Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
International Institute for Water and Environmental Engineering
Fondation 2iE

Mesures d'adaptation à la variabilité climatique dans les régions de montagne de l'Atacora au Bénin : modélisation bioéconomique des systèmes agraires dans la commune de Natitingou

Mémoire pour l'obtention du Master en Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

Présenté et soutenu publiquement le 13/06/2011 par **Tchomi-Kandi MONDJA**

Travaux dirigés par : Dr Bruno BARBIER UTER GVEA

Jury d'évaluation du stage :

Président : Abdoulaye DIARRA

Membres et correcteurs : Bruno BARBIER

Dial NIANG

Harouna KARAMBIRI

Promotion 2010/2011

DEDICACES

A mon père, ma mère, mes sœurs et frères,

A mon oncle Alphonse MOUDOUKOU et son épouse,

A Claire APPLEGARTH,

A Kérékou YERIMA

REMERCIEMENTS

A tous nos enseignants pour la connaissance qu'ils nous ont donnée au cours de cette formation.

A tout le personnel de la Direction des Etudes et des Services Académiques pour tous les services rendus à notre égard.

A Monsieur Abdoulaye DIARRA pour son accompagnement pour cette filière en tant que responsable pédagogique.

A Monsieur Bruno BARBIER pour son encadrement tout au long de ce travail.

A Severe FOSSI pour sa disponibilité à répondre à toutes nos questions.

Au Dr Attenda Mouinou IGUE, pour sa disponibilité et son orientation dans mes recherches à l'INRAB.

A Monsieur Cohomlan Richard NONFON pour son accueil à la recherche agricole à Natitingou.

A Monsieur SAGUI Victor pour son accompagnement auprès des exploitants.

A tout le personnel du Centre Régional de Promotion Agricole Atacora /Donga pour l'accueil qui m'a été accordé.

A Messieurs Baba N'TCHA et Talaki KATCHEBA, exploitants qui ont disposé de leur temps pour répondre à mes différentes questions.

A tous ceux qui de quelque manière ont contribué à la réalisation de ce travail.

A toute la promotion du cycle master 2010-2011 pour les moments passés entre nous.

Résumé

Dans un processus de changements climatiques ou la variabilité du régime climatique peut se manifester par des poches de sècheresse et des inondations, il est nécessaire de réfléchir de plus en plus aux stratégies d'adaptation. En effet, on assistera à une baisse de la production agricole et par conséquent des effets négatifs sur l'économie du pays qui en est entièrement tributaire d'une part et le niveau de vie des populations rurales d'autre part. Ainsi, au regard de l'importance accordée à l'eau dans le développement des cultures en agriculture, cette recherche s'est proposée d'analyser l'impact du déficit hydrique sur le revenu agricole des exploitations agricoles dans la commune de Natitingou. Après donc la description des systèmes agraires il s'est agit d'analyser la contrainte hydrique et de voir l'impact de la levée de cette contrainte sur la production et le revenu agricoles.

L'étude a utilisé les données empiriques collectées auprès de deux exploitations agricoles. Ces données sont complétées par les données secondaires de sources diverses. Le logiciel GAMS basée sur la programmation linéaire est l'outil qui a servi pour cette étude.

Les résultats de cette étude montrent avec la production de tomate pluviale en année climatique très sèche, que l'irrigation de complément est un moyen de sécuriser la production et par conséquent le revenu agricole du paysan.

Mots clés : Variabilité climatique, adaptation, modélisation bioéconomique

Abstract

In a process of climate changes where the variability of the climatic mode can appear by pockets of drought and floods, it is necessary to think more and more of the strategies of adaptation. Indeed, one will attend a fall of the agricultural production and consequently of the negative effects on the economy of the country which in is entirely tributary on the one hand and the standard of living of the rural populations on the other hand. Thus, in comparison with the importance attached to water in the development of the cultures in agriculture, this research proposed to analyze the impact of the hydrous deficit on the agricultural income of the farms in the commune of Natitingou. After thus the description of the agrarian systems it east is a question of analyzing the hydrous constraint and of seeing the impact of the lifting of this constraint on the production and the agricultural income.
The study used the empirical data collected near two farms. These data are supplemented by the secondary data of various sources. Software GAMS based on the linear programming is the tool which was useful for this study.
The results of this study show with the production of rain tomato in very dry climatic year, that the irrigation additional is a means of making safe the production and consequently the agricultural income of the peasant.

Keywords: Climate variability, adaptation, biophysical and economic modelization

Table des matières

I. INTRODUCTION GENERALE 1

1. Contexte et justification 1

2. Problématique 2

3. Objectifs 2

1. Objectif global 2

2. Objectifs spécifiques 2

II. CADRE DE L'ETUDE 4

1. Description de la zone de l'étude 4

1. Situation géographique de la zone de l'étude 4

2.Cadre biophysique de la zone de l'étude 4

1. Reliefs 4

2. Climat 4

3. Hydrographie 5

4. Végétation 5

5. Sols 5

III. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 6

1. Vulnérabilité des changements climatiques sur la production agricole au Bénin 6

1. Contexte climatique au Bénin 6

2. Les zones agro écologiques vulnérables 6

3. Impacts de la vulnérabilité sur l'agriculture 7

2. Mesures d'adaptation 8

1. Pratiques endogènes d'adaptation 8

2. Options potentielles d'adaptation 8

3. Concept d'irrigation de complément 8

4. La programmation linéaire 9

1. Programmation linéaire comme outil mathématique en économie agricole 11

5. La modélisation bioéconomique : principe et intérêts pour l'analyse des problèmes environnementaux 11

IV. METHODES 13

1. Présentation du site de l'étude 13

2. Méthodes 13

1. Déclaration des ensembles et sous ensembles 16

1. Les ensembles 16

2. Les sous ensembles 17

2. Les données 17

1. Les scalaires 17
2. Les paramètres 17
3. Les tables 18
3. Les variables 18
4. Les équations 19
1. La fonction objectif 19
2. Les autres équations 20
V. RESULTATS ET DISCUSSIONS 27
1. Analyse de la variabilité climatique et de la production agricole dans la commune de Natitingou 27
1. Variabilité pluviométrique de 1971 à 2010 27
2. Analyse de la variation du nombre de jours de pluie pendant la période culturale 28
3. Analyse de la variabilité pluviométrique et des rendements agricoles 29
2. Caractéristiques des systèmes agraires dans la commune de Natitingou 30
1. Caractéristiques des exploitations 30
2. Caractéristiques des ménages des exploitants 31
3. Caractéristiques des exploitations 31
3. Résultat de la modélisation sans le bassin 36
1. Superficies emblavées 36
2. Les valeurs marginales 37
3. La production 38
4. Le revenu par type de saison 39
4. Résultats de la modélisation avec le bassin 40
1. Superficies emblavées 40
3. La production 41
4. Le revenu par type de saison 42
VI. Recommandations 43
VII. Conclusion 44
VIII. References bibliographiques 45
IX. Annexes 47

Liste des tableaux

TABLEAU 1: CLASSIFICATION DES EXPLOITATIONS 31
TABLEAU 2: REPARTITION DE LA MAIN-D'ŒUVRE 32
TABLEAU 3: CALENDRIERS CULTURAUX 33
TABLEAU 4: RENDEMENTS DES SPÉCULATIONS 34
TABLEAU 5: PRIX DE LA MAIN-D'ŒUVRE SALARIALE 34
TABLEAU 6: CAPITAL DE SPECULATIONS 34
TABLEAU 7: PRIX MOYENS DES PRODUITS AGRICOLES 35

Liste des figures

FIGURE 1: CARTE DE SITUATION DE NATITINGOU 4
FIGURE 2: CARTE ADMINISTRATIVE DE NATITINGOU (SOURCE,PDC NATITINGOU, NOVEMBRE 2004) 13
FIGURE 3: VARIABILITE PLUVIOMETRIQUE DE 1971 A 2010 27
FIGURE 4: VARIATION DU NOMBRE DE JOURS DE PLUIE PENDANT LA PERIODE CULTURALE 28
FIGURE 5: VARIATIONS ANNUELLES DES HAUTEURS DE PLUIE ET DES RENDEMENTS PENDANT LA PERIODE CULTURALE 29
FIGURE 6: VARIATIONS ANNUELLES DU NOMBRE DE JOURS DE PLUIE ET DES RENDEMENTS PENDANT LA PERIODE CULTURALE 30
FIGURE 7: SUPERFICIES EMBLAVEES PAR CULTURE 36
FIGURE 8: VALEURS MARGINALES DES CULTURES 37
FIGURE 9: VARIATION DE LA PRODUCTION PAR TYPE D'ANNEE CLIMATIQUE 38
FIGURE 10: VARIATION DU REVENU PAR TYPE D'ANNEE CLIMATIQUE 39
FIGURE 11: SUPERFICIES EMBLAVEES PAR CULTURE 40
FIGURE 12: VALEURS MARGINALES DES CULTURES 41
FIGURE 13: VARIATION DE LA PRODUCTION PAR TYPE D'ANNEE CLIMATIQUE 41
FIGURE 14: VARIATION DU REVENU DU PAYSAN PAR TYPE D'ANNEE CLIMATIQUE 42

Liste des abréviations

ASECNA : Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar

CeCPA : Centre Communal de la Promotion Agricole

CeRPA : Centre Régional de la Promotion Agricole

CNCC : Comité National sur les Changements Climatiques

CNI : Commission Nationale Initiale

DANIDA : Danish International Development Assistance

Déc. : Décembre

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture

GAMS: Geometric Algebraic Modelling System

Ha: hectare

IP: Indice Pluviométrique

INRAB : Institut national des Recherches Agricoles du Benin

mm: millimètre

m^3: mètre cube

NJP : Nombre de Jours de Pluie

Nov. : Novembre

P : Pluie

PAE : Plan d'Action Environnemental

PANA : Plan d'Action National d'Adaptation

PDC : Plan de Développement Communal

PL : Programmation Linéaire

RDT : Rendement

I. INTRODUCTION GENERALE

1. Contexte et justification

Au Bénin, les réalités climatiques des trois dernières décennies attestent déjà de la forte emprise et du handicap que sont les péjorations et excès pluviométriques pour les activités économiques du pays. L'agriculture pilier de l'économie du pays, est exposée à l'instar de tous les autres secteurs d'activité aux changements climatiques qui ont pour conséquence directe la baisse des rendements.

En effet, l'économie béninoise repose essentiellement sur l'agriculture qui emploie 60% de la

population active. Contribuant pour 40% au PIB, elle assure 80% des exportations et constitue encore le principal socle de la croissance de l'économie nationale grâce à un taux de croissance sectorielle de 8%. Cependant elle est encore traditionnelle et pluviale. C'est dans ce contexte déjà inconfortable que s'annonce un changement du climat (PANA-Bénin, 2007).

Les effets des changements climatiques renforceront la variabilité du régime climatique. Selon les résultats du projet de recherche interdisciplinaire (IMPETUS [1], 2004), ces variabilités climatiques continueront et s'accentueront à l'avenir.

L'évaluation concertée de la vulnérabilité des populations effectuée dans le cadre du projet d'élaboration du Programme d'Action National aux fins de l'Adaptation aux changements climatiques, a révélé qu'au niveau national, on distingue trois risques climatiques majeurs à savoir : la sécheresse, les pluies tardives et violentes, et les inondations.

Au Nord-Ouest du Benin, les effets des changements climatiques sur la production agricole se manifestent en milieu rural par un démarrage inattendu et une forte localisation des pluies puis de longues poches de sècheresse préjudiciables à la mise en place et au développement des cultures. Les systèmes d'exploitation encore fortement traditionnels devront s'adapter aux instabilités climatiques croissantes par un ajustement des techniques culturales et diversification des sources de revenus (Elis, 1993 ; Reardon et al, 1996 ; Valdivia et al, 1996).

Les impacts directs des changements climatiques sur l'agriculture portent sur les comportements des cultures, les modifications pédologiques et les baisses de rendements liés au déficit hydrique lors des étapes critiques de leur cycle végétatif (DANIDA, 2008).

A cet effet, des stratégies d'adaptation suscitent de nos jours de nombreuses réflexions. Parmi elles, celle qui paraît idoine consisterait à apporter de l'eau aux cultures en cas de déficit hydrique (irrigation de complément) liés aux poches de sècheresse. L'irrigation de complément associée à de bonnes techniques culturales améliorerait la production et le revenu agricoles des paysans, œuvrant ainsi à conserver les progrès accomplis pour réduire la pauvreté et accroître la sécurité alimentaire sur le continent africain (FAO, 2010).

Notre thème intitulé : « Mesures d'adaptation à la variabilité climatique dans les régions de montagne de l'Atacora : modélisation bioéconomique des systèmes agraires dans la commune de Natitingou » nous permettra de réfléchir dans le même sens que le PANA-Bénin, sur comment optimiser le revenu du paysan en vue de réduire sa vulnérabilité.

2. Problématique

Certaines mesures endogènes d'adaptation sont déjà utilisées par les paysans en agriculture pour s'adapter à la variabilité climatique.

Mais comme mesures optionnelles d'adaptation préconisées par le PANA-Bénin, nous pouvons citer l'amélioration des systèmes de production agricole alimentaire.

Nous nous intéressons particulièrement dans ce document à l'irrigation de complément et ce pour deux raisons essentielles :

- l'intérêt que porte cette technique pour compenser le déficit hydrique des cultures au moment des poches de sècheresse afin de sécuriser la production agricole;
- la nécessité de bâtir une politique de valorisation des eaux pluviales et de ruissellement à des fins de produire en contre saison.

L'irrigation de complément comme technologie innovante, nécessite donc des nouveaux investissements dont le coût n'est pas toujours à la portée des exploitants agricoles.

3. Objectifs

1. Objectif global

L'objectif global est d'étudier une stratégie innovante d'adaptation pour garantir un minimum de production en agriculture pluviale, laquelle étant soumise aux conséquences de la variabilité et du changement climatiques dans la commune de Natitingou.

2. Objectifs spécifiques

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Décrire les systèmes agraires dans la commune de Natitingou et analyser la variabilité climatique et la production agricole dans la commune de Natitingou
- Identifier les différentes variables et les contraintes auxquelles est soumis la production agricole en vu de l'élaboration du modèle bioéconomique.
- Analyser l'impact de la levée de la contrainte hydrique sur le revenu agricole des exploitants.

