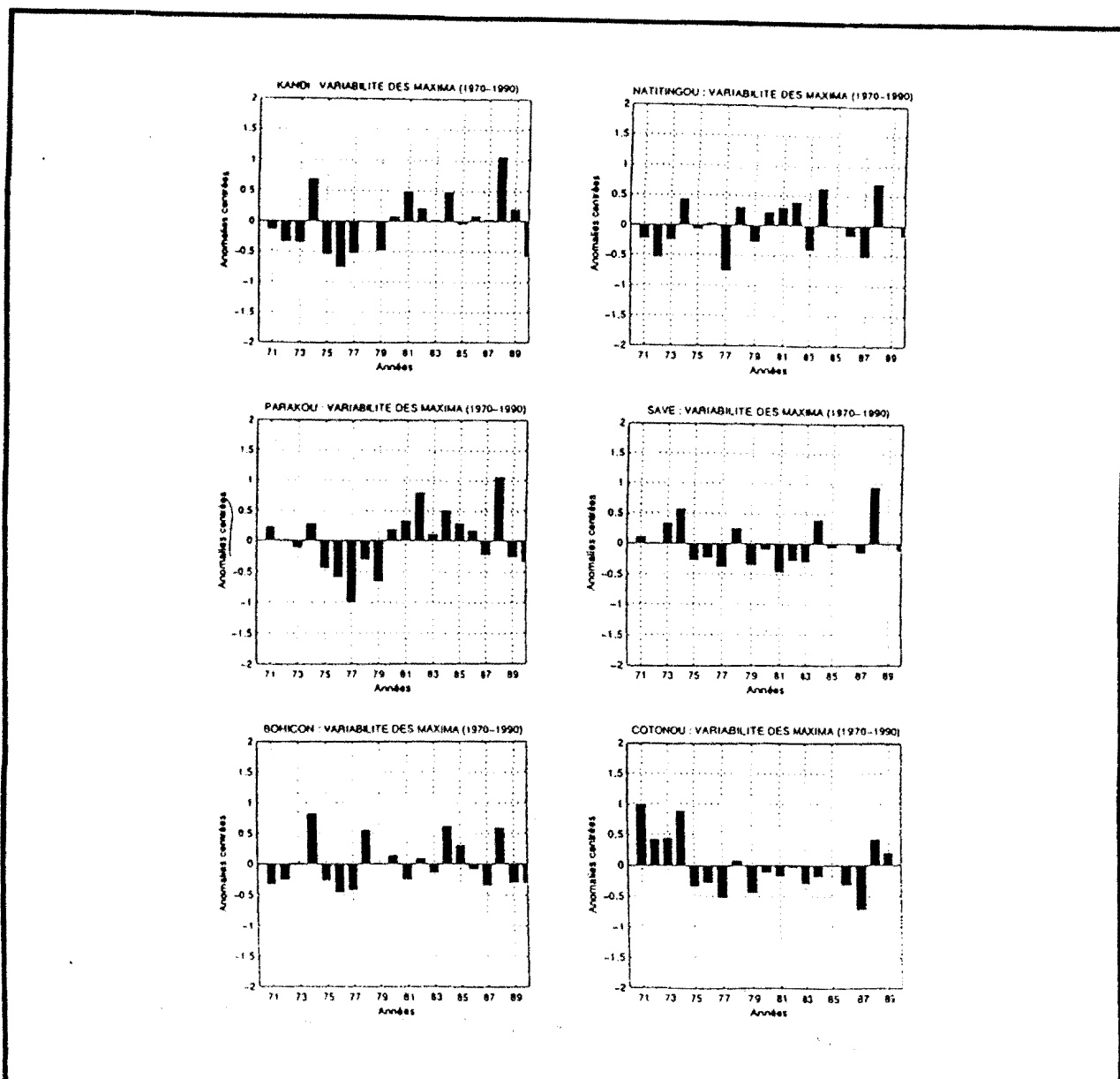


Figure 55 : Anomalies interannuelles des températures maximales au Bénin de 1970 à 1990. (Kandi représente la station du climat soudanien dans le Haut Borgou ; Parakou représente le sud du Borgou ; Natitingou représente le climat atakorien ; Savè représente le climat de transition ; Bohicon représente les climat béninien sur les plateaux de terre de barre ; Cotonou est représentative du climat côtier).

Dans le nord du Bénin, en milieu soudanien sur la période 1971-1980, 8 années (1971, 1972, 1973, 1975, 1976, 1977, 1978, 1979) ont connu des anomalies négatives de températures maximales par rapport à la moyenne. En revanche, la décennie 1980-1990 est caractérisée par un réchauffement (Figure 55). 1974, 1981, 1982, 1983 et 1988 ont été des années de grande chaleur, avec des écarts à la moyenne importants, surtout en 1988 avec un réchauffement de plus de 1°C. En

milieu atakorien, à Natitingou, la situation est quasi analogue sauf que le réchauffement n'est pas aussi prononcé ($\pm 1^{\circ}\text{C}$) (Figure 55).

Au Bénin central (Savè), la variabilité des températures maximales est assez différente de celle observée dans l'Atakora, car certaines années caractérisées par des anomalies négatives à Natitingou sont surtout marquées par des excédents thermiques (1979-1982). Pour toutes les autres stations, l'année 1988 fut aussi une année de grande chaleur (anomalie centrée = $0,97^{\circ}\text{C}$). Vers 7°N (Bohicon), la variabilité des maxima thermiques est caractérisée également par une augmentation de température en 1984, 1985, 1988, et des anomalies négatives en 1983, 1986, 1989 et 1990. Le record de forte chaleur est atteint en 1974 avec un excédent de l'ordre de $0,8^{\circ}\text{C}$ (Figure 57).

Sur le littoral, la variabilité thermique est différente. Contrairement à ce qui se passe dans les autres régions du pays, le début de la période est marqué par une hausse des températures qui varie entre $0,5^{\circ}\text{C}$ et 1°C de 1971 à 1974. De 1975 à 1987, l'évolution des températures maximales a été caractérisée par une succession d'anomalies négatives, excepté en 1978. Depuis 1988, la hausse des températures maximales confirme un réchauffement.

Au Bénin, les années de sécheresse ne coïncident pas nécessairement avec les années d'excédents d'anomalies de températures maximales.

4.2. La variabilité interannuelle de l'insolation

L'étude de la variabilité de l'insolation est essentielle car la radiation solaire fournit l'énergie lumineuse et détermine l'intensité de la transpiration ou de la quantité de vapeur d'eau rejetée par la plante à travers l'étiole. Une forte nébulosité est dommageable au maïs en phase de végétation active et explique entre autres les faibles rendements.

Au Bénin, le rythme de variabilité interannuelle de l'insolation diffère nettement d'une station à l'autre, bien que le régime annuel soit identique. En milieux soudanien et atakorien, de 1977 à 1983, l'insolation a été supérieure à la moyenne

(cas de Kandi et de Natitingou fig. 56), en relation avec des années de sécheresse identifiées par l'étude diagnostique de la pluviométrie. Mais depuis 1986, on assiste à une forte diminution de la durée d'insolation (Figure 56)

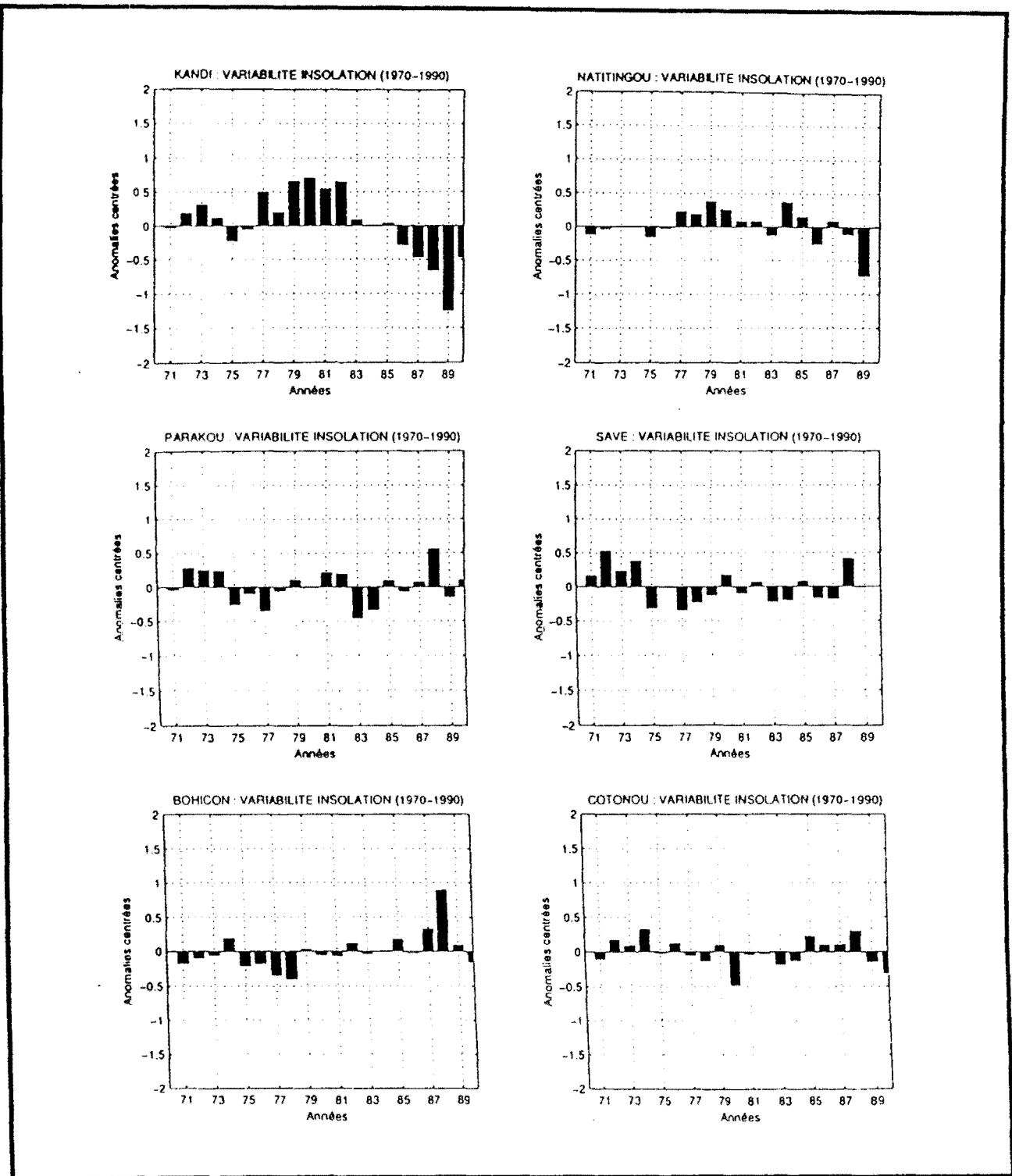


Figure 56 : Variabilité interannuelle de l'insolation au Bénin (1970-1990).

Au Bénin central, de 1971 à 1974, les anomalies positives de durée d'insolation ne dépassent pas 50 heures (Figure 56). De 1975 à 1979, cette partie du Bénin a été confronté à une réduction de la durée d'insolation. A Bohicon, la décennie 1971-1981 a été déficitaire. La deuxième décennie de la série (1971-1990) a connu des scores supérieures à la moyenne et le maximum de durée d'insolation a été atteint en 1988. Sur le littoral, la période 1972-1974 a été excédentaire avec des anomalies positives, alors que de 1980 à 1984, la durée de l'insolation a diminué par rapport à la valeur moyenne. Dans l'ensemble, la répartition temporelle de la durée d'insolation varie de façon très différente d'une station à une autre.

4.3. La répartition temporelle des anomalies interannuelles de tension de vapeur

Au pas de temps interannuel, la tension de vapeur est soumise à une grande variabilité et la configuration temporelle diffère d'une station à l'autre. Sous climat soudanien (Kandi, Natitingou), la période 1983-1990 est caractérisée par une récurrence de déficits importants (Figure 57). L'année la plus déficitaire à Kandi fut 1984 avec plus de 1,5 hPa. En milieu béninien sur les plateaux et à Cotonou sur le littoral, la tension de vapeur était à la baisse de 1975 à 1979. De 1980 à 1982, elle connaît une hausse. Cette situation constitue-t-elle une contrainte pour la maïsiculture au Bénin ?

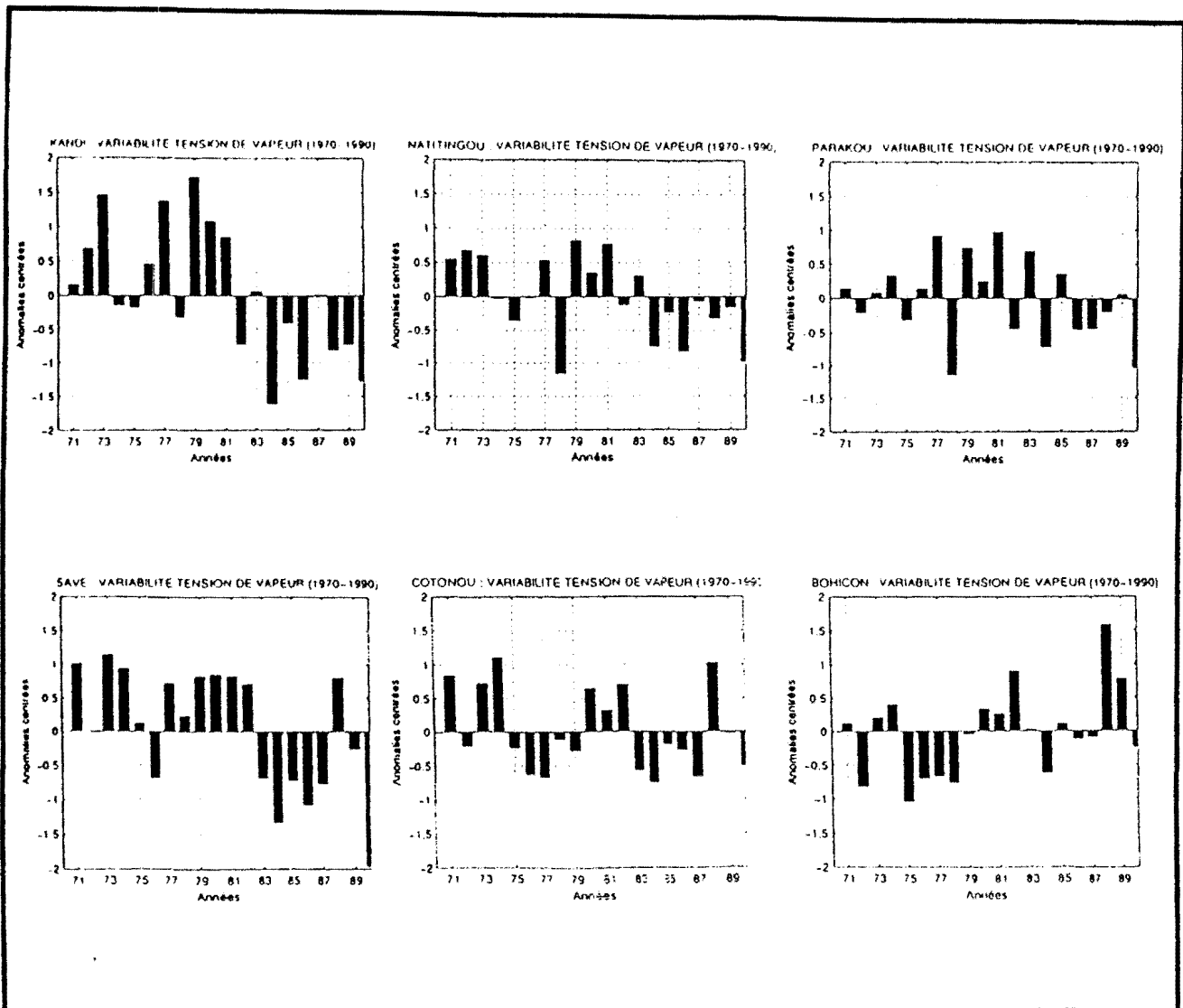


Figure 57 : Variabilité interannuelle de la tension de vapeur au Bénin (1970-1990).

SYNTHESE

Le diagnostic d'autres composantes du climat (température, insolation, tension de vapeur) confirme une péjoration climatique au Bénin. L'analyse des températures et de l'insolation montre une tendance au réchauffement sur toutes les stations, quel que soit leur régime pluviométrique. L'évolution des tendances thermométriques montre que la décennie 1981-1990 se révèle chaude, à l'opposé de la décennie 1961-1970, plus fraîche, étudiée par Boko (1998). La péjoration climatique se caractérise par une tendance à la baisse du potentiel pluviométrique et une hausse des températures. Cette évolution dichotomique des composantes du climat au Bénin entraîne indubitablement la dégradation des conditions écologiques et édaphiques : bilans hydriques et hydrologiques fortement déficitaires à cause d'une forte augmentation de l'évapotranspiration potentielle et d'une moindre abondance

de la ressource en eau atmosphérique qui entraîne une grande difficulté de valorisation de la culture du maïs et de la gestion des terroirs.

Section 5 : Analyse du bilan climatique du Bénin de 1970 à 1990

Le calcul du bilan climatique moyen au pas de temps annuel donne une idée globale de l'intensité de la sécheresse mais autorise à penser qu'il est impossible de faire des cultures sans apport d'eau complémentaire, puisque partout le solde est négatif (Afouda, 1990). C'est pourquoi nous privilégierons les pas de temps décadaire et mensuel pour apprécier la durée des saisons des pluies et la distribution des séquences sèches.

5.1. Variabilité des bilans climatiques moyens saisonniers de 1970 à 1990

Le bilan climatique est généralement calculé à partir de l'évapotranspiration potentielle et de la pluie. C'est la différence entre la demande climatique de la culture et l'offre qu'elle reçoit. Toutefois, le bilan climatique ne tient pas compte du stock hydrique disponible dans le sol. Le bilan climatique est aussi un outil de comparaison régionale. C'est une valeur climatique, car elle est calculée comme étant la différence entre les précipitations (P) et l'ETP, elles-mêmes variables climatiques. Le bilan climatique permet d'apprécier le rythme de l'humidité et de la sécheresse.

Quand $P-ETP > 0$, le bilan climatique est positif. Si $P-ETP < 0$, on dit qu'il est négatif. Quand $P-ETP = 0$, le bilan climatique est équilibré. Il permet de décompter les mois, décades ou épisodes secs et les périodes humides dans le temps selon la relation qui lie P et ETP.

Le bilan climatique au Bénin a déjà été évalué par Boko (1988), sur 10 ans (1971-1980) à partir d'une dizaine de stations (Figure 58).

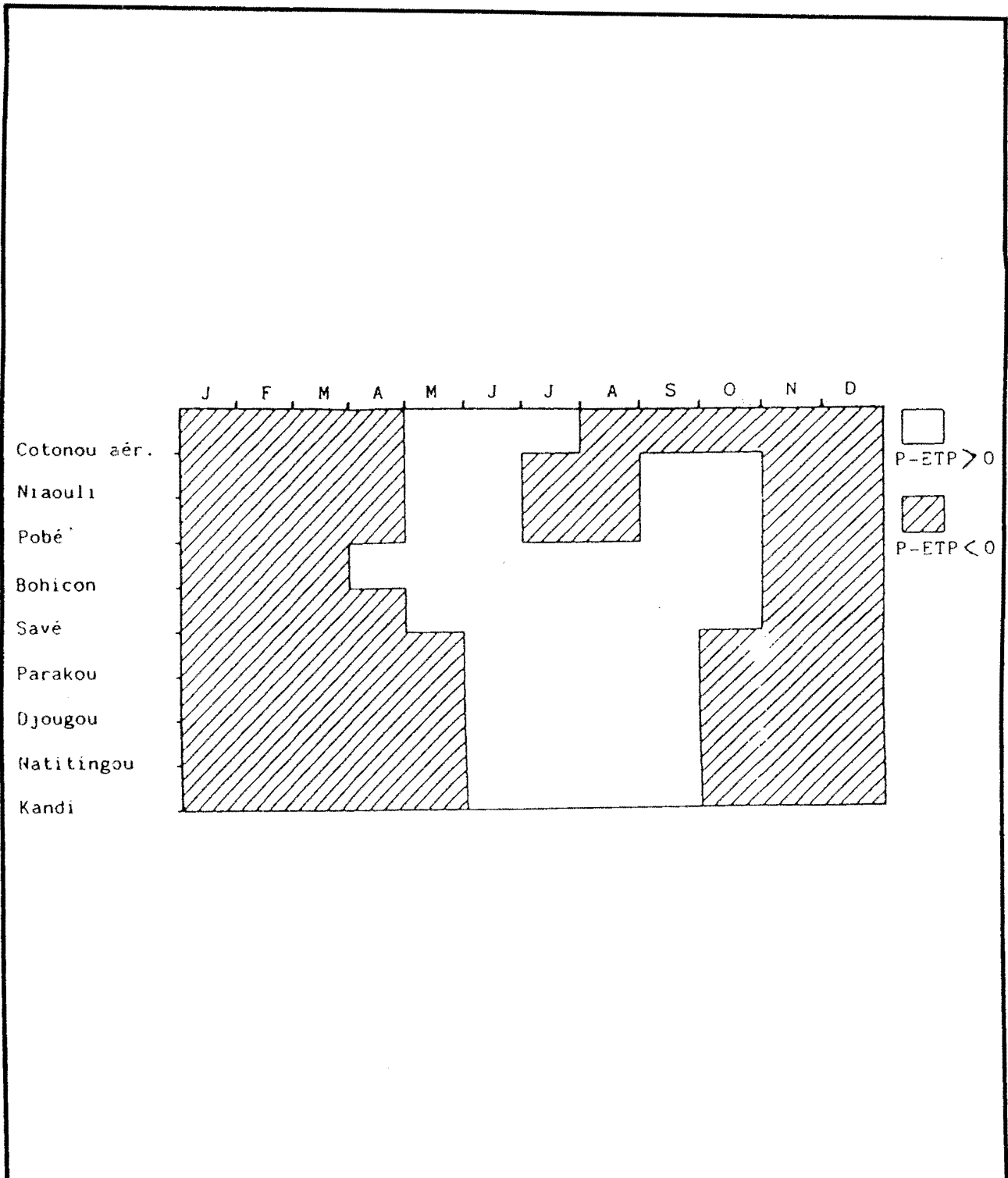


Figure 58 : Bilan climatique moyen pour dix stations du Bénin sur la période 1971-1980 (d'après Boko, 1988).

L'auteur montre que le milieu béninien se distingue des autres régions climatiques par trois mois d'humidité, de mai à juillet. A la limite de la zone d'influence océanique, le régime d'humidité se situe entre mai-juin et septembre-octobre. Entre 7° et 9° de latitude nord, on note une longue période excédentaire

supérieure ou égale à 6 mois. Au-delà de 9° de latitude nord, la période moyenne excédentaire dure 4 mois, de juin à septembre. Boko (1988) a montré que la disposition zonale du bilan climatique et le régime d'humidité expliquent bien la répartition des paysages végétaux du Bénin : savane buissonnante sur la côte, savane boisée et forêt secondaire très dégradée dans l'arrière pays immédiat, forêt hémihygrophile et forêt claire plus au nord, et enfin forêt sèche tropicale et savane arborée au delà de 9° de latitude nord. Cependant, l'auteur n'a pas fait usage du bilan climatique pour analyser la durée et la mobilité des saisons agricoles du pays.

Dans cette étude, le bilan climatique brut permet de dégager l'articulation des saisons agricoles et de faire ressortir la variabilité des phases d'humidité, notamment en comparant les deux décennies 1971-1980 et 1981-1990.

Le bilan climatique établi pour la période 1971-1990 sur les données décennales montre une légère différence par rapport aux résultats de Boko (1988) concernant le début des saisons agri-pluviométriques. Sur le littoral, à Cotonou, le bilan est excédentaire à partir de la troisième décennie du mois d'avril, avec une rupture pluviométrique à la première décennie du mois de mai. De la mi-juin à septembre, le bilan est négatif. La petite saison pluvieuse est marquée par un solde voisin de zéro. Si au cours de la décennie 1971-1980 elle a été marquée par un bilan positif (Figure 59), la deuxième saison des pluies durant la période 1971-1990 est devenue plus sèche. Dans ces conditions, le maïs semé au cours de la dernière décennie d'août ne bénéficie que de l'humidité de la première décennie de septembre, rendant très aléatoire la culture du maïs au cours de la petite saison car le bilan climatique montre une phase de déficit hydrique (Figure 59)

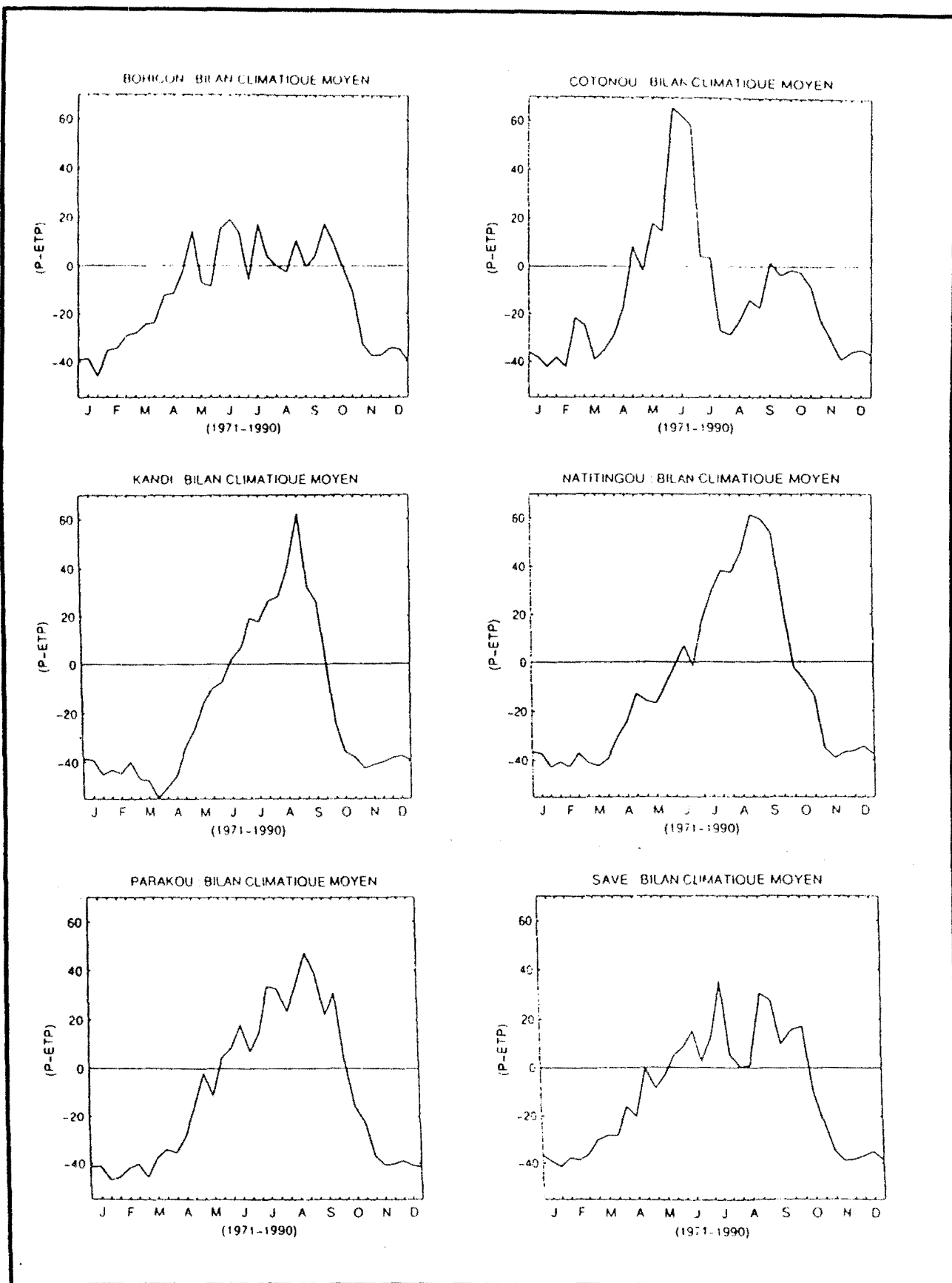


Figure 59 : Bilans climatiques moyens : diagnostic de la durée des saisons pluviométriques au Bénin au cours de la période 1971-1990

Dans ces conditions, le maïs ne peut survivre qu'avec une ponction dans les réserves du sol. Pour l'agronome, ce bilan est très simple et peu expressif. Cependant, il offre pour le modélisateur, la possibilité du choix de la réserve utile du sol en fonction des conditions locales.

Sur le plateau de terre de barre, à Bohicon, la situation est particulière. Le schéma du bilan climatique moyen est différent du rythme annuel moyen de la pluviométrie au pas de temps mensuel sur la période 1971-1990. Sur la période 1971-1980, étudiée par Boko (1988), les deux schémas sont identiques. Au cours des vingt dernières années, le schéma du régime d'humidité a été épisodique. Il n'existe pas de phases humides bien tranchées. Des périodes sèches alternent avec des phases humides de la première décennie de mai à la deuxième décennie d'octobre. La saison agricole démarre tardivement et est susceptible d'être surtout caractérisée par un faux départ, car l'installation véritable de la saison agricole n'intervient qu'à partir de la deuxième décennie de juin. La petite saison sèche a presque disparu et les mois d'août et septembre sont très humides sur la période 1971-1980. A Bohicon, dans le Zou, depuis 1971, on assiste à un démarrage tardif et à une fin précoce, donc à une réduction de la durée de la saison.

Dans la zone de transition climatique (8°N à Savè), la saison agricole débute tardivement à partir de la troisième décennie de mai et se termine durant la deuxième décennie d'octobre. Dès la fin du mois d'août le régime d'humidité s'installe jusqu'à fin octobre. Comparativement avec la zone littorale où la petite saison pluvieuse est marquée par un solde nul ou négatif, à Savè, la saison d'automne d'hémisphère nord est humide. Théoriquement, il existera un surplus d'eau utilisable pour l'écoulement et pour la reconstitution des nappes phréatiques et pour l'alimentation en eau des cultures de la deuxième saison agricole.

Dans le nord du pays, en milieu soudanien, la saison agricole dure quatre mois et débute en mai ou juin et se termine à la fin du mois de septembre ou début octobre. A Parakou, elle débute plus tôt (troisième décennie de mai) qu'à Kandi (deuxième décennie de juin). Dès la première décennie du mois d'octobre, le sud et le haut-Borgou sont en phase de sécheresse absolue.

Dans le nord-ouest, à Natitingou, le bilan climatique est positif dès la troisième décennie du mois de juin jusqu'à la troisième décennie de septembre. On assiste à une réduction de la durée de la saison des pluies sur la période 1971-1990, comparativement à la décennie 1971-1980.

SYNTHESE

L'étude du bilan climatique montre à la fois l'articulation des périodes humides, la durée des saisons agricoles et leur récente variabilité. Le bilan climatique comparé 1981-1990 et 1971-1990 à l'échelle mensuelle présente des différences significatives. La prise en compte du pas de temps décadaire décèle la mobilité des saisons pluviométriques dans le temps et dans l'espace et la réduction de la durée des saisons agricoles. De ce point de vue, au Bénin, le paysan reste confronté aux séquences sèches au cours de la saison agricole et aux faux départs pluviométriques de la saison culturale qui sont préjudiciables au semis, à la mise en place du système végétatif des cultures.

5.2. Analyse de quelques situations de sécheresse au Bénin à partir du bilan climatique potentiel sur la période 1971-1990

L'analyse ponctuelle des situations de sécheresse de 1977, 1983 et 1984 est nécessaire car ces années ont été marquées par des disettes dans le sud du Bénin et les volumes d'importation de produits vivriers ont augmenté. Le maïs était devenu une denrée très rare appelée « Nivaquine ». Cette dénomination témoigne de la gravité de la situation climatique qui a été qualifiée de « conjoncture ou situation très difficile à vivre » par les populations rurales.

5.2.1. Les déficits hydriques en 1977

- **Dans le sud**, sur le littoral en 1977, la sécheresse s'est manifestée par une petite saison des pluies largement déficitaire. Le bilan climatique est négatif de 107 mm à Cotonou. La période de déficit s'étend de juillet à la dernière décennie de mars,

soit une sécheresse de 9 mois. Le déficit pluviométrique de cette saison est préjudiciable pour la culture de maïs de deuxième saison (Figure 60).

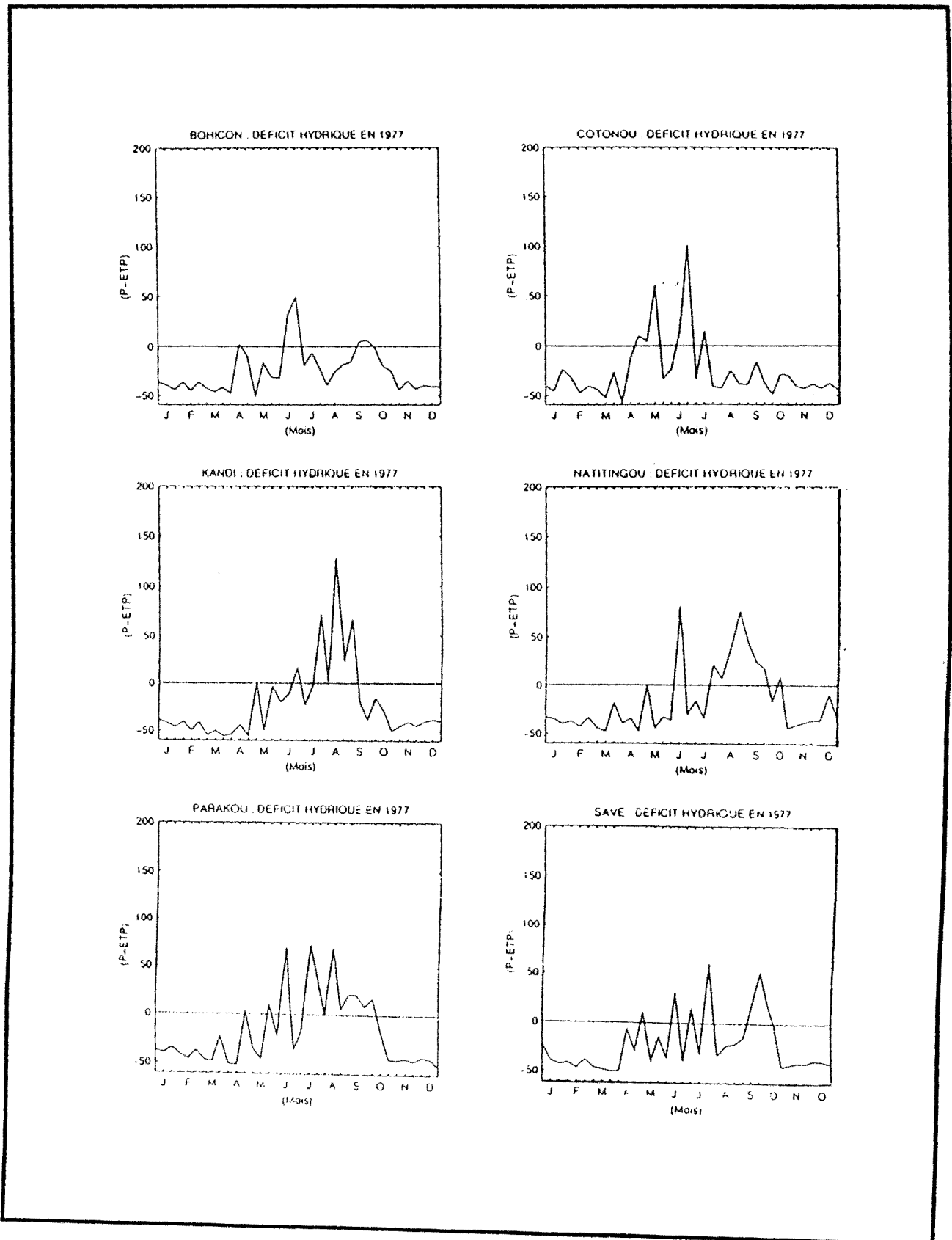


Figure 60 : Déficit hydriques en 1977 au Bénin

Par ailleurs, la longueur de la grande saison des pluies est extrêmement réduite. La période humide n'est que de 60 jours, avec une interruption de 20 jours **(de fin mai à la deuxième décade de juin) (Figure 60)**

A la latitude de 7°N (Bohicon), la grande saison des pluies est caractérisée par un faux départ. On note un début précoce de la saison pluviométrique à partir de **la deuxième décade du mois d'avril, avec un excédent de 10 mm suivi de 50 jours de déficit**. La concentration pluviométrique saisonnière ne dure que 30 jours. La fin de la saison est aussi précoce (première décade de juillet). La seconde saison des pluies se caractérise par un décalage sur septembre-octobre au lieu d'octobre-novembre habituellement. Ceci est insuffisant pour le maïs de 90 jours planté d'habitude durant cette saison.

Dans la zone de transition climatique, à Savè, la sécheresse se manifeste par des ruptures dans l'évolution pluviométrique intra-saisonnière, ce qui est préjudiciable pour la culture du maïs en particulier. Le démarrage de la saison est suivi de 30 jours de déficit. Les ressemis sont restés sans succès car la dernière décade du mois d'avril est aussi suivie de 30 jours de déficit pluviométrique (Figure 60). Par contre, le bilan climatique de la petite saison des pluies demeure positif pendant 40 jours, de septembre à octobre.

● **Au nord du Bénin**, dans le Borgou (Parakou et Kandi), la saison des pluies a démarré au même moment à la fin du mois d'avril, mais a été suivie d'une séquence sèche de 40 jours à Kandi et de 30 jours à Parakou. Par la suite, sur ces deux stations, les périodes de déficit ont alterné avec des périodes de solde positif. Par contre, la saison s'est prolongée jusqu'en octobre à Parakou (Figure 60).

Dans la région de l'Atakora, le bilan climatique présente une allure bimodale alors que le régime des pluies est monomodal. Le début de la saison des pluies est marqué par un faux démarrage et il est suivi de 30 jours de déficit. Une autre séquence sèche de 30 jours intervient de juin à juillet. La sécheresse de 1977 a été caractérisée par une réduction de la durée des saisons agricoles, une diminution des totaux pluviométriques et des séquences sèches dans l'évolution pluviométrique

intrasaisonnaire. Dans le sud du Bénin, le cycle pluviométrique ne correspond plus au cycle végétatif du maïs de 90 jours, ce qui est préjudiciable pour la culture du maïs. Ainsi les paysans producteurs de maïs se trouvent en situation de contrainte agroclimatique.

5.2.2. Les déficits hydriques en 1983 au Bénin

En milieu béninien et sur le littoral, en 1983, le bilan climatique présente un tableau pluviométrique déficitaire durant la petite saison des pluies. La grande saison agricole débute tardivement (première décade de mai) et s'étend jusqu'à fin juin. La période excédentaire dure 70 jours. A Bohicon, la période d'humidité est réduite à 50 jours. La petite saison des pluies se caractérise par un solde positif de 10 jours seulement (dernière décade du mois de septembre), avec une fin précoce. A Savè, dans le centre du pays, les quelques excédents pluviométriques enregistrés sont inférieurs à 50 mm et discontinus dans le temps (Figure 61). Ces déficits hydriques sont à l'origine de la disette de 1983 qu'ont connue certaines régions du pays car les rendements agricoles ont chuté malgré les superficies emblavées.

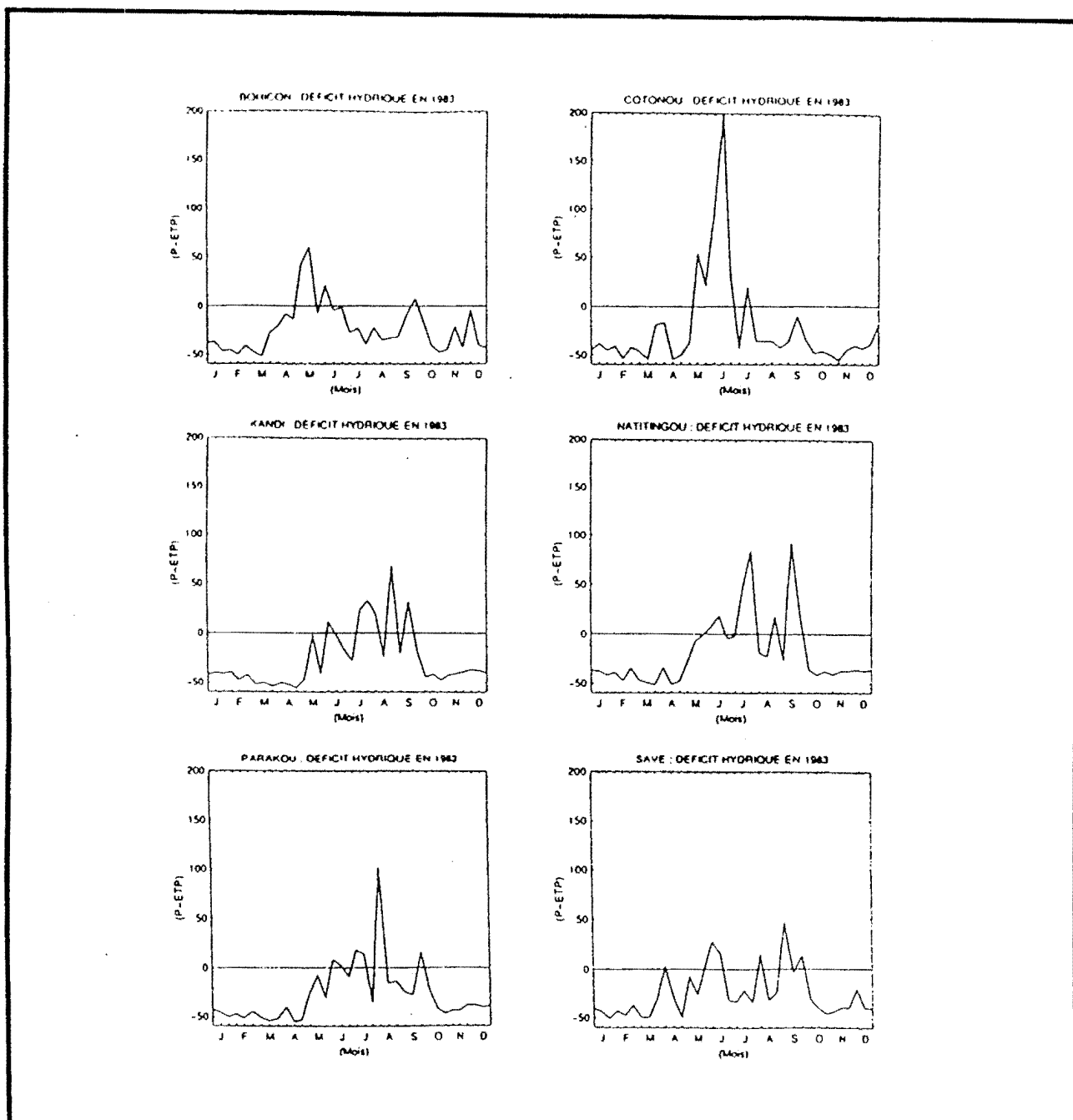


Figure 61 : Déficit hydriques en 1983 au Sud et au nord du Bénin

● Dans les régions septentrionales, les périodes d'humidité ne durent que 70 jours entrecoupées de décades déficitaires à Kandi et à Parakou. Dans la région de l'Atakora, le bilan climatique de 1983 est bimodal. Les excédents les plus importants ont été observés en juin et en septembre. Au total, la sécheresse de 1983 a presque les mêmes caractéristiques que celle de 1977. Ses conséquences agroclimatiques sur la culture du maïs ont été manifestes, et le Bénin a importé plus de maïs pour juguler la crise vivrière.

5.2.3. Les déficits hydriques en 1984 au Bénin

En 1984, sur le littoral, la période humide n'a duré que 50 jours et la saison s'achève de manière très précoce à la deuxième décennie de juin. La petite saison sèche s'installe plus tôt que prévu et le maïs a manqué d'eau à la maturité. La petite saison des pluies a été excédentaire. Vers 7°N, à Bohicon, en 1984, le démarrage de la grande saison des pluies a été tardif (la deuxième décennie de juillet) et la grande saison des pluies n'a duré que 50 jours.

La saison agricole et la campagne de cette année étaient difficiles à gérer. En revanche, vers 8°N (Savè), l'année 1984 a été humide, mais avec des excédents très modestes, qui sont en général inférieurs à 50 mm (Figure 62).

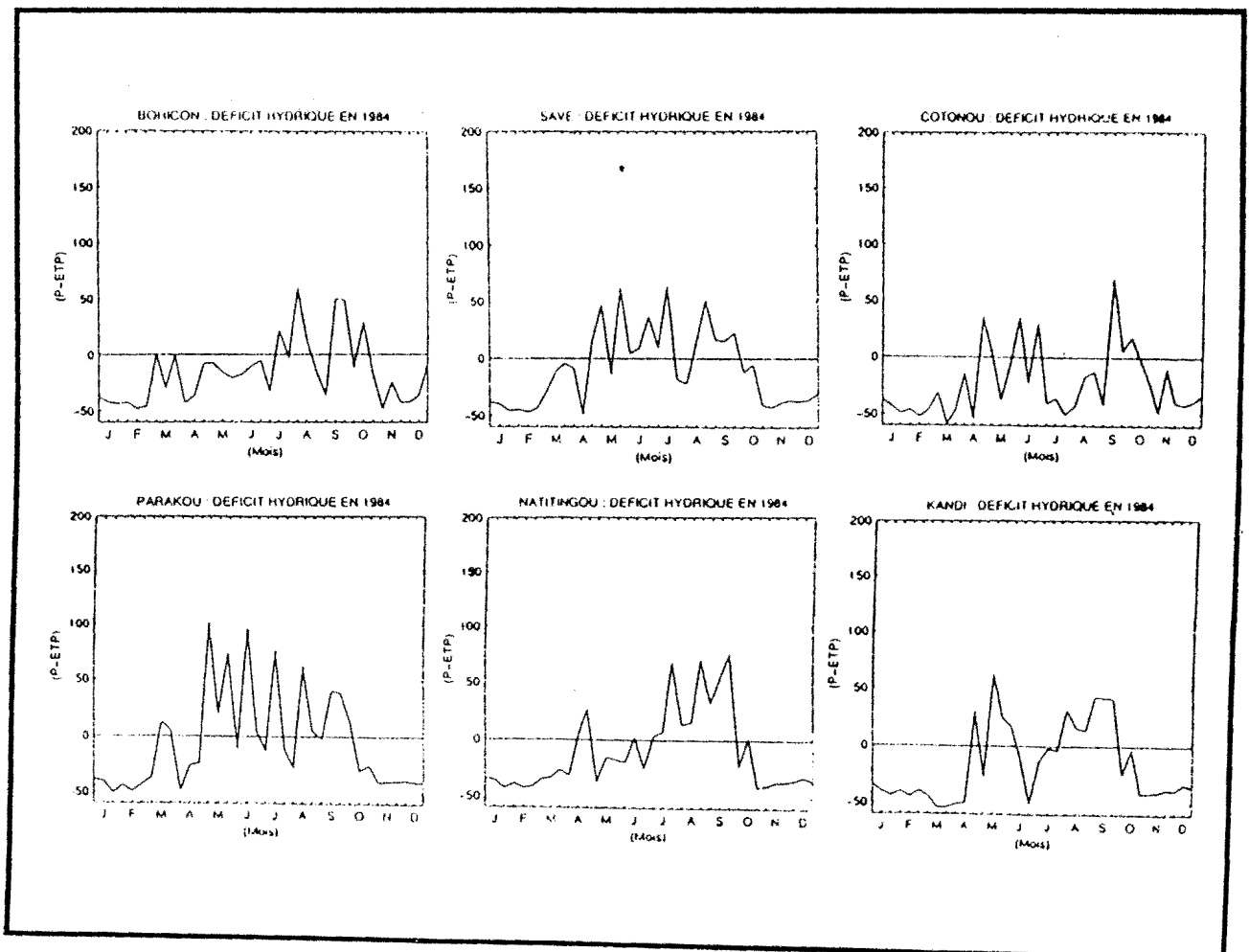


Figure 62 : Déficit hydriques en 1984 au Bénin

Au nord du Bénin, dans le Borgou-sud (Parakou), on note une alternance des phases d'humidité avec de courtes périodes de déficit. A Kandi (haut-Borgou), le

début de la saison a été précoce en avril et suivi d'une phase de sécheresse de 30 jours de juin à juillet. Par contre, les mois d'août-septembre ont été largement excédentaires.

