



Renforcement structurel de la capacité
de gestion des ressources en eau
pour l'agriculture dans le bassin du Kou

RAPPORT TECHNIQUE No 2 (2007 – 2008)

RAPPORT TECHNIQUE

No 2 (2007 – 2008)

Publié Janvier 2009.

Editeur responsable : J. Wellens* (J.Wellens@apefe.org)

En concertation avec : M. Diallo, D. Dakouré & N.F. Compaoré (AEDE) ; H. Yacouba et H. Karambiri (2iE) ; D. Ye (DRAHRH-HB) ; F. Deprez (APEFE) ; B. Tychon & F. Traoré (ULg) ; J. Derouane (WBI).

Réalisé sur financement de la DGARNE



DIRECTION REGIONALE DE L'AGRICULTURE, DE
L'HYDRAULIQUE ET DES RESSOURCES HALIEUTIQUES
DES HAUTS-BASSINS



ASSOCIATION EAU DEVELOPPEMENT ET
ENVIRONNEMENT



WALLONIE BRUXELLES INTERNATIONAL



UNIVERSITE DE LIEGE
DEPARTEMENT SCIENCES ET
GESTION DE L'ENVIRONNEMENT



ASSOCIATION POUR LA PROMOTION
DE L'ÉDUCATION ET
DE LA FORMATION À L'ÉTRANGER



SERVICE PUBLIC DE WALLONIE



DIRECTION GÉNÉRALE DE LA
COOPÉRATION AU DÉVELOPPEMENT



DIRECTION GENERALE OPERATIONNELLE
AGRICULTURE, RESSOURCES NATURELLES
ET ENVIRONNEMENT

Table des matières

Tables des matières	i
Liste des cartes, images, figures & tableaux	v
Liste des photos	ix
Abréviations	x

Avant Propos

1. Activités bisannuelles	1
1.1 Introduction	3
1.2 Démarche du projet	4
1.3 Résultats	6
1.3.1 Analyse des résultats	6
1.3.2 Taux de réalisation des tâches	12
1.4 Communications & publications	13

Résultats de recherche

2. Promouvoir des approches innovantes de recherche-développement en GIRE	17
2.1 Introduction	19
2.2 Problématique	20
2.3 Etat des lieux du cadre de gestion	22
2.3.1 Comité 'provisoire' de Gestion de l'eau du Bassin du Kou	22
2.3.2 Comité Local de l'Eau	22
2.3.3 Les services décentralisés de l'Etat	23
2.3.4 Complémentarité de la société civile	23
2.4 Systèmes de gestion des ressources en eau	24
2.4.1 Suivi des ressources en eau	24
2.4.1.1 Réseau de suivi des ressources en eau	24
2.4.1.2 Etat des lieux des ressources disponibles	25
2.4.2 Suivi-évaluation de la protection et de l'utilisation	26
2.4.2.1 Préservation de la qualité des ressources	26
2.4.2.2 Suivi des activités hydro-agricoles	26
2.4.2.3 Outil de gestion des périmètres irrigués	27
2.5 Conclusion	28
3. Recensement exhaustif des activités hydro-agricoles du bassin du Kou	29
3.1 Introduction	31
3.2 Zone d'étude & données recensées	32
3.3 Résultats	33
3.3.1 Occupation des cultures principales	33
3.3.2 Evolution des occupations	33
3.3.3 Eaux de surface vs. eaux souterraines	35
3.3.4 Moyens d'exhaure	35

3.3.5	Efficiences des apports en eau	36
3.3.6	Intensité des irrigations par rapport au moyen d'exhaure	37
3.3.7	Calendriers culturaux	37
3.3.8	Occupation des berges	38
3.4	Conclusion	38
	Annexe – Fiche d'enquête	39
4.	Utilisation des prises de vue aérienne à basse altitude pour le suivi hydro-agricole	41
4.1	Introduction	43
4.2	Problématique	44
4.3	Matériel et méthodes	45
4.3.1	Mosaïque à petite échelle	45
4.3.2	Mosaïque à grande échelle	47
4.4	Résultats	48
4.5	Conclusions	49
	Annexe – Mosaïque géoréférencée	50
5	Optimisation des calendriers d'irrigation pour la Vallée du Kou à l'aide de SIMIS	51
5.1	Introduction à SIMIS	53
5.2	Plan d'irrigation	55
5.2.1	Cas du Bloc 1	55
5.2.2	Cas du Bloc 2	56
5.3	Programme d'irrigation	56
5.3.1	Cas du Bloc 1 : Occupation actuelle	56
5.3.2	Cas du Bloc 1 : Occupation optimale	58
5.3.3	Cas du Bloc 1 : Occupation maximale en riz	60
5.3.4	Cas du Bloc 2	61
5.4	Conclusion	63
6	Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin du Kou	65
6.1	Définition de l'évapotranspiration	67
6.2	Facteurs conditionnant l'évapotranspiration	68
6.3	Mesures et estimation de l'évapotranspiration	68
6.4	Méthodologie, hypothèses, matériels & données	69
6.4.1	Approche méthodologique	69
6.4.1.1	Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle	70
6.4.1.2	Justification du choix des méthodes retenues	70
6.4.2	Hypothèse	71
6.4.3	Matériels	71
6.4.3.1	Logiciels et modèles utilisés	72
6.4.3.2	Base de données	72
6.5	Résultats et commentaires	72
6.5.1	Résultats	73
6.5.2	Interpolation et cartographie	73
6.5.3	Commentaires	74
6.6	Discussion générale	76
6.6.1	A propos de la corrélation entre l'indice de végétation et l'évapotranspiration réelle	76
6.6.2	A propos des approches et méthodes d'estimation	77
6.7	Conclusion	78

7	Elaboration du bilan d'eau du bassin du Kou & analyse critique des composants	79
7.1	Introduction	81
7.2	Zone d'étude	82
7.3	Bilan d'eau et ces principaux termes	83
7.3.1	Principe du bilan d'eau	83
7.3.2	Précipitations	83
7.3.3	Evapotranspiration réelle	83
7.3.4	Ruissellement	84
7.3.5	Infiltration	85
7.3.6	Variation de stock	85
7.4	Modélisation hydrologique	85
7.4.1	Principe de fonctionnement	85
7.4.2	Variables d'entrée et de sortie	86
7.4.3	Paramétrage et optimisation du modèle	86
7.4.4	Résultats	88
7.5	Bilan d'eau	88
7.5.1	Etablissement du bilan d'eau	88
7.5.2	Discussions et analyses	89
7.6	Conclusion	90
8	Sensibilité des paramètres de sol mesurés et bibliographiques de BUDGET	91
8.1	Introduction	93
8.2	Matériel et méthodes	94
8.2.1	Bilan d'eau	94
8.2.2	Suivi des teneurs en eau	96
8.2.3	Paramètres hydro-agricoles	97
8.2.4	Pédologie	97
8.2.5	Critères de qualité	99
8.2.6	Analyse de sensibilité	100
8.3	Résultats et discussions	100
8.3.1	Calage	100
8.3.2	Vérification	102
8.3.3	Analyse de sensibilité	104
8.4	Conclusion	105
9	Impact de la maîtrise de l'eau sur la contre la pauvreté rurale	107
9.1	Introduction	109
9.2	Données & modules d'analyses	110
9.3	Test de la première hypothèse	111
9.3.1	Vérification de la sous hypothèse SH_0^{11}	111
9.3.2	Vérification de la sous hypothèse SH_0^{12}	113
9.3.3	Résultat	113
9.4	Test de la deuxième hypothèse	114
9.4.1	Les investissements réalisés en termes de mobilisation de l'eau et leur impact sur la lutte contre la pauvreté	115
9.4.2	Les types d'exhaure de l'eau et leur impact sur la lutte contre la pauvreté	115
9.4.3	Les types d'irrigation et leur impact sur la lutte contre la pauvreté	116
9.4.4	Résultat	117
9.5	Conclusion	117

10 Problématique de la sécurité foncière sur des périmètres irrigués aménagés	119
10.1 Introduction à la problématique de la sécurité foncière	121
10.2 L'affaire dite du quartier 5 du périmètre aménage rizicole de la Vallée du Kou : un compte-rendu	121
10.3 Enseignements à retenir	124

Références bibliographiques	127
------------------------------------	-----

Cartes, Images, Figures & Tableaux

Carte 2.1	Schéma du Bassin du Kou	21
Carte 2.2	Ressources eau du Bassin du Kou avec évolutions piézométriques	21
Carte 2.3	Carte de vulnérabilité	21
Carte 2.4	Recensement des occupations hydro-agricoles	21
Carte 3.1	Zones agricoles en concurrence pour la même ressource eau	32
Carte 3.2	Parcelles recensées et leurs zones	32
Carte 3.3	Occupations par groupe de culture	34
Carte 3.4	Utilisation des eaux de surface vs. eaux souterraines	34
Carte 3.5	Moyens d'exhaure	34
Carte 3.6	Efficiences des apports en eau	34
Carte 3.7	Positionnement des parcelles par rapport aux berges	34
Carte 3.8	Puisards recensés	34
Carte 4.1	Prise de vue aérienne de l'IGB, avec points de contrôle de sol et zones d'intérêts montrant les chevauchements	46
Carte 4.2	Mosaïque des prises de vue aérienne à 'grande' échelle	46
Carte 4.3	Mosaïque géoréférencée de 305 prises de vue aérienne 'amateur'	50
Carte 5.1	Occupations de sol pour les différents scénarii de calendriers d'irrigation	59
Carte 6.1	Localisation des stations météorologiques de l'étude	72
Carte 6.2	Exemple de cartographie de l'évapotranspiration réelle (Kc variable ; SEDI Inverse Distance ; NDVI moyen)	72
Carte 7.1	Carte d'occupation des terres	82
Carte 7.2	Carte des sols	82
Carte 7.3	Stations pluviométriques avec leurs polygones de Thiessen	82
Carte 7.4	Stations hydrométriques et leurs sous-bassins	82
Carte 8.1	Positionnement des parcelles d'essai par rapport à la carte morpho-pédologique	94
Carte 8.2	Emplacement des champs d'essai pour la zone de Diaradougou par rapport à la carte morpho-pédologique	98
Carte 8.3	Emplacement des champs d'essai pour la zone de Badara par rapport à la carte morpho-pédologique	98
Image 4.1	Elaboration du plan de vol dans ArcGIS	48
Image 4.2	Comparaison images Landsat 7-ETM (rés. 30 m), prise de vue aérienne de l'IGB (rés. 5 m et mosaïque (rés 0,8 m)	48
Image 4.3	Détail de la mosaïque : cours d'eau du Kou et parcelles irriguées	48
Image 4.4	Classification image 4.3 à l'aide de Definiens Pro (eCognition)	48
Figure 3.1	Evolution de l'occupation des parcelles agricoles recensées	37
Figure 4.1	Evolution des coûts des images en fonction de la résolution spatiale	44
Figure 4.2	Heures d'insolation journalière en 2007 pour la période de janvier à mai	44
Figure 7.1	Courbe de tarage pour la station de la confluence Niamé-Baoulé	84
Figure 7.2	Fluctuations des débits au niveau de la confluence Niamé-Baoulé	84

Figure 7.3	Disponibilités des données pour la station de Niamé-Baoulé	84
Figure 7.4	Courbe de tarage pour la station de Badara	84
Figure 7.5	Fluctuations des débits au niveau Badara	84
Figure 7.6	Disponibilités des données pour la station de Badara	84
Figure 7.7	Schéma de fonctionnement du modèle HYSIM	86
Figure 7.8	Mise en évidence des corrélations entre débits simulés et observés	88
Figure 8.1	Processus de spatialisation du modèle BUDGET	94
Figure 8.2	Caractéristiques hydrauliques des sols de la zone d'étude par rapport à leurs moyennes et les sols retenus : pour le sol HPGS	98
Figure 8.3	Caractéristiques hydrauliques des sols de la zone d'étude par rapport à leurs moyennes et les sols retenus : pour le sol FLTC	98
Figure 8.4	Triangle de texture contenant les caractéristiques granulométriques des champs d'essais et des sols de références	99
Figure 8.5	Caractéristiques hydrauliques des champs d'essais par rapport aux sols de références : pour le sol HPGS	99
Figure 8.6	Caractéristiques hydrauliques des champs d'essais par rapport aux sols de références : pour le sol FLTC	99
Figure 8.7	Teneurs en eau simulées et observées : champ 1 - maïs	101
Figure 8.8	Teneurs en eau simulées et observées : champ 2 - maïs	101
Figure 8.9	Teneurs en eau simulées et observées : champ 3 - maïs	101
Figure 8.10	Teneurs en eau simulées et observées : champ 4 - choux	101
Figure 8.11	Teneurs en eau simulées et observées : champ 5 - choux	101
Figure 8.12	Teneurs en eau simulées et observées : champ 6 - choux	101
Figure 8.13	Teneurs en eau simulées et observées : champ 7 - choux	101
Figure 8.14	Vérification du calage du champ 1 pour un sol HPGS	103
Figure 8.15	Vérification du calage du champ 2 pour un sol FLTC	103
Figure 8.16	Vérification du calage du champ 3 pour un sol HPGS	103
Figure 8.17	Vérification du calage du champ 4 pour un sol FLTC	103
Figure 8.18	Vérification du calage du champ 5 pour un sol HPGS	103
Figure 8.19	Vérification du calage du champ 6 pour un sol HPGS	103
Figure 8.20	Vérification du calage du champ 7 pour un sol HPGS	103
Figure 8.21	Vérification du calage du champ 2 pour un sol HPGS	104
Figure 8.22	Vérification du calage du champ 6 pour un sol FLTC	104
Figure 8.23	Variation du rendement (bien jugé)	105
Figure 8.24	Variation du rendement (mal jugé)	105
Figure 8.25	Variation de la teneur en eau totale (bien jugé)	105
Figure 8.26	Variation de la teneur en eau totale (mal jugé)	105
Figure 8.27	Variation K_{sat} et IS du rendement (bien jugé).	105
Figure 8.28	Variation K_{sat} et IS du rendement (mal jugé)	105
Figure 8.29	Variation K_{sat} et IS de la teneur en eau (bien jugé)	105
Figure 8.30	Variation K_{sat} et IS de la teneur en eau (mal jugé)	105
Figure 8.31	Variation TAW et IS du rendement (bien jugé).	105
Figure 8.32	Variation TAW et IS du rendement (mal jugé).	105
Figure 8.33	Variation TAW et IS de la teneur en eau (bien jugé).	105
Figure 8.34	Variation TAW et IS de la teneur en eau (mal jugé).	105
Tableau 3.1	Superficie des occupations recensées	33
Tableau 3.2	Caractéristiques physiques des puisards	35
Tableau 3.3	Utilisation des eaux de surface vs. eaux souterraines	35
Tableau 3.4	Superficies par moyen d'exhaure	35

Tableau 3.5	Efficiences et adéquations des apports en eau	36
Tableau 3.6	Intensité d'irrigation vs. moyen d'exhaure	37
Tableau 3.7	Parcelles par classe de positionnement en mètres par rapport aux berges	38
Tableau 5.1	Plan d'irrigation pour l'occupation actuelle du bloc 1	55
Tableau 5.2	Plan d'irrigation pour une occupation optimale du bloc 1	55
Tableau 5.3	Plan d'irrigation pour une occupation en riz du bloc 2	56
Tableau 5.4	Plan d'irrigation pour une occupation en maïs du bloc 2	56
Tableau 5.5	Calendrier d'irrigation pour l'occupation actuelle, début de campagne (bloc 1)	57
Tableau 5.6	Calendrier d'irrigation pour l'occupation actuelle, mi-campagne (bloc 1)	57
Tableau 5.7	Détail du calendrier d'irrigation pour les parcelles de tertiaire 1.9 (occupation actuelle)	58
Tableau 5.8	Détail du calendrier d'irrigation pour les parcelles de tertiaire 1.9 (occupation optimale)	58
Tableau 5.9	Calendrier d'irrigation pour une occupation optimale, début de campagne (bloc 1)	59
Tableau 5.10	Calendrier d'irrigation pour une occupation optimale, mi-campagne (bloc 1)	60
Tableau 5.11	Calendrier d'irrigation pour une occupation maximale en riz, début de campagne (bloc 1)	60
Tableau 5.12	Calendrier d'irrigation pour une occupation maximale en riz, mi-campagne (bloc 1)	61
Tableau 5.13	Calendrier d'irrigation pour l'occupation et la distribution d'eau actuelle, début de campagne (bloc 2)	62
Tableau 5.14	Calendrier d'irrigation pour l'occupation et la distribution d'eau actuelle, mi-campagne (bloc 2)	62
Tableau 5.15	Proposition d'un nouveau calendrier d'irrigation, début de campagne (bloc 2)	62
Tableau 5.16	Proposition d'un nouveau calendrier d'irrigation, mi-campagne (bloc 2)	62
Tableau 5.17	Calendrier d'irrigation pour une occupation totale en maïs, début de campagne (bloc 2)	62
Tableau 5.18	Calendrier d'irrigation pour une occupation totale en maïs, mi-campagne (bloc 2)	62
Tableau 6.1	Classification des méthodes de mesure/estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle	68
Tableau 6.2	Récapitulatif des résultats des calculs des évapotranspirations (potentielle et réelle) pour les 7 stations météorologiques	73
Tableau 6.3	Résumé des résultats des différentes interpolations	74
Tableau 6.4	Variations de l'ETo par rapport aux normales	75
Tableau 6.5	Corrélation NDVI et évapotranspiration réelle	75
Tableau 8.1	Phases de croissance et paramètres culturaux pour le maïs	97
Tableau 8.2	Phases de sensibilité et coefficients de rendements du maïs	97
Tableau 8.3	Phases de croissance et paramètres culturaux pour les choux	97
Tableau 8.4	Phases de sensibilité et coefficients de rendements des choux	97
Tableau 8.5	Critères de qualité pour les différentes simulations de calage	101
Tableau 8.6	Critères de qualité pour les différentes simulations de vérification	103
Tableau 9.1	Données générales sur les exploitants de l'échantillon	110

Tableau 9.2	Construction de la première hypothèse	112
Tableau 9.3	Construction de la deuxième hypothèse	112
Tableau 9.4	Test de l'indépendance entre l'encadrement apporté par l'Etat et l'investissement en maîtrise de l'eau en agriculture	113
Tableau 9.5	Test de l'indépendance entre l'encadrement apporté par l'Etat et l'investissement/participations des agriculteurs en maîtrise d'eau	114
Tableau 9.6	Vérification de l'interdépendance entre la mobilisation de l'eau par barrage, par la prise d'eau sur rivière, par les stations de pompage et les indicateurs de lutte contre la pauvreté	114
Tableau 9.7	Vérification de l'interdépendance entre les forages, la mobilisation de l'eau de la nappe phréatique, les puits et les indicateurs de lutte contre la pauvreté	114
Tableau 9.8	Vérification de l'interdépendance entre l'exhaure par gravité, par l'exhaure manuelle, par l'exhaure mécanisée et les indicateurs de lutte contre la pauvreté	116
Tableau 9.9	Vérification de l'interdépendance entre l'irrigation d'appoint, l'irrigation de complément, les superficies irriguées et les indicateurs de lutte contre la pauvreté.	116

Liste des photos

- 1 g Direction Provinciale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques du Houet et projets attachés (bureaux du projet)
- m Jeune plantation de bananes (Diaradougou)
- d Préparation d'un champ de bananes et Lassina Sanou (Diaradougou)
- 17 g Mauvais état d'un canal secondaire et son module à masque (Vallée du Kou)
- m Visite de terrain organisée pour le Global Water Partnership (Vallée du Kou)
- d Formation en SIG organisée par l'Observatoire de l'Eau (Bobo-Dioulasso)
- 29 g Vente en gros de bananes pour exportation à Ouagadougou (Diaradougou)
- m Irrigation d'un bassin de bananes (Diaradougou)
- d Puisard (Sandimisso)
- 41 g Inspection de l'avion de l'aéroclub de Bobo-Dioulasso
- m Vue de Kodala
- d Vue de la zone agricole de Diaradougou
- 51 g Mesures de débits au niveau du canal d'amenée (Vallée du Kou)
- m Pirate installé au bord du canal d'amenée (Vallée du Kou)
- d Tournage du documentaire du projet (MM. Tychon et Bay)
- 65 g Inventaire des relevés pluviométriques à l'antenne de l'INERA (Bama)
- m Stations agro-climatologiques de l'antenne de l'INERA (Bama)
- d Stations agro-climatologiques de l'antenne de l'INERA (Bama)
- 79 g Bas-fond de Diaradougou
- m Station hydrométrique de la confluence Niamé-Baoulé
- d Station hydrométrique de Badara
- 91 g Prise d'échantillons de sol non-perturbés (Diaradougou)
- m Mesure de débits des motopompes (Diaradougou)
- d Champs de maïs (Diaradougou)
- 107 g Grenier (Kodala)
- m Préparation de beurre de karité (Diaradougou)
- d Préparation du sol et repiquage du riz (Vallée du Kou)
- 119 g Décorticage du riz (Vallée du Kou)
- m Irrigation d'un bassin de bananes (Dinderesso)
- d Véhicule de la police belge devenu taxi brousse (Hounde)

Abréviations

2IE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AEDE	Association Eau, Développement et Environnement
APEFE	Association pour la Promotion de l'Education et de la Formation à l'Etranger
BDOT	Base de Données des Occupations des Terres
BUNASOL	Bureau National des Sols
CEDAO	Communauté Economique des Etats de l'Afrique de l'Ouest
CGBK	Comité de gestion du bassin du Kou
CGRI	Commissariat Général aux Relations Internationales (de la Communauté française de Belgique)
CITEC	Société Nouvelle Huilerie et Savonnerie
CLE	Comité Local de l'Eau
CWB-BF	Commission mixte Wallonie-Bruxelles – Burkina Faso
DPAHRH	Direction Provinciale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques
DRAHRH-HB	Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Hauts-Bassins
DRI	Division des Relations Internationales (Direction générale des Relations Extérieures de la Région wallonne de la Belgique)
EIER	Ecole inter-états d'Ingénieurs de l'Equipement Rural
ETSHER	Ecole inter-états des Techniciens Supérieurs de l'Hydraulique et de l'Equipement Rural-
FAO	Food and Agriculture Organization
GIRE	Gestion intégrée des ressources en eau
IGB	Institut Géographique du Burkina
ISTOM	Institut Supérieur des Techniques d'Outre-Mer
INERA	Institut National de l'Environnement et de la Recherche Agricole
ONEA	Office National de l'Eau et de l'Assainissement
RESO	Ressources en Eau dans le Sud-Ouest
RW	Région Wallonne
SOFITEX	Société Burkinabé des Fibres et Textiles
SOSUCO	Société Sucrière de la Comoé
UCRB	Union des Coopératives Rizicoles de Bama
ULg	Université de Liège
VLIR	Vlaamse Interfacultaire Raad
VREO	Valorisation des Ressources en Eau dans l'Ouest du Burkina Faso



- Activités bisannuelles -

1

Activités bisannuelles

1.1 Introduction

Le bassin du Kou a une position stratégique. Il est sur les routes du Mali (Sikasso, Bamako), de la Côte d'Ivoire et à seulement 4 heures de Ouagadougou. Sa position géographique le place à un carrefour commercial qui lui confère un avantage appréciable par rapport aux autres régions du Burkina. En outre la zone bénéficie de réserves en eau considérables par rapport aux autres régions du pays. Il y pleut davantage que dans le reste du pays et la nappe d'eau de ce bassin sédimentaire semble pouvoir fournir aux agriculteurs du bassin toute l'eau supplémentaire que ne peuvent pas leur apporter les précipitations. De même, les conditions de température et d'humidité relative sont optimales pour la production de cultures tropicales ou de cultures maraîchères.

Actuellement seulement 30% du bassin sont occupés par l'agriculture mais toutes les conditions sont rencontrées pour faire de cette zone un lieu privilégié pour y développer une agriculture intensive, source de revenus et de développement. Cette intensification a commencé il y a bien longtemps, notamment quand l'Etat burkinabé a décidé fin des années soixante avec l'aide de la coopération taïwanaise, de construire un périmètre d'irrigation rizicole dans la région de Bama. Cependant, suite aux difficultés rencontrées par l'Etat, de tels périmètres n'ont pas pu être reproduits dans le bassin. Le désengagement de l'Etat dans les grands travaux d'aménagements agricoles a laissé un vide conduisant à une lente dégradation de la situation qui a, petit à petit, été reprise en main par des acteurs privés mais sans aucune concertation.

Actuellement on assiste à une intensification des activités agricoles dans le bassin du Kou. De plus en plus d'agriculteurs ont décidé de creuser des puisards pour y pomper l'eau de nappes nécessaire à leurs productions de bananes, papayes, ou autres productions maraîchères. Le long du Kou ou du canal d'amenée de l'eau au périmètre irrigué, des agriculteurs prélèvent l'eau pour irriguer leurs champs sans aucune autorisation et encore moins de redevance. L'intensification se poursuit de façon anarchique et sans aucun contrôle permettant notamment à chacun d'exploiter l'eau de nappes ou de surface comme bon lui semble.

Ce genre de situation conduit à se poser un certain nombre de questions :

1. Quelles sont les réserves en eaux souterraines et eaux de surface disponibles et renouvelables pour poursuivre l'intensification de l'agriculture ?
2. Quel niveau d'intensification agricole peut être accepté sur le bassin sans altérer les autres usages de l'eau dans le bassin (industrie – domestique – conservation de la nature) ?
3. Comment évolue l'intensification de l'agriculture (extension des zones irriguées, consommation en eau dans ces zones) dans le bassin et où nous situons-nous par rapport à la situation limite où les différents usagers de l'eau pourraient entrer en conflit pour conserver leurs droits d'utilisation de l'eau ?
4. Comment contrôler cette évolution et comment la gérer pour faire en sorte qu'elle permette le développement de l'agriculture sans entraver celui des autres secteurs ?

Ces questions sont fondamentales pour le développement harmonieux et durable des activités agricoles du bassin.

Parmi ces 4 questions, la dernière est certainement la plus difficile et elle englobe les trois premières dans la mesure où la réponse aux trois premières questions permettra de mieux gérer l'eau agricole du bassin du Kou.

La mise en place d'une méthodologie pour mieux gérer l'intensification de l'agriculture et en particulier l'usage de l'eau par l'agriculture constitue l'objectif central du projet GEeau.

1.2 Démarche du projet

Le projet visant le renforcement structurel de la gestion de l'eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou, il apparaît indispensable de considérer dans la méthodologie les différentes composantes qui permettent une bonne gestion et qui concernent autant les aspects scientifiques que techniques, socio-économiques et institutionnels. Ces différents aspects sont bien entendu liés les uns aux autres mais pour la clarté du document, ils sont présentés séparément sous forme de volets. La méthodologie comprend trois grands volets exécutés en parallèle et fortement intégrés.

Volets scientifique et technique : concevoir des outils scientifiques et techniques pour la gestion de l'eau dans le bassin du Kou

GEeau a eu comme objectif d'appuyer aux niveaux technique et scientifique le Comité de Gestion du Bassin du Kou rebaptisé CLE-Kou en 2006 afin de lui permettre de

- suivre l'évolution annuelle de la consommation en eau par l'agriculture du bassin ;
- proposer des alternatives de gestion de l'eau agricole pour optimiser l'usage de l'eau.

Concrètement, les actions suivantes du projet ont été entreprises :

1. Acquisition, analyse, contrôle et archivage des connaissances scientifiques et techniques relatives aux ressources en eau du bassin et aux usages de l'eau pour l'agriculture sur le bassin ;
2. Mise au point d'outils permettant de décrire le plus précisément possible la consommation en eau par l'agriculture pour chaque type d'agriculture observé sur la zone (Budget, SIMIS, ...) ;
3. Mise au point d'outils permettant de réduire la consommation en eau par l'agriculture ou de mieux la gérer (SIMIS, Budget,...);
4. Mise au point d'outils de suivi de l'évolution de l'intensification de l'agriculture dans le bassin (suivi de l'extension des zones irriguées et de l'extension de l'ensemble des zones agricoles sur base annuelle) ;
5. Transmission de tous ces outils auprès des utilisateurs que sont l'AEDE, la DRAHRH-HB et d'autres institutions publiques ou privées via des formations ad-hoc.
6. Faire de l'Observatoire de l'eau le dépositaire des outils matériels et logiciels en fin de projet.

Volet social ou socio-économique: motiver les populations à prendre en main leurs problèmes¹

La gestion de l'eau en agriculture était très bien contrôlée dans les années septante, lorsque le périmètre rizicole a été installé. Un certain degré de contrôle a été maintenu tant que les projets se sont succédé sur ce périmètre jusqu'au début des années nonante. Depuis, non seulement les associations d'agriculteurs ont montré leur incapacité à prendre en main la gestion de leur propre périmètre mais en plus, des cultures irriguées sont venues s'installer sans aucun contrôle un peu partout dans la vallée du Kou. La gestion de l'eau en agriculture irriguée ne se limite donc plus au seul périmètre irrigué mais s'étend à une superficie égale à environ trois fois sa surface.

La seule solution durable que l'on peut envisager pour réagir face à cette situation préoccupante consiste à faire prendre conscience aux agriculteurs de leurs incapacités à bien gérer les zones irriguées, à leur proposer des solutions techniques et économiquement acceptables et à les convaincre de les adopter. Il importe que la demande vienne d'eux.

Les actions suivantes prévues dans le cadre du projet étaient :

- Faire prendre conscience aux agriculteurs du périmètre irrigué de l'impasse dans laquelle ils se trouvent pour les faire réagir et prendre leurs responsabilités ;
- Lancer sur le périmètre irrigué une nouvelle dynamique de gestion basée sur la responsabilisation des acteurs concernés par l'utilisation de l'eau en agriculture ;
- Etendre l'approche de responsabilisation dans les zones irriguées en dehors du périmètre.

Pour s'occuper de ce volet, le projet a décidé de faire intervenir la société civile pour effectuer un appui conseil en lieu et place de l'Etat déficient. Cette démarche originale est une réponse nouvelle à une problématique qui se répand dans beaucoup de pays en développement. Le détail sur la démarche proposée est donné dans le Chapitre 2.

Volet institutionnel : renforcement du Comité de Gestion du Bassin du Kou.

Il existe une structure de suivi et de gestion intégrée de l'eau permettant à chaque secteur et chaque type d'usage de l'eau d'être représentés et pris en considération dans la gestion intégrée de l'eau du bassin. Il s'agit du Comité de Gestion du Bassin du Kou (CGBK) repris actuellement sous l'appellation « Comité Local de l'Eau du Kou – CLE-Kou ». Une telle structure de gestion doit disposer de moyens pour fonctionner correctement (efficacité et durabilité) qui doivent provenir en priorité des usagers de l'eau de manière directe (redevance, ou des souscriptions comme actuellement) ou indirecte (impôts) mais qui pourraient être appuyés dans sa phase initiale par des financements extérieurs sous forme d'appui budgétaire éventuellement ciblé. La structure devrait également avoir une assise institutionnelle stable lui conférant l'autorité indispensable pour gérer les problèmes parfois très délicats liés à l'utilisation de l'eau. Ce dernier point prend progressivement forme avec la mise en place effective du CLE en février 2006 par le Haut-commissaire de la province du Houet.

Les actions pour le renforcement du CLE-Kou par le projet étaient :

- Appui technique et scientifique du CLE-Kou par la communication d'informations et de connaissances provenant du projet ;

¹ Tout ce volet déjà engagé par l'AEDE sera considéré comme une mesure d'accompagnement et non comme une action directement prise en charge par le projet. Cette considération sera prise en compte comme telle dans le nouveau cadre logique.

- Formation ad hoc pour les personnes concernées par la gestion intégrée de l'eau dans le bassin du Kou (AEDE, techniciens de la DRAHRH et DPAHRH, ONEA, autres membres du CLE-Kou...);
- Appui à la création de l'Observatoire de l'Eau qui doit prendre la relève du projet GEeau et conduire à la durabilité des actions du projet.

1.3 Résultats

Les résultats sont présentés selon le cadre logique élaboré lors de la phase d'identification du projet et se retrouvent sous 3 grands résultats à atteindre qui sont

1. Développer des outils relatifs à l'évaluation, la gestion et la protection des ressources en eau pour l'agriculture
2. Permettre l'appropriation des outils développés par les acteurs concernés.
3. Améliorer les pratiques d'hydraulique agricole dans le bassin.
4. Mettre en place un organe de capitalisation des études, des expériences et des compétences sur les ressources en eau.

L'ensemble des activités de ces différents résultats sont passées en revue. Enfin dans un dernier tableau une estimation du taux de réalisation des tâches est présentée.

1.3.1 Analyse des résultats

1.3.1.1 Développer des outils relatifs à l'évaluation, la gestion et la protection des ressources en eau pour l'agriculture

Cinq domaines ont été identifiés comme nécessitant des outils de gestion, chacun visant à anticiper les tensions liées aux différents usages conflictuels de l'eau :

- un modèle hydrologique du bassin;
- un modèle de bilan hydrique à la parcelle;
- un modèle de gestion des périmètres irrigués ;
- le développement de l'intégration de ces différents modèles permettant le suivi de l'utilisation de l'eau par l'agriculture ;
- le développement d'un outil de simulation des scénarii de gestion des eaux pour l'agriculture.

Toute étude de simulation demande beaucoup de préparation au niveau de la collecte et du stockage des données nécessaires à la modélisation. Une règle d'or prévoit 90% du temps pour la collecte et gestion des données et les 10% restants pour la modélisation.

