



Université de Liège  
Faculté des Sciences  
Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

# Optimisation de l'utilisation des ressources en eau du bassin du Kou pour des usages agricoles

**Farid TRAORÉ**

Thèse présentée en vue de l'obtention  
du grade de Docteur en Sciences

Novembre 2012

## **Composition du jury :**

Président : Pr **Yves Cornet** (Université de Liège, Belgique)  
Promoteur : Pr **Bernard Tychon** (Université de Liège, Belgique)  
Lecteurs : Dr **François Bousquet** (CIRAD, France)  
Dr **Serge Brouyère** (Université de Liège, Belgique)  
Dr **Francis Rosillon** (Université de Liège, Belgique)  
Dr **Moussa Sanon** (CNRST, Burkina Faso)  
Ir. **Johan Derouane** (Région Wallonne, Belgique)

**Année Académique 2012-2013**

*A tous ceux qui me sont chers...*

# Sommaire

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>V</b>
<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS .....</b>	<b>XV</b>
<b>PARTIE 01 : INTRODUCTION GÉNÉRALE .....</b>	<b>1</b>
CHAPITRE 1. INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	2
1.1 <i>Contexte et problématique</i> .....	2
1.1.1 Contexte hydro agricole .....	3
1.1.1.1 Ressources en eau de surface et en eaux souterraines .....	3
1.1.1.2 Importantes ressources en eau mais peu connues.....	3
1.1.1.3 Existence de plusieurs zones agricoles irriguées .....	4
1.1.1.4 Chronologie de l'installation des différentes zones agricoles irriguées et autre définition du dicton "premier venu, premier servi" .....	4
1.1.1.5 Existence de conflits amont vs. aval aux contours complexes.....	5
1.1.2 Contexte socio économique .....	6
1.1.2.1 Type d'agriculture.....	6
1.1.2.2 Choix des types de culture.....	6
1.1.3 Conclusion : problème amont vs. aval ?.....	7
1.2 <i>Question de recherche</i> .....	7
1.3 <i>Objectifs de l'étude</i> .....	7
1.4 <i>Zone d'étude</i> .....	7
1.5 <i>Hypothèses de travail</i> .....	8
1.6 <i>Approche méthodologique</i> .....	8
1.6.1 Compréhension des mécanismes du système de gestion informel de l'eau dans la zone d'étude .....	9
1.6.2 Amélioration du système de gestion informel de l'eau dans la zone d'étude.....	9
1.7 <i>Structure du document</i> .....	10
<b>PARTIE 02 : ANALYSE DU SYSTÈME INFORMEL DE GESTION DE L'EAU EN AGRICULTURE .....</b>	<b>12</b>
CHAPITRE 2. PRÉSENTATION DU BASSIN VERSANT DU KOU ET DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	13
2.1 <i>Généralités sur le bassin versant du Kou</i> .....	13
2.2 <i>Climatologie du bassin versant du Kou</i> .....	13
2.2.1 Pluviométrie .....	14
2.2.2 Températures.....	14
2.2.3 Vents .....	15
2.2.4 Rayonnement solaire .....	16
2.2.5 Hygrométrie .....	16
2.2.6 Evapotranspiration .....	17
2.3 <i>Hydrographie</i> .....	17
2.3.1 Les rivières et les sources .....	17
2.3.2 Les mares et les lacs .....	18
2.4 <i>Occupation des terres</i> .....	18
2.5 <i>Pédologie</i> .....	19
2.6 <i>Géologie</i> .....	20

2.7	<i>Hydrogéologie</i> .....	21
2.8	<i>Le périmètre rizicole irrigué de la Vallée du Kou</i> .....	24
2.9	<i>La zone d'étude</i> .....	26
CHAPITRE 3.	RESSOURCES EN EAU DE LA ZONE D'ÉTUDE .....	27
3.1	<i>Etude des débits de la rivière Kou</i> .....	27
3.1.1	Matériel et méthode .....	28
3.1.1.1	Méthode .....	28
3.1.1.2	Matériel .....	29
3.1.2	Résultats.....	29
3.1.3	Structure de la concurrence pour l'eau en agriculture.....	30
3.2	<i>Perspectives à moyen terme</i> .....	31
CHAPITRE 4.	UTILISATION DE L'EAU DANS LA ZONE D'ÉTUDE.....	32
4.1	<i>Estimation des besoins en eau sur la zone agricole Nasso-Diaradougou</i> .....	32
4.1.1	Hypothèses.....	32
4.1.2	Matériel, méthode, données.....	33
4.1.2.1	Méthode .....	33
4.1.2.2	Matériel .....	34
4.1.2.3	Données.....	34
4.1.3	Résultats.....	37
4.2	<i>Etude des prélèvements d'eau pour l'irrigation</i> .....	39
CHAPITRE 5.	EVOLUTION DE LA CONSOMMATION EN EAU À USAGE AGRICOLE .....	40
5.1	<i>Evolution des prélèvements d'eau pour l'agriculture</i> .....	40
5.2	<i>Evolution des superficies agricoles irriguées</i> .....	42
5.2.1	Contexte de l'étude .....	43
5.2.2	Matériel et méthodes.....	45
5.2.2.1	Matériel .....	45
5.2.2.2	Méthodologie .....	47
5.2.3	Résultats et discussion .....	51
5.2.4	Conclusion .....	56
CHAPITRE 6.	CARACTÉRISATION AGRO-SOCIO-ÉCONOMIQUE DE LA ZONE .....	57
6.1	<i>Typologie des systèmes de production</i> .....	57
6.1.1	Présentation des données socio-économiques .....	58
6.1.1.1	Capital foncier des producteurs.....	58
6.1.1.2	Niveau d'équipement des exploitations .....	62
6.1.1.3	Les pratiques agricoles paysannes.....	63
6.1.1.4	Compte d'exploitation .....	66
6.1.1.5	Gestion de l'eau d'irrigation et perspectives.....	70
6.1.2	Ajustement des données de l'enquête socio-économique .....	71
6.1.3	Critères de classification des producteurs.....	73
6.1.3.1	Zone agricole d'appartenance .....	73
6.1.3.2	Origine .....	73
6.1.3.3	Nombre de champs .....	74
6.1.3.4	Arborescence des critères .....	74
6.1.4	Identification des systèmes de production sur la base de la classification des producteurs .....	75
6.2	<i>Analyse de la distribution spatiale des cultures</i> .....	78
6.3	<i>Conclusion</i> .....	81
<b>PARTIE 03 :</b>	<b>FORMALISATION DU SYSTÈME DE GESTION DE L'EAU AU SEIN D'UN MODÈLE.....</b>	<b>83</b>
CHAPITRE 7.	CONCEPT DES SYSTÈMES MULTI-AGENTS ET APPLICATION À LA GESTION DE L'EAU .....	84
7.1	<i>Origine</i> .....	84
7.2	<i>Définition</i> .....	84
7.2.1	Qu'est ce qu'un agent ?.....	84

7.2.2	Qu'est-ce qu'un système multi-agents ? .....	85
7.3	Application à la gestion des ressources naturelles .....	86
7.4	Validation des modèles multi-agents .....	87
7.5	Justification du choix des systèmes multi-agents dans la modélisation du système de gestion de l'eau en agriculture sur le bassin versant du Kou .....	88
CHAPITRE 8.	MODÉLISATION DU SYSTÈME DE GESTION PAR LES SYSTÈMES MULTI-AGENTS .....	90
8.1	But du modèle .....	90
8.2	Formalisation du système étudié au sein du modèle .....	90
8.2.1	L'espace .....	90
8.2.2	Les cultures .....	92
8.2.3	Les producteurs .....	93
8.2.4	Les ressources en eau .....	94
8.2.5	Les parcelles .....	97
8.2.6	Le marché .....	98
8.3	Implémentation du modèle dans un environnement de programmation .....	98
8.4	Fonctionnement du modèle... en résumé .....	99
8.4.1	Langage de programmation .....	99
8.4.2	Entités du modèle .....	100
8.4.3	Données d'entrée du modèle .....	100
8.4.4	Sorties du modèle .....	101
8.4.5	Pas de temps du modèle .....	101
8.4.6	Initialisation du modèle .....	101
8.4.7	Mise en route du modèle et choix de scénario .....	101
8.4.8	Déroulement d'un pas de temps du modèle .....	102
CHAPITRE 9.	EVALUATION DU MODÈLE .....	105
9.1	Protocole adopté pour les simulations .....	106
9.2	Occupation du sol .....	106
9.3	Débits en aval de la rivière .....	110
9.4	Revenus des producteurs .....	113
9.5	Eaux souterraines .....	117
9.6	Analyse de sensibilité .....	120
9.6.1	Sensibilité au nombre de producteurs au semis .....	120
9.6.2	Sensibilité à la distance-seuil déterminant le type d'exhaure .....	121
9.6.3	Sensibilité au nombre maximal de recharges d'un puisard au cours d'un pas de temps .....	124
9.6.3.1	Banane .....	125
9.6.3.2	Maïs .....	126
9.6.3.3	Gombo .....	127
9.6.3.4	Riz .....	129
9.6.4	Conclusion de l'analyse de sensibilité .....	131
9.7	Conclusion .....	132
<b>PARTIE 04 :</b>	<b>AMÉLIORATION DU SYSTÈME DE GESTION DE L'EAU .....</b>	<b>135</b>
CHAPITRE 10.	PROPOSITION D'ALTERNATIVES ET ÉVALUATION DES ALTERNATIVES PROPOSÉES .....	136
10.1	Alternatives envisageables pour l'amélioration de la gestion de l'eau .....	136
10.1.1	La taxation des cultures les plus consommatrices en eau .....	137
10.1.2	L'amélioration des efficacités en eau d'irrigation à la parcelle .....	138
10.1.3	Une meilleure adéquation entre les ressources en eau disponibles et les types de cultures choisis .....	138
10.1.4	La taxation des exploitations de plus de 0.5 ha irriguées à partir des eaux de surface .....	139
10.2	Évaluation des alternatives retenues .....	140
10.2.1	La taxation des cultures les plus consommatrices en eau .....	140
10.2.2	L'amélioration des efficacités en eau d'irrigation .....	144
10.2.3	Une meilleure adéquation entre les ressources en eau disponibles et les types de cultures choisis .....	145

10.2.4	La taxation des exploitations de plus de 0.5 ha irriguées à partir des eaux de surface .....	146
10.3	<i>Applicabilité des alternatives retenues sur le terrain</i> .....	148
10.4	<i>Conclusion</i> .....	149
<b>PARTIE 05 :</b>	<b>DISCUSSION GÉNÉRALE, CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES</b> .....	<b>151</b>
CHAPITRE 11.	DISCUSSION GÉNÉRALE, CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES .....	152
	<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> .....	<b>158</b>
	<b>ANNEXES</b> .....	<b>164</b>

## Remerciements

Au terme de ce long parcours, il me tient à cœur d'exprimer par les lignes qui suivent toute ma gratitude à un certain nombre de personnes physiques et morales, sans lesquelles ce parcours n'aurait pas été réalisé.

Je voudrais d'avance m'excuser sincèrement auprès de ce que j'aurais oublié ou que je n'aurais pas nommé cité. Que ces personnes sachent que cela n'enlève en rien la profonde gratitude que je leur témoigne.

Mes remerciements vont à mon promoteur de thèse, Bernard Tychon, et à l'institution qui a financé tous mes travaux de thèse, à savoir Wallonie-Bruxelles International (WBI). Je leur dit tout simplement : *"merci d'avoir cru en moi et de m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce projet si cher à ma personne !"*

Mes remerciements vont aux membres de mon comité de thèse (qui comptent aussi parmi les membres de mon jury de thèse) : Serge Brouyère, François Bousquet, Yves Cornet, Johan Derouane. Merci pour l'accompagnement éclairé que fût le vôtre !

Je remercie également Francis Rosillon et Moussa Sanon d'avoir bien voulu faire partie de mon jury de thèse. Nul doute que leurs remarques et suggestions ne manqueront pas d'enrichir ce travail.

J'ai une pensée toute spéciale pour mon co-promoteur du sud, Youssouf Dembélé, décédé plus tôt en cette année 2012. Je lui dédie tout simplement mon travail ! De son vivant, il m'a guidé à maintes reprises dans la conduite de cette étude. Qu'il en soit grandement remercié...

J'adresse des remerciements à la structure à laquelle j'appartiens au Burkina Faso, à savoir le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technologique (CNRST), pour m'avoir autorisé à effectuer cette thèse de doctorat. Je salue en cela le premier responsable du CNRST, Basile Guissou. J'adresse des remerciements à tous mes collègues de la Cellule de Télédétection et d'Information Géographique (CTIG) pour leur soutien.

Mes remerciements spéciaux vont aux membres anciens et présents du groupe "agrométéorologie" (affectueusement appelé "groupe BT") de Bernard Tychon : Djaby Bakary ("doyen Djaby"), Antoine Denis, Moussa El-Jarroudi ("Baba"), Djénéba Mané, Marie Lang, Louis Amani Kouadio ("frère Louis"), Hamid Mahyou, Tarik Benabdellouahab, Mahamadou Karimou Barké, Ilhem Khellaf, Abdoul-Aziz Diouf, Abdesalam Mahtour, Michel Noël, Joost Wellens, Ingrid Jacquemin.

Mes remerciements spéciaux vont aussi aux membres anciens et présents de la "grande famille" que constituent le Projet GEeau, le Projet Eaux Souterraines et l'AEDE/OE : Mamadou Diallo, Joost Wellens (again!), Nestor Fiacre Compaoré, Élie Sauret, Akoly Midékor, Martial Nitcheu, Ahmed Massa Kam, Valentin Ilogo, Mamadou Diakité, Vincent Sanou ("chef Vincent"), Claver Bado, Lassina Sanou, Nicolas Gardin, Denis Dakouré, Brehima Sawadogo. Et je n'oublie pas ici de saluer l'ensemble du village de Diaradougou représenté par son Délégué, pour nous avoir toujours aussi chaleureusement reçu, pour nous avoir permis et facilité le travail sur le terrain.

Je remercie les membres du personnel du Campus d'Arlon de l'Université de Liège et tout spécialement : Nelly Detaille, pour sa bienveillance ; Thomas Barthel, pour tous les services rendus ; Roger Thill, pour tous les services rendus et pour sa bonne humeur ! ; Chantal Bartholomée pour sa bienveillance pour tous les conseils prodigués ; Françoise Dasnoy, pour l'hospitalité de ses Maisons d'étudiants ; Mohamed Bouezmarni, pour sa bienveillance et ses conseils ; Catherine Heyman, pour

son aide précieuse dans mes travaux de SIG ; Khadija Sossey, pour sa bienveillance et ses encouragements.

A mes amis, frères et sœurs d'adoption que j'ai eu le privilège de rencontrer durant ce parcours, j'adresse un remerciement spécial ! Seul Dieu sait le soutien que vous avez été pour moi... Au risque d'en oublier, je tenterais ici de les citer nommément. Il s'agit de : Louis Amani Kouadio (again!), Trésor Baya, Marius & Christine Bessekou, Guy Éric Kouakou, Guy-Romain Kouam Kenmogne, Philippe Kodjo, Thierry Tangou, Nourou Dine Liady, Djénéba Mané (again!), Nouho Koffi Ouattara, Larbi Aziz, Claude Sene, Sheick Sangaré, Élie Sauret (again!), Raïnatou Boly, Samuel Yaknyé, Fouad Zouhir, Aurélien Olissan, Romaine Zangré... Et je sais que j'en oublie...

Merci à Dorothée Hauquier (WBI), Éric Vandelook (WBI) et à Anselme Sawadogo (APEFE) pour la gestion des aspects administratifs en relation avec le déroulement de mes travaux.

C'est ici enfin l'occasion de remercier chaleureusement ma famille et mes proches. Ils sont des piliers sur lesquels je me suis toujours appuyé et ils ont été des compagnons à toute épreuve... Je ne les citerai pas ici, mais ils se reconnaîtront tous ;-)

Enfin, et non des moindres, je remercie mon Dieu pour son précieux soutien !

Je remercie d'avance tous ceux qui me liront ! L'œuvre n'est pas parfaite, certes, mais sachez qu'elle a été accomplie avec une grande passion... Et je trouve ici l'occasion de citer Bertrand Russell qui a dit : "*Il vaut mieux viser la perfection et la manquer que viser l'imperfection et l'atteindre*"...

Bonne lecture !

## Résumé

L'eau est une ressource finie, sensible aux facteurs extérieurs et à la dégradation de l'environnement, coûteuse à maîtriser et à mettre en valeur. Elle devient plus précieuse à mesure que se multiplient les utilisations concurrentes. Par conséquent, une gestion intégrée et concertée des ressources en eau est indispensable au sein d'une unité telle que le bassin versant.

Le bassin versant du Kou, au Burkina Faso, renferme d'importantes ressources en eau qui se répartissent entre besoins domestiques (alimentation en eau potable, notamment), besoins agricoles (irrigation) et besoins industriels. Le contexte hydro agricole du bassin versant du Kou est celui d'une rivière pérenne, le long de laquelle se sont installées progressivement plusieurs zones agricoles. Au fil du temps, d'une situation de satisfaction des besoins en eau en agriculture, on est passé à une situation de déficits en eau d'irrigation, notamment en raison de la baisse observée des apports en eau, et du nombre toujours plus grand d'exploitations agricoles dépendant des eaux de la rivière. Les déficits en eaux d'irrigation touchent principalement les zones agricoles situées en aval. Le contexte socio économique est caractérisé par une tendance de plus en plus grande des producteurs pour la pratique de cultures de rentes très consommatrices en eau. Ce qui ne manque pas d'accroître les déficits en eaux d'irrigation, déjà importants. Et d'accroître encore les inégalités amont-aval, en matière de satisfaction des besoins en eau.

Dans le contexte de la zone étudiée, le principal facteur ayant une grande influence sur les niveaux de prélèvements d'eau pour l'agriculture, est le type de système de production mis en œuvre par les producteurs. L'hypothèse principale de l'étude a été de vérifier si ces systèmes de production pouvaient constituer le levier sur lequel agir afin d'optimiser l'utilisation de l'eau pour l'irrigation. La méthodologie générale adoptée a été élaborée de sorte à fournir une connaissance du système de gestion de l'eau, qui permette d'en proposer des améliorations. En ce sens, un outil d'aide à la décision basé sur les systèmes multi-agents a été élaboré afin d'apporter une réponse au problème de la gestion de l'eau dans la zone étudiée par la simulation de scénarios de gestion.

Les conclusions de l'étude ont montré par l'utilisation de l'outil élaboré, que c'est par action sur les systèmes de production qu'il est possible d'optimiser les prélèvements d'eau pour l'irrigation. Au sein des systèmes de production, ce sont surtout les changements proposés au niveau des pratiques d'irrigation qui ont permis une meilleure optimisation de la gestion de l'eau.

Enfin, l'étude a montré que l'utilisation des systèmes multi-agents pour la résolution du problème de gestion de l'eau en agriculture sur le bassin du Kou, pouvait constituer le point de départ d'une approche nouvelle dans la gestion des ressources en eau, dans la mesure où cette approche permet la prise en compte effective des conséquences des décisions des producteurs en matière de gestion de l'eau. D'une manière plus générale, les outils de gestion de ressources naturelles basés sur les systèmes multi-agents, à travers l'avantage d'une représentation commune de l'environnement au sein d'un modèle qu'ils offrent, peuvent jouer un grand rôle dans la sensibilisation et la prise de conscience des enjeux d'une meilleure gestion du bien commun que sont ces ressources naturelles.

*Mots-clés : gestion de l'eau, systèmes de production agricole, systèmes multi-agents*

## Abstract

Water is a priceless natural resource very sensitive to external factors and environmental degradation. It becomes more valuable as competing uses multiply. Therefore, integrated and cooperative water resources management is essential within a watershed.

The Kou watershed (Burkina Faso) has significant water resources which are divided between domestic (water supply, etc.), agricultural (irrigation) and industrial uses. The hydro-agricultural context of the Kou watershed is marked by a perennial river, along which are located several agricultural areas. Over time, once satisfying water needs degraded to irrigation water deficits, mainly due to a reduction in water supply and an increase in irrigated farmland. Irrigation water deficits are mostly encountered in the more downstream agricultural areas. The socio-economic context is characterized by a growing trend for highly profitable and water consuming crops (e.g. banana). This further increases the irrigation water deficits, as well as the upstream-downstream water-sharing inequalities.

In the context of the study area, the main factor that may influence the agricultural water withdrawals is the farmers' production system. The main hypothesis of the study was to verify whether these agricultural production systems could be the lever to optimize irrigation water use. The methodology of the study was to provide a sufficiently accurate knowledge of the water management system, so that improvements could be proposed. A decision support tool based on the 'multi-agent systems' approach (MAS) was developed in order to provide an answer to the problems of the study area's water management by simulating management scenarios.

The findings of the study showed (using the MAS tool) that through actions on agricultural production systems it is possible to optimize irrigation water withdrawals. Within the production systems, it is mainly changes in irrigation practices that have led to an optimization of the water management.

Finally, the study showed that the use of MAS in resolving agricultural water management issues in the Kou watershed could be the starting point for a new approach in water management. This approach allows the effective integration of the consequences of farmers' decisions regarding water management. More generally MAS-based natural resources management tools provide a common representation of the environment within a model that can help raise awareness concerning a better management of these natural resources.

*Keywords: water management, agricultural production systems, multi-agents systems*

## Liste des tableaux

Tableau 1. Principales caractéristiques physiques du bassin versant du Kou .....	13
Tableau 2. Formations aquifères du bassin versant du Kou (source : Lorenzini, 2007) .....	23
Tableau 3. Liste du matériel utilisé lors des campagnes de mesure de débits sur le Kou .....	29
Tableau 4. Estimation des débits moyens mensuels en amont et aval de la zone d'étude .....	30
Tableau 5. Principales cultures rencontrées au sein de la zone d'étude (d'après Ouédraogo, 2010) .....	33
Tableau 6. Imagerie satellitale .....	34
Tableau 7. Périodes durant lesquelles les cultures sont pratiquées.....	36
Tableau 8. Coefficients culturaux des cultures pour des semis en janvier .....	36
Tableau 9. Besoins en eau spécifiques mensuels .....	37
Tableau 10. Estimation des superficies des cultures.....	38
Tableau 11. Estimation des besoins en eau totaux.....	38
Tableau 12. Besoins en eau, prélèvements, efficacités d'utilisation de l'eau .....	39
Tableau 13. Estimation des prélèvements pour les mois d'Avril (1987-2010) .....	41
Tableau 14. Set d'images.....	46
Tableau 15. Distribution du nombre total de pixels des zones d'entraînement par image et par classe de végétation .....	48
Tableau 16. Statistiques descriptives des valeurs de réflectances (ToA) des pixels de zones échantillons pour 3 canaux de l'image Landsat-5 TM du 24 juin 2009 .....	50
Tableau 17. Évaluation de la précision de la classification de l'image Landsat-4 TM du 05 mai 1988, avant post-traitement (valeurs en pourcentage).....	51
Tableau 18. Évaluation de la précision de la classification de l'image Landsat-7 ETM+ du 20 avril 2000, avant post-traitement (valeurs en pourcentage).....	51
Tableau 19. Évaluation de la précision de la classification de l'image Landsat-5 TM du 24 juin 2009, avant post-traitement (valeurs en pourcentage).....	51
Tableau 20. Évaluation des résultats des classifications avant le post-traitement .....	52
Tableau 21. Estimation des superficies en cultures irriguées par la méthode du maximum de vraisemblance .....	52
Tableau 22. Types de trajectoire temporelle des pixels pour les 3 images, ainsi que les corrections proposées .....	52
Tableau 23. Trajectoires observées et nombre de pixels concernés .....	53
Tableau 24. Évaluation de la précision de la classification de l'image Landsat-4 TM du 05 mai 1988, après post-traitement (valeurs en pourcentage).....	54
Tableau 25. Évaluation de la précision de la classification de l'image Landsat-7 ETM+ du 20 avril 2000, après post-traitement (valeurs en pourcentage).....	54
Tableau 26. Évaluation de la précision de la classification de l'image Landsat-5 TM du 24 juin 2009, après post-traitement (valeurs en pourcentage).....	54
Tableau 27. Évaluation des résultats des classifications après le post-traitement.....	54
Tableau 28. Estimation des superficies en cultures irriguées après post-traitement .....	54
Tableau 29. Superficies moyennes (en ha) des exploitations (d'après Ouédraogo, 2010).....	59
Tableau 30 : Types de propriété des champs (d'après Ouédraogo, 2010).....	59
Tableau 31 : Mode d'acquisition des champs (d'après Ouédraogo, 2010).....	60
Tableau 32 : Position des parcelles par rapport à la prise d'eau (d'après Ouédraogo, 2010) .....	60
Tableau 33 : Nombre de champs et distance par rapport à la rivière Kou (d'après Ouédraogo, 2010).....	61
Tableau 34 : Appréciation de la fertilité des champs (d'après Ouédraogo, 2010).....	61

Tableau 35 : Taux d'équipement des producteurs en puisards et en motopompes (d'après Ouédraogo, 2010).....	62
Tableau 36 : Répartition des producteurs selon l'âge des puisards et des motopompes (d'après Ouédraogo, 2010).....	62
Tableau 37 : Taux d'équipement en matériels agricoles (d'après Ouédraogo, 2010) .....	63
Tableau 38 : Superficie par culture principale en saison sèche 2009 (d'après Ouédraogo, 2010) .....	64
Tableau 39 : Répartition des producteurs selon le mode d'exhaure (d'après Ouédraogo, 2010).....	66
Tableau 40 : Compte d'exploitation en euros par exploitation et par UAT (d'après Ouédraogo, 2010).....	67
Tableau 41 : Compte d'exploitation par culture et par ha (1/2) (modifié de Ouédraogo, 2010).....	69
Tableau 42 : Compte d'exploitation par culture et par ha (2/2) (modifié de Ouédraogo, 2010).....	70
Tableau 43 : Raison de non disposition des producteurs à payer pour l'eau d'irrigation (d'après Ouédraogo, 2010) .....	71
Tableau 44. Ressources en terre (superficies en hectares) .....	77
Tableau 45. Système de culture.....	77
Tableau 46. Caractéristiques de l'exploitation .....	77
Tableau 47. Classes de producteurs selon les systèmes de production identifiés.....	77
Tableau 48. Statistiques descriptives des distances (en mètre) des parcelles à la rivière Kou.....	78
Tableau 49. Distribution des principales cultures à Bana en fonction du numéro d'ordre du champ .....	80
Tableau 50. Distribution des principales cultures à Diaradougou en fonction du numéro d'ordre du champ .....	80
Tableau 51. Distribution des principales cultures à Sambla-Toukoro en fonction du numéro d'ordre du champ .....	81
Tableau 52. Description des entités du modèle .....	100
Tableau 53. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures, toutes simulations confondues (10 répétitions).....	107
Tableau 54. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures au sein de l'UAT de Bana, toutes simulations confondues .....	108
Tableau 55. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures au sein de l'UAT de Diaradougou, toutes simulations confondues .....	108
Tableau 56. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures au sein de l'UAT de Sambla-Toukoro, toutes simulations confondues .....	109
Tableau 57. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures irriguées par les eaux de surface au sein de l'UAT de Diaradougou, toutes simulations confondues .....	109
Tableau 58. Evaluation des simulations de débits en aval de la zone d'étude par des indicateurs de performance (pour 10 répétitions) .....	111
Tableau 59. Débits prélevés simulés vs. Débits prélevés observés au pas de temps annuel (moyennes sur les 180 premiers pas de temps, en m <sup>3</sup> /s) .....	112
Tableau 60. Débits prélevés simulés vs. Débits prélevés observés au pas de temps mensuel (moyennes sur les 180 premiers pas de temps, en m <sup>3</sup> /s).....	113
Tableau 61. Corrélations entre les revenus des producteurs d'une année à l'autre .....	114
Tableau 62. Valeurs médianes des revenus des producteurs par UAT (en euros), toutes simulations confondues.....	114
Tableau 63. Valeurs médianes des revenus des producteurs par classe de producteurs (en euros), toutes simulations confondues .....	114
Tableau 64. Classement des classes de producteurs en fonction des revenus médians (en euros), pour l'année 1.....	115
Tableau 65. Proportions relatives par classe de producteurs, des types d'exhaure pour l'irrigation des parcelles .....	115
Tableau 66. Comparaison par paires des revenus médians des producteurs (par la méthode de Wilcoxon) .....	117
Tableau 67. Classification des taux de croissance des revenus des producteurs entre l'année 1 et l'année 3, toutes simulations confondues .....	117
Tableau 68. Proportions de stress hydrique pour chaque type de culture.....	118

Tableau 69. Détail de la distribution du degré <sup>(*)</sup> de stress hydrique subi par les parcelles de culture irriguées par les eaux souterraines.....	119
Tableau 70. Conditions de l'analyse de sensibilité au nombre de producteurs par semis .....	120
Tableau 71. Rapport du test de Tukey sur la différence des moyennes de prélèvements N4, N6, N8 .....	121
Tableau 72. Conditions de l'analyse de sensibilité aux distances-seuil déterminant le type d'exhaure.....	122
Tableau 73. Rapport du test de Tukey sur la différence des moyennes de prélèvements (m <sup>3</sup> /s) en fonction des distances-seuil (m) déterminant le type d'exhaure .....	122
Tableau 74. Estimation des valeurs d'efficience hydrique zonale en fonction de la distance au Kou .....	123
Tableau 75. Distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de banane, en fonction du nombre de recharges des puisards .....	125
Tableau 76. Rapport du test de Tukey sur la comparaison des valeurs moyennes d'intensité de stress des parcelles de banane, en fonction du nombre de recharges des puisards .....	126
Tableau 77. Distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de maïs, en fonction du nombre de recharges des puisards .....	126
Tableau 78. Rapport du test de Tukey sur la comparaison des valeurs moyennes d'intensité de stress des parcelles de maïs, en fonction du nombre de recharges des puisards .....	127
Tableau 79. Distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de gombo, en fonction du nombre de recharges des puisards .....	128
Tableau 80. Rapport du test de Tukey sur la comparaison des valeurs moyennes d'intensité de stress des parcelles de gombo, en fonction du nombre de recharges des puisards .....	129
Tableau 81. Distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de riz, en fonction du nombre de recharges des puisards .....	130
Tableau 82. Rapport du test de Tukey sur la comparaison des valeurs moyennes d'intensité de stress des parcelles de riz, en fonction du nombre de recharges des puisards .....	131
Tableau 83. Composition du collège d'experts locaux .....	137
Tableau 84. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du riz, au sein de l'UAT de Bana .....	141
Tableau 85. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du riz, au sein de l'UAT de Diaradougou.....	141
Tableau 86. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du riz, au sein de l'UAT de Sambla-Toukoro .....	142
Tableau 87. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du gombo (okra), au sein de l'UAT de Bana .....	142
Tableau 88. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du gombo (okra), au sein de l'UAT de Sambla-Toukoro .....	143
Tableau 89. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du riz et du gombo, au sein de l'UAT de Bana .....	143
Tableau 90. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du riz et du gombo, au sein de l'UAT de Diaradougou .....	144
Tableau 91. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du riz et du gombo, au sein de l'UAT de Sambla-Toukoro .....	144
Tableau 92. Distributions des valeurs de débits (m <sup>3</sup> /s) simulées en aval de la zone d'étude, pour des efficacités d'irrigation de 30% et 50%.....	145
Tableau 93. Distributions des valeurs de débits (m <sup>3</sup> /s) simulées en aval de la zone d'étude, avant un après un recours important aux eaux souterraines pour l'irrigation .....	146
Tableau 94. Valeurs médianes des revenus des producteurs par UAT (en euros), après application d'une taxe aux exploitations de plus de 0.5 ha .....	146
Tableau 95. Taux de croissance moyens des revenus après application d'une taxe aux exploitations de plus de 0.5 ha .....	146

<i>Tableau 96. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures au sein de l'UAT de Bana, après application d'une taxe aux exploitations de plus de 0.5 ha (5 répétitions) .....</i>	<i>147</i>
<i>Tableau 97. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures au sein de l'UAT de Diaradougou, après application d'une taxe aux exploitations de plus de 0.5 ha (5 répétitions) .....</i>	<i>147</i>
<i>Tableau 98. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures au sein de l'UAT de Sambla-Toukoro, après application d'une taxe aux exploitations de plus de 0.5 ha (5 répétitions) .....</i>	<i>148</i>

# Liste des figures

Figure 1. Situation du bassin versant du Kou.....	2
Figure 2. Bassin versant du Kou.....	3
Figure 3. Zones agricoles irriguées du bassin versant du Kou.....	4
Figure 4. Zone agricole irriguée de Nasso-Diaradougou .....	8
Figure 5. Connexions entre les chapitres de la table des matières (en traits continus, les fortes connexions et les traits discontinus, les faibles connexions. Les flèches indiquent le sens des contributions) .....	11
Figure 6. Illustration des saisons à travers les périodes favorables à la végétation (d'après base de données FAO NewLocClim) .....	14
Figure 7. Normales pluviométriques mensuelles de 4 stations du bassin versant du Kou (en mm).....	14
Figure 8. Variation des températures moyennes mensuelles à Bobo-Dioulasso (d'après Wellens and Compaoré, 2003) .....	15
Figure 9. Moyenne mensuelle de la vitesse du vent à 2 mètres du sol à Bobo-Dioulasso (d'après Wellens and Compaoré, 2003) .....	16
Figure 10. Moyenne mensuelle du rayonnement solaire à Bobo-Dioulasso (d'après d'après base de données FAO NewLocClim).....	16
Figure 11. Moyenne mensuelle de l'humidité relative à Bobo-Dioulasso (d'après Wellens and Compaoré, 2003) .....	17
Figure 12. Evapotranspiration potentielle normale à Bobo-Dioulasso et Bama.....	17
Figure 13. Réseau hydrographique du bassin versant du Kou .....	18
Figure 14. Carte d'occupation des terres du bassin versant du Kou .....	19
Figure 15. Carte morphopédologique du bassin versant du Kou (d'après Wellens and Compaoré, 2004) .....	20
Figure 16. Géologie du bassin versant du Kou .....	21
Figure 17. Coupe Hydrogéologique et Géologique de la région de Bobo-Dioulasso (d'après SOGREAH, 1994) .....	23
Figure 18. Localisation des principales sources d'eau du bassin versant du Kou (sur la carte géologique) .....	24
Figure 19. Périmètre rizicole irrigué de la Vallée du Kou .....	25
Figure 20. Subdivision de la zone d'étude en UAT .....	26
Figure 21. Localisation des sites de mesure de débits (équipés de sondes de mesure de pression) du projet GEeau .....	28
Figure 22. Evolution de débits moyens journaliers du Kou (dans la zone d'étude) entre janvier et avril .....	30
Figure 23. Structure de la concurrence pour l'eau en agriculture sur le bassin versant du Kou.....	31
Figure 24. Aperçu du contenu du fichier des paramètres de cultures de CROPWAT (cas du chou) .....	35
Figure 25. Aperçu du contenu du fichier de paramètres des sols de CROPWAT .....	35
Figure 26. Aperçu du contenu du fichier des paramètres de pluie de CROPWAT .....	35
Figure 27. Tendances d'évolution des débits (amont en bleu, et aval en rouge) pour les mois d'Avril au sein de la zone d'étude .....	42
Figure 28. Méthodologie générale .....	46
Figure 29. Illustration du chevauchement entre les distributions des valeurs des pixels des zones échantillons (canal "vert" Landsat-7 ETM+) .....	48
Figure 30. Résultat de la correction de la classification de l'image Landsat-4 TM du 05 mai 1988.....	55
Figure 31. Résultat de la correction de la classification de l'image Landsat-7 ETM+ du 20 avril 2000.....	55
Figure 32. Résultat de la correction de la classification de l'image Landsat-5 TM du 24 juin 2009.....	55
Figure 33. Carte des zones touchées par le changement.....	55
Figure 34. Distribution des producteurs en fonction du nombre de champ (d'après Ouédraogo, 2010).....	58
Figure 35. Distribution des producteurs en fonction de la superficie totale (d'après Ouédraogo, 2010) .....	59

Figure 36 : Importance des cultures principales en saison sèche 2010 (ha) .....	64
Figure 37 : Répartition des producteurs selon l'utilisation de la main œuvre extérieure (d'après Ouédraogo, 2010).....	65
Figure 38 : Taux d'utilisation des intrants agricoles (d'après Ouédraogo, 2010) .....	65
Figure 39 : Distribution des cultures en fonction du produit brut par hectare (euros/ha).....	68
Figure 40 : Distribution des cultures en fonction des charges d'exploitation par hectare (euros/ha) .....	68
Figure 41 : Distribution des cultures en fonction de la marge brute par hectare (euros/ha).....	69
Figure 42. Hiérarchie des critères de regroupement des producteurs .....	74
Figure 43. Intersection des sciences à l'origine des systèmes multi-agents (d'après Jean-Pierre Müller) .....	84
Figure 44. L'agent dans son environnement (modifié de Wooldridge, 2000) .....	85
Figure 45. Association de systèmes multi-agents, jeux de rôle et observations de terrain (d'après Barreteau et al., 2001)....	87
Figure 46. Espace réel.....	91
Figure 47. Espace représenté au sein du modèle.....	91
Figure 48. Illustration des agrégations possibles de cellules au sein du modèle .....	92
Figure 49. Processus de choix d'une culture pour la saison prochaine, à l'échelle du producteur .....	94
Figure 50. Diagramme UML représentant les entités du modèle, et leurs relations .....	104
Figure 51. Diagramme de séquence représentant le déroulement d'un pas de temps du modèle .....	104
Figure 52. Débits aval simulés vs. Débits aval observés année 1.....	112
Figure 53. Débits aval simulés vs. Débits aval observés année 2.....	112
Figure 54. Débits aval simulés vs. Débits aval observés année 3.....	112
Figure 55. Tri ascendant des revenus médians des classes de producteurs.....	116
Figure 56. Distribution des prélèvements d'eau (m <sup>3</sup> /s) pour 4, 6 et 8 (N4, N6, N8) producteurs ensemençant simultanément leurs parcelles en début de simulation .....	121
Figure 57. Distribution des prélèvements en fonction des distances-seuil (par rapport à la rivière) déterminant le type d'exhaure.....	122
Figure 58. Pourcentage de parcelles touchées par le stress hydrique, en fonction du nombre de recharges des puisards ....	124
Figure 59. Tracé des distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de banane, en fonction du nombre de recharges des puisards.....	125
Figure 60. Tracé des distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de maïs, en fonction du nombre de recharges des puisards.....	127
Figure 61. Tracé des distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de gombo, en fonction du nombre de recharges des puisards.....	129
Figure 62. Tracé des distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de riz, en fonction du nombre de recharges des puisards .....	131
Figure 63. Association de systèmes multi-agents, jeux de rôle et observations de terrain (d'après Barreteau et al., 2001)..	157

## Liste des sigles et abréviations

<b>AEDE</b>	Association Eau Développement et Environnement
<b>AEP</b>	Alimentation en Eau Potable
<b>APEFE</b>	Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger
<b>ArGEnCo</b>	Architecture, Géologie, Environnement et Constructions
<b>BUNASOLS</b>	Bureau National des Sols
<b>CILSS</b>	Comité Inter-états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel
<b>CIRAD</b>	Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement
<b>CLE</b>	Comité Local de l'Eau
<b>CNRST</b>	Centre National de la Recherche Scientifique et Technologique
<b>CORMAS</b>	<i>Common-pool Resources and Multi-Agent Systems</i>
<b>DPAHRH</b>	Direction Provinciale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutique
<b>DRAHRH</b>	Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutique
<b>ESO</b>	Eaux Souterraines Bobo
<b>ETM+</b>	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
<b>FAO</b>	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
<b>FIT</b>	Front Intertropical
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>IGB</b>	Institut Géographique du Burkina
<b>Lux-Development</b>	Agence luxembourgeoise pour la Coopération au Développement
<b>MLC</b>	<i>Maximum Likelihood Classification</i>
<b>NDVI</b>	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
<b>OE</b>	Observatoire de l'Eau des bassins versants du Mouhoun, de la Comoé et du Banifing
<b>OMM</b>	Organisation Météorologique Mondiale
<b>ONEA</b>	Office National de l'Eau et de l'Assainissement
<b>ORD</b>	Organisation pour la Recherche et le Développement
<b>PAFDK</b>	Projet d'Aménagement Participatif des Forêts Classées de Dindéresso et du Kou
<b>PVC</b>	<i>Polyvinyl Chloride</i> (ou polychlorure de vinyle)
<b>RESO</b>	Ressources en Eau dans le Sud-Ouest
<b>RMSE</b>	<i>Root Mean Square Error</i> (ou erreur quadratique moyenne)
<b>SIG</b>	Système d'Information Géographique
<b>SMA</b>	Système Multi-Agents
<b>TM</b>	<i>Thematic Mapper</i>
<b>UAT</b>	Unité d'Appui Technique
<b>ULg</b>	Université de Liège
<b>UML</b>	<i>Unified Modeling Language</i>
<b>WBI</b>	Wallonie-Bruxelles International



## **Partie 1 : Introduction générale**

## Chapitre 1. Introduction générale

### 1.1 Contexte et problématique

Le contexte géographique de cette étude est le bassin versant du Kou, situé dans le sud-ouest du Burkina Faso. Le bassin versant du Kou (voir Figure 1, Figure 2) est l'espace géographique qui contient le système d'eau de la rivière Kou et de nombreuses sources diffuses, des lacs et mares, et cours d'eau non pérennes rattachés au Kou. Ce sous bassin du Mouhoun Supérieur a une superficie de 1823 km<sup>2</sup> et abrite par ailleurs l'agglomération urbaine de Bobo-Dioulasso, seconde ville du Burkina Faso. A Bobo-Dioulasso uniquement, la population résidente est estimée aujourd'hui à 600 000 habitants, avec un taux de croissance de près de 3% par an (Lux-Development, 2008).

Les ressources en eau du bassin du Kou se répartissent principalement entre besoins domestiques (approvisionnement en eau potable de la ville de Bobo-Dioulasso) et besoins agricoles (périmètre rizicole irrigué de Bama, zones agricoles irriguées informelles notamment).



Figure 1. Situation du bassin versant du Kou

La gestion de l'eau en milieu agricole est très délicate car les besoins en eau des exploitations agricoles sont très variés. Ils devraient être pour la plupart satisfaits dans la mesure où l'économie du Burkina Faso repose en grande partie sur l'agriculture (33% du Produit Intérieur Brut, d'après Zoungrana and Kaboré, 2009), et de ce fait, l'émergence de conflits liés à une ressource aussi rare est à craindre.

Afin de mieux cerner la problématique particulière de la gestion de l'eau en agriculture sur le bassin versant du Kou, il importe d'avoir un aperçu sur les contextes hydro agricole et socioéconomique de ce bassin versant.

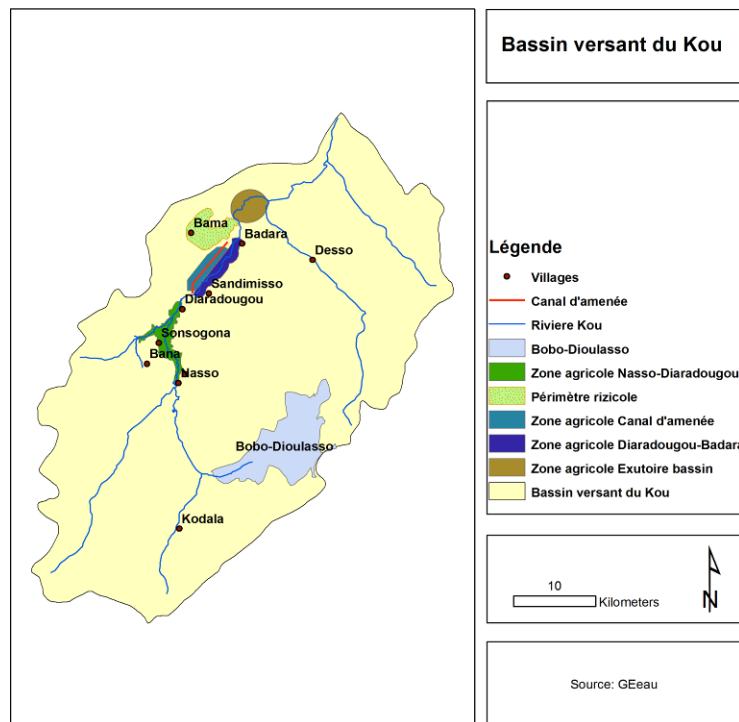


Figure 2. Bassin versant du Kou

### 1.1.1 Contexte hydro agricole

#### 1.1.1.1 Ressources en eau de surface et en eaux souterraines

Le bassin versant du Kou renferme des ressources en eau assez importantes. Ces ressources se répartissent entre eaux de surface et eaux souterraines. Les eaux de surface sont essentiellement constituées des eaux de la rivière Kou, affluent du fleuve Mouhoun qui à son tour est un important affluent du fleuve Volta<sup>1</sup>. Le bassin du Kou abrite une zone hydrogéologique très favorable, constituée d'aquifères sédimentaires logés principalement dans des sédiments récents, auxquels sont associées de nombreuses sources diffuses aux débits exceptionnels, 400 m<sup>3</sup>/h à 6 000 m<sup>3</sup>/h en étiage respectivement dans les localités de Pésou/Déso et Nasso (SOGREAH, 1993). Les caractéristiques de ces aquifères ont fait l'objet de plusieurs études (Lorenzini, 2007 ; Sauret, 2007 ; Derouane and Dakouré, 2006 ; Dakoure, 2003 ; SOGREAH, 1994 ; SOGREAH, 1993) et font encore aujourd'hui l'objet d'études (travaux du Projet ESO<sup>2</sup> ; Thèse d'Élie Sauret<sup>3</sup>).

#### 1.1.1.2 Importantes ressources en eau mais peu connues

Le manque de connaissances précises sur la capacité des aquifères du bassin versant du Kou limite fortement les projections quant à la gestion des eaux du Kou à long terme. Cette situation rend également complexe la compréhension du fonctionnement hydrogéologique et une quantification précise des volumes en eau renouvelables, totaux et exploitables des aquifères du bassin.

<sup>1</sup> Fleuve d'Afrique de l'ouest, qui se jette dans le golfe de Guinée. Il est constitué par la réunion de trois cours d'eau issus du Burkina Faso : le Mouhoun (anciennement Volta noire) ; le Nakambé (anciennement Volta blanche) et le Nazinon (anciennement Volta rouge). Ils confluent au Ghana, et forment avec l'Oti le lac Volta (plus de 8 000 km<sup>2</sup>) créé par le barrage d'Akosombo. (Source : Encyclopédie Larousse)

<sup>2</sup> Projet Eaux Souterraines Bobo : projet financé par la coopération belge et qui vise à l'appui à la gestion et à la protection des ressources en eaux souterraines exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso.

<sup>3</sup> Doctorant à l'Université de Liège, au sein du département Architecture, Géologie, Environnement et Constructions (ArGEnCo). Élie Sauret, sous la conduite du Dr Serge Brouyère, travaille à caractériser les eaux souterraines du bassin versant du Kou, au sein du Projet Eaux Souterraines Bobo (ESO). Ses travaux sont en cours et devraient bientôt être publiés.

D'après les travaux du bureau d'étude SOGREAH (1993) les dépôts sédimentaires du bassin du Kou sont intensément fracturés, affectés par des failles verticales orientées sud-est vers nord-ouest. Cette fracturation permet l'accumulation et le stockage d'importants volumes en eau dans quatre niveaux aquifères : les grès fins glauconneux (GFG), les grès à granules de quartz (GGQ), les grès fins roses (GFR) et les silstones, argilites et carbonates (SAC1). Ces quatre niveaux aquifères hébergeraient une nappe d'eau souterraine unique qui s'écoule de l'est vers les sources de Nasso avec un faible gradient hydraulique de l'ordre de 0.3%, et les valeurs de transmissivité compris entre 2 à  $5 \cdot 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s. D'un point de vue hydrogéologique, les sources de Nasso constituent l'exutoire naturel de la rivière Kou. Leur origine serait liée aux résurgences des eaux des aquifères profonds via la faille d'effondrement NW-SE qui met en connectivité hydraulique plusieurs niveaux aquifères (Sauret, 2007).

### 1.1.1.3 Existence de plusieurs zones agricoles irriguées

Sur le bassin versant du Kou, on ne dénombre pas moins de 5 grandes zones agricoles irriguées (voir Figure 3). Ces zones sont pour la plupart distribuées le long de la rivière Kou et de ses affluents, à l'exception du périmètre rizicole de Bama qui est alimenté par dérivation (canal en béton armé) des eaux du Kou. La configuration de ces zones agricoles irriguées laisse supposer le rôle clé que jouent les eaux de la rivière, dans l'irrigation. Une étude hydro agricole effectuée en 2007 par le Projet GEeau<sup>4</sup> a montré que l'utilisation des eaux de surface était prépondérante (près de 65%) par rapport à celle des eaux souterraines (Wellens et al., 2007). Ceci donne une indication sur la pression exercée sur les eaux de surface du bassin versant, si on ne considère que le domaine agricole.

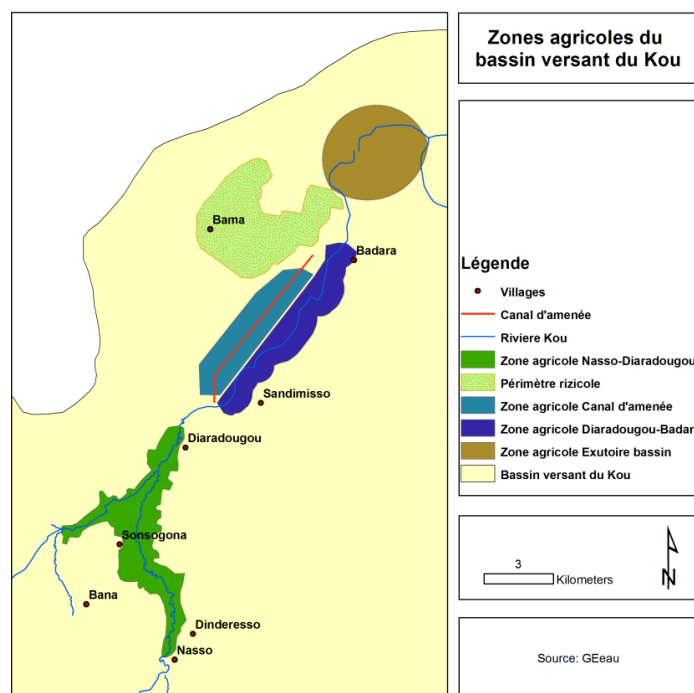


Figure 3. Zones agricoles irriguées du bassin versant du Kou

### 1.1.1.4 Chronologie de l'installation des différentes zones agricoles irriguées et autre définition du dicton "premier venu, premier servi"

<sup>4</sup> Projet GEeau : projet financé par la coopération belge et qui vise au renforcement des capacités pour la conception et la mise en œuvre d'outils de gestion de l'eau à usage agricole

L'agriculture irriguée est pratiquée sur le bassin versant du Kou depuis plus de 40 ans. Cette agriculture irriguée a officiellement commencé avec l'aménagement du périmètre rizicole de Bama, en 1969 (Wellens and Nitcheu, 2009). Ce périmètre, d'une superficie de 1260 ha, a été aménagé par la coopération taïwanaise. A cette époque, le dimensionnement du périmètre avait été fait, en tenant compte des débits disponibles du Kou. Progressivement, de nouvelles zones agricoles informelles et formelles ont vu le jour en amont du périmètre rizicole. Parmi les zones agricoles formelles, on peut citer un périmètre maraicher situé un peu en amont du périmètre rizicole de Bama (voir Figure 3). L'aménagement de ce périmètre décidé par l'État burkinabé a été également réalisé par la Coopération Taïwanaise, en 1974. Le périmètre, d'une superficie de 75 ha, était initialement destiné à la culture du haricot vert, et ce en période de repos du périmètre rizicole en aval, pour ne pas restreindre l'alimentation en eau de ce dernier. Aujourd'hui, de nombreuses cultures (banane, papaye, maïs, riz) parfois très consommatrices en eau, ont été introduites. Et l'irrigation se fait désormais presque en continu, en défaveur du périmètre rizicole en aval (communication orale, Martial Nitcheu, AEDE<sup>5</sup>). Parmi les zones agricoles informelles, on peut citer la zone agricole de Diaradougou, aménagée par les populations autochtones de la zone (l'aménagement a été inspiré par celui du périmètre rizicole de Bama), et le cas particulier de la zone agricole qui s'est créée le long du canal d'amenée (qui dérive les eaux de la rivière vers le périmètre rizicole) (voir Figure 3). La particularité de cette dernière zone est que ses prélèvements affectent directement les quantités d'eau initialement allouées aux périmètres rizicole et maraicher, situés plus en aval.

La configuration actuelle des zones agricoles irriguées sur le bassin versant modifie fortement l'ordre de répartition initialement établi. Ainsi le débit de la rivière, initialement prévu pour le périmètre rizicole en aval, se retrouve fortement diminué par les différents prélèvements en amont. Cette configuration fait passer alors le périmètre rizicole de Bama, en termes d'accès à l'eau d'irrigation, du premier rang au dernier. A cette nouvelle configuration, s'ajoute une relative diminution des débits du Kou, au fil du temps. Cette baisse du débit serait liée à la baisse générale du niveau des précipitations (Paturel et al., 1998). Il s'ensuit alors une baisse du degré de satisfaction des besoins en eau d'une partie des utilisateurs du monde agricole.

#### **1.1.1.5 Existence de conflits amont vs. aval aux contours complexes**

D'après Diallo (1998) de l'insatisfaction des besoins en eaux des utilisateurs en aval, seraient nés des conflits récurrents, plus ou moins graves entre les utilisateurs en aval et en amont. Les utilisateurs du périmètre rizicole de Bama ayant contractés des baux auprès de l'État burkinabé (qui est le gestionnaire du périmètre) s'estiment être des utilisateurs légitimes qui devraient voir leurs besoins en eau satisfaits. Devant les manquements de l'État burkinabé qui peine à instaurer un certain ordre entre les utilisateurs de l'eau en agriculture du bassin, il s'ensuit souvent des "descentes punitives" des utilisateurs de l'eau du périmètre rizicole contre les utilisateurs installés le long du canal d'amenée (Zone agricole du canal d'amenée. Voir Figure 3), en vue de faire respecter ce qu'ils considèrent être leur droit : celui de disposer du débit pour lequel ils versent des redevances.

Mais cette situation est plus complexe qu'elle ne le paraît, dans la mesure où parmi les producteurs installés le long du canal d'amenée se trouvent souvent être des membres de familles installées sur le périmètre rizicole de Bama.

Ces producteurs en manque de terres agricoles et d'eau pour l'irrigation sur le périmètre irrigué ont choisi de s'installer en amont du périmètre rizicole, le long du canal d'amenée, ce qui leur garantirait la disponibilité d'une eau pour l'irrigation. Ainsi, d'un point de vue social, ces liens formels (ou informels) entre les producteurs de l'amont et de l'aval rendent quelque peu délicat l'adoption d'une mesure rigoureuse contre ces "pirates". Et d'un point de vue économique, l'importance de plus en

---

<sup>5</sup> Association Eau Environnement et Développement, basée à Bobo-Dioulasso et partenaire du Projet GEeau

plus grandissante de rentes réalisées au sein de la zone agricole informelle, le long du canal d'aménée, pourrait dissuader les décideurs de chasser tout simplement ces exploitants informels (communication orale, Joost Wellens, Projet GEeau). L'idée serait plutôt de les intégrer au processus de gestion des eaux du Kou passant par le canal d'aménée. Une redevance pourrait leur être bientôt imposée.

## **1.1.2 Contexte socio économique**

### **1.1.2.1 Type d'agriculture**

La disponibilité en eau du bassin versant du Kou, fait des producteurs de la zone, des privilégiés en ce sens qu'ils ont la possibilité chaque année de mener des activités agricoles en dehors de l'unique saison des pluies.

Ils ont ainsi la possibilité de pratiquer des cultures dites de contre-saison (en opposition aux cultures de saison, qui se déroulent exclusivement en saison des pluies). Ils voient alors leurs produits arriver sur des marchés demandeurs, ce qui leur assure des rentes potentiellement plus élevées que celles qu'ils pourraient enregistrer au sortir de la saison des pluies.

Mais l'agriculture sur le bassin versant du Kou n'est pas qu'une agriculture de rente. Il existerait une part non négligeable de superficies dédiées à l'agriculture de subsistance. Car tous n'ont pas des superficies leur garantissant une rentabilité certaine de leurs cultures, fussent elles à forte marge brute. Tous ne disposent pas des fonds d'investissement nécessaires à la mise en œuvre de cultures à forte marge brute, telles que la banane. Tous n'ont pas accès au crédit ("on ne prête qu'aux riches" ?). Et tous n'ont pas une même accessibilité aux eaux de la rivière.

### **1.1.2.2 Choix des types de culture**

Le choix des types de culture à pratiquer est d'une très haute importance dans le schéma de la gestion de l'eau sur le bassin versant du Kou. A titre d'exemple, une culture à forte marge brute telle que la banane est aussi forte consommatrice en eau. Une adoption massive de cette dernière culture par les producteurs en amont pourrait malheureusement avoir des conséquences lourdes sur les débits en aval. Les observations de terrain tendent à montrer un engouement de plus en plus grand pour la culture de la banane. Il serait alors intéressant d'observer l'évolution de cette tendance, à long terme.

Les zones agricoles irriguées en aval du bassin versant, à l'instar de celles situées en amont, sont aussi très rentables du fait des types de cultures pratiquées (riz, banane, maraichage). Le cas du périmètre rizicole de Bama illustre bien la tendance au choix des cultures à fortes marges brutes. Du fait de la baisse constatée des débits à l'entrée de ce périmètre, toutes les exploitations du périmètre ne peuvent plus recevoir les débits qui leur étaient initialement destinés. Afin de pallier ce problème, une réorganisation de l'occupation du sol a été proposée, incluant des cultures moins rentables que le riz, mais surtout moins consommatrices en eau d'irrigation.

L'adhésion des exploitants du périmètre à cette proposition est pour l'instant timide, car le spectre des crises alimentaires que l'Afrique de l'ouest a récemment connues (2007-2009) est encore présent dans les esprits. Ces crises se sont caractérisées par des pénuries en denrées alimentaires de première nécessité, telles que le riz...

La présente étude devra explorer les différents mécanismes conditionnant le choix d'une culture donnée, puisque cette dernière conditionne à son tour, les quantités d'eau prélevées pour son irrigation.

### **1.1.3 Conclusion : problème amont vs. aval ?**

Il ressort du contexte hydro agricole de cette étude qu'une résolution du problème de la non satisfaction des besoins en eau d'une partie des utilisateurs passe par une meilleure répartition des débits alloués (ou disponibles). Ainsi, sans dénier le droit aux utilisateurs en amont d'être relativement plus satisfaits que leurs collègues en aval, il faudrait étudier en amont, les voies et moyens permettant une utilisation plus efficiente de l'eau qui permettrait une disponibilité en eau plus importante pour les utilisateurs en aval.

Il ressort du contexte socio économique de cette étude qu'une agriculture de rente (avec ses exigences de tailles de parcelles et de type de culture), même si elle est à encourager, mériterait d'être mieux cernée, de sorte à lui assurer un développement durable, aussi bien en amont qu'en aval des zones irriguées.

La présente étude explore la situation de la gestion de l'eau en agriculture dans la zone agricole la plus en amont (celle située entre Nasso et Diaradougou) (voir Figure 3). Cette étude est censée faire un diagnostic de l'utilisation actuelle des ressources en eau pour l'agriculture de la zone, et ensuite proposer des solutions d'optimisation de l'utilisation de l'eau.

## **1.2 Question de recherche**

La question à laquelle cette étude est censée répondre est l'analyse des mécanismes de gestion de l'eau dans un système agricole irrigué informel, afin d'en proposer une optimisation.

## **1.3 Objectifs de l'étude**

L'objectif global de la recherche est de contribuer à l'optimisation de l'utilisation des ressources hydriques destinées à la production agricole dans le bassin versant du Kou, en vue de favoriser un usage efficient et équitable de l'eau entre les utilisateurs, de manière à assurer la durabilité des systèmes d'irrigation, améliorer la production agricole, préserver l'environnement et éviter les conflits.

L'objectif spécifique recherché par cette étude est de proposer des améliorations à la gestion de l'eau en agriculture sur une zone agricole irriguée du bassin versant du Kou.

## **1.4 Zone d'étude**

La zone d'étude initialement choisie était le bassin versant du Kou dans sa globalité. En raison du temps imparti à cette étude, cette zone d'étude a été ramenée successivement à l'ensemble des zones irriguées du bassin versant en contre-saison, puis à la zone irriguée comprise entre Nasso et la prise d'eau de Diaradougou.

Le choix final de la zone comprise entre Nasso et Diaradougou (voir Figure 4) pourrait paraître paradoxal, dans la mesure où cette partie du bassin, située un peu en aval des sources de Nasso-Guinguette, connaît peu (ou pas) de problèmes d'eau (!). Ce sont plutôt les zones agricoles situées en aval de la zone d'étude qui sont potentiellement sujettes à des problèmes d'eau, et donc à des conflits.

L'objectif visé derrière le choix de la zone d'étude finale est double :

1. Optimiser la gestion de l'eau sur cette zone située en amont de toutes les autres zones agricoles irriguées du bassin versant, en vue d'octroyer une main d'eau plus importante en aval ;

2. Optimiser la gestion de l'eau sur cette zone en vue d'une éventuelle répliation de l'expérience sur les autres zones agricoles irriguées du bassin versant.

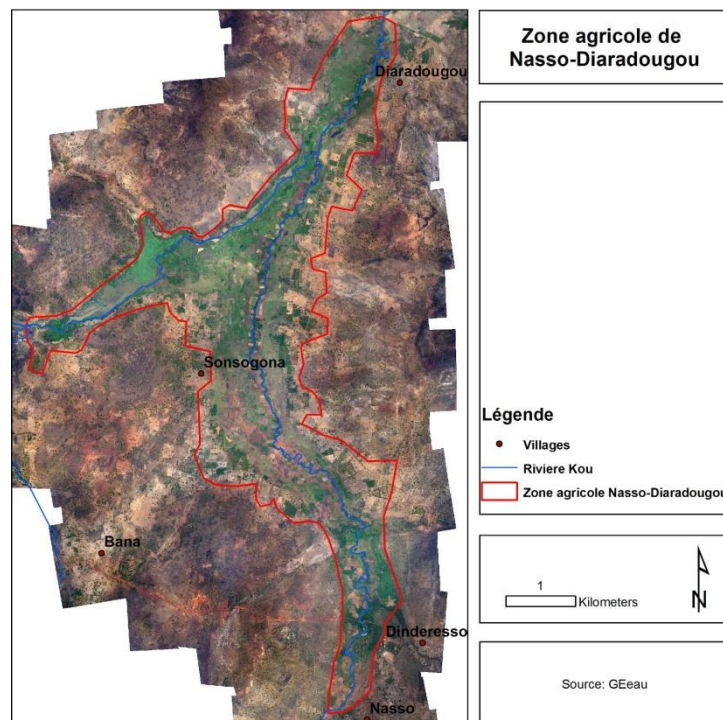


Figure 4. Zone agricole irriguée de Nasso-Diaradougou<sup>6</sup>

## 1.5 Hypothèses de travail

L'hypothèse principale de travail est que ce sont les systèmes de production mis en œuvre par les producteurs qui influencent le plus les niveaux de prélèvement d'eau dans la rivière. L'approche méthodologique construite propose des outils adaptés à l'étude des conséquences des systèmes de production sur les prélèvements.

L'étude se concentrera sur la période de l'année comprise entre janvier et juin. Cette période est aussi appelée "contre-saison", par opposition à la saison des pluies comprise entre juin et octobre.

## 1.6 Approche méthodologique

Selon Boulet (1999) proposer des méthodologies de gestion rationnelle et durable des ressources en eau d'une région suppose que l'on est capable d'appréhender la variabilité de ces ressources pour des échelles de temps et d'espace emboîtées, allant du point au grand bassin versant et du cycle diurne à la variabilité interannuelle. On doit être aussi capable de séparer les facteurs naturels et anthropiques de cette variabilité, comprendre les mécanismes et décrire les interactions entre les différents processus qui produisent ou participent à cette variabilité.

Apporter une amélioration au fonctionnement d'un système de gestion de l'eau en agriculture requiert une assez bonne connaissance des mécanismes qui constituent ce système. Dans un système "informel" tel que celui qui fait l'objet de cette étude, ces mécanismes peuvent s'avérer complexes à cerner. Il importe alors d'identifier la dynamique (naturelle ou sociale) à laquelle

<sup>6</sup> Le fond de carte est une mosaïque de composée 300 prises de vues aériennes à 0.4 mètre de résolution spatiale, datant d'avril 2009

appartiennent ces mécanismes. Pour ce faire, la méthodologie proposée pour cette étude s'articulera autour des deux principaux points suivants :

1. **Compréhension des mécanismes du système de gestion informel de l'eau dans la zone d'étude.** Cette compréhension se fera à travers l'étude hydro agricole et socio-économique du système.
2. **Amélioration du système de gestion informel de l'eau dans la zone d'étude.** Cette amélioration qui devra se traduire concrètement par une optimisation de l'utilisation de l'eau dans la zone d'étude, se fera sur la base de propositions (et simulations) de scénarios de gestion.

### **1.6.1 Compréhension des mécanismes du système de gestion informel de l'eau dans la zone d'étude**

Une exploration hydro agricole et socio économique constitue une approche permettant une caractérisation du fonctionnement du système de gestion de l'eau dans la zone d'étude.

L'analyse hydro agricole, a pour objectif de :

- Caractériser le milieu physique
- Faire l'état sur les ressources naturelles en général, et les ressources en eau en particulier
- Faire l'état des pratiques hydro agricoles des exploitants
- Faire l'inventaire des types d'usages et d'usagers de la ressource en eau
- Estimer les besoins en eau des cultures, étudier le type d'apport en eau aux cultures et la fréquence, etc.

L'analyse socio économique a pour objet les utilisateurs de l'eau en agriculture de la zone : *quelle est la représentation qu'ils se font des ressources en eau qu'ils utilisent ? ; quelle est la finalité du type d'agriculture qu'ils adoptent ? ; l'eau a-t-elle une valeur à leurs yeux ? ; dans leurs prélèvements quotidiens, prennent-ils en compte les utilisateurs en aval ? ; sont-ils organisés en coopératives ? ; etc.* A travers les questionnements ci-dessus, l'étude caractérisera le comportement du producteur dans le milieu dans lequel il mène ses activités. L'étude vise aussi à caractériser les réactions du producteur, face aux changements pouvant intervenir dans son milieu, et s'intéresser aux processus qui motivent ses prises de décision face à chaque situation pouvant survenir dans son milieu.

### **1.6.2 Amélioration du système de gestion informel de l'eau dans la zone d'étude**

Proposer des améliorations à un système nécessite une très bonne connaissance de celui-ci. Dans un souci de réalisme et pour permettre une adhésion assez grande des producteurs aux améliorations du système de gestion qui pourraient être proposées, ces dernières devraient idéalement découler des insuffisances constatées du système tel qu'il existe. Les propositions d'amélioration ne doivent toutefois pas exclure, le recours à des concepts étrangers à la zone d'étude (proposition de nouvelles techniques de production, etc.), si ceux-ci ne s'avèrent pas contraignants ou au-delà de la portée financière des producteurs.

Etant donné l'échelle physique de l'étude, ainsi que le temps imparti à cette étude, la concertation avec les acteurs de terrain en vue de solutions construites d'un commun accord ne peut se faire. L'élaboration d'alternatives au système de gestion actuel se fera à l'issue de la compréhension du système, en se basant sur le diagnostic des dysfonctionnements du système et des solutions pouvant être proposées à une échelle individuelle ou collective, en fonction du degré d'organisation des producteurs. Dans un système de stratégie individuelle, un producteur donné choisira (par exemple) une alternative à son système de production en se basant sur ses ressources et/ou sur les contraintes

qui se présentent à lui. Il serait alors difficile en se basant uniquement sur une approche globale, de prendre en compte les interactions au sein d'un système dont les effets résultent avant tout de décisions individuelles pouvant être différentes les unes des autres.

Afin d'étudier les effets d'actions individuelles sur l'ensemble du système, le recours a été fait à un concept né de l'interaction entre l'intelligence artificielle et les systèmes complexes : les systèmes multi-agents. Un système multi-agents est un système dans lequel interagissent des agents (ou acteurs) dans un environnement donné, selon une organisation donnée.

On s'intéressera alors dans un système multi-agents, à étudier l'impact global des réactions individuelles des acteurs du système en fonction des changements introduits dans le système. On introduit ici la notion de scénario, qui désigne l'exploration d'une trajectoire donnée.

Le principe de la proposition et de la simulation de scénarios s'inscrit dans une logique "essais-corrrections" en vue trouver les meilleurs scénarios en termes d'optimisation de la gestion de l'eau au sein du système simulé. L'indicateur de succès d'un scénario donné est alors la résultante du gain (pour la zone d'étude ainsi que les zones en aval) sur la consommation en eau du système mais aussi la probabilité de la répliquabilité dans le monde réel, de l'alternative proposée.

## 1.7 Structure du document

Le présent document est structuré en 5 parties, au sein desquelles figurent un ou plusieurs chapitres. Les 5 parties du document sont les suivantes :

1. **Introduction générale.** Cette partie présente le contexte et la problématique de l'étude, ses objectifs, ses hypothèses, les grandes lignes de la méthodologie générale
2. **Analyse du système informel de gestion de l'eau en agriculture.** Cette partie présente en détail la zone d'étude retenue. Elle tente aussi et surtout de caractériser au mieux la zone d'étude afin de donner une idée claire du fonctionnement du système agro-socio-économique, à la base de la gestion actuelle de l'eau dans la zone d'étude.
3. **Formalisation du système de gestion de l'eau au sein du modèle.** Une fois le système caractérisé, il est mis en modèle et le système de gestion de l'eau est simulé et analysé.
4. **Amélioration du système de gestion.** Cette partie propose des solutions alternatives à la gestion de l'eau, basée sur les lacunes du système existant.
5. **Conclusion générale.** Une discussion générale est faite, reprenant les points clés de l'étude, puis des conclusions sont tirées et des perspectives proposées.

Quatre documents annexes complètent le document principal. Ils concernent :

1. L'organigramme de la méthodologie pour la réalisation du modèle de gestion de l'eau
2. La description des entités du modèle de gestion de l'eau en agriculture élaboré dans le cadre de cette étude
3. La description de la mise en modèle de l'hydrogéologie du bassin versant, se rapportant à la zone d'étude
4. Les périodes d'acquisition des données collectées pour les besoins de l'étude

Dans la Figure 5 ci-dessous, figure l'organigramme simplifié des éléments de la table de la matière.

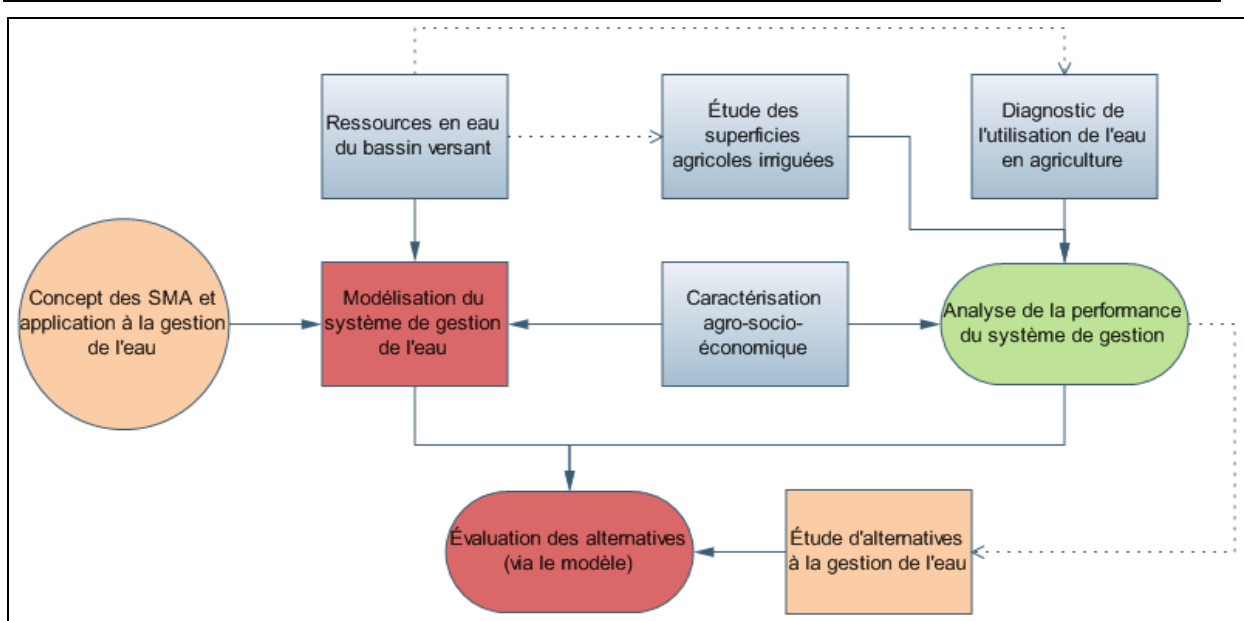


Figure 5. Connexions entre les chapitres de la table des matières (en traits continus, les fortes connexions et les traits discontinus, les faibles connexions. Les flèches indiquent le sens des contributions)



## **Partie 2 : Analyse du système informel de gestion de l'eau en agriculture**

## Chapitre 2. Présentation du bassin versant du Kou et de la zone d'étude

Il serait très difficile de présenter la zone d'étude sans parler du contexte géographique dans lequel elle se trouve, c'est-à-dire le bassin versant du Kou. Ceci entre également dans une vision d'approche de la gestion de l'eau par bassin versant.

Ainsi dans cette section, sera présenté le bassin versant du Kou, suivi d'un focus sur la zone d'étude.

### 2.1 Généralités sur le bassin versant du Kou

Le bassin versant du Kou est constitué essentiellement par un plateau gréseux culminant aux environs de 500 m au sud, pour s'abaisser progressivement jusqu'à 300 m à l'aval, point de confluence avec le Mouhoun. L'altitude moyenne est de 407 m (Wellens and Compaoré, 2003).

Les principales caractéristiques physiques du bassin versant du Kou sont résumées dans le Tableau 1, ci-dessous.

Tableau 1. Principales caractéristiques physiques du bassin versant du Kou

Superficie (km <sup>2</sup> )	1 823
Périmètre (km)	201.37
Coefficient de compacité de Gravelius	1.33
Longueur du rectangle équivalent (km)	77.01
Largueur du rectangle équivalent (km)	23.67
Indice de pente de Roche (m/km)	2.02
Indice de pente global (m/km)	3.17
Altitude moyenne (m)	407
Altitude maximale (m)	500
Altitude minimale (m)	300
Dénivelée (m)	200

La valeur du coefficient de compacité de Gravelius (défini comme le rapport du périmètre du bassin au périmètre du cercle ayant la même surface. Voir Bendjoudi and Hubert, 2002) étant supérieure au seuil de 1.12 (valeur pour un bassin versant de forme carrée), le bassin versant du Kou peut être considéré comme étant de forme allongée. Cette forme lui confère en théorie des temps de concentration plus élevés que dans le cas d'un bassin versant compact.

### 2.2 Climatologie du bassin versant du Kou

Le bassin versant du Kou est situé dans la zone soudanienne. Le climat est caractérisé par l'alternance de deux saisons, à savoir une saison pluvieuse (4 à 5 mois) qui s'étend de juin à octobre et une saison sèche (7 à 8 mois) qui s'étend d'octobre à mai (voir Figure 6). L'alternance de ces saisons est conditionnée par le déplacement annuel du Front Intertropical<sup>7</sup> (FIT).

Les principaux facteurs influençant le climat sont : la pluviométrie, les températures, les vents, le rayonnement solaire, l'hygrométrie et l'évapotranspiration.

<sup>7</sup> Le Front Intertropical est une ceinture, de seulement quelques centaines de kilomètres du nord au sud, de zones de basses pressions entourant la Terre près de l'équateur. Elle est formée par la convergence des masses d'air chaudes et souvent humides anticycloniques provenant des tropiques portées par les alizés. Elle est caractérisée par des mouvements convectifs des cellules de Hadley et, en règle générale, par des formations importantes de cumulonimbus. (Source : Wikipedia)

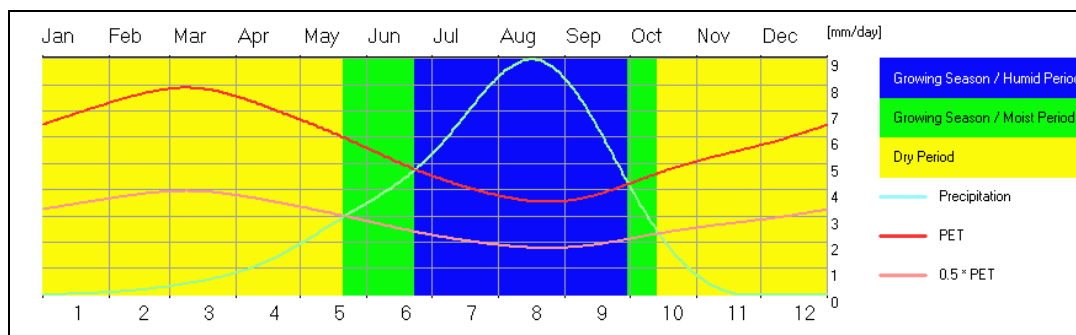


Figure 6. Illustration des saisons à travers les périodes favorables à la végétation (d'après base de données FAO NewLocClim)

### 2.2.1 Pluviométrie

La région a connu ces dernières années, une baisse de la pluviométrie liée à la baisse générale de la pluviométrie (migration des isohyètes vers le Sud) constatée dans la sous-région (Paturel et al., 1998).