SYNTHESE

Au Bénin, les sécheresses de 1977, 1983 et 1984 ont été caractérisées par des déficits pluviométriques importants. Bien que les sécheresses soient des phénomènes climatiques observés à l'échelle de tout le pays, leurs manifestations et leur ampleur diffèrent selon les saisons et selon les milieux climatiques. Les signes manifestes des sécheresses observées durant la petite saison pluvieuse sous le climat béninien sont la réduction de la durée de la saison agricole, les ruptures pluviométriques intrasaisonniers et le décalage de cette saison agricole sur septembre-octobre au lieu d'octobre-novembre. La conséquence majeure de cette réduction de la petite saison des pluies rend très aléatoire la culture du maïs de 90 jours. La grande saison des pluies est caractérisée par des faux départs pluviométriques, ce qui est préjudiciable aux ressemis.

Conclusion de l'analyse de la variabilité climatique au Bénin

Cette conclusion fait le point des résultats issus de l'analyse des données qui a permis de caractériser et de quantifier l'ampleur de la variabilité climatique au Bénin. Elle se présente comme une fiche d'intention susceptible de fournir des renseignements pour une meilleure connaissance de l'espace climatique du Bénin à des fins d'aménagement du territoire .

Résultats majeurs

● Le diagnostic pluviométrique du Bénin à partir de la période 1931-1990, découpée en deux normales, 1931-1960 et 1961-1990, met en évidence l'existence d'une péjoration climatique amorcée depuis quelques décennies. L'analyse statistique des éléments du climat confirme que les précipitations demeurent le meilleur indicateur des fluctuations climatiques au Bénin. Le

pluies s'organisent selon un gradient latitudinal qu'on retrouve dans les structures spatiales de la variabilité.

● La variabilité climatique se manifeste au Bénin par des modes spatio-temporels différents selon les régions et par un changement des structures saisonnières. Ce changement dans les structures saisonnières est marqué par une modification des régimes pluviométriques.

● La variabilité climatique se manifeste également par une diminution significative du nombre de jours de pluie, une réduction des totaux pluviométriques d'une majorité de saisons et un réchauffement anormal des températures

● La période 1931-1960 a été plus arrosée que la normale 1961-1990 marquée par d'importants déficits pluviométriques. La période récente (1961-1990) se caractérise par un début tardif et une fin précoce des saisons pluviométriques. Ceci induit une réduction de la durée des saisons agricoles.

● Au Bénin, la variabilité climatique interannuelle est commandée par celle des mois de juillet, août et septembre. Elle se caractérise par une périodicité peu franche de 2 à 3 ans qui correspond au signal de l'Oscillation Quasi Biennale (OQB), qu'on considère comme une composante de l'ENSO (Cadet et al., 1988)

● Paradoxalement, la période 1931-1960, la plus humide à l'échelle du continent connaît au sud du Bénin une petite saison sèche particulièrement nette, alors que durant la normale 1961-1990 la récession d'août est devenue anormalement humide, avec des nombres de jours de pluie plus élevés et de faibles occurrences de séquences sèches. Ces importantes anomalies pluviométriques positives sont associées à l'accroissement anormal des températures de surface océanique du bassin atlantique dans le golfe de Guinée et au ralentissement du Jet Tropical d'Est sur le Sahel et à un renforcement de la composante méridienne du vent à 200 hPa.

● La petite saison des pluies au sud du Bénin est surtout plus précoce et soumise à une très grande variabilité avec une réduction de sa durée et une nette diminution des totaux pluviométriques. Les importantes anomalies qui marquent cette saison sont associées au réchauffement des marges septentrionales de l'océan Atlantique. La petite saison pluvieuse est devenue très aléatoire, ce qui met les paysans dans une situation de risque et impose un changement de pratiques et de systèmes de culture.

● Les anomalies pluviométriques négatives qui ponctuent la grande saison de mousson sont associées au ralentissement de la composante zonale du vent et du Jet Tropical d'Est dans le Golfe de Guinée. Les excédents pluviométriques de cette saison sont associés aux anomalies négatives du bassin de l'Atlantique tropical autour du Nordeste brésilien. La variabilité spatio-temporelle des pluies de cette saison est associée à l'action combinée des TSO de la frange nord-brésilienne et au réchauffement anormal des TSO le long des côtes gabonaises.

● Au total, on peut parler de dérèglement climatique (Lamarre, 1997) au Bénin, car on note des changements indiscutables dans les structures climatiques saisonnières qui gouvernent toute la vie agricole du pays. Ce dérèglement est accompagné de quelques sécheresses à l'échelle de tout le pays, comme celles de 1977 et 1983-1984, mais avec des intensités variables selon les régions. Au Bénin, le climat béninien (6°N-8°N) a plus varié que le climat soudanien.

● Contrairement à certains auteurs qui ont limité la sécheresse ouest africaine au Sahel, on peut affirmer actuellement que l'Afrique Occidentale humide et côtière subit un véritable dérèglement climatique. Nos résultats confirment ceux de Paturol *et al.* (1995) sur la Côte d'Ivoire et ceux de Klassou (1996) qui, à partir d'une analyse de différence des pluies saisonnières de 1931-1990 des stations de Notsé et de Tchékpo, met en évidence une péjoration climatique au sud du Togo.

● Au Bénin, l'étude diagnostique des différents éléments du climat montre que la variabilité climatique est une réalité tangible caractérisée par une péjoration qui ne cesse de perdurer et face à laquelle les paysans éprouvent un grand désarroi. Selon ces communautés rurales de l'aire culturelle Adja-Fon et de la civilisation de la Nok Figurine, le déterminisme qui explique ce vécu climatique ressort de la colère de certaines divinités.

Pour l'immense majorité des paysans des différents groupements socio-culturels du Bénin, il n'y a pas de doute : les climats ont changé. Mais le concept de changement climatique ne peut être accepté car le changement dont ils évoquent les manifestations est la variabilité pour le spécialiste du climat.

TROISIEME PARTIE

CONSEQUENCES DE LA VARIABILITÉ DES FACTEURS DU RISQUE CLIMATIQUE SUR LA CULTURE DU MAÏS AU BENIN

**Partie 3. CONSEQUENCES DE LA VARIABILITE DES
FACTEURS DU RISQUE CLIMATIQUE SUR LA CULTURE
DU MAÏS AU BENIN**

**Chapitre premier – L'évaluation des contraintes et risques
liées à la maïsiculture.**

**Chapitre deuxième – Diagnostic hydrique de la culture du
maïs.**

**Chapitre troisième – Les conséquences socio-
environnementales liées à la maïsiculture**

INTRODUCTION ET POSITION DU PROBLEME

La variabilité climatique au Bénin dominée par celle des mois de juillet août et septembre, avec une périodicité de 2 à 5 ans, a des conséquences sur la production agricole, notamment sur la culture du maïs, et autres secteurs de l'économie nationale. La manifestation majeure de cette variabilité climatique se caractérise par un dérèglement des structures saisonnières, une diminution des totaux pluviométriques, une réduction de la durée de la petite saison des pluies, une réduction du nombre de jours de pluie, et une hausse des températures. Ceci entraîne indubitablement une dégradation des conditions écologiques et des difficultés dans la gestion des écosystèmes et des terroirs (Boko, 1998)

Plusieurs auteurs dont Bokonon-Ganta (1986), Boko (1988), Afouda (1990), Pérard (1993), Oké (1993), Houssou (1996), Besancenot et *al.* (1997), pour ne citer que ceux-là ont montré que la péjoration climatique au Bénin a de nombreuses conséquences sur différents écosystèmes et sur la santé des populations. Boko (1988), en étudiant les rythmes climatiques et les rythmes de développement, a montré que les fluctuations climatiques entraînent une modification des systèmes culturels et engendrent un déficit de la balance commerciale. Sans pour autant quantifier les préjudices causés par la variabilité climatique, l'auteur a démontré que les "chocs climatiques" ébranlent le système économique et tout le tissu social. Sircoulon (1982), par des exemples précis dans le Bas et le Moyen-Bénin, a montré aussi que la récession pluviométrique a entraîné des bouleversements écologiques et hydrologiques, en même temps qu'elle a modifié l'alimentation de base ainsi que les programmes d'aménagement rural. Dans une étude sur les conséquences du climat sur les écosystèmes fluviaux, Bokonon-Ganta (1988) a montré que la décennie 70 a été marquée par de forts déficits hydrologiques atteignant 40% des normales 1951-1980, 1955-1984. Pérard et *al.* (1993), à partir des enquêtes de terrain, ont montré que les irrégularités pluvieuses récentes enregistrées en milieu soudanien au Bénin, constituent des facteurs de dégradation de l'environnement physique et humain dans le Haut Borgou et le bassin du Niger au Bénin.

Toutes ces études d'impact du climat sur le développement s'accordent sur le rôle perturbateur et modificateur du climat sur les écosystèmes et la vie agricole.

Dans l'ensemble, elles démontrent aussi que la variabilité du climat peut être considérée comme un élément déterminant du rythme du développement. A l'exception de Boko (1988) qui a montré les conséquences de la répartition spatio-temporelle sur les tonnages du maïs mais sans en montrer l'influence sur les phénophases de la culture, les autres études et les travaux ci-dessus cités n'ont pas su quantifier statistiquement et de façon fréquentielle l'influence du climat sur la satisfaction des besoins en eau de la culture en termes de contrainte. C'est ce vide que veut combler le chapitre suivant.

Mais en réalité, de quelle manière la variabilité climatique constitue-t-elle une contrainte pour l'agriculture béninoise en général, et la maïsiculture en particulier. Si les rythmes climatiques régionaux ont changé, à quelles phases phénologiques du maïs les effets sont ils ressentis ? Pour répondre à ces questions, nous analyserons et caractériserons en termes de risques et de contraintes les effets du dérèglement climatique identifié dans la première partie sur la maïsiculture.

Dans un premier temps, nous circonscrirons les concepts de risque et de contrainte dans le contexte agroclimatique et présenterons les résultats de l'enquête, les raisons du choix du type de modèle du bilan hydrique des cultures et les scénarios réalistes qui serviront à le renseigner.

Dans un second temps nous présenterons les résultats de l'analyse du bilan hydrique de la culture du maïs en termes de comparaison à partir des périodes 1931-1960 et 1961-1990.

Enfin, nous analyserons les conséquences socio-environnementales liées aux contraintes agroclimatiques de la maïsiculture au Bénin.

CHAPITRE I : L'ÉVALUATION DES CONTRAINTES ET DES RISQUES LIÉS A LA MAÏSICULTURE AU BENIN

L'évaluation des conséquences de la variabilité du climat sur les écosystèmes et sur les systèmes de culture passe par un inventaire des contraintes et par la quantification des risques qu'elle induit. Cette évaluation des contraintes et risques climatiques demeure aujourd'hui une nécessité pour la compréhension des échecs de projets de développement et des mutations socio-écologiques et parvenir à une bonne politique d'aménagement du territoire qui prendrait en compte la composante climat jusque là peu considérée par les concepteurs de développement agricole du pays. La connaissance des probabilités de risque pourrait dans l'actuel contexte de péjoration climatique aider à redéfinir des zones d'aptitude pédoclimatique pour une nouvelle promotion de la culture du maïs. Mais en réalité qu'entend-on par contrainte et risque climatique? La contrainte climatique induit-elle un risque agroclimatique ? Quand finit la contrainte et où commence le risque climatique ? Enfin, contrainte et risque climatique sont-ils des termes à associer ? Afin de répondre à ces questions, la définition des deux concepts paraît nécessaire.

Section 1. : Les notions de risque et de contrainte : le cadre conceptuel

Définir les termes de contrainte et de risque n'est pas aisé. Les définitions de ces deux concepts varient selon les disciplines, les objectifs et les contextes. La bibliographie concernant leur sens est abondante et très exhaustive. Nous ne reviendrons pas en détail sur les difficultés de définition de ces deux concepts. Cependant, nous préciserons leurs sens dans le cadre de la caractérisation des effets de la variabilité climatique sur la maïsiculture au Bénin.

Selon le dictionnaire Robert, la contrainte est définie comme «une violence exercée contre quelqu'un ou une entrave à la liberté». Dans le dictionnaire de philosophie, « la contrainte est ce qui entrave la liberté d'action d'un être, soit du dehors, soit du dedans ». La contrainte peut être donc définie comme ce que subit tout individu par le fait de vivre dans un espace ou dans une société. Ici, les aléas climatiques comme les sécheresses, les inondations, la dégradation et l'érosion des sols et leurs conséquences, peuvent être considérés comme une contrainte dans la mesure où ces phénomènes poussent les communautés rurales à modifier leur

genre de vie. Le concept de contrainte dérive du latin "constringere" qui veut dire serrer. Au sens large du terme, la contrainte sous entend un asservissement, un assujettissement. La notion de contrainte induit l'idée d'une imposition, d'une obligation, et mieux encore d'une soumission. Etre contraint c'est être soumis au poids d'un facteur naturel ou humain, ou d'une quelconque difficulté. Ainsi, la notion de contrainte est étroitement liée à la notion de pression, à la coercition et au blocage d'une volonté d'action.

En climatologie appliquée ou en écophysiologie, la contrainte climatique peut être définie comme un facteur limitant de la production agricole. Un des buts de l'agriculteur est de chercher à lever ces handicaps; ce qui n'est pas toujours possible ou rentable.

Par contre, le risque exprime l'idée de danger, de péril, de hasard, et de probabilité. Il suppose l'éventualité d'un événement futur et l'incertitude d'encourir un bien ou un mal. Dans ce cas, la notion de risque peut être associée à la notion d'aventure. Selon Brossier (1989), le risque est souvent associé à des événements aléatoires susceptibles de répétition. Le risque est alors beaucoup plus statistique et peut se caractériser par sa fréquence d'apparition, son intensité. Il peut être quantifié et estimé à partir de l'évaluation des dégâts s'il est perçu sous un angle nocif. Contrairement à la contrainte, on peut se prémunir du risque, comme le risque de sécheresse climatique en prévoyant un réseau d'irrigation. Le risque d'inondation peut être aussi réduit par la construction des barrages ou de digues. Ainsi, grâce à la technologie on peut réduire le risque. Il y a des risques qu'on peut supprimer ou éviter, et enfin auxquels on peut s'adapter.

En agroclimatologie, le risque se caractérise par la fréquence d'apparition d'un événement climatique ou biologique qui peut être préjudiciable au développement. Dans ce cas, le risque peut être la sécheresse climatique, les cyclones, les coups de vents, les excès ou les déficits de température, l'attaque des cultures par des ravageurs. Le risque climatique peut être défini comme la probabilité d'avoir des pluies insuffisantes qui induisent la perte de tout ou une partie de la récolte (Eldin, 1989). Ainsi, le risque implique une notion de lourdes conséquences. En agriculture, Boussard (1979) définit le risque comme la «variance des revenus des agriculteurs

« dus aux aléas climatiques ». Si les aléas climatiques induisent la variance des revenus, la contrainte climatique devient un facteur donc une cause, et le risque est une variance, alors un effet. Bien que la contrainte climatique soit une cause et que le risque climatique constitue l'effet, la limite entre risque et contrainte est difficile à établir dans la mesure où les contraintes modulent les risques (Eldin, 1989). Contrainte climatique et risque climatique ne sont pas en général associés dans le même raisonnement car ils constituent deux concepts proches et en même temps différents d'où possibilité de confusion et de pléonasmе. Cependant dans cette étude, la contrainte et le risque sont deux phénomènes dont les conséquences sont la baisse de la productivité potentielle d'une culture (maïs). Toutefois, la contrainte demeure un phénomène régulier plus ou moins connu et auquel on peut s'adapter

Somme toute, la contrainte limite la production potentielle moyenne alors que la variance des revenus de l'agriculteur liés à cette production est le risque climatique. Si l'on se met à la place de l'agriculteur, il choisit entre plusieurs options techniques selon les contraintes climatiques. En revanche, le comportement des paysans est en général expliqué par une évaluation des risques et une analyse de leurs de les surmonter et de minimiser à partir du choix des variétés et des techniques culturales. L'évaluation des contraintes et des risques climatiques sur la maïsiculture peut se faire surtout par le calcul des termes du bilan hydrique de la culture du maïs.

Section 2. : Les besoins en eau des cultures : généralités

Le climat est l'un des facteurs nécessaires à la croissance des plantes. C'est aussi un élément indispensable pour un optimum de rendement des cultures en relation avec le sol. La caractérisation des besoins en eau des plantes passe par l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle, la détermination du coefficient cultural et de l'évapotranspiration maximale. Le sens de tous ces concepts a été déjà précisé dans la plupart des précis de climatologie, d'écophysiologie et d'agroclimatologie. Ainsi, nous ne rentrerons pas dans les détails de définition. Nous rappellerons de façon sommaire les définitions pour la compréhension des sections suivantes.

2.1. Les besoins en eau des cultures

2.1.1. L'évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration potentielle (ETP) représente la quantité d'eau évaporée par les étendues d'eau, les sols et les couverts végétaux. Elle a une place importante dans le cycle de l'eau et peut se définir comme la restitution d'eau dans l'atmosphère dans les conditions naturelles du milieu physique. La littérature concernant l'ETP est très abondante et les méthodes de calcul varient selon les milieux géographiques. Comme nous l'avons mentionné dans la section méthodologie, l'ETP qui est utilisée pour l'estimation des besoins en eau est calculée par la formule de Penman car celle-ci s'adapte bien aux pays tropicaux dont le Bénin.

2.1.2. L'évapotranspiration maximale (ETM)

L'ETM (évapotranspiration maximale) représente le besoin en eau optimum d'une culture. Elle représente la valeur de l'ETR du couvert végétal lorsque sa résistance stomatique est minimale (Guyot, 1992). Elle peut être aussi définie comme la quantité d'eau maximale évaporée par le sol et transpirée par la plante qui ne souffre d'aucune limitation d'eau ou de problème pathologique. Ainsi, elle se rapporte à des conditions dans lesquelles l'eau est suffisante pour assurer une croissance et un développement sans restrictions (Doorenbos, Kassam, 1978). C'est un indicateur du bilan hydrique qui varie en fonction des deux paramètres intrinsèques de la plante qui sont : la nature du cultivar et le stade végétatif de la culture. Du point de vue variabilité, l'ETM est faible au début du cycle de la culture (évaporation élevée) et devient maximale quand l'indice foliaire (LAI : Leaf Area Index) atteint son maximum. Elle décroît avec la sénescence de la plante. L'ETR n'atteint jamais la valeur de l'ETM car même lorsque les stomates des plantes sont largement ouverts, le couvert végétal lui-même offre une certaine résistance au transfert de la vapeur d'eau à cause de sa structure géométrique (Guyot, 1992). La variabilité de l'ETM dépend du rayonnement global, de la température, de la pluviométrie qui sont les facteurs essentiels de l'alimentation hydrique de la culture. Elle peut être définie comme la demande climatique de la plante. A défaut d'instrumentation elle peut être aussi calculée à partir de l'équation du bilan hydrique.

Ceci revient alors à chercher de manière semi-empirique les consommations en eau réelles en introduisant des coefficients culturaux. Ainsi, $ETM = Kc \cdot ETP$.

2.1.3. L'évapotranspiration réelle (ETR)

L'ETR (évapotranspiration réelle) est la somme de la quantité d'eau évaporée par le sol et transpirée par la plante. Cette demande est satisfaite par le système racinaire de la culture. L'ETR se définit par l'évapotranspiration d'un couvert végétal dans les conditions réelles. Son évaluation dépend des conditions climatiques et en particulier du bilan radiatif, du vent, de la disponibilité de l'eau à la surface du sol, des résistances opposées au transfert de l'eau de la végétation vers l'atmosphère (résistance stomatique en particulier). Sa variabilité est liée aux caractéristiques de la partie aérienne des couverts végétaux comme l'étendue, la hauteur, la disposition des surfaces évaporantes (feuille en particulier) dans l'espace.

Dans la détermination des besoins en eau des cultures, l'ETR est un facteur qui intéresse l'agronome. Elle se mesure in situ à l'aide des sondes à neutrons, des lysimètres pesables ou des évapotranspiromètres. Le principe de base de ces appareillages repose sur le principe du calcul de l'équation du bilan hydrique où $ETR = P + I - D + \Delta \text{stock}$

Avec P = apports d'eau par les pluies;

I = apports d'eau par irrigation

D = Pertes d'eau par drainage. Dans le cas où le stock d'eau du sol est reconstitué à chaque mesure et si l'on détermine P, I et D, on peut alors déterminer la valeur de l'ETR.

ΔStock = Variation du stock d'eau.

L'ETR est parfois égale à l'évapotranspiration maximale (ETM) quand l'eau disponible dans le sol est suffisante à la culture. En conditions limitantes, l'ETR est inférieure à l'ETM. On peut aussi mesurer l'ETR en la dérivant des mesures atmosphériques par la méthode aérodynamique, ou par la méthode du bilan d'énergie ou encore par le système BEARN (Bilan d'Énergie Automatique Régional et Numérique) mis au point par Perrier en 1975. De nos jours l'évapotranspiration réelle peut aussi être estimée à partir des mesures de télédétection.

2.1.4. Le coefficient cultural (Kc)

Le coefficient cultural Kc n'est pas une valeur climatique, mais un indicateur qui concerne uniquement la culture. Le coefficient cultural (Kc) peut être défini par le rapport entre les besoins en eau optimum de la culture ETM et la demande évaporative. Le Kc caractérise l'évapotranspiration d'une culture dense, régulière et saine qui dispose d'une ample réserve d'eau et de substances nutritives pour assurer un rendement maximum.

2.2. Définition et équation du bilan hydrique des cultures

Le bilan hydrique des cultures est déjà décrit dans la plupart des manuels d'agroclimatologie. Nous n'y reviendrons pas dans les détails. La formule du bilan hydrique est celle de la conservation de la masse d'eau dans le système eau-sol-plante. Son calcul consiste à évaluer le niveau au niveau d'une parcelle les apports et les pertes d'eau.

La formule est la suivante : $Pluies + Irr = ETR + Ruiss + Dr + Rc + [\Delta S]z_0$

Irr : irrigation (mm)

ETR : évapotranspiration réelle (mm)

Ruiss : ruissellement (mm)

Rc : remontée capillaire (mm)

ΔS : variation du stock d'eau (mm) entre les côtes 0 et z

Dr : percolation ou drainage profond

2.3. Généralités sur l'eau dans le sol

Du point de vue thermodynamique, l'eau circule à cause de l'existence d'un gradient de potentiel entre le sol et la plante. Ce potentiel hydrique résulte des différentes forces de liaison (osmotique, capillaire d'imbibition) et gravitaire qui s'exercent sur la molécule d'eau et les constituants du sol ou de la culture.

La circulation de l'eau pluviale dans les sols, peut se faire soit par infiltration ou par stagnation selon la granulométrie des sédiments et la topographie. La partie de l'eau qui stagne crée un engorgement du sol. L'eau peut aussi engendrer l'érosion. Le ruissellement représente alors une perte locale qui est généralement associée à la saturation du sol, à la topographie et à la nudité du sol. Il dépend de l'intensité, de la durée des précipitations, de leur répartition temporelle et des caractéristiques du sol. L'eau infiltrée servira à constituer les réserves en eau de la couche explorée par les racines. C'est la réserve en eau du sol (RU). Elle dépend des caractéristiques hydrodynamiques du sol qui sont : l'humidité volumique à la capacité de rétention, l'humidité volumique au point de flétrissement et à la profondeur du sol exploitée par la plante. La réserve utile est la valeur maximale de quantité d'eau du sol utilisable par la plante.

Elle s'exprime de la façon suivante : $RU = d_a(HCR-HPF) \times z$ avec :

d_a = densité apparente de la terre sèche,

HCR = humidité pondérale à la capacité de rétention (%),

HPF = humidité pondérale au point de flétrissement permanent (%),

Z = épaisseur de la tranche de sol correspondant à la profondeur d'enracinement en (dm).

Au niveau du sol, l'alimentation hydrique de la plante dépend de la variation de la réserve utile et des paramètres chimiques du sol.

2.4. Les paramètres de la plante intervenant dans son alimentation hydrique

Les paramètres essentiels qui interviennent dans l'alimentation hydrique sont l'enracinement (profondeur et densité racinaire) et la physiologie. En effet, l'eau pénètre dans la plante par l'épiderme des racines, traverse le mésophyle et parvient aux cavités sous-stomatiques où elle passe à l'état gazeux. La circulation de l'eau dans la plante est régulée par les stomates. Ceux-ci répondent aux variations du milieu. Ainsi, le déficit en eau d'une culture est le facteur essentiel de la régulation stomatique. Un dessèchement important du végétal entraîne la fermeture des stomates. Ainsi, l'état d'hydratation moyen de la culture dépend beaucoup de la régulation stomatique, de la présence ou de l'absence de lumière. Tous ces paramètres sont pris en compte pour l'évaluation de l'alimentation hydrique de la parcelle et la modélisation des termes du bilan de l'eau de la culture du maïs.

Section 3. La diversité variétale au Bénin : Est-ce une réponse à la variabilité pluviométrique et aux contraintes pédophytologiques ?

Plusieurs variétés de maïs sont cultivées au Bénin tant en milieu paysan que sur les parcelles agronomiques des stations de recherche de l'INRAB. Elles diffèrent les unes des autres par la durée du cycle végétatif, par leur couleur, et leur caractère organoleptique.

3.1. Les variétés paysannes

Les agriculteurs béninois cultivent le maïs de variété locale de cycle différent qu'ils gardent toujours avec eux en raison de la mauvaise adaptation à la sécheresse de certaines variétés améliorées et de leur qualité organoleptique. La liste des variétés locales est longue et leurs noms varient selon les dialectes et les régions (Tableau 14). Les variétés locales ne s'adaptent pas parfaitement à la nouvelle situation climatique du pays à cause de la variabilité pluviométrique saisonnière et de leur faible rendement. Elles sont cultivées pour la plupart du temps pour la consommation familiale. Malgré l'attachement paysan aux variétés locales, et face à la récession pluviométrique, les agriculteurs sèment beaucoup de nouveaux cultivars mis à leur disposition par la recherche agronomique. Ceux-ci nécessitent surtout l'usage des intrants et de la fumure. Mais, le faible pouvoir d'achat du paysan dans le nouveau contexte monétaire (dévaluation à 50% du franc CFA) l'oblige surtout à conserver les variétés locales à faible rendement.

NOMS LOCAUX DE LA VARIETE en langue « fon »	CARACTERISTIQUES
Agogodokome	Maïs blanc hâtif (entre 75-90 jours)
Huéga	Maïs blanc tardif (100 à 150 jours)
Naoulé	Maïs blanc tardif à grains farineux (100 jours)
Gbaguin	Maïs jaune très dur peu recherché (110 jours)
Kinvo	Maïs jaune tardif à grains tendres (120 jours)
Keve	Maïs jaune tardif à grains durs (110 jours)
Lengbo noukoun	Maïs rouge de même qualité que le huéga (110 j)
Hunve	Maïs rouge sang tardif peu recherché (115 jours)

Tableau 14 : Répertoire de quelques variétés locales de maïs cultivées dans le sud-Bénin (d'après Adande 1984 et nos enquêtes de terrain).

3.2. Les variétés améliorées précoces au Bénin

Le risque pluviométrique, la dégradation des sols ont poussé l'Institut International d'Agriculture Tropicale (IITA), la Recherche Agronomique à développer des cultivars pour caler le cycle des cultures pluviales dont celui du maïs sur le cycle pluviométrique saisonnier. Depuis plusieurs années, l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB) met à la disposition des Stations de Recherche des Cultures Vivrières (SRCV) de Niaouli au sud, et d'Ina dans le Borgou plusieurs variétés améliorées de maïs à expérimenter sur les parcelles agronomiques et en milieu paysan. On classe les variétés de maïs surtout en fonction de la durée du cycle végétatif. Ainsi à chaque cycle de culture correspond un cycle pluviométrique saisonnier. On distingue, les variétés tardives, les variétés précoces, et les variétés extra précoces. La dernière catégorie de variété Tropical Zea Extra Early (TZEE) est actuellement en cours d'expérimentation.

Les cultivars de maïs résultent des manipulations génétiques (croisements entre plusieurs variétés), et sont connues sous le générique de variétés améliorées. Les variétés précoces sont celles dont le cycle végétatif est de 90 jours. Les variétés cultivées au Bénin sont entre autres : la DMR-SRW, PIRSABARCK, EV 8730-SRW.

• La DMR-SRW

La DMR-ESRW (Downly Middew Resistent Early Streak Resistent) est une variété composite issue de manipulations génétiques faites par l'IITA (Institut International d'Agriculture Tropicale). Elle est cultivée à la fois au nord et au sud du Bénin. Elle mesure 175 cm et a une hauteur d'insertion d'épi de 75 cm. Le grain de couleur blanche et mi denté a une texture mi farineuse et mi vitreuse. L'épi mesure 14 cm, avec un diamètre de 4 cm. La couleur de ses panicules est jaune et violacée tandis que les soies sont blanches et violacées. C'est une variété qui a une très bonne résistance à la verse, à la casse, à la rouille. La DMR-ESRW présente également une bonne résistance à l'helminthosporiose et à la curvulariose. Cette variété de maïs ne résiste pas aux charançons. Elle exige un entretien minimum de 2 sarclages, une fumure de fond de 200 kg d'engrais, et une fumure d'appoint de 75 kg d'urée. Selon l'Institut National des Recherches Agricoles du Bénin (INRAB), la tolérance à la sécheresse de la DMR-ESRW est assez bonne. La densité maximum

de semis recommandée est de 62 500 plants à l'hectare soit 0,80 x 0,40 à deux plants par poquets.

3.3. Les variétés améliorées tardives

Elles regroupent les catégories de maïs dont la durée du cycle végétatif varie entre 110 et 120 jours. Plusieurs types de variétés de maïs de 120 jours ont été vulgarisés et mis à la disposition des paysans. ce sont : la TZB-SRW, TZPB-SRW, TZ-SRW, POZARICA etc.... Dans notre étude nous ne retiendrons que la TZB-SRW.

• La TZB (Tropical Zea Baja)

La TZB est un composite issu du NCA (Nigerian Composite A), et du NCB (Nigerian Composite B) tous deux développés dans "Major Cereal Projects" qui est un programme conjoint entre la République Fédérale du Nigéria et l'USAID (Agence Américaine pour le Développement international). On entend ici par composite un résultat de brassage de plusieurs variétés. Les composites ont été mis au point en 1970. Plus tard, de nouveaux caractères tels que la couleur y ont été ajoutés par l'IITA. Dès lors, les composites NCA et NCB ont changé de nom pour garder l'initiale de l'IITA. Ils sont devenus la TZA et TZB (Tropical Zea A et Tropical Zea B). Selon les différents tests effectués en milieu paysan la TZB donne de très bons rendements. C'est l'une des raisons pour laquelle nous avons choisi cette variété dans le cadre de ce travail. Comparativement à la DMR-SRW, la TZB a une hauteur de 210 cm. Le grain est mi-denté et la texture mi-farineuse et mi-vitreuse. Sa résistance à la casse, à la verse, est passable et sa résistance à la sécheresse est faible. En revanche, c'est une variété qui résiste bien à la rouille. Sa capacité de résistance à la striure, à la curvulariose et à l'helminthosporiose est très bonne. La TZB-SRW exige un entretien de deux sarclages, une fumure de fond de 200 kg.

Le répertoire de quelques variétés locales ajouté à la liste des variétés améliorées de maïs témoignent de la richesse variétale du maïs au Bénin. Mais cette diversité variétale, constitue-t-elle une réponse à la variabilité climatique ? Réduit-elle effectivement le risque agroclimatique ? Pour répondre à ces questions, nous justifierons de façon climatique le choix des deux variétés de maïs à partir desquelles nous ferons nos analyses.

3.4. Les saisons pluviométriques comme critères de choix de deux variétés de maïs (cycle long et cycle court)

Une analyse en composantes principales avec rotation a permis d'identifier la variabilité à partir des données décadaires moyennes de la pluviométrie. Les ACP dégagent deux grands modes de variabilité de saisons de culture calqués sur la répartition de la pluviométrie décadaire.

La première composante (CP1) exprime 16% de la variance et décrit le mode de variabilité qui caractérise l'unique saison des pluies en milieu soudanien (Figure 65). Il est marqué par un début de saison très aléatoire, très incertain et très fluctuant à partir de la troisième décade du mois de mai avec un "arrêt momentané" durant tout le mois de juin. Cependant toutes les pluies sont concentrées de juillet à octobre. Ainsi, l'agriculteur en milieu soudanien peut semer une variété de maïs de 120 jours afin de se caler sur le rythme pluviométrique avec une fin brutale de la saison culturale (Figure 65). Ce mode de variabilité montre que le paysan du nord du Bénin est soumis à un risque permanent de faux démarrage de la saison des pluies avec une forte probabilité de perte de semences à partir de la dernière décade du mois de mai. La fin de la saison qui correspond à la période de mûrissement du grain est très brutale et marquée par une coupure très nette (Figure 63).

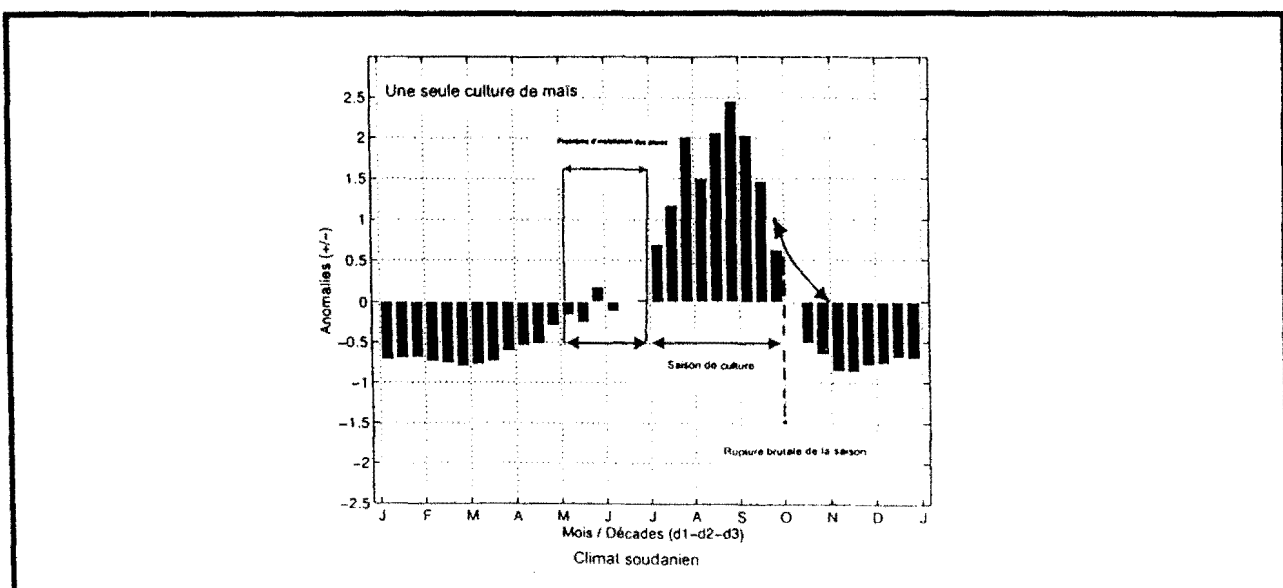


Figure 63 : Adaptation variétale et cycle pluviométrique saisonnier. CP1 de l'ACP Varimax (16% de la variance). (Une seule culture de maïs de 120 jours s'adapte à ce mode de variabilité).

La deuxième composante (CP2) exprime 15% de la variance totale. Elle correspond au sud du Bénin caractérisé par deux régimes pluviométriques et qui bénéficie de deux saisons de culture (Figure 64).

Pour la première saison, les activités agricoles peuvent démarrer à partir de la dernière décade de mois de mars et jusqu'à la deuxième décade du mois de juillet. Ici la durée de la saison est favorable à une variété de maïs de 120 jours comme la TZB-SRW qui a été retenue comme choix de maïs à cycle long (Figure 64).

Après la récession d'août, les paysans d'une façon générale, sèment le maïs de 90 jours comme la DMR-SRW à partir de la troisième décade du mois de septembre. Toutefois, la forte variabilité et le raccourcissement de la longueur de cette saison de pluies durant la période 1961-1990, sont préjudiciables à une deuxième culture de 90 jours (Figure 64).

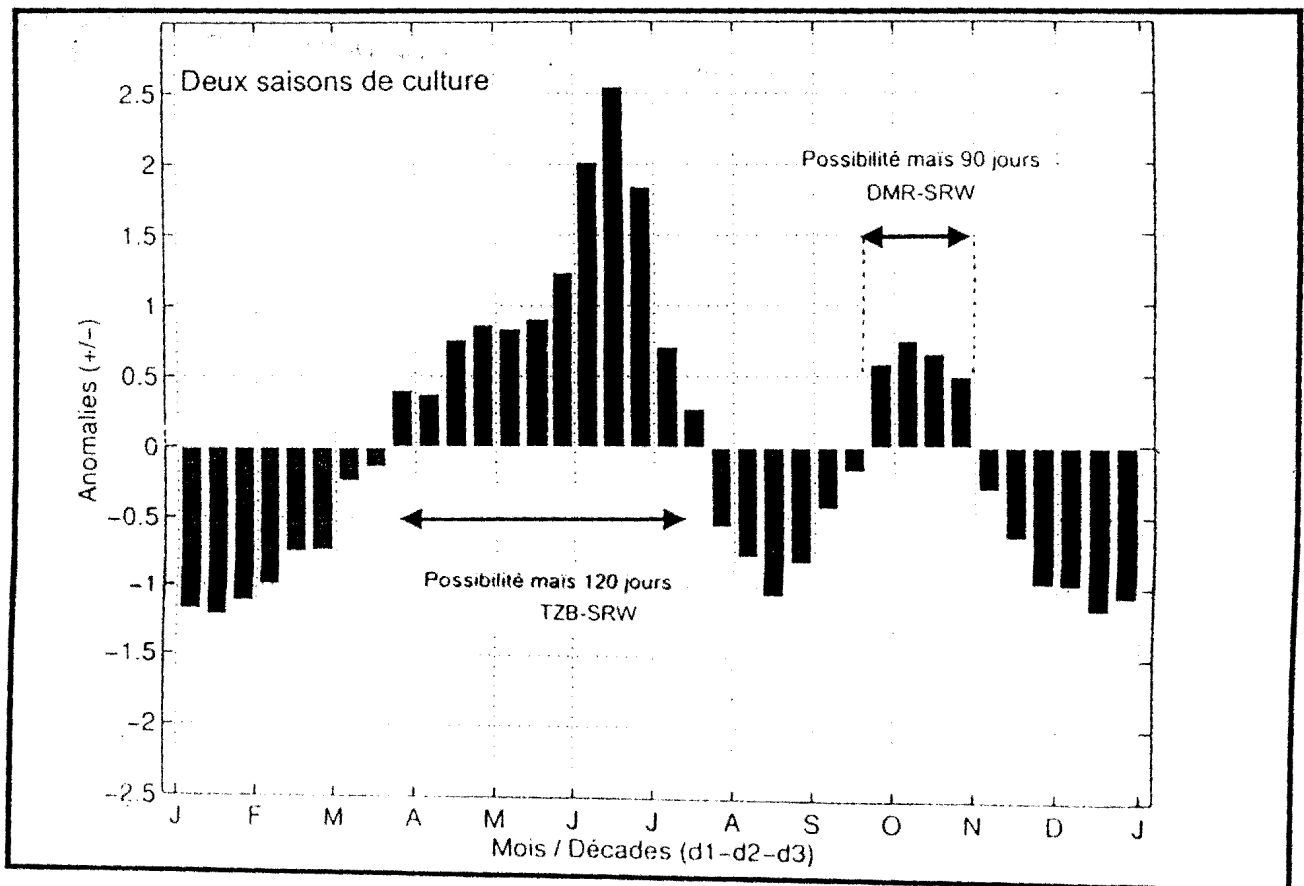


Figure 64 : Pluies décadaires et calage de deux variétés de maïs (un maïs de 120 jours et peut être aussi un maïs de 90 jours). (La CP2 issue de l'ACP avec rotation Varimax représente 15% de la variance. Mais ici seul un maïs précoce peut être cultivé).

Selon les résultats d'enquête de terrain et d'analyse multivariée, le choix des variétés cultivées est étroitement lié à la durée de la saison des pluies et non à la répartition des précipitations. Ainsi, pour le diagnostic agroclimatique du maïs nous retenons la TZB-SRW comme variété de maïs à cycle long (120 jours) et la DMR-SRW comme variété de maïs à cycle court (90 jours).

CHAPITRE II : DIAGNOSTIC HYDRIQUE DE LA CULTURE DU MAÏS

Etablir le diagnostic hydrique de la culture du maïs consiste à évaluer le niveau de satisfaction de ses besoins en eau. C'est aussi un moyen d'analyser les conséquences de la variabilité climatique identifiée dans la deuxième partie sur cette culture de grande consommation dans le sud du Bénin. L'étude du bilan de l'eau de la culture du maïs est réalisée à partir des enquêtes de terrain et d'un modèle de simulation de bilan hydrique.

● Qu'est-ce qu'un modèle de simulation du bilan hydrique ?

"L'ère de la perfection" que symbolise l'outil informatique a permis de mettre au point dans plusieurs domaines scientifiques dont la climatologie (diagnostique et appliquée), la météorologie, des modèles qui permettent de recréer d'autres univers climatiques virtuels dans un but prévisionnel. Un modèle de simulation de bilan hydrique des cultures peut se définir alors comme un outil informatique qui prend en compte les paramètres de la culture, du sol, de la météorologie, et qui, à partir d'un algorithme permet de calculer des indicateurs de stress hydrique (ETR/ETM etc...) les termes du bilan de l'eau et d'autres indicateurs agronomiques comme l'indice de rendement espéré (IRES) d'une culture. Des enquêtes de terrain permettent de le renseigner, de le caler, et de le valider. C'est un moyen qui permet de mettre au point en agroclimatologie ou en écophysologie ou dans d'autres sciences annexes des outils d'aide à la décision pour des fins appliquées. Ainsi, il existe une multitude de modèles de simulation de bilan hydrique des cultures. Leurs algorithmes varient selon les objectifs et selon les environnements.

Section 1. : La diversité des outils de diagnostic du bilan hydrique

En agroclimatologie, une des applications de la modélisation est l'établissement d'une relation entre les conditions de l'environnement (Terre océan atmosphère donc le climat, les sols) d'une part et le rendement et la production de cultures d'autre part. Elle part d'une approche dynamique qui considère les

augmentations unitaires et périodiques de la matière sèche de la plante comme étant conditionnées par des influences simultanées des divers paramètres climatiques. Ainsi, les modèles FAO, BIP, RITCHIE, BIPODE, DHC4, BHYLINA, SARRA etc... arrivent à simuler les processus de transfert de flux et permettent d'établir les bilans hydriques des cultures. Bien que tous ces modèles visent le même objectif, leur paramétrisation diffère de l'un à l'autre. Certains nécessitent beaucoup de paramètres d'entrée tandis que d'autres sont très simples à renseigner. Ainsi, on distingue plusieurs types de modèles de calcul de bilan hydrique qui sont répartis en modèles mécanistes et en modèle fonctionnels.

Les modèles fonctionnels se distinguent des modèles mécanistes par la manière de prendre en compte ou d'ignorer les phénomènes physiques ou biologiques mis en jeu dans les processus de transfert d'eau et d'énergie dans le complexe climat-sol-plante (Maraux, 1994). Dans leur conception algorithmique, certains modèles de calcul de bilan hydrique ne distinguent pas le phénomène d'évaporation du phénomène de transpiration (Franquin et Forest 1977, Doremboos et Pruiit 1977, Lhomme et Eldin 1985). Cependant, certains arrivent à faire la distinction des deux processus en considérant aussi que le sol fonctionne comme une couche uniforme. On note aussi une autre catégorie de modèles de calcul de bilan hydrique qui fonctionnent avec plusieurs réservoirs (Choisnel, 1985, Brisson et *al.*, 1992). Dans leurs définitions algorithmiques, certains considèrent une fonction de stress hydrique identique à toutes les cultures (Franquin et Forest, 1977, Chopart et Vauclin, 1990) tandis que d'autres individualisent la fonction de stress par rapport à la culture simulée.

Le modèle de simulation du bilan hydrique des cultures de la FAO a été mis au point en 1976 après la grande sécheresse sahélienne et testé dans plusieurs les pays dont les Etats du CILLS (Comité inter-Etat de lutte contre la Sécheresse dans le Sahel). Il est très simple dans sa conception algorithmique. Il fonctionne au pas de temps journalier et décrit le sol comme un réservoir unique qui se remplit par les précipitations, évacue les excès par le drainage et se vide régulièrement par évapotranspiration. Ici, la capacité de ce réservoir est la RU définie comme la lame d'eau permanente disponible (exprimée en mm) entre la capacité au champ et le

point de flétrissement. Le modèle FAO calcule finalement l'ETR, l'état de la réserve en eau du sol et le drainage pour chaque jour du cycle.