Les activités décrites ci-dessous ont toutes été fortement dominées par l'acquisition des données, soit sur le terrain, soit dans la bibliographie, soit dans les différentes archives de l'Administration. La base de données ainsi constituée est exhaustive et a fait du bassin du Kou, la zone pilote idéale pour l'Observatoire de l'Eau. Les différents modèles retenus sont repris ci-après.

Modèle hydrologique

Le bassin du Kou, du fait de ses ressources en eau, est exploité de manière intensive pour différents usages : alimentation en eau potable, irrigation des zones agricoles, ... Face à la

croissance démographique, l'élaboration d'un état des lieux des ressources en eau s'est avérée indispensable pour fournir les connaissances de bases sur l'origine de l'eau alimentant le cours d'eau et par là permettre à terme une meilleure gestion de cette ressource.

Les processus hydrologiques actifs au sein du bassin versant du Kou sont nombreux : ruissellement de surface, contribution de la nappe, évapotranspiration, infiltration, ... et difficiles à cerner. La modélisation mathématique peut constituer un outil très puissant pour aider à mieux comprendre le comportement hydrologique d'un bassin et notamment déterminer dans l'écoulement d'une rivière, la part revenant à de l'écoulement de nappe et celle provenant de ruissellement superficiel.

Plusieurs modèles hydrologiques ont été évalués et essayés. Le modèle HySim a finalement été retenu pour cette étude. La mise en œuvre de ce modèle a donné des résultats fort intéressants (Chapitre 7). Il se dégage que l'évapotranspiration est le terme dominant du bilan et que l'écoulement est constitué pour 45% d'eau de nappe et 55% d'eau superficielle ruisselée. Ce type de résultat n'avait encore jamais été obtenu sur la zone et constitue à coup sûr une information qui va pouvoir être valorisée par les gestionnaires du bassin et pour toute activité en lien avec le cycle hydrologique de la zone. Cette activité est considérée comme achevée.

Modèle de bilan hydrique à la parcelle

Le projet avait décidé dès le départ de continuer à améliorer la calibration du logiciel BUDGET sélectionné par la phase GEeau financée par le VLIR (2002-2005), un outil pour la gestion de l'eau à la parcelle particulièrement bien adapté à l'agriculture irriguée. BUDGET a ensuite été validé à partir des campagnes de mesures (suivi des teneurs en eau, des calendriers d'irrigation et des analyses granulométriques) effectuées au cours des trois années du projet. L'adaptabilité du modèle, c'est-à-dire son aptitude à fonctionner correctement si on le paramètre avec des données obtenues à partir de cartes des sols (et non plus à partir de mesures de terrain) a été étudiée par des simulations appliquées à la carte pédologique du Service des sols national (BUNASOL). Si l'adaptabilité est reconnue bonne, on peut dans ce cas utiliser les informations de la carte des sols pour estimer l'hydrodynamique des sols de l'ensemble de la carte. Cette phase de généralisation de BUDGET est reprise dans le Chapitre 8. En général, l'évolution pendant la saison du bilan d'eau montre une sur-irrigation significative pour la plupart des parcelles suivies. Vu la réserve en eau facilement utilisable, limitée dans les sols argileux des plaines alluviales, l'équilibre des dosages d'irrigation n'est pas facilement trouvé. Sur ce type de sols caractéristiques de la zone, le dosage de l'irrigation est difficile. Quelques millimètres d'eau en plus ou en moins peuvent faire passer d'une sur-irrigation à une dose insuffisante pouvant causer un stress hydrique.

Le logiciel BUDGET connaîtra également une mise à jour et sera lancé fin 2009 par la FAO sous le nouveau nom AquaCrop. En plus des paramètres déjà intégrés dans BUDGET pour le calcul d'un bilan d'eau au niveau de la parcelle (caractéristiques de culture, teneurs en eau, type de sol et données climatiques), le moteur de calcul du logiciel AquaCrop utilisera plutôt le suivi de la couverture végétale de la culture (pourcentage du sol couvert par la culture par rapport au sol nu). Durant la campagne sèche, l'évolution de la fraction végétale sur plusieurs champs a été suivie à partir de photos prises à la verticale. Leur traitement et calibrage sont prévus pour fin 2009.

Avec la disponibilité des cartes pédologiques, météorologiques et d'occupation des parcelles pour l'ensemble du bassin, il devient possible de généraliser le modèle AquaCrop au niveau régional. Activités qui sont prévues pour les campagnes sèches de 2009 et 2010.

Modèle de gestion de périmètre irrigué

Une collaboration avec la FAO a permis la mise à disposition du logiciel SIMIS portant sur la gestion des périmètres d'irrigation. A défaut d'encadrement pour la maîtrise de l'utilisation de SIMIS l'apprentissage en a été fastidieux. Après de vastes campagnes de mesures sur le terrain (mesures des débits, élaboration des courbes d'étalonnage, cartographie et occupation des parcelles), le logiciel est devenu opérationnel. De nouveaux scénarii de gestion ont été développés pour les blocs 1 et 2 qui représentent à peu près un quart de la superficie aménagée. Les calendriers proposés sont plus équitables en distribution d'eau et peuvent permettre d'emblaver de plus vastes superficies. Une note technique sur ce nouvel outil particulièrement attendu dans la vallée du Kou (périmètre rizicole du bassin du Kou) est disponible (Chapitre 5). Cette activité est considérée comme achevée.

Intégration de ces différents modèles permettant le suivi de l'utilisation de l'eau par l'agriculture

Une gestion intégrée de l'eau suppose que l'on est à même de maîtriser l'espace de la zone dans toute sa variété. Si l'irrigation dans le périmètre exploitera le logiciel SIMIS la problématique de la gestion de l'eau pour l'agriculture se concentre essentiellement sur les bas-fonds exploitant soit les eaux du cours d'eau, soit les eaux superficielles de la nappe alluviale. Le projet s'est donc concentré sur cette seule zone du bassin. Dans le cadre de l'élaboration d'un outil intégré de suivi de l'utilisation de l'eau pour les zones irriguées une carte d'occupation des sols a pu être élaborée à partir de plus de 300 prises de vue aériennes amateur à basse altitude, ayant une résolution de 0,8m (Chapitre 4). Des logiciels de mosaïquage, de traitement d'images et de SIG ont permis la construction d'une seule image géoréférencée. Cette technique permet un suivi spatial des activités agricoles à moindre coût par rapport à l'acquisition des images satellites à haute résolution. On peut conclure qu'une technique rapide et prometteuse de suivi de l'occupation des activités agricoles dans le bassin du Kou a été élaborée respectant les ressources techniques et financières localement disponibles.

Pour la même période, plusieurs images satellites RADAR ont été acquises afin d'élaborer un protocole de reconnaissances des images pour la réalisation semi-automatique des cartes d'occupation de sols et leur évolution dans le temps. Précisons que des images RADAR ont été choisies parce qu'elles ne sont pas influencées par les conditions climatiques ; des rayons radars pénètrent dans l'atmosphère sans être perturbés par la poussière et les nuages. Les prises de vue aériennes ainsi que des mesures de terrain seront utilisées pour l'interprétation des images RADAR. Cette activité se poursuivra les années à venir.

Le développement d'un outil de simulation des scénarii de gestion des eaux pour l'agriculture fait le sujet de l'étude doctorale de M. Traoré. Après avoir terminé son DEA (année académique 2007-2008), M. Traoré est venu renforcer le projet et ainsi finit sa première année de recherche doctorale à l'ULg avec une bourse de cotutelle prise en charge par le CGRI. Son travail évolue favorablement et continuera également lors du programme 2008-2010 (DRI/CGRI).

1.3.1.2 Permettre l'appropriation des outils développés par les acteurs concernés

Il est apparu très rapidement que pour pouvoir toucher les principaux utilisateurs finaux de la gestion de l'eau que sont les agriculteurs, surtout les agriculteurs qui occupent des parcelles irriguées, il fallait d'abord former des formateurs qui iraient à leur tour, enseigner aux

agriculteurs ce qu'ils ont appris. Ces mêmes formateurs pourraient bien entendu aussi servir d'intermédiaire pour mettre au courant les autorités du bassin du Kou et en particulier le CLE-Kou sur l'évolution de l'usage de l'eau dans les différentes zones du bassin.

Les besoins en terme d'outils de gestion pour le suivi de l'eau ont été identifiés en Comité technique de suivi du projet. L'outil SIMIS chargé de la gestion de l'eau en périmètre irrigué a été proposé en priorité car il correspond à un besoin précis et bien identifié dans le périmètre rizicole du bassin du Kou. En second lieu il a été demandé une formation aux systèmes d'information géographique (SIG) car ils facilitent l'analyse spatiale des observations et résultats et permettent surtout la réalisation de cartes devant servir à diffuser les résultats et servir d'outil de communication avec les acteurs et utilisateurs de l'eau du bassin. L'outil ArcGIS a été retenu.

Des notes techniques portant sur la définition, le fonctionnement et les objectifs de chaque outil ont été élaborées. Plus spécifiquement, des formations en ArcGIS et SIMIS ont été organisées par le projet et l'Observatoire de l'Eau.

Un manuel pour la formation en ArcGIS ainsi que des exercices avec des études de cas pour le secteur de l'eau dans le bassin du Kou ont été élaborés. Plusieurs cadres de l'AEDE, des Directions de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques, des projets et associations partenaires, au total 12 personnes ont bénéficié de cette formation de 3 jours qui a eu lieu mi-décembre 2007.

Vu sa technicité et sa complexité, le logiciel SIMIS a plutôt été valorisé en comité restreint avec uniquement l'AEDE dans un premier temps car cette association va intervenir directement dans l'appui-conseil sur le périmètre rizicole. Les résultats obtenus avec SIMIS ont été présentés lors des "sessions de réflexion" aux représentants des Directions Agricoles et Hydrauliques, de l'INERA, de l'AEDE et de l'Union des Coopératives Rizicoles de Bama (UCRB). Ces réunions ont permis des échanges sur l'utilisation finale de l'outil ainsi que sur son appropriation par les concernés. Un guide de l'utilisateur, élaboré par le projet, a aussi été diffusé. L'outil et les solutions proposées ont été favorablement accueillis par les invités, et les premiers concernés.

Dans l'ensemble les personnes ayant participé à la formation ArcGIS se sont approprié correctement ce nouvel outil. C'est vrai en particulier pour les utilisateurs d'ArcView 3.2 qui ont profité de la formation pour effectuer une mise à jour de leur connaissance dans le domaine des SIG.

L'appropriation est également confirmée au niveau de l'outil SIMIS par l'AEDE dans la mesure où ils travaillent actuellement au paramétrage de l'ensemble des blocs du périmètre irrigué, ce travail devant être terminé en décembre avant le début de la contre-saison pour pouvoir l'utiliser dans la prochaine campagne agricole.

L'originalité du projet est qu'il comporte un volet scientifique et un volet de renforcement des capacités. Le volet scientifique, confié aux étudiants stagiaires, aux doctorants et au coopérant APEFE, obtient des résultats qui sont ensuite valorisés en vue de renforcer les capacités des partenaires. Les restitutions du contenu de leurs travaux à l'occasion de réunions assurent en outre une meilleure compréhension de la démarche scientifique aux différents partenaires.

1.3.1.3 Améliorer les pratiques d'hydraulique agricole dans le bassin

Diagnostic ex-ante

En mai 2007, un recensement hydro-agricole du bassin du Kou a été organisé par le projet et l'AEDE, et réalisé par les agents de la Direction Provinciale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques (DPAHRH) (Chapitre 3). Les compétences en appui-conseil sur le terrain de la DPAHRH-Houet ainsi que la confiance dont profitent ses encadreurs dans le milieu agricole étaient indispensables pour le bon déroulement des enquêtes. L'AEDE et le projet ont répondu aux besoins en formation et en matériel au niveau de la DPAHRH. Le traitement des enquêtes a été effectué par le projet, et les résultats et la base de données élaborée ont été restitués au niveau de l'administration.

Pour les différentes zones agricoles du bassin du Kou, les données suivantes ont été recensées par exploitant : données d'identification & coordonnées (GPS) ; données de cultures : superficie, calendrier, ... ; points d'exhaure : prise en rivière, puisard, ... ; caractéristiques du moyen d'exhaure ; calendrier d'irrigation ; caractéristiques du puisard & coordonnées GPS. Plus de 1.200 exploitants et groupements ont été identifiés dans les 11 différentes zones agricoles. Une base de données a été élaborée à partir de ces enquêtes. Les cartes suivantes ont pu être faites : occupations agricoles du bassin du Kou ; utilisation des eaux de surface vs. eaux souterraines ; moyens d'exhaure ; efficacités en irrigation ; positionnement par rapport aux berges.

Les superficies potentielles irrigables sont déjà atteintes dans certaines régions, mais l'expansion est loin d'être freinée. Le grand enjeu pour le développement de l'irrigation se situe dans la gestion de la ressource en eau. La sensibilisation des agriculteurs sur les bonnes pratiques de l'irrigation permettrait de limiter les pertes lors de l'application de l'eau sur les parcelles et de réduire les inégalités d'accès à la ressource qui existent entre les utilisateurs situés en amont et en aval du cours d'eau.

Ce suivi a permis une mise à jour des connaissances de l'état des activités hydro-agricoles, grandes consommatrices en eau dans la zone. Il est aussi possible de mieux prévoir les futurs conflits liés à l'eau, l'inventaire sert dans ces cas comme outil d'arbitrage. Il aidera également l'élaboration des scénarii de gestion ou des formations de pointe.

L'étude répondait directement à une des activités stipulées dans le programme des actions 2006-2008 du Comité Local de l'Eau du Kou (CLE-Kou) : « Réduire les conflits dans l'utilisation de l'eau ». Avant de pouvoir attaquer cette problématique, l'élaboration d'un état des lieux (i) des ressources en eau et (ii) de ses utilisateurs s'imposait. Le recensement exhaustif des utilisateurs agricoles a satisfait ce deuxième besoin.

Restitution du diagnostic

Les résultats ont été restitués et discutés lors d'une session spéciale du CLE- Kou, le 18 décembre 2007, et à la session du 7 mai 2008, portant sur le thème de la "Gestion concertée des berges du Kou et de ses affluents".

Proposer des améliorations des pratiques d'hydraulique agricole

Rappelons que depuis le 1er avril 2005 l'AEDE a mis un conseiller en irrigation à disposition des irrigants et des organisations professionnelles d'irrigants du bassin du Kou. Il s'agissait d'une action d'immersion profonde dans le milieu afin d'améliorer la communication avec les producteurs et de réunir les conditions pour la création et le fonctionnement d'une structure professionnelle de gestion des aménagements hydro-agricoles dans le bassin.

Cette action est développée en articulation avec les activités du projet dans la perspective de l'émergence et de la professionnalisation d'un appui conseil de type privé en matière de développement de l'agriculture irriguée dans le bassin du Kou. Elle s'inscrivait plus particulièrement dans la stratégie d'appropriation et de valorisation des résultats scientifiques et techniques du projet par les bénéficiaires finaux, à savoir les agriculteurs. C'était en substance le volet socio-économique du projet.

Appui de la mise en œuvre de nouvelles pratiques d'hydraulique agricole

Les deux dernières années du projet ont été marquées par une avancée significative dans les actions démonstratives appelées à fonder une approche nouvelle de la gestion de l'eau et des infrastructures pour une mise en valeur agricole plus efficace du périmètre.

Il s'agissait notamment de la création d'une brigade dédiée à la mise en œuvre et au respect du tour d'eau. Cette action sera particulièrement renforcée au cours de la campagne de production de saison sèche 2008/2009, par la mise au point du logiciel SIMIS par l'AEDE qui permet désormais d'identifier des mesures prioritaires de gestion par la brigade de gestion de l'eau. La création de cette brigade, officialisée par un protocole signé entre l'AEDE et l'UCRB, a pour but principal de surveiller les prélèvements d'eau sur le canal d'amenée, d'organiser et de veiller à l'application du tour d'eau sur le périmètre conformément au calendrier agricole.

Elaborer des outils de suivi-évaluation des pratiques d'hydraulique agricole

Dans le cadre de l'élaboration d'un outil de suivi de l'utilisation de l'eau pour les zones irriguées une carte d'occupation détaillée des sols a pu être élaborée à partir de plus de 300 prises de vue aériennes à basse altitude, ayant une résolution de 0,8m. Des logiciels de mosaïquage, de traitement d'images et de SIG ont permis la construction d'une seule image géoréférencée. Toutes les parcelles agricoles irriguées ont ainsi pu être identifiées. Cette technique permet un suivi spatial des activités agricoles à moindre coût par rapport à l'acquisition d'images satellites à haute résolution. Elle répond avec une précision largement suffisante aux objectifs de suivi et de contrôle des parcelles irriguées demandés par les gestionnaires du bassin, tout en leur garantissant une extrême souplesse vu la disponibilité sur place des moyens pour appliquer la technique.

L'approche proposée si elle est répétée régulièrement, par exemple tous les deux ou trois ans doit permettre au CLE-Kou de connaître avec une très grande précision, les zones du bassin où l'agriculture irriguée aura continué de s'étendre pour éventuellement prendre des positions.

Valider les outils de suivi-évaluation des pratiques d'hydraulique agricole

L'outil a été présenté le 18 décembre 2007 au CLE-Kou et le Haut Commissaire, président du CLE-Kou s'est félicité de la qualité du travail réalisé par le projet GEeau.

Réaliser un diagnostic ex-post des nouvelles pratiques d'hydraulique agricole

En raison du retard accumulé tout au long du projet, les nouvelles pratiques d'hydraulique agricole viennent seulement d'être lancées en certains endroits du bassin et en particulier dans le périmètre rizicole. Il faut reconnaître qu'à ce stade, un diagnostic précis n'a pas encore pu être établi. Cependant on observe déjà un changement d'attitude parmi les agriculteurs du périmètre. Alors qu'ils pensaient qu'il n'existait aucune possibilité pour résoudre les pénuries récurrentes d'eau sur le périmètre irrigué, ce qui les décourageait très fortement, les membres de l'Union des coopératives des riziculteurs de Bama ont repris espoir. Les tours d'eau sur le périmètre ont été mieux respectés que les années antérieures et il en a résulté que les blocs 7 et 8 situés au bout du périmètre ont pu cette année produire du maïs, ce qui n'avait plus été possible depuis longtemps.

Informier le CLE-Kou sur l'état des pratiques d'hydraulique agricole sur le bassin

Le projet GEeau participe aux réunions du CLE-Kou. Il est en particulier intervenu dans la présentation des résultats du recensement sur l'état des pratiques agricoles réalisé en parallèle avec une campagne aérienne au-dessus de la zone irriguée du bassin du Kou pendant la contre-saison 2007.

1.3.1.4 Mettre en place un organe de capitalisation des études, des expériences et des compétences sur les ressources en eau

L'AEDE a mis en place un Observatoire de l'Eau : pour le bassin du Kou, ce cadre d'action est en quelque sorte la cellule scientifique et technique du Comité Local de l'Eau du Kou. L'organisation et ses statuts ont été reconnus par l'Etat. Des compétences burkinabè ont été sollicitées pour le renforcement des tâches de consultation ainsi que pour l'appropriation des outils développés par le projet. Les actions prioritaires consistaient à la mise en place de la logistique professionnelle.

L'Observatoire de l'Eau est une réponse à la demande spécifique en connaissances scientifiques et techniques des acteurs économiques au niveau local. Il accompagne le renforcement du Comité Local de l'Eau dans le développement d'une capacité de régulation publique et collective de l'eau.

1.3.2 Taux de réalisation des tâches

<u>Objectif Spécifique :</u>	[%]
Renforcer les connaissances, la gestion, la valorisation et la protection des ressources en eau pour l'agriculture dans la région des Hauts-Bassins	76

<u>Résultat 1 :</u>	
Des outils relatifs à l'évaluation, la planification, la gestion et la protection des ressources en eau pour l'agriculture ont été développés	67
Identifier et sélectionner les logiciels de modélisation appropriés	100
Valider le choix des logiciels de modélisation retenus	100
Améliorer les connaissances sur les eaux souterraines	-
Paramétrer un modèle hydrologique	100
Paramétrer un modèle de gestion de périmètre d'irrigation	100
Paramétrer un modèle de bilan hydrique	85
Développer l'intégration de ces différents modèles	20
Simuler les scénarii de gestion des eaux en agriculture à l'aide des outils développés	30
Rendre compte des résultats de l'analyse des scénarii de gestion des eaux en agriculture au CGBK	0

<u>Résultat 2 :</u>	
Les outils développés ont été appropriés par les acteurs concernés	74
Identifier les acteurs concernés par les outils développés	100
Caractériser par acteur l'utilisation spécifique des outils développés	100
Identifier les besoins en formation des acteurs concernés	100

Réaliser des supports didactiques et activités de vulgarisation/promotion des outils développés	60
Organiser les formations à l'utilisation des outils développés	60
Assurer les formations à l'utilisation des outils développés	60
Evaluer les formations à l'utilisation des outils développés	50
Suivre et évaluer l'appropriation des outils développés	60

Résultat 3 :

Les pratiques d'hydraulique agricole dans le bassin du Kou ont été améliorées.	64
Réaliser un diagnostic participatif de l'efficacité des pratiques <i>ex ante</i> de l'hydraulique agricole	100
Organiser la restitution du diagnostic aux acteurs concernés	100
Proposer des améliorations des pratiques d'hydraulique agricole intégrant les outils développés	40
Appuyer la mise en œuvre des pratiques d'hydraulique agricole intégrant les outils développés	50
Elaborer des outils de suivi-évaluation des pratiques d'hydraulique agricole	60
Valider les outils de suivi-évaluation des pratiques d'hydraulique agricole	60
Réaliser un diagnostic participatif de l'efficacité des pratiques <i>ex post</i> de l'hydraulique agricole	0
Informers le CGBK sur l'état des pratiques d'hydraulique agricole	100

Résultat 4 :

Un organe de capitalisation des études, des expériences et des compétences sur les ressources en eau a été mis en place	100
Elaborer les TDR de mise en place de l'organe (statut, organisation, fonctionnement et financement)	100
Faire valider les TDR par les parties prenantes	100
Appuyer la mise en place de l'organe	100

1.4 Communications & publications

Le projet a largement communiqué au cours des 4 années du programme, que ce soit via des participations à des ateliers, à des colloques nationaux ou internationaux ; par la rédaction de papiers ou posters directement ou indirectement via des travaux de fin d'études d'étudiants. Le projet malgré ses moyens limités si on le compare à d'autres projets, notamment européens, est très largement connu dans le Sud-ouest burkinabé et même à l'échelle nationale. Ceci est dû à la qualité des travaux réalisés et à la durée du programme qui, si on l'ajoute à la phase financée par le VLIR, a déjà dépassé 7 ans. En définitive, les actions de communications font partie intégrante des activités de recherche et elles montrent que le projet a renforcé la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture et que le travail effectué est apprécié et reconnu à sa juste valeur.

Comme pour les deux premières années, le projet continue à être invité à partager des expériences et connaissances à l'occasion des séminaires, colloques, ... Parmi les plus importants citons :

- Animation d'un atelier annuel sur la gestion intégrée des ressources en eau, au siège de la coopérative des exploitants du périmètre irrigué de la Vallée du Kou, au profit du groupe 2iE (14 mars 2007) ;
- Après avoir animé une session de travail du « Programme de formation internationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau » portant sur le cas du Bassin du Kou, organisé l'année passée par l'Agence Suédoise de Coopération Internationale au Développement, l'AEDE, l'Observatoire de l'Eau et le projet ont organisé cette année tout le volet de ce programme pour la région de Bobo-Dioulasso (19 - 21 mars 2007) ;
- Publication du Rapport Technique N° 1, synthétisant les études et résultats scientifiques et techniques du projet (février, 2007) ;
- Présentation d'un poster portant sur l' « Utilisation des prises de vue aériennes à basse altitude pour le suivi des activités hydro-agricoles – Cas du Bassin du Kou » à AfricaGIS 2007 (Ouagadougou, 17 - 21 septembre 2007);
- La collaboration avec l'Agence Suédoise de Coopération Internationale au Développement et le Global Water Partnership s'est élargie avec l'organisation, pour la troisième fois, d'une mission de travail du « Programme de formation internationale de Gestion Intégrée des Ressources en Eau ». L'AEDE, l'Observatoire de l'Eau et le projet ont organisé tout le volet de ce programme pour la région des Hauts-Bassins incluant une conférence sur la GIRE ainsi que des visites de terrains (ONEA, Guinguette, zone industrielle, SOSUCO, Vallée du Kou) pour 27 experts internationaux dans le domaine de l'eau (3 – 5 décembre 2007) ;
- Publication d'un article et présentation portant sur l' « Utilisation des prises de vue aériennes à basse altitude pour le suivi des activités hydro-agricoles – Cas du Bassin du Kou » au Salon Africain d'Irrigation et Drainage (28 janvier – 1 février 2008). Vu la pertinence de l'étude, le jury avait pris en charge la participation du Chargé de Mission de l'Observatoire de l'Eau;
- L'organisation d'une visite guidée dans les zones agricoles du Bassin du Kou, d'une usine d'égrainage de la SOFITEX et de l'huilerie du CITEC pour un voyage d'étude de l'ISTOM (11 et 12 février 2008) ;
- L'animation d'une session de formation de formateurs sur la Gestion Intégrée des Ressources en eau, organisée par la Commission de la CEDEAO – Unité de Coordination des Ressources en Eau (25 avril 2008) ;
- Présentation d'un poster sur la problématique de la concurrence sur la ressource en eau dans le bassin du Kou et les outils mis en place par le projet lors d'une visite de terrain du Premier Ministre et du Ministre de l'Agriculture (3 mai 2008) ;
- L'organisation sur le terrain avec le groupement d'écoles 2iE du projet technique « Contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau dans le Bassin du Kou » dans le cadre de la formation master spécialisé en GIRE (9 – 13 juin 2008).

Il convient également de mentionner les études réalisées dans le cadre des stages au sein du projet, régulièrement consultées et citées par les partenaires :

- « Maîtrise de l'eau en agriculture et lutte contre la pauvreté rurale au Burkina Faso : cas du bassin hydrographique du Kou » par Bayighomog Andriane, mémoire de fin d'étude (Université de Yaoundé II, Cameroun).
- « Evaluation des potentialités d'irrigation du bassin versant du Kou » par Pagezy-Boissier Marie, rapport de stage.

- « Etude de relation entre NDVI et pluviométrie dans le bassin versant du Kou » par Oyou Benjamin, mémoire de fin d'étude (2iE).
- « Analyses géotechniques pour une étude comparative de deux techniques de mesure de teneur volumique en eau des sols en vue d'une application aux simulations des besoins en eau d'irrigation » par Simo Jules, rapport de stage (2iE).
- « SIMIS : élaboration des calendriers d'irrigation pour la Vallée du Kou & élaboration d'un manuel d'utilisation », par Ntekam Martial, stage de perfection (2iE).
- « Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso » par Farid TRAORE, mémoire de fin d'études de DEA (Université de Liège) ;
- « Analyse critique des principaux composants du bilan d'eau du bassin versant du Kou » par Marie-Jeanne NIAMIAN, mémoire de fin d'études (2iE) ;
- « Analyse de sensibilité du logiciel BUDGET pour l'évaluation et la gestion de l'irrigation au niveau de la parcelle » par Mariama SAGNA, mémoire de fin d'études (2iE) ;
- « Evaluation et optimisation de la gestion de l'irrigation du périmètre irrigué de la Vallée du Kou à l'aide du logiciel SIMIS » par Colette NAKELSE (Ecole Nationale d'Ingénieurs ENI BT, Mali).



- Approches innovantes en matière de GIRE -

2

Promouvoir des approches innovantes de recherche-développement en matière de GIRE²

Le bassin du Kou, situé dans le sud-ouest du Burkina Faso, est depuis quelques décennies le théâtre de différentes formes de conflits liés à toute une série de problèmes que l'on rencontre généralement dans des zones irriguées. Dans le bassin du Kou, les aménagements hydro-agricoles couvrent une superficie totale de près de 2.000 ha ; il s'agit des périmètres privés maraîchers et horticoles, et d'un grand périmètre de 1.200 ha réalisé par l'Etat.

Malgré la présence de sources importantes, d'une nappe phréatique facilement exploitable et d'un cours d'eau pérenne, la plupart des utilisateurs se retrouvent régulièrement confrontés à des pénuries d'eau résultant d'une extension de l'agriculture irriguée.

Depuis 1987 les autorités politiques et administratives ont entrepris de rechercher avec les usagers concernés les voies pour circonscrire les menaces résultant de cette situation par la création d'un Comité 'provisoire' de Gestion du Bassin du Kou (CGBK). Malgré l'imagination dont il a fait preuve et les nombreuses réalisations à son actif, il aura fallu attendre l'année 2008 pour voir la naissance d'un Comité Local de l'Eau (CLE), inspiré des expériences du CGBK. Celui-ci s'inscrit dans le cadre d'une GIRE décentralisée voulue par l'Etat burkinabé.

La particularité de ce CLE est la montée en puissance en son sein de l'action de la société civile. Cette dernière s'est engagée à la mise en chantier d'une innovation institutionnelle : un Observatoire de l'Eau (OE). Il a pour vocation d'appuyer les pouvoirs publics dans le développement de programmes d'études relatifs à la gestion des ressources en eau. A travers l'élaboration d'une base de données spatialisée, l'OE se concentre sur la mise en place d'outils de contrôle et de suivi des ressources en eau et de leur exploitation. Les outils et études développés sont restitués et discutés lors des réunions du CLE. Ils permettent au CLE de mieux prévoir des futurs conflits liés à l'eau et servent également comme outil d'arbitrage. L'expérience témoigne que de nouvelles articulations des responsabilités en matière de recherche-développement dans le domaine de l'eau entre l'Etat, les collectivités locales, la société civile et le secteur privé sont nécessaires et possibles.

2.1 Introduction

Le bassin du Kou est l'espace géographique qui contient le système d'eau associé à la rivière Kou à ses affluents et aux sources de Nasso (dite 'Guinguette'). On y trouve d'autres cours d'eau presque permanents, ainsi que des lacs, des mares, des sources et une nappe phréatique facilement exploitable. La disponibilité de l'eau pendant toute l'année permet plusieurs récoltes après l'hivernage.

² Avec la contribution de J. Wellens (APEFE), M. Diallo (AEDE), N. Gardin (APEFE), N.F. Compaoré (VREO), D. Dakouré (OE), H. Karambiri (2iE), J. Deourane (MRW-DGRNE), S. Brouyère & B. Tychon (ULg).

Dans le bassin du Kou, les aménagements hydroagricoles en période sèche couvrent une superficie totale estimée à plus de 2.000 ha (Wellens *et al.*, 2009) ; il s'agit pour l'essentiel de périmètres privés formant la ceinture maraîchère et horticole de Bobo-Dioulasso, deuxième ville du Burkina Faso, et du grand périmètre réalisé par l'Etat à Bama spécialisé dans la production du riz. Le développement d'une filière fruits et légumes sous l'impulsion de l'initiative privée est un trait caractéristique de la production irriguée dans le bassin du Kou. Cette production irriguée est à l'origine du développement d'activités économiques dans la ville de Bobo-Dioulasso qui fournit en effet l'essentiel des services de transport, de financement et de commerce des produits agricoles, qui assure également la disponibilité sur les sites des consommations intermédiaires nécessaires aux activités de production. Enfin c'est à Bobo-Dioulasso que certains produits agricoles bruts sont transformés pour les besoins de la consommation finale des ménages et pour l'exportation.

Toute l'eau nécessaire à l'irrigation des superficies aménagées provient pendant la saison sèche (6 à 7 mois) du cours d'eau (qui conserve toute l'année un débit de base assez conséquent) et de l'aquifère alluvial.

Le bassin est en même temps le théâtre de différentes formes de conflits liés à toute une série de problèmes que l'on rencontre généralement dans des zones sous irrigation : exploitation anarchique des ressources en eau, exploitants prélevant frauduleusement l'eau, dégradation du matériel, etc. La région est marquée par l'usage conflictuel des ressources en eau entre l'agriculture vivrière et de rente, et l'agro-pastoralisme ; mais surtout entre les différents agriculteurs et villages (le droit de possession de l'eau est un 'droit collectif', chaque village a sa tranche de fleuve).

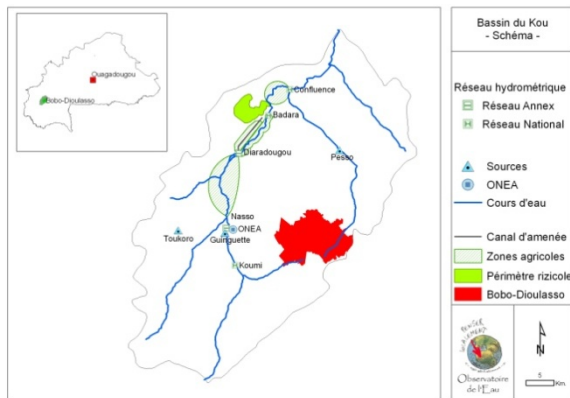
2.2 Problématique

Les ressources en eau abritées dans le bassin du Kou sont mobilisées par de nombreux utilisateurs aux besoins variés : périmètre rizicole de la vallée du Kou, périmètres informels, l'ONEA pour l'alimentation en eau de la ville de Bobo-Dioulasso, etc... Les principaux utilisateurs d'eau du bassin ont été inventoriés, la Carte 2.1 donne une idée de la diversité des exploitants dans le bassin du Kou.

