



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

MASTER SPECIALISE GIRE

Promotion 2010

Modélisation hydro-économique pour l'analyse des systèmes de production dans un contexte de pression démographique et de gestion conflictuelle des ressources en eau du bassin de Kou au Sahel

MEMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master Spécialisé
Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE)

Présenté et soutenu par :

Babatoundé Rivaldo Alain KPADONOU

Jury

Pr. Hamma Yacouba

Dr. Bruno Barbier

Mr. Marcelin Kouassi

Superviseur

Dr. Bruno Barbier,
Chercheur au CIRAD,
Enseignant au ZiE

Maître de stage

Mr. Joost Wellens,
Projet GEeau/APEFE

DEDICACES

A
Ma Chère Maman, Mondoto Kouakanou
A vous Rivélia et Rivelyne,
A toi, Eliane
A mon Père, Houssou Kpadonou et
A vous tous Claude, Marius, Rémi, Raymond, Fiacre et Adjimon

REMERCIEMENTS

Au terme de ces travaux de mémoire, il m'est agréable de remercier très sincèrement toutes les personnes morales ou physiques qui de près ou de loin, ont contribué à son aboutissement. Mes remerciements vont particulièrement à :

- L'Eternel Tout Puissant pour toutes ses grâces et accomplissements dans ma vie,
- *Docteur Bruno Barbier*, mon Superviseur, pour avoir accepté m'encadrer et pour toute sa disponibilité,
- *Monsieur Joost Wellens* surtout pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser mon stage de fin d'étude dans les locaux du projet GEeau/APEFE,
- *Monsieur Elie Sauret*, Doctorant, pour tous ses conseils et surtout pour m'avoir facilité l'accès aux bases de données du projet "Eau Souterraines"
- Responsables et tous les enseignants de l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) qui ont contribué à ma formation,
- A l'Union Economique et Monétaire Ouest Africaine (UEMOA) pour son soutien financier durant cette formation,
- A tous mes amis de la promotion GIRE 2010 de l'Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), particulièrement *Dimitri Soro, Ismaël Touré, Faousiath Mama, Pacômes Zadé, Armand Fopa Lélé, Wilfried Kombé.*
- Ma mère *Mondoto KOUAKANOU*, qui a toujours cru en moi et m'a apporté le soutien indispensable à mon épanouissement tout en sachant que tous les arbres de la forêt ne, produisent pas la même saison. Voilà encore une autre fleur de bonne augure que vient de donner un des arbres que tu as plantés ; que Dieu nous accorde encore plus de temps pour la cueillette. Une fois encore soyez-en énormément remerciée et comblée pour tous vos sacrifices et souffrances aux services de vos enfants,
- *Justin Tovilodé et Affissou Ganiou* pour tous vos soutiens et encouragements
- Enfin à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué de quelle que manière à l'aboutissement heureux de ce travail, que l'Eternel Dieu vous en comble à l'infini

RESUME

La présente étude est une application de la modélisation hydro-économique pour l'analyse des systèmes de gestion des ressources en eau pour la production agricole dans le bassin du Kou. Il ressort de l'étude que le capital physique (motopompes), la liquidité et dans une faible mesure le manque d'eau constituent les contraintes majeures au développement agricole dans ce bassin en contre saison. Les résultats ont également montré que la valeur économique de l'eau varie selon les différentes sous-unités du bassin et que les cultures de même que les systèmes de production les plus bénéficiaires des eaux du bassin ne sont toujours pas ceux qui valorisent le mieux la ressource. L'étude révèle par ailleurs que l'augmentation des usages urbains de l'eau aura un impact négatif considérable sur la production agricole et le revenu total du périmètre irrigué public de la vallée du Kou situé presque en aval du bassin. Mais pour l'ensemble du bassin et les autres systèmes de production, l'impact de l'augmentation des usages urbains sur la production et le revenu agricoles sera marginal voire nul. Toutefois, l'amélioration des efficacités d'irrigation notamment du système de la petite irrigation par motopompe peut permettre de réaliser d'importantes économies d'eau pouvant permettre d'annuler l'effet négatif des usages urbains de l'eau sur l'agriculture et aussi accroître la production en atténuant la contrainte d'eau dans le bassin et les conflits liés à sa gestion.

Mots clés : Modélisation hydro-économique, production agricole, efficacité de l'eau, usages urbains, bassin du Kou

ABSTRACT

This paper is an application of hydro-economic modeling for analyzing the systems of water resources management for farming production in Kou basin river. The study shows that physical capital (pumps), liquidity or credit and in low extent lack of water are the major constraints to agricultural development in the basin during out season period. The results show also that water value vary according to the crops and sub-units of the basin; and the crops and farming systems that reward greatly water resources of the basin are not the most beneficiaries. In addition, the survey reveals that the increase of urban use of water will have significant impact of farming production and income of public irrigated area of the valley of Kou. But the total profit of the basin and the others farming systems will not be affected by the increase of urban water use. However, improvement of physical efficiency of irrigation, particularly with the small irrigation by pumps, can allow making very important water savings that can help to cancel the negative impact of urban use on agriculture and increasing farming production by reducing water constraint in the basin and related to its management.

Key words: Hydro-economic modeling, farming systems, water efficiency, urban use, Kou river basin

RESUME ANALYTIQUE

Le défi de l'eau est très complexe pour les pays sahéliens. Ainsi, cette étude s'est proposée à partir du cas de gestion conflictuelle des ressources en eau du bassin du Kou, d'analyser les systèmes de production et de gestion de l'eau en zone sahélienne. De façon spécifique, il s'est agi de faire une analyse économique de la gestion de l'eau pour la production agricole dans ce bassin en contre saison, puis d'évaluer l'impact des usages urbains et de l'amélioration de l'efficacité physique d'irrigation sur la production agricole et l'efficacité économique de l'eau. L'approche méthodologique adoptée est fondée sur la modélisation hydro-économique avec de la programmation mathématique.

L'analyse économique du système actuel de gestion de la ressource a révélé que le capital physique (motopompes), la liquidité et dans une faible mesure le manque d'eau constituent les contraintes majeures au développement agricole dans le bassin du Kou pendant la contre saison. Toutefois, la contrainte d'eau n'affecte que les systèmes de production situés en aval, en particulier le périmètre irrigué de la vallée du Kou (PVK). Quant aux systèmes de production situés en amont, ce sont les motopompes qui constituent la principale contrainte à la valorisation agricole des eaux du bassin. Les résultats de cette analyse ont aussi montré que sur un volume total de 51,6 millions de mètres cubes d'eau exploités dans le bassin pour la production agricole de contre saison, respectivement 40, 33 et 22% sont alloués aux productions de la banane, du riz et des légumes contre seulement 4% pour le maïs. Cependant, bien qu'étant l'une des cultures les plus bénéficiaires des eaux du bassin, le riz ne contribue que faiblement au profit total du bassin avec une contribution de 13,6 millions Fcfa soit 0,6% contre 0,1% pour le maïs, 33% pour les légumes et 66% pour la banane. Il en est de même pour le PVK qui a bénéficié d'environ 38,4% du volume total d'eau utilisée dans le bassin mais dont la contribution au profit total est estimée à 0,8% contre respectivement 40% et 32% pour les sous-bassins B1 et B2 qui ont respectivement bénéficié de 25% et 19% du volume total d'eau utilisée. L'évaluation de l'efficacité économique de l'eau a par ailleurs révélé que le riz est une culture très peu rentable qui valorise très faiblement l'eau du bassin. Sa productivité économique est estimée à 0,79 Fcfa/m³ d'eau alors que celle du maïs est de 0,93 Fcfa/m³ d'eau utilisée contre respectivement 62,25 Fcfa et 68,24 Fcfa pour les légumes et la banane. Ainsi, le PVK est la sous-unité du bassin ayant la productivité économique la plus basse avec 1,27 Fcfa/m³ d'eau alors que le sous-bassin B5 et ceux situés en amont du B4 présentent des productivités économiques assez élevées qui sont comprises entre 58 et 63 Fcfa par mètre cube d'eau. Pourtant, le coût du mètre cube d'eau est assez bas sur le PVK et est évalué à 0,81 Fcfa contre 56,16 Fcfa dans les sous-bassins B1, B2, B3 et B5.

En ce qui concerne l'impact de l'augmentation des usages urbains de l'eau sur l'irrigation, les résultats de l'étude ont montré que seul le système de production du PVK et particulièrement la production rizicole en sera vulnérable. Mais, cette vulnérabilité du PVK n'aura pas un impact significatif sur le profit total du bassin et même sur les autres systèmes de production.

Par ailleurs, l'amélioration des efficacités d'irrigation a permis de réaliser d'importantes économies d'eau qui ont permis non seulement de réduire les coûts d'irrigation mais aussi et surtout d'alléger les contraintes de l'eau et de liquidité au niveau du bassin. Ainsi, le coût total d'irrigation est baissé de 1,8 à 1,2 milliards de Fcfa favorisant ainsi la libéralisation du capital liquide qui constitue l'une des contraintes majeures à la production agricole dans le bassin. Cette réduction du coût d'irrigation a, à son tour, permis d'accroître considérablement le profit total du bassin qui est passé de 1,9 milliards à environ 5 milliards de Fcfa. Les économies d'eau réalisées à travers l'amélioration de l'efficacité physique d'irrigation et la disponibilité supplémentaire du capital liquide qui en est résultée ont permis d'accroître considérablement la production agricole totale du bassin qui a évolué de 2187 à 3434 hectares de terres irriguées en contre saison, soit une augmentation d'environ 64%. Particulièrement, les systèmes de production situés en aval du bassin et où les décisions de production étaient affectées par la contraintes d'eau et/ou de la liquidité ont vu ces contraintes en partie levées. Les légumes, le riz et faiblement la banane sont les cultures ayant bénéficié de la disponibilité supplémentaire de l'eau et/ou du capital. En conclusion, l'amélioration de l'efficacité d'irrigation pourra permettre de répondre davantage au défi de l'eau à l'échelle du bassin du Kou en contribuant à réduire les conflits liés à sa gestion.

Mots clés : Modélisation hydro-économique, production agricole, efficacité de l'eau, bassin du Kou

ANALYTICAL ABSTRACT

The challenge of water management is very complex for the Sahelian countries. This study used the conflict case for water management in river basin of Kou, for analyzing farming and water management systems in Sahel. The methodological approach used is hydro-economic modeling with mathematical programming tool.

The economic analysis of water uses show that physical capital (pumps), liquidity or credit, and in a small extent the lack of water are the major constraints to agricultural development in the basin during out season period. However, water constraint affects only downstream farming systems, particularly irrigated area of the valley of Kou (PVK). For upstream farming systems, it is primary pumps that constraint agricultural water uses in the basin. The results of this analysis showed also that a total volume of 51.6 million cubic meters of water is used in the basin for farming production during the out season period with respectively 40, 33 and 22% are allocated to banana production, rice and vegetables against only 4% for maize. However, with 40% of the total water used the rice brings a very low contribution to the total profit of the basin with a part of 0.6% against 0.1% for maize, 33% for vegetables and 66% for banana. It is the same for the PVK has received about 38.4% of the total volume of water used in the basin, but its contribution to the total profit is estimated at 0.8% against 40% and 32% for sub-basins B1 and B2, respectively, who received 25% and 19% of the total volume of water used. Economic efficiency assessment of water revealed also that rice is a very wasteful crop that rewards very lowly the water resources of this river basin. Economic productivity is estimated at 0.79 FCFA/m³ water used while that of maize is 0.93 FCFA/m³ water used against respectively 62.25 and 68.24 FCFA for vegetables and bananas. Thus, the PVK is the sub-unit of the basin that has the lowest economic productivity with 1.27 FCFA/m³ water used; while the sub-basins B5 and those located upstream of the B4 have high economic productivity between 58 and 63 FCFA per cubic meter of water. However, the cost per cubic meter of water is estimated at FCFA 0.81 on the PVK against 56.16 FCFA in the sub-basins B1, B2, B3 and B5.

Regarding the impact of increased urban water use on the irrigation, the results showed that only the farming system of PVK and especially rice production will be vulnerable. But the vulnerability of the PVK will not have a significant impact on the total profit of the basin and even on the others farming systems.

In addition, improved irrigation efficiencies have achieved significant water savings that have allowed not only to reduce irrigation costs but mainly to alleviate the constraints of water and liquidity. Thus, the total cost of irrigation is decreased from 1.8 to 1.2 billion FCFA. That promoted the liberalization of liquid capital which is one of the major constraints to agricultural production in the basin. In turn, this reduction of irrigation cost increased significantly the total profit of the basin from 1.9 billion to about 5 billion FCFA. The water savings through improved efficiency physical and availability of additional liquid capital allowed substantial increasing of the total agricultural production of the basin that evolved from 2187 to 3434 hectares of irrigated land during out season period. Specifically, vegetables, rice and in small part banana are the crops beneficiaries of additional availability of water and/or liquid capital.

In conclusion, improvement of irrigation efficiency can help meet the water challenge across the basin Kou helping to reduce conflict related to its management

Key words: *Hydro-economic modeling, farming systems, water efficiency, river basin*

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	<i>i</i>
REMERCIEMENTS	<i>ii</i>
RESUME.....	<i>iii</i>
ABSTRACT.....	<i>iii</i>
RESUME ANALYTIQUE.....	<i>iv</i>
ANALYTICAL ABSTRACT	<i>v</i>
TABLE DES MATIERES.....	<i>vi</i>
TABLE DES ILLUSTRATIONS	<i>viii</i>
LISTE DES TABLEAUX.....	<i>viii</i>
LISTE DES CARTES	<i>viii</i>
LISTE DES GRAPHIQUES	<i>viii</i>
ABREVIATIONS	<i>ix</i>
I.INTRODUCTION GENERALE.....	<i>1</i>
1.1. Introduction	<i>1</i>
1.2. Problématique.....	<i>2</i>
1.3. Objectifs	<i>4</i>
II.GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE.....	<i>5</i>
2.1. Cadre physique.....	<i>5</i>
2.1.1. Cadre géographique.....	<i>5</i>
2.1.2. Climat et végétation.....	<i>6</i>
2.1.3. Hydrologie.....	<i>7</i>
2.2. Traits socio-économiques	<i>7</i>
2.3. Contexte actuel de gestion des ressources en eau dans le bassin du Kou.....	<i>8</i>
III.CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE	<i>12</i>
3.1. Cadre théorique.....	<i>12</i>
3.1.1. Notion d'efficacité et de productivité économiques de l'eau	<i>12</i>
3.1.2. Bref aperçu sur l'application de la modélisation hydro-économique à l'échelle du bassin versant	<i>13</i>
3.1.3. Modèle théorique.....	<i>15</i>
3.2. Cadre méthodologique.....	<i>16</i>
3.2.1. Matériels et données.....	<i>16</i>
3.2.2. Analyse des données	<i>16</i>
3.2.2.2. Application de la programmation mathématique	<i>22</i>
3.2.2.2.2. Scénarii simulés.....	<i>25</i>
3.2.2.2.3. Hypothèses du modèle.....	<i>26</i>
IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS	<i>28</i>

4.1. Validation du modèle	28
4.2. Analyse économique des systèmes actuels d'allocation de l'eau pour la production agricole	29
4.2.1. Analyse des valeurs marginales des ressources.....	29
4.2.2. Analyse de l'efficacité économique de l'allocation de l'eau	31
4.3. Impact de l'augmentation des usages urbains de l'eau sur les systèmes de production agricoles.....	34
4.4. Impact de l'efficacité physique de la petite irrigation par motopompes sur les systèmes de production et l'efficacité économique de l'eau	36
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	41
REFERENCES.....	44

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Position des villages par rapport au lit du Kou.....	10
Tableau 2 : Résultats du calibrage du modèle.....	28
Tableau 3 : Valeurs marginales des ressources.....	29
Tableau 4 : Quelques paramètres de l'efficacité économique de l'eau par culture.....	31
Tableau 5 : Quelques paramètres de l'efficacité économique de l'eau par sous-bassin.....	33

LISTE DES CARTES

Carte 1 : Bassin du Kou.....	5
Carte 2 : Occupation des berges par les puisards d'irrigation.....	9
Carte 3 : Position des villages par rapport au lit principal du Kou.....	10
Carte 4 : Délimitation du bassin du Kou.....	18
Carte 5 : Zones potentiellement favorables à la petite irrigation par motopompes et puisards.....	20
Carte 6 : Aptitude des sols à la production agricole.....	21
Carte 7 : Aptitude des sols à l'irrigation par motopompes et puisards.....	22

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1 : Impact de la demande en eau pour les usages urbains sur la production agricole dans le bassin.....	34
Graphique 2 : Impact de l'augmentation de la demande en eau pour les usages urbains sur la production et le revenu agricoles du PVK.....	35
Graphique 3 : Impacts de l'efficacité physique de la petite irrigation sur la quantité totale d'eau, le coût total d'irrigation et le profit total du bassin.....	37
Graphique 4 : Impact de l'efficacité physique de la petite irrigation sur la production agricole.....	39
Graphique 5 : Impact de l'efficacité physique de la petite irrigation sur l'efficacité économique de l'eau.....	40

ABREVIATIONS

2ie	Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AEDE	Association Eau, Développement et Environnement
CIRAD	Centre International de Recherche Agricole pour le Développement
CLE	Comité Local de l'Eau
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture
FIT	Front Inter Tropical
GEeau	Projet Gestion des Eaux
GIEC	Groupe Inter-Gouvernemental pour l'Etude de l'Impact du Changement climatique
GIRE	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
NE	Nord-Est
ONEA	Office National de l'Eau et de l'Assainissement
PESO	Projet Eaux Souterraines
PVK	Périmètre Irriguée de la vallée du Kou
SIG	Systèmes d'Informations Géographiques
SW	Sud-Ouest

I. INTRODUCTION GENERALE

1.1. Introduction

Le bassin du Kou est une ressource naturelle dont les potentialités hydro-agricoles revêtent une importance socio-économique capitale pour les communautés riveraines. De ce bassin, dépend outre la survie des populations rurales qu'y pratiquent diverses formes d'activités agricoles, l'approvisionnement en eau et en produits vivriers de la ville de Bobo-Dioulasso et de nombreuses autres régions du pays (Wellens et al., 2008). Mais, indépendamment de la croissance démographique soutenue ayant caractérisé cette région ces dernières décennies, les ressources en eau du bassin du Kou font objet d'un usage conflictuel entre plusieurs acteurs ayant des besoins et des usages divers : l'agriculture vivrière et de rente, l'irrigation et les cultures pluviales, la petite irrigation individuelle et les périmètres irrigués formels et informels, l'agro-pastoralisme, l'alimentation en eau potable, etc. Cependant, le plus équiétant n'est pas la forte pression anthropique que pourraient entraîner ces diverses sollicitations sur les ressources hydriques du bassin. Ces dernières sont aussi victimes d'une occupation et d'une gestion anarchiques qui, au cours des cinq dernières décennies, n'ont fait que plonger le Kou et ses ressources dans une dégradation croissante et continue.

