

REPUBLIQUE DU BENIN

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI



ECOLE NATIONALE D'ECONOMIE APPLIQUEE ET DE MANAGEMENT

**Mémoire de fin de formation du cycle II pour l'obtention
du diplôme d'Ingénieur Statisticien Économiste**

Option : Économie appliquée

Filière : Statistique

THÈME :

**ANALYSE DE L'IMPACT DE L'ÉVOLUTION DES
VARIABLES CLIMATIQUES SUR L'AGRICULTURE
VIVRIÈRE AU BENIN**

RÉALISÉ ET SOUTENU PAR :

Patrice D. HOUNGA

SOUS LA DIRECTION DE :

M. Assogba HODONOU
Statisticien économiste

Année Académique : 2010-2011

L'ÉCOLE NATIONALE D'ÉCONOMIE APPLIQUÉE ET DE MANAGEMENT (ENEAM) N'ENTEND DONNER AUCUNE APPROBATION NI IMPROBATION AUX OPINIONS ÉMISES DANS CE MÉMOIRE. CES OPINIONS DOIVENT ÊTRE CONSIDÉRÉES COMME PROPRES A SON AUTEUR.

DEDICACES

À

- *Mon défunt père ;*
- *Toi maman pour ton amour et tes prières ;*
- *Toi Judith et à nos enfants Aryel et Abel pour votre amour et soutien sans faille.*

REMERCIEMENTS

Le travail que nous présentons n'a été rendu possible que par le soutien et les conseils de personnes dont nous voudrions qu'elles trouvent ici nos remerciements.

Nous voudrions remercier en premier lieu M. Assogba HODONOU notre Maître de Mémoire, qui nous a guidé tout au long de ce travail et qui n'a cessé d'être à notre écoute pour toutes les fois où nous avons sollicité son aide.

Nous voudrions aussi remercier MM. Carlos OGOUYANDJOU, Maître Assistant des Universités, Raïmi ESSESSINO, Statisticien Economiste à l'INSAE, Edgard DIDAVI, Chef service Statistique au MAEP, Alexis ZANNOU, statisticien Economiste et Hermann AZA-GNADJI Ingénieur Agronome pour leurs conseils.

Nous voudrions également remercier nos frères et sœurs et notre belle famille pour leur amour et soutien sans faille, les frères Franck, Clément et Arnaud SAIZONOU pour leur soutien, les collègues Kabirou AROUNA et Hypolite AGBESSI pour leur collaboration.

Nous remercions également l'ensemble du corps professoral de la filière Statistique (niveau Master) de l'Ecole Nationale d'Economie Appliquée et de Management (ENEAM), ex INE, qui a assuré notre formation et qui, à travers les pratiques méthodologiques, nous a donné le goût de la recherche fondamentale. Veuillez bien trouver ici le témoignage de notre profonde reconnaissance.

Nous ne voudrions pas non plus oublier tous ceux qui nous ont aidés tout au long de notre formation et durant ce travail de fin d'études. Qu'ils retrouvent en ces lignes l'expression de nos remerciements.

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ASECNA	Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar
CRDI	Centre de Recherche pour le Développement International
DPP	Direction de la Programmation et de la Prospective
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MEPN	Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature
MAEP	Ministère de l'Agriculture de l'Elevage et de la Pêche
OMD	Objectifs du Millénaire pour le Développement
ONASA	Office Nationale d'Appui à la Sécurité Alimentaire
PANA	Programme d'Action National aux de l'Adaptation aux Changements Climatiques
RGPH	Recensement Général de la Population et de l'Habitat

Liste des tableaux

Tableau 1 : Information sur les données brutes	22
Tableau 2 : Notations des variables	22
Tableau 3: Communes retenues pour le calcul de l'indice de Hallet.....	25
Tableau 4 : Spécialisation en maïs	36
Tableau 5: Spécialisation en igname	36
Tableau 6 : Spécialisation en manioc	36
Tableau 7 : Spécialisation en riz.....	36
Tableau 8 : Les spécialités communales.....	37
Tableau 9 : Stations météorologiques retenues par culture	38
Tableau 10 : Résultats de l'étude de la tendance du rendement du maïs.....	39
Tableau 11 : valeur de R^2 et RMSE (rendement du maïs)	39
Tableau 12 : Résultats de l'étude de la tendance du rendement de l'igname.....	40
Tableau 13 : Rendement du riz de la commune de Boucoumbé.....	40
Tableau 14 : Résultats de l'étude de la tendance du rendement du manioc.....	41
Tableau 15 : Valeur de R^2 et de RMSE (rendement du manioc)	41
Tab.16.1- Validation des modèles de prévision de rendement du riz.....	45
Tab.16.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.	46
Tab.17.1 - Validation des modèles de prévision du rendement de l'igname.....	47
Tab.17.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.	47
Tab.18.1 - Validation des modèles de prévision de rendement de l'igname	48
Tab.18.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.	49
Tab.19.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du manioc	49
Tab.19.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.	50
Tab.20.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du manioc	51
Tab.20.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.....	51
Tab.21.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du manioc	52
Tab.21.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.	53
Tab.22.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du manioc	53
Tab.22.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.	54
Tab.23.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du maïs	55
Tab.23.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.	55
Tab.24.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du maïs	56
Tab.24.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.	57
Tab.25.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du maïs	57
Tab.25.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.	58
Tab.26.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du maïs	59
Tab.26.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.	59

Liste des figures

Fig 1 : Calendrier cultural en fonction de la zone agro-écologique	29
Fig 2 : Evolution des productions vivrières (1995-2010)	32
Fig 3 : Evolution de la superficie emblavée (1995-2010)	33
Fig 4 : Evolution des rendements des principales cultures vivrières (1995-2010) .	34
Fig 5: Evolution de la pluviométrie (1995-2010)	34
Fig.6 –Comparaison de rendements du riz observés (plein) et simulés (pointillé)	46
dans la commune de Boucoumbé	46
Fig.7 –Comparaison rendements de l'igname observés (plein) et simulés (pointillé) 47	
dans la commune de Glazoué.....	47
Fig.8 –Comparaison rendements de l'igname observés (plein) et simulés (pointillé)	
dans la commune de Savè.....	48
Fig. 9 –Comparaison rendements du manioc observés (plein) et simulés (pointillé	
dans la commune d'Abomey.....	50
Fig. 10 –Comparaison rendements du manioc observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune	
d'Agbangnizoun	51
Fig. 11 –Comparaison rendements du manioc observés (plein) et simulé (pointillé) dans la commune	
de Bohicon.....	52
Fig. 12 –Comparaison rendements du manioc observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune	
de Zakpota	54
Fig. 13 –Comparaison rendements du maïs observés (plein) et simulés (pointillé) dans	
la commune de Banikoara.....	55
Fig. 14 –Comparaison rendements du maïs observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune	
Ségbana	56
Fig. 15 –Comparaison rendements du maïs observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune de	
Kandi	58
Fig. 16 –Comparaison rendements du maïs observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune de	
Gogounou.....	59

RÉSUMÉ

L'agriculture béninoise à l'instar de celles de la plupart des pays subsahariens est largement tributaire des conditions climatiques et est le principal secteur de l'économie béninoise. Elle occupe 70% de la population active et contribue pour 36% du PIB et 88% des recettes d'exportation à hauteur de 15% aux recettes de l'Etat (MEPN, 2008). Actuellement l'agriculture vivrière assure l'autosuffisance de la population. Les cultures vivrières (maïs, sorgho, fonio, mil, riz) fournissent l'essentiel des céréales consommées au Bénin. Cependant, pour répondre aux besoins d'une population en constante augmentation, il est impérieux de promouvoir des systèmes appropriés de production agricole aux fins d'assurer l'autosuffisance et la sécurité alimentaire et nutritionnelle.

L'objectif général de cette étude est d'analyser l'impact de l'évolution des variables climatiques sur les rendements agricoles. Plus spécifiquement, il a été question d'une part, d'analyser la répartition sur le rendement des variables climatiques dans le temps et d'autre part, d'estimer ces relations. Ce faisant, il s'est agi d'utiliser le modèle de Fisher basé sur des indicateurs synthétiques des variables climatiques pour la prévision des rendements agricoles par la méthode de régression multiple stepwise.

Cette étude qui constitue une première approche dans la prévision des rendements des principales cultures vivrières (le maïs, le riz, le manioc et l'igname), montre que les relations trouvées entre les rendements à l'échelle communale et les variables explicatives fournissent une bonne prévision des rendements de ces cultures avec un $R^2 = 0,80$ et une erreur de prédiction faible (RMSE = 65,17 kg/ha) pour le maïs, $R^2 = 0,78$ et RMSE = 966 kg/ha pour le manioc, $R^2 = 0,80$ et RMSE = 1153 kg/ha pour l'igname et enfin $R^2 = 0,70$ et RMSE = 93 kg/ha pour le riz.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Problématique.....	3
1.2 Objectifs de l'étude.....	5
1.3 Hypothèses	5
1.4 Revue de littérature	6
MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE	11
2.1 Méthodes d'analyse.....	11
2.2 Données utilisées.....	19
2.3 Calendrier culturel	27
RÉSULTATS ET ANALYSES	30
3.1 Production agricole béninoise.....	30
3.2 Présentation des résultats de l'analyse descriptive.....	32
3.3 Résultats de l'indice de spécialisation communale.....	36
3.4 Présentation des résultats de l'analyse économétrique.....	38
<i>Suggestions et recommandations</i>.....	61
CONCLUSION	62
<i>Bibliographies</i>	65
ANNEXE	67

INTRODUCTION

Le Sommet mondial sur l'alimentation organisé par la FAO en 1996 pour répondre d'une part aux nombreuses crises alimentaires affectant les pays les plus pauvres, et de l'autre, répondre aux craintes exprimées par la communauté internationale quant à la capacité de l'agriculture de nourrir une population en constante augmentation, s'est fixé comme résolution de réduire de 400 millions le nombre de gens souffrant toujours de la faim d'ici à 2015 (HEIMO, 2004). Comme les progrès enregistrés suite à ce sommet n'ont pas été notoires, un nouveau Sommet a été organisé à Rome en 2002 pour accélérer les mesures décidées lors du Sommet de 1996 et celles prises dans le cadre des objectifs du Millénaire.

Le manque d'information crédible à la fois sur la nature des problèmes liés à l'insécurité alimentaire et aux famines, sur le nombre de gens qui en souffrent, et sur les stratégies locales de résistance aux chocs mises en œuvre par les populations affectées (vulnérabilité) par les crises alimentaires sont à compter parmi les facteurs principaux qui expliquent la persistance de la malnutrition et la faim en Afrique. Un autre facteur non moins négligeable est le changement climatique : il menace les acquis du développement et ralentit la réalisation des objectifs du Millénaire pour le développement (OMD), en particulier ceux qui se rapportent à la réduction de la faim et de la pauvreté ainsi qu'à la protection de l'environnement (FAO, 2010). Selon le dernier rapport du GIEC (IPCC, 2007), la température s'est élevée de 0,17°C par décennie entre 1970 et 2004 en Afrique de l'Ouest. Une élévation similaire des températures au Bénin est constatée dans les travaux d'AHOMADEGBE M., OZER P. & DOGOT T. (2010). L'évolution des précipitations est plus difficile à évaluer à cause du manque de données et du caractère

très variable des pluies à l'échelle locale. Selon les études de AGO E. et ERNEST A. (AGO E., et *al.*, 2005 ; ERNEST A., et *al.*, 2008), les moyennes de précipitation auraient augmenté depuis les sécheresses des années 60, mais avec une très forte variabilité à l'échelle locale. Ces travaux ainsi que ceux de HOUNTONDI Y-C et OZER P. (2010) confirment avant tout un accroissement de la variabilité des pluies au Bénin depuis cette période, qui se manifestent notamment au sud du pays par une modification des saisons pluvieuses. Le début de la grande saison des pluies recule d'année en année; la répartition des pluies durant cette saison est moins homogène, avec de nombreuses poches de sécheresse qui viennent entrecouper les précipitations (MEPN, 2008).

Enfin, les deux saisons pluvieuses tendent à fusionner suite à la disparition progressive de la petite saison sèche au mois d'août. En conséquence, le sud du Bénin pourrait connaître dans le futur un climat de type unimodal, comme au nord du pays - ce qui obligerait les agriculteurs qui dépendent principalement d'une agriculture pluviale à passer de deux à une culture annuelle (BAUDOIN, 2011). Pour corriger ces insuffisances, il est impérieux de promouvoir des systèmes appropriés de production agricole d'adaptation aux changements climatiques pour la sécurité alimentaire et nutritionnelle dans les zones agro-écologiques les plus exposées aux risques climatiques.

L'objectif de notre étude est de fournir un modèle de prévision des rendements des principales cultures vivrières, notamment le maïs, l'igname le riz, le manioc, à l'échelle de certaines communes. La recherche vise ainsi à aider la DPP du MAEP à bien mener ses études prospectives dans le domaine des produits vivriers puis à renforcer le système d'alerte rapide de l'alimentation et de l'agriculture de l'ONASA. Pour mieux aborder cette préoccupation, dans un premier temps, nous présenterons la problématique de notre étude, ensuite nous aborderons respectivement les objectifs de l'étude, les hypothèses, la revue de littérature, la méthodologie et pour finir nous présenterons les résultats et en ferons les discussions.

CHAPITRE PREMIER

PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Problématique

L'agriculture en Afrique de l'Ouest fait face à un double défi : produire plus et mieux, pour répondre à la croissance des besoins alimentaires et en particulier approvisionner les villes ; assurer des revenus et donc des emplois à la population rurale afin de réduire les flux migratoires et de lutter contre les inégalités et la pauvreté qui concernent d'abord le milieu rural.

Au Bénin le taux moyen de croissance annuelle de la production agricole par habitant, calculé sur la période 1990-2004, se situe aux environs de 2,7%. « Si les tendances récentes en matière de croissance agricole se maintenaient d'ici 2015, le Bénin aurait à faire face à une faible augmentation de la productivité totale des facteurs de l'ordre de 0,58% par an pour les cultures vivrières » (Revue des efforts de développement dans le secteur agricole, 2009). De plus, ce secteur est menacé et loin d'être la seule cause du sous-développement, les bouleversements climatiques qui touchent l'Afrique de l'Ouest depuis quelques décennies ont changé la donne. Cycles de sécheresse et périodes d'inondation se succèdent.

Selon une simulation réalisée par des chercheurs béninois en 2003, si rien n'est tenté pour faire face aux changements climatiques, le rendement

de cultures telles que le maïs, l'arachide, le manioc, le niébé et le riz baisse-rait de 6%, et celui du coton, de près de 30%, et ce, d'ici 2025 (CRDI, 2007).

Par ailleurs, l'évaluation de l'impact du changement climatique et la planification de l'adaptation nécessitent entre autre, la bonne compréhension des vulnérabilités des systèmes alimentaires nationaux. Ainsi, à l'image de la FAO, qui a élaboré divers systèmes dont CMBox, pour la prévision des rendements des cultures, et des outils d'information novateurs, simples à utiliser pour évaluer l'impact du climat et les vulnérabilités et pour planifier les mesures d'adaptation, chaque pays devrait se doter de pareils outils, non seulement pour la prévision des rendements des cultures, mais aussi pour renforcer le système d'alerte précoce relatif à la sécurité alimentaire. Mais le constat est que, les systèmes d'information sur la sécurité alimentaire et la détection précoce des famines ne fonctionnent pas correctement, en grande partie du fait de la faible capacité des gouvernements des pays en voie de développement à assurer un suivi constant des facteurs agissant sur la sécurité alimentaire.

Cependant, l'ampleur des impacts des changements climatiques au Bénin où l'agriculture constitue l'activité principale de 70% de la population active et contribue pour 36% du PIB et 88% des recettes d'exportation à hauteur de 15% aux recettes de l'Etat (MEPN, 2008), à amener les experts du Programme d'Action Nationale d'Adaptation aux Changements Climatiques du Bénin (PANA-Bénin) à suggérer entre autre, d'investir dans la mise en place d'un système d'alerte précoce et de promouvoir des systèmes appropriés de production agricole d'adaptation aux changements climatiques pour la sécurité alimentaire et nutritionnelle. La mise en œuvre de ces conclusions passe nécessairement par l'établissement de modèles de prévision des rendements agricoles. Mais, la question essentielle qui se pose est de savoir si, dans le contexte béninois où l'agriculture est tributaire de la pluie, d'autres facteurs météorologiques ou agro-météorologiques influencent le rendement agricole ?

En vue de faire face efficacement à toute situation de crise, actions et planifications doivent être organisées à l'avance. Il en résulte la nécessité de connaître aussi bien que possible, l'évolution actuelle, en cours de saison, des cultures vivrières et de pouvoir le plus tôt possible arriver à une évaluation des récoltes à venir. Les techniques statistiques, basées sur les enquêtes et sondages, sont jusqu'à présent utilisées pour atteindre cet objectif. C'est dans le but d'améliorer ces techniques que nous avons entrepris de fournir un modèle de prévision de rendement agricole dont la qualité pourrait être améliorée et évaluée dans le temps.

1.2 Objectifs de l'étude

Notre premier objectif dans ce travail est d'analyser l'impact de l'évolution des variables climatiques sur les rendements agricoles. De façon spécifique, il s'agira :

- ❖ d'analyser la répartition sur le rendement des variables climatiques dans le temps ;
- ❖ d'estimer ces relations.

1.3 Hypothèses

**** Hypothèse H₁ :**

« Le rendement des cultures est une fonction de la répartition des variables météorologiques dans le temps ».

**** Hypothèse H₂ :**

« L'adoption des paquets technologiques mis au point par la recherche affectent positivement le rendement agricole ».

1.4 Revue de littérature

Au cours de ces dernières décennies, l'agriculture a retenu l'attention de plusieurs économistes à cause de la prépondérante place qu'elle occupe surtout dans les pays en développement et plus particulièrement dans les pays de l'Afrique subsaharienne. En 1997, selon les estimations de la Banque Mondiale, dans les pays en voie de développement, 70% de la main d'œuvre active sont employés dans l'agriculture et 50% des recettes totales des exportations proviennent de l'agriculture. Il importe donc d'en tenir compte dans toutes les étapes de la planification et des réflexions prospectives sur la sécurité alimentaire et la croissance économique.

Nous allons dans cette section présenter certains travaux portant sur les modèles de prévision des rendements agricoles. Mais avant d'en arriver là, il serait utile de passer en revue certains concepts et théories qui sont à la base de ces modèles.

1.4.1 Quelques concepts

1.4.1.1 La mise en culture des terres

En dépit du développement fulgurant des techniques de conservation des sols, la productivité des sols a baissé ces dernières années provoquant une chute des rendements alors que les superficies cultivées connaissent une progression significative¹. Beaucoup d'auteurs ont tenté d'expliquer ce phénomène et la principale raison évoquée le plus souvent est l'érosion due à beaucoup de facteurs tels que la sécheresse, les feux de brousse, la mauvaise utilisation des engrais chimiques, la pluviométrie, Etc. David (1988), Barbier (1989), Coxhead et Shively (1998) ont montré que les terres allouées à la culture du riz et les autres céréales, surtout le blé, se dégradent vite et

¹Voir Lanzona, IMAPE Research Paper N°04, juillet 1999.

leur rendement baissent. Leonardo A. Lanzona² revient sur les mêmes idées. Son étude lui a permis de conclure que le taux de dégradation du sol s'accroît dramatiquement avec l'extension des cultures, et ce surtout pour les terres perpétuellement utilisées pour les cultures du riz. Parmi les facteurs qui influencent la décision de mise en culture des terres, Leonardo cite en premier lieu les rendements. Cette idée était introduite plus tôt par Barrett (1991) qui soulignait que si le rendement croît, cela signifie que les substances (matières) introduites dans la terre sont devenues plus productives, conduisant à une conservation optimale des terres. D'où les politiques macroéconomiques qui encouragent les techniques de sauvegarde de terres conduisant à l'utilisation simultanée des substances et des matières non chimiques sont supposées être favorables au management de l'environnement social. Néanmoins, le rendement exogène, est déterminé instantanément avec l'utilisation des terres, c'est-à-dire que ce sont les facteurs qui affectent le rendement qui affectent également les superficies cultivées (Leonardo Lanzona, juillet 1999).

1.4.1.2 L'érosion des sols

Les effets de l'érosion des sols sur les rendements des cultures et la productivité du sol sont considérables. L'érosion enlève au sol les fractions qui facilitent l'apport des éléments nutritifs et contribuent à maintenir un milieu physique propice à la croissance des plantes. Elle engendre la baisse de la productivité du sol, augmente la variabilité des rendements dans les champs et elle a des incidences environnementales à l'extérieur des exploitations agricoles (réduction de la qualité de l'air et de l'eau.). Coxhead et Shively (1995) ont montré dans le cas des îles Philippines que l'érosion était largement et significativement liée à la production du maïs et du blé. Un an plus tôt, Kessler et Geerling aboutissaient à la conclusion que l'érosion est la principale cause de dégradation des sols au Burkina Faso et qu'elle concourt significativement aux faibles rendements agricoles. Plusieurs facteurs sont à

²Leonardo Lanzona dans « **the environment impact of macroeconomic and adjustment policies: land use and household welfare comparaison in Camarin Sur** (1999).

la base de ce phénomène et les principaux facteurs généralement sont : la coupe du bois, les feux de brousse, les cultures itinérantes sur brûlis, la traction, les fortes pressions des éleveurs, les sites inappropriés pour la construction d'infrastructure et le changement du répertoire des semences.