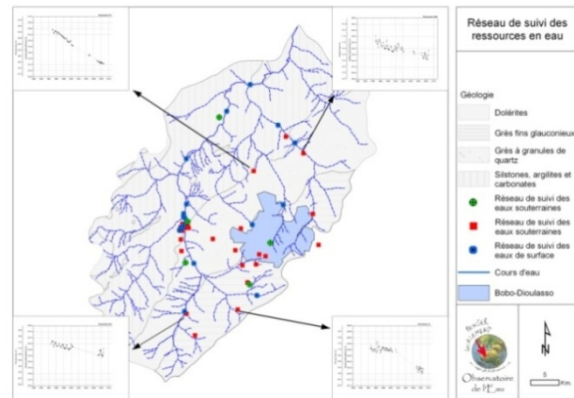
L'alimentation en eau potable de la ville de Bobo-Dioulasso par l'ONEA se fait uniquement à partir d'eau souterraine. Deux forages exploités et une source assurent cette alimentation. Les sources de la Guingette sont alimentées par la même nappe phréatique exploitée par l'ONEA et d'autres utilisateurs situés dans la zone industrielle de Bobo-Dioulasso. Une baisse de débit de 2,3 m³/s (en 1960) à 1,7 m³/s (en 1996) a déjà été constatée par Traoré *et al.* en 1997.

Le périmètre rizicole de la vallée du Kou est situé à 25 km au nord-ouest de la ville de Bobo-Dioulasso. 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 (Oubib, 2000). Une prise d'eau a été aménagée, à Diaradougou pour irriguer gravitairement ce périmètre rizicole par un canal d'amenée. A l'étiage, tout le débit du Kou est dévié pour l'irrigation du périmètre. Ce n'est qu'à la saison des pluies que la rivière retrouve un écoulement continu.

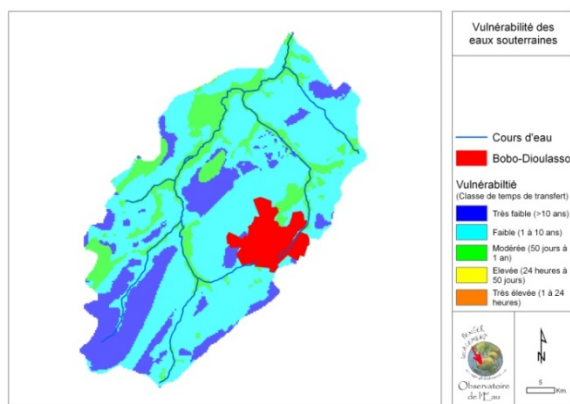
Le canal d'amenée long de 11 km traverse une zone assez propice au développement des cultures. Des maraîchers s'y sont installés tout le long avec des motopompes et des siphons.



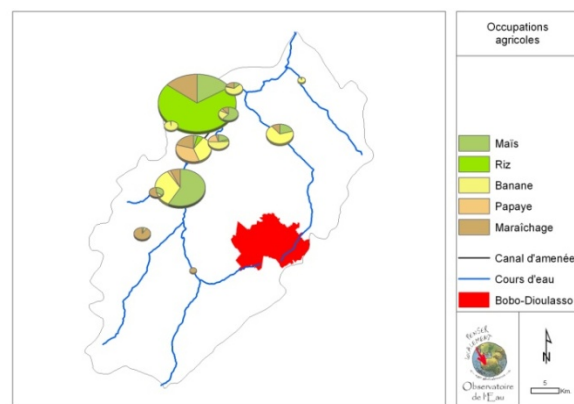
Carte 2.1 – Schéma du Bassin du Kou.



Carte 2.2 – Ressources en eau du Bassin du Kou avec quelques évolutions piézométriques.



Carte 2.3 – Carte de vulnérabilité



Carte 2.4 – Recensement des occupations hydro-agricoles.

La superficie des cultures informelles est estimée à 200 ha. (SahelConsult/F.E.T, 1997). Les prises d'eau se multiplient et réduisent certains jours le débit de canal de plus de 25% (Berthiaud, 2001 ; IWACO/BERA, 1988 ; IWACO-BURGEAP, 1998). Ceci entraîne des pénuries d'eau au niveau du périmètre irrigué.

Plusieurs types d'agriculture/irrigation ont été inventoriés en amont du périmètre irrigué. (i) Au bord du Kou tout un système d'irrigation gravitaire (canaux primaires et secondaires) est élaboré. L'irrigation n'a lieu qu'en période d'étiage. En hivernage les terrains sont inondés et occupés par du riz paddy. En étiage on y cultive surtout des cultures maraîchères. (ii) Plus en haut des rives on a également des parcelles cultivées. Beaucoup sont irriguées par motopompes tirant leur eau des puisards. La lame d'eau se trouve déjà à une profondeur d'un mètre. On y plante les mêmes cultures en hivernage qu'en contre-saison (bananier, haricots, maïs, coton,...). Pendant l'hivernage il s'agit de cultures pluviales, pendant des périodes de sécheresse on irrigue de temps en temps pour compléter les besoins en eau. En contre-saison c'est l'irrigation tout le temps. (iii) Lorsque l'on s'éloigne encore davantage des rives on trouve seulement des cultures pluviales (haricot, maïs, mil, ...).

En aval du périmètre de la Vallée du Kou une autre zone de fortes activités agricoles se présente. Les ressources en eaux se retrouvent (i) dans le Kou, (ii) dans le canal émissaire en aval du lac du Bama contenant les eaux drainées du périmètre rizicole et (iii) autour des

puisards étalés dans la zone. L'emplacement aval contraint les occupants aux cultures pluviales de l'irrigation de complément.

La satisfaction des besoins des populations conduit le plus souvent à une utilisation conflictuelle des ressources en eau disponibles. Une concertation s'imposait donc entre les différents utilisateurs nécessitant la mise en place de mécanismes de gestion intégrée afin d'assurer une gestion équitable et durable de la ressource pour l'ensemble de la population.

2.3 Etat des lieux du cadre de gestion

2.3.1 Comité 'provisoire' de Gestion de l'eau du Bassin du Kou

Devant l'acuité des problèmes et conflits, les autorités politiques et les usagers directement concernés ont entrepris depuis 1987 de rechercher les voies et moyens de circonscrire les menaces résultant de la situation. En 1997, une dynamique de concertation des acteurs sous l'impulsion de la Direction Régionale chargée de l'eau a abouti à la création formelle du Comité 'provisoire' de Gestion du Bassin du Kou (CGBK).

Sur la base des orientations ainsi dégagées, des avancées significatives ont été réalisées dans la connaissance des ressources en eau et la préparation d'options pour leur mobilisation et gestion dans la perspective de résolution des conflits et des problèmes de pollution par l'adoption d'un Programme Quinquennal d'Actions Prioritaires. Malgré les multiples efforts du comité pour faire accepter un budget au niveau de l'Etat, le comité n'a pas pu mener à bien ses objectifs à cause de problèmes financiers.

Ce qu'on retient de cette initiative, c'est l'originalité et les capacités d'initiative des acteurs locaux. L'émergence successive des difficultés a constitué un premier processus de prise de conscience. Cette prise de conscience s'est traduite par un ensemble d'échanges qui a permis de soumettre l'idée d'un comité à une structure à même de porter la préoccupation à une instance de décision.

2.3.2 Comité Local de l'Eau

Avec l'adoption en 2003 du Plan d'Action pour la Gestion Intégrée des Ressources en Eau (PAGIRE) par le gouvernement burkinabé, prévoyant un nouveau cadre institutionnel, le CGBK est devenu le Comité Local de l'Eau du Kou (CLE).

La principale force du nouveau système de gestion est le fait qu'il s'insère dans le cadre de la politique nationale. Le CLE est une émanation du CGBK, les différents acteurs y prenant part sont de ce fait bien imprégnés de la problématique. Par contre, ils voient aussi à travers le CLE une institutionnalisation de leur comité de gestion. En dépit d'actions propres à chaque groupe d'acteurs la prise de conscience ne donne pas encore lieu à des actions endogènes concertées. Ce qui a pour conséquence un manque d'implication et des faibles capacités participatives des usagers qui adoptent pour le moment un rôle d'observateur.

Cette deuxième période est néanmoins caractérisée par la recherche d'un second souffle. Cette période voit en effet (i) la reprise des activités, (ii) la montée en puissance en son sein de l'action d'organisations de la société civile, et (iii) une tentative de renouer avec la

mobilisation de la première période avec la mise en œuvre de souscriptions destinées au financement de budgets programmes. Malheureusement, suite à la disponibilité réduite de sa présidence et de son secrétariat (assumés par l'administration) le CLE rencontre encore des difficultés à prendre la relève du CGBK.

2.3.3 Les services décentralisés de l'Etat

Dans le bassin du Kou, l'action des directions provinciales en charge de l'agriculture, de l'hydraulique, des ressources halieutiques, de l'élevage et de l'environnement s'affaiblit d'année en année sous le coup de la réduction drastique des crédits de fonctionnement et des ressources humaines affectées.

Vu les réformes économiques en cours et les besoins d'assainissement du cadre macro-économique du Burkina il est peu probable que cette tendance soit inversée dans les 5 à 10 prochaines années. Dans ces conditions, seule la mise en œuvre de projets sous l'impulsion de l'aide publique au développement s'avère la principale modalité d'intervention publique. En général, ces interventions sont orientées vers la mise au point d'innovations techniques, institutionnelles, économiques, politiques et sociales et sont engagées selon des modalités qui permettront l'atteinte de résultats significatifs et bénéfiques.

Cependant, ces interventions, engagées selon le 'mode d'action projet', restent confrontées aux problématiques (i) de la coordination et intégration des actions, (ii) de la durabilité et de la réplification. En effet, à la fin des projets, les administrations retombent dans un dénuement tel qu'il leur est impossible de prendre la relève et de poursuivre les dynamiques amorcées.

2.3.4 Complémentarité de la société civile

Comme le souligne le Guide relatif à la mise en œuvre de CLE préparé par l'Administration (MAHRH, 2004) : 'Les CLE (en tant que maillon de base du cadre de gestion intégrée des ressources en eau) devront permettre en substance, d'organiser une montée en puissance de l'action publique locale et de l'action citoyenne ; de s'appuyer mieux et plus que par le passé, dans la mise en place et le suivi des politiques de l'eau, sur l'expérience, l'expertise, la volonté et la capacité d'innovation des collectivités locales, de la société civile et du secteur privé'.

Cette réflexion vient pour ainsi dire en écho au rôle joué par l'Association Eau Développement et Environnement (AEDE). L'AEDE s'est engagée à la mise en chantier d'une innovation institutionnelle majeure : un Observatoire de l'Eau (OE) ayant pour vocation : d'appuyer les pouvoirs publics dans le développement et la conduite relatifs à la connaissance, la gestion, la valorisation et la protection des ressources en eau dans l'Ouest du Burkina Faso.

L'Observatoire de l'Eau est une réponse à une demande spécifique en connaissances scientifiques et techniques des acteurs économiques au niveau local. A ce titre, il se donne pour objectifs sur son territoire d'action : (i) de disposer en permanence d'une vision renouvelée de l'état de connaissance, gestion et protection des ressources en eau ; (ii) de développer des capacités scientifiques, techniques et financières d'incitation, d'animation et de catalyse du renforcement des connaissances, des capacités de gestion et de protection des

ressources en eau, et (iii) d'initier des formations à l'intention des acteurs intervenant dans le domaine de l'eau et de l'environnement.

L'OE accompagne le renforcement du Comité Local de l'Eau dans le développement d'une capacité de régulation publique et collective de l'eau. Les connaissances qui sont en train d'être acquises et les outils en train d'être développés offrent une réelle opportunité pour une impulsion particulière dans l'action du Comité Local de l'Eau grâce à l'action spécifique de cette institution nouvelle en gestation.

2.4 Systèmes de gestion des ressources en eau

Si les innovations institutionnelles mises en œuvre pour assurer une meilleure gestion des ressources en eau dans le bassin du Kou sont nombreuses et originales, elles se font également accompagner par des travaux de recherche-développement orientés par les acteurs locaux. A ce but deux projets, profitant d'un financement de la Région Wallonne ont été mis en place : 'GEeau' pour la gestion de l'eau pour l'agriculture et 'ESO' pour le suivi et la quantification des eaux souterraines dans la région.

Ces travaux destinés à fournir aux gestionnaires des ressources les outils scientifiques qui permettront une exploitation durable de celles-ci, portent sur deux grandes thématiques : (i) l'état des lieux des ressources disponibles et (ii) le suivi-évaluation de la protection et de l'utilisation de ces ressources.

2.4.1 Suivi des ressources en eau

Une GIRE efficace repose sur une bonne connaissance des ressources en eau de surface ainsi que souterraines. Malheureusement, ce bassin est marqué par l'absence de certaines données pourtant indispensables.

Des efforts ont dès lors été consentis pour améliorer cette connaissance dans le bassin du Kou, depuis l'acquisition des données relatives à l'état des ressources en eau jusqu'à l'exploitation de ces données pour estimer les réserves disponibles, prévoir leur évolution à long terme et contribuer à la préservation de leur qualité. Ce sont d'importants moyens humains et techniques qui ont été mis en œuvre.

2.4.1.1 Réseau de suivi des ressources en eau

Afin de palier à la carence en données relatives aux ressources en eau, le réseau de point de suivi des eaux de surface et souterraines, tombés en désuétude faute de moyens financiers est en cours de réhabilitation (Carte 2.2).

Les activités portent sur le suivi des débits des cours d'eau et des sources du bassin, les niveaux d'eau des aquifères, la qualité des eaux de surface et souterraines, et est complété par l'acquisition de données produites par d'autres services (notamment la Direction de la Météorologie).

Ce suivi a permis de montrer la situation critique dans laquelle se trouvent les ressources en eau du bassin du Kou : diminution du débit de base des cours d'eau et des sources, chute des niveaux piézométriques,... pouvant s'expliquer notamment par une dégradation des facteurs

climatiques mais aussi (et surtout) par une exploitation de plus en plus intensive de celles-ci. Ainsi, le débit de base du Kou, enregistré en amont de la prise d'eau de Diaradougou (voir carte 2.1) a connu au cours de ces 40 dernières années une diminution qui atteint presque les 30%.

De plus, ce suivi réalisé de façon continue permet de mieux appréhender le comportement du système « Bassin du Kou » durant une année hydrologique.

2.4.1.2 Etat des lieux des ressources disponibles

L'étude du bassin du Kou est rendue compliquée par la présence de nombreux processus hydrologiques et l'absence de certaines données indispensables. Un certain nombre de travaux de modélisation ont dû être consacrés aux différentes parties du cycle hydrologique dans le bassin du Kou.

Les eaux qui alimentent la rivière Kou en contre-saison sont vraisemblablement issues des précipitations mais ont transité pendant un temps plus ou moins long par les aquifères de la région. Actuellement le parcours de ces eaux est encore très mal connu.

Des travaux ont été menés pour modéliser les ressources en eaux souterraines de la zone (Sauret, 2008). Ces premiers travaux, conduits à l'aide du logiciel GMS (Groundwater Modeling System), ont montré que les failles géologiques semblent jouer un rôle considérable dans la réalimentation des eaux souterraines à partir des eaux de surface : en hivernage, les failles qui recoupent le réseau hydrographique (le Kou notamment) constituent des chemins préférentiels pour l'infiltration d'importants volumes d'eau de ruissellement. Une fois que ces eaux ont atteint les aquifères, ces failles jouent encore un rôle essentiel dans leur acheminement en direction des sources, principalement des sources de Nasso et de la Guinguette qui alimentent le Kou.

Ces travaux ont également montré qu'une bonne conduite des études hydrogéologiques futures passera inévitablement par une meilleure compréhension de ces processus de réalimentation des aquifères par les précipitations.

Ainsi, la réalisation du bilan d'eau de surface a nécessité l'utilisation du modèle hydrologique HYSIM (Manley, 2003). La mise en œuvre de ce modèle a donné des résultats acceptables et sûrement intéressants ; pour un apport d'eau annuel donné, à l'exutoire 57% proviennent de la pluie et 43% de la nappe, à travers le bassin 77% sont perdus par évapotranspiration, 13% participent au ruissellement et 10% s'infiltrent (Wellens *et al.*, 2009).

Le modèle a montré l'importance de l'évapotranspiration dans le bilan et a contrario, la faiblesse de l'infiltration. Cette situation traduit une surexploitation probable des ressources en eau du bassin versant du Kou puisque l'importante évapotranspiration résulte en partie de l'importante consommation de ces eaux en agriculture irriguée. Cette situation paraît problématique pour le futur, mais grâce à cette étude, les décideurs disposent maintenant d'un état des lieux pour gérer cette situation.

2.4.2 Suivi-évaluation de la protection et de l'utilisation

2.4.2.1 Préservation de la qualité des ressources

Le bassin du Kou contient un grand nombre d'activités susceptibles de dégrader la qualité des ressources en eaux souterraines qu'il abrite : présence du deuxième centre urbain du pays, centre industriel, importantes activités agricoles. Or, la répartition de ces activités critiques sur le territoire s'est faite, faute d'outils techniques adaptés, sans tenir compte des facteurs environnementaux et notamment des ressources en eau.

Pour répondre à ce besoin, une carte de vulnérabilité (Carte 2.3) a été élaborée pour le bassin du Kou (Bieupoudé, 2008). Etant donné la grande variabilité des contextes physiques et environnementaux qui abritent les aquifères, ceux-ci ne seront pas affectés partout de la même façon par une pollution se produisant en surface. Une carte de vulnérabilité cartographie cette variabilité spatiale de la sensibilité des aquifères. La carte élaborée pour le bassin du Kou repose sur une des rares méthodes physiquement basées, la méthode APSU (Brouyère, 2001 ; Popescu et Dachy, 2004). En faisant intervenir la géologie, l'hydrogéologie, le type de sol, l'occupation des terres, ... elle renseigne le gestionnaire du territoire sur le temps que mettrait un polluant pour atteindre l'aquifère et, une fois qu'il a atteint l'aquifère le temps qu'il va y résider.

Cette carte montre que dans le bassin du Kou, c'est principalement le long de la rivière Kou, malheureusement là où sont implantées la plus grande partie des activités agricoles, que les eaux souterraines sont les plus vulnérables. Cela s'explique par la faible profondeur des niveaux dans ces zones.

En collaboration avec la direction régionale en charge de l'hydraulique et de l'agriculture, et la commune de Bobo-Dioulasso, la carte de vulnérabilité est présentée aux différents maires de la région comme un outil d'aide à la gestion.

2.4.2.2 Suivi des activités hydro-agricoles

Une intensification 'anarchique' de l'usage de l'eau pour l'agriculture et de l'occupation agricole des terres est visible depuis quelques décennies, les premiers rapports à ce sujet datent de 1988 (IWACO/BERA). Une mise à jour de cet état des lieux a confirmé l'aggravation de cette tendance (Wellens *et al.*, 2009).

Ceci a conduit l'OE à rechercher des outils de contrôle et de suivi pour les gestionnaires du bassin. Il a également été souhaité que la procédure soit réalisée à moindre coût avec les moyens techniques et financiers localement disponibles.

Parmi ces outils de suivi, le plus connu est celui du recensement. Au mois de Mai 2007, durant plus de 2 semaines, 18 encadreurs ont sillonné les différentes zones agricoles avec des questionnaires, résultant en 1.148 unités et groupements agricoles recensés. Les résultats ont été insérés dans une base de données spatialisée et analysée. Les résultats de cette étude sont disponibles dans Wellens *et al.* (2009).

A titre d'exemple, la Carte 2.4 présente les proportions de l'occupation des cultures principales pour les différentes zones agricoles. L'interprétation visuelle confirme l'importance de ces 5 zones concurrentielles en eau dans le bassin du Kou, ainsi que l'omniprésence des cultures fruitières.

L'étude répond directement à une des activités stipulées dans le programme des actions 2006-2008 du Comité Local de l'Eau du Kou (CLE-Kou) : « Réduire les conflits dans l'utilisation de l'eau ». Avant de pouvoir attaquer cette problématique, l'élaboration d'un état des lieux (i) des ressources en eau et (ii) de ses utilisateurs s'impose. Le recensement exhaustif des utilisateurs agricoles répond au second point.

Les résultats ont été restitués et discutés lors d'une session spéciale du CLE et à la session portant sur le thème de la 'Gestion concertée des berges du Kou et de ses affluents'.

Enfin, l'étude a clairement montré que les ressources scientifiques et techniques sont disponibles. Quant aux ressources financières, elles peuvent entrer dans le budget du CLE. Les ressources humaines ont été formées dans le cadre dudit recensement et il suffit de les mobiliser à chaque fois que besoin se fera sentir.

2.4.2.3 Outil de gestion des périmètres irrigués

Autre aspect important pour une GIRE efficace, c'est que les gestionnaires des ressources en eau disposent d'outils permettant de les répartir équitablement entre les différents usagers et de conseiller ces usagers pour qu'ils utilisent rationnellement et avec parcimonie l'eau mise à leur disposition.

Conformément à sa vocation, l'AEDE a mis en place depuis quelques années au profit des irrigants et des organisations professionnelles d'irrigants du périmètre irrigué de la Vallée du Kou un conseiller en irrigation. Il s'agit, en relation avec l'Union des Coopératives Rizicoles de Bama (UCRB), d'une action d'immersion profonde dans le milieu afin d'améliorer la communication avec les producteurs et de réunir les conditions pour la création et le fonctionnement d'une structure professionnelle privée de gestion des aménagements hydro-agricoles dans le bassin.

Une démobilité s'est fait sentir au niveau de beaucoup de responsables de la gestion de l'eau sur le périmètre tel point que leur tâche ne se résumait qu'à la fermeture et à l'ouverture des vannes. Les informations recueillies auprès des différents responsables ont démontré la nécessité d'un changement radical à partir d'une intervention extérieure et indépendante dans la gestion du périmètre irrigué de la Vallée du Kou.

A la suite de cela et avec l'appui de l'UCRB, l'AEDE a mis en œuvre une brigade de gestion de l'eau chargée d'une part de la surveillance des prélèvements d'eau sur le canal d'amenée et d'autre part d'organiser et de veiller à l'application du tour d'eau sur le périmètre rizicole. Cette activité est particulièrement renforcée par la mise en place du logiciel SIMIS (Mateos *et al.*, 2002), outil de gestion des périmètres irrigués, par l'Observatoire de l'Eau, permettant d'identifier des mesures prioritaires de gestion à l'appui de la brigade de gestion de l'eau.

Outre des modules de bases de données (climatiques, de sol, d'occupations de sol, d'architecture hydraulique (tirée d'un SIG),...), le logiciel SIMIS contient des modules pour :

(i) l'élaboration des plans d'irrigation :

Par zone agricole, l'occupation des parcelles, le calendrier agricole ainsi que les débits disponibles sont définis par l'utilisateur. Le module permet de comparer les exigences en irrigation, les débits requis et les débits disponibles.

(ii) l'élaboration des programmes d'irrigation :

A partir de l'architecture du périmètre irrigué, de l'occupation des parcelles, des calendriers culturels, les débits disponibles en têtes des canaux des calendriers de distribution d'eau sont calculés.

Une restitution de l'étude (Wellens et Nitcheu, 2008) a été faite auprès des responsables de l'UCRB et de l'administration concernée. Les acteurs se sont réjouis de l'initiative et ont demandé de partager ces observations et résultats aux différentes coopératives afin de mieux garantir sa mise en place effective.

Les premières années d'activités confirment la pertinence de la stratégie d'immersion pour insuffler des changements importants devant être opérés pour une amélioration significative des pratiques hydro-agricoles. Grâce au suivi hydraulique et à la mise au point d'outils de gestion spécifiques, des éléments d'une connaissance plus concrète et réaliste de la situation ont pu être fournis ; ce qui permet de nourrir un dialogue plus incisif avec les coopératives et les producteurs, et d'introduire progressivement des pratiques plus adaptées.

2.5 Conclusion

Des innovations institutionnelles sont autant de sources de développement que les innovations techniques. L'expérience de l'Observatoire de l'Eau témoigne que de nouvelles articulations des responsabilités en matière de recherche-développement dans le domaine de l'eau entre l'Etat, les collectivités locales, la société civile, le secteur privé sont nécessaires et possibles.

Elle permet en particulier, de souligner et d'accompagner les capacités d'initiative et d'action de la société civile professionnelle du domaine de l'eau dans l'impulsion de nouvelles formules d'action en matière de recherche-développement adaptée à la demande spécifique en connaissances scientifiques et techniques au niveau local.



- Recensement hydro-agricole -

3

Recensement exhaustif des activités hydro-agricoles du Bassin du Kou³

En Mai 2007, un recensement hydro-agricole du bassin du Kou a été organisé par le projet et l'AEDE, et effectué par les agents de la Direction Provinciale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques. Les compétences en appui-conseil sur le terrain de la DPAHRH-Houet ainsi que la confiance dont profitent ses encadreurs dans le milieu agricole étaient indispensables pour le bon déroulement des enquêtes. L'AEDE et le projet ont assumé les besoins en formation et en matériel au niveau de la DPAHRH. Le traitement des enquêtes a été fait par le projet, les résultats et la base de données résultante ont été restitués au niveau de l'administration.

Pour les différentes zones agricoles du bassin du Kou, les données suivantes ont été recensées par exploitant : données d'identification & coordonnées (GPS) ; données de cultures : superficie, calendrier, ... ; points d'exhaure : prise en rivière, puisard, ... ; caractéristiques du moyen d'exhaure ; calendrier d'irrigation ; caractéristiques du puisard & coordonnées GPS. Plus de 1.200 exploitants et groupements ont été identifiés dans les 11 différentes zones agricoles. Une base de données a été élaborée à partir de ces enquêtes. Les cartes suivantes ont été établies : occupations agricoles du bassin du Kou ; utilisation des eaux de surface vs. eaux souterraines ; moyens d'exhaure ; efficacités en irrigation ; positionnement par rapport aux berges.

Les superficies potentielles irrigables sont déjà atteintes dans certaines régions, mais l'expansion est loin d'être freinée. Le grand enjeu pour le développement de l'irrigation se situe dans la gestion de la ressource en eau. La sensibilisation des agriculteurs sur les bonnes pratiques de l'irrigation permettrait de limiter les pertes lors de l'application de l'eau sur les parcelles et de réduire les inégalités d'accès à la ressource qui existent entre les utilisateurs situés en amont et en aval du cours d'eau.

3.1 Introduction

Face à une intensification anarchique de l'agriculture irriguée et des pénuries chroniques en eau pour cette agriculture, il s'est avéré indispensable de mettre à jour l'état des lieux des activités hydro-agricoles dans le bassin du Kou afin de pouvoir élaborer un schéma d'aménagement le plus réaliste possible. S'appuyant sur les expertises en appui-conseil sur le terrain des agents de la Direction Provinciale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques de la province Houet (DPAHRH-Houet), un recensement exhaustif des pratiques hydro-agricoles a pu être effectué.

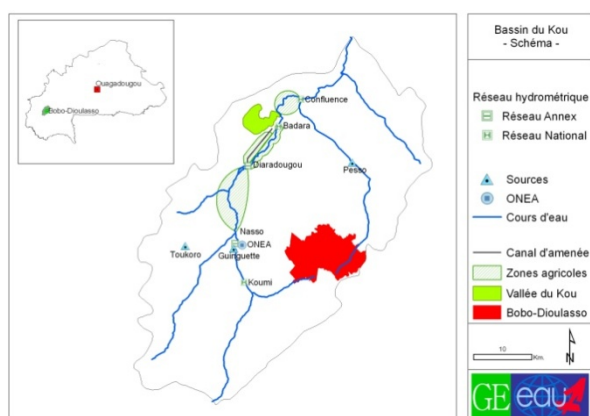
³ Avec la contribution de J. Wellens (APEFE), I. Sawadogo (DPAHRH-Houet), M. Diallo (AEDE), D. Dakouré (OE), N.F. Compaoré (VREO), F. Traoré & B. Tychon (ULg).

Au mois de Mai 2007, durant plus de 2 semaines, 18 encadreurs de la DPAHRH-Houet ont sillonné les différentes zones agricoles avec des questionnaires, résultant en 1.148 unités et groupements agricoles recensés. Les enquêtes ont été insérées dans une base de données spatialisées et analysées. La présente étude donne les résultats de ce diagnostic hydro-agricole du bassin du Kou.

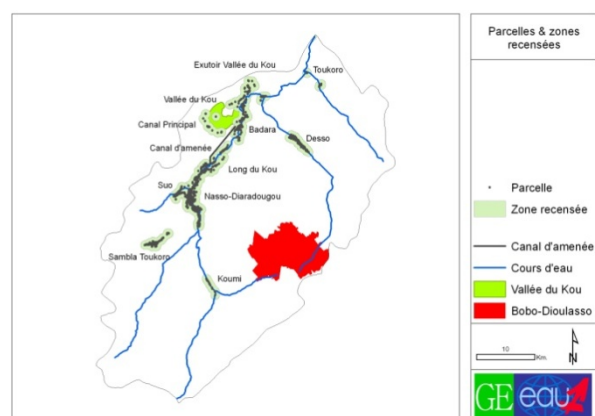
La collecte des données a été effectuée à travers les interviews des utilisateurs sur la base des questionnaires d'enquête et n'a pas comporté de mesures quantitatives de données physiques. Cette situation n'a cependant aucune incidence majeure sur la validité des grandes conclusions de l'étude.

3.2 Zone d'étude & données recensées

Les zones recensées dépassent les régions de fortes concurrences en eau sur lesquelles le projet s'est concentré depuis son installation. Elles englobent la totalité du bassin du Kou. Afin de permettre une comparaison avec des études antérieures et similaires (Projet Vallée du Kou, 1988 et Projet Sensibilisation et Formation des Paysans autour des Barrages, 1989), les cartes 3.1 & 3.2 montrent ces différentes zones concurrentielles ainsi que les positionnements des parcelles recensées et leurs zones d'appartenance.



Carte 3.1 – Zones agricoles en concurrence pour la même ressource eau.



Carte 3.2 – Parcelles recensées et leurs zones.

Les zones entre 'Nasso et Diaradougou', 'Diaradougou et Badara', 'le canal d'aménage', 'le périmètre rizicole de la Vallée du Kou', et 'Badara et la Confluence' dépendent toutes du débit d'étiage du Kou, ce qui explique leur situation concurrentielle et conflictuelle (Wellens *et al.*, 2007). Les régions de Toukoro, Sambla-Toukoro et Desso sont alimentées par leurs propres sources, qu'ils exploitent complètement. Aucune contribution au cours d'eau du Kou n'existe en saison sèche. La plaine de Suo est caractérisée par une mare temporaire, l'eau provient des débordements du Kou durant l'hivernage. En saison sèche par contre, cette mare est coupée de sa source d'alimentation.

Comme il s'agit d'un recensement exhaustif, visant la quasi-totalité des unités agricoles du bassin, le questionnaire est resté succinct et en même temps aussi complet que possible (voir Annexe A). Les données recensées par parcelle contenaient : les données d'identification et coordonnées GPS, les données de cultures, les points d'exhaure, les caractéristiques des moyens d'exhaure, le calendrier d'irrigation et les caractéristiques des éventuels puisards. Ces données ont permis d'étudier :

- les superficies des occupations agricoles des différentes zones par culture ;
- l'utilisation des eaux de surface vs. eaux souterraines pour l'irrigation ;
- les superficies par moyen d'exhaures pour les différentes zones ;
- les efficacités des apports en eau ;
- l'intensité des irrigations par rapport aux moyens d'exhaure ;
- l'évolution dans le temps de l'occupation ;
- le positionnement des parcelles par rapport aux berges.

3.3 Résultats

3.3.1 Occupation des cultures principales

La carte 3.3 présente les proportions de l'occupation des cultures principales pour les différentes zones agricoles. L'interprétation visuelle confirme l'importance de ces 5 zones concurrentielles en eau dans le bassin du Kou, ainsi que l'omniprésence des cultures fruitières pour l'ensemble du bassin du Kou. Le tableau 3.1 donne les superficies des cultures principales en hectares. En contre-saison 2007, 2.371 ha étaient irrigués dans l'ensemble du bassin.

Tableau 3.1 – Superficies des occupations recensées [ha].

	Badara	Canal d'Amenée	Canal Principal	Desso	Diaradougou - Badara	Drain VdK	Koumi	Nasso - Diaradougou	Sambla Toukoro	Suo	Toukoro	Vallée du Kou	Total
Maraîchage	9,5	50,3		16,8	4,4	11,0	9,0	36,2	45,9	21,4	0,5	179,0	415
Maïs	45,5	11,0		29,0	16,8	7,9		279,9	2,3	12,7		196,0	606
Banane	13,8	77,0	35,8	89,9	42,0	36,3	0,01	144,8	2,9	3,4	10,0		456
Papaye	3,8	83,3	0,5		16,0	1,0		10,5	0,5	0,3			116
Riz		15,0			3,0							760,0	778
Superficie totale	72,5	236,5	36,3	135,6	82,1	56,1	9,0	471,4	51,5	37,8	10,5	1135,0	2371

3.3.2 Evolution des occupations

Un inventaire des parcelles en irrigation a été effectué par les enquêteurs du Ministère de la Question Paysanne en 1987. A partir des photographies aériennes à l'échelle de 1/5.000 prises par l'IGB, une superficie sous irrigation de 170 ha, dont 13 ha occupés par des bananeraies, a été révélée en amont de la prise d'eau de Diaradougou (IWACO-BERA, 1988). La superficie potentielle irrigable de la plaine alluviale était de l'ordre de 500 ha, selon la même étude.