Le modèle SARRA développé par l'unité de recherche "Gestion de l'Eau" inspiré par Franquin et Forest (1977) et réactualisé par Forest et al. (1980) est différent de celui de la FAO. Il considère le sol comme un réservoir qui fonctionne en tenant compte de l'avancée du front de colonisation racinaire. Mais quand la racine atteint sa profondeur maximale, ce modèle fonctionne comme celui de la FAO. La réserve utile racinaire $RUR(j)$ croît en fonction de la profondeur d'enracinement $Prac(j)$ et est plafonnée par la profondeur maximale d'enracinement (P_{max}). La réserve potentielle du sol est référencée en mm d'eau par mètre de sol exploré (Maraux, 1994). Le réservoir racinaire draine dans les réservoirs maximal et principal selon les mêmes lois qui gouvernent le modèle de la FAO.

A la différence du modèle de la FAO, la confrontation entre offre en eau et demande climatique se fait par une fonction polynomiale de degré trois dite fonction d'Eagleman (1971). Celle-ci a été modifiée par Vacksman (1989) et l'ETR se calcule en fonction du coefficient cultural $Kc(j)$, de l'ETP(j) et du taux de saturation de la réserve racinaire du sol $HR(j)$. Par ailleurs, dans la liste des modèles fonctionnels plus sophistiqués on peut retenir celui de Ritchie (1972, 1985) qui est utilisé dans la famille CERES de modèles de croissance et développement. Les directives de paramétrisation de ce modèle pour la culture du maïs et les modalités de son usage sont décrits par Jones et Kiniry, (1986), Maraux (1994).

Le modèle de Ritchie fait partie intégrante des modèles multicouches où chacune des couches est prise en compte avec son épaisseur, son humidité volumique à saturation, sa capacité au champ et son point de flétrissement permanent. Ici la lame d'eau précipitée s'infiltré dans la première couche au fur et à mesure qu'elle réhumidifie. Elle produit ainsi une nouvelle humidité. Si cette nouvelle humidité est inférieure à la capacité au champ, on passe à l'étape suivante du modèle. Par contre, si l'humidité est supérieure à la capacité au champ, alors une fraction de l'excès draine dans la couche inférieure. Ainsi, la pluie est redistribuée dans le profil, et la fraction drainée par la dernière couche sort du système (Maraux, 1994). Dans ce modèle, l'évaporation du sol nu et la transpiration sont pris en

compte séparément. La demande climatique globale est séparée en deux composantes. Il s'agit de la demande potentielle s'exerçant sur le sol et de la demande s'exerçant sur les plantes appelée demande transpirative. L'évaporation est limitée par la demande évaporative potentielle avec une fonction empirique de dessèchement de l'interface sol/atmosphère. Le modèle Ritchie est composé aussi d'un module de redistribution de l'humidité après évaporation du sol nu. Il est fonctionnel sur les quatre premières couches et modulé par une fonction semblable à celle de la loi de Darcy où le terme de conductivité hydraulique non saturée est une fonction exponentielle croissante du niveau moyen de saturation du sol à l'interface des deux couches considérées. En outre, le modèle de Ritchie est couplé avec un modèle de croissance et de développement qui lui fournit l'indice foliaire et le profil de densité racinaire. A cette étape, le modèle fournit les renseignements relatifs aux indicateurs de stress. Les différences fondamentales entre ces trois modèles sont récapitulées par le tableau 15 ci-dessous.

MODELE DE LA FAO	MODELE BIP	MODELE DE RITCHIE
PARAMETRES CLIMATIQUES JOURNALIERS		
ETP Précipitations	ETP Précipitations	Transpiration potentielle Evaporation potentielle Précipitations
PARAMETRES EAU SOL		
Réserve Utile totale Stock départ	Réserve utile par mètre de sol Stock départ	Par couche : - Epaisseur - Humidité à saturation - Humidité à capacité au champ - Humidité au Pf 4.2 POROSITE Humidité initiale de chaque couche
PARAMETRES PLANTE		
Coefficient cultural Facteur P	Coefficient cultural Vitesse d'enracinement Profondeur maximale des racines	Densité racinaire journalière

Tableau 15: Etat comparatif des niveaux de constitution des modèles de simulation du bilan hydrique BIP, Ritchie et FAO (d'après Maraux, 1994).

Les trois types de modèles que nous venons de présenter ont des caractéristiques différentes compte tenu de leur paramétrisation et la description exhaustive de ceux-ci a été déjà faite par Maraux (1994). Le modèle de la FAO est d'une grande simplicité comparativement aux modèles BIP et Ritchie. Mais, il ne peut être utilisé dans cette étude.

Section 2. : Le modèle de SARRA : justifications du choix et description

2.1. Les raisons du choix du modèle SARRA

Compte tenu des difficultés de paramétrisation relatives à ces trois modèles, nous ne pourrions utiliser aucun d'entre eux. Nous ferons usage d'un autre modèle de simulation du bilan hydrique des cultures qui représente un compromis entre le modèle de la FAO, et le modèle Ritchie. L'analyse statistique des données météorologiques (cf. deuxième partie) ne suffit pas à elle seule pour caractériser l'effet du stress hydrique de la culture du maïs. Un outil intégrateur comme le modèle SARRA permet de prendre en compte la plupart des éléments édaphiques dans la caractérisation du stress hydrique du maïs, conséquence de la péjoration climatique observée sur la période 1961-1990.

En Afrique de l'ouest, outre le modèle de la FAO, d'autres modèles fonctionnels et mécanistes de simulation du bilan hydrique des cultures ont été déjà utilisés pour des outils d'aide à la décision.

Dans le cadre de l'étude des potentialités de la maïsiculture pluviale en Afrique au sud du Sahara (Projet, N°1 R3S-PF1) et du zonage des risques de sécheresse régional en Afrique soudano-sahélienne, l'évaluation des termes du bilan hydrique des cultures a été faite à partir du modèle de simulation BHYZON basé sur la fonction expérimentale d'Eagleman (1971). Grâce à ce modèle, des aires climatiquement favorables à l'extension d'une variété de maïs de 110 jours ont été identifiées. D'une façon générale, ces modèles ont été utilisés et validés avec succès.

Au Bénin, aucune étude de ce genre n'a été encore réalisée hormis les travaux de Bokonon-Ganta (1986), Boko (1988), Afouda (1990), qui présentent les bilans climatiques et agroclimatiques du Bénin sur une courte période mais pas de façon comparative sur deux normales. Ces travaux n'ont pas été réalisés avec une référence à une culture à travers son cycle et ses différents stades végétatifs. Ainsi, dans le cadre de notre étude, nous utiliserons un autre modèle plus évolué et non mécaniste (SARRA) qui intègre plusieurs paramètres d'interface.

2.2. Le modèle agroclimatique SARRA : description et fonctionnement

SARRA (Système d'Analyse Régionale des Risques Agroclimatiques) est un modèle de simulation du bilan hydrique des cultures (Reyniers *et al.*, 1997). Il gère des données météorologiques (pluviométrie, température, rayonnement, humidité, insolation, évaporation etc...), analyse les flux hydriques et quantifie le bilan hydrique ($\text{Pluie} + \text{I.r.} = \text{ETR} + \text{Dr} + \text{Rui} + \Delta\text{stock}$) du système sol-plante-atmosphère dont l'indice de satisfaction des besoins en eau. Dans cette étude, les différents indicateurs du bilan de l'eau de la culture du maïs ont été calculés avec ce modèle de diagnostic de stress hydrique. SARRA est un modèle de couplage et d'interface à cause de son ergonomie multivariée qui prend en compte toutes les composantes du milieu biophysique. SARRA est subdivisé en trois volets qui sont SARRAMET, SARRABIL, et SARRAZON. Dans son algorithme, SARRA traite les données climatiques en amont (SARRAMET). Au second niveau, il intègre les indicateurs hydriques et les principaux facteurs biophysiques et techniques culturelles qui conditionnent l'utilisation de la ressource pluviométrique (SARRABIL). A une autre échelle, il intègre la dimension spatiale des indicateurs hydriques (SARRAZON). Seul SARRABIL a été utilisé dans cette étude car il permet de quantifier le bilan hydrique de la culture et de caractériser le stress hydrique.

2.2.1. Qu'entend-on par SARRABIL ?

SARRABIL est le logiciel de simulation du bilan hydrique. A partir d'un ensemble de paramètres décrivant le sol, la culture et le climat, il calcule les différents termes du bilan de l'eau de la culture. Ce volet de SARRA permet de

comparer plusieurs situations agronomiques et de quantifier à des pas de temps pentadaires ou décadaires ou par phases phénologiques les termes du bilan hydrique à un instant donné l'offre en eau (pluie + stock d'eau dans le sol). L'équation du bilan hydrique est basée sur la conservation de la masse dans la couche de sol exploitable par les racines. L'expression mathématique de l'algorithme est la suivante :

$Plu+Irr. = ETR+Dr+Rui+stock$, où

Plu = Pluviométrie au pas de temps choisi (mm).

Irr = Un éventuel apport par irrigation pendant la pentade (mm).

Rui = Ruissellement de surface pendant la pentade (mm).

ETR = Extraction racinaire de l'eau pendant la pentade choisie (mm). Cette extraction est calculée à partir de deux paramètres ETM et HR qui est le taux d'humidité dans la tranche de sol considérée.

Dr = Drainage en profondeur au delà des horizons atteints par les racines. Dr est égal à la quantité d'eau excédant la réserve utile maximale. Cette équation est résolue par SARRABIL au pas de temps choisi. Dans le cas de cette étude, elle est résolue à plusieurs pas de temps notamment par phases phénologiques, et sur la durée du cycle.

2.2.2. Le fonctionnement de SARRABIL

Le fonctionnement de SARRABIL repose sur la prise en compte du sol comme un réservoir unique dont le volume est modulé par l'avancée du front racinaire, par l'intégration des phénomènes d'évaporation du sol nu et de transpiration de la culture (CIRAD-CA URGE, 1996). L'environnement de SARRABIL est aussi caractérisé par la présence d'un réservoir de surface fictif qui permet de corriger l'évaporation du sol nu. Ce qui permet le lancement de la simulation 2 ou 3 mois avant la date réelle des semis. Le ruissellement est pris en compte dans la gestion des "inputs" du modèle à partir de la méthode du seuil ou de la méthode ORSTOM. Elle consiste à définir un seuil de pluviométrie journalière au dessous de laquelle le ruissellement est nul. A partir de cette valeur et pour toutes les pluies supérieures, on applique un coefficient d'abattement correspondant aux pertes par ruissellement. La relation est du type suivant : $R_j = 0$ si $P_j < \text{seuil}$; ou $R_j = [\%Ruis]*(P_j - \text{Seuil})$ si $P_j > \text{seuil}$.

Quant au mode de calcul du ruissellement IRD (Casenave et Valentin, 1989), il est calculé à partir de la hauteur de pluie (P) et de l'indice de pluie antérieure (IK)

qui est un indice itératif. Cet indice prend en compte l'albédo de la surface d'humectation et l'état de la surface du sol de manière quotidienne. Il s'exprime de la façon suivante :

$$R_j = A1.P_j + A2.IK_j + A3.IK_j + A4$$

$$\text{et } IK_j = 0.606 * (IK_{j-1} + P_{j-1}).$$

Trois options de ruissellement sont définies selon ces normes et les différents horizons du sol. Le ruissellement Faible, le ruissellement Moyen et le ruissellement Fort.

Le calcul de l'ETR dans SARRABIL se fait avec une fonction polynomiale et est fonction de l'humidité relative et de l'ETM en valeurs journalières. La formule est la suivante :

$$ETR = a + b(Hr) + c(Hr)^2 + d(Hr)^3 \text{ avec :}$$

$$a = 0.732 - 0.050 * ETM$$

$$b = 4.97 * ETM - 0.661 - (ETM)^2$$

$$c = -8.75 * ETM + 1.56 * (ETM)^2$$

$$d = 4.34 * ETM - 0.88 * (ETM)^2$$

Hr = Humidité du sol au jour considéré / Humidité à la capacité de rétention. Toutes les valeurs de a, b, c, et d ont été déterminées à partir de modèles expérimentaux de régression (Eagleman, 1971) sur des mesures faites en lysimètres sur gazon, et ont été étendues pour le modèle CIRAD à toutes les cultures annuelles. SARRABIL calcule pour chaque jour ou par chaque phase phénologique ou sur tout le cycle, l'ETR, l'état de la réserve en eau du sol, le drainage, le ruissellement. Dans le cas de notre étude les valeurs d'ETP Penman calculé par un algorithme Pascal par la division Agroclimatologie de l'ASECNA de Cotonou ont été intégrées directement dans le modèle.

SARRABIL combine également les éléments du sol tels que profondeur racinaire, et les éléments relatifs à la plante comme les coefficients culturaux (Kc). D'une façon générale les paramètres de SARRABIL sont :

- Les variables liés au climat (Pluviométrie quotidienne, ETP).
- Les variables liées au sol (réserve utile, seuil de ruissellement, coefficient moyen de ruissellement).

- Les variables liées à la plante (durée du cycle, durée de chaque phase physiologique, coefficients culturaux).
- Les variables liées au temps (période de semis).

SARRABIL découpe la saison des pluies en périodes caractéristiques de passage qui sont:

- Début de la préparation du sol au plus tôt
- Début des semis au plus tôt
- Croissance et développement végétatif
- Pleine végétation et reproduction - remplissage et reproduction
- Remplissage des grains et maturation
- Fin de la saison de culture.

En somme, le module du bilan hydrique (SARRABIL) permet d'évaluer à des pas de temps pentadaires ou décadaires, les termes du bilan hydrique et la consommation en eau du milieu (ETR, drainage etc..). Il calcule une estimation de l'ETR en fonction de l'humidité du sol. Il donne le taux de satisfaction des besoins en eau du couvert végétal (ETR) aux besoins en eau de la culture (ETM).

L'indicateur de stress hydrique retenu ici est ETR/ETM (%). C'est le rapport exprimé en pourcentage de l'évapotranspiration réelle sur l'évapotranspiration maximale. Il indique le taux de satisfaction des besoins en eau de la culture et présente l'état hydrique moyen de la plante (Reyniers et *al.*, 1988). Il peut être calculé pour chaque stade phénologique. L'intérêt de cet indicateur se situe à plusieurs niveaux dans notre problématique : il intègre le terme de satisfaction à la phénophase sensible de la plante.

Section 3. : L'enquête, le renseignement des paramètres du modèle, et définitions des hypothèses réalistes

Les « inputs » du modèle concernent les éléments de l'enquête de terrain, les paramètres du sol, du climat et de la culture elle même .

3.1. L'enquête

L'objectif de l'enquête de terrain est de rassembler tous les paramètres physiques et les éléments quantitatifs nécessaires pour le renseignement du modèle SARRA. Les enquêtes se sont déroulées dans les six départements du pays, à savoir le Borgou, l'Atakora, le Zou, le Mono, l'Ouémé, l'Atlantique, sur le schéma en treize unités climatiques définies par Boko en 1988. Des sondages ont été faits dans chaque aire climatique du pays.

La technique a consisté à superposer faciès pédologiques et faciès climatiques afin d'avoir une matrice latitudinale du nord au sud du pays. Ainsi, les enquêtes se sont déroulées dans les localités suivantes (du nord au sud) : Alafiarou, Okpara, Tchaourou, Parakou, N'dali, Kassakpéré, Nikki, Kalalé, Ina, Bembéréké, Padé, Kandi, Kandifo, Sonsoro, Angaradébou, Guéné, Birni-Lafia (Karimama), Banikoara, Ouassa-Péhunco, Natitingou, Tanguiéta, Dassari (Matéri), Tchakalakou, Tempégré (Natitingou), Boukoumbé, Djougou, Bajoudè, Ouaké, Foyo, Gaounga, Glazoué, Covèdji (Savalou), Mèdédjro, Ouroghi (Savè), Bohicon, Détohou (Abomey), Niaouli (Toffo), Pobè, Oumako, Agbanaken, Toviklin, Aïnahoué (Azové), Zinvié et Abomey-Calavi. (Figure 65).

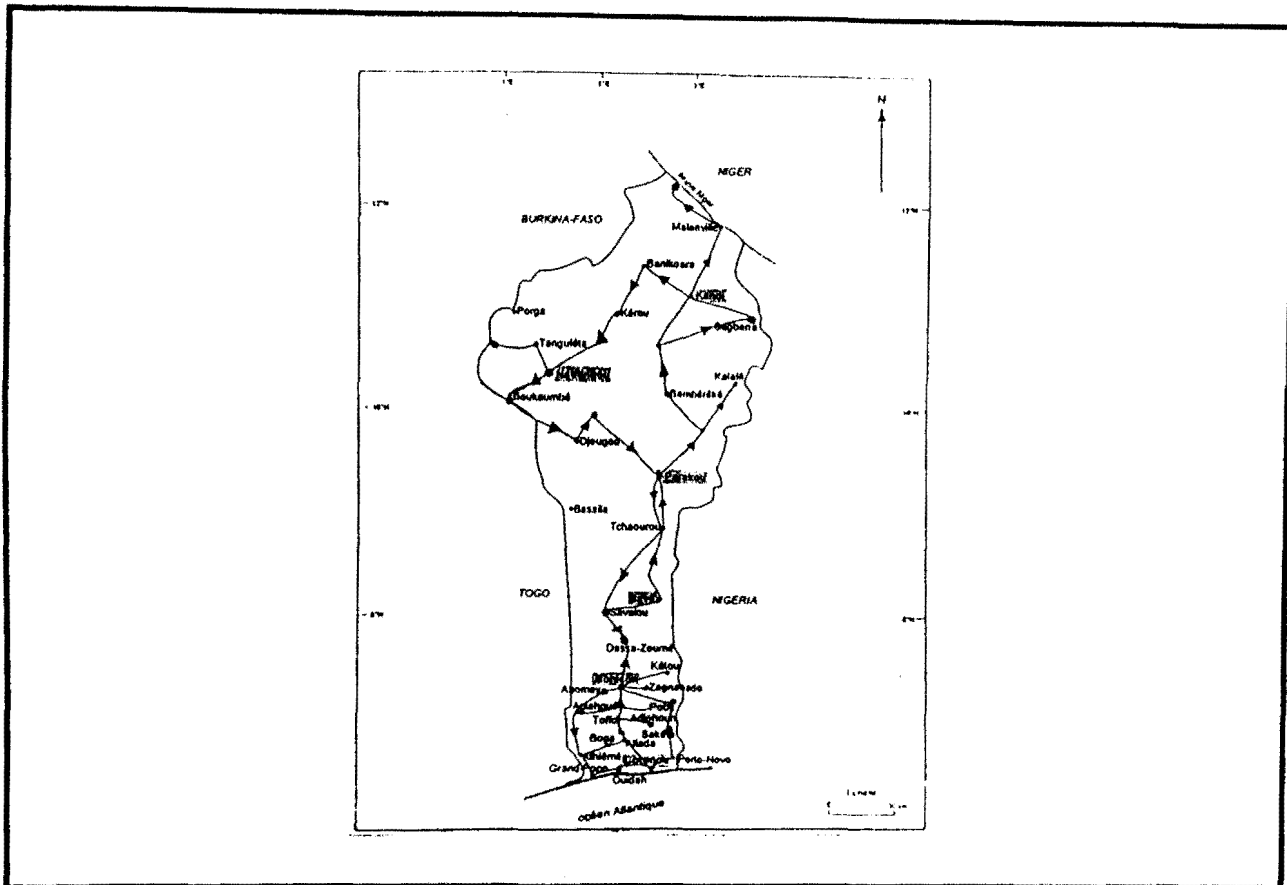


Figure 65 : Base de sondage et de relevé de profil de profondeur racinaire des deux variétés de maïs.

Dans ces différents milieux, nous avons réalisé des profils de profondeur racinaire à l'aide d'une tarière et de coupe-coupe sur les parcelles des stations de recherche sur les cultures vivrières à Ina (dans la partie septentrionale du pays), à Niaouli dans le sud (près d'Attogon), et sur les parcelles agronomiques des différentes fermes semencières de l'Institut National de la Recherche Agronomique du Bénin (INRAB). Des sondages ont été aussi effectués sur des parcelles appartenant aux paysans "multiplicateurs" de semences de Padé, de Guéné, de Banikoara, de Savalou, de Détohou, pour ne citer que ceux-là. Ces sondages des profils racinaires ont été faits à tous les stades de développement végétatif des plants de diverses variétés de maïs (levée, montaison, épiaison et maturité).



Photo 2 : Relevé de profil de profondeur racinaire de quelques variétés de maïs au Bénin. Cette photo a été prise à Niaouli dans le sud du pays

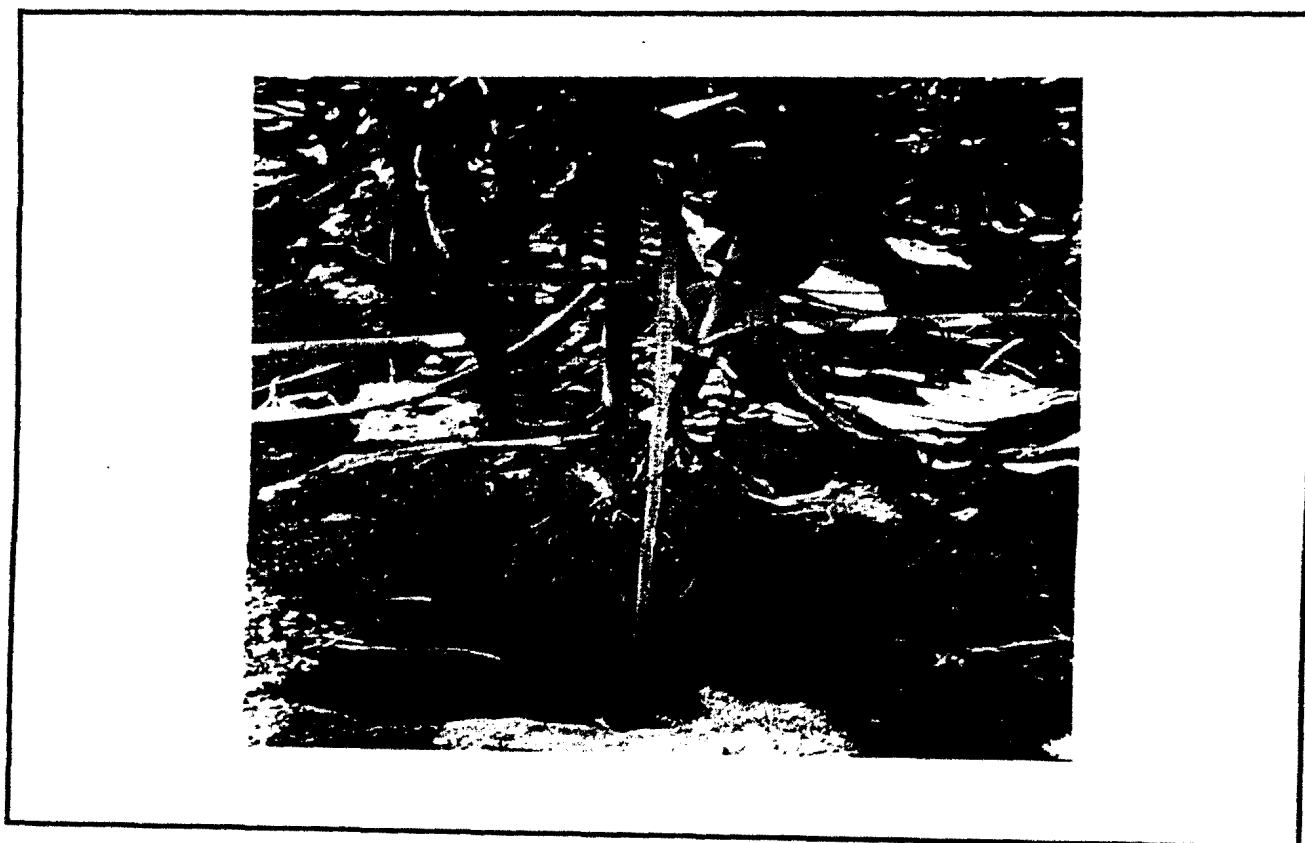


Photo 3: Relevé de profil de profondeur racinaire de quelques variétés de maïs au Bénin. Cette photo a été prise à Padé dans le Borgou.

Pour les enquêtes en milieu paysan, l'unité de base de notre échantillon est le **Groupement Villageois (GV)**. Il a été constitué de façon aléatoire et comporte 600 individus. Le GV est une structure représentative des paysans d'un village donné. Celui-ci regroupe des personnes âgées en cessation d'activités champêtres pour la fiabilité de notre information, et des agriculteurs, hommes et femmes, actifs. Le questionnaire d'enquête soumis concernait les caractères suivants :

- ❶ les différentes variétés de maïs,
- ❷ les dates de semis des différentes variétés de maïs,
- ❸ la place du maïs dans leurs habitudes alimentaires,
- ❹ les contraintes liées à la maïsiculture dans leur localité au cours des sécheresses climatiques,
- ❺ les difficultés phytosanitaires du maïs, liées aux aléas climatiques,
- ❻ le problème de la conservation des récoltes,
- ❼ les différents assolements et les systèmes de rotation dans les milieux climatiques,
- ❽ la rentabilité de la culture du maïs comparativement à celle du coton, et leurs propositions pour l'amélioration de la maïsiculture au Bénin,
- ❾ les indices de reconnaissance de début et de fin des différentes saisons pluviométriques,
- ❿ leur vision des mutations climatiques observées ces dernières années, etc.

Les informations recueillies auprès des agents de la Direction de la Recherche Agronomique concernent l'introduction de nouvelles variétés de maïs, le point de la recherche variétale en maïsiculture, et son apport dans la lutte contre les effets de la variabilité climatique, les dates de semis, les calendriers culturaux. Ces enquêtes nous ont permis de localiser les sites et milieux où sont vulgarisées les différentes variétés de maïs, de connaître les systèmes et techniques de cultures du maïs selon les différentes zones écologiques du pays. En outre, elles nous ont permis, d'une part d'avoir une idée de la résistance à la sécheresse des différentes variétés de maïs après consultation des fiches techniques des cultivars et enquêtes auprès des paysans, et de proposer une critique du modèle du bilan hydrique d'autre part.

3.2. Les éléments des sols et le choix des réserves utiles (RU)

Au niveau des sols, **SARRABIL** a été renseigné à partir des différentes cartes pédologiques établies par le Centre National d'Agropédologie de Cotonou et des données réelles de RU fournies par ce même service.

Trois types de réserve utile ont été testés à savoir 120 mm par mètre, 90 mm par mètre et 60 mm par mètre. Mais une RU = 60 mm par mètre a été retenue compte tenu des caractéristiques générales des sols du Bénin présentées dans la première partie et pour une uniformité pour faciliter le lancement du modèle.

Les données de profondeur racinaire fournies au modèle ont été mesurées in situ sur des sites et parcelles agronomiques différents à la levée, la floraison, la formation du grain et à la maturité de la TZB, la DMR (Photo 2 et photo 3). Le type de vitesse racinaire choisi pour modéliser l'avancée du front racinaire est celui de la vitesse unique car il existe une liaison entre longueur du cycle et profondeur racinaire, fertilité et profondeur (Tableau 16). L'hypothèse retenue est la suivante : la fin de la floraison correspond à la fin de la croissance racinaire. Cette hypothèse rend cohérente la synthèse faite à partir des données de terrain.

CYCLE	RU1 en mm/m	RU2 en mm/m	RU3 en mm/m
DE 120 JOURS	120 mm	90 mm	70 mm
DE 90 JOURS	130 mm	80 mm	60 mm
DE 75 JOURS	70 mm	60 mm	50 mm

Tableau 16 : Rapport entre longueur de cycle et RU (réserve utile)

3.3. Les paramètres climatiques (P et ETP)

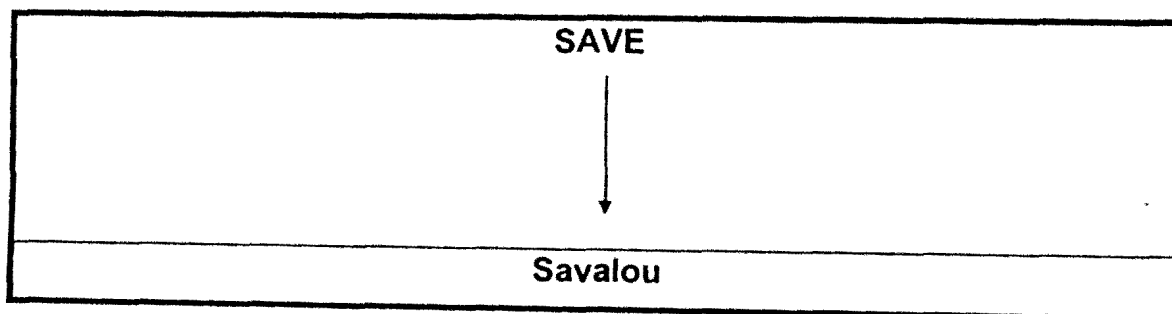
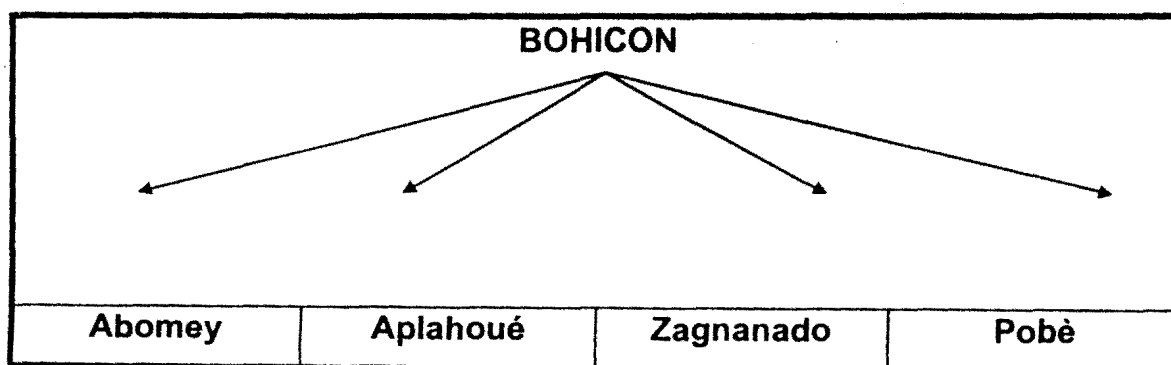
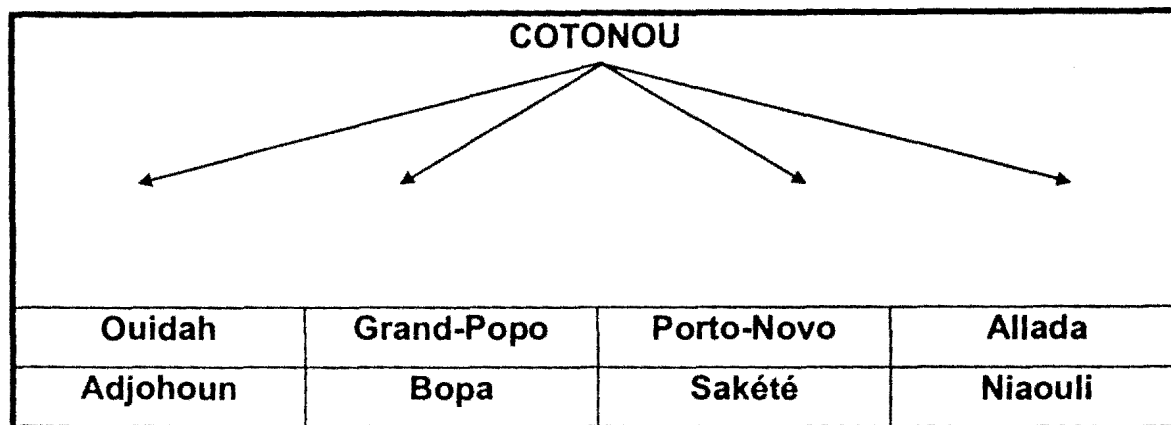
Au niveau du climat, nous avons retenu vingt postes météorologiques dont les données pluviométriques journalières ont servi à faire les simulations. Le choix a été guidé par leur représentativité agroclimatologique et par leur situation par rapport aux

stations synoptiques. Au niveau de l'évapotranspiration potentielle (ETP), les données fournies au modèle sont celles calculées pour les six stations synoptiques : Cotonou, Bohicon, Savè, Kandi, Parakou, Natitingou. Ces postes synoptiques sont bien répartis et sont représentatifs du climat de chaque région.

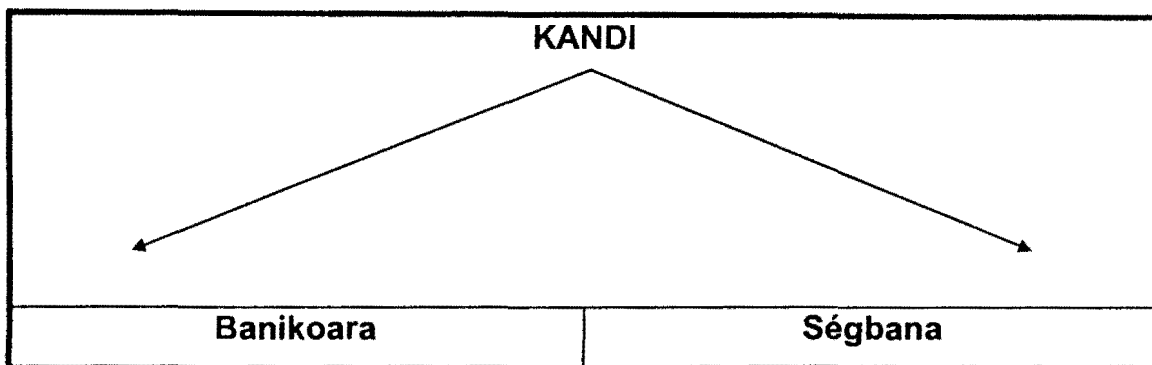
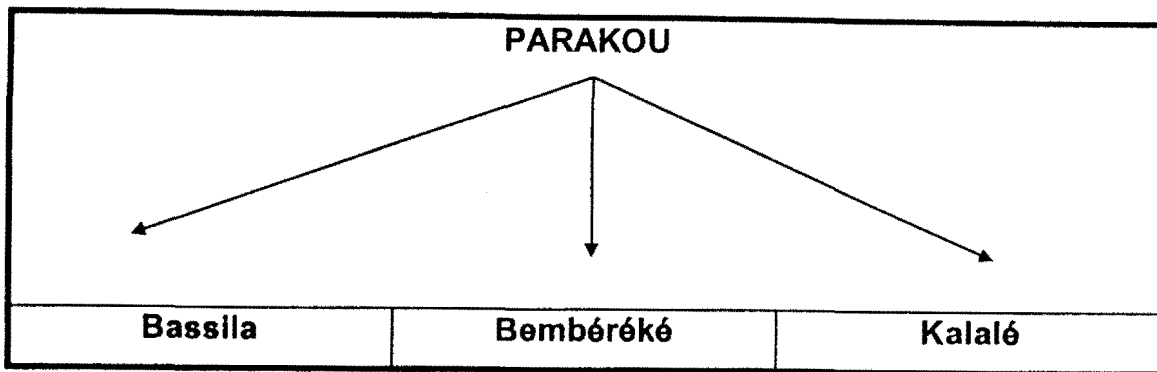
L'ETP n'étant pas trop variable dans le temps et dans l'espace (cartes non montrées) nous avons utilisé les valeurs mesurées sur des stations synoptiques pour les postes climatologiques et pluviométriques les plus proches. Nous avons procédé à une interpolation des données pour densifier la configuration du fichier afin de pouvoir renseigner le modèle. La méthode retenue est celle de l'interpolation linéaire qui prend en considération la distance. Le tableau 18 montre les stations dont les valeurs ont été calculées à partir de la station synoptique de référence et selon chaque région climatique.

Tableau 17: Stations de référence à partir desquelles une interpolation linéaire a été réalisée pour les valeurs d'ETP Penman. (La direction des flèches indiquent la stations dont l'ETP a été utilisée pour le renseignement du modèle de simulation du bilan hydrique SARRA).

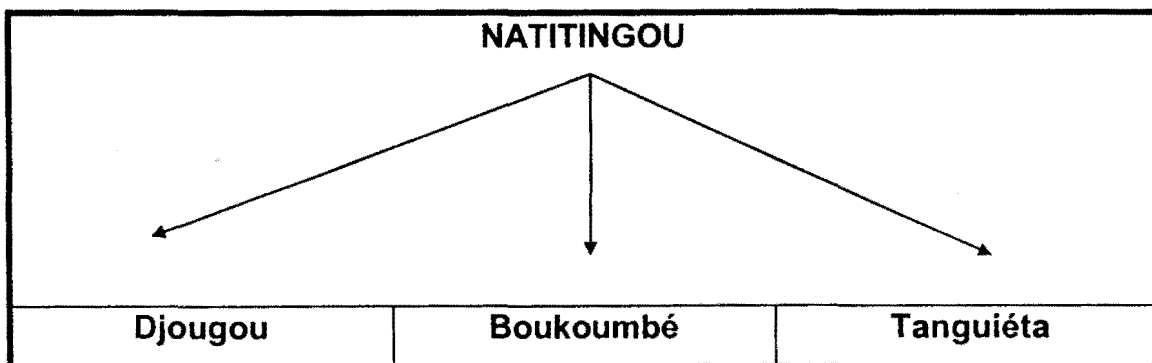
CLIMAT BENINIEN



CLIMAT SOUDANIEN (BORGOU)



CLIMAT SOUDANIEN (ATAKORA)



3.4. Les paramètres de la plante : la TZB, la DMR et les dates de semis

La TZB-SRW à cycle long, et la DMR-SRW à cycle court sont les deux variétés de maïs retenues et constituent les inputs du modèle SARRA au niveau de la plante. Ces deux variétés de maïs amélioré ont été présentées dans les sections précédentes ainsi que les raisons de leur choix. Une variété de maïs de 75 jours a été testée pour faire des propositions finales par rapport au calage du cycle de

**Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs**

culture et au raccourcissement de la durée de la deuxième saison des pluies. Mais les résultats ne seront pas présentés ici.

Les dates de semis et de récolte fournies au modèle sont gérées par la méthode de Seuil de SARRABIL. Les dates de semis suivantes sont fournies au modèle (Tableau 18 et Tableau 19).

CLIMAT BÉNINIEN					
Stations	Première Saison (120 jours) Dates de semis et de récoltes			Deuxième Saison (90 jours) Dates de semis et de récoltes	
	Dates de semis	Récoltes	Observations	Dates de semis	Dates Récoltes
Allada	30 avril	30 août	Informations recoupées-	30 septembre	1er déc.
Aplahoué	30 avril	30 août	Informations recoupées-	30 septembre	30 déc.
Cotonou	30 avril	30 août	Informations Recoupées	30 septembre	30 déc.
Dogbo	30 avril	30 août	Informations Recoupées	30 septembre	30 déc.
Athieme	30 avril	30 août	Informations Recoupées	30 septembre	30 déc.
Porto-Novo	30 avril	30 août	Informations Recoupées	30 septembre	30 déc.
Pobe	30 avril	30 août	Informations Recoupées-	30 septembre	30 déc.
Sakété	30 avril	15 août	Informations Recoupées-	30 septembre	30 déc.
Adjohoun	25 avril	30 août	Informations Recoupées	30 septembre	30 déc.
Bohicon	28 mai-30 jt.	1 ^{er} sept.	Informations Recoupées	30 septembre	30 déc.

**Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs**

Abomey	25 mai-30 jt	1 ^{er} août	Informations Recoupées	30 septembre	30 déc.
Zagnanado	20 mai-15 jt.	1 ^{er} août	Informations Recoupées	30 septembre	30 déc.
Kétou	30 avril	1 ^{er} août	Informations Recoupées	30 septembre	30 déc.
Grand-Popo	1 ^{er} mai	15 août	Informations Recoupées	30 septembre	1 ^{er} déc.
Savè	30 avril	1 ^{er} août	Informations Recoupées	30 septembre	1 ^{er} déc.
Savalou	30 avril	1 ^{er} août	Informations recoupées	30 septembre	1 ^{er} déc.

Tableau 18 : Dates de semis et de récolte réalistes sous climat béninien. (Déc. = décembre ; Jt. = juillet).

CLIMAT SOUDANIEN DU BORGOU		
STATIONS	DATES DE SEMIS	DATES DE RECOLTE
Tchaourou	17 mai	25 septembre
Bembéréké	25 mai	30 septembre
Kandi	15 mai	15 septembre
Malanville	20 juin	25 septembre
Kalalé	20 mai	25 septembre
Parakou	15 juin	15 novembre
Banikoara	20 juin	25 novembre
CLIMAT SOUDANIEN DE L'ATAKORA		
STATIONS	DATES DE SEMIS	DATES DE RECOLTE
Natitingou	22 mai	5 octobre
Boukoumbé	20 mai	30 septembre
Djougou	5 juin	15 octobre
Tanguiéta	15 mai ou 15 juin	30 septembre
Kérou	20 mai ou 25 juin	1 ^{er} octobre

Tableau 19° : Dates de semis et de récolte réalistes sous climat soudanien

Les dates de semis relevées sur le terrain sont très variables dans le temps et dans l'espace. Elles sont déterminées par les agriculteurs à partir de leur vécu et du dérèglement climatique qu'ils vivent depuis plusieurs décennies. Ces dates de semis ne sont pas des dates de situation moyenne mais celles observées par les paysans sur deux années consécutives.

Tous ces "inputs" du modèle sont traités en termes d'analyse fréquentielle pour les indicateurs du bilan hydrique des cultures en "situation historique" (langage du modèle) et en années climatiques exceptionnelles dans les proportions de cinq et huit années sur dix.

3.5. Détermination des coefficients culturaux pour des variétés de maïs de 75, 90 et 120 jours au Bénin

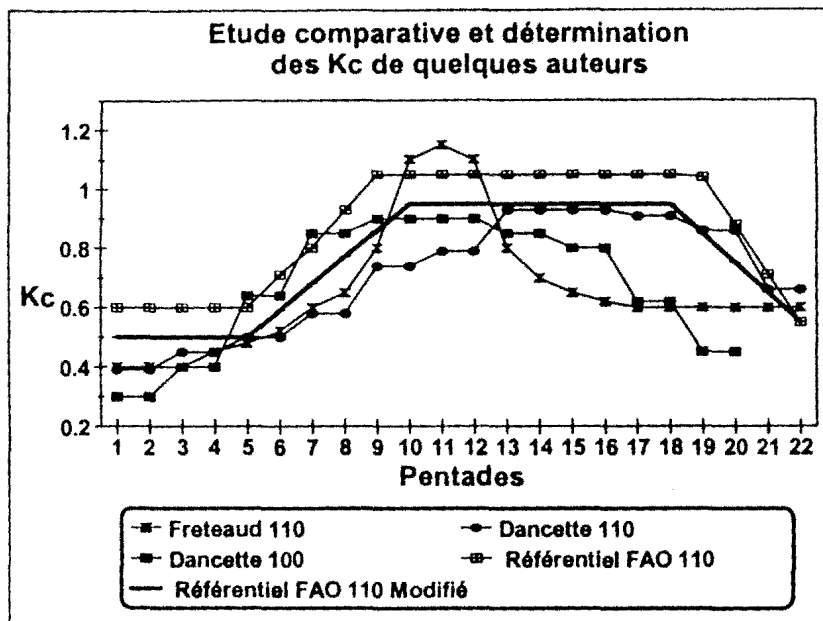
La détermination du Kc permet la prise en compte des caractéristiques culturelles dans les besoins en eau des cultures. Les méthodes préconisées pour sa détermination varient selon les différentes régions climatiques. Les coefficients culturaux déterminés par la méthode de la FAO modifiée ont été calés en fonction de la longueur du cycle de chaque variété et selon une seule hypothèse de RU.

3.5.1. Le coefficient cultural (Kc) : diversité méthodologique

Calculer et caractériser le coefficient cultural n'est pas aisé. Le débat n'est pas simple et la bibliographie concernant cet aspect du problème est très abondante. Kalms *et al.* (1975), Dancette (1976,1983), Fréteaud *et al.* (1984,1987), Poss et Saragoni (1988), Nicou *et al.* (1986) ont déterminé des coefficients culturaux pour certaines cultures dans différentes stations agronomiques d'Afrique de l'Ouest à l'aide des mesures au champ ou à partir de lysimètres. La plupart de ces travaux ont été confrontés aux difficultés liées à la mise au point d'un coefficient cultural (Kc) régional, compte tenu des nuances climatiques qui caractérisent cette partie de l'Afrique Tropicale. Les coefficients culturaux mis au point, concernent surtout la zone sahélienne et ses marges et le Togo uniquement. Ces coefficients culturaux ont leur maximum à la floraison au moment où l'évapotranspiration maximale est supérieure à celle du bac, entre le 45^{ème} et le 60^{ème} jour (Figure 66). Ils sont parfois dérivés de ceux proposés par la FAO en 1975.

Les valeurs de Kc calculés par Dancette (1983) sont différents de celles de Fréteaud (1987) et de celles proposées par la FAO (1975), bien que leurs maximums soient tous situés à la floraison (Figure 68). En somme il existe une diversité de méthodes de détermination du coefficient cultural (Figure 66) et il appartient à chaque utilisateur de retenir les coefficients culturaux de son cultivar. Ainsi, le coefficient cultural a un caractère aléatoire

Figure 66 : Etude comparative et détermination des Kc de quelques auteurs



Par rapport à la réalité géographique qui est celle du terrain, nous ne pourrions appliquer les coefficients culturaux de Dancette (1983), ni ceux de Fréteaud et al. (1984), ni ceux de la FAO (1975). Nous calculerons les Kc de maïs pour le Bénin à partir du référentiel standard de la FAO. Notre méthode de calcul de Kc sera celle de la FAO qui peut être considérée comme un compromis.

3.5.2. La méthode FAO : principes, démarches et limites

3.5.2.1. Les principes de la méthode

Les coefficients culturaux publiés par la FAO résultent de la synthèse faite par Doorenbos et Pruitt (1975), à partir d'un grand nombre de travaux réalisés dans le monde entier. La plupart des utilisateurs de ces valeurs de Kc procèdent à des réajustements selon les différents milieux climatiques dans lesquels ils seront appliqués.

La FAO découpe les cycles végétatifs des différentes cultures en quatre périodes et attribue uniquement des Kc au début et à la fin du cycle. Les stades phénologiques FAO se répartissent comme suit :

- une «période initiale» (P1) qui va du semis, et qui passe par le développement très rapide de la culture jusqu'à ce que le couvert végétal recouvre 10% du sol. A ce stade de développement de la culture, l'indice foliaire (LAI) est nul. Le Kc attribué à ce stade végétatif est appelé Kc initial.

