



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

Introduction de l'irrigation de complément dans une exploitation sahélienne : modélisation bioéconomique

Master 2 en Environnement

Présenté et soutenu publiquement le 14/06/2011 par :
Aïda ZARE

Travaux dirigés par : le Dr Bruno BARBIER

UTER : GVEA

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Abdoulaye DIARRA

Membres et correcteurs : Dr Harouna KARAMBIRI

Dr Bruno BARBIER

Dr Dial NIANG

Promotion 2009- 2011

Dédicace

*A DIEU pour tous ses bienfaits et sa grâce tout au long de ma
vie*

- *A mon **père** ZARE Idrissa pour son immense amour et son soutien sans borne*
- *A ma **mère** DEM Kaguiatou pour m'avoir donné la vie*
- *A ma **tante**, DEM Moumounina pour son soutien, son affection et ses conseils*

Je vous aime.

Remerciements

Mes remerciements vont :

- A mon encadreur le Docteur Bruno BARBIER pour son entière disponibilité, sa volonté pour l'aboutissement de ce travail. J'ai bénéficié tout à la fois de ses connaissances, son expérience et surtout de sa rigueur au travail et sa passion pour le travail bien fait.
- Au Docteur Harouna Karambiri qui n'a jamais hésité à apporter ses contributions à la réussite de mon travail.
- A Mr Sévère Fossi qui m'a initié à la programmation en langage GAM'S. J'exprime mes reconnaissances pour sa collaboration et ses conseils.
- A Mr Dial NIANG et Mounirou LAWANI pour leur collaboration au cours de la collecte de mes données et la pertinence de leur remarque.
- A tous les membres de ma famille, j'exprime ma profonde gratitude principalement à ma sœur Aïcha, mon frère Aboubacar et mes cousins Edmond et Farida.
- A mes meilleurs amis Hema Césaire, Tahirou Nasser, Guiao Kader, Nasser Kinefour, Olivier Tapsoba, et Salah Atteib pour les difficultés surmontées ensemble.
- Je suis toute aussi reconnaissante à tous mes camarades de classe pour les bons moments passés ensemble
- Je n'oublierai pas de remercier tout le personnel enseignant et non enseignant du 2^{ie}, pour m'avoir formé ou rendu les services nécessaires à ma réussite.

Enfin je suis vivement reconnaissante à tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à l'aboutissement de ce travail, qu'ils m'excusent de ne pouvoir les nommer tous ici.

Résumé

Cette étude s'est intéressée à la sécurisation du revenu des producteurs dans un contexte de variabilité climatique, par la récupération de l'eau de ruissellement pour l'application de l'irrigation de complément. Les objectifs étaient de simuler l'impact des facteurs climatiques sur la production agricole et sur le revenu monétaire; et simuler aussi l'impact de l'irrigation de complément avec l'élaboration d'un modèle bioéconomique.

L'étude a été faite sur une exploitation moyenne sahélienne plus précisément dans le village de Tougou. Le modèle élaboré en langage GAM'S est issue de l'intégration des paramètres climatique, pédologique, agro-économique et du bilan hydrique.

Les résultats des simulations ont permis de déceler des déficits hydriques variant de 20 à 60% suivant les types d'années pour le sorgho et le mil, de 30 à 80% pour le maïs. Le revenu négatif des années sèches montre la sensibilité des producteurs à la variabilité climatique. Un complément d'achat de céréale doit être fait pour couvrir les besoins alimentaires. L'introduction de l'irrigation de complément a favorisé l'autosuffisance alimentaire sur tous les types d'années et un surplus de production de 17% en générale qui est vendu.

Les résultats de ce travail permettent de connaître non seulement les effets de la variabilité climatique et de l'irrigation de complément sur la production et le revenu d'une part; et d'autre part le modèle élaboré est également utilisable pour d'autre zone pourvu que l'on dispose des données nécessaires.

Mots clés

1. Variabilité climatique
2. Déficit hydrique
3. Irrigation de complément
4. Revenu monétaire.

Abstract

This study focused on securing the income of producers in a context of climate variability, for the recovery of the runoff for the application of supplemental irrigation. The objectives were to simulate the impact of climatic factors on agricultural production and cash income, and also simulate the impact of supplemental irrigation with the development of a bioeconomic model. The study was done on an average operating specifically in the Sahelian village Tougou. The model developed in GAM'S language comes from the integration of climate parameters, soil, agro-economic and water balance. The simulation results have revealed water deficits ranging from 20 to 60% depending on the types of years for sorghum and millet, 30 to 80% for corn. Negative income dry years show the sensitivity of producers to climate variability. Additional purchase of grain should be made to cover food needs. The introduction of supplemental irrigation support production surplus of 17%.

The results of this work can know not only the effects of climate variability and supplemental irrigation on production and income on the one hand, and secondly the model developed is also used for other city provided we have the necessary data.

Keywords

1. Climate variability
2. Water deficit
3. Supplemental irrigation,
4. Cash income.

LISTE DES ABREVIATIONS

BUNASOL: Bureau Nationale des Sols

Da : densité apparente

ETP: évapotranspiration potentielle

GIEC : Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

Hcr : capacité de rétention

Hpf : capacité au point de flétrissement

Kc : coefficient culturale

Mair : maïs irrigué

PRESAO : Prévision Saisonnière en Afrique de l'Ouest

RU : réserve utile du sol

ΔS : stock dans le sol

Sommaire

Dédicace	ii
Remerciements	iii
Introduction	1
II. Objectif de l'étude	3
III. Méthodologies	4
1- Choix de la zone d'étude	4
2- La démarche méthodologique	5
3- Paramètres hydrologiques	6
4- Les paramètres physiques	10
6- Elaboration du modèle bioéconomique	12
IV. LES RESULTATS	16
1- Scénario de base : absence de l'irrigation de complément	16
2- Introduction de l'irrigation de complément	20
V. Discussion	25
VI. Recommandations	26
Conclusion et Perspectives	30
ANNEXES	Erreur ! Signet non défini.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1:légende détaillée de BUNASOL	10
Tableau 2: données agro-économiques.....	11
Tableau 3:impact de l'irrigation de complément sur le revenu	23
Tableau 4: comparaison de la production céréalière en présence et en absence d'irrigation de complément	25

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de Tougou	4
Figure 2: variation de l'indice pluviométrique à Ouahigouya.....	6
Figure 3: courbe évènementielle de Pierre Franquin.....	7
Figure 4: bilan hydrique à l'échelle de la parcelle	8
Figure 5: morphopédologie de Tougou	10
Figure 6: superficie emblavée des cultures.....	16
Figure 7: déficit hydrique par type de saison dans les bas fonds	17
Figure 8: déficit hydrique du sorgho au niveau des glacis	17
Figure 9: déficit hydrique du mil sur les glacis	18
Figure 10: déficit hydrique du mil sur les sols marginaux	18
Figure 11: production céréalières suivant les types d'années	19
Figure 12: revenu monétaire du producteur suivant les types de saison	19
Figure 13: allocation optimale des terres avec l'introduction de l'irrigation de complément ...	20
Figure 14: évolution de la demande et de l'offre en eau du maïs sans irrigation	21
Figure 15: évolution de la demande et de l'apport d'eau en présence d'irrigation.....	21
Figure 16: production céréalière avec introduction de l'irrigation de complément	22
Figure 17: valeur marginale de la contrainte terre	22
Figure 18: revenu monétaire en présence d'irrigation	23
Figure 19: Esquisse d'un micro bassin réalisé par l'ONG AZN dans le Guié (Burkina Faso)	29

Introduction

L'agriculture des pays de l'Afrique de l'Ouest, est essentiellement pluviale et donc très dépendante des conditions climatiques, qui sont très variables.

D'après le rapport du GIEC (IPCC, 2007), il faut s'attendre en Afrique de l'Ouest à des conditions climatiques plus difficiles (températures plus élevées, et plus grande variabilité pluviométrique, soit plus d'inondations et de séquences sèches) et d'une manière générale à une moindre disponibilité de l'eau. Dans la zone sahélienne, les récentes simulations à l'aide des modèles climatiques régionaux montrent que le processus de changement climatique se traduira par une augmentation de la fréquence des événements climatiques extrêmes dont les épisodes de sécheresse.

La récurrence des poches de sécheresse et l'incertitude des prévisions saisonnières expliquent en grande partie la faiblesse des rendements.

Par exemple au Burkina Faso, la saison hivernale 2007/2008 a été caractérisée par un arrêt brutal des pluies au début de septembre provoquant une baisse de 16% de la production céréalière de la campagne 2006/2007 et 11% par rapport à la moyenne des cinq campagnes précédentes. Le manque à gagner a été de 2,72 millions de tonnes à raison de 4 tonnes de maïs/hectare en moyenne (Source, DSA).

Les populations sahéliennes sont les plus touchées par les conséquences de la variation climatique.

En 1995, les sahéliens ont encaissé une perte de 600000 tonnes de céréales qui équivaut à un manque à gagner d'environ 15% sur le revenu moyen. Cette perte a eu un grand impact sur la population qui depuis une quinzaine d'année avait surinvesti dans l'agriculture pluviale **(Guillaumie et al. 2004).**

Dans le village de Tougou, toujours dans le sahel, les pluies sont souvent trop espacées, avec une hauteur de 40mm alternant avec des périodes de sécheresse de 15 jours (Mandé, 2004). Les céréales souffrent de stress hydriques et les rendements sont faibles et irréguliers. En moyenne ils peuvent varier entre 300 et 1300 kg par hectare, mais il peut être nul à l'échelle d'une parcelle. Il faut souvent re-semer car le manque de pluies après le semis peut faire échouer la culture.

Tous les impacts de l'incertitude et de la variation climatique conduisent au même résultat : un déficit de la production agricole.

Une bonne maîtrise de l'eau permettra de réduire les conséquences des aléas climatiques sur la production agricole. Pour argumenter cette affirmation, nous prenons comme exemple l'enquête réalisée par une équipe de chercheurs de l'institut Zie et du Cirad. Cette étude a été réalisée sur une période de deux ans dans un petit bassin versant au Nord de Burkina Faso en vue d'explorer les stratégies d'adaptation des pays sahéliens à la baisse des rendements des récoltes, sur quelques productions agricoles. Cela a révélé que ceux qui arrivent à s'adapter sont ceux impliqués dans l'irrigation de contre saison.

Face à la variabilité des saisons, les paysans ont développé des pratiques agricoles allant dans le sens de la conservation des eaux et la restauration des terres dégradées.

Pour améliorer les rendements des cultures pluviales, et sécuriser les revenus par le même biais, la maîtrise et l'économie de l'eau à travers l'irrigation de complément est une alternative.

La présente étude vise à mener une investigation sur l'impact théorique de l'irrigation de complément sur le revenu, à partir d'un modèle bioéconomique.

Pour ce faire, le travail consistera à collecter les données agro-économiques ; concevoir le modèle bioéconomique; monter divers scénarios et simuler les impacts de l'irrigation de complément sur la production et le revenu dans une exploitation sahélienne.

II. Objectif de l'étude

L'économie de l'eau de ruissellement consistera à construire des micros bassins pour la collecte et le stockage. Ainsi, pendant les périodes de stress hydrique entre deux pluies, le paysan utilisera l'eau du micro bassin pour apporter un complément d'eau aux cultures.

Notre objectif principal est de déterminer l'impact de l'irrigation de complément sur le revenu du paysan à partir d'un modèle bioéconomique.

Plusieurs sous objectifs techniques sont visés à savoir :

- Evaluer l'impact de l'irrigation de complément sur la production agricole
- Améliorer la prise de décision des paysans.
- Développer la notion de l'économie de l'eau de ruissellement à travers l'introduction de l'irrigation de complément

III. Méthodologies

1- Choix de la zone d'étude

Il s'est porté sur le village de Tougou qui est localisé dans le nord du Burkina Faso, dans la partie Est de la province du Yatenga à environ 23 Km de Ouahigouya, dans le département de Namissiguima.

