

MODELISATION BIOECONOMIQUE DU BASSIN VERSANT DU BANI

MÉMOIRE POUR L'OBTEINTION DU MASTER SPECIALISE EN GESTION INTEGREE DES RESSOURCES EN EAU (GIRE)

Présenté et soutenu publiquement le 23 Septembre 2011

par

Donissongou Dimitri SORO

Travaux dirigés par : Dr Bruno BARBIER Enseignant- Chercheur CIRAD/2iE
UTER GVEA

Jury d'évaluation du stage :

Président : Harouna KARAMBIRI

Membres et correcteurs : Bruno BARBIER

Sévère FOSSI

Promotion [2010/2011]

DEDICACE

A mon père et à ma mère,
A mon oncle Feu TUO Magnigui
Et à ma tante SILUE Anne-Sergine.

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je voudrais de manière sincère exprimer toute ma reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de quelque manière que ce soit.

Tout d'abord, je tiens à dire merci au Dr Bruno BARBIER, Enseignant-Chercheur au CIRAD en poste à 2iE. Il a bien voulu accepter l'encadrement de ce mémoire. Il a toujours été disponible quand j'ai eu besoin de lui.

Je remercie M. Jean Emmanuel PATUREL, chercheur à l'IRD ; M. Alain DEZETTER, chercheur à l'IRD et à M. Samuel LOUVET pour les données qu'ils m'ont fourni.

Je dis merci aussi M. Sévère FOSSI, Ingénieur de Recherche à 2iE pour sa disponibilité, ses conseils et ses critiques.

Mes remerciements s'adressent également à tous les enseignants-chercheurs du CURAT et de l'UFR STRM pour leur grande disponibilité et leurs conseils, en particulier le Pr KOUAME Fernand et les Docteurs SALEY Bachir, OUATTARA Adama, N'DA Dibi Hyppolite, DJAGOUA Eric, AKE Gabriel Etienne et ADJA Miessan.

J'exprime ma profonde gratitude à la Société de Marie de Côte d'Ivoire particulièrement à mon grand-frère Père Georges GBEZE pour son soutien moral et spirituel.

Je suis reconnaissant à M. ADJOUMANI Kouakou, Ingénieur des Travaux Publiques au Ministère de la Construction de Côte d'Ivoire pour m'avoir adopté comme son enfant.

Je remercie fraternellement tous les étudiants de la promotion GIRE 11 en particulier Messieurs KPADONOU Rivaldo, TOURE Ismaël, FOPAH Armand et ZADE Pacôme. Je n'oublie pas de citer M. DOULKOM Adama que j'appelle affectueusement doyen.

Je dis merci à tous ces amis qui sont devenus aujourd'hui par la force du destin des frères pour moi. Ce sont: ANET Jacques, LOGBA Francis, KOFFI Jean-Michel, KOUADIO Guy Levis, KOUADIO Meyssou, N'GUESSAN Patrick, TOURE Arsène et YAO Rodrigue.

Je voudrais témoigner mes sentiments les plus affectueux à N'GUESSAN Affoué Geneviève pour son soutien moral, sa patience et son affection.

Je n'oublie pas de dire merci à toute la communauté ivoirienne de 2iE particulièrement à SANGARE Drissa, KPAI Natty, DOPE Cyrille et TAGRO Patricia.

Par crainte d'avoir oublié quelqu'un, que tous ceux et celles dont je suis redevable se voient ici vivement remerciés. Je vous témoigne ma profonde reconnaissance.

RESUME

Le bassin versant du Bani à l'instar des autres bassins transfrontaliers d'Afrique de l'Ouest est une terre de fragilité environnementale et d'instabilité climatique. Pour tenter de comprendre et d'apporter des solutions à cet état de fait, cette étude a été initiée. Elle a pour objectif principal de concevoir un modèle hydro-économique pour une prospective sur la gestion du bassin. Précisément, il s'agit d'étudier l'assolement des terres suivant l'évolution de la population et son impact sur le ruissèlement dans le bassin. Pour atteindre les objectifs de l'étude, la programmation mathématique à l'aide du logiciel GAMS a été utilisée. Afin de mieux conduire l'étude, le bassin versant du Bani a été scindé en 12 sous-bassins. Les simulations nous ont faits observer que le revenu augmente avec la population à l'échelle du bassin. De 186 milliards en 2011, il passera à 338 milliards en 2035 lorsque la population va doubler et lorsqu'elle triplera en 2050, il sera de 424 milliards. Cependant lorsqu'on rapporte ce revenu global par personne, il baisse. Actuellement, il est 44 930 FCFA. En 2035, il sera de 40 885 FCFA et lorsque la population va tripler, il sera de 34 146 FCFA. Aussi, on constate que lorsque la population augmente la superficie des cultures augmente au dépend de celle de la jachère. Cette augmentation de la surface des cultures augmente le ruissellement dans le bassin versant. On observe une saturation des terres au niveau des sous-bassins Talo et Korodougou d'où la valeur que prennent les terres marginales telles que les lithosols (plus de 70 000 FCFA par hectare) et le faible coût de la main d'œuvre. Cependant, dans les sous-bassins sud (Djibrila, Bougouni et Kouto) la main d'œuvre est une ressource limitante au développement agricole (2 500 FCFA/homme/jour).

Mots Clés :

- 1 - Modélisation bioéconomique
- 2 – Variabilité climatique
- 3 - Croissance démographique
- 4 – Revenu agricole
- 5 – Valeur marginale

ABSTRACT

The Bani watershed, like other transboundaries basins from West Africa, is a land of fragile environmental and climatic instability. This study has been initiated in order to understand and provide solutions to this problem. Its main objective is to develop a model of water resources for a prospective management of basins. Specifically, it is to study the rotation of the land following the evolution of the population and its impact of runoff in the basin. To achieve the objectives of the study, modeling was done using the GAMS software. To better conduct the study, the Bani watershed was divided into 12 sub-basins. From simulations, we observed that income increases with the population across the basin. From 186 billion in 2011, it will increase to 338 billion in 2035 when the population will double and 424 billion when population will triple in 2050. But when reporting, the total income per person is declining. Presently, it is 44 930 FCFA. In 2035, it will be 40 885 FCFA and 34 146 FCFA when the population will triple. Also, we see that when the population increases, the cultivated surface area increases, depending on the area of fallow. This increase in crop area increased runoff on the watershed. There is a saturation of land at the sub-basins Korodougou and Talo, hence the marginal value taken by lands such as lithosols (over 70 000 FCFA per hectare) and the low cost of labor. However, in the southern sub-basins (Djibrila, and Bougouni Kouto) labor is a limiting resource for agricultural development (2500 FCFA / person / day).

Key words :

- 1 - Bioeconomic modeling
- 2 - climate variability
- 3 - population growth
- 4 - farm Income
- 5 – marginal value

LISTE DES ABREVIATIONS

AEP	: Adduction en Eau Potable
CIRAD	: Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
FCFA	: Franc de la Communauté Financière Africaine
CURAT	: Centre Universitaire de Recherche et d'Application en Télédétection
GAMS	: General Algebraic Modeling System
GIRE	: Gestion Intégrée des Ressources en Eau
IRD	: Institut de Recherche pour le Développement
PL	: Programmation Linéaire
PNL	: Programmation Non Linéaire
UBT	: Unité de Bétail Tropical
UFR STRM	: Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des Ressources Minières de l'Université de Cocody à Abidjan

SOMMAIRE

DEDICACE	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
INTRODUCTION	1
I. GENERALITES SUR LA ZONE D’ETUDE	4
1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DU BANI	4
1.2. HYDROGRAPHIE ET MORPHOLOGIE	4
1.3. CLIMAT ET VEGETATION	5
1.4. HYDROGEOLOGIE	6
1.5. POPULATION ET ACTIVITE SOCIO ECONOMIQUE	6
II. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	7
2.1. MODELISATION BIOECONOMIQUE ET AGRICULTURE	7
2.2. PROGRAMMATION MATHEMATIQUE	8
III. MATERIEL ET METHODE	10
3.1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET RECHERCHE DES DONNEES	10
3.2. MISE EN PLACE DU MODELE DU BANI	12
3.3. CALAGE ET VALIDATION	16
3.4. SIMULATIONS	17
IV. RESULTATS	18
4.1 ALLOCATION DES TERRES	18
4.1.1. Allocation optimale des terres à P1	18
4.1.2. Allocations de terre par sous bassin	18
4.2. REVENU FINANCIER SUR LE BASSIN	22
4.3. ANALYSE DES VALEURS MARGINALES DE LA TERRE ET DU TRAVAIL	23
4.3.1. La terre	23
4.3.2. Le travail	26
4.4. ANALYSE DU RUISSELLEMENT	27
V. DISCUSSION	29
5.1 ALLOCATION DES TERRES	29
5.2. REVENU DES POPULATIONS	29
5.3. VALEURS MARGINALES	30
5.4. RUISSELLEMENT	30
CONCLUSION	31
RECOMMANDATIONS	32
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	33

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Ensemble des cultures	13
Tableau 2: Ensemble des sols.....	13

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Situation géographique du bassin versant du Bani	4
Figure 2 : Réseau hydrographique du Bani	5
Figure 3: Démarche méthodologique	10
Figure 4 : Différents sous-bassins du Bani.....	11
Figure 5 : Allocation des terres de b1 à b6 à P1	18
Figure 6 : Distribution des terres dans b1	19
Figure 7 : Distribution des terres dans b2	19
Figure 8 : Distribution des terres dans b3	20
Figure 9 : Distribution des terres dans b4	20
Figure 10 : Distribution des terres dans b5	21
Figure 11 : Distribution des terres dans b6	21
Figure 12 : Revenus à P1, P2 et P3	22
Figure 13 : Revenus par personne à P1, P2 et P3.....	23
Figure 14 : Valeurs marginales des bas-fonds par sous-bassin.....	24
Figure 15 : Valeurs marginales des sols bruns par sous-bassin	24
Figure 16 : Valeurs marginales des sols ferrugineux par sous-bassin.....	25
Figure 17 : Valeurs marginales des bas-fonds par sous-bassin.....	25
Figure 18 : Valeurs marginales des bas-fonds par sous-bassin.....	26
Figure 19: Valeurs marginales du travail à P1, P2 et P3.....	26
Figure 20 : Ruissèlement par bassin et par type d'année à P1, P2 et P3.....	27

INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années, un intérêt soutenu se manifeste pour l'étude du climat et de sa variabilité. Le réchauffement climatique est désormais reconnu par la communauté scientifique et les institutions internationales. De même, il a été affirmé que les conséquences de ce réchauffement sur de nombreuses zones du globe allaient être importantes, mais réparties inégalement. Ainsi, l'Afrique risque d'être durement touchée (Adja, 2009) et plus particulièrement l'espace soudano-sahélien dont les populations sont majoritairement rurales et vivent de l'agro-pastoralisme. De ce fait, l'agriculture de cette zone fait face à plusieurs défis. Elle doit produire plus et mieux pour répondre à la croissance des besoins alimentaires; assurer des revenus et donc des emplois à la population rurale afin de réduire les flux migratoires et de lutter contre les inégalités. Afin de relever ces défis, les agriculteurs doivent trouver des pratiques pour s'adapter à ce climat de plus en plus variable.

Des études indiquent qu'à l'horizon 2050, la superficie des terres sujettes à un stress hydrique vont croître et devrait être plus du double de celles des terres soumises à un stress hydrique décroissant. De même, la demande en eau va augmenter au cours des décennies à venir, essentiellement en raison de la croissance de la population et l'augmentation de l'afflux, du fait entre autres de la demande en eau d'irrigation (Bates et *al*, 2008). Les régions dans lesquelles l'agriculture est actuellement marginale, en grande partie à cause de sols pauvres combinés à une pénurie d'eau et à une pauvreté rurale, pourraient être de plus en plus vulnérables aux incidences du changement climatique sur l'eau. De ce fait, même des changements climatiques minimes augmenteront le nombre de personnes susceptibles de souffrir de la faim (Makaya, 2010). Il convient alors d'avoir une maîtrise de la ressource eau.