Le bassin versant du Kou se trouve dans une zone climatique (soudanienne) dont la pluviométrie varie d'une année à l'autre, entre 600 mm et 1 500 mm.

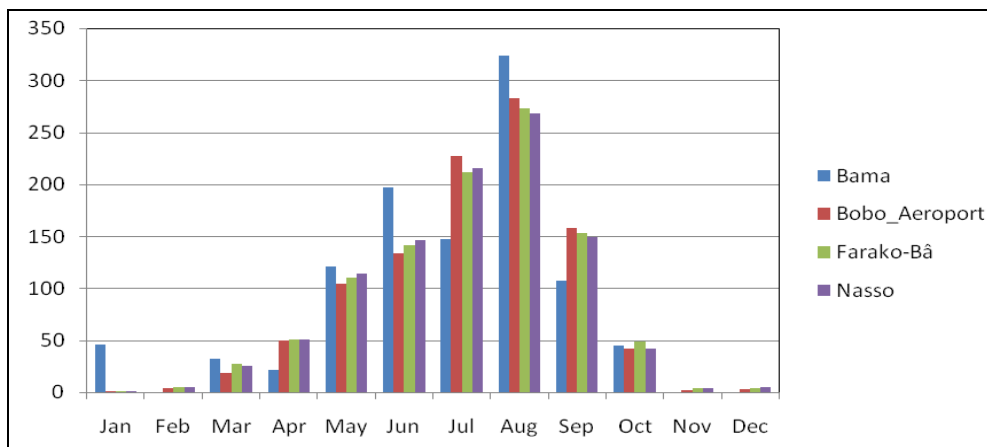


Figure 7. Normales pluviométriques mensuelles de 4 stations du bassin versant du Kou (en mm)

Le régime pluviométrique annuel de la région est caractérisé par une saison des pluies, avec un pic enregistré durant le mois d'août (voir Figure 7). Les normales pluviométriques (période 1971-2000) s'élèvent à 994 mm pour la station météorologique de Bobo-Aéroport.

### 2.2.2 Températures

Les températures moyennes mensuelles ont été tracées par Wellens and Compaoré (2003), pour la station de Bobo-Dioulasso. Ces températures moyennes sont basées sur des séries de données de 1940 à 1996 (voir Figure 8).

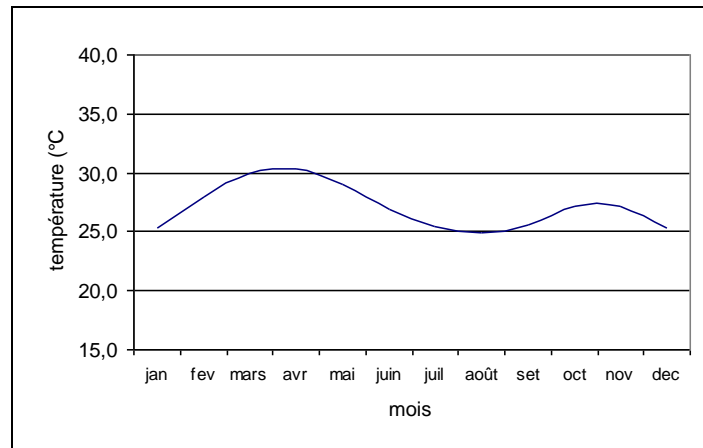


Figure 8. Variation des températures moyennes mensuelles à Bobo-Dioulasso (d'après Wellens and Compaoré, 2003)

Les courbes font ressortir que les températures sont minimales entre décembre et janvier et au cours du mois d'août, et plus élevées, le reste de l'année. Les températures les plus élevées sont observées aux mois de mars et avril. Ces températures élevées des mois de mars et avril influencent l'évapotranspiration qui présente des valeurs particulièrement hautes sur la zone d'étude durant cette période.

La moyenne annuelle de température à Bobo-Dioulasso est 26.9°C. L'amplitude thermique annuelle moyenne est de 5°C. Les écarts diurnes varient entre 8°C (août) et 14°C (janvier) ; ils se réduisent vers le sud et augmentent vers le nord.

### 2.2.3 Vents

D'après Wellens and Compaoré (2003), les vents seraient liés aux mouvements du Front Intertropical (FIT). En saison sèche (octobre à mai), lorsque le FIT redescend vers la côte du Golfe de Guinée, le Burkina Faso est soumis au régime d'un vent alizé continental du nord-est, l'Harmattan. L'Harmattan est un vent chaud, très sec et qui engendre des vents de sable dans le Sahel et le sud saharien. Plus au sud, et donc aussi dans le Sud-ouest burkinabé, il en résulte parfois des journées de "brume sèche", constituée par la fraction la plus fine de ces vents de sable que l'Harmattan emporte.

L'effet desséchant de l'Harmattan est accentuée en mars-avril par l'augmentation de la température.

Lorsque le FIT se déplace vers le nord, le Burkina Faso est balayé par la Mousson qui est un alizé austral humide.

La moyenne des valeurs mensuelles de la vitesse du vent d'une série qui s'étend de 1971 à 2000, à Bobo-Dioulasso, est reportée sur la Figure 9.

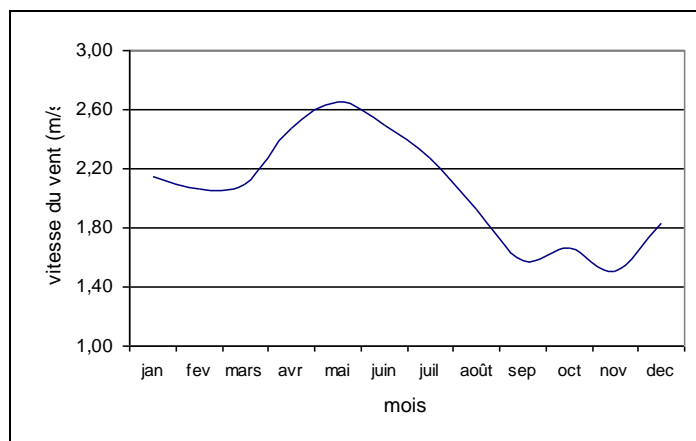


Figure 9. Moyenne mensuelle de la vitesse du vent à 2 mètres du sol à Bobo-Dioulasso (d'après Wellens and Compaoré, 2003)

Il ressort de cette figure, que la vitesse du vent est en moyenne assez élevée en saison sèche, avec un maximum à plus de 2.6 m/s en avril-mai, et tend à diminuer vers la fin de la saison des pluies, en octobre-novembre.

### 2.2.4 Rayonnement solaire

La Figure 10 présente les données de rayonnement solaire moyen à Bobo-Dioulasso, ainsi que les données de rayonnement solaire moyen au-dessus de l'atmosphère pour la latitude passant par Bobo-Dioulasso. Le rayonnement solaire moyen au-dessus de l'atmosphère a été estimé à partir de Wieringa and Lomas (2001).

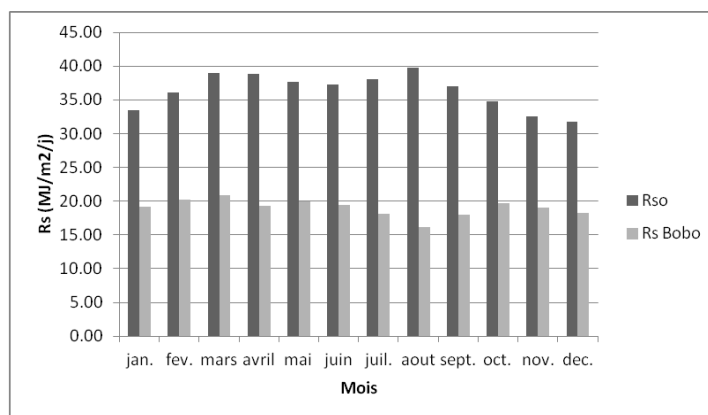


Figure 10. Moyenne mensuelle du rayonnement solaire à Bobo-Dioulasso (d'après d'après base de données FAO NewLocClim)

Le rayonnement solaire à Bobo-Dioulasso présente une évolution annuelle à deux pics, dont le premier est situé en entre mars et mai, et le second, en fin de saison des pluies (octobre). Le rayonnement solaire est relativement bas en juillet-août-septembre en pleine saison des pluies, quand le ciel est très souvent couvert de nuages.

### 2.2.5 Hygrométrie

L'hygrométrie annuelle moyenne calculée pour la période de 1961 à 1997, est de 53 %. Elle fluctue beaucoup selon la saison, et est fonction des vents et des masses d'air associées.

Les alizés de la mousson emmènent du Golfe de Guinée, un air humide, avec une hygrométrie moyenne de 80 %. En saison sèche, l'Harmattan fait descendre des zones sahariennes et sahéliennes, un air très sec dont l'hygrométrie tombe à 20 % en janvier (Wellens and Compaoré, 2003).

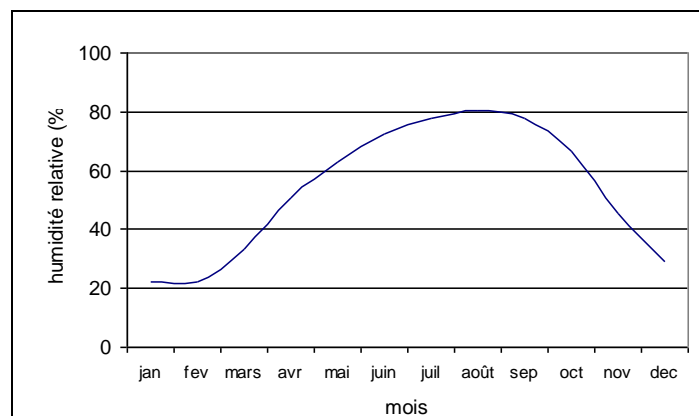


Figure 11. Moyenne mensuelle de l'humidité relative à Bobo-Dioulasso (d'après Wellens and Compaoré, 2003)

## 2.2.6 Evapotranspiration

Les tracés de l'évapotranspiration potentielle normale pour les stations de Bobo-Dioulasso et de Bama, font ressortir des valeurs élevées d'évapotranspiration en mars-avril, en saison sèche. On observe aussi des valeurs élevées en décembre pour la station de Bama, située à proximité du périmètre rizicole de Bama.

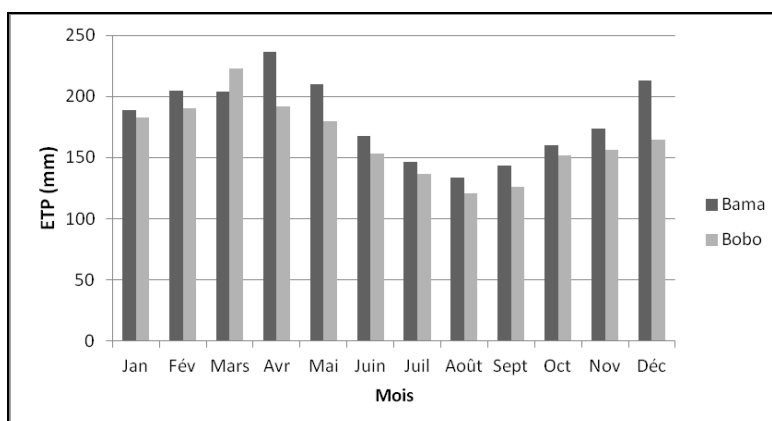


Figure 12. Evapotranspiration potentielle normale à Bobo-Dioulasso et Bama

Pour ces deux stations, on enregistre une évapotranspiration potentielle moyenne annuelle de l'ordre de 2 000 mm.

L'évapotranspiration réelle moyenne annuelle a été estimée à 860 mm (Traoré, 2007 ; Niamian, 2008 ; Wellens et al., 2008).

## 2.3 Hydrographie

### 2.3.1 Les rivières et les sources

Le Kou, issu de la jonction des marigots Kiené et Farako-Bâ qui prennent leur source sur le plateau de Banfora à une altitude de 500 m, est le premier affluent important de la rive droite du Mouhoun (Chabi-Gonni, 2003) (voir Figure 13).

Les sources de Kokoroué et de Dindéresso grossissent son cours, qui reçoit en rive gauche le marigot de Yengué et celui de Suo à son entrée dans la plaine. En aval de la plaine, le Kou reçoit le marigot de Niamé. Une dénivellation de 197 m (environ une pente moyenne de 3.65 m/km) est constatée sur 54 km de longueur entre les sources de Kiené et son exutoire à Badara. La pente moyenne dans la partie amont est de 8.3 m/km. Au niveau du cours inférieur, la pente a une valeur de 1 m/km après le seuil de Koumi à Nasso (Bazongo, 2006).

### 2.3.2 Les mares et les lacs

La mare de Bama est localisée dans le lit du marigot Bongo qui assure son alimentation hydrique. Son point le plus bas se situe à une altitude de 294.3 m. Le volume d'eau stockée est estimé à un 1 000 000 m<sup>3</sup> quand la hauteur est maximale (côte 296.7 m). La superficie du Bassin au pont de Bongo est de 30 km<sup>2</sup>.

La mare de Tumbagama est située dans le lit du Tumbagama qui est un petit affluent du Kou. Comparativement à la marre de Bama, elle est moins importante et relève d'un bassin versant d'une superficie de 15 km<sup>2</sup> (Bazongo, 2006).

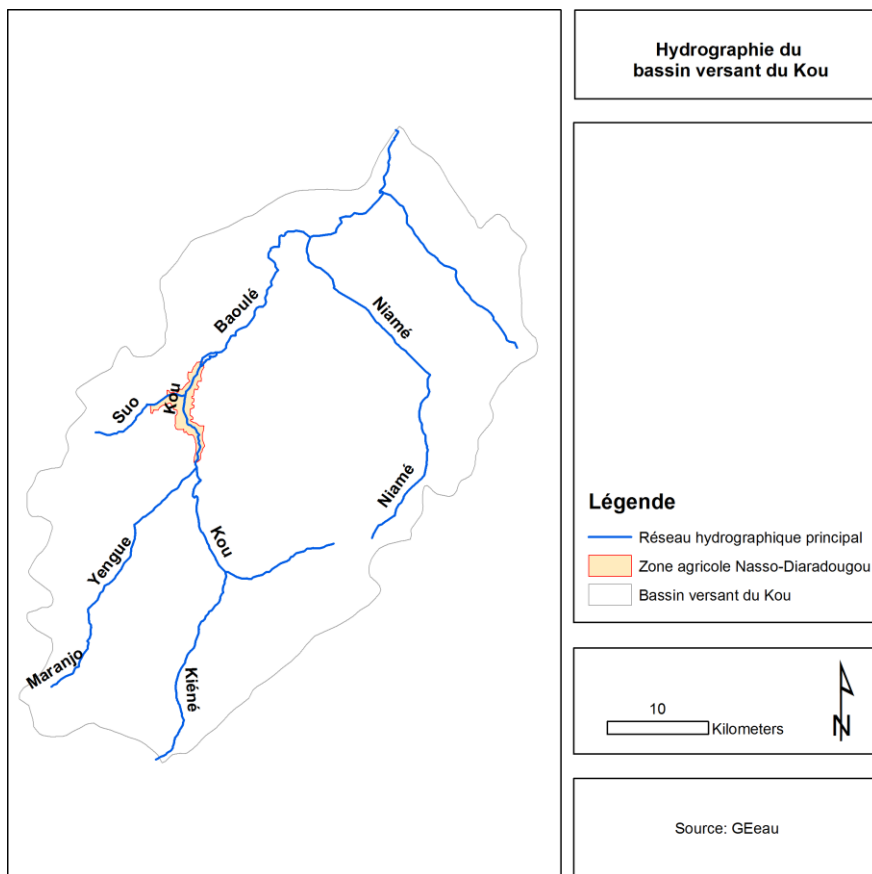


Figure 13. Réseau hydrographique du bassin versant du Kou

## 2.4 Occupation des terres

Une carte d'occupation des terres du bassin versant (voir Figure 14), a été élaborée en 2003 par le Projet GEeau, conjointement avec le Projet d'Aménagement Participatif des Forêts Classées de Dindéresso et du Kou (PAFDK).

Cette carte situe la zone d'étude en zone inondable. Ceci se vérifie par le fait que la zone d'étude soit située dans la plaine alluviale qui est partiellement inondée par endroits (rive droite de Diaradougou, rive gauche de Sonsongona) en saison des pluies.

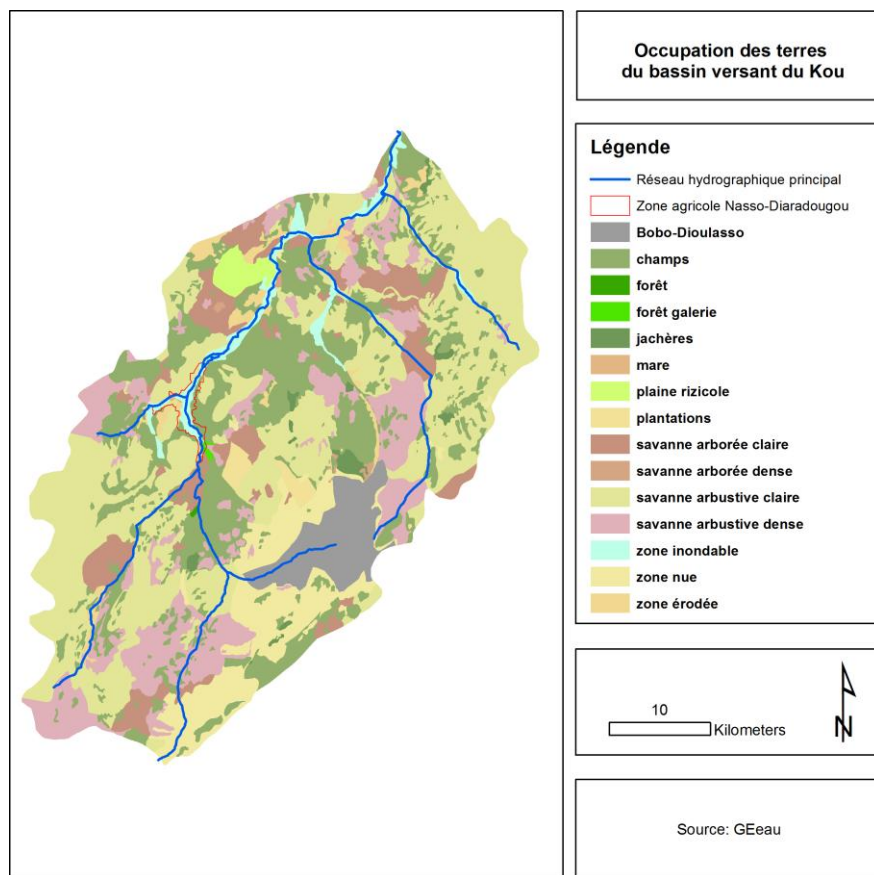


Figure 14. Carte d'occupation des terres du bassin versant du Kou

## 2.5 Pédologie

Deux types de sols sont principalement rencontrés dans la plaine alluviale du bassin versant du Kou qui se déploie principalement dans les aménagements hydro agricoles existant (Ogou, 2008), dont la zone d'étude. Ce sont : les sols hydromorphes peu humifères à pseudogley de surface (HPGS) et les sols ferrugineux tropicaux lessivés à concrétions (FLC).

Les sols HPGS tapissent le fond des bas-fonds et les glacis à pente inférieure sont des sols profonds, de couleur grise au premier horizon et grise claire à grise brunâtre dans les autres. Ils sont peu poreux. La texture est limono-argileuse en surface et argileuse en profondeur. Les agrégats sont grossiers et moyens. La consistance est très dure. L'activité biologique est assez bien développée. Le drainage est imparfait.

Les sols FLC sont surtout présents sur les hauts, moyens et les bas de pente de glacis, sur les plateaux cuirassés et dans les dépressions périphériques. Les sols FLC sont à mi-chemin entre la plaine alluviale et les unités encaissantes du relief (colluvions et terrasses).

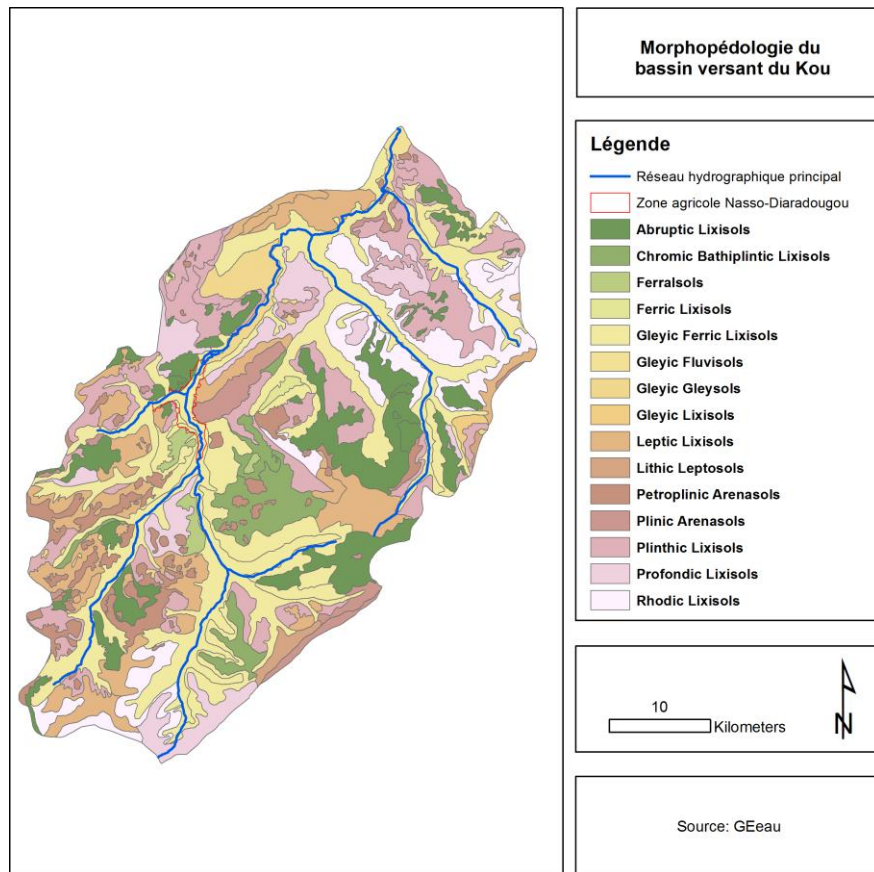


Figure 15. Carte morphopédologique du bassin versant du Kou (d'après Wellens and Compaoré, 2004)

## 2.6 Géologie

Le bassin du Kou à l'instar de la bordure Ouest et Nord-Ouest du Burkina Faso constitue l'extension Sud-Est du bassin de Taoudenni dont le remplissage a débuté vers 1.3 milliards d'années. La superficie de la bordure Sud-Est de ce bassin (Mali et Burkina Faso) est d'environ 260 000 km<sup>2</sup>, dont 45 000 km<sup>2</sup> (soit près de 20%) sont situés au Burkina Faso. Dans la partie burkinabè du bassin de Taoudenni, les formations rencontrées sont essentiellement gréseuses. Elles s'empilent régulièrement les unes sur les autres en couches subhorizontales affectées d'un léger pendage vers le Nord-Ouest (2° environ). Elles ont été subdivisées en 3 groupes par Ouédraogo (1998) :

- un groupe inférieur qui comprend la formation des Grès Inférieurs (GI), la formation de Kawara-Sindou (GKS) et la formation des Grès Fins Glauconieux (GFG).
- un groupe moyen constitué des 5 formations allant de la formation des Grès à Granules de Quartz (GGQ) à la formation des Siltstones et Grès-Quartzite de la passe de Fo (SQ) regroupés sous l'appellation Grès Silto-Dolomitiques (ou GSD) dans la partie malienne.
- un groupe supérieur constitué par les Grès de Fo Bandiagara (GFB) et les formations du Continental Terminal (CT).

Dans le bassin du Kou, ces formations s'épaississent généralement vers l'Ouest et sont de quatre types (voir Figure 16) :

- les **grès fins glauconieux** (GFG) de Takalédougou. Leur épaisseur varie de 100 à 500 m. Ils sont constitués de grès grossiers conglomératiques glauconieux et de minces niveaux de grès fins, avec parfois un aspect schisteux.

- les **grès à granules de quartz** (GGQ). Ils sont composés de grès quartzites fins à moyens avec des passées de grès grossiers à gros galets.
- les **silstones, argilites et carbonates** de Guéna-Souroukoudinga (SAC 1).
- les **grès fins roses** de Bonvalé (GFR). Ils occupent une petite superficie d'environ 25 km<sup>2</sup> au Nord-ouest de la zone d'étude, à l'Ouest du village de Bama. Cette formation se compose de grès très fins à fins, roses à violacés, finement lités et très micacés. Ce faciès est assez homogène avec des passées de grès fins à moyen feldspathiques roses.

D'après Ouédraogo (1998), ces formations se présentent sous forme d'une série homogène monoclinale avec un léger pendage vers le Nord – Nord-Ouest, haché par des failles. Ces failles seraient à rejets verticaux, grossièrement parallèles, et orientées Sud-est – Nord-ouest. Des dolérites affleurent également dans la partie Ouest du bassin versant.

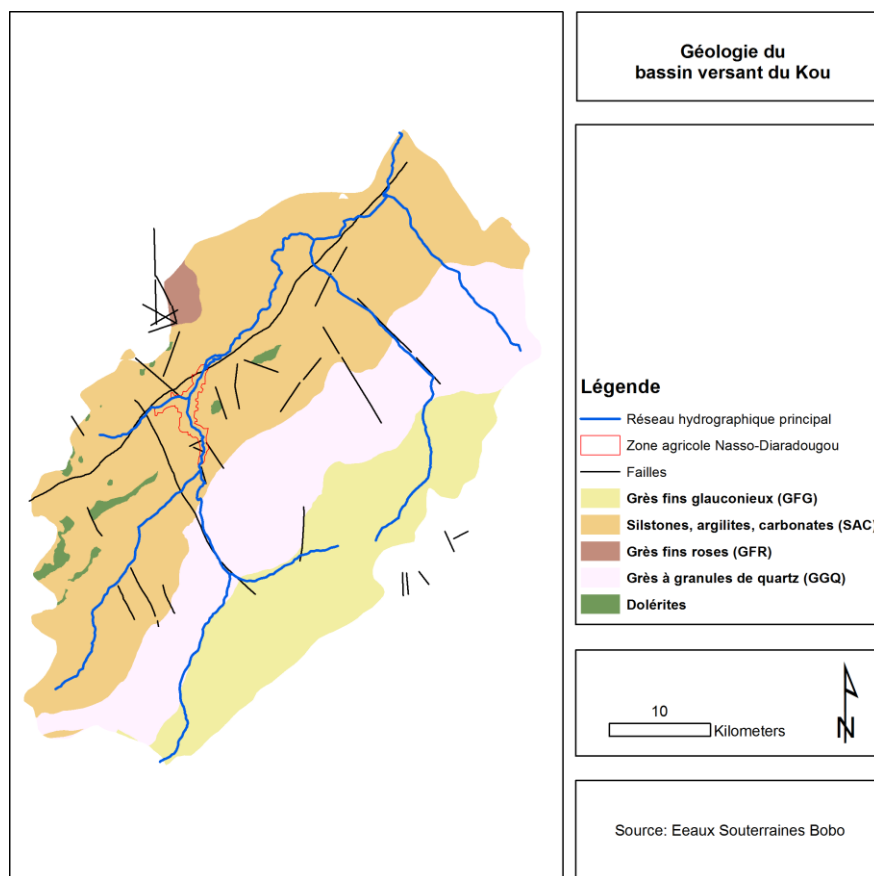


Figure 16. Géologie du bassin versant du Kou

## 2.7 Hydrogéologie

D'après Lorenzini (2007), le bassin versant est caractérisé par l'alternance de dépôts perméables et moins perméables, favorables à l'existence de couches aquifères.

Sauret (2007) décrit ainsi les niveaux aquifères rencontrés dans le bassin du Kou du bas vers le haut :

- **L'aquifère des Grès de Kwadara Sindou (GKS)**. Il repose soit sur des schistes très peu perméables, soit sur des granites du socle, en fonction de la morphologie du substratum ou de l'érosion. Les roches réservoirs sont composées essentiellement de grès et le toit de la

nappe est constitué par des formations marines très peu perméables, qui serviront de frontières à flux nuls pour la modélisation des écoulements souterrains.

- **L'aquifère des Grès Fins Glauconieux (GFG).** Il constitue le rebord supérieur de la falaise de Banfora (voir Figure 17). Il est formé au sommet par une couche imperméable d'argiles à passées gréseuses. Cette couche constitue le toit d'une série gréseuse (grès très fins) épaisse d'environ 100 à 150 m perméable, limitée à la base par des argiles ocre de couleur rouge ou verte imperméables. Son épaisseur moyenne est de 94 m. Cette série gréseuse renferme une nappe captive, sollicitée par l'ensemble des industries de la ville. Elle est très étendue, et s'étale depuis la région de Sindou au Sud - Sud-ouest du pays jusqu'à Tougan au Nord.
- **L'aquifère des Grès à Granules de Quartz (GGQ).** D'après SOGREAH (1994), il existerait deux niveaux aquifères au sein de cette formation dite "détritique" séparés l'un de l'autre par une couche lenticulaire d'argile discontinue, favorisant ainsi une connexion hydraulique entre ces deux niveaux. Les données de campagne de diagraphies réalisées par SOGREAH (1994) confirment l'existence, par endroits, d'une couche argileuse entre ces deux niveaux de 15 m d'épaisseur environ. L'épaisseur moyenne de la nappe des GGQ est de 70 m.
- **L'aquifère des Silstones Argilites et Carbonates de Guéna Souroukoudinga (SAC1).** Cet aquifère est séparé des GGQ par une série d'argiles rouges ou jaunes d'épaisseurs variables. Cette série argileuse disparaît au voisinage des sources où une faille d'effondrement NNW-SSE met en contact hydraulique les SAC1 et les GGQ (voir Figure 17). Toutefois, elle constitue le mur d'une nappe puissante dont le réservoir est constitué par des grès rouges très grossiers et glauconieux. Le toit de la nappe est constitué par une épaisse couche de calcaires dolomités, imperméables et sans aucun signe de karstification (SOGREAH, 1994). L'épaisseur moyenne de la nappe est estimée à 82 m.
- **L'aquifère des Grès fins roses (GFR).** De faibles extensions, l'aquifère des GFR est constitué de grès quartzites très fins, micacés et glauconieux, de couleur rose dominante. Il serait le réservoir d'une nappe peu épaisse et moins profonde (la profondeur des eaux par rapport au sol est de l'ordre de 11 m d'après Dakoure, 2003). Cette nappe est captée par des puits traditionnels villageois dans le département de Bama. Les différentes formations aquifères décrites présentent un pendage de 2 à 3% orienté vers le NW et larges du NE au SW.
- **Le système de fractures.** Une fracture d'effondrement orientée SW-NE met en contact hydraulique l'aquifère des SAC1 et des GGQ au niveau des sources de Nasso. Elle entraîne à son voisinage des perméabilités très fortes, et serait à l'origine de la genèse des sources de Nasso et par prolongement celles de Péso/Desso. D'autres failles orientées NW-SE sont associées à celles-ci (SOGREAH, 1993).

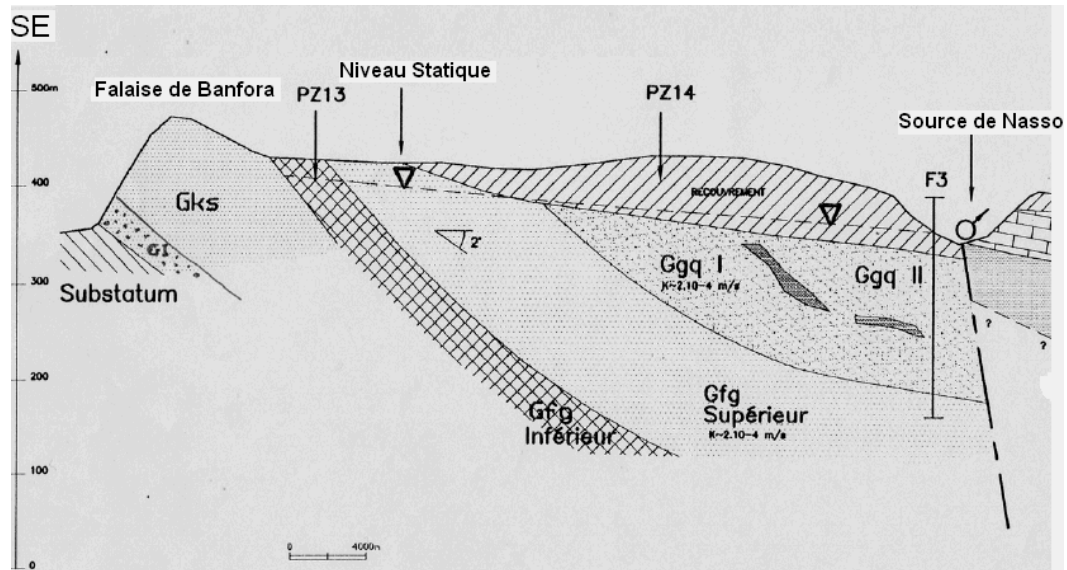


Figure 17. Coupe Hydrogéologique et Géologique de la région de Bobo-Dioulasso (d'après SOGREAH, 1994)

Enfin d'après Traoré and Gombert (1997; cité par Sauret, 2007) les aquifères des SAC et des GGQ présentent de meilleures valeurs de transmissivité (voir Tableau 2) et sont captés par la majeure partie des industries et des forages d'hydraulique villageoise.

Tableau 2. Formations aquifères du bassin versant du Kou (source : Lorenzini, 2007)

Aquifère	Débit (m <sup>3</sup> /h)	Transmissivité (m <sup>2</sup> /s)	Coefficient d'emmagasinement	pH	Conductivité électrique (μS/cm)
GKS	150	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup>	-	-
GFG	50 à 80	7.10 <sup>-4</sup>	-	5.3	5 à 15
GGQ Supérieur	320	6.10 <sup>-2</sup>	5,5.10 <sup>-4</sup>	-	75 à 190
GGQ Inférieur					5 à 30
SAC	-	5,6.10 <sup>-4</sup> à 1,1.10 <sup>-2</sup>	35 à 135	-	-

Le bassin versant du Kou compte, en outre, de nombreuses sources pérennes, dont la Guinguette (6 000 m<sup>3</sup>/h), ONEA 1 (850 m<sup>3</sup>/h) et ONEA 2 (550 m<sup>3</sup>/h). Ces deux dernières sources assurent l'alimentation en eau potable de la ville de Bobo-Dioulasso. Elles sont présentées ci-dessous (voir Figure 18), sur fond de carte géologique.

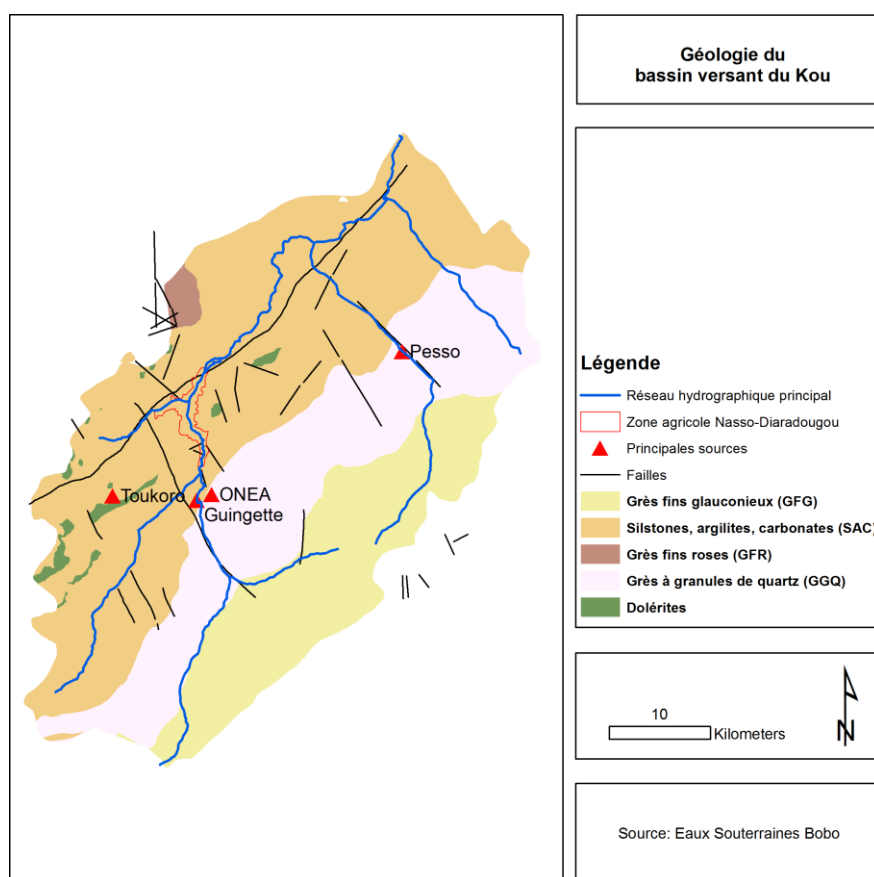


Figure 18. Localisation des principales sources d'eau du bassin versant du Kou (sur la carte géologique)

La zone d'étude est située sur la formation géologique des SAC (silstones, argilites, carbonates) qui renferme des aquifères ayant les coefficients d'emmagasinement les plus importants du bassin versant.

## 2.8 Le périmètre rizicole irrigué de la Vallée du Kou

Le périmètre rizicole irrigué de Vallée du Kou ou périmètre rizicole de Bama constitue une exception au sein des zones agricoles irriguées du bassin versant du Kou. L'un des buts de cette étude est justement d'optimiser la gestion de l'eau dans les zones irriguées en amont, afin d'octroyer une main d'eau assez conséquente au périmètre rizicole.

Le périmètre rizicole de la vallée du Kou est situé à 25 km au nord-ouest de la ville de Bobo-Dioulasso sur l'axe Bobo-Faramana-Mali et enclave le village de Bama. Il se situe entre 11.35° et 11.41° de latitude nord et 4.36° et 4.50° de longitude ouest à une altitude de 300 m. Il est délimité au sud, à l'ouest et au nord par le canal principal d'irrigation, tandis que la rivière Kou constitue sa limite naturelle à l'est (Wellens and Compaoré, 2003).

D'une superficie totale de 1 260 ha aménagés, le périmètre rizicole irrigué de la Vallée du Kou fait partie d'une vaste plaine de 9 700 ha de superficie dont 2 300 ha sont exploitables. La plaine comprend deux parties : la vallée du Kou et quelques collines de 300 m d'altitude qui limitent la plaine à la sortie de Bobo-Dioulasso (Wellens and Compaoré, 2003 ; Wellens and Nitcheu, 2009).

Le périmètre a été réalisé dans le cadre de la coopération entre le Burkina Faso (alors Haute Volta) et la République de Taïwan. Les 100 premiers hectares ont été aménagés par la coopération taïwanaise en 1969 et exploités en 1970. L'extension du périmètre s'est poursuivie jusqu'en 1974.

Après 1974, la coopération chinoise remplace la coopération taïwanaise pour 2 ans. Suite au nouveau départ de la coopération taïwanaise, le périmètre est géré par une administration nationale, l'Organisation pour la Recherche et le Développement (ORD), puis bénéficie d'une aide financière de la BOAD (Banque Ouest Africaine de Développement) et d'une assistance néerlandaise jusqu'à 1993. Le programme RESO (Ressources en Eau dans le Sud-ouest) géré par l'assistance technique d'IWACO<sup>8</sup> a fait une étude du périmètre. Enfin en 1999 - 2000 un programme spécial pour la sécurité alimentaire géré par la FAO et le Maroc a de nouveau analysé les problèmes du périmètre (Wellens and Compaoré, 2003).

La population est répartie en 8 villages situés sur le périmètre irrigué, majoritairement des producteurs allochtones venus par vagues successives, qui représentent 80 % de la population.

Le riz est la culture dominante, on y fait deux récoltes par an : le riz irrigué et le riz pluvial. La première campagne rizicole ou la campagne de contre-saison est généralement mise en place courant décembre-janvier. La deuxième campagne rizicole se pratique pendant la période pluvieuse. Depuis l'aménagement du réseau hydraulique, une baisse remarquable des rendements a été observée. La production moyenne était de 7.7 T/ha/campagne en 1980-1981. Et depuis, les rendements se sont stabilisés autour de 4.8 T/ha/campagne de paddy (Wellens and Compaoré, 2003). Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette baisse des rendements : diminution des débits du Kou, irrégularité dans les allocations d'eau, amendement insuffisants des sols.

Selon la typologie aboutie d'une étude menée par le CILSS en 1991, cet aménagement est de type : **grand aménagement hydro-agricole encadré** (SahelConsult/F.E.T., 1997).

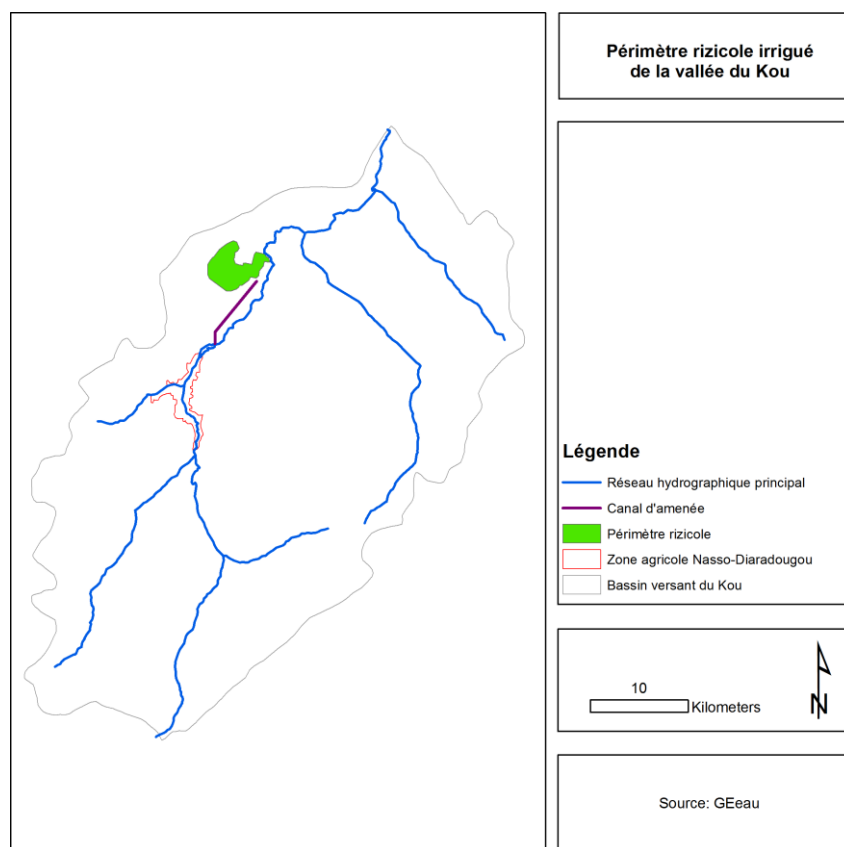


Figure 19. Périmètre rizicole irrigué de la Vallée du Kou

<sup>8</sup> IWACO : Bureau d'étude en eau et environnement, Rotterdam, Pays-Bas. Récemment rebaptisé "Royal Haskoning DHV"

## 2.9 La zone d'étude

La zone d'étude est la zone agricole irriguée qui s'étend entre Nasso et Diaradougou (longitude entre 4.40° et 4.50° ouest; latitude entre 11.18° et 11.32° nord). Elle se situe en amont de toutes les autres zones agricoles irriguées installées sur les rives du Kou, après les sources d'eau de Nasso. Elle est connue pour son agriculture irriguée intensive entre janvier et juin, avec des ressources en eau importantes. L'agriculture y est pratiquée aussi en saison des pluies, mais avec une occupation du sol moins importante qu'en contre-saison. Ouédraogo (2010) y a identifié plus d'une douzaine de types de cultures, pratiquées en général sur de petites parcelles. On rencontre des parcelles en cultures pures et en cultures mixtes. Les producteurs de la zone pratiquent une agriculture de rente ou de subsistance, ou une combinaison des deux.

Les caractéristiques climatologiques de la zone d'étude sont similaires à celle du bassin versant du Kou, dans lequel elle est incluse.

La zone d'étude a été subdivisée par les services de l'agriculture en 3 sous zones agricoles qui constituent des unités d'appui technique (UAT), selon l'appellation donnée. Ainsi, au sein de la zone d'étude existent les UAT de Bana, Diaradougou, Sambla-Toukoro (voir Figure 20).

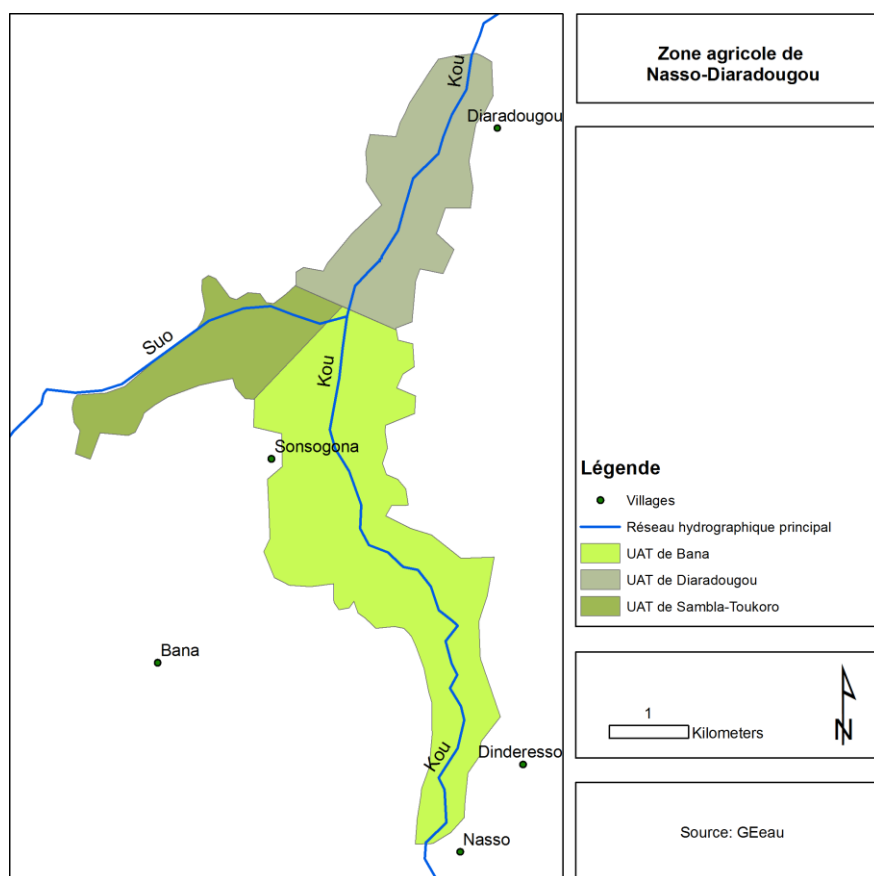


Figure 20. Subdivision de la zone d'étude en UAT

## Chapitre 3. Ressources en eau de la zone d'étude

Les ressources en eau de la zone d'étude se répartissent entre eaux de surface et eaux souterraines. Les eaux de surface sont les eaux de la rivière Kou, qui traversent la zone d'étude, permettant l'exploitation des deux rives pour l'agriculture irriguée. Dans le cas spécifique de la rive gauche, cette exploitation des eaux du Kou s'étend même sur plus d'une centaine de mètres de la rivière, avec la création de canaux secondaires et tertiaires artificiels permettant l'acheminement de l'eau. A noter que l'implantation de ces canaux a fait l'objet d'une interdiction violée<sup>9</sup>.

Les ressources en eaux souterraines proviennent de deux types d'aquifères : aquifère alluvial et aquifère profond. Les eaux souterraines participent à l'écoulement de la rivière, à travers leur contribution au Kou, au niveau des sources de Nasso. Au sein de la zone d'étude, la nappe souterraine est peu profonde par endroits, ce qui favorise la création de puisards qui sont alimentés par la nappe. Ces puisards sont utilisés comme des réservoirs de stockage de l'eau d'irrigation.

Au stade actuel, la connaissance parfaite des ressources en eaux souterraines n'est pas encore acquise. En effet, vu la complexité des systèmes aquifères au sein de la zone d'étude, il est difficile d'estimer quantitativement les ressources en eaux souterraines. Il est également difficile de fournir avec précision des informations sur les mécanismes de recharge. On suppose que l'aquifère pluvial serait rechargé par les apports pluviométriques. Quant à l'aquifère profond, il y a moins de certitudes concernant son système de recharge.

L'observation générale de données hydrométriques montre que les ressources en eau du bassin versant suivent une tendance à la baisse. Cette baisse pourrait être mise en lien avec la baisse générale de la pluviométrie observée au Burkina Faso et dans la sous-région ; et avec une diminution progressive du stock d'eau dans le sol (elle-même corrélée à la diminution des apports par les pluies ?).

Ayant des informations peu précises sur les eaux souterraines au sein de la zone d'étude, toute estimation totale des ressources en eau est rendue difficile. Les estimations faites au cours de cette étude ont concerné principalement les eaux de surface qui, au sein de la zone d'étude, se résument au cours d'eau.

Des estimations de débits du Kou pour la zone d'étude existent mais il est rare de trouver des données historiques fiables. Les séries hydrométriques sont plutôt parsemées de lacunes du fait du suivi irrégulier pratiqué par la Direction en charge des ressources en eau. Récemment, dans le cadre de cette étude, de nouvelles campagnes de mesure ont été initiées permettant une actualisation des données.

### 3.1 Etude des débits de la rivière Kou

L'objet de cette étude est de caractériser le régime du Kou durant les mois de la campagne de contre-saison. Des études avaient été faites dans le passé, mais en raison de récents changements dans l'hydrologie du bassin versant, il importait de mettre à jour les données hydrométriques existantes. En effet, depuis quelques années, une baisse générale de la pluviométrie est observée et produit une baisse des débits de la rivière. A cette baisse naturelle, il faut ajouter un épandage des eaux de la rivière à Sonsongona dû à un problème d'ensablement des berges intervenu après des travaux d'aménagement peu efficaces des berges en amont (Dindéresso).

---

<sup>9</sup> Communication orale, Noufou Zango, DPAHRH des Hauts-Bassins

Les précédentes études sur les débits du Kou avaient déjà fait ressortir de graves déficits en eau, pour les zones agricoles irriguées en aval (particulièrement, le périmètre rizicole de Bama). La mise à jour de la structure de la concurrence pour l'eau de la rivière se fera sur la base de nouvelles données hydrométriques collectées entre 2008<sup>10</sup> et 2010.

### 3.1.1 Matériel et méthode

Les nouvelles campagnes de mesures hydrométriques (2008-2010) mises en œuvre afin d'estimer les débits du Kou ont été faites sur des sections choisies de sorte à fournir une information assez détaillée (voir Figure 21). En raison du coût assez élevé des sondes et de leur nombre limité (5), les critères de répartition des sondes (entre les UAT) le long du Kou se sont basés (par UAT) sur l'importance de l'irrigation par les eaux de la rivière et de la superficie totale à irriguer. La répartition a concerné les UAT de Bana et de Diaradougou. L'UAT de Sambla-Toukoro est traversée par un affluent du Kou (le Suo) qui est à sec en contre-saison. Sur la base des critères utilisés, 3 sondes ont été installées (le long du Kou) dans l'UAT de Diaradougou et 2 sondes dans l'UAT de Bana.

Les sections de mesure vont de la station de pompage de l'ONEA (à Nasso), à la prise d'eau de Diaradougou (à l'aval de la zone d'étude) et sont espacées les unes des autres de 1.5 km en moyenne (la longueur de la zone d'étude étant estimée à 11 km). Les campagnes se sont étendues en général entre les mois de janvier et avril. En raison d'inondations fréquentes en saison des pluies (le Kou occupe son lit majeur), il est pratiquement impossible de poursuivre des mesures hydrométriques durant cette période.

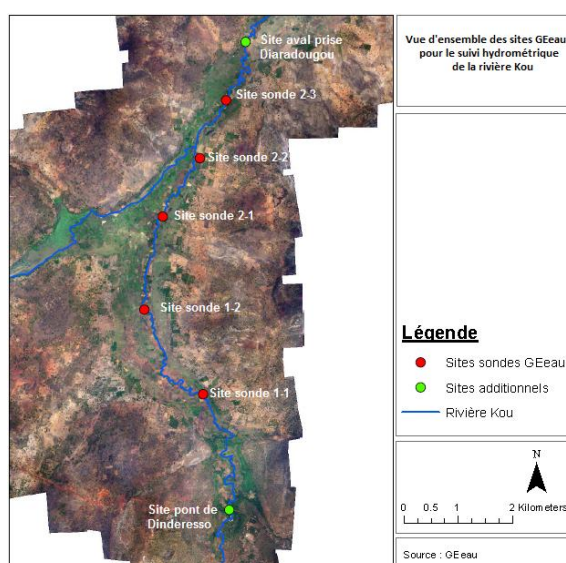


Figure 21. Localisation des sites de mesure de débits (équipés de sondes de mesure de pression) du projet GEeau

#### 3.1.1.1 Méthode

L'estimation des débits du Kou, dans le cadre de cette étude a nécessité un niveau de détail assez important. Il était important d'étudier la variabilité des débits au sein d'une journée afin d'estimer par section les volumes des prélèvements. Pour ce faire, un dispositif d'enregistrement automatique des hauteurs d'eau dans le lit de la rivière, aux sections choisies, a été mis en place. Afin de faire le lien entre les hauteurs d'eau enregistrées et les débits, des jaugeages ont été entrepris sur les

<sup>10</sup> Les mesures faites en 2008 ne se sont pas faites de manière continue dans le temps, mais ont plutôt consisté en quelques passages sur quelques sections.

sections choisies. Cela a alors permis d'obtenir une estimation des débits de la rivière à un pas de temps assez fin.

Le choix des sections de jaugeage, les techniques de jaugeage et de dépouillement des données, ont été faits en se basant le plus possible sur les recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM, 1994) et l'*U.S. Bureau of Reclamation* (USBR, 2001).

Des données de débits moyens pour les mois de décembre et mai, ont été obtenues avec le Projet ESO, qui opère dans la même zone, en se concentrant sur la caractérisation des eaux souterraines.

### 3.1.1.2 Matériel

Des sondes de mesure de pression ont été utilisées. Ces sondes placées en différentes sections donnent à un pas de temps choisi, des mesures de la hauteur de l'eau au-dessus de la sonde. Le pas de temps d'enregistrement des variations de hauteurs d'eau a été fixé à 5 minutes pour les besoins de cette étude.

Des limnimètres ont été installés aux sections de mesure des sondes, afin de calibrer les hauteurs d'eau mesurées par les sondes par rapport aux hauteurs d'eau observables depuis les berges, par un opérateur.

Pour chaque sonde installée sur une section donnée, une caractérisation du profil topographique transversal est nécessaire afin d'établir à terme une courbe de jaugeage. La courbe de jaugeage et la hauteur d'eau en fonction du temps pour chaque section de mesure, donnent une estimation du débit hydraulique en fonction du temps.

Le matériel pour le suivi de l'hydrométrie sur la zone d'étude est résumé dans le Tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3. Liste du matériel utilisé lors des campagnes de mesure de débits sur le Kou

Matériel	Nombre	Observations
Sondes de mesure de pression ('Divers')	5	Une sonde est affectée à chaque site (section) de mesure choisi.
Sonde de compensation de pression ('Barodivers')	2	Ces sondes permettent à l'aide d'une mesure de la pression atmosphérique, d'obtenir des mesures corrigées de pression avec les sondes. Elles ont un rayon de mesure de 20 km.
Echelles limnimétriques	5	Une échelle limnimétrique est affectée à chaque section de mesure choisie. La hauteur des échelles est de 1 m.
Tubes en PVC (diamètre 10 cm ; longueur 2 m à 2.5 m)	5	Pour chaque site de mesure, les sondes de mesure de pression sont logées librement dans un tube en PVC vertical.
Caisses métalliques (20 cm x 20 cm x 20 cm)	5	Les caisses métalliques sont munies d'un clapet qui, condamné, restreint l'accès aux sondes. Les caisses métalliques et les tubes en PVC sont liés par un encastrement rendu rigide par l'ajout de boulons.
Poutrelles acier de type IPN, 3 m à 3.5 m	5	Les poutrelles IPN servent à la fixation des échelles limnimétriques et des tubes en PVC
Moulinet	1	Type : <i>Eijkelkamp universal current meter F1</i> <sup>11</sup> .

### 3.1.2 Résultats

Une grande campagne de mesure des débits a été faite en 2009 sur les 5 sections de contrôle choisie. Malheureusement, les résultats obtenus sur les 5 sections n'étaient pas tous exploitables. Une

<sup>11</sup> <http://pkd.eijkelkamp.com/Portals/2/Eijkelkamp/Files/Manuals/M2-1312e.pdf>

seconde grande campagne a donc été initiée de nouveau en 2010<sup>12</sup>. Cette seconde campagne a encore concerné les 5 sections de contrôle choisies, plus deux autres sections placées respectivement plus en amont et plus en aval des sections de contrôle extrêmes. Lors de cette dernière campagne toutes les sections ont connu plusieurs passages afin de tenir compte des variations dans les profils, dus à l'ensablement et l'envasement du lit de la rivière.

Les résultats retenus sont donc ceux de la campagne de 2010, après vérification (pour certaines sections) de la cohérence avec les résultats des campagnes 2008 et 2009. Ces résultats sont présentés ci-dessous :

Tableau 4. Estimation des débits moyens mensuels en amont et aval de la zone d'étude

	Débits amont (m <sup>3</sup> /s)	Débits aval (m <sup>3</sup> /s)	Observations
<b>Décembre</b>	1.762	1.532	Données Projet ESO
<b>Janvier</b>	1.778	1.447	
<b>Février</b>	1.678	1.356	
<b>Mars</b>	1.544	1.278	
<b>Avril</b>	1.516	1.234	
<b>Mai</b>	1.948	1.687	Données Projet ESO

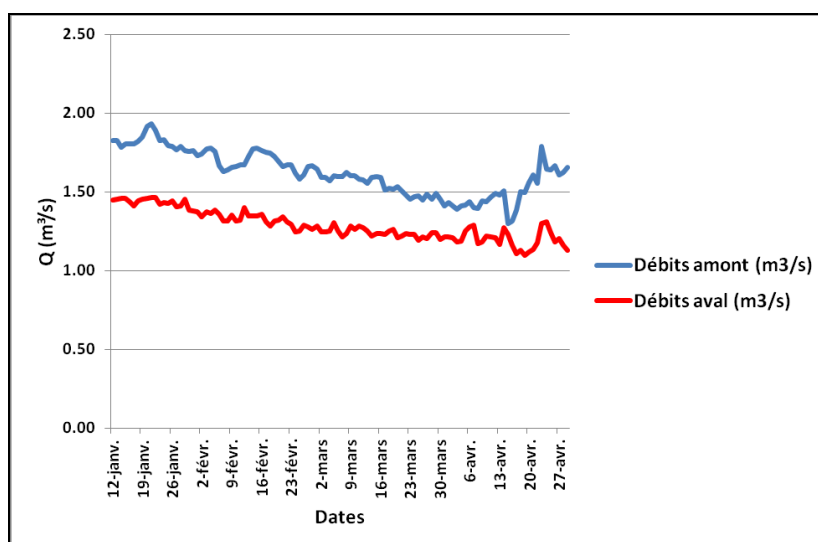


Figure 22. Evolution de débits moyens journaliers du Kou (dans la zone d'étude) entre janvier et avril

La moyenne des différences entre les débits enregistrés en amont et en aval de la zone d'étude, se situe autour de 0.29 m<sup>3</sup>/s. On pourrait alors estimer que cette différence correspond à la moyenne consommée par les producteurs pour l'irrigation des cultures.

### 3.1.3 Structure de la concurrence pour l'eau en agriculture

Les résultats obtenus ci-dessus, pour les débits en amont et en aval de la zone d'étude permettent de dresser une structure de la concurrence pour l'eau en agriculture au sein de la zone d'étude (voir Figure 23).

<sup>12</sup> La pluviométrie normale à Bobo-Dioulasso (période 1971-2000) est de 994 mm. De ce fait, les pluviométries annuelles de 2008 (1077 mm) et 2009 (894 mm) sont respectivement excédentaire et déficitaire par rapport cette normale. Les pluviométries annuelles de 2008 et 2009 conditionnent respectivement les débits du Kou en contre-saison des années 2009 et 2010. Vu la mauvaise qualité des mesures de 2009, il n'a pas été possible de les comparer à celles de 2010 afin de confirmer, en termes d'apports en eau à l'écoulement du Kou, laquelle des deux années est réellement excédentaire (ou déficitaire).

Les besoins moyens en eau de la zone d'étude ( $0.16 \text{ m}^3/\text{s}$ , voir 4.1.3, page 37) se situent en dessous des prélèvements moyens ( $0.29 \text{ m}^3/\text{s}$ ), ce qui peut être interprété comme étant une résultante de la surconsommation supposée, dans la zone.

En aval de la zone d'étude, un autre constat ressort à la lumière des informations contenues dans la Figure 23 : le long du canal d'amenée<sup>13</sup> (matérialisé en trait noir sur la Figure 23), des prélèvements "illégaux" sont effectués par des exploitants qui se sont au fil du temps, installés le long dudit canal, réduisant ainsi de  $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ , les débits en aval. Le cas de ces prélèvements "illégaux" est encore en discussion par le comité local de l'eau du bassin versant du Kou (CLE-Kou).

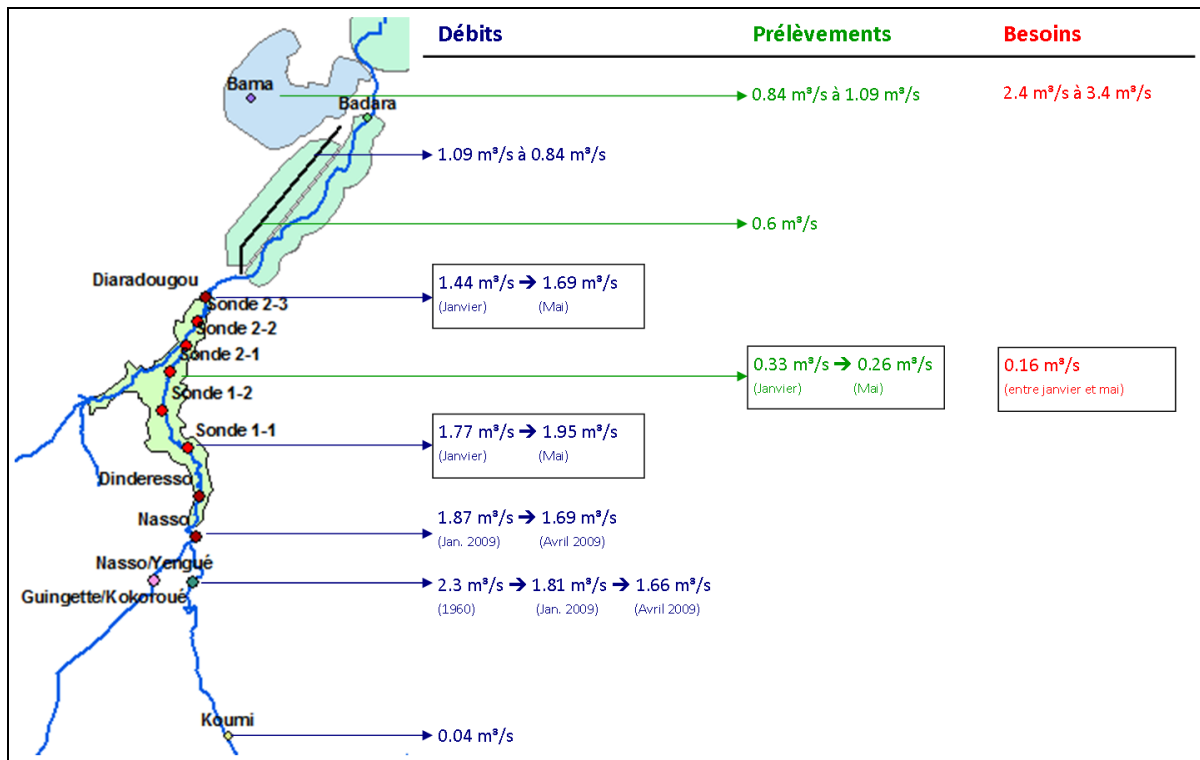


Figure 23. Structure de la concurrence pour l'eau en agriculture sur le bassin versant du Kou

### 3.2 Perspectives à moyen terme

Le niveau des ressources en eaux de surface semble être en baisse depuis plus de 20 ans, et la tendance semble se poursuivre, d'après l'observation des données hydrométriques récentes. Ce sont des perspectives qui s'assombrissent pour l'irrigation dans cette zone, car avec la croissance démographique (principalement celle de Bobo-Dioulasso), ces besoins en eau pour l'alimentation en eau potable (AEP) sont appelés à croître. Si le niveau des ressources en eau n'augmente pas, il est fort probable que ce soit la part réservée à l'agriculture qui sera diminuée. Et ce fait pourrait créer plus d'insatisfaction en aval de la zone d'étude, quant aux besoins en eau, avec la crainte de potentiels conflits liés à l'usage de l'eau.

<sup>13</sup> Le canal d'amenée a été conçu afin de dériver les eaux du Kou vers les aménagements agricoles situées en aval du bassin versant, à savoir les périmètres rizicole et maraîcher. Il mesure environ 11 km et est construit en béton. L'écoulement vers l'aval se fait de façon gravitaire.

## Chapitre 4. Utilisation de l'eau dans la zone d'étude

Au sein de la zone d'étude, l'eau disponible est utilisée principalement pour l'agriculture irriguée et pour l'alimentation en eau potable. Les chiffres ne sont pas disponibles en ce qui concerne les proportions relatives, mais les observations montrent que les quantités d'eau prélevées pour l'alimentation en eau potable sont négligeables en comparaison de celles destinées à l'agriculture. De plus l'alimentation en eau potable est faite presque exclusivement à partir des eaux souterraines. De ce fait, l'hypothèse suivante peut être faite : la quasi-totalité des eaux de surfaces prélevées le sont pour l'agriculture. Partant alors de cette hypothèse, pour le reste de l'étude ne seront considérés dans les prélèvements d'eau sur la rivière, que ceux relatifs à l'agriculture irriguée.

Un indicateur de l'efficacité d'utilisation de l'eau dans la zone d'étude est la comparaison entre les besoins en eau des cultures et les prélèvements faits pour l'irrigation des cultures. Dans le contexte du système d'irrigation informel de la zone d'étude il n'est pas rare de voir des cas de gaspillage d'eau, en raison d'un moyen d'exhaure inadapté, d'un matériel d'irrigation inadapté, d'un dépassement des doses d'irrigation requises, ou d'un laisser-aller généralement inhérent à la gestion des biens communs.

Il ne serait pas approprié dans un premier temps de parler de gestion de l'eau. Le terme "utilisation de l'eau" est plus convenable dans la mesure où au sein de la zone il n'existe aucun type d'organisation œuvrant formellement dans la gestion de l'eau. Il existe certes, sur la rive gauche du Kou (au sein de la zone d'étude) une sorte d'organisation dont le but principal est l'octroi d'eau dans la cadre d'un système de tours d'eau mis en place par un groupe de producteurs. Cette organisation n'est pas regardante quant aux quantités d'eau prélevées par ses membres, elle s'occupe juste de mettre l'eau à la disposition des membres, suivant un calendrier préétabli.

En rappel, l'importance de l'utilisation de l'eau dans le contexte de cette étude vient du fait que la zone d'étude étant placée en amont de toutes les autres zones agricoles irriguées dépendant du Kou, elle "contrôle" les débits en aval. L'utilisation de l'eau dans la zone d'étude est alors le bras de levier sur lequel il faudrait agir afin d'octroyer plus d'eau en aval.

Une étude a été faite afin d'estimer les besoins en eau des cultures. Les besoins en eau des cultures dépendent des paramètres intrinsèques des cultures (coefficients culturaux), du climat, du type de sol, des dates de semis, des longueurs de cycles végétatifs.

### 4.1 Estimation des besoins en eau sur la zone agricole Nasso-Diaradougou

Dans un souci d'optimisation de la gestion de l'eau, il importe de faire un diagnostic sur l'utilisation de l'eau en agriculture. Un des critères qui se prête le mieux à l'évaluation de l'utilisation de l'eau en agriculture est l'efficacité d'irrigation. En effet ce critère met en comparaison les doses d'irrigation apportées avec les doses requises, sur la base des paramètres sol-eau-plante. L'objet de l'étude présentée dans cette section est l'établissement des besoins en eau des principales cultures irriguées pratiquées dans la zone d'étude.

#### 4.1.1 Hypothèses

Le calcul des besoins en eau des cultures se fera sur les 12 mois de l'année, mais l'accent sera mis sur les cultures pratiquées durant la contre-saison<sup>14</sup>. La campagne agricole de contre-saison s'étend de janvier à mai.

---

<sup>14</sup> "Saison sèche", pendant laquelle on enregistre peu ou pas de pluies. Elle s'étend de novembre à juin

On s'intéressera aux cultures les plus importantes (en termes d'occupation du sol), observées au sein de la zone d'étude. L'occupation du sol étant très variable, l'importance de ces cultures peut varier d'une année à l'autre. D'après Ouédraogo (2010), les 5 cultures les plus importantes en termes de superficies (données 2010) sont les suivantes : maïs, banane, chou, riz, gombo. Elles occupent près de 94.5% de la superficie de la zone d'étude (voir Tableau 5). Ne seront prises en considération pour l'estimation des besoins en eau de la zone d'étude, que ces 5 cultures. De ce fait, elles seront considérées comme étant représentatives de l'ensemble des cultures de la zone d'étude.

Le choix d'introduire un biais dans l'estimation des besoins en eau, en négligeant les besoins en eau des 5.5% de superficie restante vient du fait que les données agronomiques détaillées manquent pour ces cultures, et que ces cultures sont très peu représentées de surcroît. Toutefois, leurs besoins en eau seront pris en compte (grossièrement) en majorant de 5.5%, les besoins en eau totaux estimés pour les 5 principales cultures.

Tableau 5. Principales cultures rencontrées au sein de la zone d'étude (d'après Ouédraogo, 2010)

Cultures	Superficies <sup>(*)</sup> (ha)	Pourcentage (%)
Maïs	87	49.57
Banane	62	35.33
Gombo	5.75	3.28
Chou	8.25	4.70
Riz	2.75	1.57
Autres <sup>(**)</sup>	9.75	5.56

(\*) Données provenant d'un échantillon de 10% des producteurs de la zone d'étude

(\*\*) Autres cultures : arachide, aubergine, tomate, poivron, piment, carotte, oignon, niébé, patate, papaye

## 4.1.2 Matériel, méthode, données

### 4.1.2.1 Méthode

La méthodologie adoptée pour cette étude est le calcul des besoins en eau spécifiques de chaque type de culture, rapporté aux superficies relatives à ces cultures, afin de déterminer pour chaque mois, des débits fictifs continus.

Le calcul des besoins en eau spécifiques des cultures tient compte, pour chaque culture, de la date de semis, de la longueur du cycle, du type de sol, des coefficients culturels aux différents stades phénologiques. A ces paramètres, s'ajoutent des paramètres régionaux tels que la pluie efficace et l'évapotranspiration potentielle.

Les calculs d'évapotranspiration et de besoins en eau se basent sur la méthode de Penman-Monteith et l'utilisation du coefficient cultural (voir Allen et al., 1998). Le calcul de la pluie efficace se base sur la méthode USDA-SCS (voir Clarke et al., 2000 ; Muñoz and Grieser, 2006).

Les estimations de superficies pour toutes les cultures considérées se sont faites à l'aide de la télédétection, en déterminant les superficies en culture et en affectant à chaque culture sa superficie relative, conformément aux données présentées dans le Tableau 5. La méthodologie utilisée pour l'estimation des superficies (pour chaque mois de la contre-saison) a consisté en la classification par arbre de décision (Quinlan, 1986 ; Friedl and Brodley, 1997) d'une série d'images Landsat-5 TM pour lesquelles les indices de végétation normalisés (NDVI) ont été calculés. Des valeurs seuils de NDVI ont été fixées permettant pour chaque image de la série, une séparation des superficies couvertes par la végétation (cultures, végétation naturelle, parcours), de celles qui ne le sont pas. Au sein de la classe

générale de végétation, la classe spécifique des cultures a été obtenue en déduisant les classes des parcours et autres végétations arbustive et arborée<sup>15</sup>.

Ainsi pour un mois donné, on obtient par sommation des débits fictifs continus des différentes cultures ensemencées, un débit fictif continu global, pour l'ensemble de la zone agricole suivie.

#### 4.1.2.2 Matériel

Deux programmes ont été principalement utilisés pour l'estimation des besoins en eau des cultures :

- **Exelis VIS™ ENVI®** pour les estimations des superficies en culture
- **FAO CROPWAT 8** pour les calculs des besoins en eau

CROPWAT est un outil d'aide à la décision pour la planification et la gestion de l'irrigation, développé par la division *Land and Water Development* de la FAO (Smith, 1992). CROPWAT a été conçu comme un outil pratique pour réaliser des calculs standards d'évapotranspiration de référence, de besoins en eau des plantes, et plus spécifiquement, pour la gestion des schémas d'irrigation<sup>16</sup>. Ce programme offre des outils assez simples pour l'estimation des besoins en eau.

#### 4.1.2.3 Données

Les données utilisées sont diverses. Elles concernent des séries d'images satellite Landsat-5 TM de l'année 2007 pour la zone d'étude (voir Tableau 6), les données climatiques de Bobo-Dioulasso (station de l'aéroport) et de la localité de Bama (station du périmètre rizicole), les fichiers de paramètres de cultures, de sol de CROPWAT.

Tableau 6. Imagerie satellitale

Images	Date d'acquisition	Résolution spatiale (m)
Landsat-5 TM	10 janvier 2007	30
Landsat-5 TM	11 février 2007	30
Landsat-5 TM	27 février 2007	30
Landsat-5 TM	18 mai 2007	30

En effet, le logiciel CROPWAT intègre déjà dans ses fichiers de base, les paramètres d'un certain nombre de cultures (voir Figure 24). Ces paramètres concernent les coefficients culturaux, le nombre de jours des différents stades végétatifs, les profondeurs racinaires, etc. Des données provenant de la littérature ont été utilisées en compléments des données contenues dans les fichiers de paramètre des cultures de CROPWAT (Critchley and Siebert, 1991 ; Fondio et al., 2007 ; Chapeaux and Enomoto, 2009).

<sup>15</sup> L'estimation des superficies des classes de parcours et de végétations arbustive et arborée est détaillée dans la partie 5.2 à venir.

<sup>16</sup> Référence internet : <http://agromet-cost.bo.ibimet.cnr.it/fileadmin/cost718/repository/cropwat.pdf>

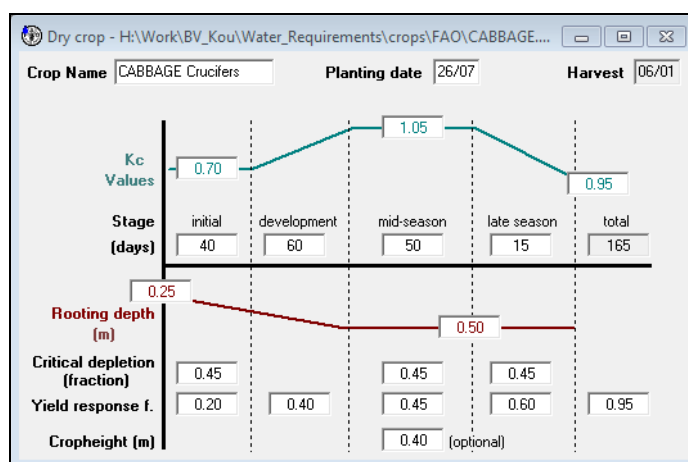


Figure 24. Aperçu du contenu du fichier des paramètres de cultures de CROPWAT (cas du chou)

Les sols de la zone d'étude sont pour la plupart classés parmi les sols argilo-limoneux. CROPWAT propose pour ces sols des paramètres (voir Figure 25).

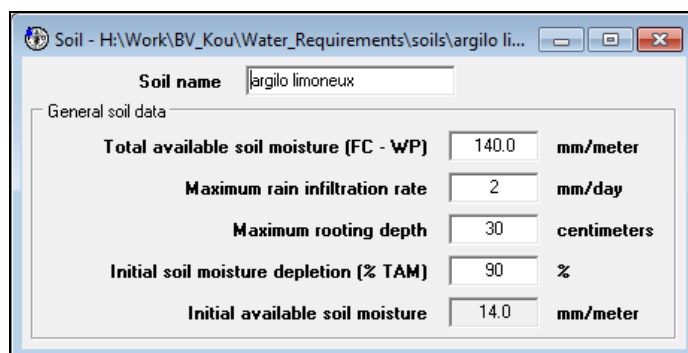


Figure 25. Aperçu du contenu du fichier de paramètres des sols de CROPWAT

Les données pluviométriques utilisées sont des normales calculées pour le bassin versant (voir Figure 26). L'essentiel des données agrométéorologiques utilisées au cours de cette étude proviennent de la base de données du Projet GEeau.