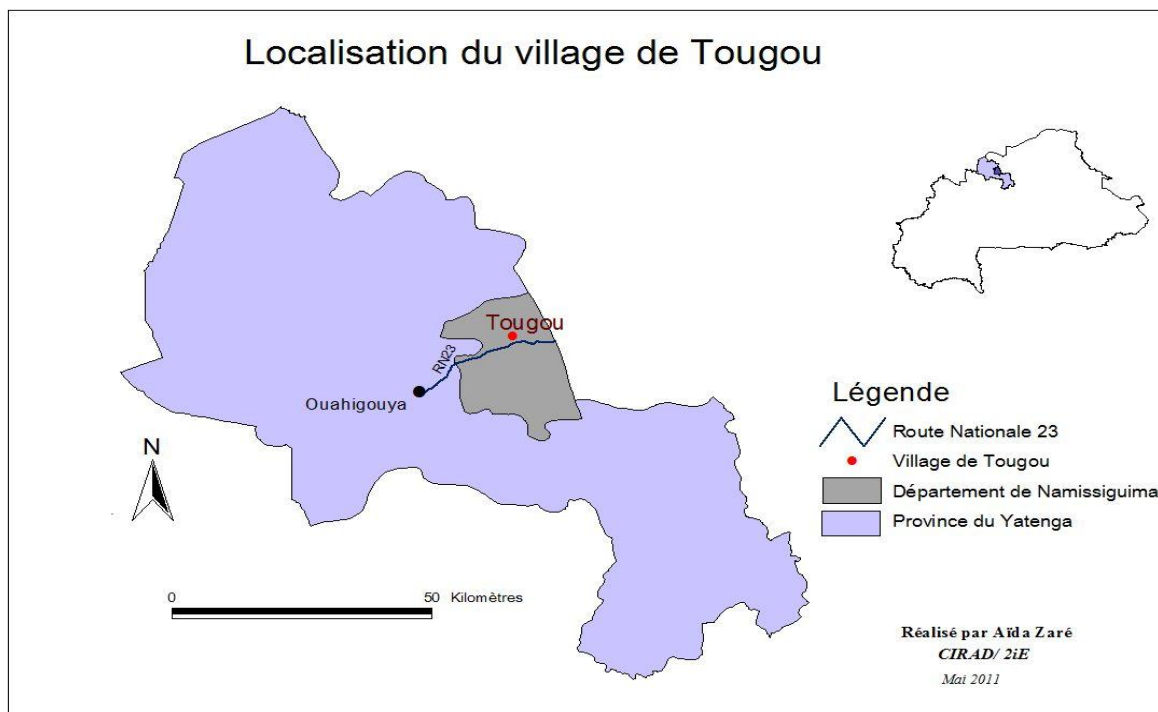


Figure 1: Localisation de Tougou

Le climat est de type sahélien avec des précipitations moyennes de 600mm. La saison pluvieuse s'étale de Juin à Septembre.

Le réseau hydrographique de la province est peu important. Le seul cours d'eau majeur, le Nakambé, est temporaire. Il faut noter l'existence de ressources en eau de surface dans le village de Tougou (la mare de BILONPONGO, la mare de SENDKATA et le barrage de Tougou). Le barrage a été conçu pour l'irrigation de 50ha aménagés, pour les besoins pastoraux ainsi que pour la pisciculture.

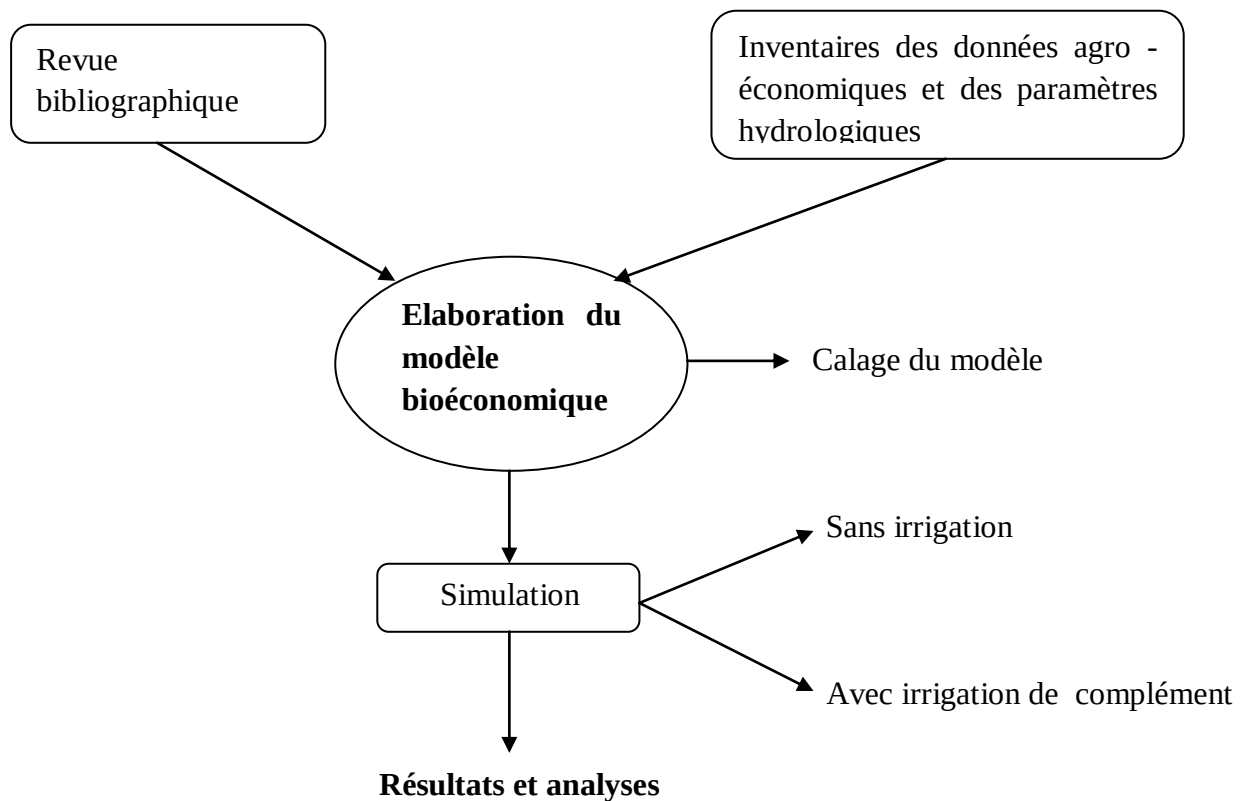
Le relief est monotone représenté par une vaste pénéplaine entrecoupée par endroit par quelques buttes et collines, puis de petites dépressions naturelles (Bunasols).

Le choix de ce site a été motivé par plusieurs raisons que sont :

- site expérimental du 2ie
- existence une base de données hydrologiques
- réalisation de plusieurs enquêtes concernant l'activité agricole.

2- La démarche méthodologique

La méthodologie s'est surtout articulée sur la revue bibliographique, l'inventaire des données, l'élaboration d'un modèle bioéconomique et la simulation de l'irrigation de complément.



3- Paramètres hydrologiques

a- Variation de l'indice pluviométrique

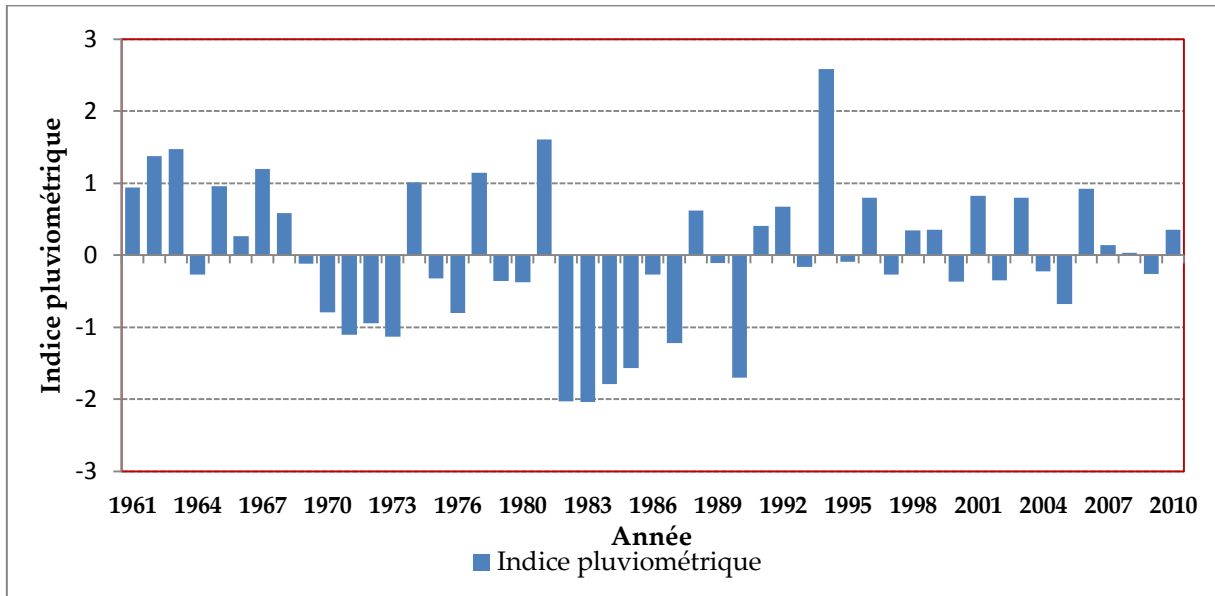


Figure 2: variation de l'indice pluviométrique à Ouahigouya

Les données pluviométriques de 1961 à 2004 ont été recueillies sur la station météorologique de Ouahigouya. Celles de 2005 à 2010 ont été recueillies sur la station météorologique de Tougou, site expérimentale du 2ie. Pour le village de Tougou, nous considérons les mêmes données pluviométriques de 1961 à 2004 de la ville Ouahigouya. Etant séparé de 23km, on peut supposer les mêmes similitudes au niveau des scénarios climatiques.

La pluviométrie moyenne calculée est de 625mm. Pour tenir compte de tous les scénarios climatiques possibles, 4 types de saisons supplémentaires ont été définis.

Les 5 types d'années climatiques sont :

- très sèche : $P < 450\text{mm}$
- sèche : $450 < P < 550\text{mm}$
- moyenne : $550 < P < 650\text{mm}$
- humide : $650 < P < 750\text{mm}$
- très humide : $P > 750\text{mm}$

L'analyse de la variation de l'indice pluviométrique de 1961 à 2010 montre des séquences climatiques humides (ex : 1961-1963, 1965-1968), sèches (1969-1973, 1981-1986) et des années moyennes (1988, 2007, 2008). Il y'a des années très humides comme celle de 1993 et des années très sèches comme celles 1981 et 1982.

Selon les types de saisons, la probabilité d'occurrence varie. En considérant l'approche du PRESAO sur la prévision climatique, nous retenons dans le cadre de ce travail les probabilités d'apparition suivantes :

Probabilité (s) = $1/6$ avec $S \in \{\text{très humide, humide, très sèche, sèche}\}$

Probabilité (saison moyenne) = $1/3$

b- La campagne agricole

Pour déterminer la durée de la campagne agricole, nous allons utiliser la courbe évènementielle de Pierre Franquin (1968), agrométéorologiste de l'ORSTOM. Il s'agira tout d'abord de représenter sur un même graphique la courbe des données pluviométriques mensuelles, ensuite celle de l'ETP mensuelle et enfin la courbe de l'ETP mensuelle/ 2.