Ainsi, le potentiel hydrique dont recèle le bassin et autour duquel est structurée la vie socio-économique des populations, se trouve aujourd'hui dans une situation assez critique caractérisée entre autres par une diminution des débits de base et une chute des niveaux piézométriques. Au cours des 40 dernières années, le débit de base du Kou a connu une diminution d'environ 30% (Wellens *et al.*, 2009) dans un contexte où les besoins deviennent de plus en plus importants et les menaces de diminution de la ressource assez considérables. L'enjeu de la gestion de l'eau dans cette zone est donc particulièrement colossal. Déjà à l'étiage, tout le débit du Kou est dévié pour l'irrigation montrant que le bassin est en voie de fermeture et il ne sera plus possible de mobiliser des débits supplémentaires en période sèche. Pourtant, les besoins en eau pour l'agriculture ne sont qu'en partie satisfaits en cette période et la gestion de la ressource est toujours émaillée de conflits plus ou moins importants en raison des usages divers et concurrentiels.

Fort de tout cela, le défi d'une gestion plus efficiente et durable des ressources en eau devient primordial aussi bien pour les usages urbains que pour le développement agricole dans le bassin du Kou. D'importants changements seront donc nécessaires en vue de favoriser le

développement agricole et assurer une gestion rationnelle de l'eau dans ce bassin. C'est donc pour donner des orientations en matière de politiques nécessaires pour relever le défi d'une gestion durable des ressources en eau au Sahel, que cette étude s'est proposée à l'aide d'une approche systémique basée sur la modélisation hydro-économique d'analyser les systèmes de production et de gestion des eaux du bassin du Kou.

Le présent rapport est donc une présentation synthétique des principaux résultats auxquels cette étude a abouti. Ce rapport s'articule autour de quatre (04) chapitres. Le premier chapitre est consacré à la partie introductive dans laquelle sont développés l'introduction, la problématique et les objectifs de l'étude. Le chapitre 2 présente les généralités sur la zone d'étude. Le cadre méthodologique utilisé est exposé dans le troisième chapitre. Le chapitre 4 présente et discute les principaux résultats de l'étude. Il est suivi enfin d'une conclusion sous forme de synthèse du rapport.

1.2. Problématique

La gestion des ressources en eau est l'une des problématiques émergentes auxquelles les pays d'Afrique subsaharienne devront plus que jamais faire face dans les prochaines décennies pour assurer le développement de leurs économies largement dépendantes du secteur agricole. En effet, la demande en eau pour des usages agricoles, domestiques, industriels, hydro-électriques et environnementaux ont rapidement augmenté dans plusieurs pays en développement, exacerbant les pénuries d'eau et la dégradation de l'environnement (Cai, et al., 2006). De plus, les changements des usages des sols et l'occupation anarchique de l'espace conjugués aux mauvaises pratiques agricoles ont en effet transformé des terres jadis fertiles en friches improductives et ont causé d'énormes externalités négatives sur les ressources en eau. Les modifications climatiques qui s'annoncent plus intenses dans le futur avec le réchauffement planétaire ont aggravé les effets en contribuant à miner les efforts du développement et de lutte contre la pauvreté dans les régions les plus pauvres (GIEC, 2007). Déjà dans de nombreuses situations, les conséquences environnementales et sociales des variabilités climatiques ont mis en péril la survie de nombreuses populations dans les pays en développement (Kpadonou et al., 2011). Selon l'Organisation internationale pour les migrations, les « éco-réfugiés » pourraient atteindre 200 millions dans le monde à l'horizon 2050, voire 700 millions selon les projections les plus pessimistes, dont une très forte proportion en Afrique.

Le défi est encore plus complexe et colossal pour les pays sahéliens, vu leurs conditions climatiques excessivement défavorables et qui, très probablement, seront davantage dégradées. Beaucoup des bassins et sous-bassins qui traversent ces pays se trouvent dans une situation assez critique attisant des conflits plus ou moins importants entre les différents usagers au niveau local mais aussi entre les pays dans le cas des bassins transfrontaliers (Barbier et Koutou, 2010). La situation du bassin du Kou dont les potentialités hydro-agricoles revêtent une importance socio-économique capitale pour les populations riveraines est assez préoccupante. De ce bassin situé dans le Sud-ouest du Burkina Faso, dépend outre la survie des populations rurales qu'y pratiquent diverses formes d'activités agricoles et pastorales, l'approvisionnement en eau et en produits vivriers pour la consommation et des usages industriels de la ville de Bobo-Dioulasso et de nombreuses autres régions du pays (Wellens *et al.*, 2008 ; Wellens *et al.*, 2007). Mais mise à part la forte pression anthropique que pourraient entraîner ces diverses sollicitations sur les ressources hydriques du bassin, l'occupation et la gestion anarchiques les ayant caractérisées au cours des cinq dernières décennies n'ont fait que plonger le Kou et ses ressources dans une dégradation croissante et continue. Les conséquences néfastes de cette gestion non planifiée sont aujourd'hui remarquables et se traduisent par l'ensablement du cours d'eau, le tarissement des nappes et des sources naturelles avec pour conséquences la diminution des débits, la chute des niveaux piézométriques et la baisse des fertilités et des superficies agricoles exploitables. Au cours des 40 dernières années, le débit de base du Kou a connu une diminution d'environ 30% (Wellens *et al.*, 2009). Déjà à l'étiage, tout le débit du Kou y compris les débits environnementaux, est dévié pour les activités agricoles compromettant davantage l'environnement et la durabilité des écosystèmes. Ainsi, le potentiel hydro-agricole dont recèle le bassin et autour duquel est structurée la vie socio-économique des populations, se trouve aujourd'hui menacé dans un contexte où les besoins deviennent de plus en plus importants et les menaces de diminution assez considérables. En effet, avec un taux de croissance annuel de 2,5%, la vallée du Kou a été marquée au cours des dernières décennies par une croissance démographique soutenue et devra atteindre dans un futur assez proche – à l'horizon 2025 – le cap des 1 000 000 habitants, alors qu'elle n'abritait que 600 000 habitants au début du millénaire (Diallo *et al.*, 2006). Les implications d'une telle dynamique démographique ajoutée à l'augmentation des niveaux de vie sur les besoins en eau sont assez évidentes et se traduiront sans conteste sur les débits disponibles pour l'irrigation exacerbant ainsi les conflits autour de la ressource.

Fort de tout ce qui précède, il y a lieu de s'interroger sur l'avenir de la gestion de l'eau et du développement agricole dans le bassin du Kou, vu le rôle capital que joue ce dernier dans la survie et la sécurité alimentaire des populations de cette région et de ses environs. Le défi d'une gestion durable des ressources en eau devient primordial aussi bien pour les populations et l'économie urbaines que pour le développement agricole dans le bassin du Kou. Comment donner un plus grand épanouissement à une telle dynamique et l'acheminer dans une perspective de développement durable ? Telle est la question fondamentale telle que formulée par Diallo et al. (2006) en matière de connaissances et de gestion de l'eau à l'échelle du bassin du Kou. En d'autres termes, comment l'eau est-elle valorisée dans les différentes sous-unités du bassin ? Quelles seront les implications de l'augmentation des prélèvements en eau en réponse à la dynamique démographique sur les usages agricoles dans le bassin ? Quel peut-être l'impact de l'amélioration de l'efficacité d'irrigation sur les systèmes de production agricoles et l'efficacité économique de l'eau dans le bassin ? De plus, comment cette amélioration de l'efficacité physique peut-elle contribuer à la réduction des conflits d'usages liés à la ressource ? Telles sont les principales questions auxquelles le présent sujet de recherche apporte des éléments de réponse pour orienter la prise des décisions afin d'assurer le développement agricole dans un cadre de gestion plus efficace et durable des ressources en eau dans le bassin du Kou.

1.3. Objectifs

L'étude vise à faire une analyse économique des systèmes de gestion et d'allocation des ressources en eau pour la production agricole dans le bassin du Kou. De façon spécifique, il s'agit de :

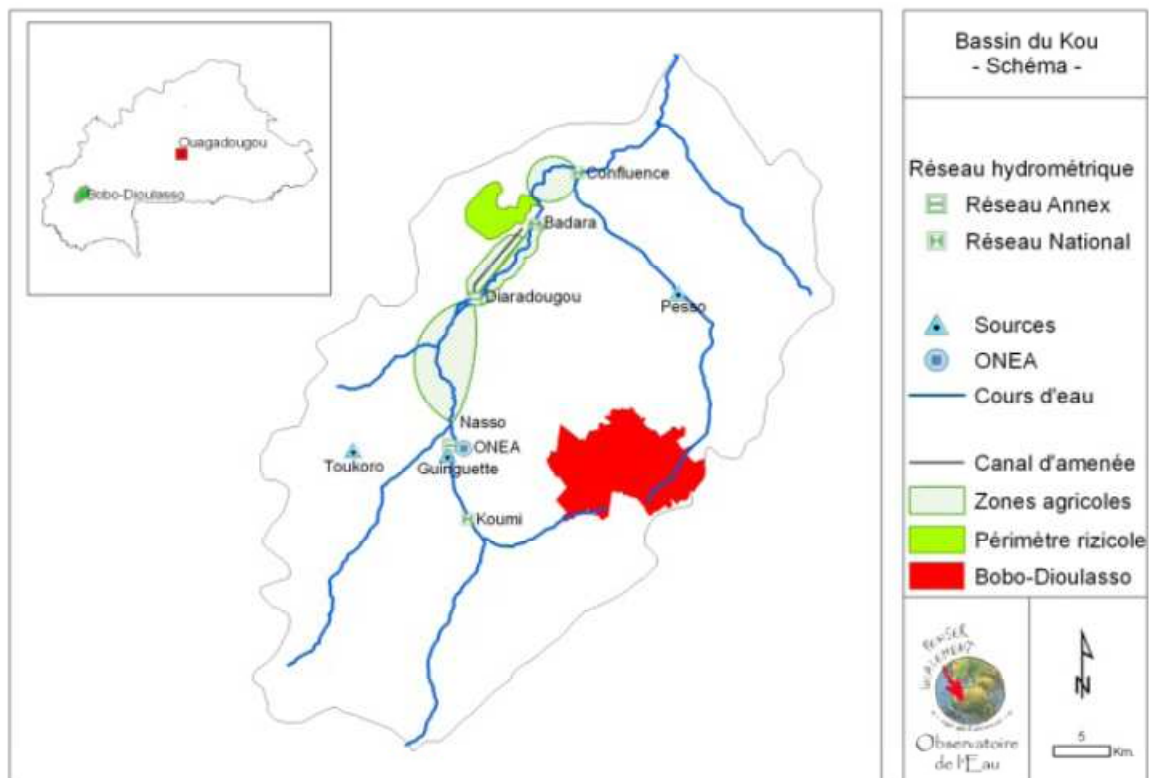
- Faire une analyse économique des systèmes actuels d'allocation des ressources en eau pour la production agricole dans le bassin
- Analyser l'impact de l'augmentation des usages urbains de l'eau sur les activités agricoles dans le bassin
- Analyser l'impact de l'amélioration de l'efficacité physique d'irrigation sur la production agricole et l'efficacité économique de l'eau dans le bassin.

II. GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

2.1. Cadre physique

2.1.1. Cadre géographique

Le bassin versant du Kou est l'un des 17 bassins régionaux qui constituent le bassin national du Mouhoun, ex Volta Noire et l'un des trois bassins nationaux du Burkina Faso. Ce dernier est compris entre les parallèles 9°20' et 15° de latitude Nord et entre les méridiens 5°03' de longitude Ouest et 2°30' de longitude Est (Carte 1).



Carte 1 : Bassin du Kou

Le bassin du Kou est situé au Sud-ouest du pays dans la province de Houet. Il s'étend sur une superficie de 1 823 km² et couvre les communes de Bobo-Dioulasso, de Bama et de Péni. Le bassin a une orientation Sud Ouest –Nord Est, parallèlement à la falaise de Banfora comprise entre les longitudes 4°28'0"W et 4°23'0"W et les latitudes 11°20'0"N et 11°11'0"N. Son relief est essentiellement constitué par un plateau gréseux culminant entre 300 et 500 m avec une altitude moyenne est de 407 m (Wellens et Compaoré, 2004). Le bassin du Kou représente l'aire géographique drainée par le Kou dont les ressources recèlent une importance capitale dans le bien être social, économique et environnemental des populations et des villes riveraines et environs.

2.1.2. Climat et végétation

Le bassin versant du Kou est situé à la limite sud de la zone climatique tropicale soudano-sahélienne. Il est caractérisé par un climat de type soudanien marqué par l'alternance de deux saisons bien distinguées, une saison pluvieuse (4 à 5 mois) qui s'étend de mi-mai à Octobre et une saison sèche (7 à 8 mois) qui s'étend d'octobre à mai. La saison sèche est caractérisée par des vents secs d'harmattan qui soufflent du NE au SW en provenance des hautes pressions sahariennes (Sauret, 2008). Ce bassin balaie une partie de la région des Hauts-Bassins qui constitue la zone la plus arrosée du Burkina Faso. La pluviométrie annuelle à l'échelle du bassin varie de 600 à 1.500 mm avec une moyenne de 1000 mm, tandis que l'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle est de l'ordre de 2.000 mm. L'alternance des saisons est fortement déterminée par le déplacement annuel du Front Intertropical (FIT) et en particulier par l'arrivée de la mousson africaine. La moyenne annuelle de température à Bobo-Dioulasso est 26,9 °C avec une amplitude thermique annuelle moyenne est de 5 °C. L'humidité relative et la tension de vapeur sont fortes en août (82%) et faibles en janvier et février (respectivement 9.2% et 7%).

Ce contexte climatique détermine la physionomie et la composition végétales du bassin à travers plusieurs formations de types forestier, savaneux ou herbacé. La végétation de la zone d'étude est en effet caractérisée par le développement d'un tapis graminéen continu à prédominance de savane et de forêts claires. On rencontre des îlots de forêts et quelques surfaces reboisées par les services forestiers. D'après des études réalisées par Coulibaly (2003), Barro (2004) et Guinko (2005), citées par Bazongo (2006), les formations végétales à l'échelle du bassin du Kou peuvent être regroupées selon les types suivants :

- une végétation aquatique dans les lits des rivières guinguette et Kou, dominée par *Nymphaea lotus* et *Potamogeton octandrus* ;
- une forêt galerie formant une véritable ceinture autour de la guinguette et du Kou et dans les autres bas-fonds ;
- une forêt claire dominée par *Anogeissus leiocarpus*, *Celtis integrifolia* et *Khaya senegalensis* ;
- une savane boisée caractérisée par 2 groupements, dont l'un à *Azelia africana* et *Acacia dudgeoni*, et l'autre à *Terminalia avicennioides* et *Pericopsis laxiflora* ;
- une savane arborée dominée par *Anogeissus leiocarpus* et *Azelia africana* ;
- une savane arbustive sur les glacis.

2.1.3. Hydrologie

Le Kou est le premier affluent important de la rive droite du Mouhoun (Chabi-Gonni, 2003 ; Sanon et al., 2006). Il prend sa source à Kodara au SW de Bobo-Dioulasso à une altitude de plus de 500. Le bassin du Kou est l'un des bassins ou sous-bassins les plus arrosés du Burkina Faso. Il regorge une ressource en eau plus ou moins abondante. En année moyenne, l'eau de surface représente 160 millions de m³ (Zonou, 2006) cité par Sauret (2008). D'après les estimations de Wellens et al. (2009), 57% des apports d'eau annuels à l'exutoire du bassin proviennent de la pluie contre 43% qui sont assurés par la nappe. Les mêmes estimations montrent que 77% des eaux qui tombent à l'échelle de tout le bassin versant sont perdus par évapotranspiration, 13% participent au ruissellement et 10% s'infiltrent dans le sol et contribuent à la recharge de la nappe. Le débit d'étiage du cours d'eau est évalué à 4.7 m³/s. Mais, il est important de noter que la permanence du régime du Kou à l'étiage est essentiellement assurée par les eaux souterraines provenant des sources de Nasso/Guinguette.

2.2. Traits socio-économiques

De par sa position géographique et de ses dotations en ressources naturelles notamment l'eau, les terres agricoles et le pâturage, le bassin du Kou a été et demeure un pôle d'attraction migratoire. En son sein est localisée la ville cosmopolite de Bobo-Dioulasso, la capitale économique du Burkina Faso et dont la position rapprochée de certains pays frontaliers tels que la Côte d'Ivoire et le Mali fait du bassin du Kou un grand pôle commercial et une terre d'accueil pour d'importants étrangers.

En réalité, les populations autochtones du bassin sont des Bobos. D'autres peuples à la recherche de surfaces agricoles et ou de l'attrait des industries en plein essor dans la région y sont affluer au fil du temps. Ainsi, on y retrouve de nos jours une diversité ethnique composée notamment des Mossis, des Kassambas, des Samos, des Blés, des Bolons, des Dorosiés, des Senoufos, des Semblas, des Tiéfos, des Viguéés et des Julas. Selon Zonou (2006) cité par Sauret (2008), cette arrivée des étrangers dans le bassin du Kou remonte vers le XII^e siècle. Mais, la région a connu durant ces dernières années un afflux important des Ivoiriens et de sa diaspora ivoirienne qui y ont trouvé refuge en fuyant les hostilités et les violences occasionnées par la crise politique. Le conflit ivoirien aurait également eu des impacts négatifs sur les activités économiques de la région qui dépend énormément de ce pays voisin pour ses approvisionnements et importations en produits manufacturiers, et aussi largement

pour l'écoulement des produits agro-alimentaires. Beaucoup de paysans pensent d'ailleurs que le dénouement actuel de la crise ivoirienne devra favoriser une nouvelle dynamique économique dans la zone en offrant surtout de nouveaux débouchés pour l'écoulement des produits agricoles.