1.4.2 Présentation générale des travaux sur la prévision des rendements agricoles au Bénin

L'économie béninoise repose essentiellement sur l'agriculture. De fait, une attention particulière doit être accordée à la recherche dans ce domaine, surtout à celle qui vise à améliorer les récoltes ou à accroître les rendements agricoles. Cependant, la littérature sur l'élaboration des modèles de prévision des rendements agricoles n'est pas assez fournie dans notre pays, et l'étude la plus récente est le modèle élaboré par d'OLIVEIRA (1998) qui prend en compte les effets de changement de technologie à travers l'étude de la tendance générale du rendement agricole. L'approche utilisée dans cette étude, est celui de Palm et al. (1991) qui ont élaboré des modèles agrométéorologiques pour prédire les rendements agricoles. Il s'agit des modèles à variables brutes et dérivées puis les modèles à variables expertes. Les variables utilisées dans ces modèles, sont les données météorologiques brutes, les cumuls de ces données ou la combinaison des variables météorologiques brutes et dérivées. Des résultats de l'application de ces modèles par d'OLIVEIRA (1998) dans le cadre de notre pays, ressort qu'il est préférable de prévoir les rendements avec les équations de tendance. Toutefois, cette étude n'aborde pas les effets combinés de deux variables météorologiques sur le rendement agricole.

1.4.3 Déterminants des rendements agricoles

Fisher fut le premier à développer en 1924 une théorie généralement connue sous le nom de « *Fisher response curve technique* » qui a permis d'examiner l'influence de la pluviométrie sur le rendement, à travers le cycle de vie de la culture. Ces travaux montrent d'une part, qu'une grande quantité de pluie est bénéfique pour la plante pendant la période de la germination

et d'autre part, que la température maximum et l'insolation ont une influence positive sur la culture en ce sens qu'une augmentation de ces paramètres est bénéfique pour la plante pendant la période de mis en terre.

Les études empiriques de ces modèles ont permis aux statisticiens agricoles (surtout Indiens) et aux agronomes de développer des outils adéquats de politiques agricoles. Ceci a considérablement amélioré le rôle du secteur agricole indien dans le développement économique et a mis en relation l'Etat et les producteurs à travers les politiques macroéconomiques.

En Inde, plusieurs chercheurs notamment Krishna et al. (2009), Agrawal et al. (2005), Metha et al. (2010) ont montré à travers la prévision des rendements de canne à sucre, du riz du blé et de la papaye, que le rendement de la culture est intimement lié aux facteurs météorologiques, agrométéorologiques, aux caractéristiques du sol ou à des indicateurs synthétiques dérivés de ces variables. Dans leurs travaux, les changements de technologie sont étudiés à travers des tendances ou des moyennes mobiles du rendement. Les résultats obtenus par ces derniers, montrent qu'à l'échelle communale ou de zones agro-climatiques, qu'une prévision fiable de riz peut être obtenue après 12 semaines de croissance.

Les travaux de Kouadio (2007) au Sénégal montrent que le modèle de prévision élaboré à partir des informations tirées des données satellitaires et de données agro-météorologiques permet une estimation relativement bonne des rendements de la culture d'arachide à l'échelle nationale ($R^2 = 0.55$ et $RMSE = 28$ kg/ha). Toutefois, il souligne que le choix des variables explicatives s'est fait par régression multiple.

En France, P. Dagnelie et R. Palm (1993) soulignent dans une série de travaux relatifs à la prévision des rendements des principales cultures de la communauté européenne que le modèle classique de régression au sens des moindres carrés, linéaire ou quadratique, s'avère être le meilleur modèle de tendance générale, et que la contribution des variables météorologiques pour expliquer les résidus par rapport à la tendance s'avère extrêmement limitée, quel que soit le modèle considéré.

Par ailleurs, d'autres auteurs, particulièrement dans les études d'assurance des producteurs face aux différents risques liés à la production (surtout la pluviométrie), ont suggéré cette approche pour mesurer les rendements agricoles. Dans « *developping based-rainfall index insurance in Morocco, 1999* » Barakat et Handoufe distinguent deux types de risques qui affectent les rendements agricoles: le risque systémique dû aux facteurs non maîtrisables tels que la pluie, l'érosion, le climat; et le risque spécifique qui peut provenir par exemple de la mauvaise utilisation des intrants chimiques, la mécanisation, les mauvaises semences, etc. Cependant, les résultats trouvés montrent que seul le risque systémique affecte de façon significative les rendements agricoles. Le risque spécifique quant à lui est contrôlable, et n'a pratiquement pas d'effet sur les rendements.

Les travaux de Fisher ont joué un rôle prépondérant dans le secteur agricole et ont apporté un souffle nouveau dans la prévision du rendement agricole. Cependant, d'autres facteurs autres que ceux cités ci-dessus, influencent le rendement de la culture.

Aux Etats Unis, Marc Nerlove en 1956 et 1958 a élaboré une théorie que l'on connaît sous le nom de « *the Nerlovian models of supply response* » qui a permis d'expliquer la réaction des producteurs agricoles américains face aux changements perpétuels des prix des récoltes, des politiques macroéconomiques et bien d'autres facteurs. Ainsi, il montre que les producteurs réagissent par rapport aux prix actuels sur le marché et les quantités observées peuvent différer des quantités désirées en raison du retard d'ajustement dans la réallocation des facteurs.

Ces différents travaux permettent d'appréhender les facteurs qui déterminent le rendement agricole. Toutefois, seuls les indicateurs synthétiques des facteurs météorologiques et agro-météorologiques seront utilisés comme variables explicatives dans nos modèles.

CHAPITRE DEUXIÈME

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE

Dans ce chapitre nous allons présenter brièvement les différentes méthodes d'analyse des données et par la suite présenter les données brutes et les sources de ces dernières.

2.1 Méthodes d'analyse

Le concept de base sur lequel repose cette étude est relativement simple. Il s'agit en effet de rechercher un modèle de prévision des rendements en mettant en évidence les corrélations entre les rendements historiques des principales cultures vivrières des années 1995 à 2009 et les différentes variables explicatives. Celles-ci vont être de différents types : météorologiques, agro-météorologiques. Les variables météorologiques et agro-météorologiques pouvant expliquer le rendement sont constituées de deux indicateurs synthétiques obtenus à partir des données décennales de différents paramètres météorologiques et agro-météorologiques. La méthodologie que nous avons utilisée dans cette étude repose sur trois outils fondamentaux à savoir : la recherche documentaire, l'identification des communes selon leur spécialité agricole à travers un indice de spécialisation sectoriel, l'analyse descriptive et l'analyse des régressions multiples comme outils d'analyse empirique.

2.1.1 Analyse économétrique

L'analyse économétrique a permis au prime abord, d'analyser la tendance générale des rendements en utilisant divers modèles d'ajustement : modèle linéaire, quadratique, logarithmique, exponentiel, inverse, en S et de croissance, et ensuite de mettre en relation pour chaque période de la saison de croissance de la plante, les rendement nets de l'effet de la tendance (ci-possible) avec les indices synthétiques des variables météorologiques et agrométéorologiques en utilisant la méthode de régression linéaire multiple Stepwise. Les logiciels suivants sont utilisés pour le traitement des données. Il s'agit de : R.2.15 (pour le calcul des indicateurs synthétiques) et SPSS.

Par ailleurs, les fondements théoriques sur lesquels s'est appuyé cette étude sont les modèles de Fisher (1924) et Hendricks et Scholl (1943) dont l'application en Inde et à travers le monde a permis de trouver une explication aux relations entre les produits agricoles et la météorologie.

2.1.1.1 Formulation du modèle de prévision

Le modèle de Fisher (1924) modifié par Hendricks et Scholl (1943) s'établit par l'équation:

$$Y = A_0 + \sum_{i=1}^p \sum_{j=0}^1 a_{ij} z_{ij} + \sum_{i \neq i'}^p \sum_{j=0}^1 a_{ii'j} z_{ii'j} + cT + e$$

où

$$z_{ij} = \sum_{w=1}^m r_{iw}^j X_{iw} \quad \text{et} \quad z_{ii'j} = \sum_{w=1}^m r_{ii'w}^j X_{iw} X_{i'w}, \quad j \in \{0; 1\}$$

Y est le rendement ;

r_{iw} est le coefficient de corrélation du rendement (ajusté pour les effets de la tendance) avec la $i^{\text{ème}}$ variable météorologique X_{iw} dans la décade w ;

$r_{ii'w}$ est le coefficient de corrélation du rendement Y (ajusté pour les effets de la tendance) avec le produit des $i^{\text{ème}}$ et $i'^{\text{ème}}$ variables météorologiques X_{iw} et $X_{i'w}$ dans la décade w ;

m est la période de la prévision ;

p est le nombre de variables météorologiques utilisées ;

e est le terme d'erreur qui suit une loi normale centrée réduite; et,

T est l'année (trend).

Dans cette approche, deux types d'indicateurs synthétiques sont calculés pour chaque Variable météorologique:

▣ z_{i0} est l'indicateur synthétique qui est égal au cumul des valeurs de chaque variable météorologique dans les différentes périodes ;

▣ z_{i1} est l'indicateur synthétique qui résulte des coefficients de corrélations entre le rendement (ci possible sans tendance) et les variables météorologiques dans les périodes respectives.

Dans ce modèle, la variable dépendante est rendement de chaque spéculation et les variables explicatives sont les indicateurs synthétiques ci-dessus cités et calculés de la façon suivante :

A partir des variables climatiques X numéroté 1 et X' numéroté 2, et pour une période de prévision de m décades, les quatre types d'indicateurs donnent :

➤ $z_{10} = d_1X + d_2X + d_3X + \dots + d_mX$

où les d_iX sont les données décadaires de la variable climatique X .

➤ $z_{120} = (d_1X) \times (d_1X') + (d_2X) \times (d_2X') + (d_3X) \times (d_3X') + \dots + (d_mX) \times (d_mX')$

➤ $z_{11} = (d_1X) \times r^1_{11} + (d_2X) \times r^1_{12} + (d_3X) \times r^1_{13} + \dots + (d_mX) \times r^1_{1m}$

Où r^1_{1m} est le coefficient de corrélation entre le rendement agricole d'une spéculation et les données décadaires de la $m^{\text{ième}}$ décade.

$$\text{➤ } z_{121} = (d_1X) \times (d_1X')r^1_{121} + (d_2X) \times (d_2X')r^1_{122} + (d_3X) \times (d_3X')r^1_{123} + \dots + (d_mX) \times (d_mX')r^1_{12m}$$

Où r^1_{12m} est le coefficient de corrélation entre le rendement agricole d'une spéculation et le produit des données décennales de la $m^{\text{ième}}$ décennie des variables (1) et (2).

De ces calculs, nous avons généré pour chaque type d'indicateurs :

$Z_{10}, Z_{20}, Z_{30}, Z_{40}, Z_{50}, Z_{60}, Z_{70}$.

$Z_{11}, Z_{21}, Z_{31}, Z_{41}, Z_{51}, Z_{61}, Z_{71}$.

$Z_{120}, Z_{130}, Z_{140}, Z_{150}, Z_{160}, Z_{170}, Z_{230}, Z_{240}, Z_{250}, Z_{260}, Z_{270}, Z_{340}, Z_{350}, Z_{360}, Z_{370}, Z_{450}, Z_{460}, Z_{470}, Z_{560}, Z_{570}, Z_{670}$.

$Z_{121}, Z_{131}, Z_{141}, Z_{151}, Z_{161}, Z_{171}, Z_{231}, Z_{241}, Z_{251}, Z_{261}, Z_{271}, Z_{341}, Z_{351}, Z_{361}, Z_{371}, Z_{451}, Z_{461}, Z_{471}, Z_{561}, Z_{571}, Z_{671}$.

Les variables météorologiques numérotées de 1 à 7 sont renseignées par le tableau 2.

2.1.1.2 Etude de la tendance des rendements

Sept modèles sont retenus pour l'étude de la tendance et se présentent comme suit :

❑ *Modèle linéaire simple*

Modèle 1 : $Y = a + bt$

❑ *Modèle quadratique :*

Modèle 2 : $Y = at^2 + bt + c$

❑ *Modèle logarithmique*

C'est un modèle obtenu après transformation logarithmique de la variable explicative t .

Modèle 3 : $Y = a + \ln(t)$

❑ *Modèle exponentiel*

Modèle 4 : $Y = ae^{bt}$ ou $\ln(Y) = \ln(a) + bt$

▣ *Modèle inverse*

Modèle 5 : $Y = a + \frac{b}{t}$

▣ *Modèle en S*

Modèle 6 : $Y = e^{(a+b/t)}$ ou $\ln(Y) = a + b/t$

▣ *Modèle de croissance*

Modèle 7 : $Y = e^{(a+bt)}$ ou $\ln(Y) = a + bt$

Dans tous ces modèles, Y désigne le rendement et t l'année.

Pour le choix des modèles, nous avons utilisé le coefficient de détermination multiple R^2 et l'erreur quadratique moyenne (RMSE pour Root Mean Square Error) présentés comme suit :

📌 Critère de choix des modèles de tendance

Dans les différents cas, nous avons tout d'abord considéré le coefficient de détermination multiple R^2 comme mesure de la qualité des ajustements.

$$R^2 = \frac{S^2 - S_e^2}{S^2}$$

Dans cette relation, S^2 est la variance des rendements et S_e^2 est la variance résiduelle relative à l'équation de régression établie, soit :

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Y_i - \bar{Y}]^2 ; \quad S_e^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 , \quad \text{avec } e_i = Y_i - f_1(t_i)$$

Avec n le nombre d'années d'observations, $f_1(t_i)$ la valeur estimée au temps t_i .

Le coefficient de détermination exprime la part de la variance des rendements expliquée par l'équation de tendance.

Nous avons ensuite associé un paramètre semblable, l'erreur quadratique moyenne (RMSE pour Roof Mean Square Error). C'est la racine carrée de la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre les prévisions et les observations où $RMSE = \sqrt{MSE}$.

C'est la valeur à minimiser dans le cadre d'une régression simple ou multiple.

La méthode est fondée sur la nullité de la moyenne des résidus. Mais la moyenne de leur carré n'est généralement pas nulle. Cette moyenne n'est autre que la variance résiduelle que l'on cherche à minimiser. Ainsi, dans le cas d'une série chronologique, $MSE = \frac{SCR}{n}$, où n est la longueur de la série et SCR est la somme des carrés des résidus.

Si l'on compare deux estimateurs sans biais, le meilleur est celui qui présente le RMSE le plus faible. De fait, dans l'analyse des résultats, le meilleur modèle de tendance serait celui qui présenterait la plus petite valeur de **RMSE** et la plus grande valeur de R^2 .

2.1.1.3 Estimation des indicateurs et validation des modèles

Il s'agit dans cette étude, de faire la prévision des rendements agricoles mais avant, d'étudier la présence de la tendance dans l'évolution des rendements des différentes cultures.

Les indicateurs synthétiques des données météorologiques, agrométéorologique constituent des variables explicatives potentielles du rendement. Parmi elles, seules les mieux corrélées aux rendements mesurés sur une série historique de 15 ans seront retenues dans un modèle de régression multiple chargé de retrouver le rendement cultural. On dénombre 57 variables explicatives potentielles pour l'ensemble de calibration.

La régression linéaire multiple se décline en plusieurs étapes. Premièrement, les variables n'étant pas corrélées au rendement sont supprimées. Les variables explicatives potentielles restantes du rendement sont ensuite sélectionnées par régression pas à pas.

La seconde étape consiste en la création de modèles de prévision de rendement et la mise en évidence des variables impliquées dans ceux-ci. Pour ce faire, une recherche exhaustive de modèles est lancée à partir des

variables sélectionnées dans l'étape précédente. Les modèles doivent satisfaire à certaines exigences pour être retenus, à savoir :

- Concerner des variables qui ont un sens au point de vue statistique et qui ne sont pas corrélées entre elles, afin de donner une certaine robustesse au modèle ;

- Avoir un coefficient de détermination (R^2) supérieur à 0,5 ;

- Faire appel à un nombre restreint de variables, compris entre 2 et 4.

La troisième étape comprend la validation des modèles respectant ces critères, c'est-à-dire la capacité de ceux-ci à prédire les rendements. Le nombre d'année étant relativement faible (15 années), il n'est pas raisonnable de séparer les observations en un échantillon pour la calibration et un autre pour la validation. La méthode la plus adaptée dans ce cas est donc la validation croisée dite "leave one-out".

Le principe de cette méthode consiste à retirer une observation de l'échantillon, de calibrer le modèle sur les $n-1$ observations restantes, et de le valider ensuite avec l'observation mise de côté. La même opération est ensuite répétée en mettant à chaque fois de côté une autre observation pour effectuer la validation, jusqu'à ce que toutes les observations de l'échantillon y soient passées. Le coefficient de détermination (R^2_{cv}) entre les observations historiques du rendement et les valeurs prédites lors de chaque étape de validation peut ensuite être calculé et permettra d'évaluer l'efficacité de prévision du modèle. Dans notre cas, pour chaque ensemble de données, 2 modèles sont sélectionnés et soumis à la validation croisée "leave-one-out", afin de sélectionner celui qui présente le meilleur R^2_{cv} et la plus petite erreur quadratique moyenne (RMSE pour Root Mean Square Error).

Les décisions des tests d'autocorrélation des résidus de Durbin-Watson (DW) et de multicolinéarité des variables explicatives VIF (facteurs d'influence de la variance) sont basées sur les résultats suivants :

✚ Tests de Durbin-Watson et Facteurs d'influence de la variance

❖ Test de Durbin-Watson

Le test de Durbin-Watson (DW) permet de détecter une autocorrélation des erreurs d'ordre un selon la forme :

$$\varepsilon_t = \rho\varepsilon_{t-1} + \mu_t$$

Le test d'hypothèse est le suivant

H_0 : Erreurs non corrélées ($\rho = 0$)

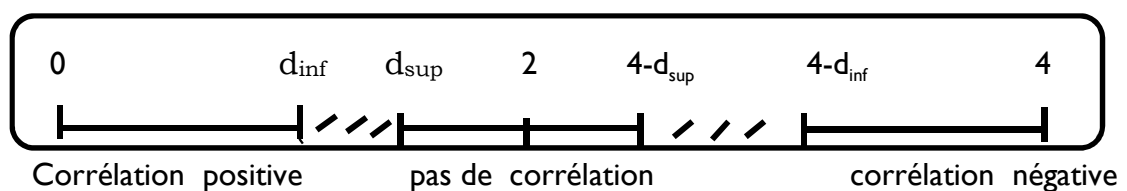
H_1 : Erreurs corrélées ($\rho \neq 0$)

La statistique de Durbin-Watson est :

$$DW = \left(\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2 \right) / \left(\sum_{t=1}^n e_t^2 \right)$$

Où e_t est le résidu calculé.

La lecture de la table de Durbin-Watson permet de déterminer deux valeurs d_{inf} et d_{sup} comprises entre 0 et 2 qui délimitent l'espace entre 0 et 4 selon le schéma ci-dessous :



Selon la position de DW empirique dans cet espace, nous pouvons conclure :

- $d_{sup} < DW < 4-d_{sup}$, on accepte la non corrélation
- $0 < DW < d_{inf}$, on accepte la corrélation positive
- $4-d_{inf} < DW < 4$, on accepte la corrélation négative
- $d_{inf} < DW < d_{sup}$ ou $4-d_{sup} < DW < 4-d_{inf}$, on se trouve dans la zone de doute, c'est-à-dire qu'on ne peut conclure dans un sens ou dans l'autre. Dans la pratique, on accepte la non corrélation (DOUCOURE, 2005)

❖ Test de Multicolinéarité : Facteurs d'inflation de la variance (VIF)

- Indique le degré de présence d'une multicolinéarité (corrélation entre les prédicteurs) dans une analyse de régression. La multicolinéarité est

problématique car elle peut accroître la variance des coefficients de régression, rendant ces derniers instables et difficiles à interpréter.

- Les facteurs d'inflation de la variance (VIF) donnent une mesure de l'accroissement de la variance des coefficients de régression estimés par rapport à une situation où les variables de prédiction n'ont pas de relation linéaire. Les directives suivantes permettent d'interpréter les facteurs d'inflation de la variance :

Facteurs d'inflation de la variance	Les prédicteurs sont:
VIF = 1	non corrélés
1 < VIF < 5	modérément corrélés
5 < VIF < 10	hautement corrélés

Des valeurs **VIF** supérieures à 10 peuvent indiquer qu'une multicolinéarité influence de façon excessive les résultats de la régression.

2.2 Données utilisées

Les variables explicatives retenues ici, sont des indicateurs synthétiques des paramètres météorologiques relatifs aux précipitations décennales, aux températures minimales et maximales moyennes décennales, à l'insolation décennale, à l'évapotranspiration décennale et à l'humidité relative minimum et maximum moyenne décennale, de la période de croissance de la culture. Les données endogènes concernent les rendements agricoles de la période 1995 – 2010.