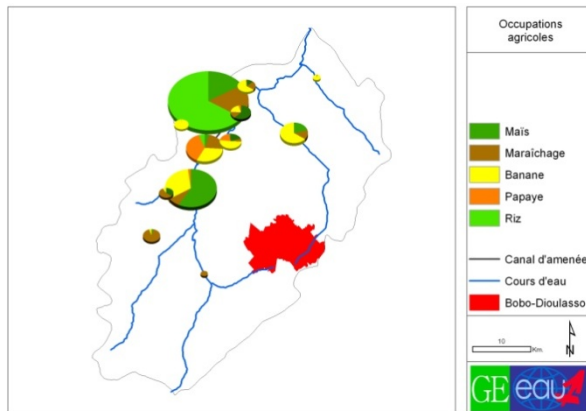
La présente étude relève pour la même zone une occupation de 509,2 ha (Nasso-Diaradougou : 471,4 ha ; et Suo : 37,8 ha), avec 159 ha occupés par des bananeraies et papayers. Cette expansion dépasse le scénario le plus alarmant de l'étude d'IWACO-BERA avec une superficie potentielle irrigable complètement saturée.

Les superficies occupées au bord du canal, entre la prise à Diaradougou et la station dite 'porcherie' située juste à l'entrée du périmètre rizicole, ont été inventoriées en 1989 à 61,6 ha ; dont 35,2 ha pour le groupement ORD, 24,5 ha pour l'IRFA et seulement 1,9 ha (!) pour des producteurs individuels (Direction de l'Organisation de la Migration Paysanne, 1989). Seulement les 24,5 ha de l'IRFA étaient occupés par des bananeraies. En 1997, la superficie des cultures le long du canal était déjà à 200 ha (IWACO/BURGEAP, 1998).

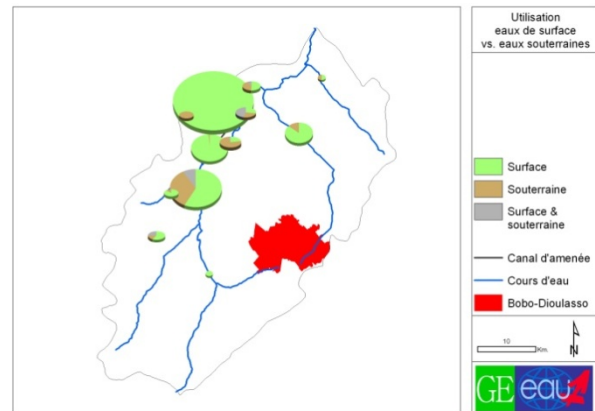
Les occupations dans cette zone ont presque quadruplé entre 1989 et 2007 : de 61,6 ha à un état actuel de 236,5 ha. Les superficies des cultures fruitières, grandes consommatrices en eau,

ont été multipliées par 6 afin d'arriver à une occupation actuelle de 160,3 ha par rapport à 24,5 en 1989. L'impact sur les eaux disponibles pour le périmètre rizicole de la Vallée du Kou est majeur et a plongé le périmètre dans des situations de pénurie en eau (Wellens *et al.*, 2007).

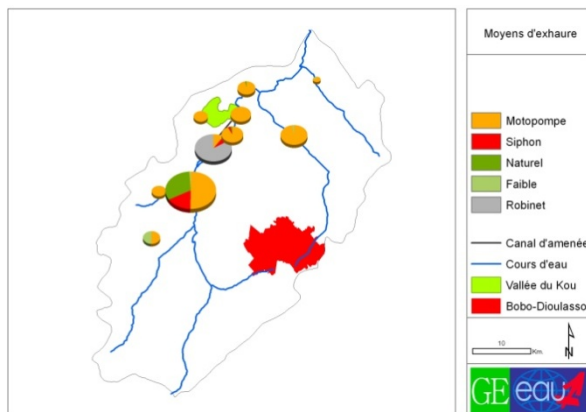
Le même inventaire exhaustif de 1989 a dénombré 126 ha de superficies irriguées le long de la rivière Kou, entre la prise à Diaradougou et le canal émissaire du périmètre rizicole de Bama. Le canal émissaire même alimentait 24,6 ha en eau pour l'irrigation. Ces deux zones sont plutôt restées stagnantes durant le temps à cause de la faible disponibilité en eau.



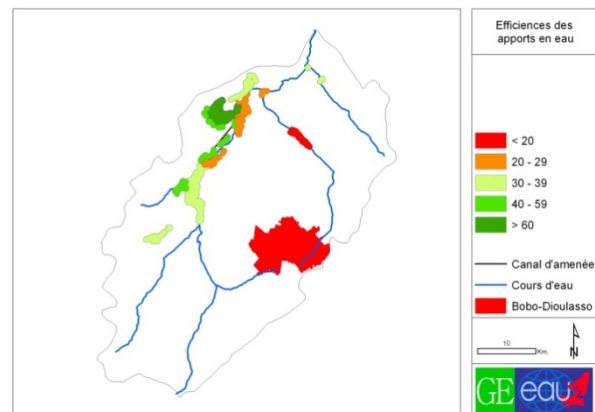
Carte 3.3 – Occupations par groupe de culture (proportions).



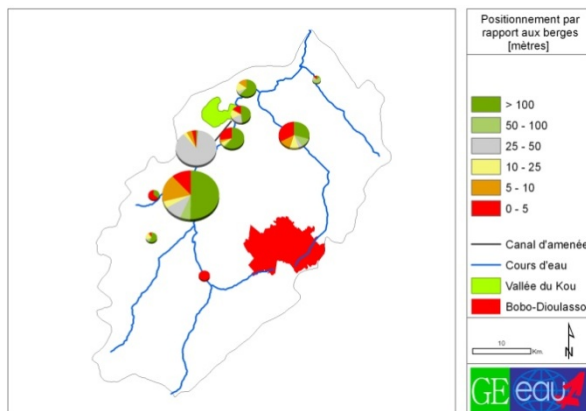
Carte 3.4 – Utilisation des eaux de surface vs. eaux souterraines (proportions).



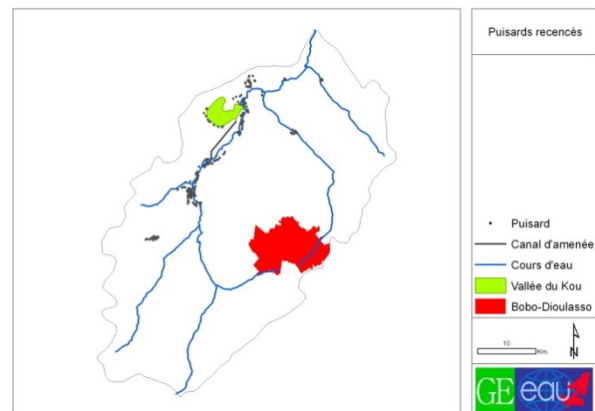
Carte 3.5 – Moyens d'exhaure (proportions).



Carte 3.6 – Efficacités des apports en eau.



Carte 3.7 – Positionnement des parcelles par rapport aux berges.



Carte 3.8 – Puits recensés.

3.3.3 Eaux de surface vs. eaux souterraines

Le bassin du Kou est constitué de plusieurs aquifères très productifs, dont certains ont des faibles profondeurs. Il s'agit surtout des nappes des plaines alluviales. Depuis quelques années on constate une expansion dans la création des puisards (441 recensés, tableau 3.2), un phénomène jamais présenté dans les inventaires précédents. La carte 3.4 & le tableau 3.3 montrent que de plus en plus d'agriculteurs font recours aux sources souterraines pour les eaux d'irrigation. La taille des puisards et la vitesse de remplissage (débit) varient fort entre les différentes régions (tableau 3). Quant à la taille, elle est dictée par la profondeur de la nappe ; quant aux différentes vitesses de remplissage rien ne peut être conclu actuellement.

Tableau 3.2 – Caractéristiques physiques des puisards.

	Badara	Canal d'Amenée	Canal Principal	Desso	Diaradougou - Badara	Drain VdK	Koumi	Nasso - Diaradougou	Sambla Toukoro	Suo	Toukoro	Vallée du Kou	Total
Nombre	35	5	13	16	42	131	-	98	51	7	13	-	441
Volume [m³]	32	18	24	60	45	11	-	28	9	18	19	-	
Débit [l/s]	8,0	29,5	-	13,6	6,3	4,8	-	6,4	0,2	2,1	13,1	-	

Tableau 3.3 – Utilisation des eaux de surface vs. eaux souterraines pour l'irrigation [ha].

	Badara	Canal d'Amenée	Canal Principal	Desso	Diaradougou - Badara	Drain VdK	Koumi	Nasso - Diaradougou	Sambla Toukoro	Suo	Toukoro	Vallée du Kou	Total
Surface	19,8	232,2	0,0	114,9	18,6	29,0	9,0	276,9	31,4	32,0	5,5	1135	1911
Souterraine	20,5	3,3	36,3	20,8	59,8	21,1	0,0	147,5	7,1	5,2	5,0		353
Combinaison	32,3	1,1	0,0	0,0	3,8	6,0	0,0	47,0	13,0	0,5	0,0		107

Etant donné le débit sanitaire modéré du Kou (Wellens *et al.*, 2007), cette approche peut constituer une bonne alternative. Des études supplémentaires sur cette réserve en eau souterraine ainsi que son impact sur le Kou s'imposent (Gardin *et al.*, 2008 ; Sauret, à paraître), surtout vu l'ampleur que cette nouvelle technique est en train de prendre.

3.3.4 Moyens d'exhaure

IWACO-BERA a mentionné en 1988 l'arrivée d'un nouveau système d'irrigation : 'des motopompes afin d'exploiter les parties élevées au bord des cours d'eau'. On constate que certaines régions dépendent complètement de l'irrigation par motopompe ou la présence est au moins très significative (carte 3.5 & tableau 3.4). Cette flambée est liée pour une grande partie à l'arrivée des motopompes à bas prix.

Tableau 3.4 – Superficies par moyen d'exhaure [ha].

	Badara	Canal d'Amenée	Canal Principal	Desso	Diaradougou - Badara	Drain VdK	Koumi	Nasso - Diaradougou	Sambla Toukoro	Suo	Toukoro	Vallée du Kou	Total
Faible débit	0,0	0,5	0,0	4,0	0,3	0,0	-	5,7	25,3	0,7	1,8		45
Naturel	0,0	0,0	0,0	0,0	3,0	2,3	-	138,1	0,0	0,0	0,0	1135	1278
Motopompe	72,5	25,5	35,3	121,9	73,8	53,4	-	227,9	26,8	36,2	8,8		711
Robinet	0,0	195,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0		195
Siphon	0,0	15,5	0,0	0,0	4,0	0,0	-	79,1	0,0	0,0	0,0		99

Par ‘robinet’ est indiquée la zone maraîchère et aménagée de l’ORD au bord du canal d’amenée. Les ‘faibles débits’ regroupent les pompes à pédales et les arroseurs, fréquents dans les zones avec une nappe peu profonde pour l’irrigation des légumes (Toukoro et Sambla-Toukoro).

3.3.5 Efficiences des apports en eau

Des volumes en eau apportés ont pu être calculés à partir des calendriers d’irrigation et les caractéristiques physiques des moyens d’exhaure. Pour le cas des motopompes les débits ont été estimés à partir de la puissance et la marque des appareils. Le débit provenant des siphons a été calculé à partir de la formule suivante (Horton and Jobling, 1984), dont toutes les données d’entrée ont été recensées :

$$Q = 10^{-5} \sqrt{\frac{1,24gHD^5}{0,00015D + \frac{124\eta^2L}{D^{\frac{1}{3}}}}}$$

Avec :

- Q = Débit [l/s] ;
- G = Accélération gravitaire (9,8 m/s²) ;
- H = Charge hydraulique [m] ;
- D = Diamètre interne [mm] ;
- η = Coefficient de rugosité de Manning ;
- L = Longueur [m].

Les besoins en eau des cultures ont été obtenus selon Allen *et al.* (1998) en utilisant les valeurs d’évapotranspiration de référence mesurée à la station météorologique de Bama (située en pleine zone agricole).

L’efficience d’un apport en eau est exprimée comme le rapport entre le volume requis et le volume livré. Quand l’efficience avoisine l’unité, la livraison du volume d’eau est sans perte au niveau de la parcelle et est considérée comme efficiente. Par contre, si le programme d’irrigation est jugé efficient à l’aide de cet indicateur, on n’a aucune information sur une éventuelle sous-livraison. Un apport en eau insuffisant par rapport au besoin de la culture est alors aussi tenu comme efficient.

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 adéquate.

Tableau 3.5 – Efficiences et adéquations des apports en eau [%].

	Badara	Canal d'Amenée	Canal Principal	Desso	Diaradougou - Badara	Drain VdK	Koumi	Nasso - Diaradougou	Sambla - Toukoro	Suo	Toukoro	Vallée du Kou	Moy.
Efficience	27	45	46	20	29	38	-	30	33	40	36	90	32
Adéquation	99	97	99	99	99	97	-	99	99	99	100	46	99

Les efficacités et adéquations des différentes régions sont affichées sur la carte 3.6 et dans le tableau 3.5, les valeurs pour le périmètre de la Vallée du Kou viennent de Wellens *et al.*

(2007). Basés sur la taille des exploitations, les types d'irrigation et le développement économique de la région, des efficacités de 60 % peuvent être atteintes (Bos and Nugteren, 1978). On constate par contre partout des très faibles efficacités en irrigation, indiquant des grandes pertes en eau. Sauf pour le cas de la Vallée du Kou où les efficacités sont relativement bonnes dues aux pénuries d'eau chroniques (adéquation basse de 46%).

3.3.6 Intensité des irrigations par rapport au moyen d'exhaure

L'idée persiste que l'arrivée des motopompes a aggravé la situation des pénuries en eau par une forte intensification d'un usage peu efficace de l'eau. La notion de la bonne dose d'eau a disparu avec l'arrivée d'un outil d'exhaure si facile.

Comme aucune mesure physique n'a été effectuée lors du recensement, il est risqué d'estimer des débits pour les moyens d'exhaure peu connus : pompe à pédale, arrosoir et gravitaire. Par contre, le rapport superficie cultivée et durée d'irrigation peut permettre de comparer de manière brute les efficacités d'application de ces différents moyens d'exhaure (tableau 3.6).

Le tableau 3.6 contient également les efficacités pour des irrigations à l'aide des motopompes et siphons. Cette nette différence confirme le manque d'efficacité dans l'utilisation des motopompes ; avec leurs 33 % d'efficacité, ils sont à la moitié des efficacités souhaitables spécifiées ci-dessus. Plus frappante, est la similitude des intensités d'irrigation à partir d'une pompe à pédale et d'une motopompe, le premier ayant un débit beaucoup plus faible que le dernier.

Ces comparaisons témoignent que l'arrivée des nouvelles techniques d'irrigation n'a pas été bien accompagnée par de l'appui-conseil, résultant dans des grandes pertes en eau.

Tableau 3.6 – Intensité d'irrigations vs. moyen d'exhaure.

Moyen	Superficie moy. [ha]	Heures / Jour	Jours / Semaine	Heures / semaine / Superficie [ha]	Efficacité [%]
Pédale	0,3	3,5	1,3	14,8	-
Arrosoir	0,4	5,3	4,2	47,1	-
Gravitaire	2,0	6,9	1,7	5,2	-
Motopompe	0,9	8,4	1,9	16,9	33
Siphons	2,2	6,6	1,8	5,3	45

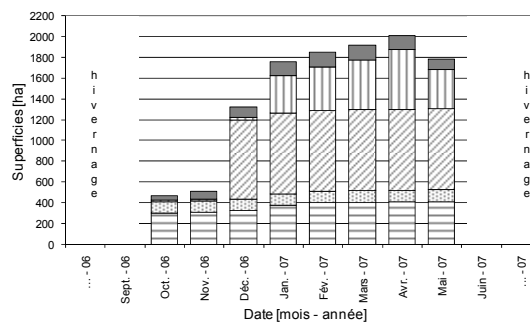


Figure 3.1 - Evolution de l'occupation des parcelles agricoles recensées.

(Banane, Papaye, Riz, Maïs et Maraîcher)

3.3.7 Calendriers culturaux

Les calendriers culturaux pour l'ensemble des cultures recensées sont affichés dans la figure 3.1. La plus grande variation est provoquée par la plantation du riz, à partir de décembre, et du maïs, à partir de janvier. La variation dans l'occupation des cultures maraîchères est beaucoup moins forte et mieux étalée dans l'année.

3.3.8 Occupation des berges

La plus grande victime de cette intensification anarchique des parcelles cultivées est la rivière Kou même. La végétation qui la longeait a disparu à bien des endroits pour laisser place à des champs de culture. Les conséquences de toutes ces agressions sont l'ensablement, la pollution de l'eau à cause des pesticides utilisés par les exploitants des champs et l'évaporation de l'eau du fait de l'absence de végétation le long du Kou.

Le tableau 3.7 & la carte 3.7 montrent que la plupart des exploitations agricoles (57,7 %) sont situées entre 0 et 50 mètres du lit. Les normes recommandent une distance de sécurité d'au moins 100 mètres, seulement respectés par 37,2 % des occupants.

Tableau 3.7 – Parcelles [ha] par classe de positionnement en mètres par rapport aux berges.

	Badara	Canal d'Amenée	Canal Principal	Desso	Diaradougou - Badara	Drain VdK	Koumi	Nasso - Diaradougou	Sambla Toukoro	Suo	Toukoro	Vallée du Kou	Total
0 - 5	9	9	-	43	24	0	18	56	1	12	1	-	173
5 - 10	1	11	-	16	3	9	0	75	1	0	1	-	116
10 - 25	8	7	-	14	6	9	0	19	3	0	0	-	66
25 - 50	12	205	-	6	0	3	0	47	1	0	1	-	274
50 -100	0	1	-	15	1	1	0	29	1	0	7	-	55
> 100	27	3	-	39	53	35	0	230	11	6	1	-	405

3.4 Conclusion

L'étude répond directement à une des activités stipulées dans le programme des actions 2006-2008 du Comité Local de l'Eau du Kou (CLE-Kou) : « Réduire les conflits dans l'utilisation de l'eau ». Avant de pouvoir attaquer cette problématique, l'élaboration d'un état des lieux (i) des ressources en eau et (ii) de ses utilisateurs s'impose. Le recensement exhaustif des utilisateurs agricoles a répondu à ce second point.

Les résultats ont été restitués et discutés lors d'une session spéciale du CLE- Kou, le 18 décembre 2007, et à la session du 7 mai 2008, portant sur le thème de la 'Gestion concertée des berges du Kou et de ses affluents'.

Le grand enjeu pour le développement de l'irrigation se situe dans la gestion de la ressource en eau. La sensibilisation des agriculteurs sur les bonnes pratiques de l'irrigation permettrait de limiter les pertes lors de l'application de l'eau sur les parcelles et de réduire les inégalités d'accès à la ressource qui existent entre les utilisateurs situés en amont et en aval du cours d'eau.

Les superficies potentielles irrigables sont déjà atteintes dans certaines régions, mais l'expansion est loin d'être freinée. L'intensification de l'exploitation de la nappe phréatique pour l'irrigation par la diffusion des puisards augmentera l'accès à la ressource, en particulier pour les parcelles situées loin des cours d'eau. Une étude plus approfondie de la localisation et l'épaisseur de la nappe phréatique, afin de localiser de manière raisonnée et non plus au hasard les puisards en fonction de celle-ci, serait une avancée importante.

Il serait intéressant que de tels inventaires, exhaustif ou représentatif, puissent être répétés régulièrement. Un tel suivi permettra une connaissance quasi permanente de l'état des activités hydro-agricoles, grandes consommatrices en eau dans la zone. Il aidera également l'élaboration des scénarii de gestion ou des formations de pointe (ex. gestion de l'eau au



**- Mosaïque de prises
de vue aérienne -**

4

Utilisation des prises de vue aérienne à basse altitude pour le suivi hydro-agricole⁴

A partir de plus de 300 prises de vue aérienne ‘amateurs’ à basse altitude, ayant une résolution de 0,8 m., une image d’occupation détaillée des sols a pu être élaborée. Des logiciels de mosaïquage, de traitement d’images et de SIG ont permis la construction d’une seule image géoréférencée. Les parcelles agricoles irriguées ont ainsi pu être délimitées. Leurs occupations ont été comparées et complétées avec les résultats d’un recensement hydro-agricole exhaustif organisé au même moment.

Cette technique permet un suivi spatial des activités agricoles à moindre coût par rapport à l’acquisition des images satellites à haute résolution. L’approche est également moins sensible aux influences atmosphériques non-prévisibles dans la programmation des images satellites. Elle répond avec une précision largement suffisante aux objectifs de suivi et contrôle des parcelles irriguées demandés par les gestionnaires du bassin.

4.1 Introduction

Le bassin du Kou est l’espace géographique qui contient le système d’eau associé à la rivière Kou à ses affluents et aux sources de Nasso. Il recèle encore de nos jours des ressources agro-écologiques et en eau relativement abondantes. Le bassin du Kou abrite l’agglomération urbaine de Bobo-Dioulasso, seconde ville du Burkina Faso. La population résidente estimée à 600.000 habitants en 2003, franchira en 2025 vraisemblablement le cap de un million (1.000.000) d’habitants dont au moins 750.000 habitants pour la seule ville de Bobo-Dioulasso⁵.

Dans le bassin du Kou, les aménagements hydro-agricoles couvrent une superficie totale estimée à plus de 3.200 ha ; il s’agit pour l’essentiel de périmètres privés formant la ceinture maraîchère et horticole de Bobo-Dioulasso, et du grand périmètre réalisé par l’Etat à Bama spécialisé dans la production du riz. Le développement d’une filière fruits et légumes sous l’impulsion de l’initiative privée est un trait caractéristique de la production irriguée dans le bassin du Kou. Cette production irriguée est à l’origine du développement d’activités économiques dans la ville de Bobo-Dioulasso qui fournit en effet l’essentiel des services de transport, de financement et de commerce des produits agricoles, qui assure également la disponibilité sur les sites des consommations intermédiaires nécessaires aux activités de production, enfin c’est à Bobo-Dioulasso que certains produits agricoles bruts sont transformés pour les besoins de la consommation finale des ménages et pour l’exportation.

⁴ Avec la contribution de J. Wellens (APEFE), M. Diallo (AEDE), D. Dakouré (OE), N.F. Compaoré (VREO), A. Denis & B. Tychon (ULg).

⁵ Avec des taux d’accroissement moyens sur la période de 2,4% en milieu rural et 2,5% pour la ville de Bobo.

Toute l'eau d'irrigation des superficies aménagées est assurée pendant la saison sèche (6 à 7 mois) par le débit de base du Kou et par des nappes alluviales.

Les importantes ressources en eau du bassin, les marchés urbains locaux, sous-régionaux et internationaux offrent donc une réelle opportunité de développement d'une agriculture intensive et commerciale, avec des perspectives d'une forte implication de l'investissement privé dans la production, la commercialisation et la transformation. Comment donner un plus grand épanouissement à une telle dynamique et l'acheminer dans une perspective de développement durable ? Telle est la question fondamentale en matière de connaissance et de gestion de l'eau pour le développement de l'agriculture dans le bassin du Kou.

4.2 Problématique

Le bassin versant du Kou fait l'objet de prélèvements d'eau par divers utilisateurs : périmètre rizicole de la vallée du Kou, périmètres informels, l'ONEA pour l'alimentation en eau de la ville de Bobo-Dioulasso, etc... (Wellens *et al.*, 2005 et 2006) Une intensification 'anarchique' de l'usage de l'eau et de l'occupation agricole des terres est constatée déjà depuis quelques décennies, les premiers rapports alarmants à ce sujet datent de 1988 (IWACO/BERA). Une mise à jour de cet état des lieux, faite dans le cadre d'un recensement hydro-agricole, a confirmé l'aggravation de cette tendance (Wellens *et al.*, 2009).

Ceci conduit les gestionnaires du bassin à rechercher des outils de contrôle et de suivi de cette intensification de l'utilisation de l'eau pour l'agriculture.

Parmi ces outils de suivi, le plus connu est celui du recensement : un inventaire exhaustif ou représentatif effectué sur le terrain. Ces études peuvent être très laborieuses en temps et moyens ; par exemple l'inventaire exhaustif hydro-agricole du bassin du Kou de 2007 (Wellens *et al.*, 2009) a duré 4 mois et coûté 2.000 €.

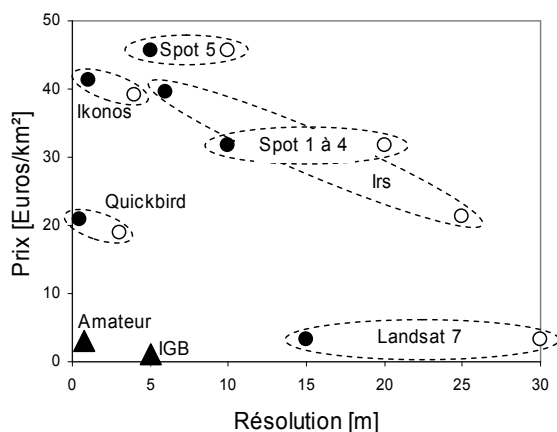


Figure 4.1 – Evolution des coûts des images (multispectrales : O et panchromatiques : ●) en fonction de la résolution spatiale (d'après Puissant, 2003).

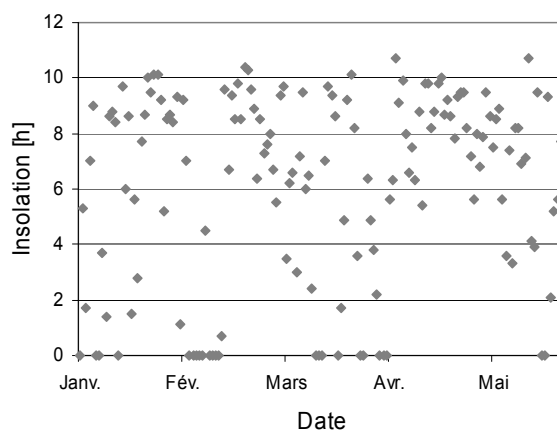


Figure 4.2 – Heures d'insolation journalière en 2007 pour la période de janvier à mai.

Des résultats plus rapides, mais moins détaillés, peuvent être obtenus à l'aide de la télédétection. Au niveau national de bonnes initiatives ont été lancées par la mise en place

d'une base de données d'occupation des terres (IGN-FI, 2005). Mais comme il s'agit d'une base de données nationale faite à partir des images Landsat, la classification ne répond pas tout à fait aux besoins régionaux par manque de détails dans l'image et dans la classification. Des images satellites à haute résolution (Spot5), voire très haute résolution (Quickbird), peuvent être une solution. Mais, comme le démontre la figure 4.1, ces images restent chères et ne sont par conséquent pas à la portée de tous (\pm 8.000 Euro pour une image Spot 5 ou la moitié pour une image Quickbird couvrant la zone d'étude). En plus, des conditions atmosphériques défavorables, difficiles à prévoir et souvent présentes (figure 4.2), comme la présence de nuages et de poussières, peuvent nuire à la qualité des images satellites et réduire considérablement leur utilité.

Pour contourner cette difficulté, il a été tenté de développer une procédure de mosaïquage des prises de vue aérienne 'amateur' afin d'élaborer des cartes d'occupation de sol à moindre coût. A partir de plus de 300 prises de vue aérienne 'amateurs' à basse altitude, ayant une résolution spatiale de 0,8 m, une carte détaillée de l'occupation de sol a pu être élaborée. Des logiciels de mosaïquage, de traitement d'images et de SIG ont permis la construction d'une image géoréférencée unique.

4.3 Matériel et méthodes

4.3.1 Mosaïque à petite échelle

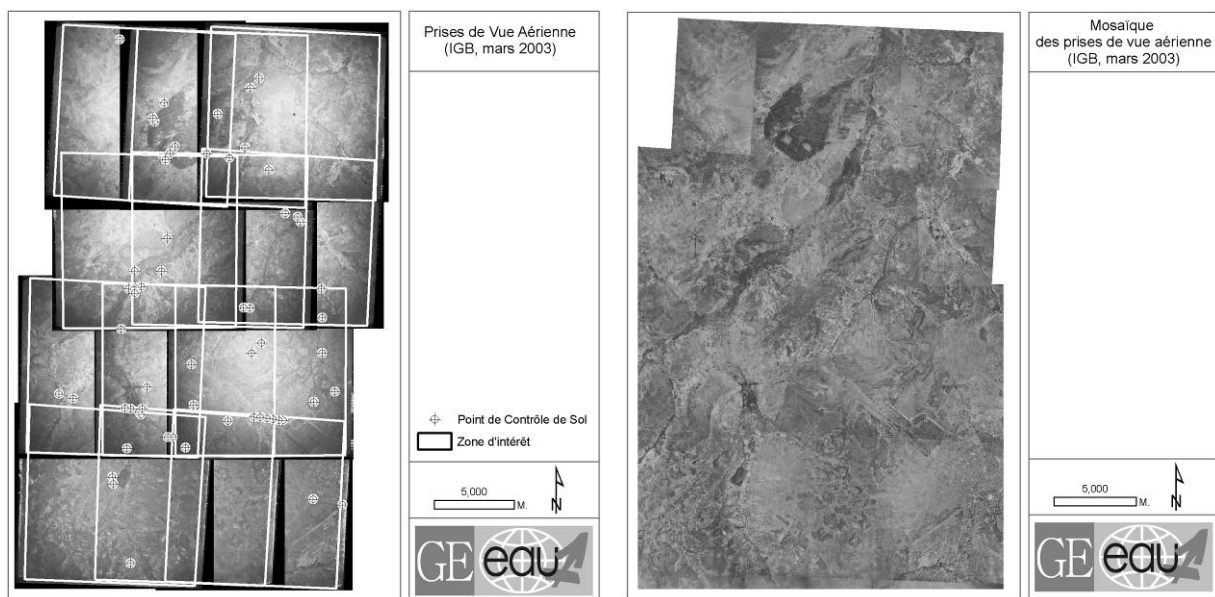
Une première mosaïque photogrammétrique de base, à plus grande échelle et plus technoscientifique, a été élaborée à partir de 9 prises de vue aérienne⁶ en noir et blanc scannées de l'Institut Géographique du Burkina Faso (IGB) à l'aide du module OrthoBASE[®] d'ERDAS IMAGINE[®]. Ce module offre un environnement pratique permettant une triangulation et orthorectification efficaces de plusieurs images à la fois. L'image résultante intègre les caractéristiques géométriques d'une carte et les qualités d'une image de photo.

La photogrammétrie est « l'art, la science et la technologie permettant d'obtenir des informations fiables sur des objets physiques et leur environnement par le biais des procédés d'enregistrement, de mesures et d'interprétation des images photographiques » (American Society of Photogrammetry, 1980). Des photos aériennes brutes contiennent des grandes distorsions géométriques provoquées par différents facteurs systématiques et non systématiques. La modélisation photo-grammétrique basée sur des équations colinéaires élimine ces erreurs et crée des ortho-images fiables.

La triangulation est le procédé chargé d'établir des liens mathématiques entre différentes images, les caractéristiques de l'appareil photo et le terrain.

L'orthorectification est un procédé visant à réduire les erreurs géométriques inhérentes aux photos aériennes. A partir des résultats de la triangulation, l'orthorectification crée des images ortho-rectifiées. Dès qu'une image est ortho-rectifiée, tous les pixels possèdent une fidélité géométrique. Cela signifie que des mesures de surfaces ou distances faites sur l'image correspondent aux mesures faites sur le terrain.

⁶ Images brutes mises à disposition par le projet BKF/007 – Projet d'aménagement participatif des forêts classées de Dindéresso et du Kou. Lux-Development & MECV



Carte 4.1 – Prise de vue aérienne de l’IGB (mars 2003), avec points de contrôle de sol et zones d’intérêts montrant les chevauchements.

Carte 4.2 – Mosaïque des prises de vue aérienne à ‘grande’ échelle.

Afin de définir un lien entre l’appareil photo, les images et le terrain, les orientations interne et externe doivent être définies pour chaque image.

L’orientation interne est la géométrie interne de l’appareil photo. Les principales variables sont le ‘point principal’ (centre de l’image) et la ‘longueur focale’ (longueur de la plaine de l’image). Ces variables doivent être calibrées dans un laboratoire.

L’orientation externe constitue la position et l’orientation angulaire du capteur par rapport au sol au moment de la prise de vue, enregistrée respectivement par le GPS et le Système de Navigation Inertielle (SNI) à bord de l’avion.

L’obtention de ces paramètres d’orientation est un calvaire bien connu dans le domaine de la photogrammétrie. Heureusement la méthodologie d’Ajustement des Blocs en Paquet d’OrthoBASE[®] (ABP, ‘Bundle Block Adjustment’) et son auto-calibration facilite considérablement la recherche de ces informations. A partir des variables estimées et mesurées, l’ABP traite les informations de tout un bloc d’images simultanément (‘en paquet’) utilisant des techniques statistiques afin d’identifier, distribuer et corriger des éventuelles erreurs automatiquement.

Quant au paramétrage de l’orientation interne, vu l’absence d’un rapport de calibrage de l’IGB, un appareil photo non métrique de 35 mm ayant une longueur focale de 152 mm, souvent utilisé pour des prises de vues aériennes (PVA), a été supposé. Le point principal a été estimé par OrthoBASE[®] à partir de la résolution de l’image scannée : 85 microns (soit 300 dpi), donnant une image à l’échelle 1/50.000 avec une résolution de 4,25 m. (ERDAS, 2002).