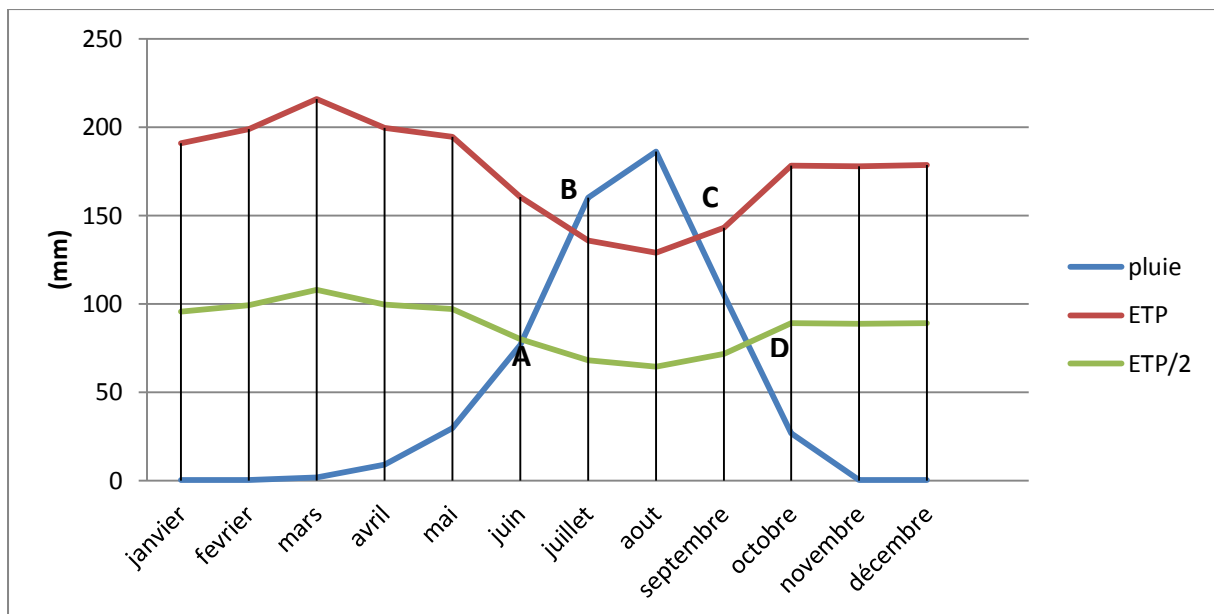


Figure 3: courbe évènementielle de Pierre Franquin

La méthode d'analyse agro-climatique proposée par Pierre Franquin en zone tropicale (1968) permet de caractériser les périodes suivantes :

- La période précédant A ($P < 1/2ETP$) est la période de la préparation du sol
- AB ($P > 1/2ETP$) : période pré humide (juin), elle correspond à la période des semis. C'est la période où le sol reconstitue son stock d'eau utile.
- BC ($P > ETP$) : période humide, les besoins en eau des cultures en état de végétation active peuvent en principe être satisfaits.

- Période après C ($P < ETP$) c'est l'instant où les pluies ne couvrent pas entièrement les besoins en eau des cultures.

La campagne agricole débute donc en début juin et s'achève en mi Septembre. Dans le modèle nous utiliserons les décades comme pas de temps.

c- Le bilan hydrique

Il exprime la conservation, entre deux dates quelconques, de la masse d'eau présente dans le système sol/plante/atmosphère. Cette eau est répartie entre l'eau stockée dans le sol et la plante d'une part, et les flux entrant et sortant de cette réserve d'autre part. Les apports d'eau sont dus aux précipitations et/ ou à l'irrigation. Une partie de ces apports pénètre dans le sol par infiltration, le reste s'accumule temporairement en surface ou ruisselle. En sens inverse, l'eau retourne à l'atmosphère par évaporation soit directement depuis la surface du sol, soit par le biais de la transpiration des végétaux. La distinction entre ces deux termes étant souvent difficile, ils sont généralement regroupés sous le terme évapotranspiration.

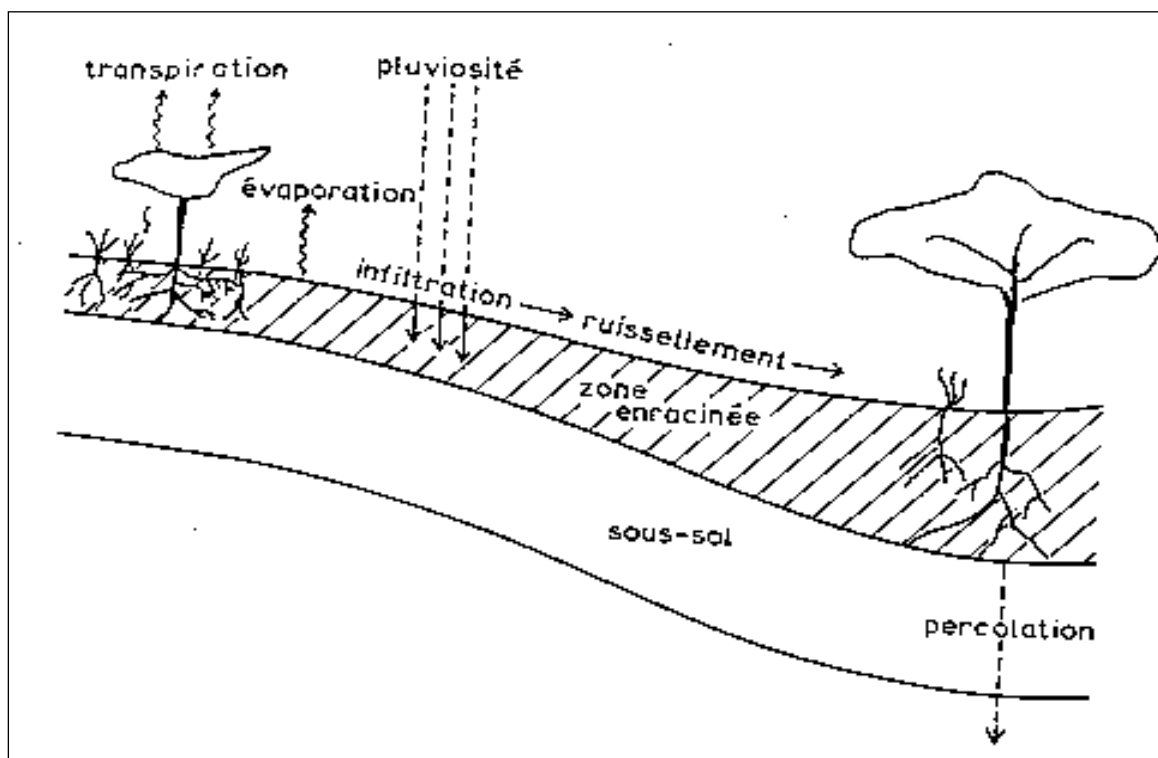


Figure 4: bilan hydrique à l'échelle de la parcelle

Variation du stock d'eau du sol (source : mémento de l'agronome) :

La variation de stock entre deux dates est égale au bilan de ces flux, selon l'équation :

$\Delta S = P + I - E - T - D - R$, où :

P = précipitations reçues entre les deux dates ;

I = irrigations ;

ETP = évapotranspiration (évaporation du sol+ transpiration des plantes) ;

D = drainage sous la zone de sol exploitée par la culture (percolation) ;

R = pertes en eau par ruissellement de surface ;

ΔS : variation du stock d'eau du sol (aux échelles pertinentes pour l'analyse des systèmes de culture, les variations de stock dans les plantes sont négligeables).

NB : par l'estimation de l'ETP corrigé à l'aide d'un coefficient cultural caractéristique d'un type de culture à un stade physiologique donné, on peut obtenir une estimation des besoins en eau de la culture (évapotranspiration réelle(ETR)).

Les plantes exploitent l'eau du sol entre deux valeurs de S, qui définissent la réserve utile :

- celle où le sol est à la teneur en eau en dessous de laquelle la culture ne parvient plus à transpirer et dite teneur en eau au point de flétrissement hpf
- celle où le sol est à sa teneur en eau maximale au-delà de laquelle l'eau s'écoule par gravité, dite capacité au champ hcr.

La réserve utile des sols est très variable. La profondeur de sol colonisable par les racines et la texture du sol sont des facteurs pouvant limiter la réserve utile

La réserve utile utilisable par la plante est la valeur obtenue lorsque hcr et hpf sont évalués entre la surface et la cote maximale (z) atteinte par les racines pour la culture considérée puis la densité apparente (da) du sol.

$$RU = (hcr - hpf) * z * da$$

4- Les paramètres physiques

Les paramètres physiques considérés représentent les différentes unités morphopédologiques. L'analyse de ces unités permet de définir les différents types de sol dans le village de Tougou.

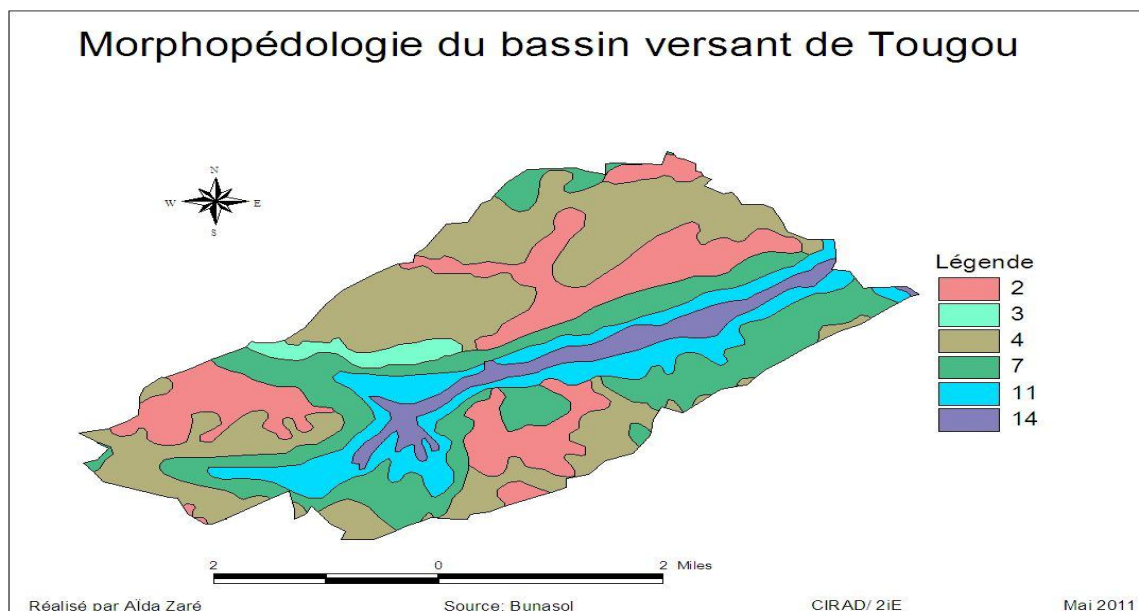


Figure 5: morphopédologie de Tougou

Tableau 1:légende détaillée de BUNASOL

Géomorphologie		Unité
Relief résiduel	Buttes cuirassées	2
	Plateaux cuirassés	3
Surface fonctionnelle	Glacis pente supérieure ou marginale	4
	Glacis pente moyenne	7
	Glacis pente inférieure	11
Ensemble fluvio-alluvial	lits mineurs et lits majeurs (bas fonds)	14

On considèrera 4 types de sol :

- les bas fonds (o1) : ce sont des sols hydromorphes, en association avec les sols ferrugineux. Ce sont les sols les plus profonds. C'est une zone d'épandage des eaux et de ravinement.
- glakis (o2) : les sols sont constitués en grande majorité de sols ferrugineux lessivés, et brunifiés.
- les marginaux (o3) : sont constitués de sols peu évolués, développés sur matériaux détritiques associés localement à des sols ferrugineux tropicaux indurés. Les sols ne sont pas très épais.
- les parcours : constitué par les buttes et collines cuirassées du relief résiduel.

Le modèle ne tiendra pas compte des parcours car ce sont des sols difficiles à travailler et improductifs.

5- Synthèse des données agro-économiques

Les types de cultures pluviales possibles (c) dans l'exploitation sont: le sorgho, le maïs pluvial, le maïs irrigué (mair), et le mil. Leurs rendements dépendent du type de saison et de sol. Les données recueillies sur les rendements moyens et les prix de vente des cultures proviennent de la base données en ligne de l'AGRISTAT. Les cultures nécessitent un besoin minimum en capital pour leur production.