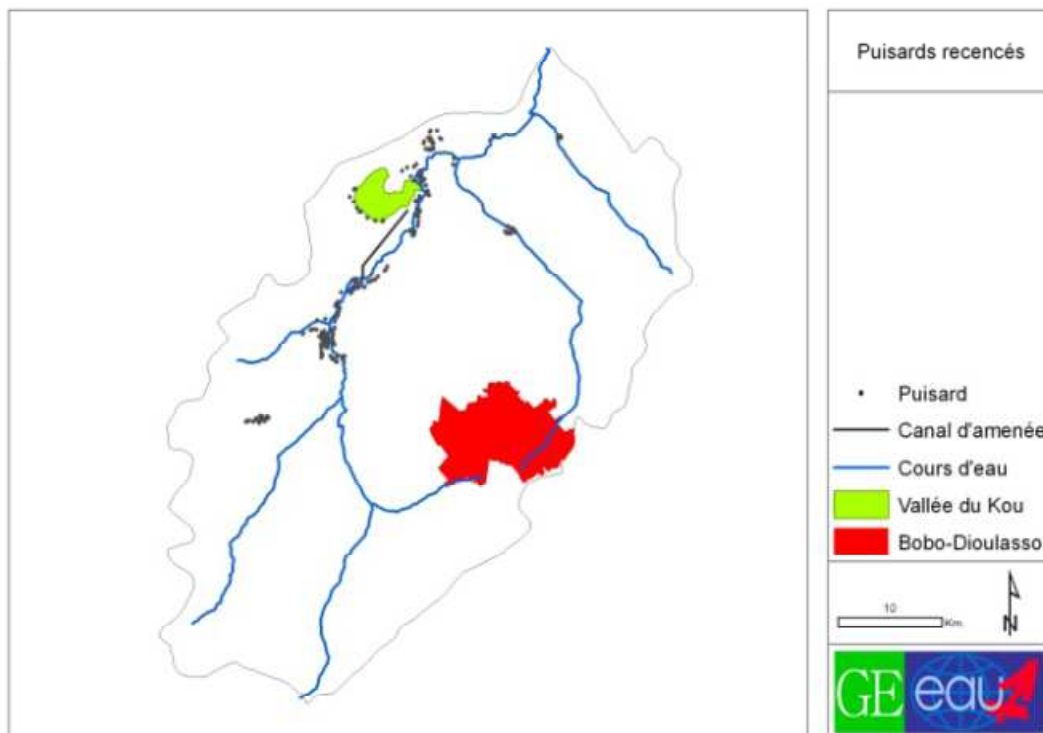
En termes d'organisation administrative, le bassin du Kou compte 79 villages répartis dans les trois communes couvertes par le bassin. Le village constitue en effet la structure administrative de base et est divisé en clans ou en familles larges avec des descendants issus d'un ancêtre commun (Sauret, 2008).

L'économie de la région repose principalement sur l'agriculture, le pastoralisme, le commerce et l'industrie. Les activités agricoles sont pratiquées durant toute l'année grâce aux divers systèmes d'irrigations implantés dans le bassin. Les principales cultures qu'on y observe sont le coton, les céréales (maïs, riz, sorgho, mil), les racines et tubercules (igname, patate), les légumineuses (niébé, haricot vert), les oléagineuses (arachide, sésame), les légumes fruits et feuilles (tomate, chou, aubergine, gombo, poivron, oseille, etc.) et de l'arboriculture fruitière (mangues, banane, agrumes). L'industrie bobolaise longtemps considérée comme agro-alimentaire s'est aujourd'hui diversifiée dans l'industrie textile, la chimie et la mécanique (Atlas de l'Afrique, 2005).

2.3. Contexte actuel de gestion des ressources en eau dans le bassin du Kou

Bien que le bassin du Kou recèle d'importantes ressources hydriques et foncières pouvant susciter un espoir pour le développement agricole et l'épanouissement des populations riveraines et environs, le contexte actuel qui caractérise sa gestion est peu rationnel et n'augure pas un futur durable pour ces ressources. En effet, indépendamment de la croissance démographique soutenue ayant caractérisée cette région ces dernières décennies, les ressources en eau du bassin du Kou font objet d'un usage conflictuel entre plusieurs acteurs ayant des besoins et des usages divers : l'agriculture vivrière et de rente, l'irrigation et les cultures pluviales, la petite irrigation et les périmètres irrigués formels et informels, l'agropastoralisme, l'alimentation en eau potable, etc. En principe, ces différentes sollicitations ne susciteraient aucun intérêt aussi bien sur le champ de la recherche que du côté des agences de développement, si les ressources disponibles à l'échelle du bassin ne présentaient aucune limite à satisfaire entièrement et de façon durable les besoins des utilisateurs. Malheureusement, tel n'est pas le cas. Si en hivernage les problèmes d'insuffisance d'eau semblent être négligeables ou même inexistantes, les besoins en période sèche sont par contre

largement supérieurs aux ressources immédiatement disponibles. En effet, le débit du Kou à l'étiage est principalement lié aux apports des sources de Nasso (dite la 'Guinguette') qui doivent à la fois répondre aux besoins en eau potable pour l'approvisionnement de la ville de Bobo-Dioulasso, aux besoins en eau des irriguants individuels et des petits périmètres irrigués installés le long du cours d'eau, à la demande en eau pour le grand périmètre public et aux quantités nécessaires pour les usages industriels et pastoraux sans oublier les services environnementaux. Ce contexte laisse place à une situation de gestion conflictuelle entre les différents usagers, chacun voulant indispensablement satisfaire ses besoins. Du coup, les ressources en eaux souterraines sont de plus en plus sollicitées pour compléter les eaux de surfaces disponibles. D'après un recensement réalisé en 2007 par le projet GEeau et l'AEDE, 441 puisards ont été construits dans le bassin par les paysans en vue d'exploiter les eaux souterraines pour la petite irrigation (Carte 2). Un phénomène qui selon Wellens et al. (2007) n'a jamais été observé lors des inventaires précédents. Cependant, les problèmes de manque d'eau pour la production agricole à l'échelle du bassin sont loin d'être résolus. D'une année à l'autre le déficit hydrique sur le grand périmètre public situé en aval du cours d'eau s'accroît avec pour conséquences un changement du système de culture sur le périmètre et la réduction des superficies emblavées. Ainsi, de plus en plus on observe une baisse de la production rizicole au profit de celles du maïs et récemment de la patate douce sur ce périmètre.

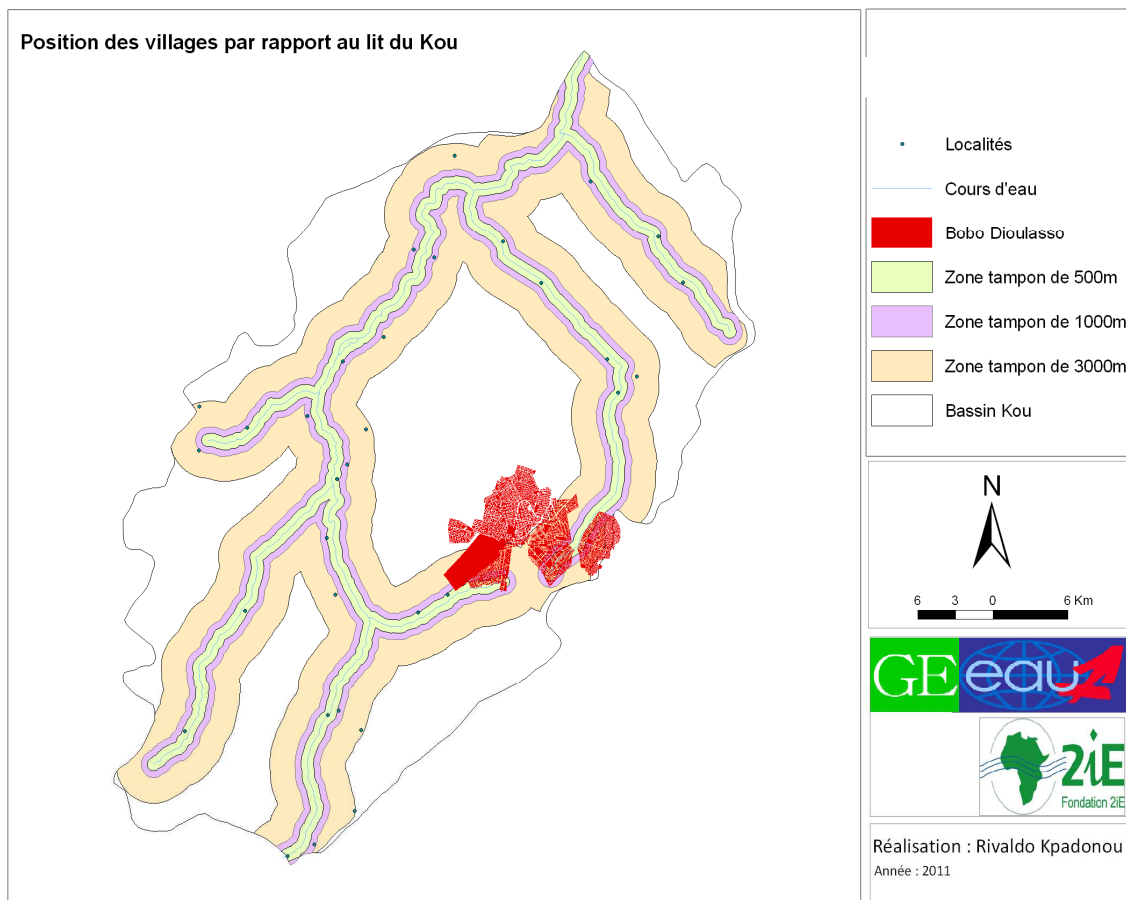


Carte 2 : Occupation des berges par les puisards d'irrigation

Cependant, le plus inquiétant n'est pas cette compétition autour des ressources du bassin. La gestion anarchique et peu efficiente qui les caractérise est en effet plus préoccupante. Selon Wellens et al. (2009), les eaux usées industrielles et domestiques, de même que près de 15.000 tonnes de déchets solides produits annuellement par la ville de Bobo-dioulasso et dont 90% présentent un potentiel toxicologique considérable pour les êtres humains et pour l'environnement, sont évacuées vers le réseau hydrographique du Kou. Outre la pollution urbaine, industrielle et aussi agricole, le Kou est fortement victime de l'exploitation archaïque de son lit principal et de ses berges. Sur les 32 localités recensés dans le bassin en 2005, 23 soient 72% sont situés dans un rayon de 1000 m de part et d'autre du cours d'eau alors qu'aucun n'y est situé à plus de 3 km (Tableau 1 et Carte 3). Ce qui montre l'importance capital que représentent les eaux du Kou dans la vie socio- économique des populations, qu'y

Tableau 1 : Position des villages par rapport au lit du Kou

Position % au Kou (en m)	100	500	1000	1500	2000	2500	3000	Total cumulé
Nombre de villages	01	15	23	27	27	28	32	153



Carte 3 : Position des villages par rapport au lit principal du Kou

sont installées de part et d'autre pour en profiter. Mais, cette occupation des berges n'est pas sans conséquences sur le cours d'eau et ses ressources car il en résulte un déboisement et une exploitation incontrôlée de son lit. Selon Wellens et al. (2007.), 57,7% des exploitations agricoles présentes dans le bassin sont situées entre 0 et 50 mètres du lit alors que les normes recommandent une distance de sécurité d'au moins 100 mètres, seulement respectés par 37,2% des occupants. Les conséquences de ces agressions sont entre autres l'ensablement, la pollution chimique résultant de l'utilisation des intrants agricoles, l'évaporation de l'eau du fait de la disparition du couvert végétal et la chute des débits de base.

Par ailleurs, avec une efficacité globale de 33%, les systèmes de mobilisation et d'allocation de l'eau pour la production agricole dans le bassin sont peu efficaces et ne correspondent pas à un contexte où la ressource est assez limitée.

Ainsi, face à l'acuité des problèmes et les sources de conflits qu'ils constituent, un Comité Local de l'Eau (CLE) regroupant les différents acteurs concernés par la gestion de la ressource a été mis en place en vue d'œuvrer pour la protection du cours d'eau tout en veillant à la satisfaction des besoins des différents utilisateurs dans un climat social apaisé à travers une approche de gestion intégrée (GIRE). Mais si ce comité a du mal à fonctionner, il est important de noter qu'une prise de conscience individuelle s'observe de plus en plus au niveau des utilisateurs notamment des paysans par rapport à la rareté de la ressource et les menaces pesant sur cette dernière. Toutefois, la majorité des producteurs voient un avenir dans la production agricole dans le milieu et beaucoup d'entre eux envisagent une extension de leur exploitation ; alors que plus nombreux pensent intensifier pour accroître leur production actuelle (Ouédraogo, 2010).

De toute façon, cette prise de conscience observée au niveau des utilisateurs peut amener ces derniers à opter de plus en plus pour des techniques de gestion plus efficaces de l'eau et également favoriser la mise en place des réformes nécessaires pour la sauvegarde et l'exploitation durable de la ressource.

III. CADRE THEORIQUE ET METHODOLOGIQUE

3.1. Cadre théorique

3.1.1. Notion d'efficience et de productivité économiques de l'eau

La notion d'efficience vise à optimiser l'utilisation de l'eau. Ainsi, on distingue selon les domaines d'application plusieurs types d'efficience. L'efficience physique ou absolue (ou encore technique) vise à faire des économies physiques de l'eau en réduisant autant que possible la demande pour tout usage de la ressource (Billi and al., n.d.). L'efficience économique cherche à obtenir le maximum possible de bénéfices économiques pour chaque usage de l'eau et pour toute la société. Dans de nombreux contextes, l'efficience économique est mesurée à travers la productivité économique. En effet, la productivité de l'eau est la quantité de produit (cultures ou autres biens) qui peut être obtenue par unité d'eau utilisée (Molden and Sakthivadivel, 1999). On parle donc de productivité économique quand le produit obtenu est exprimé en valeur financière. Elle peut être exprimée par la formule suivante :

$$\text{Productivité économique} = \frac{\text{Valeur nette présente du produit (ou Profit total)}}{\text{Quantité total d'eau consommée}}$$

Mais il existe également d'autres types d'efficience à savoir l'efficience sociale, l'efficience environnementale, l'efficience technologique, efficience allocative, etc. (Billi and al., n.d.). L'efficience sociale vise une gestion communautaire et participative de l'eau en s'efforçant de satisfaire autant que possible les besoins de tous utilisateurs. Quant à l'efficience environnementale, elle cherche la conservation des ressources naturelles. Par contre, l'efficience technologique réfère au processus de recherche des moyens pour extraire une quantité plus élevée de produits d'un même niveau ou quantité de ressources. Enfin, l'efficience allocative combine l'efficience physique ou technique et l'efficience économique. En réalité, elle vise à faire des combinaisons optimales des inputs.

Cependant, ces différentes définitions de l'efficience ne sont pas en pratique exclusive et peuvent être atteintes simultanément selon les systèmes de gestion de la ressource. Ainsi, il est clair que l'efficience de l'utilisation de l'eau devrait être abordée dans une approche multi-objective et pluri-sectorielle. En particulier, elle devrait inclure selon Garduno and Cortés (1994) aussi bien la gestion de l'offre que de la demande.

3.1.2. Bref aperçu sur l'application de la modélisation hydro-économique à l'échelle du bassin versant

La nature complexe et interdisciplinaire de la problématique de l'eau exige que les aspects techniques, économiques, environnementaux, sociaux et politiques liés à sa gestion soient incorporés dans un cadre analytique cohérent (Serageldin, 1995). Ainsi, durant les quatre dernières décennies, les professionnels de l'eau ont développé plusieurs modèles en vue d'aborder les problèmes liés à sa gestion (Mirchi et al., 2009). Mais, les premiers modèles notamment ceux développés avant les années 1960 étaient essentiellement basés sur les aspects hydrologiques (Singh et Woolhiser, 2002). Très tôt ces modèles ont montré leur insuffisance à trouver des solutions durables et efficaces aux problèmes multidimensionnels liés à la gestion de l'eau, favorisant ainsi l'émergence d'autres types de modèles basés notamment sur les approches de modélisation hydro-économique des bassins versants. Contrairement aux premiers, la modélisation hydro-économique offre d'énormes possibilités pour explorer les aspects à la fois environnementaux, bio-physiques et économiques concernant l'allocation des ressources en eau aussi bien au niveau local qu'à l'échelle du bassin versant (McKinney et al., 1999 ; Mirchi et al, 2009). Ils permettent de déterminer les compromis entre les usages conflictuels et les interactions entre les différentes parties prenantes (Mirchi et al, 2009). Depuis leur émergence vers les années 1970, une pléthore de modèles hydro-économiques a été développée et appliquée dans plusieurs bassins versants aussi bien dans les pays développés que dans les économies en développement.

McKinney et al. (1999), Mirchi et al, (2009) et Tersa et al. (n.d.) ont réalisé des revues assez pertinentes de l'application des modèles hydro-économiques dans de nombreuses situations. Beaucoup d'études se sont intéressées à l'allocation optimale des ressources en eau et se différencient particulièrement par les types de données utilisées, les méthodes appliquées et les facteurs bio-physiques ou socio-économiques considérés.

Ainsi, pour le bassin versant de Maipo en Chili, Rosegrant et al. (2000) ont développé un modèle hydro-économique qui considère non seulement l'allocation de l'eau mais aussi les interactions entre les usages agricoles et ceux non agricoles tels que les industries, la consommation humaine et la conservation de la nature. Le modèle ainsi développé a permis d'estimer les bénéfices économiques et sociaux de l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau à l'échelle du bassin. Les résultats du modèle montrent que les réallocations de l'eau améliorent l'efficacité d'utilisation et par conséquent augmentent la valeur économique de la ressource. Dans une autre étude réalisée à l'échelle du même bassin,

Cai et al. (2006) et Cai (2008) ont confirmé les résultats précédents selon lesquels les bénéfices associés aux usages de l'eau pourraient être améliorés à travers des réallocations pour accroître les valeurs d'usage.

Dans le bassin de Colorado, Booker et Young (1994) à l'aide d'un modèle hydro-économique d'optimisation, ont montré que les conversions intra-régionales des usages moins rentables vers les usages plus rentables ont permis d'accroître les bénéfices de l'allocation des ressources de 50%. Le modèle élaboré par Mahan et al. (2002) sur l'efficacité de l'allocation des eaux de surface au Sud d'Alberta au Canada ont conduit également à des résultats similaires où les conversions intra-régionales des allocations de l'eau ont augmenté les bénéfices des usages de l'eau de 6%.