En outre, la non disponibilité immédiate d’un plan de vol de la mission au niveau de l’IGB, les valeurs initiales pour l’orientation externe ont également dû être estimées. Pour l’orientation angulaire des angles initiaux de 0° sur les trois axes (X, Y et Z) ont été pris. Quelques positions ont été dérivées par des mesures au GPS sur le terrain aux endroits correspondant aux centres de certaines images. Les autres ont été calculées à partir de ces mesures tenant compte de l’échelle de l’image et des pourcentages de chevauchements entre les images (ERDAS, 2002). La hauteur de vol était affichée sur les images (± 8.000 m).

Plusieurs Points de Contrôle au Sol (PCS), facilement identifiables (carrefours, ponts, bords des parcelles,...) et communs sur plusieurs images, ont également été recensés sur le terrain et à partir des cartes topographiques afin d'assister OrthoBASE® à corriger automatiquement les orientations externes supposées (carte 4.1).

Au même moment, OrthoBASE® identifie et positionne le nombre de Points de Nœud sur des images adjacentes, augmentant ainsi le nombre des points de coordonnées nécessaires pour une meilleure ortho-rectification.

Toutes les conditions étant remplies, l'ortho-rectification de l'ensemble des images a pu être effectuée. Les zones de chevauchements sont parfaitement superposables, aucun décalage entre les différentes images ne persiste. Les différentes photos ortho-rectifiées ont été mosaïquées dans une seule image ortho-rectifiée, harmonisant le plus possible les balances de couleurs des différents PVA (carte 4.2).

La procédure proposée par OrthoBASE® peut considérablement faciliter l'élaboration d'une image photogrammétrique, sans même avoir recours aux PCS, à condition que tous les paramètres soient faciles à obtenir : i.e. rapport de calibrage de l'appareil photo (orientation interne) et plan de vol avec données GPS et SNI au moment des prises de vue (orientation externe).

La résolution de 5 m., les couleurs en noir et blanc et la qualité médiocre des images scannées rendent la reconnaissance automatisée des parcelles agricoles très difficile. Néanmoins, une image ortho-rectifiée de la zone de recherche a été obtenue à moindre coût (1 €/km²), l'image servira comme base pour l'ortho-rectification d'une mosaïque plus détaillée présentée dans la suite.

4.3.2 Mosaïque à grande échelle

Un appareil photo numérique 'ordinaire' avec déclencheur à distance a été fixé sous un petit avion de sport, type Cessna, disponible à l'AéroClub de Bobo-Dioulasso. Un plan de vol a été dessiné sur une image Landsat ETM en ArcGIS (Image 4.1), tout en tenant compte et respectant la longueur focale de l'appareil photo, la hauteur du vol et les chevauchements souhaités entre les différentes prises de vue (Warner *et al.*, 1996) et exporté vers un GPS afin d'aider à guider le pilote. Les délais entre les différentes prises de vue dépendaient de la vitesse de l'avion (Warner *et al.*, 1996) et variaient entre 8 et 12 sec.. Si la situation atmosphérique s'avérait non-opportune, le vol était reporté pour le lendemain, éliminant ainsi ses effets nuisibles sur la qualité des PVA.

Après 2 fois 2 heures de vol, on obtenait 305 photos aériennes couvrant la zone d'étude ayant une superficie de 173 km². Toutes les photos ont été orientées Sud-Nord avant de les traiter dans PTgui (New House Internet Services B.V., 2008). Des enregistrements du GPS et du SNI n'étaient plus nécessaires pour cette approche.

PTgui (Panorama Tools graphical user interface) est un petit, mais puissant, logiciel d'assemblage des photos amateurs en panorama. L'outil peut assembler plusieurs bandes de photos comprenant des centaines de photos, corriger les orientations de l'appareil photo au moment de la prise de vue en effectuant une rotation et en pivotant les images, harmoniser les balances de couleurs des différentes images et estimer tous les paramètres (longueur focale, objectif, ...) automatiquement. Le procédé est complètement automatisé, mais si nécessaire l'opérateur peut également contrôler et paramétrer lui-même les différentes étapes.

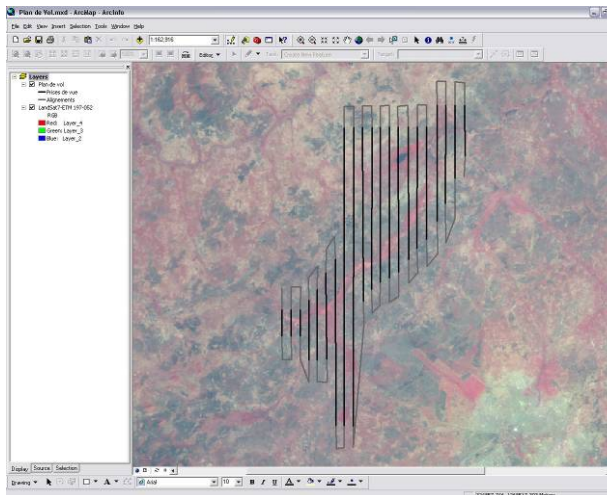


Image 4.1 – Elaboration du plan de vol dans ArcGIS.

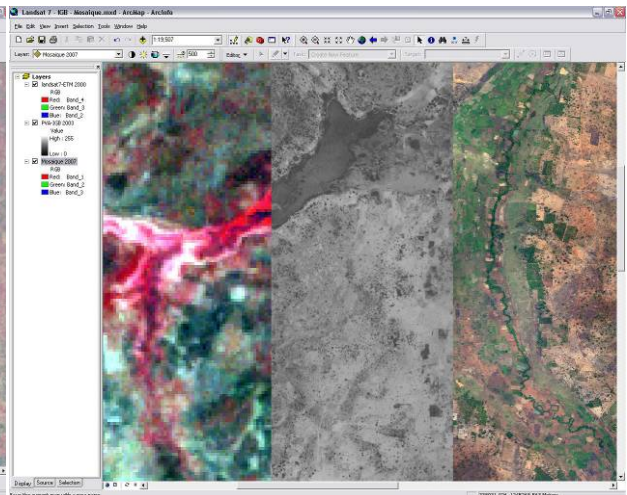


Image 4.2 - Comparaison images Landsat 7-ETM ayant une résolution de 30m., prise de vue aérienne de l'IGB (rés. 5m.) et mosaïque (rés. 0,8m.).

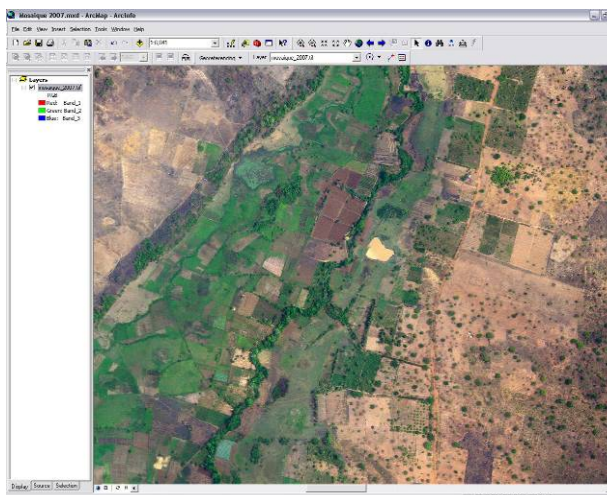


Image 4.3 - Détail de la mosaïque: cours d'eau du Kou (centre) et parcelles irriguées informelles au bord du fleuve.

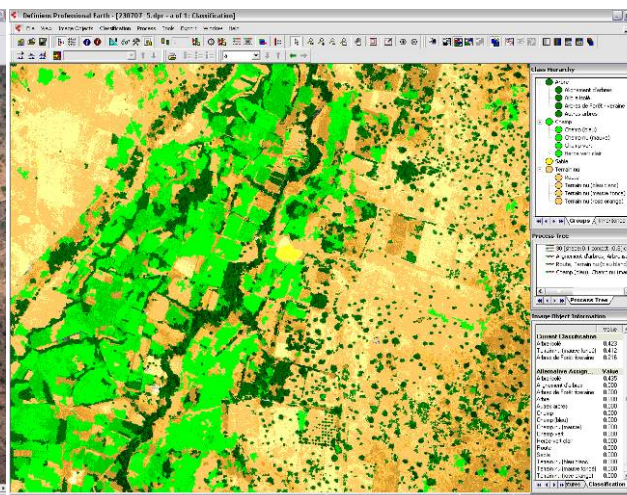


Image 4.4 - Classification image 4.3 à l'aide de Définis Pro (eCognition): terrain nu et terrain boisé, arbres isolés et forêts galeries, champs et prairies, sable, ...

A l'aide de PTgui, les 305 photos aériennes à basse altitude ont été réunies dans une image monobloc, sans transitions visibles. Le résultat de 2 Go (!) a été géoréférencé et orthorectifié avec ArcGIS. En se servant de la mosaïque photogrammétrique des images de l'IGB comme référence, des centaines de PCS ont été ajoutés sans le moindre effort et une nouvelle image orthorectifiée ayant une résolution de 0,8 m a été rapidement obtenue. Vu la taille de l'image, elle est présentée en annexe.

4.4 Résultats

La qualité de la mosaïque est démontrée dans les images 4.2, 4.3 et en annexe. L'annexe montre l'intégralité de la mosaïque sur un arrière-plan de mosaïque faite à partir des PVA de l'IGB. Malgré la taille réduite de l'image imprimée, la qualité du résultat reste bien visible. L'image 4.2 présente une comparaison entre une image Landsat ETM (résolution 30 m) et une prise de vue aérienne de l'IGB (résolution de 5m) et la mosaïque 'amateur' (résolution de

0,8 m). En dehors de l'évidente augmentation en qualité grâce aux couleurs et la résolution plus fine, on constate également les transitions parfaites, sans décalages, entre ces différents formats de prises de vue (prouvant la bonne orthorectification du procédé élaboré).

L'image 4.3 est un détail de la mosaïque de la zone agricole en amont de Diaradougou. Les parcelles et leurs délimitations, ainsi que des arbres isolés et des alignements d'arbres se distinguent clairement. A partir de ce niveau de détail on peut exploiter des algorithmes de reconnaissance d'objets spatiaux pour réaliser une carte détaillée de l'occupation du sol (image 4.4).

L'image 4.4 est le résultat d'une segmentation et classification réalisées dans le logiciel eCognition (Denis *et al.*, 2007). L'image a été segmentée afin de définir des objets spectralement homogènes, délimitant en même temps les éléments ligneux (alignement des parcelles, ou possible bordures des champs, ...). Les objets localisés dans la zone d'intérêt ont ensuite été classés afin de produire une carte de localisation des entités recherchées de tailles supérieures aux pixels de la photo : terrain nu et terrain boisé, arbres isolés et forêts galeries, champs et prairies, ... Cette approche par objet donne de meilleurs résultats que la classification spectrale par pixel habituellement utilisée. Les différentes couches d'information peuvent également être visualisées dans ArcGIS.

Ce dernier procédé fait actuellement l'objet d'une étude d'amélioration et de validation, les résultats sont prévus fin 2009.

4.5 Conclusions

Face à une intensification anarchique de l'utilisation de l'eau et de l'occupation des terres cultivables, les gestionnaires du bassin du Kou recherchaient un outil de contrôle et de suivi devant leur permettre d'évaluer l'ampleur du phénomène et son évolution régulière. Il a également été souhaité que la procédure ait un coût limité et qu'elle soit réalisée avec les moyens techniques et financiers localement disponibles.

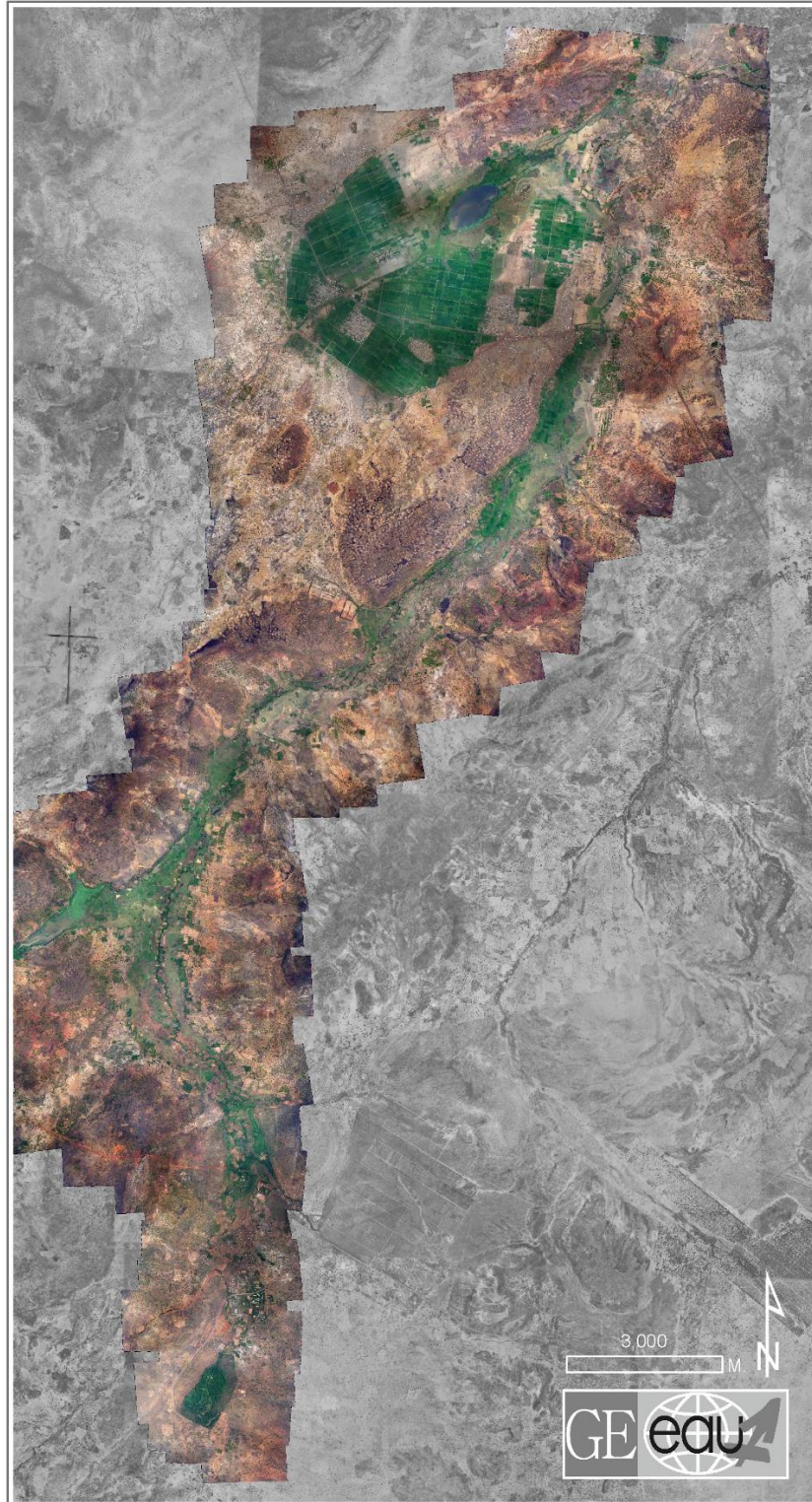
Un procédé en deux étapes a été élaboré. A partir des prises de vue aérienne (PVA) disponibles au niveau de l'Institut Géographique Burkinabé une mosaïque orthorectifiée en noir et blanc avec une résolution de 5 m a été élaborée, tout en respectant les règles techniques et scientifiques de la photogrammétrie à l'aide d'OrthoBASE[®] d'ERDAS IMAGINE. Vu la qualité médiocre des images de base, le manque de couleurs et la résolution moyenne, il est quasi impossible de délimiter et inventorier des parcelles agricoles.

A partir de plus de 300 prises de vue aérienne 'amateurs' à basse altitude, ayant une résolution de 0,8 m, une carte détaillée des occupations de sol a pu être élaborée. Des logiciels de mosaïquage, de traitement d'images et de SIG, ainsi que la mosaïque des images de l'IGB, ont permis la construction d'une image géoréférencée unique en couleur et à haute résolution. Des premiers essais en vue d'effectuer la reconnaissance automatique d'objets spatiaux afin d'élaborer des cartes d'occupation de sol ont été concluants. Le procédé doit néanmoins encore être affiné et validé.

Vu qu'il s'agit d'une approche 'amateur' non reconnue par l'administration responsable pour la cartographie et le nombre de photos nécessaires afin d'élaborer une carte détaillée de l'occupation des terres, la technique s'apprête plutôt à inventorier des zones de problèmes à moyenne taille. On peut conclure qu'une technique rapide et prometteuse de suivi de

l'occupation des activités agricoles dans le bassin du Kou a été élaborée respectant les ressources techniques et financières localement disponibles leur garantissant de la sorte autonomie et durabilité.

Annexe : mosaïque



Carte 4.3 – Mosaïque géoréférencée de 305 prises de vue aérienne ‘amateur’.



- Optimisation des calendriers d'irrigation à l'aide de SIMIS -

5

Optimisation des calendriers d'irrigation pour la Vallée du Kou à l'aide de SIMIS⁷

La vallée du Kou a été depuis le milieu des années 70, le lieu d'un développement rapide de l'irrigation. Reconnue comme une excellente plaine à vocation agricole notamment pour la riziculture, en raison de ses importantes potentialités hydrauliques, le périmètre irrigué de la vallée du Kou revêt une importance majeure dans les économies des communautés rurales et urbaines situées à proximité. D'une superficie totale aménagée de 1.260 ha, l'aménagement dudit périmètre à vocation rizicole a été réalisé de 1969 à 1970 dans le cadre de l'autosuffisance alimentaire.

Malheureusement, ce périmètre est aujourd'hui peu performant à cause de la réduction progressive des surfaces emblavées au fil des années et de la faible productivité. De 7 t/ha environ de paddy par campagne pendant les premières années après l'aménagement, les rendements sont passés à 4 t/ha dans les dernières années (Ouédraogo, 1993; Lahcen, 2000 ; Dicko, 2004). Actuellement, en station d'essai, les rendements atteignent 7 à 8 t/ha. Cela montre donc clairement les possibilités d'accroître les rendements sur les périmètres irrigués (Illy, 1997). Les causes principales de cette contre performance sont des pénuries en eau chroniques due à une intensification des utilisateurs en amont du périmètre et la mauvaise gestion de l'eau sur le périmètre.

La question de la gestion de l'eau d'irrigation devient alors primordiale. C'est dans ce sens qu'il a été jugé nécessaire d'entreprendre une stratégie d'amélioration de la gestion de l'irrigation sur le périmètre. Après avoir élaboré un diagnostic des efficacités en irrigation, le logiciel SIMIS (Mateos *et al.*, 2002) a été mis en place afin de proposer des scénarii d'irrigation fiables et équitables, et de rehausser le rendement du périmètre.

5.1 Introduction à SIMIS

Scheme Irrigation Management Information System (SIMIS) est un programme de gestion des périmètres irrigués, développé par L. Mateos de l'Institut Agricole de Cordoba, Espagne et diffusé par la FAO.

SIMIS est constitué de 19 programmes différents que l'on appelle 'modules'. Une première série de modules permet de dresser l'inventaire des différentes ressources constituant l'environnement du projet: données météorologiques, données culturales, données pédologiques, infrastructure physique, propriété foncière, caractéristiques des parcelles (efficacités,...), personnel, matériel, etc. Chaque inventaire est stocké dans une base de données.

⁷ Avec la contribution de J. Wellens (APEFE), M. Nitchou (AEDE), C. Nakelse (ENI BT).

L'information contenue dans ces inventaires est peu sujette à changements de par sa nature. Chacun des modules est autonome et peut être modifié individuellement. Ils permettent d'obtenir des réponses spécifiques à des questions courantes :

- Qui sont les utilisateurs du projet d'irrigation ?
- Quelle est la surface moyenne d'une parcelle ?
- Quelles sont les dimensions des conduites ?
- Quelle est la surface desservie par une conduite secondaire spécifique ?
- Quel chemin l'eau doit-elle suivre pour parvenir à une parcelle définie ?
- Quelles sont les structures hydrauliques en place ?

La seconde série de modules correspond à la gestion des tâches pour l'irrigation ; contrôle des activités agricoles, planification de l'irrigation et de la distribution de l'eau, etc. La plupart des modules ne peuvent fonctionner individuellement et dépendent d'une ou plusieurs bases de données. Il s'agit des modules suivants :

- Calcul des exigences en eau de la culture :
Ce module, permet de calculer les besoins en eau des cultures à partir des données météorologiques, des types de sol et paramètres des cultures. Les besoins en eau peuvent être calculés par parcelle ou groupés par tertiaire et/ou secondaire.
- Elaboration d'un plan d'irrigation :
Pour une certaine zone agricole, l'occupation des parcelles, le calendrier agricole ainsi que les débits disponibles sont définis par l'utilisateur. Le module permet de comparer par zone les exigences nettes et brutes en irrigation, les débits requis et les débits disponibles.
- Elaboration des programmes d'irrigation :
A partir de l'architecture du périmètre irrigué, l'occupation des parcelles, les calendriers de culture, les débits disponibles aux têtes des canaux secondaires, définis dans 'support de projet', des calendriers d'irrigation seront élaborés. Différents modèles de distribution d'eau existent : basé sur la rotation, basé sur l'approvisionnement proportionnel, orienté vers la demande et basé sur l'approvisionnement continu.
- Suivi de la consommation en eau.
Ce volet suit la consommation en eau durant la campagne. Il compare les débits mesurés dans les canaux avec les débits du programme d'irrigation.

Le SIMIS contient également des modules de gestion financière : comptabilité, redevances d'eau, activités de maintenance, indicateurs de performance. Ces modules ne seront pas exploités dans cette étude.

SIMIS offre la possibilité de visualiser les données et résultats sous forme de tableaux et de graphiques ou dans un Système d'Informations Géographiques. Le module SIG est très spartiate et n'a pas été trouvé assez stable. Il a été préféré de visualiser les résultats dans ArcInfo.

A partir des années 90 les grands bailleurs de fonds (BAD, Banque Mondiale, UE, ..) ont cessé d'appuyer des projets d'irrigation de grande envergure. Plusieurs développeurs des

outils de gestion des périmètres (INCA, OMIS, ...) étaient forcés de les suivre, à cause du manque de financements attribués. SIMIS en fait malheureusement partie, programmé à l'époque dans un environnement Microsoft Access 98, l'outil souffre des incompatibilités avec des systèmes d'exploitations récents (Windows XP et Vista). SIMIS reste néanmoins une très bonne option.

5.2 Plan d'irrigation

Il s'agit de mettre en rapport les eaux disponibles avec les occupations des parcelles en respectant l'efficacité globale et le type de sol (paramètres pondérés sur chaque bloc). Jouant sur les calendriers agricoles et les types d'occupations (riz ou maïs pour ces cas), le meilleur scénario faisable tenant compte des eaux disponibles sera retenu. Des plans d'irrigation ont été développés pour les blocs 1 et 2. La présente étude illustre qu'il n'est pas toujours possible de trouver une solution complètement satisfaisante.

5.2.1 Cas du Bloc 1

Le bloc 1 reçoit de l'eau tous les deux jours. Or ce bloc, étant divisé en deux groupes (amont et aval), chaque groupe est irrigué tous les quatre jours (voir aussi 'Tours d'eau'). Le module plan considère par contre une distribution d'eau continue de 24h/24. Pour conformer le logiciel à la distribution par tour d'eau à intervalle de deux jours, la moitié des débits disponibles est introduite.

Les débits en tête du bloc ont fait l'objet de plusieurs années de mesures journalières, les valeurs moyennes sont présentées dans le tableau 5.1, ainsi que leur moitié. Le repiquage pour la plupart des agriculteurs s'effectue en février. Sur environ 211 ha que compte le bloc 1, seuls 160 ha sont actuellement exploités en riz (85 ha) ou maïs (75 ha). Avec une efficacité globale de 0,6 (Bos et Nugteren, 1990 ; Wellens *et al.*, 2004), l'adéquation simulée du bloc 1 est affichée dans le tableau 5.1.

Le plan d'irrigation confirme que des montants d'eau satisfaisants sont disponibles pour alimenter le bloc 1 avec son occupation actuelle. En jouant sur les calendriers culturaux une superficie bien plus vaste (210 ha) peut être alimentée par la même ressource (tableau 5.2). Les charges des fortes demandes en eau, provoquées par une évapotranspiration plus élevée pour la période d'avril, ont pu être diminuées en repiquant le riz un mois plus tôt.

Tableaux 5.1 & 5.2 – Plans d'irrigation pour l'occupation actuelle (g.) et pour une occupation optimale (d.).

		Jan	Fév	Mar	Avr	Mai			Déc	Jan	Fév	Mar	Avr		
Maïs	[ha]		75	75	75		Maïs	[ha]			174	174	174		
Riz	[ha]		85	85	85	85	Riz	[ha]		37	37	37	37		
Débit disponible	[l/s]	613	611	660	639	659	Débit disponible	[l/s]	332	613	611	660	639		
	[l/s : 2]	307	305	330	320	329		[l/s : 2]	166	307	305	330	320		
Débit requis	[l/s]	dec 1	226	223	293	211	Débit requis	[l/s]	dec 1	91	91	169	280		
		dec 2	1	295	254	301			111	dec 2	1	116	113	223	259
		dec 3	148	210	274	271			34	dec 3	64	72	144	264	163

Les programmes d'irrigation montreront par contre qu'il sera impossible à certains endroits de fournir la dose d'eau nécessaire dans le délai de 24 h par faute des capacités maximales des

canaux. Toute l'eau peut être disponible, mais si les capacités des canaux ne permettent pas de véhiculer les doses nécessaires dans le temps prévu des inadéquations sont constatées.

5.2.2 Cas du Bloc 2

La situation du bloc 2 est moins optimiste. Avec des débits moyens constatés beaucoup plus bas que pour le bloc 1 et une superficie seulement légèrement inférieure (tableaux 5.3 & 5.4), il s'est avéré impossible d'élaborer un plan d'irrigation satisfaisant. Même en plantant le riz début janvier, les débits requis sont plus que le double des débits disponibles. Pour une occupation totale en maïs, les débits requis restent supérieurs aux disponibles. Comme le bloc 2 est également irrigué tous les deux jours, les moitiés des débits enregistrés ont été introduites.

Les programmes d'irrigations élaborés plus bas avaient surtout comme but de garantir une distribution de l'eau plus équitable pour de l'irrigation déficitaire.

Tableaux 5.3 & 5.4 – Plans d'irrigation pour une occupation en riz (g.) et pour une occupation en maïs (d.).

		Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	
Riz	[ha]		168	168	168	168	
Débit disponible	[l/s]	244	194	288	329	318	
	[l/s : 2]	122	97	144	164	159	
Débit requis	[l/s]	dec 1	1	409	320	359	305
		dec 2	3	510	340	372	183
		dec 3	293	301	356	366	58

		Jan	Fév	Mar	
Maïs	[ha]	168	168	168	
Débit disponible	[l/s]	194	288	329	
	[l/s : 2]	97	144	164	
Débit requis	[l/s]	dec 1	11	80	187
		dec 2	24	130	199
		dec 3	48	171	134

5.3 Programmes d'irrigation

La production des programmes d'irrigation ont en substance deux phases : une phase de simulation portant sur le programme d'irrigation existant afin d'évaluer l'adéquation (ou faisabilité) entre le débit en tête et les superficies cultivées, et une phase portant sur l'élaboration des propositions d'amélioration.

5.3.1 Cas du Bloc 1 : Occupation actuelle

La rubrique consiste à simuler le système en considérant les actes d'arrosage actuel. L'eau est distribuée simultanément à tous les tertiaires d'un groupe (amont ou aval) et successivement aux quaternaires et parcelles. Les tertiaires, constitués de modules à masques, livrent un débit maximal de 60 l/s. Les quaternaires peuvent seulement véhiculer un débit estimé de 40 l/s à cause de l'ensablement. Le temps de fonctionnement est de 24 h pour desservir les besoins en eau de quatre jours. La séquence d'alimentation peut être alternée de l'amont vers l'aval et vice versa.

Des simulations ont été effectuées pour les périodes au début de campagne (début février) et au pic des demandes (fin mars). Basés sur les tendances des besoins en eau de l'ensemble des cultures, ces deux calendriers peuvent être retenus pour couvrir toute la campagne. Le calendrier obtenu à partir des besoins du 4 au 7 février est applicable sur la période allant de début janvier au 13 février. Le calendrier des besoins du 24 au 27 mars est valable pour la période du 14 février jusqu'en fin de campagne sèche.

Tableau 5.5 – Calendrier d’irrigation pour l’occupation actuelle, début de campagne.

		Débit [l/s]	Débit Min [l/s]	Débit Max [l/s]	Début	Fin	Maïs	Riz	Tot.	Ade- quation [%]	
Amont	T-1.1	56	41	53	4/2 6:00	5/2 5:46	4	5	9	91	
	T-1.2	46	31	43	4/2 6:00	5/2 5:57	9	3	12	94	
	T-1.3	37	22	36	4/2 6:00	5/2 4:18	10	1	11	100	
Aval	T-1.6	43	27	40	4/2 6:00	5/2 5:03	5	4	9	98	
	T-1.7	33	25	31	6/2 6:00	7/2 5:52	5	3	8	100	
	T-1.8	44	35	41	6/2 6:00	7/2 5:24	3	6	9	98	
	T-1.8.A	56	50	53	6/2 6:00	7/2 5:42	1	8	9	76	
	T-1.9	29	25	27	6/2 6:00	7/2 5:30	3	3	6	100	
	T-1.9.A	55	50	52	6/2 6:00	7/2 5:41	1	4	5	78	
	T-1.10	30	25	29	6/2 6:00	7/2 5:55	2	4	6	100	
Amont	T-1.A.1	25	19	23	4/2 6:00	5/2 3:38	1	3	4	100	
	T-1.A.2	35	23	33	4/2 6:00	5/2 5:42	3	3	6	100	
	T-1.A.3	46	32	42	4/2 6:00	5/2 5:38	2	4	6	91	
	T-1.A.4	59	44	56	4/2 6:00	4/2 22:28	1	7	8	71	
	T-1.A.5	35	18	32	4/2 6:00	5/2 2:04	10	0	10	100	
	Aval	T-1.A.6	57	49	53	6/2 6:00	7/2 5:54	6	6	12	76
		T-1.A.7	60	49	58	6/2 6:00	7/2 8:10	3	8	11	69
		T-1.A.8	46	40	46	6/2 6:00	7/2 5:57	1	5	6	91
		T-1.A.8.A									
	T-1.A.9	36	27	33	6/2 6:00	7/2 5:37	2	4	6	100	
T-1.A.9.A											
T-1.A.10	35	28	32	6/2 6:00	7/2 5:31	3	4	7	100		
Résumé	Amont	382	257	358			75	85	160	92	
	Aval	481	402	456							

Tableau 5.6 – Calendrier d’irrigation pour l’occupation actuelle, mi-campagne.

		Débit [l/s]	Débit Min [l/s]	Débit Max [l/s]	Début	Fin	Maïs	Riz	Tot.	Ade- quation [%]	
Amont	T-1.1	52	37	49	24/3 6:00	25/3 5:00	4	5	9	88	
	T-1.2	55	40	54	24/3 6:00	25/3 2:37	9	3	12	77	
	T-1.3	55	39	52	24/3 6:00	25/3 4:47	10	1	11	91	
Aval	T-1.6	50	36	49	24/3 6:00	25/3 5:16	5	4	9	89	
	T-1.7	39	32	38	26/3 6:00	27/3 4:07	5	3	8	100	
	T-1.8	47	41	44	26/3 6:00	27/3 5:30	3	6	9	89	
	T-1.8.A	49	41	49	26/3 6:00	27/3 5:26	1	8	9	89	
	T-1.9	32	26	31	26/3 6:00	27/3 3:32	3	3	6	100	
	T-1.9.A	38	35	36	26/3 6:00	27/3 3:41	1	4	5	100	
	T-1.10	31	26	29	26/3 6:00	27/3 3:35	2	4	6	100	
Amont	T-1.A.1	27	21	25	24/3 6:00	25/3 1:42	1	3	4	100	
	T-1.A.2	40	26	36	24/3 6:00	25/3 2:39	3	3	6	100	
	T-1.A.3	39	27	38	24/3 6:00	25/3 3:40	2	4	6	100	
	T-1.A.4	50	35	48	24/3 6:00	25/3 5:08	1	7	8	81	
	T-1.A.5	48	32	47	24/3 6:00	25/3 4:19	10	0	10	93	
	Aval	T-1.A.6	55	48	53	26/3 6:00	27/3 5:19	6	6	12	77
		T-1.A.7	58	46	56	26/3 6:00	27/3 5:27	3	8	11	73
		T-1.A.8	39	33	39	26/3 6:00	27/3 2:28	1	5	6	100
		T-1.A.8.A									
	T-1.A.9	36	29	35	26/3 6:00	27/3 1:43	2	4	6	100	
T-1.A.9.A											
T-1.A.10	35	30	34	26/3 6:00	27/3 4:07	3	4	7	100		
Résumé	Amont	416	292	396			75	85	160	92	
	Aval	459	386	442							

Tableaux 5.7 & 5.8 – Détail du calendrier d’irrigation pour les parcelles de tertiaire 1.9, occupation actuelle (g.) et occupation optimale (d.).