L'étude s'articule autour de cinq (05) chapitres dont la présente introduction. Le chapitre 2 est consacré au cadre de l'étude, le chapitre 3 à la synthèse bibliographique sur la vulnérabilité de la production agricole au Bénin dans un processus de changement climatique, la programmation linéaire et la modélisation bioéconomique. Le cadre méthodologique utilisé est exposé dans le quatrième chapitre. Le chapitre 5 aborde les caractéristiques des systèmes agraires des exploitations retenues, l'analyse de la variabilité climatique et la production agricole et les résultats des différentes simulations de notre modèle que nous discuterons. Des recommandations seront faites et une conclusion mettra un terme à notre travail.

II. CADRE DE L'ETUDE

1. Description de la zone de l'étude

1. Situation géographique de la zone de l'étude

La commune de Natitingou est située dans la zone centre du département de l'Atacora. Elle couvre une superficie de 3.045 km^2 soit 12,8% de la superficie totale du département. Elle est limitée au Nord par la commune de Toucountouna, au Sud et à l'Est par celle de Kouandé et à l'Ouest par celle de Boukombé (PDC Natitingou, 2004).

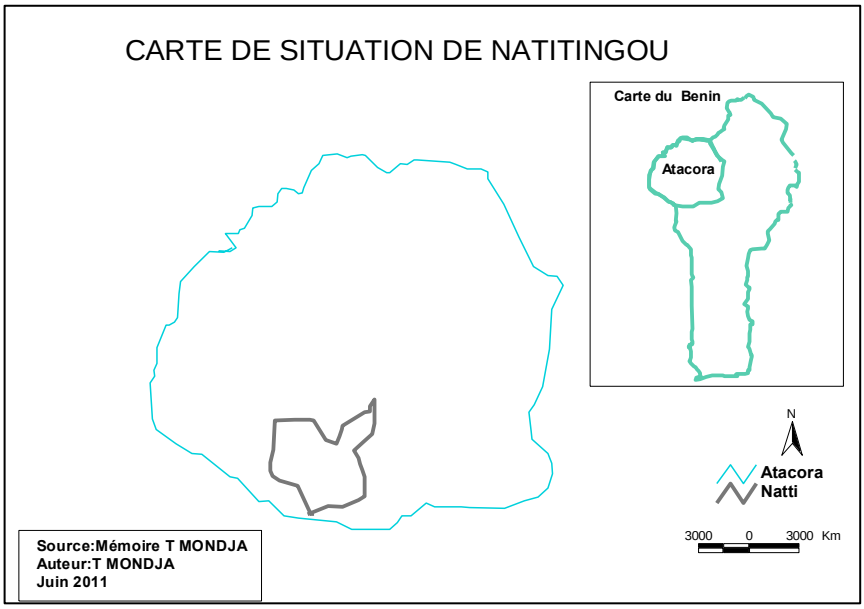

Figure 1: Carte de situation de Natitingou

2. Cadre biophysique de la zone de l'étude

1. Reliefs

Les formes du relief sont variées, allant des zones de montagnes à Natitingou, aux plateaux et pénéplaines des villages environnants. La commune de Natitingou est caractérisée par un relief accidenté, composé surtout de la chaîne de l'Atacora, de plateaux et de collines dont les vallées se présentent souvent en pente forte (PDC Natitingou, 2004).

2. Climat

La commune est sous un climat de type soudano-guinéen caractérisé par deux saisons : une saison pluvieuse qui dure 6 mois (mai à octobre), et une saison sèche de novembre à avril. A cause des influences orographiques, la commune est très arrosée surtout à Natitingou où on enregistre jusqu'à 1400 mm d'eau par an. Les plus fortes quantités d'eau sont enregistrées au cours des mois d'août et de septembre. La température moyenne est d'environ 27°C avec des variations de 17°C à 35°C pendant l'harmattan (PDC Natitingou, 2004).

3. Hydrographie

Le réseau hydrographique se réduit aux marigots, rivières et ruisseaux dont la plupart tarit en saison sèche. Les plus importants cours d'eau sont : le Yarpao, le Koumagou, et le Winmou. Le réseau hydrographique peu fourni est tributaire du climat et du relief (PDC Natitingou, 2004).

4. Végétation

La végétation caractéristique est la savane arborée, arbustive et herbacée dominée par les espèces ligneuses comme le Néré, le karité, le baobab, le faux acajou, le tamarinier, le kapokier, le caïlcédrat et le rônier. Les forêts tropicales qui existaient ont été détruites et il ne reste que quelques bosquets qui abritent les fétiches ou qui sont des sanctuaires conservés, et des forêts galeries en voie de disparition (PDC Natitingou, 2004).

5. Sols

Les sols sont généralement latéritiques, gravillonnaires, caillouteux, sablonneux, argileux. Ils sont pour la plupart lessivés, ce qui a considérablement réduit leur fertilité à cause de la forte dégradation dont ils sont l'objet. Les techniques culturales inadaptées et la faible capacité de gestion des eaux ont contribué à cette dégradation avancée des sols. Les conflits fonciers existent et sont généralement réglés à l'amiable. La rotation des cultures et la jachère sont des techniques de régénérescence des sols connues et pratiquées par les populations (PDC Natitingou, 2004).

III. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

1. Vulnérabilité des changements climatiques sur la production agricole au Bénin

1. Contexte climatique au Bénin

Régit par un climat de type sub-équatorial de la côte à la latitude de la ville de Savè, et sous l'emprise d'un climat de type tropical humide à sec à mesure que l'on s'approche de la ville de Malanville (12°lat. nord), le Bénin subit une péjoration climatique récente avec de fortes variabilités spatio-temporelles des précipitations, alternant périodes sèches et périodes humides. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les scénarios climatiques, basés essentiellement sur les évolutions de la température et de la pluviométrie à l'horizon 2100. Les simulations effectuées sur MAGICC SCENGEN indiquent une fourchette de +1°C à +2,5°C des températures à l'horizon 2100, rapportés à l'évapotranspiration Penman-Monteith, les simulations prédisent une augmentation entre 6 et 19,5% des pertes d'eau par évaporation.

Se basant sur les analogiques pluviométriques sèches et humides, le réchauffement global aurait pour conséquence entre autre, une modification sensible des hauteurs pluviométriques à l'échelle annuelle, mais surtout une augmentation de la durée de la période sèche d'un à deux mois selon les stations. Les conséquences seront remarquables sur l'agriculture béninoise, largement pluviale et de facto sur l'économie du pays, très dépendante de ce secteur.

On assistera probablement à la :

- baisse des rendements agricoles liés à l'indisponibilité des ressources en eau. En effet, une réduction des précipitations de l'ordre de 20 à 30% au niveau national se traduira par la réduction de 40-60% de disponibilité des ressources en eau ; pénurie de main-d'œuvre pour les travaux agricoles ; accentuation de l'érosion sur les sols mal protégés avec d'importantes pertes sur pied ou après récoltes. (DANIDA, 2008).

2. Les zones agro écologiques vulnérables

Les travaux effectués d'évaluation concertée de la vulnérabilité aux changements climatiques dans les zones géographiques les plus vulnérables du Bénin, dans le cadre de l'élaboration du Programme d'Action National d'Adaptation aux changements climatiques, ont permis d'établir les résultats suivants :

Sont fortement exposés aux risques climatiques dans les zones agro-écologiques du centre et du nord, les petits exploitants agricoles, les maraîchers et exploitants agricoles émergeants, et les pêcheurs ;

Sont fortement exposés aux risques climatiques dans les zones agro-écologiques du sud (i) l'agriculture vivrière, les terres, les ressources en eau, la santé humaine et la biodiversité, et (ii) les petits exploitants agricoles, les pêcheurs et les éleveurs.

Selon les données du SIMA-Bénin (Système d'information des Marchés Agricoles du Bénin), certaines communes ou régions affichent un solde vivrier négatif et devraient faire l'objet d'une attention particulière. Il s'agit essentiellement des :

- zones urbaines et périurbaines à forte concentration humaine, structurellement déficitaires comme Abomey, Bohicon, Porto-Novo, Cotonou, Natitingou ;
- localités à faible potentiel agricole telles que Sèmè-Kpodji, Ouidah, Grand-Popo, Karimama ;
- certaines régions de l'Alibori comme Ségbana, Karimama qui, de façon classique sont confrontées aux problèmes de divagation des bêtes et des localités comme Copargo, Toucountouna, Natitingou dans l'Atacora marquées par le relief , les parcs et réserves cynégétiques limitant l'expansion de l'activité agricole ; et,
- certains territoires dont les sols sont fortement dégradés en raison de l'exploitation intensive due aux fortes pressions foncières (Agbangnizou, Za-kpota, Zogbodomey) ou des zones potentiellement inondables dans le Mono (sols hydromorphes à argile gonflante) et le Littoral (DANIDA, 2008).

3. Impacts de la vulnérabilité sur l'agriculture

Les besoins alimentaires d'origine végétale sont couverts par le maïs, le sorgho, le mil, le riz, les haricots, le manioc, l'igname et l'arachide. Les impacts directs des changements climatiques sur l'agriculture portent sur les comportements des cultures, les modifications pédologiques et les baisses de rendements. Au niveau des cultures, on observe des phénomènes de raccourcissement des cycles végétatifs et de floraison précoce, dus à l'élévation de la température. Par ailleurs, sous l'effet répété des récessions et perturbations pluviométriques, les rendements agricoles seront gravement affectés. Les prévisions faites sur la productivité agricole seront complètement faussées et des risques d'insécurité alimentaire seront élevés. Les travaux de Agbossou et Akponikpè (1999) ont montré que les variations dans le bilan hydrique ne compromettent pas encore dangereusement le bouclage du cycle du maïs, la plante alimentaire la plus cultivée dans le pays. Mais si le rythme des variations persiste, la production nationale de maïs sera hypothéquée. Le maïs est la culture la plus

vulnérable avant le niébé ; le manioc et l'igname sont beaucoup moins vulnérables (DANIDA, 2008).

2. Mesures d'adaptation

1. Pratiques endogènes d'adaptation

Il existe déjà un certain ensemble de mesures endogènes d'adaptation aux changements climatiques pratiquées par les populations au Bénin. Ces mesures sur le plan agricole sont :

- Adoption des cultures à cycle court
- Réaménagement des calendriers agricoles
- Adoption de produits alimentaires de substitution
- Développement des cultures maraîchères
- Pratique de semis tardifs

2. Options potentielles d'adaptation

- Dans le domaine de la production agricole, les stratégies modernes envisagées sont :
- Renforcement du réseau national d'observation du climat ;
- Mise en place d'un système agro climatologique d'alerte rapide ;
- Amélioration des systèmes de production agricole alimentaire (Promotion des techniques culturales améliorées et adaptées aux changements climatiques, Promotion des activités de contre-saison, Sensibiliser les populations sur les impacts négatifs des changements climatiques sur les ressources des bassins versants et les activités humaines).

En somme, le scénario d'un changement climatique constitue une menace grave pour

l'économie béninoise en ce qu'il projette des impacts négatifs sur notre agriculture (PANA-Bénin, 2007).

Il convient donc de mettre en application les mesures d'adaptation proposées pour atténuer les impacts négatifs simulés.

3. Concept d'irrigation de complément

L'irrigation se définit comme l'ensemble des techniques agricoles destinées à apportées aux végétaux, par le truchement du sol, des quantités d'eau nécessaires pour leur développement harmonieux.

Cette irrigation peut se pratiquer d'une part, de manière gravitaire ou sous pression et d'autre part en saison sèche comme en saison pluvieuse.

Lorsqu'en saison pluvieuse, l'irrigation est faite pour combler le déficit hydrique dû à l'insuffisance des apports naturels (pluies, remontées capillaires, réserves en eau du sol) : on parle d'irrigation de complément ou d'irrigation d'appoint.

L'agriculture étant essentiellement extensive et dominée par les cultures pluviales en général au Bénin et en particulier dans la commune de Natitingou ; et que le climat se manifeste avec une pluviométrie à fortes irrégularités spatio-temporelles et caractérisée par des poches de sècheresse, le développement de l'irrigation de complément serait capitale pour limiter les pertes liées à ces contraintes météorologiques.

Par ailleurs, il existe plusieurs outils d'analyse de ces effets des changements climatiques sur l'agriculture. Pour ce qui concerne l'atteint des objectifs que nous nous sommes fixés nous utiliserons comme outil la programmation linéaire.

4. La programmation linéaire

La programmation linéaire (PL) est une technique de modélisation adaptée à l'analyse des systèmes de production, particulièrement pour évaluer les possibilités et les conditions d'insertion des nouvelles technologies dans les exploitations agricoles (Ghodake et Hardaker, 1981 ; Pandey et Hardaker, 1995 cités par Ouédraogo, 2005). Elle est une dimension de la programmation mathématique qui regroupe la programmation mathématique non linéaire (PNL) et la programmation mathématique linéaire (PL). Dans ses formes les plus simples, la PL est une technique mathématique par laquelle l'allocation des ressources rares en vue de maximiser un objectif désiré peut être déterminée sous les hypothèses qu'il n'y a pas de risques élevés ou complexes et que toutes les relations entre les variables sont linéaires et continues (Dillon et al. 1992). Elle est surtout utilisée lorsqu'il s'agit de réaliser des plans d'amélioration ou de développement de nouvelles stratégies (Schweigman, 1993 cité par Sissoko, 1998). Cette technique de PL consiste à optimiser, dans le sens de maximiser ou de minimiser, un objectif ou une utilité sous diverses contraintes. Elle est particulièrement appropriée pour résoudre les contraintes rencontrées dans la budgétisation partielle

(Ouédraogo, 2005) et constitue un outil courant de simulation par la modélisation (Barbier, 1993). Le modèle théorique déterministe de base de la PL peut être spécifié comme suit :

$$\text{Max } Z = C\,X \qquad (1)$$

$$AX = B$$

$$X \geq 0$$

Avec :

Z = fonction objectif (revenu agricole du ménage dans notre cas) qui est maximisée (Max)

C = un vecteur des coefficients de la fonction objective

X = un vecteur qui représente le niveau d'intensité des activités

A = une matrice des coefficients technico-économiques

B = un vecteur des ressources disponibles

On cherche donc à maximiser à travers ce système d'équations la fonction objectif (Z) par une allocation des ressources ou facteurs de production aux activités les plus productives, sous l'hypothèse que l'exploitation n'est pas confrontée à des risques.

Par contre, quand les éléments de A, B et C sont aléatoires c'est-à-dire lorsque l'exploitation est confrontée à des risques, les résultats fournis par le modèle (1) ne reflètent plus les comportements réels des paysans. La programmation stochastique discrète fournit donc un cadre formel pour représenter de tels problèmes d'optimisation quant les éléments de A, de B et de C sont aléatoires (Ait-Ameur, 2004). Pour tenir compte de l'éventail des aléas possibles, on utilise des valeurs discrètes pour les différents états de la nature. Dans ces cas, l'expression simplifiée du modèle (1) peut être présentée de la manière suivante d'après Ait-Ameur

(2005) :

$$\text{Max } E(Z) = \Sigma x\ Ps\ Zs \qquad (2)$$

Avec :

E(Z) = Espérance mathématique de la fonction objectif (revenu agricole de l'exploitation) qui est maximisée (Max) ;

Ps = Probabilité d'occurrence de l'état de la nature *s*

Zs = Revenu espéré de l'exploitation dans l'état de la nature s (R. Kpadonou, 2009).