- une «période de développement» (P2), qui est caractérisée par une augmentation rapide du LAI. La limite de ce stade de développement s'estompe quand le feuillage de la plante recouvre 70-80% du sol. C'est la période de pleine végétation qui correspond dans ce cas précis à la floraison avec l'apparition de 50% des soies (dans le cas du maïs).

- une «période mi-cycle» (P3) qui se détermine quand le produit commence à mûrir. L'indice foliaire est maximal et demeure constant. Ici, le Kc est maximal.

- une «période finale» (P4) qui s'étend jusqu'à la récolte et le Kc attribué s'appelle Kc final. Elle correspond à la phase de sénescence et à la décroissance du LAI. C'est aussi la période de maturation qui se traduit par la formation complète et totale du grain.

Bien que la FAO propose un découpage en plusieurs phases du cycle végétatif, elle ne donne pas des valeurs de Kc pour la mi-cycle et pour la fin de la période. Les valeurs relatives au Kc initial en début de cycle sont déterminées à partir d'un abaque qui prend en compte le niveau de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et la fréquence des irrigations. Les Kc des périodes P3 et P4 doivent être choisis entre des options proches ($\pm 10\%$) selon des critères grossiers de vitesse de vent et d'humidité relative dominantes (Muller, 1996) (Tableau 20).

	Hrmin = 70 % *		Hrmin < 20 %		Kc moyens
	Vent (0-5 m/s)*	Vent (5-8m/s)	Vent (0-5m/s)	Vent (5-8m/s)	Vent (0-5 m/s)
Maïs en P3	1.05	1.10	1.15	1.20	1.10
Maïs en P4	0.55	0.55	0.60	0.60	0.57

Tableau 20 : Coefficients culturaux proposés par la FAO (1975).

A partir du Kc initial et du Kc final, on détermine l'évolution des Kc des périodes P2 et P4 par interpolation linéaire.

3.5.2.2. Etude critique de la détermination des périodes végétatives FAO et les limites de la méthode

Bien que cette délimitation de phases végétatives FAO soit réaliste, certains critères retenus paraissent très grossiers. Il s'agit du recouvrement du sol à 10 ou 70 % par la couverture végétale. Il n'est pas toujours aisé de mesurer cette proportionnalité recommandée par la FAO et la détermination du début de mûrissement de certaines cultures dont les fruits et agrumes est très variable. Même si la méthode FAO de délimitation des périodes végétatives des différentes cultures est réaliste, il existe une période de ± 5 jours, voire plus, pour chacune des dates à fixer pour définir les périodes. Bien qu'étant un référentiel, la méthode FAO ne s'adapte pas à toutes les réalités du milieu. Ce référentiel ne doit être utilisé que comme un canevas. Ainsi, la méthode FAO telle qu'elle est définie ne peut être appliquée sans une modification au Bénin, compte tenu de ses réalités géographiques du pays. D'où notre modulation recommandée par Dancette (1983).

3.6. Les raisons de la modification de la méthode FAO pour le Bénin et les résultats

Les faibles rendements (800 kg/ha pour la variété locale et 1T/ha pour les variétés améliorées) de maïs cultivées au Bénin, ne nous permettent pas d'appliquer de facto les différents coefficients culturaux proposés par la FAO. Nous avons recalculé les coefficients culturaux pour chaque variété de maïs à partir de l'abaque FAO et redéfini les différentes phénophases en tenant compte de l'incertitude de ± 5 jours qui caractérise chaque stade phénologique dans les conditions climatiques du Bénin. Ce qui nous a permis d'établir pour chaque cas une courbe du coefficient cultural (Figure 66)

Les coefficients culturaux de la TZB-SRW (120 jours), la DMR-SRW (90 jours) et enfin la TZEE-SRW (75 jours) ont été calculés en prenant en compte les éléments du climat comme le vent et sa vitesse moyenne, l'humidité relative, la température moyenne. La vitesse moyenne du vent est un facteur important à considérer dans la détermination des K_c , car elle modifie le taux de transpiration en raison du degré de turbulence de l'air au-dessus du feuillage rugueux de la culture. Le taux de transpiration est plus élevé quand soufflent des vents secs que quand les vents sont chargés d'humidité (FAO, 1975).

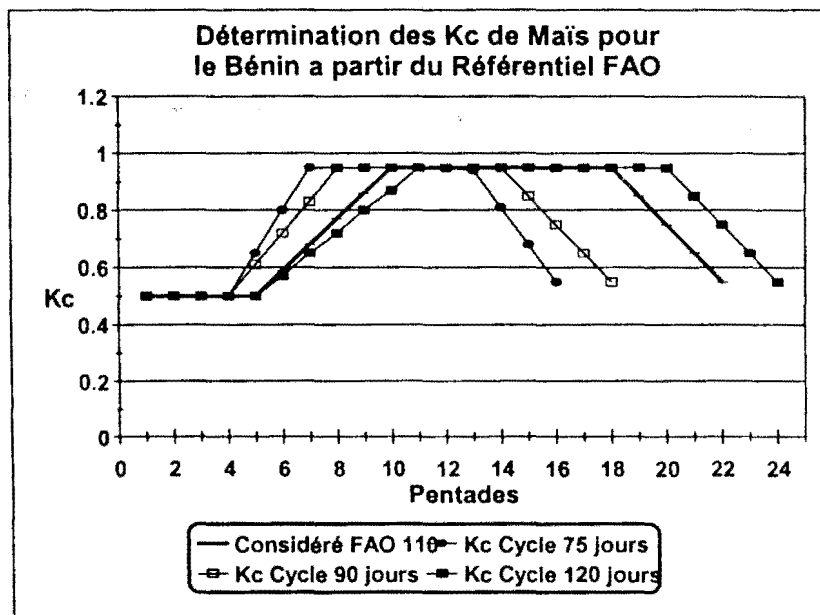


Figure 67 : Détermination des K_c de maïs pour le Bénin à partir du référentiel FAO

**Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs**

Le Kc référentiel de la FAO à partir duquel nous avons dérivé les nôtres est un coefficient cultural d'un maïs de 110 jours. Compte tenu des faibles rendements du maïs au Bénin par rapport au maïs mexicain ou guatémaltèque par exemple, et à cause des conditions météorologiques propres au Bénin, nous avons retenu comme Kc initial (0,5), Kc maximal (0,95) et Kc final (0,55). Les valeurs des Kc intermédiaires ont été déterminées par régression linéaire. Une interpolation linéaire nous a permis de tracer la courbe correspondant aux différentes valeurs des Kc à différents stades végétatifs (Tableaux 21, 22, 23).

Les valeurs de Kc pour le Bénin sont portées sur les tableaux N°21, N° 22, N° 23. Les Kc calculés sont à l'échelle pentadaire et à l'échelle décadaire et correspondent à la durée du cycle végétatif de chaque variété de maïs (Figure 67) et (Tableaux 21, 22, 23).

Table au 21 : Evolution des Kc pour le maïs tardif de 120 jours au Bénin.

Maïs à cycle long TZB-SRW (120 jours)																								
Pentades et numéros d'ordre																								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Valeurs des coefficients culturaux pentadaires																								
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.57	0.65	0.72	0.8	0.87	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.85	0.75	0.65	0.55
Valeurs des coefficients culturaux décadaires																								
Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade													
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12													
0.5	0.5	0.61	0.76	0.91	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.80	0.6													

Tableau 22 : Evolution des Kc pour le maïs de 90 jours au Bénin.

Maïs à cycle court DMR-SRW (90 jours)																							
Pentades et numéros d'ordre																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Valeurs des coefficients culturaux pentadaires																							
0.5	0.5	0.5	0.5	0.61	0.72	0.83	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.85	0.75	0.65	0.55	-	-	-	-	-
Valeurs des coefficients culturaux décadaires																							
Décade 1	Décade 2	Décade 3	Décade 4	Décade 5	Décade 6	Décade 7	Décade 8	Décade 9															
0.5	0.5	0.66	0.76	0.95	0.95	0.95	0.80	0.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tableau 23 : Evolution des Kc pour le maïs extra précoce de 75 jours au Bénin

Maïs à cycle très court TZEE-RW (75 jours)																							
Pentades et numéros d'ordre																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Valeurs des coefficients culturaux pentadaires																							
0.5	0.5	0.5	0.5	0.61	0.8	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.81	0.68	0.55	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Valeurs des coefficients culturaux décadaires																							
Décade 1	Décade 2	Décade 3	Décade 4	Décade 5	Décade 6	Décade 7	½ Décade																
0.5	0.5	0.70	0.95	0.95	0.94	0.74	0.55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

3.7. Les différentes phénophases et la variation des coefficients culturaux

Par rapport aux différentes valeurs de Kc de chaque phénophase, les durées des phénophases des variétés de maïs de 120 jours (TZB-SRW) (Tableau 24), maïs de 90 jours (DMR-SRW) (Tableau 25) et maïs de 75 jours (TZEE-SRW) (Tableau 26) se présentent comme suit :

Tableau 24 : Détermination des différentes phases végétatives du maïs de 120 jours à partir du référentiel FAO et variabilité des coefficients culturaux



Maïs à cycle long TZB-SRW (120 jours)																								
Pentades et numéros d'ordre																								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Découpage phénologique																								
PHASE 1 (Levée)					PHASE 2 (Floraison)					PHASE 3 (Formation du grain)							PHASE 4 (Mûrissement)							
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.57	0.65	0.72	0.8	0.87	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.85	0.75	0.65	0.55
Valeurs des coefficients culturaux décennaux																								
Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12													
0.5	0.5	0.61	0.76	0.91	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.80	0.6			

Tableau 25 : Détermination des différentes phases végétatives du maïs de 90 jours à partir du référentiel FAO et variabilité des coefficients culturaux.



Maïs à cycle court DMR-SRW (90 jours)																							
Pentades et numéros d'ordre																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Découpage phénologique																							
PHASE 1 (Levée)				PHASE 2 (Floraison)				PHASE 3 (Formation du grain)				PHASE 4 (Mûrissement)				-	-	-	-	-	-		
0.5	0.5	0.5	0.5	0.61	0.72	0.83	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.85	0.75	0.65	0.55	-	-	-	-	-	-
Valeurs des coefficients culturaux décennaux																							
Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade															
1	2	3	4	5	6	7	8	9															
0.5	0.5	0.66	0.76	0.95	0.95	0.95	0.80	0.6	-	-	-												

Tableau 26 : Détermination des différentes phases végétatives du maïs de 75 jours à partir du référentiel FAO et variabilité des coefficients culturaux .



Maïs à cycle très court TZEE-RW (75 jours)																							
Pentades et numéros d'ordre																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Découpage phénologique																							
PHASE 1				PHASE 2				PHASE 3				PHASE 4				-	-	-	-	-	-	-	-
				2																			
0.5	0.5	0.5	0.5	0.61	0.8	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94	0.81	0.68	0.55	-	-	-	-	-	-	-	-
Valeurs des coefficients culturaux décennaux																							
Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade	Décade															
1	2	3	4	5	6	7	8																
0.5	0.5	0.70	0.95	0.95	0.94	0.74	0.55	-	-	-	-												

Les durées des différentes phases végétatives des trois variétés de maïs sont présentées dans le tableau (27) ci-dessus.

Phases	Durée	Phases	Durée	Phases	Durée
Phase1	30 jours	Phase1	20 jours	Phase1	20 jours
Phase2	30 jours	Phase2	20 jours	Phase2	15 jours
Phase3	40 jours	Phase3	30 jours	Phase3	20 jours
Phase4	20 jours	Phase4	20 jours	Phase4	20 jours
TZB-SRW : (120 jours)		DMR-SRW : (90 jours)		TZEE-SRW : (75 jours)	

Tableau 27 : Récapitulatif des durées des phases végétatives des trois variétés de maïs

La variabilité du Kc est fonction de la durée des différentes stades végétatifs des cultures.

Les Kc de levée de la culture sont différents de ceux de la montaison et la maturation. Ils sont faibles au début du cycle et atteignent leur valeur maximale au moment où la culture atteint son développement optimum. Ils décroissent au fur et à mesure que la culture mûrit.

La phase végétative qui dure 30 jours est plus longue chez le maïs tardif (TZB-SRW) de 120 jours.

La deuxième phase du cycle végétatif (floraison) est caractérisée par une couverture dense et uniforme de la culture. Elle correspond à 20 jours avant la floraison proprement dite et finissant 20 jours après celle-ci. Les Kc varient entre 0.65 et 0.87 pour le maïs à cycle long et cette période dure à peu près 30 jours. Pour le maïs de 90 jours (DMR-SRW), ce stade végétatif a une durée de 20 jours et les valeurs de Kc se situent entre 0.61 et 0.83. Pour le un maïs de 75 jours (variété extra-précoce), les Kc de la floraison oscillent entre 0.61 et 0.95 et la durée du stade végétatif dure 15 jours à partir de la date de semis.

A la troisième phase de développement (période de formation du grain), les K_c de toutes les variétés ont leur maximum (0.95). Pour le maïs à cycle long, cette période s'étale sur 40 jours, alors qu'elle dure 30 jours chez un maïs de 90 jours. La formation du grain du maïs de 75 jours dure 20 jours.

La quatrième phase (période de mûrissement) dure deux décades pour toutes les variétés et les valeurs de K_c décroissent. Pour les maïs à cycle long et court, les coefficients culturaux varient entre 0.85 et 0.55, tandis qu'ils se situent entre 0.94 et 0.55 pour le maïs extra-précoce de 75 jours.

La caractérisation des coefficients culturaux propres au Bénin, le calcul des phases différentes phénophases permettent d'évaluer les termes du bilan hydrique des deux variétés de maïs (120 et 90 jours).

3.8. La diversité des situations et les choix réalistes

Les différents indicateurs du bilan hydrique ont été obtenus après des simulations faites sur les paramètres d'entrée du modèle SARRABIL. Par rapport à la diversité des situations (conditions édaphiques, similitude des résultats) nous avons opéré des choix réalistes et les résultats ont été analysés à partir de l'enquête de terrain présentée dans la section méthodologie (cf première partie).

Le renseignement et le calage du modèle par rapport aux variables concernant les sols sont : la RU fixée à 60 mm par mètre par rapport au stock d'eau initial qui varie avec la granulométrie et avec la nature des sédiments propres à chaque région géographique.

Le calcul des différents termes du bilan hydrique est fait pour deux périodes : 1931-1960, 1961-1990. L'indice de satisfaction des besoins en eau ETR/ETM (%) est calculé pour cinq et huit années sur dix pour les deux variétés de maïs à chaque phase végétative.

La variabilité interannuelle de l'indice de stress (ETR/ETM) est présentée pour chaque phénophase et pour les deux périodes. La variabilité spatio-temporelle

comparée de l'indice de satisfaction des besoins en eau est évaluée et présentée à partir des Analyses en Composantes Principales réalisées sur la période 1931-1990.

Section 4. : L'indice de satisfaction des besoins en eau du maïs de 120 et de 90 jours par phénophases sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990

4.1. Le cas du maïs de 120 jours selon les différentes phénophases durant la grande saison des pluies dans le sud du Bénin

4.1.1. L'indice de satisfaction des besoins en eau à la période végétative

Les résultats sont présentés en termes fréquentiels cinq et huit années pour les deux périodes 1931-1960 et 1961-1990. Les histogrammes en blanc et en couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1931-1990.

Les histogrammes en noir et en hachures présentent la situation dans 80% des cas et sur la période 1961-1990

Au sud du Bénin pour le maïs de 120 jours cultivé pendant la grande saison des pluies, les taux de satisfaction des besoins en eau de la TZB sont dans la plupart des cas inférieurs à 80%, seuil de Dancette (1983) (cf. section méthodologie) sur toutes les stations durant les périodes 1931-1960 et 1961-1990 (Figures 68 à 74). Le risque de stress à cette phase existe dans les fréquences de cinq et huit années sur dix et surtout sur la période 1961-1990 caractérisée par le dérèglement du rythme climatique saisonnier.

4.1.2. Situation agroclimatique à la floraison : l'ETR/ETM (%) durant les périodes 1931-1960 et 1961-1990

Pour la variété à cycle long (120 jours) cultivée dans le sud du Bénin, les valeurs de taux de satisfaction des besoins en eau sont partout supérieures à 80 % dans la vallée de l'Ouémé à Adjohoun au sud-est du pays et dans le sud-ouest à Grand-Popo (Figure 69 et figure 70)

Cependant, sur le littoral à Ouidah, à la floraison, on note une légère baisse de l'indice de satisfaction des besoins en eau sur les deux périodes et dans 80% des cas sur la période récente (1961-1990) et par rapport à la période 1931-1960 (Figure 68).

Figure 68 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Ouidah sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).

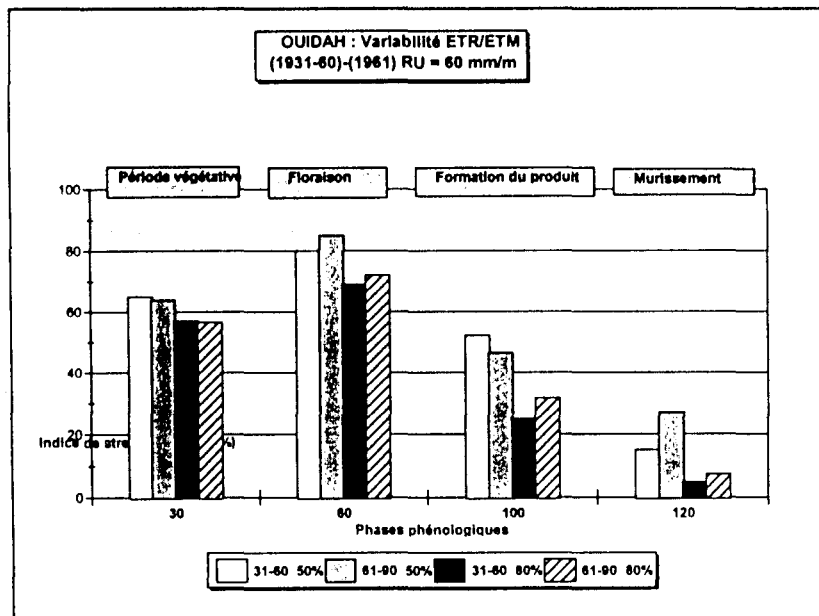
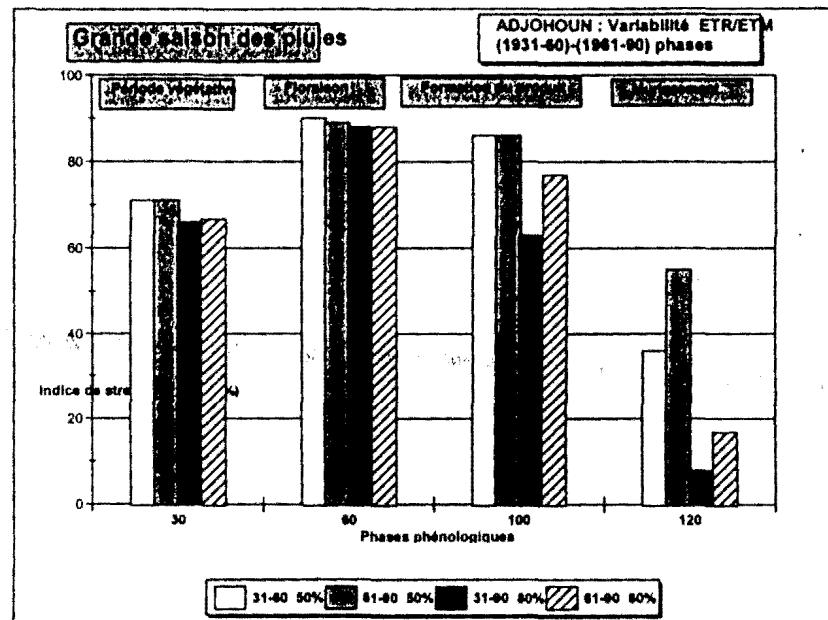


Figure 69 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Adjohoun durant les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).



4.1.3. Situation au stade de formation du grain :

A la phase de "formation du grain", comparativement à la période 1931-1960, on enregistre une baisse sensible du rapport ETR/ETM surtout au sud-ouest du Bénin dans 80% des cas (Grand-Popo et de Ouidah) (Figures 68 et figure 70).

Cependant, durant la période 1961-1990, on note une amélioration de l'indice de satisfaction des besoins en eau par rapport à la période 1931-1960. Les dernières décades de cette phénophase enregistrent une nette réduction de l'ETR/l'ETM (%) sur toutes les stations (résultats non montré).

**Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs**

En somme, la normale 1961-1990 est caractérisée par une augmentation de l'indice de satisfaction des besoins en eau par rapport à la période 1931-1960 (Figures 68 à 74).

4.1.4. L'indice de satisfaction des besoins en eau à la période de mûrissement

Par rapport à la période végétative, à la période de floraison et à la phase de formation du grain, la période de mûrissement est caractérisée par une nette réduction de l'ETR/l'ETM (%) sur toutes les stations du pays. Les taux de satisfaction des besoins en eau sont inférieurs à 60% quelle que soit la région climatique.

A la fin du cycle pour toutes les stations, le taux de satisfaction des besoins en eau a nettement baissé et est variable selon les stations. Huit années sur dix, le risque d'avoir un indice de stress hydrique est élevé dans le sud du Bénin (Figures 68 à 74).

Figure 70 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Grand-Popo sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).

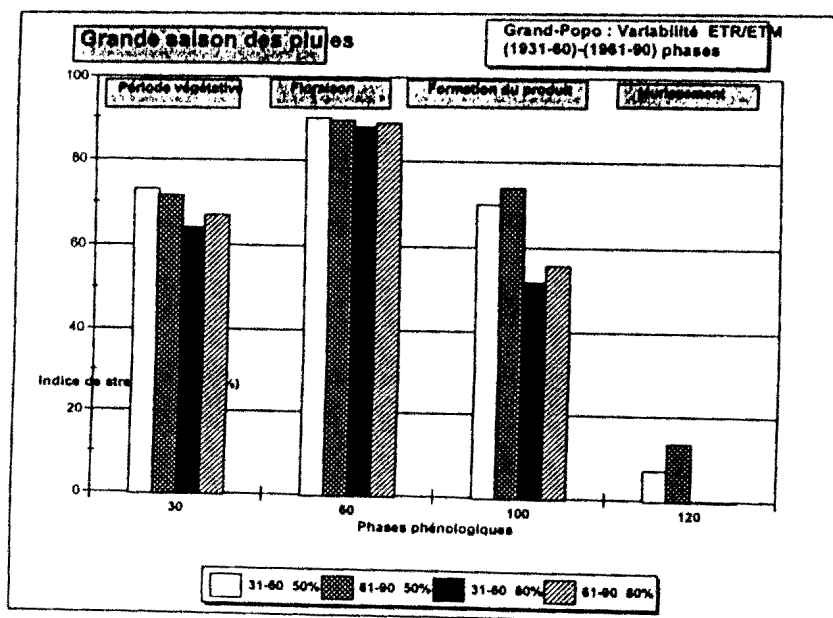


Figure 71 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Porto-Novo sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies (120 jours). (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).

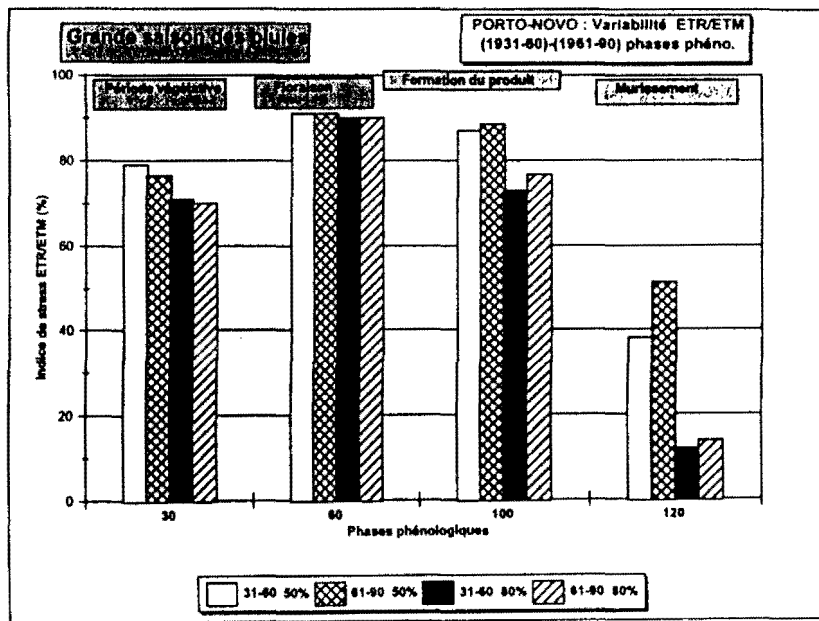


Figure 72 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Pobè sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies (120 jours) ; (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).



**Troisième partie : Conséquences des variabilités des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs**

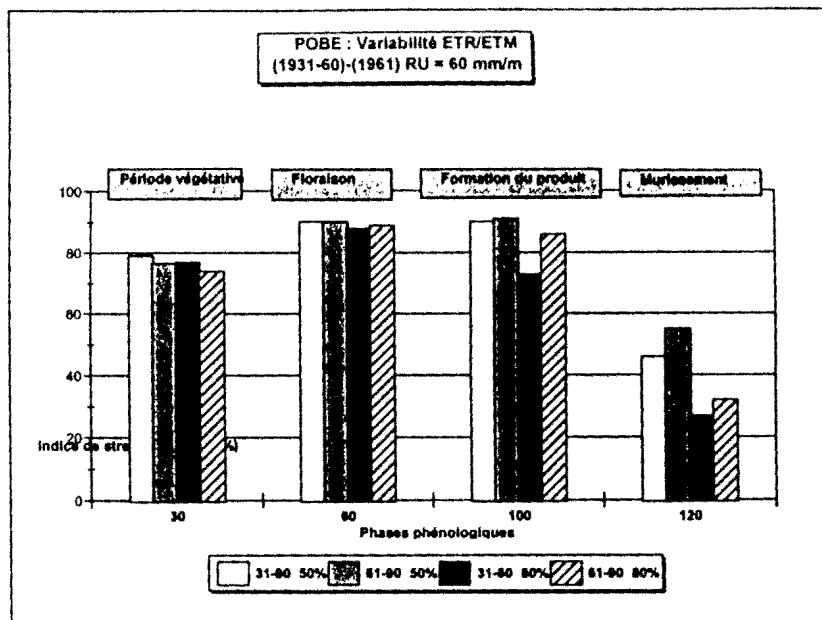


Figure 73 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Sakété sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies (120 jours). (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).

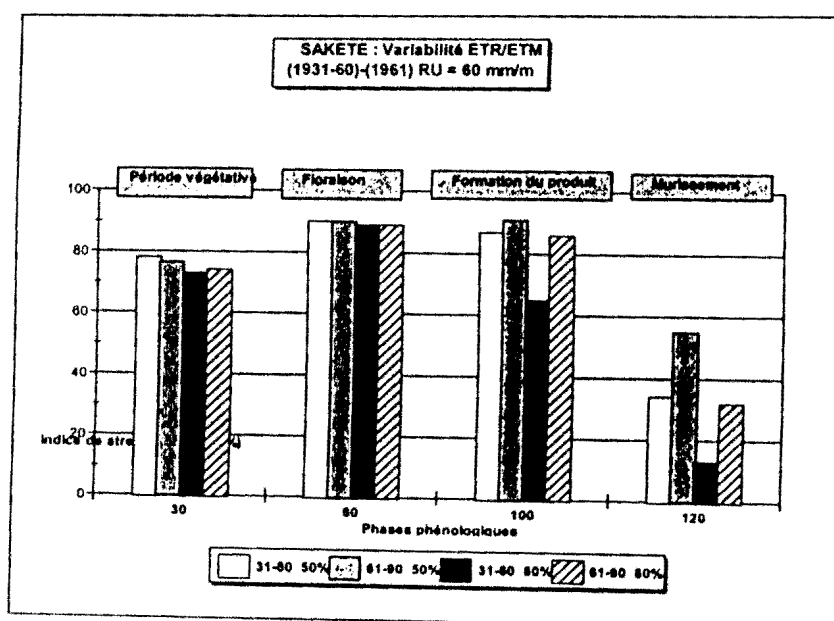
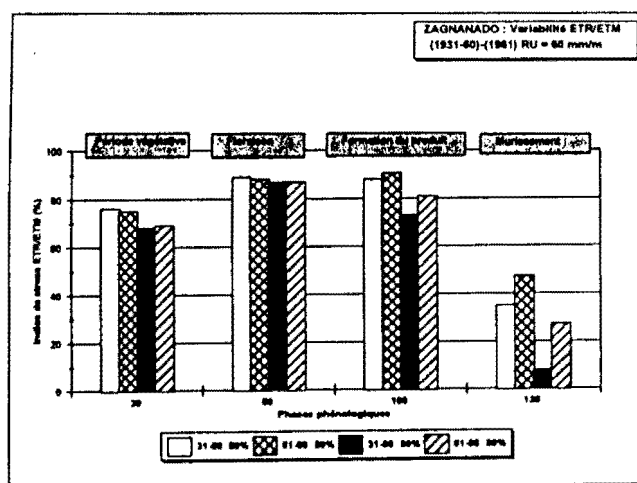


Figure 74 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Zagnanado sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies (120 jours). (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).



4.2. Caractérisation du stress hydrique du maïs précoce de 90 jours sous climat béninien durant les périodes 1931-1960 et 1961-1990

Durant la deuxième saison de culture, la période 1961-1990 est marquée par une baisse du taux d'indice de satisfaction des besoins eau pour le maïs à cycle court dans le sud du Bénin (Figures 75 à 82).

4.2.1. L'indice de satisfaction des besoins en eau à la période végétative

Les indices de stress sont inférieurs à 30% sur la période 1961-1990 sur les stations de Sakété, Ouidah, de Grand-Popo, d'Allada (Figures 77, 79, 80). Sur toutes ces stations, le risque de stress hydrique dans 80% des cas.

A la période végétative, les indices de satisfaction des besoins en eau du maïs de jours ont sensiblement diminué au cours de la période 1961-1990 par rapport à la normale 1931-1990 et surtout sur la plaine côtière (Figure 79, 80)

En revanche, à Zagnanado dans le centre du pays(Figure 82) et dans la basse vallée de l'Ouémé, les taux de satisfaction des besoins en eau sont supérieurs à 50% sauf sur le plateau de Sakété (Figure 77) où il est inférieur à 30% au cours de la période 1931-1960. Paradoxalement, à Pobè sur le même plateau de terre de barre ce taux avoisine 70% durant les mêmes périodes. Dans la basse vallée de l'Ouémé, à la période végétative, le risque de stress hydrique n'existe pas.

Figure 75 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Adjohoun au cours de la petite saison des pluies au Bénin sur les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).



Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique sur la culture du maïs

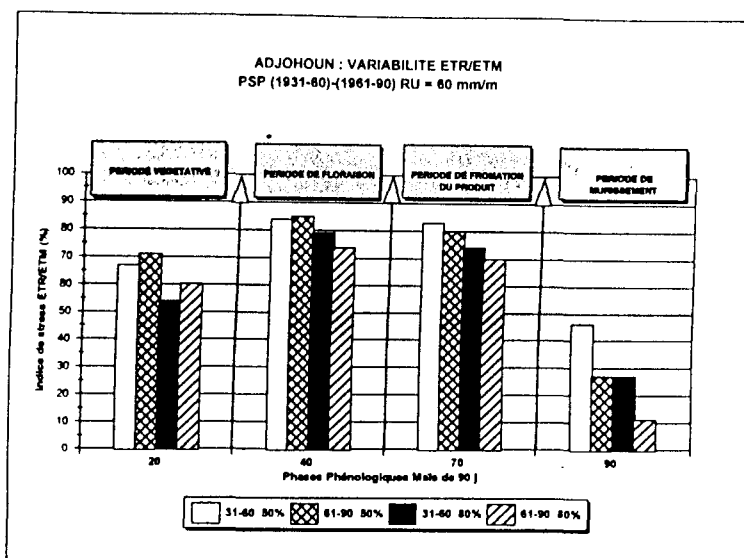


Figure 76 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Pobè au cours de la petite saison des pluies au Bénin sur les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).

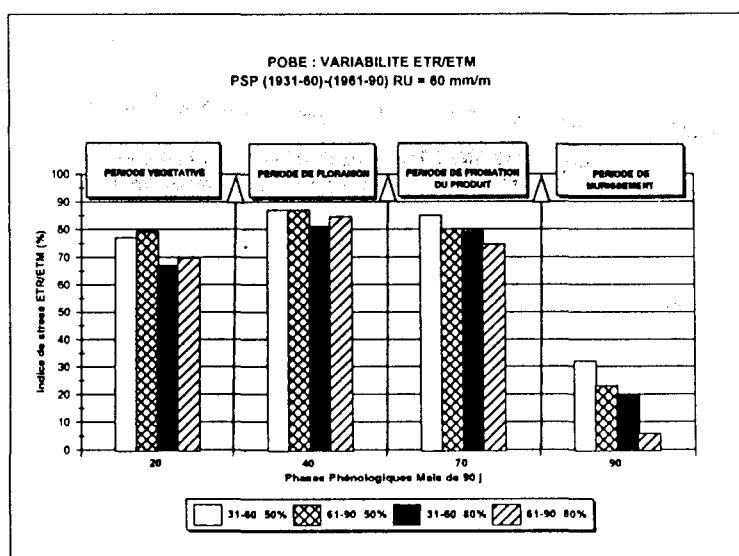


Figure 77 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Sakété cours de la petite saison des pluies sur le plateau de Sakété-Pobè au Bénin sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir

**Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs**

présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).

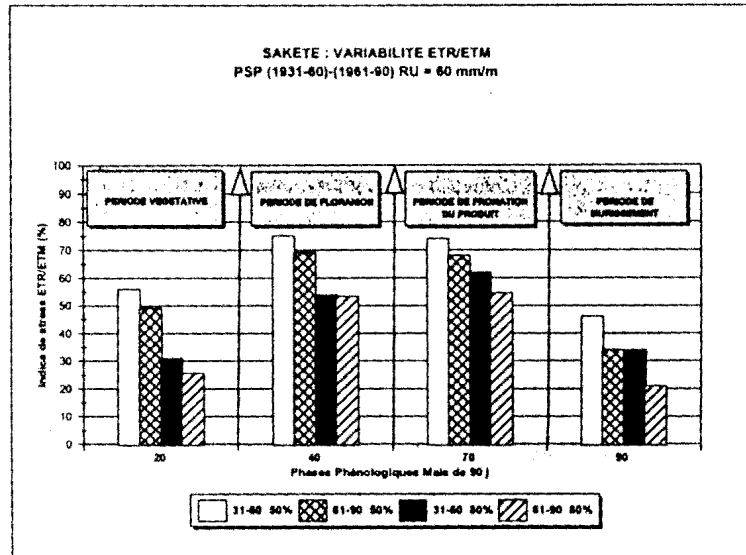


Figure 78 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Porto-Novo au cours de la petite saison des pluies au Bénin sur les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).



Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs

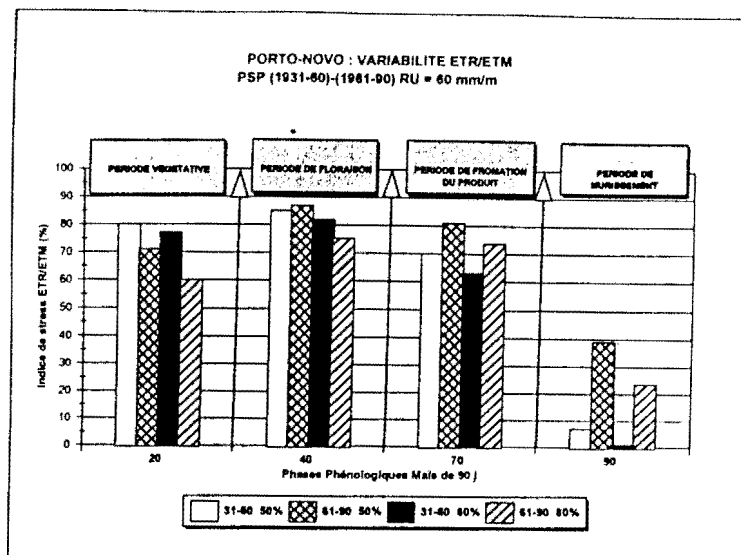
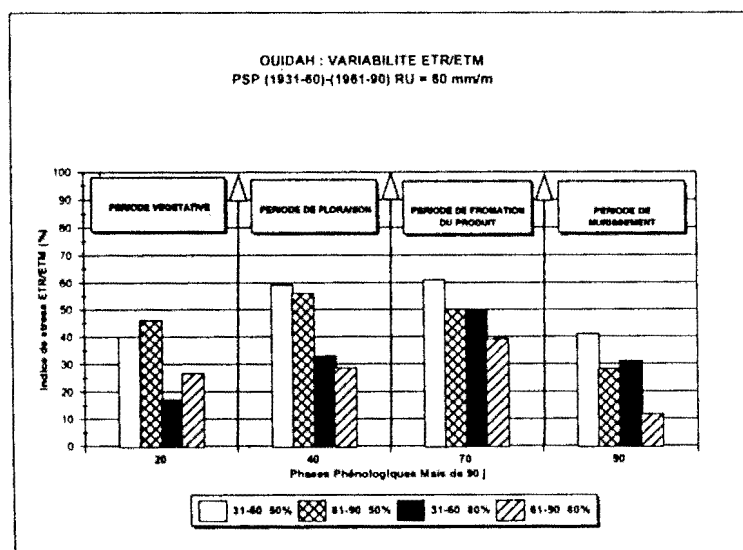


Figure 79 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Ouidah au cours de la petite saison des pluies au Bénin sur le littoral durant les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).



4.2.2. La situation agroclimatique du maïs de 90 jours à la floraison

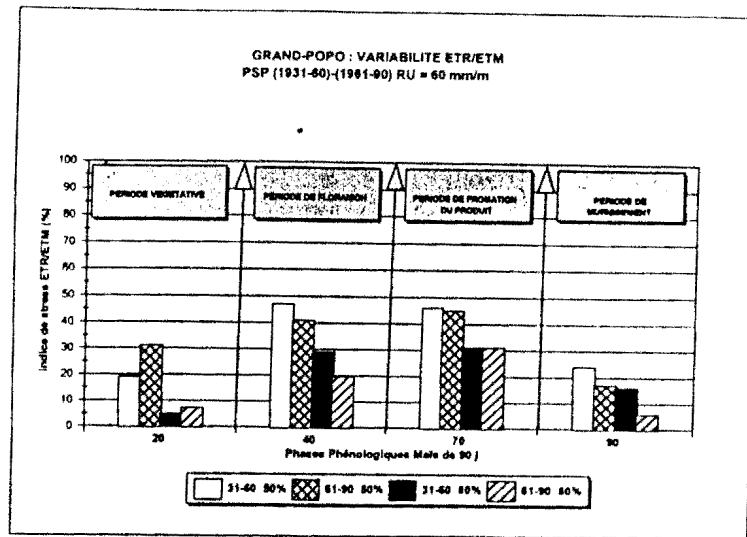
Sur la côte au sud-ouest Ouidah et Grand-Popo (Figure 79, 80), dans la zone de diagonale de déficit pluviométrique, huit années sur dix, le risque de déficit agroclimatique est élevé par rapport au sud-est sur les plateaux de Pobè (Figure 76) et de Sakété (Figure 77) et dans la vallée de l'Ouémé à Adjohoun (Figure 75) et dans le Hollidjè. Les besoins en eau du maïs de 90 jours sont moins satisfaits durant la période 1961-1990 à la phase de mûrissement.

En revanche, la situation agroclimatique sur la terre de barre est un peu meilleure par rapport celle des stations côtières (Figure 79 et 80). Toutefois, à Allada (Figure 81) il existe une différence sensible d'ETR/ETM (%) entre les périodes 1931-1960 et 1961-1990 pendant la période de floraison huit années sur dix.

Durant la floraison et sur les stations côtières du sud-ouest du Bénin le risque de stress hydrique existe et est permanent (Figure 80).

Figure 80 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Grand-Popo au cours de la petite saison des pluies au sud-est du Bénin au Bénin sur les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).





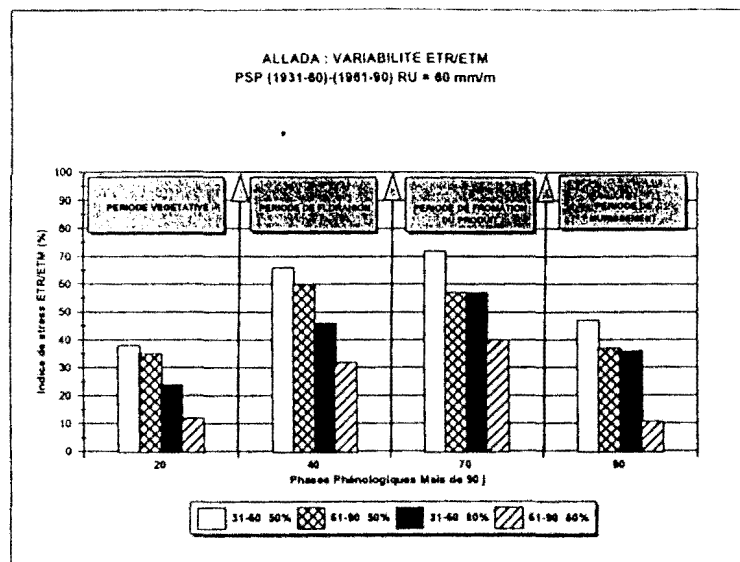
4.2.3. Le stress hydrique à la formation du grain et à la période de mûrissement.

Dans sud-ouest à Grand-Popo (Figure 80), et dans le sud-est à Porto-Novo (Figure 78) la culture du maïs de 90 jours est confrontée à un déficit hydrique à la fin du cycle quelles que soient les grandeurs fréquentielles avec quelques nuances. A Allada (Figure 81) sur le plateau de terre de barre, le maïs précoce est plus stressé au cours de période 1961-1990 que durant la normale 1931-1960 au cours la période de la période de mûrissement dans les proportions de huit années sur dix .

Figure 81 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Allada au cours de la petite saison des pluies au sud de la dépression de la Lama au Bénin sur les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur dix durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).

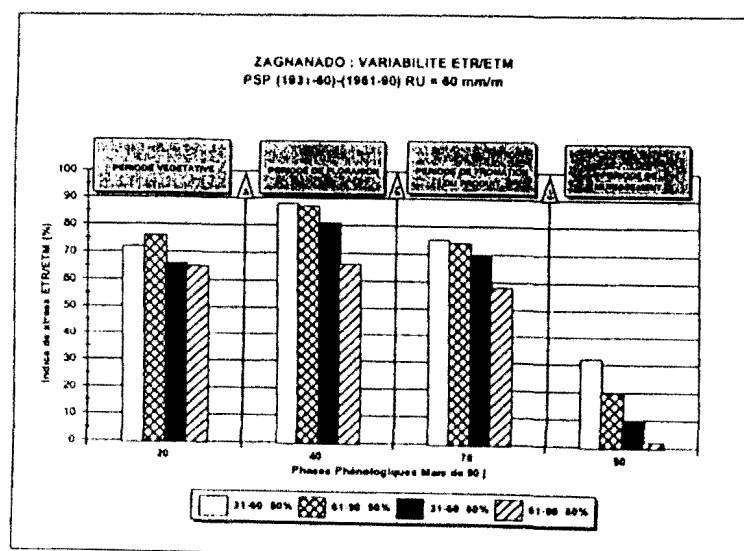


Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs



A Zagnanado, le risque d'avoir un risque de stress hydrique est élevé pour la culture du maïs de 90 jours huit années sur dix à la fin du cycle sur la période 1961-1990 (Figure 82)

Figure 82 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Zagnanado au cours de la petite saison des pluies au Bénin sur les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).



4.2.4. Variabilité de l'indice de stress hydrique du maïs de 120 jours dans le nord du Bénin sous climat soudanien

Ces résultats concernent le maïs de 120 jours calé sur le cycle pluviométrique saisonnier du nord du Bénin.

Dans la région de l'Atakora à Djougou et à Natitingou, et dans le Borgou, tout au long du cycle de 120 jours, on ne note pas une variabilité significative de l'indice de satisfaction des besoins en eau entre la période 1931-1960 et 1961-1990 selon les stades végétatifs. En milieu soudanien au Borgou, Parakou et Kandi par exemple connaissent une diminution de cet indice à la période de mûrissement. Ceci n'est théoriquement pas dommageable pour la culture en fin de cycle. Ces résultats confirment bien ceux des enquêtes de terrain dans la mesure où le Borgou, actuellement grande région cotonnière approvisionne le sud du Bénin en maïs bien que cette céréale ne soit pas trop consommée dans ce milieu. Cinq années sur dix les besoins en eau du maïs de 120 jours sont satisfaisants. Les taux de satisfaction des besoins en eau sont supérieurs à 60%. (Figure 85). Ceci peut être lié à l'arrière effet de l'engrais (NPK) qui a servi à fumer le coton car le maïs (cultivar TZB) bénéficie beaucoup de l'azote, de l'urée, du potassium et d'un travail du sol adéquat grâce à la culture attelée. En général, le maïs de 120 jours se porte bien en milieu atakorien et dans le Borgou.

Figure 83 : Variabilité de l'indice de stress hydrique en milieu atakorien en situation de fréquence cinq et huit années sur dix sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 à Natitingou. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur dix. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur dix durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).

Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique sur la culture du maïs

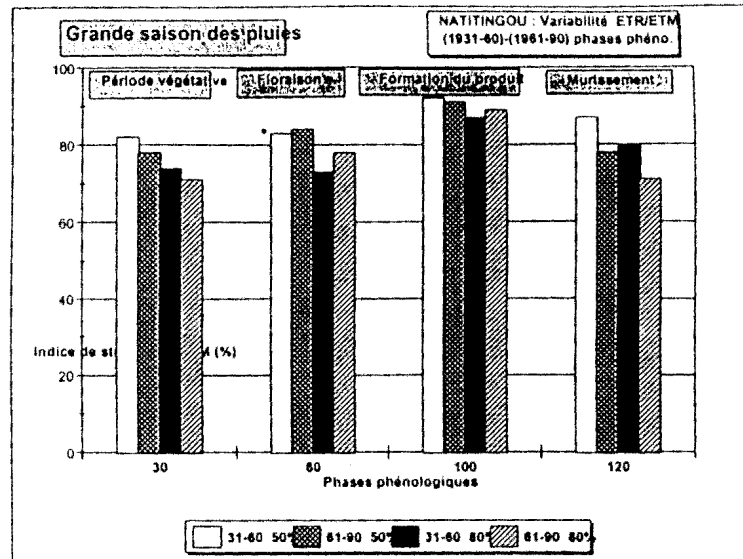


Figure 84 : Variabilité de l'indice de stress hydrique en milieu atakorien en situation de fréquence cinq et huit années sur dix sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 à Djougou. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur dix. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur dix durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).