Rodgers et Zaafrano (2002) ont modélisé le bassin versant de Brantas en Indonésie en utilisant des données de sources diverses provenant de la documentation, des enquêtes de terrain et des sources de la FAO. Le modèle ainsi élaboré est capable de simuler de nouvelles infrastructures et a permis d'analyser les coûts et les bénéfices associés à la construction de deux nouveaux barrages dans le bassin.

Louw (2000) a développé à l'aide d'un modèle de programmation mathématique positive une approche pour déterminer la valeur réelle de l'eau à l'échelle du bassin de Berg en Afrique du Sud et aussi explorer l'impact du potentiel du marché de l'eau sur l'utilisation de l'efficacité dans ce bassin. Il constate après les résultats du modèle, que la valeur réelle de l'eau est très variable allant de 0 à 20 Rand/m³ d'eau utilisée.

En Californie, Draper et al. (2003) ont développé un modèle d'optimisation économique en vue de maximiser les bénéfices futurs des usages agricoles et urbains correspondants aux demandes des besoins en eau à l'horizon 2020. Mais, l'une des limites principales de ce modèle comme beaucoup d'autres modèles hydro-économiques est qu'il est essentiellement basé sur des considérations économiques ignorant les contraintes environnementales.

Cependant, Pulido-Velazquez et al. (2007) dans une étude réalisée en Espagne, ont mis en place un modèle hydro-économique basé sur une approche holistique de modélisation des eaux de surface et des eaux souterraines pour évaluer les coûts d'opportunité de l'utilisation de l'eau. La principale particularité de cette approche est la prise en compte des contraintes environnementales et l'estimation du coût d'opportunité de l'environnement. Il ressort des résultats du modèle que les contraintes environnementales imposent des changements dans les modes de gestion et d'allocation des ressources en eau. Le modèle a montré qu'en période

d'abondance des ressources en eau, le coût d'opportunité de l'environnement est nul contrairement à la période de faible disponibilité, où ce coût peut atteindre 275 €/1000 m³ d'eau.

Tersa et al. (n.d.) ont appliqué la modélisation hydro-économique pour analyser l'utilisation de l'efficience dans un contexte de rareté des ressources en eau en Afrique du Sud. Ils ont pu établir que les mécanismes alternatives d'allocation de l'eau peuvent servir d'instruments pour faire face à la rareté de cette ressource. En Afrique de l'Ouest, Ahrends et al. (2008) ont couplé les modèles hydrologiques et économiques pour déterminer les options possibles d'optimisation de l'eau pour l'irrigation. Bharati et al. (2008) ont quant à eux, en utilisant la même approche méthodologique, exploré l'utilisation de l'eau pour l'irrigation dans le bassin du Volta.

En conclusion, il ressort de cette revue de littérature que d'importantes différences peuvent être observées entre les différentes sous-unités d'un même bassin surtout en termes d'allocation et de la valeur économique de l'eau. De plus, l'amélioration des niveaux d'efficience physique peut permettre d'accroître la disponibilité de la ressource tout en contribuant à améliorer sa valeur et sa productivité économiques. Il est aussi important de noter que la modélisation hydro-économique est une approche assez appliquée pour l'étude des systèmes de gestion des ressources en eau aussi bien au niveau local qu'à l'échelle des bassins versants. Toutefois, son utilisation en Afrique subsaharienne et surtout en zone sahélienne est assez limitée en dépit de l'importance de l'eau dans cette région.

3.1.3. Modèle théorique

La programmation mathématique est l'outil courant de modélisation utilisé pour conception des modèles hydro-économiques. Dans ses formes les plus simples, la programmation mathématique est une technique mathématique par laquelle l'allocation des ressources rares en vue de maximiser un objectif désiré peut être déterminée. Elle consiste à optimiser, dans le sens de maximiser ou de minimiser, un objectif ou une utilité sous diverses contraintes. Le modèle théorique de base de cette technique de modélisation peut être spécifié comme suit :

$$\mathbf{Max Z = CX}$$

$$\mathbf{AX = B}$$

$$\mathbf{X \geq 0}$$

Avec Z la fonction objectif (revenu agricole du bassin versant dans le cas de cette étude) qui est maximisée (Max), C un vecteur des coefficients de la fonction objectif, X un vecteur qui représente le niveau d'intensité des activités, A une matrice des coefficients technico-économiques et B un vecteur des ressources disponibles. On cherche donc à maximiser à travers ce système d'équations la fonction objectif (Z) par une allocation des ressources aux activités.

3.2. Cadre méthodologique

3.2.1. Matériels et données

L'étude est réalisée dans le bassin du Kou et concerne la période sèche où les besoins en eau sont plus importants que la quantité de la ressource immédiatement disponible. Les données nécessaires à l'étude ont été principalement réunies à partir des sources secondaires et de la documentation. La documentation a permis de réaliser une revue de littérature ayant porté sur la zone d'étude et aussi sur l'outil de modélisation hydro-économique et ses applications au niveau des bassins versants. Les données secondaires sont surtout issues des bases de données des projets GEeau (Gestion de l'Eau) et PESO (Projet Eaux Souterraines) du Programme de Coopération entre le Burkina Faso et la Communauté Wallonie-Bruxelle de la Belgique. Ces projets disposent en effet d'une base de données assez riche de plusieurs années sur les ressources en eau du bassin et leurs usages. Ils possèdent des données pertinentes sur les activités agricoles, les données climatiques, les données hydrométriques, les modèles numériques de terrain et d'autres données géographiques sur le milieu d'étude. D'autres sources de données ont été également exploitées. Il s'agit notamment des bases de données du CIRAD (Direction de l'Afrique de l'Ouest basée au Burkina Faso), des anciens mémoires et thèses du 2^{ie} et de l'Ecole polytechnique de l'Université de Bobo-Dioulasso. Les données secondaires ont été complétées par quelques visites sur le terrain en vue de discuter avec les différents usagers de l'eau pour mieux cerner les réalités du milieu et comprendre la logique de l'allocation des ressources en eau dans le bassin

3.2.2. Analyse des données

L'analyse des données a été basée sur une approche holistique combinant plusieurs méthodes d'analyse notamment les SIG et les modèles de programmation mathématique.

Les SIG ont permis de gérer et d'analyser les données à caractères géographiques. Le logiciel SIG utilisé est la version 9.3 de ArcGIS Desktop à travers ses applications ArcMap, ArcCatalog et ArcToolbox. Ce logiciel a particulièrement permis de délimiter les différentes sous-unités du bassin. Il a également été utile à la réalisation entre autres des cartes thématiques et l'estimation des superficies agricoles disponibles et irriguables dans le bassin à partir des géodatabases et des fichiers de forme.

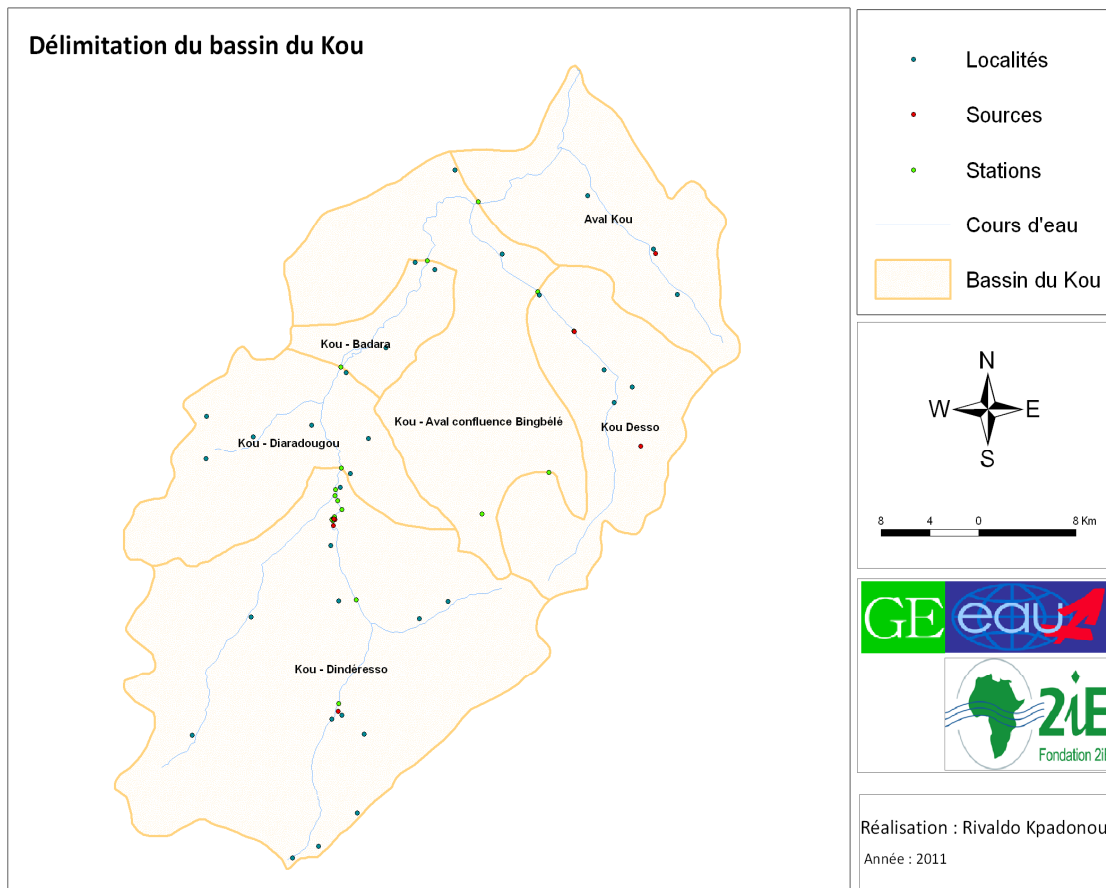
3.2.2.1. *Application des SIG*

Délimitation des sous-bassins

Bien que le modèle soit monté pour analyser la gestion des ressources en eau à l'échelle de tout le bassin versant, il est avant tout basé sur une subdivision du bassin en plusieurs sous-bassins. Cette délimitation est fondée sur des critères hydrologiques notamment les stations hydrométriques et aussi sur l'occupation et les usages de l'eau dans le bassin en contre saison. Ainsi, six (06) sous-bassins sont distingués (Carte 4) :

- Sous-bassin B0 (Kou-Dindéresso) : concerne la zone du bassin situé en amont des sources de la Guinguette. C'est une zone où le débit du Kou à l'étiage est presque nul et les activités agricoles de contre saison y sont marginales. c'est donc la raison pour laquelle ce sous-bassin est nommé B0 car les usages de l'eau en contre saison y sont négligeables.
- Sous-bassin B1 (Kou-Diaradougou) : représente la zone située entre les sources de la Guinguette et Diaradougou à l'entrée du canal d'amenée du périmètre irrigué de la vallée du Kou. C'est donc complètement en amont de cette zone au niveau de la Guinguette qu'est générée l'essentiel du débit du Kou en période sèche. C'est aussi dans cette zone, toujours en amont, que se trouvent les forages de pompage d'eau potable de l'ONEA (Office National de l'Eau et de l'Assainissement). Les usages de l'eau dans cette zone sont multiples. On note les prélèvements en eau par l'ONEA pour les usages urbains, la petite irrigation par motopompe, un périmètre irrigué d'initiative villageoise, le pastoralisme, etc.
- Sous-bassin B2 (Kou-Badara) : concerne la zone comprise entre Diaradougou et Badara en amont de la vallée du Kou. Les usages de l'eau dans cette zone sont la petite irrigation par les motopompes et puisards, le pastoralisme et les irrigants informels qui piratent le canal d'amenée.

- Sous-bassin B3 (Kou-Desso): correspond à la zone drainée par la source de Desso et sa rivière jusqu'en amont de la zone de confluence avec le lit principal du Kou. Ce sous-bassin est permanentement drainé par la rivière Desso qui est un affluent du Kou. De ce fait, il est également alimenté par un débit permanent assuré par la source de Desso et qui est indépendant de celui du cours d'eau principal. Les usages de l'eau dans cette zone sont essentiellement composés de la petite irrigation par motopompe et le pastoralisme.
- Sous-bassin B4 (Kou-Aval confluence): concerne la vallée du Kou et son périmètre irrigué. Les usages de l'eau dans B4 sont l'irrigation gravitaire sur le périmètre irrigué public de la vallée du Kou, la petite irrigation par motopompe, le pastoralisme, etc.
- Sous-bassin B5 (Aval Kou) : est la zone située en aval de la confluence. Les usages de l'eau dans cette zone sont la petite irrigation par motopompe et le pastoralisme.



Carte 4 : Délimitation du bassin du Kou

Détermination des zones propices à la petite irrigation par motopompe

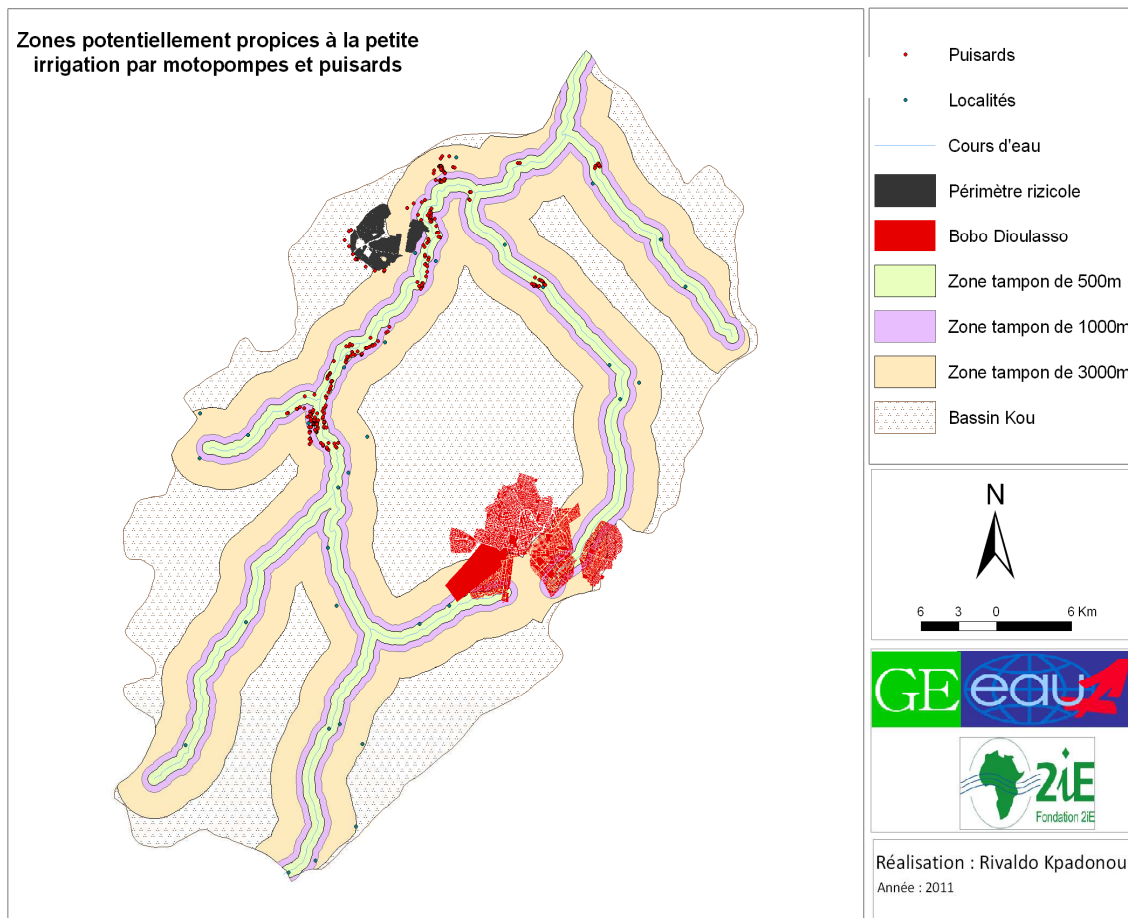
L'irrigation dans le bassin du Kou en contre saison est surtout basée sur le système de la petite irrigation par motopompes soit à partir des eaux de surface drainées dans le Kou soit à partir des puits construits dans le bassin. Mais, ce type d'irrigation n'est pas praticable

sur toute l'étendue du bassin. Il était donc nécessaire pour ce travail de déterminer les zones favorables au système d'irrigation par motopompe. Pour ce faire, il ressort de nos recherches documentaires et des discussions réalisées avec les paysans sur le terrain qu'avec les moyens actuels d'exhaure notamment les motopompes, un champ pour être irrigué à partir des eaux de surface drainées dans le Kou doit se situer dans un rayon de 500 m de part et d'autre de ce dernier. En d'autres termes, lorsqu'une parcelle est située à plus de 500 m du lit du cours d'eau, elle ne peut pas être irriguée à partir de l'eau de la rivière ou des canaux réalisés le long de celle-ci.

Quant à l'exploitation des eaux souterraines pour la production agricole, elle est essentiellement liée au niveau de la nappe qui doit être situé à une profondeur d'environ 12 m pour pouvoir servir à l'aide des motopompes et les systèmes de puisards à des fins d'irrigation. Il est donc nécessaire à ce niveau de déterminer la zone du bassin remplissant ces conditions c'est-à-dire la zone où le niveau de l'eau dans la nappe est à une profondeur d'environ 12 m. En principe l'accès à une telle information nécessite une analyse piézométrique régulière aussi bien dans le temps que dans l'espace à l'échelle de tout le bassin ; mais une telle étude fait actuellement défaut dans le milieu quoique des études sont en cours pour combler ce vide de données sur le fonctionnement hydrogéologique du bassin. Néanmoins, les résultats des études piézométriques du projet "Eaux souterraines" ont été utiles pour la détermination de cette zone propice à l'exploitation des eaux souterraines aux fins d'irrigation. En effet, il est ressorti de l'analyse des forages installés dans le bassin dans le cadre du projet "Eaux souterraines" que 62% des piézomètres ayant un niveau d'eau situé au plus à 15 m de profondeur, donc remplissant les conditions pour être exploités pour la petite irrigation par motopompes et les puisards, sont situés dans un rayon de 3000 m de part et d'autre du cours d'eau. Les discussions sur le terrain avec les paysans de même que des études empiriques confirment ces résultats. Il ressort en fait d'une étude récente réalisée par Ouédraogo (2010) que le puisard d'irrigation le plus éloigné du cours d'eau est situé à une distance de 3000 m de ce dernier.