Occupation actuelle (g.)						Occupation optimale (d.)									
Occupation	Débit [l/s]	Début	Fin	Dose [m³/ha]		Occupation	Débit [l/s]	Début	Fin	Dose [m³/ha]					
T-1.9	32	24/3	6:00	25/3	3:32	T-1.9	60	24/3	6:00	25/3	4:58				
Q-1.9.1	31	24/3	6:00	24/3	17:25	Q-1.9.1	59	24/3	6:00	24/3	11:40				
1.9-1.1	Riz-1-SAL	25	24/3	6:00	24/3	10:20	390	1.9-1.1	Maïs	57	24/3	6:00	24/3	7:41	347
1.9-1.2	Maïs-1	25	24/3	10:20	24/3	13:05	249	1.9-1.2	Maïs	51	24/3	7:41	24/3	9:34	347
1.9-1.3	Riz-1-SAL	25	24/3	13:05	24/3	17:25	390	1.9-1.3	Maïs	46	24/3	9:34	24/3	11:40	347
Q-1.9.2	31	24/3	17:25	24/3	21:45	Q-1.9.2	Maïs	59	24/3	11:40	24/3	17:21			
1.9-2.1	Riz-2-SAL	25	24/3	17:25	24/3	21:45	390	1.9-2.1	Maïs	57	24/3	11:40	24/3	13:22	347
1.9-2.2								1.9-2.2	Maïs	51	24/3	13:22	24/3	15:15	347
1.9-2.3	Maïs-2	25	24/3	21:45	25/3	0:39	260	1.9-2.3	Maïs	46	24/3	15:15	24/3	17:21	347
Q-1.9.3								Q-1.9.3	Maïs	58	24/3	17:21	24/3	23:06	
1.9-3.1								1.9-3.1	Maïs	56	24/3	17:21	24/3	19:04	347
1.9-3.2								1.9-3.2	Maïs	50	24/3	19:04	24/3	21:00	347
1.9-3.3								1.9-3.3	Maïs	46	24/3	21:00	24/3	23:06	347
Q-1.9.4	30	25/3	0:39	25/3	3:32	Q-1.9.4	Maïs	57	24/3	23:06	25/3	4:58			
1.9-4.1								1.9-4.1	Maïs	55	24/3	23:06	25/3	0:51	347
1.9-4.2	Maïs-2	25	25/3	0:39	25/3	3:32	260	1.9-4.2	Maïs	49	25/3	0:51	25/3	2:49	347
1.9-4.3								1.9-4.3	Maïs	45	25/3	2:49	25/3	4:58	347

Les simulations avaient en filigrane la satisfaction des besoins en 24 h tout en minimisant les débits en tête des quaternaires, des tertiaires et donc du secondaire. Les résultats retenus sont résumés dans les tableaux 5.5 et 5.6, un détail du calendrier d’irrigation pour le cas des parcelles du neuvième tertiaire est présenté dans le tableau 5.7.

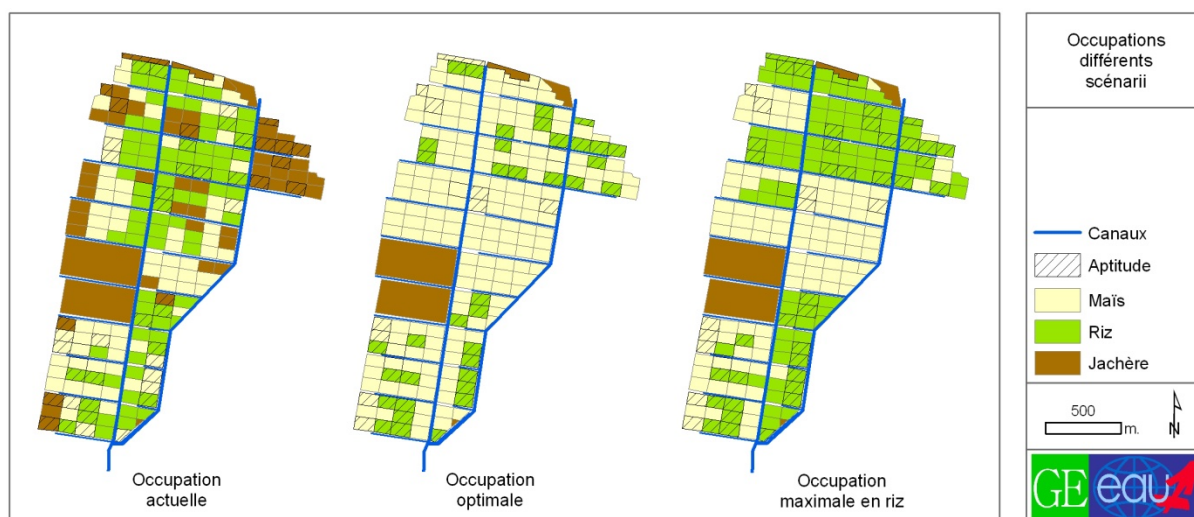
Les tableaux confirment que les besoins en eau actuels peuvent être satisfaits avec le programme élaboré. Le débit nécessaire en tête varie de 382 l/s à 481 l/s, bien en deçà de 600 l/s mesurés en tête.

Les déficits enregistrés sont dus à la capacité limitée des canaux quaternaires. En plus, aggravé par l’ensablement son débit opérationnel s’est réduit de 60 l/s à 40 l/s. Pour le tertiaire 1.A.6 avec ses 6 ha en riz et 6 ha en maïs, ayant des besoins en eau pour une période de quatre jours en mi-campagne de 182 m³/ha pour le maïs et 376 m³/ha pour le riz (valeur moyenne pour les différents types de sol), il faut 24 h avec un débit de 40 l/s sans compter des pertes afin d’être complètement adéquate (*durée = nombre de parcelles x dose d’eau ÷ débit*).

On peut conclure au vu de ces résultats que le bloc 1 reçoit beaucoup plus d’eau qu’il n’en faut par rapport au nombre de parcelles actuellement exploitées. Par la suite, des scénarii permettant la mise en exploitation de toutes les parcelles ont été recherchés.

5.3.2 Cas du Bloc 1 : Occupation optimale

L’objectif est de proposer des calendriers d’irrigation qui puissent mettre en exploitation toutes les 210 parcelles, tout en satisfaisant leur demande en eau. Dans l’optique d’une gestion globale du périmètre, du riz sera uniquement attribué aux sols lourds, apte à la riziculture, et du maïs aux autres parcelles afin de minimiser au mieux le débit nécessaire en tête du bloc (Carte 5.1).



Carte 5.1 – Occupations de sol pour les différents scénarii de calendriers d’irrigation.

Les deux groupes (amont et aval) ont été restructurés afin de permettre un rééquilibrage des demandes en eau. Les tertiaires 1.A.6 et 1.A.7 sont ainsi affectés au groupe ‘amont’. Les résultats retenus sont résumés dans les tableaux 5.9 et 5.10, un détail du calendrier est présenté dans le tableau 5.8. Au total 37 ha sont occupés par du riz et 174 ha par du maïs, pour des débits allant de 337 l/s à 555 l/s. La capacité limitée des tertiaires et quaternaires n’a pas permis d’emblaver toutes les parcelles lourdes en riz, malgré une révision à la hausse des débits des quaternaires (60 l/s) en supposant une meilleure gestion de l’entretien.

Tableau 5.9 – Calendrier d’irrigation pour une occupation optimale, début de campagne.

		Débit	Débit	Débit	Débit	Fin		Maïs	Riz	Tot.
		[l/s]	Min [l/s]	Max [l/s]	Début					
Amont	T-1.1	60	58	60	4/2 6:00	4/2 17:32	7	5	12	
	T-1.2	40	37	39	4/2 6:00	4/2 17:21	10	2	12	
	T-1.3	40	37	39	4/2 6:00	4/2 17:14	10	2	12	
	T-1.6	25	22	24	4/2 6:00	4/2 18:15	12		12	
Aval	T-1.7	25	22	24	6/2 6:00	6/2 17:03	12		12	
	T-1.8	35	32	34	6/2 6:00	6/2 16:57	7	2	9	
	T-1.8.A	40	38	39	6/2 6:00	6/2 17:20	6	3	9	
	T-1.9	25	22	24	6/2 6:00	6/2 18:02	12		12	
	T-1.9.A	25	23	24	6/2 6:00	6/2 17:56	8	1	9	
	T-1.10	30	28	29	6/2 6:00	6/2 16:50	5	2	7	
Amont	T-1.A.1	15	13	13	4/2 6:00	4/2 18:35	3	1	4	
	T-1.A.2	35	31	33	4/2 6:00	4/2 18:10	3	3	6	
	T-1.A.3	30	28	29	4/2 6:00	4/2 17:04	4	2	6	
	T-1.A.4	40	38	39	4/2 6:00	4/2 17:38	6	3	9	
	T-1.A.5	30	28	29	4/2 6:00	4/2 17:06	13		13	
	T-1.A.6	35	32	34	4/2 6:00	4/2 17:04	15		15	
	T-1.A.7	35	32	34	4/2 6:00	4/2 17:04	15		15	
	Aval	T-1.A.8	20	18	19	6/2 6:00	6/2 17:40	5	1	6
		T-1.A.8.A	45	43	44	6/2 6:00	6/2 18:13	8	3	11
		T-1.A.9	35	33	34	6/2 6:00	6/2 18:23	3	3	6
T-1.A.9.A		40	38	39	6/2 6:00	6/2 17:31	2	4	6	
	T-1.A.10	17	14	15	6/2 6:00	6/2 18:32	8		8	
Résumé	Amont	385	357	374			174	37	211	
	Aval	337	311	326						

Tableau 5.10 – Calendrier d'irrigation pour une occupation optimale, mi-campagne.

		Débit	Débit	Débit	Début	Fin	Maïs	Riz	Tot.
		[l/s]	Min [l/s]	Max [l/s]					
Amont	T-1.1	60	58	60	24/3 6:00	25/3 5:22	7	5	12
	T-1.2	60	58	60	24/3 6:00	25/3 4:58	10	2	12
	T-1.3	60	58	60	24/3 6:00	25/3 4:57	10	2	12
	T-1.6	60	57	60	24/3 6:00	25/3 4:58	12		12
Aval	T-1.7	55	53	55	26/3 6:00	27/3 4:17	12		12
	T-1.8	45	42	44	26/3 6:00	27/3 5:36	7	2	9
	T-1.8.A	45	43	44	26/3 6:00	27/3 5:32	6	3	9
	T-1.9	60	56	59	26/3 6:00	27/3 4:58	12		12
	T-1.9.A	45	43	44	26/3 6:00	27/3 5:04	8	1	9
	T-1.10	35	33	34	26/3 6:00	27/3 4:13	5	2	7
Amont	T-1.A.1	20	18	19	24/3 6:00	25/3 5:05	3	1	4
	T-1.A.2	35	31	33	24/3 6:00	25/3 4:13	3	3	6
	T-1.A.3	35	31	33	24/3 6:00	25/3 4:11	4	2	6
	T-1.A.4	45	43	44	24/3 6:00	25/3 5:48	6	3	9
	T-1.A.5	60	58	60	24/3 6:00	25/3 5:28	13		13
	T-1.A.6	60	58	60	24/3 6:00	25/3 5:57	15		15
	T-1.A.7	60	58	60	24/3 6:00	25/3 5:57	15		15
	T-1.A.8	30	28	29	26/3 6:00	27/3 5:47	5	1	6
	T-1.A.8.A	55	53	54	26/3 6:00	27/3 5:23	8	3	11
	T-1.A.9	35	33	34	26/3 6:00	27/3 4:01	3	3	6
T-1.A.9.A	30	28	29	26/3 6:00	27/3 5:57	2	4	6	
T-1.A.10	40	38	39	26/3 6:00	27/3 4:32	8		8	
Résumé	Amont	555	528	546			174	37	211
	Aval	475	450	466					

5.3.3 Cas du Bloc 1 : Occupation maximale en riz

Tableau 5.11 – Calendrier d'irrigation pour une occupation maximale en riz, début campagne.

		Débit	Débit	Débit	Début	Fin	Maïs	Riz	Tot.
		[l/s]	Min [l/s]	Max [l/s]					
Amont	T-1.1	60	58	60	4/2 6:00	4/2 17:27	7	5	12
	T-1.2	45	43	44	4/2 6:00	4/2 18:14	9	3	12
	T-1.3	40	37	39	4/2 6:00	4/2 17:12	10	2	12
	T-1.6	25	22	24	4/2 6:00	4/2 18:15	12		12
Aval	T-1.7	35	32	34	6/2 6:00	7/2 4:14	7	5	12
	T-1.8	50	48	49	6/2 6:00	7/2 4:23		9	9
	T-1.8.A	50	48	49	6/2 6:00	7/2 4:36		9	9
	T-1.9	20	17	19	6/2 6:00	6/2 21:19	12		12
	T-1.9.A	55	53	54	6/2 6:00	7/2 4:27		9	9
	T-1.10	40	38	39	6/2 6:00	7/2 4:11		7	7
Amont	T-1.A.1	40	38	39	4/2 6:00	4/2 17:43		4	4
	T-1.A.2	50	48	49	4/2 6:00	4/2 17:59	1	5	6
	T-1.A.3	55	53	54	4/2 6:00	4/2 17:37		6	6
	T-1.A.4	60	58	59	4/2 6:00	5/2 0:08		9	9
	T-1.A.5	30	26	29	4/2 6:00	4/2 17:13	13		13
	T-1.A.6	35	32	34	4/2 6:00	4/2 17:09	15		15
	T-1.A.7	35	32	34	4/2 6:00	4/2 17:09	15		15
	T-1.A.8	35	32	34	6/2 6:00	7/2 5:04		6	6
	T-1.A.8.A	45	43	44	6/2 6:00	7/2 4:37	3	8	11
	T-1.A.9	35	33	35	6/2 6:00	7/2 3:38		6	6
T-1.A.9.A	25	23	24	6/2 6:00	7/2 5:12	1	5	6	
T-1.A.10	40	38	39	6/2 6:00	7/2 5:57	1	7	8	
Résumé	Amont	475	448	465			106	105	211
	Aval	430	404	420					

Tableau 5.12 – Calendrier d’irrigation pour une occupation maximale en riz, mi-campagne.

		Débit	Débit	Débit	Début		Fin		Maïs	Riz	Tot.
		[l/s]	Min [l/s]	Max [l/s]							
Amont	T-1.1	60	58	60	26/3	6:00	27/3	5:22	7	5	12
	T-1.2	60	58	60	26/3	6:00	27/3	5:32	9	3	12
	T-1.3	60	58	60	26/3	6:00	27/3	4:57	10	2	12
	T-1.6	60	57	60	26/3	6:00	27/3	4:58	12		12
Aval	T-1.7	60	58	60	28/3	6:00	29/3	5:11	7	5	12
	T-1.8	55	53	54	28/3	6:00	29/3	5:22		9	9
	T-1.8.A	55	53	55	28/3	6:00	29/3	5:34		9	9
	T-1.9	60	56	59	28/3	6:00	29/3	4:58	12		12
	T-1.9.A	60	58	59	28/3	6:00	29/3	5:24		9	9
	T-1.10	45	43	45	28/3	6:00	29/3	4:20		7	7
Amont	T-1.A.1	25	23	24	26/3	6:00	27/3	4:29		4	4
	T-1.A.2	35	33	34	26/3	6:00	27/3	5:15	1	5	6
	T-1.A.3	35	33	34	26/3	6:00	27/3	3:36		6	6
	T-1.A.4	55	53	54	26/3	6:00	27/3	5:04		9	9
	T-1.A.5	60	58	60	26/3	6:00	27/3	5:28	13		13
	T-1.A.6	60	58	60	26/3	6:00	27/3	5:57	15		15
	T-1.A.7	60	58	60	26/3	6:00	27/3	5:57	15		15
Aval	T-1.A.8	40	38	39	28/3	6:00	29/3	5:06		6	6
	T-1.A.8.A	60	58	59	28/3	6:00	29/3	5:47	3	8	11
	T-1.A.9	40	38	39	28/3	6:00	29/3	3:51		6	6
	T-1.A.9.A	35	33	34	28/3	6:00	29/3	4:01	1	5	6
Résumé	Amont	570	548	563					106	105	211
	Aval	560	537	552							

Vu la cultivation rentable du riz, un scénario pour une occupation maximale en riz a été élaboré. Le scénario consiste à affecter du riz aux parcelles quel que soit leur type de sol, tout en respectant l’eau disponible (carte 5.1).

Le plan cultural retenu contient 105 ha de riz, repiqué en janvier, et 106 ha de maïs, semé en février. Le débit nécessaire varie entre 430 l/s et 570 l/s. L’incapacité de certains canaux à véhiculer le débit nécessaire a engendré l’occupation du riz malgré l’aptitude des parcelles (tertiaires 1, 3, 1.A.7 et 1.9). Le programme retenu traduit dans un tableur est donné dans les tableaux 5.11 et 5.12.

5.3.4 Cas du Bloc 2

Pour le bloc 2, l’eau est actuellement distribuée simultanément à tous les tertiaires et successivement aux quaternaires et parcelles. Les tours d’eau sont à intervalle de 2 jours avec une durée de 24 heures. Le débit moyen en tête déduit des pertes (230 l/s) est partagé entre sept tertiaires. Les débits de ces derniers varient entre 10 l/s et 45 l/s. Les résumés des calendriers élaborés sont présentés dans les tableaux 5.13 et 5.14. De très basses efficacités en adéquation sont enregistrées pour l’ensemble des tertiaires.

Le résultat obtenu confirme les prévisions données par le plan d’irrigation, aucun tertiaire ne peut satisfaire les demandes en eau dans le temps requis. En outre avec le manque de gestion actuel, il est facile à s’imaginer que les tertiaires en aval seront rarement pourvus de leurs doses nécessaires. Surtout le dernier tertiaire avec son débit de 10 l/s (!).

Pour atténuer l’effet de faiblesse de débit, un regroupement des tertiaires en deux sections est proposé. Des débits plus importants sont alloués par rotation entre deux groupes (amont et

aval) avec un tour d'eau tous les 4 jours pour chaque parcelle. Les résultats sont affichés dans les tableaux 5.15 et 5.16. Au niveau des efficacités en adéquation, la différence n'est pas significative. Par contre, les nouveaux débits sont plus faciles à gérer à partir des modules à masques et plus réalistes. Même avec des éventuelles défaillances dans la gestion, les tertiaires en aval recevront à tout moment de l'eau (satisfaisante ou non).

Tableaux 5.13 & 5.14 – Calendrier d'irrigation pour l'occupation et la distribution d'eau actuelle, débit de campagne (g.) et mi-campagne (d.).

	Débit	Début	Fin	Riz	Adé- quation		Débit	Début	Fin	Riz	Adé- quation				
	[l/s]			[ha]	[%]		[l/s]			[ha]	[%]				
T-2.2	35	26/2	6:00	28/2	19:13	27	39	T-2.2	35	21/4	6:00	23/4	21:50	27	38
T-2.3	45	26/2	6:00	28/2	11:58	30	44	T-2.3	45	21/4	6:00	23/4	14:10	30	43
T-2.4	35	26/2	6:00	28/2	20:07	30	39	T-2.4	35	21/4	6:00	23/4	22:17	30	37
T-2.5	35	26/2	6:00	28/2	18:13	27	40	T-2.5	35	21/4	6:00	23/4	20:55	27	38
T-2.6	35	26/2	6:00	28/2	8:16	24	48	T-2.6	35	21/4	6:00	23/4	11:11	24	45
T-2.7	35	26/2	6:00	28/2	3:39	21	53	T-2.7	35	21/4	6:00	23/4	6:08	21	50
T-2.8	10	26/2	6:00	28/2	22:38	9	37	T-2.8	10	21/4	6:00	24/4	3:08	9	35
Résumé	230					168	43	Résumé	230					168	41

Tableaux 5.15 & 5.16 – Proposition d'un nouveau calendrier d'irrigation, débit de campagne (g.) et mi-campagne (d.).

	Débit	Début	Fin	Riz	Adé- quation		Débit	Début	Fin	Riz	Adé- quation						
	[l/s]			[ha]	[%]		[l/s]			[ha]	[%]						
Amont	T-2.2	75	26/2	6:00	28/2	16:27	27	41	Amont	T-2.2	75	22/3	6:00	24/3	18:02	27	40
	T-2.3	80	26/2	6:00	28/2	15:45	30	42		T-2.3	80	22/3	6:00	24/3	17:17	30	40
	T-2.4	75	26/2	6:00	28/2	18:16	30	40		T-2.4	75	22/3	6:00	24/3	19:55	30	39
Aval	T-2.5	75	28/2	6:00	2/3	13:10	27	44	Aval	T-2.5	75	24/3	6:00	26/3	14:38	27	42
	T-2.6	65	28/2	6:00	2/3	18:01	24	40		T-2.6	65	24/3	6:00	26/3	19:42	24	39
	T-2.7	55	28/2	6:00	2/3	15:31	21	42		T-2.7	55	24/3	6:00	26/3	17:05	21	41
	T-2.8	35	28/2	6:00	1/3	14:18	9	74		T-2.8	35	24/3	6:00	25/3	15:22	9	72
Résumé	Amont	230					168	46	Résumé	Amont	230					168	45
	Aval	230								Aval	230						

Tableaux 5.17 & 5.18 – Calendrier d'irrigation pour une occupation totale en maïs, débit de campagne (g.) et mi-campagne (d.).

	Débit	Début	Fin	Maïs	Adé- quation		Débit	Début	Fin	Maïs	Adé- quation						
	[l/s]			[ha]	[%]		[l/s]			[ha]	[%]						
Amont	T-2.2	75	1/2	6:00	1/2	19:34	27	100	Amont	T-2.2	75	14/3	6:00	16/3	2:58	27	53
	T-2.3	75	1/2	6:00	1/2	19:56	30	100		T-2.3	75	14/3	6:00	16/3	4:38	30	51
	T-2.4	80	1/2	6:00	1/2	19:01	30	100		T-2.4	80	14/3	6:00	16/3	1:35	30	55
Aval	T-2.5	70	3/2	6:00	3/2	17:24	27	100	Aval	T-2.5	70	16/3	6:00	18/3	2:12	27	54
	T-2.6	65	3/2	6:00	3/2	18:01	24	100		T-2.6	65	16/3	6:00	18/3	0:50	24	56
	T-2.7	60	3/2	6:00	3/2	16:40	21	100		T-2.7	60	16/3	6:00	17/3	22:02	21	60
	T-2.8	35	3/2	6:00	3/2	12:37	9	100		T-2.8	35	16/3	6:00	17/3	11:34	9	81
Résumé	Amont	230					168	100	Résumé	Amont	230					168	59
	Aval	230								Aval	230						

Avec le regroupement de tertiaires, les doses à satisfaire passent des besoins de 2 jours aux besoins de 4 jours, l'adéquation est améliorée mais reste faible. Les déficits hydriques ne peuvent pourtant pas être attribués uniquement aux règles de distribution d'eau. La capacité restreinte des tertiaires et quaternaires joue aussi un rôle majeur.

Pour un tertiaire, alimentant 30 parcelles de riz quant à leurs besoins en eau pour quatre jours (376 m³/ha, il faut un débit de 100 l/s sans pertes pour être adéquat dans un laps de temps de 24 heures.

Les sols du bloc 2 ne sont pas trop aptes à la riziculture engendrant des vastes demandes en eau. Alors en admettant que le bloc soit occupé par une culture moins exigeante en eau, comme du maïs, des meilleurs taux de satisfaction des besoins peuvent être obtenus. Les tableaux 5.17 et 5.18 montrent les calendriers obtenus ainsi que leur adéquation.

5.4 Conclusion

La présente étude portait principalement sur l'évaluation du système irrigué de la Vallée du Kou et l'élaboration des stratégies d'amélioration de la performance de ce système. Il ressort que le système irrigué est peu efficace et que des nouveaux calendriers d'irrigation s'imposent. Pour les blocs 1 et 2, différents scénarii de gestion ont été développés à l'aide de SIMIS. Les calendriers proposés sont plus équitables que les calendriers actuels et permettent en plus d'emblaver de plus vastes superficies tout en respectant l'eau disponible. Il n'en demeure pas moins indispensable d'obtenir des coopératives un minimum de bonne volonté et de discipline pour s'ouvrir à ces éventuels changements.

En raison de causes multiples, l'incapacité des canaux à véhiculer le débit nécessaire afin de délivrer la dose d'eau nécessaire dans le temps prévu a été mise en évidence, résultant dans des efficacités inadéquates. Un désensablement et éventuellement un recalibrage des canaux en terre doit être considéré dans un futur proche.

A partir des années 90 les grands bailleurs de fonds ont cessé d'appuyer des projets d'irrigation de grande envergure. Plusieurs développeurs d'outils de gestion des périmètres (INCA, OMIS, ...) étaient forcés de les suivre, à cause du manque de financements attribués. SIMIS en fait malheureusement partie, programmé à l'époque dans un environnement Microsoft Access 98, l'outil souffre des incompatibilités avec des systèmes d'exploitations récents (Windows XP et Vista). Le moteur de calcul reste néanmoins solide et fiable, et la possibilité de visualiser les résultats obtenus à l'aide des tableurs et SIG va à la rencontre de l'«archaïsme» de l'outil.

Les calendriers d'irrigation développés tenaient compte des débits moyens constatés à la tête des différents blocs. Il a été montré que ces débits n'étaient pas en relation avec les superficies à alimenter. On propose qu'avec le temps de nouveaux calendriers soient élaborés avec des débits en tête plus équitables entre les différents blocs de l'ensemble du périmètre irrigué.



- Evapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant -

6

Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou⁸

L'évapotranspiration réelle est un terme clé du bilan hydrique. De la précision de son estimation, dépend celle du bilan hydrique. La précision du bilan hydrique est d'une importance capitale pour le bassin versant du Kou, situé dans le Sud-ouest du Burkina Faso. Les ressources en eau (très importantes) de ce bassin versant assurent l'alimentation en eau potable d'une population de 600 000 habitants, et l'irrigation de 3 200 ha de terres agricoles. C'est dans le cadre d'une vaste étude sur l'inventaire et la gestion des ressources en eau de ce bassin versant que cette étude a été initiée.

Le but de cette étude est l'estimation de l'évapotranspiration réelle sur le bassin versant du Kou. L'estimation de l'évapotranspiration réelle par analyse comparée de méthodes, est motivée par le fait qu'il n'existe aucune valeur de référence de l'évapotranspiration réelle sur le bassin versant.

Des méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle, issues de plusieurs approches, ont été sélectionnées en fonction des données de terrain et de télédétection existantes. Ces méthodes ont été testées avec un critère de convergence, comme seul moyen de validation. Certaines méthodes ont donné des résultats assez intéressants. Ces résultats ont été interpolés à l'ensemble du bassin versant et cartographiés sur la base de corrélations assez forte avec l'indice normalisé de végétation (NDVI).

6.1 Définition de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est une combinaison de deux processus : l'évaporation et la transpiration.

L'*évaporation*, ou plus précisément l'évaporation directe, désigne l'eau qui s'évapore à partir d'un sol (nu) ou d'un plan d'eau. Autrement, l'évaporation est un transfert de l'eau, à partir de la surface du sol, vers l'atmosphère.

La *transpiration* désigne la transpiration des végétaux à travers les stomates (micropores par lesquels l'eau s'évapore) de leurs feuilles. Les racines des végétaux captent l'eau qui se trouve dans le sol. Une fois parvenue aux feuilles, une partie de l'eau va s'évaporer à travers les stomates des feuilles. L'autre partie va servir à la photosynthèse.

6.2 Facteurs conditionnant l'évapotranspiration

⁸ Avec la contribution de F. Traoré & B. Tychon (ULg)

D'après Courault *et al.* (2005), l'évapotranspiration dépend principalement de deux éléments : la chaleur fournie par le rayonnement solaire et la quantité d'eau disponible dans le sol.

Du fait de la dépendance de l'évapotranspiration à la chaleur du sol, l'évapotranspiration est de ce fait liée au bilan d'énergie du sol qui s'exprime par l'équation suivante :

$$R_n = G + H + \lambda E$$

Avec : R_n , le rayonnement net à la surface du sol [W/m^2] ;

G , le flux de chaleur du sol [W/m^2] ;

H , le flux de chaleur sensible [W/m^2] ;

λE , le flux de chaleur latente [W/m^2].

L'évapotranspiration (en W/m^2) correspond au terme du flux de chaleur latente, λE (Wassenaar *et al.*, 2002 ; Bastiaanssen, 1995 ; Chemin, 2003).

On compte aussi parmi les facteurs qui conditionnent l'évapotranspiration, la résistance aérodynamique (r_a) au transfert de chaleur sensible et latente, et le stress hydrique (lié à la quantité d'eau dans le sol) car, lorsque l'eau se fait plus rare dans le sol, les stomates se referment et la transpiration ralentit.

6.3 Mesure et estimation de l'évapotranspiration

Il existe une grande variété de méthodes de mesure/estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle. Rose et Sharma (1984, in Rana et Katerji, 2000), proposent une classification de ces différentes méthodes en fonction d'un type d'approche adopté (Tableau 6.1).

Tableau 6.1 - Classification des méthodes de mesure/estimation de l'évapotranspiration à l'échelle de la parcelle (d'après Rose & Sharma, 1984)

	Approches	Méthodes
Mesure de l'évapotranspiration	Approche hydrologique	<i>Bilan hydrique</i>
		<i>Lysimètre</i>
	Approche micro météorologique	<i>Bilan d'énergie & rapport de Bowen</i>
		<i>Méthode aérodynamique</i>
Approche physiologie végétale	<i>Eddy covariance</i>	
	<i>Méthode du flux de sève</i>	
	<i>Systèmes de chambres</i>	
Estimation de l'évapotranspiration	Approche analytique	<i>Méthode de Penman-Monteith</i>
	Approche empirique	<i>Méthode du coefficient cultural K_c</i>
		<i>Modélisation du bilan hydrique</i>

Certaines des méthodes ci-dessus, sont plus convenables que d'autres pour des questions de précision ou de coût financier, ou sont particulièrement adaptées à des échelles d'espace et de temps données.

Néanmoins, ces méthodes pourraient très vite devenir caduques dans le cadre d'une estimation de l'évapotranspiration à grande échelle (bassin versant, par exemple). Selon

Chemin (2003), dans de telles conditions, le comportement particulier des cultures ainsi que leur variété impliquent la prise en compte d'une composante spatiale. Ainsi, ces dernières décennies ont vu l'arrivée de plusieurs méthodes d'estimation de l'évapotranspiration par télédétection, basées sur le calcul du bilan d'énergie et les échanges de flux entre le sol et l'atmosphère.

Courault *et al.* (2005) classe les méthodes d'estimation de l'évapotranspiration par télédétection en plusieurs catégories, à savoir :

- les *méthodes empiriques directes* où les données de télédétection sont directement introduites dans des modèles semi empiriques d'estimation de l'évapotranspiration (exemple : modèle simplifié de Jackson *et al.*, 1977),
- les *méthodes résiduelles du bilan d'énergie* combinant certaines relations empiriques avec des modules physiques. Exemples : SEBI⁹ (Menenti & Choudhury, 1993) ; SEBAL (Bastiaanssen, 1995), METRIC (Allen *et al.*, 2005).
- les *méthodes déterministes* généralement basées sur des modèles plus complexes tels que les modèles de transfert sol-végétation-atmosphère (SVAT) qui calculent les différents termes du bilan d'énergie,
- les *méthodes basées sur les indices de végétation*, ou méthodes inférentielles basées sur l'utilisation de la télédétection pour le calcul de facteurs de réduction tels que Kc, pour l'estimation de l'évapotranspiration. Exemples : WDI¹⁰ (adapté du CWSI de Jackson *et al.*, 1981), EVI (Huete, 1997 ; Choudhury *et al.*, 1994 ; Nagler *et al.*, 2005)

6.4 Méthodologie, Hypothèses, Matériels & Données

6.4.1 Approche méthodologique

L'approche méthodologique générale adoptée pour l'estimation de l'évapotranspiration sur le bassin versant du Kou, est un peu particulière, en ce sens que, quelle que soit la méthode utilisée, il n'existe aucun moyen objectif de validation. En effet, à ce jour, aucune mesure de l'évapotranspiration réelle n'existe sur le bassin versant du Kou. Certes, quelques auteurs (Bazongo, 2006 ; Lorenzini, 2007) ont tenté d'estimer l'évapotranspiration réelle, mais sans que leurs résultats n'aient vraiment été validés.

En l'absence d'un moyen de validation, Traoré (2007) propose l'utilisation d'un certain nombre de méthodes (modèles, formules) de calcul/estimation de l'évapotranspiration qui ont prouvé leur efficacité en d'autres lieux et dans des situations antérieures. Pour l'évaluation des différentes méthodes, Traoré (2007) propose l'utilisation d'un critère de convergence. Ainsi, une attention particulière est portée à la convergence, en termes de résultats, des différentes méthodes utilisées sur le bassin versant du Kou. Cela se traduirait par le fait que, si un certain nombre (non négligeable) de méthodes convergent vers un même intervalle de valeurs, alors il y aurait une probabilité plus ou moins forte que l'évapotranspiration réelle sur le bassin du Kou se situe dans cette plage.

En fait, ce critère serait une condition nécessaire pour l'évaluation des différentes méthodes utilisées. En l'absence de mesures de références, le fait d'utiliser plusieurs méthodes

⁹ SEBI : Surface Energy Balance Index ; SEBAL : Surface Energy Balance Algorithm for Land ; METRIC : Mapping Evapotranspiration at high Resolution and with Internalized Calibration

¹⁰ WDI : Water Stress Deficit Index ; EVI : Enhanced Vegetation Index

d'estimation reconnues sur un même set de données climatiques peut conduire à une convergence vers un intervalle de valeurs. Une méthode "bien évaluée" pour l'estimation de l'évapotranspiration sur le bassin versant du Kou, devrait nécessairement avoir des résultats dans cet intervalle (à déterminer).