Tableau 2: données agro-économiques

Cultures	Rendement (kg/ha)	Coût production (FCFA/ha)	Prix de vente en FCFA
Maïs	1300	20000	120
Mil	700	2000	130
Sorgho	800	0	120
Maïs irrigué	2500	100000	120

6- Elaboration du modèle bioéconomique

Le modèle est élaboré avec des outils de la programmation linéaire et dans le langage GAM'S (système de modélisation algébrique général). La programmation linéaire cherche à représenter une situation réelle par un modèle mathématique, puis à identifier les meilleures décisions dans le modèle en espérant qu'elles seront aussi les meilleures dans la réalité. La situation est modélisée par des contraintes, dont le but est de déterminer le domaine du possible. Usuellement, les décisions sont évaluées à l'aide de fonctions dites « objectifs » de type économique. On se ramène donc à trouver le maximum d'une fonction objectif parmi les solutions qui respectent les contraintes.

Par ailleurs, le principe de la bioéconomie est fondé sur l'observation d'un organisme vivant et de ses interactions avec le milieu environnant.

Dans notre modèle on s'intéressera à la relation qu'il y'a entre la ressource eau, le rendement des cultures et le revenu des populations.

Pour cette étude, le choix est fait pour une exploitation représentative moyenne de Tougou.

a- Fonction objectif

Elle maximise le revenu de l'exploitation et elle est traduite par la fonction suivante :

$Z =$

prb (s): probabilité d'occurrence des saisons

$R(s)$

$R(s)$: revenue total, $X(c, o)$: surface des cultures en ha ; $VENT(c, o, s)$: vente en kg ; $JSAL(p)$: journée de salarié, $CRED$: crédit en Fcfa ; $LOC(o)$: location de terre en ha ; ASS : assurance contre le risque ; $BASS$: volume du bassin en m^3 ; $ACHAT$: achat en kg ; IRR : l'eau d'irrigation en m^3 ; prx : prix en FCFA/ kg ; bc : besoin en capital en FCFA ; $salj$: salaire journalier en FCFA ; ti : taux d'intérêt ; ter : prix d'un hectare de terre en FCFA ; $fass$:

fréquence du risque ; pbass : le coût du bassin en FCFA/ m³ ; pac : prix d'achat en FCFA/
kg ; cirr : coût de l'irrigation

b- Les contraintes

Les contraintes représentent les ressources de l'exploitation.

✓ La terre

La somme des superficies emblavée plus la surface occupée par les mini bassins doit être inférieure à la somme de la superficie totale disponible et de la terre louée.

SURF (o) : surface occupée par le mini bassin en ha ; bter (c, p, o) : besoin en terre ; ter (o) : terre totale disponible en ha

✓ Le travail

La somme du besoin en travail de chaque spéculation doit être égale à la main d'œuvre disponible (familiale plus salarié).

bw (c, p): besoin en travail ; mod : jour de main d'œuvre disponible
Actif: tranche de la population active (Population/2)

✓ Le capital

La somme des besoins en capitaux de toutes les superficies emblavée doit être égale au capital disponible (ressources financières des familles plus crédit).

➤ **L'aversion au risque**

En cas de sécheresse extrême, le revenu minimum doit être supérieur à un revenu minimum.

R ('s2'): revenue de la saison sèche

✓ **La production**

La vente et l'autoconsommation ne peuvent pas excéder la production totale

$$= \text{AUTO}(c, o, s) + \text{VENT}(c, o, s)$$

DEF: deficit hydrique

id: indice du déficit hydrique (d'après les études de P. Fox à Tougou, l'indice de déficit hydrique est en moyenne 0,3).

✓ **L'eau**

-le besoin en eau des plantes (BES)

$$* kc(c) * 10 * X(c, o) < \text{BES}(c, p, o)$$

-la capacité de stockage du sol

$$\text{RU}(c, p, o) < (\text{hcr}(o) - \text{hpf}(o)) * da(o) * z(c) * 10 * X(c, o) * \text{RFU}$$

RFU : réserve facilement utilisable (2/3)

-l'eau stockée dans le sol et disponible pour la plante

$$. \text{ES}(c, p, o, s) < \text{eva2}(p) * \text{ES}(c, p-1, o, s) + \text{INFI}(c, p, o, s) + \text{IRR}(c, p, o, s) - \text{BES}(c, p, o) - \text{PER}(c, p, o, s) + \text{DEF}(c, p, o, s)$$

Eva2: fraction d'eau évaporée

$$. \text{INFI}(c, p, o, s) = (\text{pl}(p, s) - \text{rui1}(p, s)) * 10 * X(c, o) + \text{IRR}(c, p, o, s) ; \text{c'est la quantité d'eau infiltrée en m}^3.$$

$$. \text{PER}(c, p, o, s) + \text{INFI}(c, p, o, s) < \text{RU}(c, p, o) ; \text{c'est la quantité d'eau percolée en m}^3.$$

-la quantité d'eau contenue dans le sol ne peut excéder la capacité totale du sol à stocker l'eau

$$\text{ES}(c, p, o, s) < \text{RU}(c, p, o)$$

-le micro bassin

. $EAU(p, s) < BASS(o)$

. : c'est la
quantité d'eau contenue dans le micro bassin

. La quantité d'eau ruisselée dans le bassin ne peut être supérieure à la quantité d'eau ruisselée
sur le bassin versant :

$RUIS(p, s) < rui1(p, s) * 100$

. Le ruissellement en m^3 d'eau qui remplit le bassin doit être inférieur au volume du bassin

7- Validation du modèle

L'objectif principal de cette étape est de vérifier que le modèle reproduit bien la situation actuelle avant de simuler les impacts de l'introduction de l'irrigation de complément dans l'exploitation. Pour se faire, nous avons réalisé une petite enquête avec un agriculteur moyen de Tougou (Issa Traoré). Sans optimisation, on remarque un complément d'achat de céréales quelque soit le type d'année climatique. La quantité varie et est d'autant plus grande en année très sèche et sèche.

Sur le terrain, la production de Mr Traoré couvre les besoins alimentaires pendant 3mois en année très sèche, 5mois en année sèche, 6mois en année moyenne et 7mois en années humide et très humides. Pour couvrir les besoins alimentaire de sa famille, il a recourt à l'achat des céréales. Les résultats du modèle corroborent donc les dires d'Issa Traoré.

IV. LES RESULTATS

L'élaboration et la validation du modèle va permettre de simuler deux scénarios. Le scénario de base optimisera le revenu de l'exploitant sans l'introduction de l'irrigation de complément. Le second scénario consistera à optimiser le revenu de l'exploitant avec l'introduction de l'irrigation. On verra ainsi l'évolution du déficit hydrique, de la production, du revenu, et l'allocation optimale des terres dans les deux cas.

1- Scénario de base : absence de l'irrigation de complément

1.1. Allocation optimale des superficies

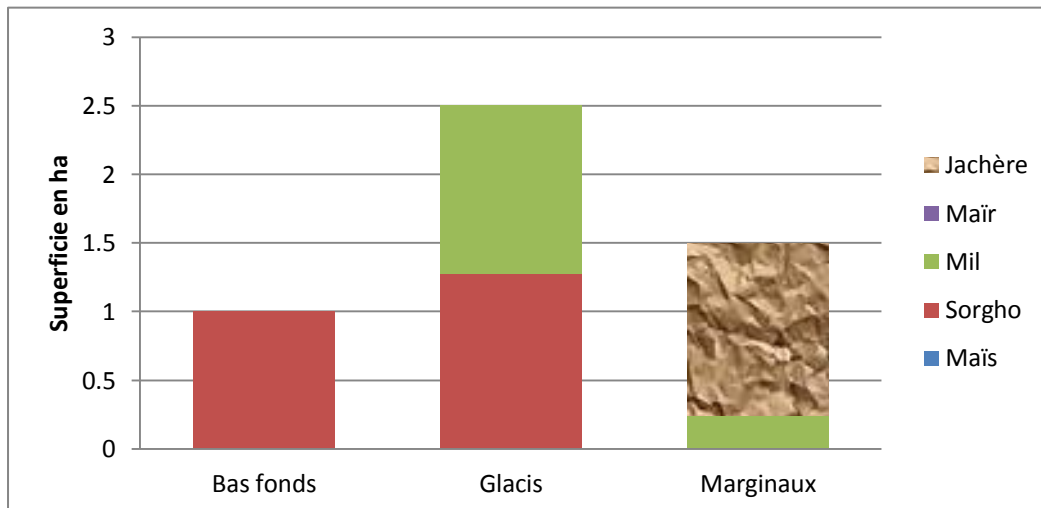


Figure 6: superficie emblavée des cultures

En absence d'irrigation, les superficies sont mises en valeur par la culture du mil et du sorgho. Les sols marginaux ne sont pas totalement exploités à cause de la contrainte de travail. La main d'œuvre disponible n'est pas suffisante pour exploiter la totalité des marginaux.

1.2. Evolution du déficit hydrique

➤ Le sorgho

- Déficit hydrique dans les bas fonds

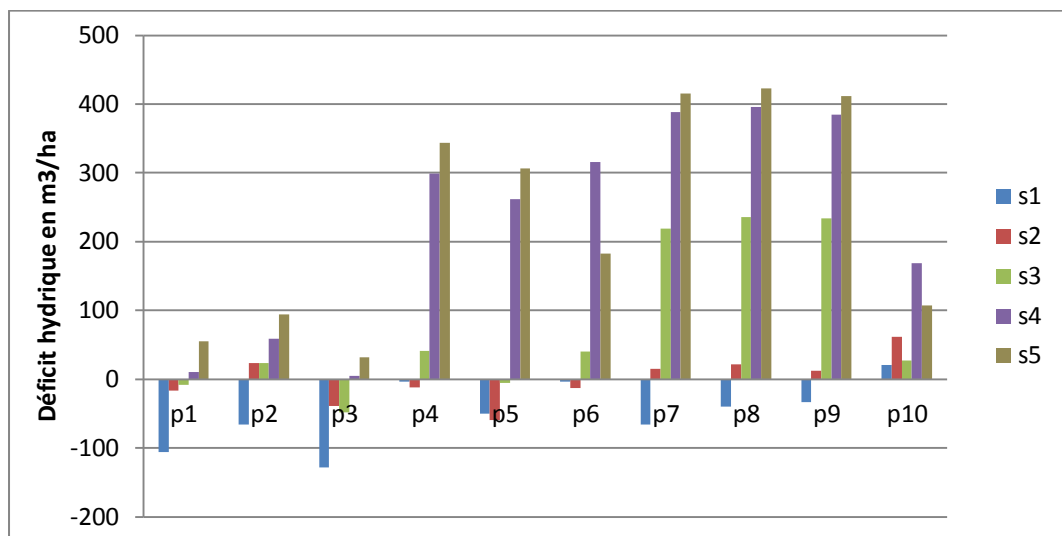


Figure 7: déficit hydrique par type de saison dans les bas fonds

Les besoins en eau du sorgho ne sont pas satisfaits sur 7 décades en saison très sèche et 3 en saison sèche. En année moyenne, on observe un déficit en p1 et p3 uniquement. Les besoins en eau du sorgho sont entièrement satisfaits en années humide et très humide.