Une troisième zone de 100 m a été par ailleurs délimitée autour de la rivière en vue de tenir compte des contraintes écologiques nécessaires pour la protection de la ressource. Il s'agit en réalité de la norme de 100 m recommandée pour constituer une zone de sécurité le long du cours d'eau en vue de limiter sa dégradation. Ainsi, trois zones tampons ont été délimitées autour du Kou : une zone tampon de 100 m correspondant à la zone de sécurité, une zone tampon de 500 m irrigable avec les eaux de surface et une zone tampon de 3000 m propice à

l'installation des puisards pour la petite irrigation. Ces délimitations telles que montrées sur la **Carte 5** ont donc permis de déterminer les zones potentiellement favorables à la petite irrigation par motopompe dans le bassin du Kou.

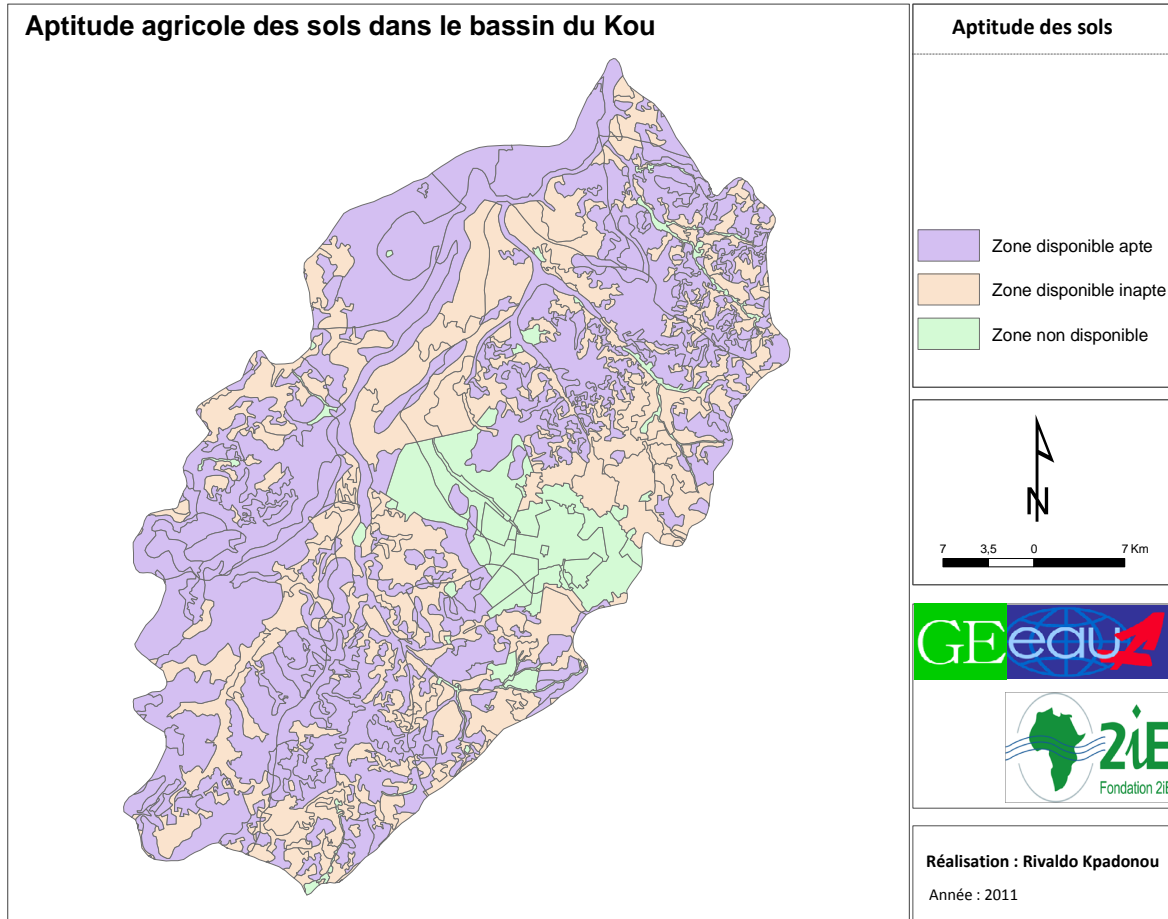


Carte 5 : Zones potentiellement favorables à la petite irrigation par motopompes et puisards

✚ Aptitude des sols à la petite irrigation par motopompe

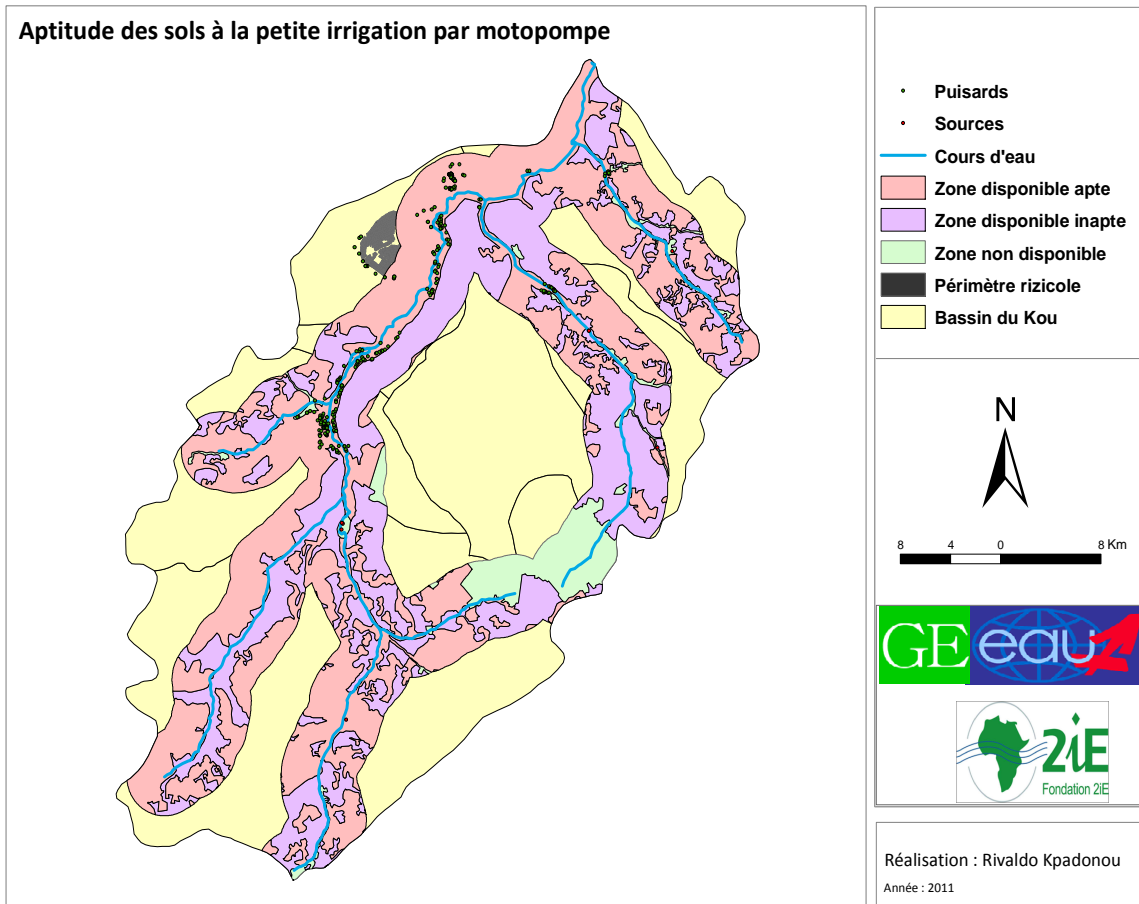
L'aptitude d'un sol à l'agriculture irriguée n'est pas seulement liée à la disponibilité ou l'apport de l'eau sur ce sol. Les propriétés physico-chimiques du sol constituent d'autres paramètres déterminants dans l'évaluation de l'aptitude agricole des sols. En effet, toute la zone identifiée dans le paragraphe précédent comme étant potentiellement favorable à la petite irrigation par motopompe n'est pas exploitable pour la production agricole ; puisque dans cette zone se trouve aussi des forêts, des mares, des cours d'eau, des habitations, etc. Ainsi, il est nécessaire de distinguer dans cette zone, les terres disponibles et aptes à la mise en culture, les terres disponibles et inaptes à l'agriculture et les terres non disponibles. Les terres disponibles et aptes à la production agricole regroupent les terres déjà cultivées, les jachères et les savanes. Les zones disponibles mais inaptes sont les carrasses, les sols nus et

dégradés, etc. Les forêts, les aires protégées, les mares et les habitations constituent par contre les terres non disponibles pour la production agricole. Cette distinction a permis de déterminer l'aptitude des sols à l'irrigation agricole à l'échelle du bassin (Carte 6)



Carte 6 : Aptitude des sols à la production agricole

Afin d'identifier les zones aptes à l'agriculture irriguée par le système des motopompes et des puisards dans les différents sous-bassins, nous avons superposé la carte de l'aptitude agricole des sols à l'échelle du bassin (Carte 6) avec celles des zones potentiellement favorables à l'irrigation par motopompe (Carte 5) et de la délimitation du bassin (Carte 4). Ce croisement a donc permis de déterminer les zones aptes à la petite irrigation par motopompe (Carte 7).



Carte 7 : Aptitude des sols à l'irrigation par motopompes et puisards

3.2.2.2. Application de la programmation mathématique

3.2.2.2.1. Structure du modèle

La programmation mathématique a permis de construire un modèle hydro-économique spécifique au contexte du bassin du Kou. Le modèle dans sa conception la plus simple confronte l'offre de l'eau provenant des ressources en eaux souterraines et de surface à la demande des différents usages aussi bien économiques, sociaux ou environnementaux. Ainsi, ce modèle met en relation les paramètres hydrologiques et hydrogéologiques du bassin avec les activités économiques. La demande en eau est constituée des demandes pour l'agriculture, l'eau potable, l'élevage et les services environnementaux. La demande pour les activités agricoles est satisfaite à la fois par l'eau de surface et l'eau souterraine. Par contre, les besoins en eau potable sont essentiellement assurés par les eaux souterraines notamment par les sources qui assurent également l'essentiel du débit du Kou à l'étiage. Quant aux demandes pour l'élevage et l'environnement, elles sont supposées essentiellement assurées par les eaux de surface.

Les analyses des résultats ont consisté d'abord au calibrage du modèle en vue de s'assurer qu'il reflète les réalités du milieu et ensuite aux simulations relatives aux scénarii d'analyse définis. Les revenus, les valeurs marginales de l'eau et les niveaux d'allocation des autres ressources notamment les ressources foncières prédits par le modèle sont les principaux résultats du modèle exploités pour l'analyse des différents objectifs de l'étude. L'écriture du modèle est codée sous le langage GAMS. La résolution du modèle est réalisée sous l'option MINOS NLP solver du GAMS.

Activités du modèle

Thématiquement, le modèle intègre trois principales composantes : hydrologique, économique et agronomique, ainsi que les relations entre les paramètres les caractérisant. Ces relations ont permis de définir une fonction objectif spécifique au contexte de cette étude. La fonction objectif du modèle consiste à maximiser les bénéfices économiques dégagés par les usages agricoles de l'eau, sous diverses contraintes à savoir les contraintes de disponibilité en eau, la contrainte d'exhaure liée à la disponibilité des motopompes, la contrainte de transferts ou de flux d'eau entre sous-bassins, la contrainte de capital, la contrainte de terre, la contrainte de travail. Les activités du modèle sont le riz, le maïs, les cultures maraîchères et la banane et la patate qui constituent les principales cultures pratiquées dans la zone d'étude.

Contraintes techniques

Contrainte foncière

La contrainte relative à l'allocation des terres dans le bassin est formulée comme suit :

$$\sum_j x(j, s, b) \leq \text{land}(s, b) ;$$

Dans cette équation, J représente l'ensemble des cultures pratiquées dans le bassin, S l'ensemble des différents types de sols, b l'ensemble des sous-bassins, $\text{land}(s,b)$ la disponibilité en terres cultivables (en ha) par type de sol et par bassin, et $x(j,s,b)$ représente la superficie de chaque type de sol allouée à chaque culture par sous-bassin.

Contrainte de main d'œuvre

La contrainte de main d'œuvre exprimée en jours de travail est traduite par l'inéquation suivante :

$$\sum_j \sum_s w(j) * x(j, s, b) \leq MO(b) ;$$

Pour cette équation, $MO(b)$ représente la quantité totale de main d'œuvre disponible par sous-bassin alors que $w(j)$ correspond à quantité de main d'œuvre requise pour un hectare de chaque culture.

Contrainte de liquidité

La contrainte liée à la disponibilité de liquidité pour le financement des activités agricoles est traduite à travers l'expression suivante :

$$\sum_j \sum_s cap(j) * x(j, s, b) + sw * MO(b) \leq AUTOFIN(b) + CRED(b)$$

Dans l'équation, $cap(j)$ représente le besoin en liquidité par culture (achats des semences, d'engrais, etc.), sw le salaire de la main d'œuvre dans le milieu, $AUTOFIN(b)$ la capacité d'autofinancement par sous-bassin alors que $CRED(b)$ correspond au niveau de crédit financier disponible.

Contrainte d'eau

La contrainte d'eau pour l'irrigation dans le bassin répond aux équations suivantes :

$$\sum_j \sum_s x(j, s, b) * bes_eau(j) \leq eau_{agr}(b) ;$$

Dans l'équation précédente, $bes_eau(j)$ représente les besoins annuels en eau par culture et $eau_{agr}(b)$ la quantité d'eau disponible par sous-bassin pour l'irrigation.

Cependant, la disponibilité d'eau pour l'irrigation dépend de l'offre totale d'eau dans le bassin et aussi des usages non agricoles tels que les besoins pour l'élevage, la consommation humaine et aussi pour les services environnementaux.

$$eau_{agr}(b) + eau_{elev}(b) + AEP(b) + eau_{env}(b) \leq ESUR(b) + ESOU(b) ;$$

Avec, $eau_{elev}(b)$ les besoins en eau pour l'élevage, $eau_{env}(b)$ les besoins pour les services environnementaux, $AEP(b)$ les besoins en eau potable pour les usages urbains, $ESUR(b)$ et $ESOU(b)$ représentent respectivement les quantités d'eau de surface et souterraines disponibles dans le sous-bassin.

Le modèle considère par ailleurs les transferts d'eau entre les différentes sous-unités du bassin qui traduisent d'ailleurs les relations conflictuelles entre les différents systèmes de production identifiés dans le milieu. En effet, la disponibilité de l'eau en particulier des eaux de surface est étroitement liée entre les différents sous-bassins et se traduisent par des transferts ou flux d'eau d'un sous-bassin à un autre. Le débit disponible à l'étiage correspond en réalité aux débits des sources situées en amont du cours d'eau dans le sous-bassin B1. C'est en fait ce débit de base qui circule et se répartit dans les autres sous-bassins. Le caractère conflictuelle

de la gestion de l'eau dans le bassin est donc lié à ces transferts qui font que la disponibilité de l'eau dans un sous-bassin dépend de la quantité d'eau reçue par les utilisateurs du sous-bassin précédent et surtout de l'usage aussi bien quantitatif que qualitatif que ceux-ci en ont fait. Cela signifie que l'utilisation de l'eau de surface drainée dans le Kou par les populations d'une sous-unité du bassin peut en limiter l'accès aux populations situées en aval.

Les flux d'eau entre les différentes sous-unités du bassin sont mathématiquement traduits par l'expression suivante :

$$SUR_{b_n} \leq SUR_{b_{n-1}} - USUR_{b_{n-1}}$$

Cette inégalité montre que la quantité d'eau de surface disponible dans un sous-bassin dépend de la quantité d'eau reçue par les utilisateurs du sous-bassin précédent et de l'usage (*USUR*) que ceux-ci en ont fait.

Contrainte d'exhaure

La contrainte d'exhaure de l'eau surtout pour la petite irrigation individuelle est liée au nombre de motopompes disponibles dans chaque sous-bassin. Cette contrainte est formulée comme suit :

$$eau_{agr(b)} \leq nb_{motop} * deb_{motop} * d ;$$

Avec $eau_{agr}(b)$ la quantité d'eau disponible pour l'irrigation, $nb_{motop}(b)$ le nombre de motopompes disponibles dans chaque sous-bassin, deb_{motop} le débit journalier d'une motopompe et d la durée de la saison en jours.

Fonction objectif

La fonction objectif du modèle vise à maximiser le profit total net lié aux usages agricoles de l'eau dans le bassin. Elle est empiriquement formulée comme suit :

$$Z = \sum_b \sum_j \sum_s x(j, s, b) * rdt(j) * pv(j) - \sum_j \sum_s \sum_b cap(j) * x(j, s, b) - \sum_j \sum_s \sum_b w(j) * sw * x(j, s, b) - bCTIRR - bCREDb * i$$

Avec, Z le revenu total du bassin, $rdt(j)$ le rendement par culture, $CTIRR(b)$ le coût total d'irrigation par sous-bassin et i le taux d'intérêt dans le milieu.

3.2.2.2.2. *Scénarii simulés*

En rapport aux objectifs de l'étude, deux principaux scénarii ont fait objet de simulations après la validation du modèle. Il s'agit :

S1 : Scénario sur l'augmentation des prélèvements en eau pour les usages urbains

Avec la croissance soutenue de la population couplée à l'augmentation du niveau de vie de la ville de Bobo-Dioulasso et ses environs, il est très évident que l'ONEA augmentera les prélèvements au niveau de ses forages ou décidera d'en construire d'autres pour répondre à l'augmentation de la demande en eau potable que devra occasionner la croissance démographique. Déjà, il ressort des entretiens informels réalisés avec certains agents de l'ONEA que ce dernier envisage la construction de deux nouveaux forages non loin de ceux qu'elle dispose actuellement au niveau des sources de la Nasso/Guinguette. D'où la pertinence d'un scénario qui vise à analyser les implications de telles augmentations des prélèvements pour usages urbains sur les activités agricoles dans le bassin.