1. Programmation linéaire comme outil mathématique en économie agricole

Les modèles de programmation mathématique permettent de représenter le fonctionnement technico-économique des exploitations agricoles et de simuler les impacts de changements exogènes (un changement de politique agricole, par exemple) sur les décisions prises.

L'utilisation d'un modèle de programmation mathématique pour l'analyse de politiques agricoles exige de vérifier que le modèle reproduit les choix initiaux de production de l'exploitation agricole. Une spécification précise de la fonction objectif et de l'ensemble des contraintes (techniques, économiques ou politiques) suffirait en principe pour assurer que le modèle représente le fonctionnement de l'exploitation. Or, ce n'est pas le cas, toutes les contraintes sont faciles à incorporer dans le modèle. Tandis que la contrainte de disponibilité de terre, par exemple, peut être aisément introduite, d'autres contraintes, telles que l'hétérogénéité dans la qualité de la terre ou les rotations culturales, restent difficiles à spécifier.

Pour cette raison, différentes méthodes ont été utilisées pour le calibrage des modèles.

5. La modélisation bioéconomique : principe et intérêts pour l'analyse des problèmes environnementaux

La conceptualisation de la modélisation bioéconomique a commencé depuis les années 70 sur l'idée d'intégrer une composante de modélisation biologique à des modèles économiques lorsque les choix techniques sont fortement soumis à l'influence des facteurs biologiques, ce qui permet de mieux rendre compte des décisions techniques (Abbes, 2005).

Cette idée n'avait pas pour but d'analyser les impacts des politiques en économie agricole, mais plutôt dans une perspective normative de trouver la solution optimale à un problème de gestion de ressources naturelles (Flichman et Jacquet, 2003). Il s'agit donc de déterminer dans une dynamique économique le taux optimal de prélèvement ou d'exploitation d'une ressource et ainsi contribuer, indirectement, à la formulation des politiques à mener sans pour autant qu'elles soient simulées.

En agriculture et avec le développement des modèles biophysiques, l'utilisation de l'approche bioéconomique est devenue une tradition dans l'analyses des relations agriculture-écologie et

l'analyse des politiques agricoles et environnementales. Elle est basée sur le couplage d'un modèle économique (faisant souvent appel à la programmation mathématique) modélisant les décisions des agriculteurs en matière de gestion des ressources à un modèle biophysique estimant, selon divers choix techniques les fonctions de production d'ingénieur et d'externalités, générées par les modes et les pratiques de production (Louhichi et al,2005 et Bergon,1999).

Le grand intérêt de l'approche bioéconomique est sa capacité à générer simultanément des résultats économiques, définis en termes de revenu, de mobilisation des forces de travail, de consommation d'intrants…., et écologiques appréhendés comme des réalités physiques, mesurées comme telles, en échappant à l'arbitraire d'une évaluation monétarisée (Boisson, 1984). L'application de cette approche peut être située à différentes échelles, allant du niveau de la ferme « Farm model » jusqu'au niveau continental, passant par le niveau de la région, le secteur, le pays,… (M. A. Ghali, 2007).

Des études récentes ont été faites, notamment la thèse de M. A. Ghali en 2007 sur un modèle bioéconomique d'exploitation sur l'éco-conditionnalité et les mesures agri environnementales de lutte contre l'érosion (cas du Lauragais) et de K. Abbès, R. Mahjoubi, G. Flichman sur l'impact les formules tarifaires binômes sur le système irrigué de la basse vallée de la Medjerda (Tunisie) en 2005.

IV. METHODES

1. Présentation du site de l'étude

Pour voir l'impact de la levée de la contrainte hydrique sur le revenu des paysans en situation de poches de sècheresse, deux exploitations ont été identifiées dans les villages environnants où se pratiquent plus les activités agricoles. Il s'agit des exploitations de messieurs N'TCHA Baba dans l'arrondissement de Kouaba et de KATCHEBA Talaki dans l'Arrondissement de Tchoumi-Tchoumi (carte administrative de la commune de Natitingou).

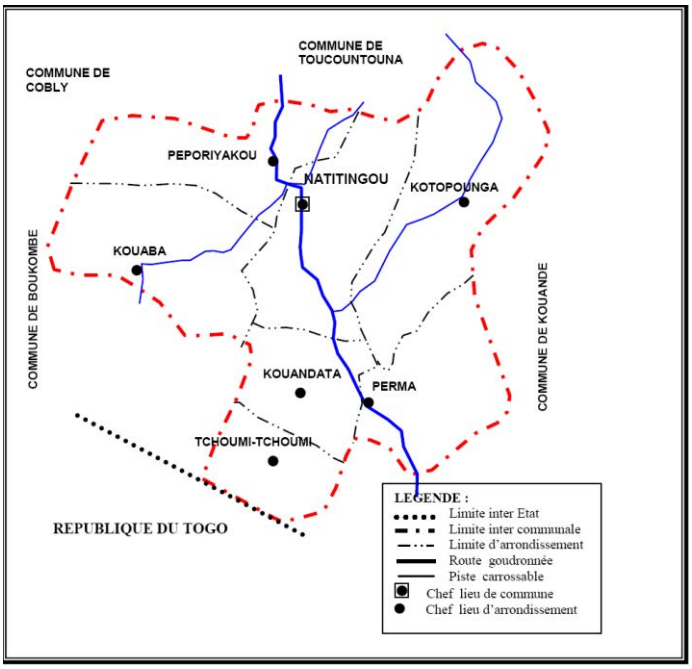

Figure 2: carte administrative de Natitingou (source, PDC Natitingou, novembre 2004)

2. Méthodes

La démarche méthodologique est celle adoptée dans le cadre logique élaborée pour cette étude.

Pour atteindre notre premier objectif qui est de caractériser les systèmes agraires dans la commune de Natitingou, nous avons organisé le travail en trois phases:

Phase 1 : phase préparatoire

Phase 2 : phase de collecte de données

Phase 3 : phase de traitement et d'analyse des données

- **Phase préparatoire**

Au cours de cette phase, nous avons :

- Conçu nos fiches d'enquête pour les renseignements sur les exploitations agricoles et le guide d'entretien pour les agents du CeCPA.
- Fait une synthèse bibliographique : cette étape nous permettra dans un premier temps de faire une synthèse sur le cadre de l'étude. Dans un second temps, la vulnérabilité de la production agricole du Bénin à la variabilité climatique et les mesures d'adaptation qui existent. Et enfin une synthèse sur la programmation mathématique et les modèle bioéconomiques.

Phase de collecte de données

Il s'est agit d'administrer le questionnaire d'enquête et le guide d'entretien, de collecter les données météorologiques, agro-météorologiques. Ces données ont été traitées pour ressortir les informations nécessaires afin de renseigner le modèle théorique élaboré pour ainsi le rapprocher de la réalité. Ces données nous ont également permis de caractériser les systèmes agraires dans la commune de Natitingou et de faire une analyse de l'impact de la variabilité climatique sur la production agricole.

Administration du questionnaire

Le questionnaire établi est spécifique aux exploitants agricoles qui sont ici impliqués.

Le questionnaire et le guide d'entretien nous ont permis:

- D'identifier et de localiser les exploitations agricoles, de même que les exploitants
- De connaître les caractéristiques technico-économiques des exploitations agricoles qui seront introduites dans le modèle théorique.

Notre questionnaire a été administré à deux (02) exploitations. Une grande exploitation et une moyenne exploitation, parce que nous avons été contraints par le temps et surtout que la décision de l'exploitant n'a grande importance. Le guide d'entretien quant à lui a été administré au Technicien Spécialisé en Production Végétale (TSPV), du Centre Communal de la Promotion Agricole (CeCPA) de Natitingou et aux agents de l'Institut National de Recherches Agricoles du Bénin.

Identification des exploitations

Les exploitations ont été identifiées grâce aux indications du Technicien Spécialisé en Production Végétale.

Analyse des donnes des enquêtes, du climat et des rendements

Les données recueillies lors des enquêtes ont été analysées sous GAMS et les données du climat et des rendements sous Excel pour réaliser des graphes.

En ce qui concerne l'atteinte des autres objectifs, nous avons utilisé la méthodologie de GAMS qui est basée sur la programmation linéaire.

Méthodologie de la modélisation

Le modèle développé est un modèle de maximisation du revenu de l'exploitation sous diverses contraintes et en particulier la contrainte hydrique. Nous avons utilisé les données de la campagne agricole 2010-2011. Le modèle est élaboré à l'échelle de l'exploitation moyenne.

Le modèle a été conçu en respectant la structure du logiciel GAMS. Le langage GAMS est un langage de programmation et, en tant que tel, il impose des règles strictes d'écriture. Cette structure se présente de la manière suivante :

- **Sets**

Declaration

Assignment of members

- **Data** (Parameters, Tables, Scalars)

Declaration

Assignment of values

- **Variables**

Declaration

Assignment of type

Assignment of bounds and/or initial values (optional)

- **Equations**

Declaration

Definition

- **Model and Solve statements**
- **Display statement** (optionnel)

1. Déclaration des ensembles et sous ensembles

1. Les ensembles

- **Les spéculations**

L'ensemble des spéculations est nommé c. Ce sont:

- les cultures principalement vivrières dont les céréales (maïs, sorgho, mil)
- les tubercules (igname). Igname de bas-fonds et sur sol ferrugineux
- et les cultures maraîchères (tomate, piment).

- **Les types d'années climatiques**

Les types d'années climatiques considérées sont l'année très sèche s1, l'année sèche s2, l'année normale s3, l'année humide s4 et l'année s5 qui est semblable à l'année normale mais avec des poches de sècheresse.

Pour distinguer les années s2, s3 et s4, nous avons calculé la moyenne l'écart type sur 40 années des hauteurs annuelles de pluie. L'indice pluviométrique a été par la suite déterminé par la formule : IP =————.

Ainsi,

Les années sèches s2 correspondent aux valeurs de l'indice pluviométrique qui sont négatives.

Les années normales s3 correspondent aux valeurs de l'indice qui se rapprochent de la moyenne.

Les années humides s4 correspondent aux valeurs extrêmes de l'indice pluviométrique qui sont positives.

La probabilité d'occurrence de l'année s1 est de 10 %, celle de l'année s2 de 20%, l'année s3 de 40%, l'année s4 de 20 % et l'année s5 de 10% en tenant compte de la variation de l'indice pluviométrique.

- **Les périodes d'irrigation**

Nous avons définis dix huit (18) périodes réparties sur la période de la campagne agricole. Ces périodes nous permettront de définir au besoin les périodes d'irrigation. Nous avons définis des périodes décadaires et des périodes mensuelles. Les périodes décadaires sont définies pour les cultures entièrement pluviales à compter de l'installation des cultures (mois de juin) jusqu'au mois d'Août.

- **Les types de sols**

Les types de sols considérés sont les bas-fonds (o1) et les sols ferrugineux (o2). La superficie cultivée sur le sol ferrugineux représente environ les 4/5 de la superficie exploitée pour la moyenne exploitation.

2. Les sous ensembles

Un seul sous ensemble a été déclaré, celui des vivriers noté c1(c) et ceci pour définir l'équation de l'autoconsommation. En effet le ménage de l'exploitant consomme surtout des céréales et très peu les tubercules.

2. Les données

1. Les scalaires

Ils sont définis sans aucun ensemble et se présentent sous forme de constante. Les scalaires pris en compte dans le modèle sont :

- le nombre de jours de main d'œuvre disponible **(mod),** estimé à 9
- le nombre de personnes pop personne dans l'exploitation **(pop)**, estimé à 8
- le capital par personne dans l'exploitation **(cap)** en FCFA, estimé à 30000

2. Les paramètres

Ils sont définis sur un ensemble. Les paramètres dans ce modèle sont :

- Le prix des différentes cultures **px(c)** qui a été obtenu sur la base des prix du service de la mercuriale.
- La probabilité d'occurrence des types de saison **prb(s)**, à partir de l'indice pluviométrique
- Le besoin en capital **bc(c)**, obtenu à partir du questionnaire administré à l'exploitant
- La masse volumique apparente en kg par m3 **da(o)**. A l'aide du diagramme de texture on a fait des projections pour avoir la texture correspondante à cette granulométrie. Une fois la texture du sol connu, nous avons identifié la masse volumique apparente correspondante sur la fiche des propriétés physiques représentatives des sols.
- L'enracinement des cultures en mm **z(c)**, à travers la recherche documentaire
- La capacité de rétention du sol **hcr(o).** A l'aide du diagramme de texture on a fait des projections pour avoir la texture correspondante à cette granulométrie. Une fois la texture du sol connu, nous avons identifié la capacité de rétention du sol correspondante sur la fiche des propriétés physiques représentatives des sols.
- L'humidité au point de flétrissement **hpf(o).** A l'aide du diagramme de texture on a fait des projections pour avoir la texture correspondante à cette granulométrie. Une

fois la texture du sol connu, nous avons identifié l'humidité au point de flétrissement correspondante sur la fiche des propriétés physiques représentatives des sols.

- Le coefficient cultural **Kc(c)**, à travers la recherche documentaire
- L'évaporation en mètres par période **eva1(p)** à travers la recherche documentaire
- La surface par type de sol **ter(o)**, à partir du questionnaire administré à l'exploitant
- La marge brute par culture par type de saison **mb(c, o, s)**
- L'impact du déficit en kg par m3 **id(c)**, à partir du questionnaire administré à l'exploitant.
- Le prix de l'irrigation en FCFA **pir(c)**
- L'évapotranspiration en mm par période **etp(p**), à partir des données de l'évapotranspiration potentiel recueillies à l'ASECNA.

3. Les tables

- Les tables sont définies sur deux ensembles différents. Ce sont:
- Le rendement par hectare par saison **rt(c, o, s)**, ils ont été obtenus à partir des rendements collectés sur quinze campagnes agricoles.
- Le calendrier des besoins en jour de travail par hectare par période **bw(c, p)**. Ce sont les besoins en jour de travail par période. Elles ont été estimées à partir du questionnaire administré à l'exploitant.
- Le besoin en terre **bter(c, p, o)**
- La pluie totale par période **pl (p, s)**. Ce sont des données de pluie estimées par période. Elles ont été calculées à partir des données des hauteurs mensuelles de pluie recueillies à l'ASECNA.
- Le ruissellement par type de saison et par période **rui1 (p, s**). Elles ont été calculées à partir des données de pluie par période auxquelles on a appliqué le coefficient de ruissellement de 13% en faisant l'hypothèse que ce dernier est uniforme sur tout le bassin versant dans lequel se trouve notre zone d'étude.