Par ailleurs, le calendrier culturel de notre pays montre que la culture de chaque produit agricole dépend de la période et de la région. Ainsi pour chaque produit agricole, il nous faut déterminer les différentes périodes de culture pour chacune des régions retenues et préciser les décades qu'elles couvrent.

2.2.1 Données brutes

Elles concernent les précipitations décennales, les températures minimales et maximales moyennes décennales, l'insolation décennale, l'évapotranspiration décennale, l'humidité relative minimum et maximum

moyenne décadaire et les paquets technologiques. Les paramètres météorologiques proviennent des six stations synoptiques du Bénin : Station de Kandi, de Natitingou, de Parakou, de Savè, de Bohicon et de Cotonou.

Cependant, l'hypothèse H_2 ne saurait être vérifiée totalement, faute d'informations complémentaires sur les nouvelles technologies utilisées dans l'agriculture. En fait, la vérification de cette hypothèse passe par l'utilisation de la fonction de production de Cobb-Douglas : $F(K, L) = AK^\alpha L^{1-\alpha}$ où A est un paramètre supérieur à zéro qui mesure la productivité de la technologie disponible, K le capital et L le travail et α est une constante comprise entre 0 et 1 qui détermine les parts relatives du revenu qui vont au travail et au capital. Toutefois, seule la première hypothèse fera l'objet de vérification.

2.2.1.1 La pluviométrie

L'agriculture béninoise est encore à l'étape traditionnelle à l'instar de la plupart des pays en développement, elle reste tributaire de l'effet aléatoire de la pluviométrie. En effet, la plupart des agriculteurs au Bénin n'arrosent pas leurs champs par faute de moyens et ne pratiquent pas le drainage ou l'irrigation. Face à ces constats, on s'attend donc à ce que la pluviométrie soit un facteur déterminant de la culture vivrière. On peut donc penser que l'effet de pluviométrie sera donc significativement positif sur les rendements agricoles. Toutefois, cet effet s'est avéré difficile à expliquer dans les pays voisins (le Togo et Burkina-Faso) (ETOUDJI, 2004). En fait, étant donné l'effet trop aléatoire des pluies, il se peut qu'elles arrivent tardivement ou qu'elles aient commencées et s'arrêtent au moment de la floraison des cultures. De plus, chaque culture a besoin d'une quantité nécessaire et suffisante d'eau pour son développement normal ; ainsi, une abondance de pluies peut aussi s'avérer fatale pour les cultures vivrières et faire baisser du coup les rendements.

2.2.1.2 Humidité relative

L'humidité relative intervient surtout dans le cas des cultures qui ont besoin d'une assez quantité d'eau dans leur cycle de croissance. C'est le cas par exemple de la culture du riz qui enregistre de bons rendements dans les zones humides. On devrait donc s'attendre à ce que l'humidité relative soit significative pour la culture du riz.

2.2.1.3 Température

La phase végétative de la plante dépend énormément de la température de l'air. Ainsi le rendement agricole pourrait être affecté dans un sens ou l'autre par rapport à une grande variabilité de la température.

2.2.1.4 Insolation

La radiation solaire est étroitement à la croissance de la culture et au rendement final de cette dernière. Cette variable météorologique pourrait donc influencer le rendement agricole.

2.2.1.5 Evapotranspiration potentielle

Comme l'insolation, l'évapotranspiration potentielle agit sur la croissance de la plante. En effet, la perte d'eau de la plante assure la croissance de cette dernière car elle libère le dioxyde de carbone au profit de l'oxygène. L'évapotranspiration potentielle serait donc une variable assez explicative du rendement de n'importe quelle culture.

2.2.2 Sources de données

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont issues de l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) en ce qui concerne les données météorologiques, et de la base de données de Country-Stat pour les données de rendements. Ces dernières sont des séries annuelles allant de 1995 à 2010 et les données météorologiques sont des valeurs décadaires (période de dix jours) des précipitations, de l'insolation, des températures, de l'humidité et de l'évapotranspiration sur

la même période. Le tableau suivant résume les premières informations sur les données brutes.

Tableau 1 : Information sur les données brutes

Variabes	Unité des données	Source	Période
Rendement	Kilogramme/hectare	MAEP	1995-2010
Température	Degré Celsius	ASECNA	1995-2010
Insolation	Heure	ASECNA	1995-2010
Evapotranspiration	Millimètre	ASECNA	1995-2010
Humidité	Pourcentage	ASECNA	1995-2010
Pluviométrie	Millimètre	ASECNA	1995-2010

Source : Nos travaux

Le tableau suivant présente les notations adoptées dans le cadre de notre étude.

Tableau 2 : Notations des variables

Variable	Notation
Rendement	Rend
1-Pluviométrie	Plu
2-Température maximale moyenne décadaire	Tmax
3-Température minimale moyenne décadaire	Tmin
4-Humidité maximale moyenne décadaire	Hmax
5-Humidité minimale moyenne décadaire	Hmin
6-Insolation	Insol
7-Evapotranspiration	Etp
Cumul de la variable i^3 sur toutes les décades	Z_{i0}
Cumul pondéré ⁴ de la i sur toutes les décades	Z_{i1}
Cumul de combinaison des variables i et j^5 sur	Z_{ij0}
Cumul pondéré ⁶ de combinaisons des variables i et	Z_{ij1}

Source : Nos travaux

³ Les indicateurs sont pondérés avec les coefficients de corrélation entre la variable i d'une décade et le rendement de la culture.

⁴ Les indicateurs sont pondérés avec les coefficients de corrélation entre le produit des variables i et j ($i \neq j$) d'une même décade et le rendement de la culture.

⁵ i désigne le numéro de chaque variable dans le tableau ci-dessus.

⁶ j désigne le numéro de chaque variable dans le tableau ci-dessus avec $i \neq j$.

2.2.3 Indicateur synthétique

L'indicateur synthétique nous a permis de faire la sélection des communes dont les productions agricoles dans les différentes cultures retenues, ont connu une bonne évolution au cours de la période (1995-2010).

L'indicateur synthétique communal des produits agricoles, est calculé en utilisant les productions agricoles annuelles au niveau national et communal. A partir de ces deux quantités respectives, nous avons recherché les parts de la production d'un produit i de l'échantillon des spéculations retenues. Par ailleurs, nous avons eu recours à la carte des communes du Bénin pour identifier les communes de la base d'analyse de l'indicateur synthétique. Seules, celles qui partagent une frontière avec les communes dotées d'une station synoptique sont retenues.

2.2.3.1 Spécialité agricole des communes: indicateur de spécialisation sectorielle de HALLET

La spécialisation régionale est définie comme la distribution du poids d'un secteur i dans l'activité économique totale d'une région r (AIGINGER et al, 1999). Ainsi, une région r est considérée comme spécialisée dans un secteur i , si ce secteur a un poids important dans le total de la production de la région r . Cette définition a été appliquée aux communes dans le cadre de l'agriculture.

L'indicateur de spécialisation sectorielle de HALLET (2000) mesure l'écart entre la structure de production de la région r et la structure nationale, avec i les différents secteurs de l'agriculture (DUPUCH et JENNEQUIN, 2001). Plus l'indice tend vers 1 et plus la structure productive de la région diffère de celle du pays, et plus son niveau de spécialisation est important.

$$Spé_r = \frac{1}{2} \sum_i |y_r^i - \bar{y}^i|$$

où $Spé_r$ est l'indice de spécialisation sectoriel de HALLET,

y_r^i est la part de la production du secteur i dans la production totale de la région,

\bar{y}^i est la part du secteur i dans la production agricole nationale.

Ainsi, nous avons calculé cet indice pour les spéculations suivantes : maïs, igname, manioc, riz. Afin de révéler l'évolution de la spécialisation au cours de la période (1995-2010), la droite de régression⁷ de l'indice est calculée pour chaque commune et l'indicateur θ a été utilisé, où $\theta = \sin\alpha$. L'angle entre la droite de régression et l'axe des abscisses (année) mesure la tendance de l'indice. Pour faciliter l'interprétation de la tendance, $\sin\alpha$ ⁸ est présenté et est compris entre $\{-1 ; 1\}$. L'évolution de l'indice de Hallet sur la période 1995-2010 permet de définir le degré de spécialisation communale et de déterminer une tendance concernant leur dynamique productive.

2.2.3.2 La zone de l'étude

Elle a été déterminée en fonction des équipements de l'ASECNA pour la mesure des variables météorologiques. En effet, le Bénin dispose de six stations synoptiques, non réparties sur les douze départements du pays. Selon les techniciens de l'ASECNA, chaque station couvre plusieurs communes et enregistrent les données journalières de la pluviométrie, de la température maximale et minimale, de l'humidité maximale et minimale, de l'insolation et de l'évapotranspiration. Par ailleurs, chaque commune dispose d'un poste d'enregistrement des données de la pluviométrie, de la température maximale et minimale. Toutes les variables météorologiques n'étant pas disponible au niveau communal, nous avons décidé dans le cadre de notre étude, et pour minimiser les biais, de faire le travail sur les communes où les stations sont installées et dans la mesure du possible, celles qui ont une frontière avec ces dernières et qui sont dans la même zone agro-écologique

⁷ Pour le calcul de la droite de régression de l'indice en fonction de l'année, l'indice de Hallet est exprimé en pourcentage.

⁸ Plus $\sin\alpha$ est proche de 1, plus la spécialisation est importante.

qu'elles (voir carte des communes). Ainsi nous sommes amenés à identifier les communes qui se sont faites illustrées ces 16 dernières années par leur production dans une culture donnée. La méthode utilisée est celle de l'indicateur de spécialisation sectorielle de Hallet. Le tableau ci-dessous montre les communes identifiées par station et zone agro-écologique.

Tableau 3: Communes retenues pour le calcul de l'indice de Hallet

Zone agro-écologique	Station	Communes
Zone II	Kandi	Kandi, Ségbana Gogounou, Banikoara
Zone IV	Natitingou	Boucoubé, Kouandé Natitingou, Toucountouna
Zone V	Parakou	Parakou, Tchaourou
Zone V	Savè	Glazoué, Savè, Ouèssè
Zone VI	Bohicon	Abomey, Agbangnizoun Bohicon, Zakpota
Zone VIII	Cotonou	Sô-Ava

Source : Nos travaux

Zones agro-écologiques

Le Bénin est divisé en huit zones agro-écologiques :

L'extrême Nord-Bénin (zone I) regroupe les communes de Malanville et de Karimama et couvre une superficie totale de 9057km^2 avec une population de 141207 habitants, selon les données du RGPH3. Elle compte 9843 ménages agricoles et les systèmes de cultures reposent sur le mil et le sorgho. Le coton, le maïs, le riz l'oignon, la pomme de terre et les cultures maraichères, le long du fleuve Niger sont des cultures secondaires de cette zone. En raison des peuplements encore faibles, les terres sont disponibles dans cette zone où on peut craindre des déséquilibres environnementaux.

La zone II est la zone cotonnière du Nord-Bénin et regroupe Ségbana, Gogounon, Banikoara, Kandi et Kérou. Elle couvre 20930 km^2 et compte 44251 habitants avec 29227 ménages agricoles (RGPH3 : février 2002). Les

systèmes de production dans cette zone sont basés sur le sorgho et le maïs complétés par l'igname. La culture du coton améliore la productivité dans cette zone à cause des fertilisants qui y sont souvent utilisés.

La zone III regroupe les communes de N'Dali, Nikki, Kalalé, Sinendé, Péhunco, Bembèrèkè et Pèrèrè. Elle s'étend sur une superficie de 23442km^2 avec une population de 602843 habitants et compte 36229 ménages agricoles. Les principales cultures rencontrées dans cette zone sont l'igname, le coton, le maïs et l'anacarde. Le faible peuplement de la zone explique la disponibilité des terres.

La zone IV (Ouest-Atacora) est constituée des communes de Cobly, Ouaké, Boucoumbé, Tanguiéta, Natitingou, Djougou, Toucountouna, Copargo, Matéri et Kouandé. Elle couvre une superficie de 16936 km^2 sa population est de 629993 habitants avec 54855 ménages agricoles. Le système de production est basé sur les céréales au Nord de la zone, complété par l'igname dans la partie sud de la zone. Le faible peuplement explique la disponibilité des terres dans la zone

La zone V (zone cotonnière) qui regroupe 12 communes dont Parakou, Savè, Glazoué, Djidja, couvre 32163 km^2 et compte 1166182 habitants avec 9153 ménages agricoles. Les céréales, les tubercules et les légumineuses sont les principales cultures de la zone.

La zone VI des terres de barre est celle qui enregistre assez de communes⁹ (22 communes) dont Agbangnizoun, Avrankou, Sakété, Zakpota, Abomey et Bohicon. Elle couvre une superficie de 6391 km^2 avec 1960136 habitants et 144715 ménages agricoles. Le système de production est basé sur la culture de maïs, du manioc et de l'arachide. Dans cette zone le régime des pluies est souvent perturbé entraînant des changements dans les cycles de production annuelle.

⁹Voir annuaire statistique MAEP, 2010

La zone VII, zone de dépression comprend les communes de Pobè, de Toffo, de Lalo d'Adja-Ouèrè et de Zogbodomey. Sa superficie est de 2564 km² avec une population de 391147 habitants. Les principales cultures sont le maïs, le manioc, le niébé, la tomate, le piment, etc. La zone révèle par ailleurs d'importantes potentialités pour la production agricole.

La zone VIII qui celle de la pêche regroupe 13 communes dont Lokossa, Cotonou, Athiémé, Ouidah, de So-Ava, de Sèmè-Podji. Elle couvre une superficie de 3280 km² avec une population de 1435888 habitants et 65120 ménages agricoles. Dans cette zone le système de production est basé sur le maïs, le manioc et les cultures maraichères. La très faible disponibilité des terres y limite l'extension de l'agriculture. Mais la principale activité qu'exercent les populations de la zone est la pêche qui leur procure l'essentiel de leurs revenus.

2.2.3.3 Carte des communes du Bénin

Le Bénin est subdivisé en six régions composées chacune de deux départements, soit douze départements pour l'ensemble du pays. Chaque département est subdivisé en communes. On dénombre 77 communes constituées de 546 arrondissements (RGPH3 : février 2002). La carte des communes du Bénin en annexe donne la répartition des communes à travers le pays.

2.3 Calendrier cultural

Le calendrier cultural du Bénin varie suivant les zones agro-écologiques. Ainsi, dans la zone cotonnière du centre Bénin, les agriculteurs plantent l'igname au début du mois de Janvier. Concernant le maïs, son ensemencement dans la zone cotonnière du nord Bénin, a lieu entre juin et juillet. Le semis du manioc dans la zone des terres de barre commence le 20 Mars et prend fin le 31 juillet. Enfin, dans la zone Ouest Atacora, les semis se font

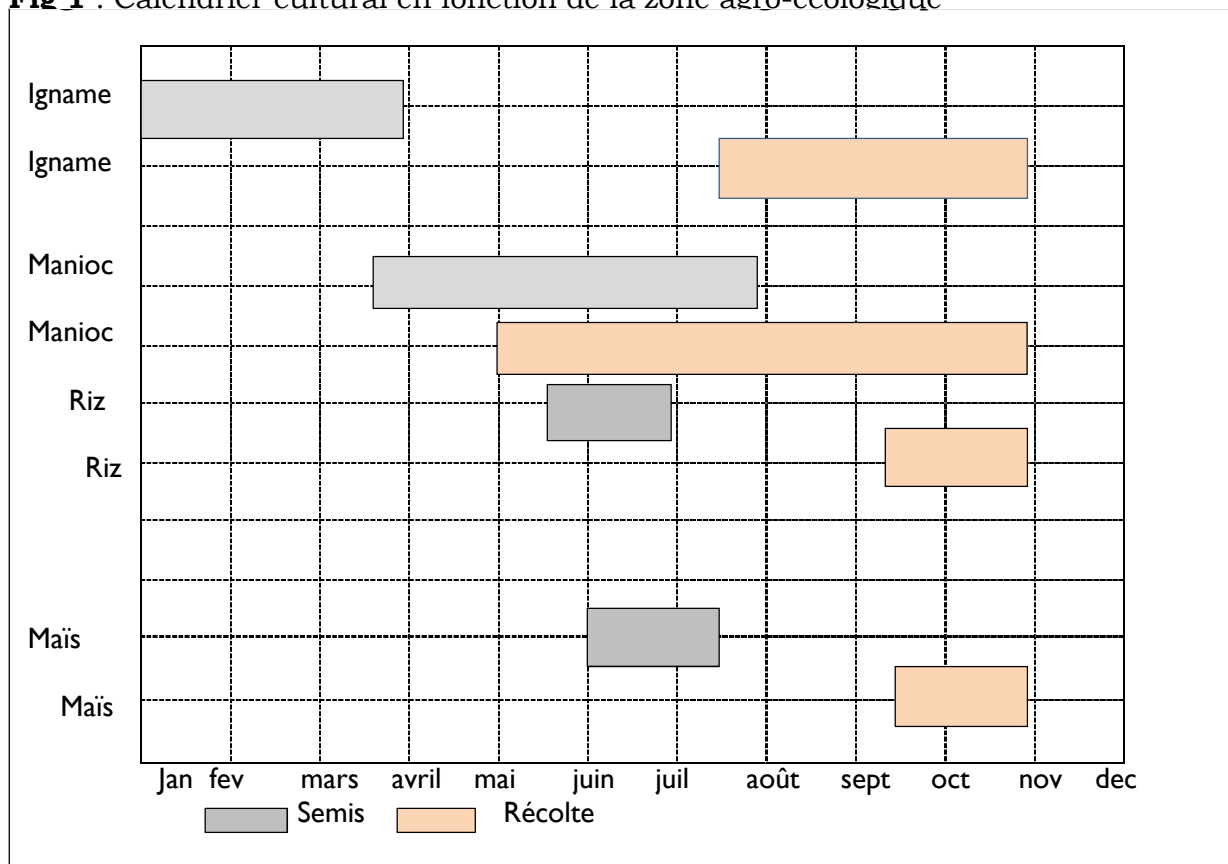
entre Mai et juin pour le riz. Notons que ce calendrier des semis est le plus souvent bouleversé par le calendrier des pluies.

Les périodes de récolte représentées dans la figure ci-dessus indiquent que la récolte de l'igname commence, au milieu du mois de Juillet pour finir à la fin du mois d'Octobre. Quant au manioc, sa récolte dure pratiquement six mois à partir du mois d'Avril. Les récoltes du riz et du maïs commencent habituellement à la mi-Septembre.

Par ailleurs, dans le sud et le centre du Bénin (Bohicon et Savè), on observe deux saisons sèches (une grande saison de décembre à mars et une petite saison d'Août à Septembre) et deux saisons pluvieuses (une grande, d'avril à juillet et une petite, de septembre à novembre). De fait, pour la prévision du rendement du manioc, les données météorologiques allant du mois d'Avril à Octobre seront prises en compte alors que pour la culture de l'igname dont le cycle de développement se situe entre 150 et 270 jours, les données météorologiques allant du mois de Février à Juillet seront utilisées dans le modèle de prévision.

Dans le Nord du Bénin, on observe une saison sèche de novembre à mai et une saison pluvieuse de mai à octobre. Ainsi, compte tenu des cycles de développement de la culture du maïs, qui varie entre 90 et 120 jours, et de la culture du riz, qui varie entre 100 et 120 jours, et aussi en fonction de la rareté des pluies au début et à la fin de la saison pluvieuse, la période de référence pour les modèles de prévision de ces deux cultures, s'étend du mois de Juin au mois de Septembre.

Fig 1 : Calendrier culturel en fonction de la zone agro-écologique



Source : Adapté à partir du calendrier culturel du Bénin sur le site <http://www.fao.org/agriculture/seed/cropcalendar/locale.do>

CHAPITRE TROISIÈME

RÉSULTATS ET ANALYSES

Dans cette partie de notre travail, nous ferons une application de la méthode retenue dans cette étude à savoir, la prévision des rendements agricoles avec le modèle de Fisher modifié successivement par Hendricks et Scholl (1943) et Agrawal et al. (1980).

3.1 Production agricole béninoise

3.1.1 Aspects généraux

Située en Afrique de l'ouest dans le golfe de Guinée, la République du Bénin couvre une superficie de 114763 Km² dont 7050000 ha soit 61,4% des terres sont cultivables, pour une population totale de 6769914 habitants recensés en février 2002. Cette population qui est rurale à 64% (environ 3,8 millions), reste concentrée dans les départements du sud et occupe 12% seulement de la superficie totale du pays. De par sa situation géographique, le Bénin bénéficie des conditions naturelles favorables aux activités de l'agriculture.

Le relief du Bénin est peu accidenté. Cependant, on note des chaînes de montagnes dans la zone Nord-Ouest (ATACORA). Plusieurs catégories de sols se distinguent à travers le pays. Il y a des sols minéraux comprenant des roches et les vertisols à caractère hydromorphe localisés au sud-Bénin mais qui se rencontrent aussi au fleuve Niger et à la Pendjari au Nord-Bénin. Ces sols sont globalement fertiles. Quant à la végétation, elle est caractérisée

par une forêt raréfiée, des palmeraies et cocoteraies au sud et une savane au Nord avançant vers le centre du pays.