	Rain	Eff Rain	Rain	Eff Rain	Rain	Eff Rain	Rain	Eff Rain
	dec 1	dec 1	dec 2	dec 2	dec 3	dec 3	month	month
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
January	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
February	0.0	0.0	4.0	3.9	0.0	0.0	4.0	3.9
March	3.4	3.3	0.2	0.2	0.0	0.0	3.6	3.5
April	4.6	4.5	7.5	7.2	8.6	8.2	20.7	20.0
May	15.5	14.3	21.4	19.2	31.2	26.5	68.1	60.1
June	29.0	25.0	7.9	7.6	70.1	46.5	107.0	79.1
July	52.6	39.3	53.1	39.6	37.7	30.9	143.4	109.8
August	79.6	49.2	61.8	43.5	63.1	44.0	204.5	136.6
September	143.1	56.0	40.2	32.4	21.2	19.0	204.5	107.5
October	16.8	15.4	9.6	9.2	4.7	4.6	31.1	29.2
November	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
December	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Total							787.0	549.8

Figure 26. Aperçu du contenu du fichier des paramètres de pluie de CROPWAT

Les Tableau 7 et Tableau 8 ci-dessous donnent, respectivement, des informations sur les périodes durant lesquelles les différentes cultures sont cultivées sur la zone d'étude, ainsi que leurs coefficients culturaux, pour des semis commençant au mois de janvier.

Tableau 7. Périodes durant lesquelles les cultures sont pratiquées

Cultures	Périodes actives
Maïs	Janvier-Mai
Banane	Janvier-Décembre
Gombo	Janvier -Mai
Chou	Janvier-Mai
Riz	Janvier-Mai

Tableau 8. Coefficients culturaux des cultures pour des semis en janvier

Mois	Décade	Banane		Chou		Gombo		Maïs		Riz	
		Stade	Kc coeff	Stade	Kc coeff	Stade	Kc coeff	Stade	Kc coeff	Stade	Kc coeff
Janvier	1	Init	0.5	Init	0.7	Init	0.6	Init	0.3	Nurs <sup>(*)</sup>	1.2
	2	Init	0.5	Init	0.7	Deve	0.66	Init	0.3	Nurs/LPr <sup>(**)</sup>	1.08
	3	Init	0.5	Init	0.7	Mid	1.04	Deve	0.45	Nurs/LPr	1.06
Février	1	Init	0.5	Deve	0.7	Mid	1.21	Deve	0.71	Init	1.1
	2	Init	0.5	Deve	0.74	Mid	1.21	Deve	0.96	Init	1.1
	3	Init	0.5	Deve	0.79	Mid	1.21	Mid	1.16	Deve	1.13
Mars	1	Init	0.5	Deve	0.84	Mid	1.21	Mid	1.18	Deve	1.18
	2	Init	0.5	Mid	1.03	Late	1.2	Mid	1.18	Deve	1.23
	3	Init	0.5	Mid	1.03	Late	1.12	Mid	1.18	Mid	1.27
Avril	1	Deve	0.52	Mid	1.03	Late	1.03	Late	1.14	Mid	1.27
	2	Deve	0.55	Late	0.98	Late	0.94	Late	0.89	Mid	1.27
	3	Deve	0.58	Late	0.93	Late	0.88	Late	0.61	Mid	1.27
Mai	1	Deve	0.61					Late	0.41	Late	1.25
	2	Deve	0.65							Late	1.2
	3	Deve	0.68							Late	1.15
Juin	1	Deve	0.71								
	2	Deve	0.75								
	3	Deve	0.78								
Juillet	1	Deve	0.81								
	2	Deve	0.84								
	3	Deve	0.88								
Août	1	Deve	0.91								
	2	Deve	0.94								
	3	Deve	0.98								
Septembre	1	Deve	1.01								
	2	Mid	1.03								
	3	Mid	1.03								
Octobre	1	Mid	1.03								
	2	Mid	1.03								
	3	Late	1.03								
Novembre	1	Late	1.02								
	2	Late	1.01								
	3	Late	1								

(\*) Nursery

(\*\*) Nursery/Land preparation

### Difficultés et esquisses de solution

La difficulté majeure de la méthodologie décrite ci-dessus, réside dans la non-harmonie des dates de semis d'un agriculteur à l'autre, ainsi que dans l'estimation difficile des superficies des différentes cultures pour l'ensemble d'une campagne agricole de contre-saison.

Dès lors une telle étude ne pourrait être qu'une estimation des besoins en eau des cultures pour l'ensemble de la contre-saison.

Afin de contourner le problème de la non-harmonie des dates de semis, pour chaque culture, le début du mois de janvier a été choisi arbitrairement comme date de semis. Les observations faites sur le terrain ont montré que la plupart des semis pour la campagne agricole de contre-saison se faisaient durant ce mois. Il peut arriver que ces semis débordent sur le début du mois de février.

### 4.1.3 Résultats

Les estimations des besoins en eau spécifiques pour les 5 cultures considérées se sont faites selon un pas de temps décadaire, puis agrégées en pas de temps mensuel (voir Tableau 9).

Tableau 9. Besoins en eau spécifiques mensuels

Mois	Besoins en eau (m <sup>3</sup> /ha/mois)				
	Banane	Chou	Gombo	Maïs	Riz
Janvier	623	649.01	1851	369	4088
Février	588	991.78	2344	1642	2139
Mars	591	1693.96	2241	1959	2320
Avril	691	1380.33	1053	508	1755
Mai	512	0	0	0	1850
Juin	387	0	0	0	0
Juillet	89	0	0	0	0
Août	0	0	0	0	0
Septembre	368	0	0	0	0
Octobre	1118	0	0	0	0
Novembre	1099	0	0	0	0

Les résultats obtenus montrent des évolutions mensuelles des besoins en eau, en forme de "cloche" pour les cultures de maïs, de chou et de gombo.

Le cas du riz montre un profil avec des valeurs très élevées en début de campagne. En effet, cette culture requiert des grandes quantités d'eau lors de la préparation du terrain. Les besoins en eau restent relativement élevés durant le reste du cycle, nécessitant ainsi que le riz soit cultivé si possible sur des sols proches de la saturation en eau.

Le profil des valeurs de besoin en eau de la banane présente peu de variation durant les 4 à 5 premiers mois de l'année, avant de passer par un minima en saison des pluies, pour remonter vers des valeurs assez importantes en fin de campagne.

Les besoins en eau d'une légumineuse telle que le gombo, s'avèrent assez élevées, bien au dessus de ceux de la banane et parfois proches de ceux du riz. Certains auteurs dans la littérature (Fondio et al., 2007) préconisent même l'apport de 20 litres par m<sup>2</sup> de surface, tous les deux jours. Ce qui correspondrait à une dose moyenne d'irrigation mensuelle de 3 000 m<sup>3</sup>/ha.

Le traitement des données de télédétection a fourni une estimation des superficies moyennes couvertes par la végétation au sein de la zone d'étude : 559 ha. Après déduction des superficies couvertes par la végétation naturelle et les parcours (70 ha), il ressort une superficie moyenne en cultures irriguées de 489 ha, entre janvier et mai.

A partir de la superficie moyenne en cultures irriguées, les superficies relatives à l'occupation des différentes cultures considérées ont été déterminées pour chaque mois (voir Tableau 10).

Tableau 10. Estimation des superficies des cultures

Mois	Maïs (ha)	Banane (ha)	Gombo (ha)	Chou (ha)	Riz (ha)	Total (ha)
Janvier	256.78	189.57	16.97	24.35	8.12	<b>495.79</b>
Février	256.78	189.57	16.97	24.35	8.12	<b>495.79</b>
Mars	256.78	189.57	16.97	24.35	8.12	<b>495.79</b>
Avril	256.78	189.57	16.97	24.35	8.12	<b>495.79</b>
Mai	0	189.57	0	0	8.12	<b>197.69</b>
Juin	0	189.57	0	0	0	<b>189.57</b>
Juillet	0	189.57	0	0	0	<b>189.57</b>
Août	0	189.57	0	0	0	<b>189.57</b>
Septembre	0	189.57	0	0	0	<b>189.57</b>
Octobre	0	189.57	0	0	0	<b>189.57</b>
Novembre	0	189.57	0	0	0	<b>189.57</b>
Décembre	0	189.57	0	0	0	<b>189.57</b>

L'estimation des besoins en eau totaux par culture est enfin obtenue par le produit des besoins en eau spécifiques moyens mensuels d'une culture par la superficie moyenne occupée par la culture. Les besoins en eau totaux mensuels pour toutes les cultures sont obtenus par sommation des besoins en eaux totaux de chaque type de culture. Un débit fictif continu nécessaire à la satisfaction des besoins en eau des cultures de la zone d'étude est déduit en rapportant le volume des besoins en eaux totaux par le temps (voir Tableau 11).

Tableau 11. Estimation des besoins en eau totaux

Mois	Maïs (m <sup>3</sup> )	Banane (m <sup>3</sup> )	Gombo (m <sup>3</sup> )	Chou (m <sup>3</sup> )	Riz (m <sup>3</sup> )	Total (m <sup>3</sup> )	Qfc <sup>(*)</sup> (m <sup>3</sup> /s)
Janvier	94926.08	118102.62	31413.80	15803.50	33181.03	293427.02	<b>0.11</b>
Février	421803.83	111467.64	39780.63	24149.94	17361.60	614563.64	<b>0.24</b>
Mars	503152.54	112036.35	38032.59	41247.95	18830.72	713300.15	<b>0.28</b>
Avril	130612.44	130993.43	17870.74	33611.16	14244.79	327332.55	<b>0.13</b>
Mai	0	97060.26	0	0	15015.88	97060.26	<b>0.04</b>
Juin	0	73363.90	0	0	0	73363.90	<b>0.03</b>
Juillet	0	16871.80	0	0	0	16871.80	<b>0.01</b>
Août	0	0.00	0	0	0	0.00	<b>0</b>
Septembre	0	69762.06	0	0	0	69762.06	<b>0.03</b>
Octobre	0	211940.17	0	0	0	211940.17	<b>0.08</b>
Novembre	0	208338.32	0	0	0	208338.32	<b>0.08</b>
Décembre	0	0.00	0	0	0	0.00	<b>0</b>

(\*) Débit fictif continu

Sur la période la plus active de la campagne de contre-saison (janvier à mai), le débit fictif continu moyen nécessaire à la satisfaction des besoins en eau est de 0.16 m<sup>3</sup>/s.

Enfin, cette étude des besoins en eau, se veut avant tout indicative des ordres de grandeur en ce qui concerne les besoins en eau pour chaque culture. Comme mentionné plus haut, plusieurs raisons empêchent une estimation très précise des valeurs réelles, du fait de l'occupation du sol qui est très variable, ne permettant pas une harmonie des dates de semis. De ce fait, les conclusions de cette étude restent quelque peu biaisées car dans la réalité, toutes les cultures ne sont pas ensemencées au 1<sup>er</sup> janvier de l'année. Les cultures sont ensemencées tout au long du mois de janvier et un peu, du mois de février. Ceci impliquerait alors l'utilisation d'autres coefficients cultureux, d'autres données d'évapotranspiration potentielle, une estimation différente des superficies ensemencées. Plusieurs études de cas pourraient permettre l'approche d'estimations plus fines. En raison des délais impartis à la présente étude, ces études de cas ne pourront être faites.

## 4.2 Etude des prélèvements d'eau pour l'irrigation

Une étude sur les prélèvements d'eau pour l'irrigation a été faite sur la base de l'étude des débits du Kou à différentes sections de contrôle, et principalement pour les sections les plus en amont et les plus en aval de la zone d'étude. Cette méthode quoique fournissant un débit fictif continu, a été préférée à une méthode privilégiant le suivi des prélèvements d'un échantillon de producteurs. Cette dernière méthode pourrait se révéler peu fiable car basée sur les déclarations des producteurs, n'ayant pas toujours une idée précise des grandeurs physiques (débits des motopompes, volumes des moyens d'exhaure, temps d'irrigation).

Ainsi la méthode d'estimation des prélèvements utilisée est un simple bilan d'eau de surface tenant compte des débits de la rivière à l'entrée et à la sortie de la zone. La différence représentant le prélèvement, sous forme de débit fictif continu.

Les résultats de l'étude sur les prélèvements d'eau dans la rivière montrent que ces prélèvements seraient en moyenne de l'ordre de  $0.29 \text{ m}^3/\text{s}$ . Une autre étude faite par sur les prélèvements d'eau pour l'agriculture montre que le prélèvement était en moyenne de l'ordre de  $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , il y a 20 ans de cela (voir partie 5.1). Ceci laisse supposer soit une intensification de l'agriculture irriguée, soit une extension des zones irriguées. L'intensification au niveau de l'agriculture étant faible en Afrique subsaharienne, l'hypothèse à prendre en compte pourrait être l'extension des superficies.

Les besoins en eau mensuels estimés dans le cadre de cette étude, pour la période de la campagne agricole de contre-saison se situent entre  $0.04 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les efficacités d'utilisation de l'eau varieraient ainsi, selon le mois, entre 15% et 105% (voir Tableau 12), soit une efficacité moyenne de 55%.

Tableau 12. Besoins en eau, prélèvements, efficacités d'utilisation de l'eau

Mois	Besoins en eau (m <sup>3</sup> /s)	Prélèvements (m <sup>3</sup> /s)	Efficacités
Janvier	0.11	0.33	33.23
Février	0.24	0.32	74.53
Mars	0.28	0.27	105.26
Avril	0.13	0.28	46.10
Mai	0.04	0.26	15.33

Cependant, une étude réalisée par Wellens et al. (2007) montre que les efficacités d'utilisation de l'eau au sein de la zone d'étude sont bien plus faibles, de l'ordre de 30% en moyenne. Les adéquations<sup>17</sup> sont elles, de l'ordre de 99%. Les cultures ne souffriraient donc pas de stress et les quantités d'eau perdues seraient supérieures à celles réellement destinées aux cultures. D'où le constat d'une mauvaise utilisation de l'eau.

<sup>17</sup> L'adéquation est le rapport entre le volume livré et le volume requis. Si le montant d'eau livrée excède le montant requis, l'adéquation est considérée comme étant bonne (Wellens, J., Nitcheu, M.N., 2009. Le périmètre irrigué de la Vallée du Kou: Diagnostic des efficacités hydro-agricole & élaboration des calendriers à l'aide de SIMIS. GEeau: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.).

## Chapitre 5. Evolution de la consommation en eau à usage agricole

L'étude de l'évolution de la consommation en eau pour l'agriculture vise à chercher une relation entre l'évolution des superficies irriguées et l'évolution des prélèvements d'eau (dans la rivière) pour l'agriculture au cours des 20 dernières années.

Entre la fin de la décennie 1980 et la fin de la décennie 2000, l'estimation des superficies en cultures irriguées montre une augmentation assez importante de ces dernières (voir partie 5.2). Si pour la même période, les pratiques en matière d'irrigation n'ont pas beaucoup changé, on peut supposer a priori que les prélèvements d'eau pour l'irrigation ont pu connaître une augmentation qui serait liée à celle des superficies irriguées.

Dans le cadre de la gestion des ressources en eau, il importe, connaissant le niveau des ressources, de connaître leur potentiel d'irrigation. Dans le cas de la zone faisant l'objet de cette étude, une telle connaissance permettrait aux décideurs de fixer des limites à l'extension des zones agricoles irriguées.

### 5.1 Evolution des prélèvements d'eau pour l'agriculture

Faute de données suffisantes l'étude de l'évolution des prélèvements d'eau pour l'agriculture irriguée au sein de la zone d'étude s'est focalisée uniquement sur les prélèvements effectués durant le mois d'avril pour toutes les années comprises dans la période d'étude. Le choix du mois d'avril s'explique par le fait que c'est le mois pour lequel les données historiques de débits sont les plus nombreuses. Idéalement cette étude aurait dû se faire sur tous les mois de la campagne de contre-saison, durant lesquels les besoins en eau des cultures semblent être les plus importants. Malheureusement, les séries disponibles contenaient énormément de lacunes pour les autres mois de contre-saison, empêchant ainsi leur utilisation.

Plutôt que de travailler de manière absolue, avec des valeurs de débits mesurées sur les différentes stations hydrométriques, des valeurs relatives telles que la différence de débits mesurés simultanément, à l'entrée et à la sortie de la zone d'étude seront considérées. Cette différence est supposée être égale aux prélèvements d'eau pour l'irrigation des parcelles irriguées installées le long du cours d'eau, de part et d'autre du cours d'eau. Cette supposition néglige l'évaporation de l'eau de la rivière, ainsi que les flux d'échange dans les deux sens entre la rivière et la nappe souterraine. En rappel, la quantification des flux d'eau échangés entre la rivière et la nappe fait l'objet de la thèse en cours d'Élie Sauret. Pour l'heure, ces flux échangés seront considérés faussement nuls dans le cadre de la présente étude.

Ainsi, le choix d'un indicateur tel que le "prélèvement d'eau", plutôt que le "débit mesuré sur le cours d'eau", permet de s'affranchir de l'effet direct (sur les calculs) de la baisse de la pluviométrie d'une année à l'autre, étant donné que la zone d'étude est homogène en termes d'apports pluviométriques (isohyètes 900 à 1 100 mm<sup>18</sup>), et que les débits à l'entrée et à la sortie du système sont soumis aux mêmes effets de la pluviométrie.

Toutefois, une difficulté s'est posée à la bonne réalisation de cette étude ; il s'agit de l'insuffisance de données hydrométriques. En effet, plusieurs stations hydrométriques n'ont pas connu un suivi rigoureux et ont, pour certaines, été laissées à l'abandon durant des années entières. Une conséquence est alors la relative faiblesse du nombre de données disponibles pour l'étude, rendant ainsi les conclusions de l'étude en la matière plus indicatives que formelles.

---

<sup>18</sup> <http://www.meteo-burkina.net/>

Afin de contourner l'obstacle qu'est le manque de données au sein des séries chronologiques, une comparaison des différentes tendances d'évolution des débits mesurés, obtenues à partir de traitements statistiques, a été faite.

Le set de données (voir Tableau 13) se compose des débits moyens des mois d'avril, mesurés à la station en amont de la zone d'étude (station de Nasso) et à la station en aval (station de Diaradougou). Les prélèvements correspondent à la différence de débit entre l'entrée et la sortie du système pour des dates ou périodes similaires.

En observant le set de données, on peut s'apercevoir d'une importante rupture dans la chronologie. En effet, il n'existe aucune donnée hydrométrique disponible entre 1993 et 2004. Cette lacune rend difficile toute analyse sur ces données et ne permet pas de tirer une conclusion. En outre, le nombre assez faible d'observations ne permet pas non plus que celles-ci soient scindées en deux groupes, tel que leur distribution dans le temps semble le montrer.

Toutefois, dans le cadre d'une exploration "informelle" des données hydrométriques disponibles, ces dernières ont été portées sur un graphique. En traçant sur un graphique (voir Figure 27) les deux droites de tendances d'évolution des débits mesurés respectivement, en amont (station de Nasso) et en aval (station de Diaradougou) de la zone d'étude, les tendances obtenues sont toutes négatives. La pente de la droite de tendance de la station en aval semble être la plus négative, ce qui est attesté par le rapport des pentes des droites de tendance, qui est de 1.29 en faveur de celle de la droite de tendance de la station en aval. L'écart entre les deux droites de tendance pourrait représenter lui-même la "tendance", apparemment à la hausse dans la zone d'étude, des prélèvements d'eau à partir de la rivière Kou pour l'irrigation des cultures.

Un test de conformité sur les coefficients angulaires des deux droites de régression a été fait afin de vérifier si elles sont significativement différentes l'une de l'autre (au seuil de 0.05). Le test a montré un chevauchement dans les intervalles de confiance des coefficients angulaires, montrant ainsi que ces derniers n'étaient pas significativement différents. On ne peut donc prouver formellement l'augmentation des prélèvements en fonction du temps, en se basant uniquement sur le set de données utilisé.

Tableau 13. Estimation des prélèvements pour les mois d'Avril (1987-2010)

Dates	Débits Nasso (m3/s)	Débits Diaradougou (m3/s)	Prélèvements (m3/s)
Avril 1987	2.35	2.16	0.19
Avril 1989	2.27	2.17	0.1
Avril 1990	2.25	-	-
Avril 1992	2.11	1.76	0.35
Avril 1993	2.32	2.11	0.21
Avril 2004	-	1.65	-
Avril 2007	2.08	1.60	0.48
Avril 2009	1.69	1.37	0.32
Avril 2010	1.53	1.23	0.30

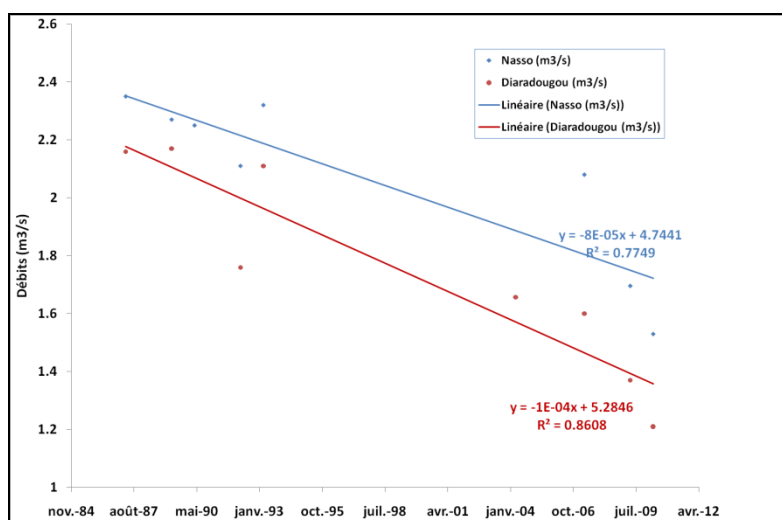


Figure 27. Tendances d'évolution des débits (amont en bleu, et aval en rouge) pour les mois d'Avril au sein de la zone d'étude

A ces prélèvements d'eau de surface effectués directement sur la rivière Kou, s'ajoutent les prélèvements effectués sur les eaux souterraines, notamment dans la nappe alluviale accessible à moins de 10 m par endroits (Ogou, 2008). D'après Wellens et al. (2007), depuis quelques années on constate un recours progressif des agriculteurs aux eaux souterraines pour l'irrigation. L'exploitation des eaux souterraines se fait par des ouvrages tels que des puits et des "puisards artisanaux" qui sont des fosses peu profondes creusées dans le sol et alimentées soit par les écoulements de la nappe, soit par des pompages à partir de la rivière. Ces puisards jouent le rôle de réservoir de stockage de l'eau d'irrigation.

La relative baisse observée dans les prélèvements d'eau dans le Kou pour les années 2009 et 2010 (voir Tableau 13), pourrait être l'effet du choix par un grand nombre de producteurs, de l'exhaure par les eaux souterraines. Ce nombre est estimé à environ 31% du total des producteurs (Wellens et al., 2007).

En conclusion, on pourrait (a priori) estimer qu'entre 1988 et 2009, une augmentation des prélèvements d'eau pour l'agriculture a été enregistrée. Cette augmentation irait globalement de pair avec l'augmentation estimée des superficies en cultures irriguées (voir les conclusions de la partie 5.2 ci-dessous). Les lacunes trop importantes au sein de ces séries hydrométriques empêchent une caractérisation formelle de la tendance exacte de l'augmentation des prélèvements d'eau pour l'agriculture.

## 5.2 Evolution des superficies agricoles irriguées

En l'absence de données historiques pouvant apporter des informations sur l'évolution des superficies irriguées au sein de la zone d'étude, une estimation des superficies en cultures irriguées a été faite à l'aide de la télédétection. Cette étude se base sur une approche originale permettant d'utiliser de l'information actuelle pour recréer de l'information historique, là où elle manquait.

L'étude a été soumise pour publication à la revue **Geocarto International** (groupe Taylor and Francis) et a été acceptée avec révisions. La version de l'étude présentée ci-dessous est quelque peu modifiée afin de s'adapter au format général de la thèse. Son titre original est : "*Monitoring the evolution of irrigated areas with Landsat images using backward and forward change detection analysis in the Kou watershed, Burkina Faso*".

### 5.2.1 Contexte de l'étude

Plusieurs auteurs dans le monde ont travaillé à cartographier les zones irriguées à l'aide de la télédétection. Les matériels et méthodes utilisés ont été en général influencés par le contexte des études. L'agriculture en Afrique tropicale sub-saharienne représente un cas spécifique assez complexe qui présente cependant des similarités avec l'Asie du sud du fait, entre autres, du parcellaire fortement morcelé qui y est rencontré, avec la notable différence d'une meilleure pluviométrie en Asie du sud. Si des efforts considérables ont été accomplis dans la cartographie des terres irriguées en Asie du sud (Thenkabail et al., 2009 ; Velpuri et al., 2009 ; Machwitz et al., 2010), on ne peut en dire autant pour l'Afrique tropicale sub-saharienne.

L'étude en cours explore le potentiel de la télédétection à moyenne résolution spatiale (à savoir l'imagerie Landsat à 30 m de résolution) pour le suivi de l'extension des zones irriguées. Selon plusieurs auteurs (Bastiaanssen et al., 2000 ; Nellis et al., 2009 ; Conrad et al., 2010) ce type d'image convient au suivi de l'agriculture et de l'occupation du sol. L'approche adoptée vise à contourner les difficultés rencontrées souvent dans les pays en voie de développement où il existe peu de données historiques (exemple : enquêtes, inventaires agricoles) pouvant servir de base au suivi des terres cultivées.

Le choix de l'imagerie Landsat se justifie par le contexte économique difficile dans les pays en voie de développement, ne permettant pas une facile acquisition d'images à très haute résolution spatiale (exemple : Quickbird, Ikonos), plus appropriées pour le suivi du parcellaire très fragmenté comme c'est le cas au Burkina Faso en général, et sur le bassin versant du Kou en particulier.

Toutefois, l'utilisation l'imagerie Landsat induit la gestion de pixels mixtes ("*mixels*" en anglais). Ce sont des pixels contenant de l'information sur plus d'un type de couverts (Foody, 2004). Les pixels mixtes sont très souvent des sources d'erreur dans les classifications d'images (Short, 2005 ; Wang et al., 2007).

L'agriculture irriguée traditionnelle pratiquée par les producteurs du bassin versant du Kou est assez complexe à cartographier en raison de la diversité des cultures pratiquées sur de petites superficies. Selon Heller et al. (2012), cette diversité des cultures est encore plus difficile à cartographier à partir d'images à moyenne résolution. Plusieurs auteurs (Masoner et al., 2003 ; Thenkabail et al., 2004 ; Hoang et al., 2008 ; Conrad et al., 2010) proposent alors l'utilisation des capteurs hyperspectraux ou l'utilisation des techniques orientées objet (exemple : la segmentation d'images) pour résoudre le problème spécifique de la confusion dans les signatures spectrales des cultures.

Plusieurs études (Petit et al., 2001 ; Gumma et al., 2011) ont montré que les indices de végétation, tels l'indice normalisé de végétation (NDVI) étaient de bons outils pour identifier les changements spatio-temporels dans les zones de végétation irriguées ou non. D'après Ozdogan (2010) le "*Green Index*" (rapport entre le canal "proche infrarouge" et le canal "vert" des images satellites. Indice proposé par Gitelson et al., 2005) pouvait être efficace pour le suivi des zones irriguées, mais cette méthode semble plus convenir aux zones de monoculture plutôt qu'aux zones de cultures mixtes fréquemment rencontrées en Afrique.

Au cours d'études précédentes sur la cartographie des zones irriguées sur le bassin versant du Kou faites par Traoré et al. (2012), des classifications basées sur l'utilisation des arbres de décision avec comme variables principales le NDVI et l'indice de verdure (ou "*greenness*", obtenu par combinaison linéaire des canaux d'images Landsat) issue de la transformation dite "*Tasseled cap*" (voir Crist et al., 1986), se sont révélées être peu concluantes quant à la séparation entre les différents types de végétation. Les algorithmes dits de "*Classification And Regression Trees*" (CART. Voir Breiman et al.,

1984; Quinlan, 1986) n'ont pas permis une différenciation entre les classes de végétation en raison des chevauchements au niveau des signatures spectrales.

En cas de disponibilité d'images sur plusieurs périodes pour une zone donnée, il est possible d'utiliser les informations contenues dans la série pour améliorer les classifications de chaque image en utilisant des méthodes d'analyse multi-temporelles. L'analyse multi-temporelle des images possède un potentiel important dans l'identification des zones irriguées (Lambin, 1997 cité par Petit et al., 2001 ; Ozdogan and Gutman, 2008 ; Heller et al., 2012) dans la mesure où l'analyse multi-temporelle permet de prendre en compte le développement phénologique des cultures (Conrad et al., 2010). Ceci requiert toutefois la disponibilité de plusieurs images durant le cycle des cultures, ce qui n'a pas été possible dans le cas particulier de l'étude en cours.

En outre, selon Ozdogan (2010), une bonne planification des périodes d'acquisition des images est nécessaire en vue de pouvoir différencier effectivement les zones irriguées des autres types de couvert végétal. Cette planification requiert alors une connaissance assez précise des calendriers culturels de la zone suivie. Une telle expertise est très importante dans l'amélioration des analyses de détection de changements.

L'analyse de détection de changements est un procédé qui permet d'identifier les différences notées dans l'état d'un objet ou d'un phénomène suivi à différentes périodes (Singh, 1989). Selon Macleod and Congalton (1998), la détection de changement concerne principalement:

- la détection de ce qui a changé
- l'identification de la nature du changement
- la mesure de l'ampleur du changement
- l'identification de la configuration spatiale du changement

Il existe plusieurs techniques d'analyses de détection de changements ; plusieurs auteurs (Singh, 1989 ; Lu et al., 2004 ; Coppin et al., 2004; Pham et al., 2007) les mentionnent en les subdivisant en plusieurs catégories : les techniques dites algébriques, les transformations d'image, les classifications d'image, les méthodes avancées, les approches SIG, l'analyse visuelle, etc.

La méthode de détection de changement utilisée dans l'étude en cours se base sur une comparaison post-classification, pixel-par-pixel. Dans cette procédure une matrice complète des trajectoires des pixels d'images classifiées est générée. La procédure s'apparente à celle de Hall et al. (1991) et de Zhou (2008), à la notable différence que les chaînes markoviennes<sup>19</sup> ne sont pas utilisées dans la correction des trajectoires des pixels. Dans l'étude en cours, les chaînes de Markov ont été remplacées par des règles basées sur la connaissance du terrain. La méthode pourrait donc être considérée comme une méthode-expert de classification (ou post-classification). L'utilisation de règles permet la détection d'anomalies dans une trajectoire donnée de pixel sur une série d'images. Ceci a l'avantage de contrôler les résultats de classifications obtenues à partir d'un set d'images indépendantes les unes des autres, en connectant chaque pixel d'une image avec ses autres états au cours du temps. En utilisant la connaissance du terrain pour corriger les données d'occupation du sol

---

<sup>19</sup> Les processus Markoviens (de premier ordre, par exemple) se basent sur la notion suivant laquelle la probabilité que le système soit dans un état donné à l'instant  $t_2$  peut être déduit de la connaissance de son état à un moment antérieur,  $t_1$ , et ne dépend pas de l'histoire du système avant  $t_1$  (voir Parzen, E., 1964. Stochastic processes. Holden-Day, San Francisco.; Bell, E.J., Hinojosa, R.C., 1977. Markov analysis of land use change: Continuous time and stationary processes. Socio. Econ. Plan. Sci. 11(1) 13-17. ; Petit, C., Scudder, T., Lambin, E., 2001. Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: Resettlement and rapid land-cover changes in south-eastern Zambia. Int. J. Remote Sens. 22(17) 3435 - 3456.). Dans l'étude en cours, l'influence du voisinage d'un pixel donné n'est pas prise en compte du fait du caractère non-homogène de l'occupation du sol (voir carte d'occupation du sol dans la partie 2.4)

obtenues par classification d'images, cette approche a plus à voir avec l'utilisation du sol que la couverture du sol.

**Le but de cette étude est d'évaluer l'évolution dans le temps des zones irriguées dans le bassin du Kou.** La méthode proposée se distingue des autres en ce sens qu'elle va au-delà des limites de la classification "classique" d'images (méthode du maximum de vraisemblance, dans ce cas) en utilisant l'analyse de détection des changements pour corriger les données d'occupation du sol d'une image donnée à partir de celles d'une autre au sein d'une série temporelle, quelle que soit sa position dans la série.

L'approche choisie vient après plusieurs tentatives au cours desquelles de nombreuses méthodes connues pour leur capacité à discriminer la végétation irriguée ont été testés, sans succès. En plus des méthodes basées sur les indices de végétation mentionnées précédemment, les classifications utilisant la combinaison de canaux spectraux de séries intra-annuelles d'images satellite ont été testées. Les résultats, bien que n'étant pas mauvais, n'étaient pas meilleurs à ceux des classifications basées sur une seule image à la fois. Cela pourrait s'expliquer par l'hétérogénéité au sein des différentes classes de végétation sélectionnées, ce qui provoque de grandes dispersions, et le chevauchement de leurs signatures spectrales crée ainsi de la confusion dans la reconnaissance de pixels. En outre, les résultats étaient également peu concluants en raison de l'indisponibilité des images au bon moment. Ce problème est bien connu lorsque l'on travaille avec des données historiques. L'utilisation de la combinaison de plusieurs images a cependant montré un bon potentiel pour la sélection des zones d'entraînement pour les classifications.

## 5.2.2 Matériel et méthodes

L'étude de l'évolution des zones irriguées a concerné la période comprise entre 1988 et 2009. Afin de faciliter l'identification de ces zones, la période couverte chaque année se situe en général entre janvier et juin (et précisément entre mars et juin), lorsque toutes les cultures sont toutes irriguées par les eaux de surface et/ou souterraines. Cependant même au cours de la contre-saison, la végétation naturelle est maintenue du fait de la nappe peu profonde par endroits. Les zones agricoles situées sur les versants et dépendantes de la pluviométrie (survenant entre juin et octobre) n'ont pas été prises en compte par l'étude.

### 5.2.2.1 Matériel

Les données utilisées (voir Tableau 14) proviennent de trois images Landsat à moyenne résolution (path 197; row 52) et de prises de vue aériennes acquises au cours d'une campagne aérienne (voir Wellens et al., 2010).

Les prises de vues aériennes (PVA) acquises directement au format numérique, ont été constituées en une mosaïque d'images de 0.4 m de résolution spatiale qui a servi à identifier précisément les zones de végétation. Les PVA ont également servi à délimiter un masque autour des zones de cultures, et à valider l'approche globale. L'usage des PVA dans la méthodologie n'est pas obligatoire et aurait pu être remplacé par des points de contrôle classiques (GPS) et de la reconnaissance de terrain.

Les images Landsat sont disponibles gratuitement sur le site web de l'USGS<sup>20</sup>. Ces images ont été sélectionnées selon les critères suivants: acquisition entre mars et juin (correspondant à la période d'activité intense d'irrigation dans la zone d'étude), et exemptes autant que possible d'une

---

<sup>20</sup> <http://glovis.usgs.gov/>

couverture nuageuse (10% de couverture nuageuse au plus). Sur la base de ces critères, des images ont été sélectionnées de 1988 à 2009, avec toutefois une sérieuse limitation au cours de la décennie 1990-2000 : il existe très peu d'images Landsat de qualité pour la zone concernée. D'une manière générale, dans la zone d'étude, il existe un problème de disponibilité d'images Landsat-5 TM. Quant aux images Landsat-7 ETM+, elles sont inutilisables dans la zone d'étude en raison d'un problème survenu sur le capteur du satellite en mai 2003<sup>21</sup>. En 2009, en dehors d'une image Landsat-5 TM acquise le 24 Juin, il n'existe aucune autre image couvrant la campagne agricole de contre-saison.

Tableau 14. Set d'images

Images	Date d'acquisition	Résolution spatiale (m)
Landsat-4 TM	05 mai 1988	30
Landsat-7 ETM+	20 avril 2000	30
PVA du projet GEeau	19 avril 2009	0.4
Landsat-5 TM	24 juin 2009	30

Les images satellites ont été traitées à l'aide de programme Exelis VIS™ ENVI®. Les algorithmes de l'analyse de détection de changement ont été générés à l'aide du programme R®. Les questions relatives aux systèmes d'information géographiques ont été traitées à l'aide de la suite ESRI™ ArcGIS® Desktop.

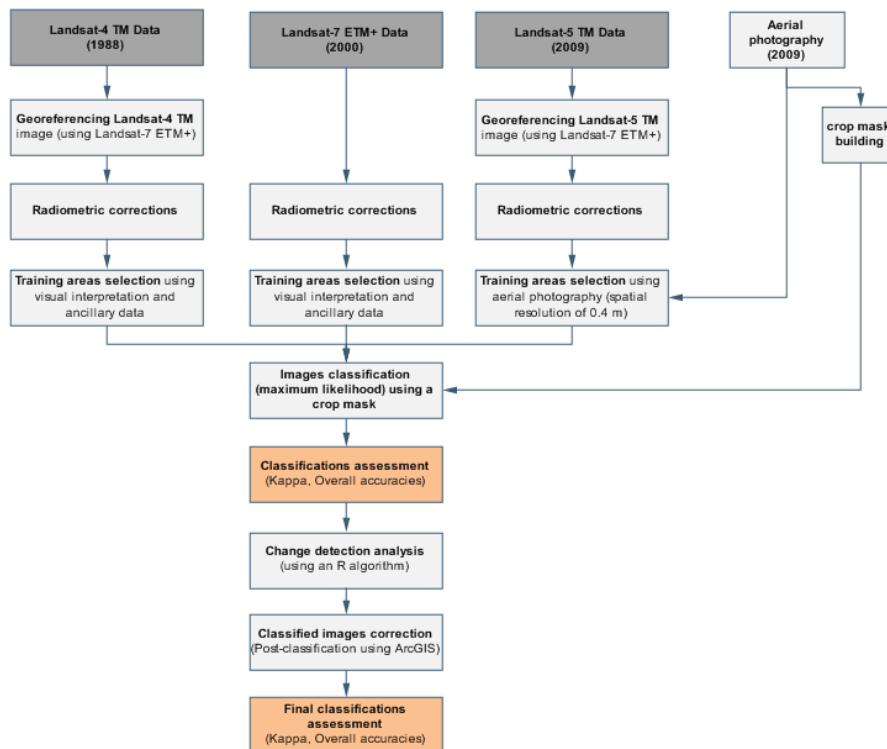


Figure 28. Méthodologie générale

<sup>21</sup> Le 31 Mai 2003, le Scan Line Corrector (SLC) de l'instrument ETM+ a connu une panne. Le SLC consiste en une paire de petits miroirs qui pivotent autour d'un axe, en tandem avec les mouvements du principal miroir de balayage d'ETM+. Le but du SLC est de compenser le mouvement "vers l'avant" de la plate-forme afin que les balayages résultants soient alignés en parallèle les uns par rapport aux autres. Sans l'effet du SLC, l'instrument photographie la terre avec des effets de "zig-zag" résultant en des images avec des zones dupliquées et des zones "ignorées" sur l'image. [http://en.wikipedia.org/wiki/Landsat\_7 (dernière consultation : 12 octobre 2012)]

### 5.2.2.2 Méthodologie

Les grandes lignes de la méthodologie sont présentées en Figure 28. L'étude de l'évolution des superficies irriguées au cours du temps a consisté initialement en une classification supervisée de chaque image satellite. Les classifications ont été suivies par une analyse de détection de changement pixel-par-pixel afin d'identifier et de corriger les trajectoires improbables. Une fois que ces images classifiées ont été corrigées, la qualité du post-traitement a été évaluée afin de valider ou non les corrections faites.

#### 5.2.2.2.1 Correction d'image

La base de données étant constituée d'images provenant de différents capteurs, il a nécessité préalablement à tout traitement, des corrections géométriques des images Landsat-4 TM et Landsat-5 TM afin qu'elles se superposent avec l'image Landsat-7 ETM+ du 20 avril 2000<sup>22</sup>, et avec la mosaïque de PVA. Les corrections des images ont été obtenues avec une erreur quadratique moyenne de 0.05 pixel d'image Landsat. Cette valeur est inférieure au seuil de 0.2 pixel recommandé par Townshend et al. (1992) et Dai et al. (1998), comme étant le seuil idéal afin d'obtenir une erreur de moins de 10% lors de la superposition des images pour l'analyse de détection de changements.

Selon Mas (1999), si deux images différentes doivent être utilisées pour une analyse quantitative basée sur de l'information radiométrique, comme dans le cas des analyses multi-date d'images pour la détection de changements d'états de surface, alors ces images devraient être ajustées pour compenser les divergences radiométriques. À cette fin, tous les canaux des images Landsat utilisées ont été convertis de leurs valeurs numériques initiales (de 0 à 255) en réflectance au-dessus de l'atmosphère<sup>23</sup> ("*Top of Atmosphere - ToA - reflectance*"), suivant Chander and Markham (2003) et Chander et al. (2009).

#### 5.2.2.2.2 Création d'un masque de culture

Avant la classification, un masque dont l'objectif a été de cerner les potentielles zones irriguées a été défini de façon à réduire la zone d'étude. Ce masque a une superficie de 648 ha et a été produit par photo-interprétation de la mosaïque de PVA d'avril 2009. Ce masque est assez grand pour inclure l'ensemble des zones irriguées visibles en 2009 au sein de la zone d'étude. La délimitation du masque n'a pas pu exclure l'entièreté des couverts végétaux autres que des cultures, mais ceux-ci représentent une proportion beaucoup plus faible que celle des cultures irriguées. En outre, le tracé du masque exclut les zones de sol nu, les plans d'eau et les forêts galeries. Le tracé du masque de cultures étant récent, on peut supposer que sa superficie représente la superficie maximale observée de cultures irriguées au cours du temps. En raison de la pression foncière importante au sein de la zone d'étude, les terres converties à l'agriculture ont très peu de probabilité de retourner à un état de végétation naturelle.

#### 5.2.2.2.3 Classification d'images

La classification est limitée à la zone incluse dans le masque pour chaque image. Pour chaque image, des zones d'entraînement ont été définies (à l'intérieur du masque) sur base d'interprétation visuelle des images, et de données auxiliaires (obtenues principalement à partir des interviews de producteurs de la zone). La végétation a été divisée en trois classes principales : les terres agricoles irriguées (classe "*irrigated crops*"); les parcours (classe "*pasture lands*"); les arbres et arbustes (classe

---

<sup>22</sup> Les images Landsat-7 EMT+ seraient mieux géoréférencées que les images Landsat-4 TM et Landsat-4 TM (communication orale, Yves Cornet)

<sup>23</sup> Cette démarche avait été initialement faite afin de permettre l'utilisation de zones d'entraînement uniques pour toutes les images. Ceci n'a finalement pas été fait, mais les valeurs des pixels converties en réflectances ont été conservées pour la suite de l'étude.

"natural vegetation"). La diversité des cultures, le parcellaire fragmenté et la résolution des images satellites (30 m) n'ont pas permis de créer des sous-classes de cultures plus détaillées. Toutefois, les classes existantes étaient tout à fait suffisantes pour le but de cette recherche, à savoir le suivi de l'extension des zones irriguées. Pour chaque image et chaque classe de végétation, les zones d'entraînement ont été divisées en deux groupes (voir Heller et al., 2012): en moyenne deux tiers des zones d'entraînement ont été utilisés pour classifier les images, tandis que le tiers restant des zones d'entraînement a été utilisé pour vérifier (ou évaluer) la qualité de la classification des images. Pour chaque classe, les échantillons ont été sélectionnés de manière uniforme. Le nombre total de pixels échantillonnés (à l'intérieur du masque) varie de 168 à 553 pour les classes des cultures irriguées, de 215 à 262 pour les classes des parcours, et de 47 à 180 pour les classes de végétation naturelle (voir Tableau 15).

Tableau 15. Distribution du nombre total de pixels des zones d'entraînement par image et par classe de végétation

Classes	Landsat-4 TM 1988-05-05	Landsat-7 ETM+ 2000-04-20	Landsat-5 TM 2009-06-24
Irrigated crops	168	226	553
Pasture	215	230	262
Natural vegetation	180	141	47

Dans la première étape du traitement, la méthode de la classification par maximum de vraisemblance a été appliquée. Cette méthode supervisée est probablement la méthode multi-canal la plus largement connue et utilisée pour la classification d'images. Des échantillons de pixels pour lesquels les classes d'occupation sont connues, sont nécessaires pour déterminer la classe d'appartenance de pixels d'une image (Jayroe et al., 1976). L'algorithme de la méthode du maximum de vraisemblance suppose que les valeurs des pixels suivent une distribution gaussienne (Caloz and Collet, 2001), mais cela ne se vérifie pas toujours dans la réalité. Dans le cadre de l'étude en cours, les valeurs ne suivent pas rigoureusement une distribution gaussienne (voir Figure 29 et Tableau 16). Pour cette classification par maximum de vraisemblance, aucun seuil de probabilité n'a été utilisé.

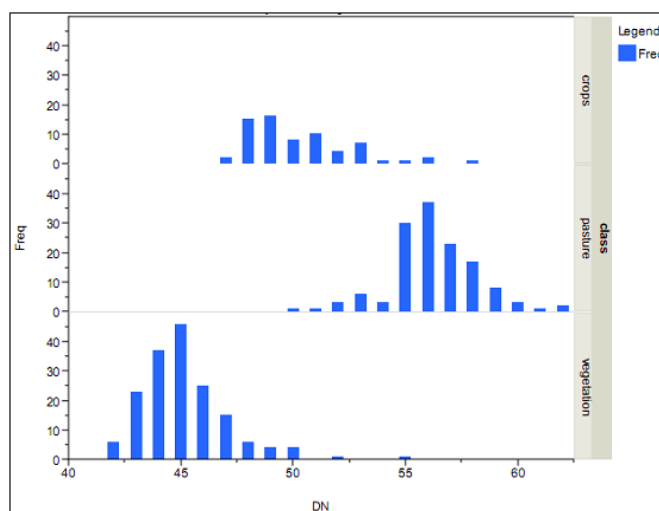


Figure 29. Illustration du chevauchement entre les distributions des valeurs des pixels des zones échantillons (canal "vert" Landsat-7 ETM+)

Afin d'étudier la séparabilité des classes, l'indice des distances de *Jeffries-Matusita* a été utilisé (allant de 0 à 2, avec des valeurs supérieures à 1.9 indiquant une bonne séparabilité. Voir Richards and Jia, 2006). Par exemple, l'indice de *Jeffries-Matusita* pour l'image Landsat-5 TM du 24 juin 2009 était de 1,93 pour la séparabilité entre les parcours et la végétation naturelle. Les indices de distance de *Jeffries-Matusita* pour la séparabilité entre les cultures irriguées et les classes de parcours, et entre les cultures irriguées et les classes de végétation naturelle, étaient 1.80 et 0.97, respectivement. Ceci

met en évidence l'hétérogénéité de la classe des cultures irriguées. Il est à noter que la classe des cultures contient plus d'une douzaine de types de cultures (voir Ouédraogo, 2010) qui étaient impossibles à distinguer sur les images. Des résultats similaires ont été obtenus pour les deux autres images Landsat de la série.

L'évaluation de la classification a été faite à l'aide de la précision globale (en pourcentage) et du coefficient Kappa, tous deux calculés à partir de la matrice d'erreur (Cohen, 1960; Banko, 1998; Foody, 2002; Rossiter, 2004; Congalton and Green, 2009). Plus d'informations sur le coefficient Kappa figurent dans Landis and Koch (1977) et Streiner and Norman (2003). La technique de validation choisie utilise des données de vérité-terrain sélectionnées par une interprétation visuelle sur les trois images Landsat. Les pixels sélectionnés par interprétation visuelle ont été confirmés par les données auxiliaires disponibles. En outre, dans le cas spécifique de l'image Landsat-5 TM de 2009, les PVA ont été utilisés pour contrôler la sélection de pixels des zones d'entraînement pour la classification et la validation de l'image.

#### **5.2.2.2.4 Analyse de détection de changements**

Quels que soient les résultats des classifications par maximum de vraisemblance, ceux-ci sont encore sujets à des erreurs en raison de bruits induits par les similitudes des réponses spectrales de certaines catégories d'occupation du sol (Manandhar et al., 2009). La méthode du maximum de vraisemblance est basée sur l'utilisation de quelques échantillons qui pourraient ne pas être tout à fait représentatifs, bien que selon Hall et al. (1991), "*ces échantillons représentent les meilleures estimations qui peuvent être obtenus avec les données disponibles*". En plus des problèmes d'échantillonnage induits par l'utilisateur des images, les pixels mixtes (mentionné plus haut) restent une source potentielle d'erreur.

L'analyse de détection de changements a permis de détecter les trajectoires qu'il aurait été très peu probable d'observer dans la réalité de la zone d'étude. Certaines de ces trajectoires estimées semblent incompatibles et vont à l'encontre des tendances observées dans la réalité. Par exemple, au sein de la zone d'étude, en raison de la forte intensification de l'agriculture, il est rare de voir une transition des terres agricoles irriguées vers des terres de parcours ou de végétation naturelle. Par conséquent, afin d'harmoniser les résultats de la classification avec les tendances d'utilisation des terres observées sur le terrain, quelques règles simples de correction de trajectoire de pixel ont été définies :

- Un pixel de végétation naturelle peut évoluer vers des parcours ou des cultures, et il peut conserver son état d'origine.
- Un pixel de parcours peut évoluer vers des cultures ou conserver son état d'origine; une évolution vers la végétation naturelle est assez peu probable.
- Un pixel de cultures ne peut que conserver son état d'origine. Une évolution vers la végétation naturelle est peu probable en raison de la pression sur les terres agricoles due à l'arrivée continue de migrants et de l'attrait croissant des rentes considérables réalisés sur les marchés par les cultures irriguées de contre-saison.

Tableau 16. Statistiques descriptives des valeurs de réflectances (ToA) des pixels de zones échantillons<sup>24</sup> pour 3 canaux de l'image Landsat-5 TM du 24 juin 2009

<b>Band 2</b>								
<b>Irrigated crops</b>			<b>Pasture lands</b>			<b>Natural vegetation</b>		
Mean	0.125		Mean	0.124		Mean	0.118	
Median	0.123		Median	0.123		Median	0.117	
Min	0.117		Min	0.117		Min	0.108	
Max	0.156		Max	0.138		Max	0.141	
Std. Dev.	0.005		Std. Dev.	0.004		Std. Dev.	0.005	
N	298		N	173		N	307	
<b>Band 3</b>								
<b>Irrigated crops</b>			<b>Pasture lands</b>			<b>Natural vegetation</b>		
Mean	0.103		Mean	0.102		Mean	0.092	
Median	0.100		Median	0.101		Median	0.091	
Min	0.089		Min	0.094		Min	0.084	
Max	0.147		Max	0.117		Max	0.129	
Std. Dev.	0.010		Std. Dev.	0.005		Std. Dev.	0.006	
N	298		N	173		N	307	
<b>Band 4</b>								
<b>Irrigated crops</b>			<b>Pasture lands</b>			<b>Natural vegetation</b>		
Mean	0.286		Mean	0.209		Mean	0.309	
Median	0.287		Median	0.201		Median	0.309	
Min	0.186		Min	0.173		Min	0.258	
Max	0.366		Max	0.277		Max	0.350	
Std. Dev.	0.035		Std. Dev.	0.024		Std. Dev.	0.014	
N	298		N	173		N	307	

<sup>24</sup> Particulièrement pour les besoins de cette analyse, les zones échantillons ont été prises à l'intérieur et à l'extérieur du masque afin d'augmenter le nombre d'observations.

Pour un pixel classifié donné, l'appartenance à une classe est donc contrôlée par ses appartenances de classe consécutives. Les règles de contrôle sont basées sur les tendances observées dans la chronologie de l'occupation des sols au sein de la zone d'étude. Il n'est pas pris en compte le contexte environnant le pixel du fait de la grande hétérogénéité au sein de l'occupation du sol. Les trajectoires sont corrigées en agissant sur les tables d'attributs des images classifiées. Ces tables d'attribut contiennent le type de classe pour chaque pixel. Les tables d'attributs sont visualisables dans ESRI™ ArcGIS® après l'exportation des images classifiées du programme Exelis VIS™ ENVI® vers le programme ESRI™ ArcGIS®. Les scripts pour les corrections de trajectoire de pixels tels que définis ont été écrits dans un environnement de programmation permettant d'opérer sur des tableaux ou des matrices (le programme R®, dans le cas de cette étude).

Une fois les trajectoires des pixels corrigées, les images post-classifiées sont évaluées de nouveau, sur la base de la précision globale et des coefficients de Kappa. Les zones d'entraînement utilisées pour ces évaluations post-classification sont les mêmes que celles utilisées pour les évaluations des images classifiées initialement.

### 5.2.3 Résultats et discussion

L'évaluation des classifications par maximum de vraisemblance est présentée dans les Tableau 17, Tableau 18, Tableau 19 et Tableau 20.

Sur la base des critères d'appréciation de Kappa de Landis and Koch (1977) et Streiner and Norman (2003), les évaluations de classification sont bonnes à très bonnes. Les estimations des superficies irriguées sont présentées dans le Tableau 21. Les réductions importantes des superficies irriguées observées en 2000 suggèrent une anomalie. La valeur obtenue en 2000 représente 80% de celle obtenue en 1988. Ce résultat contredit l'hypothèse selon laquelle les zones agricoles irriguées sont en expansion en raison de la forte pression foncière.

Tableau 17. Évaluation de la précision de la classification de l'image Landsat-4 TM du 05 mai 1988, avant post-traitement (valeurs en pourcentage)

Class	Irrigated crops	Pasture	Natural vegetation	Commission error	Omission error	Prod. accuracy	User accuracy
Irrigated crops	<b>92.06</b>	6.38	15.2	27.5	7.94	92.06	72.5
Pasture	3.17	<b>93.62</b>	0.8	6.38	6.38	93.62	93.62
Natural vegetation	4.76	0	<b>84</b>	2.78	16	84	97.22

Tableau 18. Évaluation de la précision de la classification de l'image Landsat-7 ETM+ du 20 avril 2000, avant post-traitement (valeurs en pourcentage)

Class	Irrigated crops	Pasture	Natural vegetation	Commission error	Omission error	Prod. accuracy	User accuracy
Irrigated crops	<b>97.37</b>	9.26	9.76	10.84	2.63	97.37	89.16
Pasture	2.63	<b>90.74</b>	2.44	5.77	9.26	90.74	94.23
Natural vegetation	0	0	<b>87.80</b>	0.00	12.20	87.80	100.00

Tableau 19. Évaluation de la précision de la classification de l'image Landsat-5 TM du 24 juin 2009, avant post-traitement (valeurs en pourcentage)

Class	Irrigated crops	Pasture	Natural vegetation	Commission error	Omission error	Prod. Accuracy	User accuracy
Irrigated crops	<b>81.55</b>	2.90	13.74	19.23	18.45	81.55	80.77
Pasture	0.97	<b>95.65</b>	3.05	7.04	4.35	95.65	92.96
Natural vegetation	17.48	1.45	<b>83.21</b>	14.84	16.79	83.21	85.16

Tableau 20. Évaluation des résultats des classifications avant le post-traitement

Images	Overall accuracy	Kappa	Agreement <sup>(*)</sup>
<b>Landsat-4 TM May, 05 1988</b>	0.881 ±0.044	0.81 ±0.06	Very good
<b>Landsat-7 ETM+ April, 20 2000</b>	0.930 ±0.041	0.89 ±0.05	Very good
<b>Landsat-5 TM June, 24 2009</b>	0.855 ±0.041	0.77 ±0.03	Good

<sup>(\*)</sup> According to Landis and Koch (1977) and Streiner and Norman (2003)

Tableau 21. Estimation des superficies en cultures irriguées par la méthode du maximum de vraisemblance

Images	Areas (ha)
<b>Landsat-4 TM May 05, 1988</b>	346.5
<b>Landsat-7 ETM+ April 20, 2000</b>	275.49
<b>Landsat-5 TM June 24, 2009</b>	500.76

Parmi les sources d'erreur qui ont pu influencer les résultats de la classification de l'image Landsat-7 ETM+ du 20 avril 2000, pourraient figurer des erreurs d'échantillonnage au niveau des zones d'entraînement. L'échantillonnage des zones d'entraînement pour cette image (et pour l'image Landsat-4 TM de 1988) a été faite en combinant l'interprétation visuelle, la connaissance du terrain et les informations complémentaires collectées auprès des producteurs. En dépit de ces informations sur l'occupation du sol et des précautions prises, une telle approche montre clairement des limites. Mais dans le contexte de l'étude, il n'y avait pas de meilleure façon d'évaluer l'occupation du sol d'il y a 9 ou 21 années plus tôt.

Cette anomalie détectée dans la classification de l'image de l'année 2000, jette le doute sur les résultats des classifications "indépendantes" basées sur une seule image. Les évaluations mêmes positives de la classification de l'image ne garantissent pas l'exactitude de l'affectation de chaque pixel à sa classe.

Il est alors important d'évaluer les potentielles erreurs de classification dans l'évolution dans le temps de chaque pixel par une analyse de détection du changement et de correction de trajectoire de pixels au cours de la phase de post-traitement.

L'analyse de détection de changement a donné un aperçu des différents types de trajectoires observées dans l'état des pixels de 1988 à 2009 (voir Tableau 22). Au total 25 des 27 (3<sup>3</sup>) trajectoires possibles (trois images et trois types de changement) ont été observées. Le Tableau 23 présente ces 25 trajectoires ainsi que le nombre de pixels concerné pour chacune des trajectoires.

Tableau 22. Types de trajectoire temporelle des pixels pour les 3 images, ainsi que les corrections proposées

No	Trajectories	Corrected trajectories	No.	Trajectories	Corrected trajectories
<b>1</b>	1 > 2 > 1	1 > 1 > 1	<b>15</b>	2 > 1 > 1	-
<b>2</b>	1 > 1 > 1	-	<b>16</b>	2 > 1 > 2	2 > 2 > 2
<b>3</b>	1 > 1 > 2	1 > 1 > 1	<b>17</b>	2 > 1 > 3	2 > 1 > 1
<b>4</b>	1 > 2 > 2	2 > 2 > 2	<b>18</b>	2 > 3 > 3	3 > 3 > 3
<b>5</b>	1 > 2 > 3	1 > 1 > 1	<b>19</b>	3 > 2 > 1	-
<b>6</b>	1 > 3 > 1	1 > 1 > 1	<b>20</b>	3 > 2 > 3	3 > 3 > 3
<b>7</b>	1 > 1 > 3	1 > 1 > 1	<b>21</b>	3 > 1 > 2	3 > 1 > 1
<b>8</b>	1 > 3 > 3	3 > 3 > 3	<b>22</b>	3 > 1 > 1	-
<b>9</b>	1 > 3 > 2	1 > 1 > 1	<b>23</b>	3 > 1 > 3	3 > 3 > 3
<b>10</b>	2 > 2 > 1	-	<b>24</b>	3 > 3 > 1	-
<b>11</b>	2 > 2 > 2	-	<b>25</b>	3 > 3 > 3	-
<b>12</b>	2 > 2 > 3	2 > 2 > 2	<b>26</b>	3 > 2 > 2	-
<b>13</b>	2 > 3 > 1	2 > 1 > 1	<b>27</b>	3 > 3 > 2	-
<b>14</b>	2 > 3 > 2	2 > 2 > 2			

1: irrigated crops; 2: pasture lands; 3: natural vegetation

Tableau 23. Trajectoires observées et nombre de pixels concernés

Trajectoires	Nbr. of pixels	Percentage
2 > 3 > 1	3806	22.89
1 > 3 > 1	3504	21.07
1 > 1 > 1	2333	14.03
1 > 1 > 2	1216	7.31
2 > 3 > 2	1042	6.27
2 > 1 > 1	1002	6.03
1 > 3 > 2	897	5.39
1 > 1 > 3	413	2.48
3 > 1 > 1	399	2.40
2 > 1 > 2	385	2.32
3 > 2 > 1	371	2.23
3 > 1 > 2	206	1.24
1 > 3 > 3	194	1.17
2 > 3 > 3	175	1.05
3 > 3 > 1	171	1.03
3 > 2 > 2	148	0.89
2 > 1 > 3	119	0.72
3 > 1 > 3	89	0.54
3 > 2 > 3	67	0.40
3 > 3 > 2	31	0.19
1 > 2 > 1	19	0.11
1 > 2 > 2	18	0.11
1 > 2 > 3	17	0.10
2 > 2 > 1	4	0.02
3 > 3 > 3	4	0.02
<b>Total</b>	<b>16630</b>	<b>100.00</b>

La méthode de correction des anomalies dans les séries temporelles des pixels s'est basée sur tous les états que peuvent prendre un pixel donné au cours du temps (avant et arrière). La vérification de l'état d'un pixel implique la comparaison de son état avec ses autres états pris au cours du temps. Cette approche a l'avantage de détecter et de corriger les anomalies en amont et en aval de la série. Les évaluations des traitements effectués en phase de post-classification sont présentées dans les Tableau 24, Tableau 25, et Tableau 26. Pour chacune des trois images, la post-classification a résulté en une amélioration significative de la précision globale et des coefficients Kappa (voir le Tableau 27).

Le post-traitement a permis l'amélioration de l'estimation des superficies et rendu les résultats des classifications beaucoup plus réalistes (et donc plus conforme à la réalité du terrain). Le Tableau 28 montre que plus de corrections ont été nécessaires pour les images de 2000 et de 2009 par rapport à celle de 1988, la plus ancienne de la série. Les illustrations de classifications corrigées sont présentées sur les Figure 30, Figure 31, et Figure 32. La Figure 33 présente les zones ayant subi un changement entre 1988 et 2009.

La superficie irriguée ont augmenté de 242 ha entre mai 1988 et juin 2009, soit une augmentation de près de 72%. L'évolution de la superficie irriguée semble avoir été considérable après le début des années 2000.

Tableau 24. Évaluation de la précision de la classification de l'image Landsat-4 TM du 05 mai 1988, après post-traitement (valeurs en pourcentage)

Class	Irrigated crops	Pasture	Natural vegetation	Commission error	Omission error	Prod. accuracy	User accuracy
Irrigated crops	<b>100</b>	1.80	3.51	4.26	0.00	100.00	95.74
Pasture	0	<b>98.20</b>	0	0.00	1.80	98.20	100.00
Natural vegetation	0	0	<b>96.49</b>	0.00	3.51	96.49	100.00

Tableau 25. Évaluation de la précision de la classification de l'image Landsat-7 ETM+ du 20 avril 2000, après post-traitement (valeurs en pourcentage)

Class	Irrigated crops	Pasture	Natural vegetation	Commission error	Omission error	Prod. accuracy	User accuracy
Irrigated crops	<b>94.64</b>	1.02	11.11	4.50	5.36	94.64	95.50
Pasture	5.36	<b>98.98</b>	2.78	6.73	1.02	98.98	93.27
Natural vegetation	0	0	<b>86.11</b>	0.00	13.89	86.11	100.00

Tableau 26. Évaluation de la précision de la classification de l'image Landsat-5 TM du 24 juin 2009, après post-traitement (valeurs en pourcentage)

Class	Irrigated crops	Pasture	Natural vegetation	Commission error	Omission error	Prod. Accuracy	User accuracy
Irrigated crops	<b>98.57</b>	1.16	0	0.36	1.43	98.57	99.64
Pasture	1.07	<b>98.84</b>	3.85	4.49	1.16	98.84	95.51
Natural vegetation	0.36	0	<b>96.15</b>	3.85	3.85	96.15	96.15

Tableau 27. Évaluation des résultats des classifications après le post-traitement

Images	Overall accuracy	Kappa	Agreement <sup>(*)</sup>
Landsat-4 TM May, 05 1988	0.984 ±0.017	0.97 ±0.05	Very good
Landsat-7 ETM+ April, 20 2000	0.951 ±0.029	0.92 ±0.05	Very good
Landsat-5 TM June, 24 2009	0.985 ±0.013	0.96 ±0.04	Very good

<sup>(\*)</sup> According to Landis and Koch (1977) and Streiner and Norman (2003)

Tableau 28. Estimation des superficies en cultures irriguées après post-traitement

Images	Areas (ha)	Percentage of area corrected
Landsat-4 TM May 05, 1988	335.70	-3%
Landsat-7 ETM+ April 20, 2000	358.92	30%
Landsat-5 TM June 24, 2009	578.43	15%

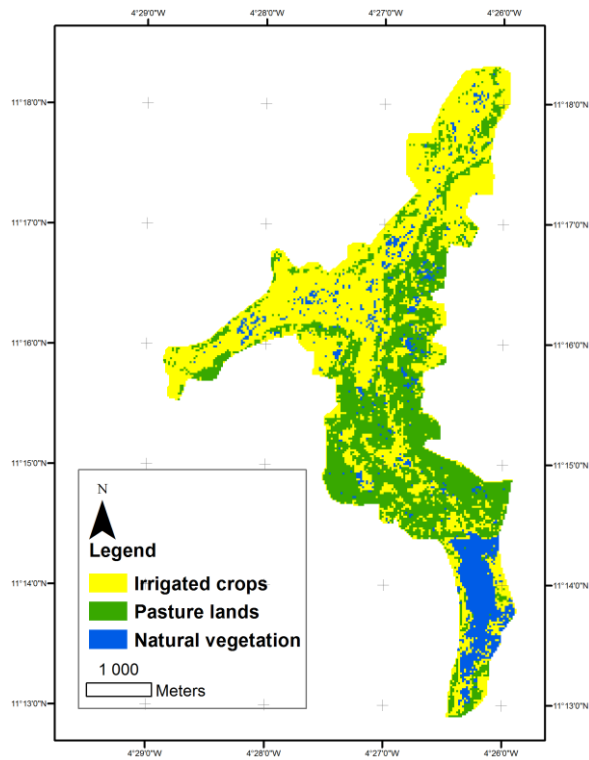


Figure 30. Résultat de la correction de la classification de l'image Landsat-4 TM du 05 mai 1988

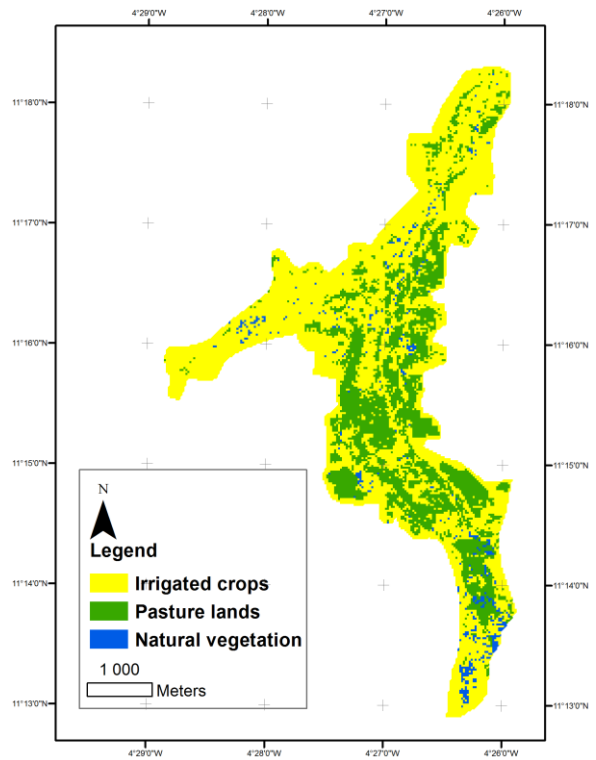


Figure 31. Résultat de la correction de la classification de l'image Landsat-7 ETM+ du 20 avril 2000

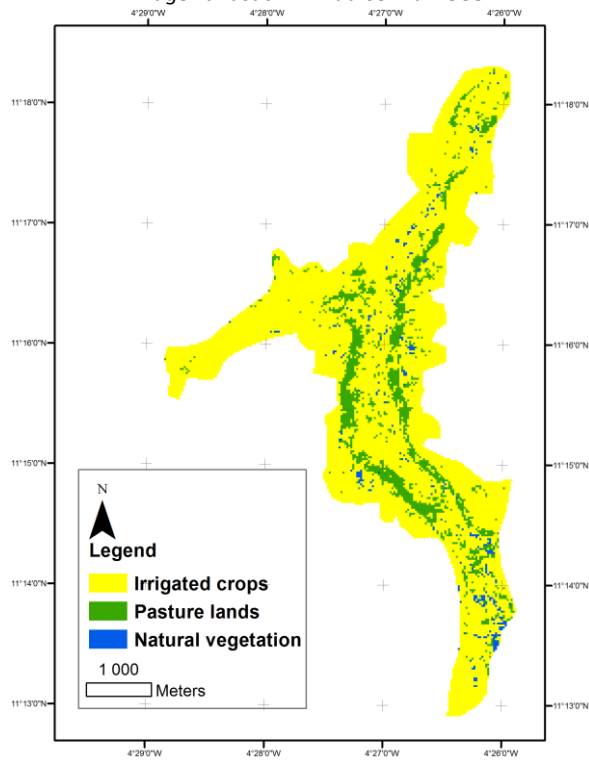


Figure 32. Résultat de la correction de la classification de l'image Landsat-5 TM du 24 juin 2009

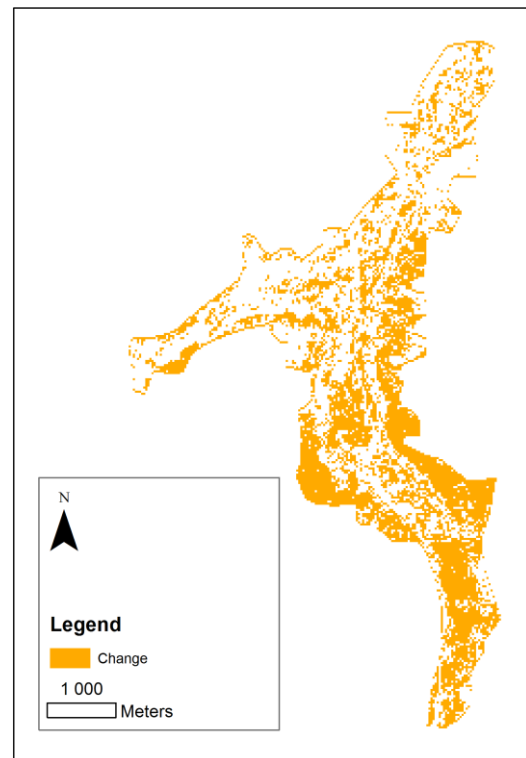


Figure 33. Carte des zones touchées par le changement

Tel que rapporté par Ouédraogo (2010), et tel que l'atteste la Figure 33 ci-dessus, la plupart des terres de parcours converties en terres cultivées irriguées étaient situées au sein de l'UAT de Bana, qui a connu un afflux de migrants à la recherche de nouvelles terres de cultures, au cours des

années 2000. Ces migrants sont arrivés de régions où l'accès à l'eau pour l'irrigation était difficile. La baisse des coûts (intervenue depuis le début des années 2000) du matériel agricole (pompes), et la popularité de certaines cultures à forte marge brute (banane) pourrait également expliquer l'exploitation croissante des ressources en eau dans la région et la mise en culture de terres initialement non agricoles.

#### **5.2.4 Conclusion**

Au terme de cette étude sur le suivi de l'évolution des superficies en culture irriguées au sein de la zone d'étude, il ressort que l'approche basée uniquement sur la classification des images en utilisant le maximum de vraisemblance a montré une efficacité limitée due notamment au type de parcellaire (morcelé) et aux chevauchements entre les signatures spectrales entre les classes de végétation (voir Figure 29) et aussi au sein de ces classes. Le post-traitement basé sur une analyse de détection des changements utilisant des trajectoires logiques de changements dans l'utilisation du sol, a sensiblement amélioré l'estimation des superficies irriguées. Les précisions des classifications sont passées de 85-92% à 95-98%. Le pourcentage de la superficie corrigée est compris entre 3 à 15%.

Cette approche doit être vérifiée dans d'autres contextes similaires afin d'être validée. Si toutefois elle l'était, elle permettrait de récupérer des informations sur l'occupation passée dans les zones irriguées où il existe peu d'information cartographique. Cette méthode de recherche de l'information pourrait s'avérer particulièrement utile dans les pays en développement où le manque d'information est un obstacle majeur à la gestion efficace des ressources naturelles. Elle est également adaptée aux pays en voie de développement dans la mesure où elle implique un processus à faible coût et facile à mettre en œuvre afin de gérer l'expansion des terres en cultures irriguées.

Les conclusions de cette étude sur l'évolution des terres agricoles irriguées le long de la rivière Kou confirment l'hypothèse selon laquelle l'agriculture irriguée est en pleine expansion. L'étude a montré que les superficies irriguées ont augmenté de près de 70% en 20 ans, en particulier au cours des 10 dernières années. Cette évolution rapide a probablement augmenté l'utilisation des ressources en eau, ce qui conduira à des conflits entre les utilisateurs si le déficit en eau d'irrigation en aval venait à croître.

## Chapitre 6. Caractérisation agro-socio-économique de la zone

### 6.1 Typologie des systèmes de production

Faire une étude sur la typologie des systèmes de production des producteurs pour un site donné revient à prendre en compte un certain nombre de facteurs qui peuvent varier d'un endroit à l'autre, en fonction de leur relative pertinence. C'est cette variabilité dans la prise en compte des facteurs caractérisant le système de production qui fait dire à Bonnefond et al. (1988) que : *"le système de production n'est pas visible, il n'a pas d'existence objective, il est construit par un observateur à partir d'un ensemble de données sélectionnées et reliées les unes aux autres"*.

Fillonneau (1981), définit le système de production en ces termes : *"un système de production, c'est une organisation des ressources pour produire"*. Le système de production se caractérise alors par les voies et moyens employés, les niveaux de production atteints et l'assolement (Couty, 1987). Kanté 2001, subdivise le système de production en 3 sous systèmes, à savoir les ressources en terre, les caractéristiques des exploitations et le système de culture.

Le système de culture selon Bonnefond et al. (1988), fait référence à une surface traitée de manière homogène en ce qui concerne les itinéraires techniques et les successions culturales. Ainsi le système de culture est caractérisé par la nature des espèces cultivées, la répartition des cultures dans l'espace et dans le temps, les techniques appliquées aux cultures et les niveaux de production atteints (Couty, 1987). Pieri (1989), propose une classification des systèmes de culture au sud du Sahara en : systèmes de culture manuels à faible intensification ; systèmes de culture manuels intensifiés ; systèmes de culture mécanisés à traction animale. Les systèmes de culture étant une composante du système de production, il ressort alors la possibilité pour un système de production d'en posséder plusieurs.

L'étude de la typologie des systèmes de production des producteurs de la zone agricole irriguée de Nasso-Diaradougou a pour but la constitution de classes de producteurs afin de rendre plus lisibles les données socioéconomiques recueillies sur la zone, et rendre plus commode la modélisation de leur comportement au sein d'un système multi-agents.

D'après un recensement effectué en 2007 (Wellens et al., 2007), le nombre de producteurs sur le site était estimé à 1 148. En raison des contraintes budgétaires et de temps, l'enquête socio-économique n'a concerné qu'un échantillon représentatif de 117 producteurs. Le tirage des 117 producteurs s'est fait suivant un échantillonnage aléatoire stratifié, la strate étant représentée par l'UAT d'appartenance du producteur. La superficie occupée par les 117 producteurs représente 24% de l'ensemble de la zone d'étude.

D'après la classification publiée par Frenken (2005), la zone d'étude serait de type 5, à savoir une *zone d'irrigation dite informelle et privée*. Ce type concerne les zones irriguées situées généralement au bord des zones de rivières pérennes et de haute nappe.

Peu d'études générales existent sur les systèmes de culture dans la région. A défaut, on note des études spécifiques telles que la caractérisation des cultures de maïs pluvial dans l'ouest du Burkina Faso, faite par Segda (1994). Cette étude traite de la culture du maïs pluvial, plutôt que du maïs irrigué. Toutefois, elle fournit des indications intéressantes pouvant être prises en compte dans le cadre de la présente étude. Ainsi, d'après Segda (1994), dans l'ouest du Burkina Faso, la pratique des rotations culturales seraient encore méconnue de la plupart des exploitants ; la pratique de la fertilisation organique serait aléatoire et peu courante.

### 6.1.1 Présentation des données socio-économiques

Dans cette section seront présentés les résultats des enquêtes socio-économiques menées sur la zone d'étude en avril 2010. L'enquête a été supervisée par le projet GEeau et réalisée par M. Mathieu Ouédraogo, spécialiste en agro-socio-économie.

Les enquêtes ont consisté en l'administration d'un questionnaire aux 117 producteurs sélectionnés. Il n'y a eu qu'un seul passage par producteur au cours des enquêtes, ce qui induit un risque d'erreur quant à l'impossibilité de la vérification de la véracité de certaines de leurs déclarations.

Les résultats exhaustifs des enquêtes figurent dans le document de Ouédraogo (2010). Dans les sous-sections suivantes seront présentées les parties présentant un grand intérêt pour l'étude. Pour chaque producteur enquêté, ces parties concernent :

- Le capital foncier
- Les moyens d'équipement
- Les pratiques paysannes
- Le compte d'exploitation
- La gestion de l'irrigation

#### 6.1.1.1 Capital foncier des producteurs

##### 6.1.1.1.1 Nombre de champs et superficie des exploitations

###### a. Le nombre de champs

Le nombre de champs détenus par chaque producteur varie de 1 à 4 au maximum. Environ 38% des producteurs ne disposent que d'un seul champ. Les producteurs ayant plus d'un seul champ représentent 62% de l'échantillon avec 47% des producteurs qui ont deux champs, 12 % ont trois champs et seulement 3% ont quatre champs.