3. Les variables

- La variable objectif en FCFA **(R1)**
- Le revenu par type de saison en FCFA **(R)**
- La surface des cultures en ha **(X)**
- Le volume d'eau dans le bassin en m^3 **(EAU)**
- Le volume d'eau ruisselé de l'amont en m^3 **(RUIS)**
- Le volume d'eau ruisselé dans parcelle en m^3 **(RUIS2)**
- La vente en kg **(VENT)**
- L'autoconsommation en kg **(AUTO)**
- Le crédit en Fcfa **(CRED)**
- L'assurance contre le risque **(ASS)**
- Le volume du bassin en m^3 **(BASS)**
- La surface du bassin en ha **(SURF)**
- La réserve utile du sol en m^3 par ha **(RU)**
- Le besoin en eau des cultures en m^3 par ha **(BES)**
- Le déficit hydrique en m^3 **(DEF)**

- La quantité d'eau percolée en m^3 **(PER)**
- La quantité d'eau infiltrée en m^3 **(INFI)**
- L'eau d'irrigation en m^3 **(IRR)**
- L'eau dans le sol en m^3 **(ES)**
- L'évaporation par période et par saison en m^2 **(EVA)**

Il faut noter que toutes ces variables sont positives, sauf celles du revenu par saison et du revenu fonction objectif.

4. Les équations

1. La fonction objectif

La fonction objectif dans le modèle de programmation linéaire consiste à maximiser le revenu agricole total de l'exploitant définit ici comme la somme par type de saison, de la probabilité d'occurrence des saisons par le revenu par saison.

Le modèle peut être présenté de la manière suivante :

Max rev =E= sum ((s), prb(s) * R(s)) =E= R1;

Prb(s): est la probabilité d'occurrence de la saison s.

R(s) : est le revenu du paysan par saison s.

R(s) =E= sum ((c, o), VENT(c, o, s)* px (c) Ŕbc (c) * X(c, o))

- 0.08 * CRED

- 0.27 * ASS

- 600* sum (o, BASS (o))

- 50 * sum ((c, p, o), IRR(c, p, o, s))

Avec:

px (c): le prix de vente des produits par kg

bc (c): le besoin en capital pour chaque culture

X(c, o): la superficie emblavée pour chaque culture

BASS(o): la capacité du bassin

IRR(c, p, o, s) : les besoins en eau d'irrigation

CRED : le crédit pris par l'exploitant

ASS : l'indemnité que paye l'exploitant en année de risque (année sèche)

Ce revenu total sera optimisé en fonction de plusieurs variables et sous un certain nombre de contraintes traduites par des équations et inéquations.

2. Les autres équations

Les principales contraintes existantes sur cette exploitation agricole sont d'ordre technique et économique. Elles sont tout d'abord relatives à la disponibilité en facteurs de production.

- **La contrainte du risque**

Avec la variabilité climatique, l'exploitant court le risque d'une année sèche pendant laquelle son revenu va baisser. Il prend donc une assurance pour se couvrir du risque.

L'équation de cette contrainte se présente de la manière suivante :

lrisk.. sum (o, R('s3')) =G= 250000 - ASS

Avec:

R('s3'): le revenu en année sèche

ASS: la cotisation donnée par le paysan

Cette équation impose que valeur limite du revenu auquel le paysan est contraint en année sèche après soustraction de la cotisation pour l'assurance soit supérieur ou égale à son revenu au cours de cette année. L'assureur lui paye alors une indemnité pour couvrir le risque.

- **La contrainte de crédit (CRED)**

En année sèche, le revenu du paysan ayant baissé, il se trouve obligé de prendre du crédit. Le taux d'intérêt de ce crédit est de 8%.

- **La contrainte de terre**

Cette contrainte se traduit par la superficie de terre disponible. L'équation de cette contrainte se présente de la manière suivante :

lter(p,o).. sum(c, bter(c,p,o) * X(c,o)) + SURF (o) =L= ter(o)

Avec:

bter(c,p,o): le besoin en terre des cultures par période

X(c,o): la superficie des spéculation

SURF (o): la superficie occupée par le bassin

Cette équation impose que la superficie disponible soit supérieure ou égale à la somme des besoins en terre des cultures.

- **La contrainte de bassin**

Cette contrainte se traduit par la capacité du bassin. Les équations de cette contrainte se présentent de la manière suivante :

lbass(p,o,s).. EAU(p,s) =L= BASS(o) (1)

lsurf(o).. SURF(o) =E= BASS(o)/1.5 * 0.0001 (2)

L'équation (1) impose que l'eau dans le bassin soit inférieure ou égale à la capacité du bassin.

L'équation (2) impose que la capacité du bassin soit égale à sa superficie.

- **La contrainte hydrique**

Cette contrainte se traduit par la quantité d'eau disponible dans le bassin en début de chaque période et pouvant combler un éventuel déficit hydrique. L'équation de cette contrainte se présente de la manière suivante :

leau(p,s).. EAU(p-1,s) + RUIS(p,s) - sum((c,o), IRR(c,p,o,s)) - EVA(p,s) =E= EAU(p,s);

Avec:

EAU(p-1,s) : l'eau qui reste dans le bassin de la période précédente

RUIS(p,s): le ruissellement

IRR(c,p,o,s) : les besoins en eau d'irrigation

EAU(p,s): l'eau dans le bassin pour la période suivante

Cette équation impose que l'eau dans le bassin pour la période soit égale à la quantité d'eau dans le bassin après avoir soustrait des apports (eau dans le bassin de la période précédente additionnée à l'eau ruisselée pendant la période) les sorties (besoins en eau d'irrigation et quantité d'eau qui a évaporé dans le bassin).

- **Besoins en eau des plantes (BES)**

Cette contrainte se traduit par la quantité d'eau disponible pour les besoins des cultures par période. L'équation de cette contrainte se présente de la manière suivante :

lbes(c,p,o).. etp(c,p) * kc(c)* 10 * X(c,o) =L= BES(c,p,o)

Avec :

etp(c,p) : l'évapotranspiration par culture et par période

kc(c) : le coefficient cultural par culture

X(c,o) : la superficie emblavée par culture et par type de sol

Cette équation impose que la quantité d'eau disponible pour les besoins des cultures soit supérieure ou égale aux besoins en eau des cultures des superficies emblavées.

- **Evaporation dans le bassin (EVA)**

Cette contrainte se traduit par la quantité d'eau évaporée dans le bassin par période et par saison. L'équation de cette contrainte se présente de la manière suivante :

leva(p,s).. EVA(p,s) =E= eva1(p) * sum(o, SURF(o));

Avec:

EVA(p,s): la limite de l'évaporation dans le bassin

eva1(p): l'évaporation par période dans le bassin

SURF(o): la superficie occupée par le bassin

Cette équation impose que la quantité d'eau évaporée soit égale à la quantité d'eau évaporée par période pour tous les types de bassins.

- **La contrainte d'eau stockée dans le sol (ES)**

Cette contrainte se traduit par la quantité d'eau stockée dans le sol à chaque période. Les équations de cette contrainte se présentent de la manière suivante :

les1(c,p,o,s).. ES(c,p-1,o,s) + INFI(c,p,o,s) - BES(c,p,o) - PER(c,p,o,s) - DEF(c,p,o,s) =E= ES(c,p,o,s) (1)

les2(c,p,o,s).. ES(c,p,o,s) =L= RU(c,p,o) (2)

Avec:

ES(c,p-1,o,s) : l'eau stockée dans le sol pour la période précédente

INFI(c,p,o,s): l'eau infiltrée dans le sol pendant la période

BES(c,p,o): les besoins en eau des cultures pendant la période

PER(c,p,o,s): l'eau percolée dans la nappe

DEF(c,p,o,s): le déficit hydrique

RU(c,p,o): la réserve utile

L'équation (1) impose que l'eau dans le sol à chaque période soit égale à la quantité d'eau disponible dans le sol après avoir extrait de l'eau disponible dans le sol à la fin de la période précédente et de l'eau infiltrée au cours de la période, les besoins en eau des cultures, l'eau percolée et le déficit hydrique.

L'équation (2) impose que la réserve utile soit supérieure à l'eau stockée dans le sol.

- **Le ruissellement (RUIS)**

Cette contrainte se traduit par la quantité d'eau ruisselée par période. Les équations de cette contrainte se présentent de la manière suivante :

Lrui(p,s).. RUIS(p,s) =L= rui1(p,s) * 100 (1)

Lrui2(p,s).. RUIS(p,s) =L= sum(o, BASS(o)) (2)

Avec:

RUIS(p,s): l'eau ruisselée dans le bassin par période

rui1(p,s): la quantité totale d'eau ruisselée

BASS(o): la capacité du bassin

L'équation (1) impose que l'eau qui a ruisselé sur la parcelle soit supérieure ou égale à ce qui entre dans le bassin. Donc tout ce qui entre dans le bassin ne doit pas être supérieur à ce qui ruisselle.

L'équation (2) impose que l'eau ruisselée dans le bassin soit inférieure ou égale à la capacité du bassin.

- **La contrainte de l'infiltration (INFI)**

Cette contrainte se traduit par la quantité d'eau infiltrée dans le sol par période. L'équation de cette contrainte se présente de la manière suivante :

Linfi(c,p,o,s).. INFI(c,p,o,s) =L= (pl(p,s)-rui1(p,s)) * 20 * X(c,o) + IRR(c,p,o,s);

Avec :

INFI(c,p,o,s): l'eau infiltrée

Rui1(p,s): l'eau ruisselée dans la parcelle

pl(p,s): la pluie tombée par période et par saison

X(c,o): la superficie emblavée

IRR(c,p,o,s) : l'eau d'irrigation

Cette équation impose que la quantité d'eau infiltrée dans le sol soit inférieur ou égale à la quantité d'eau qui résulte de la différence entre la pluie tombée et l'eau ruisselée additionnée à la quantité d'eau apportée pour l'irrigation.

- **La contrainte de la réserve utile (RU)**

Elle définit la quantité d'eau disponible pour les cultures dans le sol. L'équation de cette contrainte se présente de la manière suivante :

lru(c,p,o).. (hcr(o)- hpf(o))* da(o)* z(c)* 10* X(c,o) * 2/3 =L= RU(c,p,o);

Avec :

hcr(o) : la capacité de rétention

hpf(o) : l'humidité au point de flétrissement

da(o) : la densité apparent des types de sol

z(c) : l'enracinement des cultures

X(c,o) : la superficie emblavée

RU(c,p,o) : la réserve utile

Cette équation impose que la réserve utile soit supérieure ou égale à la réserve facilement utilisable par les cultures qui est fonction de la densité apparente et de l'enracinement des cultures.

- **La contrainte de la percolation (PER)**

Cette contrainte se traduit par la quantité d'eau percolée par période sur la parcelle. L'équation de cette contrainte se présente de la manière suivante :

lper(c,p,o,s).. PER(c,p,o,s) =L= INFI(c,p,o,s) - RU (c,p,o)

Avec:

PER(c,p,o,s): la quantité d'eau percolée

INFI(c,p,o,s): la quantité d'eau infiltrée

RU (c,p,o): la réserve utile

Cette équation impose que l'eau qui a percolée à travers le sol de la parcelle soit inférieure ou égale à la quantité d'eau restante après avoir soustrait de l'eau qui a infiltrée sur la parcelle la réserve utile.

- **La contrainte de travail**

Cette contrainte se traduit par la disponibilité de la main d'œuvre. L'équation de cette contrainte se présente de la manière suivante :

ltra(p).. sum((c,o), bw(c,p) * X(c,o)) =L= mod * pop / 2

Avec:

bw(c,p) : le besoin en travail

X(c,o) : la superficie emblavée

Mod: la main-d'œuvre disponible

Pop: la population totale

Cette équation impose que la main-d'œuvre disponible soit supérieure ou égale à la somme des besoins en travail des cultures par période. Autrement dit, l'offre de travail doit être supérieure à la demande.

- **La contrainte de capital**

Cette contrainte se traduit par la disponibilité en capital. L'équation de cette contrainte se présente de la manière suivante :

lcap.. sum((c,o), bc(c) * X(c,o)) =L= cap * pop + CRED

Avec:

bc(c): le besoin en capital

cap: le capital disponible

pop: la population

CRED: le crédit

Cette équation impose que le besoin en capital pour les superficies emblavées soit inférieure ou égale à la somme du capital disponible et du crédit emprunté.

La contrainte d' auto consommation

Cette contrainte se traduit par la quantité de céréales consommée par le ménage du paysan. L'équation de cette contrainte se présente de la manière suivante :

lconso(c,s)$c1(c).. sum (o, AUTO(c,o,s))+ ACH(c,s) =G= conso(c)$c1(c) * pop;

Avec:

AUTO(c,o,s): la consommation

Pop: la population

Cette équation impose que la consommation en vivriers du ménage agricole soit inférieure ou égale à la quantité de céréales disponible pour la consommation.

- **La production**

Cette contrainte se traduit par la quantité de récolte. L'équation de cette contrainte se présente de la manière suivante :

lprod(c,o,s).. (X(c,o)* rt(c,o,s)) - 10 * sum(p, DEF(c,p,o,s)) =E= AUTO(c,o,s) + VENT(c,o,s)

Cette équation impose que la somme de la quantité de récolte consommée et de la quantité de récolte vendue soit égale au rendement total des cultures soustrait des pertes liées au déficit.

V. RESULTATS ET DISCUSSIONS

1. Analyse de la variabilité climatique et de la production agricole dans la commune de Natitingou

La pluviométrie est le paramètre climatique le plus étudié, car c'est le plus variable d'une année à l'autre et d'un lieu à un autre.