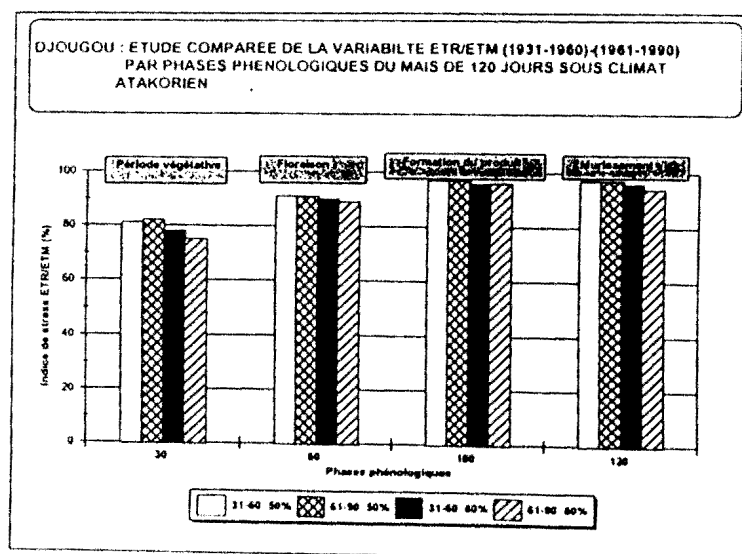


Figure 85 : Variabilité de l'indice de stress en milieu soudanien en situation de fréquence cinq et huit années sur dix sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 à Kandi. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).

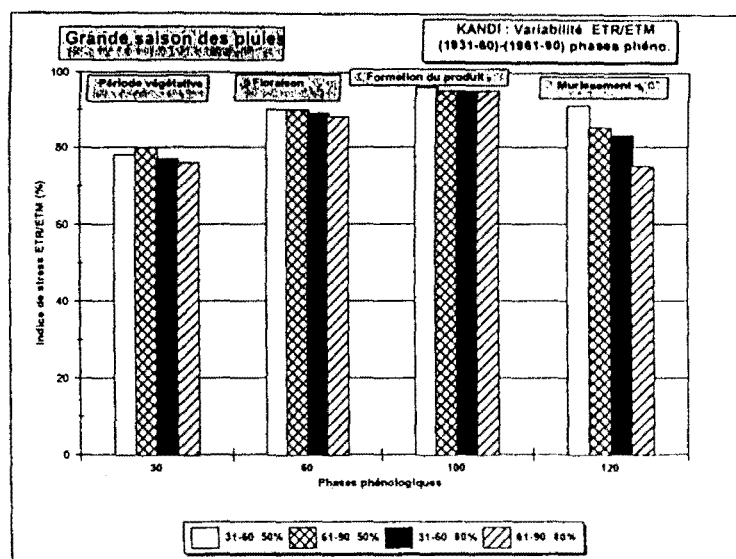
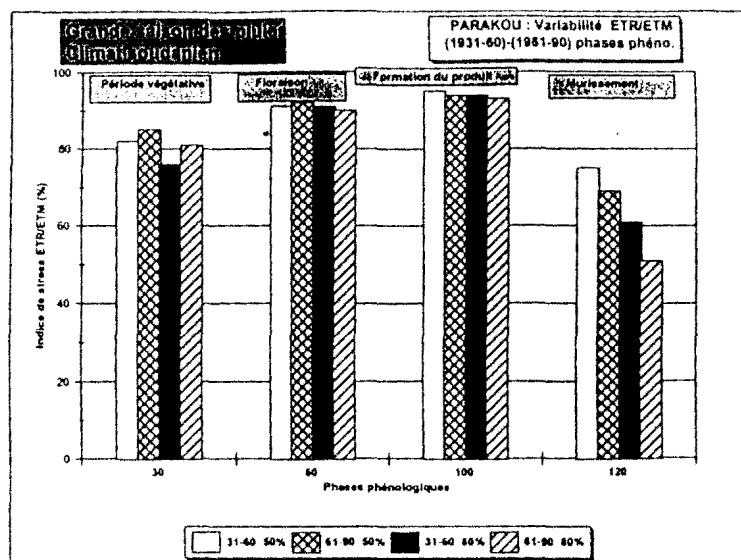


Figure 86 : Variabilité de l'indice de stress hydrique en milieu soudanien en situation de fréquence cinq et huit années sur dix sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 à Parakou. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).

**Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs**



Section 5. : Structures spatiales et variabilité interannuelle de l'indice de satisfaction des besoins en eau du maïs de 120 jours par phénophases

La variabilité interannuelle du taux de satisfaction des besoins en eau du maïs est identifiée à partir des Analyses en Composantes Principales. Elle complète l'étude de caractérisation de l'indice de stress agronomique en situation fréquentielle et par phénophases.

L'étude statistique est réalisée uniquement pour le maïs de 120 jours et sur la grande saison des pluies pour tous les milieux climatiques et sur la période 1931-1990. Elle permet de dégager à la fois dans le temps et dans l'espace la variation de l'indice de stress sur le cycle cultural de 120 jours dans nord et dans le sud du Bénin par rapport à la variabilité des pluies sur la période 1931-1990.

5.1. Variabilité dans le temps et dans l'espace de l'indice de stress hydrique ETR/ETM (%) à la période végétative

A la période végétative, le premier mode de variabilité interannuelle décrit par la CP1 représente le Bénin méridional et exprime 23% de la variance. La chronique temporelle associée au champ spatial montre que de 1943 à 1947, l'indice de satisfaction des besoins en eau du maïs de 120 jours est inférieur à 80% (seuil de Dancette, 1983) donc moins

satisfaisant pour ces stations du sud du Bénin alors que durant la décennie 60-70 l'ETR/ETM (%) a été toujours positif (Figure 87)

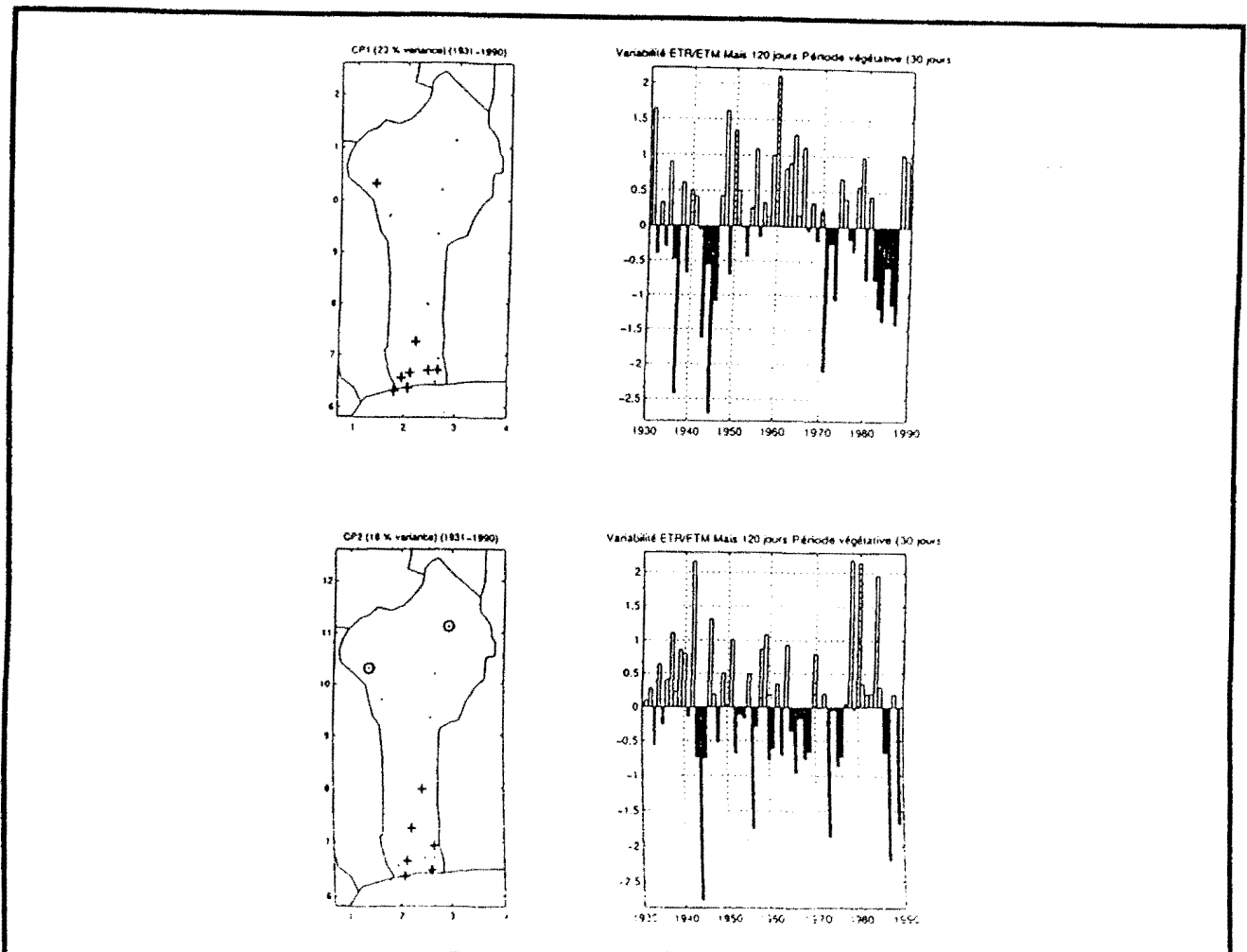


Figure 87 : Variabilité spatio-temporelle du taux de satisfaction des besoins en eau de maïs de 120 jours au Bénin sur la normale période 1931-1990 à la phase végétative ; CP1 = 23% de la variance et CP2 = 18% de la variance ; les grandes croix gras correspondent aux valeurs propres des vecteurs corrélés positivement et significatifs ; les cercles avec un petit losange correspondent aux valeurs de vecteurs propres corrélés négativement et significatifs

C'est ce qui expliquerait peut être les bons rendements agricoles enregistrés au cours de cette décennie. Vers les années 80, les indices de stress sont été très éprouvants pour la culture durant la phase végétative. Au cours de cette période, le champ pluviométrique a été marqué par des déficits hydriques très importants et de graves sécheresses comme celles de 1983 et de 1984.

La deuxième composante exprime 18% de la variance et représente une structure dipolaire avec quelques nuances. Le champ spatial est caractérisé par une absence de cohérence. La chronique temporelle associée à la structure spatiale montre que la moitié de la décennie 1940-1950 a été une série d'années durant lesquelles les besoins en eau du maïs n'ont pas été satisfaisants. De 1960 à 1970, excepté les années, 1963, 1965, l'indice de satisfaction des besoins en eau du maïs n'a pas toujours été satisfait au cours de cette phénopase.

5.2. Variabilité spatio-temporelle de l'indice de satisfaction des besoins en eau du maïs tardif de 120 jours à la floraison

A la floraison, le Bénin ne présente pas une grande cohérence spatiale. Ceci est lié à la diversité de l'assiette pédologique et aux techniques culturales exercées dans les régions géographiques.

La CP1 exprime 18% de la variance expliquée et représente les stations météorologiques du plateau de Porto-Novo et de Sakété-Pobè au sud-est et par la station de Kandi dans le nord-est (Figure 88). Pour ces stations, durant la floraison des années 1944-1948, les besoins en eau du maïs n'ont pas été satisfaits pour la culture. La chronique temporelle associée à cette première composante décrit une forte variabilité interannuelle d'une station à une autre. De 1960 à 1969, les besoins en eau du maïs de 120 jours ont été pour la plupart des cas satisfaits. Par contre, en 1982, 1983, et 1984, l'indice de stress a été aussi éprouvant pour la culture (Figure 88). Cette situation agroclimatique coïncide avec les années de sécheresse identifiées dans la partie climatique de l'étude.

Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique sur la culture du maïs

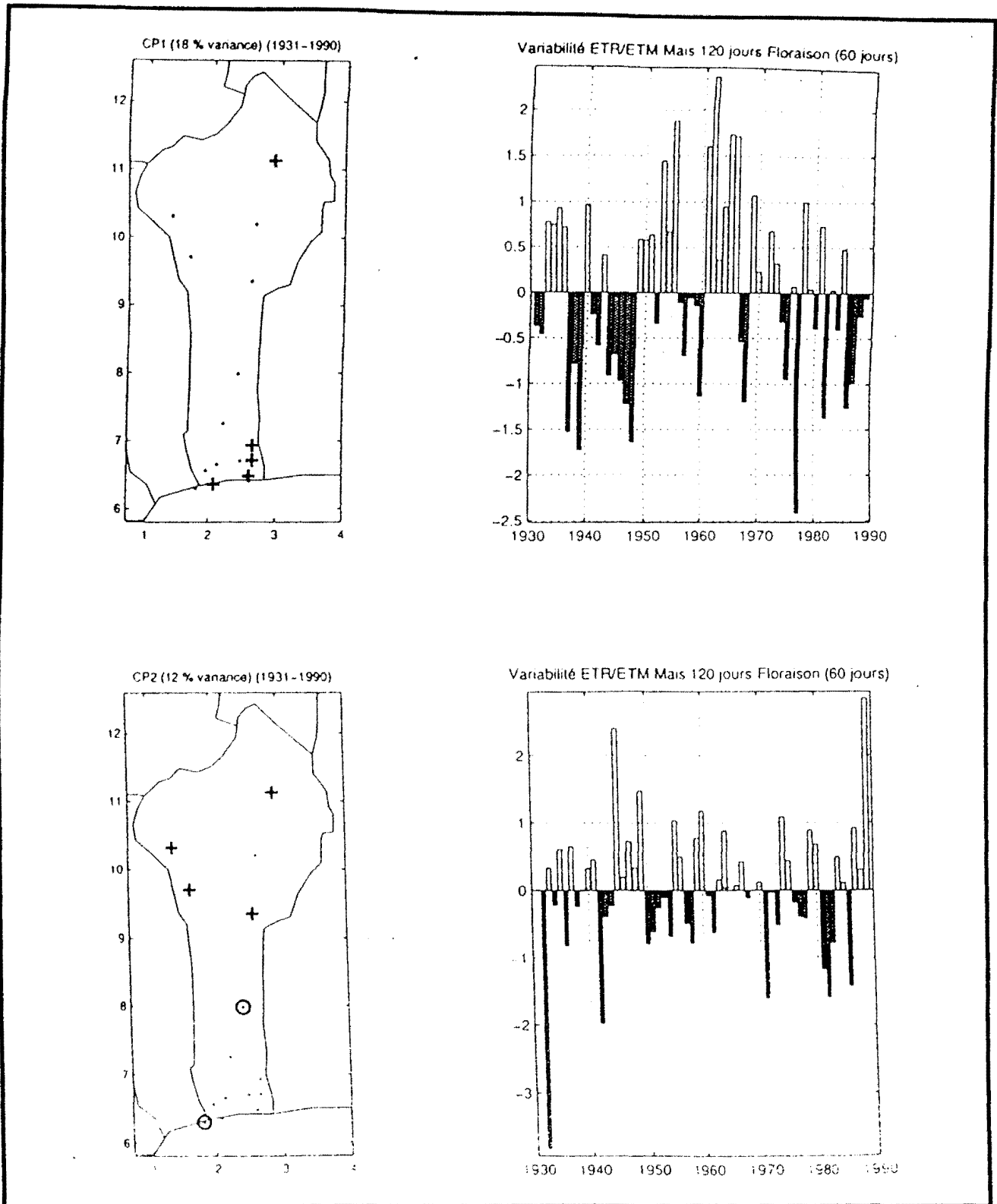


Figure 88 : Variabilité spatio-temporelle du taux de satisfaction des besoins en eau de maïs de 120 jours au Bénin sur la normale période 1931-1990 à la floraison ; CP1 = 18% de la variance ; CP2 = 12% de la variance ; les grandes croix gras correspondent aux valeurs propres des vecteurs corrélés positivement et significatifs ; les cercles avec un petit losange correspondent aux valeurs de vecteurs propres corrélés négativement et significatifs

Avec 12% de la variance, la CP2 décrit les stations situées au-delà de 9° de latitude nord et qui correspondent au Borgou et à l'Atakora en milieu soudanien. Les périodes 1950-1955, 1980-1984 correspondent aux années durant lesquelles les besoins en eau de la culture n'ont pas été satisfaisants.

5.3. Variabilité spatio-temporelle de l'indice de stress ETR/ETM (%) du maïs tardif de 120 jours à la période de formation du grain

A la formation du grain, le Bénin présente grossièrement un champ agroclimatique cohérent. Toutes les stations du climat béninien et la station de Kandi en milieu soudanien sont bien décrites par la CP1 et représentent 49% de la variance.

La chronique temporelle associée au champ spatial de cette phénophase montre une différence entre les normales 1931-1960 et 1961-1990. Les plus fortes anomalies négatives de l'indice de satisfaction des besoins en eau se sont produites sur la période 1931-1960 et dépassent parfois trois écart-types (Figure 89). Durant cette période, les stations du climat béninien ont été beaucoup éprouvés par le stress agronomique (Figure 89).

**Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs**

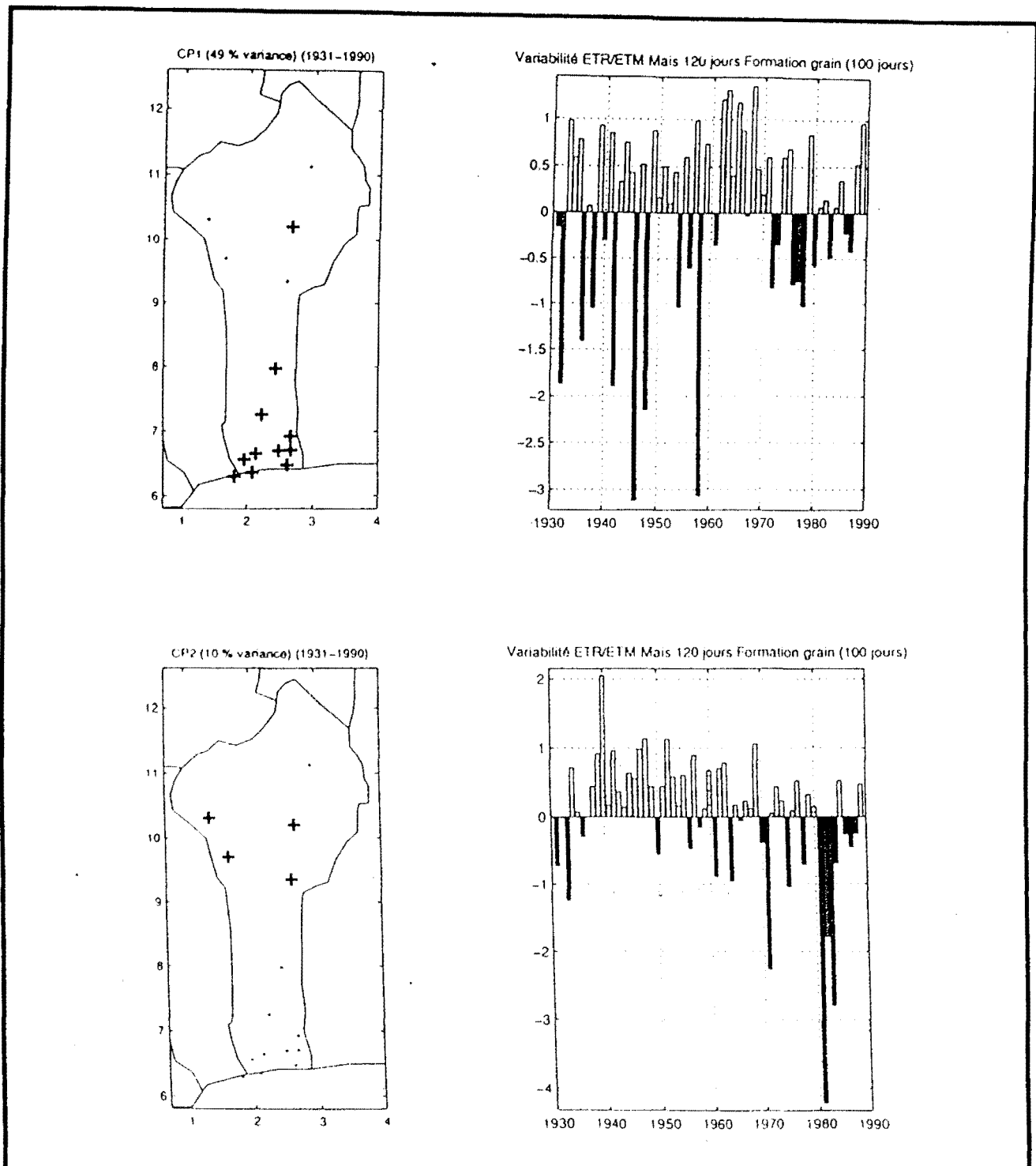


Figure 89 : Variabilité spatio-temporelle du taux de satisfaction des besoins en eau de maïs de 120 jours au Bénin sur la normale période 1931-1990 au stade de formation du grain ; CP1 = 49% de la variance ; CP2 = 10% de la variance ; les grandes croix gras correspondent aux valeurs propres des vecteurs corrélés positivement et significatifs ; les cercles avec un petit losange correspondent aux valeurs de vecteurs propres corrélés négativement et significatifs

Au cours du trentenaire 1961-1990, les anomalies ont été moins fortes que celles de la période 1931-1960. La décennie 1961-1970 a été marquée par des anomalies positives de ETR/ETM (%). 1972, 1973, 1976, 1977, 1978 1979, ont été des années au cours desquelles les besoins hydriques n'ont pas été bien satisfaits. Ceci se justifie sur les relevés des stations agronomiques et les fiches des paysans multiplicateurs de semences, sur lesquels le nombre de grains sur les épis est inférieur à la normale.

La CP2 exprime 10% de la variance et représente les stations comprises entre 9° et 11° latitude nord. Au cours de la décennie 1940-1950 les besoins en eau de la culture ont été bien satisfaisants comparativement à la période 1980-1990 (Figure 91).

A l'échelle temporelle, le schéma agroclimatique des années 1981, 1982, 1983, 1984 est calqué sur celui de la pluviométrie car les années de stress agronomique correspondent aux années de déficit pluviométrique. Dans certaines régions, le maïs a été confronté à un déficit hydrique à la formation du grain en 1981, ce qui compromet les rendements agricoles.

5.4. Variabilité dans le temps et dans l'espace de l'indice de satisfaction des besoins en eau du maïs tardif de 120 jours à la période de mûrissement

A la période de maturité du grain, on note une forte variabilité interannuelle de l'indice de satisfaction des besoins en eau sur la CP1 qui explique 41% de la variance (Figure 92). Le signal dégagé par cette composante représente les stations du sud-Bénin qui ont été caractérisées par des déficits d'ETR/ETM (%) vers la fin de la décennie 1971-1980 (Figure 92).

Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique sur la culture du maïs

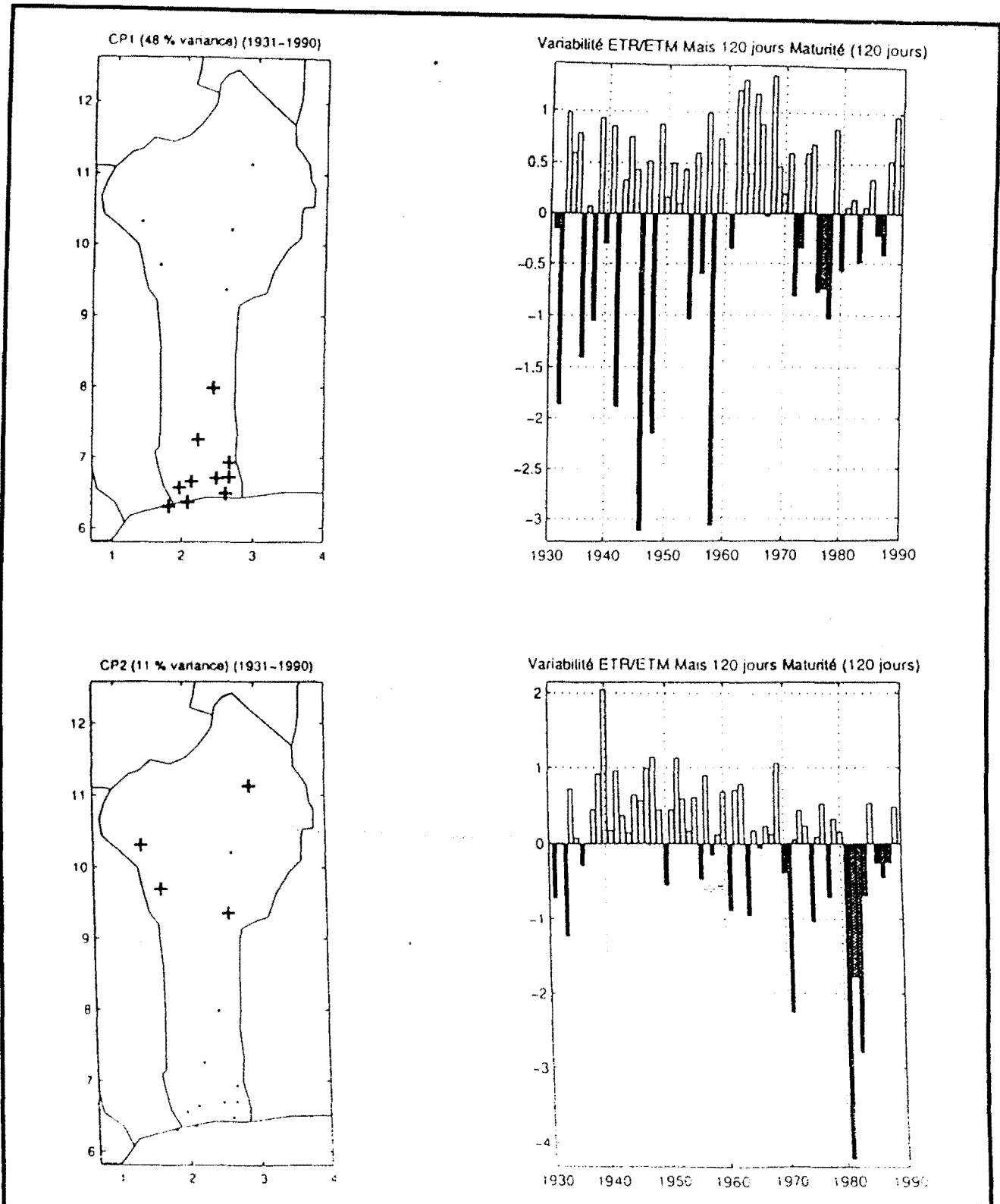


Figure 90 : Variabilité spatio-temporelle du taux de satisfaction des besoins en eau de maïs de 120 jours au Bénin sur la normale période 1931-1990 à la phase de maturité ; CP1 = 41% de la variance ; CP2 = 11% de la variance ; les grandes croix gras correspondent aux valeurs propres des vecteurs corrélés positivement et significatifs ; les

cercles avec un petit losange correspondent aux valeurs de vecteurs propres corrélés négativement et significatifs

La deuxième composante est représentée par les stations du climat atakorien et du climat soudanien avec 11% de la variance. La chronique temporelle associée à cette structure spatiale témoigne de la baisse de l'indice de satisfaction des besoins en eau du maïs au cours des années 1981-1984.

L'apport majeur de la technique des ACP appliquée au stress agronomique montre que l'indice de satisfaction des besoins en eau ETR/ETM (%) du maïs de 120 jours est soumis comme la pluviométrie et les autres paramètres climatiques à une forte variabilité interannuelle sur la période 1931-1990. Les périodes de déficit pluviométrique interannuel identifiées par les études diagnostiques coïncident avec les périodes d'insatisfaction des besoins en eau de la culture sur le plan agroclimatique.

SYNTHESE

A partir des enquêtes de terrain, des outils de simulation du bilan hydrique de la culture du maïs, l'analyse statistique de l'indice de stress agronomique améliorent la connaissance sur les aptitudes agroclimatiques des milieux maïsicoles du Bénin. La quantification des indices de satisfaction des besoins en eau ETR/ETM (%) a permis de montrer la caractérisation agroclimatique générale du Bénin orientée sur le maïs (confrontation offre/demande climatique).

Les résultats agronomiques sont validés à partir des acquis de la climatologie diagnostique : la diminution des totaux pluviométriques saisonniers, les faux départs des saisons pluviométriques, la forte pluviométrie qui caractérise la petite saison sèche au sud du Bénin depuis 1961 et le raccourcissement de la petite saison des pluies.

La variation de l'ETR/ETM (%) n'est pas la même selon les différentes phénophases durant les périodes 1930-1960 et 1961-1990 et selon les fréquences cinq et huit années sur dix.

L'étude comparative des situations agroclimatiques des périodes 1931-1960 et 1961-1990 montre que les trente dernières années caractérisées par un dérèglement climatique ont comme conséquence la réduction sensible des indices de satisfaction des besoins en eau, plus sensible dans le sud du Bénin au cours de la petite saison des pluies.

La hausse du total pluviométrique de la petite saison sèche dans le sud du Bénin sur la période 1961-1990 a de l'effet sur la variété de 120 jours. Elle favorise surtout un bon développement au stade de formation de grains sur toutes les stations du sud du Bénin. En situation moyenne, le maïs de 120 jours se porte bien tant le sud que tant le nord du pays.

Les quelques faux départs pluviométriques en début de saison sont sans incidences agronomiques car les besoins en eau du maïs sont généralement satisfaits à la période végétative pour les deux variétés de maïs.

Le raccourcissement de la petite saison des pluies durant la période 1961-1990 est préjudiciable au maïs de 90 jours à la phase de mûrissement dans le sud du Bénin.

Pour le maïs de 90 jours, le sud-est du Bénin demeure une région très favorable pour le développement de la culture. Par contre dans le sud-ouest le maïs au cours de cette saison est soumis à un stress agronomique cinq et huit années sur dix.

Au Bénin, dans l'actuel contexte climatique, huit années sur dix, le risque d'avoir de faibles taux de satisfaction des besoins en eau est plus élevé dans le sud-ouest du pays que dans le sud-est. Cette situation s'explique par la récente et forte réduction du potentiel pluviométrique, la décroissance du nombre de jours de pluie durant la saison culturale, la surexploitation et l'épuisement des sols.

CHAPITRE III : LES CONSEQUENCES SOCIO-ENVIRONNEMENTALES LIEES A LA MAÏSCULTURE AU BENIN

A partir d'une enquête de terrain en milieu paysan et d'entretiens avec les responsables de développement rural, sélectionneurs-maïs, ce chapitre expose les vicissitudes climatiques vécues par les communautés rurales du Bénin. Il fait un inventaire des contraintes qu'impose la baisse de l'indice de satisfaction des besoins en eau du maïs. Il montre ensuite les efforts d'adaptation des paysans et présente la stratégie paysanne pour minimiser le risque agroclimatique et surmonter la contrainte climatique.

La péjoration climatique augmente le risque de mauvaise récolte et constitue une contrainte pour les communautés rurales (Yallou, 1994). Elle bouleverse les calendriers agricoles, impose des modes de vie différents et donne une autre vision de la perception du climat dans ce milieu très croyant. La persistance de la crise climatique exige enfin des efforts d'adaptation pour diminuer le risque et surmonter la contrainte climatique. Dans ce contexte, la stratégie paysanne doit être considérée comme une solution à la variabilité car, "si le climat oriente l'homme dans le choix des plantes à cultiver, des variétés à mettre au point et dans les meilleures pratiques de culture, il le détermine aussi corrélativement, dans les techniques de lutte contre ses excès" (Pagney, 1973).

Les adaptations des communautés rurales aux vicissitudes climatiques et les méthodes anti-risque sont d'ordre technique, social et culturel. Face à la variabilité pluviométrique que connaît le Bénin, chaque groupe socioculturel a une adaptation particulière. Boko (1988), Bokonon-Ganta (1987), Pérard et *al.* (1990 et 1992), Houndénou, (1992), Aïfan (1993) ont retracé à partir des enquêtes de terrain et dans une optique écogéographique les grandes lignes des vicissitudes vues et vécues par ces communautés rurales. Les adaptations paysannes liés à la pluviométrie ont été déjà évoqués par Totognon (1994) mais sans un diagnostic climatique préalable. L'auteur a tout simplement montré à partir de l'évolution interannuelle des précipitations de la période 1984-1992. Mieux encore l'organisation saisonnière des

pluies et leur variabilité n'ont pas été étudiées. Il montre aussi sans une analyse statistique que l'installation des précipitations et la durée de la saison des pluies, la quantité et la répartition sont extrêmement aléatoires. Ces contraintes pluviométriques obligent les paysans à adopter des nouvelles stratégies pour diminuer le risque de mauvaise récolte et pour se réadapter à l'actuelle durée de la saison des pluies.

Section 1. : Les stratégies et techniques anti-risques des agriculteurs

Les différentes communautés rurales *ouémènou, aïzo, adja, fon, mahi, popo, houéda, mina, kotafon*, essaient de surmonter la contrainte à travers la maîtrise de certains paramètres physiques du milieu grâce à leur ingéniosité technique quoi que l'outillage soit rudimentaire. Ainsi, on peut définir dans ce milieu autant de paysages agraires qu'il y a de combinaisons spécifiques de traits caractéristiques car le paysage agricole est l'expression d'une civilisation agricole dont les facteurs déterminants ne sont pas seulement d'ordre climatique (Boko, 1988). Face au changement de rythme pluviométrique les paysans ont modifié les dates de semis, et réadapté leurs techniques culturales et calendriers agricoles selon la nouvelle donne climatique (Figure 91)

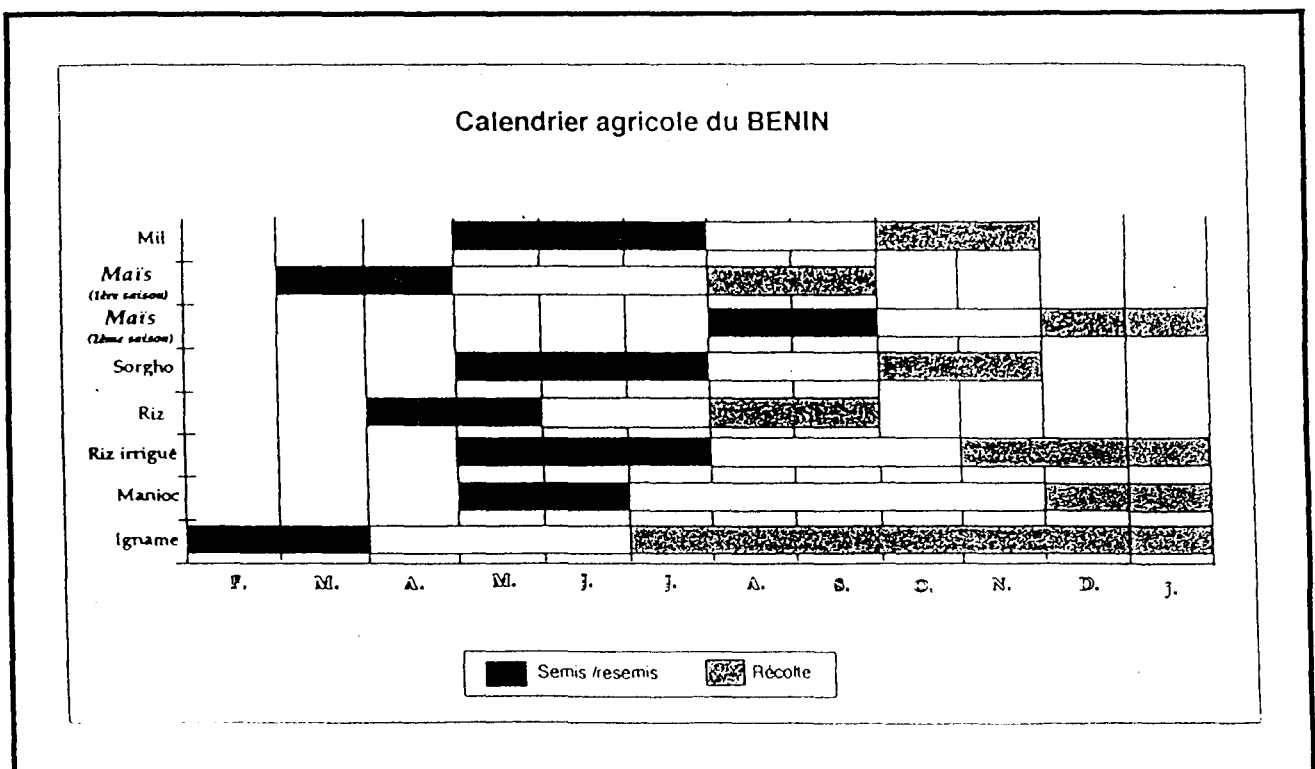


Figure 91 : Calendrier agricole d'adaptation à la variabilité pluviométrique

*Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs*

Dans la plupart des régions, les dates de semis ont été. Pour la grande saison de moisson d'été dans le sud Bénin, les semis de maïs qui se faisaient autrefois (courant 1931-1960 et même jusqu'en 1965) entre les 20 et 25 mars ont lieu actuellement fin avril et surtout début mai dans certaines localités comme à Zagnanado, Didja, Toviklin, Aplahoué, Oumako pour ne citer que celles-là. Au total, le retard des pluies oblige actuellement les agriculteurs à allonger la date de semis. Pour pallier au problème de sécheresse en début de saison agricole et pour s'adapter à la persistance des faux départs de saison de culture, les paysans pratiquent des ressemis dans la plupart des cas dans la première décade du mois de mai.

Pendant la deuxième saison des pluies, les semis ont lieu dans la deuxième quinzaine de septembre et les ressemis se font fin septembre ou début octobre selon les localités (Figure 94). Malgré ce réajustement de la date de semis, le risque pluviométrique est toujours fréquent car la saison a de plus en plus un caractère très aléatoire et l'indice de satisfaction des besoins en eau est toujours inférieur à 80%, seuil au delà duquel on peut espérer toujours avoir de bons rendements agricoles (Dancette, 1983)

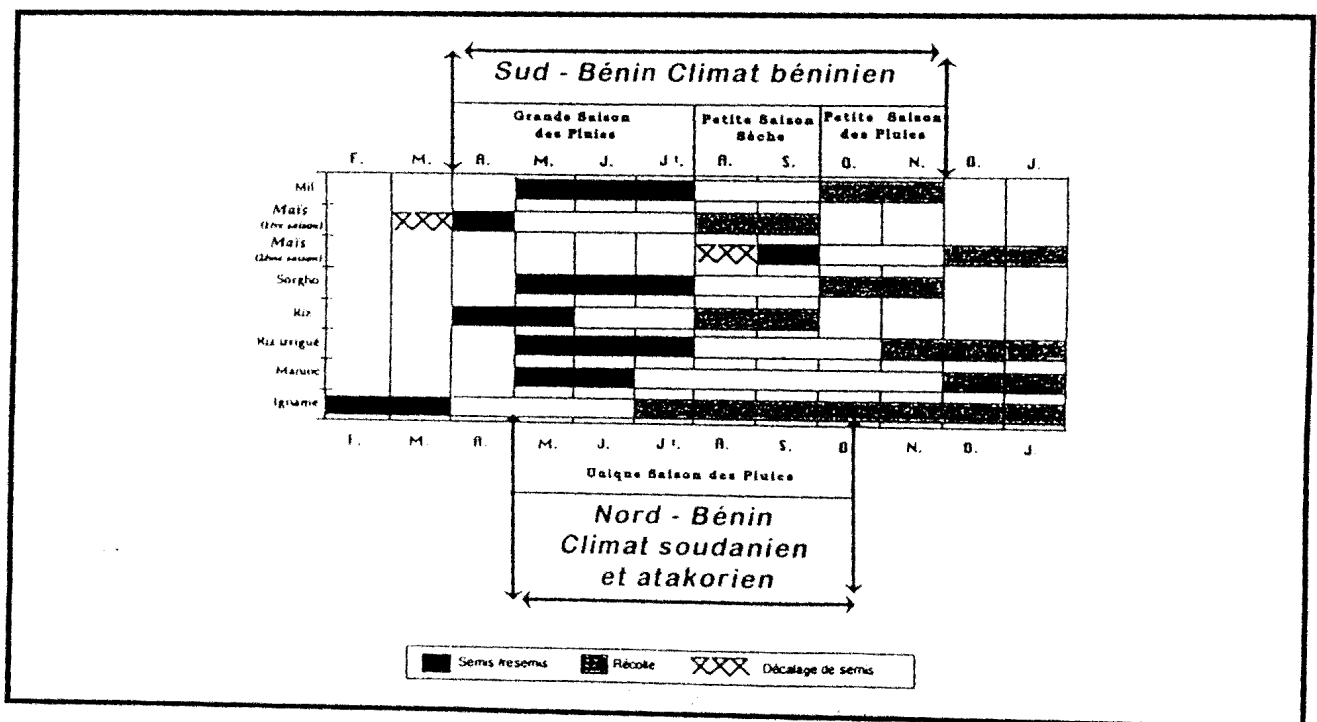


Figure 92 : Calendrier agricole réadapté compte tenu de la variabilité pluviométrique (d'après enquêtes de terrain).

Le problème est plus complexe dans la zone de transition climatique. A Glazoué dans le Bénin central par exemple à la limite des deux types de régimes pluviométriques dans le Bénin central, certains paysans ne font qu'une seule culture de maïs compte tenu de la grande variabilité de la petite saison des pluies. Dans ce secteur agricole, il n'y a qu'une seule récolte de maïs presque une année sur deux et le niébé, plus adapté à la variabilité pluviométrique tend à se substituer au maïs. Cette attitude paysanne peut aussi s'expliquer par le fait que les besoins en eau de la culture du maïs sont moins satisfaits en petite saison et la quantité des pluies demeure insuffisante pour l'alimentation hydrique sur tout le cycle du maïs de 90 jours.

Durant les années exceptionnellement sèches (Figure non montrée), la consommation en eau des pieds de maïs reste faible, le stress hydrique très élevé à toutes les phénophases et par conséquent les pays enregistrerent de très faibles rendements. C'est le cas de 1983-1984 où le déficit global en maïs dans le sud était de 11 000 tonnes (FAO, 1987).

Sur le plan spatial, pour minimiser le risque, les paysans diminuent le volume de superficies à emblaver de peur de perdre les semences déjà achetées cher auprès du CARDER à 9 500 francs CFA le sac de 50 kg suite à la dévaluation monétaire du franc CFA contre 4 000 francs CFA auparavant. Mais la forte persistance des anomalies pluviométriques négatives de la deuxième saison, la réduction de sa durée, pose toujours au paysan le problème d'adaptation variétale malgré le choix du cultivar calé sur le cycle pluviométrique saisonnier.

Section 2. : Le choix variétal et le pouvoir d'achat paysan

Selon nos enquêtes de terrain et les travaux de Totognon (1994), face aux fluctuations pluviométriques qui caractérisent la première saison de culture, les paysans sèment plutôt des variétés de cycle intermédiaire de 100 à 110 jours pour se prémunir des risques et surmonter la contrainte climatique. Pour la deuxième saison culturale, ils préfèrent semer le maïs de 90 jours. Cependant, le risque d'avoir une faible ETR/ETM à la floraison et à la formation du grain dans 50% et 80% des

cas reste toujours élevé dans le sud-ouest du pays. La réduction du nombre de jours de pluie et la diminution de la quantité précipitée ne permet plus une meilleure adaptation du maïs de 90 jours durant la deuxième saison. Ils disposent rarement de cultivars qui leur permettraient d'adapter le choix aux périodes de semis. La dévaluation du franc CFA de 50% intervenue en 1994, le "transfert de compétence" à travers une libéralisation complète des activités agricoles, limitent beaucoup le pouvoir d'achat du paysan et ne lui permettent plus d'acheter les semences et les intrants. Le peu de semences de cultivars qu'ils ont en leur possession ne leur permettent pas de rattraper la saison.

Face à la récession pluviométrique, toutes les communautés rurales expriment leur intérêt pour les variétés extra précoces adaptées à la réduction de la durée de la petite saison des pluies. Celles-ci estiment que ces variétés diminueraient le risque de mauvaise récolte car elles conviendraient aux semis tardifs. Les semis de la grande saison pluvieuse permettraient d'avoir des récoltes précoces pour mieux surmonter la période de soudure. Face à ce besoin et à la réalité climatique, les CARDER départementaux ont testé et vulgarisé des variétés de maïs à cycle court comme la DMR, la Pirsabak. Selon nos enquêtes de terrain, les paysans ont beaucoup apprécié la DMR pour son rendement et sa précocité. Même si la vulgarisation du maïs précoce à cycle court comme la DMR-SRW, la Pirsabarck, la Pool 16, OBAF1, OBA F2 a été pour les CARDER départementaux, la CORAF et la direction de la Recherche Agronomique du Bénin la solution pour minimiser le risque de mauvaise récolte et surmonter la contrainte climatique, on note une insatisfaction des communautés rurales productrices de maïs. Elles reprochent à ces variétés à cycle court la fermeture imparfaite des épis, la dureté des grains, la mauvaise qualité de la pâte et les dégâts qu'ils subissent dans les greniers par le "gros capucin". Ces variétés ne présentent plus une bonne résistance à la sécheresse depuis la persistance de la péjoration climatique. La plupart de ces cultivars sont aujourd'hui dépassés et il faudra penser à d'autres manipulations génétiques et trouver d'autres gènes qui s'adaptent mieux à l'actuel contexte climatique des pays riverains du golfe de Guinée. Pour ces raisons, les paysans cultivent certaines de ces variétés améliorées sur des superficies relativement petites par rapport à celles consacrées aux variétés locales (Totognon, 1994) (Figure 93).