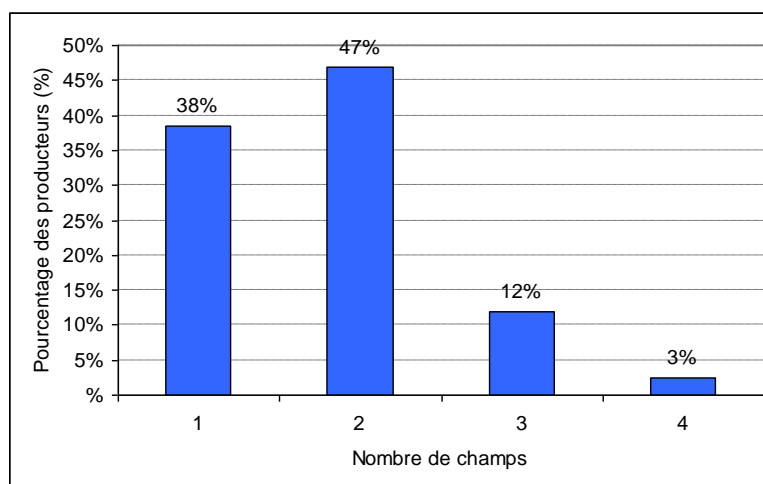


Figure 34. Distribution des producteurs en fonction du nombre de champ (d'après Ouédraogo, 2010)

###### b. Les superficies cultivées

Les superficies cultivées par les producteurs sont relativement faibles. En effet, la superficie totale moyenne par producteur est de 1.54 ha avec un minimum de 0.25 ha et un maximum de 11 ha. Il existe une variabilité des exploitations en termes de superficie. L'écart-type observé est de 1.72 ha. Environ 34% des producteurs ont moins de 1 ha et 38% ont entre 1 et 2 ha de superficie. Seulement

3% ont plus de 5 ha. Les superficies cultivées sont plus importantes à Diaradougou avec une moyenne de 2.82 ha contre seulement 0.82 ha à Sambla-Toukoro.

Tableau 29. Superficies moyennes (en ha) des exploitations (d'après Ouédraogo, 2010)

UAT	N	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
Bana	58	1.28	0.803	0.25	4.00
Diaradougou	29	2.82	2.867	0.25	11.00
Sambla-Toukoro	30	0.82	0.500	0.25	2.50
Total	117	1.54	1.721	0.25	11.00

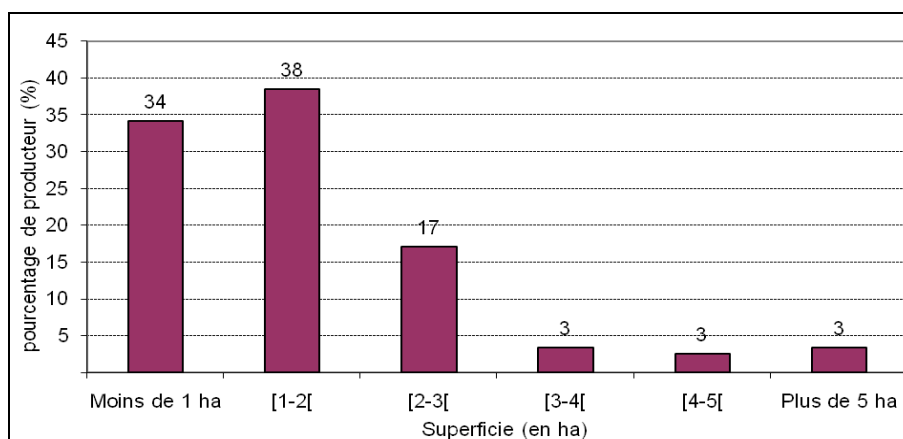


Figure 35. Distribution des producteurs en fonction de la superficie totale (d'après Ouédraogo, 2010)

#### 6.1.1.1.2 Type de propriété et mode d'acquisition des champs

La majorité des producteurs dispose de champs individuels. Seulement 7.2% des champs des producteurs de l'échantillon sont collectifs.

Les principaux modes d'acquisition des champs sont l'héritage qui représente 73.9% des champs, les dons (16.4%) et la location (6.3%). Les ventes ne concernent que seulement 1.9% des champs.

Tableau 30 : Types de propriété des champs (d'après Ouédraogo, 2010)

Mode de tenure	Statistiques	UAT			Total
		Bana	Diaradougou	Sambla-Toukoro	
Propriété individuelle	N	87	54	51	192
	%	92.6	88.5	98.1	92.8
Propriété collective ou communautaire	N	7	7	1	15
	%	7.4	11.5	1.9	7.2
<b>Total</b>	N	94	61	52	207

Tableau 31 : Mode d'acquisition des champs (d'après Ouédraogo, 2010)

Mode d'acquisition des champs	Statistiques	UAT			Total
		Bana	Diaradougou	Sambla-Toukoro	
Héritage	N	53	51	49	153
	%	56.4	83.6	94.2	73.9
Achat	N	2	0	2	4
	%	2.1	0	3.8	1.9
Location	N	4	8	1	13
	%	4.3	13.1	1.9	6.3
Prêt/cession temporaire	N	1	0	0	1
	%	1.1	0	0	0.5
Cession définitive (don)	N	32	2	0	34
	%	34.0	3.3	0	16.4
Propriété communautaire	N	2	0	0	2
	%	2.1	0	0	1
Total	N	94	61	52	207

### 6.1.1.1.3 Qualité des champs

La qualité des champs peut être appréciée à partir de la fertilité des terres et de leur emplacement par rapport à la source d'eau. En effet, la fertilité des sols et l'eau constituent les deux facteurs biophysiques fondamentaux pour la production agricole sur les sites irrigués.

#### a. Position des champs par rapport à la rivière

Tous les champs des producteurs enquêtés sont situés en amont de la prise d'eau de Diaradougou<sup>25</sup>. Ces champs sont répartis entre la rive gauche du Kou pour 69.1% d'entre eux et la rive droite pour 30.9%.

Tableau 32 : Position des parcelles par rapport à la prise d'eau (d'après Ouédraogo, 2010)

Position par rapport à la prise d'eau	Statistiques	UAT			Total
		Bana	Diaradougou	Sambla-Toukoro	
En amont de la prise d'eau, rive gauche	N	65	40	38	143
	%	69.1	65.6	73.1	69.1
En amont de la prise d'eau, rive droite	N	29	21	14	64
	%	30.9	34.4	26.9	30.9
Nombre de champ	Total	94	61	52	207

#### b. Distance des champs à la rivière

La distance moyenne des champs par rapport à la rivière Kou est de 350 m et varie entre 3 et 3 000 m. Dans les cas de producteurs possédant plusieurs champs, la moyenne des distances des champs les plus proches de la source d'eau est de 281 m tandis que la moyenne des distances des champs les plus éloignées est de 411 m. La proximité des champs par rapport à la source n'est pas sans conséquence sur les ressources en eau. Les problèmes d'ensablement du cours d'eau peuvent se produire suite à l'érosion des terres de cultures. De même des problèmes de pollution de l'eau peuvent se produire suite aux dépôts des résidus d'engrais et de pesticides dans les eaux.

<sup>25</sup> Canal en béton détournant les eaux du Kou en aval de Diaradougou, vers le périmètre rizicole de Bama.

Tableau 33 : Nombre de champs et distance par rapport à la rivière Kou (d'après Ouédraogo, 2010)

UAT	Statistiques	Distance du champ le plus proche de la rivière Kou (m)	Distance du champ le plus éloigné de la rivière Kou (m)	Distance moyenne des champs par rapport à la rivière Kou (m)
<b>Bana</b>	Moyenne	313	438	389
	Fréquence	58	58	94
	Ecart-type	588	609	586
	Minimum	3	5	3
	Maximum	3000	3000	3000
	<b>Médiane</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>Diaradougou</b>	Moyenne	182	324	266
	Fréquence	29	29	61
	Ecart-type	219	274	258
	Minimum	5	5	5
	Maximum	600	700	700
	<b>Médiane</b>	<b>50</b>	<b>300</b>	<b>100</b>
<b>Sambla-Toukoro</b>	Moyenne	315	445	376
	Fréquence	30	30	52
	Ecart-type	329	482	418
	Minimum	6	6	6
	Maximum	1000	2000	2000
	<b>Médiane</b>	<b>110</b>	<b>350</b>	<b>200</b>
<b>Total</b>	Moyenne	281	411	350
	Fréquence	117	117	207
	Ecart-type	460	511	470
	Minimum	3	5	3
	Maximum	3000	3000	3000
	<b>Médiane</b>	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>100</b>

c. *Fertilité des terres*

La fertilité des terres a été caractérisée à travers la perception des producteurs. Ces derniers estiment que les sols sont riches à très riches. Environ 76% des champs sont perçus par les producteurs comme étant riches et 20% comme étant très riches.

Tableau 34 : Appréciation de la fertilité des champs (d'après Ouédraogo, 2010)

Fertilité des champs	Statistiques	UAT			Total
		Bana	Diaradougou	Sambla-Toukoro	
<b>Très riche</b>	N	10	4	27	41
	%	10.6	6.6	52.9	19.9
<b>Riche</b>	N	80	53	24	157
	%	85.1	86.9	47.1	76.2
<b>Moyennement riche</b>	N	4	3	0	7
	%	4.3	4.9	0	3.4
<b>Pauvre</b>	N	0	1	0	1
	%	0	1.6	0	0.5
<b>Total</b>	N	94	61	51	206

### 6.1.1.2 Niveau d'équipement des exploitations

#### 6.1.1.2.1 Infrastructures et équipements d'irrigation

L'enquête montre que 65.2% des producteurs possèdent au moins une motopompe. Le taux d'équipement en motopompe est plus élevé à Diaradougou (89.3%) et à Bana (66.7%) qu'à Sambla-Toukoro (40%).

Les principales raisons d'équipement en motopompe sont la facilité d'irrigation et l'autonomie dans la pratique de l'irrigation. Les motopompes sont relativement d'acquisition récente. En effet, 85.5% des producteurs ont une motopompe d'âge inférieur à 5 ans contre 14.5% qui ont une motopompe de plus de 9 ans.

L'enquête montre que 46% des producteurs possèdent au moins un puisard. Le taux d'équipement en puisard est plus élevé à Diaradougou (66.7%) et à Bana (55.4%) qu'à Sambla-Toukoro (10%).

Les principales raisons d'équipement en puisard sont le fait d'avoir l'eau en permanence dans les champs, l'autonomie et la facilité de l'irrigation. Contrairement aux motopompes, les puisards sont relativement d'acquisition plus ancienne. Seulement 35.3% des producteurs ont un puisard d'âge inférieur à 5 ans contre 41.2% qui ont un puisard de 5 à 9 ans et 23.5% ont un puisard de plus de 9 ans.

Tableau 35 : Taux d'équipement des producteurs en puisards et en motopompes (d'après Ouédraogo, 2010)

Type d'équipement	Statistiques	UAT			Total
		Bana	Diaradougou	Sambla-Toukoro	
Motopompes	N	38	25	12	75
	%	66.7	89.3	40	65.2
Puisard	N	31	18	3	52
	%	55.4	66.7	10	46

Tableau 36 : Répartition des producteurs selon l'âge des puisards et des motopompes (d'après Ouédraogo, 2010)

Age	Statistiques	Puisard	Motopompe
Moins de 5 ans	N	18	53
	%	35.3	85.5
5 à 9 ans	N	21	0
	%	41.2	0
Plus de 9 ans	N	12	9
	%	23.5	14.5
Total	N	51	62

#### 6.1.1.2.2 Equipement et matériels agricoles

L'enquête a montré que les producteurs ont un faible niveau d'équipement. Le taux d'équipement est de 29.9% pour les charrues, 28.2% pour les bœufs de trait, 27.4% pour les charrettes, 26.5% pour les appareils de traitement phytosanitaire. Le taux d'équipement en outils est plus élevé (100% pour la daba<sup>26</sup>, 72.6% pour les faucilles, etc.)

<sup>26</sup> Houe à fer large en pointe et à manche court

Tableau 37 : Taux d'équipement en matériels agricoles (d'après Ouédraogo, 2010)

Type d'équipement	Bana		Diaradougou		Sambla-Toukoro		Total	
	N	%	N	%	N	%	N	%
<b>Charrue</b>	13	22.4	15	51.7	7	23.3	35	29.9
<b>Motoculteur</b>	1	1.7	0	0	0	0	1	0.9
<b>Charrette</b>	13	22.4	12	41.4	7	23.3	32	27.4
<b>Appareil de traitement phytosanitaire</b>	13	22.4	17	58.6	1	3.3	31	26.5
<b>Tracteur</b>	1	1.7	1	3.4	0	0	2	1.7
<b>Pulvériseur</b>	0	0	4	13.8	0	0	4	3.4
<b>Herse</b>	3	5.2	4	13.8	1	3.3	8	6.8
<b>Bœuf de labour</b>	16	27.6	10	34.5	7	23.3	33	28.2
<b>Ane</b>	6	10.3	8	27.6	7	23.3	21	17.9
<b>Houe</b>	3	5.2	3	10.3	0	0	6	5.1
<b>Daba</b>	58	100	29	100	30	100	117	100
<b>Machette/coupe-coupe</b>	52	89.7	28	96.6	27	90	107	91.5
<b>Couteaux</b>	42	72.4	26	89.7	28	93.3	96	82.1
<b>Hache</b>	46	79.3	19	65.5	29	96.7	94	80.3
<b>Binette</b>	5	8.6	4	13.8	2	6.7	11	9.4
<b>Faucille</b>	42	72.4	21	72.4	22	73.3	85	72.6
<b>Râteau</b>	17	29.3	9	31.0	1	3.3	27	23.1
<b>Pelle</b>	30	51.7	19	65.5	20	66.7	69	59
<b>Brouette</b>	6	10.3	9	31.0	1	3.3	16	13.7
<b>Arrosoir</b>	38	66.7	20	69.0	9	30.0	67	57.8
<b>Pioche</b>	27	46.6	15	51.7	13	43.3	55	47.0

### 6.1.1.3 Les pratiques agricoles paysannes

#### 6.1.1.3.1 Systèmes de culture

Les producteurs pratiquent plusieurs systèmes de culture. Environ 73% des producteurs font de la monoculture et 27% pratiquent l'association de culture. Le nombre de cultures associées varie entre 2 et 4. Environ 24% des producteurs pratiquent l'association de deux cultures, 2.6% l'association de 3 cultures et 0.9% l'association de 4 cultures.

Les spéculations pratiquées en culture principale par l'échantillon d'étude sont surtout le maïs et la banane qui représentent respectivement 54% et 29.2% des parcelles. Le gombo (*Abelmoschus esculentus*) représente 8.6% des parcelles, le chou (4.5%), l'oignon (3.5%), le riz (2%), l'arachide (2%). Les autres cultures (papaye, patate, aubergine, poivron, carotte et tomate) ne représentent chacune que moins de 2% des parcelles, en termes de culture principale. Cependant ces cultures ont une grande fréquence comme culture associée.

En termes de superficie couverte, ce sont également le maïs et la banane qui occupent les plus grandes soles avec respectivement un total de 87 ha et de 62 ha au niveau de l'échantillon. Ce qui correspond respectivement à 50% et 35% des superficies totales emblavées par l'échantillon d'étude. Les superficies moyennes emblavées par spéculation en culture principale sont de 1.63 ha pour la banane, de 0.81 ha pour le maïs, 0.92 ha pour le chou et de 0.34 ha pour le gombo.

Tableau 38 : Superficie par culture principale en saison sèche 2009 (d'après Ouédraogo, 2010)

Culture	Moyenne	Maximum	Minimum	Superficie totale (ha)	Pourcentage (%)	Fréquence N
Riz	0.69	1.25	0.50	2.75	2	4
Maïs	0.81	7.00	0.25	87.00	54	107
Arachide	0.44	0.50	0.25	1.75	2	4
Niébé	1.00	1.00	1.00	1.00	0.5	1
Carotte	0.50	0.50	0.50	0.50	0.5	1
Patate	0.38	0.50	0.25	0.75	1	2
Tomate	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	1
Oignon	0.36	0.50	0.25	2.50	3.5	7
Chou	0.92	2.00	0.25	8.25	4.5	9
Gombo	0.34	0.75	0.25	5.75	8.6	17
Aubergine	0.58	0.75	0.50	1.75	1.5	3
Poivron	0.38	0.50	0.25	0.75	1	2
Banane	1.63	7.00	0.25	62.00	19.2	38
Papaye	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	1
Autres	0.25	0.25	0.25	0.25	0.5	1
<b>Total</b>	<b>0.89</b>	<b>7.00</b>	<b>0.25</b>	<b>175.50</b>	<b>100</b>	<b>198</b>

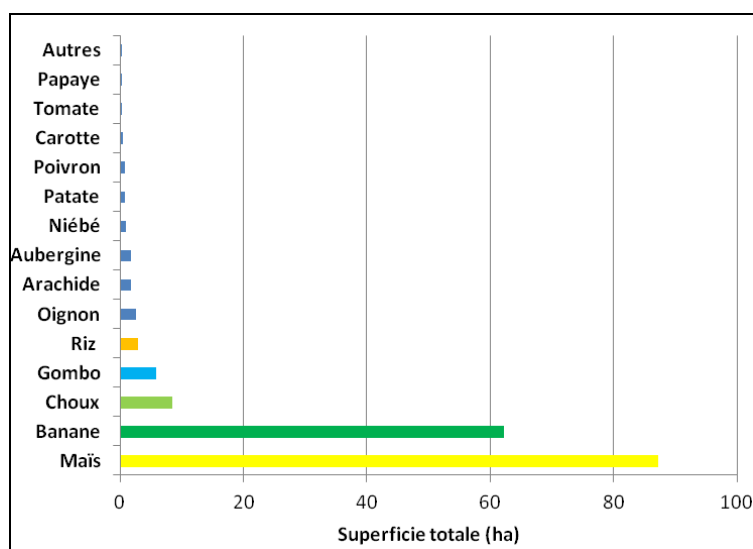


Figure 36 : Importance des cultures principales en saison sèche 2010 (ha)

### 6.1.1.3.2 Utilisation de la main d'œuvre

La principale source de main d'œuvre dans la production agricole demeure la main d'œuvre familiale. Cependant, on observe un fort recours à la main d'œuvre extérieure. Environ 53% des producteurs ont recours à la main d'œuvre extérieure et seulement 16% ont eu recours à des employés saisonniers. Le recours à la main d'œuvre extérieure est plus élevé à Diaradougou. Au niveau de Sambla-Toukoro, il n'a pas été noté la présence de main d'œuvre saisonnière salariée.

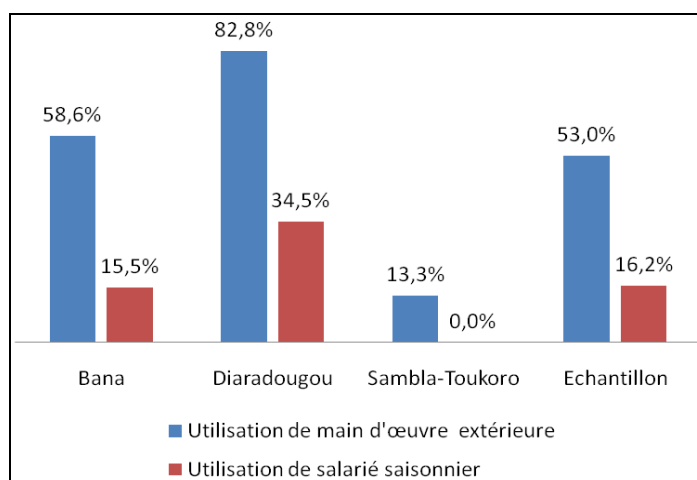


Figure 37 : Répartition des producteurs selon l'utilisation de la main œuvre extérieure (d'après Ouédraogo, 2010)

### 6.1.1.3.3 Utilisation des intrants agricoles

L'enquête montre que les producteurs utilisent plusieurs types d'intrants à des degrés divers. Les taux d'utilisation sont de 88% pour les engrais chimiques (NPK<sup>27</sup> et urée), de 30.6% pour la fumure organique, de 27% pour les herbicides et de 14.4% pour les autres pesticides.

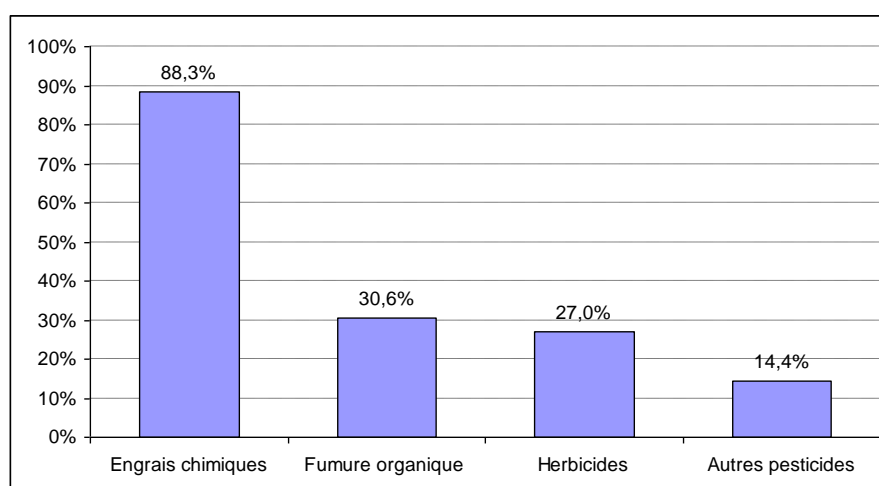


Figure 38 : Taux d'utilisation des intrants agricoles (d'après Ouédraogo, 2010)

### 6.1.1.3.4 Pratique d'irrigation

#### Mode d'exhaure

Plusieurs modes d'exhaure existent sur le site de production. Les modes d'exhaure les plus courants sont :

- **le mode prise en rivière directe.** Il consiste en une aspiration (directement dans la rivière) et un refoulement sur les parcelles à irriguer. Ce mode représente 43.6% de l'ensemble des différents modes d'exhaure.
- **le mode puisard canalisation.** Il consiste à creuser une canalisation partant de la rivière, vers un puisard à partir duquel les parcelles seront irriguées. Ce mode représente 16.2% de l'ensemble des différents modes d'exhaure.

<sup>27</sup> Engrais composé de 3 éléments : Azote (N), Phosphore (K) et Potassium (K)

- **le mode puisard nappe phréatique.** Il consiste à laisser remplir le puisard par les eaux de la nappe, peu profondes. Ce mode représente 11.1% de l'ensemble des modes d'exhaure.
- **le mode prise en rivière par canalisation.** Il consiste à prélever directement de l'eau en rivière via une canalisation creusée dans le sol, de la rivière vers les parcelles à irriguer. Dans ce mode, il n'existe pas de puisard ou bassin de stockage. Ce mode représente 8% de l'ensemble des modes d'exhaure.

On observe également des combinaisons de plusieurs modes d'exhaure par les producteurs. La combinaison la plus répandue est la (Prise en rivière directe + Puisard canalisation bassin) qui se rencontre chez 11.1% des producteurs.

Tableau 39 : Répartition des producteurs selon le mode d'exhaure (d'après Ouédraogo, 2010)

Mode d'exhaure	UAT			Total
	Bana	Diaradougou	Sambla-Toukoro	
Prise en rivière directe	N	21	6	24
	%	36.2	20.7	80
Prise en rivière directe + Prise en rivière par canalisation	N	0	2	3
	%	0	6.9	10.0
Prise en rivière directe + Puisard nappe phréatique	N	0	2	0
	%	0	6.9	0
Prise en rivière directe + Puisard canalisation	N	8	5	0
	%	13.8	17.2	0
Prise en rivière par canalisation	N	5	4	1
	%	8.6	13.8	3.3
Prise en rivière par canalisation + Puisard canalisation	N	1	0	0
	%	1.7	0	0
Puisard nappe phréatique	N	8	5	0
	%	13.8	17.2	0
Puisard canalisation	N	14	3	2
	%	24.1	10.3	6.7
Puisard canalisation + Puisard nappe phréatique	N	0	1	0
	%	0	3.4	0
Données manquantes	N	1	1	0
	%	1.7	3.4	0
Total	N	58	29	30
	%			117

#### 6.1.1.3.5 Accès au crédit

L'enquête a révélé un très faible accès au crédit pour soutenir la production agricole sur les sites de production. Seulement 2.6% des producteurs ont obtenus un crédit en nature pour soutenir leur production au cours de la campagne agricole de contre-saison 2010 contre 13.7% au cours de la campagne agricole de contre-saison 2009. Pour le crédit monétaire, ce sont 2.6% et 6% qui ont emprunté de l'argent pour soutenir leur production au cours des campagnes agricoles de contre-saison respectivement en 2010 et 2009.

#### 6.1.1.4 Compte d'exploitation

Rappelons que deux éléments sont nécessaires à l'établissement d'un compte d'exploitation. Il s'agit des produits bruts et des charges. Le produit brut se définit par la valeur de la production au prix de marché. Les charges d'exploitation correspondent à la valeur des dépenses ou des moyens de production utilisés dans le processus de production de l'exploitation, à l'exclusion de la main d'œuvre familiale. Le résultat d'exploitation est la différence entre les produits bruts et les charges totales. Un seul indicateur de résultats a été utilisé pour évaluer la rentabilité financière des exploitations et des cultures dans cette étude. Il s'agit de la marge brute qui correspond au produit

brut diminué des charges monétaires. Ces charges sont constituées des dépenses en intrants, de la main d'œuvre salariée et des autres charges (carburants et transport). La marge brute permet de rémunérer le travail familial, le capital d'exploitation et le capital foncier.

#### 6.1.1.4.1 Compte d'exploitation des producteurs

##### a. Produit brut d'exploitation

Le produit brut moyen par exploitation est de 2 175 euros (1 426 738 FCFA), soit respectivement de 1 485 euros (974 998 FCFA) à Bana, 5 475 euros (3 590 931 FCFA) à Diaradougou et 317 euros (208 049 FCFA) à Sambla-Toukoro.

##### b. Charges d'exploitation

Les dépenses d'exploitation sont constituées par le coût de la main d'œuvre, le coût des intrants agricoles et les autres coûts tels que ceux liées au carburant et aux transports des intrants et des produits. Les charges totales par exploitation sont évaluées à 1 093 euros (716 968 FCFA) en moyenne. Elles sont de 715 euros (468 847 FCFA) à Bana, de 2 820 euros (1 850 084 FCFA) à Diaradougou et de 154 euros (101 322 FCFA) à Sambla-Toukoro.

##### c. Résultat d'exploitation

Le compte d'exploitation fait ressortir une marge brute moyenne par exploitation de 1 082 euros (709 770 FCFA) soit 526 euros (345 068 FCFA) par hectare. La marge brute est plus élevée à Diaradougou que dans les deux autres UAT. Elle s'élève à 2 654 euros (1 740 847 FCFA) par exploitation soit 783 euros (513 844 FCFA) par ha. Les marges les plus faibles sont observées à Sambla-Toukoro avec une marge brute moyenne de 163 euros (106 727 FCFA) soit 184 euros (120 512 FCFA) par ha. La distribution de la marge brute montre que 14% des producteurs ont une marge brute négative. La moitié des producteurs a une marge brute inférieure à 381 euros (250 000 FCFA). Environ 15% des producteurs ont une marge brute supérieure à 1 500 euros (1 000 000 FCFA) par exploitation.

Tableau 40 : Compte d'exploitation en euros par exploitation et par UAT (d'après Ouédraogo, 2010)

Rubriques	Bana	Diaradougou	Sambla-Toukoro	Echantillon
<b>I- Produits</b>				
1.1. Superficie	1.28	2.82	0.82	1.54
1.2. Produit brut d'exploitation	1486.28	5473.98	317.15	2174.91
<b>II- Charges</b>				
2.1. Intrants				
2.1.1. Semence	67.75	212.05	13.54	92.38
2.1.2. Engrais chimiques	271.19	1007.57	82.09	456.29
2.1.3. Pesticides	19.05	55.42	5.06	28.85
2.1.4. Fumure organique	189.53	688.59	11.43	492.54
Sous-total coûts des intrants	360.88	1737.70	71.24	655.35
2.2. Main d'œuvre payée				
2.2.1. Main d'œuvre ponctuelle	48.67	102.01	43.29	68.40
2.2.2. Main d'œuvre saisonnière	242.54	500.30		378.20
Sous-total coût de la main d'œuvre	101.42	301.80	43.29	171.07
2.3. Autres coûts				
2.3.1. Frais de carburant	255.38	884.52	86.78	361.03
2.3.2. Frais de transport	355.47	146.23	5.46	212.10
Sous-total autres coûts	370.95	940.49	87.87	432.27
Coûts totaux	714.71	2820.25	154.45	1092.94
<b>III- Résultat d'exploitation</b>				
3.1. Marge brute d'exploitation	771.57	2653.73	162.69	1081.97
3.2. Marge brute d'exploitation par hectare	574.43	783.30	183.71	526.02

### 6.1.1.4.2 Compte d'exploitation des cultures

#### a. Produit d'exploitation

Les produits bruts les plus élevés sont obtenus avec la banane, le gombo et la carotte avec plus de 1 500 euros (1 000 000 FCFA) par ha. Les produits bruts les plus bas sont obtenus avec le maïs, l'oignon et le niébé avec moins de 450 euros (300 000 FCFA) par ha.

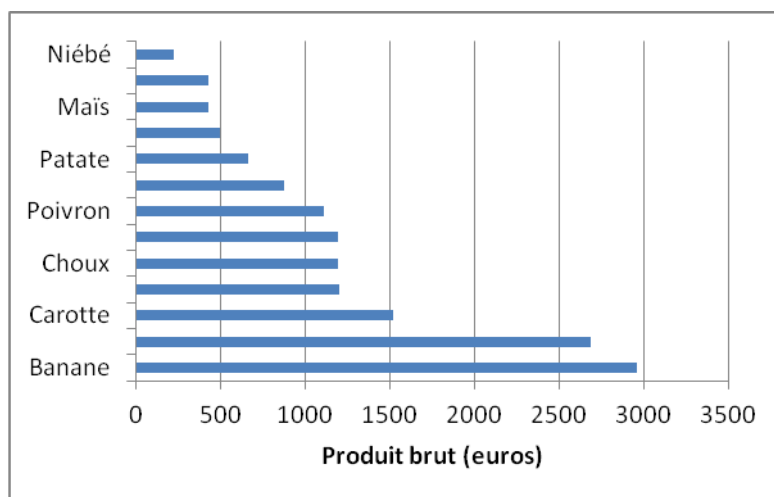


Figure 39 : Distribution des cultures en fonction du produit brut par hectare (euros/ha)

#### b. Charges d'exploitation

La banane et la tomate présentent les charges de production les plus élevées avec plus de 760 euros (500 000 FCFA) par ha. Les charges les moins élevées ont été obtenues avec les cultures d'oignon, de carotte, de riz et de niébé avec moins de 305 euros (200 000 FCFA) par ha.

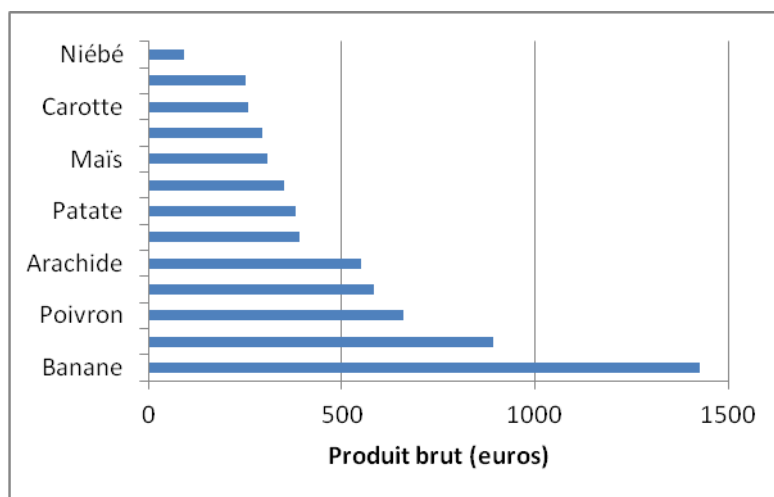


Figure 40 : Distribution des cultures en fonction des charges d'exploitation par hectare (euros/ha)

#### c. Résultat d'exploitation

Le résultat d'exploitation montre que le gombo et la banane présentent les marges brutes les plus élevées. Elles s'élèvent respectivement à 2 297 euros (1 506 613 FCFA) et 1534 euros (1 006 477 FCFA) pour ces deux cultures. Les cultures à faibles marges brutes sont le niébé, l'oignon et le maïs avec moins de 152 euros (100 000 FCFA) par ha. L'arachide présente une marge brute négative.

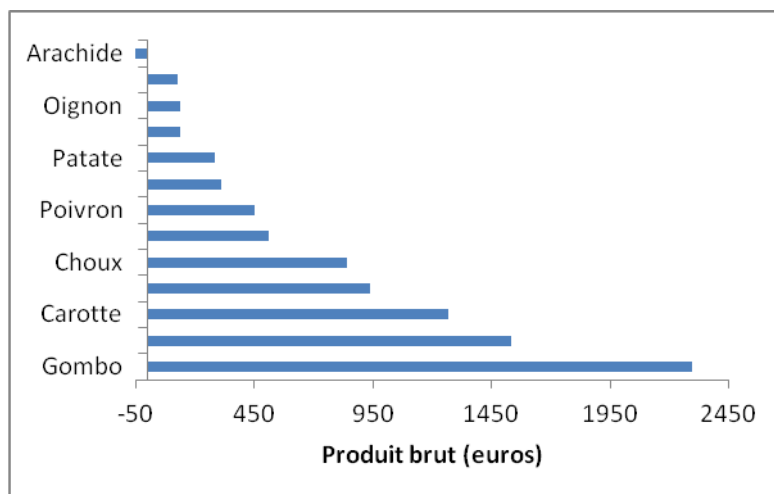


Figure 41 : Distribution des cultures en fonction de la marge brute par hectare (euros/ha)

Tableau 41 : Compte d'exploitation par culture et par ha (1/2) (modifié de Ouédraogo, 2010)

Culture	Gombo	Banane	Carotte	Riz	Choux	Aubergine	Poivron
<b>I- Produits (en euros)</b>							
Superficie	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha
Produit brut	2687.97	2960.07	1524.39	1192.14	1194.01	875.34	1109.76
<b>II- Charges (en euros)</b>							
Intrants agricoles							
- Semence	34.80	135.63	114.33	20.37	58.99	85.45	113.82
- NPK	103.54	292.37	97.56	81.49	74.82	136.18	174.80
- Urée	82.49	239.07	45.73	57.65	57.33	92.82	151.42
- Fumure organique		164.60			19.05		
- Herbicide	0.64	3.39		4.43	0.84		
- Autres pesticides	1.36	4.07		0.55	2.08		
Sous total intrant	222.83	839.12	257.62	164.50	213.13	314.45	440.04
Main d'œuvre (MO)							
- MO extérieure	23.73	15.89		66.45	18.84	25.41	11.18
Autres coûts							
- Carburant	132.55	393.80		17.18	88.54	204.78	208.33
- Transport	12.20	177.00		2.77	30.43	37.40	
Sous-total autres coûts	144.75	570.80		19.96	118.97	242.18	208.33
Cout total	391.31	1425.81	257.62	250.90	350.94	582.03	659.55
<b>III- Résultat d'exploitation (en euros)</b>							
- Marge brute	2296.67	1534.26	1266.77	941.24	843.07	514.36	450.20

Tableau 42 : Compte d'exploitation par culture et par ha (2/2) (modifié de Ouédraogo, 2010)

Culture	Tomate	Patate	Niébé	Oignon	Maïs	Arachide
<b>I- Produits (en euros)</b>						
Superficie	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha	1 ha
Produit brut	1204.27	665.65	228.66	429.88	434.11	501.14
<b>II- Charges (en euros)</b>						
Intrants agricoles						
- Semence	70.12	16.26	4.57	44.51	5.30	333.13
- NPK	192.07	115.85	22.87	42.53	58.65	
- Urée	45.73	54.88	48.78	42.74	32.11	
- Fumure organique					63.29	
- Herbicide		24.39		2.44	5.33	
- Autres pesticides						
Sous total intrant	307.93	211.38	76.22	132.23	164.68	347.74
Main d'œuvre (MO)						
- MO extérieure	33.54	100.10	15.24	17.68	17.58	17.79
Autres coûts						
- Carburant	548.78			140.12	118.34	183.74
- Transport		71.14		3.66	7.90	
Sous-total autres coûts	548.78	71.14		143.78	126.25	183.74
Cout total	890.24	382.62	91.46	293.69	308.51	549.26
<b>III- Résultat d'exploitation (en euros)</b>						
- Marge brute	314.02	283.03	137.20	136.19	125.59	-48.12

### 6.1.1.5 Gestion de l'eau d'irrigation et perspectives

#### 6.1.1.5.1 Gestion de l'eau d'irrigation

Seulement 17.1% des producteurs affirment qu'il existe des conflits liés à la gestion de l'eau. Environ 98.3%, affirment qu'ils prennent en compte les besoins des utilisateurs de la ressource en eau en aval dans l'utilisation de l'eau.

#### 6.1.1.5.2 Consentement à payer pour l'eau d'irrigation

Presque la totalité des producteurs (99.1%) accorde une valeur économique à l'eau d'irrigation. Cependant aucun producteur n'est disposé à payer pour cette eau. Les raisons pour lesquelles les producteurs ne sont pas prêts à payer pour l'eau d'irrigation sont principalement le manque d'argent (54.7%), le fait que la rivière soit un "don de Dieu" (21.4%), le fait que la zone ne soit pas aménagée (7.7%) et le fait que ceux qui ont précédé les producteurs actuels sur le site n'aient jamais payé pour l'irrigation (5.1%).

Tableau 43 : Raison de non disposition des producteurs à payer pour l'eau d'irrigation (d'après Ouédraogo, 2010)

Raison de non disposition des producteurs à payer pour l'eau d'irrigation	UAT			Total	
	Bana	Diaradougou	Sambla-Toukoro		
Les prédécesseurs sur le site n'ont jamais payé	N	1	3	2	6
	%	1.7	10.3	6.7	5.1
Les dépenses d'exploitation sont déjà énormes	N	0	1	0	1
	%	0	3.4	0	0.9
L'eau de la rivière est un "don de Dieu"	N	7	9	9	25
	%	12.1	31	30	21.4
La zone n'est pas aménagée	N	2	4	3	9
	%	3.4	13.7	10.0	7.7
Le rendement est faible	N	0	0	1	1
	%	0	0	3.3	0.9
Manque d'argent	N	37	12	15	64
	%	63.8	41.4	50.0	54.7
Sans raison	N	11	0	0	11
	%	19	0	0	9.4
<b>Total</b>	N	58	29	30	117

### 6.1.1.5.3 Adoption de nouvelles techniques

En cas de possibilité de mobilisation des eaux de la nappe alluviale, 71.8% des producteurs sont disposés à irriguer uniquement à partir des eaux souterraines.

Seulement 12%, des producteurs sont disposés à adopter de nouvelles pratiques hydro-agricoles moins consommatrices en eau comme le goutte-à-goutte.

Environ 58.1% des producteurs voient un avenir dans la production agricole sur le site et 33.3% pensent augmenter leurs superficies emblavées. Les 66.66% pensent intensifier sur leurs superficies actuelles.

### 6.1.2 Ajustement des données de l'enquête socio-économique

Les données recueillies au cours de l'enquête socio-économique ont fourni des informations très importantes permettant de caractériser en partie les systèmes de production au sein de la zone d'étude. Toutefois, ces données brutes nécessitent par moment de sérieux ajustements afin qu'elles soient conformes à la réalité du terrain. En effet, les dires des producteurs, sans être erronés, auraient besoin d'être confrontés aux observations faites sur le terrain par les services techniques de la DPAHRH<sup>28</sup>, dans la mesure où la plupart des producteurs n'a pas reçu d'instruction scolaire, et de ce fait, n'a pas toujours une notion correcte des proportions ou des distances.

Ainsi, certaines données provenant des services techniques de la DPAHRH contredisent des estimations faites sur les superficies des champs à Diaradougou. Il ressort que les superficies à Diaradougou sont inférieures ou égales à 1 ha, pour la plupart. Des superficies, notamment celles de champs de riz, peuvent dépasser 1 ha, mais celles-ci se situent en général en périphérie de la zone agricole irriguée.

Les informations sur les types d'exhaure ont besoin d'être ajustées, car dans la réalité, il semble qu'au delà de 200 m de distance par rapport au cours d'eau, il devient impossible de pratiquer une prise directe (à l'aide d'une motopompe) sur la rivière. Cette information contredit les déclarations de certains producteurs qui ont affirmé pratiquer des prises directes, à plus de 1 000 m de distance de la rivière. Une telle situation est très rare et ne se rencontre que sur la rive gauche du Kou à

<sup>28</sup> Direction Provinciale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques

Diaradougou, où des canalisations secondaires et tertiaires ont été dérivées du Kou pour l'irrigation de parcelles (dont des parcelles de riz notamment !).

Concernant toujours l'exhaure, il a été constaté dans les alentours du village de Diaradougou, que les puisards-nappe ne se trouvent pas pour la plupart, proches de la rivière, mais plutôt à une certaine distance des berges<sup>29</sup>. Il semblerait qu'aux abords du Kou, ces puisards connaissent des recharges pas très importantes. Ces informations mériteraient d'être vérifiées auprès des hydrogéologues du Projet Eaux Souterraines Bobo (ESO)<sup>30</sup>. Si toutefois elles sont avérées, alors les déclarations de certains producteurs affirmant utiliser des puisards-nappe aux abords du Kou doivent être corrigées.

D'un point de vue économique, les résultats des enquêtes ont montré que les marges brutes d'exploitation étaient plus importantes au sein de l'UAT de Diaradougou, par rapport à celles de Bana et Sambla-Toukoro. Ces informations sont confirmées par les services de la DPAHRH. L'explication réside surtout dans le fait que les producteurs de Diaradougou sont plus anciens sur leur site, plus expérimentés, disposent de terres assez riches et de l'eau d'irrigation dont ils ont besoin. A l'inverse, à Sambla-Toukoro, ils disposent de moins d'eau, ce qui freine l'essor de l'agriculture irriguée dans cette zone. La production agricole à Sambla-Toukoro se compose surtout de maïs et de maraichage.

Une information très importante manque aux données d'enquête : il s'agit de la connexion des producteurs aux marchés. D'après les informations émanant des services de la DPAHRH, les producteurs écoulent les produits sur les marchés de Bobo-Dioulasso, Ouagadougou (Burkina Faso) et même de la Côte d'Ivoire. Les producteurs ne sont pas directement connectés à ces marchés, mais le sont via un réseau d'intermédiaires, et de négociants. C'est alors de cette manière qu'ils perçoivent la demande des produits sur le marché et ajustent leurs besoins de production en ce sens. En l'absence d'informations formelles ou fiables, on ne peut conclure formellement sur le fait que le choix des cultures soit strictement dicté par la demande de ces marchés lointains, mais tout au plus, la demande de ces marchés constitue une forte influence. L'établissement d'un diagramme de Venn (Delage, 2006 ; Wright et al., 2002 ; Lassissi, 1998) des représentations des organisations extérieures et intérieures de la zone aurait pu apporter plus d'information sur ce sujet.

L'information collectée au niveau du mode d'acquisition de terres de culture à Bana aurait besoin d'être rectifiée. Le mode d'acquisition majoritaire est l'héritage, suivi de la cession définitive, d'après les résultats de l'enquête socio-économique. Il ressort des informations de la DPAHRH, qu'en lieu et place d'une cession définitive, ce sont plutôt des ventes massives de terrain qui ont été faites, surtout au cours des années 2000. Ceci a engendré une arrivée massive de migrants sur le site de Bana, et donc, une augmentation conséquente des terres cultivées. Cette information est confirmée par l'étude sur le suivi par la télédétection de zones agricoles irriguées du bassin versant. La zone agricole irriguée de Bana pourrait encore croître dans la mesure où les autochtones y sont plus disposés qu'à Diaradougou ou Sambla-Toukoro, à vendre une partie de leurs terres. A Diaradougou, on loue plutôt les terres (baux de 3, 6, 9 ans), mais pas de manière massive. A Sambla-Toukoro, il y a peu de location et pas de vente. Les populations autochtones seraient réputées être peu ouvertes.

Une question très importante se pose après une analyse approfondie des données de l'enquête socio-économique : **l'échantillon de producteurs choisi est-il finalement représentatif de l'ensemble ?** Répondre affirmativement à cette question serait finalement risqué, car même si le principe d'échantillonnage à la base était stratifié (avec comme strate les UAT) et proportionnel au nombre de producteurs au sein des UAT, il apparaît que l'échantillonnage est biaisé quant à la proportion de

---

<sup>29</sup> Communication orale, Noufou Zango, DPAHRH

<sup>30</sup> Projet financé par la coopération belge et qui vise à l'appui à la gestion et à la protection des ressources en eaux souterraines exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso.

superficie occupée par les producteurs retenus, par rapport à la superficie totale. Le biais aurait été introduit dans :

- Les déclarations souvent approximatives des producteurs dans l'estimation de leurs superficies
- La prise en compte de parcelles secondaires et tertiaires dans les bilans des exploitations; ces parcelles n'avaient pas toutes été déclarées au sein de la base de données à partir de laquelle l'échantillon de producteurs a été tiré

En conclusion sur la qualité des données de l'enquête socio-économique, il est important de mentionner encore que celles-ci ont été recueillies sur un temps assez court (quelques semaines). Bien qu'elles soient assez riches en éléments de caractérisation des systèmes de production, elles restent indicatives et ne prendront tout leur sens qu'après avoir été confrontées à des observations de terrain faites sur un temps plus long.

### **6.1.3 Critères de classification des producteurs**

La méthode de typologie des producteurs de la zone d'étude se base sur leur classification en respectant des critères pertinents de regroupement. Ce choix de méthode intervient après un essai de classification des 117 producteurs en mode non supervisé, par les outils statistiques. La classification en mode non supervisé, bien qu'ayant fourni des résultats statistiquement valables, proposait des regroupements difficiles à concevoir sur le terrain.

De ce fait, la classification en mode supervisé basée sur des connaissances de terrain est apparue comme étant un meilleur moyen de regrouper les producteurs. Dans la réalité du terrain, des formes d'organisation existent, des pratiques hydro agricoles spécifiques à des groupes existent. Le but de cette classification est de "donner une forme" à ce qui apparaît de prime abord "informel".

Le type de classification supervisée adopté pour cette étude, est de type hiérarchisé. De critères en critères, une arborescence est créée. Il importe alors de choisir les critères de manière pertinente et en nombre limité, de sorte à ne pas générer une trop grande arborescence qui pourrait engendrer par moment des classes de très faibles effectifs, ne permettant plus des analyses statistiques rigoureuses. Les critères de regroupement retenus sont les suivants (dans l'ordre hiérarchique) : la zone agricole à laquelle appartient le producteur, son origine (autochtone ou allochtone), le nombre de champs que possède le producteur. La justification du choix de chaque critère retenu est donnée ci-dessous.

#### **6.1.3.1 Zone agricole d'appartenance**

Les 3 UAT qui sont contenues au sein de la zone d'étude présentent a priori des spécificités différentes soit du point de vue démographique, du point de vue économique, du point de vue des pratiques hydro agricoles, tel que cela a été présenté par les résultats de l'enquête socio-économique.

#### **6.1.3.2 Origine**

Depuis le début des années 2000, une immigration assez importante a été constatée sur la zone d'étude. En effet, la zone est parmi celles qui sont assez bien arrosées par la pluie (1 000 mm en moyenne par an), parcourues par un cours d'eau pérenne et regorgeant de sources d'eau peu profondes. A cela, il faut ajouter la baisse du prix (intervenue au début des années 2000) des équipements hydro agricoles tels que les motopompes, facilitant à une multitude de producteurs, l'exploitation des ressources en eau. En conséquence, les superficies agricoles irriguées auraient ainsi connu une augmentation de plus de 60% en dix ans (359 ha en 2000, contre 578 ha en 2009).

Une différence pourrait exister au sein des systèmes de production des producteurs autochtones et des producteurs allochtones. L'agriculture irriguée dans la zone a commencé au début des années 1970. Entre cette période et le début des années 2000, les producteurs initialement installés (et pouvant être considérés comme "autochtones") ont acquis des terres de bonne qualité, et un savoir-faire. Il apparaît intéressant de prendre en compte le fait qu'un producteur soit autochtone ou allochtone. Son origine, a priori, pourrait influencer ses pratiques hydro agricoles, la taille et le nombre de ses parcelles, ses revenus.

### 6.1.3.3 Nombre de champs

Le nombre de champs que possède un producteur pourrait orienter, a priori, le type d'agriculture qu'il pratique. En effet, bien que le nombre de champs ne détermine pas toujours à l'avance le type d'agriculture (rente, ou subsistance) pratiqué, il l'influence fortement, surtout dans le cas où le producteur dispose en plus d'importants capitaux. Car le devenir de la production est en partie lié à la taille du ménage, aux événements à venir (cérémonies, scolarisation d'enfants, etc.). Néanmoins, le nombre de champs possédés par le producteur reste un indicateur intéressant pour le type d'agriculture pratiqué par le producteur.

### 6.1.3.4 Arborescence des critères

Sur la base des trois critères hiérarchisés ci-dessus présentés, le set de 117 producteurs sera classifié, et au sein des différentes classes générées, des analyses statistiques permettront de mettre à jour les principales caractéristiques de chaque classe (voir Figure 42). Ces analyses confirmeront ou infirmeront le choix des critères choisis pour la classification en mode supervisé.

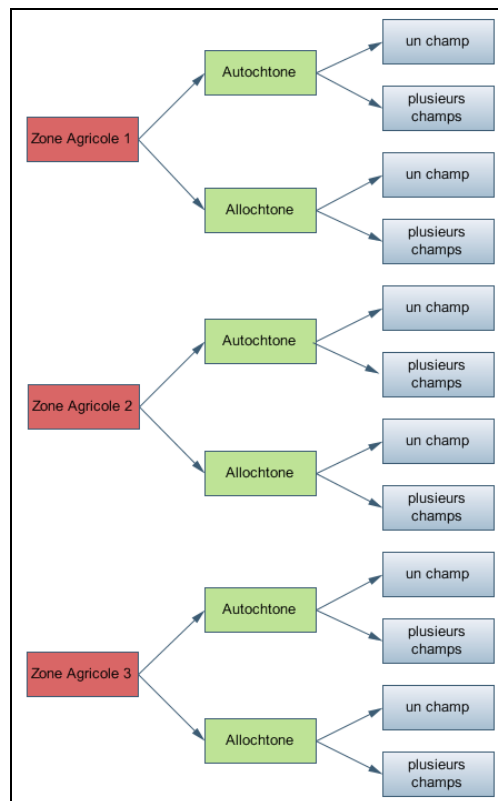


Figure 42. Hiérarchie des critères de regroupement des producteurs

#### **6.1.4 Identification des systèmes de production sur la base de la classification des producteurs**

L'essai de caractérisation des systèmes de production, fait ressortir des résultats pertinents permettant la constitution de classes de producteurs basée sur leurs pratiques hydro agricoles. L'essai de caractérisation s'est fait sur la base d'une analyse statistique des données relatives aux ressources en terre, aux systèmes de culture et aux caractéristiques des exploitations.

Au niveau des ressources en terre, il ressort aussi que les superficies des champs des allochtones sont relativement plus grands que ceux des autochtones.

L'analyse des systèmes de culture montre que dans les UAT de Bana et Sambla-Toukoro, un producteur possédant un seul champ, mettra l'accent sur la culture du maïs. A Diaradougou, le fait de ne posséder qu'un seul champ n'empêche pas le producteur de choisir entre des cultures vivrières (maïs, riz) et des cultures de rente (banane). Dans le cas d'une possession de plus d'un champ, les cultures des producteurs autochtones à Bana sont un peu plus orientées vers des cultures légumineuses, avec toujours une présence de la culture de maïs. Quant aux cultures des producteurs allochtones à Bana, elles sont plus tournées vers la culture de la banane et aussi du maïs.

A Diaradougou, un producteur autochtone possédant plus d'un champ n'a pas des pratiques différentes de celui qui ne possède qu'un champ : les cultures varient entre le maïs, la banane et le riz. Par contre, un producteur allochtone possédant plusieurs champs à Diaradougou, préférera uniquement la culture de banane. Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'on considère qu'un producteur allochtone en situation de location de terre sera porté beaucoup plus par le désir de rentabiliser son investissement. Il préférera s'orienter vers les cultures à forte marge brute, telles que la banane.

A Sambla-Toukoro, les producteurs autochtones possédant plusieurs champs s'orientent vers la culture de légumineuses (gombo) en plus de celle du maïs. La culture de la banane n'y est pas courante, en raison de faible disponibilité en eau dans cette zone. On peut alors s'imaginer que sous cette contrainte, les producteurs de la zone iront à l'essentiel, à savoir les cultures pouvant aussi bien servir pour l'alimentation des ménages que pour la vente, dans le cas d'une production suffisante.

Les caractéristiques des exploitations font ressortir globalement qu'à Bana et à Diaradougou, les producteurs allochtones sont généralement installés plus loin du cours d'eau (500 m, en moyenne), que les producteurs autochtones (100 m, en moyenne). Ceci pourrait tout simplement s'expliquer par le fait que les premiers producteurs installés (probablement, les autochtones), ont préférentiellement choisi de s'installer proche de la rivière, pour des facilités d'irrigation.

La proportion des producteurs possédant un ou plusieurs puisards est relativement plus grande chez les allochtones que chez les autochtones, indépendamment de la zone agricole. Serait-ce dû à l'hypothèse formulée ci-dessus, à savoir que les producteurs autochtones installés le plus souvent près des rives du Kou, irriguent préférentiellement à partir des eaux de la rivière ? Toutefois, au sein du groupe des producteurs autochtones, la proportion de ceux qui possèdent un puisard est relativement plus grande, dans le cas d'un producteur possédant plusieurs champs.

Le taux d'équipement en motopompe est relativement plus élevé chez les producteurs allochtones que chez les producteurs autochtones, et au sein même de chaque groupe (autochtone, allochtone), ce taux est relativement plus élevé chez les producteurs possédant plus d'un champ.

L'irrigation à partir des eaux de la rivière est plus importante chez les producteurs autochtones que chez les producteurs allochtones. Cette information est finalement corrélée à la proximité des exploitations des producteurs autochtones d'avec la rivière.

L'UAT de Diaradougou est de loin celle où les producteurs réalisent les meilleures marges brutes par hectare (783 euros), suivie de l'UAT de Bana (574 euros) et enfin celle de Sambla-Toukoro (183 euros). En dehors de la bonne expérience des producteurs de Diaradougou et de la richesse de leurs terres, ces différences peuvent s'expliquer par le type de culture pratiquée : à Diaradougou, les cultures les plus représentées sont la banane, le chou, le riz... La banane est une culture à forte marge brute. Dans les deux autres zones, certaines cultures à forte marge brute, telles que le gombo et la banane sont présentes, mais en proportions relativement plus faibles qu'à Diaradougou.

Les résultats des analyses présentées ci-dessus montrent qu'en fonction de l'appartenance à une zone agricole, en fonction du statut d'autochtone ou d'allochtone, en fonction du nombre de champs possédés, les systèmes de production présentent des différences, souvent importantes.

Ainsi l'échantillon de 117 producteurs retenus dans le cadre de ces analyses, peut être classifié selon les critères retenus. Toutefois, certains groupes ne présentent pas de grandes différences en leur sein, et alors il serait opportun de ne pas les scinder, mais plutôt de les maintenir homogènes.

Au sein du groupe des producteurs allochtones de Bana, il ne sera pas fait de différence dans la classification entre un producteur possédant un ou plusieurs champs, dans la mesure où ils présentent plus ou moins les mêmes caractéristiques pour leurs exploitations. Quelques variantes peuvent cependant exister au sein de ce groupe, notamment dans l'introduction d'une rotation maïs-banane, dans le cas de possession de plusieurs champs.

De même, au sein des producteurs allochtones de Diaradougou, il ne sera pas fait de différences dans la classification entre un producteur possédant un ou plusieurs champs. Ces champs présentent les mêmes caractéristiques d'exploitation.

Pour une question d'effectif très faible et alors non représentatif, le groupe des producteurs allochtones de Sambla-Toukoro ne sera pas représenté. En effet, il semble que cette zone agricole soit peu ouverte à l'immigration de producteurs.

Le nombre de producteurs possédant 4 champs représentant moins de 2% de l'échantillon total des 117 producteurs, le nombre de champs par producteurs sera limité à 3 au maximum, ce qui porte désormais le pourcentage de cette catégorie (possession de 3 champs) à 15% de l'échantillon total, plutôt que 13% précédemment.

Au final, ce sont 8 classes de producteurs qui auront été constituées, avec des profils variables au sein de certaines classes (voir Tableau 44 ; Tableau 45 ; Tableau 46 ; Tableau 47).

Tableau 44. Ressources en terre (superficies en hectares)

UAT	Statuts	Effectifs	Nombre Champs	Sup1	Sup2	Sup3
Bana	Autochtone	34	Un	0.70	-	-
			Plusieurs	0.70	0.65	0.75
	Allochtone	24	Un	0.96	-	-
			Plusieurs	0.96	0.96	0.58
Diaradougou	Autochtone	24	Un	1.31	-	-
			Plusieurs	1.31	1.25	1.31
	Allochtone	5	Un	1.55	-	-
			Plusieurs	1.55	1.42	1.38
Sambla-Toukoro	Autochtone	29	Un	0.5	-	-
			Plusieurs	0.5	0.38	0.25
	Allochtone	1	Un	1.5	-	-
			Plusieurs	1.5	1	-

Tableau 45. Système de culture

UAT	Statuts	Effectifs	Nombre Champs	Typologie Champ1	Typologie Champ2	Typologie Champ3
Bana	Autochtone	34	Un	Maïs	-	-
			Plusieurs	Maïs	Maïs, Gombo, Oignon	Maïs, Gombo
	Allochtone	24	Un	Maïs	-	-
			Plusieurs	Maïs	Banane, Maïs	Maïs
Diaradougou	Autochtone	24	Un	Banane, Maïs	-	-
			Plusieurs	Banane, Maïs	Maïs, Banane, Riz, Chou	Maïs, Banane
	Allochtone	5	Un	Maïs, Banane	-	-
			Plusieurs	Maïs, Banane	Banane, Chou	Banane
Sambla-Toukoro	Autochtone	29	Un	Maïs	-	-
			Plusieurs	Maïs	Maïs, Gombo	Gombo
	Allochtone	1	Un	Maïs	-	-
			Plusieurs	Maïs	Maïs	-

Tableau 46. Caractéristiques de l'exploitation

UAT	Statuts	Effectifs	Nombre Champs	Distance Kou (m)	Puisard	Motopompe	Irrigation rivière
Bana	Autochtone	34	Un	45	23.50%	44%	100%
			Plusieurs	45	47%	80%	94%
	Allochtone	24	Un	500	70%	60%	70%
			Plusieurs	500	78.50%	91%	70%
Diaradougou	Autochtone	24	Un	100	14%	57%	85%
			Plusieurs	100	70.60%	100%	88%
	Allochtone	5	Un	500	100%	100%	50%
			Plusieurs	500	100%	100%	50%
Sambla-Toukoro	Autochtone	29	Un	120	25%	60%	100%
			Plusieurs	200	4.70%	61%	100%
	Allochtone	1	Un	-	-	-	-
			Plusieurs	-	0%	100%	100%

Tableau 47. Classes de producteurs selon les systèmes de production identifiés

UAT	Statuts	Nombre Champs	Effectifs	Classes	Observations
Bana	Autochtone	Un	34	Classe111	
	Autochtone	Plusieurs		Classe112	
	Allochtone	Un	24	Classe121	Rotation Maïs-Banane si plusieurs champs
Diaradougou	Autochtone	Un	24	Classe211	
	Autochtone	Plusieurs		Classe212	
	Allochtone	Un	5	Classe221	Effectif faible. Rotation Maïs-Banane pour le champ 1
Sambla-Toukoro	Autochtone	Un	29	Classe311	
	Autochtone	Plusieurs		Classe312	

## 6.2 Analyse de la distribution spatiale des cultures

L'occupation du sol au sein de la zone d'étude est très changeante. Du fait de la disponibilité des ressources en eau, de l'influence des marchés, du non respect des rotations culturales, du nombre insuffisant d'années d'observation de l'occupation du sol, il est très difficile, voire impossible d'établir une analyse rigoureuse de la distribution spatiale des cultures. Une telle analyse basée sur de longues séries d'observation aurait permis par exemple la détermination de la fréquence d'apparition des cultures installées le plus près du cours d'eau, des zones préférentielles pour chaque cultures (si il y a lieu), etc.

En l'absence de données suffisantes, aucune analyse spatiale consistante, aucun indice de représentativité significatif (exemple : "*nearest neighbor index*" de Clark and Evans, 1954) ne peut être établi. L'analyse de la distribution spatiale des cultures présentée dans cette section ne sera que descriptive (occurrences) sans possibilité d'être rigoureusement cartographiée.

Sur la base des données d'occupation du sol pour les cultures ensemencées en 2009, une analyse des distances des parcelles au cours d'eau a été tentée (voir Tableau 48). Les résultats de cette analyse se basent sur des données insuffisantes permettant de conclure sur la significativité des résultats. De plus, pour les quelques données utilisées, il apparaît de grandes dispersions au sein des distances au cours d'eau, pour la plupart des cultures.

Tableau 48. Statistiques descriptives des distances (en mètre) des parcelles à la rivière Kou

Cultures <sup>(*)</sup>	Mean	Min	Max	Std Dev	CV	N
Arachide	195.84	8.34	329.81	167.29	85.42	3
Aubergine	104.37	53.98	154.76	71.26	68.28	2
Banane	162.55	2.91	497.81	174.65	107.44	17
Carotte	610.65	610.65	610.65	-	-	1
Chou	179.00	17.00	462.73	165.90	92.68	6
Gombo	226.11	88.23	420.19	172.97	76.50	3
Maïs	200.80	1.77	898.32	171.13	85.22	64
Niébé	911.80	911.80	911.80	-	-	1
Oignon	126.42	62.10	208.20	74.60	59.01	3
Patate	38.04	38.04	38.04	-	-	1
Poivron	476.75	476.75	476.75	-	-	1
Riz	71.28	4.09	138.46	95.02	133.31	2
Tomate	3.98	3.98	3.98	-	-	1

<sup>(\*)</sup> Cultures principales, campagne agricole de contre-saison 2009

Au sein de l'UAT de Bana, la culture principale dominante est le maïs, quel que soit le nombre de parcelles que possède le producteur (voir Tableau 49). Le maïs représente alors près de 60% des cultures produites sur les parcelles principales. Sur les parcelles secondaires, la culture de maïs est encore dominante, suivie de celle de la banane qui vient en seconde position. Le maraichage (gombo, oignon, chou) a aussi sa place au sein des superficies en culture, mais concerne beaucoup plus les parcelles secondaires, voire tertiaires.

La quasi-totalité des cultures de bananes à Bana sont vendues. Le maïs est lui aussi vendu le plus souvent, au même titre que les cultures maraichères.

Au sein de l'UAT de Diaradougou, les cultures principales dominantes sont la banane et le maïs (voir Tableau 50). Le riz est aussi une culture présente sur la zone, notamment sur la rive gauche du Kou, du fait de l'expérience des producteurs de la zone en matière de production du riz (anciens du périmètre rizicole de Bama), des aménagements hydrauliques existants (canaux secondaires en terres, dérivés de la rivière), de la disponibilité de terres de grandes superficies à la périphérie de

la zone. Enfin, parmi les cultures secondaires de la zone, figure le chou. Il semblerait qu'une partie importante du chou produit à Diaradougou soit exporté vers la Côte d'Ivoire.

Les cultures telles que le gombo, la patate douce<sup>31</sup>, la papaye sont pratiquées sur les parcelles secondaires. Sur le marché, elles sont aussi rentables, mais présentent plus de risques à la vente, que le maïs, la banane et le chou. La papaye est un produit très rentable (rendement 50 à 60 tonnes par hectare à Diaradougou), mais malheureusement, hautement périssable. Sa culture présente un risque pour les producteurs dans la mesure où ceux-ci doivent impérativement s'assurer de la présence d'un marché pour l'écoulement des papayes à la maturité, sous peine de devoir brader leur production, vu le caractère hautement périssable de la culture. Les parcelles de papayes sont de tailles généralement inférieures à 1 ha. Le gombo est une culture très productive, mais de l'avis des producteurs de Diaradougou, leurs terres ne se prêtent pas facilement à cette culture. La patate douce demande beaucoup de préparation au niveau des parcelles (cultures sur buttes), beaucoup d'eau dans sa phase de croissance<sup>32</sup>. La patate douce à Diaradougou est pratiquée sur des sols hydromorphes.

A Diaradougou, les productions de banane, chou, gombo et maïs sont vendues dans leur plus grande proportion. Une partie de la production de maïs, s'élevant à près de 20%, est conservée pour les besoins du ménage. L'autre partie de la production de riz est vendue.

Au sein de l'UAT de Sambla-Toukouro, la culture principale dominante est de loin le maïs (voir Tableau 51). Le maïs est aussi bien produit sur les parcelles principales que secondaires (pour les producteurs possédant plus d'une parcelle). Le gombo vient en seconde position. Il est surtout produit sur les parcelles secondaires. Sur ces parcelles secondaires, on rencontre aussi un peu d'arboriculture fruitière, avec la culture de la papaye.

Le cas de la zone de Sambla-Toukoro est celui d'une zone qui n'est pas vraiment tournée vers l'agriculture de rente. Les producteurs s'orientent prioritairement vers les cultures vivrières comme le maïs, qu'ils peuvent utiliser aussi bien pour la consommation du ménage que pour la vente, en cas d'excédent de production. La pratique de la culture du gombo (des champs secondaires) est alors destinée à rapporter de l'argent au ménage. Toute la production de gombo est en général vendue.

---

<sup>31</sup> La patate douce (*Ipomoea batatas*) est une plante vivace de la famille des Convolvulacées largement cultivée dans les régions tropicales et subtropicales pour ses tubercules comestibles. (Source : Wikipedia)

<sup>32</sup> <http://devenet.free.fr/agriculture/patatedouce.htm>

Tableau 49. Distribution des principales cultures à Bana en fonction du numéro d'ordre du champ

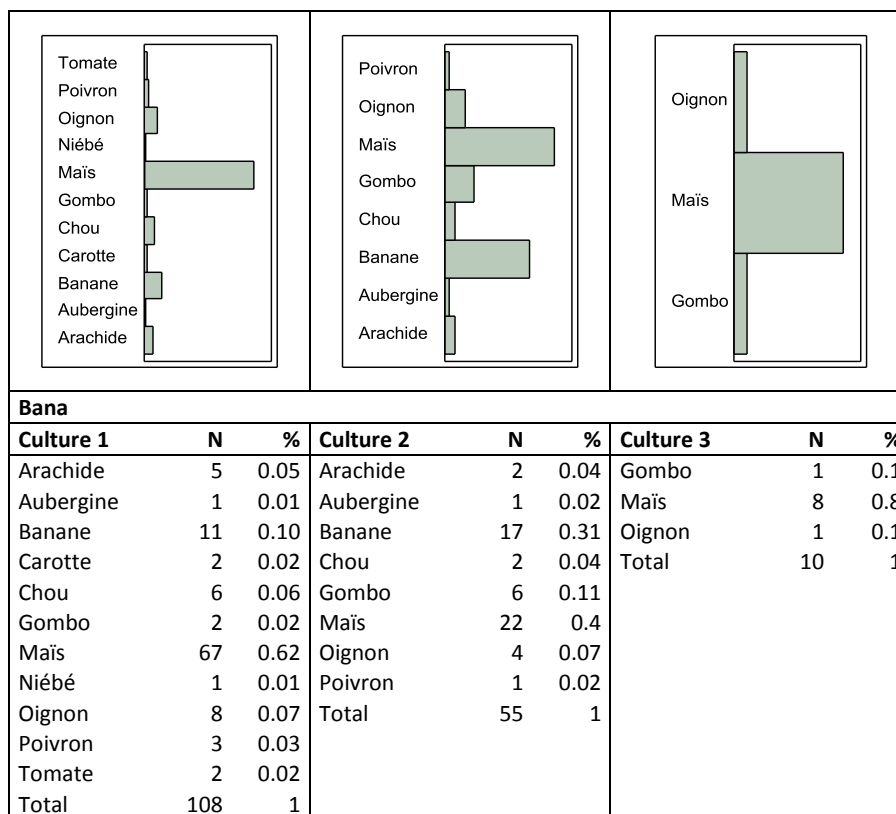


Tableau 50. Distribution des principales cultures à Diaradougou en fonction du numéro d'ordre du champ

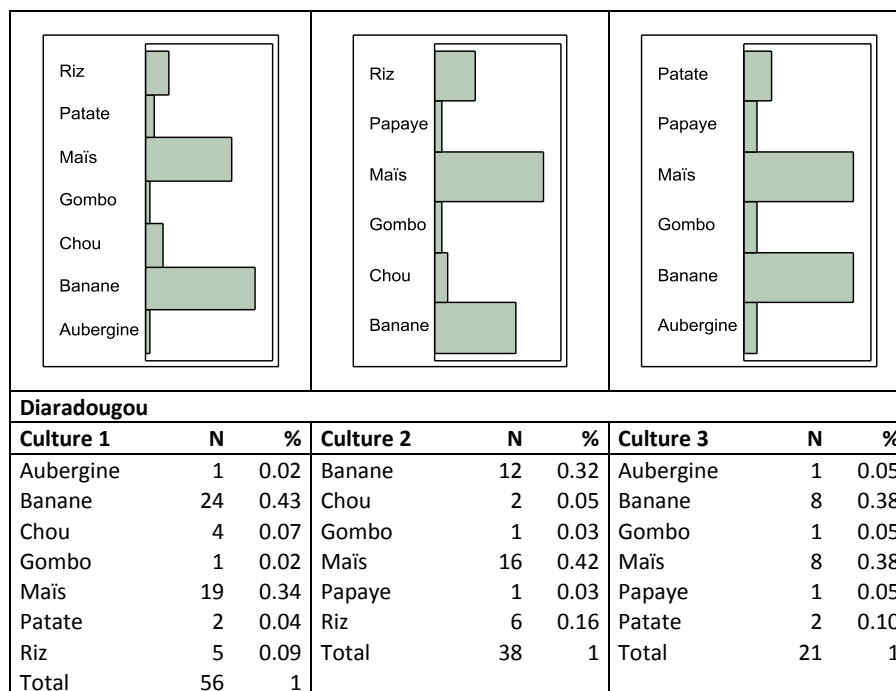
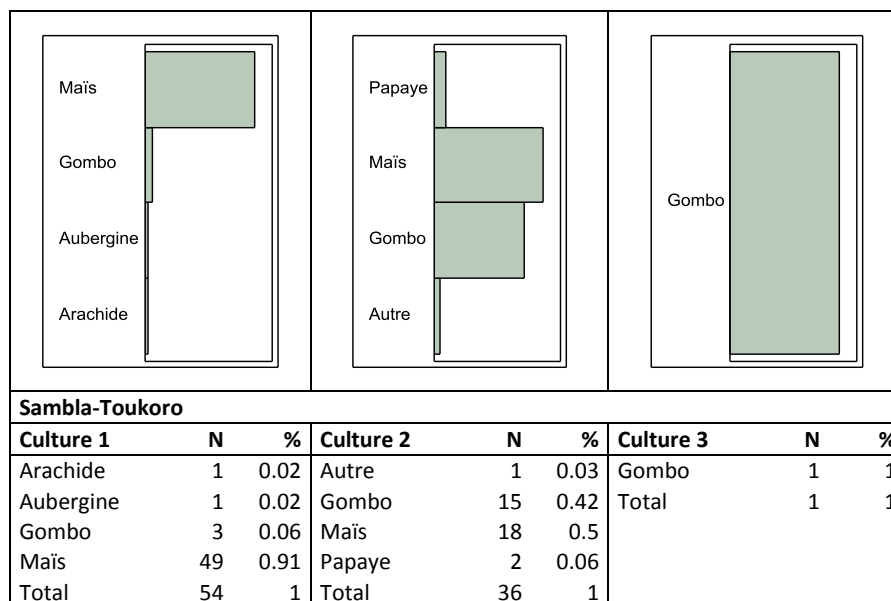


Tableau 51. Distribution des principales cultures à Sambla-Toukoro en fonction du numéro d'ordre du champ



La distribution spatiale des cultures sur la zone d'étude montre finalement que dans quelques rares cas, l'eau peut être un facteur limitant à la production agricole. C'est le cas au sein de l'UAT de Sambla-Toukoro où, faute de ressources en eau suffisantes, les producteurs sont obligés de s'orienter vers des cultures pouvant s'accommoder aux ressources en eau disponibles. Le problème de la disponibilité en eau serait le résultat d'un aménagement hydraulique ayant échoué et ayant eu pour conséquence une limitation de l'accès à l'eau d'irrigation dans la zone<sup>33</sup>.

Ainsi, quand l'eau n'est pas un facteur limitant, les producteurs ont toute latitude pour le choix de leurs cultures, y compris celles qui présentent de fortes marges brutes, pour peu qu'ils en aient les moyens financiers pour supporter les charges liées à la pratique de ces cultures.

### 6.3 Conclusion

Les analyses qui précèdent ont permis de présenter d'une manière exhaustive la zone d'étude, ainsi que de caractériser l'agriculture irriguée qui y est pratiquée. Cette agriculture est pratiquée par des producteurs dont les motivations ne sont pas toujours très précisément cernées.

Le caractère informel de l'agriculture dans la zone vient du fait que la zone agricole n'a pas fait l'objet d'un aménagement, elle n'est pas gérée par une quelconque organisation ; que ceux qui y pratiquent l'agriculture n'ont pour la plupart pas été scolarisés et n'ont pas reçu de formation dans le domaine agricole. Il en résulte alors pour plusieurs producteurs, une formation au métier de l'agriculture, apprise sur le terrain, avec toutes les lacunes que cela peut comporter. En outre, les producteurs de la zone sont fortement influencés par les marchés environnants, qui dictent par la loi de la demande, le type de culture à pratiquer. Certes, cela procure une rente considérable, quand l'opportunité est bien saisie, mais aussi de grosses pertes, quand l'opportunité n'a pas vraiment été considérée au regard des possibilités réelles qui s'offraient aux producteurs (cas de la production de papaye).

L'un des gros inconvénients de cette agriculture informelle est le manque de vision. Un manque de vision de la part des producteurs ou tout simplement une perception limitée de leur environnement. Cette perception limitée ne permet pas aux producteurs du site d'avoir une idée des ressources dont

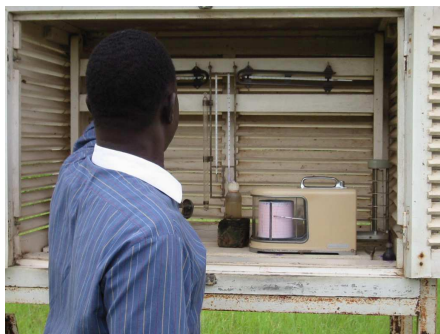
<sup>33</sup> Communication orale, Noufou Zango, DPAHRH

ils disposent pour produire. Et ceci est à la base du problème lié à l'utilisation de l'eau dans la zone. Les ressources en eau sont (inconsciemment ?) perçues comme étant illimitées.

Le problème de la gestion de l'eau dans les zones irriguées du bassin du Kou n'est pas un problème isolé, mais plutôt un problème commun à la plupart des systèmes informels impliquant une gestion de ressources naturelles. Autrement dit, on est clairement en présence d'un problème de gestion d'un bien commun, propriété de tous et de personne à la fois.

Les déficits en eau d'irrigation très souvent constatés en aval sont donc la résultante de l'appropriation excessive par les producteurs en amont de ce bien qu'est l'eau de la rivière, sans pour autant avoir une représentation finie de ce bien, ainsi que de l'impact de leurs consommations sur l'aval de la zone.

A ce stade de l'étude, il est désormais possible de proposer une (ou plusieurs) représentation de la zone d'étude ainsi que du système d'utilisation/gestion de l'eau, dans un espace virtuel permettant des simulations de scénarios possibles. Cette formalisation du système se fera par des outils utilisant les systèmes multi-agents.



## **Partie 3 : Formalisation du système de gestion de l'eau au sein d'un modèle**

## Chapitre 7. Concept des systèmes multi-agents et application à la gestion de l'eau

### 7.1 Origine

Les systèmes multi-agents proviennent du croisement entre les systèmes complexes, l'intelligence artificielle distribuée et l'informatique (voir Figure 1) (Drogoul, 1993 ; Müller, 2002 ; Bousquet and Le Page, 2004). En rappel, les systèmes complexes sont des systèmes comprenant de nombreuses entités en interaction, dont on ne peut prévoir le comportement ou l'évolution par un simple calcul. L'intelligence artificielle distribuée est une branche de l'intelligence artificielle qui traite de l'interaction entre des agents intelligents (Chaib-Draa et al., 1992). Elle désigne la mise en commun de la capacité de raisonnement de plusieurs individus pour la réalisation d'un but qu'il est impossible ou plus difficile d'atteindre sans cette coopération (Chaib-Draa et al., 1992 ; Konolige, 1992).