Ce critère de convergence n'est pas, par contre, une condition suffisante pour l'évaluation concluante d'une méthode donnée, car plusieurs méthodes pourraient (pour une raison ou une autre) converger vers une valeur erronée d'évapotranspiration.

6.4.1.1 Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration retenues

Parmi les méthodes d'estimation d'évapotranspiration existantes, celles qui ont été retenues, sont les plus simples (et non simplistes). Ces méthodes simples, à notre sens, sont celles qui ne nécessitent pas trop de données de terrain ou de données de calibration, ou celles qui compensent le manque de mesures ou calibration de terrain, par des estimations issues de la télédétection et de l'imagerie satellitale basse résolution (MODIS, SPOT Vegetation).

L'estimation par la télédétection n'est pas toujours précise, mais elle vient palier au manque de mesures de terrain, comme c'est le cas du bassin versant du Kou.

Ainsi, les méthodes qui seront utilisées dans le cadre de cette étude, sont les suivantes :

- Méthode du bilan hydrique (exutoire Badara)
- Méthode du bilan d'énergie (résidu)
- Méthode FAO-56 Penman-Monteith
- Méthode FAO-Agrometshell
- Méthode de Thornthwaite
- Méthode originale de Penman-Monteith
- Méthode de calcul de l'évapotranspiration réelle du bilan d'énergie

Les formules détaillées qui sous-tendent ces méthodes d'estimation de l'évapotranspiration sont présentées dans l'étude de Traoré (2007).

6.4.1.2 Justification du choix des méthodes retenues

La **méthode FAO-56 Penman-Monteith** (Allen *et al.*, 1998) est la formule recommandée pour l'estimation de l'évapotranspiration de référence (ET₀). Même si elle ne calcule que l'évapotranspiration de référence (et non l'évapotranspiration réelle), il nous est apparu nécessaire d'y avoir recours afin d'estimer la valeur plafond que pourrait prendre l'évapotranspiration sur le bassin versant du Kou.

La **formule de Thornthwaite** est une formule empirique d'estimation de l'évapotranspiration potentielle, relativement simple à mettre en œuvre, dans la mesure où elle requiert peu de données (températures moyennes de l'air, notamment). L'un des inconvénients de la méthode de Thornthwaite est son pas de temps (mensuel) de calcul de l'évapotranspiration potentielle.

La **méthode du bilan hydrique** a été retenue pour sa simplicité relative, et plus encore pour sa logique qui veut que l'évapotranspiration soit estimée comme étant le résidu d'une équation qui tient compte des différents termes du bilan hydrique (P, Q, etc.). Il faudrait néanmoins

souligner que l'inconvénient de la méthode du bilan hydrique, est le risque de propagation d'erreurs faites au cours de l'estimation de certains termes, qui pourraient se répercuter sur le terme résidu (évapotranspiration, dans notre cas).

Le choix de la **méthode du bilan d'énergie**, obéit aux mêmes critères qu'à ceux de la méthode du bilan hydrique, en ce sens qu'elle est aussi une méthode "comptable" simple. A la différence de la méthode du bilan hydrique, la méthode du bilan d'énergie, dans notre cas, ne s'appuiera pas sur des mesures de terrain, mais plutôt sur des mesures de télédétection.

Agrometshell (AMS) est un modèle agrométéorologique développé par la FAO. Le calcul de l'évapotranspiration de référence dans AMS se fait suivant la méthode FAO56. Toutefois, elle se fait avec une certaine "souplesse" dans le choix des variables et paramètres à prendre en compte dans les calculs.

AMS permet également le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETa) à travers l'utilisation de coefficients cultureux, et d'autres paramètres agronomiques entrant dans le calcul du bilan hydrique à la parcelle et du rendement des cultures.

La **formule originale de Penman-Monteith** d'estimation de l'évapotranspiration réelle combine la méthode du bilan d'énergie avec la méthode aérodynamique qui estime le flux de chaleur latente à partir de différences de pression de vapeur et de vitesse de vent entre la surface évapotranspirante et l'atmosphère et qui tient compte de résistances aérodynamiques et de surface pour expliquer l'échange surface-atmosphère.

6.4.2 Hypothèse

Afin de mettre en œuvre certaines des méthodes qui seront utilisées dans le cadre de cette étude, il convient ici de formuler un certain nombre d'hypothèses.

Le calcul de l'évapotranspiration se fera sur une année hydrologique.

Le choix du calcul sur l'année hydrologique permettra de s'affranchir de l'estimation de certains termes complexes du bilan hydrique, comme le stock d'eau dans le sol. En choisissant l'année hydrologique, on fait implicitement l'hypothèse que le niveau du stock d'eau dans le sol varie très peu pour une même période, d'une année à l'autre (cycle hydrologique). Ce terme serait alors sensiblement nul ($\Delta S \sim 0$) et l'équation du bilan hydrique ne se résumerait plus qu'aux termes de la pluie, de l'évapotranspiration et du drainage.

6.4.3 Matériels

Un certain nombre d'outils ont été utilisés dans le cadre de ce travail. Ces outils, vont de l'imagerie satellitale, aux modèles de calcul de l'évapotranspiration, en passant par les Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et les logiciels de télédétection.

Ont été aussi utilisés, des systèmes de gestion de bases de données climatiques.

6.4.3.1 Logiciels et modèles utilisés

- Logiciels de télédétection et de traitement de données satellitaires : *RSI ENVI 4.3*, *WinDisp 5.1*, *MODIS Reprojection Tool (MRT)*, *VGT Extract*, *Crop VGT*
- Logiciel de systèmes d'information géographique : *ESRI ArcGIS Desktop 9.0*
- Modèles agroclimatologiques : *Agrometshell 1.57*

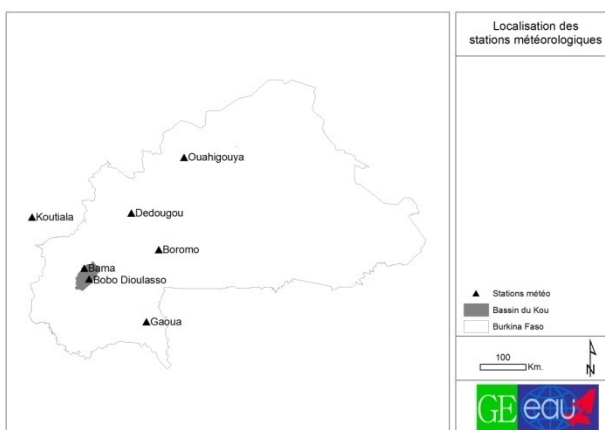
6.4.3.2 Base de données

La réalisation de cette étude repose sur l'utilisation d'un certain nombre de bases de données, assez diverses, mais complémentaires. Les données contenues dans ces bases sont climatologiques, agronomiques, piézométriques, cartographiques. On distingue les bases de données suivantes :

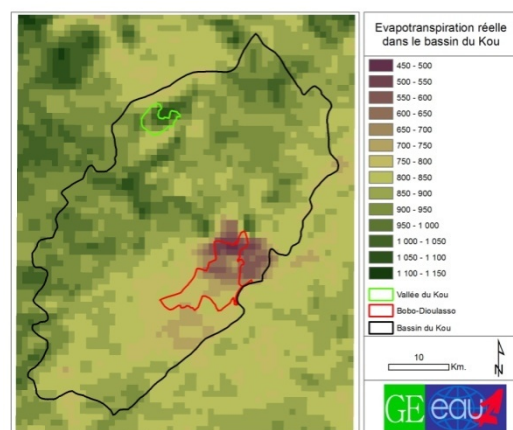
- Base de données du Projet GEeau
- Base de données de l'AGRHYMET (AP3A)
- Base de données de la FAO
- Base de données MODIS
- Base de données SPOT Vegetation
- Base de données du Projet "Eaux Souterraines Bobo"

6.5 Résultats et commentaires

Le calcul de l'évapotranspiration a concerné en plus des 2 stations météorologiques (Bobo-Aéroport et Bama) que comporte le bassin versant du Kou, 5 autres stations qui sont : Boromo, Dédougou, Gaoua, Ouahigouya, Koutiala (Mali). L'introduction de ces 5 autres stations (Carte 6.1) a eu pour but la multiplication du nombre de stations, afin de permettre une spatialisation des résultats de l'évapotranspiration, à travers l'utilisation de méthodes d'interpolation.



Carte 6.1 – Localisation des stations météorologiques de l'étude



Carte 6.2 - Exemple de cartographie de l'évapotranspiration réelle (Kc variable ; SEDI Inverse Distance ; NDVI moyen)

6.5.1 Résultats

Tableau 6.2 - Récapitulatif des résultats des calculs des évapotranspirations (potentielle et réelle) pour les 7 stations météorologiques

	Méthode	Condition	Bama	Bobo	Boromo	Dédougou	Gaoua	Ouahigouya	Koutiala
ET _o (mm)	FAO 56								
	Penman-Monteith	-	2149.71	1986.34	-	-	-	-	-
	Agrometshell	-	2097.57	2153.84	-	884.27	-	-	-
	Thornthwaite	-	1798.59	1934.91	-	2541.64	1814.81	2537.33	-
	Base de données GEeau	-	-	2047.6	-	-	-	-	-
	Normales	-	2180	1977	1924	-	1894	1769	2083
	Bilan hydrique	-	944.54	944.54	-	-	-	-	-
	Résidu du bilan d'énergie	-	-	-	-	-	-	-	-
ETR (mm)	ETR du bilan d'énergie	D = 6 kPa	2211.89	1691.05	-	-	-	-	-
		D variable	1311.61	1019.81	-	-	-	-	-
	Penman-Monteith	D = 6 kPa	2036.21	967.65	-	-	-	-	-
		D variable	1283.85	704.64	-	-	-	-	-
		K _c = 1	898	845	695	562	913	556	578
	Agrometshell	K _c variable	866	841	695	562	825	615	578

6.5.2 Interpolation et cartographie

Les calculs d'interpolation de l'évapotranspiration réelle s'appliquent aux résultats ponctuels obtenus pour les stations météorologiques de l'étude. On s'intéresse à une spatialisation de ces résultats, selon une méthode qui tient compte de la variabilité de l'occupation du sol. Pour ce faire, notre choix s'est porté sur les méthodes SEDI contenues dans le modèle *Agrometshell*.

Les méthodes SEDI (*Satellite Enhanced Data Interpolation* routines) sont des méthodes directes d'interpolation "assistée". Ces méthodes peuvent être appliquées à tout paramètre dont les valeurs sont sous forme de points distribués dans l'espace. Trois conditions doivent être remplies pour l'application des méthodes SEDI :

- la disponibilité de la variable (ou du paramètre) à interpoler, sous forme de points distribués dans l'espace (exemple : pluie, évapotranspiration, rendements)
- la disponibilité d'un paramètre de fond, sous forme d'un maillage spatial régulier, pour la même zone géographique (exemple : NDVI, altitude)
- une corrélation (positive ou négative) entre les deux paramètres ci-dessus mentionnés

Les méthodes SEDI renvoient en sortie, le paramètre interpolé sous forme d'image ou de grille de données. Les méthodes d'interpolations proposées dans le SEDI sont : la régression et les inverses de distances.

La variable considérée pour les interpolations est, l'évapotranspiration réelle calculée par la méthode d'estimation AMS, pour chacune de nos 7 stations sélectionnées. Comme paramètre (ou maillage) de fond, nous avons choisi des images NDVI SPOT Vegetation à 1 km, pour une zone couvrant l'ensemble de nos 7 stations météorologiques. Le choix du NDVI, tient au fait qu'à priori, une végétation saine (symbolisée par un bon NDVI) présente une assez bonne évapotranspiration.

Cette hypothèse est d'ailleurs confirmée par les travaux de Courault *et al.* (1992) dans le cadre d'une étude sur la détection des effets de sécheresse en France entre 1988 et 1990.

En fonction d'un coefficient cultural K_c fictif moyen appliqué au bassin versant, des méthodes d'interpolation choisies, des grilles d'interpolation considérées, nous avons obtenu les résultats d'évapotranspiration moyens (sur l'ensemble du bassin versant) suivants :

Tableau 6.3 - Résumé des résultats des différentes interpolations

Méthode ETR	Méthode d'interpolation	Grille d'interpolation	Bama (mm)	Bobo (mm)	Gamme	ETR moyenne annuelle du bassin versant du Kou (mm)	
K _c = 1	Aucune	-	898	845	-	-	
	SEDI Distance	Inverse	NDVI moyen ¹¹ 2000	1029.10	682.18	542 - 1163	943.89
			NDVI max ¹² 2000	1031.69	634.06	473 - 1123	908.10
	SEDI Regression		NDVI moyen 2000	1032.95	717.19	537 - 1118	914.54
			NDVI max 2000	897.13	615.18	461 - 1082	871.50
	Inverse Distance	-	840.82	840.82	802 - 845	836.84	
K _c variable	Aucune	-	866	841	-	-	
	SEDI Distance	Inverse	NDVI moyen 2000	1013.25	724.71	534 - 1148	927.30
			NDVI max 2000	946.38	590.84	465 - 1108	894.10
	SEDI Regression		NDVI moyen 2000	956.88	656.17	533 - 1083	885.78
			NDVI max 2000	899.22	537.4	460 - 1047	849.85
	Inverse Distance	-	824.66	830.10	788 - 832	822.49	

On obtient après interpolation, des résultats assez différents, en fonction des cas considérés. La tendance générale qui se dégage de ces résultats est que l'évapotranspiration réelle à Bama reste supérieure à celle de Bobo-Dioulasso, pour la plupart des méthodes utilisées (Carte 6.2). Toutefois, les écarts entre les évapotranspirations obtenues à Bama et à Bobo-Dioulasso par les méthodes d'interpolation SEDI, sont accentués (en moyenne 330 mm).

L'évapotranspiration réelle moyenne du bassin versant, calculée par les différentes méthodes d'interpolation, se situe dans une gamme allant de 822 mm à 943 mm. Cette dernière valeur d'évapotranspiration est assez proche de celle obtenue par la méthode du bilan hydrique, à savoir, 944 mm.

6.5.3 Commentaires

Les calculs de l'évapotranspiration potentielle à Bobo et Bama, par les différentes méthodes, ont donné des résultats plutôt satisfaisants dans la mesure où ces résultats oscillent autour des valeurs normales d'évapotranspiration pour ces deux stations. Les écarts autour des normales se situent entre -17.50 % (Thornthwaite à Bama) et 8.94 % (Agrometshell à Bobo).

Pour les stations météo de Gaoua et Ouahigouya, ces variations autour de la normale sont de -4.36 % à Gaoua et 30.28 % à Ouahigouya.

¹¹ Pour chaque pixel de l'espace, on considère la moyenne des valeurs de ce pixel pour les 36 décades de l'année

¹² Pour chaque pixel de l'espace, on considère le maximum des valeurs de ce pixel pour les 36 décades de l'année

Tableau 6.4 - Variations de l'ETo par rapport aux normales^(*)

	Bama	Bobo
FAO 56 Penman-Monteith	-1.39	0.47
Agrometshell	-3.78	8.94
Thornthwaite	-17.50	-2.13
Base de données GEeau	-	3.57

^(*)ETo normale à Bobo = 1977 mm
ETo normale à Bama = 2180 mm

Tableau 6.5 – Corrélation NDVI et évapotranspiration réelle

Corrélations	R
NDVI_moyen - ETR_Kc1	0.872
NDVI_moyen ETR_Kcvar	- 0.859
NDVI_max - ETR_Kc1	0.803
NDVI_max - ETR_Kcvar	0.744

Bien que l'objectif de ce travail ne soit pas le calcul de l'évapotranspiration potentielle, il importait de l'estimer pour deux raisons :

- l'évapotranspiration potentielle est l'évapotranspiration de la plante en absence de stress quelconque. De ce fait, l'évapotranspiration potentielle peut être considérée, dans la pratique, comme une valeur "plafond" de l'évapotranspiration réelle, qui elle, se produit assez souvent en condition de stress dans ce type de régions à climat soudano-sahélien. Pour la région de Bobo Dioulasso, on aura noté que seulement durant les mois de Juillet, Août, et dans une moindre mesure, Septembre, on pouvait observer une évapotranspiration potentielle, du fait des fortes pluviométries en ces périodes.
- l'évapotranspiration potentielle est une variable d'entrée pour le calcul de l'évapotranspiration réelle, pour beaucoup de modèles d'estimation de l'évapotranspiration réelle, dont Agrometshell.

L'évaluation des résultats du calcul de l'évapotranspiration réelle est relativement moins aisée, dans la mesure où on ne connaît, pour aucune de nos stations, des valeurs normales. On peut tout juste garder pour repère les "plafonds" que constituent les valeurs d'évapotranspiration potentielle, et aussi les totaux pluviométriques pour nos stations où l'évapotranspiration annuelle ne dépasse pas la pluviométrie, en général.

Notre valeur de référence aurait pu être l'évapotranspiration réelle donnée par la méthode du bilan hydrique, mais nous devons relativiser cette valeur qui dépend à la fois de l'exactitude des hypothèses faites pour la simplification des autres termes du bilan, et aussi de l'exactitude des valeurs de drainage à Badara, qui ne sont probablement pas exemptes d'erreurs.

Si nous supposons tout de même que le résultat donné par la méthode du bilan hydrique est indicatif de l'ordre de grandeur de l'évapotranspiration sur le bassin versant du Kou, alors nous pouvons mettre en doute les résultats obtenus par les méthodes dérivées du bilan d'énergie qui donnent en général des valeurs supérieures à la pluviométrie annuelle sur le bassin du Kou. Le constat est peut être plus mitigé quant à la méthode Penman-Monteith qui, par exemple, à Bama a donné une valeur assez proche de celle du bilan hydrique. Les autres résultats sont, soit beaucoup plus élevés, soit beaucoup plus faibles.

Les méthodes Agrometshell ont donné des résultats assez intéressants en ce sens que les évapotranspirations à Bama et Bobo étaient déjà inférieures à la pluviométrie annuelle. Mais elles sont dans leur majorité, plus basses que la valeur donnée par la méthode bilan hydrique, sans qu'on ne puisse toutefois conclure. On ne peut conclure, car si les hypothèses simplificatrices faites sur les autres termes du bilan s'avéraient fausses et que le drainage à

Badara était sous-estimé, on aurait peut être une valeur d'évapotranspiration plus faible par la méthode bilan hydrique. Cette valeur pourrait être alors de l'ordre de celles obtenues par Agrometshell.

Nous ne ferons pas ici un classement absolu des différentes méthodes que nous avons utilisées, dans la mesure où, elles ne sont toutes que des méthodes d'estimation basées sur des approches différentes. Toutefois, nous pouvons constater les résultats assez divergents (ou aberrants) de certaines méthodes, telles que celle du bilan d'énergie. Plusieurs raisons pourraient être à l'origine de ces résultats :

- la qualité des données d'entrée. Les données issues de la télédétection étaient parfois assez mauvaises, en comparaison des valeurs indicatives mesurées de certains paramètres
- les hypothèses et/ou approximations faites sur certaines variables
- dans une moindre mesure, les méthodes elles-mêmes, en ce sens qu'elles n'ont pas toutes été validées sous toutes les latitudes et peuvent être sujettes à des estimations biaisées

Les méthodes basées sur le bilan d'énergie sont, à ce jour encore, critiquables dans la mesure où elles se basent sur une estimation de la surface du sol (T_s) qui n'est pas toujours fiable du fait de l'agrégation des données satellitaires.

D'après Courault et al (1998), le caractère instantané des mesures de température de surface (1 à 2 passages du satellite par jour) induit des extrapolations journalières erronées, du fait des fortes variations climatiques auxquelles sont exposés les sols (variation de vent, humidité, etc.).

A propos des résultats des interpolations, on pourrait faire les observations suivantes :

- Les plus fortes valeurs d'évapotranspiration réelle se rencontrent essentiellement dans les fonds de vallée, les zones inondables et les zones irriguées.
- Les valeurs de l'évapotranspiration réelle sont de l'ordre de 1000 à 1200 mm, au niveau du périmètre irrigué de la vallée du Kou, et d'autres zones irriguées du bassin versant.
- Les valeurs d'évapotranspiration, dans les fonds de vallée ou le long du Kou (en aval, après la station de Nasso), sont de 980 à 1100 mm.

On constate alors que dans les zones ci-dessus citées, il arrive que l'évapotranspiration réelle dépasse la pluviométrie moyenne annuelle du bassin versant. En dehors de ces zones, pour certains points on observe aussi une évapotranspiration réelle supérieure à la pluviométrie. Ces observations, sont toutefois assez rares.

6.6 Discussion générale

6.6.1 A propos de la corrélation entre l'indice de végétation et l'évapotranspiration réelle

Nous avons recherché des corrélations entre les valeurs de NDVI et d'évapotranspiration réelle pour les 7 stations météorologiques de l'étude, le but étant de vérifier, a posteriori, la relation supposée entre le NDVI et l'évapotranspiration. Une relation forte entre ces deux

variables pourrait aider au suivi régulier de l'évapotranspiration réelle sur le bassin versant du Kou.

En effet, il serait intéressant à partir des images SPOT Vegetation (ou MODIS) délivrées à un pas de temps décadaire, de pouvoir estimer l'évapotranspiration réelle sur le bassin versant.

Pour les 7 stations, les corrélations obtenues sont affichées dans le Tableau 6.5. Les coefficients de corrélation obtenus sont assez bons. Dans le cadre d'une étude plus poussée sur la relation NDVI-ETR, il serait intéressant d'établir une relation mathématique entre ces deux variables, basée sur une solide corrélation.

6.6.2 A propos des approches et méthodes d'estimation

Il ressort de cette étude que l'estimation de l'évapotranspiration réelle est assez complexe, du fait qu'on ne maîtrise pas toujours tous les mécanismes moteurs de ce phénomène, ou que ces mécanismes diffèrent considérablement d'un milieu à un autre.

Afin de cerner cette variabilité au sein des mécanismes qui déclenchent ou favorisent l'évapotranspiration, plusieurs approches ont été développées par un certain nombre d'auteurs : *approche hydrologique, approche micro météorologique, approche physiologie végétale, approche analytique, approche empirique.*

Cette multiplicité des approches témoigne de la complexité du phénomène de l'évapotranspiration.

A propos des différentes approches et des méthodes qui leur sont rattachées, il est remarquable également de voir que les méthodes sont adaptées à des conditions particulières.

Parmi les méthodes micro météorologiques, une méthode semble, a priori, adaptée aux climats semi-arides, il s'agit de la méthode Eddy covariance. Cette méthode a d'ailleurs permis l'estimation de l'évapotranspiration réelle, par Bagayoko (2006), sur un bassin versant de l'Est du Burkina Faso. Dans le cadre d'une recherche avancée sur l'estimation de l'évapotranspiration réelle, un tel dispositif pourrait être testé sur le bassin versant du Kou.

La méthode d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'aide des coefficients culturaux mérite également d'être approfondie, car elle pourrait fournir de meilleurs résultats après une classification de l'occupation du sol sur le bassin versant du Kou. Un problème se poserait toutefois, c'est celui de l'évapotranspiration réelle dans les zones urbanisées (Bobo Dioulasso, par exemple). On ne sait pas quel coefficient cultural attribuer à de telles zones. D'après une étude menée en Australie par Floyd (2001), l'évapotranspiration réelle annuelle des zones faiblement urbanisées se situerait aux environs de 60% de la pluviométrie annuelle.

La méthode du rapport de Bowen, basée sur un ratio entre la différence de pression de vapeur et la différence de température entre deux points de l'espace pris au-dessus de la végétation semble également être une solution pour l'estimation de l'évapotranspiration réelle. Le seul inconvénient de l'application de cette méthode sur le bassin versant du Kou serait la taille non-négligeable de ce bassin qui occasionnerait un temps de mesure assez long pour en couvrir l'entière superficie.

On voit clairement ici, qu'à l'échelle d'une grande superficie comme celle du bassin versant du Kou, caractérisée par une occupation du sol assez détaillée, il convient pour une meilleure estimation, de mettre en œuvre deux ou trois méthodes à la fois, toutes adaptées aux types d'occupation du sol.

6.7 Conclusion

De par sa complexité, l'estimation de l'évapotranspiration réelle sur notre bassin versant, a nécessité l'utilisation de 5 méthodes au total. L'emploi de ces méthodes ou approches différentes, avait pour but, de palier à l'absence de valeurs de référence d'évapotranspiration sur notre bassin versant. Pour ce faire, dans l'approche méthodologique, un critère de convergence que devaient nécessairement remplir les méthodes jugées "bonnes", a été introduit.

Beaucoup de difficultés ont été rencontrées au cours de l'application de la plupart des méthodes d'estimation/calcul, en raison de l'état des données d'entrée et/ou paramètres. Dans certaines des bases de données utilisées dans cette étude, beaucoup de lacunes ou des données de mauvaise qualité ont été recensées dans les séries chronologiques. Exemple : hydrométrie et piézométrie du bassin versant du Kou.

La télédétection à basse résolution (MODIS & SPOT Vegetation, principalement) a été utilisée comme solution palliative à la faiblesse des données de terrain, mais les produits de la télédétection utilisés sont, eux aussi, critiquables à plus d'un titre : périodes d'acquisition non-uniformes, manque de documentation pour l'exploitation de certains produits MODIS, présence de "bruits" induits par de probables couvertures nuageuses lors des acquisitions, etc. La liste des défaillances liées, en général, à la qualité des données n'est pas exhaustive, mais au-delà, l'aspect fondamental quant à la qualité des données d'entrée, est qu'elle influence considérablement la qualité des sorties des modèles et méthodes de calcul (cf. calcul par la méthode du bilan d'énergie).

Cette étude n'a pas pu apporter de réponses plus fines aux mécanismes à la base de l'évapotranspiration réelle sur notre bassin versant, mais on peut supposer (sous réserve d'une étude spécifique sur la question) que cette évapotranspiration reste conditionnée par la chaleur apportée par le rayonnement solaire, la disponibilité en eau (sol et plante) et par les résistances aérodynamique et stomatique.

Les estimations de l'évapotranspiration réelle sur le bassin versant du Kou issues de cette étude, sont sujettes à caution, dans la mesure où elles reposent, soit sur des hypothèses qui n'ont pas toutes été vérifiées (dans cette étude et dans d'autres, sur le même site), soit sur des données d'entrée dont les estimations ne sont pas exemptes d'erreurs.

Toutefois, sur la base du critère de convergence et des valeurs-seuils fixés au départ, à savoir, une évapotranspiration réelle annuelle inférieure à la pluviométrie moyenne annuelle, les résultats obtenus sont assez intéressants, notamment avec la méthode du bilan hydrique et la méthode des coefficients culturaux d'Agrometshell.



- Bilan d'eau du bassin du Kou -

7

Elaboration du bilan d'eau du bassin du Kou & analyse critique des principaux composants¹³

L'objectif de cette étude est la réalisation d'un bilan d'eau du bassin versant du Kou. Cela a nécessité l'utilisation du modèle hydrologique HYSIM. La mise en œuvre de ce modèle, réalisée sur une année hydrologique (année 2000), et particulièrement sur le sous bassin versant en amont de Badara a révélé la relative complexité de ce bassin versant due à la présence de nombreux processus hydrologiques actifs en son sein: ruissellement de surface, contribution de la nappe aux débits d'écoulement, précipitations, évapotranspiration, infiltration.

Les résultats obtenus sont satisfaisants et indiquent que pour un apport d'eau annuel de 1027,7 mm, à l'exutoire 57% provient de la pluie et 43% provient de la nappe, à travers le bassin 77% (863,8 mm) est perdu par évapotranspiration, 13% (151,5 mm) participe au ruissellement de surface et 10% (112,4 mm) s'infiltré. Une validation avec une autre année est programmée.

7.1 Introduction

L'eau est présente dans toutes les activités humaines et constitue un atout important dans le développement d'un pays. D'autant plus vrai pour une région soudano-sahélienne comme le Sud-ouest du Burkina Faso, qui bien que théoriquement relativement bien favorisé par la disponibilité et la qualité de certains paramètres climatiques et naturels (biodiversité), connaît dans la réalité des contraintes de divers ordres ; dont une forte variabilité spatiotemporelle, une forte croissance démographique, et les activités y liées, résultant en des pénuries d'eau.

Il convient par conséquent de gérer les ressources en eau du bassin de façon intégrée afin de garantir la durabilité de l'écosystème et de l'eau qu'il fournit. Cette étude consiste à réaliser le bilan d'eau du bassin versant du Kou permettant à terme une meilleure connaissance du niveau des ressources en eau du bassin, préambule à une meilleure gestion de ces ressources.

Les objectifs spécifiques peuvent être résumés comme suit : i) évaluer et analyser les différents termes mesurables du bilan d'eau du bassin versant du Kou. Cela consistera à reconstituer sur une période donnée les flux d'eau entrant et sortant du bassin ; ii) estimer et analyser les différents termes non mesurables à l'aide d'une modélisation hydrologique, et iii) établir le bilan hydrologique à l'échelle du bassin versant du Kou et analyser sa fermeture.

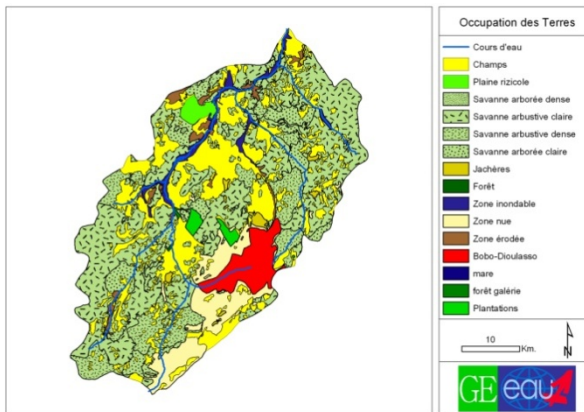
7.2 Zone d'étude

¹³ Avec la contribution de J. Wellens (APEFE), F. Traoré (ULg), M.-J. Niamian (2iE), H. Karambiri (2iE), M. Diallo (AEDE), D. Dakouré (OE), N.F. Compaoré (VREO), J. Derouane (MRW-DGRNE) & B. Tychon (ULg).

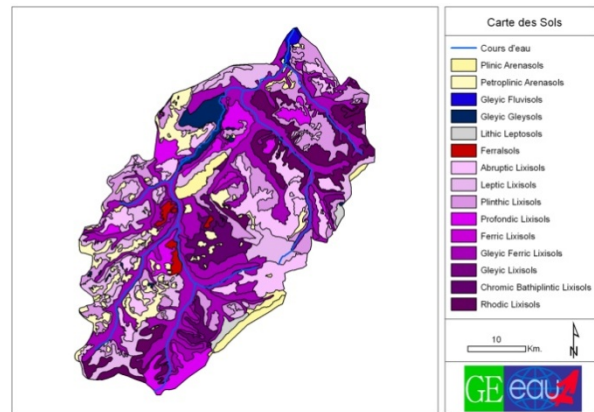
Le bassin du Kou (1.823 km²), situé dans le Sud-ouest du Burkina Faso, est l'espace géographique qui contient le système d'eau associé à la rivière Kou. On y trouve des cours d'eau permanents ainsi que des lacs, des mares et des sources (Guingette, Peso, ...). Les aménagements hydro-agricoles couvrent une superficie totale de près de 3.200 ha ; il s'agit pour l'essentiel des périmètres privés formant la ceinture maraîchère et horticole de Bobo-Dioulasso, seconde ville du pays, et du grand périmètre de 1.200 ha réalisé par l'Etat à Bama et spécialisé dans la production du riz. La végétation naturelle est dominée par la savane arbustive à arborée (Carte 7.1).

Les sols du secteur d'étude sont des sols peu évolués d'érosion sur matériaux gravillonnaires, des vertisols sur alluvions ou matériaux argileux, des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés sur matériaux sableux, sablo-argileux et argilo-sableux et des sols ferralitiques (Carte 7.2).

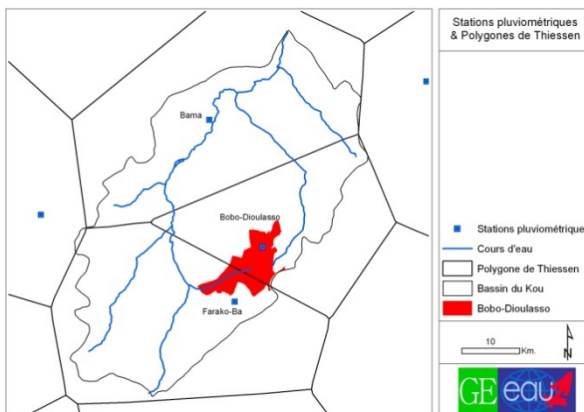
Le bassin se situe à la limite sud de la zone climatique tropicale soudano-sahélienne. Le climat est caractérisé par l'alternance de deux saisons bien distinctes, une saison des pluies (mi-mai à octobre) et une saison sèche. La pluviométrie moyenne annuelle varie de 900 à 1.500 mm, tandis que l'évaporation potentielle moyenne annuelle est de l'ordre de 2.000 mm.



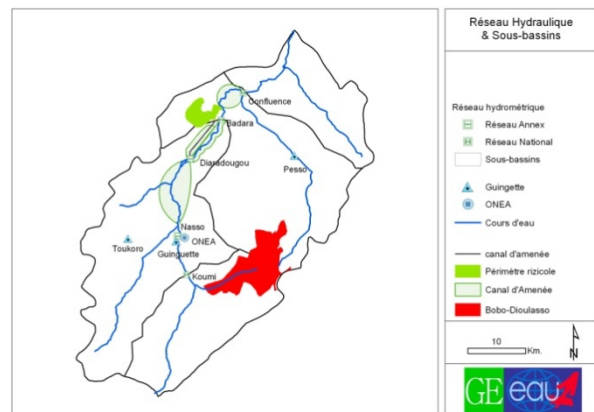
Carte 7.1 – Carte d'occupation des terres.