1. Variabilité pluviométrique de 1971 à 2010

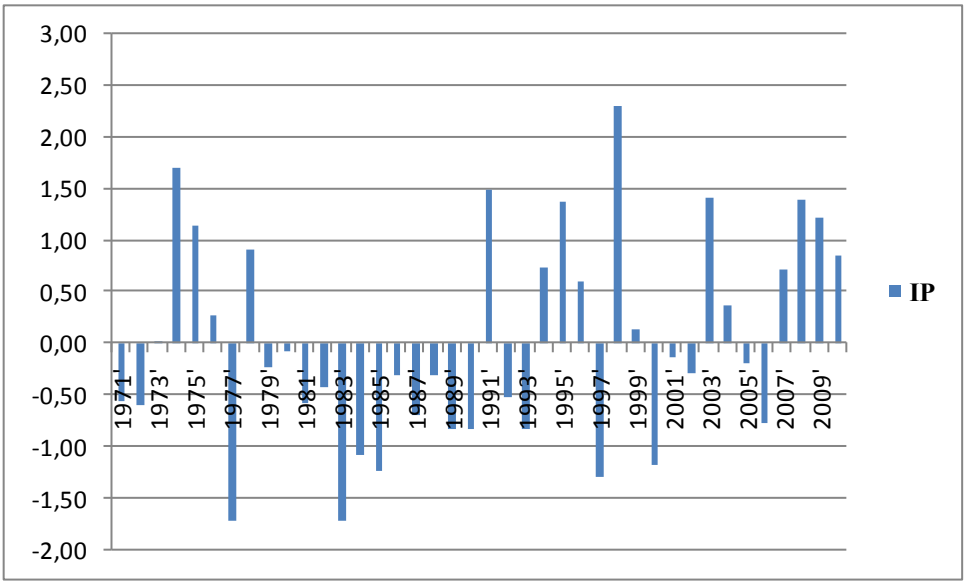

Figure 3: variabilité pluviométrique de 1971 a 2010

De l'analyse de cette figure, on constate qu'il y a des années humides et des années humides. On peut aussi noter quelques années très humides et très sèches.

Dans ce contexte climatique, c'est la variabilité pluviométrique qui traduit les contraintes d'ordre climatique les plus remarquables, aussi bien pour les ressources en eau, que pour la production agricole.

2. Analyse de la variation du nombre de jours de pluie pendant la période culturale

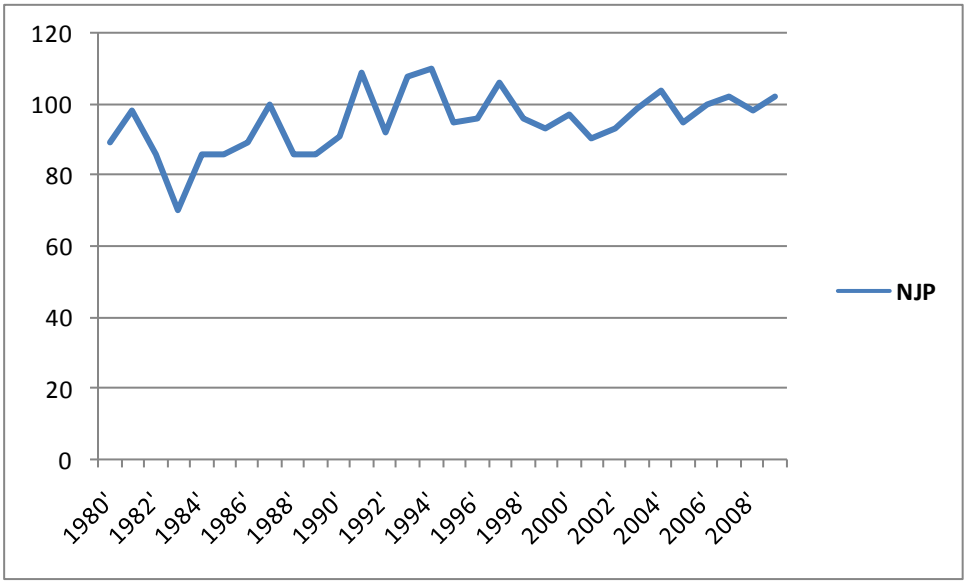

Figure 4: variation du nombre de jours de pluie pendant la période culturale

Cette figure traduit la variation du nombre de jours de pluie pendant la période culturale de 1980 à 2009. Le nombre de jours de pluie dans ce mois varie de 70 jours à 110 jours. Nous pouvons aussi remarquer que sur les six mois (180 jours) la moyenne des jours de pluie est de 95. Le nombre de jours de pluie tombée pendant cette période et inférieur à cette moyenne est de 43%. La répartition des pluies varie d'une année à l'autre en fonction du nombre de jours et 43 % ont une valeur presque égale à la moitié du nombre de jours dans cette période.

3. Analyse de la variabilité pluviométrique et des rendements agricoles

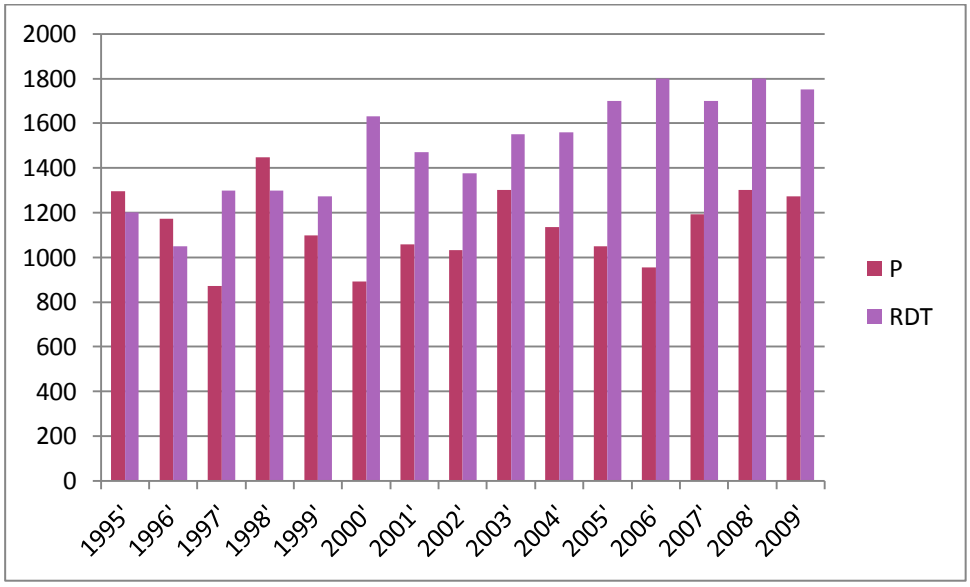

Figure 5: variations annuelles des hauteurs de pluie et des rendements pendant la période culturale

La figure 5 traduit la variation du rendement agricole du maïs amélioré en fonction des hauteurs de pluie tombée pendant la période culturale. Elle a été établie sur 15 campagnes (1995 à 2009) réalisées dans la commune. Nous remarquons les meilleurs rendements (au-delà de 1500kg/ha) sont obtenus aussi bien qu'en année humide et très humide qu'en année sèche. Par contre, l'année où la pluviométrie est la plus élevée (année très humide) on a obtenu un rendement moyen. Nous pouvons remarquer qu'en 2000 et en 2006, bien qu'on soit en année sèche (pluviométrie inférieure à 1000 mm) respectivement, les rendements du maïs sont meilleurs. De cette analyse, nous pouvons conclure que le rendement n'est pas fonction de la hauteur de pluie tombée mais pourrait être fonction de sa répartition dans le temps.

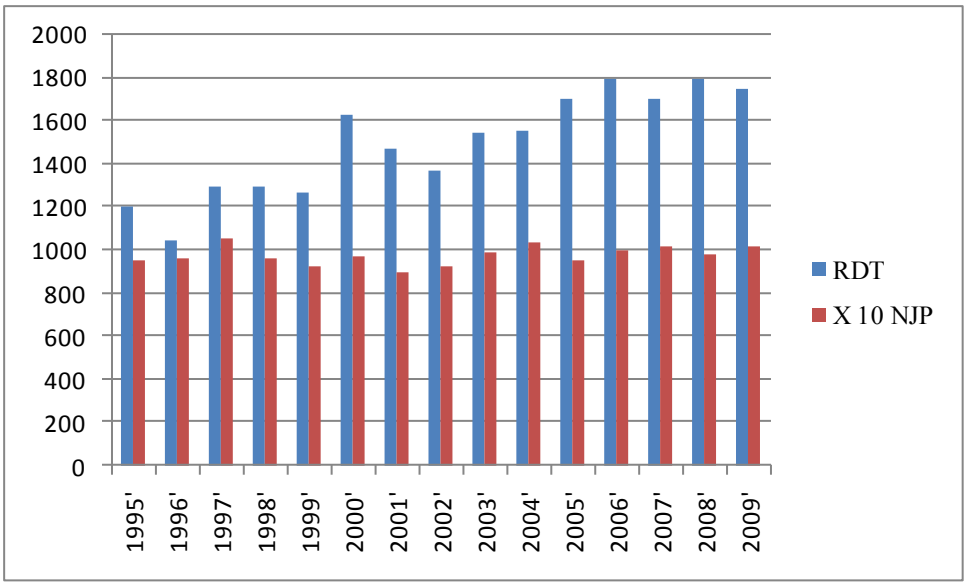

Figure 6: Variations annuelles du nombre de jours de pluie et des rendements pendant la période culturale

La figure 4 traduit la variation du rendement du maïs amélioré en fonction du nombre de jours de pluies tombées pendant la période culturale. Cette variation du rendement a été établie sur quinze (15) campagnes agricole (de 1995 à 2009) réalisés dans la commune. D'une manière générale, pour les mêmes meilleurs rendements observés avec le graphe 3, ils correspondent aux années où les NJP sont plus grand. Cependant, on remarque qu'en 1997 où le NJP est plus élevé nous avons un rendement moyen.

En somme, dans ce contexte de variabilité climatique que ce soit à grande ou à petite échelle où l'eau est le facteur déterminant dans tous les stades de développement d'une plante la production agricole en est tributaire. Une des stratégies d'adaptation les plus efficientes à cette variabilité qui se manifesterait par des poches de sècheresse reste l'irrigation de complément pour améliorer ou du moins sécuriser la production et par conséquent le revenu du paysan.

2. Caractéristiques des systèmes agraires dans la commune de Natitingou

Nos enquêtes et entretien nous ont permis de décrire les systèmes agraires dans la commune de Natitingou.

1. Caractéristiques des exploitations

La classification des exploitations est résumée dans le tableau suivant:

Tableau 1: Classification des exploitations

Exploitations	Taille (ha)	Adoption des innovations technologiques
Petite	0,25 - 1	Pas du tout
Moyenne	1,5 - 5	Très peu
Grande	>5	Adoption totale

2. Caractéristiques des ménages des exploitants

La taille des ménages varie entre 6 et 10 personnes y compris les adultes et les enfants. L'actif agricole varie entre 4 et 8. Nous avons un ménage monogame et l'autre polygame. Les chefs d'exploitations sont tous des hommes alphabétisés et dont le niveau d'instruction est le primaire. Ils sont informés de l'existence du crédit de campagne agricole mais n'en ont pas fait pour les campagnes précédentes. Ils appartiennent tous à un groupement. La forme de prêt dont a bénéficier l'exploitant de la grande exploitation (polygame, taille de ménage égale à 5 et l'actif agricole de 3) est l'octroi des intrants pour la production du coton et que le CeCPA retire après la vente du coton.

3. Caractéristiques des exploitations

- **Taille des exploitations**

Les deux exploitations ont une taille comprise entre 5 et 15 ha. Les superficies augmentent d'année en année à cause de la pauvreté des sols et ceci dans le souci d'augmenter la production.

- **Les sols des exploitations**

Les sols rencontrés sur ces exploitations sont les sols ferrugineux et les bas-fonds.

- **Distance séparant les champs des habitations**

Les habitations sont au milieu ou à proximité des exploitations. Excepté les parcelles cultivées en contre saison pour les cultures maraîchères et le long des cours d'eau.

- **Origine des terres de l'exploitation**

Les différentes origines des terres rencontrées à Tchoumi-Tchoumi et à Mousansamou sont l'attribution et le prêt.

- **Les moyens de production**

Les moyens de production rencontrés dans ces exploitations sont la houe, la daba, le coupe-coupe (manchette), la hache, la pioche, le tracteur et le grenier. Ces outils traditionnels à part

le tracteur sont d'une puissance très limitée. La force humaine constitue dans ce cas le principal moteur de la production. L'agriculture étant extensive. La durée de vie de ces moyens traditionnels de production est de 1 à 2 ans. Le tracteur est loué uniquement pendant le labour.

- **Les moyens de transport**

Les moyens de transports interviennent eux aussi dans la production de ces exploitations. Ils sont nécessaires pour le transport des produits de récolte pour la vente. Il s'agit du vélo et de la motocyclette.

- **Main d'œuvre**

Il a été dit plus haut que la force humaine constitue le principal moteur de la production dans ces exploitations. Les formes de main-d'œuvre qu'on distingue sont:

- la main-d'œuvre familiale
- la main-d'œuvre salariale (occasionnelle)
- et une autre forme de main-d'œuvre sociale qui n'est ni familiale et ni salariée. Cette main d'œuvre est une forme d'entraide qui est acquise par une simple invitation des amis du village et des villages voisins. Celui qui invite, offre à ses convives de la bière locale (tchoukoutou) et de la nourriture.

Les opérations culturales telles qu'elles sont exécutées demandent un apport considérable de la main d'œuvre. Cette main-d'œuvre est répartie comme suit :

Tableau 2: Répartition de la main-d'œuvre

Spéculations	Nombre d'homme-jours
Maïs	80
Sorgho	74
Mil	74
Niébé	60
Igname	126
Tomate	86
Piment	86

- **Pratiques culturales**

A la base des renseignements récoltés auprès des exploitants, le calendrier cultural se présente comme suit :

Tableau 3: Calendriers culturaux

Opérations Culturales / Spéculations	Labour	Semi /Plantation	Sarclage /Désherbage	Récolte	Battage /Vannage
Maïs	Mai/Juin	Juin	Juillet-Août	Septembre	Octobre
Sorgho	Mai/Juin	Juin	Juillet-Août	Nov.Déc.	Déc.
Mil	Mai/Juin	Juin	Juillet-Août	Déc.	-
Piment	Nov.	Nov.	Déc.	Janvier	-
Igname	Déc. /Mai	Déc. /Mai	Mars/Juillet	Août/Déc.	-
Tomate	Mai/Nov.	Mai/Nov.	Juin/Déc.	Juillet-Août/Janvier-Mars	-

- **Les types de spéculations**

Les cultures pratiquées dans ces exploitations sont :

- Les cultures céréalières (sorgho, maïs, mil et le riz)

Dans le cas du maïs, c'est le maïs amélioré et plus spécialement les variétés précoces à cause du raccourcissement de la durée des pluies.

- Pour ce qui est du sorgho, les paysans ne cultivent que la variété rustique à cause de l'usage de ses tiges. Pour le mil, c'est aussi la variété tardive.
- Les tubercules (igname à une récolte, à deux récoltes). Au sein de ces deux groupes, il existe différentes variétés.
- Les cultures industrielles (coton, l'arachide)
- Les cultures maraîchères (tomate, piment, gombo, légumes)

C'est un système de culture à vocation céréalière dans le but de satisfaire les besoins locaux.