Une meilleure gouvernance de l'eau permettrait de réduire l'incidence du risque climatique et de la croissance démographique sur la production agricole. Elle est indispensable pour assurer la vie des agriculteurs et le progrès de nos sociétés, dans le respect de l'environnement. Ces défis ne peuvent plus désormais s'aborder de façon sectorielle ou localisée, ni séparément. Les solutions passent par une approche globale et concertée, organisée à l'échelle pertinente des bassins versants des fleuves, lacs et aquifères, qu'ils soient locaux, nationaux ou transfrontaliers, et en cohérence avec les schémas d'aménagement et de gestion des territoires correspondants.

L'importance et l'intérêt ainsi manifestés pour l'eau se traduisent de plus en plus en terme de gestion intégrée et rationnelle de cette ressource (GIRE) en tant qu'un des socles du développement durable (BAD et FAD, 1987). Une approche de Gestion Intégrée des

Ressources en Eau encourage le développement et la gestion coordonnés de l'eau, des terres et des ressources connexes, en vue de maximiser, de manière équitable, le bien-être économique et social qui en résultent, sans pour autant compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux (Konaré, 2009). Elle s'appuie sur une panoplie d'outils économiques, techniques, institutionnels, et sur une mobilisation des acteurs, à s'adapter à chaque situation locale des bassins.

CONTEXTE

Ce document constitue le mémoire de fin d'études de la formation de Master Spécialisé en Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE). Il s'inscrit dans la continuité d'un projet du programme de recherche RESSAC (vulnérabilité des Ressources en Eau Superficielle au Sahel aux évolutions Anthropiques et Climatiques à moyen terme) financé par l'Agence Nationale de la Recherche. La zone d'étude du projet est le bassin versant du Bani.

Le bassin versant du Bani à l'instar des autres bassins transfrontaliers d'Afrique de l'Ouest est une terre de fragilité environnementale et d'instabilité climatique. Cette instabilité est marquée par une importante variabilité spatiale et temporelle des paramètres hydrologiques et climatiques, en particulier la pluviométrie. La variable pluie est un facteur de plus en plus limitant à tout point de vue (populations, écosystèmes, ...). Cette situation rend la gestion des ressources en eau difficile, ce qui est un problème majeur de développement pour les populations car la maîtrise de l'eau conditionne le développement du monde rural. Non seulement elle est source de vie et doit permettre l'autosuffisance alimentaire, mais aussi elle génère l'intégralité des activités du monde rural : cultures, élevage et pâturages, pêche, etc.

Pour tenter de comprendre et d'apporter des solutions à cet état de fait, le présent mémoire se consacre à la *Modélisation bioéconomique du bassin versant du Bani*. A travers ce thème, il s'agira de concevoir un modèle hydro-économique pour une gestion prospective du bassin. L'objectif principal ainsi défini doit conduire à une meilleure orientation des agriculteurs par rapport aux ressources en eau disponible, afin qu'ils soient moins vulnérables au climat et à l'augmentation de la population. Cet objectif majeur se décompose en différents objectifs spécifiques qui dans leur agencement constituent l'ossature du travail. Il s'agit de :

- Etudier l'assolement suivant l'évolution de la population;
- Etudier l'impact de l'augmentation de la population sur le ruissèlement dans le bassin.

Le travail s'articule en trois grandes parties :

- dans la première partie des généralités, le développement fait ressortir les conditions physiques naturelles de la région en marquant les aptitudes réelles ou les potentialités qui la caractérisent. Il en est de même des difficultés naturelles qu'impriment ces conditions aux populations dans leur aspiration au développement. S'agissant de cette population, l'intérêt est porté sur sa taille, sa densité et ses activités socio-économiques;
- la seconde partie traite de la démarche méthodologique. Elle fait la synthèse de toutes les données synthétiques et de terrains nécessaires à l'étude de même que les logiciels utilisés et rend compte de la démarche méthodologique ;
- la dernière partie fait la synthèse de tous les résultats obtenus. Ils sont interprétés et discutés.

Une conclusion générale et des recommandations achèvent ce travail.

I. GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

1.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE DU BASSIN VERSANT DU BANI

Le bassin versant du Bani, est un bassin transfrontalier et un sous-bassin du haut Niger ayant son exutoire à Sofara dans la région de Mopti au Mali. Il se situe globalement entre 3° et 9° Longitudes Ouest et entre 9° et 15° Latitudes Nord (Figure 1). Il couvre une superficie d'environ 130.000 km² répartie entre le Mali (79,2%), la Côte d'Ivoire (15,6%), le Burkina Faso (5%) et la Guinée Conakry (0,2%) (Konaré, 2009).

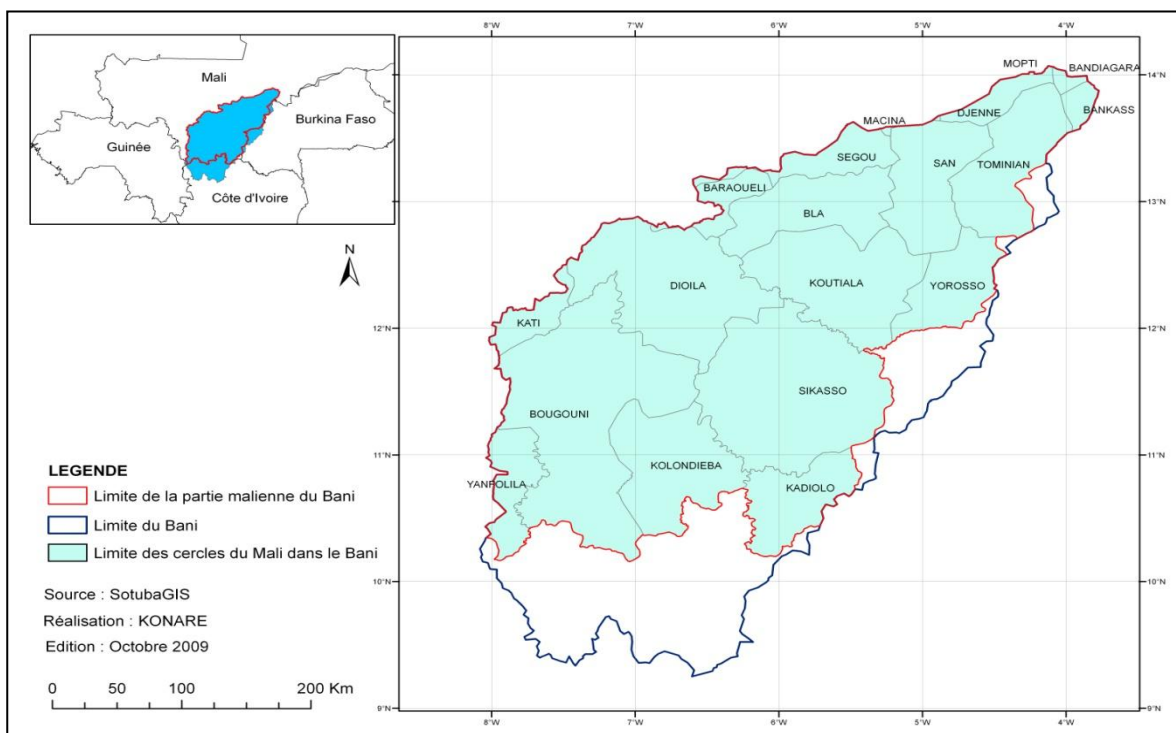


Figure 1 : Situation géographique du bassin versant du Bani

1.2. HYDROGRAPHIE ET MORPHOLOGIE

Le Bani est formé par les rivières Baoulé et Bagoé qui prennent naissance en Côte d'Ivoire. Il reçoit ensuite son principal affluent, le Banifing de Kouoro en rive droite avant d'arriver à la station de Douna et d'entrer dans le delta intérieur. Dans le delta, le Bani reçoit le Banifing de San puis le Yamé de Bandiagara et arrive à Mopti où il se jette dans le fleuve Niger. (Voir carte Figure 2) (Siou, 2008).

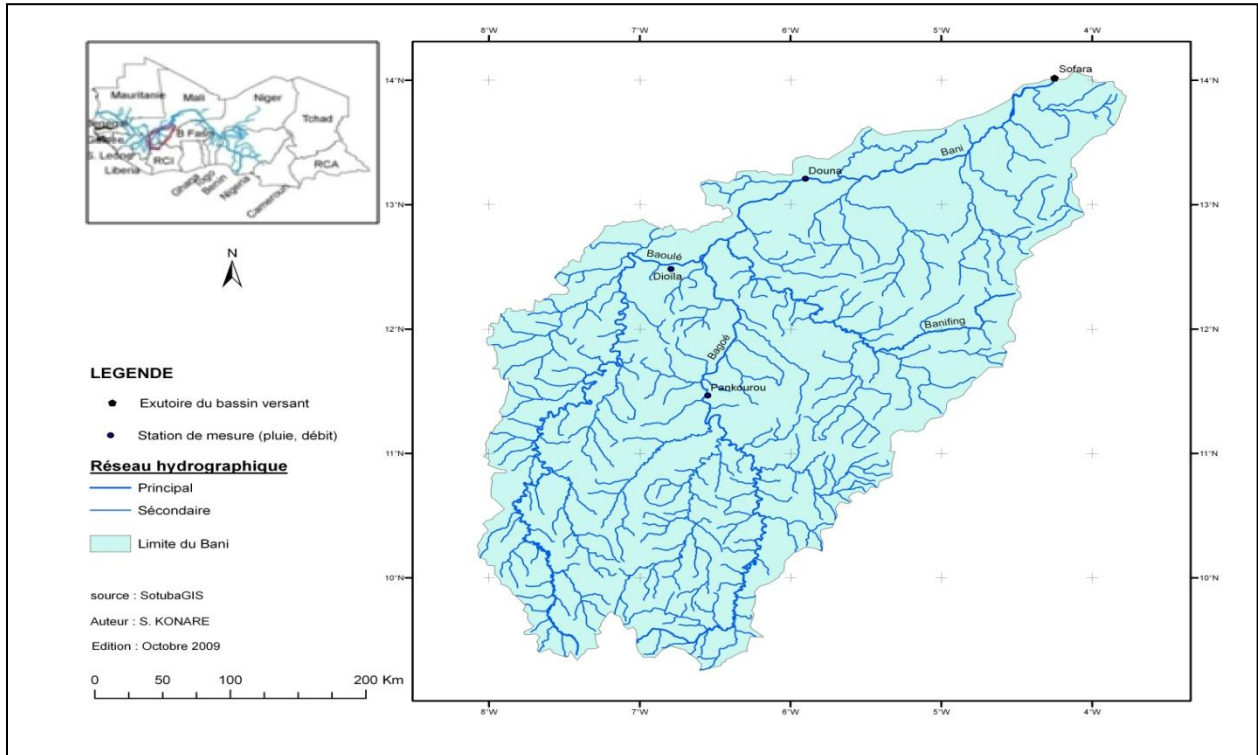


Figure 2 : Réseau hydrographique du Bani

Il s'agit d'un bassin peu accidenté : Le Baoulé et la Bagoé prennent leur source dans une série de collines qui séparent le Mali et la Côte d'Ivoire (Brunet-Moret et *al.*, 1986 Cité par Jennaud, 2007). La Bagoé prend sa source à 600m d'altitude et descend très rapidement à 350m. Le Baoulé prend sa source à 450m d'altitude. Ensuite, les deux cours d'eau s'écoulent sur les plateaux à faible pente du sud du Mali dont l'altitude varie entre 280 et 400m. Le Bani arrive ensuite dans la cuvette qui constitue le delta intérieur de Niger. Le seul relief important de cette zone est le plateau de Bandiagara (790m) au Nord-Est du bassin.

1.3. CLIMAT ET VEGETATION

Le climat du bassin versant du Bani est de type tropical, avec une saison sèche dominée par l'Harmattan (vent chaud et sec provenant du Sahara) et une saison humide dominée par la Mousson qui amène de l'air humide et instable, engendrant des précipitations (Siaou, 2008). Des études ont montré une tendance générale à la baisse de celles-ci sur le bassin (Roudier, 2008).