Un réseau hydrographique assez fourni composé de fleuves, de lacs, de lagunes et d'affluents comme le Mono, le Couffo, l'Ouémé, le Zou, le Niger, l'Alibori, le Nokoué, le Mékrou, le Toho, et d'autres arrosent le Bénin du Nord au Sud et de l'Est à l'Ouest. Ce réseau est complété par une pluviométrie régulée par quatre saisons au sud (deux saisons de pluie et deux saisons sèches) et deux saisons au Nord (une des pluies et une sèche) souvent bonne et plus ou moins bien répartie au cours de l'année. La pluviométrie est, en dehors de certaines zones du Nord-Bénin, supérieure à 900 mm en moyenne par an.

3.1.2 Caractéristiques de la production agricole

La production agricole est la principale activité de la population béninoise. Elle se déroule sur environ 450000 exploitations de type familial généralement de petite taille (en moyenne entre 0,5 ha au sud et 2ha au Nord). La production cotonnière domine le groupe des cultures industrielles tandis que pour les cultures vivrières, les tubercules et les céréales sont en tête (annuaire statistique MAEP, 2009).

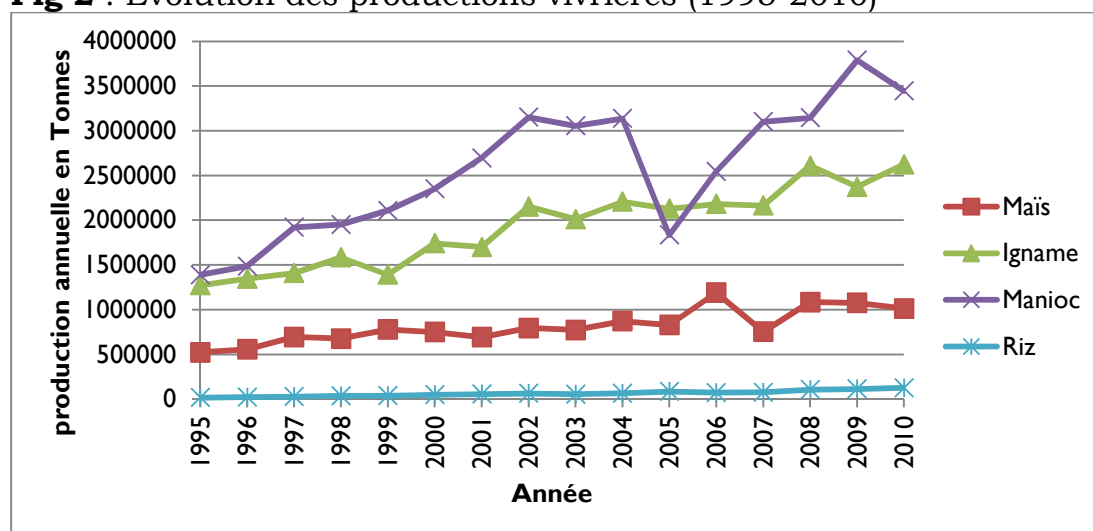
La force du travail n'est pas totalement valorisée ; la majorité des exploitants agricoles utilisent peu d'intrants en raison de l'insuffisance des moyens financiers dont ils disposent. Ainsi l'augmentation, de la production agricole s'effectue virtuellement par l'extension des superficies cultivées, provoquant la dégradation des forêts.

3.2 Présentation des résultats de l'analyse descriptive

3.2.1 Evolution des productions annuelles

La figure suivante montre, globalement, pour chaque culture, une évolution à la hausse au fil des années. En volume, les trois cultures les plus importantes sont dans l'ordre le manioc, l'igname et le maïs. Pour le manioc et l'igname, on observe une évolution semblable. De 1995 à 1998, la production du maïs n'était pas importante mais vers la fin des années 2006, cette production a subi une ascension fulgurante dénotant ainsi la forte demande intérieure. La production du riz connaît une évolution timide.

Fig 2 : Evolution des productions vivrières (1995-2010)

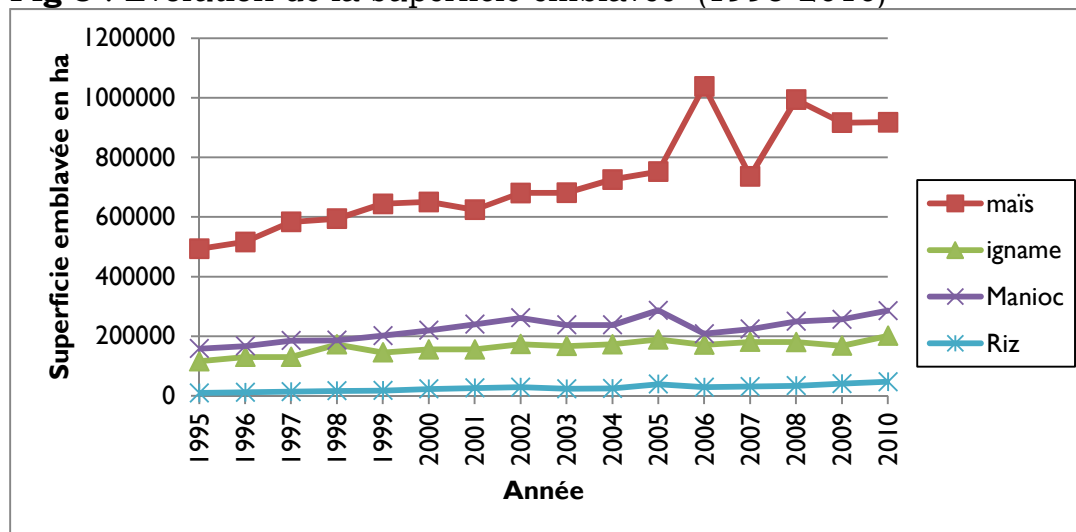


Source : Nos travaux

3.2.2 Evolution des surfaces emblavées

Comme la production, la surface cultivée des cultures a évolué en général à la hausse au cours des années. Mais l'évolution la plus forte, comme le montre la figure suivante, est celle de la surface cultivée pour le maïs qui atteint un pic de 1038463 hectares en 2006. Toutefois, cette évolution semble stagner ces dernières années. Les surfaces cultivées pour le manioc et l'igname ont accru légèrement. Quant à la culture du riz, les superficies emblavées ont connues une évolution timide ces dernières années.

Fig 3 : Evolution de la superficie emblavée (1995-2010)

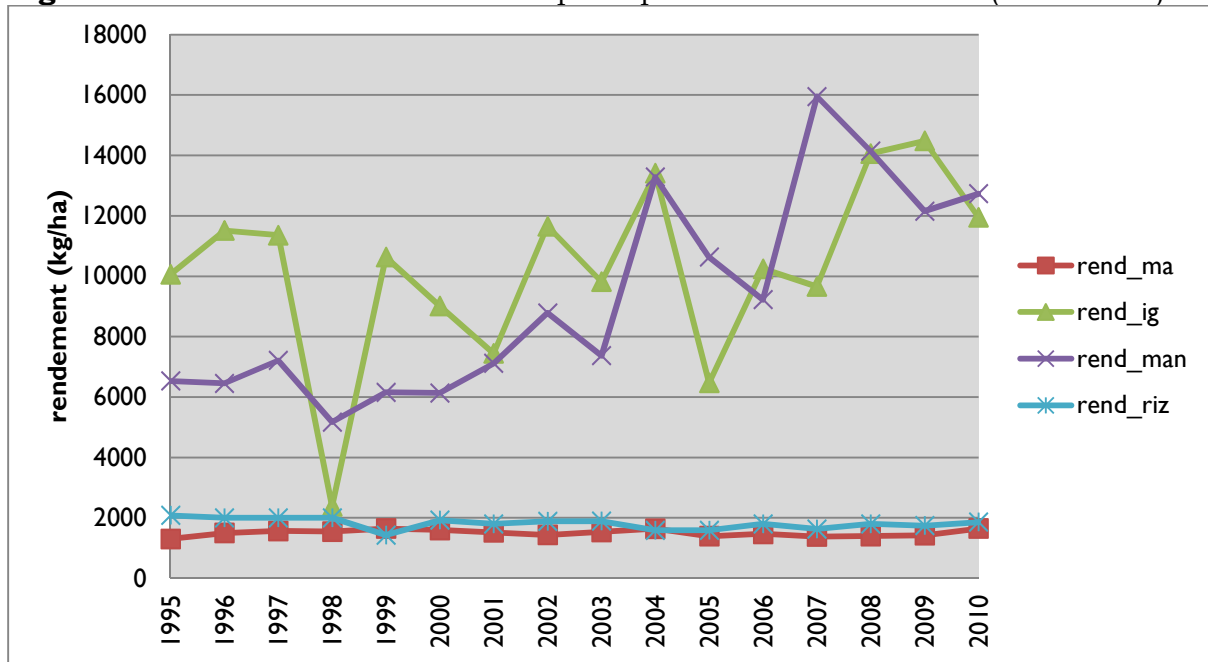


Source : Nos travaux

3.2.3 Evolution des rendements

La figure suivante montre, globalement, pour chaque culture, une évolution à la hausse du rendement au fil des années. En termes de rendement, les deux cultures les plus importantes sont dans l'ordre l'igname et le manioc. Pour le manioc et l'igname, on observe une évolution globalement semblable, sauf qu'en 1998 le rendement de l'igname a connu une chute et a atteint sa valeur minimale (2376 kg/ha) sur toute la période de l'étude. Le rendement à l'hectare du riz a connu une évolution sensible sur toute la période. En revanche, le rendement de la culture du maïs est resté sensiblement constant et ceci peut s'expliquer par le fait que les productions du maïs, ces dernières années ne sont pas proportionnelles aux superficies emblavées.

Fig 4 : Evolution des rendements des principales cultures vivrières (1995-2010)



Source : Nos travaux dans Excel 2010

3.2.4 Evolution de la pluviométrie

Fig 5: Evolution de la pluviométrie (1995-2010)



Source : Nos travaux

Comme le montre la figure ci- dessus, la quantité de pluie annuelle est caractérisée par une évolution aléatoire et varie d'une station à une autre.

3.2.5 Evolution de la température maximale et minimale

Comme cela se remarque à travers les figures 4 et 5 en annexe 1, les températures maximales et minimales moyennes décennales des quatre stations, présentent une distribution régulière dans le temps. Cependant, on observe par endroit des températures minimales moyennes décennales voisines de 16°C.

3.2.6 Evolution de l'humidité maximale et minimale

Les données de l'humidité maximale et minimale relative moyenne décennale semblent avoir une évolution régulière dans le temps (figure 8 et 9 en annexe 1) et varient d'une station à une autre avec des fluctuations différentes suivant les décades. Cependant, nous observons au cours de la période 2007-2009 une fluctuation irrégulière de l'humidité maximale moyenne décennale qui atteint son plus bas niveau contrairement à l'humidité minimale moyenne décennale dont les plus fortes valeurs sont observées sur la période.

3.2.7 Evolution de l'insolation et de l'évapotranspiration

L'observation des figures 10 et 11 (en annexe 1) représentant respectivement l'insolation et l'évapotranspiration décennale, montre une distribution régulière des deux paramètres.

3.3 Résultats de l'indice de spécialisation communale

Tableau 4 : Spécialisation en maïs

Communes	Spé	Spé	Evolution
	1 995	2 010	
Banikoara	0,05	0,19	0,50
Gogounou	0,08	0,18	0,32
Kandi	0,12	0,30	0,48
Ségbana	0,06	0,16	0,60
Natitingou	0,02	0,01	-0,03
Boucoubé	0,02	0,05	0,12
Toucoutouna	0,01	0,01	0,08
Kouandé	0,03	0,05	0,21
Savè	0,04	0,03	0,05
Tchaourou	0,03	0,01	-0,12
Ouèssè	0,02	0,05	0,23
Parakou	0,03	0,04	0,10
Glazoué	0,04	0,01	-0,13
Bohicon	0,13	0,11	-0,25
Abomey	0,06	0,06	0,01
Agbangnizoun	0,11	0,10	-0,04
Zakpota	0,09	0,11	0,24
Sô-Ava	0,02	0,05	0,07
Cotonou	0,01	0,00	-0,09

Tableau 5: Spécialisation en igname

spé	spé	Evolution
	1 995	
0,06	0,02	-0,24
0,10	0,15	0,17
0,04	0,01	-0,19
0,18	0,20	-0,36
0,30	0,27	-0,52
0,13	0,12	-0,29
0,33	0,32	-0,39
0,28	0,29	-0,23
0,10	0,27	0,77
0,35	0,38	-0,08
0,12	0,06	-0,34
0,33	0,31	0,12
0,20	0,32	0,68
0,00	0,00	0,00
0,08	0,00	-0,28
0,02	0,00	-0,27
0,04	0,02	-0,61
0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00

Tableau 6 : Spécialisation en manioc

Commune	Spé	spé	Evolution
	1 995	2 010	
Banikoara	0,02	0,01	-0,05
Gogounou	0,02	0,01	-0,06
Kandi	0,02	0,00	0,09
Ségbana	0,02	0,02	0,12
Natitingou	0,07	0,12	0,47
Boucoubé	0,01	0,01	0,04
Toucoutouna	0,11	0,11	0,32
Kouandé	0,10	0,10	0,26
Savè	0,29	0,11	-0,71
Tchaourou	0,06	0,07	0,16
Ouèssè	0,29	0,33	0,18
Parakou	0,08	0,09	-0,04
Glazoué	0,10	0,10	0,08
Bohicon	0,12	0,33	0,83
Abomey	0,23	0,38	0,81
Agbangnizoun	0,16	0,32	0,82
Zakpota	0,09	0,17	0,76
Sô-Ava	0,12	0,01	-0,15
Cotonou	0,21	0,00	-0,71

Tableau 7 : Spécialisation en riz

spé	spé	Evolution
	1995	
0,01	0,02	0,22
0,01	0,01	0,07
0,00	0,02	0,17
0,00	0,00	0,15
0,00	0,00	0,02
0,05	0,08	0,29
0,00	0,00	0,03
0,00	0,01	0,02
0,00	0,01	0,05
0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,01
0,00	0,00	0,01
0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	-0,01
0,00	0,00	0,01
0,00	0,00	0,01
0,00	0,00	0,00

Source : Nos travaux

Les communes du Nord Bénin, comme Gogounou, Ségbana, Kandi et Banikoara, augmentent leur volume de production maïs (tableau 2) entraînant ainsi une spécialisation communale. Par contre la commune de Boucoubé (tableaux 5 et 6) augmente sensiblement son volume de production en céréale (riz) au détriment de l'igname.

Les communes du centre Bénin orientées vers les productions de céréales et tubercules présentent des tendances différentes. Ainsi les communes telles Savè et Glazoué accroissent leur volume de production en tubercules (Igname) entraînant ainsi une spécialisation communale (tableau 3). En revanche, on observe une diminution du volume de production de l'igname (principale culture) dans les communes de Parakou, Ouèssè et Tchaourou.

Les communes de la zone des terres de barre telles Bohicon, Abomey, Agbangnizoun et Zakpota (tableau 4) ont modifié profondément leur structure productive avec une spécialisation vers le manioc qui fait partir des principales cultures de ces communes.

Les tableaux suivants montrent respectivement les communes identifiées pour chaque produit et stations synoptiques d'enregistrement des variables pluviométriques.

Tableau 8 : Les spécialités communales

Communes	Spécifications
Banikoara, Gogounou, Kandi, Ségbana	Maïs
Savè, Glazoué	Igname
Bohicon, Abomey, Agbangnizoun, Zakpota	Manioc
Boucoubé	Riz

Source : nos travaux

Tableau 9 : Stations météorologiques retenues par culture

Type de culture	Stations synoptiques retenues
Maïs	Kandi
Igname	Savè
Manioc	Bohicon
Riz	Natitingou

Source : Nos travaux

3.4 Présentation des résultats de l'analyse économétrique

3.4.1 Résultats de l'étude de la tendance du rendement

L'examen judicieux de l'évolution des rendements de certaines cultures révèle la présence d'une tendance générale. Le plus souvent, cette tendance est croissante et est liée à l'utilisation de variétés nouvelles, de quantités d'engrais plus importantes et de pratiques culturales et phytosanitaires mieux adaptées. En revanche, la préférence des spéculations plus rentables au détriment des cultures mieux adaptées aux terres, peut entraîner des tendances décroissantes.

En conséquence, si l'examen du graphique d'une chronique, montre que les variables semblent liées linéairement, on peut utiliser un modèle de régression simple pour l'ajustement des données et dans le cas contraire, on procède à la transformation des courbes non linéaires par des modèles mieux adaptées (VATE, 1993). Les résultats de l'application des modèles de tendance au niveau de signification de 5%, se présentent comme suit :

Tableau 10 : Résultats de l'étude de la tendance du rendement du maïs

Modèles	R ² (%)			
	Kandi	Banikoara	Gogounou	Ségbana
1	50	7	0,00	0,071
2	53,6	7,7	0,037	36,1
3	29,1	8,2	0,002	14,7
4	50,4	6,1	0,00	6,4
5	7,1	8,9	0,038	15,7
6	7,9	8,8	0,044	18,7
7	50,4	6,1	0,00	6,4

Au regard des différents résultats obtenus dans les quatre communes, seuls les modèles 1; 2; 4 et 7 ajustés dans la commune de Kandi expliquent une bonne partie de la variation du rendement du maïs. De fait un modèle de tendance issu des quatre ci-dessus cités nous permettra de dégager la tendance du rendement de maïs dans la commune de Kandi.

Cependant, On ne saurait donc retenir un modèle de tendance qui justifierait l'évolution des rendements de maïs dans les communes de Banikoara, Gogounou et Ségbana. Ainsi, la modélisation des effets du climat prendra en compte dans ces trois communes, non pas les résidus des rendements par rapport à la tendance, mais les valeurs brutes des rendements.

Le tableau suivant donne les résultats du coefficient de détermination et de l'erreur quadratique moyenne.

Tableau 11 : valeur de R² et RMSE (rendement du maïs)

Modèles	R ² (%)	RMSE
1	50	152,074
2	53,6	146,505
3	50,4	154,236
4	50,4	154,236

Au vu des résultats, il apparaît clairement que le modèle 2, explique bien l'évolution des rendements dans la commune de Kandi. Ainsi le modèle de prévision de rendement de maïs dans la commune de Kandi mettra en

relation les résidus du rendement générés par le modèle quadratique de tendance, et les variables climatiques.

Tableau 12 : Résultats de l'étude de la tendance du rendement de l'igname

Modèles	R ² (%)	
	Glazoué	Savè
1	5,8	30
2	31,4	31,1
3	0,6	22,2
4	6,1	18,8
5	0,2	10,7
6	0,6	4
7	3,1	18,8

Comme dans la commune de Gogounou, les différents ajustements ne présentent de bons résultats du coefficient de détermination. Ainsi les modèles de prévision du rendement de l'igname dans ces deux communes seront simulés avec les rendements bruts d'igname.

Tableau 13 : Rendement du riz de la commune de Boucoubé

Modèles	R ² (%)
1	29,3
2	38,5
3	37,1
4	25
5	33,4
6	29,4
7	25

Aucun modèle d'ajustement n'explique une bonne partie de la variation du rendement du riz. Ainsi, comme dans les cas précédents, la modélisation des effets du climat sera implémentée avec les rendements bruts de la culture du riz.

Tableau 14 : Résultats de l'étude de la tendance du rendement du manioc

Modèles	R ² (%)			
	Abomey	Agbangnizoun	Bohicon	Zakpota
1	56,7	52,9	56	47,9
2	57,2	53,4	56	58,8
3	42,7	39,2	51	28,9
4	59,8	50,9	52,4	57,7
5	20,8	18,1	35,2	11
6	21,3	14,8	40,8	12
7	59,8	50,9	52,4	57,7

Les résultats du coefficient de détermination des ajustements réalisés, nous permet de sélectionner les modèles suivants par communes. Le tableau ci-dessous regroupe ces résultats et présente les valeurs de l'erreur quadratique moyenne pour chaque modèle d'ajustement retenu.

Tableau 15 : Valeur de R² et de RMSE (rendement du manioc)

Commune	modèle	R ² (%)	RMSE
Abomey	1	56,7	1885,939
	2	57,2	1875,276
	4	59,8	1891,499
	7	59,8	1891,499
Agbangnizoun	1	52,9	2312,717
	2	53,4	2301,152
Bohicon	1	56	2759,221
	2	56	2759,221
Zakpota	2	58,8	2858,951
	4	57,7	3156,929
	7	57,7	3156,929

- Dans la commune d'Abomey, du point de vue de la précision des ajustements, les tests usuels (test de Fisher, coefficient de détermination) désignent la tendance exponentielle ou croissante (modèle 4 et 7) comme la plus " précise ", devant les tendances linéaires et quadratiques (modèle 1 et 2). Mais l'application du critère MSE conduit à préférer la tendance quadratique. Nous retiendrons donc la tendance quadratique (modèle 2) pour

l'évolution du rendement du manioc dans la commune d'Abomey. Ce choix n'est pas contredit pas le graphique de la chronique qui montre en effet, une légère concavité vers le haut.

- Dans les communes d'Agbangnizoun et de Zakpota, les résultats obtenus du critère MSE permettent de retenir la tendance quadratique pour l'étude de l'évolution du rendement de manioc dans ces deux communes.