Pour ce qui est des rendements, ils ne sont qu'un simple rapport des quantités de production obtenues par les exploitants par les superficies déclarées. Ces rendements ont été difficiles à obtenir parce que les exploitants ne sont pas parvenus à estimer la quantité récoltée par manque d'initiative et de manque d'instruments de mesure. Nous avons donc utilisé les rendements du CeCPA sur les dix (10) dernières campagnes agricoles pour en obtenir la moyenne. C'est-à-dire de la campagne 2001-2002 à la campagne 2010-2011.

Les rendements moyens obtenus se présentent comme suit :

Tableau 4: Rendements des spéculations

Spéculations	Rendements (kg)
Maïs	1662
Sorgho	1056
Mil	707
Niébé	871
Igname	12053
Tomate	6550
Piment	5560

- **Le capital des spéculations**

Les investissements dans ces exploitations prennent en compte l'achat des intrants, les repas des convives quand il s'agit de la main d'œuvre sociale et l'achat du matériel de travail. Pour la grande exploitation, la location de tracteur et la main d'œuvre salariale quand il en trouve. L'unité de mesure est le quart d'hectare. Le tableau suivant présente le prix de la main d'œuvre salariale par activité :

Tableau 5: Prix de la main-d'œuvre salariale

Activités	superficie (ha)	Prix (F CFA)
Défrichage	0,25	3000
Sarclage	0,25	2000
Labour (billons)	0,25	6000
Labour (buttes)	0,25	10000
Location tracteur	1	25 - 30000
Culture attelée	1	20 - 24000

Le capital investit par spéculation a été calculé sur la base des déclarations des dépenses faites par les exploitants pour toute la parcelle cultivée. Nous avons ainsi calculé le capital par hectare.

Tableau 6: Capital de spéculations

Spéculations	Capital
Maïs	81000
Sorgho	2000
Mil	2000
Igname	50000
Piment	160000
Tomate	130000

- **Les prix moyens des produits agricoles dans le marché de Natitingou**

Il existe un service de la mercuriale qui se charge de récolter les prix des différents produits agricoles tous les jours de marché de Natitingou. Nous avons donc utilisés ces données sur deux (02) ans pour obtenir le prix moyen présentés dans le tableau suivant :

Tableau 7: Prix moyens des produits agricoles

Produits	Prix moyen (F CFA/Kg)
Maïs	171
Sorgho	188
Mil	200
Igname	230
Tomate	624
Piment	400

- **Les nouvelles technologies adoptées dans la commune**

Comme nouvelles technologies, nous avons la mécanisation (tracteurs) et les variétés améliorées de certaines spéculations.

- **Les techniques de conservation de l'eau et des sols**

Ce sont :

- L'introduction de la fumure organo- minérale,
- L'association agriculture-élevage
- Les bandes de vétivers
- Les cordons pierreux
- La jachère
- La couverture végétale
- Les légumineuses

Toutes ces techniques de conservation de l'eau et des sols sont très peu utilisées par les paysans, excepté la jachère. Cela s'explique par le fait qu'une fois les sols devenus pauvres, les paysans pratiquent de la déforestation pour obtenir de nouvelles terres.

3. Résultat de la modélisation sans le bassin

1. Superficies emblavées

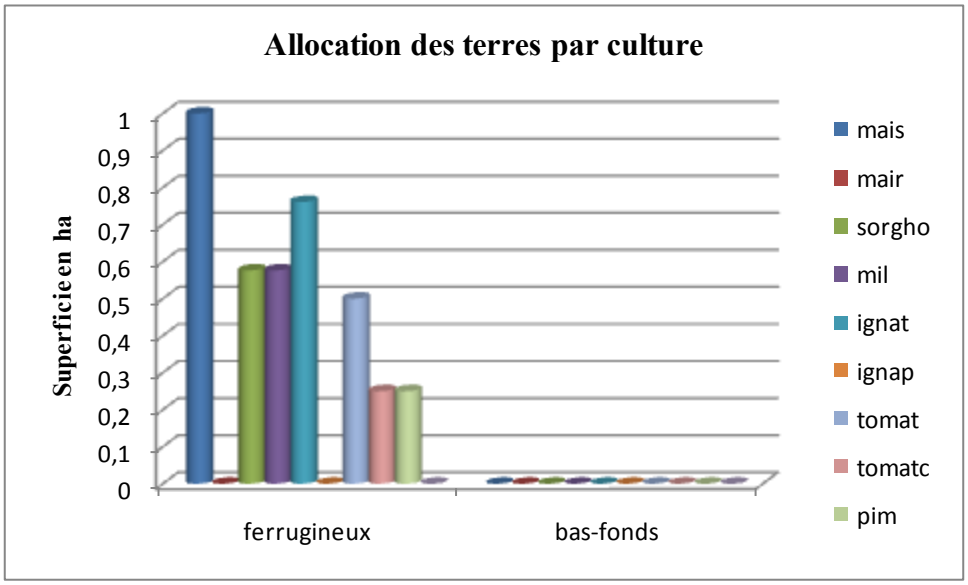

Figure 7: superficies emblavées par culture

Cette figure nous présente les allocations en terre des cultures. Sur les cinq (05) ha dont dispose l'exploitant, seuls 3,913 ha ont été emblavé dans le modèle.

Ces cultures ont été dans l'ensemble emblavées sur un sol ferrugineux. Il faut noter que le calage du modèle ne reflète pas exactement la réalité de l'exploitant.

Cependant, le modèle nous propose de faire du mais non irrigué sur une superficie de 1 ha, du sorgho à hauteur de 0,576 ha, du mil également sur 0,576 ha, de l'igname tardive à hauteur de 0,761 ha, de la tomate pluviale sur 0,5 ha, de la tomate de contre saison sur 0,25 ha et du piment en contre saison sur 0,25 ha. En dehors de l'igname précoce et de la jachère le modèle prend en compte la majorité des cultures emblavées par le pays pour la campagne agricole passée chez cet exploitant et leurs superficies s'approchent de la réalité.

2. Les valeurs marginales

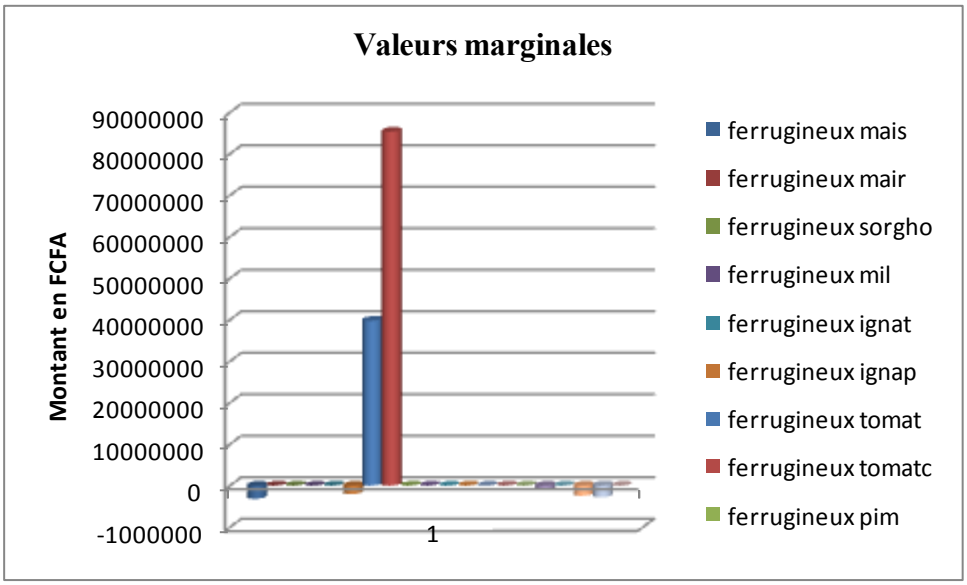

Figure 8: valeurs marginales des cultures

Cette figure présente les valeurs marginales pour chaque culture. Les valeurs négatives expriment que si le paysan force à faire ces cultures, il perdra cette valeur par ha. Les valeurs positives quant à elles expriment que le paysan gagnerait cette valeur par ha s'il fait cette culture. Dans notre cas précis les cultures qui présentent des valeurs marginales négatives sont le maïs pluvial, l'igname précoce, la tomate pluviale, la tomate de contre saison et le piment. Ces cultures sont limitées par les fonctions de production et de consommation.

3. La production

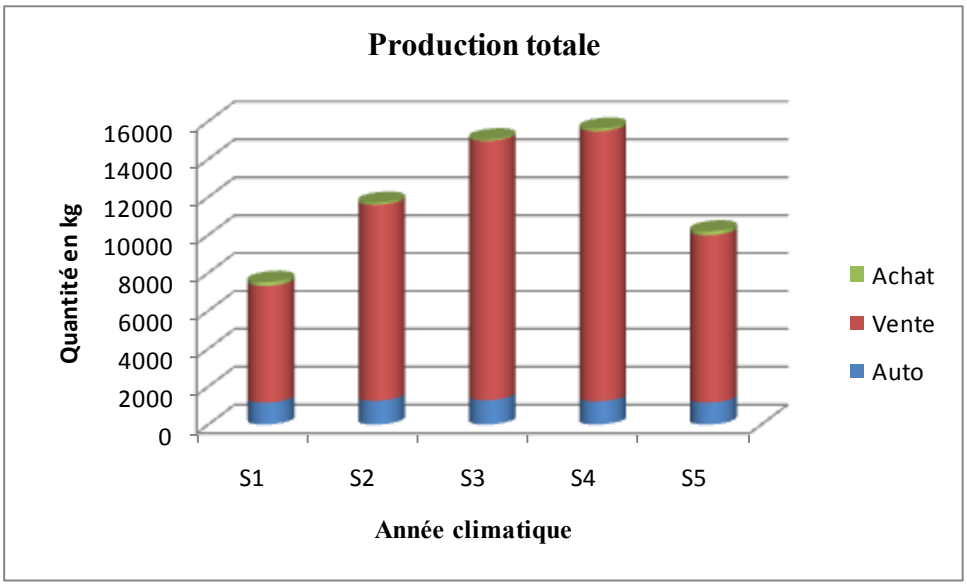

Figure 9: variation de la production par type d'année climatique

Cette figure nous présente la production de l'exploitation. Cette production prend en compte l'autoconsommation, la vente des produits de récolte et les achats en périodes de soudure. On constate que la quantité de produits de récolte vendue dépasse celle autoconsommée et les achats en produits vivriers qui sont eux faibles. Les variations de ces fonctions de production évoluent également avec l'année climatique. Il faut noter que dans ce cas précis, il n'a pas produit assez de vivriers pour lui permettre d'assurer son autosuffisance alimentaire. Il est donc contraint d'en acheter.

Par ailleurs, quand l'année climatique n'est pas favorable à la production, il vend moins puisqu'il est obligé de garantir son autosuffisance alimentaire. On constate qu'il en achète un peu moins pendant les années de bonne production.

4. Le revenu par type de saison

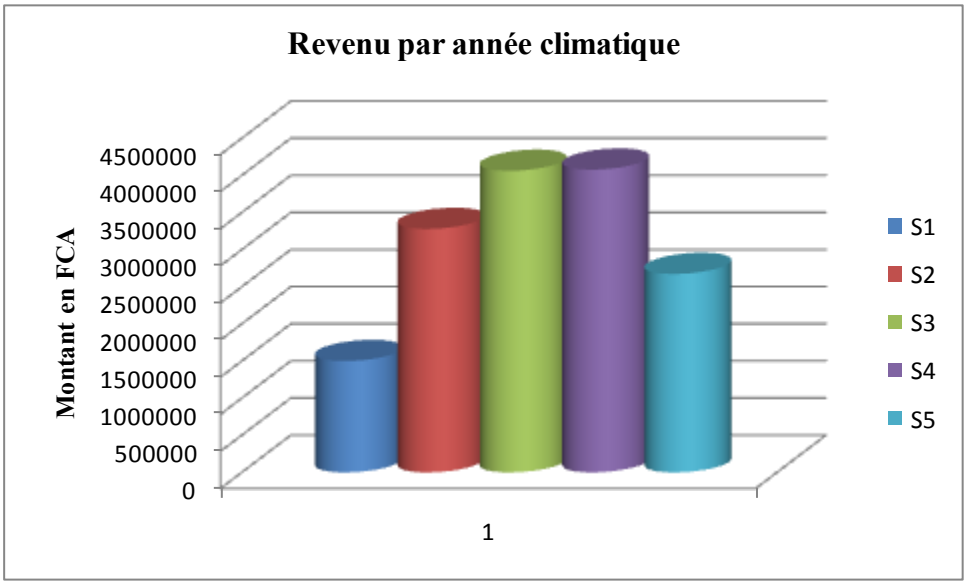

Figure 10: variation du revenu par type d'année climatique

Cette figure montre le revenu du paysan par type d'année climatique. On constate d'une part que ses revenus sont meilleurs quelque soit l'année climatique. Ceci peut s'expliquer par le fait que, les rendements sont importants pour ces cultures et aussi la production de maraîchère (tomate et piment) en contre saison ayant une grande valeur marchande. L'objectif du modèle étant de maximiser le revenu de l'exploitant, alors il a tendance à privilégier les cultures qui ont une grande valeur marchande. Dans ce contexte le paysan est obligé d'acheter des vivriers. Ce qui est contraire à la réalité. Dans la réalité, l'exploitant n'achète pas pour autant de vivriers.

Une autre analyse qui peut être faite de ce graphe est que mieux l'année est humide meilleur est son revenu. Or nous savons aussi qu'en année sèche la valeur marchande des produits des cultures est grande et devrait augmenter son revenu. Ceci implique que le rendement a baissé au point où la hausse des prix ne peut en aucun cas augmenté son revenu. Il vend donc moins pour assurer son autosuffisance alimentaire.