La pluviométrie diminue du Sud au Nord du Mali, si bien que le bassin du Bani se trouve partagé entre 4 zones climatiques :

- la zone soudano-guinéenne au Sud du bassin avec des valeurs annuelles de pluie supérieures à 1200mm. La saison des pluies y dure au moins 6 mois (mars-avril jusqu'à octobre-novembre). Les cultures traditionnelles sont le riz, le fonio et le maïs. On y trouve « une forêt tropophile très sensible aux feux de brousse ». (Autorité du bassin Niger, 2002)
- la zone soudanienne, caractérisée par une saison sèche plus courte (5 à 6 mois entre Novembre et Avril) et surtout des précipitations annuelles comprises entre 1000 et 1200 mm.
- La zone soudano sahélienne, qui correspond à la zone située entre les isohyètes 1000 mm et 750 mm. C'est une zone de transition entre deux climats qui est susceptible d'être très sensible aux aménagements du territoire qui peuvent devenir des facteurs favorisant une dégradation durable des sols dans cette zone.
- La zone sahélienne, correspondant aux régions recevant moins de 750 mm/an.

Les formations végétales varient surtout en fonction du gradient pluviométrique et des conditions édaphiques. La couverture végétale du bassin est constituée de formations de type forêt claire, savane arborée, arbustive ou herbeuse, mais on y rencontre de plus en plus de surfaces dégradées et dénudées (Konaré, 2009).

1.4. HYDROGEOLOGIE

Sur le plan hydrogéologique, les eaux souterraines sont liées à deux types de formations aquifères :

- une nappe aquifère « croûteuse », dans les latérites, les alluvions et la zone altérée en place;
- une nappe aquifère localisée dans les formations gréseuses et cristallines alimentée par des fracturations avec des débits spécifiques, dans les grès, variant de 0,1 à plus de 1m³/h.

L'alimentation des nappes souterraines est le fait des infiltrations directes de la lame pluviométrique non ruisselée et non évapotranspirée par la végétation et aux écoulements souterrains des eaux de surface des cours d'eau.

1.5. POPULATION ET ACTIVITE SOCIO ECONOMIQUE

En 1998, la population de la partie malienne du bassin du Bani était estimée à environ 2,8 millions (RGPH, 1998 ; *Cité par* Konaré, 2009). Avec un taux d'accroissement moyen de la population de 3% cette population serait passée à 4,14 millions d'habitants en 2011, soit une densité d'environ 39 habitants au kilomètre carré.

Cette population, essentiellement rurale, s'active principalement autour de l'agriculture. Destinée généralement à l'autoconsommation, les cultures vivrières sont essentiellement le mil, le maïs, le sorgho, le niébé et le riz. Le coton est la principale culture de rente. Les autres cultures de rentes sont des cultures maraîchères de contre saison (tomates, oignons, aubergines, pomme de terre, etc.) pratiquées dans les bas-fonds. D'autres activités existent à coté de cette agriculture telle l'élevage extensif et le commerce (Konaré, 2009).

II. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

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 ; *Cité par Mondja, 2011*). Cette idée n'avait pas pour but d'analyser les impacts des politiques en économie agricole, mais plutôt de trouver la solution optimale à un problème de gestion de ressources naturelles (Flichman et Jacquet, 2003 *Cité par Mondja, 2011*). Il s'agissait donc de déterminer dans une dynamique économique, le taux optimal de prélèvement ou d'exploitation d'une ressource et ainsi contribuer à la formulation des politiques à mener. Ainsi, plusieurs études ont menées dans ce sens. Nous pouvons citer entre autres, la thèse de Ghali (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 l'étude de Abbès et *al.* (2005) sur l'impact des formules tarifaires binômes sur le système irrigué de la basse vallée de la Medjerda (Tunisie).

2.1. MODELISATION BIOECONOMIQUE ET AGRICULTURE

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 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 (Ghali, 2007).

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. (Boisson, 1984). L'application de cette approche peut être située à différentes échelles, allant du niveau de la ferme jusqu'au niveau continental, passant par le niveau de la région, le secteur, le pays. (Ghali, 2007).

La modélisation bioéconomique en agriculture fait souvent appelle à la programmation mathématique.

2.2. PROGRAMMATION MATHEMATIQUE

La programmation mathématique est une technique de résolution des problèmes d'optimisation sous contrainte. Il s'agit des problèmes où un décideur souhaite optimiser une certaine mesure de la satisfaction, en choisissant un ensemble d'activités sous certaines conditions externes (Ghali, 2007). Elle regroupe la programmation mathématique non linéaire (PNL) et la programmation mathématique linéaire (PL). Cette dernière est un instrument particulièrement bien adapté aux problèmes qui se posent dans l'activité agricole (Kpadonou, 2009). Cet outil mathématique permet la résolution de problèmes dans lesquels une fonction d'utilité doit être optimisée (maximisée ou minimisée) sous un certain nombre de contraintes. En pratique, ceci correspond à la recherche d'une combinaison optimale d'activités pour un ensemble de conditions technico-économiques données (Jeannaud, 2007).

Les premières applications de la programmation linéaire (PL) à la gestion des exploitations agricoles se basent sur des hypothèses relativement simples. Elles supposent un comportement qui maximise le profit chez le décideur.

Pour formuler le modèle d'exploitation, il est nécessaire de spécifier:

- L'ensemble des activités, leurs unités de mesure et leurs besoins en ressources,
- Les contraintes de ressources fixes de l'exploitation,
- Le rendement de chaque activité,
- L'objectif du programme linéaire.

Il existe plusieurs exécutable permettant de faire la programmation mathématique. Parmi ceux-ci, il y a GAMS (Général Algebraic Modeling System). L'écriture sur GAMS se fait par l'intermédiaire d'un fichier d'entrée sur lequel on écrit le modèle à résoudre en code ASCII dans un éditeur de texte avec l'extension « .GMS » (Marico, 2010).

Lorsque le fichier est exécuté par GAMS, celui-ci transcrit automatiquement les résultats de la simulation dans un fichier de sortie portant le même nom que le fichier d'entrée mais avec l'extension « .LST ». Un programme GAMS est composé de six sections :

- Sets (ensemble)
- Données (PARAMETERS, TABLES, SCALAIRES)
- Variables
- Equations
- Enoncés MODEL et SOLVE
- Enoncé DISPLAY (Optionnel)

La seule règle régissant l'ordre des éléments est qu'on ne peut faire référence à un élément avant de l'avoir déclaré.

III. MATERIEL ET METHODE

Le schéma ci-dessous (Figure 3) présente la démarche adoptée dans cette étude.

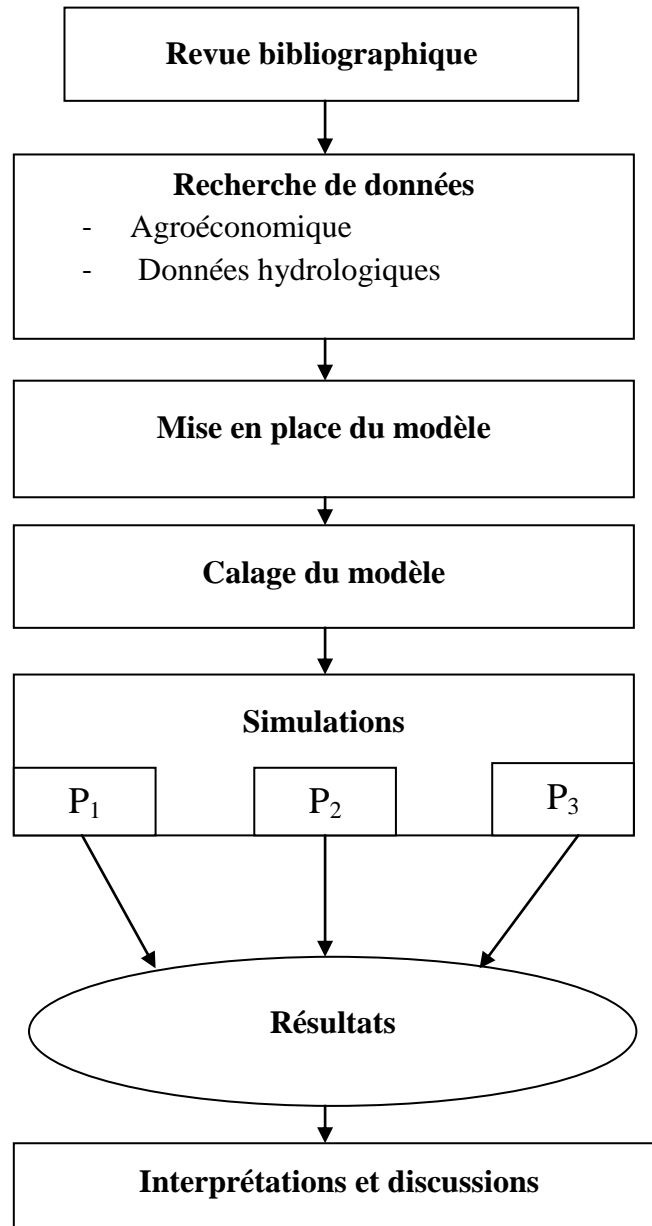


Figure 3: Démarche méthodologique

3.1. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE ET RECHERCHE DES DONNEES

Cette phase a permis de collecter des documents sur la thématique au niveau des bibliothèques et sur internet. Cela nous a aidé à connaître et comprendre davantage la portée du sujet. Ainsi, les notions d'exploitation agricole et de modélisation bioéconomique ont pu être cernées.

Nous avons recensé ensuite les données qui s'avèrent nécessaire pour l'élaboration de notre modèle. C'est alors que *des données agroéconomiques* telles que les différentes cultures pratiquées sur le bassin, les rendements des cultures, les différents types de sols, les superficies cultivables, les besoins en eau des cultures, etc. Toutes ces données ont été acquises auprès des personnes impliquées dans le projet. Nous avons aussi acquis *des données climatiques* comme la pluie et les débits de plusieurs stations pluviométriques et hydrométriques qui se trouvent dans le bassin.

Nous avons eu aussi besoin de d'autres données telles que les capacités de stockage des différents réservoirs présent sur le bassin, les quantités d'eau prélevées pour l'agriculture, l'élevage, l'industrie et l'AEP (Adduction en Eau Potable des populations).

Il est important de rappeler que cette étude a été menée suivant le découpage fait du bassin du Bani en 12 sous-bassins dans le projet (Koffi, 2010 ; Marico, 2010). Ce sont les stations hydrométriques qui ont servi de critères principaux dans cette discrétisation (Figure 4).

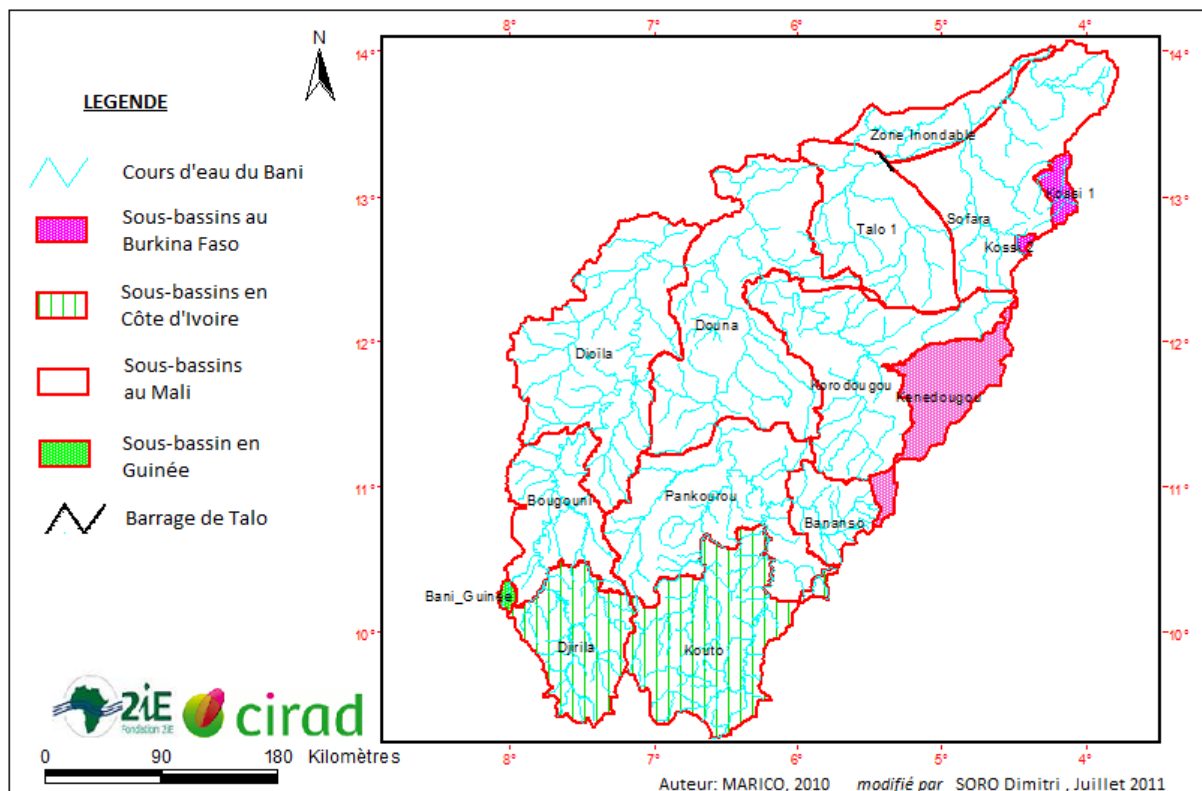


Figure 4 : Différents sous-bassins du Bani

Pour des raisons de commodité, nous avons renommé les sous-bassins. Ainsi, on a ce qui suit : Djirila = b1, Bougouni = b2, Dioïla = b3, Douna = b4, Talo1 = b5, Zone inondable = b6, Kouto = b7, Pankourou = b8, Bananso = b9, Kéné Dougou = b10, Korodougou = b11, Sofara = b12.