- Les résultats du critère RMSE obtenus dans la commune de Bohicon, ne permet pas de retenir un modèle. Mais le calcul de l'erreur absolue moyenne donne respectivement pour les modèles linéaire et quadratique, MAE= 2109,1731 et

MAE= 2108,0650. Ce second critère nous permet de retenir la tendance quadratique pour étudier l'évolution des rendements manioc dans cette commune.

Conclusion de l'étude de la tendance

Au vu des différents résultats obtenus, il apparaît clairement que l'évolution des rendements des communes Banikoara, Gogounou, Ségbana, Glazoué, Savè, Boucoubmé est sans tendance. Ainsi, les modèles de prévision de rendements de ces communes utiliserons les rendements bruts des diverses cultures, comme variables dépendantes.

En revanche l'évolution des rendements des cultures dans les communes de Kandi, de Natitingou, d'Abomey, de Bohicon, d'Agbangnizoun et de Zakpota, est caractérisée par des tendances quadratiques dont les équations sont régies par les relations suivantes :

❖ Commune de Kandi

$$Y = -2,459t^2 + 4,167t + 1783,979$$

❖ Commune d'Abomey

$$Y = 12,053t^2 + 306,545t + 5713,675$$

❖ Commune de Bohicon

$$Y = -0,712t^2 + 713,496t + 4691,987$$

- ❖ Commune d'Agbangnizoun

$$Y = 13,933t^2 + 344,367t + 5299,969$$

- ❖ Commune de Zakpota

$$Y = 88,865t^2 - 708,012t + 7092,705$$

3.4.2 Résultats des modèles de prévision et validation

Toutes les estimations et tests ayant conduit aux résultats suivants figurent en annexe.

Dans le but de simplifier la lecture du document, seules les variables statistiquement significatives figureront dans nos modèles.

Par ailleurs, excepté la commune de Savè, deux modèles de prévision sont retenus par commune et les meilleurs sont mis en évidence en gras. Seuls les résultats des meilleurs modèles sont présentés dans le document.

Les différents résultats obtenus pour le cas de la culture du maïs, montrent que les communes de Kandi et Gogounou fournissent les meilleurs chiffres avec un R^2 dépassant 0,80 et une erreur type en deçà des 65,17 kg/hectare. Sur un rendement moyen de maïs des quatre communes, de 1485,75 kg/ha sur les 15 années d'observations, ceci représente une erreur d'environ 4,4%. Les évolutions des valeurs prédites par les quatre modèles et les valeurs observées dans ces communes sont représentées par les figures 13;14;15 et 16.

Concernant les variables explicatives auxquelles les modèles font appel, on observe des similarités entre les modèles. Ainsi les rendements au niveau des communes de Banikoara et de Ségbana sont fortement corrélés au cumul pondéré de l'interaction entre la pluviométrie et l'insolation et ceux des communes de Kandi et de Gogounou sont fortement corrélés au cumul pondéré de la combinaison de l'insolation et de l'évapotranspiration. Outre ces facteurs, l'effet joint de la température maximale moyenne décadaire et de l'humidité minimale moyenne décadaire explique aussi bien le

rendement de maïs. Au total, l'accroissement des effets joints de la pluviométrie et de l'insolation d'une part, de la température maximale et de l'humidité minimale moyenne décadaire d'autre part, pourraient contribuer à l'augmentation des rendements de maïs de nos communes. Ce résultat n'est pas surprenant car d'une part, l'agriculture béninoise est tributaire de la pluie et d'autre part, la durée qui sépare la mise en terre des graines et les premières récoltes, appartient à l'intervalle de la saison pluvieuse.

De l'analyse des résultats des modèles de prévision du rendement du manioc, il ressort que les facteurs tels, la pluviométrie, la température maximale moyenne décadaire, l'insolation et l'humidité maximale moyenne décadaire interagissent sur le rendement du manioc. Ainsi les cumuls pondérés de la pluviométrie, de l'insolation, de la température maximale moyenne décadaire et de l'humidité maximale moyenne décadaire, de l'humidité maximale moyenne décadaire et de l'évapotranspiration, sont fortement corrélés au rendement du manioc. Ces variables expliquent bien le rendement du manioc et témoignent de la robustesse des différents modèles, en ce sens que le manioc a besoin d'un climat chaud et humide et les températures trop basses ne sont pas trop bonnes pour cette spéculation. Par ailleurs, le meilleur modèle atteint un $R^2 = 0,78$ avec une erreur type de moins de 966 kg/hectare, soit une erreur moyenne de 10,2%. La présence de l'année comme facteur explicatif des modèles tend à montrer une tendance dans l'évolution des rendements, qui est positive dans les différents cas. Cela s'explique par le fait que ces dernières années on tend vers une modernisation de la culture du manioc dans ces zones. L'évolution des valeurs prédites et des valeurs observées est représentée aux figures 9; 10; 11 et 12.

Les deux modèles de prévision de rendement de l'igname obtenus révèlent une similarité entre eux. Le rendement de l'igname est en effet fortement corrélé avec le cumul pondéré de l'interaction de l'insolation et de l'évapotranspiration, et aussi d'autres facteurs tels la pluviométrie, la température maximale moyenne décadaire et l'humidité maximale. Par ailleurs, le meilleur des deux modèles explique plus de 80% du rendement de l'igname

avec une erreur type de moins de 1153 kg/hectare. Sur un rendement moyen de 10 770,75 kg/hectare sur la période d'étude, ceci représente une erreur moyenne d'environ 10,7%. L'absence de la tendance dans l'évolution des rendements traduit la constance de l'utilisation des technologies dans la culture de l'igname. L'évolution des valeurs prédites par ces modèles et des valeurs observées est représentée aux figures 7 et 8.

Le rendement du riz reste fortement influencé par les cumuls pondérés des combinaisons de l'insolation, et de la pluviométrie d'une part, puis de l'humidité maximale moyenne décadaire d'autre part. Ce modèle traduit la réalité car structurellement le riz a besoin d'une assez grande quantité d'eau pour réussir. Ce modèle explique plus de 70% du rendement du riz avec une erreur-type en deçà de 93 kg/hectare, soit une erreur moyenne de 5,13% sur la période d'étude (rendement moyen de 1810,15 kg/hectare). La figure 6 présente l'évolution des valeurs prédites par le modèle et les valeurs observées sur la période de l'étude.

3.4.2.1 Commune de Boucoubé

Tab.16.1- Validation des modèles de prévision de rendement du riz

Modèles	R ² cv	RMSE (kg/ha)	Variables explicatives
Modèle1	70,22	92,53	Z₁₇₁, Z₄₆₁
Modèle 2	65,77	98,36	Z ₁₇₁ , Z ₅₆₁

Avec :

Z_{171} : cumul pondéré de la combinaison des variables pluviométriques d'évapotranspiration

Z_{461} : cumul pondéré de la combinaison de l'humidité minimale moyenne décadaire et de l'insolation

Z_{561} : cumul pondéré de la combinaison de l'humidité maximale moyenne décadaire et de l'insolation.



Fig.6 –Comparaison de rendements du riz observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune de Boucoumbé

Tab.16.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.

Variables	Coefficient Standardisés			
	B	Erreur Standardisées	t	Sig.
Constante	950,147	247,445	3,840**	0,002
Z ₁₇₁	0,056	0,015	3,763**	0,003
Z ₄₆₁	0,127	0,041	3,099**	0,009

** - Significatif à 1%

Equation du modèle de prévision :

$$Rend_{Boucoumbé} = 950,147 + 0,056 Z_{171} + 0,127 Z_{461}$$

$$R^2 = 79\%$$

$$DW=2,026$$

$$[prob (Shapiro-Wilk)=0,278]$$

$$VIF=1,293$$

$$n=15$$

3.4.2.2 Commune de Glazoué

Tab.17.1 - Validation des modèles de prévision du rendement de l'igname

Modèles	R ² cv	RMSE (kg/ha)	Variables explicatives
Modèle1	78,85	1270,49	Z ₆₇₁ , Z ₁₆₀
Modèle 2	79,92	1152,46	Z₆₇₁, Z₁₆₁, Z₄₆₁

Avec :

Z₆₇₁ : cumul pondéré de la combinaison de l'insolation et de l'évapotranspiration.

Z₁₆₀ : cumul de la combinaison de la pluviométrie et de l'insolation.

Z₁₆₁ : cumul pondéré de la combinaison de la pluviométrie et de l'insolation.

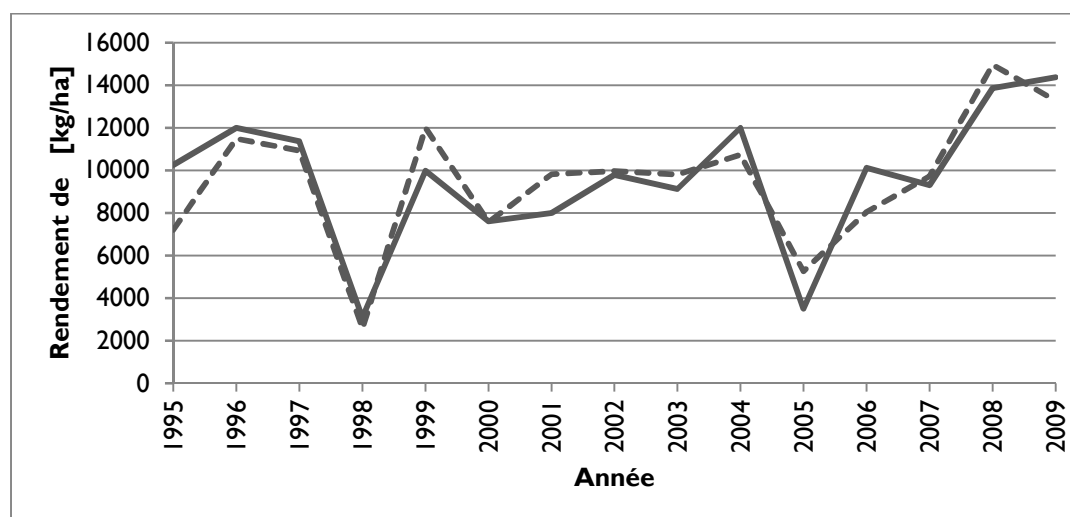


Fig.7 –Comparaison rendements de l'igname observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune de Glazoué

Tab.17.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.

Variables	Coefficient Standardisés			Sig.
	B	Erreur Standardisées	t	
Constante	16384,848	4257,122	3,849**	0,003
Z ₆₇₁	0,794	0,386	2,059	0,064
Z ₁₆₁	0,320	0,119	2,691*	0,021
Z ₄₆₁	0,617	0,268	2,301*	0,042

** - Significatif à 1%

* - Significatif à 5%

Equation du modèle de prévision

$$Rend_{Glazoué} = 16384,848 + 0,794 Z_{671} + 0,320 Z_{161} + 0,617 Z_{461}$$

$$R^2 = 89,8\%$$

$$DW=2,241$$

$$[Prob (Shapiro-Wilk) =0,953]$$

$$VIF < 5$$

$$n=15$$

3.4.2.3 Commune de Savè

Tab.18.1 - Validation des modèles de prévision de rendement de l'igname

Modèle	R ² cv	RMSE (kg/ha)	Variables explicatives
Modèle	72,59	1968,50	Z₆₇₁, Z₂₄₁

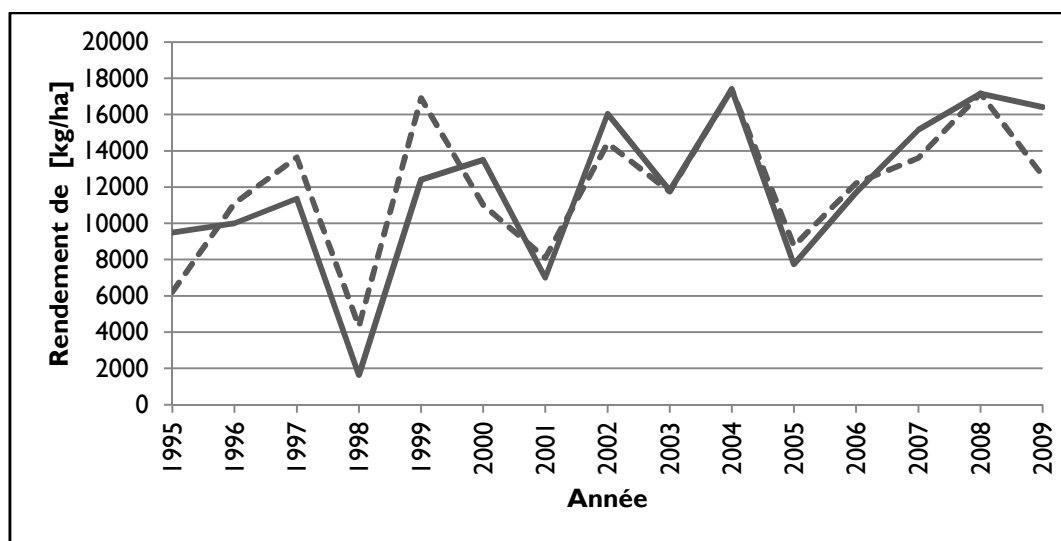


Fig.8 –Comparaison rendements de l'igname observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune de Savè

Tab.18.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.

Variables	Coefficient Standardisés			t	Sig.
	B	Erreur Standardisées			
Constante	51228,434	7088,931		7,227**	,000
Z ₆₇₁	2,087	0,435		4,798**	,000
Z ₂₄₁	8,859	3,032		2,922*	,013

** - Significatif à 1%

* - Significatif à 5%

Equation du modèle de prévision

$$Rend_{Savè} = 51228,434 + 2,087 Z_{671} + 8,859 Z_{241}$$

$$R^2 = 82,5\%$$

$$DW = 1,658$$

$$[Prob (Shapiro-Wilk) = 0,945]$$

$$VIF = 1,269 \quad n = 15$$

3.4.2.4 Commune d'Abomey

Tab.19.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du manioc

Modèles	R ² cv	RMSE (kg/ha)	Variables explicatives
Modèle1	77,62	692	Z₆₁, Z₁₄₁, Z₂₄₁
Modèle 2	74,48	816,13	Z ₆₁ , Z ₁₄₁

Avec :

Z₆₁ : cumul pondéré de l'insolation.

Z₁₄₁ : cumul pondéré de la combinaison de la pluviométrie et de l'humidité maximale moyenne décadaire.

Z₂₄₁ : cumul pondéré de la combinaison de la température maximale et de l'humidité maximale.

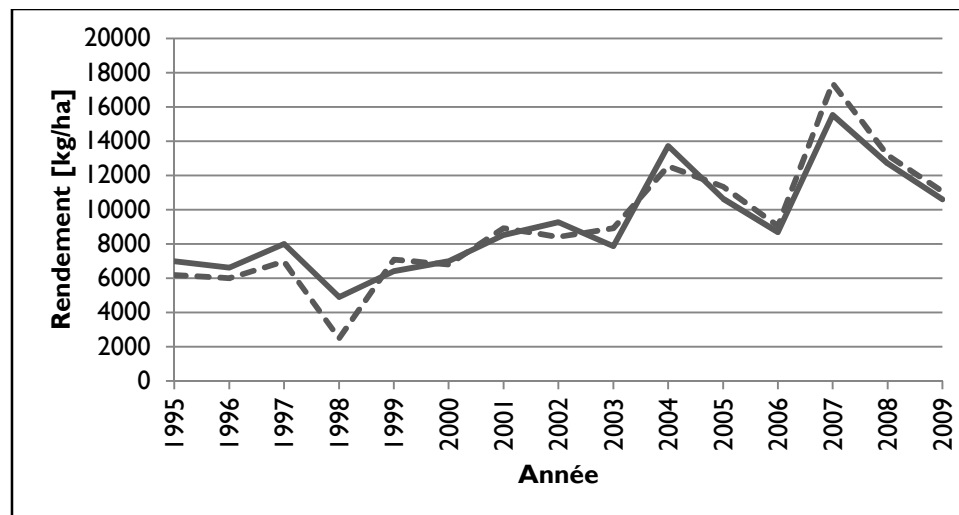


Fig. 9 –Comparaison rendements du manioc observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune d'Abomey

Tab.19.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.

Variables	Coefficient Standardisés		t	Sig.
	B	Erreur Standardisées		
Constante	-2828,917	1465,251	-1,931	0,080
Z ₆₇₁	0,159	0,029	5,430**	0,000
Z ₁₆₁	59,562	12,960	4,596**	0,001
Z ₄₆₁	-0,819	0,343	-2,386*	0,036

** - Significatif à 1%

* - Significatif à 5%

Equation du modèle de prévision

$$Rend_{Abomey} = 2884,758 + 0,159 Z_{671} + 59,562 Z_{161} - 0,819 Z_{461} + 12,053t^2 + 306,545t$$

$R^2 = 90\%$

$DW=2,029$

$[Prob (Shapiro-Wilk) = 0,109]$

$VIF < 5$

$n=15$

3.4.2.5 Commune d'Agbangnizoun

Tab.20.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du manioc

Modèles	R ² cv	RMSE (kg/ha)	Variables explicatives
Modèle1	63,52	1156,14	Z ₆₇₁ , Z ₁₇₁
Modèle 2	72,76	1109,43	Z₁₁, Z₆₁

Avec :

Z₁₁ : cumul pondéré de la pluviométrie.

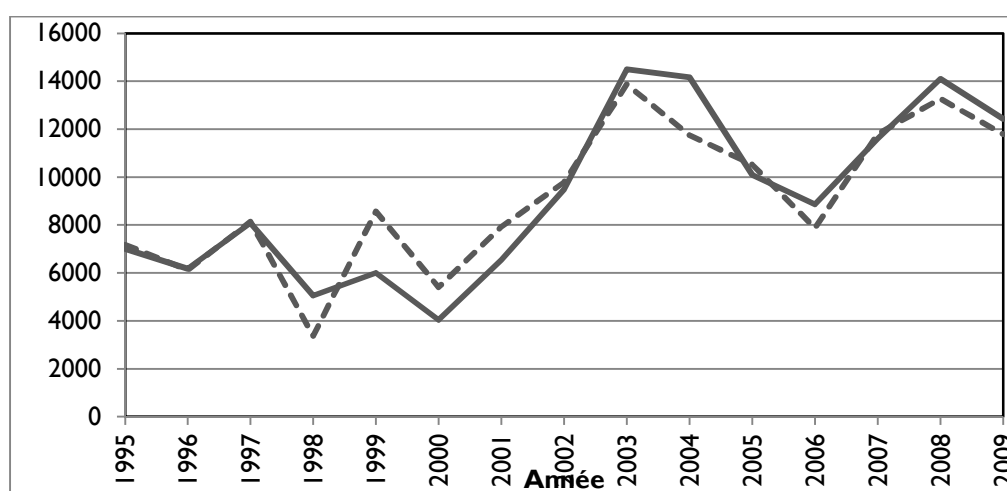


Fig. 10 –Comparaison rendements du manioc observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune d'Agbangnizoun

Tab.20.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student

Variables	Coefficient Standardisés			Sig.
	B	Erreur Standardisées	t	
Constante	-2830,096	724,938	-3,904**	0,002
Z ₁₁	20,879	6,166	3,386**	0,005
Z ₆₁	78,788	26,211	3,006*	0,011

** - Significatif à 1%

* - Significatif à 5%

Equation du modèle de prévision

$$Rend_{Agban} = 2469,873 + 20,879 Z_{11} + 78,788 Z_{61} + 13,933t^2 + 344,367t$$

$$R^2 = 81,4\%$$

$$DW=1,929$$

$$[Prob (Shapiro-Wilk) = 0,855]$$

$$VIF = 1,595$$

$$n=15$$

3.4.2.6 Commune de Bohicon

Tab.21.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du manioc

Modèles	R ² cv	RMSE (kg/ha)	Variables explicatives
Modèle1	66,91	1423,9	Z ₄₇₁ , Z ₁₅₁
Modèle 2	78,32	1126,94	Z₄₇₁, Z₁₅₁, Z₃₁

Avec :

Z₃₁ : cumul pondéré de la température minimale moyenne décadaire.

Z₄₇₁ : cumul pondéré de la combinaison de l'humidité maximale moyenne décadaire et de l'évapotranspiration.

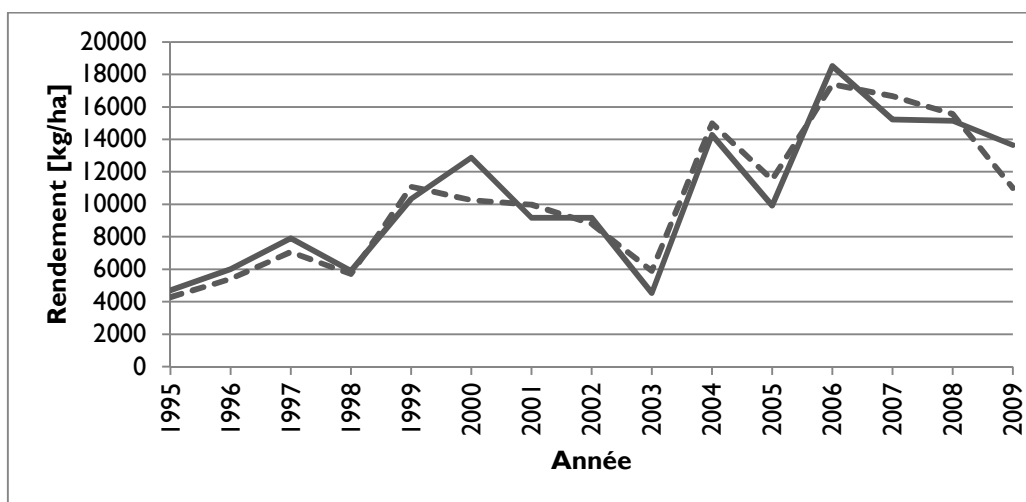


Fig. 11 –Comparaison rendements du manioc observés (plein) et simulé (pointillé) dans la commune de Bohicon

Tab.21.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.