- Déficit sur les glacis

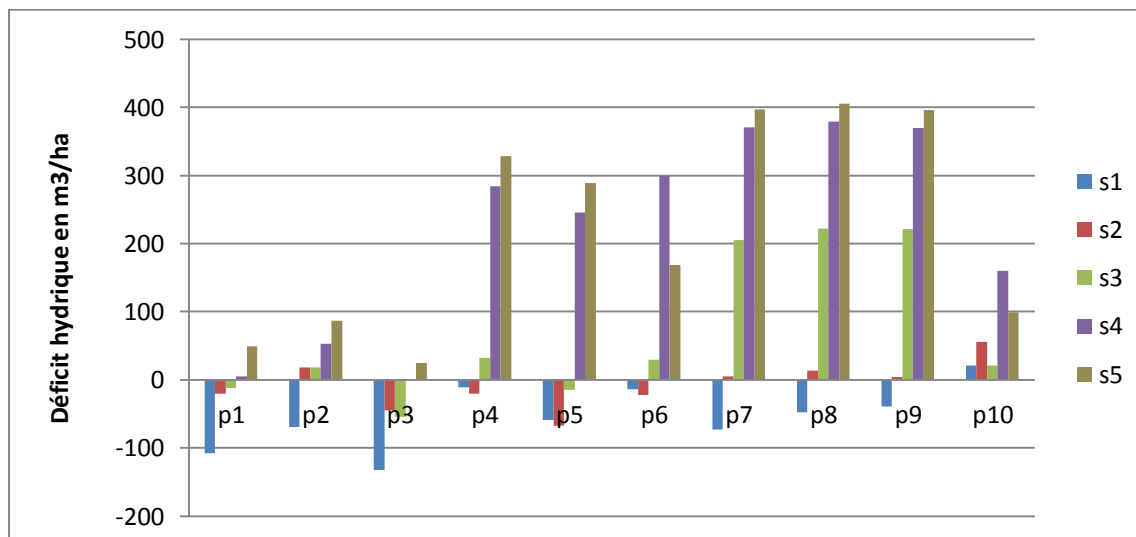


Figure 8: déficit hydrique du sorgho au niveau des glacis

Au niveau des glacis, on observe un déficit sur 8 décades en s1, sur 5 en s2, sur 3 en s3 et sur une décade en année humide. Les besoins sont entièrement satisfaits en s5.

➤ Le mil

- Déficit sur les glacis

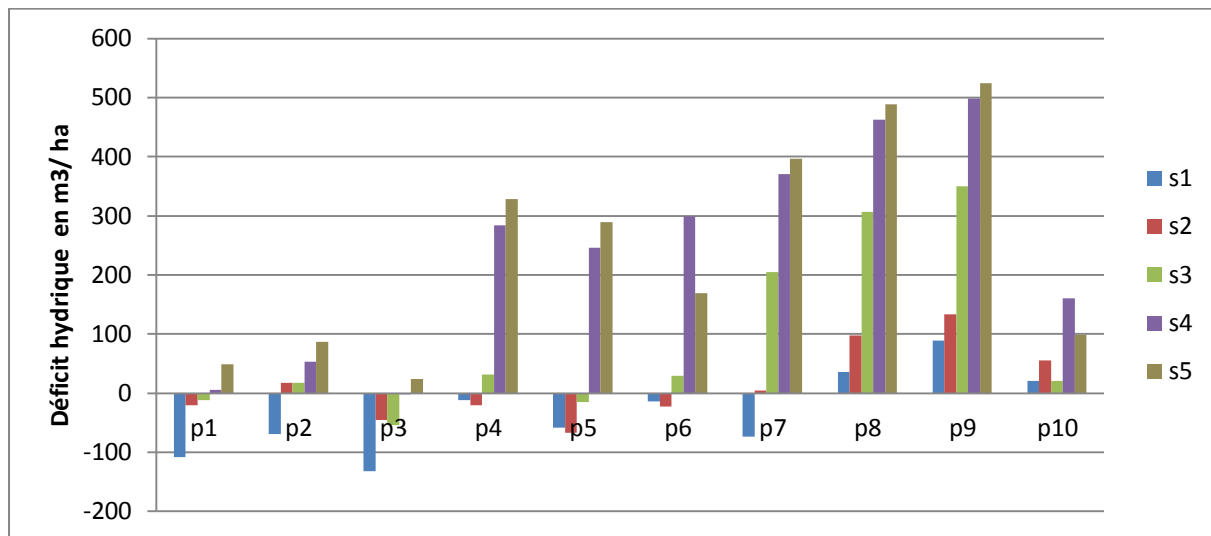


Figure 9: déficit hydrique du mil sur les glacis

Les besoins en eau du mil sur les glacis sont couverts par la pluie en s4 et s5. On observe un déficit sur les 7ième décades en s1. Sur 10 périodes, les besoins en eau du mil sont couverts sur 5 périodes en année s2 et sur 7 en s3.

- Déficit sur les terres marginales

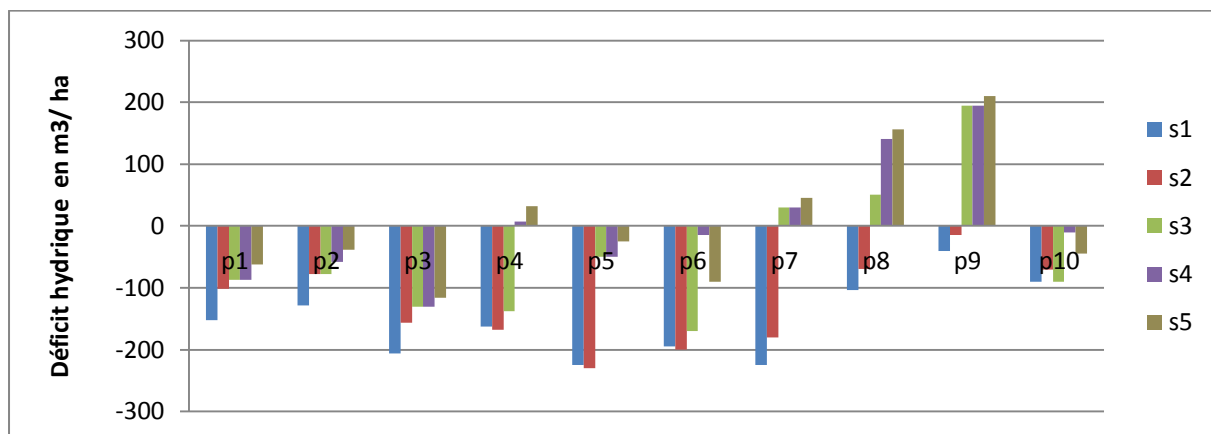


Figure 10: déficit hydrique du mil sur les sols marginaux

Sur les marginaux on observe en générale un déficit hydrique au niveau de toutes les saisons. Cela s'explique par le ruissellement qui est élevé sur ces sols du fait de leur état dégradé. En plus, ils ont une faible capacité de rétention de l'eau.

Le surplus d'eau qui s'observe dans tous les cas représente la fraction d'eau qui va percoler.

1.3. La production

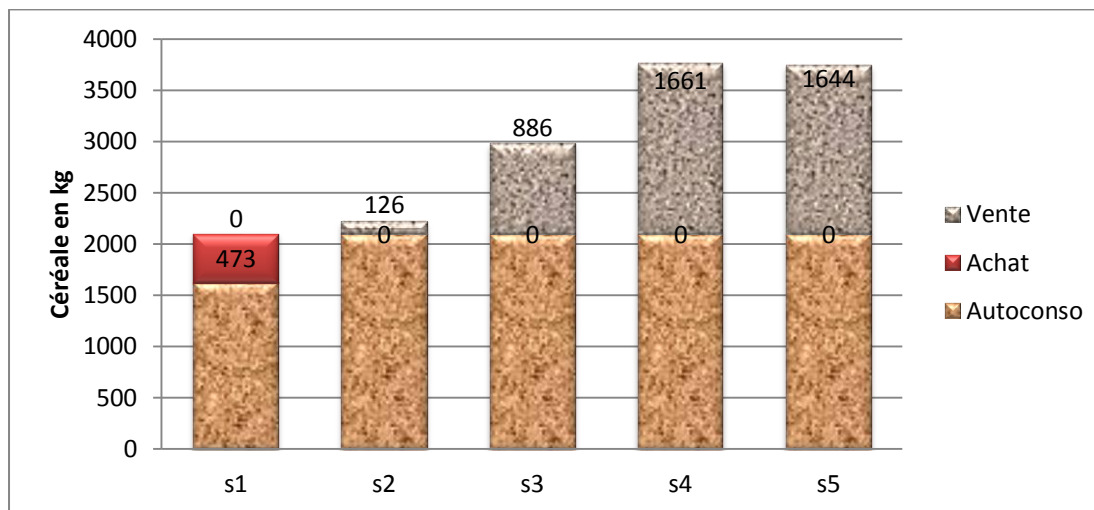


Figure 11: production céréalières suivant les types d'années

Le fort déficit hydrique des années très sèches provoque un achat de céréales de 473kg comme complément et cela pour couvrir les besoins alimentaires annuels. Les productions des autres années, entraîne une autosuffisance alimentaire qui annule l'achat des céréales. Le surplus est vendu et cela génère un revenu qui est fonction de la marge du surplus.

1.4. Le revenu

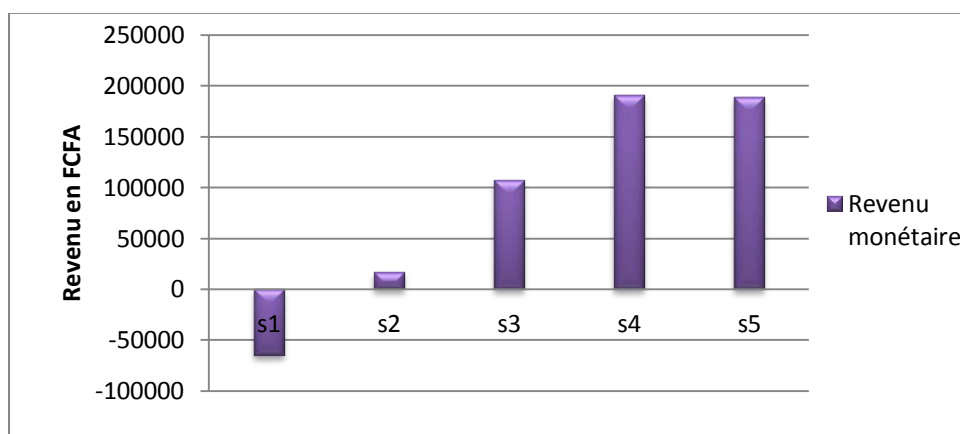


Figure 12: revenu monétaire du producteur suivant les types de saison

La quantité de céréales achetée entraîne un solde négatif en année très sèche. La recherche de l'autosatisfaction alimentaire fait que la contrainte du risque n'influence pas le revenu final. Le surplus de la production des bonnes années entraîne un revenu positif qui est proportionnel à la fraction de céréale vendue.

1.5.Valeur marginale de l'eau

La valeur marginale de l'eau est de 2500 F CFA/m³. La réalisation d'un bassin de récupération de l'eau de ruissellement pourra améliorer le revenu de 2500 F CFA/m³.

2- Introduction de l'irrigation de complément

2.1.Allocation optimale des terres

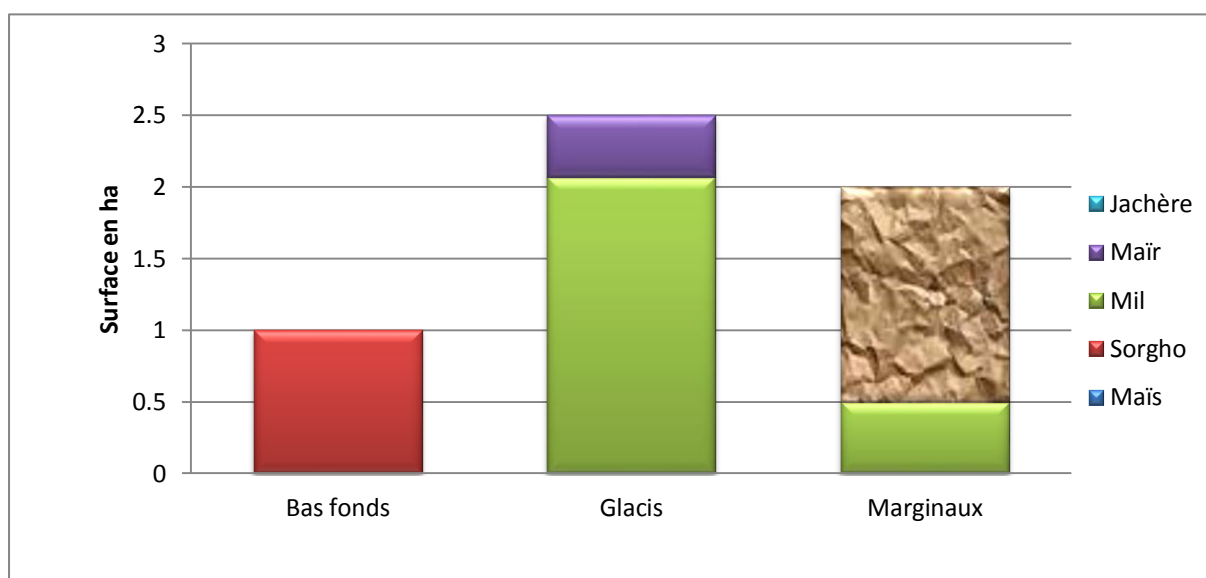


Figure 13: allocation optimale des terres avec l'introduction de l'irrigation de complément

Comme dans le scénario de base, la culture du sorgho occupe la totalité des bas fonds. Sur les glacis, on observe une redistribution des terres due à la culture du maïs irrigué. Les 4/5 des terres marginales sont occupées par le mil et les 1/5 par le maïs irrigué. Le travail demeure toujours limitant et on a seulement 1/3 des marginaux qui sont mis en valeur par la culture du mil et les 2/3 par la jachère.