3.2. MISE EN PLACE DU MODELE DU BANI

Le modèle a été conçu en respectant la structure du logiciel GAMS expliquée dans la synthèse bibliographique.

a) *La fonction objectif à maximiser*

Il s'agit du revenu du bassin (RE), décrite par la formule suivante:

$$RE = \sum_b \sum_s \sum_r \sum_c mb(h, s, r, c) * X(b, s, r, c) - \sum_p SAL(b, p) * salj(p) - CRED(b) * ti \quad (1)$$

Avec, mb : marge brute

X : surface cultivée

SAL : jour de travail salarié

Salj : salaire journalier

CRED : crédit agricole

ti : taux d'intérêt

h : région climatique

s : type de sols

r : type d'années

c : type de cultures

la marge brute

$$mb(h, s, r, c) = prx(c) * rdmt(h, s, r, c) - bc(c) \quad (2)$$

Avec, prx: prix en FCFA/kg

rdmt : rendement des cultures

bc : besoin capital par hectare

b) *Les activités*

Les activités du modèle sont les cultures comptées en hectares. Nous avons porté notre choix sur certaines cultures car elles sont les plus importantes sur le bassin du Bani. Cependant, beaucoup d'autres cultures sont pratiquées, mais elles ne sont pas autant répandues que celles indiquées dans le tableau 1 à la page suivante. L'ensemble des cultures est appelé « c ».

Tableau 1 : Ensemble des cultures

Cultures	Abréviations
mil	mi
sorgho	sor
mais	mais
coton	co
bourgou	bg
jachère	ja

Nous avons recensé 5 grands types de sols sur le bassin qui forment l'ensemble des sols « s » (Tableau 2).

Tableau 2: Ensemble des sols

Sols	Abréviations
Sols ferrallitiques	fra
Sols ferrugineux	fer
Sols bruns	br
Lithosols	lit
Cuirasse	cui

c) *Les contraintes*

✓ **Contrainte de terre**

Cette contrainte se traduit par la superficie totale des terres disponibles. Dans le modèle, la surface maximale utilisable pour les activités agricoles est donnée selon le type de sol. Le modèle attribue des surfaces par sous-bassin à chaque type de sol et cultures ($X(b, s, c)$) sans dépasser la totalité des surfaces disponibles ($surf(b)$). Toutes les surfaces agricoles ne sont pas forcément attribuées.

$$ter(b, s) = \sum_c X(b, s, c) \quad (3)$$

✓ **Contrainte coton**

Le coton est la principale culture de rente de la zone ce qui fait que tous les agriculteurs sont tentés par celle-ci afin de générer un revenu pour subvenir aux besoins de la famille. Donc

pour ne pas que tout l'espace soit emblavé en coton, nous avons décidé de mettre une contrainte au niveau de la culture du coton. Aussi, les agriculteurs cultivent le coton pour avoir des intrants qu'ils utiliseront pour d'autres spéculations.

$$\sum_c X(b, s, c) \leq \sum_c^{cl(c)} X(b, s, c) \quad (4)$$

✓ Contrainte de travail

Ce modèle est construit sur la base d'une période culturale (un an pour le cas des cultures annuelles). L'équation (5) 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.

$$ltra = \sum_{c,s} bw(c, p) * X(b, s, c) \leq camp(p) * pop(b) * act + SAL(b, p) \quad (5)$$

Avec, bw : besoin en homme jour par hectare

X : surface cultivée

$camp$: jour de travail disponible

pop : population

act : proportion d'actifs dans la population

SAL : jour de travail salarié

La main d'œuvre en Afrique de l'Ouest est essentiellement familiale. Cependant, de la main d'œuvre temporaire est parfois nécessaire. Le coût de la journée de travail varie en fonction du type de travail à réaliser.

✓ Contrainte de capital

Une contrainte de trésorerie a dû être ajoutée dans le modèle. En effet, pour les exploitations agricoles, le manque de capital est une contrainte à l'adoption de nouvelles techniques et à l'augmentation de la production et des revenus. Les crédits (CRED) donnent la possibilité aux agriculteurs d'acquérir des intrants (engrais, insecticides, fongicides, aliments bétail, etc.). Dans la zone cotonnière, la société cotonnière assure l'approvisionnement en intrants à crédit pour la culture du coton. Les crédits sont remboursés sur la vente du coton. De ce fait, cette culture joue un rôle majeur au niveau de l'exploitation. Les intrants achetés à crédits pour le coton peuvent être utilisés sur d'autres cultures, notamment le maïs (Kebe, 1993). Le prix des

intrants est majoré de 10% lorsque l'agriculteur achète à crédit. Le remboursement du crédit et des intérêts se fait une fois la récolte terminée et vendue.

$$\sum_{(b)} bc(c, s) * X(b, s, c) < cap(b) * pop(b) - CAP2(b) + CRED(b) \quad (6)$$

La somme des besoins en capitaux pour l'ensemble des superficies emblavées doit être inférieure au capital disponible du bassin.

$$\sum_{(b)} SAL(b, p) * salj(p) < CAP2(b) \quad (7)$$

La ressource financière disponible pour le salaire doit être supérieure au coût du travail salarié.

✓ Contrainte en eau d'irrigation

Selon le type d'année en début de campagne, la superficie a cultivée est revu à la hausse ou à la baisse.

$$\sum_{s,c} be(s, c) * \frac{X(b,s,c)}{eff} = \sum_{b,r} OIRR(b, r) \quad (8)$$

Avec, be : besoin en eau des cultures

X : superficie emblavée

Eff : efficacité du réseau d'irrigation

Les besoins en eau des cultures sont inférieurs au produit de la réserve par l'efficacité des réseaux d'eau estimée à 0.7

✓ Contrainte d'eau pour l'AEP

Cette contrainte concerne la quantité d'eau prélevée pour approvisionner la population urbaine en eau potable.

$$popu(b) * bpopu * 365 * ces = \sum_{b,r} OPOP(b, r) \quad (9)$$

Avec, popu : population urbaine

bpopu : besoin en eau journalier de la population urbaine

ces : proportion de la population approvisionnée en eau potable

✓ Contrainte d'eau pour les animaux

Cette contrainte concerne la quantité d'eau prélevée par le cheptel dans le bassin.

$$che(b) * 365 * banx = \sum_{b,r} OANX(b, r) \quad (10)$$

Avec, che : cheptel en UBT

Banx : besoin en eau journalier d'un animal

✓ Contrainte du ruissèlement

$$\sum_{(b,r)} ru(s, r, c) * X(b, s, c) = EAU2(b, r) \quad (11)$$

Le ruissèlement en m³ d'eau pour l'ensemble des cultures par type de sol doit être égal au ruissèlement en m³ d'eau dans le bassin versant.

$$\sum_{(b,r)} EAU1(b, r) < res(b) \quad (12)$$

Le ruissèlement en m³ d'eau qui remplit le réservoir doit être inférieur au volume d'eau utile dans le réservoir multiplié par 1000.

3.3. CALAGE ET VALIDATION

Le calage consiste à faire varier les paramètres générés par GAMS les uns par rapport aux autres, de façon à obtenir une simulation correcte du point de vue des assolements. Les écarts entre les valeurs observées et les valeurs simulées sont minimisées au moyen d'un ajustement des paramètres du modèle ;

Une qualité essentielle du modèle est sa capacité à représenter les processus quelles que soient ces conditions. Dans notre cas, la validation porte sur le même type de variables et de critères que ceux qui ont servi au calage.

3.4. SIMULATIONS

Le modèle, une fois calibré, permet de réaliser des simulations suivant des scénarii bien déterminés. Nous ferons les simulations suivant 3 scénarii. Le premier scénario (P1) est celui qui est fait avec les données de population actuelle (2011). Le second (P2) est fait avec une population qui a doublée et le troisième (P3) est fait lorsque la population triple.

La formule du taux de croissance ci-dessous, nous a permis de déterminer le nombre d'année nécessaire pour que la population double et triple.

$$F = P (1 + i)^n \quad (13)$$

Avec :

F = Valeur future

P = Valeur initiale

i = Taux de croissance (3 % → 0.03)

n = Nombre d'année

IV. RESULTATS

4.1 ALLOCATION DES TERRES

4.1.1. Allocation optimale des terres à P1

Nous ne présenterons ici que les allocations de terre sur les sous-bassins b1, b2, b3, b4, b5 et b6. Ils représentent un échantillon de la zone d'étude. Avec ces 6 sous-bassins, les différentes zones climatiques sont représentées.

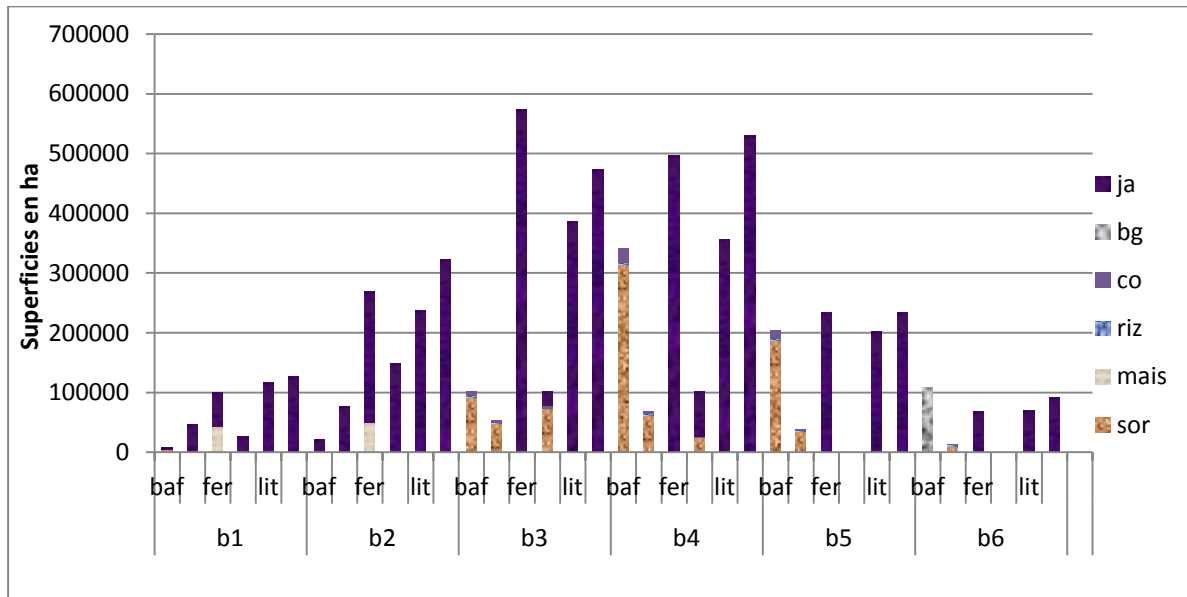


Figure 5 : Allocation des terres de b1 à b6 à P1

Dans le scénario de base (Figure 1), nous constatons que beaucoup de terres sont laissés en jachères et ce quelque soit le sous-bassin. C'est le cas des lithosols et des cuirasses qui sont entièrement laissés en jachère. Par contre, les bas-fonds et les sols bruns sont exploités sur tous les sous-bassins pour cultiver du riz, du sorgho et du coton. Dans les sous-bassins Djibrila (b1) et Bougouni (b2), une partie des superficies des sols ferralitiques est utilisée pour cultiver du maïs.