S2 : Scénario basé sur l'amélioration des efficiences d'irrigation

Le niveau actuel des efficiences d'irrigation dans le milieu est très faible et ne reflète nullement un contexte où les ressources en eau sont fortement limitées. Selon Wellens et al. (2007) l'efficience globale actuelle dans le bassin est de 33%, alors que d'après Bos et Nugteren (1978) des efficiences de 60 % peuvent être atteintes avec le système d'irrigation qu'y était en vogue. Mais, avec le système d'irrigation actuel par les motopompes où les pertes de distribution sont presque nulles, les niveaux d'efficience encore plus élevés sont possibles. Il s'agit alors à travers les simulations qui seront réalisées dans ce scénario d'analyser le rôle que peut jouer l'adoption des pratiques plus efficiences de gestion des ressources en eau dans la réduction des conflits d'usages liés à la ressource dans le bassin. Les simulations réalisées à travers ce scénario concernent uniquement le système de la petite irrigation par motopompe. En effet, l'amélioration de l'efficience physique d'un périmètre irrigué exige des aménagements et par conséquent des charges techniques que nous pouvons pas aborder dans ce travail. Or, tel n'est pas le cas avec le système de la petite irrigation par motopompe où il faudra seulement contrôler la durée et les fréquences d'irrigation.

3.2.2.2.3. Hypothèses du modèle

Face à quelques incertitudes sur le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique du bassin, certaines hypothèses étaient nécessaires pour lever le doute sur certains aspects et le manque d'informations pour les intégrer dans le modèle. Ainsi, les hypothèses du modèle sont les suivantes :

H1 : Il existe une relation linéaire entre les pompages de l'ONEA pour les usages urbains et les débits d'étiage du Kou, de sorte que, tout prélèvement d'eau réalisé par l'ONEA se traduit par une diminution équivalente en valeur du débit de base du cours d'eau. Cette hypothèse tient compte du fait que même s'il est largement reconnu que les prélèvements de l'ONEA affectent le débit du Kou à l'étiage, aucune relation linéaire n'a été établie en vue d'explicitier la nature de cette relation et dans quelles mesures les pompages de l'ONEA réduisent le débit du Kou.

H2 : Il n'y a pas de relation entre la nappe et les eaux de surface en période sèche de sorte que, l'exploitation des eaux souterraines pour les activités agricoles n'a aucune influence sur la disponibilité des eaux de surface et vice versa. En effet, il est impossible à l'état actuel des connaissances sur les fonctionnements hydrologiques et hydrogéologiques du bassin, de dire qu'il n'y a pas de relations entre la nappe et le Kou à l'étiage ou qui des deux alimentent l'autre en cette période au cas où une relation existerait.

IV. RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1. Validation du modèle

Avant l'utilisation des résultats du modèle et l'analyse des scénarii, il a fallu s'assurer que le modèle reproduise bien la réalité. Pour ce faire, les résultats émanant du modèle ont été comparés aux données empiriques obtenues auprès des structures d'intervention opérant dans le milieu. Le tableau 2 présente de façon synthétique les résultats issus du calibrage du modèle. Globalement ces résultats reflètent la situation observée dans le milieu. Particulièrement, il ressort du tableau 2 que le riz, le maïs, la banane et les légumes sont les principales cultures considérées par le modèle comme c'est le cas dans le milieu d'étude.

Tableau 2 : Résultats du calibrage du modèle (ha)

Cultures (ha)	B1	B2	B3	B4	B5	Ensemble	
						Modèle	Réalités
Riz	12	0	0	770	0	782	778
Maïs	0	0	0	246	0	246	606
Banane	177	217	37	0	87	518	571
Légumes	330	85	9	199	17	640	415
Total	519	302	46	1216	104	2187	2370

Les niveaux de production prédits par le modèle sont assez proches des résultats empiriques, sauf dans les cas du maïs et des légumes où de grandes différences sont observées entre les résultats du modèle et les données empiriques. Ainsi, on constate une sous-estimation de la production du maïs par rapport aux données empiriques, alors que celle des légumes est considérablement sur-estimée. Mais, ces différences se justifient dans la réalité. En effet en contre saison, le maïs, s'il n'est pas produit sur le périmètre irrigué de la vallée du Kou, est généralement cultivée en association ou en relais avec d'autres spéculations notamment les légumes. Ainsi, les 606 ha de maïs issus des données empiriques sont majoritairement constituées d'une association du maïs avec les légumes, mais ont été comptabilisés dans les données empiriques uniquement pour la production du maïs. Ce qui a permis d'accroître le niveau de production de cette culture tout en réduisant celle des légumes. Mais faute de données pour tenir compte de ces associations culturelles dans le modèle, les productions réalisées en association avec le maïs sont dans notre cas, uniquement comptabilisées pour les légumes. Ce qui explique donc le fait que les résultats du modèle sur-estiment la production des légumes alors que celle du maïs est sous-estimée par rapport aux données empiriques. En

définitive, on peut donc considérer que le modèle élaboré représente assez la réalité du milieu et peut donc servir pour des simulations et l'analyse des scénarii.

4.2. Analyse économique des systèmes actuels d'allocation de l'eau pour la production agricole

4.2.1. Analyse des valeurs marginales des ressources

Le tableau 3 présente les valeurs duales des principales ressources intégrées dans le modèle. Ce tableau indique que les valeurs duales de la terre et de la main d'œuvre sont nulles quel que soit le bassin considéré. Ce qui signifie que les ressources foncières et le travail ne constituent pas des contraintes à la valorisation agricole de l'eau et le développement de l'agriculture irriguée dans l'ensemble du bassin du Kou notamment en contre saison. Par contre, les valeurs marginales du capital telles que présentées dans le tableau 3 sont positives pour toutes les sous-unités du bassin. Particulièrement, les valeurs marginales du capital liquide sont assez élevées et sont plus importantes que le coût d'opportunité du capital dans les différents sous-bassins à l'exception du sous-bassin B3 où se trouve le périmètre irriguée rizicole. La valeur marginale du capital liquide dans ce dernier bassin est 0,001 Fcfa alors que le coût d'opportunité du capital c'est-à-dire le taux d'intérêt au placement dans la zone d'étude est de 3,5 à 5% soit 0,035 à 0,05 Fcfa pour 1 Fcfa du capital placé. Comparativement aux autres sous-bassins, les valeurs marginales du capital liquide sont comprises entre 0,340 et 0,342 Fcfa et dépassent largement le coût d'opportunité du capital dans le milieu. Cela signifie que les exploitations agricoles des sous-bassins B1, B2, B3 et B5 gagneront davantage en investissant leur capital financier dans la production agricole de la contre saison que de réaliser des placements. Par contre, les exploitations agricoles du sous bassin B4 ont intérêt à réaliser des placements que d'investir leurs ressources financières dans la production agricole du fait de la faible rentabilité du capital liquide dans ce sous-bassin.

Tableau 3 : Valeurs marginales des ressources en FCFA

	B1	B2	B3	B4	B5
Capital					
Motopompe	56654	73347	73347	239020	73347
Crédit	0,342	0,340	0,340	0,001	0,340
Terre	0	0	0	0	0
Main d'œuvre	0	0	0	0	0
Eau	0	0	0	0,161	0

En qui concerne les ressources en eau, seul le sous-bassin B4 présente une valeur marginale positive de 0,161 Fcfa. Ce qui indique que l'eau n'est un facteur limitant à la production agricole de contre saison que dans le sous-bassin B4. Tous les autres sous-bassins à savoir les sous-bassins B1, B2 et B3 qui sont situés en amont du B4 et le sous-bassin B5 qu'y est situé en aval, présentent une valeur marginale nulle pour l'eau. Du coup, les systèmes de production de ces sous-bassins ne sont pas affectés par la contrainte d'eau pour l'irrigation. En réalité, les sous-bassins situés en amont du B4 ont une priorité d'accès à la ressource et peuvent à la hauteur de leurs moyens, mobiliser cette ressource pour répondre à leurs besoins d'irrigation. Ces sous-bassins ont la possibilité d'exploiter aussi bien les ressources en eau souterraine que celles des eaux de surface. Mais, la mobilisation des eaux souterraines aux fins d'irrigation étant plus contraignante et exigeante en moyens, les paysans préfèrent tant que possible exploiter les eaux de surface. C'est ce qui réduit la disponibilité des ressources en eau notamment des eaux de surface dans les autres sous-bassins en particulier dans B4. Or ce dernier dispose d'un grand périmètre irrigué rizicole essentiellement irriguable par les eaux de surface. Celles-ci étant considérablement exploitées par les systèmes de production situés en amont, une partie assez importante du périmètre rizicole n'est donc exploitée faute de l'eau. C'est ce qui explique la contrainte d'eau traduite par la valeur marginale de 0,161 Fcfa observée au niveau du B4. Par contre le sous bassin B5, bien que complètement situé en aval et du coup, ne reçoit presque pas les eaux de surface, il n'est pas affecté par la contrainte d'eau. Ceci est lié au fait que ce sous-bassin contrairement à B4 ne possède pas un périmètre irrigué et peut donc satisfaire ses besoins en eau d'irrigation par les eaux souterraines qui semblent être moins limitées.

Cependant, même si la disponibilité de l'eau ne constitue pas une contrainte réelle à l'irrigation dans la plupart des bassins, la mobilisation de cette ressource quoique disponible est une contrainte majeure à l'irrigation et au développement agricole dans le bassin du Kou. En effet, qu'il s'agisse des eaux souterraines ou celles de surface, leur mobilisation pour l'irrigation notamment en période sèche est assurée par les motopompes sauf sur le périmètre irrigué de la vallée du Kou où on observe un système d'irrigation gravitaire. Mais, il ressort de l'analyse des valeurs marginales des motopompes, que les différents sous-bassins ne possèdent pas suffisamment ce moyen d'exhaure pour mobiliser la quantité d'eau nécessaire à leurs besoins d'irrigation. Cette contrainte de motopompes est plus exprimée au niveau du B4 avec une valeur marginale de 239 020 Fcfa alors que le B1 est le sous bassin le moins affecté par cette contrainte avec une valeur marginale de 56 654 Fcfa par motopompe.

En définitive, ces résultats montrent que le capital financier, les motopompes et l'eau sont les principales contraintes à la production agricole de contre saison dans le bassin du Kou. Cependant, la contrainte d'eau n'affecte que le sous-bassin B4. Ce dernier constitue également la sous-unité du bassin la plus affectée par la contrainte de motopompes. Dans les autres sous-bassins, ce sont le capital et les motopompes qui constituent les principales contraintes à la production agricole en contre saison. Ainsi, les sous-bassins situés en amont du B4 disposent encore de terres pouvant être exploitées pour la production agricole en contre saison si les contraintes de capital et de motopompes sont atténuées. Ce qui pourra limiter davantage la disponibilité de l'eau au niveau du B4 et accentuer la contrainte d'eau dans ce sous-bassin particulièrement sur le périmètre irrigué de la vallée du Kou, surtout si l'extension agricole dans les systèmes de production situés en amont est essentiellement assuré par les eaux de surface.

4.2.2. Analyse de l'efficacité économique de l'allocation de l'eau

Cette section est consacrée à l'analyse de la valeur économique de l'eau dans le bassin du Kou à travers quelques indicateurs économiques notamment les profits totaux, les productivités économiques et les coûts des usages agricoles de l'eau. Les prédictions du modèle sur les indicateurs de la valeur économique de l'eau dans le bassin sont consignées dans les tableaux 4 et 5.

Le profit total de l'ensemble du bassin est de 2,11 milliards de Fcfa pour un volume total de 51,6 millions de mètre cube d'eau utilisée. La productivité moyenne du bassin est donc 40,86 Fcfa par mètre cube d'eau utilisée. Le tableau 4 présente quelques paramètres de l'efficacité économique de l'utilisation de l'eau par culture.

Tableau 4 : Quelques paramètres de l'efficacité économique de l'eau par culture

Cultures	Production (ha)	Volume total d'eau (millions de m ³)	Revenu total (millions Fcfa)	Productivité (Fcfa/m ³)	Coût d'irrigation (Fcfa/m ³)
Riz	782	17,20	13,60	0,79	1,27
Maïs	246	2,80	2,59	0,93	1,27
Banane	518	20,50	1400	68,24	56,16
Légumes	640	11,10	691	62,25	56,16
Ensemble	2187	51,60	2110	40,86	-

Il ressort de l'analyse de ce tableau que les ressources en eau du bassin sont principalement et par ordre d'importance exploitées pour la production de la banane, du riz et des légumes. En effet, 40%, 33% et 22% des 51,6 millions de mètre cube d'eau utilisées pour l'irrigation de

contre saison sont respectivement allouées à la production de la banane, du riz et des légumes contre seulement environ 4% pour la production du maïs. Le riz est donc après la banane l'une des cultures les plus bénéficiaires des ressources en eau du bassin du Kou pendant la décrue. Cependant, les demandes en eau pour la production rizicole dans ce bassin sont actuellement loin d'être couvertes : seulement 782 ha des 1228 ha de terres aménagées et aptes pour à la riziculture sont actuellement exploitées du fait de la contrainte d'eau. Cela constitue une des principales sources des conflits d'usages de l'eau dans le bassin, puisque les riziculteurs situés en aval du bassin ne cessent d'accuser les autres paysans situés en amont d'être responsables des déficits d'eau sur le périmètre rizicole. Mais, bien qu'étant l'une des cultures les plus bénéficiaires des ressources du bassin, le riz ne contribue que faiblement au profit total du bassin avec une contribution de 13,6 millions Fcfa soit 0,6% contre 0,1% pour le maïs, 33% pour les légumes et 66% pour la banane. L'analyse des productivités de l'eau par culture montre également que les céréales (riz et maïs) sont très peu rentables contrairement aux légumes et la banane qui présentent des taux de rentabilités assez élevés par unité d'eau utilisée. En effet, la productivité la plus faible est observée au niveau du riz avec une valeur de 0,79 Fcfa/m³ d'eau alors que celle du maïs est de 0,93 Fcfa/m³ d'eau utilisée contre respectivement 62,25 Fcfa et 68,24 Fcfa pour les légumes et la banane. Ce qui indique qu'économiquement, le riz est la culture qui valorise moins l'eau du bassin alors que la banane représente la culture la plus rémunératrice de cette ressource suivie des légumes. Pourtant, le riz et le maïs sont essentiellement produits sur le périmètre irrigué public de la vallée du Kou où les coûts d'irrigation sont assez faibles contrairement aux autres cultures irriguées par les systèmes des motopompes très coûteux. En réalité, le coût d'irrigation du riz ou du maïs est estimé à 1,27 Fcfa/m³ alors que celui de la banane ou des légumes est estimé à 56,16 Fcfa/m³ d'eau utilisée. Ainsi, en dépit de ces coûts d'irrigation assez élevés, les légumes et la banane présentent les productivités économiques les plus élevées par unité d'eau utilisée.

Le tableau 5 présente par ailleurs, les résultats des indicateurs d'efficience de l'allocation de l'eau dans les différentes sous-unités du bassin. Ce tableau montre que le sous-bassin B4 et le PVK (périmètre irrigué de la vallée du Kou) sont les sous-unités ayant plus bénéficié des ressources en eau du bassin pendant la décrue. Le volume total d'eau utilisé dans B4 est de 23,4 millions de mètre cube, soit 45% du volume total d'eau utilisé dans l'ensemble du bassin. Cette forte utilisation de l'eau dans B4 est dû au fait que le PVK (périmètre rizicole de la vallée du Kou) est situé dans ce sous-bassin. En effet, le volume d'eau utilisé sur le PVK

est estimé à 20 millions de mètre cube d'eau, soit 38,4% du volume total d'eau utilisé dans le bassin. Cependant, ni le B4 ni le PVK ne représente pas le sous-bassin ayant le plus contribué au profit total de l'ensemble du bassin. Le profit total du bassin est essentiellement assuré par les sous-bassins B1 et B2 qui ont respectivement bénéficié de 25% et 19% du volume total d'eau utilisé dans le bassin avec des contributions respectives de 40% et 32% au revenu total. Le sous-bassin B4 et le PVK ayant plus bénéficié des ressources en eau du bassin n'ont contribué respectivement qu'à 11% et 0,8% au profit total du bassin.

Tableau 5 : Quelques paramètres de l'efficience économique de l'eau par sous-bassin

Sous bassins	Production (ha)	Volume total d'eau (millions de m ³)	Revenu total (millions Fcfa)	Productivité (Fcfa/m ³)	Coût d'irrigation (Fcfa/m ³)
B1	782	13,10	762	58,00	56,16
B2	246	10,10	619	61,59	56,16
B3	518	1,62	99,5	61,44	56,16
B4	640	23,40	211	09,02	9,27
B5	782	3,72	235	62,95	56,16
PVK	246	20,00	16,1	00,81	1,27
Ensemble	2187	51,60	2110	40,86	-

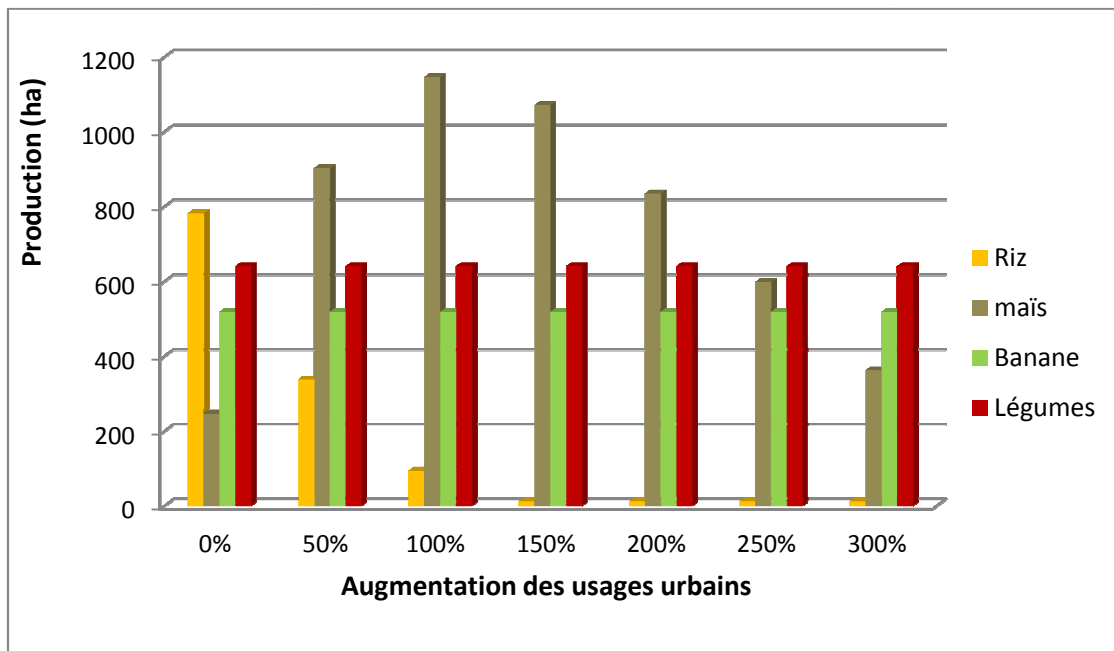
De plus, l'analyse de la productivité économique de l'eau dans les différents sous-bassins montre que les faibles niveaux de productivités sont également enregistrés dans B4 et le PVK avec respectivement 9,02 et 1,27 Fcfa par mètre cube d'eau utilisée. Par contre dans le sous-bassin B5 et ceux situés en amont du B4, les productivités économiques de l'eau sont assez élevées et sont comprises entre 58 et 63 Fcfa par mètre cube utilisée. Cependant, les coûts d'irrigation dans ces sous-bassins (B1, B2, B3 et B5) sont assez élevés et largement supérieurs à ceux du sous-bassin B4 et du PVK. En effet, le coût unitaire de l'eau d'irrigation est estimé à 0,81 Fcfa dans le PVK, 9,27 Fcfa dans B4 contre 56,16 Fcfa par mètre cube dans les autres sous-bassins. Pourtant dans l'ensemble du bassin et au regard des acteurs externes, les exploitations agricoles situées en amont du PVK donc dans B1, B2 et B3, et qui majoritairement exploitent de façon informelle les ressources en eau du bassin sont souvent considérées pour des utilisateurs non payeurs de la ressource.