4. Résultats de la modélisation avec le bassin

1. Superficies emblavées

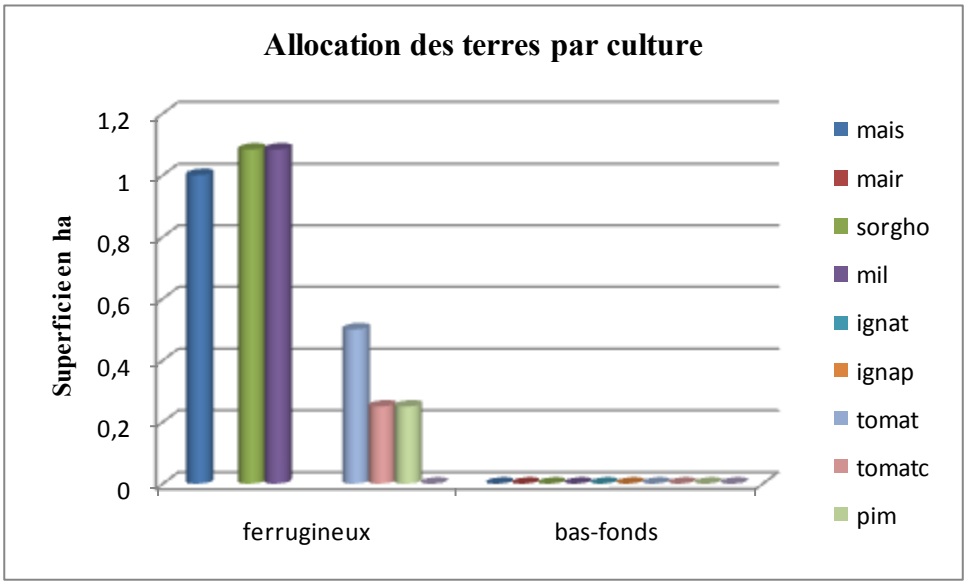

Figure 11: superficies emblavées par culture

On remarque à travers cette figure que les mêmes cultures ont été emblavées sauf l'igname mais avec des superficies différentes. Ces cultures ont été emblavées sur une superficie de 4,166 ha. Il ne fait pas du maïs irrigué qu'on lui propose de faire. L'irrigation de complément pour le maïs n'est donc pas rentable. Par contre, il fait de l'irrigation pour la tomate en p1. L'année climatique s1 étant toujours la même (hauteur de pluie identique), On peut émettre l'hypothèse qu'il y a eu probablement une séquence sèche juste après l'installation de la saison des pluies qui a conduit apporter de l'eau à la culture de tomate. L'irrigation de complément est donc rentable dans ce cas.

2. Les valeurs marginales

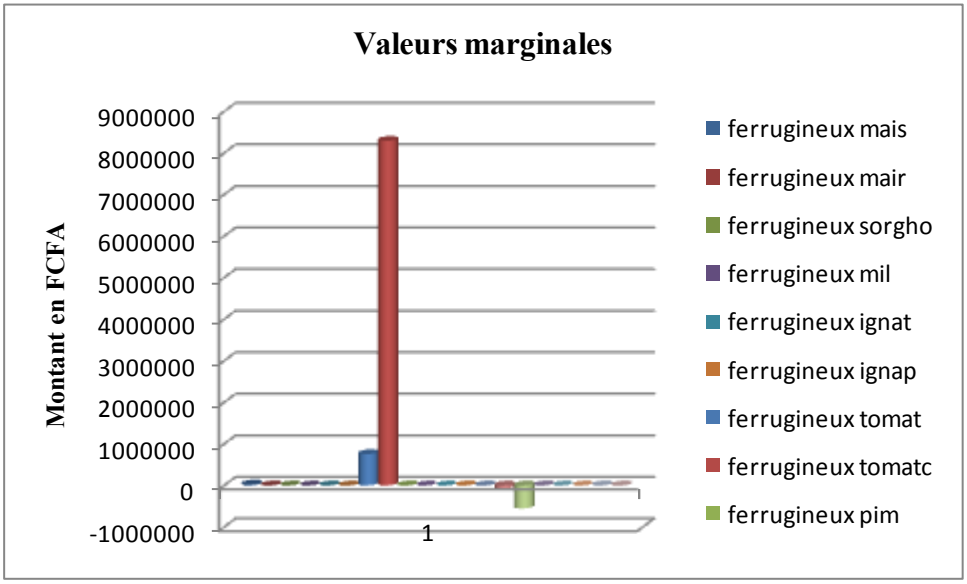

Figure 12: Valeurs marginales des cultures

Les mêmes interprétations sont faites que dans le premier scénario.

3. La production

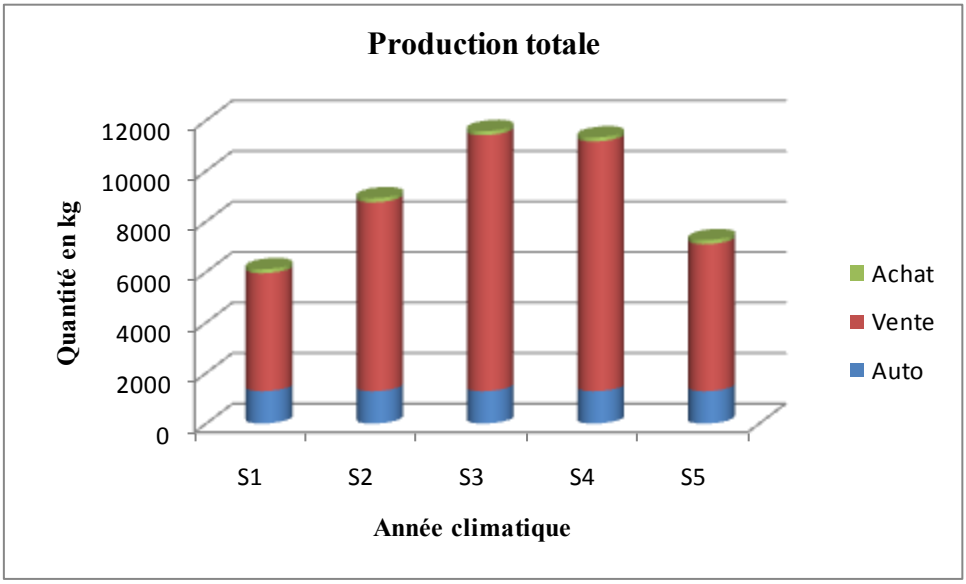

Figure 13: Variation de la production par type d'année climatique

Cette figure nous montre la variation de la production qui est semblable au scénario avec le bassin. La quantité de récolte pour l'autoconsommation et les achats est restée la même sur toutes les années climatiques. Seule la quantité de récolte vendue a varié d'une année climatique à l'autre. En effet, les besoins en achat concernent uniquement l'igname puisqu'il n'en produit désormais plus alors qu'il fait partir de sa consommation en temps normal. Pour

ce qui est de l'autoconsommation en général, il a désormais produit suffisamment de vivriers qui a garanti son autosuffisance alimentaire.

4. Le revenu par type de saison

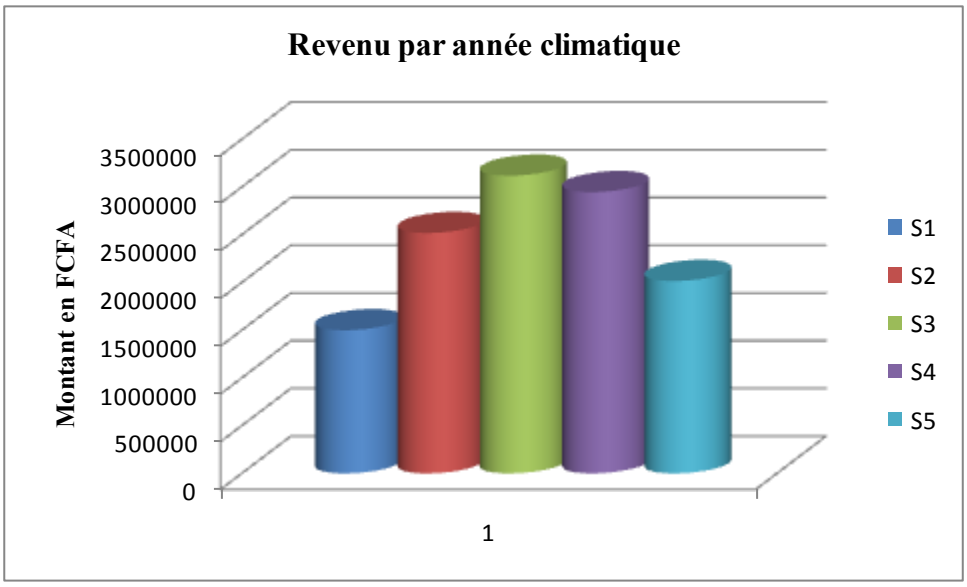

Figure 14: Variation du revenu du paysan par type d'année climatique

Le revenu évolue de la même manière que dans le cas sans le bassin. Nous remarquons que contrairement au scénario 1, le revenu a baissé sur toutes les années climatiques. Puisqu'il peut désormais garantir son autosuffisance alimentaire, il vend donc moins et ceci baisse son revenu. Une autre cause de la baisse de son revenu dans le scénario 2 est qu'il achète de l'igname qui a une valeur marchande plus élevée que les céréales contrairement au scénario 1 où il achète que des céréales.

Une autre analyse de ces résultats montre qu'en année climatique S1 dans les deux scénarii, il a le même revenu bien qu'il réalise le bassin dans le deuxième scénario pour combler le déficit hydrique. Le bassin a donc permis de sécuriser la production de tomate pluviale qui était de 1250 kg dans le scénario 1 et de 1249,47 kg dans le scénario 2. On peut donc conclure que l'irrigation de complément a été par ailleurs rentable pour la tomate pluviale.

VI. RECOMMANDATIONS

- ✓ Adopter l'irrigation de complément comme stratégie d'adaptation aux effets néfastes des changements climatiques sur l'agriculture.
- ✓ Octroyer des crédits aux paysans comme mesure d'atténuation aux conséquences des changements climatiques.
- ✓ Un système d'irrigation par aspersion à partir d'un arrosoir pourra assurer en temps réel le complément d'eau pour enrayer le déficit hydrique engendré par les poches de sécheresse durant la saison des pluies.
- ✓ Approfondir les recherches sur l'irrigation de complément
- ✓ Développer une politique de valorisation des eaux pluviales à travers la réalisation de bassins afin de permettre aux paysans de faire des cultures de contre saison pour améliorer leur revenu.

VII. CONCLUSION

L'objectif de cette étude est d'analyser l'impact de l'irrigation de complément sur le revenu des exploitants dans la commune de Natitingou. De façon spécifique, il s'est agit de faire une analyse des contraintes liées à la production agricole et particulièrement la contrainte de déficit hydrique et de la stratégie d'atténuation qui est la réalisation d'un bassin, puis d'évaluer l'impact que pourrait produire une levée éventuelle de cette contrainte sur la production et le revenu agricoles des exploitations.

Les résultats de la modélisation montrent que les risques de poches de sècheresse pourraient être à l'origine de la contrainte de déficit hydrique pour la tomate pluviale et que ceci baisserait les rendements. L'apport de l'eau de l'irrigation est donc une stratégie pour sécuriser ces rendements. Cependant, cette irrigation nécessite la réalisation d'un bassin pour collecter l'eau de ruissellement et d'en faire une source disponible. L'irrigation de complément apparaît alors comme une stratégie optionnelle d'adaptation aux effets des changements climatiques sur la production agricole.

Cette réflexion nécessite alors que des études plus approfondies qui permettront d'identifier les cultures qui sont sensibles au déficit hydrique et la technologie d'irrigation qui les accompagnent.

VIII. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DANIDA, (2008). Appréciation des impacts des changements climatiques sur les programmes de développement de la coopération avec le Bénin**:** 89.

Ministère de l'Environnement et de la protection de la Nature (MEPN), (2007). PROGRAMME D'ACTION NATIONAL D'ADAPTATIONAUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DU BENIN (PANA-BENIN)

Abbes, K., R. Mahjoubi, et al. (2005). Impacts des formules tarifaires binômes sur le système irrigué de la basse vallée de la Medjerda Tunisie, Institut agronomique méditerranéen de Montpellier**:** 17.

Département des Etudes Agronomiques. Notice explicative des cartes d'aptitude culturale en République Populaire du Benin. **Etude N° 251:** 131.

BARBIER B. and PETER H. "Implications of Population Growth and Declining Access to Transhumant Grazing Areas for the Sustainability of Agropastoral Systems in the Semi-Arid Areas of Niger."

Système d'Information des Marchés Agricoles du Bénin, (2003). "LA SECURITE ALIMENTAIRE AU BENIN : PRODUCTION DOMESTIQUE 2003 ET PERSPECTIVES ALIMENTAIRES POUR 2004 " SIMA-BENIN (Note de conjoncture N° 003): 16.

Brown, D. R. (2000). A Review of Bio-Economic Models.

CASTELLANET, C. (1992). L'irrigation villageoise. Paris.

Programme d'Appui aux Communes, (2006). MONOGRAPHIE DE LA COMMUNE DE NATITINGOU. M. D. DECENTRALISATION**:** 85.

Florence. JACQUET, M. B., (2004). MODELISATION DE L'EXPLOITATION. Montpellier.

Direction du Génie Rural et des Améliorations Foncières, (1989). Aménagement du bas-fonds de Tassayota (Boukombé). Porto-Novo, Ministère du Développement Rural et de l'Action Coopérative. **19**.

Ghali, M. A., (2007). Un modèle bioéconomique d'exploitation pour l'analyse de l'écoconditionalité et des mesures agrienvironnementales de lutte contre l'érosion (cas du Lauragais). Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes. Montpellier, Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier.

HOUNDENOU, C., (2005). Recueil des informations existantes sur les effets néfastes des Changements Climatiques en République du Bénin. Cotonou, Ministère de l'Environnement, de l'Habitat et de l'Urbanisme**:** 75.

KPADONOU, B., Rivaldo Alain, (2010). IMPACT DE LA CONTRAINTE DE CREDIT SUR LA PRODUCTION ET LE REVENU AGRICOLES : une analyse par la programmation stochastique discrète des exploitations agricoles de la basse vallée de l'Ouémé. Economie et Sociologie Rurales. Parakou, Université de Parakou. **3eme cycle:** 164 p.

Laere, P.-E. V. (2003). Mémento de l'irrigation. Manuels Techniques**:** 15.

Masters, W. A. and J. Vitale (1998). ADOPTION ET IMPACT DES NOUVELLES TECHNOLOGIES.

Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature (2007). PROGRAMME D'ACTION NATIONAL D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DU BENIN (PANA-BENIN). D. G. d. l'Environnement. Cotonou, Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature**:** 81.

Commune de Natitingou, (2004). PLAN DE DEVELOPPEMENT COMMUNAL. Mairie. Natitingou, COMMUNE DE NATITINGOU**:** 108.

Ministère du Développement Rural, (1995). Cultures vivrières, céréales, légumineuse à graines et tubercules. I. N. R. A. Benin. Cotonou, Institut National des Recherches Agricoles du Benin.