4.1.2. Allocations de terre par sous bassin

Nous présenterons ici les résultats des allocations de terre des six premiers sous-bassins (b1 à b6). Il s'agira de comparer les allocations lorsque la population double (P2) et lorsqu'elle triple (P3) au scénario de base (P1).

- *Sous-bassin Djibrila (b1)*

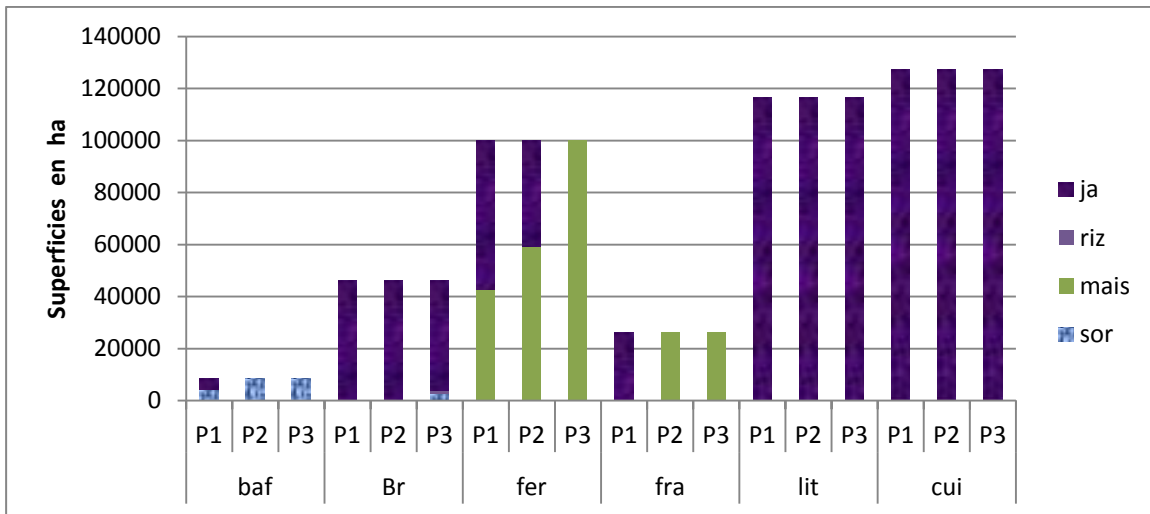


Figure 6 : Distribution des terres dans b1

Les cultures pratiquées sont le riz, le maïs et le sorgho. Le riz et le sorgho sont cultivés dans les bas-fonds. Les sols bruns, les lithosols et la cuirasse sont laissés entièrement en jachère sur les 3 périodes. Le maïs est cultivé sur les sols ferrugineux et ferralitiques. Sa surface augmente lorsque la population augmente.

- *Sous-bassin Bougouni (b2)*

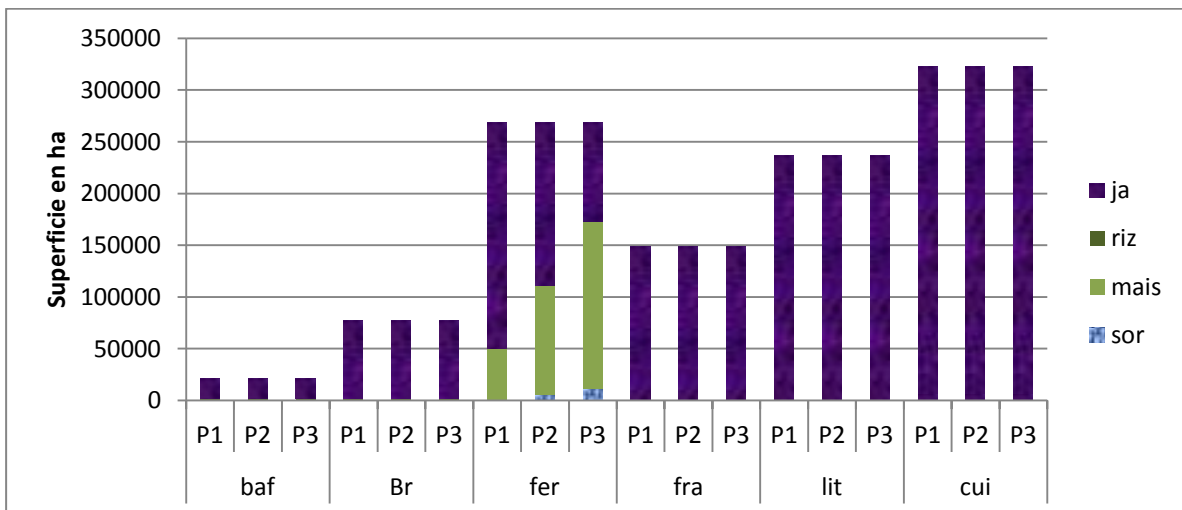


Figure 7 : Distribution des terres dans b2

Les spéculations sur ce sous-bassin sont le riz, le maïs et le sorgho. Les sols ferralitiques, les lithosols et les sols cuirassés sont laissés dans leur totalité en jachère quelques soit les scénarii. Par contre sur le sol ferrugineux, on observe des superficies de maïs et de Sorgho qui augmentent suivant l'évolution de la population.

- *Sous-bassin Dioïla (b3)*

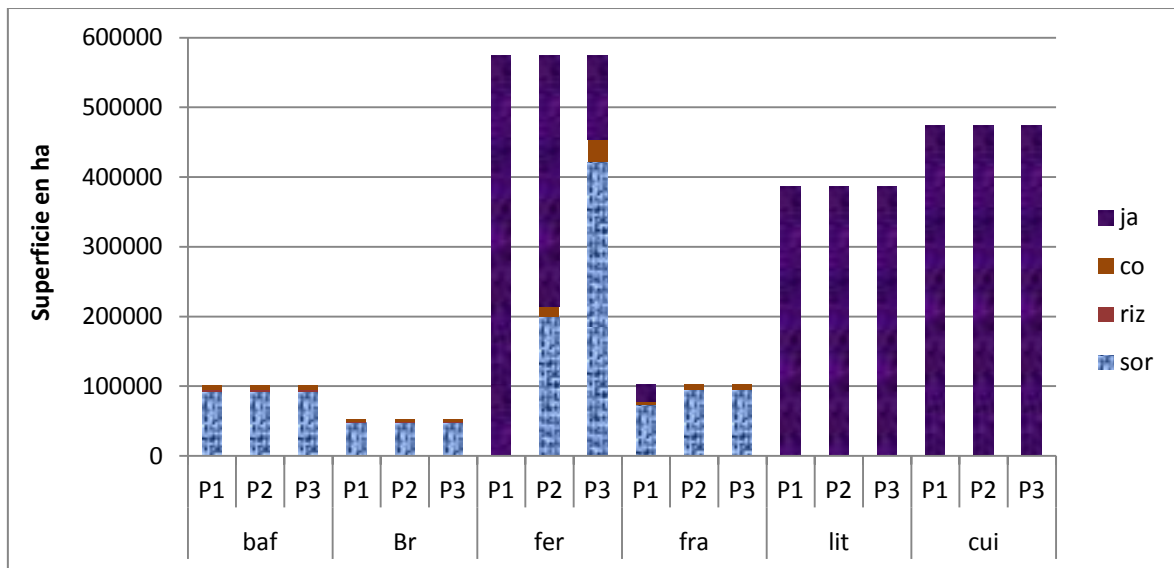


Figure 8 : Distribution des terres dans b3

Dans le sous-bassin 3, ce sont le coton, le riz et le sorgho qui sont cultivés. Les lithosols et les sols cuirassés sont laissés en jachère sur les 3 périodes. Dans les bas-fonds, sur les sols bruns et ferralitiques, ce sont le sorgho, le coton et le riz qui sont cultivés à des superficies constantes sur les 3 périodes. Il n'y a que sur le sol ferrugineux que l'on observe des augmentations des superficies emblavées de sorgho et de coton.

- *Sous-bassin Douna (b4)*

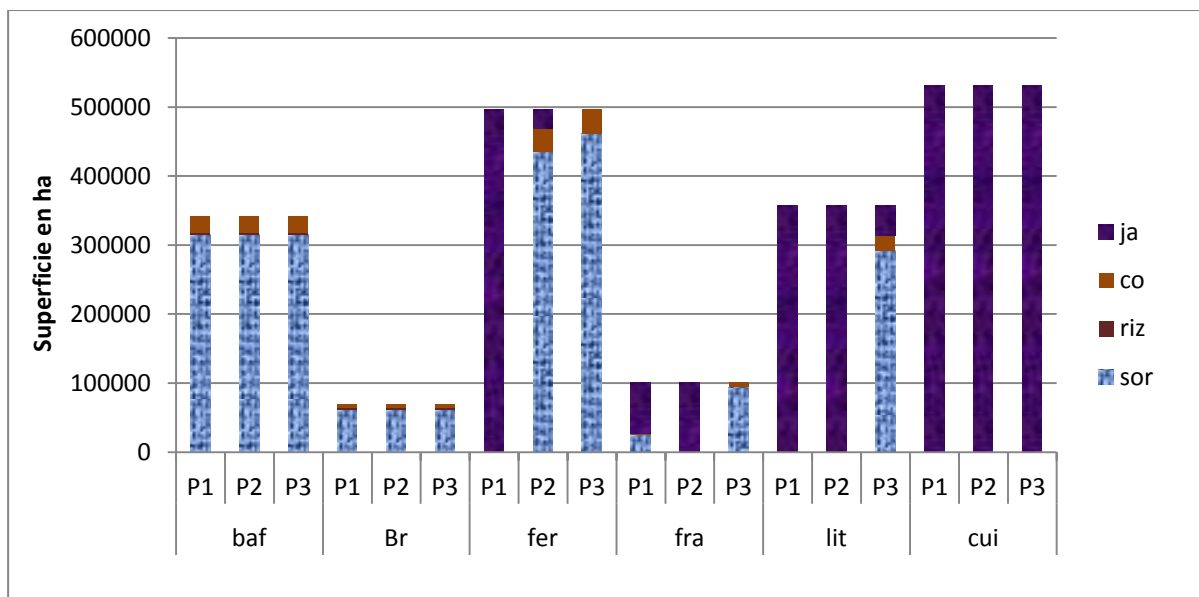


Figure 9 : Distribution des terres dans b4

Le sorgho est la culture la plus pratiquée sur ce sous-bassin. Cela s’observe dans les bas-fonds, sur les sols bruns et sur les sols ferrugineux. Il est aussi cultivé sur ces mêmes sols du coton et du riz. Les sols cuirassés sont laissés sur les 3 périodes en jachère (Figure 4).

- *Sous-bassin Talo (b5)*

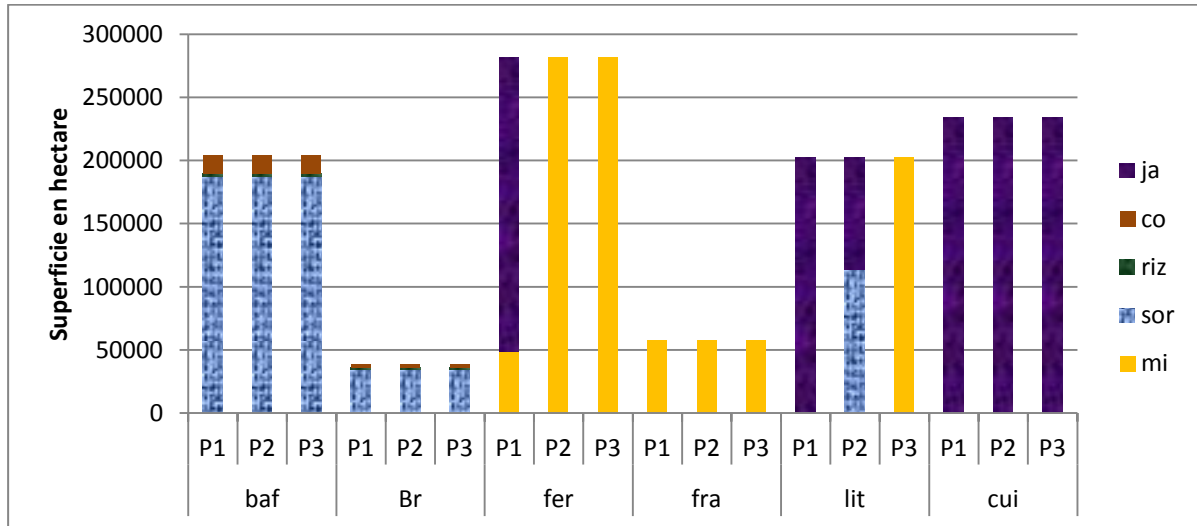


Figure 10 : Distribution des terres dans b5

Dans les bas-fonds et sur les sols bruns, ce sont le sorgho, le riz et le coton qui sont cultivés avec des superficies qui ne varient pas suivant l’évolution de la population. Sur les sols ferrallitiques et les sols ferrugineux, c’est le mil qui est cultivé. Les lithosols sont partiellement cultivés lorsque la population double et totalement lorsqu’elle triple. Les sols cuirassés sont laissés en jachère.