Variables	Coefficient Standardisés			
	B	Erreur Standardisées	t	Sig.
Constante	48894,324	26713,762	1,830	0,094
Z ₄₇₁	1,231	0,619	1,988	0,072
Z ₁₅₁	0,553	0,169	3,276**	0,007
Z ₃₁	953,111	33,767	2,856*	0,016

** - Significatif à 1%

* - Significatif à 5%

Equation du modèle de prévision

$$\text{Rend}_{\text{Agban}} = 53586,311 + 1,231 Z_{471} + 0,553 Z_{151} + 953,111 Z_{31} - 0,712 t^2 + 713,496 t$$

$$R^2 = 87,8\%$$

$$DW=2,245$$

$$[\text{Prob (Shapiro-Wilk)} = 0,387]$$

$$VIF < 5$$

$$n=15$$

3.4.2.7 Commune de Zakpota

Tab.22.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du manioc

Modèles	R ² cv	RMSE (kg/ha)	Variabes explicatives
Modèle1	77,26	1087,81	Z₄₆₁, Z₁₃₁
Modèle 2	77,61	1115,04	Z ₁₃₁ , Z ₆₁

Avec :

Z₁₃₁ : cumul pondéré de la combinaison de la pluviométrie et de la température minimale moyenne décadaire.

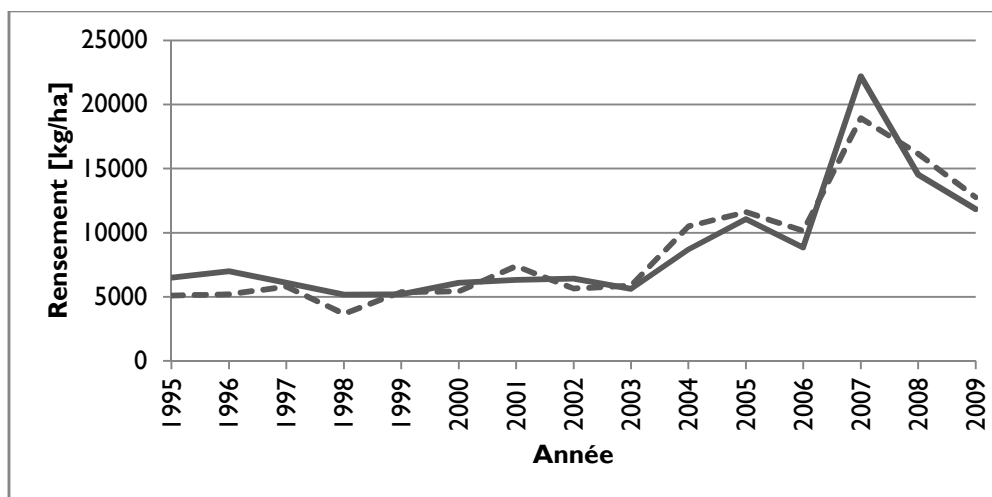


Fig. 12 – Comparaison rendements du manioc observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune de Zakpota

Tab.22.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.

Variables	Coefficient Standardisés			
	B	Erreur Standardisées	t	Sig.
Constante	7397,729	1801,621	4,106**	0,001
Z ₁₃₁	0,956	0,166	5,759**	0,000
Z ₄₆₁	0,934	0,211	4,414**	0,001

** - Significatif à 1%

Equation du modèle de prévision

$$Rend_{Zakpota} = 14490,434 + 0,956Z_{131} + 0,934Z_{461} + 88,865t^2 - 708,012t$$

$$R^2 = 88,4\%$$

$$DW=1,753$$

$$[Prob (Shapiro-Wilk) = 0,834]$$

$$VIF = 1,228$$

$$n=15$$

3.4.2.8 Commune de Banikoara

Tab.23.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du maïs

Modèles	R ² cv	RMSE (kg/ha)	Variables explicatives
Modèle1	73,96	93,19	Z₁₆₁, Z₂₆₁
Modèle 2	68,72	101,058	Z ₃₁ , Z ₁₇₁

Avec :

Z₂₆₁ : cumul pondéré de la combinaison de la température maximale moyenne déca-daire et de l'insolation.

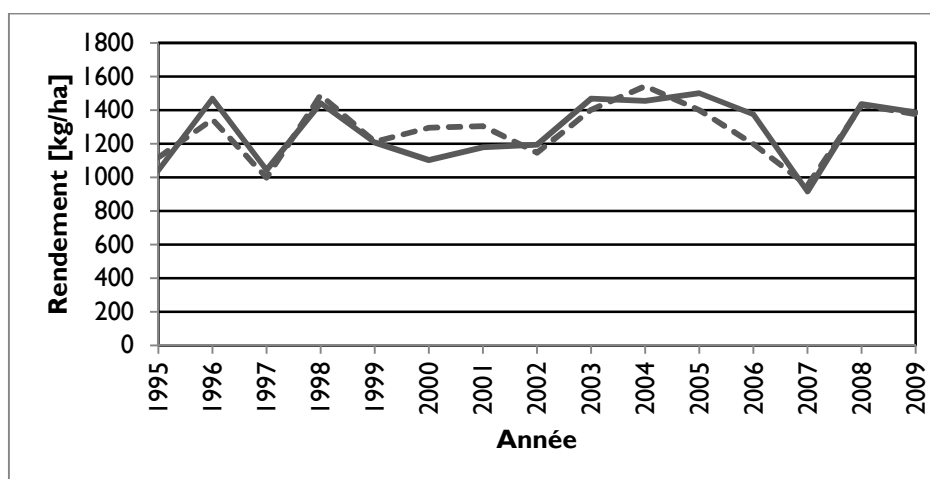


Fig. 13 – Comparaison rendements du maïs observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune de Banikoara

Tab.23.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.

Variables	Coefficient Standardisés			
	B	Erreur Standardisées	t	Sig.
Constante	1176,263	104,682	11,237**	0,000
Z ₂₆₁	0,228	0,078	2,946*	0,012
Z ₁₆₁	0,047	0,009	5,492**	0,000

** - Significatif à 1%

* - Significatif à 5%

Equation du modèle de prévision

$$Rend_{banikoara} = 1176,263 + 0,228 Z_{261} + 0,047 Z_{161}$$

$R^2 = 80\%$

$DW=1,636$

$[Prob (Shapiro-Wilk) = 0,999]$

$VIF = 1,048$

$n=15$

3.4.2.9 Commune de Ségbana

Tab.24.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du maïs

Modèles	R ² cv	RMSE (kg/ha)	Variables explicatives
Modèle 1	55,20	80,64	Z₁₆₁, Z₂₅₁
Modèle 2	52,13	81,37	Z ₁₆₁ , Z ₅₆₁

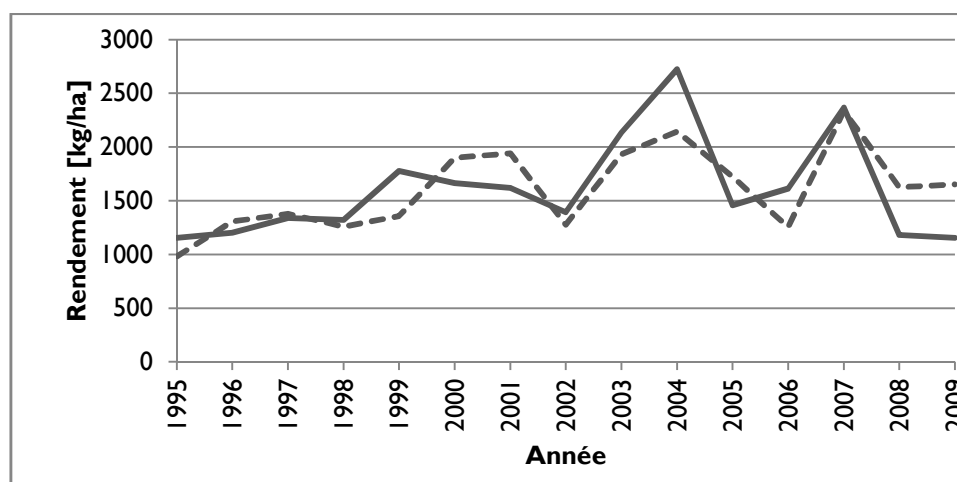


Fig. 14 – Comparaison rendements du maïs observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune Ségbana

Tab.24.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.

Variables	Coefficient Standardisés			
	B	Erreur Standardisées	t	Sig.
Constante	-1793,465	911,407	-1,968	0,073
Z ₂₅₁	1,441	0,385	3,745	0,003
Z ₁₆₁	0,063	0,028	2,248	0,044

** - Significatif à 1%

* - Significatif à 5%

Equation du modèle de prévision

$$Rend_{Ségbana} = -1793,465 + 1,441 Z_{251} + 0,063 Z_{161}$$

$$R^2 = 69,9\%$$

$$DW = 1,605$$

$$[Prob (Shapiro-Wilk) = 0,842]$$

$$VIF < 5$$

$$n = 15$$

3.4.2.10 Commune de Kandi

Tab.25.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du maïs

Modèles	R ² cv	RMSE (kg/ha)	Variabes explicatives
Modèle 1	72	88,86	Z ₁₇₁ , Z ₆₇₁
Modèle 2	86,6	65,17	Z₂₅₁, Z₁₇₁, Z₆₇₁

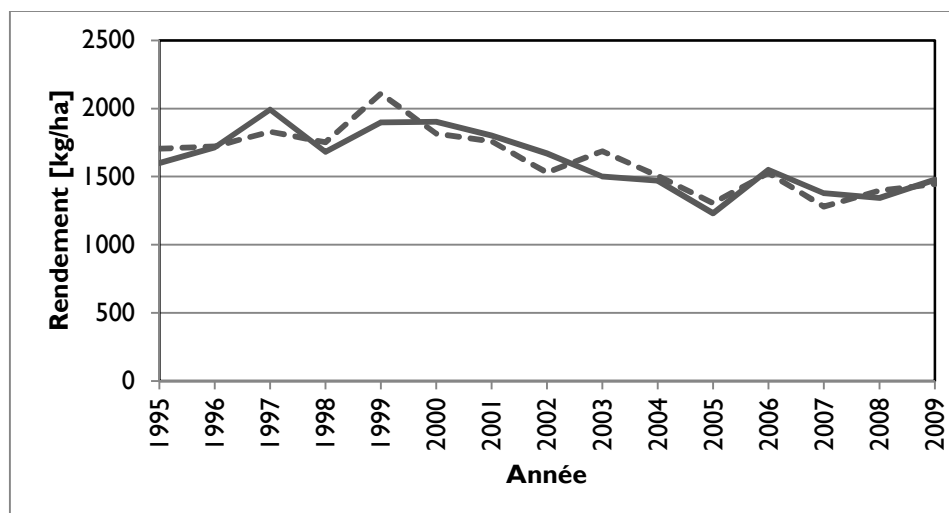


Fig. 15 –Comparaison rendements du maïs observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune de Kandi

Tab.25.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.

Variables	Coefficient Standardisés			
	B	Erreur Standardisées	t	Sig.
Constante	1250,117	190,147	6,574**	0,000
Z ₆₇₁	0,030	0,017	1,733	0,111
Z ₁₇₁	0,031	0,011	2,727*	0,020
Z ₂₅₁	1,143	0,340	3,362**	0,006

** - Significatif à 1%

* - Significatif à 5%

Equation du modèle de prévision

$$Rend_{kandi} = 3034,096 + 0,030 Z_{671} + 0,031 Z_{171} + 1,143 Z_{251} - 2,459t^2 + 4,167t$$

$$R^2 = 85,5\%$$

$$DW=2,249$$

$$[Prob (Shapiro-Wilk) = 0,936]$$

$$VIF < 5$$

$$n=15$$

3.4.2.11 Commune de Gogounou

Tab.26.1 - Validation des modèles de prévision de rendement du maïs

Modèles	R ² cv	RMSE (kg/ha)	Variables explicatives
Modèle1	88,5	68,28	Z₆₇₁, Z₅₇₁
Modèle 2	87,3	69,5	Z ₁₇₁ , Z ₅₇₁

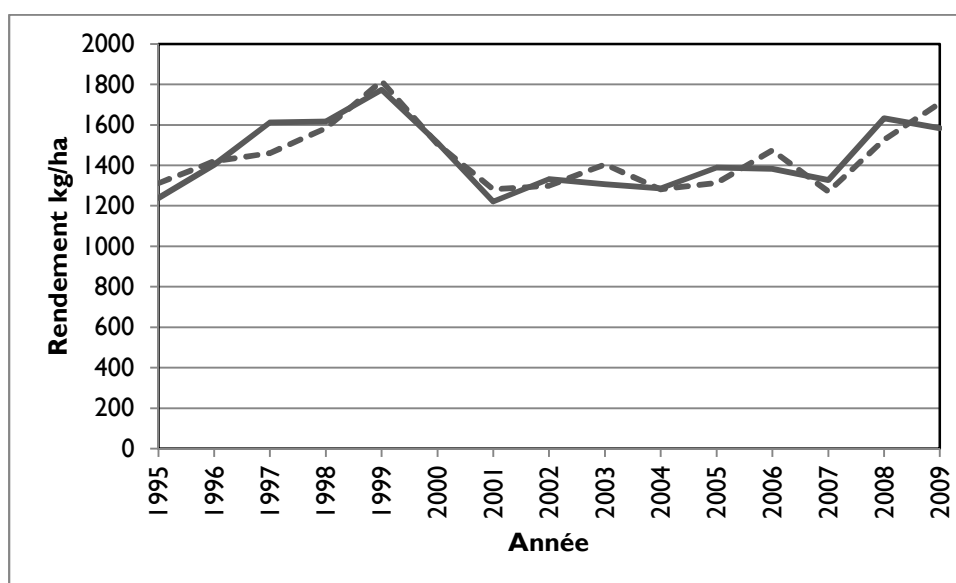


Fig. 16 –Comparaison rendements du maïs observés (plein) et simulés (pointillé) dans la commune de Gogounou

Tab.26.2 - Résultats des coefficients de régression et du test de Student.

Variables	Coefficient Standardisés			
	B	Erreur Standardisées	t	Sig.
Constante	2751,783	258,873	10,630**	0,000
Z ₆₇₁	0,054	0,012	4,577**	0,001
Z ₅₇₁	0,122	0,053	2,320*	0,039

** - Significatif à 1%

* - Significatif à 5%

Equation du modèle de prévision

$$\text{Rend}_{\text{Gogounou}} = 2751,783 + 0,054 Z_{671} + 0,122 Z_{571}$$

$$R^2 = 85,9\%$$

$$DW = 2,330$$

$$[Prob (Shapiro-Wilk) = 0,615]$$

$$VIF < 5$$

$$n=15$$

Suggestions et recommandations

Les résultats ci-dessus obtenus sont fortement tributaires du choix des communes liées aux stations synoptiques. Pour cela, les suggestions suivantes nous semblent pertinentes :

▣ Doter tous les départements, voire toutes les communes, des stations synoptiques capables d'enregistrer tous les paramètres météorologiques.

▣ Etendre cette étude à toutes les communes du pays et toutes les cultures, pour pouvoir déterminer des prévisions globales au niveau national.

Pour y parvenir, nous recommandons ce qui suit :

- Identifier les départements qui fournissent une part significative de la production nationale et déterminer les rendements des différentes cultures de ces départements.
- A partir de ces départements sélectionnés, rechercher un modèle combinant ces départements et qui ferait une bonne estimation au niveau national. A cet effet, on peut rechercher d'abord par régression multiple les départements qui ayant un modèle de prévision de rendement correct, sont plus explicatifs de la production au niveau national. Par la suite, les départements qui expliquent le mieux la production nationale ainsi obtenus sont utilisés pour l'estimation du rendement au niveau national.

CONCLUSION

De façon générale, les résultats exposés ci-dessus mettent en évidence l'importance de certains facteurs. Ainsi, la pluviométrie, l'insolation et l'évapotranspiration potentielle se retrouvent dans la quasi-totalité des modèles retenus pour la prévision des rendements des différentes cultures. Ceci nous conduit donc à penser que ces paramètres sont très corrélés au rendement, qu'ils sont assez stables et que ce sont donc de bons prédicteurs.

Par ailleurs, il faut remarquer que certains facteurs semblent être déterminants dans la vie des différentes cultures. Ainsi la présence de l'humidité minimale relative dans le modèle de prévision du riz confirme une fois encore que ce facteur est indispensable pour l'accroissement du rendement de cette culture. Aussi les modèles de prévision du manioc sont révélateurs de ce que le manioc a besoin effectivement d'un climat chaud et humide pour sa survie.

Il est également intéressant de noter que parmi les quatre type d'indicateurs utilisés comme facteurs explicatifs, seuls ceux qui sont pondérés par les coefficients de corrélation sont représentés dans les modèles de prévision. Cette observation tend à justifier que le rendement est bien une fonction linéaire de coefficients de corrélation. Remarquons également que tous les paramètres utilisés dans les modèles retenus sont disponibles au moins dix jours avant la de la période des récolte. Ceci signifie que les estimations de rendements peuvent être faites à l'aide de ces modèles au moins dix jours avant les dates de récolte.

La présente étude a été entreprise dans le but d'améliorer les méthodes de prévision des principales cultures vivrières (maïs, manioc, riz et igname) au Bénin. Il s'agit d'élaborer des modèles de prévision de rendements de ces différentes cultures en identifiant les paramètres météorologiques qui ont un effet significatif sur le rendement de chaque culture.

L'étude s'est inspirée des modèles de Fisher et de Hendricks et Scholl qui sont surtout utilisés en Inde pour déterminer l'influence des facteurs météorologiques sur le rendement agricole ou pour élaborer des modèles de prévisions de rendements. Les résultats obtenus varient d'une culture à l'autre.

L'évolution des rendements de certaines cultures présentent des tendances qui sont avérées croissantes. Ceci implique que les agriculteurs bénéficient de nouvelles techniques de cultures qui permettent d'avoir de meilleurs rendements. Il est aussi important de remarquer que le rendement agricole est plus lié à l'évapotranspiration potentielle et à l'humidité qu'aux paramètres météorologiques simples tels la pluviométrie et la température. Ceci confirme les conclusions de Baier et Robertson (1967) dans une étude réalisée sur la prévision du rendement du blé à travers les indicateurs agrométéorologiques.

Au niveau des indices synthétiques explicatifs des différents modèles, seuls ceux qui sont pondérés ont un effet significatif sur les rendements agricoles.

Au vu de l'ensemble des résultats, l'effet de la pluviométrie qui est celui le plus attendu sur les rendements a été assez intéressant vu qu'elle est présente dans la quasi-totalité des modèles obtenus.

Au total, ces modèles sont très satisfaisants, surtout si l'on tient compte du peu de données disponibles et des nombreux facteurs estimés tout au long du processus d'élaboration de ceux-ci. Ces résultats peuvent être appliqués à la prévision des rendements agricoles des différentes com-

munes au moins dix jours avant la période de récolte. Ils pourront certainement contribuer à l'amélioration des outils de prévision des productions agricoles mais il reste encore du travail car les prévisions des surfaces emblavées, demeurent quasi inexistantes et constituent une difficulté importante dans la mise en place de ces outils de prévision des producteurs agricoles.

Bibliographies

- Agrawal, Ranjana; Ramakrishna, Y.S.; Kesava Rao, A.V.R.; Kumar, Amrender; Bhar, Lal Mothan; Madan Mohan and Saksena, Asha (2005). Modeling for forecasting of crop yield using weather parameter and agriculture inputs. (AP Cess Fund Project Report)
- Baier, W. and Robertson, G.W., 1967. Estimating yield components of wheat from calculated soil moisture. *Can. J. Plant. Sci.*, 47 : 617-30.
- Banque Mondiale (1997). Indicateurs Africains de Développement.
- Bronne C.E, Wellens, J. Diakité, M., Farid, T., Diallo, M., Tychon, B. (2010). Elaboration d'un modèle de prévision des rendements cotonniers dans la province du Houet (Burkina Faso), Université de Liège pp 1-8.
- Centre de Recherche pour le développement International (CRDI) (2007). Place à l'adaptAction. (www.crdi.ca/acca)
- Fodiyé. B. D., *Méthodes économétriques plus programmes Cours et Travaux Pratiques*, Dakar, Janvier 2005, 487p
- Albert K. E. (2004) Estimation des principales cultures vivrières au Togo Mémoire-ENSEA, Abidjan (Côte d'Ivoire) – 71p
- Fisher, R.A. 1924: The influence of rainfall on the yield of wheat at Rothamsted. *Roy. Soc. (London), Phil. Trans. Ser.B.*, 213: 89-142.
- Hendrick, W.A. and Scholl, J.C. 1943: Technique in measuring joint relationship. The joint effects of temperature and precipitation on crop yield. *N. Carolina Agric. Exp. Stat. Tech. Bull.* 74.
- Heimo, C.R., 2004. Introduction au projet de gestion de l'information spatiale pour le suivi de la sécurité alimentaire. GMFS Policy Foundation. Report Submitted to the European Space Agency on May 2004 on be

half of the GMFS Consortium.