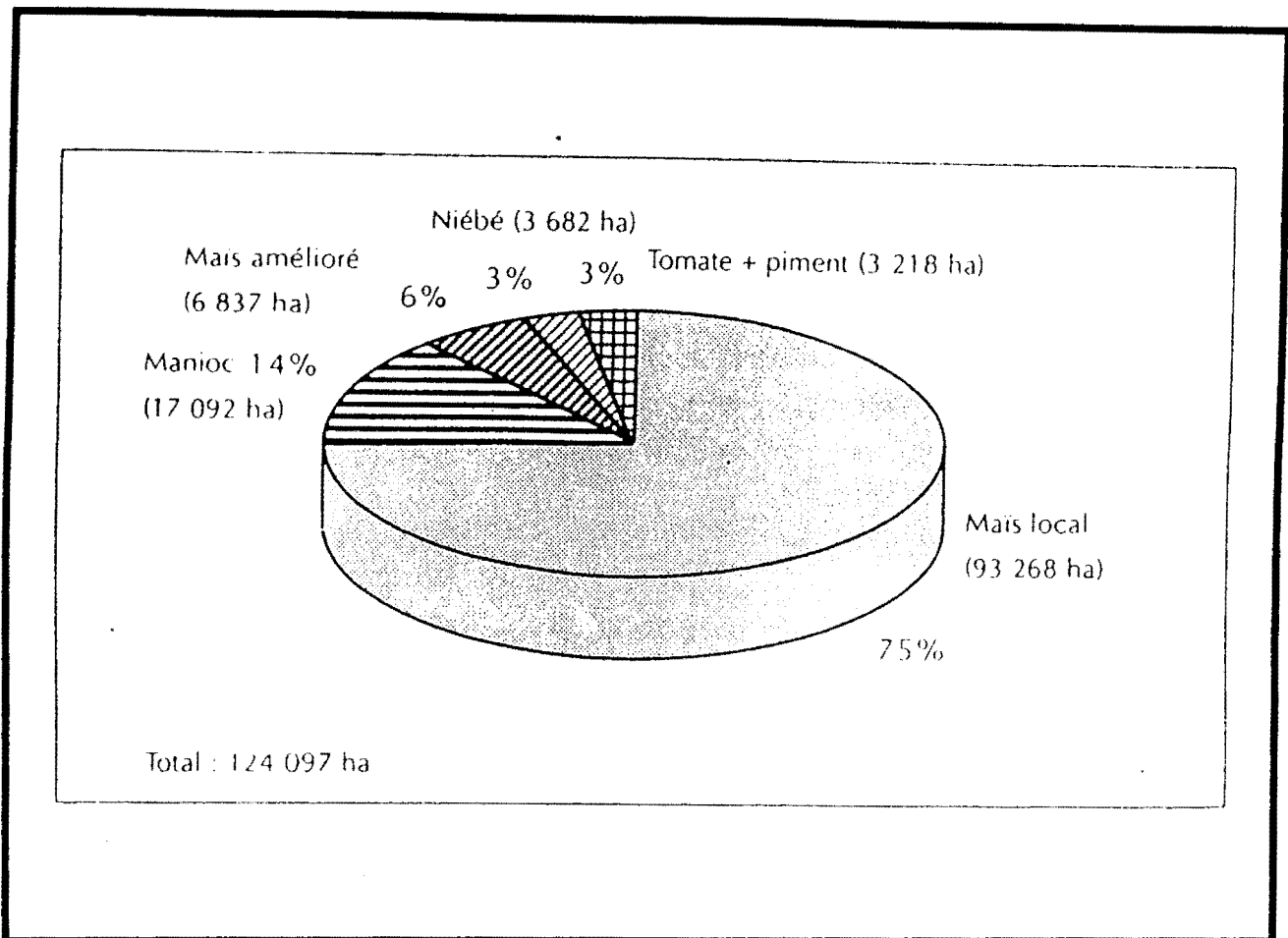


Figure 93 : Pourcentage du maïs local par rapport au maïs amélioré : cas dans le département de l'Atlantique de 1984 à 1992 (d'après, Totognon, 1994).

La figure ci-dessus montre qu'une part importante de superficies emblavées est réservée au maïs local (75% de la superficie totale). 6% sont seulement réservées au maïs amélioré soit environ 6837 ha. Pour surmonter ces vicissitudes climatiques, il faut mettre à la disposition des communautés paysannes des cultivars extra précoces tels que la TZEE (Extra Early), maïs de 75 jours dont nous avons déjà à cet effet calculé les coefficients cultureux pour des études de faisabilité. L'adoption de cette nouvelle variété pourrait sans doute leur permettre de rentabiliser leurs investissements et de rembourser les prêts auprès des Caisses Locales de Crédit Agricole Mutuel (CLCAM). Cette solution constituerait un moyen pour diminuer le risque de mauvaise récolte car les variétés extra précoces s'adapteraient mieux aux semis tardifs et aux semis précoces et à la variabilité pluviométrique du début de la saison culturale. En outre, elle permettrait en première saison d'avoir des récoltes précoces pour mieux surmonter la période de soudure. Mais la politique de vulgarisation de ces paquets technologiques et d'innovations doit être bien assurée

afin qu'elle ne rencontre pas la réticence des paysans comme ce fut le cas de la TZB dans le département de l'Atakora. Outre le décalage des dates des semis et la nécessité du cultivar extra-précoce, les paysans ont modifié les systèmes de culture pour s'adapter à la variabilité climatique.

Section 3. : La modification du système de culture

De nos jours, le système de culture itinérante a reculé. La jachère est redevenue inexistante. Or, le maïs est généralement en tête de rotation après le défrichement de la jachère naturelle. L'actuel système de culture consiste à cultiver le maïs pour assurer sa propre succession. Ainsi, le maïs succède à lui même jusqu'à ce que son rendement soit jugé faible par le paysan (Adégbola, 1994). Pour surmonter cette contrainte dans le zou nord par exemple à Worogui en pays Idatcha, et dans le secteur de Savè en milieu tchabè, le paysan sème le niébé, l'arachide, la patate douce ou fait de l'association maïs-manioc. Il laisse le sol en jachère quand il dispose encore de beaucoup de terres cultivables. Afin de réduire le déficit au cours de la saison culturale, les paysans font le binage et la billonnage qui ont les caractéristiques d'accélérer l'infiltration et de réduire les pertes en eau par ruissellement et par évaporation (Agbangla, 1988). Le binage se fait avant la première pluie de la saison de mousson d'été boréal. La technique de semis à sec est pratiquée dès que la saison des pluies accuse un retard ce qui permet aux cultures de bénéficier de la quasi-totalité de la saison écourtée. Les paysans du Bénin méridional font aussi usage d'une autre technique pour améliorer les rendements de la culture du maïs : il s'agit de la jachère de manioc semé à haute densité. Cette technique consiste à associer au maïs en grande saison des pluies du manioc semé à la densité d'environ 17 000 plants à l'hectare. Sur les petites exploitations à Ouèdèmè par exemple, à la fin de la saison des pluies le maïs est récolté et le manioc reste seul sur la parcelle en petite saison pluvieuse. Au début de la prochaine grande saison des pluies, le manioc est récolté et le sol est préparé pour la culture de maïs. Sur cette parcelle, le maïs peut être cultivé pendant une à trois saisons (Floquet *et al.*, 1985).

Les paysans pratiquent aussi la polyculture afin de profiter de l'humidité du sol. Pour eux, en cas de rupture de la saison des pluies, les plantes à exigence hydrique les plus faibles donneront au moins un rendement acceptable. Ainsi, le manioc précoce est devenu la culture préférée pour les paysans du Bénin méridional. Pour gérer la période de soudure, les paysans cultivent le haricot. Malgré les efforts d'adaptation paysanne au dérèglement, du rythme pluviométrique, d'autres contraintes limitent aussi les production et les rendements.

Section 4. : La maïsiculture et les contraintes pédo-démographiques au Bénin

Un des problèmes importants auquel se trouve confrontée la culture du maïs est la fragilité des sols qui est due à leur surexploitation et à la pression foncière. Si la jachère est considérée comme une solution à la baisse de fertilité des sols, la pression démographique en limite sa pratique. Ainsi, les communautés rurales du Bénin toutes ethnies confondues à l'exception des peulhs sédentaires font un usage intensif du sol et l'agriculture est poussée jusqu'à ses dernières limites. L'absence de la jachère et la réduction de sa durée ont entraîné l'épuisement des sols en matière organique et l'envahissement des champs cultivés par des adventices agressives pour le maïs dont le striga. Toutes ces conséquences limitent l'espoir de bons rendements car les sols en milieu béninois sont très sollicités et sont sans une bonne rotation.

Même si le problème est commun à tout l'espace béninois, les causes sont différentes selon les régions climatiques. Vers les années 1970, les contraintes climatiques identifiées plus haut ont entraîné de profondes mutations socio-économiques dans le Borgou, première zone cotonnière du pays (Pérard et al., 1993). Cette même zone (Haut Borgou) est devenue productrice de maïs depuis quelques années suite à une intense politique de vulgarisation agricole. La réduction du volume actuel de l'eau pluviale associée à l'usage de la culture attelée ont fragilisé le milieu écologique et diminué les aptitudes culturales des sols. L'extension de la culture du coton, exigeant des espaces agricoles, des sols travaillés en profondeur, de l'engrais et l'utilisation de la culture attelée ont accéléré le déboisement, l'érosion des sols et des pentes, ont modifié le bilan de l'eau et aggravé l'assèchement des milieux (Pérard et al., 1993).

*Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs*

Dans les milieux où l'agriculture est pratiquée sur des pentes dont l'angle d'inclinaison est compris entre 3 et 4%, les pertes annuelles en sols avoisinent 20 tonnes /ha et équivalent à une couche de 3 mm selon la Banque Mondiale (1992). Sur les pentes raides et plus longues, l'érosion peut emporter l'entière couche arable (20 à 30 cm) en l'espace d'une année (Photo 4).



Photo 4 : Fragilité écologique en zone cotonnière au Bénin. (Cette photo a été prise à Kalalé dans le Borgou au cours de la saison des pluies).

Même si la culture attelée permet d'accroître les superficies cultivées, elle accélère dans ces milieux l'érosion par le processus de lessivage intensif et de désagrégation chimique des matériaux sur les pentes.

La dégradation des sols est très importante dans le Bas-Bénin. Cette situation est liée à l'explosion démographique (Tableau 28) que connaît cette partie du pays suite à la récente histoire économique qui a entraîné la surexploitation des sols, la macrocéphalie urbaine et l'extension des villes.

Régions administratives	1979		1992		Accroissement annuel (1979-1992) (%)
	Population (hts)	Pourcentage (%) par rapport à la population totale du Bénin	Population (hts)	Pourcentage (%) par rapport à la population totale du Bénin	
Atakora	479 604	14,4	648 330	13,4	2,3
Atlantique	686 258	20,6	1.060 310	21,8	3,4
Borgou	490 669	14,7	816 278	16,8	4,0
Mono	477 378	14,3	646 954	13,3	2,4
Ouémé	626 868	18,8	869 492	17,9	2,5
Zou	570 433	17,1	813 985	16,8	2,8
Total	3 331 210	100	4 885 349	100	2,9

Tableau 28 : Taux de croissance démographique régionaux (1979-1992) ; (d'après, INSEA, 1992).

On note une augmentation de la population urbaine surtout dans l'Atlantique et dans l'Ouémé et un fort taux d'accroissement annuel dans le Borgou, l'Atlantique, et dans le Zou (Tableau 28). Cette pression démographique sur les ressources naturelles dont les sols cultivables joue un rôle très important au niveau de l'érosion et de la perte de fertilité des sols. La densité de population est de 12 à 15 habitants au km² dans le nord alors qu'elle est de 150 habitants au km² dans le sud.

La faible occupation du sol en milieux soudanien et atakorien donne l'impression que le nord du Bénin possède de grands espaces vides avec une grande vocation agricole. Cette même idée a été reprise dans le Plan d'Action Environnemental du Borgou en 1992 «*Le Borgou est la région qui a la plus grande superficie de terres non occupées, ce qui peut lui faire jouer un rôle crucial dans les futures stratégies de développement agricole*». Cependant, il y a surexploitation des terres car la densité rurale est élevée. Quand bien même il existât de vastes terres dans le nord du Bénin avec de faibles densités de population, il est important de rappeler qu'elles sont actuellement exploitées pour le pâturage, le ramassage du bois de chauffe. Certaines terres sont réservées aux aires protégées (les zones cynégétiques, les espaces de reboisement et aux forêts classées, comme celle de Pénessoulou) dont nous avons parlé dans première partie de ce travail.

**Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs**

Selon la Banque Mondiale (1994), les ressources en terres du Bénin ne sont pas suffisantes pour couvrir les besoins agricoles de la population de façon durable. Le rapport montre qu'avec le rythme d'occupation des sols et la contrainte foncière les communautés rurales du département de l'Atlantique et les ouéménou du sud-est du pays avaient déjà exploité les terres au-delà de leur capacité de régénération depuis 1990. Cette partie du Bénin regroupe 65% de la population paysanne sur 15% du territoire national.

Les études prospectives de la Banque Mondiale prévoient même la détérioration complète de ces terres avant l'an 2005 si les tendances actuelles de la démographie et de l'exploitation des terres évoluent au rythme actuel (Tableau 29).

Départements	Superficies cultivables	Superficies cultivées en 1990	Densité dans les zones cultivées (hts/km ²)	Superficies Cultivables de façon durable (%)	Superficies Cultivables en 2005
Atakora	13.410	13	241	40	23
Borgou	27.500	13	182	40	29
Zou	12.300	27	280	47	49
Atlantique	2.350	52	579	57	80
Mono	2.810	48	636	57	88
Ouémé	3.480	60	494	57	96
Total	61.850	21	321	50	61

Tableau 29 : Densité de population et pression démographique sur les terres du Bénin (d'après, Banque Mondiale, 1994).

«Pour calculer la superficie totale cultivable de façon durable étant donné la technologie actuelle et les niveaux de production, il faudrait ajouter au pourcentage de superficie cultivée les zones de jachères nécessaires pour maintenir la fertilité des sols. Les agronomes les estiment à 150% de la superficie cultivée dans le nord, 112% dans le Zou, et 75% dans le sud».

Seules les communautés rurales du Borgou et de l'Atakora pourraient exploiter leurs terres de façon durable. Dans certaines zones du pays, la demande en bois de feu, l'importance des pâturages ont entraîné aussi la dégradation des

terres disponibles. Dans le zou nord par exemple, la situation est plus complexe. La contrainte foncière est très forte. Elle varie de 0,25 à 0,50 ha de terres cultivables par personne en moyenne. Ce manque de terres cultivables s'explique d'une part par l'arrivée des migrants agricoles en provenance du sud Bénin suite à la détérioration des sols et des immigrés de la région sinistrée de Boukoubé dans l'Atakora. A Dassa-Zoumè, Glazoué et Savalou, on dénombre en moyenne 1 ha de terres cultivables par habitant. Ainsi, la baisse de fertilité des sols liée à pression foncière est un problème national et inquiète l'Etat.

Les principales actions entreprises par l'Etat, ont été réalisées par les structures du Ministère du Développement de concert avec les coopération allemande. Dans le cadre de l'amélioration de la fertilité des sols, le CARDER a initié la technique de la jachère améliorée avec le pois d'Angole (*Cajanus cajan*). Mais cette technique n'a pas été acceptée par les paysans pour des raisons agronomique et socio-économique. Cette légumineuse pousse mal sur les sols pauvres où le rendement du maïs est inférieur à 500 kg à l'hectare et l'effet précédent de sa jachère ne dure qu'une seule saison. Mieux encore les populations rurales ne sont pas habituées à consommer les graines de *Cajanus cajan*. Face à la baisse continue de la fertilité des sols, la cellule Recherche appliquée en milieu réel (RAMR) de la direction de la Recherche Agronomique a introduit des technologies basées sur une faible utilisation des engrais : ce sont les cultures en couloir de *Leucaena leucicephala*, de *Gliricidia* sp. et des jachères de *Mucuna utilis* et d'*Acacia auriculiformis*. Ces techniques de culture en couloirs permettent de retenir l'eau pluviale et la matière organique sur les pentes et limite le lessivage. La jachère de *Mucuna utilis* est préconisée pour les sols dégradés. Malgré ces efforts, l'appauvrissement des terres et le boum démographique, obligent les paysans à changer de stratégie pour une politique de survie comme la culture du *Mucuna* (Photo 5).



Photo 5 : Jachère de *Mucuna utilis* (photo a été prise à Détohou dans le Zou)

La pression démographique et l'appauvrissement des terres dans le sud du pays et sa partie centrale engendrent des mouvements migratoires (rural-rural) des paysans fon, tchabè, itcha, vers la région cotonnière du Borgou à Banikoara, Padé, Kandi, Gogounou.

La pauvreté des sols de la région de l'Atakora et spécialement de Boukoubé et Manta est à l'origine des migrations des ethnies, otamari, kotokoli, vers Gaounga, Ina, Banikoara dans les vallées des cours d'eau où ils exploitent les bas-fonds pour la riziculture. Le groupe Yowa constitué de Piobè, de Lokpa, et de Yowa migrent vers le sud à Bassila, et dans la région de Wari-Marou. Ainsi, on assiste à une colonisation agricole et à un développement d'une agriculture intensive.

Section 5. : La reconversion professionnelle des paysans et la violation du sacré : est-ce une solution à la péjoration climatique et au risque agroclimatique?

Outre, le rural-rural, la péjoration climatique a engendré la reconversion professionnelle de jeunes paysans. La plupart émigrent dans les grands centres urbains comme Cotonou, Abomey, Bohicon, Porto-Novo, Parakou pour s'adonner aux activités de transport en commun comme le "Zémidjan" communément appelé taxi-moto. Le désenchantement de certains d'entre eux les pousse à la délinquance dans les banlieues des villes où ils s'adonnent à des activités illégales. On assiste de plus en plus à la recrudescence des actes antisociaux et immoraux. Dans d'autres cas, l'exode est international vers le Nigéria, le Ghana, la Côte d'Ivoire, et le Gabon.

Par ailleurs, Il a été constaté dans le Bas-Bénin qu'après une crise pluviométrique on note la persistance des vols et la violation des tabous et interdits sociaux ethno-claniques. Les paysans ne respectent plus les jours de repos obligatoires de la semaine réservés aux divinités. Les lacs sacrés ont été violés par les pêcheurs, des arbres sacrés ont été abattus pour le bois afin de trouver un gain substantiel lorsque les récoltes ont été mauvaises. On peut alors affirmer avec Boko (1988), que la crise pluviométrique nourrit la crise sociale et que climat et société forment un système dont l'autorégulation dépend de l'homme. Si la contrainte climatique engendre un déplacement des communautés rurales et une modification des aires de culture, dans les régions d'accueil, les immigrants agricoles restent confrontés au problème d'acquisition des terres. Ils sont soumis à des pressions et interdits de pratiquer certaines cultures comme l'anarcadium car cette culture est très recherchée sur le marché international. Même si les immigrants s'installent partout sans frais, obligation leur est faite de ne pas planter des arbres fruitiers et des cultures pérennes. Dès lors se pose un problème de droit coutumier.

Section 6. : Le paquet technologique maïsicole et la réticence des paysans

Une étude des performances des techniques d'allongement de la durée sous culture des sols "manioc dense" et billons réalisée par le programme d'Etude des Systèmes de Culture Traditionnels (ESYCTRA) a montré que les techniques endogènes sont globalement supérieures à la technique de pois d'Angole. Ceci explique l'attachement des paysans à ces pratiques au détriment des alternatives proposées par la vulgarisation agricole (Hinvi *et al.* 1990). Par ailleurs, les paysans ne pratiquent pas les rotations culturales conseillées par les agents de développement rural car ils ont du recul par rapport aux innovations et aux techniques proposées. L'épandage de l'engrais chimique n'est pas automatique dans les techniques agraires propres au sud du Bénin. Le prix d'achat des intrants étant devenu trop élevé, leur rentabilité sur les sols très pauvres n'est pas évidente sur des sols dépourvus de matière organique. La spécialisation des exploitations en maïs pour "assurer" l'autosuffisance ne permet pas non plus de pratiquer la bonne rotation culturale pour stabiliser le rendement du maïs. Il n'y a donc pas de compromis équilibré entre la satisfaction des actuels besoins pressants et la nécessité d'adopter des pratiques culturales qui assurent de manière durable des bons rendements en maïs (Totognon, 1994).

Conclusion troisième partie

A partir de plusieurs techniques d'analyse, dont la simulation des termes du bilan hydrique de la culture du maïs, cette troisième partie met en évidence les effets du dérèglement climatique observé sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 sur la satisfaction des besoins en eau du maïs à chaque stade végétatif. Elle présente aussi les conséquences éco-géographiques de la variabilité climatique sur la culture du maïs.

Elle montre que le dérèglement du rythme pluviométrique est plus manifeste sur la période 1961-1990 que sur la période 1931-1960. Ce dérèglement climatique ajouté à d'autres contraintes écologiques induisent une diminution des indices de

satisfaction des besoins du maïs de 90 jours au cours de la deuxième saison des pluies dans la partie méridionale du Bénin.

- Les taux des indices de satisfaction des besoins en eau du maïs sont généralement faibles au cours de la deuxième saison de culture dans le sud du Bénin sur la période 1961-1990 et les risques agroclimatiques de perte de récolte sont élevés.
- Quelle que soit la station, les taux d'indice de satisfaction des besoins en eau sont inférieurs à 80% à tous les stades végétatifs durant le deuxième saison agricole. Ils sont importants et limitants à la phase de formation du grain et au stade de maturité. En revanche, ils le sont moins au moment des ébauches florales.
- L'évolution interannuelle des taux d'indice de satisfaction des besoins en eau de la culture du maïs montre qu'aux années extrêmes de déficit ou d'excédent pluviométrique correspondent des années d'important stress agronomique.
- Le rapport ETR/ETM (%) reste satisfaisant à chaque phénophase pour le maïs de 120 jours au cours de la grande saison des pluies.
- La cartographie de l'indice de stress ETR/ETM (%) pour le maïs à cycle court (DMR-SRW), montre que le sud-ouest du Bénin est la région où le maïs est soumis à des stress importants dans 50 et 80% des cas. Cette partie du Bénin demeure la région climatique où le risque de sécheresse régional est le plus élevé au cours de la deuxième saison culturale. Cette zone à faibles potentialités mises en évidence par l'hypothèse de faible RU correspond à celle où la culture pluviale du maïs donne de faibles rendements.
- Le sud-est, et principalement la vallée de l'Ouémé et les plateaux de Porto-Novo-Sakété-Pobè, demeure un milieu de fortes potentialités agroclimatiques où le maïs de 90 jours se développe mieux, tous cycles confondus.
- Le Borgou en milieu soudanien et la région de Djougou en milieu atakorien constituent les zones à fortes potentialités maïsicoles. Le risque d'avoir des indices

de satisfaction des besoins en eau dommageables pour la culture huit années sur dix est faible. Ces milieux peuvent constituer des zones de prédilection du maïs de 120 jours en raison de l'arrière-effet de la fumure de la culture du coton, de la culture attelée de la rotation et des assolements (Photo 5). Le maïs est cultivé en association avec le coton (Photo 7). Le maïs tend à remplacer le sorgho plus traditionnel aux rendements moins élevés.



Photo 6 : la culture attelée dans un champ de maïs de 120 jours dans le Borgou. Cette photo a été prise à Padé en 1996



Photo 7 : Culture du maïs en association avec le coton. Cette photo a été prise dans le Zou à Glazoué en 1996

- L'étude comparative des situations agroclimatiques des périodes 1931-1960 et 1961-1990 montre que les trente dernières années caractérisées par un dérèglement climatique ont comme conséquence la réduction sensible des indices de satisfaction des besoins en eau, principalement dans le sud du Bénin au cours de la petite saison des pluies.
- La hausse du total pluviométrique de la petite saison sèche dans le sud du Bénin sur la période 1961-1990 a de l'effet sur la variété de 120 jours. Elle favorise surtout un bon développement au stade de formation de grains sur toutes les stations du sud du Bénin. Le maïs de 120 jours se porte bien tant le sud que tant le nord du pays.
- Par rapport à la baisse de la pluviométrie de la grande saison des pluies sur tout le pays, on ne note pas d'important déficit agronomique.

*Troisième partie : Conséquences des la variabilité des facteurs du risque climatique
sur la culture du maïs*

- Les faux départs pluviométriques en début de saison sont sans incidences agronomiques car les besoins en eau du maïs sont généralement satisfaits à la période végétative.
- Le raccourcissement de la petite saison des pluies durant la période 1961-1990 est défavorable de 90 jours au maïs à la phase de mûrissement dans le sud du Bénin.

Malgré les multiples techniques d'adaptation des agriculteurs et de la paysannerie à la péjoration climatique (re-semis, modification du système cultural, compostage etc...), le risque de stress agronomique existe dans certaines régions agricoles du Bénin.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la promotion du développement agricole du Bénin en milieu tropical humide en Afrique de l'ouest. Avec une approche méthodologique pluridisciplinaire qui lui confère son caractère systémique, elle identifie l'influence de la variabilité climatique sur les besoins en eau à chaque stade végétatif de deux variétés de maïs et caractérise le risque de stress agronomique en agriculture pluviale au Bénin. Cette conclusion générale constitue aussi une réponse aux questions posées en introduction de cette thèse.

DE L'ASPECT NOVATEUR DE L'ETUDE

Le travail est essentiellement basé sur l'analyse des données, et la technique de la modélisation des termes du bilan hydrique de la culture du maïs. Le dépouillement des enquêtes sociologiques, les mesures de terrain sur les parcelles agronomiques et en milieu paysan complètent l'approche technique. Ce travail est d'abord géographique mais novateur car il allie techniques informatiques modernes et études du terrain.

Les résultats obtenus permettent de confirmer ou d'infirmer les hypothèses de recherche formulées au début de la thèse. **Les principaux résultats concernent l'établissement du diagnostic climatique du Bénin et la quantification des risques agroclimatiques induits par le dérèglement du climat.**

DU DIAGNOSTIC CLIMATIQUE

La thèse présente le diagnostic climatique du Bénin sur la période 1931-1990. A partir d'une étude comparative des normales 1931-1960 et 1961-1990, elle met en évidence une variabilité climatique intrasaisonnière et interannuelle et caractérise le risque de stress agroclimatique.

L'étude climatique précise que le Bénin est caractérisé par le climat béninien et le climat soudanien avec une variante dans le nord-ouest du pays à cause de la chaîne de l'Atakora qui modifie le schéma zonal de la pluviométrie. On distingue deux types de régimes pluviométriques. Ce sont le régime pluviométrique bimodal au sud entre 5 et 7° de latitude nord, et le régime pluviométrique unimodal, entre 7° et 12° de latitude nord.

Le diagnostic climatique du Bénin sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 montre que les pluies s'organisent selon un gradient nord-sud et un gradient vertical. L'ampleur de la variabilité pluviométrique diffère selon les climats et les saisons. Cette variabilité est caractérisée par d'importants changements dans les structures saisonnières.

● Sous le climat béninien du Bénin méridional, la normale 1931-1960 a été plus humide avec une petite saison sèche (août-septembre) qui présente d'importants déficits pluviométriques, alors que la période 1961-1990 a été plus sèche, avec une petite saison sèche anormalement pluvieuse. **La récession d'août, ou petite saison sèche, connaît une augmentation de sa pluviométrie durant la période 1961-1990 dans le Bas-Bénin.** "L'arrêt momentané" des pluies au sein de la saison de mousson tend à disparaître. **Le rythme subéquatorial tropical est supplanté par un rythme soudanien dans la mesure où on ne note plus manifestement de transition pluviométrique.** Cette situation constitue une contrainte majeure pour les paysans qui, depuis un moment sont en situation de risque pluviométrique. Les importants excédents de la récession d'août dans le sud du Bénin sont associés au ralentissement du Jet Tropical d'Est sur le Sahel et à un réchauffement anormal des températures de surface océanique du bassin atlantique dans le golfe de Guinée.

● **La petite saison des pluies** sur les plateaux de terre de barre est marquée par une très grande variabilité avec une diminution significative du total pluviométrique et une réduction de sa durée. La variabilité est également marquée par un décalage du maximum pluviométrique qui est passé de septembre, sur la période 1931-1960, à octobre durant la normale 1961-1990. Les excédents pluviométriques qui

caractérisent cette saison sont associés à un réchauffement anormal des marges septentrionales de l'océan Atlantique tropical.

● **Les anomalies pluviométriques positives de la grande saison des pluies ou saison de mousson**, sont associées à un renforcement de la composante zonale du vent et du Jet Tropical d'Est dans les hautes couches de l'atmosphère. En revanche, les excédents pluviométriques enregistrés au cours de cette saison sont associées aux anomalies négatives des TSO du bassin de l'océan Atlantique autour du Nordeste brésilien.

● Le risque de faux départs des saisons pluviométriques est plus élevé sur la période 1961-1990 que sur la période 1931-1960. L'étude des régimes pluviométriques moyens montre que le climat béninien a beaucoup plus varié que le climat soudanien.

● Sous le climat soudanien, la variabilité se manifeste par un démarrage tardif de la saison des pluies et une fin précoce dans la plupart des stations, et par un phénomène de persistance des anomalies pluviométriques. En milieu soudanien, le mois d'août mois qui correspond au coeur de la saison des pluies est marqué par une diminution significative de son total pluviométrique sur la période 1961-1990.

● A l'échelle intermensuelle, la variabilité pluviométrique au Bénin est dominée par celle des mois de juillet, août et septembre, et qui se caractérise par une forte persistance et par une périodicité de 2 ou 3 ans qui correspond au signal de l'Oscillation Quasi Biennale (OQB).

En somme, la variabilité climatique au Bénin est surtout marquée par celles de la petite saison sèche et de la petite saison des pluies dans le sud du pays. Partout ailleurs, elle se manifeste par la réduction de la durée des saisons agricoles et un réchauffement. De tous les climats du Bénin, le climat béninien demeure celui qui a le plus varié, surtout sur la période 1961-1990. Le rythme pluviométrique moyen est modifié. Le régime pluviométrique anciennement bimodal tend à être unimodal sur la dernière période étudiée. Cependant, il faudra attendre encore des années pour confirmer cette remarque. A l'échelle de cette étude, on ne peut donc parler de changement climatique proprement dit mais on peut évoquer une importante variation du climat car l'identification du changement climatique nécessiterait des observations séculaires de grande échelle. Il existe alors au Bénin un dérèglement climatique. Cette variabilité du climat est associée aux fluctuations de températures de surface de l'océan Atlantique, et aux vents atmosphériques. Toutefois, pour la plupart des paysans du Bénin, berceau du *Vodoun*, les causes de ce dérèglement climatique sont dues à la violation du sacré et au mécontentement de certaines divinités.

DE LA CARACTERISATION DU RISQUE DE STRESS HYDRIQUE

Le diagnostic agroclimatique montre que cette variabilité climatique a des conséquences sur la vie agricole du pays et notamment sur la satisfaction des besoins en eau du maïs. De façon absolue, il identifie un risque agroclimatique qui constitue une contrainte déterminante pour les agriculteurs du sud-ouest du Bénin.

L'étude comparative de la satisfaction des besoins en eau sur la période 1931-1960 et 1961-1990 montre que globalement les indices de satisfaction des besoins en eau ont sensiblement diminué sur la période 1961-1990 par rapport à 1931-1960. La période 1961-1990 est caractérisée sur le plan agronomique par de faibles indices de satisfaction des besoins en eau du maïs dans le sud-ouest du pays.

1. Le stress agronomique à chaque phénophase du maïs à cycle court de 90 jours

A la période végétative, durant la petite saison des pluies dans le sud du Bénin, les risques climatiques et de perte de semences existent huit années sur dix. Le stress agronomique est préjudiciable à la culture du maïs de 90 jours. L'indice de satisfaction des besoins en eau du maïs de 90 jours, est toujours inférieur à 50% sur le littoral du Bénin à la période végétative ainsi qu'à **la floraison**.

A la phase de formation des grains et à la maturité, les différentes valeurs d'ETR/ETRM (%) observées sont limitantes pour le développement de la culture du maïs de 90 jours.

2. Le stress agronomique à chaque phénophase du maïs à cycle long de 120 jours

Les indices de satisfaction des besoins en eau du maïs de 120 jours sont satisfaisants à toutes les phénophases et dans les proportions de huit années sur dix. Mieux encore dans le nord-est, la culture du maïs bénéficie de l'arrière effet de la fumure et les sols sont de bonne qualité en milieu soudanien. La caractérisation du risque agroclimatique montre que le maïs de 120 jours peut être encore développé dans le nord et le sud-est durant la grande saison des pluies.

Le dérèglement climatique a eu plus d'effet sur les besoins en eau du maïs de 90 jours que sur ceux du maïs de 120 jours. Le cycle pluviométrique de la petite saison pluvieuse au sud du Bénin ne correspond plus au cycle végétatif du maïs précoce de 90 jours.

En termes de choix variétaux, un maïs extra précoce de 75 jours devrait être cultivé afin que le cycle pluviométrique saisonnier soit plus ou moins conforme à la durée du cycle végétatif de la culture.

3. De la réduction de la durée de la saison des pluies au sud du Bénin et le stress hydrique

L'augmentation du potentiel pluviométrique de la petite saison sèche sur la période 1961-1990 constitue un atout positif pour le maïs de 120 jours. L'eau précipitée au cours de cette saison constitue un confort pour la culture. La réduction de la durée de la petite saison des pluies dans le sud augmente le risque de stress hydrique du maïs de 90 jours surtout dans le sud-ouest du pays.

L'approche géographique de l'étude des taux d'indices de satisfaction des besoins en eau du maïs de 90 jours montre que l'évolution interannuelle des pluies de la période 1931-1960 est différente de celle de l'indice de stress hydrique.

Seul, le sud-est demeure encore une région propice à la maïsiculture car les indices de satisfaction des besoins en eau des variétés à cycle court et à cycle long sont élevés, principalement dans la vallée de l'Ouémé malgré la forte densité de population.

DES STRATEGIES PAYSANNES

Pour minimiser le risque, les agriculteurs adoptent des stratégies variées. Les dates de semis ont été réajustées dans la mesure où le démarrage des pluies de la petite saison pluvieuse est devenu très tardif. Les techniques de culture ont été modifiées, et les sols peu fertiles subissent par endroits la jachère de Mucuna, initiée par la Direction de la Recherche Agronomique. Malgré les efforts de cette institution et ceux de la paysannerie, la maïsiculture reste confrontée à des problèmes écogéographiques très importants, comme la pression démographique, la baisse de la fertilité des sols et le fort taux d'humidité. La dégradation continue des terres entraîne des mouvements migratoires interrégionaux et internationaux.

DES CONTRAINTES LIEES A LA MAÏSICULTURE

Les contraintes d'ordre économique et organisationnel relèvent de la responsabilité des différents gouvernements qui se sont succédés à la tête du pays.

On note une absence quasi totale d'une véritable filière maïs, car l'Etat a surtout privilégié les cultures telles que le palmier à huile, le coton destinées à l'exportation.

Les contraintes d'ordre politique s'expliquent récemment par le passage d'une économie de type socialiste à une économie libérale. Cette mutation met le paysan béninois dans une situation inconfortable. L'Etat ne met plus à la disposition des CARDER (Centre d'Action Régionale pour le Développement Rural) les engrais pour la fumure des variétés de maïs améliorées. Elle est laissée à l'initiative privée qui a augmenté anarchiquement les prix des pesticides et intrants. Le prix d'achat de 50 kg d'engrais fixé à 4 500 francs CFA et livré par le CARDER, est passé à 9 000 francs CFA suite à la dévaluation monétaire de 50%. Les paysans les plus démunis qui ne sont regroupés dans aucune structure n'ont plus la possibilité de s'approvisionner en engrais et fertilisants.

Les contraintes d'ordre culturel se limitent aux caractères organoleptiques de certaines variétés de maïs et à la mouture des grains. Les innovations introduites par la direction de la Recherche Agronomique sont confrontées à des difficultés d'adoption par les agriculteurs.

● Au total, même si l'analyse des séries moyennes pluviométriques mensuelles montre qu'en principe le Bénin se prête à la maïsiculture, la variabilité spatio-temporelle de celles-ci combinée à la dégradation des sols, mettent la culture du maïs devant une multitude de contraintes éco-socio- environnementales, et les paysans ont un sentiment fataliste à l'égard de la péjoration climatique.

DES PERSPECTIVES

Le débat que suscite ce sujet de thèse est riche et les pistes de recherche éco-géographiques ouvertes sont nombreuses. Vu la complexité des problèmes liés à la maïsiculture sur les plans écophysiological, politique, sociologique et économique tous les aspects ne peuvent être abordés dans ce travail. Les autres dimensions de la question seront abordées dans nos futurs travaux.

Le manque de données saisonnières de rendements des variétés de 120 et 90 jours a limité nos investigations. Ainsi, nos priorités de recherche concerneront :

1- les relations entre l'indice de satisfaction des besoins en eau et le rendement espéré.

2- l'établissement d'un zonage agroclimatique des potentialités maïsicoles et autres cultures pluviales.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ACHEBE (C. S.) MAHOUGBE (O.), 1978 : La flèche de Dieu. Edition Présence Africaine. Paris, 299 pages.

ADAM (S.), BOKO (M.), 1983 : Le Bénin ; Edition Edicef, Paris, 98 pages.

ADANDE (A. S), 1984 : Le maïs et ses usages au Bénin méridional. Les nouvelles Editions Africaines, ACCT

ADDRA (H.M.), 1978 : Contribution à l'étude des climats du Togo. In annales Université du Bénin. Vol. 5 pp. 227-239, Lomé.

ADEGBIDI (A.A.), 1994 : Les performances du maïs amélioré TZB en milieu paysan dans le département de l'Atacora au Bénin : Production et valorisation du maïs à l'échelon villageois en Afrique de l'Ouest actes du séminaire Maïs Prospère. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement et Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Nationale du Bénin, pp.135-144, Cotonou

ADEGBOLA (P.), 1994 : Expériences et acquis paysans dans la culture du maïs au sud du Bénin. Production et valorisation du maïs à l'échelon villageois en Afrique de l'Ouest actes du séminaire Maïs Prospère. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement et Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Nationale du Bénin, pp.124-129, Cotonou.

ADEJUWON (J.O.), BALOGUN (E.E), ADEJUWON (S.A.), 1990 : On the annual and seasonal patterns of rainfall fluctuations in sub-saharan west-africa, Journal of Climatology, 10, 839-848.

ADJAKIDJE (V.), 1984 : Contribution à l'étude botanique des savanes guinéennes de la république Populaire du Bénin. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle. Université de Bordeaux III- 450 pages +annexes

ADJANONHOUN (E.), 1965 : Comparaison entre les savanes côtières de la Côte d'Ivoire et du Dahomey : In Annales de l'Université d'Abidjan – Série Sciences, Tome I, N°1 ; PP 41-60.

AFOUDA (F.M.), 1990 : L'eau et les cultures dans le Bénin Central et septentrional: Etude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural de la savane africaine. Thèse de Doctorat Nouveau Régime. Institut de Géographie, Université de Paris IV-Sorbonne. Paris, 428 pages.

AGBANGLA (A.D.), 1988 : Contribution à l'étude agroclimatique des saisons de pluie en vue de l'adaptation de la culture de l'arachide dans la province du Zou. Mémoire de fin d'étude, Ingéniorat. Centre de Météorologie de Niamey.

AGLI (H.), 1995 : Recherches sur la variabilité pluviométrique dans le bassin-versant du Niger au Bénin. Mémoire de DEA "Climats et Contraintes Climatiques". Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne, Dijon, 48 pages.

- AIFAN (H.), 1993** : Climat, ressources en eau et développement agricole dans le Moyen-Bénin, Mémoire de D.E.A "Climats et Contraintes Climatiques". 2 Volumes .Texte et Figures 161 pages +Vol. II figures. Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne.
- AKINDELE (A.), AGUESSY (C.), 1955** : Le Dahomey. Editions Maritimes et Coloniales, Paris.
- AKINDJOGBIN (J. A.), 1967** : Dahomey and it's neighbors (1708-1818). University Press, Cambridge.
- AKOUEGNINOU (A.E), 1984** : Contribution à l'étude botanique de forêts denses semi-décidues en République Populaire du Bénin. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle d'Ecologie, Université de Bordeaux II, 250 pages.
- ALAJIRE(J.), OLARIAN, 1991** : Evidence of climatic change in Nigeria based on annual series of rainfall of different daily amounts 1919-1985. In Climate Change. Vol.19 N°3 Kluwer Academic Publishers. Netherlands. pp. 320-340.
- ALIDOU (S.), 1983** : Etude sédiementologique, paléogéographique du bassin intracratonique paléozoïque-mésozoïque de Kandi (Nord-Est du Bénin - Afrique de l'Ouest).
- ANONYME, 1992** : Carte de sécurité alimentaire du Bénin. Projet SECAL, Office National des Céréales/GTZ
- ASECNA, 1973** : La structure continue de l'équateur météorologique sur l'Afrique tropicale. Bur. d'étude DEM. N° 29
- ATTIGNON (K.H.), 1960** : Le Climat de la Zone côtière entre Takoradi et Cotonou et ses conséquences biogéographiques. D.E.S.S. de Géographie, Faculté des Lettres, Université d'Aix-En-Provence, 72 pages.
- AUBREVILLE (A.), 1934** : Les forêts du Dahomey et du Togo. Bulletin du Comité d'Etudes Historiques et scientifiques de l'A.O.F., Tome XX, N°1-2, pp. 16-22, Dakar.
- AUBREVILLE (A.), 1937** : Les forêts du Dahomey et du Togo. Bulletin du Comité d'Etude historique et Scientifique d'Afrique Occidentale Française. 20 : 1-112.
- AUBREVILLE (A.), 1949** : Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Soc. Ed. Maritimes et coloniales. Larose, Paris, 351 pages.
- AZONTONDE (H.A.), YOUSOUF (I.), LAWANI (M.), 1989** : Etude pédologique au 1/10.000 des fermes semencières du Bénin. Projet PNUD/FAO BEN/84/010 " Formulation de projets semences.
- AZONTONDE (H.A.), 1991** : Propriétés physiques et hydrauliques des sols du Bénin. In Soil Water Balance in the sudano-sahelian Zone (proceedings of the Niamay Workshop, February. IAHS Publ. N° 199, 1991.
- BARNETT (T.P.), 1977** : The principal time and space scales of the Pacific trade wind fields. J. Atmos. Sci., 34, 221-236.
- BARNETT (J.P.), 1983** : Interaction of the moosson and Pacific trade wind systems at interannual time scales. Monthly, Weather Review. Vol.111, pp. 756-773.

- BEADLE (G.W), 1939** : Teosinte and the origin of maize. *Journal of Heredity* N°30. pp.245-247.
- BELTRANDO (G.), 1990** : Variabilité interannuelle des précipitations en Afrique orientale (Kenya, Ouganda, Tanzanie, et relations avec la dynamique de l'atmosphère. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille II, 233 pages.
- BENOIT (P.), 1977** : The start of growing season in northern nigeriá. *Agricultural Meteorology* 18 : 385-405
- BESANCENOT (J-P.), BOKO (M.), OKE (P. C.), 1997** : Weather conditions and meningitis in Bénin. In *European Journal of Epidemiology* art. no pips no 142638 pp.
- BEYNEL (D.J.), 1971** : Revue des différentes solutions dahoméennes au problème de développement de l'agriculture. In *Doctrine*, pp. 209-245.
- BIDOU (J.E.), 1981** : Saison sèche et sécheresse en République Populaire du Bénin pendant la période 1970-1979. In *Annales de la Flash*. N°2, pp. 224-237, Cotonou.
- BIGOT (S.), 1990** : Relations entre les températures de surface de l'océan mondial et la variabilité des aires de mousson : exemples des Philippines et de l'Afrique de l'Ouest. Mémoire de DEA «Climats et Contraintes Climatiques». Centre de Recherches de Climatologie URA 909 CNRS. Université de Bourgogne, Dijon.
- BIO BIGOU (L.B.), 1987** : La vallée bénino-nigérienne du fleuve Niger : populations et développement économique. Thèse de Doctorat (nouveau régime). 2 volumes. Université de Bourgogne. 917 pages, Dijon.
- BLACKMAN (R. B.) TUKEY (J. W),. 1958** : The measurement of power spectra. Dover Publ., New-york, 190 pages.
- BLASO (F.), 1985** : Mangroves du Bénin : statut écologique, ICITV. CNRS, CNRS`Université Paul-Sabatier.
- BLASO (F.), 1991** : Les mangroves. In *La Recherche*. N° 231, Paris.
- BLOC (D.) GAY (J-P.), GOUET (G.F.), 1987** : Durée des phases végétatives et reproductive chez le maïs : influence de la température. In *actes sur le Colloque sur la physiologie du maïs*. Pp. 148-162. INRA
- BOILIL (N.), TOURE (C.), 1989** : Brumes sèches et vents de sables au Sahel, analyse de la situation météorologique du 13 au 2 février 1989. In *Veille Climatique Satellitaire*, N° 27. pp. 24-27, Lannion.
- BOKO (M.), 1988** : Climats et Communautés Rurales du Bénin: Rythmes climatiques et rythmes de développement. Thèse de Doctorat d'Etat. 2 tomes. Centre de Recherches de Climatologie. URA 909 CNRS. Université de Bourgogne, Dijon, 601 pages.
- BOKO (M.) ADJOVI (L. C.), 1994** : Recherche de tendances dans les séries pluviométriques du Bénin méridional : Implications agroclimatiques. In *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*. Volume 7. Thessaloniki. pp. 294-304.

- BOKONON-GANTA (E.B.), 1986** : Les sécheresses africaines récentes .Le cas du Bénin et du Togo. Communication aux journées climatologiques de France, Centre de Recherches de Climatologie, Université de Bourgogne.
- BOUSSARD (J. M.), 1979** : Risk and uncertainty in Programmi,g models : a review in Roumasset, Boussard, Sigh, 1979.
- BRASSEUR-MARION (P.), 1951** : Le climat de Porto-Novo et de Cotonou. D.E.S. Annexe de Géographie. Paris-Sorbonne.
- BROSSIER (J.), 1989** : Risque et incertitude dans la gestion de l'exploitation agricole : quelques principes méthodologiques. In Le risque en agriculture. Editions ORSTOM pp. 25-41
- BRUNET-MORET(V.), 1979** : Homogénéisation des précipitations, In cahiers de l' ORSTOM, Série Hydrologie, 16 3/4, pp. 147-170.
- BRYAN (C.) WEARE and NASSTROM John S., 1982** : Examples of extended Empirical Orthogonal Function Analyses. In Monthly Weather Review Volume 110. PP. 481-485.
- BUDYKO (M.I.), 1974** : Climate and life. Academic Press, New-York.
- CACHAN (P.), 1966** : Recherches sur les méthodes d'évaluation des variations saisonnières des facteurs climatiques. In Bull. Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Nancy, T. VII, fasc.2.
- CADET (D.) HOUSTON (S.H.), 1984** : Precipitable water over Africa and the easterb/central Atlantic ocean during the 1979 summer. QJRMS, 62, 761-774.
- CADET (D.) NIOLI (N.O.), 1987** : Water vapour transport over West Africa and the Atlantic Ocean during summer 1979. QJRMS, 113, 581-602.
- CADET (D.), GARNIER (R.), 1988** : L'Oscillation Australe et ses relations avec les anomalies climatiques globales. In La Météorologie Série VII N°21. pp.4-17.
- CAMBERLIN (P.), 1987** : Les réactions du champ pluviométrique ouest-africain aux forçages atmosphériques et océaniques d'échelles régionales et planétaires. Mémoire de Maîtrise de Climatologie. Centre de Recherches de Climatologie. URA 909 du CNRS "Climatologie Tropicale". Université de Bourgogne. Dijon, 108 pages.
- CAMBERLIN (P.), 1991** : Recherches sur la Pluviométrie de la corne de l'Afrique. Mémoire de D.E.A. "Climats et Contraintes Climatiques". U.R.A 909 du CNRS. Université de Bourgogne. Dijon, 117 pages.
- CAMBERLIN (P.), 1994** : Les Précipitations dans la corne orientale de l'Afrique: Climatologie, variabilité et connexions avec quelques indicateurs océano-atmosphériques. Thèse de Doctorat de Géographie. Spécialité: Climatologie. Centre de Recherche de Climatologie. Université de Bourgogne Dijon, 379 pages.