- *Sous-bassin Zone inondable (b6)*

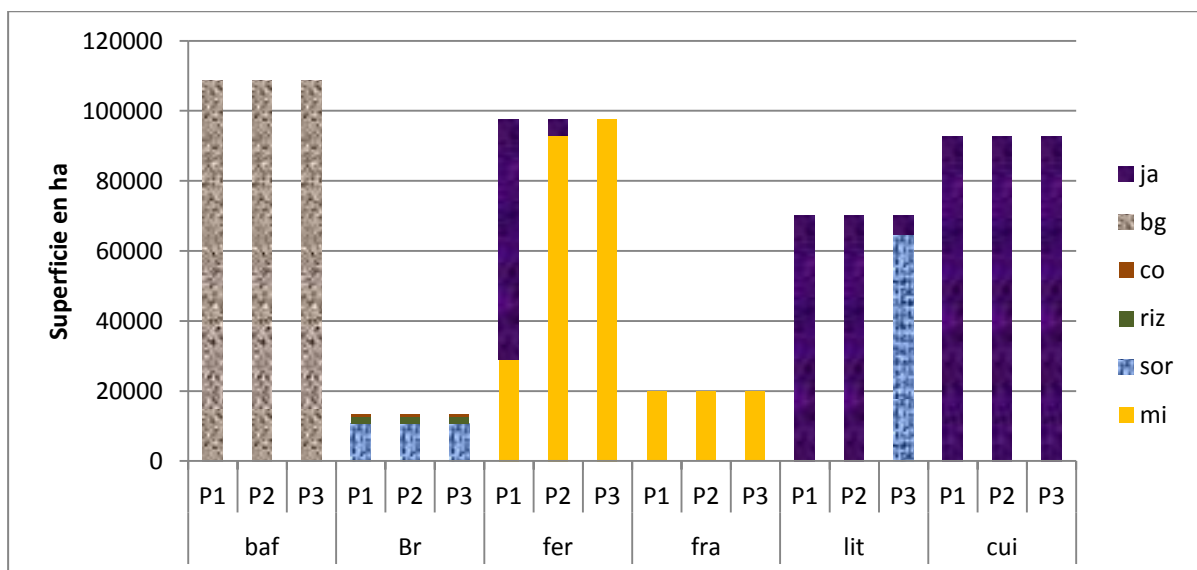


Figure 11 : Distribution des terres dans b6

Dans le sous-bassin 6, les spéculations sont le bourgou, le coton, le riz, le sorgho et le mil. Dans les bas-fonds, le bourgou est la culture uniquement pratiquée sur les 3 périodes. Il en est de même sur les sols cuirassés qui sont laissés en jachère. Sur les sols bruns, ce sont le sorgho et le riz qui sont cultivés. Sur le sol ferrugineux, la superficie de mil augmente suivant l'évolution de la population au détriment de la jachère. Sur le sol ferrallitique, c'est le mil qui est cultivé. Lorsque la population triple, les lithosols sont utilisés pour cultiver le sorgho.

4.2. REVENU FINANCIER SUR LE BASSIN

Dans cette partie, nous analyserons le revenu global du bassin et les revenus par personne sur les trois périodes (P1, P2 et P3).

- Revenu global

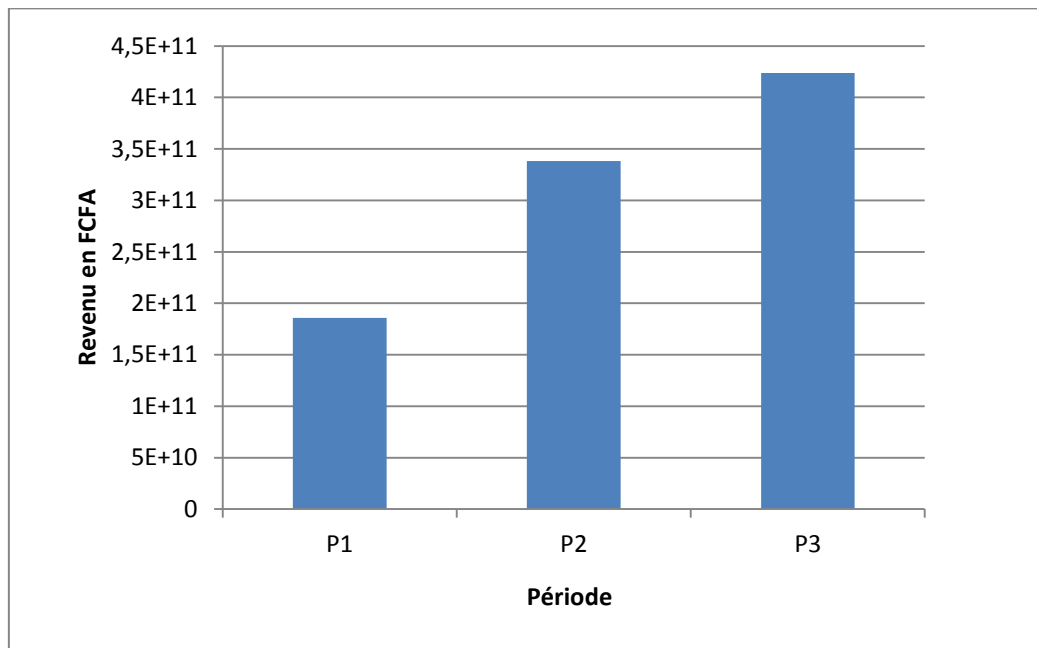


Figure 12 : Revenus à P1, P2 et P3

Sur la figure 14, on constate une nette augmentation du revenu global. Il a augmenté de 82% de 2011 à 2035 c'est-à-dire de 185.9 milliards à 338.3 milliards. Il est ensuite passé à 423.8 milliards en 2050 soit une augmentation de 25% de 2035 à 2050.

- *Revenu par personne*

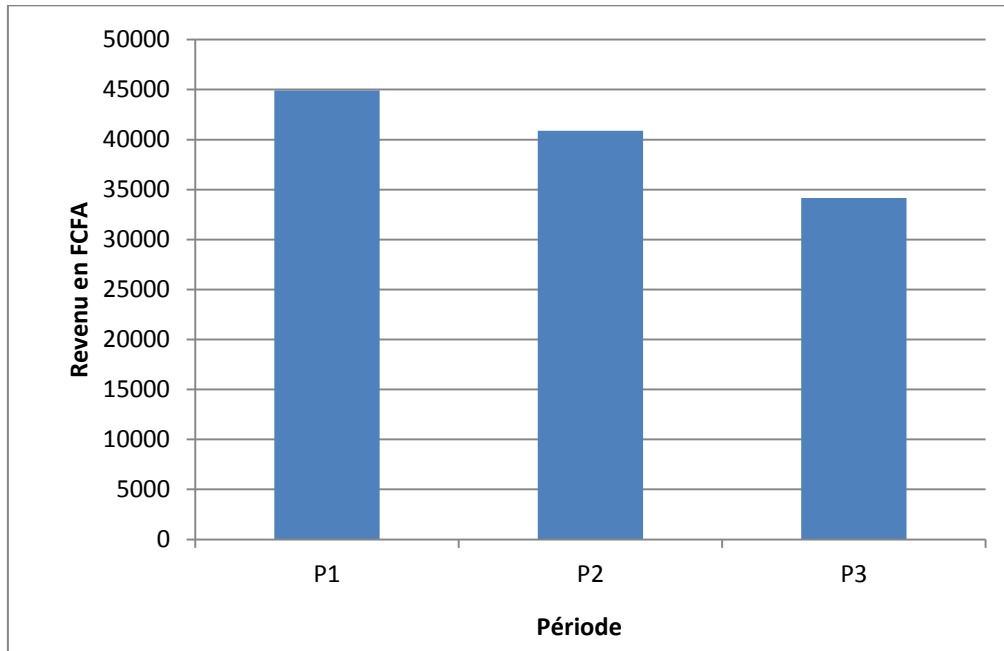


Figure 13 : Revenus par personne à P1, P2 et P3

Le revenu par individu sur l'ensemble du bassin est de 44 930 FCFA en 2011. Il passe en 2035 à 40 885 FCFA lorsque la population double. On enregistre donc une baisse de 10% de 2011 à 2035. Lorsque la population triple, le revenu individuel passe à 34 146 FCFA soit une baisse de 24% de 2011 à 2040.

4.3. ANALYSE DES VALEURS MARGINALES DE LA TERRE ET DU TRAVAIL

La valeur marginale est la valeur de la quantité additionnelle produite par une unité supplémentaire. Cela peut être le travail, la terre et l'eau (Donni, 2005).

4.3.1. La terre

Dans cette partie, nous présenterons les valeurs marginales des différents types de sols suivants les trois scénarii décrits dans la démarche méthodologique.

- *Bas-fonds*

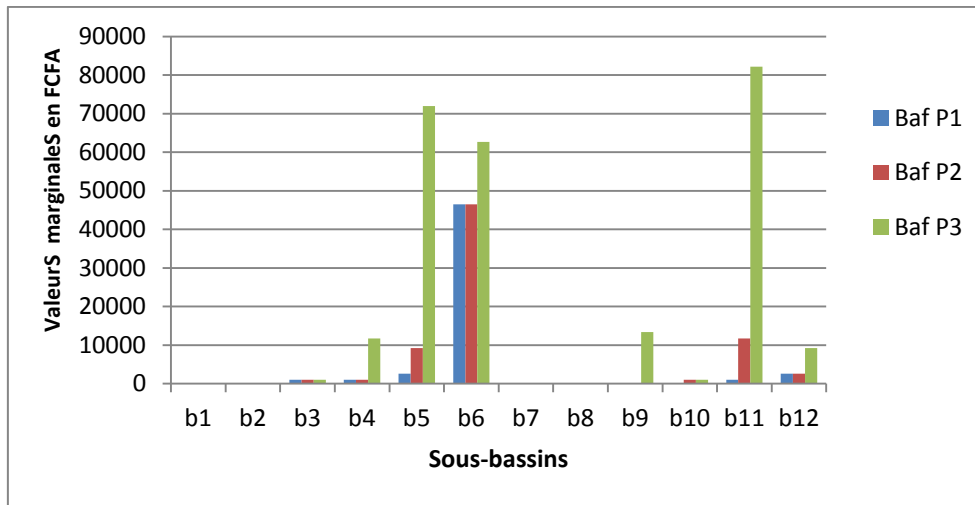


Figure 14 : Valeurs marginales des bas-fonds par sous-bassin

Sur la première période (P1), les bas-fonds sont une ressource limitante sur certains sous-bassins (b3, b4, b5, b6, b11 et b12). Ils prennent beaucoup plus de valeur lorsque la population double puis triple dans les sous-bassins de Talo (b5), dans les zones inondables (b6) et de Korodougou (b11) (Figure 8).