Les faibles productivités de l'eau observées dans B4 et le PVK sont liées aux systèmes de culture pratiqués dans ces sous-unités du bassin. En effet, le système de culture pratiqué sur le PVK est essentiellement dominé par le riz et le maïs. Or les analyses précédentes ont révélés que les céréales en particulier le riz sont les cultures les plus exigeantes en eau dans le bassin, mais paradoxalement les moins rentables et productives. Le fait que le PVK soit entièrement inclus dans B4 explique par conséquent les faibles productivités économiques observées avec les fortes quantités d'eau utilisée dans ce sous-bassin.

4.3. Impact de l'augmentation des usages urbains de l'eau sur les systèmes de production agricoles

Les demandes en eau pour la consommation en milieu urbain sont souvent considérées comme des usages concurrentiels à l'irrigation pendant la contre saison. Ainsi, cette section est consacrée à l'analyse des résultats du scénario S1 relatif aux simulations sur les prélèvements en eau aux fins de consommation humaine dans le bassin. Le graphique 1 montre que l'augmentation des demandes en eau pour les besoins de consommation n'a pas un impact significatif sur le profit total du bassin de même que ceux des différents sous-bassins. Particulièrement, les sous-bassins B1, B2, B3 et B5 sont restés insensibles à l'augmentation des prélèvements pour les besoins de consommation (Graphique 1).

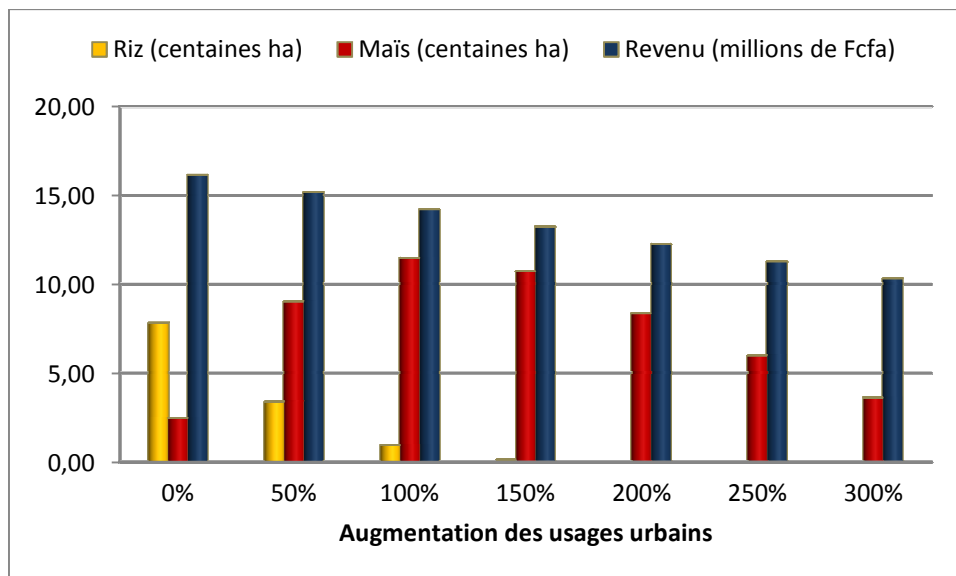
Graphique 1 : Impact de la demande en eau pour les usages urbains sur la production agricole dans le bassin



Par contre, le sous-bassin B4 et spécifiquement le PVK situé en son sein est considérablement affecté par la demande en eau pour la consommation humaine. En effet, l'analyse du graphique 2 montre que l'augmentation des prélèvements en amont du bassin pour les besoins de consommation humaine se traduira par une baisse de la production et du revenu total du PVK. En effet, le débit du Kou à l'étiage est essentiellement assuré par les sources naturelles de Nasso situées en amont du bassin. C'est donc le débit généré au niveau de ces sources qui circule et se répartit dans tout le bassin à l'étiage. Ainsi, plus un sous-bassin ou un système de production est situé en amont donc assez proche des sources, plus les exploitations riveraines ont une priorité d'accès aux ressources en eau du bassin notamment aux eaux de surface. De

ce fait, lorsque les ressources en eau de surface du bassin sont fortement sollicitées depuis l'amont pour d'autres usages tels que l'eau potable, les systèmes de productions agricoles situés en amont c'est-à-dire proches des sources peuvent exploiter à la limite des moyens disponibles, l'eau restante pour satisfaire leurs besoins d'irrigation. Ce qui réduit la disponibilité de l'eau pour les systèmes de production situés en aval ou loin des sources augmentant ainsi le déficit hydrique notamment sur le périmètre irrigué de la vallée du Kou (PVK) dont les besoins en eau sont essentiellement assurés par les eaux de surface. Ce déficit hydrique engendré par l'augmentation des prélèvements pour les usages urbains s'est traduit dans un premier temps par une baisse de la production du riz au profit de celle du maïs, le premier étant plus exigeant en eau que le dernier. Mais, la production rizicole ne sera plus possible sur le PVK lorsque la quantité d'eau prélevée pour les besoins de consommation humaine sera triplée. De plus à ce même taux d'augmentation des prélèvements, le revenu total généré par le PVK sera réduit de près de la moitié en passant de 16,14 millions à 8,7 millions de Fcfa. Cependant, même si l'augmentation des prélèvements pour les usages urbains aura des impacts considérables sur le système de culture et le revenu agricole du PVK, cela ne se fera pas observer sur le revenu total de l'ensemble du bassin. Ce qui s'explique par le fait que le PVK constitue la sous-unité la plus consommatrice des eaux du bassin en contre saison avec 38,4% du volume total d'eau utilisé dans le bassin pour la production agricole ; alors qu'elle ne contribue qu'à 0,8% au profit total de l'ensemble du bassin.

Graphique 2 : Impact de l'augmentation de la demande en eau pour les usages urbains sur la production et le revenu agricoles du PVK



Toutefois, le système de culture de l'ensemble du bassin sera légèrement modifié avec la disparition du riz essentiellement produit sur le PVK si les prélèvements sont augmentés au triple.

Il ressort donc de ces analyses que les systèmes de productions situés en aval et particulièrement le PVK sont les plus vulnérables à l'augmentation des usages non agricoles notamment des demandes en eau potable dans le bassin. Mais, cette vulnérabilité en eau du PVK n'aura pas un impact significatif sur le profit total du bassin bien que le système de culture de l'ensemble du bassin sera un peu affecté. Cela montre que la demande en eau pour les usages urbains ne constitue pas encore une menace majeure au développement agricole dans le bassin du Kou. Seules les cultures les moins rentables mais plus exigeantes en eau telles que le riz pourront être affectées par ces usages non agricoles. Les systèmes de productions et les exploitations agricoles du bassin dépendant de ces cultures pourront également être affectés.

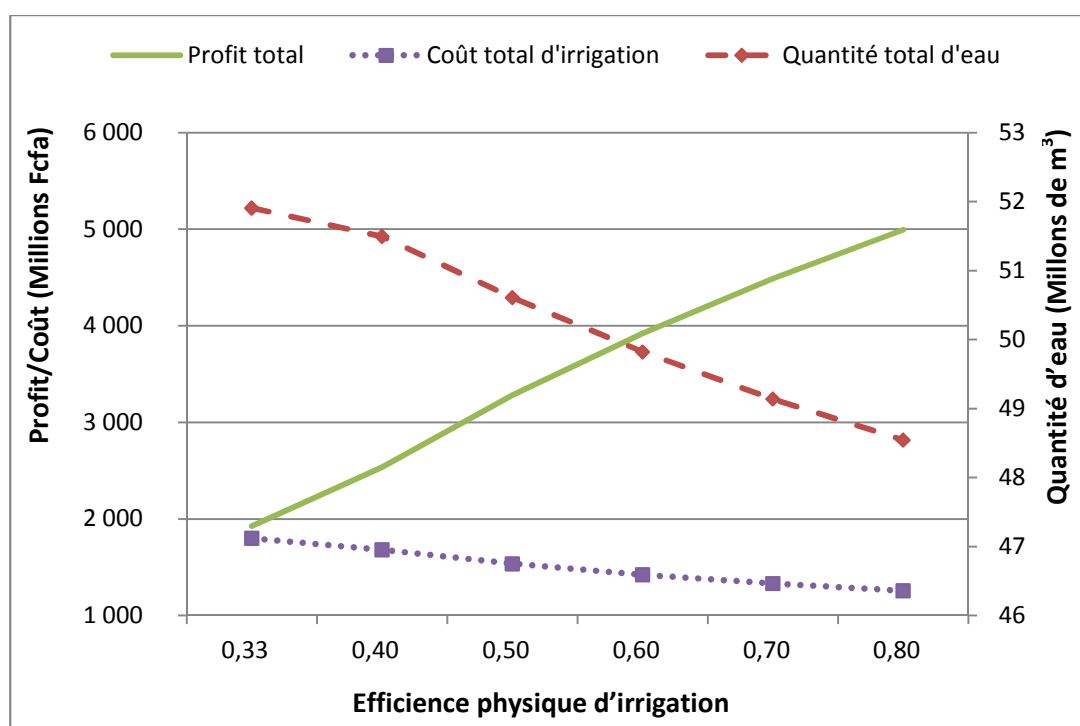
4.4. Impact de l'efficacité physique de la petite irrigation par motopompes sur les systèmes de production et l'efficacité économique de l'eau

Cette section est consacrée à l'évaluation et l'analyse de l'impact de l'efficacité d'irrigation sur la production et l'efficacité économique des usages agricoles de l'eau dans le bassin en période sèche. En réalité, on distingue deux principaux systèmes d'irrigation dans le milieu : un système d'irrigation gravitaire pratiqué sur le périmètre irrigué public de la vallée du Kou et un système de la petite irrigation individuelle par motopompes. Mais pour des raisons déjà évoquées dans la méthodologie au paragraphe 3.2.2.2.2, les simulations réalisées dans cette section concernent uniquement les efficacités d'irrigation du système de la petite irrigation individuelle par motopompes. Ces simulations ont en fait consisté à la variation du taux de l'efficacité physique d'irrigation de ce système en vue d'une part d'analyser l'impact sur la production agricole et l'efficacité économique de l'utilisation de l'eau en contre saison, et d'autre part, d'examiner comment l'amélioration de l'efficacité d'irrigation peut contribuer à la gestion des conflits d'usages de l'eau dans le bassin. Les prédictions du modèle relatives à ces simulations sont présentées dans les graphiques 3, 4 et 5.

Ainsi, le graphique 3 montre les relations entre la quantité totale d'eau, le coût total et le profit total de l'irrigation de même que leurs variations en fonction du niveau d'efficacité physique de la petite irrigation par motopompe. Les résultats de ce graphique montrent que la

quantité totale d'eau consommée et le coût total d'irrigation évoluent dans le même sens en diminuant avec le niveau d'efficacité physique d'irrigation. En effet, l'amélioration de l'efficacité d'irrigation permet de réduire les pertes de transport, de distribution ou d'application de l'eau en apportant autant que possible à la culture, justes les quantités nécessaires à son développement. Ce qui permet de réduire le volume d'eau mobilisé aux fins d'irrigation dans le bassin. Ainsi, de la même manière que la quantité totale d'eau consommée, la production agricole est passée de 51,9 millions de mètres cubes avec un taux d'efficacité de 0,33, à 48,5 millions de mètres cubes avec une efficacité de 0,80. De plus, telle qu'illustrée sur le graphique 3, cette baisse de la quantité totale d'eau consommée s'est traduite par une baisse du coût total d'irrigation qui est passé de 1,8 à 1,2 milliards de Fcfa. Mais, bien que ces résultats puissent paraître assez surprenant, ils correspondent bien aux réalités observées dans le milieu notamment aux spécificités du système d'irrigation individuel par motopompe. En principe, l'amélioration des efficacités physiques d'irrigation induit généralement des investissements et des charges supplémentaires et par conséquent s'accompagne d'une augmentation des coûts d'irrigation ou de l'eau. Mais, dans le contexte du système d'irrigation du bassin du Kou et particulièrement de la petite irrigation par motopompes considérée dans cette section, l'amélioration de l'efficacité physique s'est au contraire traduite par une baisse du coût d'irrigation.

Graphique 3 : Impacts de l'efficacité physique de la petite irrigation sur la quantité totale d'eau, le coût total d'irrigation et le profit total du bassin



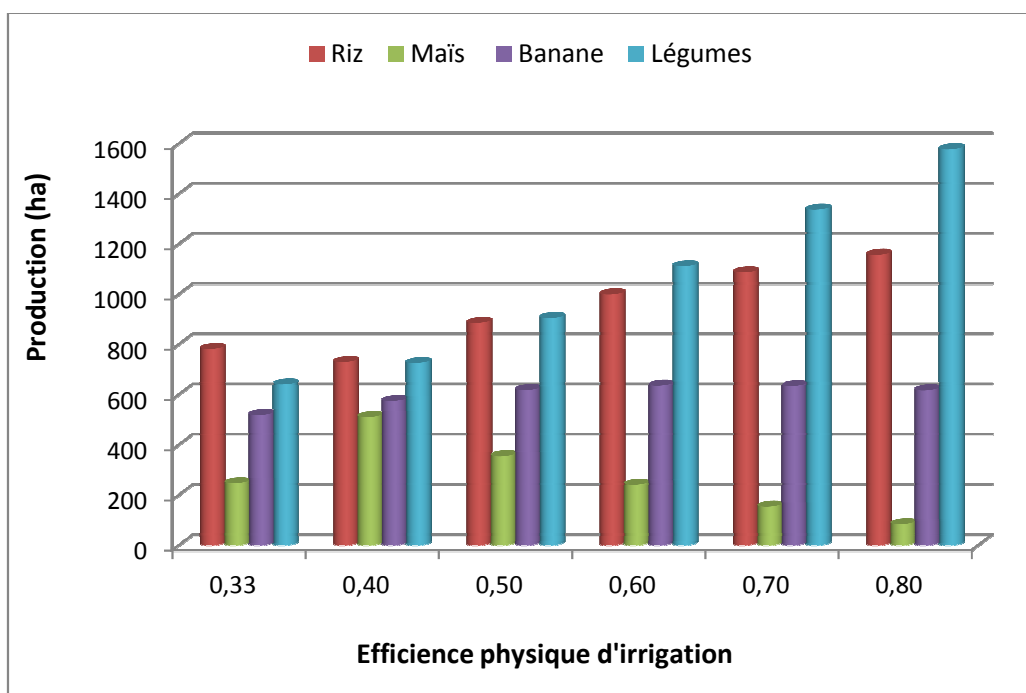
En effet, les inefficiences d'irrigation observées au niveau du système d'irrigation par motopompe sont essentiellement dues aux excès d'application de l'eau de sorte que la quantité d'eau offerte à la culture est largement supérieure à ses besoins réels. Les pertes de transport et du réseau sont en réalité très négligeables. Or, la quantité d'eau mobilisée par une motopompe est fonction de la durée d'irrigation, qui à son tour est liée au temps de fonctionnement de la motopompe et par conséquent à la consommation en carburant. Du coup, l'amélioration de l'efficacité physique de ce système d'irrigation ne nécessite pas un aménagement ou un investissement particulier mais plutôt une réduction des doses d'irrigation par une diminution des durées et/ou des fréquences d'irrigation. Ce qui induit une baisse considérable dans la consommation en carburant dont les dépenses afférentes constituent l'une des charges majeures de production dans un système d'irrigation par motopompes.

Par ailleurs, la baisse de consommation en eau induite par l'amélioration de l'efficacité d'irrigation et la réduction du coût d'irrigation qui en est résultée ont permis d'accroître considérablement le profit total du bassin qui est passé de 1,9 milliards sous un niveau d'efficacité de 0,33 à environ 5 milliards de Fcfa avec une efficacité d'irrigation de 0,80 (Graphique 3). Mais, cette forte augmentation du profit total du bassin n'est pas imputable au seul effet de la réduction du coût d'irrigation. Elle trouve également son origine dans l'augmentation de la disponibilité des ressources en eau à l'échelle du bassin et par ricochet de l'allègement de contrainte hydrique au niveau des différents systèmes de production. En effet, l'amélioration des efficacités d'irrigation a permis de réaliser d'importantes économies d'eau qui ont permis non seulement de réduire les coûts d'irrigation mais aussi et surtout d'alléger les contraintes de l'eau au niveau du bassin. Ce qui a favorisé l'augmentation de la production agricole par l'irrigation d'autres terres non exploitées. De plus, la réduction du coût d'irrigation a permis de libérer du capital liquide qui d'après les analyses précédentes est l'une des contraintes majeures à la production agricole dans le bassin du Kou pendant la contre saison.