CARBONNEL (J P.), HUBERT (P.), 1992 : Pluviométrie en Afrique de l'Ouest soudano-sahélienne: Remise en cause de la stationnarité des séries. In L'aridité : Une contrainte au développement; Editions ORSTOM, pp. 37-51.

CARLIENE (B.) Brénier , 1991 : La biotechnologie et l'Agriculture des pays en développement : le cas du maïs. Etudes du Centre de Développement OCDE , Paris, 109 pages

CATTEL (R.B.), 1966 : The scree test for the number of factors. Multi Behav. Res. 1, 245.

CENTRE TECHNIQUE DE COOPERATION AGRICOLE ET RURALE (1991) : Résumé du rapport final sur le zonage des risques de sécheresse en Afrique soudano-sahélienne pp, 193-200 + annexes

CHAROY (J.), 1971 : Les cultures irriguées au Noger. Résultats de 7 années de mesure et d'expérimentation (1963-1970). In L'Agronomie Tropicale. 40 (3).

CHARRE (J.), 1985 : Les variations spatio-temporelle des précipitations annuelles en Afrique de l'Ouest entre le Sahara et l'isohyète 1000 mm. Actes du Colloque sur les recherches françaises en Météorologie et Télédétection sur le continent africain. 18 -20 juin, 1985. Ecole Polytechnique Palaiseau.

CHEVALIER (A. M.), 1911 : La culture du maïs en Afrique Occidentale et spécialement au Dahomey. In Supplément au Journal Officiel de l'AOF, N° 48.

CHEVALIER (A.) , 1924 : Le rôle joué par les migrations humaines dans la répartition actuelle de quelques végétaux . Congrès de l'Association Française pour l'avancement des Sciences, pp 990-996. Liège.

CHEVALIER (A.), 1909 : L'extension et la régression de la forêt vierge de l'Afrique Tropicale

CHOISNEL (E.), 1988 : L'Analyse spatiale du bilan hydrique en agroclimatologie. In La Météorologie VIIème N°43- pp. 31-42.

CHOISNEL (E.), 1992 : L'agrométéorologie, outil de décision. La Météorologie, VIIème série, N° 42 pp 4-10 Paris.

CHOPART (J.L.), KONE (D.), 1985 : Influence des techniques culturales sur l'alimentation hydrique du maïs et du cotonnier. In L'Agronomie Tropicale 43 (2), 85-90.

CHOPART (J.L.), VAUCIL (M.), 1990 : Water Balance Estimation Model : field Test and Sensitivity Analysis. Soil Sci. Soc. Am. J. 1977-1384.

CIMMYT , 1991. CIMMYT, 1989-1990. Réalité et tendances : le maïs dans le monde.

CITEAU J. (1992) : Les satellites météorologiques : une approche nouvelle de la connaissance du climat au Sahel. Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier. 110 pages, Toulouse.

COLIN (C), 1991 : Sur les upwellings équatorial et côtier dans le Golfe de Guinée. In Oceanologica Acta, 14, 3 pp. 223-240

COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES, (1991) : Zonage des risques de sécheresse en Afrique soudano-sahélienne et conséquences sur les systèmes de culture. Projet fédérateur PF1. CIRAD-IRAT. 44 pages.

COQUERY-VIDROVITCH (C.), 1976 : De la traite des esclaves à l'exportation de l'huile de palme et des palmistes au Dahomey : XIX^{ème} siècle. Edition : The development of indigenous Trade and Markets in West Africa. London

CORNEVIN (R.), 1962 : Le Dahomey. Editions P.U.F, Coll. Q.S.J? N°1176, 2^{ème} édition, 128 pages.

CORNEVIN (R.), 1975 : La sécheresse en zone sahélienne. Causes et conséquences, études des mesures à prendre. Notes et études documentaires N° 4216-4217. La documentation française.

CORNEVIN (R.), 1981 : La république populaire du Bénin, des origines dahoméennes à nos jours. Editions Maisonneuve et Larose-Paris.

COUREL (M-F.), 1985 : Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Paris I, 407 pages.

CROWE (P.R.), 1971 : Concepts in Climatology UK: Olingman. London, 135 pages

CUAZ (L.V.), 1959 : Le régime hydrologique côtier dahoméen, Centre d'Etudes de pêche, Cotonou.

CUAZ (L.V.), 1960 : Les courants du Golfe de Guinée, Centre d'Etudes de pêche, Cotonou.

DANCETTE (C.), 1976 : Mesure d'évapotranspiration potentielle et d'évaporation d'une nappe d'eau libre au Sénégal. In l'Agronomie Tropicale, 31 (4), : 321-328.

DANCETTE (C.), 1983 : Estimation des besoins en eau des principales cultures pluviales en zone soudano-sahélienne. In l'Agronomie Tropicale 31 (4). pp. 281-293

DANGBEGNON (C.), 1987 : Systèmes de connaissance et recherche informelle paysans. Une étude de cas : la culture du maïs sur le plateau adja (villages Dadohoué et Dékandji). Thèse d'ingénieur d'agronome. Université Nationale du Bénin.

DEMANGEOT (P.), 1992 : Les régions naturelles du globe. Editions seuil, Paris.

DEMAREE (G.R.), NICOLIS (C.), 1990 : Onset of sahelian drought viewed as a fluctuation-induced transition. QJRMS, 116, 221-238.

DENEAU (V.), 1956 : Les singularités climatiques du Bas-TOGO. Mémorial de la Météorologie Nationale, N°42, Paris.

- DEVAUTOUR (H.) NAGO (C.M), 1989** : Le maïs au sud-Bénin. Innovations technologiques et alimentation. In *Céréales en régions chaudes : conservation et transformation*. AUPEL/UREF. Editions John Libbey Eurotext, pp 167-177. Paris.
- DHONNEUR (G.), 1971** : Les lignes de grains en Afrique Occidentale et Centrale. Essai de synthèse NTI, N°38, ASECNA, Dakar
- DHONNEUR (G.), 1974** : Nouvelles approche des réalités météorologiques de l'Afrique Occidentale et Centrale. ASECNA, Université de Dakar. Pp.385-487.
- DHONNEUR (G.), 1985** : L'équateur météorologique : une structure planétaire ; 25^{ème} congrès du CIG, 27-41, Dijon.
- DHONNEUR (G.), 1988** : Traité de météorologie tropicale N° 1, 151 pages, Trappes.
- DISSOU (M.), 1983** : Palmeraie naturelle et aménagement volontaire de l'espace. Thèse d'Etat en Géographie. Université de ParisX-Nanterre 2 tomes. Paris
- DJIVO (A.), 1977** : Guézo, la rénovation du Dahomey. ABC, Paris.
- DOMINGO (E.), 1978** : Le Zou Méridional : Peuplement et vie régionale (Bénin, Afrique Occidentale). Thèse de 3^{ème} cycle en géographie, Université Louis Pasteur. Strasbourg, 182 pages
- DONOU (A.), 1978** : Cité par BOKONON GANTA (E.B., 1984), In *La diagonale de Sécheresse climatique du Golfe du Bénin*. Mémoire de DEA de Géographie Physique. Paris IV-Sorbonne. 75 pages.
- DOOREMBOS (J.) PRUITT(W.O), 1975** : Les besoins en eau des cultures. Bulletin d'irrigation et de drainage n°24. FAO, Rome.
- DOOREMBOS (J.) et KASSAM (A.H.), 1984** : Réponse des rendements à l'eau. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage N°33. Rome, 233 pages.
- DRUYAN (L.M.), 1989** : Advances in the study of sud-saharan drought, *International Journal of Climatology*, 9, 77-90.
- DUMONT (R.), 1962** : L'Afrique Noire est mal partie. Edition Seuil. Paris.
- DUMONT (R.), 1986** : Pour l'Afrique j'accuse. Le journal d'un agronome au Sahel en voie de destruction. Editions Plon, Paris , 422 pages.
- EAGLEMAN (J.), 1971** : An experimental derived model for actual evaporation. *Agri. Meteorol.* 8, 385-394.
- ELDIN (M.), 1989** : Analyse et prise en compte des risques climatiques pour la production végétale. Le risque en agriculture. Editions ORSTOM. Collections à travers champs, , pp 47- 63 Paris

- ESSO (J-P.), 1991** : Contribution à l'étude des pâturages et des systèmes agropastoraux du Sud-Bénin.
- EUVERTE (G), 1967** : Les Climats et l'agriculture. Editions P.U.F. Coll. Q.S.J? N°824. Paris, 126 pages.
- FAO (1975)** : Réponses des rendements à l'eau . Irrigation, and drainage paper , 25.
- FAURE (G.), FUSILIER (J-L.), MARCHAND (J-L), 1994** : Les effets de la mécanisation sur la productivité en maïsiculture. Cas de la zone cotonnière Production et valorisation du maïs à l'échelon villageois en Afrique de l'Ouest actes du séminaire Maïs Prospère. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement et Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Nationale du Bénin, pp.49-53 Cotonou
- FAURE (P.), 1977** : Note explicative et carte pédologique de reconnaissance de le République Populaire du Bénin à 1/200 000. Feuilles de Natitingou (6) et Porga (8). ORSTOM-Paris, 68 pages.
- FOLLAND (C.K.), PARKER (D.E.), WARD (N.) JONES (D.E.), 1987** : Experiments in the prediction of african rainfall. In Proc. Of the First Trechnical Conference on Meteorologie. Research in Eastern and Southern Africa, KMD, Nairobi, 6-9 janvier. pp.50-52.
- FOLLAND (C.K.), (1990)** : Observed climate variations and change. In Climate Change IPCC Scientific Assessment, University Press, Cambridge, pp.195-238.
- FONTAINE (B.), 1981** : Pluviométrie soudano-sahélienne et dynamique atmosphérique sur l'Afrique occidentale et l'Atlantique nord : essai sur la variabilité physionomique et génétique d'une zone limite. Thèse de Doctorat de 3 ème cycle. Université de bourgogne. 166 pages.
- FONTAINE (B.), 1985** : La variabilité des précipitations en domaine sahélien et ses connexions avec la circulation atmosphérique africaine atlantique. In Cahier de Centre de Recherches de Climatologie. N° 11. URA 909 CNRS. Université de Bourgogne. pp.85-91, Dijon,
- FONTAINE (B.), 1990** : Champ Atlantique, pluviométrie ouest-africaine et oscillation australe. In Veille Climatique Satellitaire, N°32, Météorologie Nationale. Lannion-ORSTOM, pp.34-49.
- FOREST (F.) LIDON (B.), 1984** : Influence du régime pluviométrique sur la fluctuation du rendement d'une culture de sorgho intensifiée. In agrometeorology of sorghum and millet in the semi-arid tropics. ICRISAT Center, Patancheru, and OMM.,India. pp. 247-273.
- FOREST (F.), KONATE (M.), 1986** : Proposals for the classification of agroclimatic situations of upland rice in terms of Water Balance. Progress in rice research : 93-106. IRR. Los banos.
- FOREST (F.), REYNIERS (F.N.), 1986** : Proposals for the classification of agroclimatic situations of unpland rice in terms of Water Balance. Progress in rice research : 93 -106. IRRI. Los Banos.
- FRANQUIN (P.), 1969** : Analyse agroclimatique en régions tropicales : saisonn pluvieuse et saison humide. Application. Cahiers ORSTOM, série biologie N° 9, pp.65-95, Paris.

- FRANQUIN (P.), FOREST (F.), 1977** : Des programmes pour l'évaluation et l'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. In *Agronomie Tropicale*, 32 (1) : 7-11.
- FRANQUIN (P.), FOREST (F.), 1977** : Des programmes d'analyse fréquentielle des termes du bilan hydrique. In *Agronomie Tropicale* 32 (1), 1-22.
- FRETEAUD (J.-P.), LIDON (B.), MARLET (S.), 1984** : La détermination des coefficients culturaux en zone soudano-sahélienne. Proposition d'une méthode générale et pratique. Doc. Mult. IRAT DEVE, 28 pages.
- FRETEAU (J.P.), POSS (R.) SARAGONI (H) , 1987** : Ajustement d'un modèle de bilan hydrique à des mesures tensio-neutroniques in situ (culture du maïs au Togo méridional) In *Agronomie Tropicale*. 42 (2) : 94-102.
- FUSILLIER (J.-L.), 1994** : Bilan et perspectives de diffusion de la maïsiculture en zone de savane d'Afrique de l'Ouest : Production et valorisation du maïs à l'échelon villageois en Afrique de l'Ouest actes du séminaire Maïs Prospère. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement et Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Nationale du Bénin, pp.29-40, Cotonou
- GALIBA (M), 1994** : La culture du maïs en milieu paysan au Bénin et au Togo : l'expérience du projet Sasakawa Global 2000. Production et valorisation du maïs à l'échelon villageois en Afrique de l'Ouest actes du séminaire Maïs Prospère. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement et Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Nationale du Bénin, Cotonou, pp.109-114.
- GALINAT (W.C.), 1977** : The origin of corn. In *corn and corn improvement*. Ed. GF Spague, pp.1-47
- GARNIER (B. J.), 1960** : Maps of the water balance in west africa. In *Bulletion de l'IFAN*. Vol XXII A, pp.709-722, Dakar.
- GAY (J.P.), 1984** : Fabuleux maïs, histoire et avenir d'une plante. Edition AGPM, 295 pages.
- GAY (J.P.), 1984** : Le cycle du maïs. In *actes Colloque sur la physiologie du maïs et ses composantes*. pp.1-11, INRA, Paris.
- GERMAIN (P.), 1975** : Contribution à la connaissance du quaternaire récent du littoral dahoméen, ASSEQUA, Bulletin de liaison- Etude du Quaternaire N° 44-45, Paris.
- GIBBS (W. J.), MAHER (J.V.), 1967** : Rainfall deciles as drought indicators. Bulletin N° 48. Commonwealth Bureau of Meteorology, Australia, Melbourne.
- GIBBS (W.J), MAHER (J.V.), 1967** : Rainfall deciles as drought indicators. Bulletin N° 48. Commonwealth Bureau of Meteorology. Melbourne, Australia.
- GIRAUD (J.M.), GREGOIRE (P.), 1976** : Le climat soudano-sahélien, Année-Année pluvieuse. La météorologie Vième série. N°6, 69-82.
- GIRI (J.), 1986** : L'Afrique en panne Vingt-cinq ans de «développement». Karthala, Paris, 204 pages

- GLANTZ (M.), 1987** : Drought and Hunger in Africa: denying famine of future Cambridge University New-York USA; 457 pages.
- GUILLOT (B.), LAHUEC (J.P.), CITEAU (J.), BELLEC (B.) et NOYALET (A.), 1976** : Analyse de l'évolution climatique en Afrique de l'Ouest en 1983-1985 à l'aide de l'imagerie satellitaire et de données conventionnel. ORSTOM, Dakar, pp. 173-202.
- GUINKO (S.), 1973** : Contribution à l'étude écologique des savanes marécageuses du Bas-Dahomey. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle. Université d'Abidjan. 142 pages.
- GUNN (J.), 1991** : Influence of forcing variables on global energy balance during the period of intensive instrumental observation (1958-1987) and their implications for paleoclimate. In Climate Change . VOL.19 N°4. Academic Publishers/ Dordrecht. Boston, London. pp.393-420. 15 graphiques.
- HAILE (T.), 1990** : Drought in Ethiopia. In 3rd WMO Symposium on Meteor. Aspects of Tropical Droughts, Niamey, WMO TMRP Series N° 36, 273-278.
- HAMILTON (A.C.) and TAYLOR (D.), 1991** : History of climate forest in tropical africa during the last 8 millions years. In Climatic Change pp.65-78.
- HASTENRATH (S.), 1978** : On modes of tropical circulations and climate anomalies. J. Atmos. Sci. 35, pp. 2222-2231.
- HASTENRATH (S.), 1988** : Climate and circulation of the tropics. Atmospheric Sciences Library, D. Reidel publishing company, Dordrecht, 455 pages.
- HILLEL (D.), 1988** : L'Eau et le sol : principes et processus physiques. Université catholique de Louvain Unité de Génie Rural. Collection PEDASUP 5. Louvain-la-Neuve.
- HILLS (R.C.), MORGAN (J.H.T.), 1981** : Rainfall Statistics: an interactive approach to analysing rainfall records for agricultural purposes. Experimental Agriculture N°17 PP. 1-16
- HISARD (P.), 1990** : Variabilité des précipitations dans l'Atlantique Tropical sud-est pendant un El Nino. In Hydrologie Continentale. Volume 5, N°2. PP., 87-104.
- HODONOU (J.) , 1976** : La politique d'aménagement du territoire au Dahomey et sa projection spatiale régionale dans le Mono. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle de géographie. Université Louis-Pasteur, 425 pages. Strasbourg.
- HOPKINS (A. G.), 1973** : An economic history of west Africa. Longman, London.
- HOUSSOU (A.), 1974** : Etudes des formations détritiques de l'ouest du bassin sédimentaire côtier du Dahomey. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle. Université de Lille. N°464.

HOUNDENOU (C.), 1988 : Contribution à l'étude géomorphologique de la partie occidentale du littoral béninois. Mémoire de Maîtrise de Géographie Physique. Faculté des Lettres Arts et Sciences Humaines. Université Nationale du Bénin. Cotonou, 144 pages,.

HOUNDENOU (C.), 1992 : Variabilité pluviométrique et conséquences socio-écologiques dans les plateaux du Bas-Bénin (Afrique de l'Ouest). Mémoire pour l'obtention du D.E.A "Climats et Contraintes Climatiques ". URA 909 du CNRS "Climatologie tropicale" Université de Bourgogne. 2 Volumes. Dijon, 90 pages.

HOUNDENOU (C.), HERNANDEZ (K.), 1998 : Modification de la saison pluvieuse dans l'Atakora (1961-1990) : un exemple de sécheresse au nord-ouest du Bénin (Afrique Occidentale). Science et Changements Planétaires-

HOUNKANNOUNON (J.), 1979 : Les précipitations en République Populaire du Bénin (d'après la normale 1961-1970). Mémoire de Maîtrise de Géographie. U.N.B. Cotonou, 51 pages+annexes.

HOUSSOU (C. S.), 1996 : Rougeole, saisons et climat dans l'Atacora (Nord-Ouest du Bénin). In Climat et Santé, Cahiers de bioclimatologie et de biometéorologie humaines N° 15, Dijon, pp. 143-145

HOUSSOU (C. S.), 1998 : Les bioclimats humains de l'Atacora (Nord-Ouest du Bénin) et leurs implications socio-économiques. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne. Dijon, 328 pages, .

HOUSSOU (S.C.), 1991 : Rythmes climatiques, rythmes pathologiques dans le nord-ouest du Bénin. Mémoire de DEA "Climats et Contraintes Climatiques". Centre de Recherches de Climatologie, URA 909 CNRS-Climatologie Tropicale, Université de Bourgogne, Dijon.

HUBERT (H.), 1908 : Géographie physique du Dahomey. Renseignements coloniaux, supp. Au Bulletin du comité de l'Afrique française. N°9, Paris.

HULME (M.), 1992 : Rainfall changes in Africa : 1931-1960 to 1961-1990. International journal of Climatology, 12, 685-699.

HURAUULT (J.), 1966 : Les principaux types de peuplement du sud-est du Dahomey et leur répartition cartographique. Etude de photo-interprétation N° 2. IGN. Paris.

IGUE (J.O.), 1992 : In Cartes de sécurité alimentaire du Bénin. (LARES-SARL), 28 pages, Cotonou.

IITIS (H. H.), 1978 : The maize mystic. A reappraisal of origin of corn. In Abstract, p.1-4. Ann. Journal of Botany.

INRA (1984) : Physiologie du maïs. Communications au Colloque Physiologie du maïs. INRA. Paris, 574 pages

JANICOT (S.), 1985 : Analyse spatio-temporelle du champ de précipitations annuelles sur l'Afrique Occidentale et l'Afrique Centrale. In Veille Climatique Satellitaire., 10 pp 32-44.

JANICOT (S.), 1990 : Variabilité des précipitations en Afrique de l'ouest et circulations quasi-stationnaires durant une phase de transition climatique. Thèse de Doctorat d'Etat, 178 pages+annexes. Paris.

- JANICOT (S.), 1992a** : Spatio-temporal variability of west-african rainfall. Part1 : regionalizations and typings, *Journal of Climatology*, 5, 489-497.
- JANICOT (S.), 1992b** : Spatio-temporal variability of west-african rainfall. Part2 : Associated surface and airmass characteristics, *Journal of Climatology*, 5, 499-511.
- JANOWIAK (J.E), 1988** : An investigation of interannual rainfall variability in Africa. *Journal of Climate*, 1, 240-255.
- JENIK (J.), 1994** : The Dahomey-Gap : an important isssue in african phygeography. *Mém. Soc. Biogéogr. IV* : pp. 125-133
- KAISER (H. F.), 1972** : The JK method: A procedure for finding the eingenvectors and eingenvales of real symetric matrix *Comp. J. Vol. 15 N°3* pp. 271-273.
- KALMS (J.M.), VALET (S.), 1975** : Détremination des besoins en eau des différentes cultures vivrières et industrielles dabs les conditions pédoclimatiques des terrasses du Niger à Tillabery. INRAN, 16 pages, Niamey.
- KENDALL (M.G.), STUART (A.), 1963** : The advanced theory of statistics. Volume I. Charles Griffin (London) Edt.:
- KENDALL (M.G.), 1962** : Ranks correlation Méthods. Charles Griffin (3 ème édition).
- KLASSOU (K.S.), 1996** : Risques hydrologiques et socio-économiques liés à la dynamique climatique dans le bassin-versant du Haho à Gati (Togo). In *Les risques liés au climat*. Editions Universitaires de Dijon. pp.51-63
- KRAUS (E.B.), 1977** : Subtropical droughts and cross-equatorial energy transports. *Monthly Weather Review.*, 105, 1009-1018.
- KRISHNAMURTI (N.), 1971** : Tropical est-west culations during the northern summer. In *JAS*, 28, 1342-1347.
- LAMB (P.J.), 1966** : Climate in the 1960's. *Geogr. Journal*, 132-2, 183-212.
- LAMB (P.J.), 1985** : Rainfall in dub-saharan west-africa during 1941-83, *Zeit. Für Gletsc. Und Glazial.*, 21, 131-139
- LAMBERGEON (D.), 1977** : Relations entre les pluies et les pressions en Afrique Occidentale. *Publi. ASECNA*, n°57.
- LANG (J.), PARADIS (G.), 1977** : Un exemple d'environnement sédimentaire, biodétritique, non carbonaté marin et continental, holocène en climat intertropical : Le domaine margino-littoral du Bénin (Ex Dahomey). *Revue de géographie physique et de géologie dynamique* (2); Vol XIX, Fasc.3. pp.295-312, 9 figures.
- LANG (J.), PARADIS (G.), 1983** : Interpretation d'uen datation d'âge ogolien dans le quaternaire margino-littoral du Bénin (Afrique de l'Ouest). Ed. *Quaternaria* (sous presse).

- LANG (J.), PARADIS (G.), 1984** : Le quaternaire margino-littoral béninois (Afrique de l'Ouest) ; synthèse des datations au carbone 14. *Paleoecology of Africa*. Edition J.A. Coetze et E. M. Van Zinderen Baker. AA. Balkema. Publ ; 16, 65-67. Rotterdam Pays-Bas.
- LE BARBE (L.), ALE (G.), MILLET (B.), TEXIER (H.) BOREL (Y.), GUALDE (R.), 1993** : Les ressources en eau superficielles de la République du Bénin . Institut français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération. Collection Monographies Hydrologiques N° 11, 457 pages + Annexes
- LE COURRIER-ACP/CEE, 1996** : Le nouvel ordre mondial. Bruxelles
- LEBART (L.) MORINEAU (A.) FENELON (J.-P.), 1982** : Traitement des données statistiques : Méthodes et Programmes . Dunod 2^{ème} édition, Paris, 582 pages.
- LEROUX (M.), 1970** : La dynamique des précipitations en Afrique en Afrique Occidentale. Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle. Université de Dakar.
- LEROUX (M.), 1980** : Le climat de l'Afrique Tropicale. Thèse de Doctorat d'Etat, 3 tomes, Université de Bourgogne, Dijon, 1427 pages + atlas.
- LEROUX (M.), 1983** : Le climat de l'Afrique Tropicale. Thèse de Doctorat d'Etat. ed. Stakine-Champion. 636 pages + atlas.
- LHOMME (J.P.), 1981** : L'évolution de la pluviométrie annuelle de la Côte d'Ivoire au cours des 60 dernières années. In *Météorologie*, VI série, 25, 135-141.
- LOUGH (J.M.), 1986** : Tropical atlantic sea surface temperatures and rainfall variations in sub-saharian africa and northeast Brazil. In *Monthly Weather Review*; Vol. 114, 56-570.
- MAHE (G.), 1991** : La variabilité des apports fluviaux au golfe de Guinée utilisée comme indice climatique. In *Pêcheries ouest-africaines : variabilité, instabilité et changements*. P. Cury et C. Roy Ed. ORSTOM, pp 47-61, Paris.
- MANGELDSORF (P.C.), REEVES (R.G.), 1940** : L'origine du maïs. *Rev. Bot App*. 20 pages, pp. 628-633.
- MANGELDSORF (P.C.), NAISCH (R.S.) GALINAT (W.C), 1967** : Préhistoire maïze teosinte and tripasacum from Tamaulipus Mexico. *Bot. Mus. Leaflets Havard Un*. Vol. 22 N°4. pp.33-62.
- MANGELDSORF (P.C.), 1974** : Corn it's origin, evolution and environment. The Berkley Press of Havard university, 262 pages.
- MANGELDSORF (P.C.), BARGHOON (E.S), BANEJEE (V.C.), 1978** : Fossil, pollen and the origin of corn. *Bot. Mus Leaflets. Havard University*, 26 pages, PP. 237-255.

MARAUX (F), 1994 : Modélisation mécaniste et fonctionnelle du bilan hydrique des cultures. Le cas des sols volcaniques du Nicaragua. Thèse de Doctorat de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon. Paris 268 pages + annexes.

MARCHAND (J.-L.), PETERSCHMITT (M.) REYNAUD (B.), 1994 : Les viroses de la striure, du stripe et de la mosaïque sur le maïs en région tropicale (Afrique et îles de l'océan Indien). In Agriculture et développement N° 4, pp. 1-15.

MERCIER (P.), 1968 : Les "Somba" du Dahomey septentrional. Tradition, changement, histoire. Thèse pour le Doctorat es Lettres. Faculté des Lettres et Sciences Humaines de Paris, 536 pages.

MITCHELL

MONDJANNAGNI (A. C.), 1969 : Contribution à l'étude des paysages végétaux du Bas-Dahomey. In Annales d'Université d'Abidjan, Tome 1. Fascicule2, Abidjan.

MONDJANNAGNI (A. C.), 1975 : Campagnes et villes du sud de la République du Bénin. AGECCOOP. Paris, 614 pages.

MONTENY (B.A.), 1986 : Forêt équatoriale, relais de l'océan comme source de vapeur d'eau pour l'atmosphère. Veille Climatologique Satellitaire N°12 - ORSTOM-CMS. Lannion, pp 39-51

MONTENY (B.A.), 1986 : Forêt équatoriale, relais de l'océan comme source de vapeur d'eau pour l'atmosphère. In Veille Climatologique satellitaire. N° 12, ORSTOM-CMS Lannion. pp.39-51.

MONTGOMERY (E.G.), 1906 : What is an ear of corn. Popular Science. Monthly 68. pp.55-62.

MORON (V.), 1992 : Variabilité spatio-temporelle des précipitations en Afrique sahélo-saharienne et guinéenne (1933-1990). In La Météorologie VII ème série ; 43-44 : 24-30. Paris.

MORON (V.), 1993 : Variabilité des précipitations en Afrique tropicale au nord de l'équateur (1933-1990) et relations avec les températures de surface océanique et de la dynamique de l'atmosphère. Thèse de Doctorat, Tome1 225 pages + atlas. Centre de Recherches de Climatologie. Université de Bourgogne. Dijon, 225 pages.

MORON (V.), 1994 : Guinean and sahelian rainfall anomaly indices at annual and monthly scales (1933-1990). International journal of climatology;4, pp.325-341.

MORON (V.), 1996 : Régionalisation et évolution des précipitations tropicales annuelles (1946-1992). Sécheresse. Edition Jonh Libbey Eurotex, Montrouge, Volume 7, pp. 25-32.

MOTHA (R.P.), LEDUC (S.K.), STEVART (L.T.), SAKAMOTO (C.M.), STROMMEN (N.D.), 1980 : Precipitation patterns in west-africa. Monthly Weather Review, 108, 1567-1578.

NEUVY (G.), 1991 : L'homme et l'eau en milieu tropical. Coll. Masson, 227 pages.

- NICHOLSON (S.E.), 1980** : The nature of rainfall fluctuations in subtropical west africa. In *Monthly Weather Review* 108, PP. 473-487.
- NICHOLSON (S.E.), 1981** : Rainfall and atmospheric circulation during drought and wetter periods in west Africa. In *Monthly Weather Review*. N°109. pp. 2191-2208.
- NICHOLSON (S.E.), 1983** : Subsaharian rainfall in tthe years 1976-1980: Evidence of continued drought. In *Monthly Weather Review*. pp.1646-1654.
- NICHOLSON (S.E.), 1986** : The spatial coherence of african rainfall anomalies: Interhemispheric teleconnexions. *Journal of Climate and App.I. Met.*25, pp.1365-1385.
- NICHOLSON (S.E.), ENTEKHABI (D), 1986** : The quasi-periodic behaviour of rainfall variability i n Africa and relationship to the southern Oscillation. *Arch. Met. Geop. and Bio. Ser.* 34, pp.311-348.**NICHOLSON (S.E.), 1989** : Long-term changes in african rainfall, *weather* 44, 47-56
- NICHOLSON (S.E.) and LARE(A.R.), 1990** : A climatology of description of surface enrgy balance in the central Sahel Part II . The evapoclimatonomy submodel, *Journal of Applied Metoerology* 29, 138-146.
- NICHOLSON (S.E.), PAOLO (I.), 1993** : A re-evaluation of rainfall variability in the Sahel,Part1: characteristics,of rainfall fluctuations. *International Journal of Climatology*,5 pp.371-389.
- NICOLIS (C.),1990** : Dynamique atmosphérique et prévisibilité. In *Contribution à l'étude du changement du climat*, IRM Belgique, série A, N° 124, 75-80.
- O'LENIC (E.A.), LIVEZEY (R.E)., 1988** : Practical considerations in the use of rotated principal component analysis in diagnostic studies of upp.er-air height fields. *Monthly Weather Review*, 116, 1682-1689.
- OFFICE NATIONAL DES CEREALES, 1992** : Cartes de sécurité alimentaire du Bénin. Ministère du Développement Rural. Bénin, 28 planches + texte.
- OGALLO (J.), 1979** : Rainfall variability in Africa. *Monthly Weather Review*, 107, 1133-1139.
- OKE (P.C.), 1993** : Type de temps et recrudescence de la méningite cérébro-spinale au Bénin. Mémoire de maîtrise de géographie. Université Nationale du Bénin. Cotonou/Abomey-Calavi, 139 pages.
- OLADIPO (E. O.), 1987** : Power spectra and coherence of drought in the interior plains, In *journal of Climate*, 7, PP. 477-491.
- OLANIRAN (O.J.), 1991** : Evidence of climatic change in Nigeria based on annual series of rainfall of different daily amount, 1919-1985. *Climatic Change*, 19, PP. .319,-341
OMM, TMRP, N) 28, 40-43.
- OUATTARA (M.) NIANGADO (O.), VAKSMANN (M.), TRAORE (S.B.), 1982** : Adaptation du sorgho au climat saoudano-sahélien : étude de photosensibilité. Documents du CIRAD, pp 2-22. Montpellier.

- OVERLAND (J. E.), PREISENDORFER (R. W.), 1982** : A significance test for principal component applied to a cyclone climatology. *Monthly Weather Review*, 110, 1-4.
- OYEDE (M. L.), 1983** : Un Exemple de sédimentation biodétritique quaternaire dans le domaine margino-littoral en climat tropical humide, le "Lac "Ahémé (Bénin, Afrique de l'Ouest) Thèse de Doctorat de 3ème cycle. Université de Bourgogne, 171 pages. 49 figures.
- PAGNEY (P), 1973** : La Climatologie. QSJ ? PUF., Paris, 190 pages.
- PALMER (W.C.), 1965** : Meteorological drought. Weather Bureau Paper N° 45. Departement of commerce. Washington D.C USA : US.
- PALMER (W.C.), 1965** : Meteorological drought. Weather Bureau Research Paper N°45. Departement of Commerce. Washington DC, USA :US
- PAPADAKIS (J.), 1965** : Enquête agro-écologique en Afrique Occidentale : Libéria, Côte d'Ivoire, Ghana, Togo, Dahomey, Nigéria. Volume II. Atlas ONU-FAO.
- PARADIS (G.) et ADJANOHOUN (E.), 1974** : L'impact de la fabrication du sel sur la végétation de la mangrove et de la géomorphologie dans le Bas-Dahomey. In *Annales de l'Université d'Abidjan. Série, E, Tome VII, Fasc.1*
- PARADIS (G.), 1976** : Recherches sur le quaternaire récent du sud de la République populair du Bénin (ex-Dahomey), étude de thanatocenoses de mollusque. Thèse de 3^{em}e cycle. Université de Paris-sud, 173 pages.
- PARADIS (G.), 1979** : Observations sur *Laguncularia racemosa* G. et *Dalbergia ecastaphyllum* (L.T.) dans les successions secondaires de la mangrove du Bénin. *Bulletin de l'IFAN, série A, T.XII, N°1.*
- PARADIS (G.), 1981** : Ecologie et géomorphologie en climat subéquatorial sec: la végétation du Bas-Bénin Occidentale; In *Annales d'Université d'Abidjan, Série E., Tome XIV.* Paris.
- PATUREL (J.E.), SERVAT (E.), KOUAME(B.), BAYER(J.F.), LUBES (H.), MASSON (J.M.), 1995** : La sécheresse en Afrique de l'Ouest non sahélienne (Côte d'Ivoire, Togo et Bénin). In *Sécheresse ; 6 : 95-102.*
- PELISSER (P.), 1963** : **Les pays du Bas-Ouémé** : une région témoin du dahomey méridional. *Travaux du département de Géographie N°10, FAC des Lettres et Science Humaines, Dakar, 173 pages.*
- PENMAN (H.L.), 1962** : Weather and crops. *Quaterly journal of the Royal Meteorological Society. Volume 88, N° 377, .209-219.*
- PERARD (J.) , BOKO (M.),et BOKONON-GANTA (B.E.), 1991** : Contraintes climatiques et croyances en Afrique Tropicale: Essai d'ethnoclimatologie. In *Actes du 3ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Lannion, pp. 163-171.*
- PERARD (J.), 1992** : Estimation des contraintes climatiques en Afrique Tropicale. *Approche méthodologique.* In *Actes du 5ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Centre de Recherches de Climatologie. Université de Bourgogne. Dijon, pp. 99-104.*

- PERARD (J.), 1992** : Orages au Bénin : Modèle scientifique, modèle traditionnel. In Cahiers du Centre de Recherche de Climatologie. N°14. URA 909 CNRS. Université de Bourgogne, Dijon. pp. 33-40. **PERARD (J.) BOKONON-GANTA (E-B.) 1993** : Variabilité pluvieuse et mutations socio-économiques dans le haut-Borgou (nord-Bénin). In Publications de l'Association Internationale de Climatologie. Volume 6. Toulouse.
- PFEIFFER (V.), 1988** : Agriculture au Sud-Bénin : Passé et Perspectives. Harmattan, 172 pages
- PHILANDER (S. G. H), PACANOWKI (R.C.), 1981** : The oceanic response to cross equatorial winds with applications to coastal upwelling in low latitudes. *Tellus*, 33., 20-210
- PICAUT (J.), 1983** : Sur les mécanismes des variations thermiques dans le Golfe de Guinée. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle, U.B.O. 199 pages, Brest.
- POUGNET (R.), 1957** : Le précambrien du Dahomey. *Bull. Direct. Fédérale de Mines et Géologique*. N° 22, 191 pages
- QUENUM (F-J.), 1980** : Milieu naturel et mise en valeur agricole entre Sakété et Pobè dans le sud-est du Bénin. Thèse de doctorat de 3^{ème} cycle. Université de Louis-Pasteur. Starsbourg, 279 pages.
- QUILFEN (Y.), 1987** : Variations interannuelles de l'atmosphère atlantique tropicale et interactions avec l'océan. Thèse de Doctorat de 3^{ème} cycle. Université de Paris VI.
- RAMR, 1993** : Rapport d'activités du projet Recherche appliquée en milieu réel. Année 1992. MDR/DRA/RAMR, Cotonou, Bénin.
- RAMUSSON E.M. (1987)** : Global climatic change and variability: effects of drought and desertification in Africa. In *Drought and Hunger in Africa: Denying famine a future* . Cambridge University Press. New-York, USA. PP. 3-22 *Research Bulletin N° 13. International Crops Research Institute For The Semi-Arid Tropics. Pantancheru, Andhra Pradesh, India, 181 pages.*
- RASMUSSEN (E. M.), 1987** : Global climatic change and variability : effects of drought and desertification in Africa pp. 3-22 In *Drought and hunger in Africa : denying famine a future* (Glantz M. Ed.) Cambridge University Press. New York.
- REED (R.J.), 1988** : West-ward travelling, synoptic-scale disturbances of Northern hemisphere summer in tropical africa and the adjacent atlantic. In *recherche relative à l'expérience WAMEX et Météorologie tropicale en Afrique,*
- REYNIERS (F-N), FOREST (F.) 1988** : Améliorer l'alimentation hydrique et son efficience en agriculture pluviale en Afrique au sud du Sahara : In *actes du séminaire sur l'Agriculture irriguée en Afrique. CTA et Institut International pour la mise en valeur et l'amélioration des terres Tome1. Harare174 pages.*
- REYNIERS (F-N), BARON (C.), CORRADO (S.), 1997** : SARRA, logiciel opérationnel pour l'évaluation agricole des ressources pluviométriques au Sahel. In *Atelier harmonisation des outils méthodologiques de collecte, de suivi et d'analyse des données agro-socio-économiques en gestion des ressources naturelles, pp, 27-37, Dakar,*

- RICHMAN (B.); 1986** : Rotation of principal component. *Journal of Climatology*, 6, 293-336.
- RIOU (CH.), 1975** : La détermination pratique de l'évaporation : application à l'Afrique-Centrale. ORSTOM. N° 80. Paris, 236 pages.
- RITCHIE (J.T.), 1972** : Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete covr. *Water resourc.*, 8 : 1204-1213.
- ROBBINS (C.B.) , 1978** : The Dahomey-Gap : A re-evaluation of it's significance as a faunal barrier to west african high forest. *Bulletin of Carnegie Museum of Natural history* 6, pp.: 168-174.
- ROGNON (P.), 1994** : La sécheresse édaphique. In *sécheresse N°3 Vol.5*, PP.141-142. Montrouge
- ROUANET (G.), 1984** : Le maïs. Editions Maisonneuve et Larose. Paris, 142 pages
- SAARIEN (T. F.), 1966** : Perception of the Drought hazard on the great plains. Departement of Geography Research Paper N°106. University of Chicago. USA. Chicago. 183 pages.
- SAPORTA (G.), BOUROCHE (J.M.), 1980** : L'Analyse des données. Collection Q.S.J.? PUF N° 1999. Paris
- SERVAIN (J.), PICAUT (J.), BUSALACCHI (A.J.), 1985** : Interannual and seasonal variability of the Tropical Atlantic depicted by sixteen years of sea-surface temperature and winds stress. In *Coupled Ocean-Atmopshere models*, Elsevier, Nihoul Editeur, pp. 211-237. Amsterdam
- SERVAIN (J.), 1991** : Simples climatic indices for the tropical Atlantic ocean. Soumis à *Journal of Geophysical Research*, 23 pages.
- SHINODA (M.), 1986** : Rainfall distribution and monsoon circulation over tropical in the 1979 northern summer : their comparaison between East and west Africa. *JMSJ*, 68 19-35.
- SINSIN (B.), 1995** : Le rôle des aires protégées dans la conservation des ressources génétiques. *Actes du Séminaire national sur les Ressources phytogénétiques au Bénin. Volume2, Niaouli.*, 10pages.
- SIRCOULON (J.), 1982** : Evolution des climats et des ressources en eau. In *Afrique contemporaine. N° 161 (spécial)*. Documentation française, Paris, pp. 57-78.
- SIRCOULON (J.), 1986** : La sécheresse en Afrique de l'Ouest. Comparaison des années 1982-1984 avec les années 1972-1973. *Cahiers hydrologiques Vol. XXI, N°4 ORSTOM.* ; pp. 75-92. Bondy.
- SIVAKUMAR M. V. K. (1991)** : Drought Spells and Drought Frequencies in West Africa : Durée et fréquence des périodes sèches en Afrique de l'Ouest. ICRISAT. *Research Bulletin N° 13. India*, 180 pages.
- SIVAKUMAR (M.V.K.), 1992** : Climate Change and implications for agriculture in Niger. *Climatic Change* 20 : 297-312

- SNEYERS (R.), 1975** : Sur l'analyse statistique des éries d'observations. Note technique N° 143, OMM ; N° 415, 192 pages, Genève.
- STEINER (K. G.), 1990** : Manuel d'expérimentation en milieu paysan pour les projets de développement rural. recommandations pour le développement de messages de vulgarisation pour les petits exploitants dans les domaines de la socio-économie et de l'environnement. Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale (CTA) et Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Eschborn.
- SUCHEL (J-B.), 1988** : Les climats du Cameroun. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Saint-Etienne, 4 volumes 1 186 pages + 322 figures
- SURET-CANAL (J.), 1964** : L'Afrique noire occidentale et centrale : l'ère coloniale (1990-1945), Paris
- TANAKA (R.E.), WEARE (B.C.), NAVATO (A.R) and NEWELL (R.E.) , 1975** : Recent African rainfall patterns. In Nature 255, PP. 201-203
- TASTET (J-P.), 1975** : Les formations sédimentaires quaternaires actuelles du littoral du Dahomey. In Bulletin ASSEQUA, N° 46, Dakar.
- TASTET (J-P.), 1977** : Les formations sédimentaires pléistocènes du littoral du Togo et de la République du Bénin. Recherches Françaises du Quaternaire. Supplément au Bulletin A.F.E.Q., pp. 155-167.
- TESSIER (D.), 1994** : Rôle de l'eau sur les propriétés physiques des sols. In sécheresse N°3 Vol. 5: Montrouge, PP. 143-150
- THORWAITHE (C.W.), GARNIER (B.J.), 1956** : A method of computing evapotranspiration in west africa. Bulletin IFAN, série A. Volume 18. N° 3 pp.665-676. Dakar.
- TODOROV (AV), 1985** : Sahel, the changing rainfall and the norlas used for its assesment., JCAM, 24, pp. .97-107.
- TOFFI (D. M.), 1991** : Ressources climatiques et activités salicoles sur le littoral occidental du Bénin. Mémoire de DEA " Climats et Contraintes Climatiques" URA 909 CNRS Centre de Recherches de Climatologie. Université de Bourgogne. 165 pages. Dijon.
- TOTONGNON (K-J.), 1994** : Le maïs dans les systèmes de production du département de l'Atlantique. Production et valorisation du maïs à l'échelon villageois en Afrique de l'Ouest actes du séminaire Maïs Prospère. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement et Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Nationale du Bénin, pp.130-134, Cotonou
- TOVO (M.), 1995** : Réduire la pauvreté au Bénin : Vers une stratégie d'action. Centre pour l'environnement et le développement en Afrique (CEDA), Cotonou, 337 pages.
- TURC (L.), 1954** : Le bilan d'eau des sols : relations entre précipitations, l'évaporation et l'écoulement. INRA. Annales d'Agronomie. 5 ème année, N°4, pp.491-596. Paris.