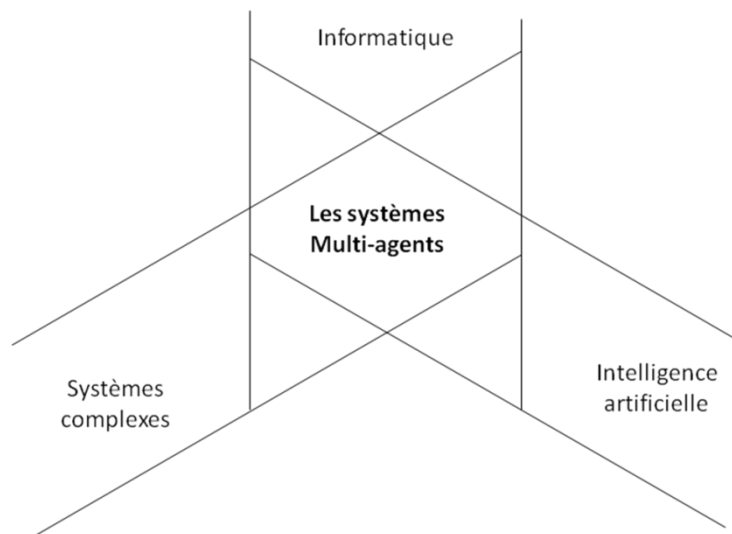


Figure 43. Intersection des sciences à l'origine des systèmes multi-agents (d'après Jean-Pierre Müller<sup>34</sup>)

### 7.2 Définition

#### 7.2.1 Qu'est ce qu'un agent ?

D'après Wooldridge (2000), il est assez curieux de remarquer qu'il n'existe pas une définition universellement adaptée au terme "agent", bien que la notion centrale d'autonomie (de l'"agent") fasse le consensus. Plusieurs auteurs (Drogoul, 1993 ; Ferber, 1995 ; Wooldridge and Jennings, 1995) proposent toutefois des définitions assez proches les unes des autres, de ce qu'est un "agent". Ferber (1995) propose la définition suivante : *"un agent est une entité réelle ou virtuelle, évoluant dans un environnement, capable de le percevoir et d'agir dessus, qui peut communiquer avec d'autres agents, qui exhibe un comportement autonome, lequel peut être vu comme la conséquence de ses connaissances, de ses interactions avec d'autres agents et des buts qu'il poursuit"*.

Une distinction est faite entre les agents, classés en deux principales catégories distinctes, à savoir les agents dits "cognitifs" et "réactifs". Selon Drogoul (1993), les agents *cognitifs* sont dotés de capacité de représentation qui leur permettent de raisonner sur leur fonctionnement collectifs. Leur architecture interne, basée en majorité sur l'approche dite BDI (*Beliefs Desires Intentions*), leur permet de construire, à partir de leurs *croyances* (connaissances entachées d'une certaine

<sup>34</sup> Présentation Powerpoint "Les SMA: principes, origines, modalités de fonctionnement"

probabilité) et de leurs *désirs* (leurs buts), des plans qui se traduiront en *intentions* (actions envisagées sur le monde ou sur les autres agents) (Rao and Georgeff, 1991). A l'inverse, les agents *réactifs* n'ont pas de représentation de l'environnement ni des autres agents, et souvent peu de mémoire ; leurs actions et leurs perceptions sont purement locales. Comme dans les colonies d'insectes sociaux, c'est la multiplicité des interactions et leur caractère stochastique qui vont permettre d'obtenir, par auto-organisation et émergence de structures, des propriétés collectives robustes et adaptatives, souvent assimilables à de véritables comportements de résolution collective de problèmes (Drogoul and Dubreuil, 1991). D'après Drogoul (1993), entre les modèles basés sur des agents *cognitifs* et ceux basés sur des agents *réactifs*, il existe un certain nombre d'architectures hybrides d'agent.

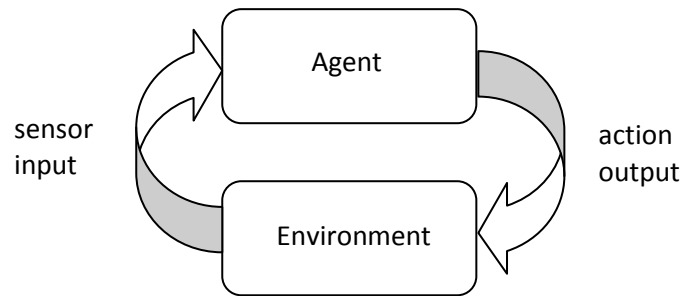


Figure 44. L'agent dans son environnement (modifié de Wooldridge, 2000)

### 7.2.2 Qu'est-ce qu'un système multi-agents ?

D'après Ferber (1995), un système multi-agents (SMA) est un ensemble d'agents qui agissent (et interagissent) dans un environnement commun. Un SMA se compose des éléments suivants :

- Un **environnement E**.
- Un ensemble d'**objets O**. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans l'environnement **E**.
- Un ensemble d'**agents A** qui sont des objets particuliers, lesquels représentent les entités actives du système.
- Un ensemble **R** de **relations** qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
- Un ensemble d'**opérations Op** permettant aux agents de l'ensemble **A** de percevoir, produire, consommer, transformer, et manipuler des objets de l'ensemble **O**. Cela correspond à la capacité des agents à percevoir leur environnement, à manger, etc.

Les propriétés des SMA sont les suivantes :

- **Ouvert** : les agents y entrent et en sortent librement (ex: un café, une application de commerce électronique, etc.)
- **Fermé** : l'ensemble d'agents reste le même (ex: un match de football, un système multi-experts)
- **Homogène** : tous les agents sont construits sur le même modèle (ex: une réunion de travail, une colonie de fourmis)
- **Hétérogène** : des agents de modèles différents, de granularité différentes (ex: un écosystème)
- **Mixte** (ou non) : les agents "humains" sont partie intégrante du système (ex: un groupe de travail médié par des agents assistants) (implique ouvert et hétérogène)

Les applications les plus complexes concernent les SMA ouverts, hétérogènes et mixtes... mais la plupart des recherches se font sur les systèmes fermés et homogènes.

Selon Bousquet (2001), le point clé des SMA réside dans la formalisation de la nécessaire coordination entre agents. La communication est alors un aspect important à prendre en compte dans un SMA intelligent<sup>35</sup>. Les SMA mettent aussi davantage l'accent sur le processus de prise de décision des agents et de l'organisation sociale dans laquelle ces individus sont intégrées (Bousquet and Le Page, 2004). Ainsi la recherche sur les agents porte sur : la décision (*exemple : quels sont les mécanismes de décision de l'agent ?*) ; le contrôle (*exemple : quelles sont les relations entre agents ?*) ; la communication (*exemple : quels types de messages s'envoient-ils ?*).

### 7.3 Application à la gestion des ressources naturelles

Dans la plupart des cas de modélisation de la gestion des ressources naturelles par les SMA, c'est la méthode de la simulation qui est la plus utilisée (Bousquet and Le Page, 2004). Cette simulation pose le problème de l'interaction entre des ensembles d'agents et des ressources dynamiques (Bousquet et al., 1996). En effet, les problèmes de gestion des ressources naturelles sont des problèmes dans lesquels on étudie généralement l'action anthropique sur l'environnement, sur les ressources. A l'opposé, dans le domaine des sciences sociales, ce serait plutôt l'étude sociétale résultant des changements survenus au sein de l'environnement. C'est aussi le lieu de l'étude des relations entre les Hommes à propos des ressources.

Du fait de la prise en compte du champ humain dans les questions de gestion des ressources naturelles, les modèles développés à cet effet sont plus prospectifs et exploratoires que purement prédictifs (Bousquet, 2001). Ceci s'explique par la nature complexe des écosystèmes (interactions à plusieurs niveaux, non-linéarité), et le comportement humain, imprédictible par essence.

Quel que soit le degré de complexité d'un modèle SMA dédié à la gestion des ressources naturelles, il n'en demeure pas moins que celui-ci reste une représentation simplifiée de la réalité. Dans ce genre de modèles, les mécanismes réels sont définis comme une succession de règles simples entrant en compte dans la dynamique du système. Avec les différentes hypothèses et simplifications faites, le modèle devient seulement une représentation du système parmi tant d'autres (Becu et al., 2003).

Les applications des SMA à la gestion des ressources naturelles sont assez nombreuses. Une liste non-exhaustive de ces applications est donnée par Bousquet and Le Page (2004), où sont mentionnées, entre autres, l'étude de Lansing and Kremer (1993) sur un problème de gestion de l'eau à Java, l'étude de Bousquet (1993) sur la gestion de la pêche au Mali, l'étude de Feuillette et al. (2003) sur la gestion d'une nappe en Tunisie, l'étude de Barreteau and Bousquet (2000) sur la gestion de systèmes irrigués au Sénégal. A noter aussi, l'étude de Becu et al. (2003) sur la gestion de l'eau sur un petit bassin versant en Thaïlande, l'étude de Saqalli et al. (2010) sur les facteurs affectant les conditions de vie des populations de la région de Diantchandou (Niger), et celles de Berger et al. (2007), Schlüter and Pahl-Wostl (2007) et van Oel et al. (2012 ; 2010) sur, respectivement, la disponibilité et l'utilisation de l'eau dans des bassins versants du Chili, du delta de la rivière Amudarya (Asie centrale) et du Brésil.

Dans bien de cas, une modélisation par SMA peut traiter d'un problème de gestion de bien commun dans le cadre d'une approche constructiviste avec les acteurs du système. Ce qui implique une prise de décision collective. Parmi les méthodes existantes permettant de traiter de la prise de décision collective, Bousquet and Le Page (2004) recommandent la *modélisation d'accompagnement*. En

---

<sup>35</sup> Selon Drogoul 1993, l'"intelligence" dans le contexte des SMA doit être prise dans un sens beaucoup plus large que celui lié à la capacité à raisonner. On doit ainsi passer, pour continuer à parler d'intelligence d'un SMA, à une notion d'intelligence définie principalement comme une "adaptabilité susceptible de variété" interprétée par un observateur humain comme intentionnelle. Un SMA sera donc considéré comme intelligent si, dans l'accomplissement de la tâche pour laquelle il a été conçu, il manifeste pour un observateur les trois qualités suivantes : adaptabilité, variabilité, intentionnalité.

résumé, la modélisation d'accompagnement est un processus au cours duquel les acteurs du système, à partir des perceptions subjectives différentes qu'ils ont d'une situation et de la connaissance de ce qui les oppose les uns aux autres, améliorent leur niveau de connaissance et définissent une représentation partagée du système. Cela contribue au processus collectif de prise de décision que Weber and Bailly (1993) définissent comme étant le "*processus d'interaction entre des acteurs individuels et/ou collectifs ayant des représentations et des poids différents dans la négociation*". La modélisation d'accompagnement, à travers la modélisation par les SMA et l'emploi des jeux de rôles, permet de réaliser une représentation simplifiée du système et de mettre en évidence les comportements des acteurs impliqués. Les jeux de rôles (au sens de la modélisation d'accompagnement) seront abordés dans la section suivante de ce document, qui traite de la validation des modèles SMA.

En se basant sur l'approche de la modélisation d'accompagnement, la construction d'un modèle se fait en suivant une boucle "terrain-modélisation-simulation-terrain". Les hypothèses ne sont pas fixées au début, mais elles émergent de la confrontation à la réalité d'un modèle progressivement construit (Hervé, 2005). Le modèle ainsi mis en place doit être évalué par les acteurs "modélisés", puis vient la phase des simulations montrant la dynamique issue des différents niveaux d'interactions au sein du modèle (Bousquet, 2001). Au final, le processus décrit ci-dessus, montre que ces modèles peuvent servir de support à la discussion sur les informations qu'il est nécessaire d'acquérir et de suivre (Bousquet, 2001).

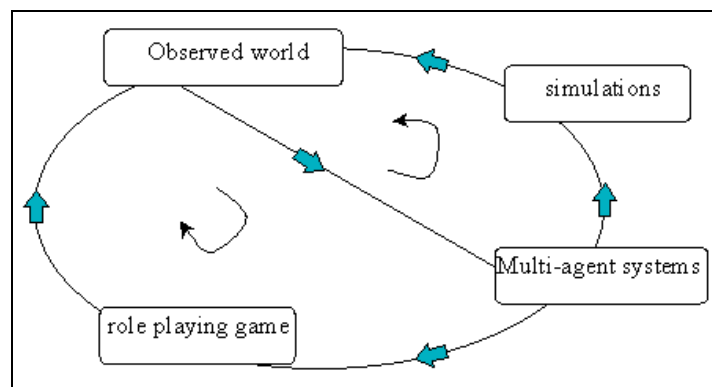


Figure 45. Association de systèmes multi-agents, jeux de rôle et observations de terrain (d'après Barreteau et al., 2001)

## 7.4 Validation des modèles multi-agents

En raison du nombre souvent important de paramètres pris en compte dans les modèles multi-agents, leur validation demande une approche particulière, différente de celles des modèles "classiques". En effet, les différents niveaux d'interaction possibles au sein des systèmes complexes rendent parfois difficile l'interprétation des comportements qui émergent de ces interactions.

Un certain nombre de modèles SMA est basé sur la coopération entre plusieurs agents afin de réaliser un objectif commun. Dans ce cas, les changements produits sur l'environnement ne sont pas les résultats du comportement d'un seul agent, mais de l'interaction des agents entre eux et avec l'environnement sur lequel ils agissent. En conséquence, le comportement émergent du système est difficile à comprendre. Par ailleurs, le système est très difficile à vérifier à un niveau global, car le comportement global n'est pas la somme des comportements locaux des agents (Jacobs et al., 1998).

Les tests classiques pour la validation des modèles recommandés dans la littérature sont la comparaison des résultats du modèle avec la réalité ou avec d'autres modèles, le comportement du modèle dans des situations extrêmes, des tests de sensibilité sur les paramètres, le suivi de variables

spécifiques au cours des simulations, etc. (Rykiel Jr, 1996; Mazzotti and Vinci, 2007; Feuillette et al., 2003). Tandis que ces tests sont souvent utilisés pour valider les modèles classiques, il n'existe aucune méthode généralement acceptée pour la validation d'un modèle complexe (Feuillette et al., 2003).

En effet, selon Bousquet and Le Page (2004), dans la communauté des SMA il est largement reconnu que l'une des faiblesses des SMA est l'impossibilité d'établir une preuve mathématique des résultats obtenus. Feuillette et al., 2003 soulignent justement la différence entre une solide validation et une accréditation (ou vérification) en ce sens que, dans le premier cas le modèle est perçu comme une représentation plus ou moins exacte de la réalité et peut donc être utilisé pour des prévisions alors que dans le second cas - c'est souvent le cas pour les systèmes complexes - l'objectif est de comprendre les propriétés des processus interactifs.

La vérification consiste à déterminer qu'un programme simulé par ordinateur est une représentation acceptable du modèle conceptuel. La vérification consiste essentiellement à vérifier si la sortie du modèle est raisonnable et à déboguer le modèle conceptuel et le programme informatique (Feuillette et al., 2003).

D'après Bousquet and Le Page (2004), pour valider un modèle SMA, la première stratégie est de fournir des présentations rigoureuses de la structure du modèle. A cet effet, parmi les outils permettant une représentation graphique structurée des modèles SMA, on peut citer le langage UML (*Unified Modeling Language*). Une seconde stratégie permettant de valider les modèles SMA, serait d'en comparer les sorties avec celles d'autres types de modèles utilisant les équations différentielles. Cette stratégie fournit des résultats assez intéressants, mais ce au prix d'importantes simplifications au sein du modèle SMA (Bakam et al., 2001 ; Bousquet and Le Page, 2004). Enfin, une autre stratégie consiste à évaluer la pertinence des hypothèses du modèle (Bousquet and Le Page, 2004). En ce sens, l'utilisation des jeux de rôle comme "validation sociale" est l'option qui a été retenue par Barreteau and Bousquet (2000) pour la validation d'un modèle de gestion des systèmes irrigués au Sénégal. Ce type de validation consiste à reproduire les règles implémentées dans le modèle, dans un jeu où les acteurs du système jouent leur propre rôle. Ceci permet la discussion entre les acteurs eux-mêmes et entre les acteurs et le modélisateur et permet ainsi de vérifier/corriger les hypothèses à la base du modèle afin qu'il soit une représentation du système, la mieux approchée (et partagée) qui soit.

## **7.5 Justification du choix des systèmes multi-agents dans la modélisation du système de gestion de l'eau en agriculture sur le bassin versant du Kou**

D'après van Oel et al. (2010), il est de plus en plus reconnu que la simulation multi-agents est une technique de modélisation adéquate pour représenter les interactions homme-environnement.

Berger et al. (2007) et Schlüter and Pahl-Wostl (2007) ont montré, à propos de l'analyse des politiques pour la gestion des ressources en eau, que les SMA sont utiles pour une meilleure compréhension de la complexité de l'utilisation de l'eau et des utilisateurs de l'eau au niveau des sous bassins versants.

L'approche par les SMA se justifie dans le cadre de la présente étude, par le fait que la réussite de la gestion de l'eau au sein de la zone d'étude ne se fera que par la prise en compte effective du champ social. Le succès de l'optimisation des prélèvements en eau d'irrigation sur la rivière Kou devrait idéalement s'inscrire dans une démarche participative qui prenne en compte le comportement des producteurs au sens de leurs pratiques hydro agricoles, ainsi que leurs aspirations au sens agro économique. Autrement, toute solution uniquement basée sur une approche purement physique court le risque de rencontrer une adhésion faible (voire nulle) de la part des acteurs de terrain.

De ce fait, le modèle développé dans le cadre de cette étude ne sera qu'une première étape dans l'approche d'optimisation de l'utilisation de l'eau dans la zone d'étude. Ce modèle servira de base de discussion pour son perfectionnement au sens de la pertinence de la représentation du système simulé, et aussi permettra de discuter des éventuels scénarios de gestion à envisager.

Le but ultime du modèle résultant n'est pas la prévision à long terme, car d'après Bousquet (2001), *"le long terme n'est pas prévisible dans le champ économique et social ; il est par contre décidable"*. Le but serait l'exploration des conséquences des choix de production faits par les producteurs, sous l'influence de quelques facteurs probables.

Enfin, du fait de l'interdisciplinarité qu'impliquent les problèmes de gestion des ressources naturelles, l'usage des SMA permet la prise en compte, au sein de la représentation commune, des variables pertinentes des différents champs disciplinaires.

## Chapitre 8. Modélisation du système de gestion par les systèmes multi-agents

### 8.1 But du modèle

Le modèle développé dans le cadre de cette étude vise principalement à simuler l'étude de l'impact des choix des producteurs sur les ressources en eau disponibles. L'impact direct de leurs décisions au sein du système de production choisi, se traduit concrètement dans la problématique de cette étude, par l'impact de leur système de culture, sur les ressources en eau.

A partir d'une connaissance assez bonne du système à modéliser, le modèle a alors pour rôle de permettre une étude à court-terme (3 ans) de l'impact des décisions des producteurs sur les débits en aval.

Au sein du modèle, évoluent des acteurs ou agents, possédant chacun des ressources pour produire, pourvus de stratégies pour leur permettre de faire les meilleurs choix possibles parmi les systèmes de culture qui leur sont proposés.

### 8.2 Formalisation du système étudié au sein du modèle

A l'image de toute modélisation, celle qui est mise en œuvre dans cette étude vise à représenter dans un système simple la réalité complexe observée sur le terrain. Toutefois, il ne s'agit pas de représenter toute une réalité, mais uniquement ses éléments pertinents qui la caractérisent au mieux, en ne perdant pas de vue les objectifs à atteindre.

Partant de là, un modèle simple mettant en jeu les producteurs, leurs ressources pour produire, ainsi que les ressources en eau disponibles, a été élaboré. Dans ce modèle, les entités représentées sont de trois types :

- **Les entités spatiales.** Ce sont les éléments qui représentent l'espace et qui possèdent des coordonnées dans l'espace. Exemple : les parcelles de culture.
- **Les entités sociales.** Elles représentent les entités actives du modèle. Dans le modèle développé, les seules entités sociales représentées, sont les producteurs.
- **Les entités passives situées ou non.** Les entités passives désignent ici les agents du modèle qui ne prennent pas part d'une manière autonome au déroulement des simulations. Ces entités sont plutôt utilisées par les agents actifs du modèle. Exemple : le marché, les puisards.

En rappel, les conclusions des analyses des enquêtes socioéconomiques ont failli quant à fournir des informations précises sur des aspects tels que le type d'exhaure en fonction de la localisation de la parcelle, les coûts des intrants (semences, engrais, etc.), la stratégie des producteurs en ce qui concerne les rotations au niveau des semis. Encore une fois, ce manque de précision s'explique par le caractère ponctuel de cette enquête (une seule, au cours de cette étude), n'ayant pas permis de corriger les dires des enquêtés, assez souvent entachés d'erreur quant à des estimations de distances, de proportions, et aussi quant à la déclaration de leurs biens. Ce genre de biais est assez fréquent dans les enquêtes adressées au monde rural, au Burkina Faso. Afin de surmonter ces lacunes, des hypothèses ont été faites, et les entités observées sur le terrain ont été formalisées dans le modèle, comme suit :

#### 8.2.1 L'espace

L'espace réellement représenté dans le modèle correspond à 215 ha, soit 33% de la zone d'étude (qui s'étend sur 648 ha). Ces 215 ha se répartissent entre les exploitations agricoles (154.5 ha) et les

cellules de la rivière (60.5 ha). Le système ayant été discrétisé en mailles carrées de 50 m de côté, il est alors constitué de 189 lignes sur 97 colonnes, soit 18 333 cellules. Sur les 18 333 cellules, seules 860 cellules appartenant soit aux cultures, soit à la rivière, sont réellement actives (voir Figure 46 et Figure 47).

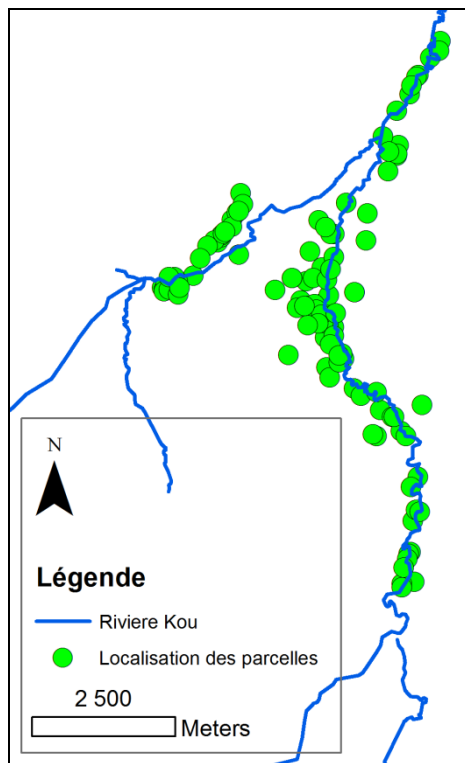


Figure 46. Espace réel

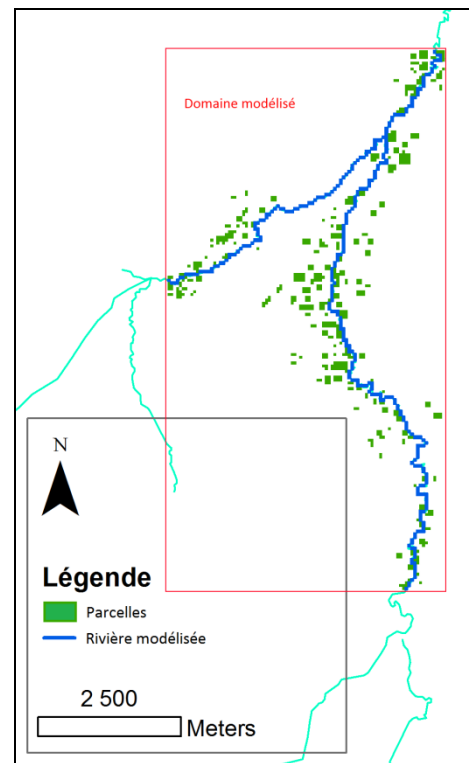


Figure 47. Espace représenté au sein du modèle

Au sein de l'espace, les cellules sont agrégées soit en parcelles agricoles, soit en exploitations agricoles, ou en cellules de rivière. La cellule représente l'entité spatiale élémentaire. Une parcelle agricole constitue un agrégat de cellules contiguës. Une exploitation agricole est constituée d'un agrégat de parcelles qui peuvent être contiguës ou non. Les cellules de rivière constituent entre elles un agrégat de cellules contiguës, et disposées selon le tracé réel de la rivière Kou. Une illustration de l'espace et des agrégations possibles de cellules est présentée en Figure 48. L'agrégation des cellules se fait sur la base d'un attribut commun, qui est le code donné dans le système au producteur ("code producteur") détenteur desdites cellules. Partant d'une telle construction, certaines exceptions sont possibles : une cellule ayant un code producteur unique dans le système, est à la fois une cellule, une parcelle et une exploitation. De même une parcelle (donc, agrégat de cellules ayant le même code producteur) peut aussi être à la fois une exploitation, si aucune autre parcelle (ou même cellule) n'a le même code producteur au sein du système.

La configuration de l'espace au sein du modèle repose à plus de 60% sur celle qui existe dans la réalité. Cette estimation provient du fait que la position de parcelles principales (60% du total) des producteurs a été identifiée par GPS. La position des parcelles secondaires et tertiaires a été estimée car aucune localisation précise sur la position de ces parcelles, n'avait été fournie lors des enquêtes de terrain. Les distances séparant les parcelles secondaires et tertiaires ont été déterminées à l'aide d'un générateur de nombre aléatoire en supposant que celles-ci restent comprises dans un intervalle de 0 et 200 m. Quant à la situation géographique (est, ouest, nord, sud) des parcelles secondaires et tertiaires par rapport aux parcelles primaires, elles ont été aussi déterminées de manière aléatoire.

Les parcelles et la rivière ont été importées dans le modèle à partir d'un système d'information géographique (SIG).

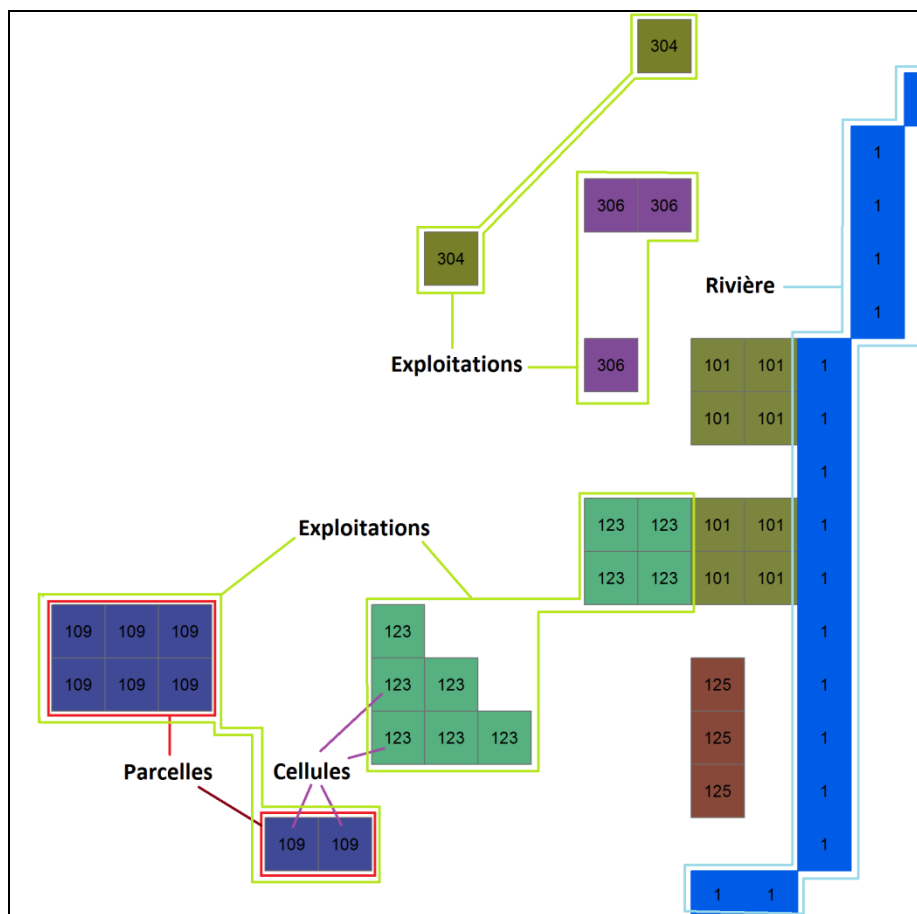


Figure 48. Illustration des agrégations possibles de cellules au sein du modèle

## 8.2.2 Les cultures

Cinq cultures (sur la dizaine de cultures existantes) sont représentées au sein du modèle. Ce sont : la banane, le chou, le gombo, le maïs, le riz. Ces cultures occupent près de 95% des superficies en cultures, au sein de la zone d'étude.

Les cultures sont caractérisées au sein du modèle, par des **attributs agronomiques** simples tels que : le type de culture, les besoins en eau, la longueur du cycle végétatif ; des **attributs agro économiques** tels que : les marges brutes totales et les coûts de production pour chaque culture. A partir de ces informations de base, le modèle simule la présence des cultures. Bien que la zone d'étude soit supposée être une zone d'abondantes ressources en eau, où les cultures ne connaissent pas le stress hydrique, il a été intégré dans le modèle la notion de satisfaction des besoins en eau. Ainsi, au cours des simulations, toute demande en eau non satisfaite est prise en compte et impacte le rendement économique du producteur.

Pour des questions de simplification, le système de cultures associées<sup>36</sup> n'est pas pris en compte dans le modèle. Ainsi, les cultures sont homogènes au sein d'une parcelle. A l'échelle de l'exploitation, les parcelles peuvent toutes être occupées par les mêmes cultures ou non.

<sup>36</sup> Système de culture dans lequel deux (ou plusieurs) cultures sont pratiquées en même temps sur la même parcelle.

Concernant les attributs agro économiques des cultures, les données disponibles sur les éléments du compte d'exploitation des producteurs (intrants, semences, main d'œuvre, etc.) présentent de trop grandes variations, laissant ainsi planer le doute sur leur fiabilité. A défaut d'informations plus fiables, il a été arrêté pour les besoins du modèle, de ne considérer que des valeurs moyennes relatives à l'ensemble de la zone d'étude, en termes de produits bruts d'exploitation, marges brutes, et coûts de production, et ce par type de culture. Cette simplification a pour effet d'uniformiser les chiffres pour l'ensemble des 3 UAT.

L'introduction d'une valeur limitant la capacité des puisards a pour effet d'engendrer sur certaines parcelles un déficit, quant à la satisfaction des besoins en eau. Ce déficit engendre à son tour, un stress hydrique. Afin de prendre en compte le stress hydrique au sein du modèle, un "compteur de stress" a été établi pour chaque parcelle. Ce compteur de stress enregistre à la fois, les occurrences de stress et les intensités de stress. **L'intensité du stress s'exprime par le degré de déficit de satisfaction des besoins en eau.** Le degré de satisfaction est le rapport de la différence entre le volume d'eau requis (donc, besoins en eau totaux) et le volume d'eau disponible, sur le volume d'eau requis (voir Équation 1). Un coefficient basé sur les deux variables du compteur de stress hydrique, à savoir l'occurrence et l'intensité du stress, peut affecter négativement les rendements du producteur lors de la récolte de la parcelle en cas de stress important et prolongé des cultures. Le modèle n'étant pas un modèle de simulation de la croissance des cultures, ne seront pas pris en compte, les temps durant lesquels survient le stress hydrique, en rapport avec les périodes critiques du cycle végétatif de la culture. Cette information supplémentaire aurait en effet permis de mieux qualifier le stress (sévère ou non) et mieux imaginer son impact sur le rendement. Ce point particulier pourrait faire l'objet d'une perspective intéressante dans le cadre de développements futurs pouvant être apportés au modèle.

*Équation 1. Equation du calcul du stress hydrique (à l'échelle de la parcelle) au sein du modèle*

$$\text{Intensité du stress hydrique} = \frac{\text{Volume d'eau requis} - \text{Volume d'eau disponible}}{\text{Volume d'eau requis}}$$

### 8.2.3 Les producteurs

Les 154.5 ha d'exploitation agricole sont détenus par 117 producteurs. Ces 117 producteurs, soit 10% de l'effectif total des producteurs de la zone d'étude, correspondent au résultat d'un tirage aléatoire réalisé pour les besoins de l'enquête socio-économique qui a eu pour but de caractériser les systèmes de production dans la zone d'étude. La taille de l'échantillon (10%) avait été dictée par les moyens financiers disponibles pour la réalisation de l'enquête. Pour les besoins de la modélisation, la même taille d'échantillon (et les mêmes producteurs échantillonnés) a été retenue.

Les producteurs au sein du modèle sont répartis en classes d'appartenance. Ces classes ont été déterminées suite à des analyses de leurs données socioéconomiques. Les classes d'appartenance font partie des attributs des producteurs dans le modèle. Entre autres attributs des producteurs, il leur est assigné une liste des "cultures possibles" en fonction de leur classe d'appartenance. Ceci a pour avantage d'éviter toute dispersion quant au choix des cultures, mais présente aussi l'inconvénient d'"enfermer" parfois le producteur dans une courte liste de cultures possibles.

A défaut de n'avoir eu plusieurs années de données qui auraient permis un meilleur suivi quant à la rotation des cultures ou à la stratégie motivant le choix d'une culture pour un producteur donné, un mécanisme simple simulant une stratégie des producteurs a été mis en place (voir Figure 49). En fin de saison culturale, un producteur estime ses revenus (en soustrayant les charges de production de son produit brut d'exploitation) et évalue ses possibilités en termes d'investissement dans une culture plus rentable pour la prochaine saison. La culture la plus rentable du modèle ("*Model's best*")

*crop*", *MBC*) est celle qui a généré le plus de revenus au cours de la dernière simulation. Pour la saison culturale à venir, le choix par le producteur des cultures pour chacune de ses parcelles, se fera prioritairement en comparant les revenus générés par la culture la plus rentable du modèle (*MBC*) aux revenus générés par une des cultures de son historique lui ayant rapporté le plus ("*Farmer's all-time best crop*", *FABC*). Quel que soit son choix, il devra s'assurer que ses revenus lui permettent l'adoption de la culture choisie. En outre, si le choix du producteur se porte sur la culture la plus rentable du modèle (*MBC*), il devra s'assurer que cette culture fait partie de sa liste de "cultures possibles" ("*Farmer's possible crops*", *FPC*). Si les revenus du producteur sont bas et qu'il n'a aucune possibilité de choix parmi les cultures présentant les plus fortes marges brutes, alors il est contraint au choix (parmi ses "cultures possibles") de la culture présentant les plus faibles coûts de production, sa "culture par défaut" ("*Farmer's default crop*", *FDC*). Ce dernier choix est parfois corrélé aux plus faibles valeurs de marge brute. Ceci peut avoir un effet pervers, dans la mesure où la contrainte du choix d'une culture rapportant peu, peut maintenir d'année en année un producteur dans une constante, voire vers une banqueroute, si toutefois les prix de vente de ses produits fluctuaient considérablement vers le bas. Pour les producteurs ayant fait le choix d'une culture rentable (et pouvant assumer ce choix) pour la saison culturale à venir, il leur est donné d'ensemencer cette culture sur leur parcelle la plus grande (s'ils en possèdent plus d'une). Ceci est fait afin de leur permettre de maximiser leur rente.

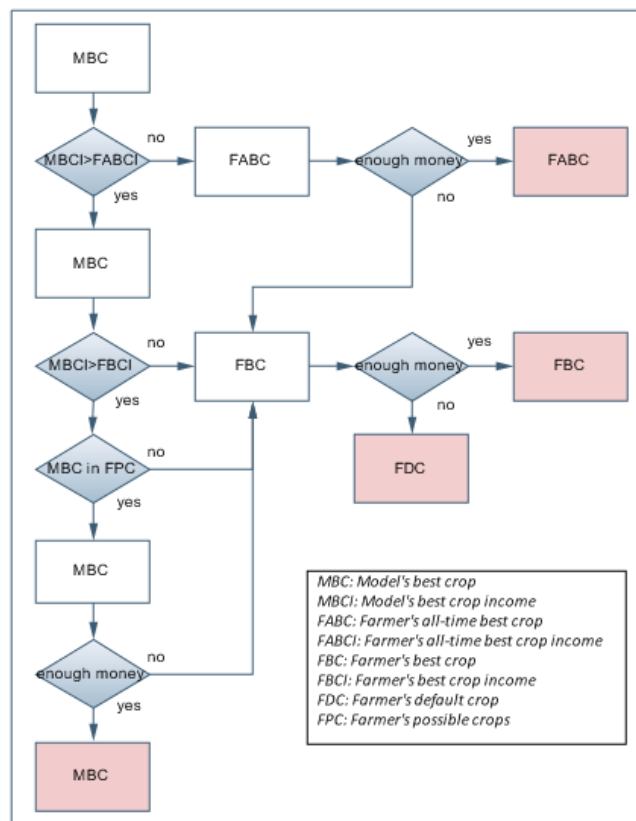


Figure 49. Processus de choix d'une culture pour la saison prochaine, à l'échelle du producteur

### 8.2.4 Les ressources en eau

Les ressources en eau au sein du modèle sont représentées par la rivière Kou et par la nappe souterraine. Ainsi, pour l'irrigation des cultures, deux grandes classes en termes d'exhaure seront considérées : l'irrigation par les eaux de la rivière qui désigne toute irrigation faite uniquement à partir de ces eaux ; l'irrigation par les eaux souterraines qui désigne toute irrigation impliquant les

eaux souterraines. Dans le cas de la seconde classe, on considère que le fait de recourir aux eaux souterraines en partie, ou entièrement, indique bien la possibilité de captage des eaux de l'aquifère.

Pour des besoins de simplification, la nappe est considérée comme étant constituée d'un aquifère unique, présentant en ses différents points des valeurs de piézométrie différentes. Les données ayant servi à la mise en place de la couche "eaux souterraines", proviennent de l'interpolation des données piézométriques de quelques essais de pompage dans des puits alimentés uniquement par les eaux souterraines<sup>37</sup>. Ces données n'étant pas continues dans le temps, il a fallu considérer des périodes de l'année, pour lesquelles les observations étaient les plus importantes et supposer alors que l'évolution de la piézométrie entre deux périodes consécutives choisies, était linéaire. Les périodes pour lesquelles les données de piézométrie étaient importantes, sont janvier, avril et juillet. Pour chaque cellule de l'espace, des équations linéaires ont été définies permettant de simuler l'évolution de la piézométrie entre janvier et avril, avril et juillet, et juillet et janvier. Ainsi, pour chacune des 18 333 cellules de l'espace, il existe 3 fonctions affines par morceaux, suivant les 3 intervalles de temps définis au cours de l'année. Ce modèle simplifié de nappe souterraine présente l'avantage de pouvoir être mis à jour très facilement, si des informations plus précises sur la piézométrie sont disponibles.

Le modèle de nappe étant simplifié, les écoulements au sein de la nappe ne seront pas pris en compte. Ainsi, les échanges entre la nappe et la rivière ne sont pas simulés.

Les valeurs de débits de la rivière ont été mesurées sur le Kou, durant l'année 2010. Des valeurs de débits existent pour l'amont et l'aval de la zone d'étude, mais pour les besoins de simulation par le modèle, seules les valeurs en amont importent. Ces valeurs alimentent l'écoulement de la rivière dans le modèle à chaque pas de temps, selon le jour julien correspondant. Les valeurs de débits observées en aval de la zone d'étude seront utiles (après simulation) pour une comparaison des débits simulés (à l'aval du modèle) par rapport aux débits observés.

Au-delà d'une distance de 200 m de la rivière, une parcelle est considérée comme étant irriguée à partir d'un puisard captant les eaux souterraines. Cette hypothèse s'explique en partie par le fait que la plupart des producteurs possède des motopompes usagées, ne leur permettant plus de capter et refouler de l'eau au-delà d'une certaine distance, fixée pour les besoins de l'étude à 200 m. Ces 200 m correspondent également à la limite moyenne de la largeur lit majeur de la plaine alluviale déployée de part et d'autre de la rivière Kou<sup>38</sup>. A cette distance, la pente du terrain (lit majeur) augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la rivière en direction des plateaux cuirassés, des buttes et glacis marquant l'extension latérale de la plaine alluviale. Le dénivelé topographique augmente la distance de refoulement des eaux drainées la rivière. Les paysans préfèrent alors prélever l'eau de la plaine alluviale à l'aide de puits et puisards. Il existe toutefois dans la réalité, bien de motopompes capables de refouler de l'eau à plus de 200 m, mais leur proportion reste faible au sein de la zone d'étude. De plus sur le terrain, l'une des stratégies d'irrigation pour les parcelles situées à plus de 200 m, n'est pas forcément le pompage ; il existe (si la configuration du terrain le permet), une possibilité de creuser dans le sol un canal partant de la rivière jusqu'au puisard de la parcelle, et acheminer ainsi l'eau de la rivière jusqu'au puisard, chargé de stocker cette eau en vue de son utilisation pour l'irrigation de la parcelle. On parle ici d'un type d'exhaure mixte, sachant que le puisard peut aussi être alimenté par les eaux de nappe, si celle-ci est peu profonde en ce point. Pour les besoins de l'étude, dont un des aspects les plus importants porte sur l'impact des prélèvements d'eau en rivière pour l'irrigation, il a paru intéressant de considérer des types

---

<sup>37</sup> L'étude complète sur la détermination de la disponibilité en eau dans les puisards, dans le cadre de la modélisation, est présentée en annexes.

<sup>38</sup> Communication orale, Élie Sauret

d'exhaure exclusifs. Il est à noter que la distance conditionnant le type d'exhaure, initialement fixée à 200 m, fera l'objet de variations, dans le cadre d'une analyse de sensibilité.

Comme indiqué plus haut dans le document (voir section 1.1.1.1, page 3), la relation entre la rivière et la nappe est encore en cours d'étude et la publication prochaine de conclusions formelles sur cette relation est attendue. Toutefois, dans le cadre de la présente étude, l'hypothèse retenue, reste que le système de l'écoulement de la rivière est sans perte (infiltration, évaporation). Il serait néanmoins simpliste de ne pas considérer que cette "conservation" soit la conséquence d'un équilibre du bilan hydrique de la zone d'étude. Dans l'hypothèse d'un bilan hydrique zonal en équilibre, on suppose alors que tout prélèvement excédentaire pour l'irrigation qui percole, rejoint probablement la nappe alluviale (si celle-ci est peu profonde), et finalement pourrait retourner (en partie) vers la rivière (dans une zone d'échange rivière-nappe) plus en aval et plus tard dans le temps.

L'efficience hydrique zonale est à différencier de l'efficience hydrique à la parcelle qui compare les quantités évapotranspirées aux quantités d'eau reçues par la parcelle. Cette efficience hydrique à la parcelle a été prise à 30%, suite aux travaux de terrain de Wellens et al. (2007). La prise en compte de l'efficience hydrique à la parcelle (30%) dans le modèle s'opère par un triplement (exactement 3.33) systématique des valeurs de besoins en eau, au moment de leur satisfaction.

L'espace des parcelles modélisées (154.5 ha) représente 24% par rapport à la réalité (648 ha). Ces 154.5 ha résultent de la prise en compte des superficies des parcelles secondaires et tertiaires. Avant la mise en œuvre des enquêtes socio-économiques, seules étaient disponibles les informations sur les superficies des parcelles principales. Celles-ci représentaient alors près de 15% des superficies réelles. Avec la prise en compte des superficies des parcelles secondaires et tertiaires, il apparaît désormais plus logique de faire l'hypothèse qu'un producteur dans le modèle bien que représentant 10 producteurs en termes stricts d'échantillonnage sur la population totale des producteurs, **en représente plutôt 4 quant aux aspects hydro agricoles**. En effet, l'occupation du sol étant l'un des principaux facteurs explicatifs des niveaux de prélèvement d'eau pour l'irrigation, il convient de s'aligner sur un rapport d'un producteur du modèle prélevant de l'eau dans la rivière pour 4. Ainsi, une irrigation faite à partir de la rivière est systématiquement multipliée par 4. Cela est fait, afin d'évaluer l'impact "réel" des prélèvements en rivière, sur les débits en aval. Par contre, dans le cas d'une irrigation à partir des eaux souterraines, le facteur multiplicatif 4 n'est pas utilisé. En effet, dans les hypothèses concernant la nappe, cette dernière est considérée comme étant infinie en termes de disponibilité en eau.

Conscient que c'est une distance-seuil fixée arbitrairement par l'utilisateur du modèle qui conditionne finalement dans le modèle le nombre de producteurs irriguant à partir de la rivière, au cours des simulations, l'efficience hydrique zonale sera fixée à 0.75 par défaut. Cette valeur sera appelée à fluctuer en fonction de la distance de la parcelle par rapport à la rivière. Une parcelle assez éloignée de la rivière, qui reçoit une sur-irrigation provenant des eaux de la rivière rallongera un peu plus le "cycle" de l'eau à l'échelle zonale, par rapport à une parcelle plus proche de la rivière. L'ajustement de l'efficience hydrique zonale servira de coefficient d'ajustement pour aligner les prélèvements simulés sur les prélèvements observés, lors d'une phase de calibration.

Les prélèvements d'eau dans la rivière se font sans limite (tel qu'observé dans la réalité). La seule limite possible est l'assèchement de la rivière. Par contre les prélèvements d'eau dans les puisards (eaux souterraines) ont été limités par jour, à 3 fois le volume d'eau d'un puisard (pour chaque cellule composant une parcelle). Ce chiffre moyen symbolise la possibilité au cours d'une journée pour un producteur, de vider l'équivalent d'un volume de puisard par cellules de parcelle jusqu'à 3 fois, et voir sa ressource se recharger autant de fois. Dans la réalité du terrain, tous les puisards ne sont pas équivalents en termes de capacité d'irrigation ou de recharge. Selon les quelques

observations faites, il existe des puisards à la capacité "illimitée" en ce sens que, soit le volume du puisard est de loin supérieur au volume des prélèvements journaliers, soit la vitesse de recharge permet une compensation assez rapide des prélèvements. A l'inverse, il existe des puisards pour lesquels le producteur est obligé de marquer des temps d'arrêts au cours de son irrigation, afin de permettre la recharge. La valeur de "*3 fois la capacité de puisard par cellules de parcelle*" proposée tente de trouver un équilibre "*volumes des puisards/temps de recharge*" qui pourrait être imposé à tous les puisards du modèle. Cette valeur est appelée à fluctuer au cours d'une phase de calibration.

Les dimensions des puisards ont été standardisées pour les besoins de la modélisation. Ainsi, la section des puisards est de 3 m x 3 m, soit 9 m<sup>2</sup>. La profondeur est de 4 m. La hauteur d'eau dans le puisard est variable. La valeur de la hauteur d'eau est gérée à chaque pas de temps par la fonction piézométrique décrite plus haut dans cette section. De ce fait, en fonction des conditions à l'initialisation du modèle, et de la fonction piézométrique spécifique à la cellule, le stock d'eau dans cette dernière peut s'avérer suffisant ou non pour l'irrigation d'un type de culture donné.

### 8.2.5 Les parcelles

Sur le terrain, il n'a pas été constaté une organisation ou un ordre particulier selon lequel puissent se faire les semis en début de campagne agricole. Les semis s'étalent sur le mois de janvier, voire février, et se font, a priori au gré des producteurs. Cette donnée sur les semis est prise en compte dans le modèle par le choix aléatoire en début de simulation, de 6 producteurs par pas de temps pour le semis, sur une de leurs parcelles. L'ensemble des parcelles répertoriées étant de 202, un choix de 6 producteurs engendre une période de semis de 33 jours, soit un peu plus que le mois de janvier. Pour les besoins d'une analyse de sensibilité, les choix de 4 à 8 producteurs pour le semis seront également considérés. Ceci équivaldrait à une période de semis comprise entre le 26<sup>e</sup> et le 51<sup>e</sup> jour julien. Pour un producteur possédant plus d'une parcelle au sein de son exploitation, une durée de 10 jours (chiffre arbitraire) a été fixée, pour séparer les dates de semis. Dans la réalité, la durée séparant l'ensemencement de deux parcelles appartenant à un producteur, dépend du nombre de personnes actives au sein du ménage ou de la main d'œuvre externe dont il peut bénéficier, ou tout simplement de la planification de ses travaux champêtres.

Lors de l'ensemencement d'une parcelle, le producteur responsable de la parcelle établit un calendrier d'irrigation pour celle-ci, allant jusqu'à la récolte. La fréquence choisie entre 2 irrigations consécutives est de 3 jours. Ce chiffre est en concordance avec les pratiques d'irrigation constatées sur le terrain : les parcelles sont irriguées 2 à 3 fois par semaine. Le modèle procède à chaque pas de temps à un calcul des besoins en eau de la parcelle. Ces besoins en eau sont cumulés sur 3 jours, et sont satisfaits tous les 3<sup>e</sup> jours d'une série cumulée.

Pour chaque parcelle, la récolte est faite par le producteur à la date inscrite dans sa mémoire et déterminée dès l'ensemencement de la parcelle. La récolte consiste alors à retirer toutes les cultures de la parcelle, à calculer le bilan économique de la parcelle, inscrire dans l'historique du producteur, le type de culture et la rente générée par la culture. Dans la pratique, la plupart des cultures font l'objet d'une vente sur le marché local ou sur des marchés distants. Dans les cas particuliers du maïs et du riz, il a été constaté qu'en moyenne 30% de la production du maïs était réservé pour la consommation du ménage du producteur, tandis que près de 50% du riz produit servait à la consommation du ménage. Ainsi, lors du bilan économique à la parcelle, il est tenu compte, pour le maïs et le riz, des proportions non vendues.

Sur le terrain, il a été constaté au sein de l'UAT de Bana, que des superficies de végétation naturelle étaient de plus en plus converties en parcelles de culture. C'est l'UAT qui a connu la plus grande croissance en termes de nombre d'exploitations créées au cours des années 2000. Ainsi au sein du

modèle, il a été pris en compte la possibilité pour un producteur de cette zone de procéder à une extension d'une des parcelles de son choix, à raison d'une cellule après 3 années consécutives de croissance économique continue sur la parcelle concernée.

Enfin, dans le modèle, les sols au sein des parcelles sont considérés comme étant homogène (argilo-limoneux). Cette simplification est faite en l'absence de données plus précises sur la nature et la qualité des sols à l'échelle parcellaire.

### 8.2.6 Le marché

Une forte composante économique existe au sein du modèle, et est gérée par un module "marché". Ce module est chargé de la fluctuation des prix de vente des cultures, basée sur la relation inversement proportionnelle entre l'offre sur le marché et les prix de vente. Le mécanisme de fluctuation des prix permet de faire varier le prix à la vente d'une culture autour de sa valeur moyenne. Ainsi, dès que les occurrences d'apparition d'une culture au sein du modèle dépassent 51% du total des cultures (soit la "majorité"), le module "marché" fait perdre à cette culture  $\frac{1}{4}$  de sa valeur, en affectant son prix de vente du facteur 0.75. A l'inverse, si l'occurrence d'apparition d'une culture est inférieure à 10% du total des cultures, son prix de vente est majoré du  $\frac{1}{4}$  de sa valeur (le prix de vente est affecté d'un facteur 1.25). Le module "marché" pourrait servir à matérialiser l'effet sur les stratégies des producteurs, des marchés externes (tels que celui de Ouagadougou, Bobo-Dioulasso, ou de la Côte d'Ivoire). Ce module "marché" pourra faire l'objet d'améliorations lorsque des données plus précises sur le fonctionnement de l'évolution des prix des denrées agricoles sur la zone seront disponibles.

## 8.3 Implémentation du modèle dans un environnement de programmation

Après la formalisation du système, vient l'étape de son implémentation au sein d'un environnement offrant des outils permettant la mise en œuvre effective du modèle. Dans le cadre de la présente étude, la plate-forme de développement choisie est CORMAS<sup>39</sup> qui elle-même utilise l'environnement de programmation *Cincom*® *VisualWorks*®. CORMAS est une plate-forme développée par l'équipe GREEN (Gestion des ressources renouvelables et environnement) du CIRAD. CORMAS est un environnement basé sur les systèmes multi-agents, pour l'exploration des interactions complexes entre dynamiques naturelles et sociales dans le domaine de la gestion des ressources naturelles. Les entités prédéfinies de CORMAS sont des classes génériques à partir desquelles, les utilisateurs peuvent créer les entités spécifiques à leur modèle.

CORMAS permet la gestion des scénarios. Cette gestion de scénarios peut se faire à l'initialisation et/ou à l'ordonnancement des simulations avec le modèle. Il est alors possible de définir des conditions différentes au lancement de la simulation ou de les définir de sorte à influencer la marche du modèle.

Un aperçu de l'interface graphique principale de CORMAS est disponible sur le site web CORMAS du CIRAD<sup>40</sup>.

---

<sup>39</sup> CORMAS : Common-pool Resources and Multi-Agent Systems

<sup>40</sup> <http://cormas.cirad.fr/fr/outil/presentation/>

## 8.4 Fonctionnement du modèle... en résumé

Le modèle simule les activités quotidiennes de 117 producteurs agricoles utilisant les ressources en eau de la zone d'étude pour leur production. Le modèle est conçu pour leur permettre de maximiser leurs rendements sous la seule contrainte financière<sup>41</sup>. Le modèle se focalise alors sur l'impact de leurs choix de production sur le débit de la rivière en aval de la zone d'étude.

Les simulations par le modèle se font en exécutant une liste de tâches à chaque pas de temps. L'exécution des tâches peut se faire selon deux niveaux : le niveau global et le niveau local.

Le niveau global est exécuté par la "super-classe", le superviseur du programme (alias "le chef d'orchestre"). C'est un module du programme possédant ses propres méthodes, mais pouvant avoir accès aux attributs et méthodes de toutes les entités du modèle. Le superviseur commande toutes les opérations du modèle, initialise les classes ou entités, leur fait accomplir des tâches spécifiques, etc. C'est le module central du programme.

Le niveau local concerne les entités du modèle. Etant pourvues d'attributs et d'actions, elles ont la possibilité d'exécuter certaines tâches de manière autonome et de transmettre les résultats au superviseur.

### 8.4.1 Langage de programmation

Le langage de programmation sur lequel se base CORMAS est le *Cincom® Smalltalk™*, un langage orienté objet<sup>42</sup>. Un objet est une collection de données regroupées de façon significative avec les opérations connexes, ou des morceaux de programmes, qui manipulent ces données (Lount, 2004).

Le *Smalltalk* a un concept puissant connu sous le nom "blocs" qui sont des extraits de code de programme qui sont également traités comme des objets, ce qui leur permet d'être utilisé comme n'importe quel autre objet (Lount, 2004).

Le *Smalltalk* est un langage interprété, l'environnement de développement dispose donc d'une machine virtuelle.

Quelques caractéristiques de *Smalltalk* :

- Tout est objet : Les chaînes de caractères, les entiers, les booléens, les définitions de classes, les blocs de code, les piles et la mémoire sont représentés en tant qu'objets.
- Les objets communiquent via message. Quand un objet reçoit un message, la méthode correspondante est recherchée dans la classe (et superclasse) du récepteur.
- Les règles de syntaxe de *Smalltalk* sont simples et cohérentes. Il s'agit d'un langage à la fois simple à lire et à écrire
- Les types sont dynamiques, pas besoin de définir des types dans le code, ce qui permet au langage d'être concis.
- Une classe peut hériter d'une seule autre classe (héritage simple).

---

<sup>41</sup> L'eau n'est pas un facteur limitant, a priori.

<sup>42</sup> La programmation orientée objet (POO), ou programmation par objet, est un paradigme de programmation informatique. Il consiste en la définition et l'interaction de briques logicielles appelées objets ; un objet représente un concept, une idée ou toute entité du monde physique (exemple : une voiture, une personne). Il possède une structure interne et un comportement, et il sait communiquer avec ses pairs. Il s'agit donc de représenter ces objets et leurs relations ; la communication entre les objets via leurs relations permet de réaliser les fonctionnalités attendues, de résoudre le ou les problèmes.

Une plus ample documentation sur le *Smalltalk* peut être trouvée sur les site web des fondations *GNU Smalltalk*<sup>43</sup>, *Squeak Smalltalk*<sup>44</sup> ou chez l'éditeur de logiciel *Cincom*<sup>45</sup>.

### 8.4.2 Entités du modèle

La liste complète des entités qui composent le modèle, leur type et leurs caractéristiques sont présentés dans le Tableau 52 ci-dessous. Un diagramme UML présente en Figure 50 les relations entre les entités du modèle.

Tableau 52. Description des entités du modèle

Types d'entité	Entités	Description
Spatial	<b>Cell</b>	Cellule. Entité élémentaire de l'espace. Élément pouvant faire partie de toute autre entité spatiale composée d'un ensemble de cellules
	<b>Plot</b>	Parcelle de culture. Entité spatiale composée d'agrégats de cellules ayant des attributs en commun et étant contiguës
	<b>Farm</b>	Exploitation. Entité composée d'agrégats de parcelles ayant des attributs en commun et n'étant pas spatialement connectées
	<b>River</b>	Rivière. Entité composée d'agrégats de cellules ayant des attributs en commun et étant contiguës
Social	<b>Farmer</b>	Producteur. Seul entité sociale du modèle. Entité ayant la faculté de communiquer, de percevoir, de se mouvoir
Passif	<b>Market</b>	Marché. Entité n'ayant pas une localisation dans l'espace, mais étant connectée aux entités 'Farmer' et 'Crop'
	<b>Puisard</b>	Puisard. Entité située sur une des cellules d'une parcelle (située à plus de 200 m de la rivière)
	<b>Crop</b>	Culture. Entité située sur les cellules des parcelles. Les cultures sont classées parmi les entités 'occupant la cellule'

Le formalisme UML est très utilisé pour la représentation graphique des entités, sous forme de diagramme des classes. Un diagramme des classes sous UML se présente sous 3 parties : le nom de la classe, les attributs de la classe et les méthodes (ou actions) de la classe (Debrauwer and Van der Heyde, 2005). A l'image des diagrammes de classe UML, toutes les entités du modèle se caractérisent par des attributs et des actions. En annexe de ce document sont présentés tous les attributs et toutes les actions de chaque entité du modèle.

Une documentation exhaustive sur UML peut être trouvée sur le site web *Object Management Group (OMG)*<sup>46</sup> qui assure la standardisation du langage.

### 8.4.3 Données d'entrée du modèle

Les données d'entrée du modèle sont multiples. Ce sont essentiellement des fichiers de données tabulaires sous forme de valeurs séparées par des virgules (type "\*.csv") ou des fichiers de grille générés par un SIG (type "\*.asc" ou "\*.env") contenant :

- des informations sur les besoins en eau pour chaque type de culture simulé par le modèle ;
- des valeurs journalières des débits moyens à l'entrée de la zone d'étude ;
- des revenus agricoles et non agricoles (de la saison précédente) pour chaque agriculteur ;
- la carte de situation des parcelles et de la rivière ;
- la carte initiale piézométrique de la zone représentée dans le modèle.

<sup>43</sup> <http://smalltalk.gnu.org/documentation>

<sup>44</sup> <http://www.squeak.org/Documentation/>

<sup>45</sup> <http://www.cincomsmalltalk.com/main/products/documentation/>

<sup>46</sup> <http://www.uml.org/>

#### **8.4.4 Sorties du modèle**

L'avantage que procure cette modélisation en CORMAS est la possibilité de pouvoir observer en sortie, presque toutes les valeurs des attributs de chaque entité du modèle. Toutefois, afin de ne pas générer une pléthore de sorties, il convient de se focaliser sur celles permettant de juger au mieux de la performance du modèle, au regard des objectifs fixés. Ainsi, le débit en aval du système, les revenus des producteurs, l'évolution de l'occupation du sol, le niveau des eaux souterraines, seront les principales sorties suivies. L'étude du "débit à l'aval de la zone d'étude" du modèle, permet d'évaluer les conséquences d'une marche choisie (ou scénario) du modèle.

#### **8.4.5 Pas de temps du modèle**

Le pas de temps choisi est la journée. Les données d'entrée tels que les débits de la rivière sont au pas de temps journalier. Les données de hauteur d'eau dans le sol ont été estimées au pas de temps journalier. Ainsi le modèle effectue des simulations de cycles de 365 jours correspondant à une année. Le choix d'un cycle de 365 jours, plutôt que 180 jours (durée approximative de la contre-saison) vient de la prise en compte de la culture de la banane qui est une culture presque annuelle (un cycle d'un peu plus de 11 mois).

Dans un souci de simplification, les données du modèle ont donc été adaptées au pas de temps journalier.

Dans les analyses des résultats des simulations, un focus sera fait sur les données des 180 premiers pas de temps de chaque cycle, car toutes les cultures du modèle (à l'exception de la banane) voient leur cycle compris dans cet intervalle.

#### **8.4.6 Initialisation du modèle**

L'initialisation du modèle consiste en l'initialisation de toutes les entités du modèle et de toute méthode que l'utilisateur choisit d'initialiser. A l'initialisation, les entités "cellule", "rivière", "parcelle", "exploitation", "marché", "producteur" sont créées suivant les règles spécifiées lors de l'encodage du programme.

Plusieurs modes d'initialisation sont programmables par l'utilisateur en fonction des situations initiales possibles rencontrées dans la réalité. Dans le modèle conçu dans le cadre de la présente étude, un seul type d'initialisation est possible.

#### **8.4.7 Mise en route du modèle et choix de scénario**

Lors de la mise en route du modèle, l'utilisateur a le choix de la situation initiale programmée, qu'il souhaite simuler, ainsi que le type de marche du modèle, si plusieurs types de marche ont été programmés. En fonction des conditions réelles qui peuvent connaître des changements (réels ou supposés), on peut être amené à vouloir explorer les conséquences d'un type de marche.

Le choix du type de situation initiale, combiné au type de marche du modèle, sont les bases des scénarios possibles au sein du modèle. CORMAS gère la notion de scénario aux deux niveaux, à savoir, l'initialisation et la marche.

Le modèle tel que conçu fonctionne suivant des cycles de 365 pas de temps. Il est capable de simuler 3 années consécutives (soit 1095 pas de temps).

Au cours des 3 années (ou cycles) consécutives simulées, les paramètres liés aux ressources en eau restent constants d'une année à l'autre. Ainsi, au début d'une nouvelle année, les données de débits de la rivière sont réinitialisées. De même que les données liées à la piézométrie. Ceci est une contrainte induite par le peu d'observations de données hydrologiques disponibles.

#### 8.4.8 Déroulement d'un pas de temps du modèle

Sur un pas de temps, le modèle exécute un certain nombre de routines. Ces routines peuvent être exécutées au niveau du superviseur du modèle, ou au niveau des entités. Le schéma général du déroulement d'un pas de temps du modèle est présenté en Figure 51.

**Écoulement de l'eau dans la rivière à partir du débit à l'amont.** Un algorithme a été écrit pour simuler l'écoulement de l'eau dans la rivière. L'algorithme affecte à la première cellule en amont de la rivière, une valeur de débit à chaque pas de temps (jour). La valeur affectée à la cellule la plus en amont est diffusée (au cours d'un seul pas de temps) vers la cellule la plus en aval, sur laquelle une sonde est placée, afin de vérifier le bon fonctionnement de l'algorithme. Le système est considéré sans pertes (par écoulement latéraux ou infiltration dans le lit). Le débit en aval est égal au débit en amont si aucun prélèvement n'a été effectué au cours du pas de temps. En chaque cellule de rivière, le calcul du débit s'effectue selon la loi des nœuds : le débit d'une cellule considérée est égal au débit de la cellule précédente<sup>47</sup>, ôté d'un éventuel débit de prélèvement si la cellule en question est un point d'accès à l'eau pour une parcelle environnante. La valeur du débit en aval est un indicateur de performance de l'optimisation de l'utilisation de l'eau. Un débit inférieur ou égal à 0 m<sup>3</sup>/s provoque un arrêt brusque du modèle. Cette dernière instruction s'avère utile afin de limiter le volume de prélèvement, ou le nombre de producteurs effectuant simultanément un prélèvement d'eau pour l'irrigation.

**Attribution de la valeur de la hauteur d'eau (dans le sol) pour chaque cellule de la grille.** Cet algorithme attribue à chaque cellule de la grille, une valeur de hauteur d'eau dans le sol, à chaque pas de temps. Pour chaque cellule, la fonction simulant la hauteur d'eau dans le sol est une fonction définie sur 3 intervalles de temps, au cours du cycle de 365 pas de temps. Les pas de temps 109, 200 et 365 correspondent à des temps de changement des pentes et des ordonnées à l'origine, des fonctions exprimant la hauteur d'eau au cours de l'année.

**Semis sur les parcelles.** Cet algorithme choisit aléatoirement  $k$  producteurs par pas de temps, pour le semis. La valeur de  $k$  a été fixée arbitrairement à 6, afin qu'au bout de 34 pas de temps, l'intégralité des 202 parcelles du modèle soit ensemencée. Ce qui équivaldrait dans la réalité, à un semis étalé sur l'ensemble du mois de janvier, premier mois de la contre-saison. Le semis se fait avec marquage des dates de semis et récolte. Les semis sur les deuxième et troisième parcelles d'un producteur sont décalés respectivement de 10 et 20 jours par rapport à ceux de la première parcelle.

**Attribution journalière des valeurs des besoins en eau par type de culture.** Cet algorithme lit dans un fichier externe les valeurs des besoins en eau de chaque culture, pour la date concernée et les attribue aux cultures concernées.

**Calcul journalier des besoins en eau au niveau des parcelles.** Algorithme de calcul des besoins en eau de la parcelle, pour chaque pas de temps.

**Prélèvement d'eau pour l'irrigation des parcelles à partir des puits.** Algorithme effectuant les calculs des besoins totaux pour chaque parcelle et prélevant de l'eau dans le sol (via les puits)

---

<sup>47</sup> Cellule adjacente la plus en amont, selon le sens d'écoulement de l'eau dans la rivière

pour l'irrigation. Les efficacités d'irrigation sont fixées à 30%. Les parcelles irriguées sont celles pour lesquelles il y a une correspondance entre le pas de temps du modèle et la programmation selon le calendrier d'irrigation de la parcelle. Enfin cet algorithme calcule d'avance la demande en eau d'irrigation pour les parcelles irriguées à partir de la rivière. Il en résulte des requêtes au niveau des cellules "point d'accès pour l'irrigation" de la rivière, qui seront prises en compte à l'étape suivante.

**Mise à jour des débits de la rivière.** Algorithme mettant à jour toutes les valeurs de débit des cellules de la rivière à partir de la valeur de débit de l'amont et des requêtes dans les différents "points d'accès pour l'irrigation".

**Prélèvement d'eau pour l'irrigation des parcelles à partir de la rivière.** Algorithme effectuant le prélèvement d'eau en rivière pour l'irrigation des parcelles proches de la rivière (moins de 200 m). La demande en eau a été précédemment calculée. On considère qu'un producteur proche de la rivière prélève de l'eau pour 4 producteurs "virtuels".

**Actualisation des prix sur le marché.** Algorithme de fluctuation des prix de vente des cultures. La valeur des cultures sur le marché est actualisée au pas de temps 80, en fonction de l'offre disponible. Le pas de temps 80 intervient en cours de campagne agricole de contre-saison, peu avant les premières récoltes.

**Récolte progressive et bilan.** Cette procédure consiste à "forcer" les producteurs dont une parcelle est prête à être récoltée (selon la date de semis et la longueur du cycle de la culture), à le faire et à sortir ladite parcelle du système. Après la récolte sur une parcelle, le bilan économique de la parcelle est fait et est stocké dans la mémoire du producteur.

**Choix de la culture de la saison prochaine et réinitialisation partielle.** Au 365<sup>e</sup> pas de temps, chacun de producteurs en fonction de ses gains et de ses ressources de production, fait le choix stratégique de la culture censée lui permettre de maximiser ses gains au cours de la campagne agricole prochaine. Une réinitialisation partielle des attributs des producteurs et de leurs parcelles est faite, afin que des attributs utilisés au cours d'une campagne ne soient pas automatiquement reconduits pour la campagne suivante. Ces attributs concernent par exemple, pour les producteurs, les calendriers d'irrigation, et pour les parcelles, les compteurs de stress, les dates de semis, l'occupation du sol, les besoins en eau de la parcelle.

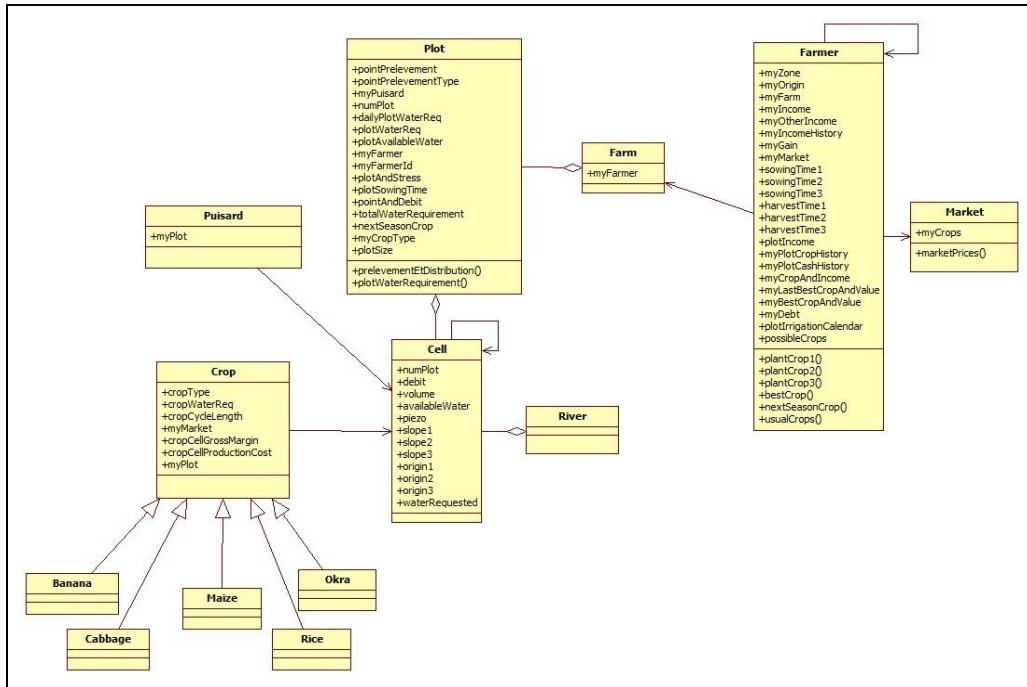


Figure 50. Diagramme UML représentant les entités du modèle, et leurs relations

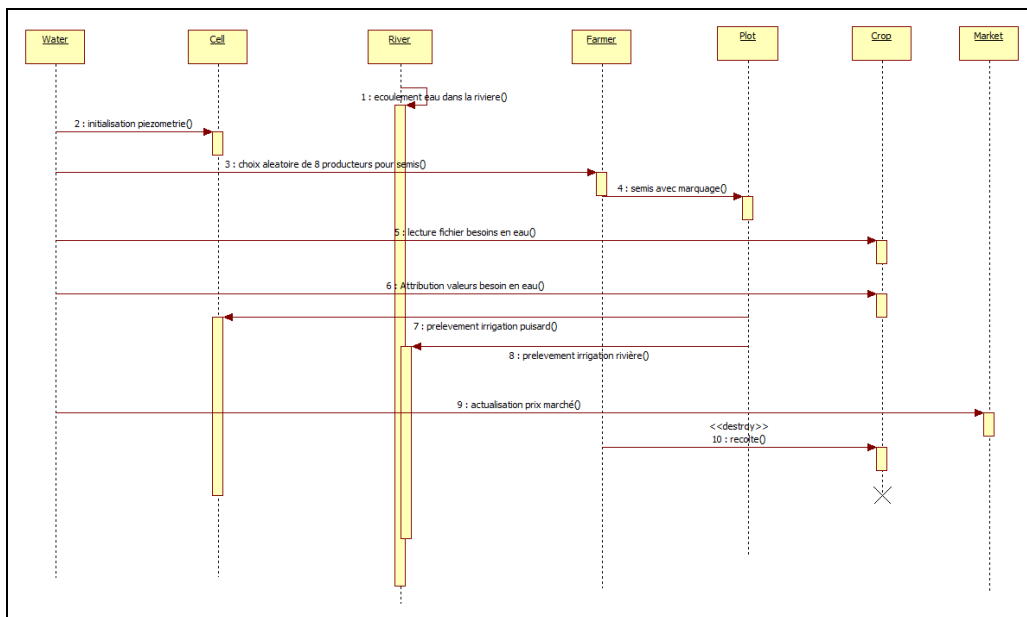


Figure 51. Diagramme de séquence représentant le déroulement d'un pas de temps du modèle

## Chapitre 9. Evaluation du modèle

L'évaluation du modèle utilisé dans le cadre de la présente étude, repose principalement sur deux points fondamentaux : l'évaluation des sorties du modèle et l'évaluation de la logique des sorties du modèle, logique en rapport avec la réalité du terrain.

Le modèle dans sa définition est plus un modèle exploratoire, qu'un modèle prédictif. Son utilité est de permettre d'explorer les conséquences des choix des agents du modèle. Etant construit sur la base d'une représentation de la réalité, il a suivi le schéma classique de la perception d'un phénomène à sa modélisation, qui inclut sa mise en équation et/ou son encodage.

Toutefois l'approche pour l'évaluation d'un tel modèle exploratoire est assez particulière, car le propre d'une modélisation basée sur les systèmes multi-agents est d'étudier, en fonction de l'autonomie dont jouissent les agents, l'impact de leur comportement, de leurs décisions, en réponse aux stimuli qu'ils reçoivent, ou des situations demandant une prise de décision.

Il serait a priori difficile de prévoir avec exactitude les choix qui seront faits par les agents du modèle. De ce fait, une évaluation classique de modèle, passant par une calibration et une validation ne saurait s'appliquer ici. On est plutôt dans une vérification de la construction du modèle et une évaluation des résultats afin de s'assurer qu'ils sont logiques par rapport à la réalité simulée.

D'une manière générale, d'après Beck (2002), les questions essentielles à se poser dans le cadre de l'évaluation d'un modèle, sont les suivantes :

- Le modèle a-t-il été construit sur les bases d'hypothèses solides ?
- Est-ce que le comportement du modèle simule bien la réalité ?
- Est-ce que le modèle réalise le but pour lequel il a été conçu ?

Après l'approbation de la formalisation ayant conduit à l'encodage des entités représentées dans le modèle, la vérification du modèle se fera par l'analyse des résultats générés par le modèle en sortie. Afin de s'assurer de la fiabilité et de la stabilité des résultats, donc de la robustesse du modèle, une analyse de sensibilité sera mise en œuvre. L'analyse de sensibilité est un processus par lequel on évalue la robustesse d'un modèle en examinant comment les résultats de l'analyse varient lorsque la valeur des variables clés est modifiée dans un intervalle déterminé (Saltelli, 1999 ; Ducauze et al., 2009).

Quatre sorties ont été retenues et feront l'objet d'analyses. Ce sont :

- **Les débits en aval de la rivière.** Une meilleure connaissance de l'hydrologie du bassin versant du Kou fait partie des préoccupations des gestionnaires des ressources en eau de la zone d'étude. L'optimisation recherchée dans la gestion de l'eau de la rivière Kou passe obligatoirement par une meilleure satisfaction des besoins en eau en aval du bassin versant (et bien sûr au sein de la zone d'étude). Le présent travail s'inscrivant dans cette ligne, il importe d'étudier les débits en aval générés par le modèle afin de s'assurer qu'ils s'alignent sur les valeurs observées et que leur tracé se rapproche du tracé des valeurs réelles observées.
- **L'occupation du sol.** L'étude de l'occupation du sol s'avère très importante dans le suivi des tendances en ce qui concerne les superficies occupées par les cultures suivies dans cette étude. Cette sortie prise d'une année à l'autre, renseigne sur les choix de culture des producteurs. Leurs choix de production ayant un impact sur leurs prélèvements d'eau dans la rivière.

- **Les revenus des producteurs.** Les revenus des producteurs constituent la sortie la plus importante, après celle des débits en aval. En effet, la zone d'étude est connue pour son activité agricole rentable. Ceci a justement constitué un attrait pour bien de producteurs allochtones, venus de la ville ou de contrées lointaines, en vue d'y faire fortune. La rentabilité (aussi faible soit-elle) est nécessaire au maintien de l'activité agricole dans la zone.
- **Les eaux souterraines.** La question des eaux souterraines, bien que peu précise dans cette étude, reste d'une grande importance dans la mesure où ces eaux sont potentiellement une alternative réelle aux ressources en eaux de surface qui sont limitées. Le module de simulation des eaux souterraines est un module de **simulation de la disponibilité de l'eau dans le sol**. A ce titre, l'intérêt de cette sortie est de montrer si les eaux souterraines sont satisfaisantes ou non pour la production agricole dans la zone d'étude.

Enfin, une analyse de sensibilité permettra de montrer les variables d'entrée ou les paramètres auxquels le modèle est le plus sensible.

## 9.1 Protocole adopté pour les simulations

Pour chacune des sorties suivies, l'analyse des résultats des simulations s'est faite sur la base d'un nombre de 10 simulations. Chaque simulation concerne un set de 3 cycles consécutifs de 365 pas de temps. Le nombre de simulations choisi s'est montré suffisant, pour permettre de tirer de premiers constats ou même des conclusions plus ou moins définitives.

Les conditions standard de simulation sont les suivantes :

- Le nombre de producteurs choisis aléatoirement pour les semis par pas de temps (en début de cycle) est de 6
- La distance-seuil à la rivière conditionnant le type d'exhaure des parcelles est de 200 m
- Le nombre de prélèvements virtuels associés au prélèvement en rivière d'un producteur est de 4

L'essentiel des données d'analyse porte (pour chaque cycle simulé) sur les 180 premiers pas de temps, censés représenter les mois de la saison agricole de contre-saison (janvier à juin).

Les analyses de résultats sont pour la plupart de nature statistique et ont été faites à l'aide du programme SAS® JMP®.