IX. ANNEXES

Annexe 1 : Cadre logique

Objectifs	Tâches	Démarche	Outils	Résultat
Décrire les systèmes agraires dans la commune de Natitingou et analyser l'impact de la variabilité climatique sur la production agricole	Rechercher des données sur les systèmes agraires dans la commune de Natitingou	-Interview des exploitants sur les modes de production agricole -Entretien avec les techniciens du CeRPA	Questionnaire d'enquête Guide d'entretien Moto (transport) Internet Centre de documentation du CeRPA Atacora/Donga	Les systèmes agraires dans la commune de Natitingou sont connus.
	Rechercher des données sur les rendements et le climat de la commune de Natitingou.	-Interview des exploitants sur les modes de production agricole -Entretien avec les techniciens du CeRPA et de l'INRAB -Recherche documentaire	- Questionnaire d'enquête -Archives ASECNA - Centre de documentation du CeRPA Atacora/Donga -Bibliothèque INRAB	La variabilité climatique et son éventuel impact sur la production agricole sont connus.
Identifier les différentes variables et les contraintes auxquelles est soumis la production agricole en vu de l'élaboration du modèle bioéconomique.	Comprendre la programmation linéaire, le modèle bioéconomique et la structure du logiciel GAMS	-Recherhe bibliographique -Recherche documentaire -Formation su GAMS	Livres Support de cours Logiciel GAMS	Le principe de la programmation linéaire, le modèle bioéconomique et le logiciel GAMS sont maîtrisés
	Identifier les différentes variables et contraintes de la production agricole	-Interview des exploitants sur les modes de production agricole -Entretien avec les techniciens du CeRPA -Recherche documentaire	Questionnaire d'enquête Guide d'entretien Centre de documentation du CeRPA Atacora/Donga Bibliothèque INRAB	Les variables et contraintes du système agricole sont connus

	Concevoir un modèle bioéconomique à l'échelle de l'exploitation	-Entrée des ensembles, des données, des variables et des contraintes sous forme d'équations dans le logiciel GAMS	-logiciel GAMS -Archives ASECNA -Supports de cours -Internet	Le modèle bioéconomique de l'exploitation est élaboré
Analyser l'impact de la levée de la contrainte hydrique sur le revenu agricole des exploitants.	Simuler des scénarii	-Scénario sans bassin -Scénario avec bassin	-logiciel GAMS	L'impact sur le revenu de l'exploitant est connu

Annexe n°2 : Fiche d'enquête réservée aux exploitants

Questionnaire individuel de l'exploitant

Nom de l'enquêteur……..

Date de l'enquête ____/____/_____/

N° Fiche…….

Commune ……..

Arrondissement……..

Village …….....

Quartier ……...……..

Structure du ménage

Caractéristiques		**Code**	**Réponse**
Nom de l'enquêté			
Sexe		1= Masculin 0= Féminin	
Situation matrimoniale		1= Marié 2= Non marié	
Niveau	Avez-vous reçu une éducation formelle ?	1=Oui 0=Non	
		Si oui, en quelle classe	

d'instruction		avez-vous abandonné ?	
	Etes-vous alphabétisé ?	1=Oui 0=Non	
Appartenance à un groupement?		1=Oui 0=Non	
Si oui, quel est votre Statut dans le groupement		1=Membre du bureau 2=Membre simple	
Quel est l'effectif de l'exploitation		Masculin	
		Féminin	
Combien de membres du ménage travaillent avec vous dans les champs ?		Masculin	
		Féminin	

Cultures et types de sols

Cultures	**Types de sol**	**Raison**
Maïs		
Mil		
Sorgho		
Coton		
Igname		
Oignon		
Piment		
Tomate		
Soja		
Riz		
Arachide		
Voandzou		

Types d'association de cultures rencontrées

Différentes associations	**Pourquoi ces associations ?**

Les différentes rotations de cultures pratiquées

Différentes rotations	Pourquoi ces rotations ?

Durée de jachère

Nombre d'années consécutives d'utilisation de la terre : ……

Nombre d'années consécutives de jachère (durée jachère) :……

Crédit et épargne au niveau des exploitations agricoles

Rubriques		Modalités		Réponse
Avez-vous des informations sur les opportunités d'obtention de crédit ?		1=Oui 0=Non		
Si oui, préciser le type de crédit pour lequel vous êtes informés ?				
Avez-vous réalisé au cours des 5 dernières années des emprunts auprès d'une institution formelle de microfinance ?		1=Oui 0=Non		
Si oui, préciser l'année et le mois d'obtention du dernier crédit (inscrire Janvier 2008, Mars 2009, Février 2008, etc.)		1ère fois	2è fois	3è fois
Caractéristiques des prêts obtenus au cours de la campagne agricole 2009-2010	Durée du prêt			
	Montant			
	Taux d'intérêt			
	Nombre d'échéance			
	1er remboursement			
	Dernier remboursement			
Avez-vous réalisé au cours des 5 dernières années des emprunts auprès des structures informelles de crédit ?		1=Oui 0=Non		
Si oui, préciser l'année et le mois d'obtention du dernier crédit (inscrire Janvier 2008, Janvier 2009, Février 2008, etc.)		1ère fois	2è fois	3è fois
Caractéristiques des prêts obtenus au cours de	Durée du prêt			
	Montant			
	Taux d'intérêt			

la campagne agricole 2008-2009	Nombre d'échéance			
	1er remboursement			
	Dernier remboursement			

3. Terre et superficies emblavées

3.1. Terres

- Nature du sol ……. (ferrugineux, bas-fonds ou ferralitique)

Parcelles	**Mode d'accès***	**Saison**					**Contre saison**				
		Superficie		Cultur Es**	Obj. X°	Production obtenue en unité locale	Superficie		Cultures	Obj. X°***	Production obtenue en unité locale
		En unité locale	En ha				En unité locale	En ha			
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											

*1=Héritage 2=achat 3=location 4=prêt 5= gage

- ** 1= coton 2= mais 3= sorgho 4= mil 5= niébé 6= igname 7= tomate 8= oignon

- *** **Objectif de production** : 1=Consommation exclusive 2= Vente exclusive

3=Consommation et vente

Revenu agricole

Cultures	**Part sur 100 de la production**	**Saison**		**Contre saison**	
		Quantité	**Valeur**	**Quantité**	**Valeur**
Coton	Dons en %				
	Autoconsommation en %				

	Vente	Vente à la récolte				
		Vente un mois après récolte				
		Vente 3 à 6 mois après la récolte				
Mais	Dons en %					
	Autoconsommation en %					
	Vente	Vente à la récolte				
		Vente un mois après récolte				
		Vente 3 à 6 mois après la récolte				
	Achat en soudure					
Sorgho	Dons en %					
	Autoconsommation en %					
	Vente	Vente à la récolte				
		Vente un mois après récolte				
		Vente 3 à 6 mois après la récolte				
	Achat en soudure					
Mil	Dons en %					
	Autoconsommation en %					
	Vente	Vente à la récolte				
		Vente un mois après récolte				
		Vente 3 à 6 mois après la récolte				
		Achat en soudure				

Niébé	Dons en %					
	Autoconsommation en %					
	Vente	Vente à la récolte				
		Vente un mois après récolte				
		Vente 3 à 6 mois après la récolte				
	Achat en soudure					
Igname	Dons en %					
	Autoconsommation en %					
	Vente	Vente à la récolte				
		Vente un mois après récolte				
		Vente 3 à 6 mois après la récolte				
	Achat en soudure					
Manioc	Dons en %					
	Autoconsommation en %					
	Vente	Vente à la récolte				
		Vente un mois après récolte				
		Vente 3 à 6 mois après la récolte				
Tomate	Dons en %					
	Autoconsommation en %					
	Vente	Vente à la récolte				
		Vente un mois après récolte				
		Vente 3 à 6 mois après la récolte				
Oignon	Dons en %					
	Autoconsommation en %					

	Vente	Vente à la récolte				
		Vente un mois après récolte				
		Vente 3 à 6 mois après la récolte				
Piment	Dons en %					
	Autoconsommation en %					
	Vente	Vente à la récolte				
		Vente un mois après récolte				
		Vente 3 à 6 mois après la récolte				

Temps et coût des travaux pour la production des différentes cultures

Coton

Opérations	**Main d'œuvre familiale**					**Main d'œuvre salariale**				
	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour
Fauchage /défrichement										
Labour										
Semis et resemis										
Traitements phytosanitaires										
1er sarclage										
2ème sarclage										
3ème sarclage										
Récolte et transport										

Mais

Opérations	**Main d'œuvre familiale**					**Main d'œuvre salariale**				
	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour
Fauchage /défrichement										
Labour										
Semis et resemis										
1er sarclage										

Epandage d'engrais										
2ème sarclage										
Récolte et transport										

Sorgho

Opérations	**Main d'œuvre familiale**					**Main d'œuvre salariale**				
	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour
Fauchage /défrichement										
Labour										
Semis et resemis										
1er sarclage										
2ème sarclage										
Récolte et transport										

Mil

Opérations	**Main d'œuvre familiale**					**Main d'œuvre salariale**				
	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour
Fauchage /défrichement										
Labour										
Semis et resemis										
1er sarclage										
2ème sarclage										
Récolte et transport										

Niébé

Opérations	**Main d'œuvre familiale**					**Main d'œuvre salariale**				
	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour
Fauchage /défrichement										
Labour										

Semis et resemis										
1er traitement										
2ème traitement										
1er sarclage										
2ème sarclage										
Chasse aviaire										
Récolte et transport										

Igname

Opérations	**Main d'œuvre familiale**					**Main d'œuvre salariale**				
	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour
Fauchage /défrichement										
Labour										
Piochage										
Plantation										
Traitements phytosanitaires										
1er sarclage										
2ème sarclage										
3ème sarclage										
Récolte et transport										

Tomate

Opérations	**Main d'œuvre familiale**					**Main d'œuvre salariale**				
	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour
Fauchage /défrichement										
Labour										
Piochage										
Pépinière										
Repiquage										
Traitements phytosanitaires										
1er sarclage										
2ème sarclage										
3ème sarclage										
4ème sarclage										
Coupe de tuteurs										
Redressement										
Récolte et transport										

Oignon

Opérations	**Main d'œuvre familiale**					**Main d'œuvre salariale**				
	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour
Fauchage /défrichement										
Labour										
Semis et resemis										
Traitements phytosanitaires										
1er sarclage										
2ème sarclage										
Récolte et transport										

Piment

Opérations	**Main d'œuvre familiale**					**Main d'œuvre salariale**				
	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour	H	**F**	**E**	Nbre de jours	Nbre heures /jour
Fauchage /défrichement										
piochage										
Labour										
Semis et resemis										
Traitements phytosanitaires										
1er sarclage										
2ème sarclage										
3ème sarclage										
4ème sarclage										
Récolte et transport										

5. Utilisation des engrais, pesticides et semences

Quelle quantité d'intrants avez vous utilisé au cours de la dernière campagne

Intrants		**Saison**		**Contre saison**	
		Quantité totale	**Montant total**	**Quantité totale**	**Montant total**
Raticides	Coton				
	Maïs				
	Sorgho				
	Mil				
	Niébé				
	Igname				

	Tomate				
	Oignon				
Herbicides	Coton				
	Maïs				
	Sorgho				
	Mil				
	Niébé				
	Igname Tomate				
	Oignon				
Insecticides	Coton				
	Maïs				
	Sorgho				
	Mil				
	Niébé				
	Igname Tomate				
	Oignon				
Engrais minéraux	Coton				
	Maïs				
	Sorgho				
	Mil				
	Niébé				
	Igname Tomate				
	Oignon				
Engrais organique	Coton				
	Maïs				
	Sorgho				
	Mil				
	Niébé				
	Igname Tomate				
	Oignon				

7. Charges d'équipements

N°	Outils	Nombre	Prix unitaire	Durée de vie	Mode d'acquisition*	Coût si location
Daba						
Houe						

Coupe-coupe						
Pulvérisateurs						
Motopompe						
Emballages (sacs)						
Autres						

*1= achat ; 2= héritage ; 3= don ; 4= location ; 5= autre (préciser)

8.Rendements des cultures

Cultures	**Coton**	**Mais**	**Sorgho**	**Mil**	**Niébé**	**Igname**	**Manioc**	**Tomate**	**Oignon**
Saison									
C-saison									

Annexe3 : guide d'entretien avec les exploitants

Que pensez-vous des changements climatiques ? Subissez Ŕvous déjà leurs effets ?

……..……
……..……
……...……
……...……
……...

Comment ces changements se manifestent au niveau de la production ?

……...……
……...……
……...……
……...

Quelles stratégies endogènes adoptez-vous ?

……
……
……
……
……

Quelles stratégies modernes auriez-vous préférer adopter pour sécuriser votre production aux effets de ces changements ?

……
……
……
……
……

E n année de très mauvaise récolte lié à ces phénomènes, que ferez-vous ?

……
……
……
……
……

Etes-vous prêts à vous couvrir de ce risque en souscrivant à une assurance ?

……
……

Si oui, combien pourrez-vous cotiser par an ?

.....
.....
.....

Annexe n°4 : Guide d'entretien avec les agents du CeRPA

Quels sont les catégories d'exploitation rencontrées et leurs caractéristiques ?

Classe	**Taille**	**Technologies**	**Autres**

Quels sont les calendriers culturaux de la commune ?

Opérations Culturales / Cultures	**Labour**	**Semi /Plantation**	**Sarclage /Désherbage**	**Récolte**	**Battage /Vannage**
Maïs					
Sorhgo					
Mil					
Niébé					
Igname					
Tomate					

Arachide					
Riz					

Quelles sont les types de terres agricoles rencontrés dans la commune et leurs propriétés ?

N°	Types de sol

Les paysans font-ils appel à la main-d'oeuvre salariée ? ……

Si oui, quels sont les coûts en fonction des activités ?

Activités	Prix/ha

Quelles sont les pratiques de conservation des sols et de l'eau rencontrées ?

……
……
……
……
……

Quelles sont les moyens de productions qui existent dans la commune ?

.....
.....
.....
.....

Quels sont les rendements agricoles obtenus ces 30 dernières années ?

……..

Comment varient ces rendements en fonction du type de sol et en fonction de la pluie ?

……..……
……..……
……..……
……..

Quels sont les prix moyens des produits agricoles dans la commune ces 5 dernières années ?

Produits agricoles	**Prix (CFA)**

Que pensez-vous des changements climatiques ? La commune subit-elle déjà leurs effets ?

……..……
……..……
……...……
……...……
……...

Comment ces changements se manifestent dans la commune ?

……...……
……...……
……...……
……...

Quelles stratégies endogènes observées dans la commune ?

……
……
……
……
……

Quelles mesures prenez-vous pour accompagner les paysans ?

……
……
……
……

Annexe 5: Rendements de quelques campagnes agricoles dans la commune de Natitingou