- VAKSMAN (M.) et SIRIBA (D.) 1995** : Risque et intensification en Afrique Tropicale semi-aride «Diagnostic hydrique et Minéral des cultures. In rapport scientifique des activités sur le sorgho au Mali. Projet STD3 CIRAD-CA et IER Bamako.
- VERGER (P.), 1968** : Flux et reflux de la traite des nègres entre le Golfe d Bénin et Bahia de Todos os santos de XVII au XIX^{ème} siècle. Edition Mouton, Paris.
- VESSEREAU (A.), 1974** : La statistique. Collection Q.S.J?. PUF, Paris, 127 pages.
- VOLKOFF (B.) : 1976** : Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin ai 1/200.000. Feuille d'Abomey. Note explicative N° 66(2), ORSTOM, Paris, 40 pages.
- VOLKOFF (B), WILLAIME (P.), 1976** : Carte pédologique de reconnaissance de la République Populaire du Bénin. Feuille de Porto-Novo. Notice explicative N° 66(1), ORSTOM, Paris, 39 pages.
- VOLKOFF (B.), WILLAIME (P.), 1963** : Notice explicative de la carte des sols de la République du Dahomey. Rapport annuel, 1962, 2^{ème} partie. ORSTOM. Mission Dahomey. Cotonou
- WALSH (J.E.), RICHMAN (M. B.), 1981** : Seasonnaly in the associations between surface temperatures over the United States and the North Pacific Ocean. Monthly Weather Review. 109, 767-783.
- WARD (N.M.), 1992** : Provisionnaly corrected surface wind data, Worwide Ocean-atmosphere, surface fields ans sahelian rainfall variability , Journal of Climate, 5, 454,-474.
- WEARE (B.C.), 1977** : Empirical orthogonal analysis of Atlantic Ocean surfaces temperatures. Quart. J. Roy. Meter. Soc, 103, 467-478.
- WEATHERWAX (P.), 1954** : India corn in old America. The Mac Millan Compagny, 283 pages. New-York,
- YALLOU (C-G), 1994** : Le Maïs au Bénin : atouts et perspectives : production et valorisation du maïs à l'échelon villageois en Afrique de l'Ouest actes du séminaire Maïs Prospère. Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement et Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université Nationale du Bénin, pp. 115-122, Cotonou
- YALLOU (C-G.), ADJAKIDJE (V.), 1995** : Rapport national sur les ressources phytogénétiques. Ministère du Développement Rural, Cotonou.
- Yeshanew (A.), 1993** : Annual and seasonnal rainfall anomaly in Ethiopia as revelad by eigenvector analysis. 1^{ère} conférence de la Société Météorologique Africaine. Naïrobi, 1993.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Evolution en tonnes des importations de céréales du Bénin (d'après le Port Autonome de Cotonou, 1992).....	13
Tableau 2 : Evolution en tonnes des importations alimentaires du Bénin autres que les céréales (d'après le Port Autonome de Cotonou, 1992).....	13
Tableau 3 : Répartition régionale de la production du maïs (en milliers de tonnes et en %) de 1970 à 1989.	76
Tableau 4 : Stations utilisées dans cette étude sur la période 1961-1990 (Bénin sud et Bénin nord). Les stations accompagnées d'une astérisque sont celles situées au centre.	86
Tableau 5 : Stations à données complètes de la période 1931-1990 ; (<i>ce sont pour nous les stations dites principales</i>).	87
Tableau 6 : Répartition de l'énergie solaire reçue sur le sol horizontal pour trois stations (D'après Boko, 1988, extrait du projet FICU) ; (moy = moyenne; Tot = total en watts/m ²).	136
Tableau 7 : Précipitations moyennes comparées des périodes 1931-1960 et 1961-1990 sous climat béninien. Les différences significatives au seuil de 5% sont marquées en gris.	159
Tableau 8 : Variabilité des régimes pluviométriques moyens au Bénin entre les périodes 1961-1990 et 1931-1960. (La significativité des résultats est testée aux seuils de 1 et 5 % selon le Test en t de Student).....	166
Tableau 9 : Matrice de départ.....	169
Tableau 10 : Matrice finale	
Tableau 11 : Différences entre les variances de 1931-1960 et de 1961-1990. En grisé, différence de variance significative au seuil de 1% selon le test de Fischer. Le signe + indique une augmentation de la variance. Le signe – indique une diminution de la variance.....	176
Tableau 12 : Les 5 premiers modes de variabilité saisonnière de l'Océan Atlantique (fenêtre spatiale 20°N -20°S) sur la période 1964-1990 d'après une ACP avec rotation Varimax données du fichier Focal).	211
Tableau 13 : Corrélation des TSO atlantiques et CP1 des saisons de pluies dans le Bas-Bénin. (Les corrélations significatives sont suivies d'une astérisque et sont grisées)..	214
Tableau 14 : Répertoire de quelques variétés locales de maïs cultivées dans le sud-Bénin (d'après Adande 1984 et nos enquêtes de terrain).	257
Tableau 15: Etat comparatif des niveaux de constitution des modèles de simulation du bilan hydrique BIP, Ritchie et FAO (d'après Maraoux, 1994).....	267

Tableau 16 : Rapport entre longueur de cycle et RU (réserve utile)	277
Tableau 17: Stations de référence à partir desquelles une interpolation linéaire a été réalisée pour les valeurs d'ETP Penman. (La direction des flèches indiquent la stations	279
Tableau 18 : Dates de semis et de récolte réalistes sous climat béninien. (Déc. = décembre ; Jt. = juillet)	282
Tableau 19° : Dates de semis et de récolte réalistes sous climat soudanien	283
Tableau 20 : Coefficients culturaux proposés par la FAO (1975).....	287
Table au 21 : Evolution des Kc pour le maïs tardif de 120 jours au Bénin.	289
Tableau 22 : Evolution des Kc pour le maïs de 90 jours au Bénin.	290
Tableau 23 : Evolution des Kc pour le maïs extra précoce de 75 jours au Bénin.....	290
Tableau 24 : Détermination des différentes phases végétatives du maïs de 120 jours à partir du référentiel FAO et variabilité des coefficients culturaux.....	291
Tableau 25 : Détermination des différentes phases végétatives du maïs de 90jours à partir du référentiel FAO et variabilité des coefficients culturaux.....	292
Tableau 26 : Détermination des différentes phases végétatives du maïs de 75 jours à partir du référentiel FAO et variabilité des coefficients culturaux	292
Tableau 27 : Récapitulatif des durées des phases végétatives des trois variétés de maïs .	293
Tableau 28 : Taux de croissance démographique régionaux (1979-1992) ; (d'après, INSEA, 1992).....	332
Tableau 29 : Densité de population et pression démographique sur les terres du Bénin (d'après, Banque Mondiale, 1994).....	333

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Indices des importations de produits alimentaires au Bénin (d'après les données du Port Autonome de Cotonou, 1979 et Boko 1988).....	12
Figure 2 : Evolution des nombres-indices des importations de céréales et assimilés, sauf riz au Bénin (1980-1990). (Base 100 = 1980-1990).....	14
Figure 3 : Pays et localisation des stations du zonage de la maïsiculture en Afrique de l'ouest (d'après Technical Center For Agricultural in Rural Cooperation (ACP-CEE), Vol. 1). ..	17
Figure 4 : Localisation du Bénin en Afrique (Tiré du CD-ROM Atlas Géographique base de la NASA)	19
Figure 5 : Les grandes unités topographiques du Bas-Bénin (d'après Adam et Boko, 1993).	21
Figure 6 : Esquisse géomorphologique de la région du Bas-Bénin (d'après, Slansky,1992).	25
Figure 7 : Esquisse simplifiée des différentes catégories de sols du Bénin (d'après Adam et Boko, 1983).	39
Figure 8 : Le Dahomeyan Gap (d'après Jenik, 1994).	47
Figure 9 : Origine, expansion et diffusion du maïs dans le monde (d'après Rouanet, 1984 mais modifié).	68
Figure 10 : Consommation de maïs par habitant en kg/an, période 1979-1984 (d'après Tomety, 1988).	69
Figure 11 : Distribution des stations météorologiques par rapport aux régions du Bénin : Situation en 1990	82
Figure 12 : Réseau météorologique du Bénin (stations sélectionnées dans ce travail toutes périodes confondues ; les stations synoptiques sont représentées en gras et grisées)...	85
Figure 13 : Eléments fondamentaux de la circulation atmosphérique en domaine de mousson pluvieuse déterminant les climats du Bénin	118
Figure 14 : Configuration de la circulation océanique atlantique (d'après Demangeot, 1992).	120
Figure 15 : Régime thermique marin de l'océan atlantique à proximité de Cotonou (d'après Deneau, 1956).....	122
Figure 16 : Relation totaux pluviométriques annuels et altitude au Bénin. (Les stations du nord sont représentées par des points et celles du sud sont matérialisées par des croix).	129

Figure 17: Relation totaux pluviométriques annuels et latitude au Bénin. (Les stations du nord sont représentées par des points et celles du sud sont matérialisées par des croix).	129
Figure 18 : Rythme des températures minimales des six stations synoptiques du Bénin (1971-1990).....	133
Figure 19 : Rythme des températures maximales des six stations synoptiques du Bénin (1971-1990).....	134
Figure 20 : Rythme moyen de l'insolation au Bénin (1971-1990).....	136
Figure 21 : Rythme annuel moyen de la tension de vapeur au Bénin (1971-1990).....	137
Figure 22 : Le rythme pluviométrique moyen du climat béninien durant la période 1931-1990. Grand-Popo est situé sur le littoral au sud-ouest à 6°17 N ; Porto-Novo est situé au sud-est à 6°29 N ; Bohicon est situé sur le plateau de terre de barre à 7°10 N.....	139
Figure 23 : Ambiance atmosphérique du début de la saison de mousson au Bénin-Togo : situation au sol (d'après Klassou, 1996).	142
Figure 24 : Situation météorologique moyenne de mai-juin au sol et en altitude (d'après Klassou, 1996).	143
Figure 25 : Situation atmosphérique moyenne de juillet-août au sol : le FIT atteint sa position la plus septentrionale (d'après Klassou, 1996).....	145
Figure 26 : Situation atmosphérique moyenne de juillet-août en altitude à 1500 mètres, (d'après Klassou, 1996).....	145
Figure 27 : Régimes pluviométriques de transition au Bénin central sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 et 1931-1990.....	163
Figure 28 : Premier mode de variabilité intermensuelle identifié au Bénin à partir des EEOF sur la période 1931-1990 ; CP1 = 21% de la variance. Les signes + (en gras) montrent les corrélations positives significatives. Les signes + montrent les corrélations positives non significatives. Les petits cercles montrent les corrélations négatives non significatives. Les doubles cercles montrent les corrélations négatives significatives.	170
Figure 29 : Le mode 2 de la variabilité pluviométrique intermensuelle au Bénin : les EEOFS sur la période 1931-1990 ; (CP2 = 14% de la variance). Les signes + (en gras) montrent les corrélations positives significatives. Les signes + montrent les corrélations positives non significatives. Les petits cercles montrent les corrélations négatives non significatives. Les doubles cercles montrent les corrélations négatives significatives.	172
Figure 30 : Le mode 3 de la variabilité pluviométrique intermensuelle au Bénin : les EEOFS 1931-1990. (CP3 = 12% de la variance). Les signes + (en gras) montrent les corrélations positives significatives. Les signes + montrent les corrélations positives non significatives. Les petits uniques cercles montrent les corrélations négatives non significatives. Les doubles cercles montrent les corrélations négatives significatives.	173

Figure 31 : Variabilité spatio-temporelle au sud du Bénin au pas de temps annuel (1961-1990). (Obtenue par ACP sans rotation ; (CP1 = 78% de la variance expliquée).....	182
Figure 32 : Variabilité spatio-temporelle des pluies au sud Bénin au pas de temps annuel (1961-1990) (obtenu à partir d'une ACP sans rotation) ; (CP2 = 9% de la variance expliquée).....	184
Figure 33 : Structures spatio-temporelles de la variabilité de la grande saison des pluies au sud du Bénin (CP1 = 66% à partir d'une ACP sans rotation).	185
Figure 34: Structures spatio-temporelles de la variabilité de la grande saison des pluies au sud du Bénin ; (CP2 = 8% à partir d'une ACP sans rotation).	186
Figure 35 : Structures spatio-temporelles de la variabilité de la récession d'août au sud du Bénin ; (CP1 = 84% à partir d'une ACP sans rotation).....	187
Figure 36 : Structures spatio-temporelles de la variabilité de la petite saison des pluies au sud du Bénin ; (CP1 = 66% à partir d'une ACP sans rotation)	188
Figure 37: Les modes de variabilité spatio-temporelle de l'unique saison des pluies du climat soudanien au nord du Bénin (1961-1990) à partir d'une ACP avec rotation Varimax (CP1 = 30% de la variance expliquée ; CP2 = 20% de la variance expliquée; CP3 = 15% de la variance expliquée).....	189
Figure 38 : Evaluation de la tendance sur la CP1 de la saison de mousson en milieu béninien (1961-1990) par la méthode de Man-Kendall.....	193
Figure 39 : Evaluation de la tendance sur la CP1 de la petite saison sèche en milieu béninien (1961-1990) par la méthode de Man-Kendall. (La courbe directe est en trait fin ; la courbe rétrograde est représentée en gras ; le seuil de signification de 95% est en pointillés ; le seuil de signification de 99% est matérialisé par un point tiret).....	194
Figure 40 : Evaluation de la tendance sur la CP1 de la deuxième saison de culture en milieu béninien (1961-1990)) par la méthode de Man-Kendall. (La courbe directe est en trait plein; la courbe rétrograde est représentée en gras ; le seuil de signification au seuil de 95% est en pointillés ; le seuil de signification au seuil de 99% est matérialisé par un point-tiret).	195
Figure 41 : Bas-Bénin : Evaluation de la tendance sur la CP1 au pas de temps annuel en milieu béninien à partir du test de Man Kendall.	196
Figure 42 : Variabilité du nombre de jours de pluie en milieu béninien (1961-1990) avec test de Man-Kendall.	198
Figure 43 : Variabilité du nombre de jours de pluie en milieux soudanien et atakorien (1961-1990) avec test de Mann-Kendall. (La courbe directe est en trait plein; la courbe rétrograde est représentée en gras; le seuil de signification de 95% est en pointillés; le seuil de signification de 99% est matérialisé par un point-tiret).	199

Figure 44 : Variabilité du nombre de jours de pluie à partir de la CP1 de l'unique saison des pluies en milieux soudanien et atakorien (1961-1990) avec test de Mann-Kendall. (La courbe directe est en trait fin ; la courbe rétrograde est représentée en gras; le	200
Figure 45 : Anomalies pluviométriques dans le bassin du Niger au Bénin de 1961 à 1990.	201
Figure 46 : Anomalies pluviométriques dans la région de l'Atakora de 1961 à 1990.	202
Figure 47: Les cycles et périodicités au Bénin au pas de temps annuel et saisonnier (1931-1990) ; (La première ligne = cumul annuel ; deuxième ligne = grande saison des pluies (GSP) ; troisième ligne = la petite saison des pluies (PSP) ; quatrième ligne = petite saison sèche (PSS°). Les points (●) indiquent les stations du réseau pluviométrique qui présentent des pics selon les pas de temps annuel et saisonnier.....	205
Figure 48 : Modes de variabilité spatio-temporelle des TSO sur la période 1964-1990 dans le bassin atlantique Focal (20°N-20°S).....	212
Figure 49 : Relation entre les pluies de la grande saison des pluies au sud du Bénin (avril-juillet) et le champ de vent 1964-1989 à U850 hPa. (Les corrélations significatives aux seuils de 90 et 99% sont représentées en gris clair et en gris foncé ; les corrélations négatives sont indiquées par des isolignes en tiretés ; les liens positifs sont marqués par des traits pleins).	217
Figure 50 : Relation entre les pluies de la grande saison des pluies au sud du Bénin (avril-juillet) et le champ de vent zonal (U200 hPa) durant la période 1964-1989. (Les corrélations significatives aux seuils de 90 et 99% sont représentées en gris clair et en gris foncé ; les corrélations négatives sont indiquées par des isolignes en tiretés ; les liens positifs sont marqués par des traits pleins).....	218
Figure 51 : Relation entre les pluies de la grande saison des pluies au sud du Bénin (avril-juillet) et le champ de vent méridien (V200 hPa) durant la période 1964-1989 ; (Les corrélations significatives aux seuils de 90 et 99% sont représentées en gris clair et en gris foncé ; les corrélations négatives sont indiquées par des isolignes en tiretés ; les liens positifs sont marqués par des traits pleins).....	219
Figure 52 : Relation entre le champ de vent zonal (U200 hPa) et la petite saison sèche au Bénin (1964-1989) ; (Les corrélations significatives aux seuils de 90 et 99% sont représentées en gris clair et en gris foncé; les corrélations négatives sont indiquées par des isolignes en tiretés ; les liens positifs sont marqués par des traits pleins).	220
Figure 53 : Relation entre le champ de vent méridien (V200 hPa) et la petite saison sèche au Bénin (1964-1989) ; (Les corrélations significatives aux seuils de 90 et 99% sont représentées en gris clair et en gris foncé ; les corrélations négatives sont indiquées par des isolignes en tiretés ; les liens positifs sont marqués par des traits pleins).	221
Figure 54 : Variabilité interannuelle des anomalies de températures minimales au Bénin de 1970 à 1990. (Kandi représente la station du climat soudanien dans le haut-Borgou ;	

Parakou représente le sud du Borgou ; Natitingou représente le climat atakorien ; Savè représente le climat de transition ; Bohicon représente les climat béninien sur les plateaux de terre de barre ; Cotonou est représentative du climat côtier)	224
Figure 55 : Anomalies interannuelles des températures maximales au Bénin de 1970 à 1990. (Kandi représente la station du climat soudanien dans le Haut Borgou ; Parakou représente le sud du Borgou ; Natitingou représente le climat atakorien ; Savè représente le climat de transition ; Bohicon représente les climat béninien sur les plateaux de terre de barre ; Cotonou est représentative du climat côtier).	226
Figure 56 : Variabilité interannuelle de l'insolation au Bénin (1970-1990).....	228
Figure 57 : Variabilité interannuelle de la tension de vapeur au Bénin (1970-1990).	230
Figure 58 : Bilan climatique moyen pour dix stations du Bénin sur la période 1971-1980 (d'après Boko, 1988).	232
Figure 59 : Bilans climatiques moyens : diagnostic de la durée des saisons pluviométriques au Bénin au cours de la période 1971-1990	234
Figure 60 : Déficits hydriques en 1977 au Bénin	237
Figure 61 : Déficits hydriques en 1983 au Sud et au nord du Bénin	240
Figure 62 : Déficits hydriques en 1984 au Bénin	241
Figure 63 : Adaptation variétale et cycle pluviométrique saisonnier. CP1 de l'ACP Varimax (16% de la variance). (Une seule culture de maïs de 120 jours s'adapte à ce mode de variabilité).....	260
Figure 64 : Pluies décadaires et calage de deux variétés de maïs (un maïs de 120 jours et peut être aussi un maïs de 90 jours). (La CP2 issue de l'ACP avec rotation Varimax représente 15% de la variance. Mais ici seul un maïs précoce peut être cultivé).....	261
Figure 65 : Base de sondage et de relevé de profil de profondeur racinaire des deux variétés de maïs.	274
Figure 66 : Etude comparative et détermination des Kc de quelques auteurs	285
Figure 67 : Détermination des Kc de maïs pour le Bénin à partir du référentiel FAO	288
Figure 68 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Ouidah sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....	296
Figure 69 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Adjohoun durant les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise	

présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....297

Figure 70 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Grand-Popo sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....299

Figure 71 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Porto-Novvo sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies (120 jours). (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....300

Figure 72 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Pobè sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies (120 jours) ; (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....300

Figure 73 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Sakété sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies (120 jours). (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....301

Figure 74 : Variabilité comparée de l'ETR/ETM (%) à Zagnanado sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au cours de la grande saison des pluies (120 jours). (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur

- 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....302
- Figure 75 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Adjohoun au cours de la petite saison des pluies au Bénin sur les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....303
- Figure 76 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Pobè au cours de la petite saison des pluies au Bénin sur les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....304
- Figure 77 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Sakété cours de la petite saison des pluies sur le plateau de Sakété-Pobè au Bénin sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....304
- Figure 78 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Porto-Novo au cours de la petite saison des pluies au Bénin sur les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....305
- Figure 79 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Ouidah au cours de la petite saison des pluies au Bénin sur le littoral durant les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en

hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....306

Figure 80 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Grand-Popo au cours de la petite saison des pluies au sud-est du Bénin au Bénin sur les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....307

Figure 81 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Allada au cours de la petite saison des pluies au sud de la dépression de la Lama au Bénin sur les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).308

Figure 82 : Situation agroclimatique d'un maïs de 90 jours à Zagnanado au cours de la petite saison des pluies au Bénin sur les périodes 1931-1960-1961-1990. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....309

Figure 83 : Variabilité de l'indice de stress hydrique en milieu atakorien en situation de fréquence cinq et huit années sur dix sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 à Natitingou. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....310

Figure 84 : Variabilité de l'indice de stress hydrique en milieu atakorien en situation de fréquence cinq et huit années sur dix sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 à Djougou. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années

sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....311

Figure 85 : Variabilité de l'indice de stress en milieu soudanien en situation de fréquence cinq et huit années sur dix sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 à Kandi. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....312

Figure 86 : Variabilité de l'indice de stress hydrique en milieu soudanien en situation de fréquence cinq et huit années sur dix sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 à Parakou. (Les histogrammes en blanc sur la période 1931-1960 cinq années sur 10. Les histogrammes de couleur grise présentent la situation agroclimatique cinq années sur dix sur la période 1961-1990 ; les histogrammes en noir présentent la situation agroclimatique huit années sur 10 durant la période 1931-1960 ; les histogrammes en hachures présentent la situation agroclimatique dans 80% des cas sur la période 1961-1990).....312

Figure 87 : Variabilité spatio-temporelle du taux de satisfaction des besoins en eau de maïs de 120 jours au Bénin sur la normale période 1931-1990 à la phase végétative ; CP1 = 23% de la variance et CP2 = 18% de la variance ; les grandes croix gras correspondent aux valeurs propres des vecteurs corrélés positivement et significatifs ; les cercles avec un petit losange correspondent aux valeurs de vecteurs propres corrélés négativement et significatifs.....314

Figure 88 : Variabilité spatio-temporelle du taux de satisfaction des besoins en eau de maïs de 120 jours au Bénin sur la normale période 1931-1990 à la floraison ; CP1 = 18% de la variance ; CP2 = 12% de la variance ; les grandes croix gras correspondent aux valeurs propres des vecteurs corrélés positivement et significatifs ; les cercles avec un petit losange correspondent aux valeurs de vecteurs propres corrélés négativement et significatifs.....316

Figure 89 : Variabilité spatio-temporelle du taux de satisfaction des besoins en eau de maïs de 120 jours au Bénin sur la normale période 1931-1990 au stade de formation du grain ; CP1 = 49% de la variance ; CP2 = 10% de la variance ; les grandes croix gras correspondent aux valeurs propres des vecteurs corrélés positivement et significatifs ;

les cercles avec un petit losange correspondent aux valeurs de vecteurs propres corrélés négativement et significatifs318

Figure 90 : Variabilité spatio-temporelle du taux de satisfaction des besoins en eau de maïs de 120 jours au Bénin sur la normale période 1931-1990 à la phase de maturité ; CP1 = 41% de la variance ; CP2 = 11% de la variance ; les grandes croix gras correspondent aux valeurs propres des vecteurs corrélés positivement et significatifs ; les cercles avec un petit losange correspondent aux valeurs de vecteurs propres corrélés négativement et significatifs.....320

Figure 91 : Calendrier agricole d'adaptation à la variabilité pluviométrique.....324

Figure 92 : Calendrier agricole réadapté compte tenu de la variabilité pluviométrique (d'après enquêtes de terrain).325

Figure 93 : Pourcentage du maïs local par rapport au maïs amélioré : cas dans le département de l'Atlantique de 1984 à 1992 (d'après, Totognon, 1994).328

LISTE DES PHOTOS

Photo 1: Culture de case dans le Borgou. Cette photo a été prise à Banikoara au nord-ouest en 1996.....	74
Photo 2 : Relevé de profil de profondeur racinaire de quelques variétés de maïs au Bénin. Cette photo a été prise à Niaouli dans le sud du pays	275
Photo 3: Relevé de profil de profondeur racinaire de quelques variétés de maïs au Bénin. Cette photo a été prise à Padé dans le Borgou.	275
Photo 4 : Fragilité écologique en zone cotonnière au Bénin. (Cette photo a été prise à Kalalé dans le Borgou au cours de la saison des pluies).....	331
Photo 5 : Jachère de Mucuna utilis (photo a été prise à Détohou dans le Zou)	335
Photo 6 : la culture attelée dans un champ de maïs de 120 jours dans le Borgou. Cette photo a été prise à Padé en 1996.....	339
Photo 7 : Culture du maïs en association avec le coton. Cette photo a été prise dans le Zou à Glazoué en 1996	340

TABLES DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE.....	5
CHAPITRE I - PROBLEMATIQUE : CONTEXTES ET OBJECTIFS.....	7
SECTION 1. : CONTEXTES ET POSITION DU SUJET	7
SECTION 2. : LES OBJECTIFS.....	16
CHAPITRE II : PRESENTATION DU DOMAINE D'ETUDE : LES FONDEMENTS DE LA MAÏSICULTURE AU BENIN.....	19
SECTION 1. : LES COMPOSANTES NATURELLES DU MILIEU : UN ATOUT MAÏSICOLE.....	19
1.1. <i>Les unités de relief et la structure géologique.....</i>	20
1.1.1. Le relief.....	20
1.1.1.1. La plaine côtière et les plaines alluviales et deltaïques	21
1.1.1.2. Les plateaux	24
1.1.1.2.1. Les plateaux de terre de barre du Bas-Bénin	24
1.1.1.3. La dépression de la Lama	25
1.1.1.4. Les plateaux au nord de la dépression de la Lama	26
1.1.1.5. La pénéplaine du Bénin	26
1.1.1.6. Le plateau de Kandi	27
1.1.1.7. La Chaîne de l'Atakora.....	28
1.2. <i>L'hydrographie.....</i>	29
1.2.1. Les cours d'eau du Bénin.....	30
1.2.1.1. Les cours d'eau du bassin sud	30
1.2.1.1.1. L'Ouémé.....	30
1.2.1.1.2. Le Mono	31
1.2.1.1.3. Le Couffo	31
1.2.1.1.4. Le Zou	32
1.2.1.2. Les cours d'eau du bassin nord.....	32
1.2.1.2.1. Le Pendjari	32
1.2.1.2.2. Le Koumagou et le Yéripao.....	32
1.2.1.2.3. Le Niger	33
1.2.1.2.4. Le Mékrou	34
1.2.1.2.5. L'Alibori	34
1.2.1.2.6. La Sota	35
1.2.2. Les lacs et lagunes du Bénin	35
1.2.2.1. Le Djessin.....	35
1.2.2.2. La lagune de Porto-Novo.....	36
1.2.3. Les "lacs"	36
1.2.3.1. Le "lac" Nokoué.....	36
1.2.3.2. Le "lac" Ahémé	37
1.2.3.3. Les lacs secondaires.....	37

SECTION 2. : LES PRINCIPAUX TYPES DE SOLS ET LEURS APTITUDES AGRONOMIQUES, SUPPORTS DES CIVILISATIONS MAÏSICOLES.....	37
2.1. Les sols minéraux bruts et peu évolués	40
2.2. Les sols fersialitiques	41
2.2.1. Les sols sur terre de barre	41
2.2.2. Les sols fersialitiques appauvris indurés sur grès.....	42
2.3. Les vertisols (ou sols hydromorphes à gley)	42
2.3.1. Les vertisols sans drainage externe	42
2.3.2. Les vertisols à drainage externe	42
2.4. Les sols hydromorphes ou sols à pseudogley	43
2.5. Les sols ferrugineux tropicaux	43
2.5.1. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés bien drainés sur granites leucocrates	44
2.5.2. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés à engorgement de profondeur	44
2.5.3. Les sols ferrugineux tropicaux lessivés mal drainés	45
SECTION 3. : LES PAYSAGES VÉGÉTAUX : LE BÉNIN UN PAYS EN VOIE DE SAVANISATION ACCÉLÉRÉE ?	46
3.1. Le couvert végétal de la plaine côtière.....	48
3.1.1. Le bush arbustif	48
3.1.2. La savane herbeuse et la prairie aquatique.....	49
3.1.3. La mangrove	49
3.2. Les formations végétales des plateaux de terre de barre dans le Bas-Bénin	50
3.2.1. Les forêts semi-décidues.....	50
3.2.2. Les forêts sèches	51
3.2.3. La forêt de Penessoulou	51
3.2.3. Les galeries forestières.....	52
3.2.4. Les jachères arbustives et la palmeraie des plateaux du Bas-Bénin.....	52
3.2.4. Les savanes des plateaux	52
3.3. Le paysage végétal du Moyen Bénin et du Borgou.....	54
3.3.1. La couverture végétale du Moyen-Bénin	54
3.3.2. La couverture végétale de la zone soudanienne du Bénin.....	54
SYNTHESE	55
SECTION 4. : LES GROUPES SOCIO-CULTURELS DU BÉNIN	55
4.1. Les groupes socio-culturels du Bénin méridional et central et leur mise en place	56
4.2. Le peuplement du Bénin septentrional	57
4.2.1. Le peuplement de la vallée du Niger au Bénin	57
4.2.2. Les autres groupes socio-culturels du Bénin septentrional	57
SECTION 5. : LES CIVILISATIONS AGRAIRES DU BÉNIN PAR UNITÉS DE PAYSAGES ET LES DIFFÉRENTES FORMES D'OCCUPATION DU SOL	58
5.1. Le paysage agraire fon.....	58
5.2. Les paysages agraires adja et aïzo.....	59
5.3. Les paysages agraires mahi, nago et yorouba	59
5.4. Le paysage agraire haatonou ou hāriba	59
5.5. Le paysage agraire dendi et de la plaine de l'Oti	60

6. <i>Le paysage agraire otamari</i>	60
CHAPITRE III : HISTORIQUE ET ENJEUX DE L'AGRICULTURE BÉNINOISE , PLACE DE LA CULTURE DU MAÏS DANS L'ÉCONOMIE DU BÉNIN	61
SECTION 1. : BREFS HISTORIQUE ET PRÉSENTATION DE L'ÉCONOMIE BÉNINOISE : DU PASSÉ AU PRÉSENT	61
SECTION 2. : L'AGRICULTURE BÉNINOISE ET LA FILIÈRE MAÏS.....	64
SYNTHÈSE.....	66
CHAPITRE IV. LE MAÏS, UNE CULTURE PLUVIALE A HISTOIRE CONTROVERSEE	67
SECTION 1. : LE MAÏS, UNE CULTURE À LONGUE HISTOIRE : POLÉMIQUE SUR SON ORIGINE GÉOGRAPHIQUE ET SA DIFFUSION	67
SECTION 2. : L'ORIGINE BOTANIQUE DU MAÏS, CONTROVERSES SCIENTIFIQUES	70
SECTION 3. : LES CAUSES DE L'INTRODUCTION DU MAÏS AU BÉNIN.....	71
SECTION 4. : ÉVOLUTION ET VARIABILITÉ INTERANNUELLE DES PRODUCTIONS DU MAÏS	75
SYNTHÈSE.....	77
CHAPITRE V - LES DONNÉES : CRITIQUE, FIABILITÉ ET VALIDITÉ	80
SECTION 1. : CRITIQUE DU RÉSEAU D'OBSERVATIONS MÉTÉOROLOGIQUES ET CRITÈRES DE CHOIX DES STATIONS	80
1.1. <i>Historique du réseau ASECNA en République du Bénin</i>	80
1.2. <i>Justification du choix de la période d'étude et des stations étudiées</i>	83
1.2.1. Les raisons du choix des séries 1931-1960, 1961-1990 et 1931-1990	83
1.2.2. Les raisons du choix des stations	84
1.3. <i>Le fichier pluviométrique</i>	85
1.4. <i>Le fichier Focal</i>	88
1.5. <i>Le fichier ETP et le fichier Climato du Bénin</i>	90
1.5.1. Le fichier ETP.....	90
1.5.2. Le fichier Climato.....	90
1.6. <i>Le fichier des productions agricoles</i>	90
1.7. <i>Les données de terrain et l'enquête</i>	91
CHAPITRE VI - MÉTHODES D'ÉTUDE DIAGNOSTIQUE DU CLIMAT ET APPROCHES AGROCLIMATOLOGIQUES	92
SECTION 1. : L'ANALYSE STATISTIQUE DES SÉRIES STATIONNELLES.....	92
1.1. <i>Le comblement des manques et la validation des données pluviométriques : la méthode des moindres carrés</i>	92
1.2. <i>La moyenne arithmétique : paramètre de tendance centrale, représentativité et signification</i>	93
1.3. <i>Les paramètres de dispersion</i>	94
SECTION 2. : LES OUTILS DE CARACTÉRISATION DE L'ÉVOLUTION TEMPORELLE : L'ANALYSE SPECTRALE ET LA RECHERCHE DE TENDANCES	95
2.1. <i>L'analyse spectrale</i>	96
2.2. <i>Identification des tendances</i>	97
2.3. <i>La mise en évidence du phénomène de persistance climatique: les auto-corrélations</i>	100

SECTION 3. : LA RECHERCHE DE LA DÉPENDANCE STATISTIQUE : LES COEFFICIENTS DE CORRÉLATION LINÉAIRE	101
SECTION 4. : LE TEST DE STUDENT ET LES ANALYSES COMPOSITTES	102
4.1. <i>Le test de Student</i>	102
4.2. <i>L'analyse composite</i>	103
SECTION 5. : L'ANALYSE FRÉQUENTIELLE.....	104
SECTION 6. : LES MÉTHODES FACTORIELLES.....	105
6.1. <i>Les analyses en composantes principales (ACP)</i>	105
6.2. <i>La classification automatique</i>	107
SECTION 7. : LES APPROCHES AGROCLIMATOLOGIQUES	108
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.....	112
DEUXIEME PARTIE	115
CHAPITRE I - LE CLIMAT MOYEN DU BENIN DE 1931-1990 : UN DES FACTEURS	
FONDAMENTAUX DE LA MAÏSICULTURE	117
<i>Introduction</i>	117
SECTION I. : ENVIRONNEMENTS ATMOSPHERIQUE ET OCÉANIQUE RÉGIONAUX.....	118
1.1. <i>Rappels sur les centres d'action atmosphérique impliqués dans la climatologie du Bénin</i>	118
1.2. <i>Le Bénin et l'océan Atlantique</i>	119
1.3. <i>Les mécanismes de la pluviogenèse et les perturbations atmosphériques au Bénin</i>	122
SECTION 2. : LES COMPOSANTES DU CLIMAT DU BÉNIN : CHAMPS PLUVIOMÉTRIQUES MOYENS ANNUELS ET RYTHMES SAISONNIERS.....	124
2.1. <i>Les champs pluviométriques moyens annuels du Bénin et l'ordonnement des coordonnées géographiques</i>	126
2.2. <i>Les champs moyens saisonniers du Bénin (1931-1990)</i>	130
2.2.1. <i>Les champs pluviométriques moyens saisonniers du sud-Bénin</i>	130
2.2.2. <i>Les champs pluviométriques moyens saisonniers du nord-Bénin</i>	131
2.3. <i>Les rythmes moyens des autres paramètres climatiques du Bénin</i>	132
2.3.1. <i>Le rythme saisonnier moyen des températures minimales au Bénin</i>	132
2.3.2. <i>Le rythme saisonnier moyen des températures maximales au Bénin</i>	134
2.3.3. <i>Le rythme saisonnier moyen de l'insolation au Bénin</i>	135
2.3.5. <i>Le rythme saisonnier de la tension de vapeur au Bénin</i>	137
SECTION 3. : LES TYPES CLIMATIQUES ET LES SAISONS AGRI-PLUVIOMÉTRIQUES.....	138
3.1. <i>Le climat béninien : caractérisation et originalité</i>	138
3.1.1. <i>La grande saison des pluies (saison de mousson d'été boréal)</i>	141
3.1.2. <i>La petite saison sèche : l'arrêt momentané des pluies, déroulement et mécanismes physiques</i>	144
3.1.3. <i>La petite saison des pluies</i>	146
3.1.4. <i>La grande saison sèche dans le sud du Bénin</i>	147
3.2. <i>Le climat soudanien du Bénin : présentation et articulation</i>	148
3.2.1. <i>Une unique saison des pluies</i>	148
3.2.2. <i>La saison sèche soudanienne au nord-Bénin</i>	150

<i>Conclusion sur le climat moyen du Bénin</i>	154
CHAPITRE II : LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE AU BENIN DE 1931 A 1990	156
<i>Introduction</i>	156
SECTION 1. : COMPARAISON DES NORMALES PLUVIOMÉTRIQUES 1931-1960 ET 1961-1990.....	158
1.1. <i>Les cumuls annuels</i>	158
1.2. <i>Variabilité des régimes pluviométriques au Bénin : comparaison des normales 1931-1960 et 1961-1990</i>	160
1.2.1. <i>Variabilité des régimes pluviométriques bimodaux</i>	160
1.2.2. <i>Variabilité des régimes pluviométriques unimodaux</i>	164
1.2.3. <i>Bilan de la variabilité des régimes pluviométriques au Bénin 1961-1990-1931-1960</i>	164
1.3. <i>Les modes de variabilité intermensuelle au Bénin</i>	167
<i>SYNTHESE</i>	173
1.4. <i>La variabilité relative au Bénin</i>	174
1.4.1. <i>Situation au pas de temps annuel dans le Bas-Bénin</i>	174
1.4.2. <i>La variabilité relative saisonnière au Bénin</i>	175
1.5. <i>La variabilité temporelle intra-saisonnière des séquences sèches au Bénin</i>	177
1.5.1. <i>Justification et concept de sécheresse</i>	178
1.5.2. <i>Etude comparée des séquences sèches sur les périodes 1931-1960 et 1961-1990 au Bénin</i>	179
SECTION 2. LA VARIABILITÉ INTERANNUELLE RÉCENTE DES PRÉCIPITATIONS (1961-1990)	181
2.1. <i>Les structures spatiales de la variabilité au pas de temps annuel de 1961 à 1990</i>	182
2.1.2. <i>La variabilité pluviométrique interannuelle des saisons au sud du Bénin</i>	184
2.1.2.1. <i>Les structures spatiales de la variabilité de la grande saison des pluies du climat béninien</i>	184
2.1.2.2. <i>La variabilité du champ pluviométrique du Bénin méridional pendant la récession d'août</i>	187
2.1.2.3. <i>Les structures spatiales de la variabilité de la petite saison des pluies au sud du Bénin</i>	188
2.1.3. <i>Les modes de variabilité de la saison des pluies du climat soudanien</i>	189
2.2. <i>Vers une péjoration climatique ?</i>	191
2.2.1. <i>La péjoration climatique au sud du Bénin</i>	192
2.2.1.1. <i>Identification des tendances dans l'évolution temporelle des précipitations</i>	192
2.2.1.2. <i>Variabilité du nombre de jours de pluie en milieu béninien : un indicateur de péjoration climatique pour la production agricole</i>	197
2.2.2. <i>Variabilité temporelle du nombre de jours de pluie en milieu soudanien</i>	198
<i>SYNTHESE</i>	203
2.3. <i>La composante cyclique de la variabilité pluviométrique au Bénin</i>	203
SECTION 3. ELÉMENTS D'EXPLICATION DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE.....	206
3.1. <i>Les essais d'explication populaire de la variabilité pluviométrique au Bénin : déterminisme ou fatalité ?</i>	207
3.2. <i>Les téléconnexions avec les champs océaniques</i>	209
3.2.1. <i>Les modes de variabilité des températures de surface océaniques atlantiques (1964-1990)</i>	210
3.2.2. <i>Corrélations entre les champs océaniques et les champs pluviométriques</i>	214
3.3. <i>Téléconnexions avec les champs atmosphériques</i>	216
3.3.1. <i>Relations entre la grande saison des pluies (GSP) du Bas-Bénin et la dynamique de l'atmosphère à 850 hPa</i>	216

3.3.2 Relations entre la grande saison des pluies (GSP) du bas-Bénin et la dynamique de l'atmosphère à 200 hPa	217
3.3.2. Les précipitations de la petite saison sèche et le vent à 200 hPa	220
SYNTHESE	222
SECTION 4. VARIABILITÉ DES AUTRES COMPOSANTES DU CLIMAT	222
4.1. <i>La variabilité des températures de surface</i>	223
4.1.1. Les températures minimales	223
4.1.2. Variabilité des températures maximales au Bénin	225
4.2. <i>La variabilité interannuelle de l'insolation</i>	227
4.3. <i>La répartition temporelle des anomalies interannuelles de tension de vapeur</i>	229
SYNTHESE	230
SECTION 5 : ANALYSE DU BILAN CLIMATIQUE DU BÉNIN DE 1970 À 1990	231
5.1. <i>Variabilité des bilans climatiques moyens saisonniers de 1970 à 1990</i>	231
SYNTHESE	236
5.2. <i>Analyse de quelques situations de sécheresse au Bénin à partir du bilan climatique potentiel sur la période 1971-1990</i>	236
5.2.1. Les déficits hydriques en 1977	236
5.2.2. Les déficits hydriques en 1983 au Bénin	239
5.2.3. Les déficits hydriques en 1984 au Bénin	241
SYNTHESE	242
<i>Conclusion de l'analyse de la variabilité climatique au Bénin</i>	242
RÉSULTATS MAJEURS	242
TROISIEME PARTIE	246
<i>Introduction et position du problème</i>	248
CHAPITRE I: L'EVALUATION DES CONTRAINTES ET DES RISQUES LIES A LA MAÏSCULTURE AU BÉNIN	250
SECTION 1. : LES NOTIONS DE RISQUE ET DE CONTRAINTE : LE CADRE CONCEPTUEL	250
SECTION 2. : LES BESOINS EN EAU DES CULTURES : GÉNÉRALITÉS	252
2.1. <i>Les besoins en eau des cultures</i>	253
2.1.1. L'évapotranspiration potentielle	253
2.1.2. L'évapotranspiration maximale (ETM)	253
2.1.3. L'évapotranspiration réelle (ETR)	254
2.1.4. Le coefficient cultural (Kc)	255
2.2. <i>Définition et équation du bilan hydrique des cultures</i>	255
2.3. <i>Généralités sur l'eau dans le sol</i>	255
2.4. <i>Les paramètres de la plante intervenant dans son alimentation hydrique</i>	256
SECTION 3. LA DIVERSITÉ VARIÉTALE AU BÉNIN : EST-CE UNE RÉPONSE À LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE ET AUX CONTRAINTES PÉDOPHYTOLOGIQUES ?	257
3.1. <i>Les variétés paysannes</i>	257
3.2. <i>Les variétés améliorées précoces au Bénin</i>	257

3.3. Les variétés améliorées tardives.....	259
3.4. Les saisons pluviométriques comme critères de choix de deux variétés de maïs (cycle long et cycle court).....	260
CHAPITRE II : DIAGNOSTIC HYDRIQUE DE LA CULTURE DU MAÏS.....	263
SECTION 1. : LA DIVERSITÉ DES OUTILS DE DIAGNOSTIC DU BILAN HYDRIQUE	263
SECTION 2. : LE MODÈLE DE SARRA : JUSTIFICATIONS DU CHOIX ET DESCRIPTION.....	268
2.1. Les raisons du choix du modèle SARRA.....	268
2.2. Le modèle agroclimatique SARRA : description et fonctionnement.....	269
2.2.1. Qu'entend-on par SARRABIL ?.....	269
2.2.2. Le fonctionnement de SARRABIL.....	270
SECTION 3. : L'ENQUÊTE, LE RENSEIGNEMENT DES PARAMÈTRES DU MODÈLE, ET DÉFINITIONS DES HYPOTHÈSES RÉALISTES.....	272
3.1. L'enquête.....	273
3.2. Les éléments des sols et le choix des réserves utiles (RU).....	276
3.3. Les paramètres climatiques (P et ETP).....	277
3.4. Les paramètres de la plante : la TZB, la DMR et les dates de semis	280
3.5. Détermination des coefficients culturaux pour des variétés de maïs de 75, 90 et 120 jours au Bénin.....	284
3.5.1. Le coefficient cultural (Kc) : diversité méthodologique	284
3.5.2. La méthode FAO : principes, démarches et limites	285
3.5.2.1. Les principes de la méthode.....	285
3.5.2.2. Etude critique de la détermination des périodes végétatives FAO et les limites de la méthode.....	287
3.6. Les raisons de la modification de la méthode FAO pour le Bénin et les résultats	288
3.7. Les différentes phénophases et la variation des coefficients culturaux.....	291
3.8. La diversité des situations et les choix réalistes.....	294
SECTION 4. : L'INDICE DE SATISFACTION DES BESOINS EN EAU DU MAÏS DE 120 ET DE 90 JOURS PAR PHÉNOPHASES SUR LES PÉRIODES 1931-1960 ET 1961-1990.....	295
4.1. Le cas du maïs de 120 jours selon les différentes phénophases durant la grande saison des pluies dans le sud du Bénin.....	295
4.1.1. L'indice de satisfaction des besoins en eau à la <u>période végétative</u>	295
4.1.2. Situation agroclimatique à la <u>floraison</u> : l'ETR/ETM (%) durant les périodes 1931-1960 et 1961-1990.....	295
4.1.3. Situation au stade de formation du grain :.....	297
4.1.4. L'indice de satisfaction des besoins en eau à la période de mûrissement	299
4.2. Caractérisation du stress hydrique du maïs précoce de 90 jours sous climat béninien durant les périodes 1931-1960 et 1961-1990.....	302
4.2.1. L'indice de satisfaction des besoins en eau à la <u>période végétative</u>	303
4.2.2. La situation agroclimatique du maïs de 90 jours à la <u>floraison</u>	307
4.2.3. Le stress hydrique à la formation du grain et à la période de mûrissement.....	308
4.2.4. Variabilité de l'indice de stress hydrique du maïs de 120 jours dans le nord du Bénin sous climat soudanien	310
SECTION 5. : STRUCTURES SPATIALES ET VARIABILITÉ INTERANNUELLE DE L'INDICE DE SATISFACTION DES BESOINS EN EAU DU MAÏS DE 120 JOURS PAR PHÉNOPHASES	313

5.1. Variabilité dans le temps et dans l'espace de l'indice de stress hydrique ETR/ETM (%) à la <u>période végétative</u>	313
5.2. Variabilité spatio-temporelle de l'indice de satisfaction des besoins en eau du maïs tardif de 120 jours à la <u>floraison</u>	315
5.3. Variabilité spatio-temporelle de l'indice de stress ETR/ETM (%) du maïs tardif de 120 jours à la période de <u>formation du grain</u>	317
5.4. Variabilité dans le temps et dans l'espace de l'indice de satisfaction des besoins en eau du maïs tardif de 120 jours à la période de <u>mûrissement</u>	319
SYNTHESE	321
CHAPITRE III : LES CONSEQUENCES SOCIO-ENVIRONNEMENTALES LIEES A LA MAÏSICULTURE AU BENIN	323
SECTION 1. : LES STRATÉGIES ET TECHNIQUES ANTI-RISQUES DES AGRICULTEURS.....	324
SECTION 2. : LE CHOIX VARIÉTAL ET LE POUVOIR D'ACHAT PAYSAN	326
SECTION 3. : LA MODIFICATION DU SYSTÈME DE CULTURE.....	329
SECTION 4. : LA MAÏSICULTURE ET LES CONTRAINTES PÉDO-DÉMOGRAPHIQUES AU BÉNIN	330
SECTION 5. : LA RECONVERSION PROFESSIONNELLE DES PAYSANS ET LA VIOLATION DU SACRÉ : EST-CE UNE SOLUTION À LA PÉJORATION CLIMATIQUE ET AU RISQUE AGROCLIMATIQUE?	336
SECTION 6. : LE PAQUET TECHNOLOGIQUE MAÏSICOLE ET LA RÉTICENCE DES PAYSANS	337
<i>Conclusion troisième partie</i>	337
CONCLUSION GENERALE	342
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	350
LISTE DES TABLEAUX	370
LISTE DES ILLUSTRATIONS	372
LISTE DES PHOTOS	382

Imprim' Service



IMPRIM' SERVICE

90, rue de Mirande

21000 DIJON

Tél & Fax: 80 65 30 74