(<http://private.mcnet.ch/ecology/id37.htm> Consulté le 25/12/2012)

Krishna P.; Suresh K.K.(2009). A study on pre-harvest forecast of sugarcane yield using climatic variables, *India*. Vol 7&8, pp. 1-8

Metha, S.C.; Sathya Pal; Kumar; Vinod (2010). Weather based model for forecasting potato yield in Uttar Pradesh. (IASRI Publication)

Ministère de l'agriculture de l'élevage et de la Pêche. Annuaire Statistique, Campagne Agricole 2008-2009

Patrick. O. (1998). Tendances générales et effet du climat dans la prévision des rendements agricoles. Mémoire-INE cycle 1 stat Cotonou (Bénin), 55p

Palm, R. De Bast, A. et Lahlou M. (1991). Comparaison de modèles agrométéorologiques de type statistique empirique construits à partir de différents ensembles de variables météorologiques. Bull. Rech Agron, Gembloux, 26, 71-89.

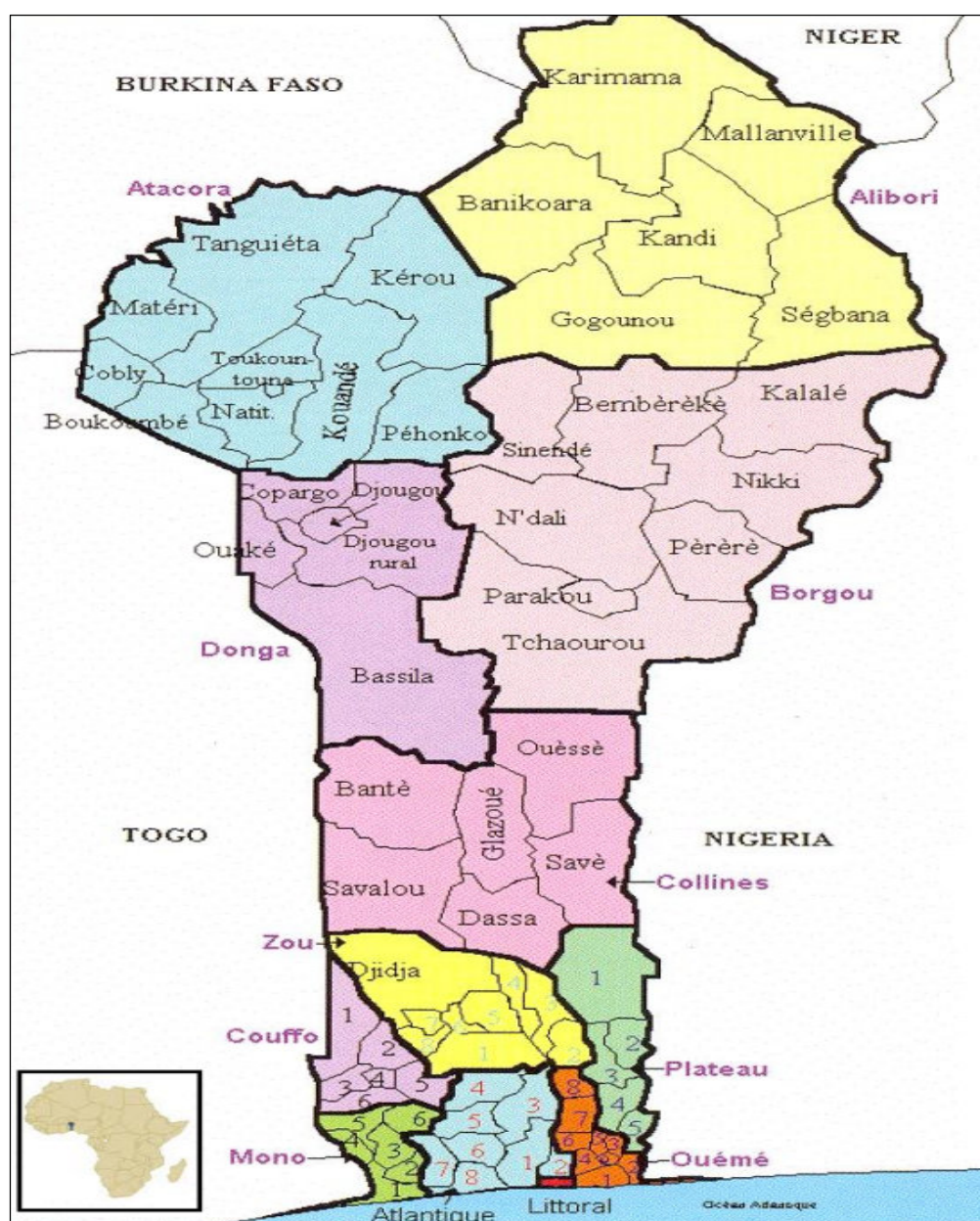
Revue des efforts de développement dans le secteur agricole (2009). Cotonou (Bénin)

Michel V. *Statistique chronologique et prévision*, Paris Ed. ECONOMICA, 1993, 254p.

ANNEXE

Annexe 1 : Carte des communes du Bénin

Fig 17 : Carte des communes du Bénin



Source: <http://www.afrique-planete.com/benin/carte-regions-benin.php>

Annexe 2 : figures de l'évolution des variables climatiques

Fig 18 : Evolution de la température maximale (1995-2010)

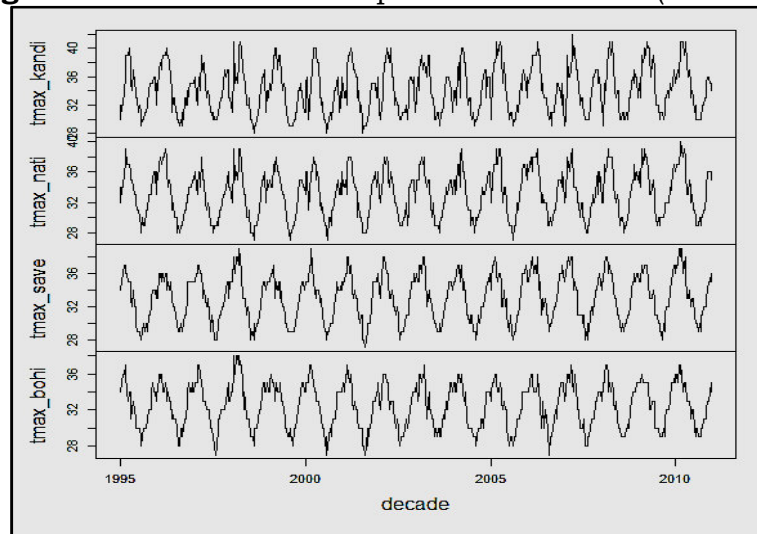
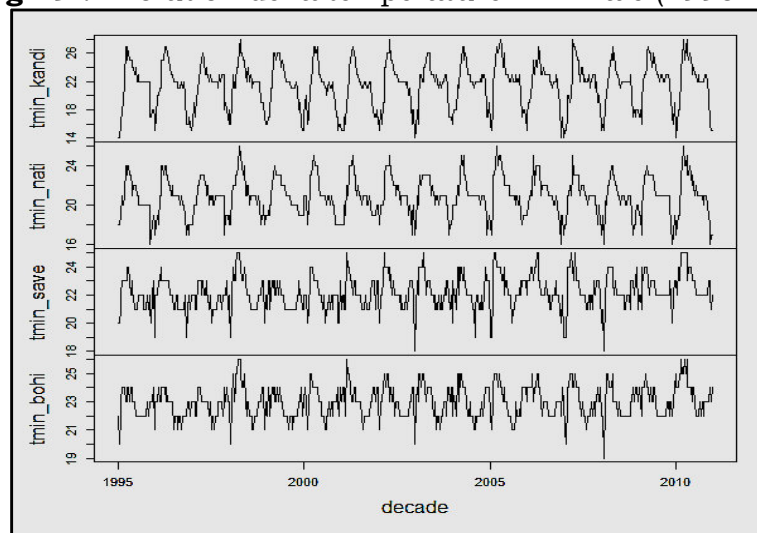


Fig 19 : Evolution de la température minimale (1995 -2010)



Source : Nos travaux dans R 2.15.1

Fig 20 : Evolution de l'humidité maximale (1995 - 2010)

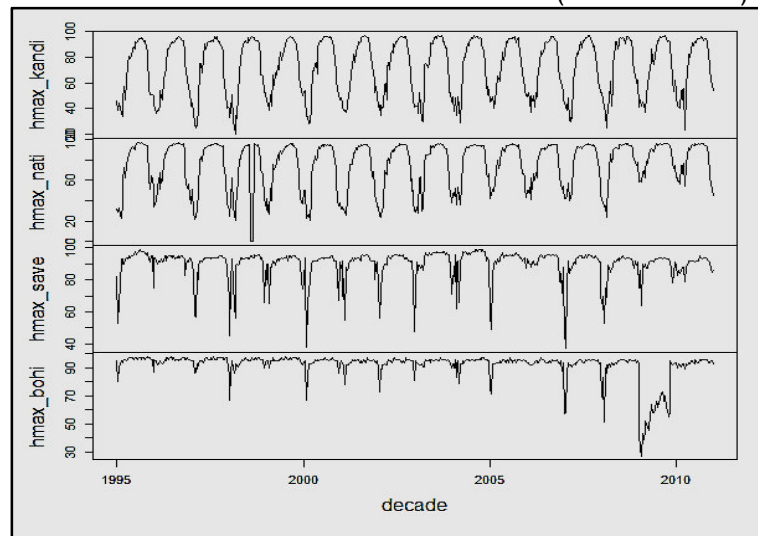
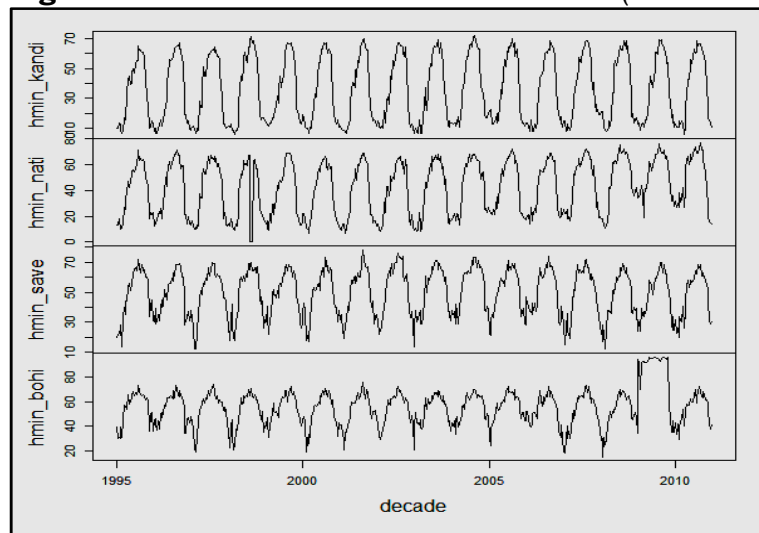


Fig 21 : Evolution de l'humidité minimale (1995 - 2010)



Source : Nos travaux dans R 2.15.1

Fig 22 : Evolution de l'insolation décadaire (1995 - 2010)

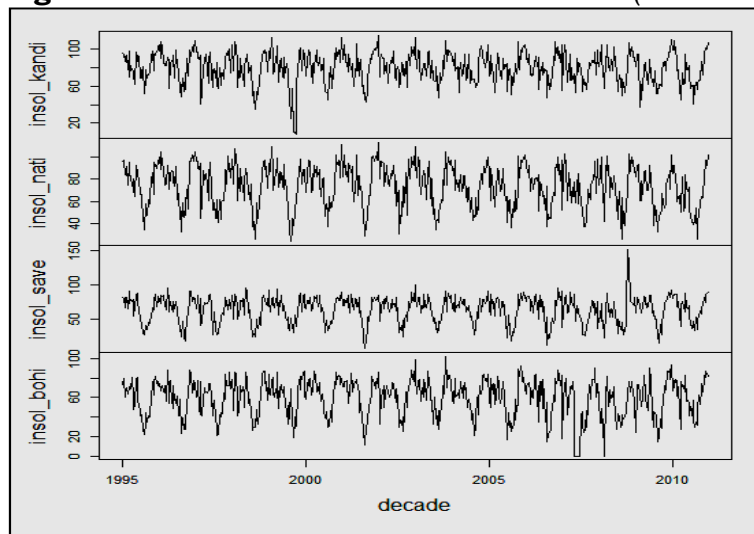
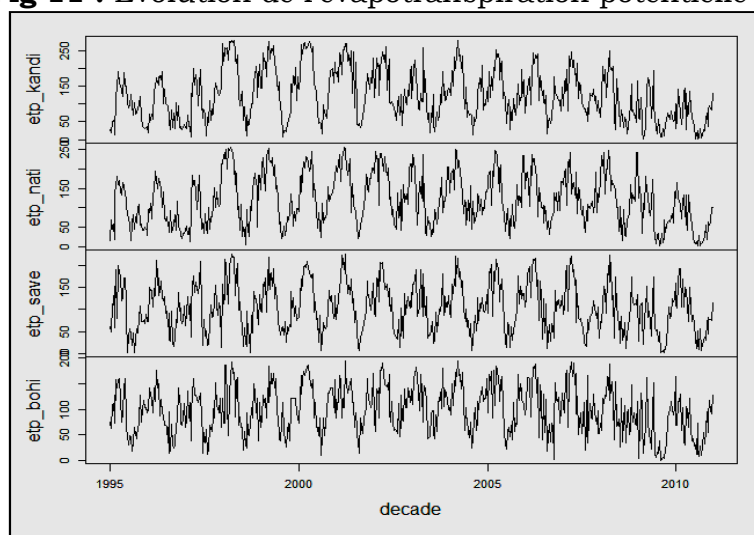


Fig 11 : Evolution de l'évapotranspiration potentielle (1995 -2010)



Annexe 3 Résultats des coefficients de régression des modèles de prévision
Commune de Boucoubé

Tab.16.3 – Résultats de ANOVA du modèle de prévision du riz

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Sig.
Régression	386121,198	2	193060,599	22,545**	0,000
Résidu	102758,332	12	8563,194		
Total	488879,530	14			

** - Significatif à 1%

Récapitulatif des modèles^c

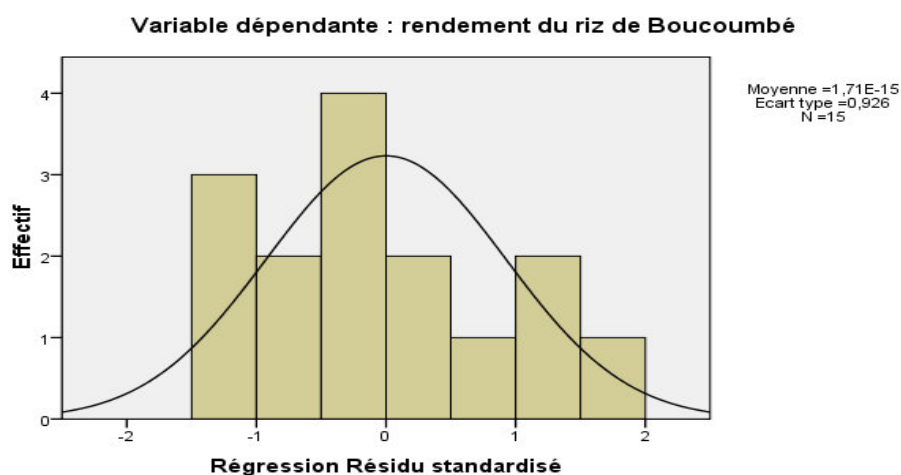
Mo- dèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques					Durbin- Watson
					Variation de	Variation	ddl1	ddl2	Sig. Varia-	
1	,788 ^a	,622	,592	119,297	,622	21,351	1	13	,000	
2	,889 ^b	,790	,755	92,538	,168	9,605	1	12	,009	2,026

a. Valeurs prédites : (constantes), z171

b. Valeurs prédites : (constantes), z171, z461

c. Variable dépendante : rendement du riz de Boucoubé

Histogramme



Commune de Glazoué

Tab.27.3 – Résultats de ANOVA du modèle de prévision de l'igname

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Sig.
Régression	1,281E8	3	4,268E7	32,142**	,000
Résidu	1,461E7	11	1327972,151		
Total	1,427E8	14			

** - Significatif à 1%

Récapitulatif des modèles^d

Mo- dèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques					Durbin- Watson
					Variation de	Variation	ddl1	ddl2	Sig. Varia-	
1	,881 ^a	,776	,758	1569,371	,776	44,923	1	13	,000	
2	,921 ^b	,848	,823	1342,824	,073	5,756	1	12	,034	
3	,947 ^c	,898	,870	1152,377	,049	5,294	1	11	,042	2,241

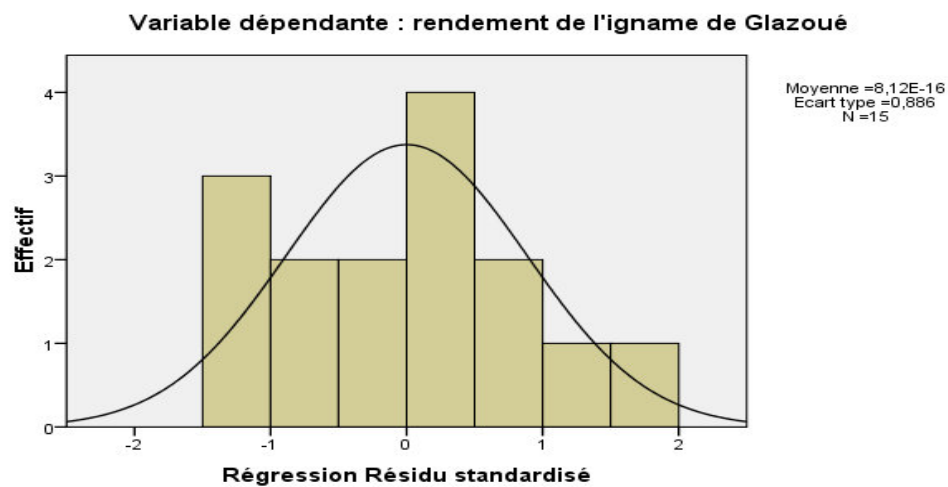
a. Valeurs prédites : (constantes), z671

b. Valeurs prédites : (constantes), z671, z161

c. Valeurs prédites : (constantes), z671, z161, z461

d. Variable dépendante : rendement de l'igname de Glazoué

Histogramme



Commune de Savè

Tab. 18.3 – Résultats de ANOVA du modèle de prévision de l'igname

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Sig.
Régression	2,185E8	2	1,093E8	28,198**	0,000
Résidu	4,650E7	12	3874701,574		
Total	2,650E8	14			

** - Significatif à 1%

Récapitulatif des modèles^c

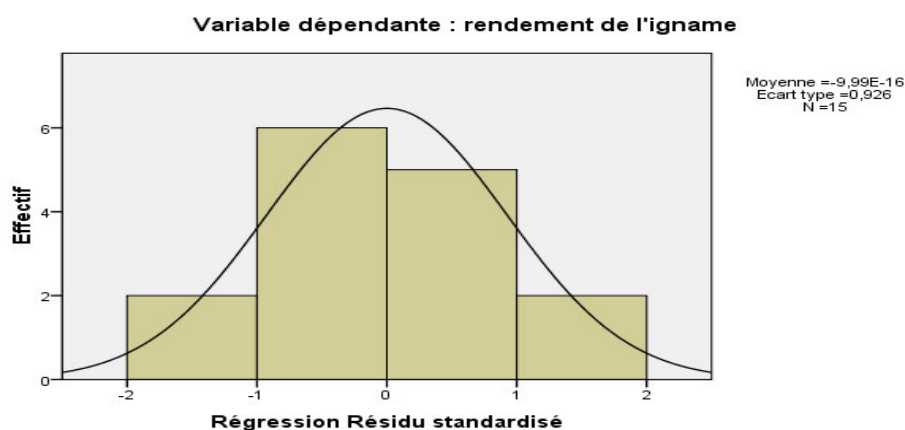
Mo- dèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques					Durbin- Watson
					Variation de R-deux	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Varia- tion de F	
1	,837 ^a	,700	,677	2474,103	,700	30,295	1	13	,000	
2	,908 ^b	,825	,795	1968,426	,125	8,537	1	12	,013	1,658

a. Valeurs prédites : (constantes), z671

b. Valeurs prédites : (constantes), z671, z241

c. Variable dépendante : rendement de l'igname

Histogramme



Commune d'Abomey

Tab.19.3 – Résultats de ANOVA du modèle de prévision du manioc

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Sig.
Régression	4,749E7	3	1,583E7	33,054**	0,000
Résidu	5267539,621	11	478867,238		
Total	5,275E7	14			