## 9.2 Occupation du sol

Les distributions des types de cultures composant l'occupation du sol au sein du modèle montrent exclusivement la présence de 4 types de culture (sur les 5 types existant dans le modèle) : la banane, le maïs, le gombo et le riz. Le chou n'est jamais choisi par les producteurs au cours des simulations.

Les distributions montrent en général une très forte présence de cultures de maïs, ce qui reflète assez bien la réalité observée sur le terrain (47% dans le modèle contre 52% dans la réalité). La seconde culture la plus représentée est la banane (20% à 27% dans le modèle, contre 19% dans la réalité). Puis viennent le riz (11% à 18% dans le modèle, contre 2% dans la réalité) et le gombo (12% à 13% dans le modèle contre 8% dans la réalité) (voir Tableau 53). Ces proportions concernent pour chaque producteur les parcelles principale, secondaire et tertiaire (si ces deux dernières existent) et diffèrent quelque peu de celles issues de l'enquête socio-économique qui ne prenait en compte que les superficies des parcelles principales.

Tableau 53. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures, toutes simulations confondues (10 répétitions)

Année 1			Année 2			Année 3		
Crop	Count	Prob	Crop	Count	Prob	Crop	Count	Prob
banana	422	0.209	banana	501	0.248	banana	562	0.278
maize	969	0.480	maize	956	0.473	maize	953	0.472
okra	258	0.128	okra	274	0.136	okra	277	0.137
rice	371	0.184	rice	289	0.143	rice	228	0.113
Total	2020	1	Total	2020	1	Total	2020	1

La culture de riz au sein du modèle joue un rôle assez particulier dans la mesure où sa part d'occupation du sol est largement surévaluée. Derrière cette surévaluation de la présence de la culture de riz, se cache un ensemble de cultures minoritaires qui n'auraient pas pu être représentées, tant leurs occurrences sont faibles.

Toutefois une surévaluation de la part de la culture de riz dans l'occupation du sol n'est pas sans conséquences sur les prélèvements d'eau au cours des simulations, dans la mesure où les besoins en eau du riz sont très élevés, plus élevés que ceux d'une culture comme la banane. Ce fait a alors tendance à introduire un biais au niveau de l'estimation des prélèvements d'eau pour l'irrigation, au sein du modèle.

Afin d'évaluer le mieux possible l'impact de l'occupation du sol sur les débits en aval, les parcelles de cultures ont été scindées en deux groupes distincts : les parcelles irriguées par les eaux de surface et les parcelles irriguées uniquement à partir des eaux souterraines. Les parcelles irriguées à partir des eaux de surface sont celles qui ont un impact direct sur les débits en aval.

Il ressort de l'analyse des résultats de simulation de l'occupation du sol, que quels que soient le mode d'exhaure et l'UAT, la tendance globale sur 3 années consécutives est à l'augmentation des superficies des cultures de bananes, au détriment des cultures de riz (et donc du groupe des cultures confondues à celle du riz). Les cultures de maïs et de gombo, elles, restent stables ou connaissent quelques petites variations autour d'une valeur moyenne. C'est au sein de l'UAT de Diaradougou que les superficies de cultures de riz sont converties le plus en cultures de banane (voir Tableau 55). Derrière ce constat se trouve encore illustré le niveau économique des producteurs de Diaradougou relativement élevé, leur permettant la possibilité d'opter sans trop de problème pour les cultures qui leur rapportent le plus, tant qu'ils disposent du savoir-faire nécessaire à l'adoption de ces nouvelles cultures.

En considérant spécifiquement chaque type d'exhaure, c'est au niveau de l'irrigation par les eaux de surface que les superficies en banane croissent le plus vite. Les superficies en culture de riz évoluent presque autant, mais de manière inversement proportionnelle (voir Tableau 57).

Tableau 54. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures au sein de l'UAT de Bana, toutes simulations confondues

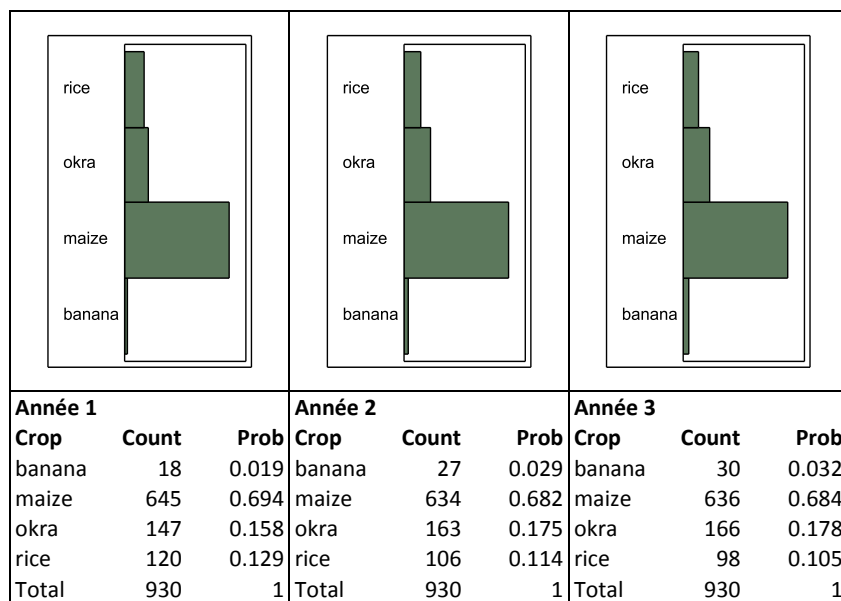


Tableau 55. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures au sein de l'UAT de Diaradougou, toutes simulations confondues

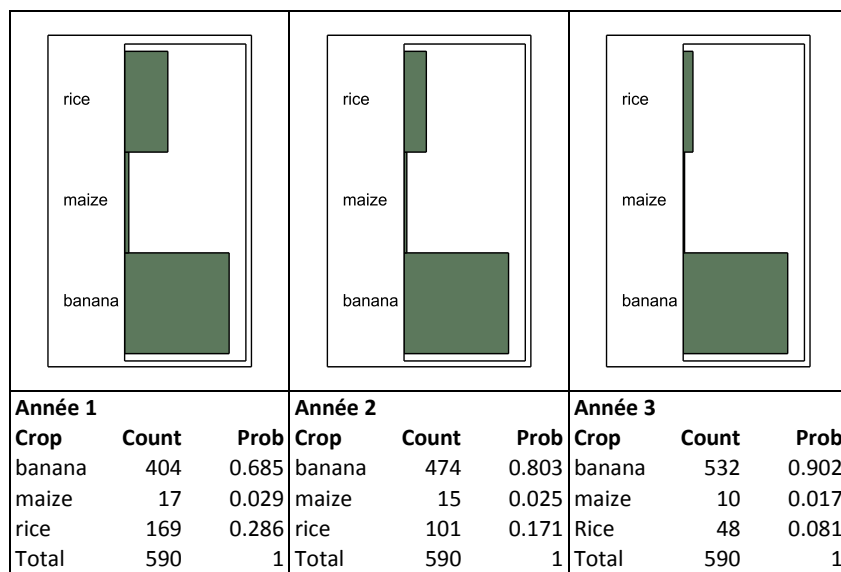


Tableau 56. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures au sein de l'UAT de Sambla-Toukoro, toutes simulations confondues

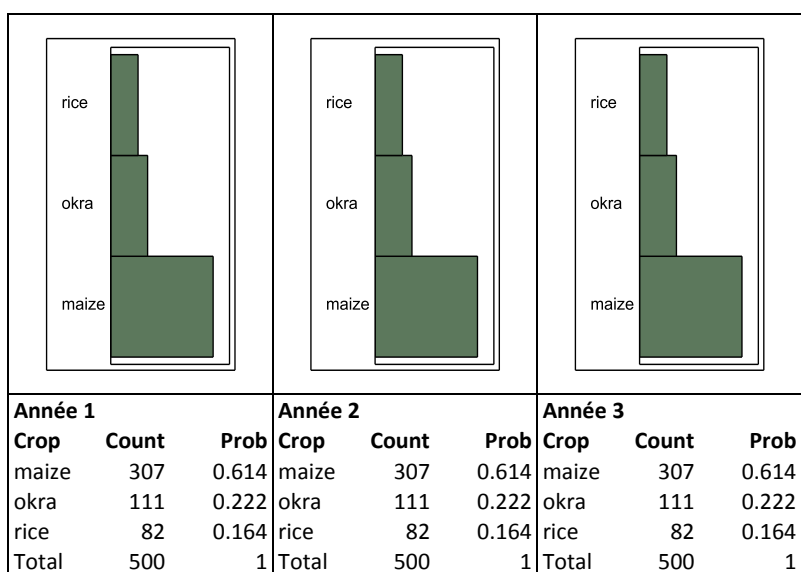
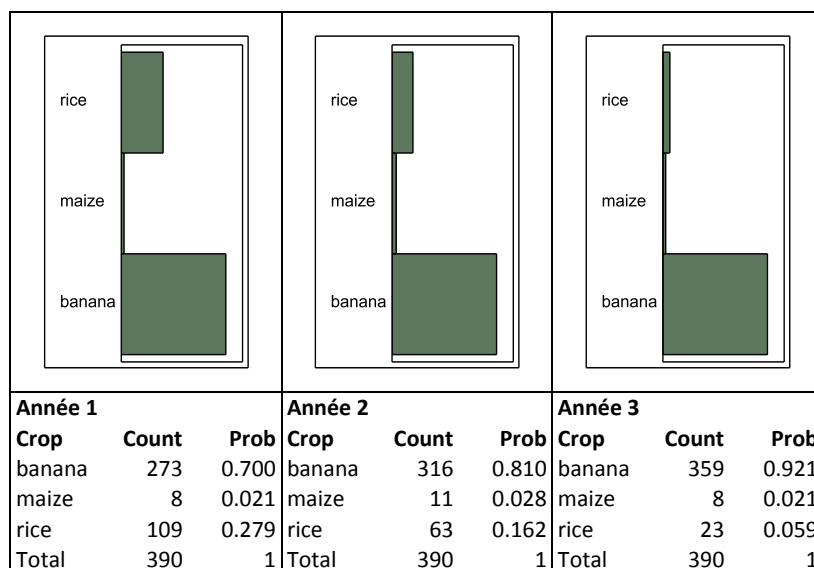


Tableau 57. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures irriguées par les eaux de surface au sein de l'UAT de Diaradougou, toutes simulations confondues



D'une manière générale, l'analyse qui peut être faite de l'évolution de l'occupation du sol est qu'il existe une tendance à l'augmentation des superficies des cultures à forte marge brute et facilement vendues sur le marché, dans les limites (financières, foncières, spatiales) possibles. Ceci est bien illustré (au sein du modèle) par la culture de la banane qui est possible au sein des UAT de Bana et Diaradougou, et ce indépendamment de la qualité du sol (qui en cas de pauvreté est très vite amendé !). Les superficies occupées par cette culture évoluent très vite. La culture de gombo pourrait elle aussi voir ses superficies occupées évoluer de la sorte, si ses exigences en matière de qualité de sol n'étaient pas perçues comme étant aussi complexes par les producteurs de Diaradougou, si elle avait les mêmes facilités de commercialisation (demande) sur le marché, que la banane. De ce fait, les superficies occupées par la culture de gombo y restent assez limitées.

La culture de maïs doit sa grande représentation dans le modèle (comme dans la réalité) au fait qu'elle soit praticable au sein des 3 UAT et qu'elle passe même pour être une "culture par défaut", qui sert à la fois de produit vivrier et de produit de rente.

La diminution des superficies en riz au sein du modèle est probablement due aux règles fixées pour cette culture, qui veulent que près de 50% de la production soit gardée pour l'alimentation du ménage. Ce chiffre est issu des statistiques en matière de gestion des récoltes. Ceci ne laisse alors qu'une part de 50% de la production de riz, destinée à la vente. Le riz n'étant pas une culture à forte marge brute du fait de la concurrence du riz massivement importé d'Asie, il s'ensuit que d'année en année, des producteurs décident de substituer à cette culture, d'autres cultures plus rentables.

Les parts de production de riz au sein de la zone d'étude, étaient faibles à inexistantes, il y a quelques années. L'engouement pour cette culture n'est revenu qu'à la faveur des récentes crises alimentaires (2007-2009. Voir Loada, 2008) qui ont frappé le Burkina Faso. Le riz étant un produit de grande consommation à l'échelle nationale et sa disponibilité faisant alors défaut à cette période, certains producteurs opportunistes dans la zone d'étude y ont vu une occasion d'amélioration de leurs rentes en choisissant de pratiquer de nouveau cette culture.

Ceci illustre bien le fait que l'agriculture irriguée de rente au sein du bassin versant du Kou, ait tendance à être très influencée par la demande des marchés extérieurs. Et cette tendance est bien représentée dans le modèle. La tendance à la diminution de la production de riz, observée dans les simulations, pourrait être alors facilement inversée s'il arrivait, par le biais de la demande des marchés, que la marge brute de la culture de riz soit réévaluée.

Sur la base des marges brutes dégagées pour chaque culture, il apparaît que les producteurs au sein du modèle ne font pas le choix de pratiquer la culture de chou. Cette dernière présente une marge brute inférieure à celle du riz.

L'occupation du sol telle que représentée au sein du modèle, fait l'impasse sur les cultures très minoritaires rencontrées dans la réalité. Cette impasse profite surtout à la culture du riz, ce qui rend réduit la fiabilité de l'occupation du sol dans le modèle à 95% (par rapport aux observations réelles).

Toutefois, malgré ce manque de précision de l'occupation du sol, il ressort que cette occupation reste bien corrélée aux débits simulés. En effet, les simulations sur 3 années consécutives montrent une tendance à la réduction des superficies en cultures de riz, au profit surtout des superficies en cultures de bananes. L'impact sur les débits en aval est le suivant : les besoins en eau du riz étant plus élevés que ceux de la banane, une évolution inversement proportionnelle d'une de ces deux cultures par rapport à l'autre, engendre une diminution globale des volumes prélevés pour l'irrigation. Cette diminution a tendance à améliorer les indicateurs de performance (voir Tableau 58, page 111) du modèle, concernant l'aspect hydrologique. Une des conclusions qui peut être tirée à ce stade est que **le modèle surestime les prélèvements d'eau au cours des années 1 des simulations et tend à les "corriger" au cours des années 2 et 3.**

### 9.3 Débits en aval de la rivière

L'évaluation de cette sortie a consisté, à l'image de ce qui se fait couramment en modélisation hydrologique, à comparer les débits simulés par le modèle, aux débits observés sur la portion de la rivière limitée à la zone d'étude. Trois indicateurs ont été utilisés à cet effet : le coefficient de corrélation entre les deux séries, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le critère de Nash-Sutcliffe (Nash and Sutcliffe, 1970).

Le coefficient de corrélation recherche l'intensité de la liaison qui peut exister entre les débits simulés et les débits observés.

L'erreur quadratique moyenne, est la somme arithmétique des carrés des écarts entre les valeurs simulées et les valeurs observées.

Le critère de Nash-Sutcliffe exprime la proportion de variance des débits expliqués par le modèle. En d'autres termes, ce critère exprime la différence relative entre l'erreur du modèle testé et l'erreur d'un modèle de référence, défini par la moyenne des débits. Plus la valeur du critère est proche de 1, meilleur est l'accord entre la simulation et l'observation (Picouet et al., 2009).

Tableau 58. Evaluation des simulations de débits en aval de la zone d'étude par des indicateurs de performance (pour 10 répétitions)

Indicateurs de performance	Années	Min	Max	Moy.
Nash	Année 1	0.347	0.382	0.367
	Année 2	0.355	0.399	0.374
	Année 3	0.348	0.403	0.375
RMSE (m <sup>3</sup> /s)	Année 1	0.239	0.256	0.244
	Année 2	0.235	0.245	0.240
	Année 3	0.236	0.242	0.239
R <sup>2</sup>	Année 1	0.477	0.495	0.484
	Année 2	0.476	0.505	0.487
	Année 3	0.479	0.501	0.489

Les résultats pour chaque simulation montrent que les moyennes des indicateurs tendent à s'améliorer au fil des ans (voir Tableau 58). Cette tendance serait l'effet de changements systématiques de l'occupation du sol pour une grande majorité de producteurs, pour les années 2 et 3.

Les coefficients de détermination (R<sup>2</sup>) ne dépassent pas 0.5, et les valeurs du critère de Nash ne dépassent pas 0.4. Ces dernières valeurs étant éloignées de la valeur 1, on peut en conclure que le modèle ne simule pas avec précision les débits en aval. Les valeurs de RMSE restent moyennement élevées et tendent à baisser légèrement pour les années 2 et 3. Les Figure 52, Figure 53 et Figure 54 montrent que les allures se ressemblent par endroits, et surtout, qu'il existe un décalage systématique entre les valeurs simulées et les valeurs observées pour une grande période de la saison des pluies.

Les paliers observables entre les 120<sup>e</sup> et les 180<sup>e</sup> pas de temps correspondent à des périodes pour lesquelles, il n'existe pas de données de débits observées selon un pas de temps journalier. Les données disponibles sont au pas de temps mensuel, occasionnant ainsi des paliers pas vraiment cohérents, qui affectent les indicateurs de performance.

Un autre décalage notoire existe en début de simulation entre les débits simulés et les débits observés en aval, au sein du modèle. Ce décalage s'explique par les hypothèses retenues au niveau de la partie hydrologique du modèle : en début de simulation (état initial) l'occupation du sol est nulle. Elle se définit au cours des 30 à 40 premiers pas de temps. Dans la réalité, le début de la campagne agricole de contre-saison ne coïncide pas toujours avec le 1<sup>er</sup> janvier de chaque année. Ce qui suggère une occupation du sol souvent antérieure à cette date et donc, un volume de prélèvement non-nul à la même date. Ce prélèvement est de 0.37 m<sup>3</sup>/s pour les données hydrologiques utilisées (voir Tableau 4, page 30).

**Note :** En excluant les paliers compris entre les 120<sup>e</sup> et les 180<sup>e</sup> pas de temps de l'analyse de performances, les indices s'améliorent considérablement (de l'ordre de 0.5 à 0.7 pour le critère de Nash et de 0.13 à 0.16 m<sup>3</sup>/s pour le RMSE). Dans l'état actuel du système il est difficile d'obtenir des mesures de débits à l'échelle journalière sur la zone d'étude, durant la saison des pluies dans la mesure où une partie non-négligeable de la zone se situe sur le lit majeur de la rivière. De ce fait, des inondations sont très fréquentes sur la zone d'étude, rendant difficile tout accès et toute mesure de débits.

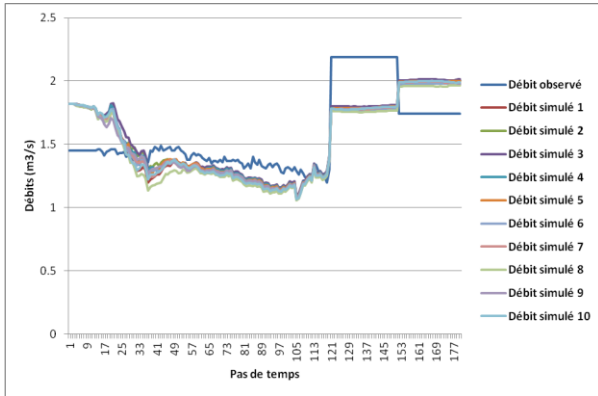


Figure 52. Débits avalés simulés vs. Débits avalés observés année 1

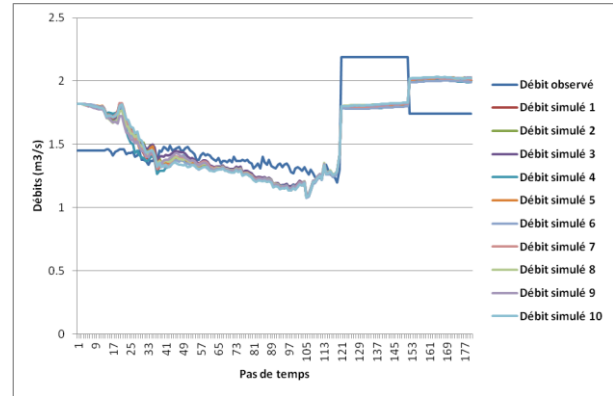


Figure 53. Débits avalés simulés vs. Débits avalés observés année 2

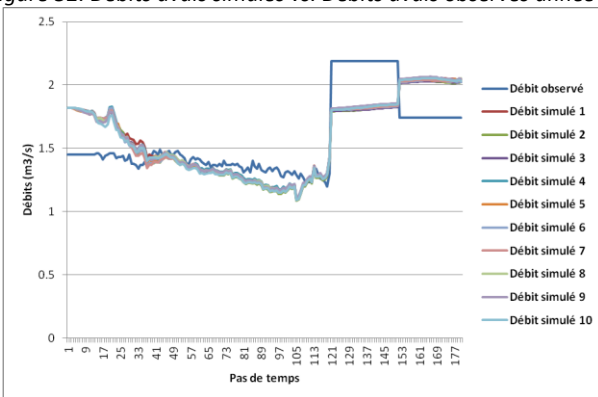


Figure 54. Débits avalés simulés vs. Débits avalés observés année 3

L'analyse des prélèvements simulés ("**débit entrant observé - débit sortant simulé**") montre que les prélèvements moyens (sur les 180 premiers pas de temps) connaissent une baisse entre l'année 1 et l'année 3 (voir Tableau 59). Cette évolution dans les prélèvements moyens d'une année à l'autre est fortement dépendante de l'occupation du sol qui connaît des changements importants (notamment la réduction d'année en année des superficies de culture de riz - voir Tableau 53, page 107).

Tableau 59. Débits prélevés simulés vs. Débits prélevés observés au pas de temps annuel (moyennes sur les 180 premiers pas de temps, en m<sup>3</sup>/s)

	Prelev. min. simulés	Prelev. max simulés	Prelev. moy. simulés	Prelev. moy. observés
<b>Année 1</b>	0.328	0.387	<b>0.354</b>	<b>0.292</b>
<b>Année 2</b>	0.316	0.342	<b>0.331</b>	<b>0.292</b>
<b>Année 3</b>	0.299	0.322	<b>0.310</b>	<b>0.292</b>

A l'exclusion du mois de janvier où le modèle présente des niveaux de prélèvement relativement bas, dus à la mise en place progressive des cultures, les autres mois de la campagne de contre-saison affichent des niveaux de prélèvement qui présentent un écart moyen (en valeur absolue) de 0.12 m<sup>3</sup>/s par rapport aux prélèvements observés (voir Tableau 60).

Tableau 60. Débits prélevés simulés vs. Débits prélevés observés au pas de temps mensuel (moyennes sur les 180 premiers pas de temps, en m<sup>3</sup>/s)

	Mois	Prelev. min. simulés	Prelev. max simulés	Prelev. moy. simulés	Prelev. moy. observés
Année 1	Janvier	0.086	0.138	0.119	<b>0.331</b>
	Février	0.371	0.477	0.403	<b>0.322</b>
	Mars	0.357	0.416	0.386	<b>0.266</b>
	Avril	0.396	0.440	0.418	<b>0.282</b>
	Mai	0.389	0.431	0.407	<b>0.261</b>
	Juin	0.370	0.419	0.390	-
Année 2	Janvier	0.082	0.125	0.101	<b>0.331</b>
	Février	0.313	0.377	0.356	<b>0.322</b>
	Mars	0.352	0.382	0.370	<b>0.266</b>
	Avril	0.395	0.415	0.405	<b>0.282</b>
	Mai	0.376	0.402	0.387	<b>0.261</b>
	Juin	0.354	0.383	0.364	-
Année 3	Janvier	0.079	0.104	0.089	<b>0.331</b>
	Février	0.290	0.328	0.311	<b>0.322</b>
	Mars	0.339	0.370	0.354	<b>0.266</b>
	Avril	0.384	0.411	0.394	<b>0.282</b>
	Mai	0.354	0.382	0.369	<b>0.261</b>
	Juin	0.325	0.356	0.342	-

Enfin, il est à noter que lors de tests au cours desquels toutes les irrigations au sein du modèle se sont faites uniquement à partir des eaux de la rivière, un assèchement très rapide de cette dernière a pu être observé.

#### 9.4 Revenus des producteurs

Le modèle intègre un module simple de calcul des revenus agricoles des producteurs, basé sur les marges brutes à l'hectare pour chaque type de culture, en fonction des superficies en culture. Ces marges brutes pour chaque culture, représentent des valeurs moyennes.

Une difficulté à la validation des revenus simulés, vient de l'absence d'au moins deux séries annuelles consécutives de revenus agricoles réels. Pour pallier cette difficulté, un essai de corrélation a été tenté entre les revenus agricoles réels des producteurs pour l'année 2009, et les revenus simulés par le modèle dans son année 1. Ceci a été fait en vue de permettre une calibration des revenus au sein du modèle, afin de vérifier à chaque fin de simulation si l'activité agricole reste toujours rentable, s'il existe une véritable croissance. Enfin, l'un des objectifs de la recherche de corrélation est la possibilité de travailler en valeurs absolues (revenus simulés comparables aux revenus observés), plutôt qu'en valeurs relatives (revenus simulés comparables uniquement entre eux).

Les résultats de la corrélation entre la série des revenus agricoles réels de 2009 et les séries des revenus de l'année 1 du modèle donnent des coefficients de corrélation R très variables (entre 0.11 et 0.91). Ces résultats se justifient par l'occupation du sol qui change d'une condition initiale de simulation à une autre, ne permettant pas de se retrouver dans la configuration ayant généré les résultats observés des revenus de 2009. Les résultats qui seront présentés dans les sections suivantes concerneront alors uniquement ceux des simulations, et seront considérés de manière relative, d'une UAT à une autre, ou d'une classe de producteur à une autre.

Une première analyse des revenus simulés par le modèle, montre pour chaque producteur, une bonne corrélation entre les revenus simulés d'une année à l'autre (voir Tableau 61). Ceci traduirait

une conservation de la croissance (ou de la décroissance) d'une année à l'autre dans les revenus des producteurs.

Tableau 61. Corrélations entre les revenus des producteurs d'une année à l'autre

	R <sup>2</sup> (revenus an 1 vs. revenus an 2)	R <sup>2</sup> (revenus an 2 vs. revenus an 3)
<b>Simulation 1</b>	0.981	0.983
<b>Simulation 2</b>	0.956	0.976
<b>Simulation 3</b>	0.953	0.966
<b>Simulation 4</b>	0.957	0.963
<b>Simulation 5</b>	0.968	0.985
<b>Simulation 6</b>	0.967	0.980
<b>Simulation 7</b>	0.967	0.975
<b>Simulation 8</b>	0.970	0.975
<b>Simulation 9</b>	0.970	0.981
<b>Simulation 10</b>	0.955	0.977

Pour une question d'harmonie, les analyses des revenus simulés des producteurs concerneront des utilisations de médianes (et non de moyennes), afin de rester dans la logique qui a prévalu dans l'analyse des revenus réels déclarés. Ces revenus basés sur des dires d'enquêtés présentaient de si grandes irrégularités, qu'il a été préférable d'en considérer le plus possible, les valeurs médianes.

L'étude des revenus pour toutes les simulations effectuées montre que les revenus médians des producteurs à Diaradougou, sont nettement plus élevés que ceux des deux autres UAT (voir Tableau 62). En proportions, ce résultat est en accord avec les revenus observés sur le terrain pour 2009, où les mêmes tendances apparaissent.

Tableau 62. Valeurs médianes des revenus des producteurs par UAT (en euros), toutes simulations confondues

UAT	Valeur médiane an 1	Valeur médiane an 2	Valeur médiane an 3	Valeur médiane observée 2009
<b>Bana</b>	1724.94	2119.43	2355.80	403.96
<b>Diaradougou</b>	4356.13	6441.48	8618.23	2179.88
<b>Sambla-Toukoro</b>	979.15	1533.72	2149.23	221.18

Selon le détail des classes de producteurs, il ressort également que les revenus des producteurs de Diaradougou, qu'ils possèdent une seule parcelle ou plusieurs, restent généralement plus élevés que ceux des producteurs des autres UAT (voir Tableau 63).

Tableau 63. Valeurs médianes des revenus des producteurs par classe de producteurs (en euros), toutes simulations confondues

UAT	Statuts	Nombre parcelles	Classes de producteurs	Valeur médiane an 1	Valeur médiane an 2	Valeur médiane an 3
<b>Bana</b>	Autochtone	Une	<b>Classe111</b>	1725.86	1770.69	1834.36
	Autochtone	Plusieurs	<b>Classe112</b>	3101.60	4638.90	6033.66
	Allochtone	Une	<b>Classe121</b>	813.53	1286.20	1471.66
<b>Diaradougou</b>	Autochtone	Une	<b>Classe211</b>	3016.18	4356.13	5426.70
	Autochtone	Plusieurs	<b>Classe212</b>	5124.13	7637.86	9732.13
	Allochtone	Une	<b>Classe221</b>	3434.23	4010.23	7652.43
<b>Sambla-Toukoro</b>	Autochtone	Une	<b>Classe311</b>	441.85	478.22	517.96
	Autochtone	Plusieurs	<b>Classe312</b>	1159.54	1780.90	2409.15

En faisant un tri décroissant des revenus par classe de producteurs, un premier constat est que pour chaque UAT, ce sont les producteurs autochtones, détenteurs de plusieurs parcelles qui perçoivent les meilleures rentes (voir Tableau 64). Ce résultat semble évident a priori, mais cela restait encore à être vérifié, dans la mesure où le nombre de parcelles possédées ne détermine pas tout seul le

niveau de la rente. D'autres critères tels que le type de culture, la taille des parcelles, le savoir faire, etc. peuvent être pris en compte.

A Bana, un autochtone possédant une seule parcelle perçoit de meilleures rentes par rapport à un allochtone dans la même situation, bien que statistiquement, ce dernier possède une superficie relativement plus grande. L'explication de tels résultats dans le modèle, est à rechercher plutôt du côté du positionnement de la parcelle du producteur allochtone : la plupart du temps celui-ci étant installé, dans l'ordre chronologique, après le producteur autochtone, il a plus de chances que la situation géographique de sa parcelle ne le contraigne à irriguer uniquement depuis un puisard (voir Tableau 65). Et, en fonction des besoins en eau de la culture pratiquée, en fonction des ressources en eaux souterraines disponibles en ce point, il pourrait y avoir ou non des occurrences de stress hydriques qui ont un effet réducteur sur les rendements et donc sur les marges brutes.

A Diaradougou, c'est plutôt une situation inversée qui est observée en année 1 ; un allochtone possédant une seule parcelle réalise de meilleures rentes par rapport à un autochtone n'en possédant qu'une. L'explication est à trouver dans le paramètre qui les différencie : le type de culture ou plus précisément, la culture du riz qui n'est commune qu'aux producteurs autochtones. Au début de la simulation de l'année 1, le choix des cultures n'est juste guidé que par les revenus initiaux du producteur, et non par l'historique de l'exploitation de la (les) parcelle (s) (qui est vierge à cet instant). Le choix par un producteur autochtone de la culture de riz se fait alors quand celui-ci n'a pas les moyens d'opter pour des cultures à fortes marges brutes (qui sont aussi pourvues de fortes charges). A la récolte, il n'y a que 50% de la production du riz qui soit vendu.

Enfin, à Sambla-Toukoro la rente d'un producteur autochtone ne possédant qu'une seule parcelle ne représente que 9% à 15% de celle d'un autochtone dans la même situation à Diaradougou, par exemple. Ces producteurs de Sambla-Toukoro cultivent du maïs (production vendue à 70%) et n'irriguent qu'à partir des eaux souterraines, avec des risques d'occurrence de stress hydrique, pouvant impacter négativement les rentes.

Tableau 64. Classement des classes de producteurs en fonction des revenus médians (en euros), pour l'année 1

UAT	Statuts	Nombre parcelles	Classes de producteurs	Superficies médianes (ha)	Revenus médians an 1	Rang
Bana	Autochtone	Une	Classe111	2	1725.86	5
	Autochtone	Plusieurs	Classe112	2	3101.60	3
	Allochtone	Une	Classe121	4	813.53	7
Diaradougou	Autochtone	Une	Classe211	4.5	3016.18	4
	Autochtone	Plusieurs	Classe212	4	5124.13	1
	Allochtone	Une	Classe221	3	3434.23	2
Sambla-Toukoro	Autochtone	Une	Classe311	1.5	441.85	8
	Autochtone	Plusieurs	Classe312	2	1159.54	6

Tableau 65. Proportions relatives par classe de producteurs, des types d'exhaure pour l'irrigation des parcelles

UAT	Statuts	Nombre parcelles	Classe de producteurs	Irrigation par puisard	Irrigation par la rivière
Bana	Autochtone	Une	Classe111	18.75	81.25
	Autochtone	Plusieurs	Classe112	42.11	57.89
	Allochtone	Une	Classe121	33.33	66.67
Diaradougou	Autochtone	Une	Classe211	12.5	87.5
	Autochtone	Plusieurs	Classe212	42.5	57.5
	Allochtone	Une	Classe221	18.18	81.82
Sambla-Toukoro	Autochtone	Une	Classe311	100	0
	Autochtone	Plusieurs	Classe312	87.5	12.5

La longueur réduite des séries de données socio-économiques observées ne permet pas une comparaison et une classification absolues des classes de producteurs. Toutefois, de manière relative, les classes peuvent être comparées entre elles. La classe des producteurs autochtones possédant une seule parcelle à Sambla-Toukoro (Classe311) est la classe qui génère le moins de revenus. Avec la classe des autochtones de Bana possédant une seule parcelle (Classe111), elles sont celles qui présentent les taux de croissance les plus faibles, d'une année à l'autre (voir Figure 55). Le tri des revenus médians des classes de producteur présenté en Figure 55 montre ces revenus s'accordent globalement avec les revenus médians observés pour la campagne 2009.

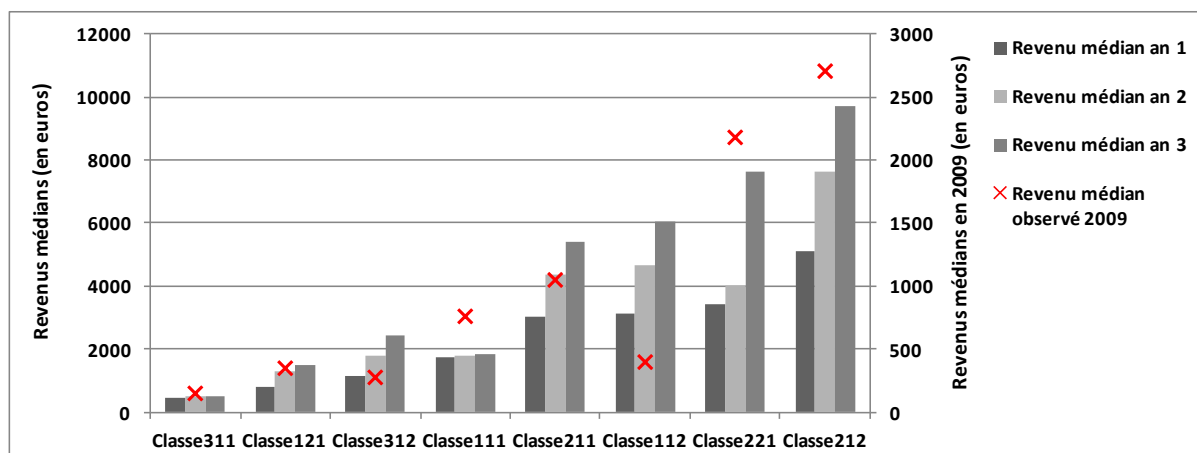


Figure 55. Tri ascendant des revenus médians des classes de producteurs

Une étude faite sur la comparaison des revenus médians générés par classe de producteurs a conclu qu'il n'y avait pas de différences significatives entre les revenus des classes 211 et 112, des classes 312 et 111, des classes 221 et 112 et des classes 221 et 211 (voir Tableau 66).

L'étude des taux de croissance des revenus des producteurs pris entre l'année 1 et l'année 3, montre que les plus forts taux de croissance se situent au sein de l'UAT de Diaradougou (voir Tableau 67). Suivent les UAT de Bana et Sambla-Toukoro, respectivement. Les taux de croissance sont plus élevés à Diaradougou qu'à Bana et à Sambla-Toukoro, du fait que les producteurs de Diaradougou sont relativement plus riches que ceux des autres UAT, ce qui leur permet de pouvoir rectifier plus aisément un revers de fortune subi suite à un mauvais choix de culture. Ceci n'est pas le cas pour les producteurs des autres UAT. Ainsi, les taux de croissance les plus bas (ou négatifs) sont à attribuer à des producteurs déjà endettés et qui ne peuvent plus faire le choix d'une culture à forte marge brute, du fait de leur endettement. Au final, ces derniers connaissent une très faible croissance ou s'enfoncent dans des soldes de plus en plus négatifs.

Si la conservation des taux de croissance positifs peut sembler logique, elle l'est moins pour les cas de taux de croissance négatifs qui se conservent (au sein du modèle) sur deux années consécutives. Dans la réalité on serait plutôt face à des situations de faillite (revente ? mise en location ?) ou d'obligation d'emprunts conséquents pour sauver l'exploitation.

Tableau 66. Comparaison par paires des revenus médians des producteurs (par la méthode de Wilcoxon)

farmerClass	- farmerClass	Score Mean Difference	Std Err Dif	Z	p-Value
212	121	481.921	20.60347	23.3903	<0.0001
212	111	331.421	18.24619	18.1638	<0.0001
211	121	292.811	21.22109	13.7981	<0.0001
312	311	280.086	18.57546	15.0783	<0.0001
212	112	201.301	18.82853	10.6913	<0.0001
112	111	184.057	18.48682	9.9561	<0.0001
211	111	167.172	16.47076	10.1496	<0.0001
221	121	161.292	22.55395	7.1514	<0.0001
212	211	115.372	17.27929	6.6769	<0.0001
312	121	94.974	21.14879	4.4908	<0.0001
221	111	76.498	16.95695	4.5113	<0.0001
<b>211</b>	<b>112</b>	21.541	17.74442	1.214	<b>0.2248</b>
<b>312</b>	<b>111</b>	-0.088	19.20941	-0.0046	<b>0.9964</b>
<b>221</b>	<b>112</b>	-10.52	18.46611	-0.5697	<b>0.5689</b>
<b>221</b>	<b>211</b>	-25.979	10.94809	-2.3729	<b>0.0176</b>
121	111	-82.569	20.40821	-4.0459	<0.0001
312	221	-114.943	20.05406	-5.7317	<0.0001
311	221	-126.001	12.74565	-9.8858	<0.0001
221	212	-135.48	17.91603	-7.5619	<0.0001
311	111	-208.376	16.4902	-12.6364	<0.0001
311	121	-221.251	20.29786	-10.9002	<0.0001
312	211	-222.876	19.09133	-11.6742	<0.0001
311	211	-232.239	12.98716	-17.8822	<0.0001
312	112	-269.837	19.66499	-13.7217	<0.0001
311	112	-272.768	17.49742	-15.589	<0.0001
121	112	-310.24	20.73094	-14.9651	<0.0001
311	212	-371.497	17.12799	-21.6895	<0.0001
312	212	-423.035	19.49103	-21.7041	<0.0001

Tableau 67. Classification des taux de croissance des revenus des producteurs entre l'année 1 et l'année 3, toutes simulations confondues

UAT	Statuts	Nombre parcelles	Classes	Taux de croissance an 1 - an 3	Proportion de producteurs
Bana	Autochtone	Une	Classe111	0-50%	141/159
	Autochtone	Plusieurs	Classe112	0-200%	141/181
Diaradougou	Allochtone	Une	Classe121	0-100%	186/240
	Autochtone	Une	Classe211	0-250%	65/67
	Autochtone	Plusieurs	Classe212	0-400%	154/173
Sambla-Toukoro	Allochtone	Une	Classe221	0-150%	44/50
	Autochtone	Une	Classe311	0-25%	81/96
	Autochtone	Plusieurs	Classe312	0-200%	168/204

*Note : Les valeurs présentées dans le Tableau 67 représentent des classes de taux de croissance pour les différentes classes de producteurs. Ces classes de taux de croissance ont été déterminées pour chaque classe sur un effectif assez important (plus de 77% des producteurs par classe).*

## 9.5 Eaux souterraines

L'évaluation du module de gestion des eaux souterraines au sein du modèle se fait de manière assez simple dans la mesure où le fonctionnement dudit module n'a pas été rendu complexe, lors de son implémentation. Ainsi l'évaluation du modèle consiste en la vérification de la reproduction des fonctions censées décrire la variation de la hauteur d'eau dans le sol, en chaque maille du système.

Le système comportant 18 333 cellules, qui affichent à chaque pas de temps une valeur différente, il serait impossible de présenter ici le contenu de ces matrices. Toutefois, après vérification des valeurs

contenues dans les matrices, il ressort que les fonctions d'évolution de la hauteur de l'eau dans le sol, sont bien exécutées. A noter que les mêmes valeurs sont reprises à chaque cycle de 365 pas de temps. Il serait possible dans un autre scénario d'introduire des facteurs de diminution ou d'augmentation des valeurs, de sorte à traduire les variations qui peuvent être enregistrées dans les recharges des eaux souterraines.

En rappel, l'un des objectifs majeurs de la présence du module eaux souterraines au sein du modèle est l'étude de son potentiel, en vue d'en faire une source alternative aux prélèvements en rivière pour l'irrigation des cultures. A ce titre, il a été d'un grand intérêt de comparer pour chaque parcelle dépendant exclusivement des eaux souterraines, les quantités d'eau disponibles et les quantités d'eaux requises lors de l'irrigation des cultures. De cette comparaison, il est établi un indicateur assez simple donnant un degré du stress subi par les cultures de la parcelle (voir Équation 1, page 93).

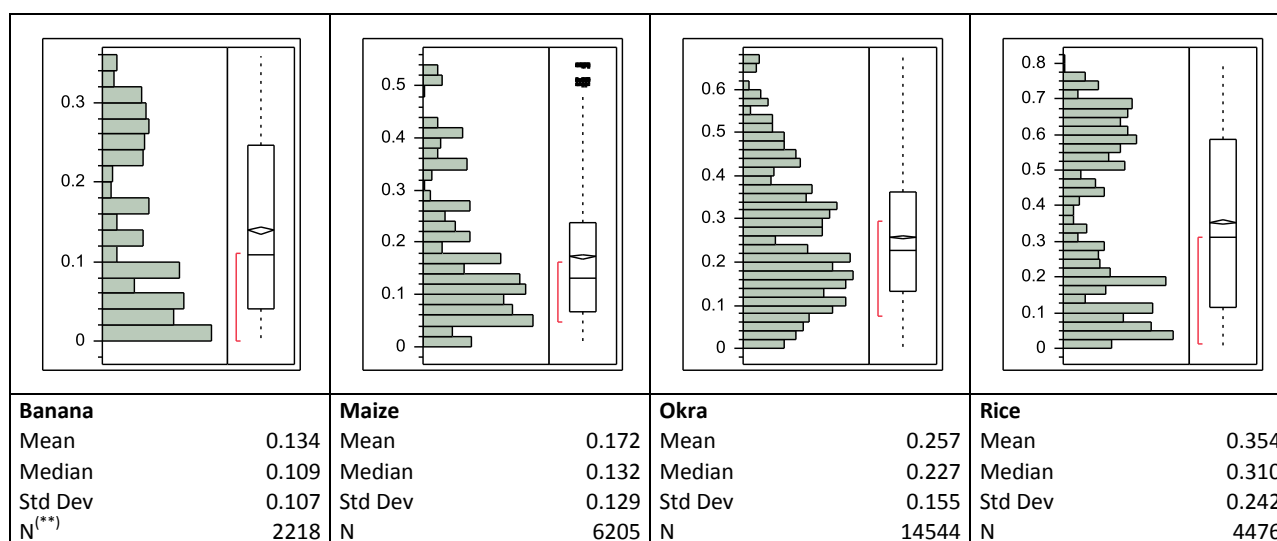
A la lumière de l'indicateur du degré de stress utilisé, il ressort que sur l'ensemble des parcelles de culture irriguées par les eaux souterraines, simulées par le modèle, toutes connaissent un stress hydrique. En rappel, les conditions de simulation sont celles dans lesquelles, un puisard par cellule de parcelles ne peut être rechargé que 3 fois au cours d'un pas de temps. Les parcelles de cultures les plus affectées par le stress hydrique, sont celles du riz et du gombo. Les parcelles de maïs et de banane sont elles aussi touchées par le stress hydrique, mais dans des proportions plus faibles (voir Tableau 68). L'un des constats qui se dégage du Tableau 68 est que la proportion de parcelles de maïs affectée par le stress hydrique s'avère plus élevée que celle des parcelles de banane. Ce résultat trouve pleinement sa justification dans le fait que même si sur l'ensemble de son cycle, la banane est plus consommatrice en eau que le maïs, le maïs consomme relativement plus d'eau que la banane durant les 4 mois que dure son cycle (voir Tableau 9 page 37, sur les besoins en eau spécifiques des cultures).

Tableau 68. Proportions de stress hydrique pour chaque type de culture

Crop	Hydric stress (%)	No Hydric stress (%)
Banana	43	57
Maize	49	51
Okra	100	0
Rice	100	0

Une analyse détaillée des valeurs indicatrices du degré de stress des différentes parcelles de culture, montre effectivement un degré moyen de stress plus important, au sein de la culture de riz (voir Tableau 69). L'analyse montre une fois de plus que le degré moyen de stress des parcelles de maïs est plus important que celui des parcelles de banane.

Tableau 69. Détail de la distribution du degré<sup>(\*)</sup> de stress hydrique subi par les parcelles de culture irriguées par les eaux souterraines



<sup>(\*)</sup> Une valeur de 0 = pas de stress et une valeur de 1 = 100% de stress

<sup>(\*\*)</sup> N représente le nombre de données utilisées pour l'analyse. N est variable du fait du caractère aléatoire de l'occurrence d'apparition des différentes cultures au sein des simulations, et du nombre de simulations utilisé pour les analyses

Sur la base des résultats ci-dessus, il est possible de conclure (de manière partielle<sup>48</sup>, toutefois) sur la possibilité d'utiliser les eaux souterraines comme alternative à l'irrigation par les eaux de surface. Prenant le cas des parcelles de maïs ou de banane, le déficit moyen en terme de satisfaction des besoins en eau ne dépasse pas 25%, une valeur qui ne devrait pas avoir un impact très négatif sur les rendements, et donc sur les revenus des producteurs.

En revanche, la valeur moyenne du déficit de satisfaction des besoins en eau pour les parcelles de riz et de gombo suggère assez clairement que les ressources en eau de la zone d'étude ne sont pas adaptées à ces types de cultures. Prenant le cas des ressources en eau de surface, la culture de riz serait à déconseiller formellement aux producteurs, tant elle épuiserait la ressource, avec des conséquences directement visibles (plus assez d'eau en aval). Ce type de culture est encore "tolérable" en irrigation à partir des eaux souterraines, mais serait plus approprié dans les zones de dépressions, ou "zones de bas-fond"<sup>49</sup>, selon la terminologie la plus couramment utilisée pour désigner ce genre de terrain (pour plus d'information sur les zones de bas-fond, voir Lavigne Delville et al., 1996). D'après Kaboré (2007), au Burkina Faso, le riz est cultivé dans 61% des cas, dans des zones de bas-fond. En outre, l'étude des revenus des producteurs a montré que le riz n'était pas la culture rapportant le plus sur le site.

La recommandation pouvant être faite sur la culture de gombo, serait de limiter sa pratique durant la contre-saison et la réserver plutôt pour la campagne agricole de la saison des pluies, comme cela se fait en général, à l'échelle du Burkina Faso. Les besoins en eau du gombo sont assez élevés, mais peuvent être comblés par les abondantes quantités de pluie qui tombent durant les 4 à 5 mois de la saison des pluies.

A ce stade, il faudrait toutefois relativiser les conclusions sur la culture de riz au sein du modèle dans la mesure où sa représentation est largement surévaluée. Car dans la réalité, à la place du riz, se

<sup>48</sup> Toute conclusion définitive quant à la possibilité d'utiliser durablement les eaux souterraines comme alternative à l'irrigation par les eaux de surface, ne pourrait se faire qu'après la fin des études en cours sur la caractérisation des eaux souterraines du bassin versant du Kou.

<sup>49</sup> Ces zones regroupent les milieux alimentés en eau par les eaux de ruissellement et les précipitations. Elles se forment principalement dans des dépressions.

trouve une multitude d'autres cultures très peu représentées, mais pas toutes aussi consommatrices en eau que le riz (en rappel, voir section 9.2 page 106). En cela, on peut toujours conclure que toute culture ayant des besoins en eau largement inférieurs à ceux du riz, pourrait être produite au sein de la zone d'étude à partir d'une irrigation exclusivement par les eaux souterraines, sans occurrence de stress, ou de stress sévère.

## 9.6 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité effectuée sur le modèle, a consisté en l'étude de la sensibilité du modèle aux variations de quelques paramètres. Parmi la multitude de paramètres que compte le modèle, ceux qui ont été retenus pour cette étude concernent :

- le nombre de producteurs choisis aléatoirement pour le semis, en début de simulation ;
- la distance-seuil déterminant les types d'exhaure des parcelles (prélèvements en rivière ou par puisard) ;
- l'impact du nombre maximal de recharge d'un puisard sur le stress hydrique subi par les cultures en place.

D'une manière générale, l'analyse de sensibilité porte sur les paramètres pouvant avoir un impact plus ou moins grand sur les débits en aval, et sur les paramètres conditionnant le degré de satisfaction des besoins en eau par les puisards.

### 9.6.1 Sensibilité au nombre de producteurs au semis

Les prélèvements totaux d'eau, correspondant à la différence entre le débit aval et le débit amont au sein du modèle, ont été calculés pour 3 situations précises : un semis impliquant 4, 6 et 8 producteurs, en début de simulation. En rappel, 202 parcelles sont représentées au sein du modèle, ce qui équivaut à une durée totale de semis, respectivement, de 51 jours, 34 jours et 26 jours. Ceci est fait afin que les semis soient compris entre un mois (30 jours) et deux mois (60 jours), de sorte à être plus ou moins conforme aux observations de terrain.

Les conditions de l'analyse étaient les suivantes : la distance-seuil conditionnant les deux types d'exhaure avait été fixée à 200 m et le nombre de prélèvements "virtuels" associé au prélèvement pour irrigation d'un producteur à partir de la rivière, à  $n = 4$  (voir Tableau 70). L'efficacité hydrique zonale est fixée à 0.75.

Tableau 70. Conditions de l'analyse de sensibilité au nombre de producteurs par semis

Distance à la rivière (m)	Nombre de producteurs au semis	Nombre de prélèvements "virtuels"
200	4	4
200	6	4
200	8	4

Soient N4, N6, N8, les prélèvements calculés pour les situations, respectivement, de 4, 6 et 8 producteurs au semis. Afin de déterminer dans quelle mesure le modèle pouvait être sensible aux variations de prélèvements symbolisés par N4, N6, N8, une comparaison des moyennes des prélèvements, basée sur le principe de la plus petite différence significative, a été effectuée. Pour plus de détails sur la méthode de la plus petite différence significative, le lecteur voudra bien se référer à Dagnelie (2006<sup>50</sup>). Plus précisément, la méthode de Tukey (qui est une variante de la

<sup>50</sup> Voir la section 12.4.2 (page 406). La **plus petite distance significative** est l'écart qui doit exister entre deux traitements pour qu'on puisse les considérer comme "statistiquement" différents.

méthode de la plus petite différence) a été utilisée. La méthode de Tukey compare par paires, les moyennes et détermine celles qui ne sont pas significativement différentes.

Les résultats du test de Tukey sont donnés dans la Figure 56 et le Tableau 71. L'interprétation de ce test est que N6 et N8 ne sont pas significativement différents l'un de l'autre. Par contre le test conclut que N4 et N6, et N4 et N8, sont significativement différents l'un de l'autre. Ainsi les différences moyennes de prélèvements sont plus grandes selon que le nombre de producteurs choisis à chaque pas de temps pour le semis augmente, mais sans que cette différence ne soit significative au-delà de 6 producteurs par pas de temps.

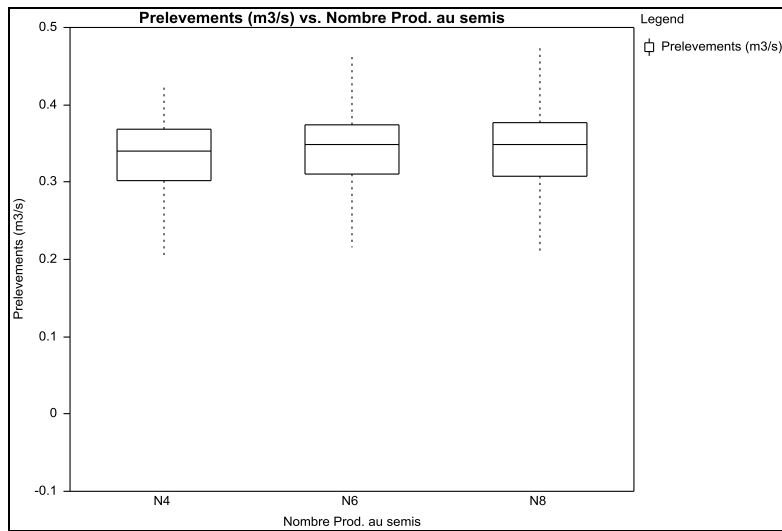


Figure 56. Distribution des prélèvements d'eau ( $m^3/s$ ) pour 4, 6 et 8 (N4, N6, N8) producteurs ensemençant simultanément leurs parcelles en début de simulation

Tableau 71. Rapport du test de Tukey sur la différence des moyennes de prélèvements N4, N6, N8

Variables <sup>(*)</sup>		Moyennes ( $m^3/s$ )
N8	A	0.331
N6	A	0.330
N4	B	0.322

<sup>(\*)</sup>Les variables non-connectées par la même lettre sont significativement différentes

### 9.6.2 Sensibilité à la distance-seuil déterminant le type d'exhaure

Les prélèvements pour plusieurs situations dans lesquelles les distances-seuil déterminant le type d'exhaure au sein du modèle étaient variables, ont été analysés afin de savoir si le modèle était sensible aux variations de ce paramètre. En rappel, la distance-seuil standard au sein du modèle avait été fixée arbitrairement à 200 m. Cette valeur se base sur l'état réel du matériel d'exhaure, à savoir principalement les motopompes détenues par les producteurs, et par une moyenne approximative des distances des parcelles au cours d'eau, telles que déclarées par les producteurs enquêtés.

Les conditions de l'analyse ont été les suivantes : le nombre de producteurs choisis pour le semis à chaque pas de temps a été fixé à 6 ; le nombre de producteurs "virtuels" associés à un producteur prélevant de l'eau dans la rivière par pas de temps a été maintenu à 4 (voir Tableau 72).

Tableau 72. Conditions de l'analyse de sensibilité aux distances-seuil déterminant le type d'exhaure

Distance à la rivière (m)	Nombre de producteurs au semis	Nombre de producteurs "virtuels"
50	6	4
100	6	4
150	6	4
200	6	4
250	6	4
300	6	4
400	6	4

L'analyse a consisté en une comparaison des moyennes de prélèvements pour toutes les distances-seuil, afin d'évaluer si leurs impacts en aval sont significativement différents les uns des autres. Le test de Tukey a été de nouveau utilisé.

La comparaison par paires des moyennes des prélèvements faite par le test de Tukey, conclut que les prélèvements moyens en fonction des distances-seuil sont significativement différents les uns des autres (voir Figure 57 ; Tableau 73).

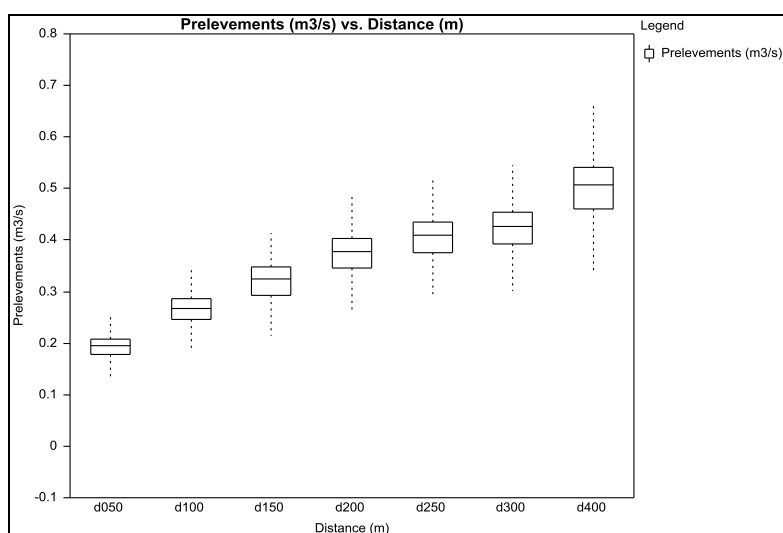


Figure 57. Distribution des prélèvements en fonction des distances-seuil (par rapport à la rivière) déterminant le type d'exhaure

Tableau 73. Rapport du test de Tukey sur la différence des moyennes de prélèvements ( $m^3/s$ ) en fonction des distances-seuil (m) déterminant le type d'exhaure

Distances		Moyennes <sup>(*)</sup>
D400	A	0.483
D300	B	0.405
D250	C	0.389
D200	D	0.358
D150	E	0.306
D100	F	0.255
D050	G	0.186

<sup>(\*)</sup> Les variables non-connectées par la même lettre sont significativement différentes

Les résultats de cette analyse montrent une cohérence dans la logique selon laquelle, plus on augmente la distance-seuil déterminant le type d'exhaure, plus le nombre de prélèvements dans la rivière diminue. Ces résultats ont l'intérêt de montrer notamment la possibilité de réduire les prélèvements en jouant tout simplement sur cette distance-seuil.

Sur le terrain, une toute autre approche est en cours de discussion par les décideurs (CLE-Kou) sans pour autant rencontrer l'adhésion des producteurs : celle de créer une zone de protection des berges du Kou, sur une distance (de part et d'autre du Kou) comprise entre 50 m et 100 m. La mesure vise à protéger le Kou contre l'ensablement et l'envasement. Si une telle mesure était appliquée, elle aurait pour effet de ne permettre qu'à ceux qui seront installés après la zone de protection d'irriguer par prise directe sur la rivière. Ce qui réduirait considérablement les prélèvements sur la rivière.

Les résultats de l'analyse ci-dessus permettent également d'estimer l'efficacité hydrique zonale au sein du modèle, supposée varier en fonction de la distance-seuil déterminant les types d'exhaure. Afin de l'estimer, l'hypothèse sera faite qu'elle varie de manière inversement proportionnelle à la distance au Kou. Ainsi à une distance de 0 m de la rivière, l'efficacité serait de 1 et à 200 m de la rivière elle est de 0.75. Les résultats contenus dans le Tableau 73 montrent que les niveaux de prélèvement dans la rivière sont proportionnels à la distance d'éloignement par rapport au Kou (symbolisée par la distance-seuil déterminant le type d'exhaure).

Une seconde hypothèse est faite ici : la relation qui lie l'efficacité hydrique zonale et la distance-seuil au Kou est l'inverse de celle qui lie les niveaux de prélèvement moyen à la distance-seuil au Kou.

Posons que la relation qui lie les niveaux de prélèvement à la distance-seuil est de type:

*Équation 2. Relation mathématique entre débits prélevés et distance d'éloignement au Kou*

$$\text{Débits} = a + b * (\text{Distance})^\alpha$$

Avec :  $a = 0.0109006$  ;  $b = 0.0237575$  ;  $\alpha = 0.5$  (coefficients déterminés après ajustement -  $R^2 = 0.995$ )

On en déduit alors que la relation qui lie la distance-seuil à l'efficacité hydrique zonale est également de type :

*Équation 3. Relation mathématique entre efficacité hydrique zonale et distance d'éloignement au Kou*

$$\text{Efficacité} = a' + b' * (\text{Distance})^\alpha$$

Avec :  $a' = 1$  ;  $b' = -0.01767767$  ;  $\alpha = 0.5$

De l'Équation 3 des valeurs d'efficacité hydrique zonale peuvent être estimées (voir Tableau 74). L'efficacité zonale se réduit à mesure que les parcelles prélevant de l'eau d'irrigation dans la rivière Kou s'éloignent de celle-ci.

*Tableau 74. Estimation des valeurs d'efficacité hydrique zonale en fonction de la distance au Kou*

Distances d'éloignement du Kou (m)	Efficacité hydrique zonale
0	1
50	0.88
100	0.82
150	0.78
200	0.75
250	0.72
300	0.69
400	0.65

### 9.6.3 Sensibilité au nombre maximal de recharges d'un puisard au cours d'un pas de temps

En tant que ressource potentiellement importante, il importait d'étudier les conditions pouvant permettre réellement d'affirmer que l'irrigation par les eaux souterraines pouvait se substituer à l'irrigation par les eaux de surface. Cette étude de sensibilité a donc consisté à faire varier le nombre maximal de recharges possibles des puisards et à utiliser les degrés de stress mis en place pour chaque culture comme indicateur de la satisfaction des besoins en eau. En rappel, le nombre maximal de recharges par puisards avait été initialement fixé à 3. Ainsi les nombres de recharges suivants ont été testés : 1, 2, 3, 4, 5, 6.

Les conditions des simulations étaient les suivantes : distance déterminant le type d'exhaure fixée à 200 m ; nombre de producteurs au semis par pas de temps : 6 ; nombre de producteurs prélevant simultanément de l'eau dans la rivière par pas de temps : 4.

Le principe de l'analyse de sensibilité a été une fois encore de procéder à une comparaison des valeurs moyennes des intensités de stress pour chaque culture, en fonction du nombre de recharges maximal des puisards. Une autre comparaison non moins importante a été d'observer, en fonction du nombre de recharges des puisards, la variation des occurrences de stress par type de culture.

Les analyses montrent que plus le nombre de recharges des puisards augmente, plus le pourcentage de parcelles touchées par du stress hydrique diminue (voir Figure 58). Ceci est vrai, sauf dans le cas du riz, où le pourcentage de parcelles touchées par le stress hydrique augmente plutôt. Ce constat est paradoxal et ne trouve aucune explication pour le moment. Des analyses supplémentaires s'imposent, notamment au niveau de l'évolution du degré de stress pour la culture, en fonction du nombre de recharges.

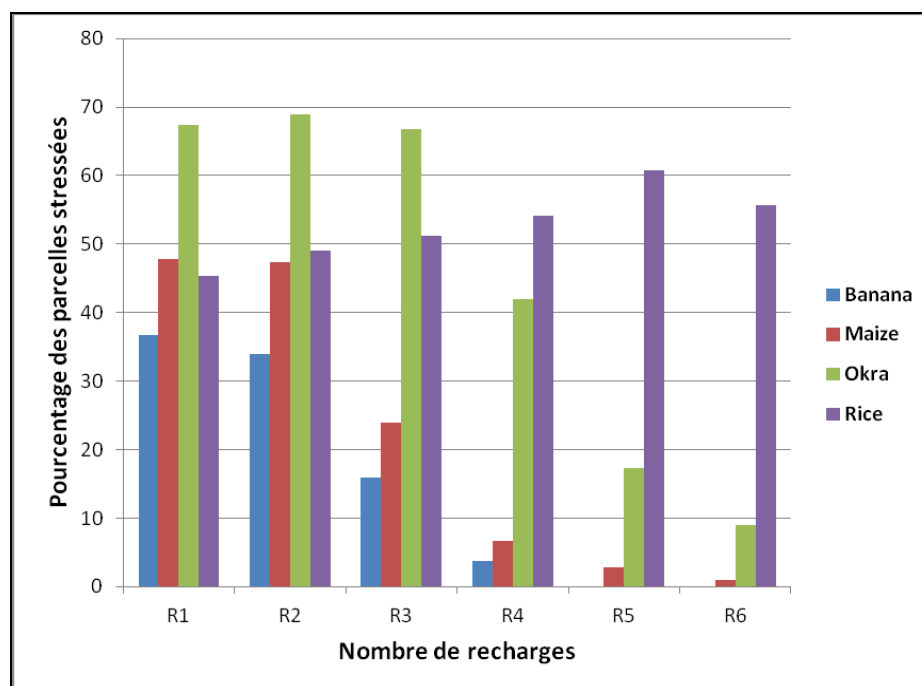
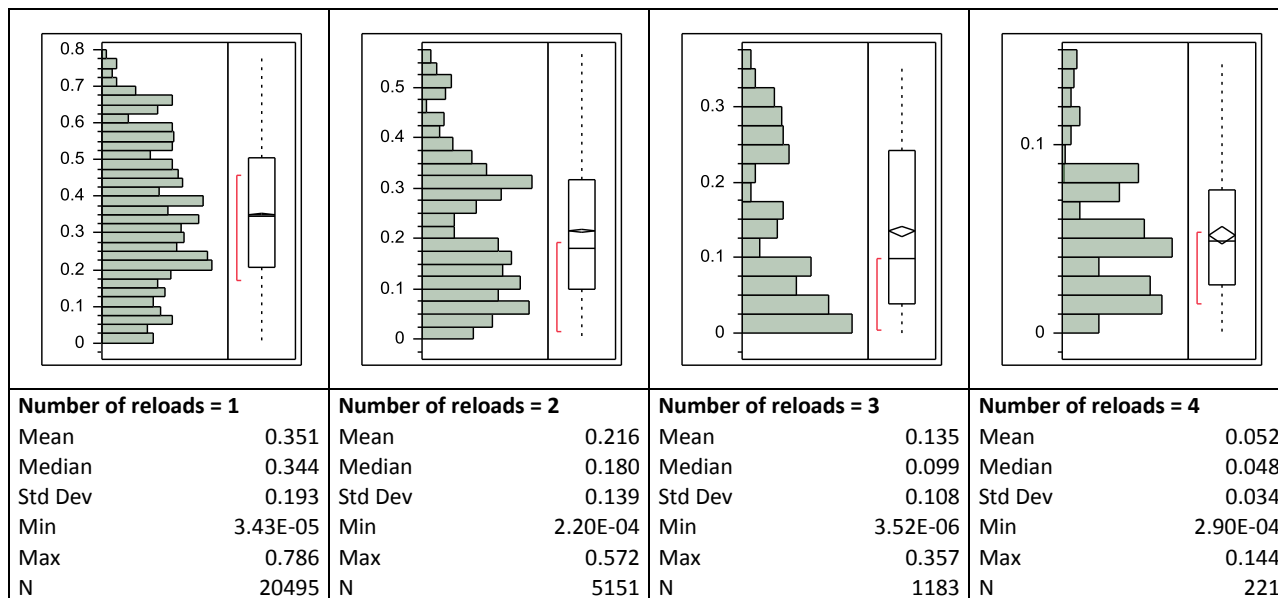


Figure 58. Pourcentage de parcelles touchées par le stress hydrique, en fonction du nombre de recharges des puisards

### 9.6.3.1 Banane

Les analyses ont montré dans le cas de la banane qu'à partir de 5 recharges possibles de puisard, les parcelles en culture de banane ne connaissent plus de stress hydrique. Pour un nombre de recharges inférieur à 5, le Tableau 75 (présentant les distributions des intensités de stress) montre une décroissance des valeurs moyennes de stress.

Tableau 75. Distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de banane, en fonction du nombre de recharges des puisards



Une comparaison des valeurs moyennes d'intensité de stress a été faite, afin de vérifier s'il existe des différences significatives entre ces valeurs, en fonction du nombre de recharges. Les conclusions de cette comparaison de moyennes (test de Tukey) sont que les différences entre les valeurs moyennes d'intensité de stress sont significatives pour cette culture (voir Figure 59 ; Tableau 76).

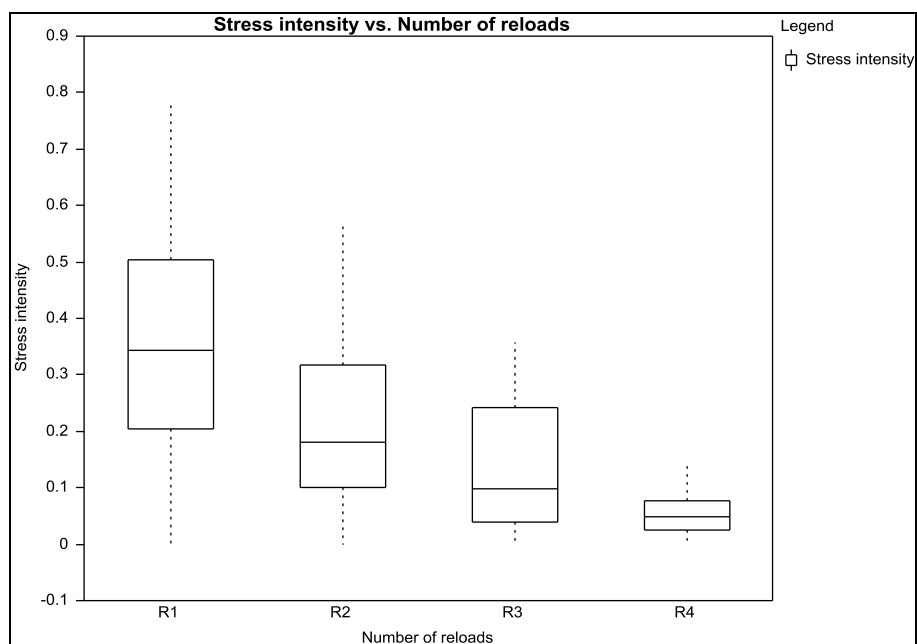


Figure 59. Tracé des distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de banane, en fonction du nombre de recharges des puisards

Tableau 76. Rapport du test de Tukey sur la comparaison des valeurs moyennes d'intensité de stress des parcelles de banane, en fonction du nombre de recharges des puisards

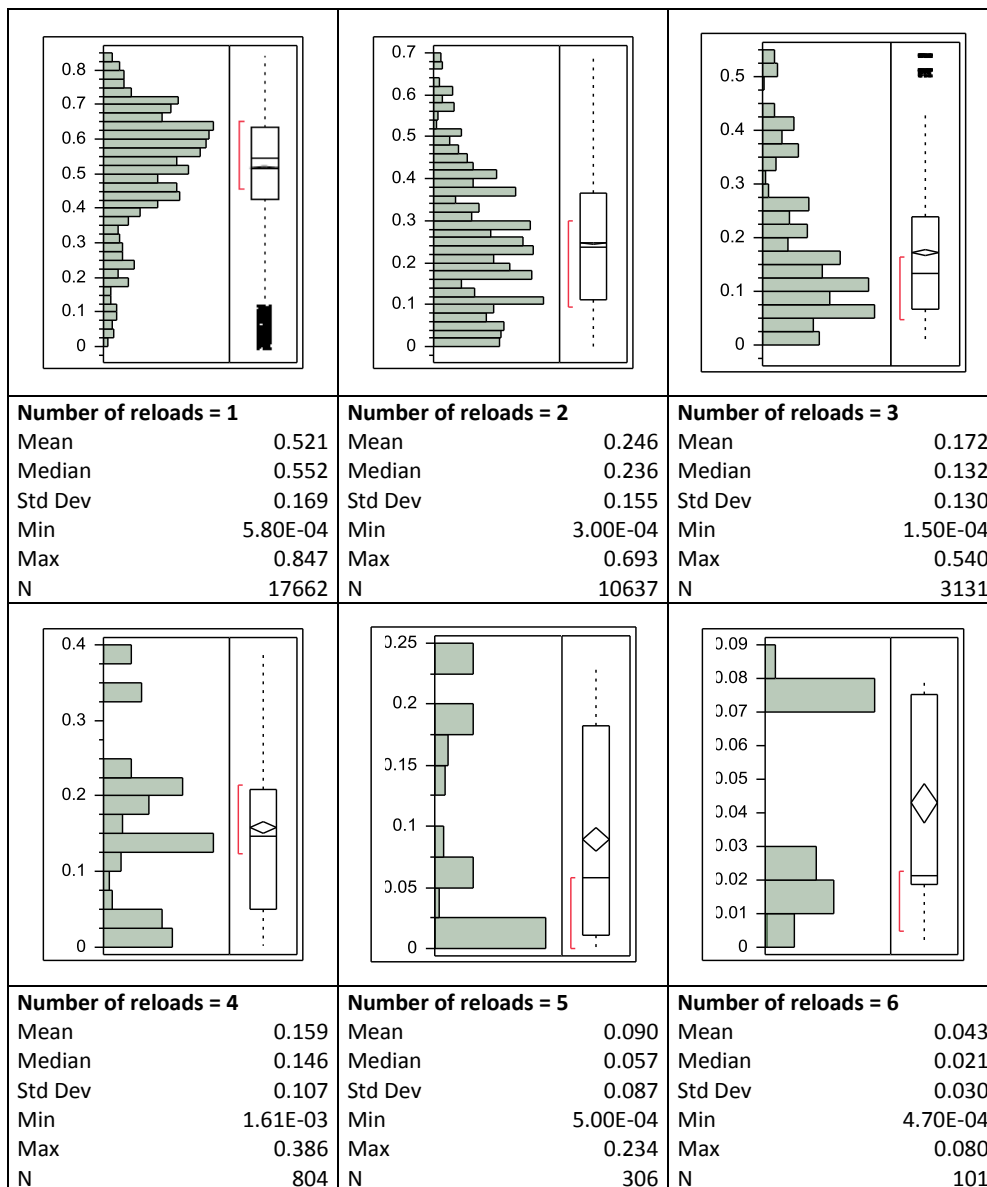
Banana		Mean <sup>(*)</sup>
Num. reloads = 1	A	0.351
Num. reloads = 2	B	0.216
Num. reloads = 3	C	0.135
Num. reloads = 4	D	0.052

<sup>(\*)</sup>Les variables non-connectées par la même lettre sont significativement différentes

### 9.6.3.2 Maïs

Les analyses des distributions des intensités de stress par nombre de recharges pour les parcelles en culture de maïs montrent une bonne réactivité du stress en fonction de la disponibilité de l'eau. En effet, à partir d'un nombre de recharges égal à 6, les valeurs moyenne et maximale du stress sont proches de zéro (voir Tableau 77).

Tableau 77. Distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de maïs, en fonction du nombre de recharges des puisards



Une comparaison de valeurs moyennes d'intensité de stress hydrique a été effectuée en utilisant le test de Tukey, basé sur le principe de la plus petite différence significative. Ce test a montré surtout l'absence de différences significatives entre les stress hydriques induits par des nombres de recharges, de 3 et 4 et des nombres de recharges de 5 et 6 (voir Figure 60 ; Tableau 78). Pour ces deux derniers cas, la culture de maïs se sera montrée peu sensible à la différence entre les volumes d'eau apportés.