Ainsi, telles que présentées à travers le graphique 4, les économies d'eau réalisées à travers l'amélioration de l'efficacité physique et la disponibilité supplémentaire du capital liquide qui en est résultée ont permis d'accroître considérablement la production agricole totale du bassin qui a évolué de 2187 à 3434 hectares de terres irriguées en contre saison, soit une augmentation d'environ 64%. Particulièrement, les systèmes de production situés en aval du bassin et où les décisions de production étaient affectées par la contrainte d'eau et/ou de

liquidité ont vu ces contraintes en partie levées. Les légumes, le riz et dans une faible mesure la banane sont les cultures ayant bénéficié de la disponibilité supplémentaire de l'eau et/ou du capital liquide. La production du maïs a par contre diminué avec l'augmentation des niveaux d'efficacité. En effet, la variation de l'efficacité d'irrigation de 0,33 à 0,80 a permis d'accroître les productions du riz, des légumes et de la banane respectivement de 782, 518 et 640 hectares à 1157, 1577 et 617 hectares respectivement ; alors que celle du maïs a chuté considérablement en passant de 246 à 83 hectares.

Graphique 4 : Impact de l'efficacité physique de la petite irrigation sur la production agricole

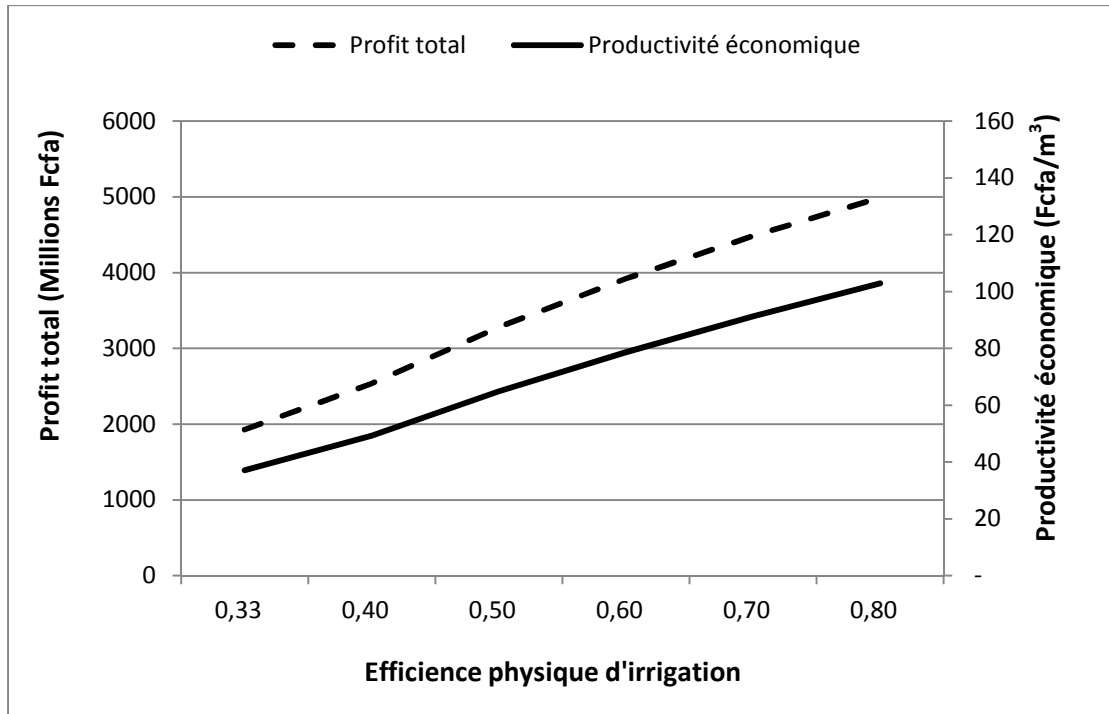


Ce qui montre que la production du maïs notamment sur le périmètre irrigué de la vallée du Kou est surtout favorisée par les déficits hydriques enregistrés sur ce périmètre. L'augmentation de l'efficacité d'irrigation a permis d'accroître la disponibilité de l'eau sur ce périmètre en favorisant la production du riz qui a considérablement accrue au détriment de celle du maïs.

Le graphique 5 présente par ailleurs l'effet de l'efficacité physique d'irrigation sur quelques paramètres de l'efficacité économique de l'eau de même que les relations existant entre ces paramètres. Ce graphique présente en fait l'évolution du profit total et de la productivité économique de l'eau en fonction des niveaux d'efficacité physique d'irrigation. Il ressort de l'analyse du graphique que tout comme le profit total, la productivité économique de l'eau augmente avec l'amélioration de l'efficacité physique d'irrigation en passant de 37 Fcfa par

mètre cube d'eau avec un taux d'efficacité de 0,33, à 103 Fcfa par mètre cube pour une efficacité physique de 0,80. Ces résultats montrent donc l'amélioration de l'efficacité d'irrigation permet d'accroître le profit et la valeur économique des usages agricoles de l'eau.

Graphique 5 : Impact de l'efficacité physique de la petite irrigation sur l'efficacité économique de l'eau



Toutefois, il est important de noter que l'amélioration des niveaux d'efficacité considérée dans cette section ne concerne que les systèmes de production ou les sous-unités du bassin où le système de la petite irrigation individuelle par motopompes est pratiqué. Le système d'irrigation gravitaire pratiqué sur le grand périmètre irrigué de la vallée du Kou n'est pas concerné par ces simulations sur les niveaux d'efficacité. Cependant, le PVK (périmètre irrigué de la vallée du Kou) représente la sous-unité la plus consommatrice des ressources en eau du bassin avec environ 40% du volume total d'eau utilisée. Ce qui signifie qu'une augmentation de l'efficacité sur le PVK pourra permettre de répondre davantage au défi de l'eau à l'échelle du bassin en réduisant les conflits liés à sa gestion.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Conclusion

L'étude a permis d'appliquer la modélisation hydro-économique à l'analyse des systèmes de gestion et d'allocation des ressources en eau du bassin du Kou. Elle a ainsi apporté une contribution en matière d'approche d'étude des conflits d'usages de l'eau dans ce bassin.

L'analyse économique des systèmes actuels d'allocation de la ressource a révélé que le capital physique notamment les motopompes, la liquidité et le manque d'eau constituent les contraintes majeures à l'irrigation en contre saison. De plus, sur un volume total de 51,6 millions de mètres cubes d'eau exploitée dans le bassin pour la production agricole de contre saison, respectivement 40, 33 et 22% sont allouées aux productions de la banane, du riz et des légumes contre seulement 4% pour le maïs. Cependant, bien qu'étant l'une des cultures les plus bénéficiaires des ressources en eau du bassin, le riz ne contribue que faiblement au profit total du bassin avec une contribution de 0,6% contre 0,1% pour le maïs, 33% pour les légumes et 66% pour la banane. Il en est de même pour le PVK qui a bénéficié d'environ 38,4% du volume total d'eau utilisé dans le bassin mais dont la contribution au profit total est estimé à 0,8% contre respectivement 40% et 32% aux sous-bassins B1 et B2 qui ont respectivement bénéficié de 25% et 19% du volume total d'eau utilisé.

L'estimation des efficacités et productivités économiques de l'eau a par ailleurs révélé que le riz est une culture très peu rentable valorisant très faiblement l'eau du bassin. Sa productivité économique est estimée à 0,79 Fcfa/m³ d'eau contre respectivement 62,25 Fcfa et 68,24 Fcfa pour les légumes et la banane. Ainsi, le PVK est la sous unité du bassin ayant la productivité économique la plus basse avec 1,27 Fcfa/m³ d'eau alors le sous-bassin B5 et ceux situés en amont du B4 présentent des productivités économiques sont assez élevés qui sont comprises entre 58 et 63 Fcfa par mètre cube d'eau utilisée. Pourtant, l'estimation des coûts d'irrigation a révélé que le coût du mètre cube d'eau est 56,16 Fcfa dans les sous-bassins B1, B2, B3 et B5 contre 0,81 Fcfa sur le PVK.

En ce qui concerne l'impact de l'augmentation des usages urbains de l'eau sur l'irrigation, les résultats de l'étude ont montré que seul le système de production du PVK et particulièrement la production rizicole en sera vulnérable. Mais, cette vulnérabilité du PVK n'aura pas un impact significatif sur le profit total du bassin et même sur les autres systèmes de production.

La dernière section de l'étude a été consacrée à l'analyse de l'impact de l'efficacité physique d'irrigation sur l'efficacité économique de l'eau dans le bassin. Les résultats obtenus dans ce

cadre ont montré que l'amélioration des efficacités d'irrigation a permis de réaliser d'importantes économies d'eau qui ont permis non seulement de réduire les coûts d'irrigation mais aussi et surtout d'alléger les contraintes de l'eau au niveau du bassin. Ainsi, le coût total d'irrigation est baissé de 1,8 à 1,2 milliards de Fcfa favorisant ainsi la libéralisation du capital liquide qui constitue l'une des contraintes majeures à la production agricole pendant la contre saison. Ce qui a permis d'accroître considérablement le profit total du bassin qui est passé de 1,9 milliards à environ 5 milliards de Fcfa. Les économies d'eau réalisées à travers l'amélioration de l'efficacité physique et la disponibilité supplémentaire du capital liquide qui en est résultée ont permis d'accroître considérablement la production agricole totale du bassin qui a évolué de 2187 à 3434 hectares de terres irriguées en contre saison, soit une augmentation d'environ 64%. Ce qui signifie que l'amélioration peut permettre de répondre au défi de l'eau à l'échelle du bassin en réduisant les conflits liés à sa gestion

Recommandations

Au regard des résultats de cette étude, nos recommandations afin de contribuer à une gestion durable des ressources en eau du bassin du Kou sont les suivantes :

- Favoriser l'accès des paysans aux services financiers afin d'atténuer la contrainte de liquidité
- Doter les paysans de puisards et des motopompes afin de favoriser l'utilisation des eaux souterraines pour l'irrigation. Ce qui pourra permettre de réduire la pression sur les eaux de surfaces et réduire le manque d'eau sur le périmètre irrigué de la vallée du Kou (PVK)
- Faire/commanditer des études supplémentaires afin de clarifier les relations existant entre les eaux de surface et les eaux souterraines de même que la durée de recharge de la nappe en vue de juger de la pertinence d'exploiter les eaux souterraines pour l'irrigation.
- Mettre en place une approche participative et inclusive de la gestion de la ressource tout en évitant d'infliger des mauvais traitements ou de caricaturer les irrigants informels installés le long du cours d'eau et des canaux
- Réaliser des expérimentations et des recherches approfondies sur le système de la petite irrigation par motopompes enfin d'élaborer un calendrier efficace d'irrigation pouvant permettre de réduire les pertes d'application et du coup améliorer les efficacités physiques d'irrigation
- Vulgariser les calendriers d'irrigations élaborés en vue de promouvoir les meilleures techniques d'irrigations avec les motopompes

- Sensibiliser les paysans sur les avantages économiques et techniques de l'adoption des calendriers et meilleures techniques d'irrigation avec les motopompes
- Accroître la valeur économique de l'eau sur le PVK (introduction des variétés moins exigeantes en eau, réallocations des ressources, techniques d'irrigation plus efficaces)
- Encourager la production des cultures les plus exigeantes en eau telles que le riz pendant l'hivernage afin de réduire voire abandonner leur production en contre saison

REFERENCES

- Ahrends, H., Mast, M., Rodgers, Ch., Kunstman, H. 2008. Coupled hydrological-economic modeling for optimized irrigated cultivation in a semi-arid catchment of West Africa. *Environmental Modelling and Software*, 23, 385-395.
- Ali Mirchi, A. ; Watkins, D., Jr. and Madani, K. 2009. Modeling for watershed planning, management, and decision making. In: *Watersheds: Management, Restoration and Environmental*, Nova Science Publishers, 2009.
- Atlas de l'Afrique : Burkina Faso. 2005. Les éditions J.A.
- Barbier, B. et Koutou, M. 2010. Gestion des bassins versants nationaux et transfrontaliers. Note de cours, Master GIRE, Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2ie), Ouagadougou, Burkina Faso.
- Bazongo B. A. 2006. Etude des pertes d'eau par évapotranspiration des groupes de cultures et des formations forestières en contre-saison dans le bassin versant du Kou dans l'Ouest du Burkina Faso. Mémoire d'ingénieur agronome. Institut du Développement Rural, GEeau plus. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 61 p.
- Bharati, L., Rodgers, C., Erdenberger, T., Plotnikova, M., and Shumilov, S. 2008. Integration of economic and hydrological models: Exploring conjunctive irrigation water use strategies in the Volta basin. *Agricultural Water Management*, 95, 925-936.
- Billi, A., Ganitano, G. and Quarto, A. (n.d.). The economics of water efficiency: A review of theories, measurement issues and integrated models. *Options méditerranéennes*, Séries B, n°57.
- Booker, J.F., Young, R.A., 1994. Modeling intrastate and interstate markets for Colorado River water-resources. *Journal of Environmental Economics and Management*, 26 (1), 66–87.
- Bos, M.G. and Nugeteren, J. 1990. On Irrigation efficiencies. ILRI publication 19, Wageningen, the Netherlands. 117 p.
- Cai, X., Ringler, C. & Rosegrant, M. W. 2006. Modeling water resources management at the basin level: methodology and application to the Maipo River Basin. Research Report, No. 149. International Food Policy Research Institute (IFPRI), Washington DC.
- Cai, X.M., 2008. Implementation of holistic water resources-economic optimization models for river basin management Reflective experiences. *Environmental Modeling and Software*, 23(1), 2-18.
- Chabi-Gonni, B.G.F. 2003. Synthèse hydrologique sur la Vallée du Kou. Mise en place d'un système de suivi et d'évaluation de la ressource. Mémoire de fin d'études EIER. 85 p.
- Diallo, M. ; Wellens, J. ; Dakouré, D. et Compaoré, N. F. 2006. L'expérience du projet Gestion de l'Eau (GEeau) dans le bassin du Kou au Burkina Faso : Promouvoir des approches innovantes de recherchedéveloppement en matière d'eau. Article non publié, Geeau, Burkina Faso,2006.
- Draper, A.J., Jenkins, M.W., Kirby, K.W., Lund, J.R., Howitt, R.E., 2003. Economic engineering optimization for California water management. *Journal of Water Resources Planning and Management* 129 (3), 155–164.

- Garduno, H. and Arreguin-Cortés. 1994. Efficient water use. Proceedings of the International Seminar on Efficient water use, Mexico, October, UNESCO Regional Office for Science and Technology for Latin America and Caribbean.
- GIEC. 2007. Les changements climatiques : dimensions économiques et sociales, GIEC, édition : Paris, association 4D, 1997, version française.
- Kpadonou, R. B. A. ; Adégbola, Y. P. et Tovignan, S. 2011. Innovations paysannes d'adaptation à la vulnérabilité climatique dans la basse vallée de l'Ouémé au Bénin. Communication au *Symposium International AfricaAdapt sur le Changement Climatique*, Addis-Abeba, Ethiopie, 9-11 mars, 201
- Linz, T., Kloos, J. and Tsegai, D. (n.d.) Improving water use efficiency under worsening scarcity: Evidence from the Middle Olifants sub-basin in South Africa.
- Louw (2002). The Development of a Methodology to Determine the True Value of Water and the Impact of a Potential Water Market on the Efficient Utilisation of Water in the Berg River Basin. Water Research commission (WRC), Pretoria.
- Mahan, R. C., Horbulyk, Th. M. and Rowse, J. G. 2002. Market Mechanisms and the Efficient Allocation of Surface Water Resources in Southern Alberta, *Socio-Economic Planning Sciences*, 25-49.
- McKinney, C. D., Cai, X., Rosegrant, M., Ringler, C., and Scott, C. A. 1999. Modeling water resources management at the basin level: Review and future directions. *SWIM Paper No. 6*, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.
- Molden, D. and Sakthivadivel. 1999. Water accounting to assess use and productivity of water. *Water resources development*, Vol. 15, No. 1-2, pp. 55-71
- Ouédraogo, M. 2011. Etude socio-économique sur les utilisateurs agricoles des ressources en eau du Kou : Cas de la zone agricole située entre Nasso et Diaradougou. Rapport final, Projet GEEau "Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou", Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, août 2010
- Pulido-Velazquez, M., Andreu, J., Sahuquillo, A. 2007. Economic optimization of conjunctive use of surface and groundwater at the basin scale. *Journal of Water Resources Planning and Management* 132 (6), 454-467.
- Rodgers, C., & Zaafrano, R. 2002. Water Allocation and Pricing Strategies in the Brantas River Basin, East Java, Indonesia. A paper prepared for the Conference on Irrigation Water Policies: Micro and Macro Considerations, held in Agadir, Morocco 15-17 June 2002.
- Rosegrant, M.W., Ringler, C., McKinney, D.C., Cai, X., Keller, A., Donoso, G. 2000. Integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: the Maipo river basin. *Agricultural Economics* 24 (1), 33-46.
- Sanon M., Diallo A., Zougrana M., Thanou O., Garani A., Yaméogo A. 2006. Changements Climatiques et Sécurité Alimentaire. Communication présentée à l'occasion de la Journée du CILSS, Ouagadougou 12 Septembre 2006.
- Sauret, E., S., G. 2008. Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou. Mémoire de DEA, Université de Liège, Belgique, 2008

- Serageldin, I. 1995. Water resources management: A new policy for a sustainable future. *Water Int.*, 20, 15–21.
- Singh, V. P. and Woolhiser, D. A. 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *J. Hydrol. Eng.*, 7(4), 270-292.
- Wellens, J., Diallo, M., Gardin, N., Midekor, A., Compaoré, N. F., Dakouré, D., Karambiri, H., Derouane, J., Brouyère, S. et Tychon, B. 2008. Promouvoir des approches innovantes de recherche-développement en GIRE au Burkina Faso. GEEau, CS 322, Burkina Faso.
- Wellens, J., Sawadogo, M., Diallo, M., Dakouré, D., Compaoré, F., Traoré, F. et Tychon, B. 2007. Recensement exhaustif des activités hydro-agricoles du Bassin du Kou. GEEau/APEFE, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, 9p.
- Wellens, J. et Compaoré N.F. 2004. Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation – GEEau. Rapport Annuel No 3 (décembre 2003 – Octobre 2004). Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Hauts Bassins, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso & K.U.Leuven, Leuven, Belgique. 124 p.
- Wellens, J., Traoré, F., Diallo, M., Dakouré, D. et Compaoré, N.F. 2009. Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou. Rapport Technique 2. APEFE-DRI/CGRI. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 131 p.
- Wellens, J., Diallo, M., Dakouré, D. et Compaoré, N.F. 2007. Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou. Rapport Technique 1. APEFE-DRI/CGRI. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 127 p.