2.2.Le rôle de l'irrigation de complément dans l'introduction de la culture du maïs

➤ **L'évolution du besoin en eau du maïs et de l'apport des pluies en années sèches et moyenne en absence d'irrigation**

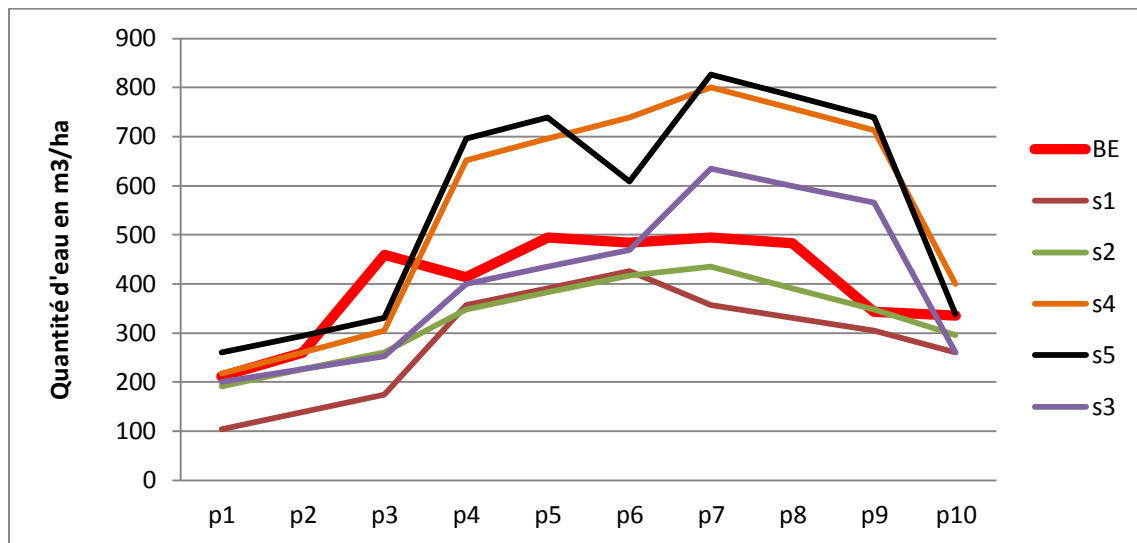


Figure 14: évolution de la demande et de l'offre en eau du maïs sans irrigation

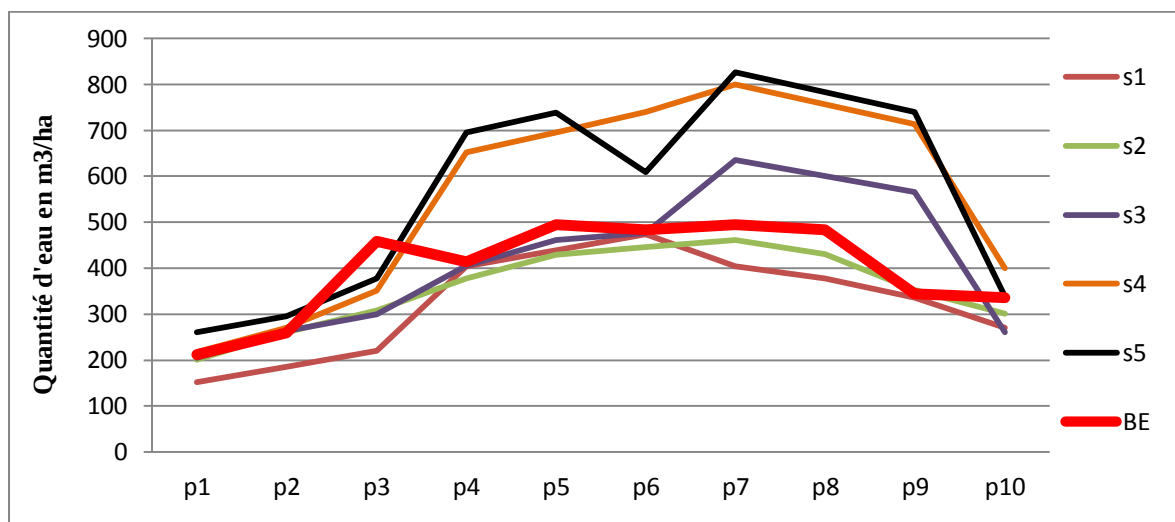


Figure 15: évolution de la demande et de l'apport d'eau en présence d'irrigation

En absence d'irrigation, l'analyse de la demande en eau du maïs montre que la pluie efficace ne couvre en aucune période les besoins en eau du maïs en années sèches. En année moyenne la demande d'eau n'est couverte qu'à partir de la sixième période. Pendant les années humides, deux périodes (p2-p3) de stress hydrique sont observées.

Le maïs étant très sensible au manque d'eau, sa culture n'est pas pratiquée en absence d'irrigation à cause des pertes de production que les stress hydriques peuvent causer.

Avec l'introduction de l'irrigation, le supplément d'eau apporter aux cultures réduits le déficit hydrique au niveau de toutes les années.

2.3.La production

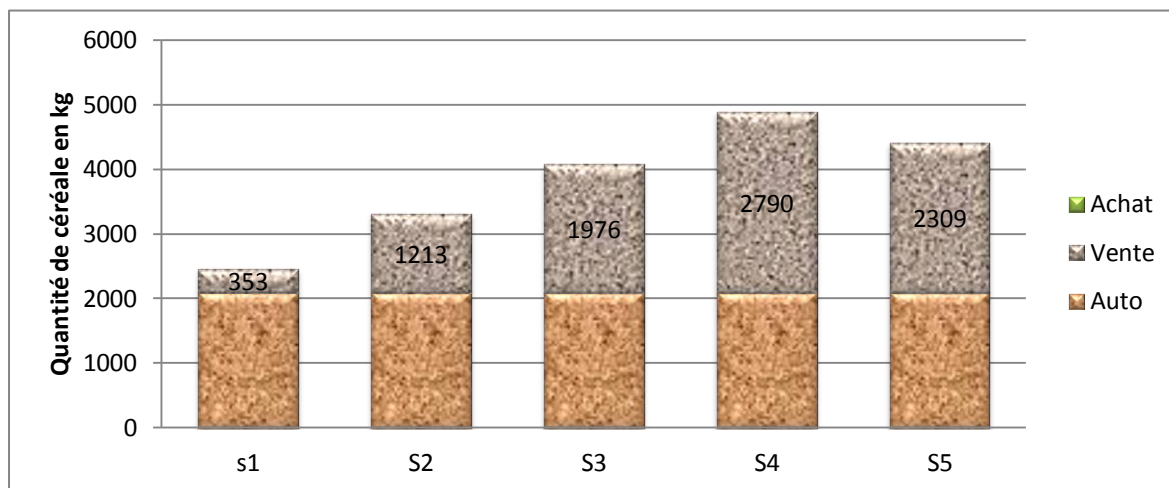


Figure 16: production céréalière avec introduction de l'irrigation de complément

Quelque soit les années, la production céréalière est suffisante pour couvrir les besoins annuels sur le plan alimentaire. Même, les mauvaises années il y'a génération de surplus de production qui est vendu.

2.4.La valeur marginale de la ressource terre

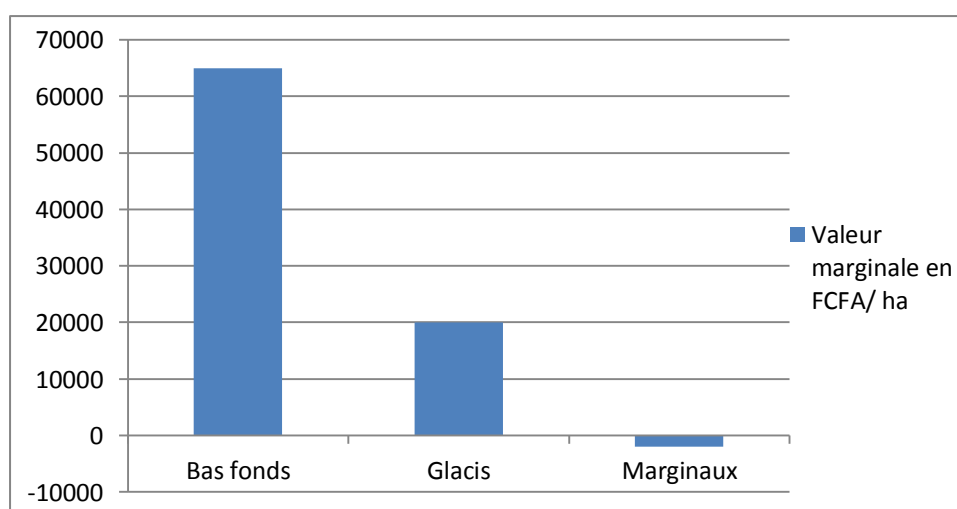


Figure 17: valeur marginale de la contrainte terre

Le coût d'opportunité le plus élevé s'observe au niveau des bas fonds, suivi des glacis. La location ou l'acquisition des terres de bas fonds favorisera un gain de 60000 F CFA/ ha et de 20000F CFA/ha pour les terres de glacis. Les marginaux présentent une valeur marginale négative, cela équivaut à dire que l'acquisition d'un ha de terre marginale favorisera une perte de 1900 F CFA sur le revenu. Les terres marginales ne sont donc pas rentables.

2.5.Le revenu

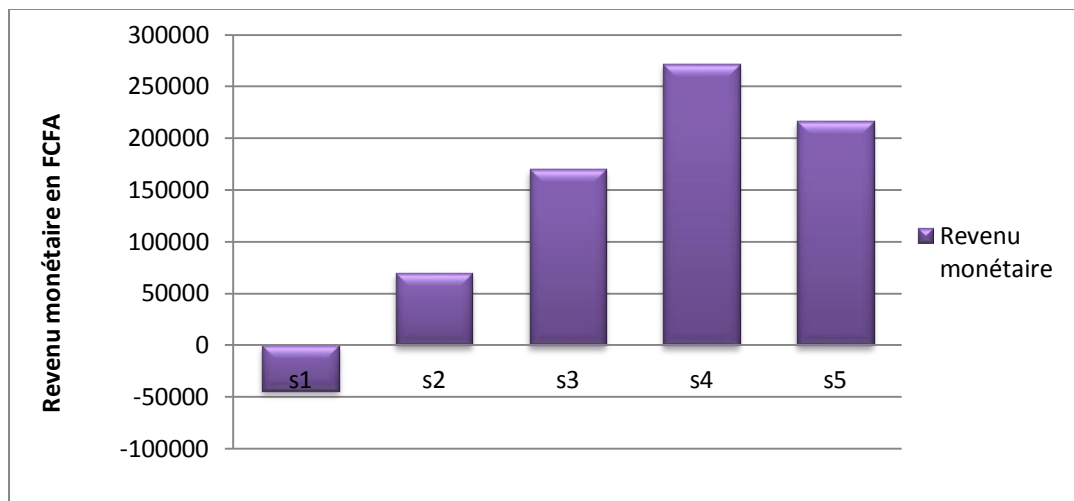


Figure 18: revenu monétaire en présence d'irrigation

Le revenu monétaire est négatif en saison très sèche et cela en dépit de la vente de surplus de céréale. Evaluons donc l'impact de la réalisation du bassin sur le revenu.