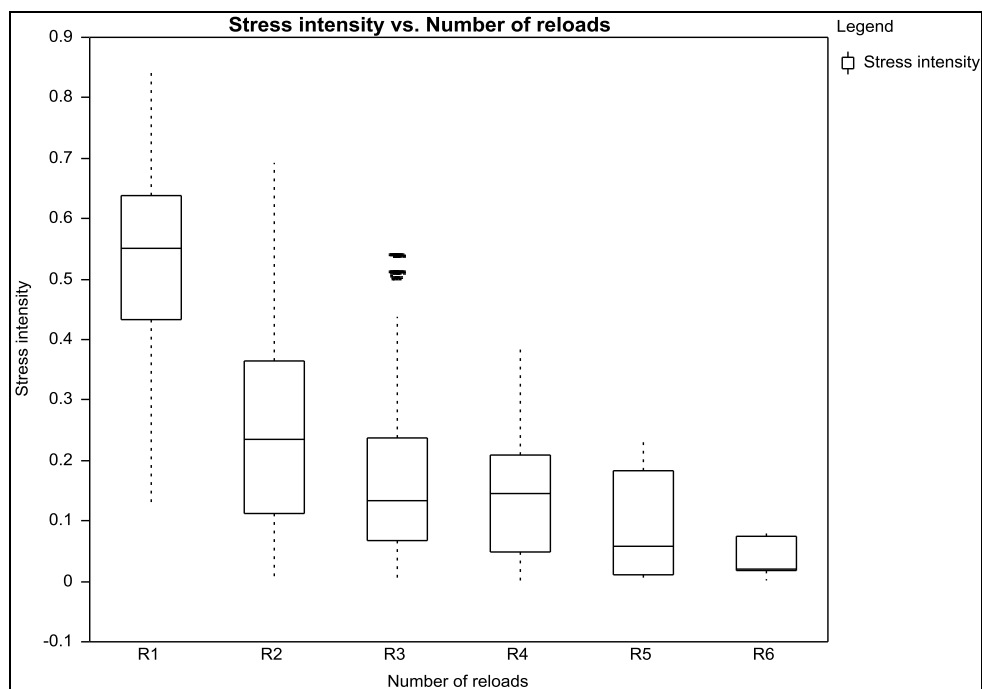


Figure 60. Tracé des distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de maïs, en fonction du nombre de recharges des puits

Tableau 78. Rapport du test de Tukey sur la comparaison des valeurs moyennes d'intensité de stress des parcelles de maïs, en fonction du nombre de recharges des puits

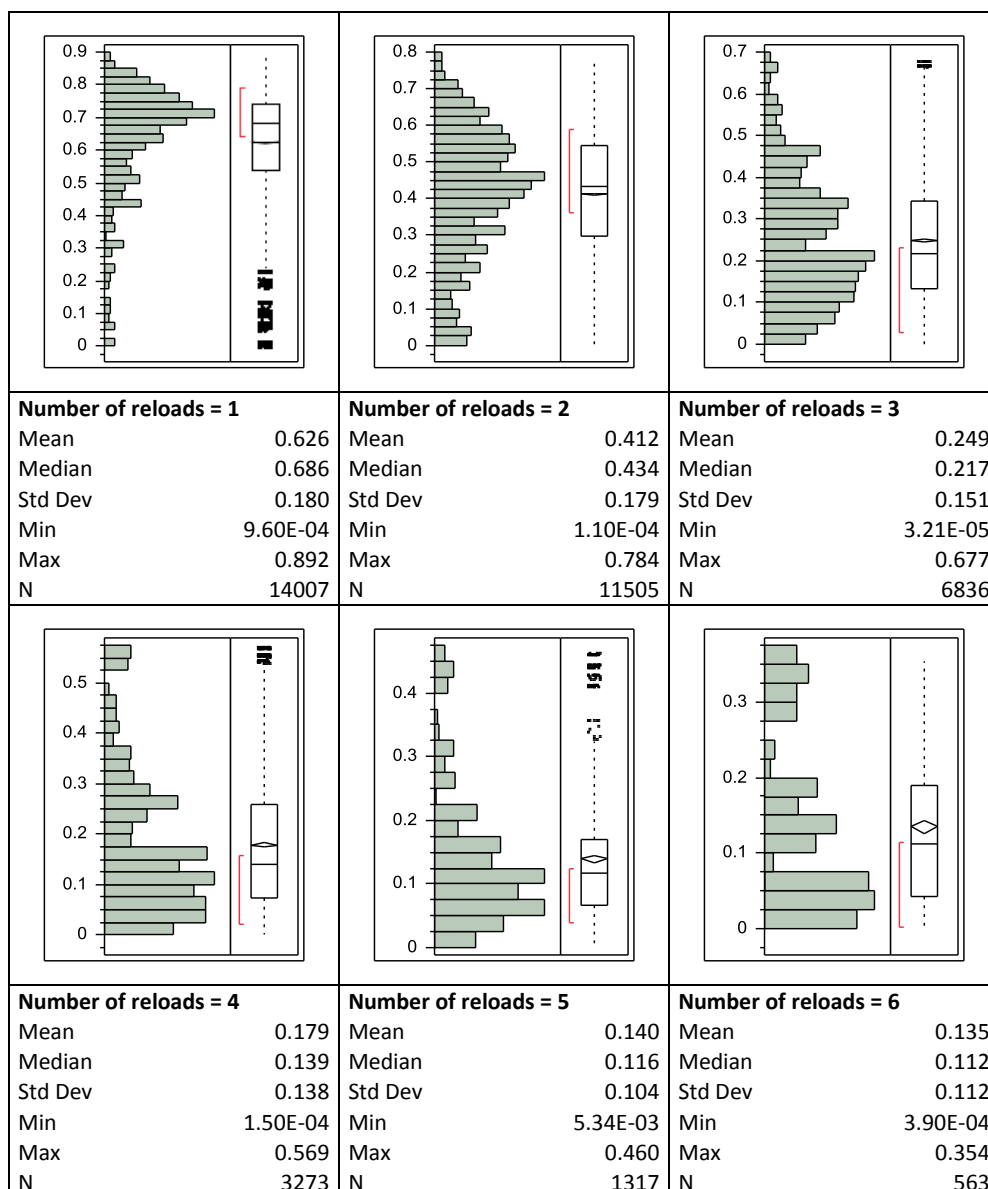
Maize		Mean <sup>(*)</sup>
Num. reloads = 1	A	0.521
Num. reloads = 2	B	0.246
Num. reloads = 3	C	0.172
Num. reloads = 4	C	0.159
Num. reloads = 5	D	0.090
Num. reloads = 6	D	0.043

<sup>(\*)</sup> Les variables non-connectées par la même lettre sont significativement différentes

### 9.6.3.3 Gombo

Les distributions des valeurs de stress induits par les différents nombres de recharges des puits irrigant les parcelles de gombo, montrent de prime abord que le gombo est une culture assez difficile à satisfaire (au point de vue hydrique), à partir des ressources disponibles au niveau des eaux souterraines. Les valeurs de stress dans le cas d'une seule recharge de puits avoisinent 0.9, ce qui se traduit par un déficit hydrique de 90% (voir Tableau 79). Même après une augmentation du nombre de recharges de puits, la satisfaction des besoins en eau des parcelles de gombo reste partielle, vu qu'il subsiste 13.5% de déficit, malgré 6 recharges de puits par pas de temps.

Tableau 79. Distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de gombo, en fonction du nombre de recharges des puisards



Une comparaison des valeurs moyennes d'intensité de stress (en utilisant le test de Tukey) a montré qu'il n'existait pas de différences significatives entre les effets d'un nombre de recharges de puisards de 5 ou 6, sur l'intensité du stress des cultures de gombo (voir Figure 61 ; Tableau 80).

D'une manière générale, les chiffres du stress du gombo laissent supposer clairement que la satisfaction des besoins en eau de cette culture nécessite de plus grandes quantités d'eau que dans le cas de la banane par exemple. Dans l'hypothèse de ressources en eaux souterraines considérables, une telle culture peut encore trouver sa place au sein des cultures exploitables au sein de la zone d'étude. Mais que dire alors de l'effet d'une telle culture sur les ressources en eau de surface, sachant que celles-ci sont clairement limitées ?

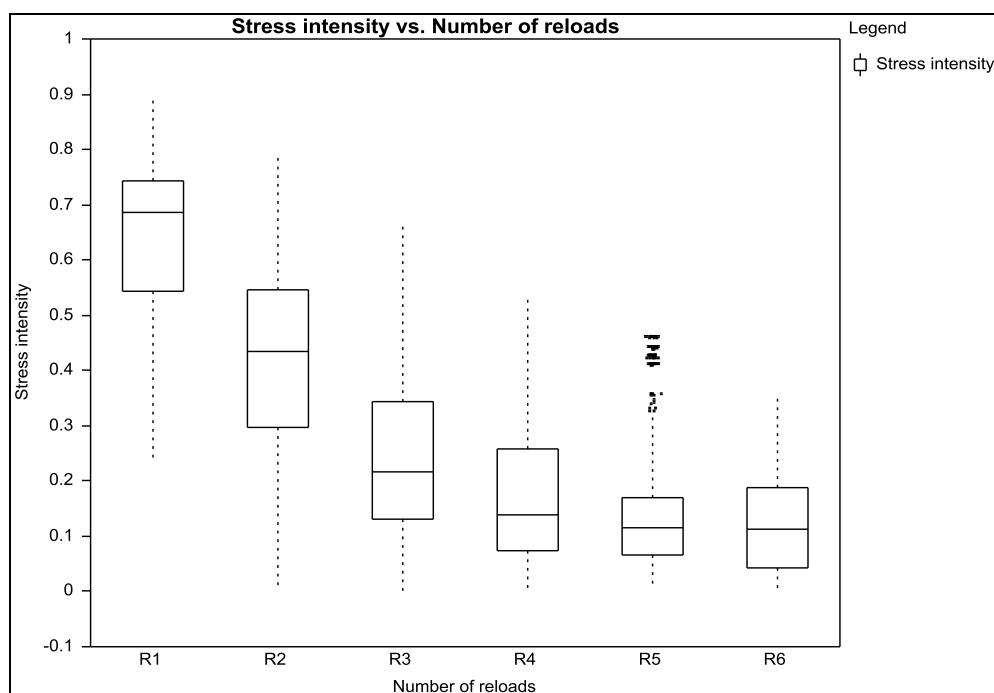


Figure 61. Tracé des distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de gombo, en fonction du nombre de recharges des puisards

Tableau 80. Rapport du test de Tukey sur la comparaison des valeurs moyennes d'intensité de stress des parcelles de gombo, en fonction du nombre de recharges des puisards

Okra		Mean <sup>(*)</sup>
Num. reloads = 1	A	<b>0.626</b>
Num. reloads = 2	B	<b>0.412</b>
Num. reloads = 3	C	<b>0.249</b>
Num. reloads = 4	D	<b>0.179</b>
Num. reloads = 5	E	<b>0.140</b>
Num. reloads = 6	E	<b>0.135</b>

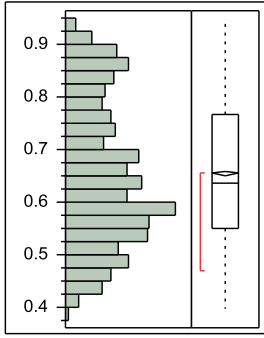
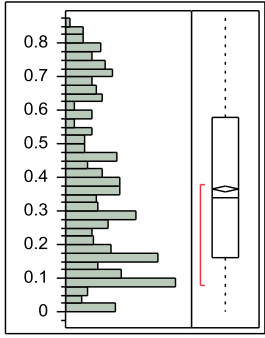
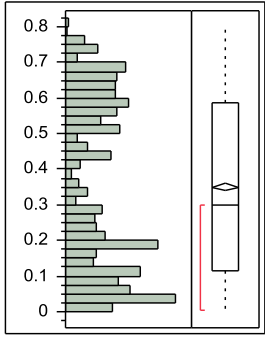
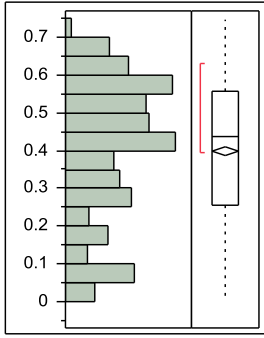
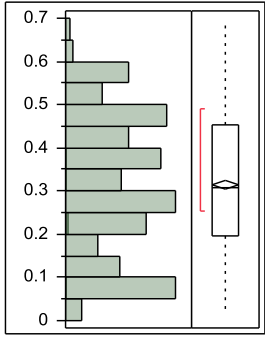
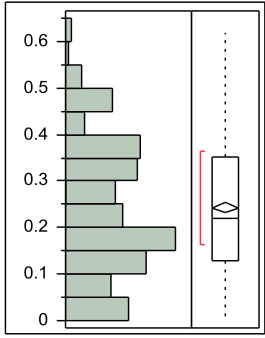
<sup>(\*)</sup>Les variables non-connectées par la même lettre sont significativement différentes

#### 9.6.3.4 Riz

Les distributions des valeurs d'intensités de stress pour la culture de riz, se comportent à peu près comme celles du gombo. Leurs moyennes commencent assez fortes avec une seule recharge de puisard et après 6 recharges de puisard, diminuent mais restent légèrement en deçà de 0.25, soit 25% de déficit hydrique en moyenne (voir Tableau 81).

La diminution observée au sein des valeurs d'intensités de stress hydrique tranche avec la tendance à l'augmentation des parcelles de riz touchées par le stress hydrique, à mesure que le nombre de recharges des puisards augmentait. Ceci pourrait alors se comprendre par une augmentation du nombre de parcelles stressées à mesure qu'augmente le nombre de recharges des puisards, avec des intensités de stress de plus en plus basses. A ce point, il n'existe toujours aucun élément de réponse à ce comportement atypique.

Tableau 81. Distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de riz, en fonction du nombre de recharges des puisards

		
<b>Number of reloads = 1</b>	<b>Number of reloads = 2</b>	<b>Number of reloads = 3</b>
Mean 0.655	Mean 0.367	Mean 0.351
Median 0.637	Median 0.340	Median 0.299
Std Dev 0.137	Std Dev 0.241	Std Dev 0.243
Min 3.96E-01	Min 5.40E-05	Min 1.34E-03
Max 0.943	Max 0.873	Max 0.808
N 3811	N 3731	N 2232
		
<b>Number of reloads = 4</b>	<b>Number of reloads = 5</b>	<b>Number of reloads = 6</b>
Mean 0.398	Mean 0.314	Mean 0.243
Median 0.439	Median 0.308	Median 0.218
Std Dev 0.190	Std Dev 0.163	Std Dev 0.144
Min 2.20E-05	Min 1.31E-02	Min 1.36E-03
Max 0.745	Max 0.682	Max 0.617
N 1212	N 1016	N 659

Les comparaisons des moyennes des intensités de stress hydrique ont montré qu'il existe des différences significatives entre les effets de stress induits par le nombre de recharges des puisards (voir Figure 62 ; Tableau 82).

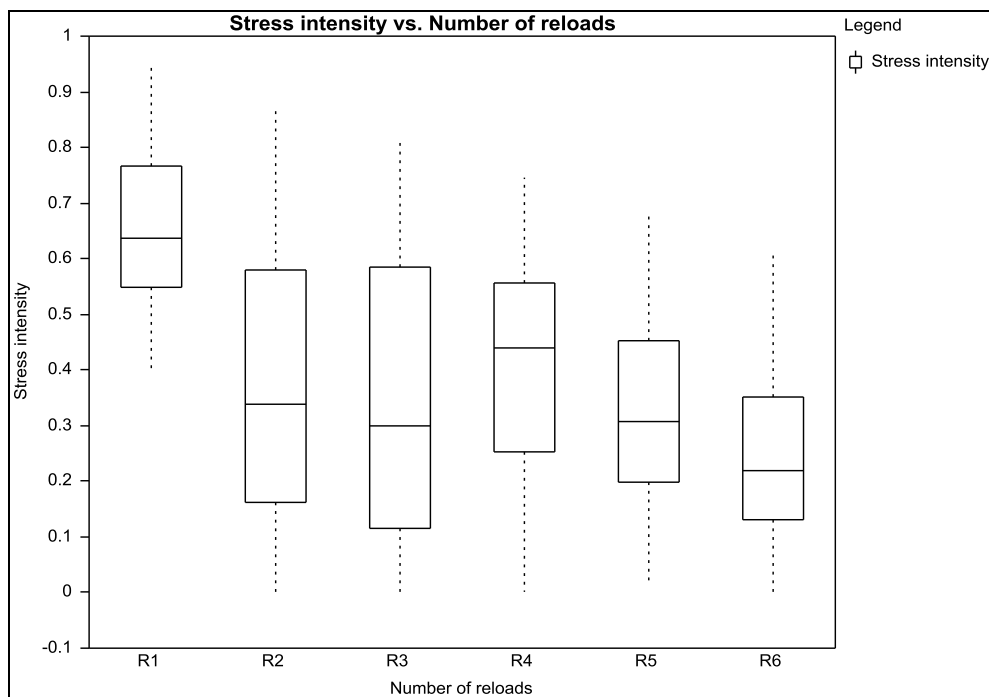


Figure 62. Tracé des distributions des valeurs d'intensité de stress hydrique pour les parcelles de riz, en fonction du nombre de recharges des puisards

Tableau 82. Rapport du test de Tukey sur la comparaison des valeurs moyennes d'intensité de stress des parcelles de riz, en fonction du nombre de recharges des puisards

Rice		Mean <sup>(*)</sup>
Num. reloads = 1	A	0.655
Num. reloads = 4	B	0.398
Num. reloads = 2	C	0.367
Num. reloads = 3	D	0.351
Num. reloads = 5	E	0.314
Num. reloads = 6	F	0.243

<sup>(\*)</sup>Les variables non-connectées par la même lettre sont significativement différentes

Bien qu'il existe des différences significatives entre les valeurs moyennes d'intensité de stress des parcelles de riz, il apparaît que le nombre de recharge n'est pas très fortement corrélé au degré de stress. Ceci peut s'observer sur l'effet produit par 4 recharges (par pas de temps), qui ne font pas mieux baisser le stress que 2 ou 3 recharges. En dehors de ce cas particulier, le modèle semble traduire dans l'ensemble, l'effet du nombre de recharges sur le stress des parcelles de riz.

### 9.6.4 Conclusion de l'analyse de sensibilité

En conclusion, l'étude de sensibilité aura montré que le modèle n'est pas très sensible au nombre de producteurs choisis pour le semis. Une possible explication à ce fait pourrait résider dans la différence entre les cas de figure considérés, à savoir 4, 6 ou 8 producteurs. Les effets du choix de 4, 6 ou 8 producteurs au semis par pas de temps restent relativement limités aux 51 premiers pas de temps du modèle (au plus). Sur l'ensemble des 180 pas de temps considérés pour les analyses, cela n'aura pas eu énormément d'impact.

Le modèle est par contre assez sensible aux prélèvements induits par la distance-seuil déterminant le type d'exhaure. Une telle conclusion suggère ainsi la possibilité d'utiliser le modèle pour tester dans la réalité les effets d'une imposition de distances limitant ou interdisant l'installation de parcelles sur les berges du Kou.

Enfin, l'analyse de sensibilité a montré que le stress hydrique subi par les parcelles en cultures irriguées par les eaux souterraines était assez sensible aux variations des ressources disponibles. Les cas des cultures de gombo et de riz ont montré qu'il faudrait mobiliser beaucoup plus de ressources (que dans les cas du maïs ou de la banane, par exemple) pour satisfaire ces cultures. En comparaison, dans la réalité du terrain les besoins en eau de ces cultures (quoique beaucoup moins représentées dans la réalité que dans le modèle) sont satisfaits. Une remarque serait alors que les valeurs de hauteurs d'eau de nappe dans les cellules de la grille du modèle pourraient être sous estimées par rapport aux valeurs réelles, induisant systématiquement du stress au niveau des parcelles des cultures irriguées par les eaux souterraines.

## 9.7 Conclusion

En guise de conclusion à la formalisation du système de gestion de l'eau étudié, au sein d'un modèle, il convient de répondre à des questions essentielles (dont celles posées par Beck, 2002), dans le cadre d'une évaluation plus générale de tout le processus ayant conduit à la modélisation.

### ***Le modèle a-t-il été construit sur les bases d'hypothèses solides ?***

Le modèle a été construit de sorte à prendre en compte la plupart des entités intervenant dans la problématique à résoudre, qui est l'optimisation des ressources en eau utilisées au sein de la zone d'étude.

La construction du modèle repose sur l'hypothèse selon laquelle les choix des systèmes de production ou plus précisément, les systèmes de culture, pouvaient conditionner les prélèvements d'eau pour l'irrigation et par conséquent les débits en aval.

Après analyse des résultats générés par le modèle, il est ressorti que les changements observés au sein de l'occupation du sol dans le modèle, avaient un impact sur les débits en aval du système. L'autre hypothèse sur laquelle le modèle a été construit concerne encore les systèmes de production dans leur composante économique. Le modèle se devait de prendre en compte les aspirations des producteurs en termes de recherche de meilleures rentes, et aussi (et surtout) de maintenir (en termes de proportions relatives), la distribution des revenus au sein des UAT.

Le modèle a montré que le niveau de richesse au sein de l'UAT de Diaradougou se maintenait au-dessus du niveau de ceux des autres UAT. Enfin, l'une des dernières hypothèses était de montrer que les producteurs pouvaient être regroupés en un certain nombre de classes ou de types, en fonction de leurs systèmes de production. L'analyse des résultats des simulations a montré qu'il était effectivement possible de distinguer des classes de producteurs, sur la base de leurs systèmes de production et par conséquent, des revenus générés par ces systèmes.

### ***Le comportement du modèle simule-t-il bien la réalité ?***

L'évaluation du modèle a concerné aussi bien l'évaluation des données qualitatives et quantitatives issues des résultats des simulations, que la logique de ces résultats.

Concernant les aspects hydrologiques, le modèle simule assez bien les débits en aval, avec toutefois un biais assez important, au regard des indicateurs de performance utilisés. Ce biais peut avoir plusieurs origines, dont l'occupation du sol qui n'est pas forcément celle qui était en place lors de la campagne de mesure de débits en effectuée 2010. Ce biais peut aussi trouver son origine dans les hypothèses simplificatrices utilisées au niveau des besoins en eau des plantes, des efficacités d'irrigation, de la majoration des prélèvements, etc.

Le modèle a montré une certaine dynamique dans l'occupation du sol, d'une campagne agricole à l'autre, sous-tendue par les aspirations des producteurs à améliorer leurs rentes, et donc à choisir (quand ils le peuvent) les meilleures cultures en ce sens. Dans un sens le modèle retranscrit assez bien le fait que malgré les bonnes rentes que procurent la culture de banane, tous les producteurs n'ont pas les moyens, ou le savoir-faire nécessaires à l'adoption de cette culture. Partant toujours sur la base de la recherche d'une meilleure rente, il a été constaté dans les résultats des simulations que la culture du chou ne faisait jamais partie des choix des producteurs, en raison de sa marge brute faible.

Les simulations ont permis de retranscrire aussi, toutes proportions gardées, les revenus des producteurs par UAT. Au sein des UAT, les analyses des revenus ont montré qu'il était possible de distinguer des classes de producteurs, selon leurs systèmes de production.

Le module des eaux souterraines, plutôt simplifié, simule bien la disponibilité de l'eau dans le sol. L'étape suivante concernant ce module sera l'intégration des conclusions des recherches du Projet Eaux Souterraines Bobo<sup>51</sup>, avec la possibilité de simuler les mouvements horizontaux et verticaux dans le sol. Toutefois, en l'état, ce module a permis de montrer que les eaux souterraines pouvaient constituer une alternative intéressante aux prélèvements d'eau en rivière. Les stress hydriques occasionnés par les limitations inhérentes à ce mode d'exhaure ne constituent pas de réelles entraves à la production agricole, tant que les cultures restent modérément consommatrices en eau.

#### ***Le modèle réalise-t-il le but pour lequel il a été conçu ?***

Le but du modèle est de permettre l'exploration des conséquences des choix de production des agents sur les débits en aval. Ce but est atteint, même s'il subsiste encore des améliorations possibles en termes de calibration des paramètres hydrologiques, ou des paramètres liés à la consommation en eau par les plantes.

En l'état, le modèle montre une certaine sensibilité au niveau des débits en aval, quand des changements importants surviennent dans l'occupation du sol (et donc dans les besoins en eau totaux), quand le nombre de prélèvements varie (en raison des variations de la distance-seuil déterminant le type d'exhaure). Enfin, l'un des avantages de ce modèle est que dans sa conception, il permet la prise en charge facile de différents scénarios.

#### ***Quelle est la contribution du modèle à la compréhension du phénomène étudié ?***

Le modèle a largement contribué à confirmer deux a priori :

1. **La zone d'étude de par sa situation en amont des autres zones agricoles irriguées joue un rôle très important dans la gestion des débits en aval.** Il est également entendu que le pari d'une meilleure utilisation de l'eau en agriculture sur le bassin versant du Kou ne se fera pas uniquement en agissant sur la zone la plus en amont ; le pari se gagnera en répliquant sur les zones agricoles le long du Kou, les solutions qui seront proposées sur la zone d'étude.
2. **La clé d'une meilleure gestion au sein de la zone d'étude est liée aux systèmes de production ;** les objectifs de production visés, l'utilisation des moyens pour produire (exemple : l'eau disponible), conditionnent la manière dont la ressource en eau est utilisée.

---

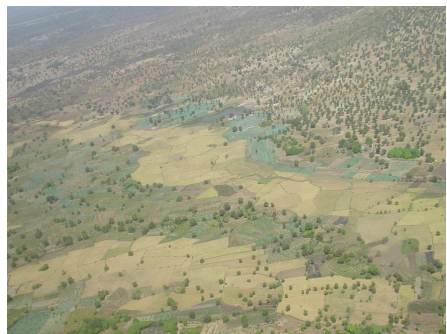
<sup>51</sup> Projet financé par la coopération belge et qui vise à l'appui à la gestion et à la protection des ressources en eaux souterraines exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso.

***Partant de la compréhension du phénomène étudié, des faiblesses constatées au sein du système, quelles sont les propositions de solution possibles pour l'amélioration de l'utilisation de l'eau ?***

Les solutions pour une amélioration de l'utilisation, afin qu'elles soient cohérentes avec les usages dans la zone, avec la perception que les producteurs ont de la ressource en eau, doivent découler des insuffisances du système tel qu'il existe. Toutes les insuffisances constatées ne pouvant être facilement corrigées, il convient de se focaliser sur celles qui raisonnablement, pourraient être améliorées et qui sont simulables par le modèle, en l'état :

- La taxation des cultures les plus consommatrices en eau
- L'amélioration des efficacités d'irrigation à la parcelle
- Une meilleure adéquation entre les ressources en eau disponibles et les types de cultures choisis
- La taxation des exploitations de plus de 0.5 ha irriguées à partir des eaux de surface

Les alternatives citées ci-dessus feront l'objet, dans les prochaines sections, d'une analyse détaillée en terme de faisabilité et seront simulées afin d'étudier l'impact qu'elles pourraient avoir sur les débits en aval du système.



## **Partie 4 : Amélioration du système de gestion de l'eau**

## **Chapitre 10. Proposition d'alternatives et évaluation des alternatives proposées**

### **10.1 Alternatives envisageables pour l'amélioration de la gestion de l'eau**

Le but de cette partie est de présenter les alternatives envisageables pour une meilleure gestion de l'eau dans la zone d'étude.

Au sortir de l'évaluation du modèle, quatre pistes ont été évoquées comme étant de potentielles alternatives à une meilleure utilisation de l'eau. Ce sont :

- La taxation des cultures les plus consommatrices en eau
- L'amélioration des efficacités d'irrigation à la parcelle
- Une meilleure adéquation entre les ressources en eau disponibles et les types de cultures choisis
- La taxation des exploitations de plus de 0.5 ha irriguées à partir des eaux de surface

La liste des alternatives pourrait bien s'allonger si l'on prenait en compte la possibilité de taxation directe de l'eau, l'introduction de techniques d'irrigation moins consommatrices en eau. Mais les résultats des enquêtes socio-économiques avaient bien montré la non-disponibilité des producteurs à payer (directement) pour l'eau d'irrigation. Concernant l'introduction de nouvelles techniques d'irrigation plus efficaces telles que le goutte-à-goutte, son succès serait très mitigé ou tout simplement pas au rendez-vous en raison de plusieurs facteurs : le coût du matériel n'est pas à la portée de tous les producteurs, la qualité de l'eau occasionnera des colmatages fréquents, les producteurs auront besoin d'un encadrement de la part des services de l'agriculture qui n'auront pas toujours les moyens pour assurer cet encadrement, l'introduction du goutte-à-goutte signifierait un changement du type de culture pratiqué vers plus de maraichage.

Le problème majeur de la résolution du problème de gestion de l'eau au sein de la zone d'étude réside en premier lieu dans la perception que les producteurs ont de la ressource en eau. Bien que la plupart constatent une baisse générale du niveau des ressources en eau, et que 90% d'entre eux affirment prendre en compte les besoins des utilisateurs en aval, on ne peut que constater une augmentation au fil du temps des prélèvements, due à l'adoption de cultures à forte marge brutes, mais aussi fortes consommatrices en eau (exemple : banane, gombo).

Dès lors, la meilleure alternative possible passe par une sensibilisation des producteurs sur le niveau des ressources en eau. Cette tâche fort-complexe et de longue haleine serait du ressort de l'État burkinabé et d'associations, tous regroupés au sein du Comité Local de l'Eau du Kou (CLE-Kou).

Les alternatives retenues l'ont été en raison de la possibilité de simulation de leur mise en œuvre par le modèle, et leur évaluation par la suite. Il pourrait toujours exister des alternatives meilleures ou plus adaptées mais qui ne seraient pas simulables en l'état par le modèle.

En raison d'une contrainte de temps, l'examen des solutions alternatives ne se fera pas en concertation avec les acteurs de terrain représentés dans le modèle, mais par un collège d'experts locaux. Une partie assez importante de la présente étude a été menée sur la base d'une concertation permanente avec les membres de ce collège.

Le collège d'experts locaux est composé de personnes œuvrant de longue date dans le domaine de la gestion de l'eau sur le bassin versant du Kou. Pour la plupart, elles font partie d'institutions (projets,

associations, etc.) de premier plan dans les domaines de l'eau et de l'environnement au sein de la zone d'étude. La composition de ce collège d'experts locaux est donnée dans le tableau suivant :

Tableau 83. Composition du collège d'experts locaux

Nom et Prénoms	Institution
Mamadou <b>Diallo</b>	AEDE/OE
Joost <b>Wellens</b>	GEeau
Nestor Fiacre <b>Compaoré</b>	ESO
Noufou <b>Zango</b>	DPAHRH
Akoly <b>Midekor</b>	AEDE/OE
Brehima <b>Sawadogo</b>	AEDE/OE
Ahmed <b>Kam</b>	AEDE/OE
Martial <b>Nitcheu</b>	AEDE/OE
Elie <b>Sauret</b>	ULg/ESO

### 10.1.1 La taxation des cultures les plus consommatrices en eau

Ceci est une mesure qui devrait idéalement échoir aux décideurs, en l'occurrence le CLE-Kou, avec une phase de sensibilisation, suivie plus tard d'une phase d'application stricte des dispositions qui seront prises.

La taxation des cultures les plus consommatrices en eau vise à remodeler partiellement le schéma actuel de l'occupation du sol, en rendant le producteur responsable devant le choix de sa culture. Cette mesure n'est pas une "taxe sur l'eau" dissimulée, mais une liste encadrée de cultures possibles au sein de la zone d'étude, sans que cela n'ait des conséquences lourdes sur la satisfaction des besoins en eau en aval. En dehors de la liste de cultures possibles, toute culture présentant des besoins en eau élevés peut être soumise à une taxation spéciale.

Dans le cadre de cette étude, deux cultures seront concernées par cette mesure. Il s'agit du gombo et du riz. Ces deux cultures, lors de l'évaluation du modèle, se sont montrées relativement fortes consommatrices en eau. Si la culture de gombo, en plus d'être forte consommatrice en eau est aussi une culture à forte marge brute, on ne peut en dire autant pour le riz. La culture de riz sur le site a l'inconvénient de présenter une forte consommation en eau, avec une marge brute peu élevée.

La mesure serait alors à double effet : réduire considérablement les superficies en riz (ou autres cultures présentant le même profil<sup>52</sup>) et freiner l'expansion des superficies en gombo (ou autres cultures présentant le même profil<sup>53</sup>).

Une première remarque serait qu'une telle mesure au sein du modèle ne pourrait porter véritablement du fruit que sur les deuxièmes et troisièmes cycles de 365 pas de temps, en ce sens que le producteur après récolte et calcul de ses gains, perçoit assez vite le rendement économique plutôt faible obtenu avec une culture taxée.

Une seconde remarque est que certains producteurs au sein du modèle ne se déferont pas de la culture du riz, car étant (au sein du modèle) contraint à pratiquer cette culture, du fait de leur appartenance à une zone géographique ou une classe de producteurs.

<sup>52</sup> Toute culture qui soit forte consommatrice en eau, avec une faible marge brute

<sup>53</sup> Toute culture qui soit forte consommatrice en eau, avec une forte marge brute

### **10.1.2 L'amélioration des efficacités en eau d'irrigation à la parcelle**

L'analyse des données du Tableau 12 (voir page 39) dans lequel les efficacités d'utilisation d'eau à la parcelle sont calculées à l'échelle mensuelle, laisse supposer une variation assez importante des efficacités au cours de la campagne de contre-saison. Cela signifierait-il que les producteurs soient en mesure d'adapter leurs comportements en matière de pratiques d'irrigation, en fonction du niveau des ressources en eau ?

Pour les besoins de la modélisation, les efficacités d'irrigation à la parcelle au sein de la zone avaient été fixées à 30%, conformément aux études de terrain de Wellens et al. (2007). Cette valeur d'efficacité traduirait le fait que sur le terrain, pour 1 m<sup>3</sup> d'eau réellement nécessaire pour l'irrigation, ce sont 3 m<sup>3</sup> d'eau qui sont prélevés et donc 2 m<sup>3</sup> d'eau qui seraient perdus pour l'irrigation. Ces chiffres pourraient paraître irréalistes, mais bien accessibles, si l'on considère :

- Les canaux creusés dans la terre, sans revêtement, afin d'acheminer de l'eau de la rivière vers le puisard de la parcelle ou vers les cultures directement
- Les motopompes vétustes qui présentent des fuites importantes
- Les jointures entre les conduites en PVC et autres flexibles chargés d'acheminer l'eau, présentant d'énormes fuites
- L'irrigation à la limite de l'inondation de certaines parcelles, du fait de la méconnaissance des bonnes pratiques d'irrigation
- etc.

Il apparaît à ce niveau qu'une efficacité de 100% pourrait paraître idéaliste ! Mais alors pourquoi pas une efficacité de 50%, sur la base de quelques améliorations en matière de pratiques d'irrigation ?

L'idée maitresse de cette solution alternative serait d'amener le producteur à être plus conscient, plus responsable de l'eau qu'il utilise gratuitement.

Le choix d'une efficacité d'irrigation de 50% (quels que soient le type d'exhaure et la culture pratiquée) sera évalué et comparé à celui d'une efficacité de 30%, au sens des débits en aval de la zone d'étude.

### **10.1.3 Une meilleure adéquation entre les ressources en eau disponibles et les types de cultures choisis**

Une certaine adéquation est à rechercher entre le type de culture pratiqué et les ressources dont on dispose pour produire. Il ne viendrait pas à l'esprit d'un producteur sensé de vouloir pratiquer une culture forte consommatrice en eau à partir d'une ressource en eau limitée ?! Ainsi ce dernier ferait l'un des ajustements suivants :

- Soit il changerait de type de culture et choisirait un type de culture qui s'adapte à ses ressources en eau
- Soit il choisirait de n'exploiter que partiellement sa parcelle (en maintenant la culture choisie) de sorte à satisfaire pleinement les besoins en eau de ses cultures
- Soit il augmenterait le niveau de ses ressources en eau afin que celles-ci arrivent à satisfaire les besoins en eau de toute sa parcelle mise en culture.

Le premier cas de figure ci-dessus cité est bien faisable et serait même à encourager, car étant le fait d'un producteur conscient des limites de son système de production. Toutefois, ce cas de figure n'est pas simulable en l'état par le modèle, car l'algorithme approprié n'a pas été écrit. En rappel, l'une des hypothèses concernant les systèmes de production au sein du modèle, était que l'un des seuls

facteurs limitant était le facteur économique. En effet, sur le terrain, il n'a pas été rencontré beaucoup de cas dans lesquels l'eau était clairement le principal facteur limitant à la production agricole (à l'exception de la production agricole à Sambla-Toukoro, dans une moindre mesure).

Le troisième cas de figure est celui qui serait le plus envisageable au regard des pratiques qui ont cours sur la zone d'étude : le producteur investirait dans l'augmentation de ses ressources en eau, si cela pourrait lui permettre d'adopter une culture lui rapportant plus (bien au delà de l'investissement consenti pour l'augmentation de ses ressources en eau).

Au sein du troisième cas de figure, plusieurs solutions sont alors envisageables au sein du modèle. L'une des solutions serait d'assouplir les règles d'irrigation et rendre moins exclusifs les types d'exhaure. Ainsi, on verrait apparaître pour la première fois (au sein du modèle) une irrigation mixte, faite à partir de la rivière et des eaux souterraines, pour des parcelles placées dans une certaine configuration, ou occupées par des cultures fortes consommatrices en eau. Une première hypothèse serait de suggérer que l'irrigation partielle ou totale par les eaux souterraines se fasse de manière graduelle, en fonction de l'éloignement de la parcelle d'avec la rivière. Schématiquement par exemple, l'ordre suivant apparaîtrait : les parcelles situées entre 0 et 100 m de la rivière seraient irriguées uniquement à partir des eaux de surface ; les parcelles situées entre 100 m et 200 m de la rivière seraient irriguées de façon mixte (eaux de surface et eaux souterraines) ; les parcelles situées au-delà de 200 m de la rivière seraient irriguées à partir des eaux souterraines uniquement.

L'un des inconvénients de cette alternative serait d'amener systématiquement tous les producteurs situés à plus de 100 m de la rivière à creuser des puits pour l'irrigation. Cette mesure pourrait se révéler contre-productive en ce sens qu'elle ne fait pas de distinction entre les besoins en eau des différents types de cultures pratiqués, elle ne fait pas de distinction entre les superficies des parcelles, etc. Le producteur possédant une petite parcelle d'une culture peu consommatrice en eau n'adhérerait pas forcément à l'idée de devoir creuser un puits pour l'irrigation de ses cultures.

Une autre alternative a alors été élaborée et c'est cette dernière qui fera l'objet d'une évaluation car pouvant être mise en œuvre sans grandes difficultés à partir des algorithmes déjà existants au sein du modèle. Dans cette alternative, les cultures fortes consommatrices en eau (exemple : gombo, riz) sont irriguées obligatoirement par les eaux souterraines. Ainsi l'irrigation des eaux de surface ne concernerait plus que les cultures de maïs, de banane et de chou.

#### **10.1.4 La taxation des exploitations de plus de 0.5 ha irriguées à partir des eaux de surface**

Cette alternative semble assez proche de celle de la taxation des parcelles de cultures fortes consommatrices en eau. Toutefois, elle se différencie de cette dernière par le fait que ce n'est plus le type de culture qui est visé mais plutôt la superficie de l'exploitation. En effet cette dernière influence fortement les quantités d'eau consommées, indépendamment des cultures en place.

L'un des effets observables d'une telle mesure serait une relative baisse au niveau de rentes, par rapport à leurs niveaux initiaux. En réaction à ce stimulus, il est intéressant de savoir si en compensation de ces pertes, les producteurs optimiseront la productivité de l'eau (moins de prélèvements) et des terres (choix d'une culture de rente élevée).

Le montant de la taxe est fixé de manière arbitraire à 20% des revenus. Cette mesure concerne en moyenne 81 parcelles, soit près de 40% des parcelles de l'espace.

## 10.2 Évaluation des alternatives retenues

L'évaluation des alternatives s'est faite une fois encore par des simulations en adaptant le modèle, que ce soit lors de son initialisation ou de sa marche, aux conditions imposées par les alternatives. D'une manière générale, les simulations se sont faites sur 3 cycles de 365 pas de temps, avec 5 répétitions, afin de consolider les observations découlant des analyses des résultats des simulations.

Pour ces évaluations, l'accent a été mis sur l'observation des débits en aval, débits rappelons-le, qui sont (dans l'état actuel du système) à la base de frustrations en aval, du fait de la satisfaction partielle des besoins en eau.

Pour toutes les simulations, le nombre de producteurs choisis pour le semis à chaque pas de temps (en début de simulation) a été maintenu à 6 ; la distance-seuil à la rivière, déterminant le type d'exhaure a été maintenue à 200 m ; le nombre de producteurs prélevant simultanément dans la rivière pour l'irrigation a été maintenu à 4.

L'évaluation des débits en aval se fera uniquement pour les 180 premiers pas de temps, ce qui correspond aux 6 premiers mois de l'année, période durant laquelle a cours la campagne agricole de contre-saison.

### 10.2.1 La taxation des cultures les plus consommatrices en eau

La première mesure de taxation observée concerne le riz. La taxation a consisté en un doublement du prix des charges liées à la culture du riz. Cette augmentation de charge est censée refléter une hypothétique taxe imposée par l'État burkinabé aux producteurs de riz de la zone d'étude, afin de décourager la pratique de la culture, de faire payer indirectement de l'eau aux plus gros consommateurs, et enfin, de replacer le périmètre rizicole de la vallée du Kou (à Bama, en aval) au centre de la production rizicole au sein du bassin versant du Kou.

L'évaluation des résultats montre que la mesure (augmentation des charges de production du riz) n'est pas très efficace. Elle a juste tendance à freiner une augmentation des superficies en culture de riz, en gardant constante les quotas de production de riz à Bana et Sambla-Toukoro (voir Tableau 84, Tableau 85, Tableau 86). A Diaradougou, la tendance déjà observée, qui était l'abandon progressif de la culture du riz au profit de celle de la banane, se maintient. Toujours à Diaradougou, à la faveur de l'augmentation des charges de production du riz, on observe l'apparition de la pratique de la culture du chou, pour le premier cycle de 365 pas de temps. Après le premier cycle, le chou disparaît de nouveau. On peut supposer qu'en fin de saison agricole, les revenus générés par cette culture ne sont pas meilleurs à ceux des autres cultures.

Tableau 84. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du riz, au sein de l'UAT de Bana

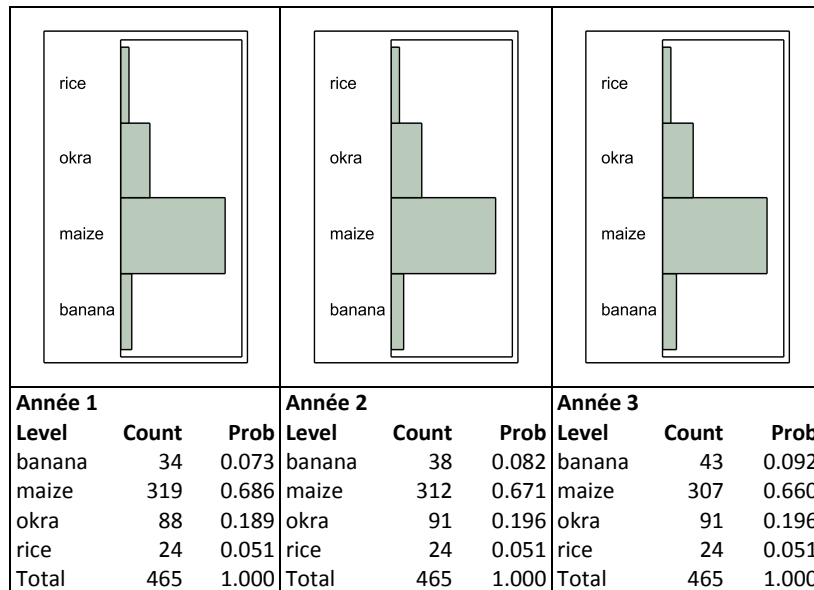


Tableau 85. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du riz, au sein de l'UAT de Diaradougou

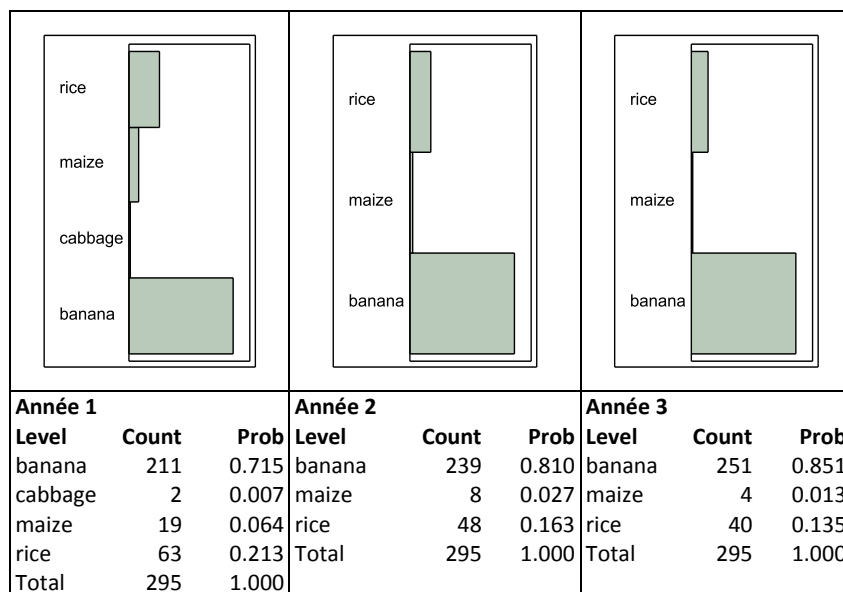
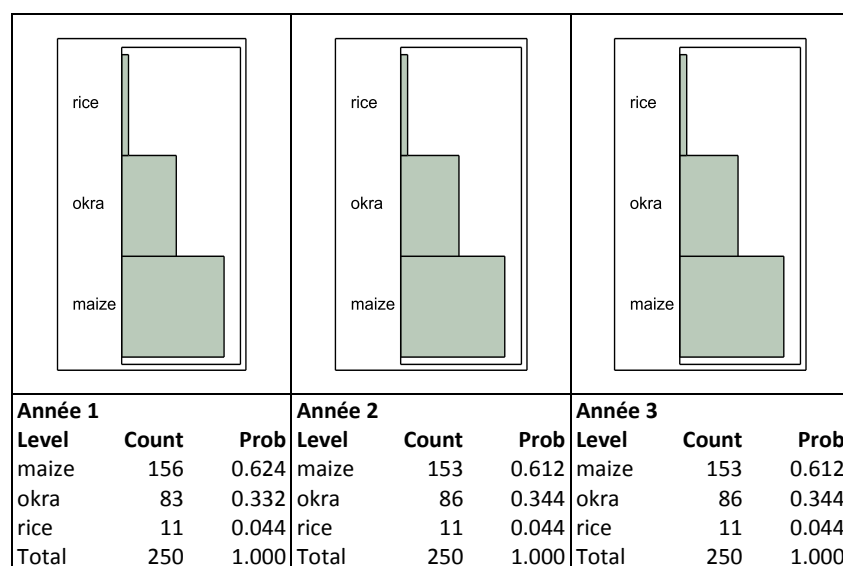


Tableau 86. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du riz, au sein de l'UAT de Sambla-Toukoro



La seconde mesure de taxation d'une culture est celle du gombo. Les résultats des simulations montrent que la mesure visant à augmenter les charges de production du gombo, est apparemment sans effet dans la mesure où la production du gombo reste légèrement croissante au sein des UAT de Bana et Sambla-Toukoro (voir Tableau 87, Tableau 88). La mesure n'a pour effet que de faire baisser les gains liés à la pratique de cette culture, mais n'entraîne pas son abandon automatique pour une autre culture. A Bana et à Sambla-Toukoro, l'une des cultures phares après le maïs, est le gombo. Malgré une baisse de la rente du gombo, si cette rente reste supérieure à celle du maïs ou du riz, le gombo sera encore et toujours prisé. Pour un meilleur succès d'une taxation de la culture de gombo (ou du riz), il faudrait au même moment rehausser considérablement les marges brutes de la culture du maïs, par exemple. Ce qui serait très peu probable dans la réalité, dans la mesure où les cours des produits agricoles sont fixés par le marché et pas toujours régulés par les États, sauf dans des situations exceptionnelles.

Tableau 87. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du gombo (okra), au sein de l'UAT de Bana

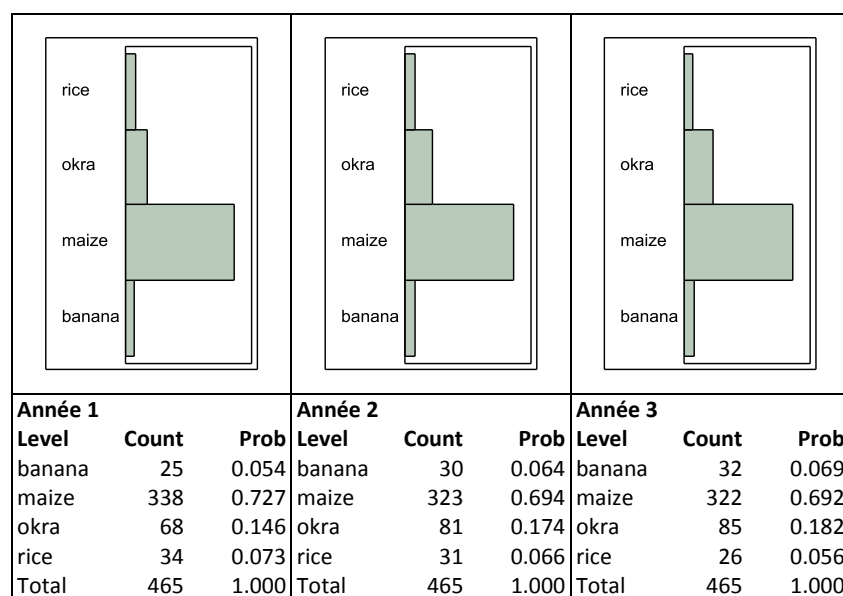
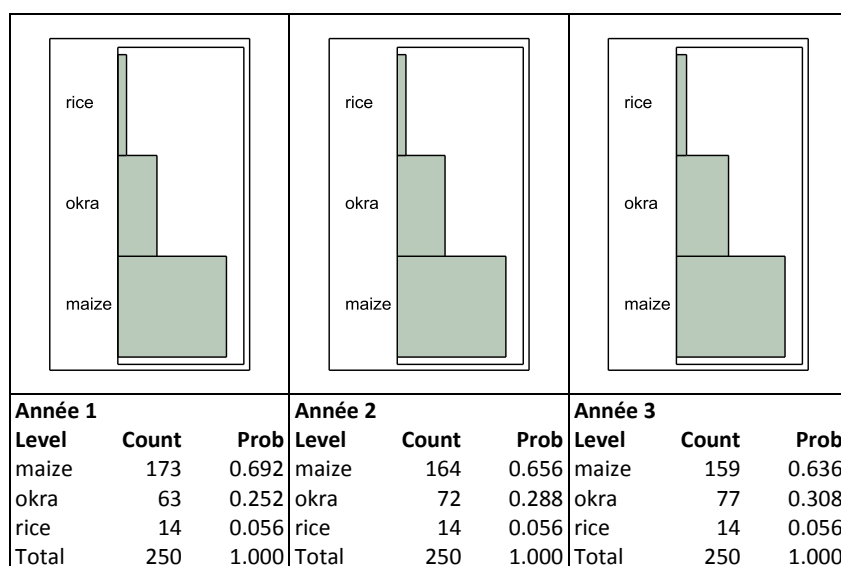


Tableau 88. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du gombo (okra), au sein de l'UAT de Sambla-Toukoro



L'augmentation simultanée des charges de production sur les cultures de gombo et de riz aboutit finalement aux résultats présentés plus haut dans le paragraphe, à savoir que la mesure ne produit que peu d'effet. On observe encore une stagnation de la production de riz dans les UAT de Bana et Sambla-Toukoro, et une augmentation ininterrompue de la part des cultures de gombo (voir Tableau 89, Tableau 90, Tableau 91). Une fois de plus, faute d'alternatives les producteurs continueront d'adopter les cultures à fortes marges brutes (exemple : gombo), tant que leurs moyens leur permettent de supporter les charges liées à la pratique de ces cultures.

Tableau 89. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du riz et du gombo, au sein de l'UAT de Bana

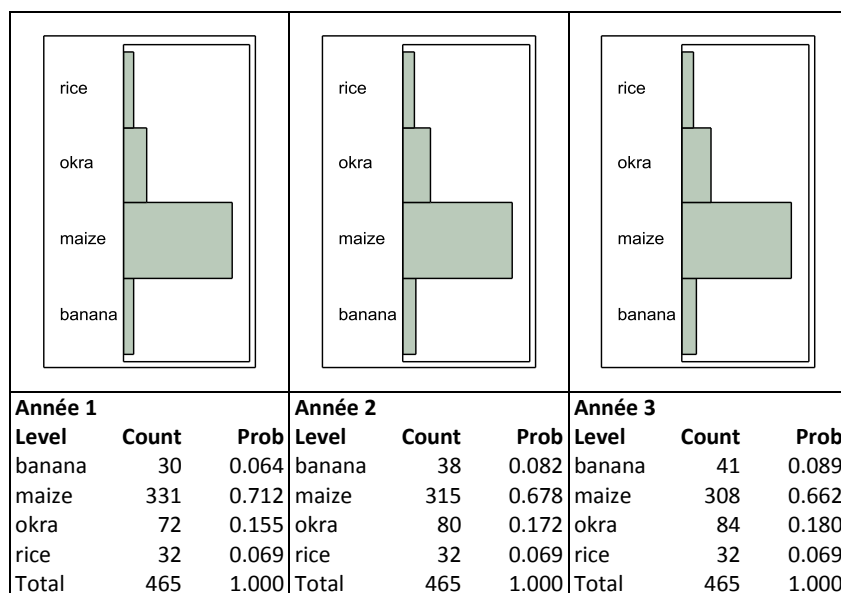


Tableau 90. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du riz et du gombo, au sein de l'UAT de Diaradougou

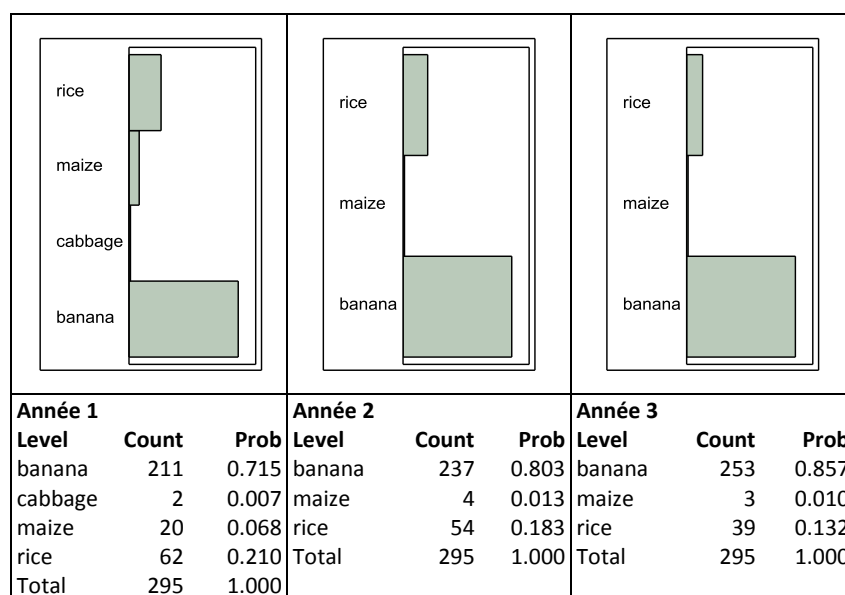
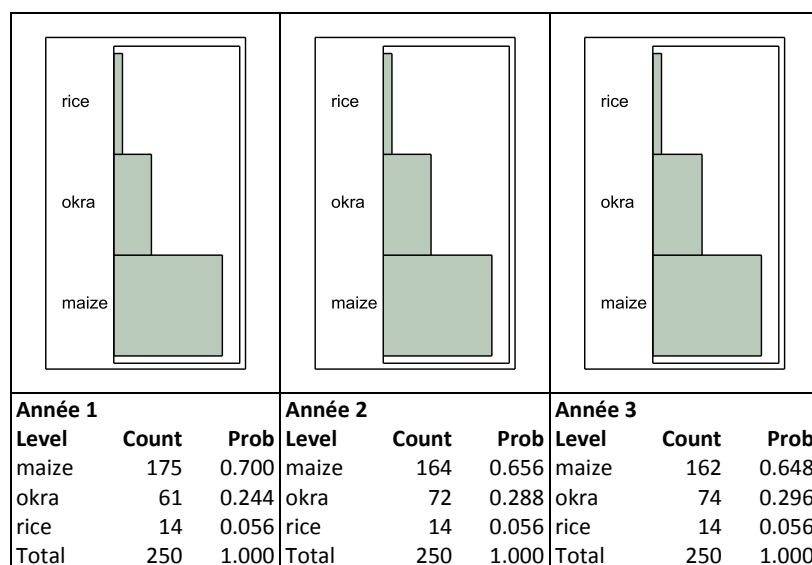


Tableau 91. Évolution de l'occupation du sol après augmentation des charges de production du riz et du gombo, au sein de l'UAT de Sambla-Toukoro

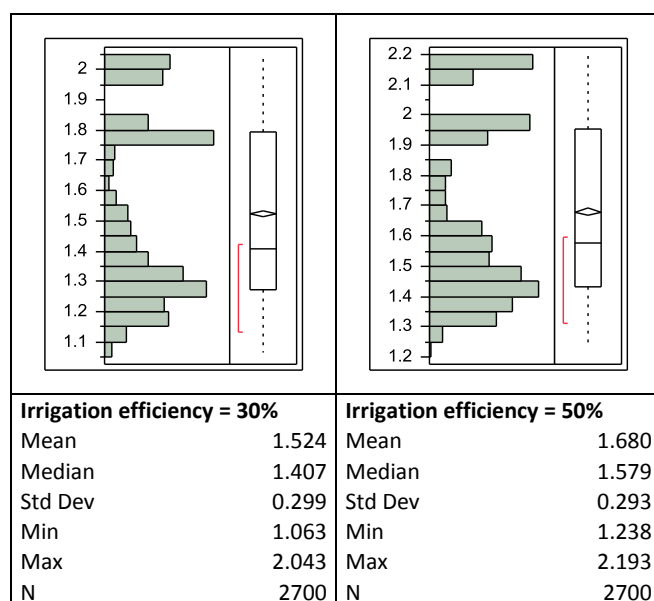


En conclusion de cette partie, on peut remarquer que le pari d'une meilleure optimisation des ressources en eau ne se fera pas (tenant compte des hypothèses du modèle) seulement en augmentant les charges des cultures fortes consommatrices en eau. Pour accompagner une telle mesure, il faudrait de fortes mesures incitatives ou mieux, la proposition d'alternatives permettant de maintenir (ou augmenter) les niveaux de rente déjà atteints.

### 10.2.2 L'amélioration des efficacités en eau d'irrigation

L'amélioration des efficacités d'irrigation, passées de 30% à 50%, permet un gain de 10% par rapport à la moyenne des débits en aval de la zone d'étude (voir Tableau 92). La moyenne des débits en amont durant les 6 premiers mois de l'année étant de 1.89 m<sup>3</sup>/s, ils passent respectivement en débit de sortie de 1.52 à 1.68 m<sup>3</sup>/s. La moyenne des prélèvements d'eau dans la rivière pour l'irrigation passerait de 0.37 m<sup>3</sup>/s, à 0.21 m<sup>3</sup>/s.

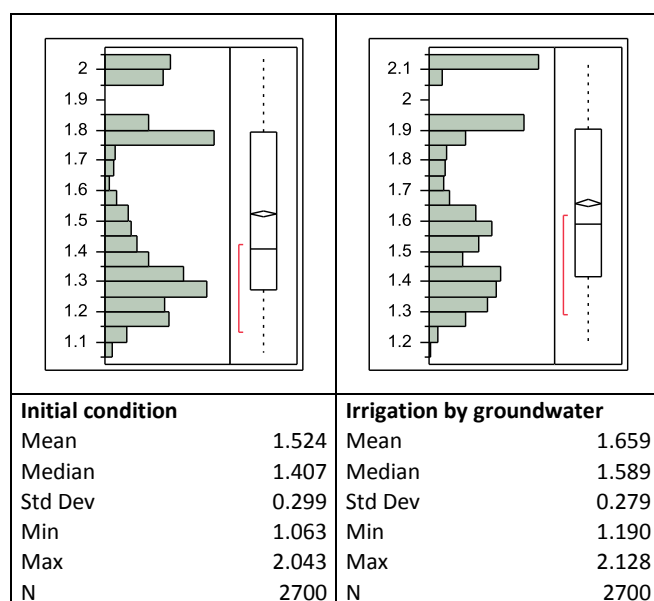
Tableau 92. Distributions des valeurs de débits ( $m^3/s$ ) simulées en aval de la zone d'étude, pour des efficacités d'irrigation de 30% et 50%



Cette amélioration substantielle dans le niveau des prélèvements s'est faite au sein du modèle sans changer la configuration de l'occupation du sol. C'est dire qu'en maintenant en place toutes les cultures, y compris les plus consommatrices en eau, et en jouant (si possible) sur les efficacités d'irrigation, il est possible de faire un bon pas dans le sens de l'optimisation des ressources en eau.

### 10.2.3 Une meilleure adéquation entre les ressources en eau disponibles et les types de cultures choisis

L'évaluation de l'alternative selon laquelle les cultures fortes consommatrices en eau pourraient être irriguées uniquement à partir des eaux souterraines a fourni un gain de près de 9% en termes de débits en aval, par rapport à une situation initiale au sein de laquelle il n'existe aucune contrainte quant au type d'exhaure (voir Tableau 93). Ce résultat est proche de celui obtenu précédemment en améliorant les efficacités d'irrigation.

Tableau 93. Distributions des valeurs de débits ( $m^3/s$ ) simulées en aval de la zone d'étude, avant un après un recours important aux eaux souterraines pour l'irrigation


Cette amélioration des valeurs de débits en aval s'est aussi faite, sans changer la configuration de l'occupation du sol. Ce résultat montre qu'il est réellement possible de faire des économies sur les prélèvements d'eau de surface, pour peu que les eaux souterraines soient une source durable d'irrigation.

#### 10.2.4 La taxation des exploitations de plus de 0.5 ha irriguées à partir des eaux de surface

L'application d'une taxe sur les exploitations de plus de 0.5 ha a effectivement eu pour effet de réduire quelque peu les revenus médians des producteurs (voir Tableau 94, en comparaison du Tableau 62 page 114). Toutefois la baisse des revenus a été relativement plus sévère au sein de l'UAT de Sambla-Toukoro qu'à Diaradougou où les effets semblent être moindres (voir Tableau 95). L'amortissement de l'effet de la taxation pourrait être dû aux revenus importants générés par l'occupation du sol majoritairement en banane à Diaradougou.

Tableau 94. Valeurs médianes des revenus des producteurs par UAT (en euros), après application d'une taxe aux exploitations de plus de 0.5 ha

UAT	Valeur médiane an 1	Valeur médiane an 2	Valeur médiane an 3
Bana	1589	2050	2192
Diaradougou	4317	6506	8578
Sambla-Toukoro	862	1371	1854

Tableau 95. Taux de croissance moyens des revenus après application d'une taxe aux exploitations de plus de 0.5 ha

UAT	Taux de croissance moyen sur 3 ans (%)
Bana	-6.04
Diaradougou	-0.12
Sambla-Toukoro	-12.10

L'application d'une taxe sur les exploitations de plus de 0.5 ha affecte très peu (ou pas) l'occupation du sol au sein des UAT (voir Tableau 96, Tableau 97, Tableau 98). Il semble alors que les producteurs au sein du modèle n'auront pas été réactifs à ce stimulus, en modifiant leur occupation du sol de sorte à combler le manque occasionné par l'application de la taxe.

Tableau 96. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures au sein de l'UAT de Bana, après application d'une taxe aux exploitations de plus de 0.5 ha (5 répétitions)

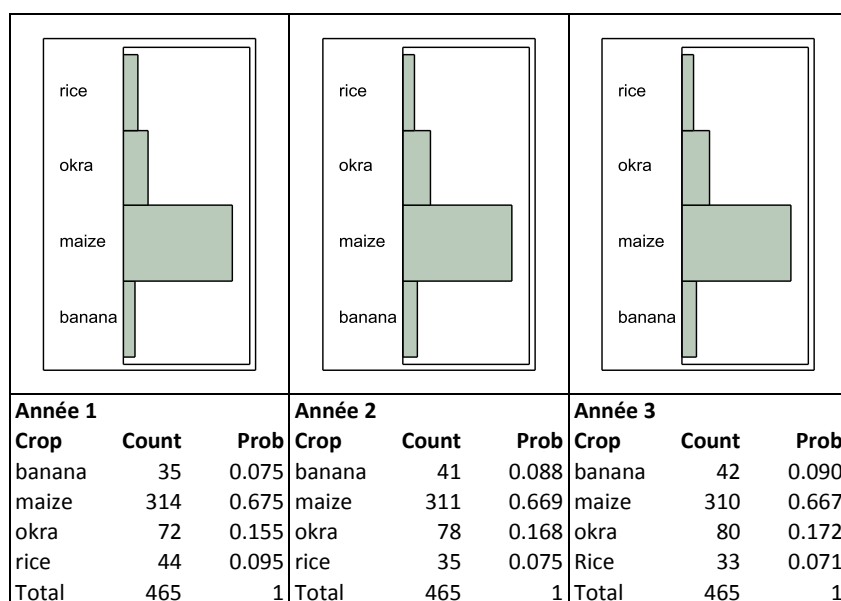


Tableau 97. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures au sein de l'UAT de Diaradougou, après application d'une taxe aux exploitations de plus de 0.5 ha (5 répétitions)

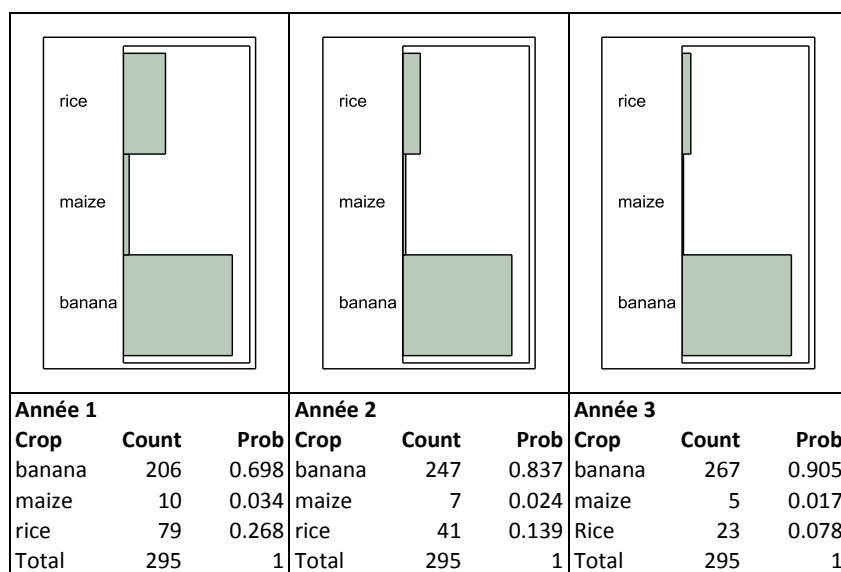
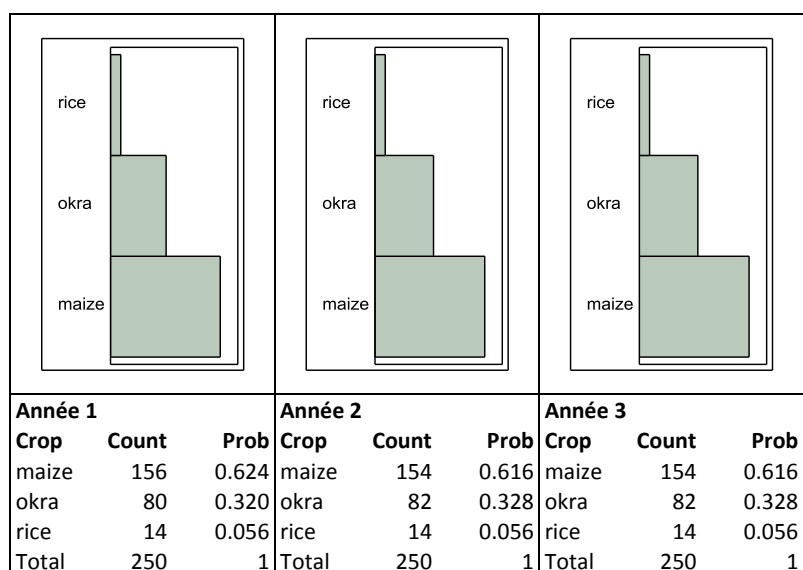


Tableau 98. Valeurs moyennes des occupations du sol par les cultures au sein de l'UAT de Sambla-Toukoro, après application d'une taxe aux exploitations de plus de 0.5 ha (5 répétitions)



### 10.3 Applicabilité des alternatives retenues sur le terrain

Après évaluation des quelques alternatives retenues, il reste à s'assurer de l'applicabilité sur le terrain de mesures évaluées au sein de l'espace de simulation qu'est le modèle. Rappelons-le, le modèle en lui-même n'est qu'une représentation simplifiée de la réalité. Ce qui implique qu'un scénario donné au sein du modèle, devra être réadapté à la réalité, et évalué par une expertise avant d'envisager son application sur le terrain.

Les alternatives simulées par le modèle ont été présentées l'une après l'autre au collège d'experts locaux afin de juger de leur crédibilité et de leur applicabilité sur le terrain. Dans l'optique d'évaluer la crédibilité des alternatives proposées, il n'est pas pris en compte la combinaison d'alternatives.

D'après les experts locaux, l'alternative qui consiste à taxer les cultures fortes consommatrices en eau rentre un peu dans le cadre de la politique nationale de gestion de l'eau à travers le principe du préleveur-payeur (voir GWP/AO, 2009 ; MAHRH, 2009). Cette alternative mériterait d'être mûrement réfléchi avant d'être retenue, car étant trop hypothétique. Sur le terrain, il n'existe pas encore de structure ou une quelconque autorité capable d'imposer de telles taxes. Ensuite, de telles taxes seraient si impopulaires qu'elles auraient très peu de chance d'être appliquées. Les experts suggèrent un processus progressif qui viserait en priorité les plus grands exploitants avant de s'étendre à tous les exploitants sous forme d'une taxe basée sur l'assolement. Il apparaît ainsi clairement pour cette alternative que des lois existent déjà, mais ne sont pas mises en application.

L'amélioration des efficacités d'irrigation semble être un objectif atteignable de l'avis des experts. Ils considèrent cette alternative comme étant la priorité des priorités en matière de gestion de l'eau au sein de la zone d'étude. Selon M. Noufou Zango il serait possible de rendre les jointures entre canalisations et flexibles des réseaux d'irrigation, plus étanches. De l'avis de cet expert local cette solution serait à la portée des producteurs.

Le recours aux eaux souterraines pour l'irrigation est déjà une réalité sur la zone d'étude. Toutefois, une question essentielle demeure : **les eaux souterraines sont-elles en quantité suffisante pour soutenir seules l'irrigation au sein de la zone d'étude ?** De l'avis des experts, avec l'entrée en vigueur

du respect d'une zone-tampon de 100 m de part et d'autre du Kou, en vue de la protection de ses berges, les producteurs n'auront pas d'autre choix que d'adopter massivement l'irrigation par les eaux souterraines. A en croire M. Noufou Zango, l'utilisation des puisards pour l'irrigation est assez répandue sur la zone d'étude. Ce sont les moyens financiers qui manquent à beaucoup de producteurs pour agrandir leurs puisards et surtout stabiliser les berges de ces puisards afin qu'elles ne soient pas rapidement endommagées.

La taxation des exploitations de moyennes à grandes superficies irriguées à partir des eaux de surface entre également dans le cadre de la politique nationale de gestion de l'eau en agriculture. De l'avis du collègue d'experts locaux, elle serait à encourager vivement. Toutefois pour plus d'efficacité, l'application de la taxation sur les exploitations devrait être accompagnée de mesures incitatives telles que la revalorisation des prix de ventes de cultures alternatives en vue de permettre un maintien des niveaux de rente déjà atteint par les cultures consommatrices d'eau, en place.

Les bénéfices à long terme de la taxation sur les exploitations sont une meilleure productivité de l'eau et des terres.

## 10.4 Conclusion

Les propositions pour l'amélioration de l'utilisation de l'eau au sein de la zone d'étude ont toutes à leur base un point commun, à savoir la perception que les utilisateurs ont de la ressource qu'ils utilisent. L'objectif de l'optimisation de l'utilisation de l'eau au sein de la zone d'étude ne saurait se soustraire à cette base et par suite à la volonté (ou non) des utilisateurs de ménager cette ressource.

Malgré les difficultés de gestion du bien commun qui est la ressource en eau, il est important que les utilisateurs ne confondent pas le caractère informel de l'usage qu'ils font de leur ressource avec une forme d'anarchie. Il n'est pas non plus nécessaire pour eux d'attendre d'être dans une situation pleinement conflictuelle avec les utilisateurs plus en aval, avant de se décider à prendre mieux en main la ressource dont ils disposent.

La liste des propositions pour solutionner le problème d'eau peut s'allonger, mais il n'était pas dans les objectifs de cette étude de tester toutes les solutions possibles. La zone d'étude ayant ses spécificités, il a semblé préférable pour l'étude de faire un diagnostic des pratiques d'irrigation, afin de proposer des solutions en rapport direct avec les insuffisances découlant du système.

En l'état, les propositions qui pourraient être retenues afin d'être expérimentées sur le terrain, sont finalement celles en rapport direct avec les pratiques d'irrigation (à savoir, l'amélioration des efficacités d'irrigation et le recours aux eaux souterraines). Les solutions en rapport avec les autres aspects des systèmes de production (changement de l'occupation du sol, limitation des superficies des grandes cultures) ou les solutions passant par des regroupements de producteurs semblent avoir peu d'effets ou/et se révèlent difficiles d'application. En fait, les solutions visant la constitution de groupes pour la réalisation d'un objectif de production ou de gestion de l'eau n'ont pas été abordées dans cette partie de l'étude, du fait du caractère encore individualiste<sup>54</sup> des producteurs de la zone d'étude.

De même l'aspect purement foncier n'a pas été abordé au cours de l'étude dans la mesure où la loi portant sur la réforme agraire et foncière élaborée en 1984 et relue en 1991, en 1996 et en 2010, peine à être appliquée (voir M.E.F, 1996; Barry, 2010). Dans un tel contexte, il serait assez difficile d'imaginer l'impact sur l'organisation de l'agriculture dans la zone, qu'aurait une quelconque Autorité de Mise en Valeur (AMV). Il serait aussi difficile de mesurer concrètement les effets de l'application

---

<sup>54</sup> Communication orale, Noufou Zango, DPAHRH

d'une distance-tampon de 100 m à partir des berges (pour la protection de celles-ci) ; une telle mesure impliquerait inévitablement un aspect foncier, au moins dans la délocalisation des producteurs touchés par cette mesure.

Pour ce qui concerne l'applicabilité des solutions proposées, elles devront encore franchir des étapes importantes telles que leur acceptation socioculturelle. En zone rurale (et pas seulement) cet aspect non négligeable peut être garant ou non du succès d'une solution proposée.

Tout au long de l'étude, il est revenu à plusieurs reprises le caractère plutôt prospère de l'agriculture de contre-saison (en général) sur la zone d'étude. Ce niveau général de prospérité ne doit pas pour autant occulter la précarité des petits exploitants. Cette catégorie d'exploitant rencontre encore des difficultés quant à la mobilisation de plus importantes ressources en eau (exemple : élargissement de puisards) qui leur permettrait d'accroître leur production. Un tel contexte appelle alors à la prudence quant une promotion rapide de nouvelles techniques d'irrigation plus efficaces mais plus coûteuses, telles que le goutte-à-goutte. Cette technique ne serait tout simplement pas à la portée des petits exploitants.

Pour l'heure, il y a urgence à mettre en œuvre des concertations afin de sensibiliser les utilisateurs de la ressource eau, sur l'importance d'une meilleure utilisation de la ressource, afin que l'activité agricole de contre-saison soit durable et toujours aussi prospère. Ces concertations pourraient également être le lieu d'échanges permettant d'une part, au modélisateur d'améliorer sa perception de l'espace, et d'autre part, aux producteurs de trouver ensemble des solutions construites d'un commun accord pour une meilleure utilisation de l'eau.

Aux autorités en charge de la gestion des ressources en eau à l'échelle du Burkina Faso, il revient la lourde responsabilité de légiférer sur l'usage des ressources en eau. Même si les ressources en eau au sein de la zone d'étude existent à un niveau local, elles restent avant tout un patrimoine national.



## **Partie 5 : Discussion générale, conclusion générale et perspectives**

## Chapitre 11. Discussion générale, conclusion générale et perspectives

Au terme de cette étude sur l'optimisation des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin versant du Kou, il convient de se poser quelques questions fondamentales sur l'étude. Concernant la question de la justification de l'étude, faudrait-il encore se la poser, tant tout au long de l'étude, le lecteur se sera bien rendu compte de toute l'importance de la problématique qui touche à la fois à l'eau et à l'agriculture, deux éléments essentiels pour la sécurité alimentaire des populations.

En rappel, le Burkina Faso, pays sahélien, dépend fortement de l'agriculture (qui contribue à 33% à son Produit Intérieur Brut) avec une production végétale qui est en grande partie liée à la distribution spatio-temporelle des pluies. L'agriculture ne se pratique alors majoritairement que durant les 4 à 5 mois de la saison des pluies (juin à octobre). En dehors de la saison des pluies, il n'existe que quelques rares zones (à l'échelle du pays) où une agriculture utilisant d'autres sources d'eau que la pluie, reste possible. Le bassin du Kou fait partie de ces rares zones. Toutefois, il est à noter que le potentiel en terre irrigable estimé en 2006 à 2363 000 ha soit moins de 2% des terres cultivables (Zoungrana and Kaboré, 2009) est faiblement exploité au Burkina Faso, ce qui conduit les producteurs à s'installer de plus en plus dans les quelques zones exploitées. Le bassin versant du Kou n'échappe pas à cette "ruée". Il s'ensuit alors des problèmes liés au caractère informel des zones agricoles du bassin versant. Parmi ces problèmes figurent l'absence de règles en matière d'installation sur les terres (problème foncier), et surtout (pour ce qui concerne cette étude) l'absence de règles sur l'utilisation de l'eau pour l'irrigation.

Si des lois nationales suffisent à préciser presque complètement le droit foncier, le droit de l'eau en dépit de la législation existante (voir MAHRH, 2009) est plus complexe du fait de la mobilité de l'eau qui n'existe pas pour le sol. Ce sont les relations entre l'amont et l'aval des écoulements qui ajoutent de la complexité au phénomène. *"Quoique fasse mon voisin sur sa parcelle, je disposerai toujours de la mienne. Par contre, si mon voisin prélève toute l'eau du ruisseau qui traverse nos deux parcelles et l'assèche avant qu'il ne pénètre sur la mienne, je ne dispose plus de l'eau du ruisseau à laquelle je prétendais avoir droit"* (Axès, 1998).

Le principal problème de l'agriculture irriguée au sein du bassin versant Kou étant celui de la satisfaction des besoins en eau de tous les utilisateurs de la ressource en eau, notre recherche aura tenté de répondre à la sollicitation des autorités en charge de la gestion de l'eau du bassin versant du Kou (en l'occurrence le CLE-Kou<sup>55</sup>), pour la mise en place d'un outil d'aide à la gestion de l'eau en agriculture.

Cet outil devait permettre aux gestionnaires des ressources en eau, de réaliser des projections en matière de trajectoires de gestion de l'eau, afin de prévenir d'éventuels conflits entre l'amont et l'aval, liés à la satisfaction des besoins en eau.

C'est ainsi que pour répondre aux objectifs fixés, la méthodologie générale adoptée a été structurée autour de deux points principaux : la compréhension des mécanismes du système de gestion informel de l'eau dans la zone d'étude, et l'amélioration du système de gestion informel de l'eau dans la zone d'étude.