** - Significatif à 1%

Récapitulatif des modèles^d

Mo- dèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estima- tion	Changement dans les statistiques					Durbin- Watson
					Variation de R-deux	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Varia- tion de F	
1	,836 ^a	,699	,676	1104,4561	,699	30,246	1	13	,000	
2	,921 ^b	,848	,823	816,13075	,149	11,808	1	12	,005	
3	,949 ^c	,900	,873	692,00234	,052	5,691	1	11	,036	2,029

a. Valeurs prédites : (constantes), z141

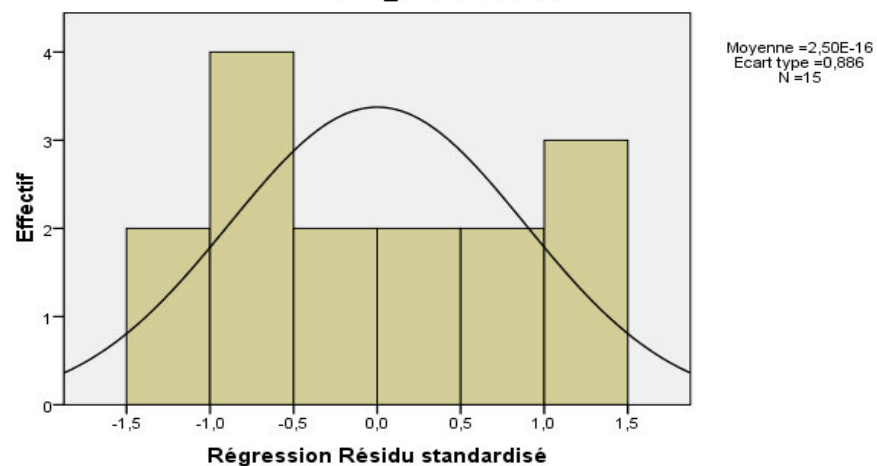
b. Valeurs prédites : (constantes), z141, z61

c. Valeurs prédites : (constantes), z141, z61, z241

d. Variable dépendante : Error for rendman abom with temps from CURVEFIT, MOD_16 QUADRATIC

Histogramme

Variable dépendante : Error for rendman abom with temps from CURVEFIT, MOD_16 QUADRATIC



Commune d'Agbangnizoun

Tab.20.3 – Résultats de ANOVA du modèle de prévision du manioc

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Sig.
Régression	6,466E7	2	3,233E7	26,267**	,000
Résidu	1,477E7	12	1230894,391		
Total	7,943E7	14			

** - Significatif à 1%

Récapitulatif des modèles^c

Mo- dèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques					Durbin- Watson
					Variation de	Variation	ddl1	ddl2	Sig. Varia-	
1	,821 ^a	,674	,649	1411,29024	,674	26,882	1	13	,000	
2	,902 ^b	,814	,783	1109,45680	,140	9,036	1	12	,011	1,929

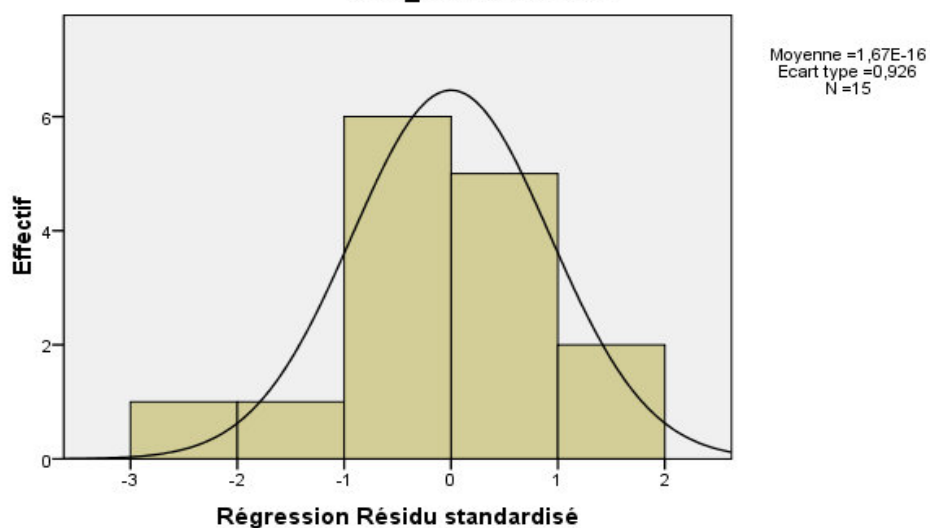
a. Valeurs prédites : (constantes), z11

b. Valeurs prédites : (constantes), z11, z61

c. Variable dépendante : Error for rendman_agban with temps from CURVEFIT, MOD_17 QUADRATIC

Histogramme

Variable dépendante : Error for rendman_agban with temps from CURVEFIT, MOD_17 QUADRATIC



Commune de Bohicon

Tab.21.3 – Résultats de ANOVA du modèle de prévision du manioc

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Sig.
Régression	1,002E8	3	3,339E7	26,286*	,000
Résidu	1,397E7	11	1270388,802		
Total	1,142E8	14			

** - Significatif à 1%

Récapitulatif des modèles^d

Mo- dèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques					Durbin- Watson
					Variation de R-deux	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Varia- tion de F	
1	,821 ^a	,674	,649	1692,46406	,674	26,852	1	13	,000	
2	,887 ^b	,787	,751	1424,01252	,113	6,363	1	12	,027	
3	,937 ^c	,878	,844	1127,11526	,091	8,155	1	11	,016	2,245

a. Valeurs prédites : (constantes), z471

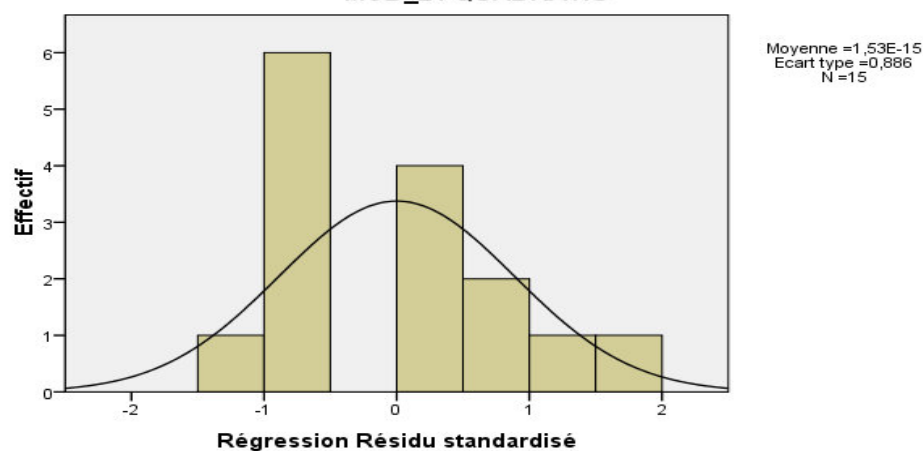
b. Valeurs prédites : (constantes), z471, z151

c. Valeurs prédites : (constantes), z471, z151, z31

d. Variable dépendante : Error for rendman_bohi with temps from CURVEFIT, MOD_21 QUADRATIC

Histogramme

Variable dépendante : Error for rendman_bohi with temps from CURVEFIT, MOD_21 QUADRATIC



Commune de Zakpota

Tab.22.3 – Résultats de ANOVA du modèle de prévision du manioc

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Sig.
Régression	1,084E8	2	5,418E7	45,802**	,000
Résidu	1,420E7	12	1183020,985		
Total	1,226E8	14			

** - Significatif à 1%

Récapitulatif des modèles^c

Mo- dèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques					Durbin- Watson
					Variation de	Variation	ddl1	ddl2	Sig. Varia-	
1	,834 ^a	,696	,673	1692,67718	,696	29,778	1	13	,000	
2	,940 ^b	,884	,865	1087,66768	,188	19,485	1	12	,001	1,753

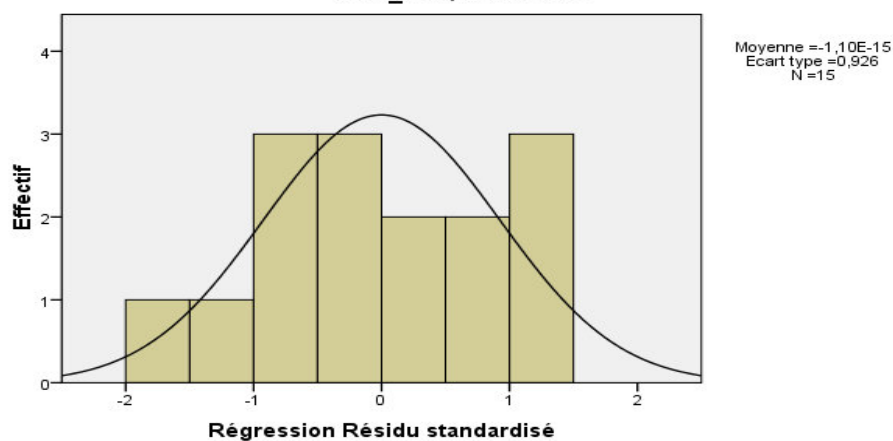
a. Valeurs prédites : (constantes), z131

b. Valeurs prédites : (constantes), z131, z461

c. Variable dépendante : Error for rendman zakpo with temps from CURVEFIT, MOD 20 QUADRATIC

Histogramme

Variable dépendante : Error for rendman_zakpo with temps from CURVEFIT, MOD_20 QUADRATIC



Commune de Banikoara

Tab.23.3 – Résultats de ANOVA du modèle de prévision du maïs

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Sig.
Régression	415998,741	2	207999,370	23,953**	,000
Résidu	104201,815	12	8683,485		
Total	520200,556	14			

** - Significatif à 1%

Récapitulatif des modèles^b

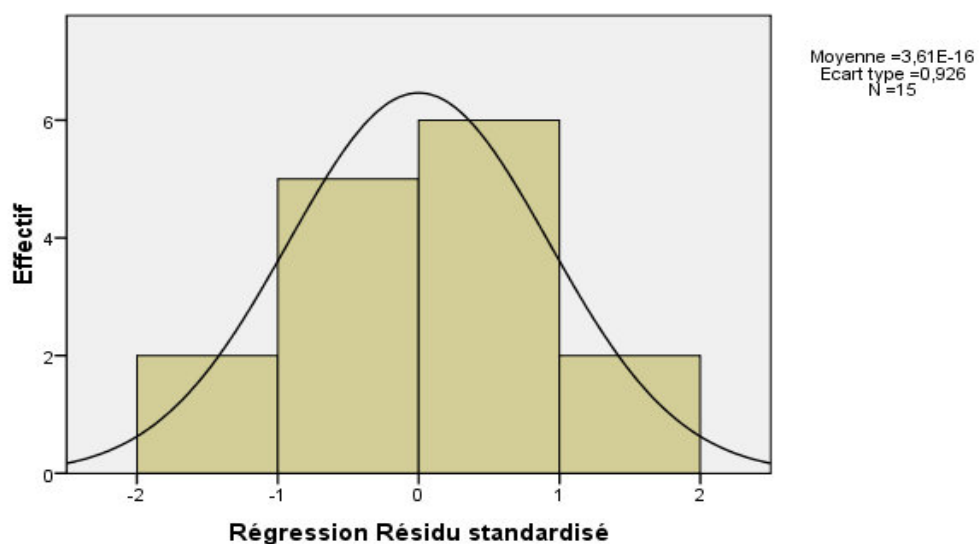
Mo- dèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de	Changement dans les statistiques					Durbin- Watson
					Variation de	Variation	ddl1	ddl2	Sig. Varia-	
1	.894 ^a	.800	.766	.93185	.800	23.953	2	12	.000	1.636

a. Valeurs prédites : (constantes), z161, z261

b. Variable dépendante : rendement de maïs de banikoara

Histogramme

Variable dépendante : rendement de maïs de banikoara



Commune de Ségbana

Tab.24.3 – Résultats de ANOVA du modèle de prévision du maïs

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Sig.
Régression	2175799,334	2	1087899,667	13,940**	0,001
Résidu	936488,134	12	78040,678		
Total	3112287,468	14			

** - Significatif à 1%

Récapitulatif des modèles^c

Mo- dèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques					Durbin- Watson
					Variation de	Variation	ddl1	ddl2	Sig. Varia-	
1	,757 ^a	,572	,539	319,975	,572	17,398	1	13	,001	
2	,836 ^b	,699	,649	279,358	,127	5,055	1	12	,044	1,605

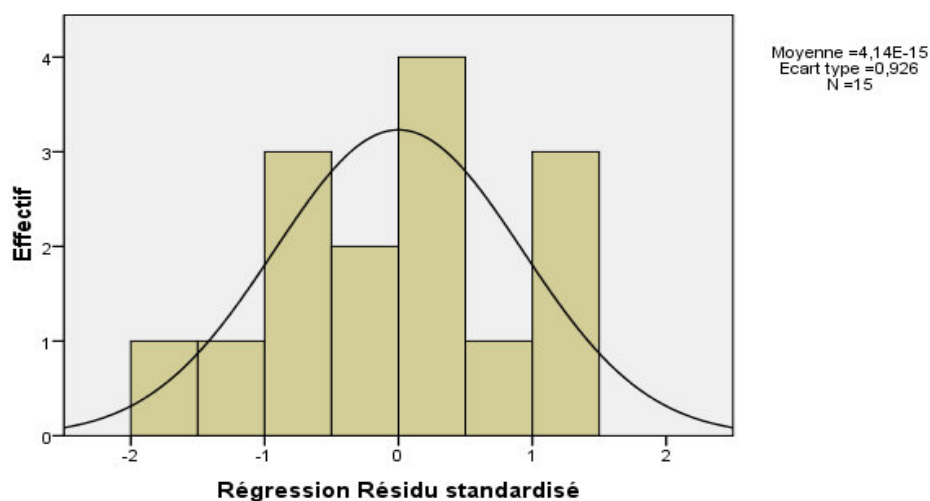
a. Valeurs prédites : (constantes), z251

b. Valeurs prédites : (constantes), z251, z161

c. Variable dépendante : rendement de maïs de Ségbana

Histogramme

Variable dépendante : rendement de maïs de Ségbana



Commune de Kandi

Tab.25.3 – Résultats de ANOVA du modèle de prévision du maïs

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Sig.
Régression	275229,782	3	91743,261	21,598**	0,000
Résidu	46725,243	11	4247,749		
Total	321955,025	14			

** - Significatif à 1%

Récapitulatif des modèles^b

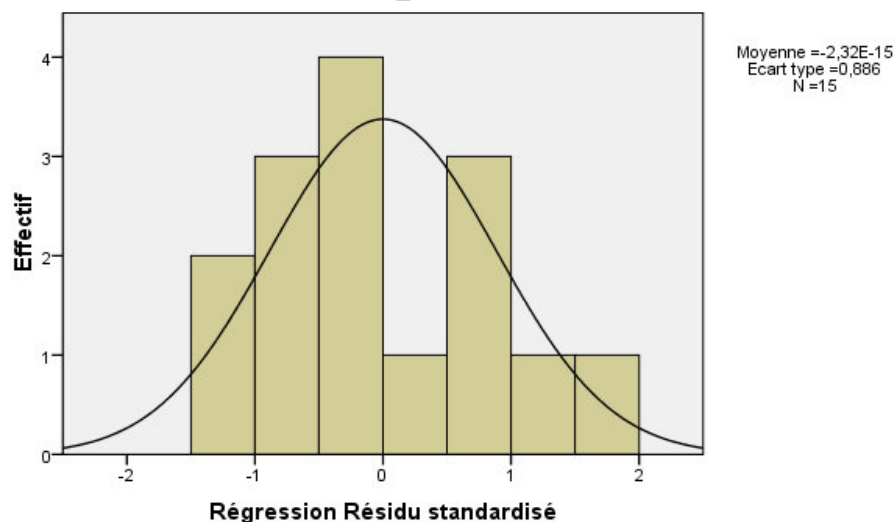
Mo- dèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de l'estimation	Changement dans les statistiques					Durbin- Watson
					Variation de R-deux	Variation de F	ddl1	ddl2	Sig. Varia- tion de F	
1	,925 ^a	,855	,815	65,175	,855	21,598	3	11	,000	2,250

a. Valeurs prédites : (constantes), z251, z171, z671

b. Variable dépendante : Error for rendma_kandi with temps from CURVEFIT, MOD_3 QUADRATIC

Histogramme

Variable dépendante : Error for rendma_kandi with temps from CURVEFIT,
MOD_3 QUADRATIC



Commune de Gogounou

Tab.26.3 – Résultats de ANOVA du modèle de prévision du maïs

Modèle	Somme des carrés	ddl	Moyenne des carrés	F	Sig.
Régression	340936,425	2	170468,213	36,564**	0,000
Résidu	55946,359	12	4662,197		
Total	396882,784	14			

** - Significatif à 1%

Récapitulatif des modèles^b

Mo- dèle	R	R-deux	R-deux ajusté	Erreur standard de	Changement dans les statistiques					Durbin- Watson
					Variation de	Variation	ddl1	ddl2	Sig. Varia-	
1	.927 ^a	.859	.836	.68 280	.859	36.564	2	12	.000	2.330

a. Valeurs prédites : (constantes), z571, z671

b. Variable dépendante : rendement de maïs de Gogounou

Histogramme

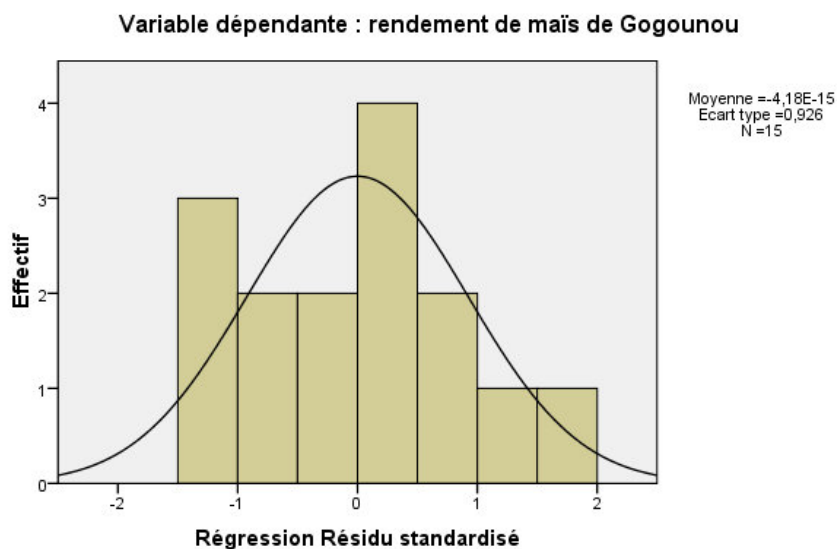


TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 Problématique.....	3
1.2 Objectifs de l'étude.....	5
1.3 Hypothèses	5
1.4 Revue de littérature	6
1.4.1 Quelques concepts	6
1.4.1.1 La mise en culture des terres.....	6
1.4.1.2 L'érosion des sols	7
1.4.2 Présentation générale des travaux sur la prévision des rendements agricoles au Bénin	8
1.4.3 Déterminants des rendements agricoles	8
MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE	11
2.1 Méthodes d'analyse.....	11
2.1.1 Analyse économétrique.....	12
2.1.1.1 Formulation du modèle de prévision.....	12
2.1.1.2 Etude de la tendance des rendements	14
2.1.1.3 Estimation des indicateurs et validation des modèles	16
2.2 Données utilisées.....	19
2.2.1 Données brutes.....	19
2.2.1.1 La pluviométrie	20
2.2.1.2 Humidité relative.....	21
2.2.1.3 Température	21
2.2.1.4 Insolation.....	21

2.2.1.5 Evapotranspiration potentielle	21
2.2.2 Sources de données	21
2.2.3 Indicateur synthétique	23
2.2.3.1 Spécialité agricole des communes: indicateur de spécialisation sectorielle de HALLET	23
2.2.3.2 La zone de l'étude.....	24
2.2.3.3 Carte des communes du Bénin.....	27
2.3 Calendrier cultural	27
RÉSULTATS ET ANALYSES	30
3.1 Production agricole béninoise.....	30
3.1.1 Aspects généraux	30
3.1.2 Caractéristiques de la production agricole	31
3.2 Présentation des résultats de l'analyse descriptive.....	32
3.2.1 Evolution des productions annuelles	32
3.2.2 Evolution des surfaces emblavées.....	32
3.2.3 Evolution des rendements	33
3.2.4 Evolution de la pluviométrie	34
3.2.5 Evolution de la température maximale et minimale	35
3.2.6 Evolution de l'humidité maximale et minimale.....	35
3.2.7 Evolution de l'insolation et de l'évapotranspiration	35
3.3 Résultats de l'indice de spécialisation communale.....	36
3.4 Présentation des résultats de l'analyse économétrique.....	38
3.4.1 Résultats de l'étude de la tendance du rendement	38
3.4.2 Résultats des modèles de prévision et validation.....	43
Suggestions et recommandations.....	61
CONCLUSION	62
Bibliographies	65
ANNEXE	67