Le coût d'un bassin de 50m³ est d'environ 100.000 FCFA. En supposant une période d'amortissement de 3ans, le coût du bassin s'élèvera à 33.333FCFA/ an soit 600 FCFA par m³. On fixe un coût aléatoire de 20FCFA/ m3 d'irrigation.

Tableau 3:impact de l'irrigation de complément sur le revenu

	s1	s2	s3	s4	s5
Revenu issu de la vente de céréales (FCFA)	43000	152500	223200	350000	252000
Dépense liée au micro bassin et à l'irrigation (FCFA)	87000	82500	53200	80000	37000

Le revenu des années s1 et s2 sont négatifs alors que sa production lui occasionne un surplus à revendre. Cela est du au fait que le coût lié à l'irrigation, et à la réalisation du micro bassin est supérieure au revenu que peut apporter la vente pendant ces saisons. Ce coût varie suivant les

années et cela s'explique par le fait que la quantité d'eau pour l'irrigation varie suivant les années. La fraction élevée de céréales vendue des autres années, occasionne un revenu qui couvre entièrement les dépenses liées à la réalisation du micro-bassin.

Après les 3ans succédant la mise en place du système d'irrigation, le revenu se verra exempté des investissements.

V. Discussion

Impact de l'irrigation de complément sur l'allocation des terres

L'irrigation de complément favorise la redistribution de l'allocation des terres avec la disparition de la culture du sorgho sur les glakis et l'introduction de la culture du maïs sur 0, 43 ha sur les mêmes sols. L'irrigation de complément réduit le déficit hydrique de 27% sous le maïs. C'est cela qui entraîne l'apparition de la culture du maïs. La contrainte de travail empêche l'exploitation totale des terres marginales.

Impact de l'irrigation de complément sur la production

Avec l'irrigation de complément, on constate une autosubsistance de l'exploitant et cela quelque soit le type d'année.

Tableau 4: comparaison de la production céréalière en présence et en absence d'irrigation de complément

Type d'année	Production totale de céréale en kg en absence d'irrigation	Production totale de céréale avec irrigation (kg)	Surplus de production observé avec de irrigation (kg)
S1	1627	2453	826
S2	2226	3313	1087
S3	2986	4076	1090
S4	3761	4890	1129
S5	3744	4409	665

La production céréalière est améliorée à 17% environs de s1 à s4 et de 8% en années très humides. Il faut dire qu'avec le surplus d'eau généralement observé en saison très humide, l'irrigation de complément n'est pas rentable au même titre que les autres années. Cette amélioration générale induit une autosuffisance alimentaire de l'exploitant et lui génère un revenu minimum issu de la vente du surplus de production en toute année.

Impact de l'irrigation de complément sur le revenu monétaire

On observe un revenu amélioré de 40% en année très sèche, de 80% en année sèche, et d'environ 57% les autres années pendant la période d'amortissement. La période

d'amortissement passée, on observera une amélioration de 190% et de 89% en année sèche. Les autres années, l'amélioration est d'environ 63%.

VI. Recommandations

Les recommandations vont s'articuler tout d'abord sur les périodes d'irrigation, ensuite sur le système d'irrigation. Pour terminer nous aborderons les autres techniques de rétention et d'économie de l'eau.

1- Les périodes d'irrigation

Selon les années, l'analyse du déficit hydrique sous les différentes cultures a permis de déceler les périodes critiques. L'irrigation doit être axée au niveau des différentes périodes où le déficit hydrique a été décelé. On a ainsi :

- année très sèche et sèche: l'irrigation du maïs doit se faire de la première à la dixième période.
- année moyenne : l'irrigation doit être axée de la deuxième à la sixième période. A la maturation (dixième période), un complément d'eau doit être également apporté aux cultures par irrigation.
- année très humide et humide : l'irrigation doit être axée sur la deuxième et la troisième période uniquement.

2- le système d'irrigation

Aperçu sur les méthodes d'irrigation :

Suivant la technicité du paysan (mécanisation des travaux cultureux) et sa capacité d'investissement (coûts du matériel d'irrigation), les apports d'eau complémentaires peuvent être distribués aux cultures par l'une des trois méthodes suivantes :

- Irrigation gravitaire qui consiste à apporter l'eau aux plantes par un système de canalisation permettant de « laisser couler l'eau d'un lieu plus haut que le jardin vers un autre situé plus

bas en le traversant » en vue d'assurer l'infiltration correcte d'une partie de l'eau dans le sol selon les besoins des plantes

- Irrigation par aspersion qui consiste à apporter aux plantes le complément d'eau nécessaire par le haut sous forme de pluie artificielle grâce à un système ayant des gicleurs destinés à projeter dans l'air l'eau arrivant sous pression
- Irrigation par « goutte à goutte » qui consiste à apporter aux plantes la quantité d'eau nécessaire par un écoulement au goutte à goutte exactement aux pieds des plantes.

De ces différentes méthodes, nous recommandons le système d'irrigation à motricité humaine. Le système d'irrigation à motricité humaine permet d'assurer une irrigation de type gravitaire selon différentes variantes qui se différencient par les combinaisons possibles de la source d'eau, du réseau d'alimentation d'eau et de stockage, du réseau de distribution de l'eau aux plantes :

- type de pompe : pompe manuelle, pompe à pédale
- selon le mode de stockage : bassin, réservoir
- selon le réseau de distribution de l'eau aux plantes : conduite en tube (PVC, Galva, plastique) conduite en terre, canalisations en terre.

3- Les autres techniques de l'économie de l'eau

On peut associer d'autre technique de conservation des eaux à l'irrigation e complément. Ces techniques permettent aussi de valoriser les terre d'où la notion de techniques de conservation des eaux et des sols. Ces différentes techniques sont :

- Le Zai (Moore) est une forme de culture en poquet qui permet de concentrer l'eau dans des micros bassins où les graines seront semées. Pendant la saison sèche les trous sont creusés en quinconce à la daba (Zaï manuelle) ou à l'aide d'un tracteur (Zaï mécanisé). La terre ainsi retirée est déposée en croissant en aval des trous, la rugosité de la surface est ainsi améliorée : le ruissellement, la vitesse du vent et donc l'érosion sont limités.
- Les demi-lunes: c'est à peu près des Zaï mais agrandi avec une profondeur de 30 à 40 cm. Ils sont constitués d'un bassin de réception et d'un impluvium. La récolte d'eau tombe dans l'impluvium.

- Les diguettes : on distingue les diguettes en terre ou talus de terre, les diguettes filtrantes en pierres. Elles permettent de freiner la vitesse des eaux de ruissellement ; Favoriser l'infiltration au maximum de ces eaux dans le sol et d'améliorer ainsi le bilan hydrique du sol. Permettre l'évacuation des eaux excédentaires; favoriser le dépôt de graines, de terres fines et des matières organiques entraînées par le vent et les eaux de ruissellement.
- Les cordons pierreux : c'est un alignement et une superposition des pierres les unes sur les autres et les unes après les autres. Il y'a un effet infiltrant et un dépôt d'éléments grossiers en amont.
- Le paillage : Il consiste à recouvrir le sol d'une couche d'herbes ou de branchages ou encore de résidus culturels (tiges de mil ou de sorgho) de façon à stimuler l'activité des termites. Au fil du temps, la paille se décompose et devient de l'humus, il en résulte un ameublissement du sol et une augmentation de sa porosité qui permettent une meilleure infiltration de l'eau. Cette technique permet au sol de garder plus longtemps l'humidité, même lorsque les pluies sont faibles. Le paillage favorise aussi la fertilité en améliorant la couche superficielle du sol qui s'enrichit en matières organiques.
- Labour et culture en courbe de niveau : il s'agit d'une technique par laquelle on oriente le labour perpendiculairement à la pente. Elle augmente la porosité du sol, diminue le ruissellement, les dégâts de l'érosion hydrique, ralentit la vitesse de l'eau et augmente son infiltration dans le sol.
- Le sous solage : il consiste à ameublir les couches profondes du sol au moyen d'outils à dents (sous- souleuse) qui peuvent pénétrer dans le sol à une profondeur de 60 à 100cm. Il favorise l'infiltration de l'eau de pluie et la pénétration des racines en brisant les horizons de sol compacts ou encroûtés. Cette technique permettra une bonne valorisation des terres marginales



Figure 19: Esquisse d'un micro bassin réalisé par l'ONG AZN dans le Guié (Burkina Faso)

Conclusion et Perspectives

Le modèle développé dans cette étude permet de simuler l'intérêt de la récupération de l'eau de ruissellement.

Les résultats du modèle ont permis de déceler l'impact du déficit hydrique sur la production. Dans le scénario de base, l'exploitant n'est pas autosuffisant pendant les années très sèches et il a un revenu négatif occasionné par l'achat de céréales.

Avec l'irrigation de complément on réduit le déficit hydrique de 27%, augmente la production de 17%. Cela favorise l'autosubsistance et génère un surplus de production même les années les plus mauvaises. La vente de ce surplus permet à l'exploitant d'avoir un revenu minimum. Il y'a un surplus monétaire de 40% la mauvaise année pendant la période d'investissement du système d'irrigation. L'irrigation de complément réduit donc les conséquences du déficit hydrique et améliore le rendement des cultures. L'introduction de l'irrigation de complément dans une exploitation sahélienne s'avère rentable et demeure une stratégie d'adaptation adéquate à la variabilité climatique en zone sahélienne.

La présente étude pourrait être complétée par l'introduction d'autre paramètre. La prise en compte de la fertilité du sol, des techniques culturales utilisées dans la zone, de l'élevage et de la migration pourront améliorer les résultats du modèle ce qui facilitera une prise de décision moins risqué de l'exploitant.

BIBLIOGRAPHIE

Affholder F., Forest F., Lidon B. et Valony M.J. La gestion de l'eau, Mémento de l'agronome

Ahmadi N., Chantereau J., Lethève H.C., Marchand J.L et Ouendeba B., Les céréales, Mémento de l'agronome

Barbier B. et Hazell P.B.R. (2000), Declining access to Transhumant areas and sustainability of agro-pastoral systems in the semi-arid areas of Niger, Washington IFPRI.

Boussard J.M (1987), Economies de agriculture, Paris: Economica, 320p.

Boussard M.B. et Daudin J.J. (1988), La programmation linéaire dans les modèles de production, Paris : MASSON.

Comité National des Irrigations et du Drainage. (2009), Irrigation de complément sur le maïs en agriculture pluviale.

CRA. (2009), Bulletin mensuel : Le sahel face aux changements climatiques. Numéro spéciale. Niamey

Dosso .M et Ruellan A., Le sol et la production végétale, Mémento de l'agronome

FAO (2001), Smallholder irrigation technology: prospects for sub-saharan Africa, Knowledge Synthesis, Report N°3.

Fox P., Rockström J. et Barron J. (2004), Risk analysis and economic viability of water harvesting for supplemental irrigation in semi-arid Burkina Faso and Kenya, Stockholm : Natural Resource Management Department of Systems Ecology, Stockholm University.

Franquin P. et Rijks D. (1983), Index des paramètres météorologiques et des informations agrométéorologiques qui en découlent, Fonds documentaire IRD.

Franquin P. (1985), Agro-stratégies pour le sahel, ORSTOM, Inter tropiques N°10.

Franquin P. (1968), Analyse agroclimatique en région tropicale: les conditions hydriques, ORSTOM, Série biologique N°5,15-23.

Jabiou B. (2003), Caractéristiques physiques des couvertures pédologiques.

Karambiri H., Hama Y. et Paturel J.M. (2009), Caractérisation du ruissellement et de l'érosion de la parcelle du bassin versant en zone sahélienne : cas du petit bassin versant de Tougou au Nord du Burkina, 2iE et Université de Montpellier 2.