Au cours de la phase de compréhension des mécanismes du système de gestion de l'eau de nombreux champs disciplinaires ont été investigués à la recherche d'informations essentielles à la

---

<sup>55</sup> Comité Local de l'Eau du Kou

caractérisation de ce système de gestion. Cette phase a nécessité une collecte de données assez exhaustives sur les ressources en eau disponibles et sur l'utilisation qui en était faite. La caractérisation du système s'est avérée complexe à étudier en raison des multiples interactions et des acteurs en jeu. Toutefois les matériels et méthodes utilisés au cours de cette première phase ont permis de dresser des contours assez distincts du système informel de gestion/utilisation de l'eau dans la zone d'étude.

La seconde phase de la méthodologie générale a consisté en l'élaboration d'un outil pouvant permettre l'amélioration du système de gestion de l'eau. L'outil élaboré l'a été en suivant comme lignes directrices les contours du système tel qu'il existe. La vocation de l'outil mis en œuvre est l'aide à la décision. En cela, il a permis l'exploration des conséquences de choix de gestion choisis.

Différentes étapes au cours de la mise en œuvre de la méthodologie générale auront permis la mise en valeurs de résultats intermédiaires qui présentent un grand intérêt pour la problématique de la gestion de l'eau sur le bassin versant du Kou. Ce sont entre autres :

- **L'étude des débits de la rivière Kou.** L'hydrométrie au sein de la zone d'étude a fait l'objet d'un suivi avec la mise en place d'un réseau de mesure automatique des hauteurs d'eau (converties en débits) dans le Kou, ayant permis l'acquisition de données possédant une résolution temporelle de 5 minutes (voir partie 3.1).
- **La mise à jour de la structure de la concurrence pour l'eau en agriculture sur le bassin versant du Kou.** Les résultats de l'étude des débits de la rivière Kou ont permis non seulement une actualisation des débits et mais aussi une actualisation des niveaux de prélèvements d'eau pour l'irrigation au niveau des différentes zones agricoles du bassin versant. Les débits et prélèvements ont été mis en comparaison avec les besoins en eau de ces différentes zones agricoles, donnant ainsi un aperçu de la carte des déficits en eau d'irrigation (voir partie 3.1.3). Les résultats de la mise à jour de la structure de la concurrence pour l'eau en agriculture ont permis de montrer que les déficits en eau sont localisés dans les zones agricoles irriguées en aval du bassin versant.
- **L'évolution des prélèvements d'eau pour l'agriculture.** Sur la base de données historiques de l'hydrométrie, l'étude a montré que les prélèvements en eau d'irrigation dans la rivière pourraient avoir connu une augmentation au cours du temps, probablement due à l'augmentation des superficies irriguées au cours de la même période (voir partie 5.1).
- **L'évolution des superficies agricoles irriguées.** La télédétection a permis d'apporter une information sur l'évolution de l'occupation du sol au sein de la zone d'étude. Ainsi, par une méthode de post-classification basée sur la connaissance de la logique d'évolution de l'occupation du sol, il a été possible de recréer de l'information historique sur l'estimation des superficies en cultures irriguées au cours des 20 dernières années. L'une des conclusions de l'étude sur l'évolution des superficies agricoles irriguées est l'augmentation de plus de 70% de ces superficies entre 1988 et 2009 (voir partie 5.2). La télédétection a également servi à estimer les superficies spécifiques des cultures lors de l'estimation des besoins en eau de ces cultures.
- **L'identification des systèmes de production sur la base de la classification des producteurs.** Une classification des producteurs de la zone d'étude, basée sur des critères pertinents (origine, capital foncier, zone d'appartenance) a permis de mettre à jour les différents types de systèmes de production existant au sein de la zone d'étude (voir partie 6.1.4). La construction du modèle de gestion repose en partie sur les résultats de cette classification des systèmes de production.

La synthèse des résultats intermédiaires ci-dessus cités, ainsi que celle de résultats provenant d'analyses non reprises ici ont permis d'apporter une réponse à la problématique de l'étude. Il importe alors au terme de l'étude de savoir si le problème aura été traité tel qu'il le mériterait, en prenant en compte toute sa dimension.

***L'étude apporte-t-elle une réponse satisfaisante à la problématique posée ?***

L'étude a essayé d'apporter une réponse à la problématique de l'utilisation de l'eau sur le bassin versant, en traitant le problème en amont du système. Ainsi, la zone d'étude choisie répond à une stratégie à long terme visant à résoudre les problèmes, d'amont en aval, préférentiellement. En rappel, le choix de la zone d'étude, en amont, a aussi été guidé par la disponibilité des données et par la volonté d'en faire une zone d'expérimentation pilote.

Les ressources en eau au sein de la zone d'étude ont permis (et permettent encore) aux producteurs autochtones de réaliser des rentes substantielles, ce qui a constitué un attrait pour de nombreux producteurs allochtones, venus s'y installer au fil du temps. Ces nouvelles installations sur le site se sont faites par le biais de ventes, locations, cessions de terrains, sans l'intervention de l'État burkinabé. Ainsi s'est constitué une zone d'aménagement informel d'agriculture irriguée, de près de 650 ha.

Le caractère informel de la zone d'étude a nécessité une approche pluridisciplinaire qui a permis de mieux comprendre le fonctionnement d'un tel système, composé en majorité par des producteurs individuels. Le constat qui se dégage est que les producteurs au sein de la zone d'étude réalisent des rentes appréciables, voire exceptionnelles comparées aux autres productions agricoles réalisées au cours de la saison des pluies. La rentabilité économique apparaît comme un des piliers qui soutient le système. En revanche, assurer la durabilité du système et surtout des ressources existantes n'apparaît pas comme une priorité des producteurs.

Dès lors que les issues du problème peuvent être fortement teintées par les intérêts économiques des individus, il convient de se tourner vers des solutions prenant en compte toute la dimension humaine, sociale, et économique du problème.

La méthodologie retenue pour répondre à la problématique s'est alors reposée sur l'exploration, du système à étudier par l'élaboration d'un modèle basé sur les systèmes multi-agents. L'exploration a permis d'observer les conséquences à court terme (3 ans) des choix de production actuels. Des alternatives ont été proposées pour une meilleure utilisation de l'eau. Ces alternatives reposent sur les insuffisances constatées sur le système dans son état actuel.

L'étude a fourni des éléments permettant une meilleure compréhension hydro agricole et socioéconomique de la zone d'étude. La priorité a été mise sur l'étude des systèmes de production au sein de la zone d'étude, car les prélèvements d'eau pour l'irrigation restent corrélés aux choix de production.

L'étude a permis de simuler les conséquences des choix de systèmes de production sur les débits en aval.

Enfin, l'étude a proposé des pistes de solution à explorer pour optimiser la gestion de l'eau au sein de la zone d'étude. Ces pistes bien que liées aux systèmes de production, sont plus en rapport avec les moyens d'irrigation qu'avec les systèmes de culture. En effet, les solutions envisagées portent surtout sur l'amélioration possible des efficacités d'irrigation et le recours aux eaux souterraines. Ces solutions peuvent paraître évidentes, mais comme toutes les autres solutions envisagées, elles

restent tributaires de la volonté des producteurs. Une action des autorités pour la prévention des conflits basée sur la prise en compte des besoins des producteurs en adéquation avec la durabilité des ressources, pourrait permettre une sensibilisation des producteurs en vue de l'adoption des solutions proposées.

Ce travail, loin d'être une œuvre parfaite, peut toutefois être classé parmi les références techniques des gestionnaires des ressources en eau du Kou. En somme, un outil d'aide à la décision. Car il est important de noter que ce travail s'inscrit pleinement dans l'un des sous-objectifs spécifiques de la seconde phase du Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PAGIRE, initié par le Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques) qui est d' "*assurer le suivi et développer la connaissance des ressources en eau au bénéfice des usagers à travers le Système National d'Information sur l'Eau*". De manière précise, l'étude intègre le domaine d'action n°3 du PAGIRE (MAHRH, 2009) qui est la "*connaissance et suivi des ressources en eau, des usages et des risques*".

### **Quels sont les points forts et les points faibles de l'étude ?**

**Les points forts de cette étude résident dans l'approche méthodologique adoptée.** Cette approche méthodologique a fait appel à plusieurs sciences afin de comprendre un système qui était, a priori, difficile de cerner. Et l'approche par les systèmes multi-agents réalise bien l'intégration de tous les aspects clés des différents champs disciplinaires qui ont servi à caractériser au mieux la zone d'étude.

L'approche par les systèmes multi-agents, elle-même, constitue l'originalité de cette étude : l'utilisation d'une approche pouvant prendre en compte l'interaction entre dynamiques naturelles et dynamiques sociales.

**Les points faibles de l'étude résident (au sein de certains champs disciplinaires) dans la faiblesse des données disponibles, de qualité.** L'étude s'est heurtée à plusieurs reprises à un manque de données, notamment des données historiques ou des données de qualité. Afin de pallier ce problème, des hypothèses ont dû être faites, la durée des campagnes de terrain, souvent infructueuses, pour des vérifications de données, ou tout simplement pour des recherches de données, a été supérieure à la planification initiale.

Au point de vue de la caractérisation socio économique de la zone d'étude, l'absence de budget et le calendrier initial chargé n'ont pas permis de réaliser plus d'une campagne de collecte de données. Plusieurs campagnes de données auraient certainement fourni plus d'éléments d'analyse sur les systèmes de production.

Au point de vue de l'hydrologie du bassin versant, la discontinuité des séries temporelles hydrométriques sur les périodes 1990-2000 et 2000-2010 n'a pas permis de quantifier le rythme auquel les ressources en eau du bassin versant évoluent. Les mêmes constats peuvent être formulés concernant les eaux souterraines. Un suivi irrégulier de ces ressources jusqu'au milieu de la décennie 2000-2010 a longtemps empêché une bonne caractérisation de la nappe. Afin de contourner cette lacune, des hypothèses ont dû être faites à propos des eaux souterraines, au sein du modèle. Toutefois, la flexibilité du modèle à ce niveau permettra une actualisation rapide du module des eaux souterraines, dès la publication des résultats de la thèse d'Élie Sauret<sup>56</sup>.

---

<sup>56</sup> Doctorant à l'Université de Liège, au sein du département Architecture, Géologie, Environnement et Constructions (ArGEnCo). Élie Sauret, sous la conduite du Dr Serge Brouyère, travaille à caractériser les eaux souterraines du bassin versant du Kou, au sein du Projet Eaux Souterraines Bobo (ESO). Ses travaux sont en cours et devraient bientôt être publiés.

---

### ***Est-ce que l'utilisation des systèmes multi-agents se justifiait pour cette étude ?***

L'objet de l'originalité de cette étude pourrait être l'objet de sa critique... A la lumière du travail accompli et des résultats obtenus, l'on pourrait se demander si le choix d'une modélisation par les systèmes multi-agents était pertinent. De tels résultats (ou de meilleurs) n'auraient-ils pas pu être atteints avec des programmes (Exemple : RIBASIM, DHI Mike Basin, MODSIM-DSS, WEAP) plus ou moins complexes de gestion de bassin versant ? La réponse à une telle critique est que le choix de la modélisation par les systèmes multi-agents a été fait après une étude des possibilités offertes par des solutions toutes prêtes qui ont fait leur preuve ailleurs. L'une des lacunes de ces solutions, venaient de leur manque de flexibilité de sorte à s'adapter aux conditions particulières du bassin versant du Kou. Aucune des solutions étudiées n'offraient une prise en compte à la fois des aspects sociaux, économiques, hydrologiques tels qu'ils existent sur la zone d'étude. Dès lors que l'analyse de la problématique a montré que la résolution ne se ferait pas comme dans un cas ordinaire de recherche opérationnel du fait de la prise en compte du champ social, le concept des systèmes multi-agents s'est imposé. Enfin, la modélisation par les systèmes multi-agents offrait l'avantage de la construction d'un modèle basé sur la représentation que peut avoir le modélisateur, de l'environnement et surtout des acteurs de cet environnement, avec les perceptions diverses qu'ils en ont. Des précautions ont été prises afin que cette représentation ne soit pas trop biaisée par rapport à la réalité, en développant un modèle sur la base d'une concertation collégiale et d'une représentation commune<sup>57</sup>.

### ***Quelle est la contribution de cette étude à la science des systèmes multi-agents ?***

La démarche méthodologique adoptée avec les systèmes multi-agents bien qu'étant appréciable n'est pas tout à fait complète sans une phase de restitution (validation sociale ?) qui aurait permis de confronter la représentation du système avec la réalité du terrain. Toutefois, cette étude apporte une contribution à cette science en lui fournissant une autre étude de cas qui aura une fois encore démontré son potentiel dans le domaine de la gestion des ressources naturelles en interaction avec le social. Nul doute que les étapes à venir dans une suite du développement de ce modèle, seront axées sur une meilleure exploitation du potentiel de systèmes multi-agents sur la base d'une meilleure compréhension socio-économique de l'activité agricole dans la zone d'étude.

En outre, bien que l'approche de modélisation par les systèmes multi-agents adoptée pour cette étude diffère de celles de Feuillette et al. (2003) pour la gestion d'une nappe souterraine en Tunisie ; de Becu et al. (2003) pour la gestion de l'eau sur un bassin versant thaïlandais ; ou de van Oel (2012) pour la gestion en eau sur un bassin versant brésilien, l'approche met un accent particulier sur le processus de décision de l'agent. Le processus de décision de l'agent étant un des axes important de recherche dans le domaine des systèmes multi-agents (Bousquet and Le Page, 2004).

### ***A quoi va servir une tel modèle ?***

L'outil ainsi mis en place, loin d'être une finalité, constitue le point de départ d'une nouvelle approche dans la gestion des ressources en eau du Kou, dans la mesure où cette nouvelle approche permet désormais de tenir compte des vues des différents acteurs ou groupes d'acteurs. Un tel outil dans sa composante "validation sociale" va permettre de confronter les acteurs aux conséquences des choix qu'ils font. Cet outil pourra alors servir à une sensibilisation au problème de l'utilisation de l'eau au sein du bassin versant.

---

<sup>57</sup> Il est question ici du collège d'experts locaux

### **Quels sont les perspectives à la suite d'une telle étude ?**

L'une des premières perspectives à donner à l'étude réalisée serait de la confronter à la réalité qu'elle simule afin, par "essais-correction", d'arriver à une représentation du monde réel (voir Figure 63) qui soit commune aux acteurs représentés.

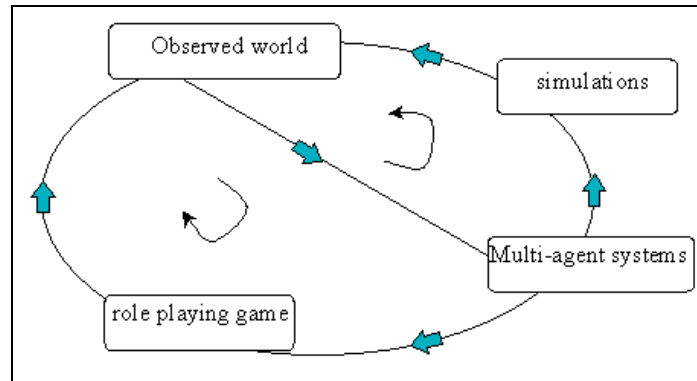


Figure 63. Association de systèmes multi-agents, jeux de rôle et observations de terrain (d'après Barreteau et al., 2001)

Le pari de l'optimisation des ressources en eau en agriculture sur le bassin versant du Kou ne saurait se réaliser si l'outil mis en place devait se limiter uniquement à la zone pilote ayant servi de champ d'expérimentation. Une perspective immédiate est la réplification de l'expérience sur les zones agricoles en aval, situées le long du Kou. Des recherches supplémentaires doivent y être faites, afin soit d'intégrer directement les données de ces zones au sein du modèle existant, ou alors développer d'autres modèles spécifiques à ces zones, en s'inspirant fortement de la présente expérience.

### **Et si l'étude était à refaire ?**

Cette étude reste perfectible dans biens des points, comme souligné lors de différents chapitres. Au-delà de l'étude en cours, la modélisation par les systèmes multi-agents offre une réelle souplesse dans sa mise en œuvre, comme le montre la Figure 63 ci-dessus. L'approche de modélisation mise en œuvre au cours de cette étude a consisté en une collecte assez exhaustive de données afin de s'assurer que ces dernières étaient suffisantes à créer une représentation du système. Alternativement, un autre point de départ très intéressant pour une modélisation par les systèmes multi-agents pourrait consister en l'exploitation d'un set minimum de données permettant la construction d'une représentation sommaire. C'est ensuite par confrontation avec la réalité que cette représentation sera affinée et déterminera les données pertinentes à collecter (voir Barreteau and Bousquet, 2000). Une telle approche présente l'avantage d'optimiser la phase de collecte de données.

## Références bibliographiques

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Axès, F., 1998. Les images SPOT, une source d'information sur l'eau, Droit international des cours d'eau internationaux - éducation à une culture de l'eau partagée et protégée: Kaslik, Liban.
- Bakam, I., Kordon, F., Le Page, C., Bousquet, F., 2001. Formalization of a Spatialized Multiagent Model Using Coloured Petri Nets for the Study of an Hunting Management System, In: Rash, J., Truszkowski, W., Hinchey, M., Rouff, C., Gordon, D. (Eds.). Springer Berlin / Heidelberg, pp. 123-132.
- Banko, G., 1998. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data and of Methods Including Remote Sensing Data in Forest Inventory. International Institute for Applied Systems Analysis: Laxenburg, Austria.
- Barreteau, O., Bousquet, F., 2000. SHADOC: a multi-agent model to tackle viability of irrigated systems. *Annals of Operations Research* 94(1) 139-162.
- Barreteau, O., Bousquet, F., Attonaty, J.-M., 2001. Role-playing games for opening the black box of multi-agent systems: method and lessons of its application to Senegal River Valley irrigated systems, *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*. JASSS.
- Barry, I.K., 2010. Réforme agraire et foncière : Le 3e toilettage sera t-il le bon ? L'Observateur Paalga: Ouagadougou, Burkina Faso.
- Bastiaanssen, W.G.M., Molden, D.J., Makin, I.W., 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible applications. *Agri. Water Manag.* 46(2) 137-155.
- 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. Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso - Institut de Développement Rural: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, p. 61.
- Beck, B., 2002. Model Evaluation and Performance, In: El-Shaarawi, A.H., Piegorisch, W.W. (Eds.), *Encyclopedia of Environmetrics*. John Wiley & Sons, Ltd: Chichester, pp. 1275-1279.
- Becu, N., Perez, P., Walker, A., Barreteau, O., Page, C.L., 2003. Agent based simulation of a small catchment water management in northern Thailand: Description of the CATCHSCAPE model. *Ecological Modelling* 170(2-3) 319-331.
- Bell, E.J., Hinojosa, R.C., 1977. Markov analysis of land use change: Continuous time and stationary processes. *Socio. Econ. Plan. Sci.* 11(1) 13-17.
- Bendjoudi, H., Hubert, P., 2002. Le coefficient de compacité de Gravelius: analyse critique d'un indice de forme des bassins versants. *Hydrological Sciences Journal* 47(6) 921-930.
- Berger, T., Birner, R., McCarthy, N., Díaz, J., Wittmer, H., 2007. Capturing the complexity of water uses and water users within a multi-agent framework. *Water Resources Management* 21(1) 129-148.
- Bonnefond, P., Couty, P., Germain, N., 1988. Systèmes de production agricole en Afrique tropicale : essai de conclusion. *Cahiers des Sciences Humaines* 24(1) 137-144.
- Boulet, G., 1999. Modélisation des changements d'échelle et prise en compte des hétérogénéités de surface et de leur variabilité spatiale dans les interactions sol-végétation-atmosphère, Département Sciences et Géographie. Université Joseph Fourier - Grenoble I: Grenoble, France, p. 265.
- Bousquet, F., 2001. Modélisation d'accompagnement - Simulations multi-agents et gestion des ressources naturelles renouvelables. Université de Lyon 1: Lyon, France, p. 71.
- Bousquet, F., Barreteau, O., Mullon, C., Weber, J., 1996. Modélisation d'accompagnement : Systèmes Multi-Agents et Gestion des Ressources Renouvelables, Colloque International "Quel environnement au XXIème siècle ? Environnement, maîtrise du long terme et démocratie": Fontevraud-l'Abbaye, France, p. 10.
- Bousquet, F., Cambier, C., Mullon, C., Morand, P., Quensière, J., Pavé, A., 1993. Simulating the interaction between a society and a renewable resource. *Journal of Biological Systems* 1(2) 199-214.
- Bousquet, F., Le Page, C., 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling* 176(3-4) 313-332.
- Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R.A., Stone, C.J., 1984. *Classification and Regression Trees*. Chapman & Hall/CRC, Monterey, California, USA.

- Caloz, R., Collet, C., 2001. Précis de télédétection, volume 3 : traitements numériques d'images de télédétection. Presses de l'Université du Québec, Agence Universitaire de la Francophonie, Sainte-Foy, Canada.
- Chabi-Gonni, F.B.G., 2003. Synthèse hydrologique sur la vallée du Kou. Mise en place d'un système de suivi et d'évaluation de la ressource. 2IE: Ouagadougou, Burkina Faso, p. 86.
- Chaib-Draa, B., Moulin, B., Mandiau, R., Millot, P., 1992. Trends in distributed artificial intelligence. *Artificial Intelligence Review* 6(1) 35-66.
- Chander, G., Markham, B.L., 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 41(11) 2674-2677.
- Chander, G., Markham, B.L., Helder, D.L., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sens. Environ.* 113(5) 893-903.
- Chapeaux, J.P., Enomoto, R., 2009. Utilisation des systèmes d'irrigation, Guide d'irrigation. Programme Compétitivité et Diversification Agricoles: Bamako, Mali.
- Clark, P.J., Evans, F.C., 1954. Distance to nearest neighbor as a measure of spatial relationship in populations. *Ecology* 35(4) 445-453.
- Clarke, D., Smith, M., El-Askari, K., 2000. CROPWAT for Windows: User Guide. Food and Agricultural Organization of the United Nations: Rome, Italy.
- Cohen, J., 1960. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educ. Psychol. Meas.* 20(1) pp. 37-46.
- Congalton, R.G., Green, K., 2009. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices, 2nd ed. CRC/Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, USA.
- Conrad, C., Fritsch, S., Zeidler, J., Rücker, G., Dech, S., 2010. Per-Field Irrigated Crop Classification in Arid Central Asia Using SPOT and ASTER Data. *Remote Sens.* 2(4) 1035-1056.
- Coppin, P., Jonckheere, I., Nackaerts, K., Muys, B., Lambin, E., 2004. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *Int. J. Remote Sens.* 25(9) 1565-1596.
- Couty, P., 1987. La production agricole en Afrique subsaharienne : manières de voir et façons d'agir. *Cahiers des Sciences Humaines* 23(3-4) 391-408.
- Crist, E.P., Laurin, R., Cicone, R.C., 1986. Vegetation and soils information contained in transformed Thematic Mapper data In: Agency, E.S. (Ed.), IGARSS' 86 Symposium: Paris, pp. 1465-1470.
- Critchley, W., Siegert, K., 1991. Water Harvesting. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Dagnelie, P., 2006. Statistique théorique et appliquée - Volume 2, 2nd ed. De Boeck.
- Dai, X., Khorrarn, S., 1998. The effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 36(5) 1566-1577.
- Dakoure, D., 2003. Etude hydrogéologique et géochimique de la burdure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina Faso - Mali) - Essai de modélisation. Université Paris VI - Pierre et Marie Curie: Paris, France, p. 266.
- Debrauwer, L., Van der Heyde, F., 2005. UML 2 - Initiation, exemples et exercices corrigés. Editions ENI, Nantes, France.
- Delage, L.M.R., 2006. L'épidémiologie participative, une nouvelle voie pour l'épidémiologie vétérinaire, Ecole vétérinaire. Université Paul-Sabatier: Toulouse, p. 142.
- Derouane, J., Dakouré, D., 2006. Etude hydrogéologique et modélisation mathématique du système aquifère du bassin sédimentaire de Taoudeni au Burkina Faso, Colloque international - Gestion des grands aquifères - 30 mai-1er juin 2006: Dijon, France, p. 21.
- Drogoul, A., 1993. De la simulation multi-agent à la résolution collective des problèmes - Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes multi-agents, Informatique. Université Paris 6: Paris, France, p. 231.
- Drogoul, A., Dubreuil, C., 1991. Eco-problem solving model: result of the N-Puzzle, Decentralized A.I. 3. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, pp. 283-295.
- Ducauze, C., Baillet-Guffroy, A., Bui, T.X., 2009. Choix et validation d'une méthode d'analyse. AgroParisTech: Paris, France.
- Ferber, J., 1995. Les systèmes multi-agents: Vers une intelligence collective. InterEditions.
- Feuillette, S., Bousquet, F., Le Goulven, P., 2003. SINUSE: a multi-agent model to negotiate water demand management on a free access water table. *Environmental Modelling & Software* 18(5) 413-427.

- Fillonneau, C., 1981. Place et rôles des enquêtes agronomiques en milieu rural, *Méthodologie Générale de Recherches en milieu rural : Séminaire du CURD. ORSTOM: Bouaké, Côte d'Ivoire*, p. 10 p. multigr.
- Fondio, L., Djidji, A.H., Kouamé, C., Aïdara, S., N'Klo, H., 2007. Bien cultiver le Gombo en Côte d'Ivoire. Centre National de Recherche Agronomique: Abidjan, Côte d'Ivoire.
- Foody, G.M., 2002. Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sens. Environ.* 80(1) 185-201.
- Foody, G.M., 2004. Sub-pixel methods in remote sensing, In: De Jong, S.M., Van der Meer, F.D. (Eds.), *Remote sensing image analysis: including the spatial domain*. Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands, pp. 37-49.
- Frenken, K., 2005. L'irrigation en Afrique en chiffres : enquête AQUASTAT - 2005, In: AQUASTAT (Ed.). Food and Agricultural Organization of the United Nations: Rome, Italy.
- Friedl, M.A., Brodley, C.E., 1997. Decision Tree Classification of Land Cover from Remotely Sensed Data. *Remote Sens. Environ.* 61 399-409.
- Gitelson, A.A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D.C., Arkebauer, T.J., 2005. Remote estimation of canopy chlorophyll content in crops. *Geophys. Res. Lett.* 32(8) L08403.
- Gumma, M.K., Thenkabail, P.S., Hideto, F., Nelson, A., Dheeravath, V., Busia, D., Rala, A., 2011. Mapping Irrigated Areas of Ghana Using Fusion of 30 m and 250 m Resolution Remote-Sensing Data. *Remote Sens.* 3(4) 816-835.
- GWP/AO, 2009. Capitalisation du processus d'élaboration du PAGIRE et de sa mise en oeuvre au Burkina Faso. Global Water Partnership / Afrique de l'Ouest: Ouagadougou, Burkina Faso, p. 52.
- Hall, F.G., Botkin, D.B., Strebel, D.E., Woods, K.D., Goetz, S.J., 1991. Large-Scale Patterns of Forest Succession as Determined by Remote Sensing. *Ecology* 72(2) 628-640.
- Heller, E., Rhemtulla, J.M., Lele, S., Kalacska, M., Badiger, S., Sengupta, R., Ramankutty, N., 2012. Mapping Crop Types, Irrigated Areas, and Cropping Intensities in Heterogeneous Landscapes of Southern India Using Multi-Temporal Medium-Resolution Imagery: Implications for Assessing WaterUse in Agriculture. *Photogramm. Eng. Rem. S.* 78(8) 815-827.
- Hervé, D., 2005. Commentaire - La modélisation d'accompagnement : un débat nécessaire et salutaire. *Natures Sciences Sociétés* 13(2) 174-176.
- Hoang, K.H., Bernier, M., Villeneuve, J.-P., 2008. Les changements de l'occupation du sol dans le bassin versant de la rivière Càu (Viêt-Nam) - Essai sur une approche diachronique. *Téledétection* 8(4) 227-236.
- Jacobs, N., Driessens, K., De Raedt, L., 1998. Using ILP-systems for verification and validation of multi-agent systems, In: Page, D. (Ed.). Springer Berlin / Heidelberg, pp. 145-154.
- Jayroe, R.R.J., Atkinson, R., Dasarathy, B.V., Lybanon, M., Ramapryian, H.K., 1976. Classification software technique assessment. NASA Technical Note TN-D-8240.
- Kaboré, D.P., 2007. Efficience technique de la production rizicole sur les périmètres aménagés du Burkina Faso, In: CAPES (Ed.), Document de travail. Centre d'Analyse des politiques Economiques et Sociales: Ouagadougou, Burkina Faso.
- Kanté, S., 2001. Gestion de la fertilité des sols par classe d'exploitation au Mali-Sud. Wageningen University and Research Centre, Wageningen, The Netherlands.
- Konolige, K.G., 1992. *Distributed Reasoning and Planning*. SRI International, p. 14.
- Lambin, E.F., 1997. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Prog. Phys. Geog.* 21(3) 375-393.
- Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33(1) 159-174.
- Lansing, J.S., Kremer, J.N., 1993. Emergent Properties of Balinese Water Temple Networks: Coadaptation on a Rugged Fitness Landscape. *American Anthropologist* 95(1) 97-114.
- Lassissi, A., 1998. La MARP dans les communautés de pêche - Un guide pour les agents de terrain. Programme pour le Développement Intégré des Pêches Artisanales en Afrique de l'Ouest (DIPA): Cotonou, Bénin, p. 125.
- Lavigne Delville, P., Boucher, L., Vidal, L., 1996. Les bas-fonds en Afrique tropicale humide : stratégies paysannes, contraintes agronomiques et aménagements, In: Pichot, J., Sibelet, N., Lacoeuilhe, J.J. (Eds.), *Fertilité du milieu et stratégies paysannes sous les tropiques humides: actes du séminaire 13-17 novembre 1995*, Montpellier, France. CIRAD: Montpellier, France, pp. 148-161.
- Loada, A., 2008. Burkina Faso : petites manœuvres et grandes résolutions face aux mobilisations, In: CETRI (Ed.), *Etat des résistances dans le sud - 2009*, Syllepse ed: Paris, France, p. 228.

- Lorenzini, G., 2007. Etude du bassin d'alimentation des sources de Nasso - Etat des lieux des ressources en eaux souterraines du bassin du Kou, Département ArGenCo. Université de Liège: Liège, Belgique, p. 119.
- Lount, P.W., 2004. A Brief Introduction to Smalltalk.
- Lu, D., Mausel, P., Brond, E., iacute, zio, Moran, E., 2004. Change detection techniques. *Int. J. Remote Sens.* 25 2365-2401.
- Lux-Development, 2008. La forêt classée du Kou: un patrimoine naturel et culturel à préserver. Lux-Development S.A.
- M.E.F, 1996. Réorganisation agraire et foncière. Ministère de l'économie et des finances / Assemblée Nationale: Ouagadougou, Burkina Faso, p. 44.
- Machwitz, M., Bloethe, J., Klein, D., Conrad, C., Dech, S., 2010. Mapping of large irrigated areas in Central Asia using MODIS time series. *Ecosystems, and Hydrology XII (Proceedings Volume), Proceedings of SPIE Volume 7824* 1-12.
- Macleod, R.D., Congalton, R.G., 1998. A quantitative comparison of change-detection algorithms for monitoring Eelgrass from remotely sensed data. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 64(3) 207-216.
- MAHRH, 2009. Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PAGIRE) - Deuxième phase (2010-2015). Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques: Ouagadougou, Burkina Faso, p. 90.
- Manandhar, R., Odeh, I., Ancev, T., 2009. Improving the Accuracy of Land Use and Land Cover Classification of Landsat Data Using Post-Classification Enhancement. *Remote Sens.* 1(3) 330-344.
- Mas, J.F., 1999. Monitoring land-cover changes: A comparison of change detection techniques. *Int. J. Remote Sens.* 20(1) 139-152.
- Masoner, J.R., Mladinich, C.S., Konduris, A.M., Jerrod Smith, S., 2003. Comparison of irrigation water use estimates calculated from remotely sensed irrigated acres and state reported irrigated acres in the Lake Altus drainage basin, Oklahoma and Texas, 2000 growing season. U.S. Geological Survey / U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, p. 47.
- Mazzotti, F.J., Vinci, J.J., 2007. Validation, verification, and calibration: using standardized terminology when describing ecological models, Wildlife Ecology and Conservation Department, University of Florida. University of Florida.
- Müller, J.-P., 2002. Des systèmes autonomes aux systèmes multi-agents : Interaction, émergence et systèmes complexes. Université de Montpellier 2: Montpellier, France, p. 58.
- Muñoz, G., Grieser, J., 2006. CLIMWAT 2.0 for CROPWAT. Food and Agricultural Organization of the United Nations: Rome, Italy.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3) 282-290.
- Nellis, M.D., Price, K.P., Rundquist, D., 2009. Remote Sensing of Cropland Agriculture, In: Warner, T., Nellis, M., Foody, G.M. (Eds.), *The SAGE Handbook of Remote Sensing*. SAGE Publications Ltd: London, pp. 368-383.
- Niamian, M.J., 2008. Analyse critique des principaux composants du bilan d'eau du bassin versant du Kou. Institut International de l'Eau et de l'Environnement: Ouagadougou, Burkina Faso, p. 75.
- Ogou, C., 2008. Etude des potentialités aquifères de la plaine alluviale du Kou entre Nasso et Diaradougou. Institut International d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, 2iE: Ouagadougou, Burkina Faso.
- OMM, 1994. Guide des pratiques hydrologiques, 5th ed. Organisation Météorologique Mondiale, Genève, Suisse.
- Ouédraogo, C., 1998. Cartographie géologique de la région sud ouest du Burkina Faso au 1/200000 - Synthèse géologique. AQUATER/BUMIGEB: Ouagadougou, Burkina Faso.
- Ouédraogo, M., 2010. Etude socio-économique sur les utilisateurs agricoles des ressources en eau du Kou : Cas de la zone agricole située entre Nasso et Diaradougou. GEeau: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, p. 46.
- Ozdogan, M., Gutman, G., 2008. A new methodology to map irrigated areas using multi-temporal MODIS and ancillary data: An application example in the continental US. *Remote Sens. Environ.* 112(9) 3520-3537.
- Ozdogan, M., Yang, Y., Allez, G., Cervantes, C., 2010. Remote Sensing of Irrigated Agriculture: Opportunities and Challenges. *Remote Sens.* 2(9) 2274-2304.
- Parzen, E., 1964. Stochastic processes. Holden-Day, San Francisco.
- Paturel, J.E., Servat, E., Delattre, M.O., Lubes-Niel, H., 1998. Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique / Analysis of rainfall long series in non-Sahelian West and Central Africa within a context of climate variability. *Hydrol. Sci. J.* 43(6) 937 - 946.

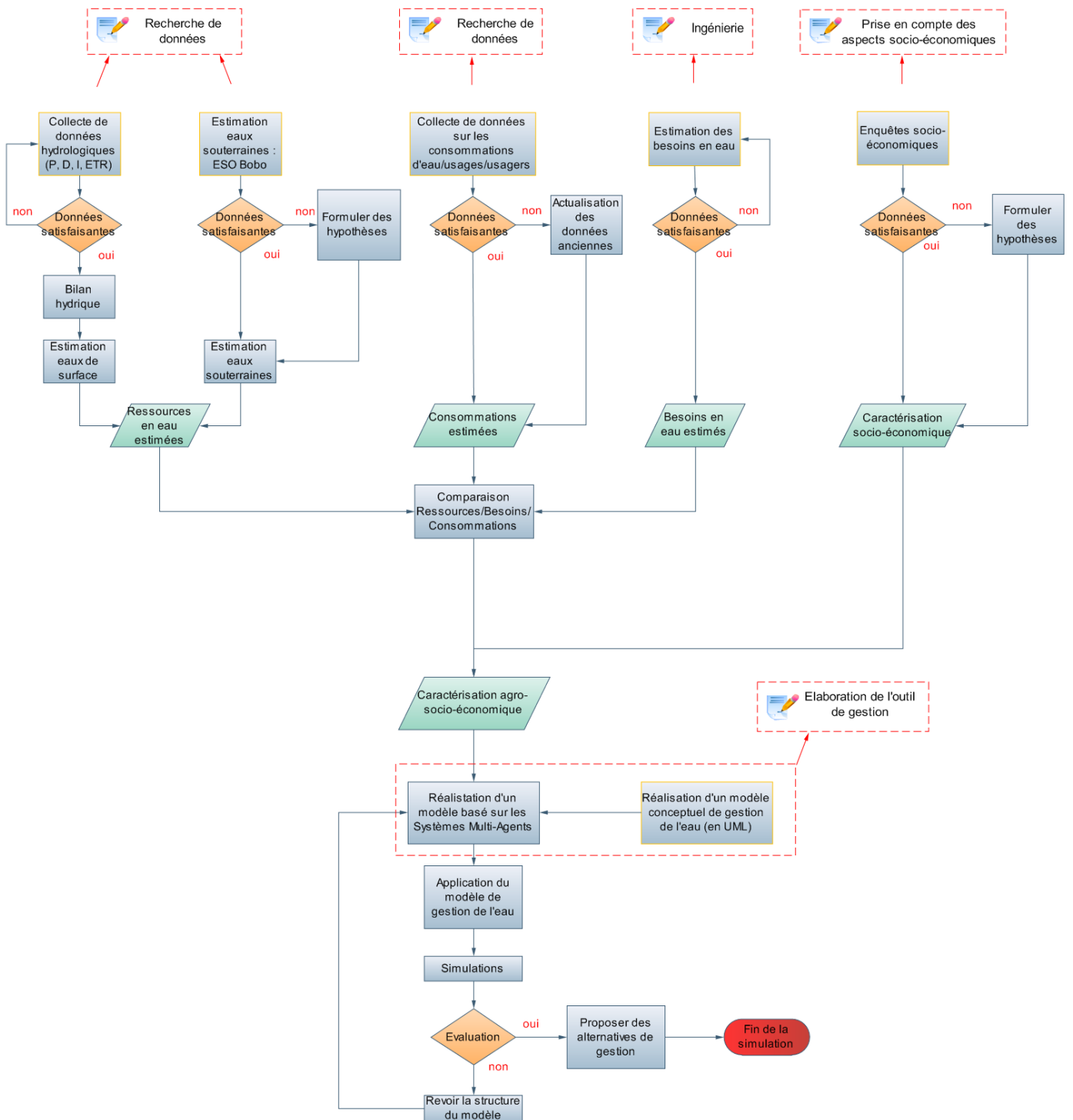
- Petit, C., Scudder, T., Lambin, E., 2001. Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: Resettlement and rapid land-cover changes in south-eastern Zambia. *Int. J. Remote Sens.* 22(17) 3435 - 3456.
- Pham, T.T.H., Bonn, F., Dubois, J.-M., 2007. Démarche méthodologique pour la détection des changements d'un milieu morcelé en utilisant des images à moyenne résolution spatiale : application à une région littorale au Viêt-Nam. *Téledétection* 7(1-2-3-4) 303-323.
- Picouet, C., Hingray, B., Musy, A., 2009. *Hydrologie 2 - Une science pour l'ingénieur*, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR) ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Lausanne, Suisse.
- Pieri, C., 1989. *Fertilité des terres de savanes : bilan de trente ans de recherche et de développement agricoles au sud du Sahara*. Ministère de la Coopération et du Développement - CIRAD, Paris, France.
- Quinlan, J.R., 1986. Induction of Decision Trees. *Mach. Learn.* 1(1) 81-106.
- Rao, A.S., Georgeff, M.P., 1991. Modeling rational agents within a BDI-architecture, In: Allen, J., Fikes, R., Sandewall, E. (Eds.), *Second International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning, KR91*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, USA.
- Richards, J.A., Jia, X., 2006. *Remote sensing digital image analysis an introduction*, 4th ed. Springer, Berlin, Germany.
- Rossiter, D.G., 2004. Technical note: Statistical methods for accuracy assessment of classified thematic maps. *International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC): Enschede, The Netherlands*, p. 46.
- Rykiel Jr, E.J., 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90(3) 229-244.
- SahelConsult/F.E.T., 1997. *Inventaire des ressources en eau, Rapport Final - Tome 3: Dossier Ressources en eau de surface*. Programme RESO: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.
- Saltelli, A., 1999. *Evaluation of Sensitivity and Uncertainty Analysis Methods in a Quality Assessment Framework with Application to Environmental and Business Statistics*. European Commission - Joint Research Centre: Ispra, Italy.
- Saqalli, M., Biellers, C.L., Gerard, B., Defourny, P., 2010. Simulating Rural Environmentally and Socio-Economically Constrained Multi-Activity and Multi-Decision Societies in a Low-Data Context: A Challenge Through Empirical Agent-Based Modeling. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 13(2) 1.
- Sauret, E., 2007. *Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou*, Département ARGEnCo. Université de Liège: Liège, Belgique.
- Schlüter, M., Pahl-Wostl, C., 2007. Mechanisms of Resilience in Common-pool Resource Management Systems: an Agent-based Model of Water Use in a River Basin. *Ecology and Society* 12(2).
- Segda, Z., 1994. *La culture du maïs dans les systèmes de culture pluviaux dans l'ouest du Burkina Faso, Production et valorisation du maïs à l'échelon villageois en Afrique de l'Ouest*. Actes du séminaire Maïs prospère. CIRAD - FSA/UNB: Cotonou, Benin.
- Short, N.M., 2005. *Remote Sensing Tutorial* EOS-Goddard Program Office.
- Singh, A., 1989. Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *Int. J. Remote Sens.* 10(6) 989-1003.
- Smith, M., 1992. *CROPWAT: A computer program for irrigation planning and management*. Food And Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- SOGREAH, 1993. *Notice explicative de la carte hydrogéologique 1:50000 de la région de Bobo-Dioulasso. Etude des ressources de la zone sédimentaire de la région de Bobo-Dioulasso*. Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques - Direction des Etudes et de la Planification - Direction Régionale de l'Eau des Hauts-Bassins: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, p. 25.
- SOGREAH, 1994. *Etude des ressources en eaux souterraines de la zone sédimentaire de la région de Bobo-Dioulasso*. Ministère de l'Agriculture de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques - Direction des Etudes et de la Planification - Direction Régionale de l'Eau des Hauts-Bassins: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.
- Streiner, D.L., Norman, G.R., 2003. *Health Measurement Scales: A Practical Guide to Their Development and Use*, 3rd ed. Oxford University Press, USA, New York, NY.
- Thenkabail, P.S., Biradar, C.M., Noojipady, P., Dheeravath, V., Li, Y., Velpuri, M., Gumma, M., Gangalakunta, O.R.P., Turrall, H., Cai, X., Vithanage, J., Schull, M.A., Dutta, R., 2009. Global irrigated area map (GIAM), derived from remote sensing, for the end of the last millennium. *Int. J. Remote Sens.* 30(14) 3679-3733.
- Thenkabail, P.S., Enclona, E.A., Ashton, M.S., Van Der Meer, B., 2004. Accuracy assessments of hyperspectral waveband performance for vegetation analysis applications. *Remote Sens. Environ.* 91(3-4) 354-376.

- Townshend, J.R.G., Justice, C.O., Gurney, C., McManus, J., 1992. The impact of misregistration on change detection. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 30(5) 1054-1060.
- Traoré, F., 2007. Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso, *Sciences et Gestion de l'Environnement*. Université de Liège: Arlon, Belgique, p. 124.
- Traoré, F., Djaby, B., Wellens, J., Tychon, B., 2012. Estimation des zones agricoles irriguées du bassin versant du Kou à l'aide de la télédétection. Université de Liège: Arlon, Belgique, p. 9.
- Traoré, S., Gombert, P., 1997. Valorisation des débits interannuels de la source de la Guinguette. Programme RESO: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, p. 10.
- USBR, 2001. *Water measurement manual*, 3rd ed. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, USA.
- van Oel, P.R., Krol, M.S., Hoekstra, A.Y., 2012. Application of multi-agent simulation to evaluate the influence of reservoir operation strategies on the distribution of water availability in the semi-arid Jaguaribe basin, Brazil. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 47-48(0) 173-181.
- van Oel, P.R., Krol, M.S., Hoekstra, A.Y., Taddei, R.R., 2010. Feedback mechanisms between water availability and water use in a semi-arid river basin: A spatially explicit multi-agent simulation approach. *Environmental Modelling & Software* 25(4) 433-443.
- Velpuri, M., Thenkabail, P., Gumma, M.K., Biradar, C., Dheeravath, V., Noojipady, P., Yuanjie, L., 2009. Influence of resolution in irrigated area mapping and area estimation. *Photogramm. Eng. Rem. S.* 75(12) 13.
- Wang, Z., Hu, G., Yao, S., 2007. Decomposition Mixed Pixel of Remote Sensing Image Based on Tray Neural Network Model, In: Kang, L., Liu, Y., Zeng, S. (Eds.), *Advances in Computation and Intelligence*. Springer Berlin / Heidelberg: Berlin, pp. 305-309.
- Weber, J., Bailly, B., 1993. Prévoir, c'est gouverner. *Natures Sciences Sociétés* 1(1) 59-64.
- Wellens, J., Compaoré, N.F., 2003. Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation - GEeau, In: Leuven, D.R.A.H.R.H.-H.B.-K.U. (Ed.), *Rapport annuel 1*. GEeau: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, p. 123.
- Wellens, J., Compaoré, N.F., 2004. Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation - GEeau, In: Leuven, D.R.A.H.R.H.-H.B.-K.U. (Ed.), *Rapport annuel 3*. GEeau: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso, p. 124.
- Wellens, J., Midekor, A.A., Diallo, M., Traoré, F., Tychon, B., 2010. Utilisation des prises de vue aérienne à basse altitude pour le suivi des activités hydro-agricoles – Cas du Bassin du Kou, *Integrated Water Resources Management and Challenges of the Sustainable Development - Second International Congress*. International Association of Hydrogeologists: Agadir, Morocco.
- Wellens, J., Nitcheu, M.N., 2009. Le périmètre irrigué de la Vallée du Kou: Diagnostic des efficacités hydro-agricole & élaboration des calendriers à l'aide de SIMIS. GEeau: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.
- Wellens, J., Sawadogo, I., Diallo, M., Dakouré, D., Compaoré, N.F., Traoré, F., Tychon, B., 2007. Recensement exhaustif des activités hydro-agricoles du bassin du Kou. GEeau: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.
- Wellens, J., Traoré, F., Niamian, M.J., Diallo, M., Compaoré, N.F., Dakouré, D., Tychon, B., 2008. Elaboration du bilan d'eau du bassin versant du Kou et analyse critique des principaux composants. GEeau: Bobo-Dioulasso, Burkina Faso.
- Wieringa, J., Lomas, J., 2001. *Lecture notes for training agricultural meteorological personnel*, 2nd ed. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Wooldridge, M., 2000. Intelligent Agents, In: Weiss, G. (Ed.), *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. MIT Press, pp. 27-77.
- Wooldridge, M., Jennings, N.R., 1995. Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review* 10(2) 115-152.
- Wright, A.N., Ahmed, S., Mutesasira, L., 2002. Méthodes accélérées de recherche participative pour les institutions de micro-finance - Kit d'outils. *MicroSave*, p. 88.
- Zhou, Q., Li, B., Sun, B., 2008. Modelling Spatio-Temporal Pattern of Landuse Change Using Multitemporal Remotely Sensed Imagery, *ISPRS Congress Beijing 2008*: Beijing, China, pp. 729-734.
- Zougrana, M., Kaboré, M., 2009. Evolution du secteur agricole et des conditions de vie des ménages au Burkina Faso. Ministère de l'agriculture, de l'hydraulique et des ressources halieutiques: Ouagadougou, Burkina Faso.



## Annexes

## Organigramme de la méthodologie pour la réalisation d'un modèle de gestion des ressources en eau du Kou pour les usages agricoles



## 1 Entités du modèle. Définition des attributs, des actions et des sondes

### 1.1 Entités spatiales

#### 1.1.1 Cell

Attributs	Observations
<b>availableWater</b> : valeur de l'eau reçu par la culture lors d'une irrigation. Elle est différente du volume potentiel disponible au niveau de la cellule	
<b>debit</b> : valeur attribuée aux cellules particulières de la grille que sont les cellules de rivière. Cette valeur représente le débit moyen journalier (m <sup>3</sup> /s) pour la cellule	
<b>numPlot</b> : numéro attribué à la cellule, déterminant la parcelle à laquelle elle appartient	
<b>numPlot2</b> : numéro attribué à la cellule, déterminant la parcelle à laquelle elle appartient (temporaire)	
<b>origin1</b> : origine de la fonction linéaire qui simule l'évolution de la piézométrie du jour 1 au jour 109	
<b>origin2</b> : origine de la fonction linéaire qui simule l'évolution de la piézométrie du jour 110 au jour 200	
<b>origin3</b> : origine de la fonction linéaire qui simule l'évolution de la piézométrie du jour 201 au jour 365	
<b>piezo</b> : valeur attribuée à chaque cellule de la grille. Cette valeur représente au niveau du puisard la hauteur d'eau (m) potentiellement disponible. Le puisard est installé sur une de la cellule de la parcelle.	
<b>slope1</b> : pente de la fonction linéaire qui simule l'évolution de la piézométrie du jour 1 au jour 109	
<b>slope2</b> : pente de la fonction linéaire qui simule l'évolution de la piézométrie du jour 110 au jour 200	
<b>slope3</b> : pente de la fonction linéaire qui simule l'évolution de la piézométrie du jour 201 au jour 365	
<b>volume</b> : volume d'eau mobilisable au niveau d'une cellule donnée. Sa valeur est calculée soit à partir du débit (pour une cellule de rivière), soit par la hauteur piézométrique (pour une cellule munie d'un puisard)	
<b>waterDiffusion</b> : fonction de transmission de l'écoulement de l'eau entre deux cellules adjacentes de la rivière.	Le déclenchement de cette fonction se fait depuis la "super-classe" (ou "chef d'orchestre").
<b>waterRequested</b> : variable utilisée temporairement afin de jouer le rôle d'une mémoire-tampon au cours de l'écoulement de l'eau dans la rivière	
Actions	Observations
Aucune	
Sondes	Observations
<b>cellWaterLevel</b> : sonde permettant le suivi de la hauteur d'eau disponible dans le sol	L'activation de cette sonde, uniquement pour les cellules occupées par des cultures et irriguées par puisard, prend énormément de temps à s'exécuter.

### 1.1.2 Plot

Attributs	Observations
<b>dailyPlotWaterReq</b> : besoins en eau de la parcelle (somme des besoins en eau de toutes les cellules composant la parcelle)	
<b>myCropType</b> : type de la culture de la parcelle	
<b>myFarmer</b> : connexion de la parcelle au propriétaire de la parcelle (et aussi de l'exploitation)	
<b>myFarmerId</b> : attribut donnant l'identifiant unique (donné par le modèle) du propriétaire de la parcelle	
<b>myPuisard</b> : connexion de la parcelle au puisard installé sur la même parcelle	
<b>nextSeasonCrop</b> : affectation du type de culture pour la prochaine saison. Obtenu par imitation ou par choix de la meilleure culture du propriétaire de la parcelle	
<b>numPlot</b> : la parcelle "hérite" du même numéro attribué aux cellules qui la composent	
<b>plotAndStress</b> : compteur d'occurrence et degré de stress pour chaque parcelle (au cours d'une simulation)	Dictionnaire
<b>plotAvailableWater</b> : valeur de l'eau disponible pour les cultures de toutes les cellules de la parcelle	
<b>plotSize</b> : attribut donnant la taille de la parcelle. Exprimé en nombre de cellules composant la parcelle	
<b>plotSowingTime</b> : attribut reprenant la valeur de la date de semis des cultures contenues dans la parcelle	
<b>plotWaterReq</b> : sommation sur 3 jours des besoins en eau de la parcelle (3 fois "dailyPlotWaterReq")	
<b>pointAndDebit</b> : attribut servant de mémoire-tampon pour stocker pour chaque point de prélèvement (sur la rivière) la valeur du débit à prélever de la rivière au cours du pas de temps.	Dictionnaire
<b>pointPrelevement</b> : point de prélèvement pour l'eau d'irrigation. Ce point peut être une cellule de la rivière (si la parcelle est à moins de 200 m de cette dernière) ou un point choisi aléatoirement sur la parcelle pour l'installation d'un puisard	
<b>pointPrelevementType</b> : attribut permettant d'identifier le type du point de prélèvement (cellule de rivière ou de parcelle ?)	
<b>totalWaterRequirement</b> : attribut donnant la valeur du prélèvement pour l'irrigation. Majoration de la demande en eau par l'efficacité d'irrigation à la parcelle et par un nombre "virtuel" de producteurs (4)	
Actions	Observations
<b>plotWaterRequirement</b> : fonction de calcul des besoins en eau journaliers de la parcelle (basée sur la prise en compte des besoins en eau de toutes les cellules de la parcelle)	
<b>prelevementEtDistributionPuisard</b> : x. Fonction de prélèvement de l'eau d'irrigation dans les puisards	
<b>prelevementEtDistributionRiviere</b> : x. Fonction de prélèvement de l'eau d'irrigation en rivière	
Sondes	Observations
<b>plotsWaterRequirement</b> : sonde donnant pour chaque pas de temps et pour chaque parcelle, la valeur des besoins en eau	

### 1.1.3 Farm

Attributs	Observations
<b>myFarmer</b> : désigne le producteur ('farmer') responsable de l'exploitation ('farm')	
Actions	Observations
Aucune action	
Sondes	Observations
Aucune sonde	

### 1.1.4 River

Attributs	Observations
Aucun attribut	
Actions	Observations
Aucune action	
Sondes	Observations
<b>debitIn</b> : sonde donnant la valeur du débit de la cellule de rivière la plus en amont	
<b>debitOut</b> : sonde donnant la valeur du débit de la cellule de rivière la plus en aval	

## 1.2 Entités sociales

### 1.2.1 Farmer

Attributs	Observations
<b>harvestTime1</b> : temps de récolte pour la parcelle 1	
<b>harvestTime2</b> : temps de récolte pour la parcelle 2 (si elle existe)	
<b>harvestTime3</b> : temps de récolte pour la parcelle 3 (si elle existe)	
<b>myBestCropAndValue</b> : meilleure culture de l'historique du producteur, toutes parcelles confondues	Dictionnaire
<b>myClass</b> : désigne la classe à laquelle appartient le producteur	
<b>myCropAndIncome</b> : attribut utilisé à l'initialisation des producteurs et mettant en relation chaque culture et le revenu qu'elle a engendré lors de la dernière campagne agricole	Dictionnaire
<b>myDebt</b> : niveau d'endettement du producteur	
<b>myFarm</b> : désigne l'exploitation du producteur	
<b>myFarmNumPlot</b> : désigne le numéro identifiant l'exploitation du producteur	
<b>myIncome</b> : revenus agricoles du producteur	
<b>myIncomeHistory</b> : historique des revenus du producteur	Tableau
<b>myLastBestCropAndValue</b> : culture de la saison précédente ayant rapporté le plus (parmi toutes les autres cultures pratiquées sur l'ensemble des parcelles de l'exploitation)	Dictionnaire
<b>myMarket</b> : désigne le "marché virtuel" auquel le producteur est connecté	La connexion au marché existe mais n'est plus directement utilisée
<b>myNextMainCrop</b> : instruction sur le type de cultures à venir pour la campagne prochaine	
<b>myOrigin</b> : désigne les origines du producteur ('autochtone' ou 'allochtone')	
<b>myOtherIncome</b> : revenus non-agricoles du producteur	
<b>myPlotCropHistory</b> : historique des cultures menées sur chaque parcelle de l'exploitation	Dictionnaire
<b>myPlotIncomeHistory</b> : historique des revenus des cultures menées sur chaque parcelle de l'exploitation	Dictionnaire
<b>myZone</b> : désigne l'une des 3 zones agricoles (UAT) à laquelle appartient le producteur	
<b>plotIncome</b> : revenu généré par la parcelle concernée	
<b>plotIrrigationCalendar</b> : calendrier d'irrigation pour toutes les parcelles de l'exploitation. Etabli en fonction des dates de semis. Périodicité d'irrigation (pour chaque parcelle) : 3 jours	Dictionnaire
<b>possibleCrops</b> : ensemble des cultures possibles pour le producteur. Les limitations sont fonction de l'appartenance à une zone géographique, à l'origine, et au nombre de parcelles du producteur	Tableau
<b>sowingTime1</b> : temps de semis pour la parcelle 1	
<b>sowingTime2</b> : temps de semis pour la parcelle 2 (si elle existe)	
<b>sowingTime3</b> : temps de semis pour la parcelle 3 (si elle existe)	

Actions	Observations
<b>plantCrop1</b> : semis sur la parcelle 1	
<b>plantCrop2</b> : semis sur la parcelle 2 (si elle existe)	
<b>plantCrop3</b> : semis sur la parcelle 3 (si elle existe)	
<b>bestCrop</b> : processus de détermination de la meilleure culture toutes parcelles confondues	
<b>nextSeasonCrop</b> : processus permettant l'adoption d'une culture par imitation de celle qui a le mieux marché pour l'ensemble des producteurs. Contrainte : la culture n'est adoptée que si elle se trouve parmi les cultures possibles du producteur	
<b>usualCrops</b> : processus de choix de la meilleure culture du producteur afin éventuellement de reconduire cette dernière pour la prochaine campagne	
Sondes	Observations
<b>myCropsHistory1</b> : sonde faisant l'historique des cultures semencées sur la parcelle 1 de producteur	
<b>myCropsHistory2</b> : sonde faisant l'historique des cultures semencées sur la parcelle 2 de producteur (si elle existe)	
<b>myCropsHistory3</b> : sonde faisant l'historique des cultures semencées sur la parcelle 3 de producteur (si elle existe)	
<b>myFarmIncome</b> : sonde faisant le suivi du total des revenus du producteur	

## 1.3 Entités passives

### 1.3.1 Market

Attributs	Observations
<b>myCrops</b> : renvoie à la classe de cultures ('self theCrops')	
Actions	Observations
<b>marketPrices</b> : outil de fluctuation des prix des produits en fonction de l'offre	Possibilité de rendre l'outil de fluctuation des prix, plus complexe, en fonction de la connexion de la zone d'étude aux marchés environnants et lointains
Sondes	Observations
Aucune sonde	

### 1.3.2 Crops

Attributs	Observations
<b>cropCellGrossMargin</b> : marge brute pour la culture concernée, à l'échelle de la cellule	
<b>cropCellProductionCost</b> : coûts de production de la culture concernée à l'échelle de la cellule	
<b>cropCycleLength</b> : longueur du cycle de la culture concernée	
<b>cropType</b> : indique le type de culture	
<b>cropWaterReq</b> : besoins en eau de la culture, à l'échelle d'une cellule	
<b>myMarket</b> : assignation d'un seul et unique "marché virtuel" à toutes les cultures du modèle	
<b>myPlot</b> : attribut faisant le lien entre la culture et la parcelle sur laquelle elle est semée	
Actions	Observations
Aucune action	
Sondes	Observations
Aucune sonde	

### 1.3.3 Puisard

Attributs	Observations
<b>myPlot</b> : connexion du puisard à la parcelle sur laquelle il est installé	
Actions	Observations
Aucune action	L'action du prélèvement de l'eau est gérée directement au niveau des parcelles
Sondes	Observations
Aucune sonde	

## 2 Procédures à l'échelle globale ('Model Class')

Procédures	Actions
<b>dailyPlotWaterRequirement</b>	Calcul des besoins en eau journalier pour chaque parcelle ensemencée
<b>groundWaterIntake : x</b>	Prélèvement d'eau pour l'irrigation des parcelles à partir des puits. Calcul de la demande en eau d'irrigation (cumulée sur 3 jours) pour les parcelles irriguées à partir de la rivière. Action faite par chaque parcelle
<b>harvest : x</b>	Fonction visant à forcer les producteurs à récolter leurs cultures quand le temps de la récolte est atteint pour la parcelle concernée
<b>initDebit: x</b>	Fonction qui gère l'écoulement de l'eau dans la rivière, avec une actualisation de la valeur du débit dans la cellule la plus en amont à chaque pas de temps
<b>initialCapital</b>	Fonction qui initialise les revenus de chaque producteur en début de simulation
<b>lateHarvest</b>	Fonction visant à forcer les producteurs à récolter leurs cultures tardives quand le 365 <sup>e</sup> pas de temps est atteint pour la parcelle concernée
<b>nextSeasonCrops</b>	Bilan annuel fait à l'échelle de l'exploitation par les producteurs. Décision concernant les cultures de la campagne agricole à venir. Agrandissement de la taille des parcelles pour les producteurs qui remplissent les conditions exigées.
<b>piezo : x</b>	Fonction simulant pour chaque pas de temps, la hauteur d'eau dans le sol, pour chaque cellule de la grille
<b>plotIncome: x</b>	Fonction de calcul des revenus générés par la récolte d'une culture sur une parcelle x. Calcul basé uniquement sur les marges brutes moyennes des cultures
<b>readCropFile: x</b>	Fonction d'initialisation des attributs à caractère agronomique d'une culture spécifique
<b>readPiezoFile</b>	Fonction d'initialisation des paramètres des fonctions de simulation de l'évolution de la piézométrie durant les 365 jours de l'année
<b>readPiezoInit</b>	Lecture du fichier contenant les données piézométriques de toutes les cellules de la grille, au pas de temps t = 1
<b>resetEntities</b>	Réinitialisation partielle du modèle après le 365 <sup>e</sup> pas de temps. Cette action concerne les attributs des cellules, des parcelles, des producteurs, liés aux aspects agronomiques.
<b>riverWaterShare : x</b>	Prélèvement d'eau pour l'irrigation des parcelles à partir de la rivière. Action faite par chaque parcelle
<b>sowing : x</b>	Choix aléatoire de " k " producteurs par jours, pour le semis. Semis avec marquage des dates de semis et récolte. Les semis sur les parcelles 2 et 3 sont décalés de 10 et 20 jours respectivement par rapport à ceux des parcelles 1
<b>updateDebit</b>	Fonction qui simule la propagation du débit de l'amont vers l'aval. La propagation se fait instantanément, à chaque pas de temps
<b>waterDischarge : x</b>	Lecture des données du fichier externe contenant les valeurs de débits en amont de la rivière. Seule la valeur de débit de la cellule la plus en amont est actualisée à chaque pas de temps.
<b>waterRequirement : x</b>	Lecture des données des fichiers de besoins en eau pour chaque culture, pour chaque pas de temps
Sondes	Actions
<b>inletDebit</b>	Sonde fournissant les valeurs de débit en amont
<b>outletDebit</b>	Sonde fournissant les valeurs de débit en aval
<b>totalWaterDemandRiver</b>	Sonde fournissant la valeur de la demande totale en eau pour chaque pas de temps

## **Détermination de la disponibilité en eau dans les puisards dans le cadre de la modélisation par les Systèmes Multi-Agents**

### **Objectif**

L'objectif est d'intégrer les aspects eaux souterraines dans le modèle de gestion des ressources en eau de la zone agricole irriguée située entre Nasso et Diaradougou. Plus spécifiquement, l'étude consiste, non à reproduire exactement le comportement hydrogéologique du bassin versant dans la zone d'étude, mais plutôt à traduire de manière simplifiée, ce comportement hydrogéologique, en termes d'éléments exploitables directement par les agents dans le modèle.

L'objectif du modèle de gestion est d'explorer les voies permettant de meilleures efficacités d'utilisation de l'eau, avec plus d'eau pour les utilisateurs en aval de la zone d'étude. De ce fait, le recours aux eaux souterraines constitue une alternative à étudier, permettant moins de prélèvements d'eau dans la rivière.

On s'intéresse alors ici à étudier la disponibilité de l'eau pour les agriculteurs utilisant des puisards uniquement connectés à la nappe (ou "puisards-nappe") pour l'irrigation de leurs cultures.

Cette étude sur un aspect de l'hydrogéologie du bassin versant du Kou se veut informelle, dans la mesure où une étude plus rigoureuse menée par le Projet Eaux Souterraines Bobo, est en cours depuis 2005, et livrera bientôt des conclusions. Dans l'attente de ces conclusions, la présente étude se veut toutefois formelle quant à l'intégration d'un modèle simplifié d'un aspect de l'hydrogéologie du bassin versant, afin de mettre en œuvre la modélisation de la gestion de l'eau dans la zone d'étude.

Une meilleure connaissance de l'hydrogéologie pourra à tout moment être intégrée dans le modèle.

### **Hypothèses simplificatrices**

Afin de simplifier le modèle hydrogéologique du bassin versant du Kou dans la zone d'étude, les simplifications suivantes sont faites :

- Les ressources en eaux souterraines restent suffisantes pour assurer l'irrigation des cultures. Par contre, l'accessibilité à ces ressources, est limitée en certains endroits.
- L'exploitation des ressources en eaux souterraines reste (à priori) sans conséquences immédiates sur le débit de la rivière Kou.
- La variable qui fera l'intérêt de cette étude est la hauteur d'eau dans les puisards. Cette hauteur est considérée indépendamment des profondeurs respectives des puisards.
- Pour les besoins de cette étude, on considèrera que les dimensions respectives des puisards ne sont pas des facteurs limitant quant à la disponibilité des ressources en eau ou à la satisfaction des besoins en eau des plantes. A cet effet, on considèrera les mêmes sections de puisard pour tous les agriculteurs. Ces sections représentent la section médiane obtenue après analyse de la distribution de l'ensemble des sections des puisards de la base de données.

## **Matériel & Méthode**

### **Matériel**

L'information sur les hauteurs d'eau dans la zone d'étude présente la contrainte de devoir être spatialisée, de sorte que pour chaque cellule de la couche spatiale du modèle, il existe une information spécifique.

Les informations disponibles sur les hauteurs d'eau et les sections des puisards proviennent des enquêtes hydro agricoles du Projet GEeau, réalisées sur 199 puisards (en avril 2007); des données de 6 puisards spécifiques suivis en 2010 (avril 2010); des données hydrogéologiques (hauteurs piézométriques) fournies par le Projet Eaux Souterraines Bobo couvrant la période 1987 à 2011.

La distribution spatiale des puisards-nappe est donnée dans la *Figure 1*.

### **Méthode**

Dans le cadre de l'intégration des données hydrogéologiques au modèle de gestion de l'eau en irrigation par les systèmes multi-agents (SMA), il est impératif de générer une couche d'information sur la hauteur d'eau disponible en chaque point de ladite couche. Le modèle étant dynamique, il devrait simuler l'évolution de la hauteur de nappe au cours des simulations.

Pour ce faire, la méthode d'intégration des données hydrogéologiques au modèle SMA se basera sur une spatialisation de l'information et sur des fonctions (en chaque point) permettant d'estimer l'évolution des hauteurs d'eau dans le temps.

La méthode choisie pour la spatialisation de l'information sur les hauteurs d'eau dans la zone d'étude, est l'interpolation spatiale. Plusieurs méthodes d'interpolation existent (Li and Heap, 2008), parmi lesquelles le choix s'est porté pour cette étude, sur la méthode du Krigeage. Pour plus de détails sur la méthode du Krigeage, le lecteur voudra bien consulter les références suivantes : Li and Heap (2008), Gratton (2002).

Dans le cadre de cette étude, les données géolocalisées de hauteurs d'eau de 2007, appuyées par des hauteurs piézométriques (elles aussi, géolocalisées) ont servi à la réalisation des interpolations spatiales. Les données de hauteurs d'eau de 2010 ont servi à la vérification de l'interpolation.

La répartition temporelle des données n'étant pas très dense (3 périodes choisies), on considèrera l'évolution de la hauteur d'eau entre périodes, comme étant linéaire.

L'étude statistique des distributions des paramètres de forme des puisards permettra la détermination de la section moyenne à considérer pour un puisard donné au sein du modèle.

### **Limites de la méthodologie**

- Le nombre relativement faible (6) des points de contrôle de l'interpolation spatiale sur un domaine de près de 4 500 ha...
- L'interpolation des hauteurs d'eau dans les puisards, indépendamment d'une connaissance suffisante de la piézométrie complexe du bassin versant. De plus cette interpolation se fera en mode "non supervisé", ce qui implique qu'il n'y ait aucun contrôle de l'opération faite suivant un algorithme prédéfini (Krigeage). En effet, la technique du Krigeage utilisée dans cette étude ne prendra pas en compte les éventuelles failles dans les formations aquifères,

entre autres. Cette étude sur les hauteurs d'eau pourrait être actualisée en fonction des connaissances (à venir) sur la piézométrie du bassin versant.

- La linéarité supposée dans l'évolution des ressources en eaux souterraines disponibles, au cours des simulations du modèle. Cette hypothèse est assez grossière, mais en absence d'informations fines sur la piézométrie de la zone modélisée, il est difficile d'implémenter dans le modèle SMA un modèle hydrogéologique plus complexe ou plus proche de la réalité.

## Résultats

### Périodes pour lesquelles les données sont maximales

Après analyse des données de hauteurs d'eau disponibles au sein de la base de données, 3 périodes ont été retenues. Ces périodes sont celles pour lesquelles les données sont suffisantes à réaliser des interpolations spatiales pour lesquelles la couverture spatiale du domaine à modéliser est la meilleure possible.

Les périodes choisies sont celles de janvier, avril et juillet. Le mois de janvier se situe en début de la campagne agricole de contre-saison; le mois d'avril se situe également en plein milieu de la campagne agricole de contre-saison, au moment où les ressources en eau de la zone sont les plus sollicitées ; le mois de juillet se situe en saison des pluies, à une période durant laquelle les pluies commencent à recharger la nappe alluviale.

En l'absence de résolution temporelle plus fine, nous considérerons ces 3 périodes et supposerons une variation linéaire des ressources en eau, entre les points considérés.

### Hauteurs d'eau dans les puisards

Les résultats obtenus sont produits sous forme de cartes des hauteurs d'eau potentielles dans le sol, pour les 3 périodes choisies (voir Figures 2-3-4). Les valeurs estimées de hauteurs d'eau dans les puisards varient entre 0.3 m et 2.7 m. La comparaison entre les valeurs estimées et les valeurs mesurées pour les 6 points de contrôle (hauteurs d'eau mesurées par GEeau en 2010) donne des coefficients de détermination plutôt bas (entre 0.20 et 0.30). L'explication pourrait résider dans la faiblesse du nombre de points de contrôles, les hauteurs d'eau qui varient pour le même point, même en présence de dates anniversaires, etc.

L'étude statistique de l'évolution des hauteurs d'eau au cours de l'année, pour chaque cellule de la grille, montre que les hauteurs d'eau sont plus élevées en janvier qu'en avril, très légèrement plus élevées en avril qu'en juillet et moins élevées en juillet qu'en janvier. Ce profil d'évolution obtenu à partir de l'analyse statistique confirme l'hypothèse selon laquelle les hauteurs d'eau dans le sol seraient à un "niveau haut" en début de contre-saison. Au fil du déroulement de la campagne, ce niveau baisserait en fonction des sollicitations grandissantes pour l'irrigation des cultures (ceci inversement à l'augmentation de l'évapotranspiration des cultures et de l'évaporation). La recharge de la nappe alluviale par les eaux de pluie se ferait de manière décalée dans le temps par rapport à la saison des pluies (qui se situe entre juin et octobre). Ces variations (essentiellement entre janvier et juin) sont à l'image de celle des débits mesurés dans la rivière ; les débits sont à un "niveau haut" en janvier et à un "niveau bas" en mai.

### Section type d'un puisard au sein du modèle

Les résultats de l'analyse des distributions de longueurs, largeurs, profondeurs, des puisards, présentent des distributions non normales et montrent qu'il existe une grande variabilité au sein des dimensions (voir Tableau 1). A cet effet, pour les dimensions types le choix des médianes sera

préférée à celui des moyennes (Chatellier and Durieux, 2003). Ainsi, on retiendra comme dimensions, 3 m pour la longueur, 3 m pour la largeur et 4 m pour la profondeur.

Tableau 1. Statistiques descriptives des caractéristiques de forme des puisards

	Longueur (m)	Largeur (m)	Profondeur (m)
<b>Moyenne</b>	3.77	2.76	4.08
<b>Médiane</b>	3.3	3	4
<b>Ecart-type</b>	2.34	1.33	1.99
<b>Coef. Variation (%)</b>	62	48	49
<b>N</b>	199	199	199

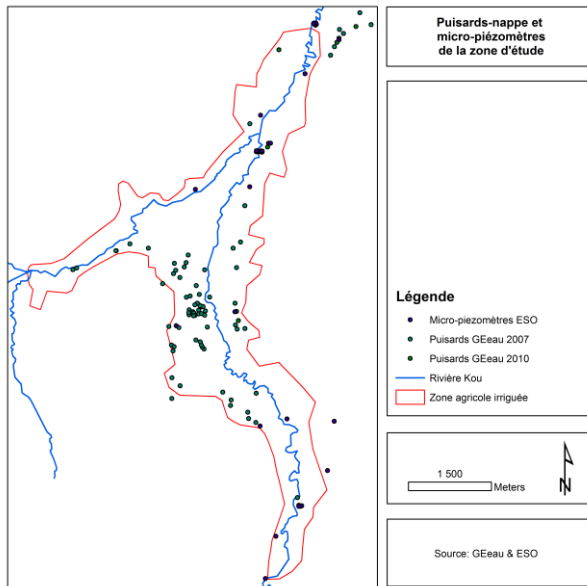


Figure 1. Puisards-nappe de la zone d'étude

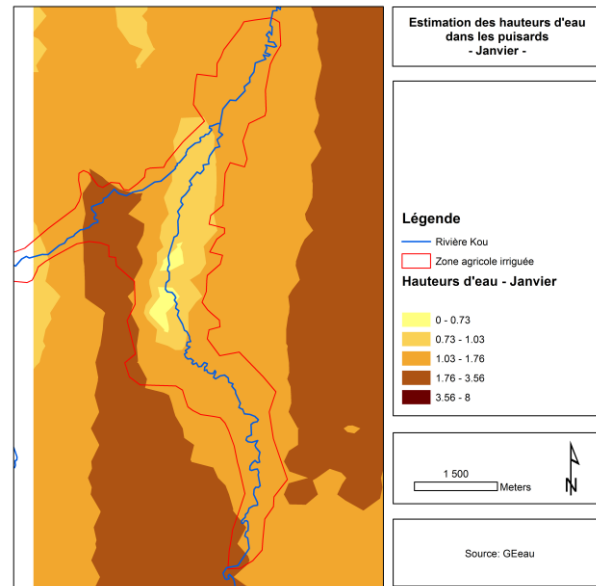


Figure 2. Estimation des hauteurs d'eau potentielles dans les puisards - Janvier

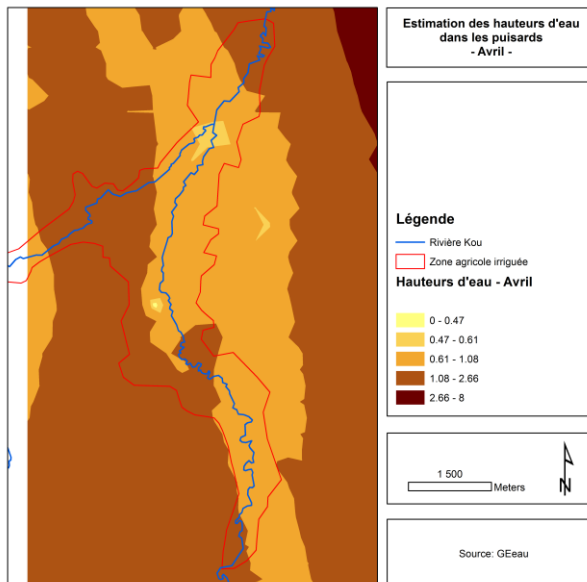


Figure 3. Estimation des hauteurs d'eau potentielles dans les puisards - Avril

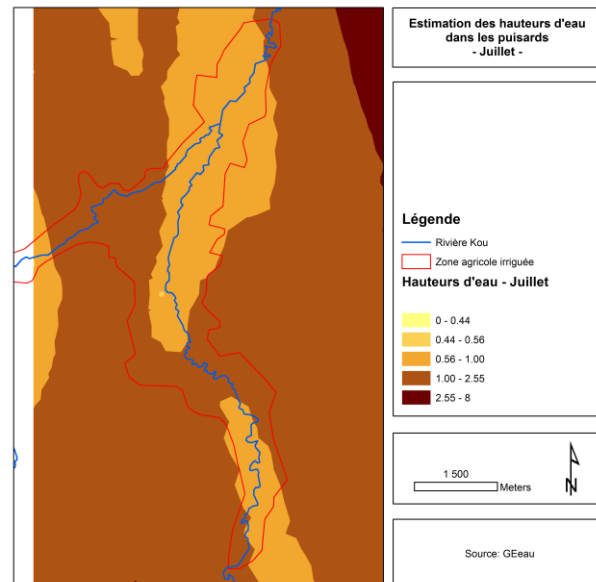


Figure 4. Estimation des hauteurs d'eau potentielles dans les puisards - Juillet

## Références bibliographiques

Chatellier, G., Durieux, P., 2003. Moyenne, médiane, et leurs indices de dispersion : quand les utiliser et comment les présenter dans un article scientifique? *Rev. Mal. Resp.* 20 421-424.

Gratton, Y., 2002. *Le Krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale*, Institut d'Analyse Géographique.

Li, J., Heap, A.D., 2008. *A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists*. Geoscience Australia, Canberra.

## Périodes d'acquisition des données collectées

<b>Types de données</b>	<b>Périodes d'acquisition</b>
Données hydrométriques	Fév. à Mai 2009; Jan. à Avril 2010
Données piézométriques	1987 à 2011
Données hydro-agricoles	Avril 2007; Avril 2009
Données socioéconomiques	Avril 2010;
Données de télédétection	Mai 1988; Avril 2000; Jan. à Mai 2007; Avril 2009; Juin 2009