- *Sols bruns*

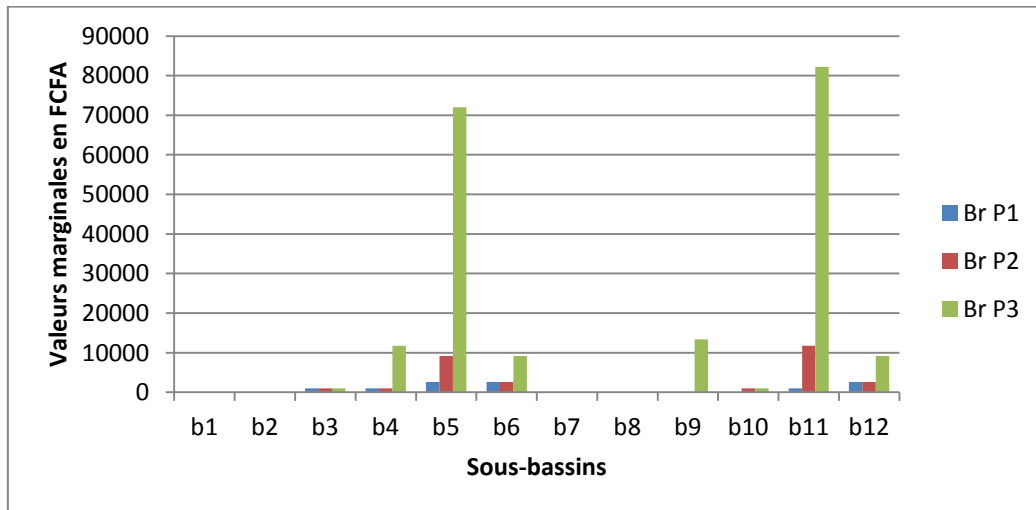


Figure 15 : Valeurs marginales des sols bruns par sous-bassin

La figure 9, nous montre que les sols bruns ont des valeurs marginales à P1 sur certains sous-bassins. Ces valeurs augmentent avec l'évolution de la population. Elles sont les plus élevées sur les sous-bassins de Talo (b5) et Korodougou (b6).

- *Sols ferrugineux*

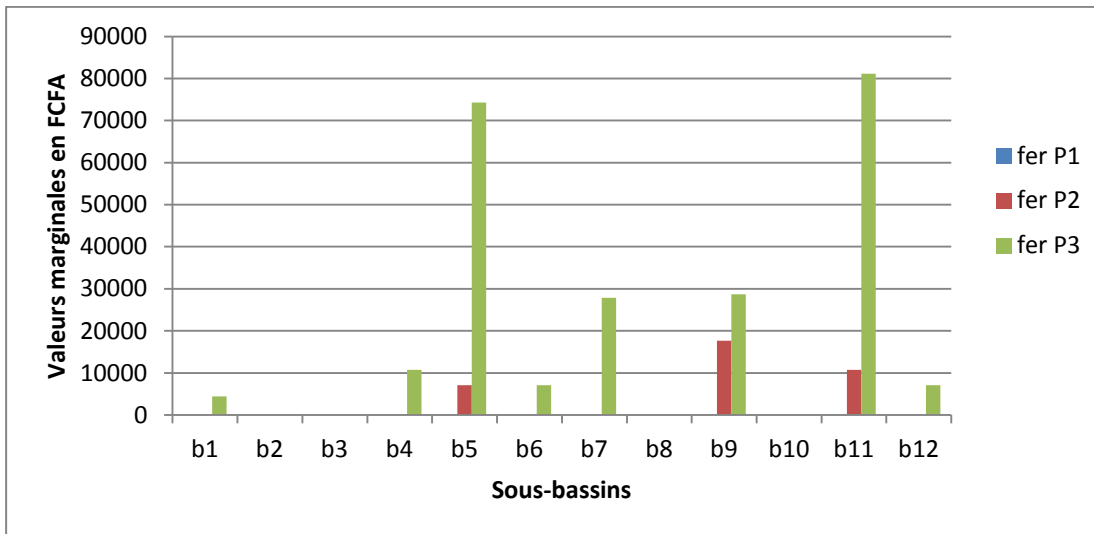


Figure 16 : Valeurs marginales des sols ferrugineux par sous-bassin

Sur la figure 10, on n’observe pas de valeur marginale avec la population actuelle. Par contre, lorsque la population double les sols ferrugineux prennent de la valeur sur les sous-bassins de Talo (b5), de Bananso (b9) et Korodougou (b11). Lorsqu’elle triple, les sols ferrugineux prennent beaucoup plus de valeur sur le bassin en général. Cela est plus remarquable sur les sous-bassins de Talo et Korodougou.

- *Sols ferralitiques*

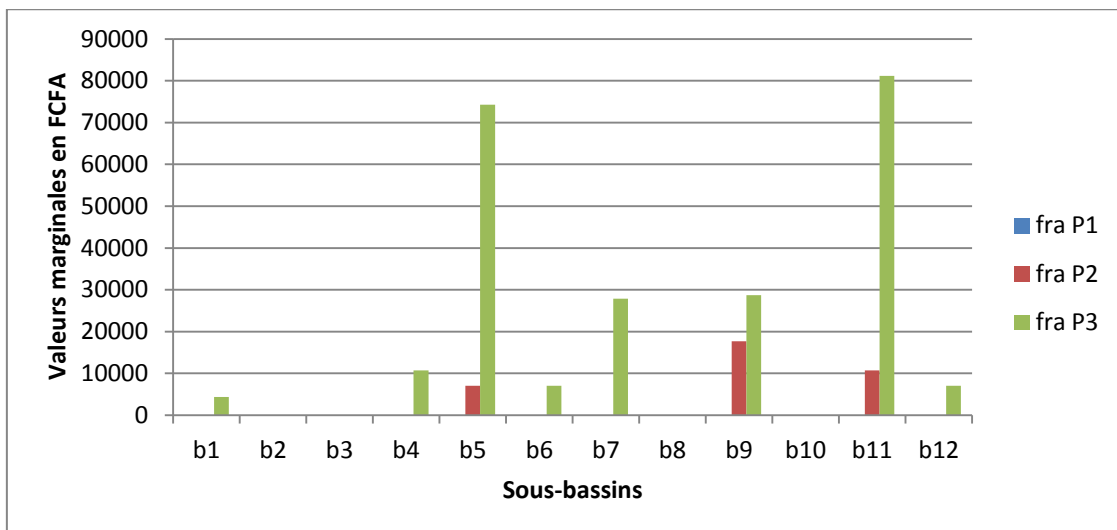


Figure 17 : Valeurs marginales des bas-fonds par sous-bassin

Sur la figure 11, on fait le même constat que la figure 10. Les sols ferralitiques prennent de la valeur lorsque la population triple.

- *Lithosols*

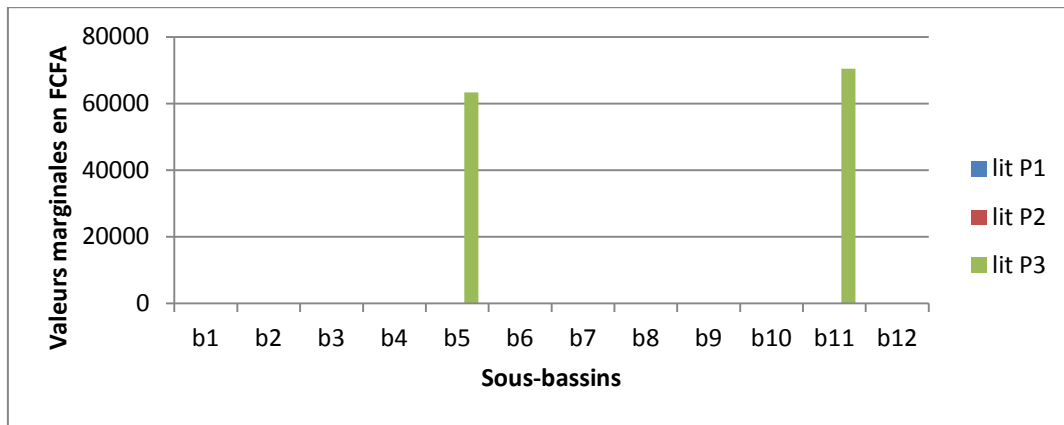


Figure 18 : Valeurs marginales des bas-fonds par sous-bassin

La figure 12, nous indique que les lithosols sont une ressource en terre limitante dans les sous bassins de Talo (b5) et de korodougou (b11) lorsque la population triple. Un gain ou une perte de 1ha sur ces deux sous-bassins entrainerait un gain ou une perte de 62 000 FCFA sur b5 et de 70 000 FCFA sur b11.

- *Cuirasse*

Sur la cuirasse, on n’observe pas de marge brute quelques soit la population.

4.3.2. Le travail

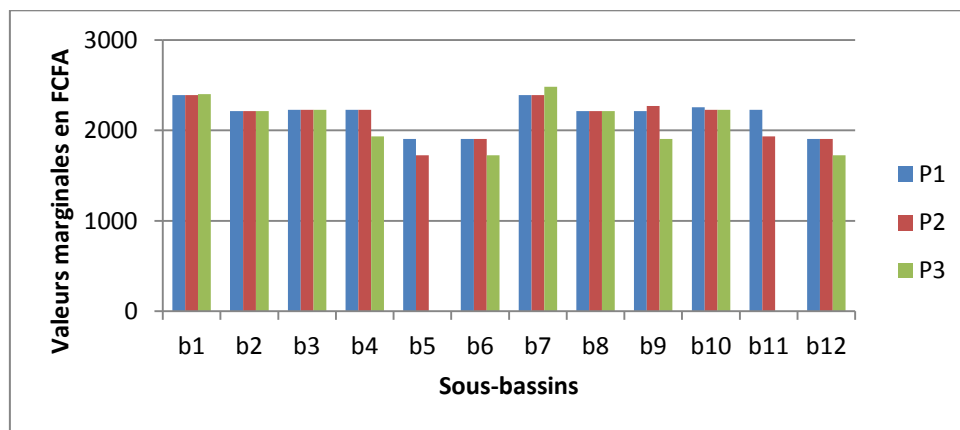


Figure 19: Valeurs marginales du travail à P1, P2 et P3

On constate que la valeur marginale de la main d’œuvre baisse lorsque la population augmente. Lorsque la population triple sur les sous-bassins Talo (b5) et Korodougou (b11), le travail n’a plus de valeur marginale.

4.4. ANALYSE DU RUISSELLEMENT

Les résultats sont présentés par type d'année et aux 3 périodes.

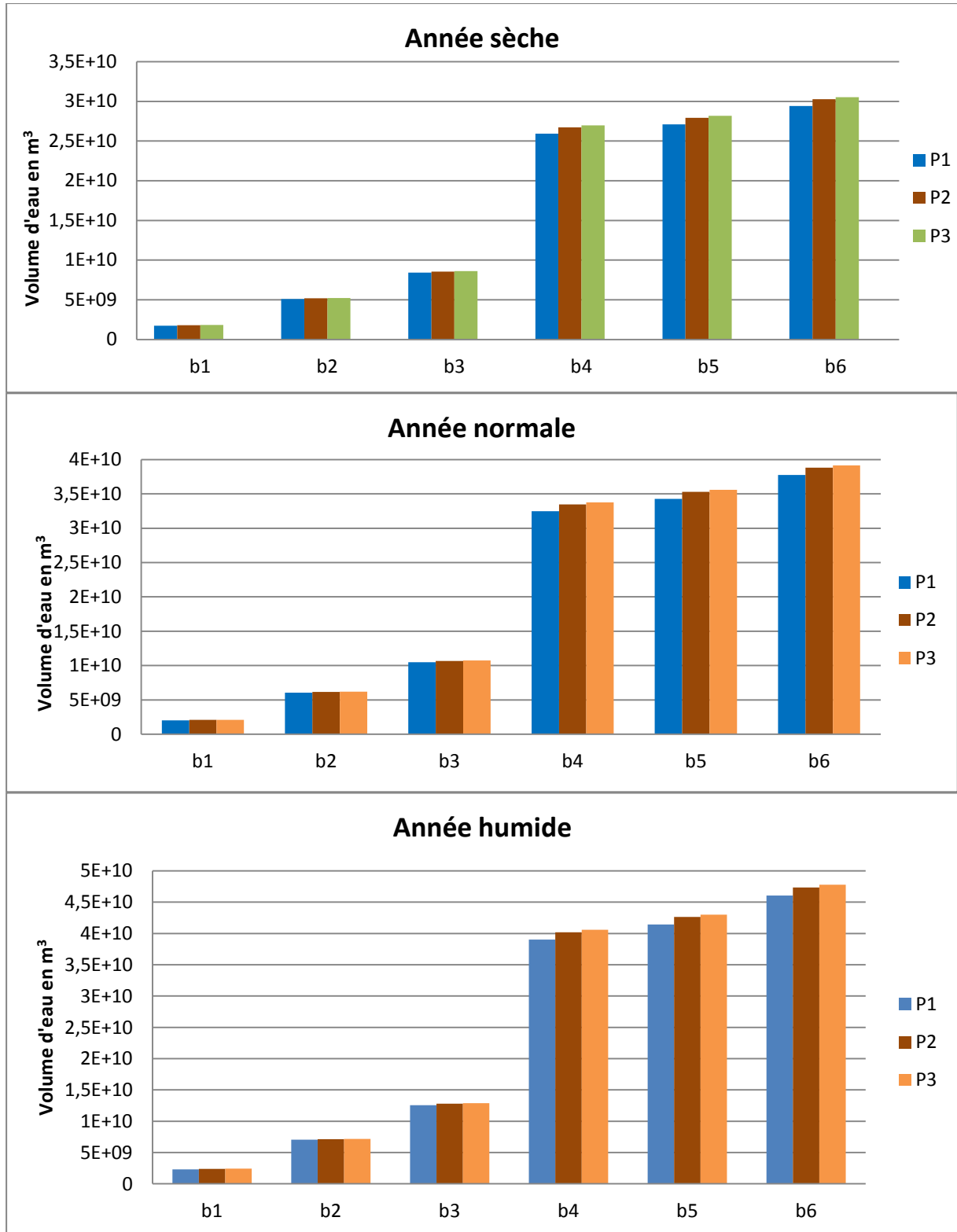


Figure 20 : Ruissellement par bassin et par type d'année à P1, P2 et P3

Nous constatons sur la figure 15 que le ruissèlement augmente de l'amont vers l'aval du bassin quel que soit le type d'année. Aussi, il évolue dans le même que la population. En effet, lorsque la population augmente, il augmente aussi.