Leener P.D et Hugues D. (1990), Les chemins de l'eau, irrigation, drainage. Nivelles.

Makaya P. (2010), Interactions dynamiques home- climat- ressources dans un bassin versant sahélien : modélisation hydroéconomique, Mémoire, 2ie.

Mandé T. (2004), Conception d'un modèle d'optimisation stochastique pour l'agriculture dans un bassin versant du Burkina Faso, Mémoire de DEA, Université de Ouagadougou.

Pachouri R. et Reisinger A. (2007), Climate change 2007: synthesis report, contribution of working group I, II, and III. Assessment Report of the intergovernmental Panel on climate change, p-104.

Torres M., Maneta M.P., Wallender W.W., Vosti S., Howitt R., Rodriguez L. et Luis B. (2009): A hydro-economic model to assess water and agricultural income links, Dept of agricultural and resource economics, university of California, Davis.

Programme d'Action National d'Adaptation à la variabilité et aux changements climatiques. (2006), Ministère de l'Environnement et du Cadre de vie.

Rogers P., Silva R.D et Bhatia R. (2002). Water is an economic good. How to use prices to promote equity, efficiency and sustainability. Water policy (4), pp 1-17.

Sarr B., Traoré S. et Salack S. (2007), Evaluation de l'incidence des changements climatiques sur les rendements des cultures céréalières en Afrique soudano-sahélienne, centre régional Agrymet, CILSS.

Seidhom A.R. et Sawadogo L. (2010), Soil and water relationships of some crops in sahel-Dori, Burkina Faso, Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles (INERA).

Simonovic S.P. et Marino M.A. (2001), Integrated water resources management, publ.n°272, IAHS Press.

Sompougdou T.R. (2008), Evaluation du bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant de Tougou (bassin supérieur du Nakambé)- Burkina Faso, Mémoire d'ingénieur, 2ie.

Site internet:

- <http://www.sisa.bf/agristat/>
- www.inera.bf

ANNEXES

Donnée pluviométriques

PLUVIOMETRIE (mm) POUR OUAHIGOUYA

Année	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	TOTAL
1961	0.0	0.0	0.0	0.9	30.6	59.6	267.1	264.5	126.3	0.0	0.0	0.0	749.0
1962	0.0	0.0	0.0	10.6	41.5	91.1	124.1	378.0	141.6	13.3	5.7	0.0	805.9
1963	0.0	0.0	2.2	46.3	3.3	128.4	229.1	251.0	100.7	57.6	0.7	0.0	819.3
1964	2.0	0.0	0.0	3.2	55.7	75.5	141.0	175.9	122.8	5.5	0.0	9.4	591.0
1965	4.0	0.0	0.0	0.6	23.8	179.8	113.6	210.3	165.0	53.9	0.0	0.0	751.0
1966	0.0	0.0	0.2	5.3	1.4	94.3	155.9	144.4	109.5	149.3	0.0	0.0	660.3
1967	0.0	0.2	7.7	1.2	25.0	103.5	155.3	289.9	150.5	48.9	0.0	0.0	782.2
1968	0.0	8.5	0.0	5.6	61.1	66.0	263.6	178.2	94.0	25.1	0.0	0.0	702.1
1969	0.0	0.0	2.3	4.2	25.8	70.7	166.3	221.5	112.8	6.7	0.0	0.0	610.3
1970	0.0	0.0	0.0	0.0	8.5	36.7	194.6	159.4	122.5	0.0	0.0	0.0	521.7
1971	0.0	0.0	3.0	18.1	16.8	61.4	135.5	170.4	73.5	0.0	0.0	2.7	481.4
1972	0.0	0.3	0.0	12.0	38.2	107.0	103.8	136.0	68.2	36.0	0.0	0.0	501.5
1973	0.0	0.0	0.0	12.4	9.3	63.8	125.3	161.8	96.0	8.1	0.3	0.0	477.0
1974	0.0	0.0	1.8	0.0	6.0	45.6	289.1	301.0	70.2	44.5	0.0	0.0	758.2
1975	0.0	0.0	0.0	6.6	15.0	42.7	139.5	293.2	86.2	0.0	0.0	0.0	583.2
1976	0.0	0.0	0.0	0.0	51.3	81.2	119.1	90.5	131.5	46.5	0.0	0.0	520.1
1977	1.8	0.0	0.0	2.5	20.1	46.9	**	128.8	157.2	0.2	0.0	0.0	357.5*
1978	0.0	0.0	24.9	50.4	31.9	146.9	219.9	139.6	105.0	57.3	0.0	0.0	775.9
1979	0.0	0.0	3.5	16.5	0.6	152.5	91.3	117.0	140.6	56.6	0.1	0.0	578.7
1980	0.0	0.0	0.0	7.5	20.0	68.9	228.7	163.9	60.8	26.3	0.0	0.0	576.1
1981	0.0	0.0	2.6	11.0	222.4	82.4	182.0	175.3	105.6	54.8	0.0	0.0	836.1
1982	0.0	0.0	2.7	2.8	42.5	68.2	66.6	129.1	33.2	15.0	0.0	0.0	360.1
1983	0.0	0.0	0.4	5.7	8.0	60.0	110.2	121.5	51.4	1.0	0.0	0.0	358.2
1984	0.0	0.0	0.0	0.5	32.8	24.7	133.1	81.5	97.9	18.8	1.7	0.0	391.0
1985	0.0	0.0	0.0	3.7	7.6	61.9	147.7	133.4	63.8	2.2	0.0	0.0	420.3
1986	0.0	0.0	0.0	1.2	39.8	101.0	127.8	171.7	140.9	8.1	0.0	0.0	590.5
1987	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	123.9	105.7	99.6	131.1	6.1	0.0	0.0	466.4
1988	0.0	0.0	0.0	43.2	0.0	9.2	206.2	294.0	153.6	0.9	0.0	0.0	707.1
1989	0.0	0.0	0.0	0.0	34.2	25.1	147.0	311.2	61.0	33.5	0.0	0.0	612.0
1990	0.0	0.0	0.0	2.6	19.9	23.7	154.2	97.4	75.8	29.5	0.0	0.0	403.1

Données sur l'évapotranspiration

ETP PENMAN (mm) POUR OUAHIGOUYA

Année	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	TOTAL
1961	217.6	199.6	215.4	223.7	228.0	151.8	124.4	113.1	144.5	222.3	223.5	209.2	2273.1
1962	220.4	231.9	273.5	226.4	214.9	155.2	134.4	104.1	129.0	185.5	180.0	188.7	2244.0
1963	194.2	191.5	262.9	205.3	178.7	156.4	124.2	115.3	138.0	159.5	196.3	177.6	2099.9
1964	212.4	218.4	216.0	219.6	189.6	131.9	108.4	113.0	128.0	190.3	181.8	173.9	2083.3
1965	200.8	197.6	249.7	205.9	201.3	138.9	121.0	105.7	130.2	178.3	161.9	174.7	2066.0
1966	182.3	184.3	216.9	186.9	194.1	142.5	134.9	119.6	130.9	162.8	175.3	191.8	2022.3
1967	205.8	198.3	219.9	211.2	204.3	150.6	122.0	115.3	123.7	182.7	190.4	186.6	2110.8
1968	199.1	211.0	223.3	197.9	179.6	138.5	118.2	127.6	143.4	185.6	186.6	205.8	2116.6
1969	205.0	217.5	235.5	211.5	196.1	151.3	122.5	112.9	138.7	179.1	161.1	204.2	2135.4
1970	216.2	206.3	240.9	208.4	198.4	160.7	120.7	119.0	138.5	194.0	196.3	190.1	2189.5
1971	200.9	212.6	234.5	216.1	199.8	188.6	127.4	115.9	136.5	195.8	192.9	198.3	2219.3
1972	207.6	207.1	232.2	201.4	168.8	137.8	133.0	124.8	151.1	189.9	189.5	191.1	2134.3
1973	206.5	204.0	220.9	203.3	196.5	158.5	123.8	126.7	141.7	199.7	188.3	186.5	2156.4
1974	199.1	189.0	208.6	193.6	181.8	151.0	103.7	110.0	136.2	161.8	165.6	177.5	1977.9
1975	190.8	171.8	194.3	179.0	162.7	135.9	102.3	117.8	126.7	171.7	167.2	171.4	1891.6
1976	182.7	186.7	202.0	186.7	150.2	127.7	112.9	119.9	136.8	155.1	168.8	161.8	1891.3
1977	172.3	184.4	212.2	176.5	165.5	151.5	126.5	117.7	134.6	164.6	162.6	173.4	1941.8
1978	193.0	161.7	178.0	164.7	155.6	123.0	110.6	125.3	135.2	160.9	169.8	170.6	1848.4
1979	200.7	198.7	237.4	222.7	178.0	131.4	126.4	129.1	140.5	173.0	194.0	190.5	2122.4
1980	215.2	206.4	284.5	218.4	206.4	140.0	121.5	122.9	160.8	196.8	189.4	184.9	2247.2
1981	157.3	**	175.6	178.2	186.6	182.8	153.9	151.1	145.6	167.2	167.8	159.3	1825.4*
1982	159.7	**	171.3	176.5	189.4	175.5	172.7	147.4	158.4	162.4	144.4	158.6	1816.3*
1983	187.1	**	185.2	184.1	**	187.4	174.0	165.0	169.9	185.6	178.7	168.2	1785.2*
1984	188.1	195.9	211.7	191.6	179.2	150.6	142.6	139.7	158.2	181.4	170.5	167.3	2076.8
1985	171.6	**	191.2	184.3	214.7	195.1	155.4	147.5	157.5	166.6	165.5	157.4	1906.8*
1986	152.8	**	170.9	197.4	197.1	186.1	155.5	148.8	**	169.4	155.2	160.3	1693.5*
1987	162.9	**	177.3	183.4	220.6	177.4	182.2	161.3	151.4	175.4	170.2	166.0	1928.1*
1988	158.8	**	226.1	212.7	229.5	205.6	172.4	149.5	146.7	182.9	167.6	158.3	2010.1*
1989	174.7	**	182.1	216.2	226.6	218.8	177.9	141.4	159.4	173.2	198.7	186.9	2055.9*
1990	195.3	**	229.4	205.8	246.7	206.4	170.6	160.7	162.1	176.4	171.2	168.2	2092.8*

Pluie efficace en mm dans les bas fonds

	s1	s2	s3	s4	s5
p1	106	195	204	222	267
p2	142	231	231	267	302
p3	178	267	258	311	338
p4	364	356	409	667	712
p5	400	391	445	712	756
p6	436	427	480	756	623
p7	364	445	649	818	845
p8	338	400	614	774	801
p9	311	356	578	729	756
p10	267	302	267	409	347

Pluie efficace en mm sur les glacis

	s1	s2	s3	s4	s5
p1	104,4	191,4	200,1	217,5	261
p2	139,2	226,2	226,2	261	295
p3	174	261	252,3	304,5	330,6
p4	356,7	348	400,2	652,5	696
p5	391,5	382,8	435	696	739
p6	426,3	417,6	469,8	739,5	609
p7	356,7	435	635,1	800,4	826,5
p8	330,6	391,5	600,3	756,9	783
p9	304,5	348	565,5	713,4	739,5
p10	261	295,8	261	400,2	339,3

Pluie efficace en mm sur les marginaux

	s1	s2	s3	s4	s5
p1	60	110	115	125	150
p2	80	130	130	150	170
p3	100	150	145	175	190
p4	205	200	230	375	400
p5	225	220	250	400	425
p6	245	240	270	425	350
p7	205	250	365	460	475
p8	190	225	345	435	450
p9	175	200	325	410	425
p10	150	170	150	230	195

Apport d'irrigation en mm

	s1	s2	s3	s4	s5
p1	47	9	5	0	0
p2	47	34	38	10	0
p3	47	47	47	47	47
p4	47	30	6	0	0
p5	47	47	26	0	0
p6	47	28	7	0	0
p7	47	26	0	0	0
p8	47	39	0	0	0
p9	31	5	0	0	0
p10	10	5	0	0	0