V. DISCUSSION

5.1 ALLOCATION DES TERRES

Les superficies des cultures augmentent au fil des années au dépend de celles de la jachère. Ceci traduit la pression anthropique sur les terres qui est la conséquence de la croissance démographique du Bani (3% par an) (Jeannaud, 2007). Aussi, remarquons nous que les cultures les plus cultivées sont le mil et le sorgho, suivis par le coton et le maïs. Le mil et le sorgho sont moins exigeants en temps de travail. La culture du coton permet d'avoir accès aux crédits et aux intrants qui peuvent alors être utilisés sur les autres cultures de l'exploitation (notamment le maïs), voire revendus pour améliorer la trésorerie de l'exploitation. Le crédit aux intrants pour le coton est important pour les producteurs et s'insère dans la gestion du système de production cotonnier qui fait alterner coton et céréales dans une rotation (Fournier, 2002 *Cité par* Jeannaud, 2007). Le riz est une spéculaton moins cultivée. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que le riz ne soit pas rentable. Des politiques telles que la subvention de la culture du riz pourraient accroître la superficie des terres emblavées en riz.

On constate que les lithosols et les cuirasses ne sont presque pas cultivés parce que ce sont des terres de mauvaises qualités, pauvre en matière en matière organique. Cependant, les lithosols sont en partie cultivés lorsque la population augmente dans les sous-bassins b5 et b6. Ceci peut s'expliquer par le fait que les bonnes terres agricoles de ces bassins sont déjà exploitées et ce sont des bassins qui ont suffisamment de ressources en eau.

5.2. REVENU DES POPULATIONS

Le revenu par personne obtenu dans cette étude est un peu plus faible (45 000 FCFA) que celui obtenu par Simien (2006) qui est de 60 000 FCFA. Cela peut s'expliquer par le fait que les deux études n'ont pas été menées aux mêmes dates. Aussi, Simien a intégré des contraintes supplémentaires telles que l'élevage et la production de fumure organique dans son modèle.

L'augmentation du revenu global du bassin se fait en même temps que l'augmentation de la population. Cependant, le revenu individuel baisse. Cela entraîne différentes actions dans la population. En effet, la croissance démographique sans l'augmentation proportionnelle de la production crée un déficit, un grand nombre de paysans soit émigre soit change d'activité. Bien que l'augmentation de la population influence positivement la croissance économique dans une région, cela n'est possible que si la main d'œuvre est utilisée à bon escient (Makaya, 2010).

5.3. VALEURS MARGINALES

La terre prend beaucoup de valeur dans les sous-bassins Talo et Korodougou pour deux principales raisons. En 2007, la mise en eau du seuil de Talo a permis la mise en valeur de plus de 20 000 ha ce qui a favorisé la migration des personnes pour cultiver ces terres dans les cercles de Bla et San (Cessouma, 2008). C'est dans cette zone qu'on retrouve les plus fortes densités de population (50 hab./Km²) malgré une faible pluviométrie entre 800 et 600 mm de pluie par an (Konaré, 2009). Quant au sous bassin Korodougou, il fait partie du vieux bassin cotonnier du Mali. Ce bassin cotonnier historique se situe pour l'essentiel aux alentours de Koutiala et au nord de Sikasso. Cette zone très densément peuplée (45 hab./Km²) est très cultivée même les terres marginales comme les lithosols ne sont épargnées. L'agriculture cotonnière de la zone a beaucoup bénéficié de subvention, ce qui a favorisé l'immigration des populations (Konaré, 2009 ; Dufumier, 2005). Cette immigration rend la main d'œuvre facilement accessible dans la zone d'où la baisse des valeurs marginales du travail.

La valeur élevée du travail dans les sous-bassins sud du bassin s'explique par le fait que ce sont des zones peu peuplées du fait de l'instabilité politique pendant la période précoloniale, l'enclavement et les maladies (onchocercose dans le passé) (Konaré, 2009).

5.4. RUISSELLEMENT

Plusieurs études (Mouelhi, 2003; Andreassian , 2004) indiquent que les activités anthropiques modifient l'occupation du sol et les états de surface associés, ce qui entraîne une modification des relations pluie-débit sur les bassins versants. Ainsi, le changement d'état de surface a entraîné une augmentation des ruissellements en Afrique sahélienne (Mahé, 2006). C'est cet état de fait que cette étude a permis de remarquer. En effet, l'augmentation de la population entraîne une pression sur la ressource terre. Cette pression se traduit par une augmentation de la superficie des terres cultivées au détriment de la jachère. Le coefficient de ruissellement étant plus élevé sur les terres cultivées que sur les terres en jachère, on observe un ruissèlement qui augmente avec le temps. Dans les régions sahéliennes les nappes participent peu aux écoulements qui sont constitués. Le facteur prépondérant de la génération de l'écoulement est les états de surface (Mahé, 2006). Ce constat a été aussi fait par Mahé et *al.*, (2010) sur le bassin versant du fleuve Nakambé au Burkina Faso.

CONCLUSION

Le modèle élaboré à l'aide du logiciel GAMS nous a permis d'obtenir un certain nombre de résultats. Le revenu augmente avec la population à l'échelle du bassin. Cependant, lorsqu'on rapporte ce revenu par personne, il baisse. Le modèle ne fait pas beaucoup de riz du fait du capital trop important et de la main d'œuvre que demande cette culture. On assiste donc à une pression anthropique sur les ressources se traduisant par l'augmentation de la superficie des cultures au dépend de celle de la jachère. On observe une saturation des terres dans sous-bassins Talo et Korodougou à cause de la mise en eau du seuil de Talo et du vieux bassin cotonnier de Koutiala. Dans le sud du bassin, le coût de la main d'œuvre est élevé et beaucoup de terre sont en jachère du fait de la densité de la population qui est faible. Cependant, on constate que la pression démographique fait augmenter le ruissellement dans le bassin.

Afin d'avoir des résultats beaucoup plus précis, il serait bien de mener les activités suivantes :

- Faire une enquête de terrain pour mieux apprécier le principe de fonctionnement des systèmes agraires du bassin,
- intégrer beaucoup plus de cultures et l'apport du bétail dans le modèle.

RECOMMANDATIONS

Au terme de notre étude, nous recommandons ce qui suit :

- Favoriser l'installation des populations vers les zones sud du bassin en créant des infrastructures sanitaires et scolaires;
- Faire des aménagements hydro-agricoles qui vont permettre de développer l'agriculture sur tout le bassin et cultiver tout au long de l'année ;
- Encourager l'intensification des cultures (utilisation de fertilisants, culture attelée).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbes K. et Mahjoubi R., Flichman G. (2005). Impacts des formules tarifaires binômes sur le système irrigué de la basse vallée de la Medjerda (Tunisie). Actes du séminaire Euro Méditerranéen, 16p.
- Adja M.G. (2009). Etude de l'état hydrique saisonnier du bassin versant de la Bagoé dans un contexte de variabilité climatique. Départements de Boundiali et Tengréla, (milieux soudano-sahéliens au Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 193 p.
- Andreassian V. (2002). Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de Doctorat, Université de Paris 6, France, 262 p.
- BAD et FAD (1997). Politique sectorielle de l'eau et de l'assainissement. 257^{ème} réunion du Conseil d'Administration de la BAD et 185^{ème} réunion du Conseil d'Administration de la FAD, 55 p.
- Boisson J.M. (1984). Formation et signification du prix de l'eau. Revue d'Economie Méridionale. n. 125-126. pp. 43-52.
- Cessouma A. (2008). L'agriculture irriguée et les perspectives d'économie d'eau au mali. Revue HTE N°141, 6p.
- Donni O. (2005). Cours d'économie du travail 1 et 2^e cycle, Université de Cergy-Pontoise, France, 115p.
- Ghali M. A. (2007). Un modèle bioéconomique d'exploitation pour l'analyse de l'écoconditionnalité et des mesures agrienvironnementales de lutte contre l'érosion (cas du Lauragais). Master 2, CIHEAM, France, 76p.
- Jeannaud E. (2007). Mise en œuvre d'un modèle hydrologique semi-distribué à base physique (SWAT) sur le bassin versant du Bani (Mali). Mémoire de stage 2^{ème} Année, Université de Montpellier 2, 52p.
- Koffi K. V. (2010). Modélisation hydro-économique du bassin du Bani. Rapport de stage, Master 1 Environnement, Zie, Ouagadougou, Burkina Faso, 25p.

- Konaré S. (2009). Culture des Bas-fonds du bassin versant du fleuve Bani au Mali : Utilisation de SIG pour la caractérisation de productions agricoles. Mémoire Master spécialisé en GIRE, 2ie, Ouagadougou, Burkina Faso, 65p
- Kpadonou B. R. A. (2009). Impact de la contrainte de crédit sur la production et le revenu agricoles : Une analyse par la programmation stochastique discrète des exploitations agricoles de la basse vallée de l'Ouémé. Mémoire Ingénieur, Université de Parakou, Benin, 130p.
- Mahe G., Diello P., Paturel J.-E., Barbier B., Karambiri H., Dezetter A., Dieulin C., Rouché N. (2006). Baisse des pluies et augmentation des écoulements au Sahel : Impact climatique et anthropique sur les écoulements du Nakambe au Burkina Faso. Revue Sécheresse, 21 (1e), pp. 1-6.
- Mahe G. (2006). Variabilité pluie-débit en Afrique de l'Ouest et Centrale au 20ème siècle : changements hydro-climatiques, occupation du sol et modélisation hydrologique. Mémoire Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Techniques Montpellier 2, France, 160 p.
- Makaya P. (2010). Modélisation hydro-économique et politique : Interactions dynamiques homme-climat-ressources dans le bassin du barrage Tougou. Mémoire Master spécialisé en HSI, 2ie, Ouagadougou, Burkina Faso, 38p.
- Marico O. M. (2010). Modèle hydro-économique du bassin versant du Bani. Mémoire Master 2 en Eau, 2ie, Ouagadougou, Burkina Faso, 38p.
- Mondja T.-K. (2011). 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 Master 2, 2ie, Ouagadougou, Burkina Faso 70p.
- Mouelhi S. (2003). Vers une chaîne cohérente de modèle pluie-débit conceptuels globaux aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts de Paris, France, 274 p.
- Roudier P. (2008). Vulnérabilité des ressources en eau superficielle d'un bassin soudano-sahélien dans un contexte de changement climatique: approche par indicateur Mémoire Master 2, ENGEES, France, 50p.

Simien A (2006). Tests et évaluation du modèle FSSIM dans la région Sud-Mali. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Agronomie Approfondie. Ecole National Supérieure Agronomique de Montpellier, France, 52p.

Siou K. L. A. (2008). Méthodologie de caractérisation et d'évaluation des débits d'étiages. Application au bassin du Bani (Mali). Mémoire de Master 2 BGAE, France, 58p.