Carte 7.2 – Carte des sols.



Carte 7.3 – Stations pluviométriques avec leurs polygones de Thiessen.



Carte 7.4 – Stations hydrométriques et leurs sous-bassins.

7.3 Bilan d'eau et ces principaux termes

7.3.1 Principe du bilan d'eau

Le principe du bilan d'eau est fondé sur une équation de continuité qui consiste à comparer la quantité d'eau totale arrivant dans un bassin versant avec la quantité d'eau totale sortant et s'inscrit dans sa forme la plus générale : $\sum \text{entrée} - \sum \text{sorties} = \Delta R$. Avec ΔR la variation des réserves en eau qui cumule les variations de stockage de l'eau dans le sol et la variation des stockages superficiels (dépressions, retenues d'eau, etc.).

Vu la complexité du bassin versant, marqué par une non disponibilité de certaines données, les principaux termes possibles du bilan d'eau sont subordonnés aux données existantes (données qui reflètent la réalité d'une manière implicite). Il s'agit notamment de (i) la pluviométrie et l'évapotranspiration qui reflètent les phénomènes climatologiques et (ii) le débit, mesuré à l'exutoire qui révèle le fonctionnement hydrologique du bassin versant. On aboutit ainsi à l'équation du bilan d'eau suivante pour une surface :

$$P = R + ET_R + I + \Delta R_S$$

Avec : P : précipitation [mm] ;
R : écoulement de surface (ruissellement)
et écoulement souterrain [mm] ;
ET_R : évapotranspiration réelle [mm] ;
ΔR_S : stockages superficiels [mm].

7.3.2 Précipitations

Etant donné la forte variabilité de la pluie dans l'espace (Bro Carl, 2001 ; Wellens *et al.*, 2003), plusieurs stations hydrométriques ont été prises en compte afin d'obtenir une estimation convenable de la quantité d'eau réellement tombée sur la zone d'étude. La détermination des pluies moyennes a été effectuée à partir de la méthode de polygones de Thiessen ; les stations de Bobo-Dioulasso, Bama et Farako-Ba ont été retenues (Carte 7.3). L'homogénéité de ces séries de données a été démontrée par Wellens *et al.* (2003).

Une analyse fréquentielle des précipitations annuelles et pondérées sur les trois stations a été effectuée à l'aide de Rainbow (Raes *et al.*, 1996). Pour une période commune de 1989 à 2005, l'an 2000 (année retenue pour l'étude) est considéré comme humide avec une fréquence de dépassement de 20 %. Pour la période étudiée, la pluviométrie varie entre 680 mm/an et 1128 par an, avec une pluviométrie pondérée de 1075 mm pour l'an 2000.

7.3.3 Evapotranspiration réelle

Dans les pays chauds, l'évapotranspiration est, après la précipitation, le terme le plus important du bilan hydrologique (Roche, 1963). Ce terme fait en même temps partie des termes les plus complexes dans la mesure où il n'y a aucun suivi de l'évapotranspiration réelle sur le bassin versant du Kou.

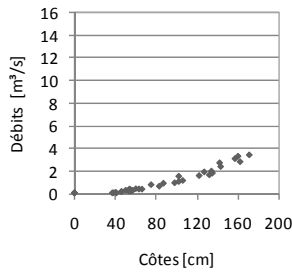


Figure 7.1 – Courbe de tarage pour la station de la Confluence Niamé-Baoulé

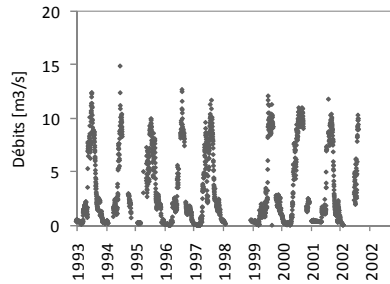


Figure 7.2 – Fluctuations des débits au niveau de la Confluence Niamé-Baoulé.

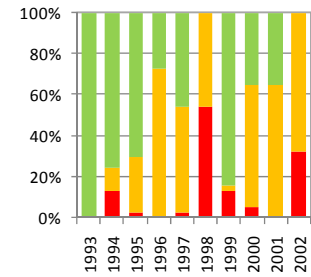


Figure 7.3 – Disponibilité des données (Niamé-Baoulé) ; rouge = absente ; orange = incomplète ; vert = complète.

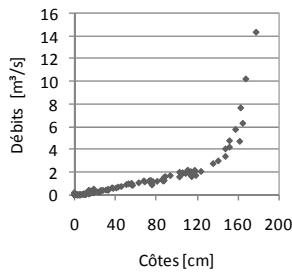


Figure 7.4 – Courbe de tarage pour la station de Badara

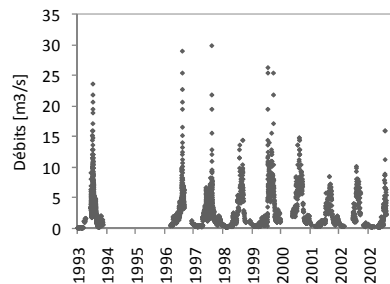


Figure 7.5 – Fluctuations des débits au niveau de Badara.

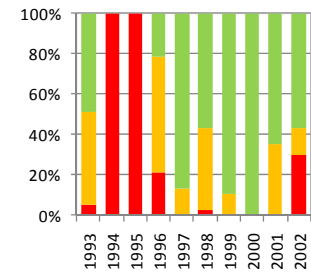


Figure 7.6 – Disponibilité des données (Badara) ; rouge = absente ; orange = incomplète ; vert = complète.

L'évapotranspiration réelle peut être modélisée à partir de l'évapotranspiration potentielle, cette dernière correspond à l'évapotranspiration dans des conditions optimales pour la végétation dans lesquelles l'eau n'est pas un facteur limitant.

Une estimation de l'évapotranspiration réelle a été faite sur le bassin versant du Kou à l'aide d'AgroMetshell (Traoré, 2007). Une interpolation des données d'évapotranspiration venant de plusieurs stations météorologiques dans les alentours a été améliorée à l'aide des images NDVI de Spot Végétation pour l'année 2000 (méthode SEDI : Satellite Enhanced Data Interpolation). L'étude a estimé l'évapotranspiration réelle annuelle du bassin à 860 mm.

7.3.4 Ruissellement

Les données hydrométriques sur le bassin versant du Kou souffrent à présent de plusieurs lacunes du point de vue de leur qualité et quantité (Mamadou, 2006). Les figures 7.3 et 7.6 présentent les disponibilités en débits mesurés pour la période 1993-2002 pour les stations hydrométriques à la Confluence Niamé-Baoulé et à Badara (Carte 7.4).

Normalement, la dernière station hydrométrique en aval, la confluence Niamé-Baoulé, devrait être choisie comme exutoire pour le bilan d'eau du bassin versant. En saison hivernale, cette station n'est plus accessible pour cause d'inondations rendant tout jaugeage impossible. La courbe d'étalonnage (Figure 7.1) montre l'absence des jaugeages au moment des crues. On est par conséquent obligé de délimiter le bassin versant à la zone en amont de la station de Badara.

Les figures 7.4 à 7.6 affichent la relative bonne qualité et quantité de données hydrométriques pour la station de Badara. Il est important de noter que les débits mesurés à ce niveau ne sont pas représentatifs de la lame d'eau écoulée à cause des prélèvements effectués à la prise d'eau de Diaradougou pour l'alimentation du périmètre irrigué de la Vallée du Kou. Ces prélèvements ont été ajoutés aux débits enregistrés à Badara.

En plus de ces débits, il faudrait tenir compte du débit de base des sources de Nasso, dites 'Guinguette', comme débit initial (2,7 m³/s).

7.3.5 Infiltration

L'infiltration qualifie le transfert de l'eau à travers les couches superficielles du sol, lorsque celui-ci reçoit une averse ou s'il est exposé à une submersion. L'eau infiltrée remplit en premier lieu les horizons superficiels et percole par la suite sous l'action de la gravité. Il peut se former une ou plusieurs nappes avec des écoulements.

Les mécanismes de l'infiltration étant peu connus dans le bassin versant du Kou, leur caractérisation a nécessité l'utilisation du modèle hydrologique HySim. La fermeture du bilan d'eau servira à contrôler la validité des données qui ont servi à l'établir.

7.3.6 Variation de stock

Ce terme, correspondant à la variation des stockages superficiels d'eau, est assez dynamique dans le cas du Bassin du Kou, vu leurs fortes exploitations. La variation de stock peut être obtenue suite à un bilan des points d'eau. La difficulté réside dans le fait que les variations des niveaux d'eau de ces stockages sont peu connues.

Cependant, en considérant un pas de temps annuel pour le calcul du bilan d'eau, on peut faire l'hypothèse que d'une année à l'autre les réserves en eau n'évoluent pas trop et par conséquent, ce terme s'annule.

7.4 Modélisation hydrologique

HySim (Manley, 2003) est un modèle conceptuel de simulation hydrologique. Il est à cheval entre les modèles physiques basés sur l'analyse et la quantification des phénomènes physiques se produisant dans un bassin versant et les modèles 'empiriques' à base de régressions multiples où la physique n'intervient que pour suggérer des variables explicatives.

7.4.1 Principe de fonctionnement

Les processus hydrologiques au sein du bassin versant sont schématisés par les transferts entre six réservoirs virtuels en communication. La capacité des réservoirs, le taux maximum de transfert entre eux et les équations qui commandent les processus de transfert sont définis par des paramètres indépendants du temps. A l'opposé, les volumes des réservoirs et les taux de transfert varient en fonction du temps.

La représentation schématique à la figure 7.7 illustre la façon dont les réservoirs sont raccordés entre eux et permet de mieux comprendre le fonctionnement du modèle (plus de détail : Wellens *et al.*, 2007).

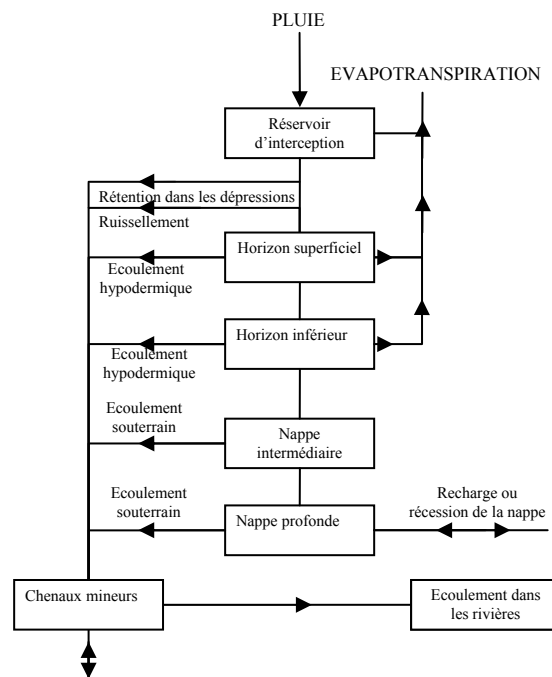


Figure 7.7 - Schéma de fonctionnement du modèle

7.4.2 Variables d'entrée et de sortie

Les principales variables d'entrée sont la pluviométrie moyenne et l'évapotranspiration. Comme variables de sortie on a : l'infiltration, les contenances des différents réservoirs, la percolation, le ruissellement, etc..

7.4.3 Paramétrage et optimisation du modèle

La détermination de la plupart des paramètres est faite sur la base des indications du manuel d'utilisation de HySim. Un SIG a été utilisé pour calculer les valeurs pondérées et spatialisées de certains paramètres par manque de module SIG dans le modèle.

L'optimisation des paramètres a été faite par une procédure de 'essai et erreur'. A partir des paramètres par défaut ou calculés, les résultats simulés ont été comparés avec les données observées. Si nécessaire, des paramètres ont été légèrement ajustés, tout en respectant la réalité du terrain, afin d'arriver à des comparaisons satisfaisantes.

Les paramètres hydrauliques ont été obtenus à l'aide des données topographiques disponibles et sur la base des observations de terrain. Ils concernent les caractéristiques géométriques des chenaux.

La largeur en gueule est 30 m, celle au plafond 15 m. La profondeur est 2 m, la longueur 40 km, la largeur du lit majeur est 100 m et la pente longitudinale 2 ‰. Le coefficient de rugosité

de Manning pour du chenal est 0,033 et celui du lit majeur 0,06 (Arcement et Schneider, 1990).

Comme *réservoir d'interception*, une valeur de 2 mm est raisonnable pour les prairies tandis que, pour des zones de forêt, on pourra dépasser 10 mm. La carte d'occupation du sol du bassin montre une hétérogénéité avec une prédominance de zones arbustives (66%) suivies de plantations (19%), champs (13%) et plaine rizicole (8%). On retient de ce fait une valeur de 8 mm.

La *proportion de zone imperméable* correspond à la proportion du bassin versant que l'on peut considérer comme imperméable y compris les routes, les aires naturelles ayant cette propriété ainsi que la rivière même. Une valeur de 0,02 est typique pour des zones rurales, due à la forte présence des sols lourds et souvent peu perméables ; une valeur de 0,11 a été retenue.

Le *temps de montée des petits chenaux* est le temps mis par les affluents des canaux mineurs en amont du bassin versant pour atteindre une valeur maximale au niveau de la station hydrométrique. Wellens *et al.* (2007) ont calculé 60 h.

La *profondeur racinaire* peut varier entre 500 et 1.000 mm, et peut aller à 5.000 mm dans une zone boisée. Une profondeur de 4.000 mm a été considérée.

L'*indice granulométrique* contrôle la réponse du sol et est déterminé en fonction de la texture du sol (Manley, 2003). La carte pédologique de la zone d'étude montre une hétérogénéité avec : 8,5% argileux, 5,5% argilo-sableux, 23% limoneux, 40,9% limono-argileux, 1% limono-sableux et 21,1% sablo-limoneux (Wellens *et al.*, 2004). En considérant la texture la plus dominante (limono-argileux), on obtient une valeur de 0,12.

La *perméabilité verticale à saturation à la limite entre l'horizon superficiel et l'horizon inférieur* varie entre 5 mm/h (sols argileux) jusqu'à 200 mm/h (sols sableux). On retient 120 mm/h.

Le taux de transfert d'humidité de sol vers la nappe est contrôlé par la *perméabilité verticale à saturation à la base de l'horizon inférieur*. Sa valeur change entre 1 mm/h (sols lourds) et 100 mm/h ou plus (sols sableux). Une valeur de 12 mm/h, proche de la valeur par défaut, a été utilisée.

Une valeur de 12 mm/h, presque la valeur par défaut, a été prise pour la *perméabilité horizontale à saturation de l'horizon superficiel et l'horizon inférieur*.

Sachant qu'en période d'étiage, la contribution du ruissellement cesse en premier et l'écoulement se prolonge après l'arrêt de l'écoulement hypodermique, il est admis que le débit du cours d'eau provient d'une nappe.

En admettant que la période relative de basses eaux de la zone d'étude s'échelonne généralement de septembre à avril, le coefficient de récession de la nappe correspond à la pente du logarithme obtenue à partir du report des débits de cette période en fonction du temps. Ce qui conduit à un *coefficient de récession de la nappe* de 0,95.

Des facteurs de correction de la pluie et de l'évapotranspiration potentielle permettent de corriger des éventuelles sous- ou surestimations de ces valeurs. Vu la bonne qualité de ces

données d'entrée un facteur de 1 a été intégré pour la pluviométrie et de 1,1 pour l'évapotranspiration, afin de mieux aligner l'évapotranspiration réelle simulée avec celle obtenue par Traoré (2007).

7.4.4 Résultats

Lorsqu'il s'agit de juger de la qualité d'une simulation, il est fait appel à des fonctions objectives ou fonctions de critères qui permettent d'estimer globalement sous forme d'un seul nombre, l'écart entre les sorties calculées et les débits observés. Plusieurs fonctions critères sont utilisées pour l'appréciation des modèles pluies-débits (Fortin *et al.*, 1971 ; Nash et Sutcliffe, 1970 ; etc.).

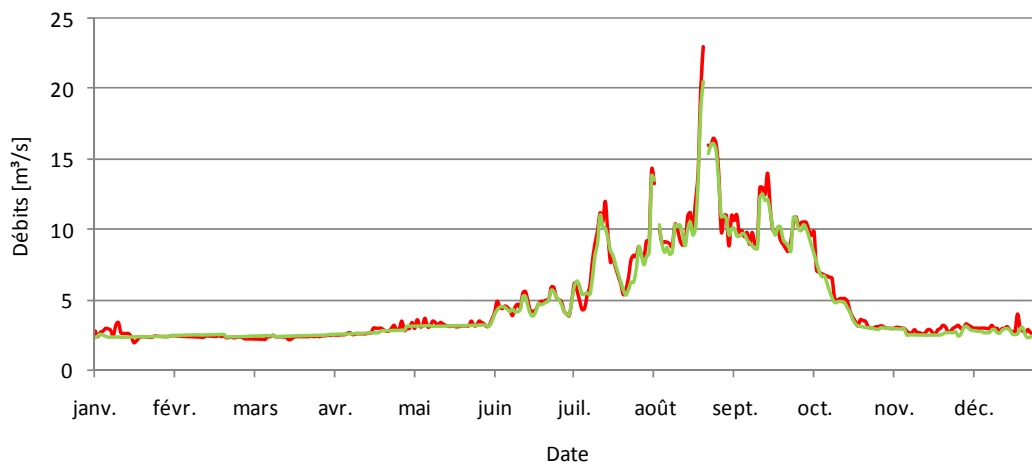


Figure 7.8 – Mise en évidence des corrélations entre débits simulés (rouge) et observés (vert).

Pour ce qui est de cette étude, on a utilisé dans un premier temps, un critère visuel qui consistait à représenter sur un graphique les valeurs observées des débits en fonction des valeurs simulées. Ensuite, ce critère visuel a été quantifié par la fonction critère de Nash. Il est en effet de l'avis de nombreux auteurs que, c'est la fonction qui permet d'obtenir les meilleurs résultats (Servat et Dezetter, 1990 ; Dezetter, 1991).

Sachant que $C_{Nash} \in]-\infty, 1]$, on considère qu'un modèle hydrologique donne des résultats acceptables si la valeur du critère de Nash est supérieure à 0,8 (Monfodji, 2004).

Une comparaison des débits simulés et observés est mise en évidence à travers la figure 7.8. Le critère de Nash appliqué aux débits donne un coefficient de 0,98 ; soit une très bonne restitution des débits. Cependant, l'observation visuelle montre une légère tendance à surestimer les débits.

7.5 Bilan d'eau

7.5.1 Etablissement du bilan d'eau

Pour l'établissement du bilan d'eau, on raisonne en hauteur d'eau d'où l'utilisation de la hauteur de lame d'eau équivalente. On appelle déficit d'écoulement, la différence entre

précipitation moyenne et la quantité d'eau sortie du bassin. Les équations ci-dessous mettent en exergue les principaux termes du bilan d'eau de l'année 2000. Les termes issus de la modélisation sont l'évapotranspiration réelle et l'infiltration.

$$\begin{aligned}\text{Bilan d'eau} &= \sum \text{entrées} - \sum \text{sorties} ; \\ &= P - (ET_R + I + R) ; \\ &= 1072,1 - (863,8 + 112,4 + 151,5) \\ &= -55,6 \text{ mm}\end{aligned}$$

Le résultat négatif traduit que le bilan est déficitaire avec un excès d'eau. Cet excès d'eau pourrait provenir d'une contribution de la nappe au débit d'écoulement. Des études théoriques et expérimentales ont prouvé la contribution des eaux souterraines à l'écoulement du Kou (Dakouré, 2003 ; Derouane et Dakouré, 2006).

On peut conclure que sur le bassin versant du Kou et pour l'année 2000, 57 % des débits à l'exutoire provenaient de la pluie et 43% de la nappe. Quant aux sorties, 77 % étaient perdus par évapotranspiration, 13 % sont évacués par ruissellement de surface et 10 % se sont infiltrés. La question qui se pose est de savoir si les valeurs trouvées sont réalistes.

7.5.2 Discussions et analyses

Cette analyse des résultats obtenus se justifie par le fait que le bilan d'eau n'est pas un moyen d'évaluation de données inconnues, mais plutôt un moyen pour valider les données qui ont servi à l'établir.

Au vu du bilan d'eau global, l'évapotranspiration réelle est le terme le plus dominant avec une valeur de 863,8 mm. La dominance de ce terme sur le bassin versant du Kou trouve son explication dans la forte exploitation agricole. Les prélèvements massifs d'eau pour l'irrigation augmentent l'évapotranspiration au détriment des écoulements (Lorup *et al.*, 1998). Auparavant, l'évapotranspiration du bassin du Kou pour l'année 2000 avait également été estimée à 860 mm à l'aide de la télédétection (Traoré, 2007). La faible différence de 4 mm fait conclure que l'évapotranspiration réelle a été bien restituée par le modèle.

Si l'on confronte la valeur de l'infiltration à la valeur de la pluie, on constate qu'elle est faible (10 % de la pluie). Ceci est dû à la nature de la zone d'étude, dominée par une texture peu perméable (argilo-limoneuse). En plus, pendant la saison sèche, l'évapotranspiration laisse peu de possibilité à l'infiltration. La demande évaporative est suffisamment forte pour permettre une remontée capillaire considérable (Raes et Deproost, 2003).

Le coefficient d'écoulement est également faible (inférieur à 8%), même s'il remonte pendant la période pluvieuse (Niamian, 2008). Le bassin du Kou n'est pas très urbanisé et compte de ce fait un nombre de micro-dépression où l'eau de ruissellement (et une partie de la pluie) est piégée. Une partie de cette eau s'infiltrer et l'autre partie s'évapore. D'après l'OCDE (2001), des terres labourées présentent aussi des capacités de rétention assez élevées.

Comme énoncé précédemment, des études théoriques et expérimentales ont déjà signalé qu'il existe une contribution de la nappe à l'écoulement du Kou. Une recharge variant entre 0 et 200 mm par an dans les terrains gréseux a été avancée par le CIEH (CIEH/USAID, 1987 cité par Dakouré, 2003). Dakouré (2003) avait obtenu une recharge annuelle variant de 0 à

127 mm à l'issue de l'utilisation des modèles hydrologiques à réservoir. Une valeur de recharge de 166 mm a été acquise par IWACO (1989).

La contribution de la nappe, 55,6 mm, obtenue dans le cadre de cette étude est plus ou moins en accord avec ces études antérieures. De façon générale la connaissance des mécanismes de la recharge reste encore sommaire sur le bassin versant du Kou dans la mesure où aucune étude n'a pu donner une valeur de référence à cette recharge.

Le constat général est qu'aucun terme du bilan ne semble être sous- ou surestimé. Le bilan d'eau établi peut être considéré comme bouclé de manière satisfaisante. Les résultats obtenus ont été analysés et se situent dans des proportions acceptables.

7.6 Conclusion

Les processus hydrologiques actifs au sein du bassin versant du Kou sont nombreux : ruissellement de surface, contribution de la nappe, évapotranspiration, infiltration, ... Il en résulte donc un fonctionnement complexe. Puisque certains termes ne pouvaient pas être estimés directement, il a été trouvé nécessaire d'utiliser la modélisation hydrologique.

Le modèle hydrologique HySim utilisé dans le cadre de cette étude se veut le plus complet possible et de ce fait, tente d'intégrer un maximum de paramètres afin de recréer au mieux les conditions qui prévalent dans un milieu naturel tel qu'un bassin versant.

La mise en œuvre de ce modèle a donné des résultats acceptables et sûrement intéressants. Il s'est dégagé une importance de l'évapotranspiration et une faiblesse de l'infiltration dans le cycle hydrologique de ce bassin versant. Cela traduit que le bassin versant du Kou est marqué par une nette surexploitation. Cette situation paraît problématique pour le futur. Les résultats obtenus restent donc un état des lieux pour les décideurs.

Selon Klemes (1988) l'équation du bilan d'eau peut être considérée comme l'un des 'Rubik Cubes' les plus difficiles à résoudre de la nature, pour lequel les facettes changent de couleur, de forme, de taille au fur et à mesure qu'elles sont déplacées par différentes formes, et dans lequel même les bases structurales changent au cours du temps.



- Etude de sensibilité : BUDGET -

8

Etude de sensibilité des paramètres de sol mesurés et bibliographiques de BUDGET¹⁴

La présente étude analyse la compatibilité entre des données pédologiques issues des analyses de terrain et de laboratoire, et celles d'une carte morpho-pédologique pour l'outil de simulation du bilan d'eau à la parcelle BUDGET. Avec la disponibilité des cartes pédologiques, météorologiques et d'occupation des parcelles, il devient intéressant de s'interroger sur une possibilité de spatialisation du modèle.

Après un calage satisfaisant, l'adaptabilité du modèle a été étudiée par une simulation des résultats du calage appliquée à la carte morpho-pédologique. Les résultats étaient en général recevables, mais certains cas ont nécessité une reclassification par l'opérateur.

Dans une perspective de spatialisation, la cartographie des types de sol doit être la plus fiable possible. La plupart des parcelles agricoles de la région tombe malheureusement dans la zone frontalière de deux groupes morpho-pédologiques. Vu la relative grande variation en sorties de simulation constatée pour une éventuelle attribution de sol erronée, la recherche vers une délimitation plus précise s'avère nécessaire.

8.1 Introduction

A l'heure actuelle, environ 3.600 km³ d'eau douce sont prélevées pour la consommation humaine (FAO, 2002) dans différentes régions du monde. Parmi tant de secteurs économiques, l'agriculture est le plus grand consommateur d'eau avec un pourcentage d'utilisation d'environ 80% de la ressource eau. La relation eau-agriculture est une relation qui existe depuis longtemps. L'utilisation de l'eau à des fins agricoles a été pratiquée depuis des millénaires.

Au Burkina Faso, la variabilité climatique a favorisé le développement de l'irrigation (surtout par gravité) afin d'assurer la stabilité de la sécurité alimentaire qui dépendait en grande partie de l'agriculture pluviale. Aujourd'hui la problématique de l'eau dans le bassin du Kou, situé en zone agro-climatique favorable à l'agriculture dans la partie Sud-ouest du Burkina Faso est au cœur des préoccupations des décideurs, et même des usagers. La forte pression agricole et l'émergence des tensions sociales étaient inévitables vu la disponibilité de la ressource et la forte migration des riverains.

La résolution de cette problématique liée à la ressource en eau s'est faite par la mise en place de partenariats pour assurer l'évaluation de l'irrigation au niveau des aménagements hydro agricoles et surtout pour planifier une bonne gestion de la ressource en eau par l'utilisation d'outils de modélisation.

¹⁴ Avec la contribution de J. Wellens (APEFE), F. Traoré (ULg), M. Sagna (2iE), J. Talla (2iE) H. Yacouba (2iE), M. Diallo (AEDE), D. Dakouré (OE), N.F. Compaoré (VREO), J. Derouane (MRW-DGRNE) & B. Tychon (ULg).

La présente étude vise à spatialiser l'outil de simulation de bilan d'eau à la parcelle, BUDGET, ayant déjà fait ses preuves en quelques points de la zone d'étude (Raes *et al.*, 2006). L'objectif général est d'analyser la compatibilité des données d'entrée pédologiques obtenues par des mesures détaillées sur le terrain et des analyses au laboratoire avec celles publiées dans la bibliographie. Il comprend les étapes suivantes :

- ✓ la calibration du modèle BUDGET afin de reproduire au mieux les résultats des observations de teneur en eau ;
- ✓ la vérification de la calibration du modèle en utilisant les données pédologiques fournies par la carte morpho-pédologique du BUNASOLS (Carte 8.1, Bureau National des Sols) en vue d'une spatialisation du modèle. Avec la disponibilité des cartes pédologiques, météorologiques et d'occupation des parcelles pour l'ensemble du bassin, il devient intéressant de s'interroger sur une possibilité de généralisation du modèle BUDGET au niveau régional (Figure 8.1) ;
- ✓ l'analyse de sensibilité de ces groupes de données d'entrée en comparaison avec la réponse du modèle

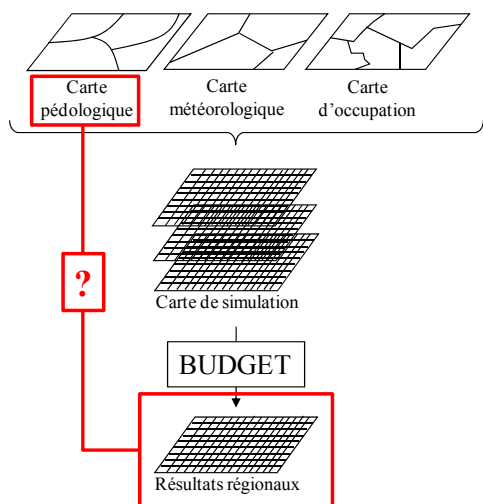
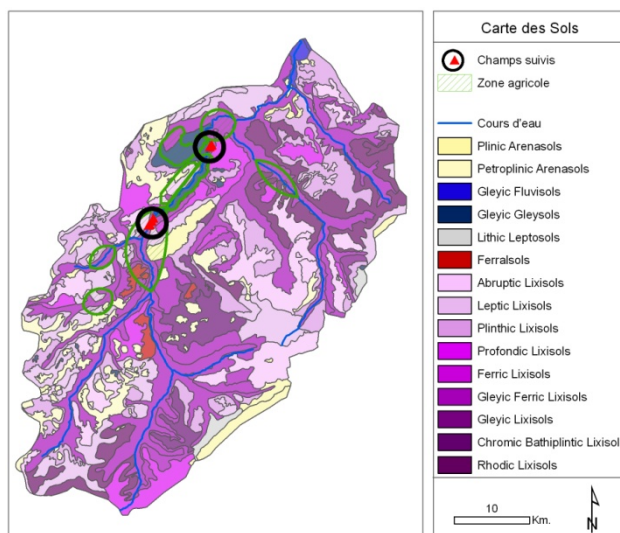


Figure 8.1 - Processus de spatialisation du modèle BUDGET.



Carte 8.1 - Positionnement des parcelles d'essai par rapport à la carte morpho-pédologique.

8.2 Matériel et méthodes

8.2.1 Bilan d'eau

Le logiciel BUDGET est un modèle de bilan d'eau qui permet d'évaluer les efficacités en irrigation ainsi que l'élaboration des calendriers d'irrigation au niveau de la parcelle (Raes, 1982 ; 2002). Le modèle comprend plusieurs sous-modèles qui décrivent les mouvements verticaux de l'eau et les processus de l'extraction de l'eau par les racines dans un profil se drainant librement.

Les différents processus pris en compte par le logiciel sont :

- l'infiltration à la suite de la précipitation et/ou de l'irrigation;
- l'écoulement superficiel ;

- le drainage interne ;
- la percolation profonde;
- l'évaporation ;
- et la transpiration.

BUDGET calcule donc pour chaque jour le stock d'eau dans un profil du sol, affecté par des entrées en eau et par des pertes en eau. Pendant des périodes de manque d'eau, les pertes relatives de récoltes sont estimées à l'aide des coefficients de réponse du rendement (K_y). Ces valeurs pour les différents stades de croissance sont données par Doorenbos et Kassam (1979). En sélectionnant les critères de la dose d'irrigation (quantité) et le moment de l'irrigation (intervalle), BUDGET peut également générer des schémas d'irrigation.

Les données climatologiques nécessaires sont des données pluviométriques et des données concernant l'évapotranspiration de référence journalières, décennales moyennes ou mensuelles moyennes qui sont toutes transformées en données journalières au moment de la simulation suivant la méthodologie de Gomma (1983). En spécifiant et en caractérisant la culture retenue, le logiciel propose des paramètres par défaut pouvant être modifiés si nécessaire.

Le profil du sol peut être composé de différentes couches, chacune ayant des caractéristiques spécifiques. BUDGET contient un jeu complet de caractéristiques par défaut qui peut être sélectionné et adapté aux différents types de couches du sol.

L'estimation de la quantité de pluie perdue par l'écoulement superficiel est basée sur la méthode du "US Soil Conservation Service", notamment le 'Curve number method' (USDA, 1964 ; Steenhuis et al., 1995).

L'infiltration et le drainage interne sont décrits par une fonction de drainage exponentielle (Raes *et al.* 1982), qui tient compte de l'humidité initiale et des caractéristiques de drainage des différentes couches du sol. Des observations faites sur le terrain ont montré que la fonction de drainage imite l'infiltration et le drainage interne de façon réaliste (Raes, 1982 ; Feyen 1987 ; Wiyo, 1999).

A l'aide de la procédure du double coefficient de 'culture' (Allen *et al.*, 1998), on calcule le taux d'évaporation du sol et de la transpiration de la culture. L'évaporation effective du sol est dérivée de l'humidité du sol et de la couverture végétale (Ritchie, 1972 ; Belmans *et al.*, 1983).

L'extraction effective de l'eau par les racines est finalement décrite en terme 'sink' (Feddes *et al.*, 1978 ; Hoogland *et al.*, 1981 ; Belmans *et al.*, 1983) qui tient compte de la distribution des racines et de la teneur en eau dans le profil du sol.

Le sous-modèle de réponse des cultures à la disponibilité en eau est la partie la plus difficile à développer. A l'aide d'une fonction polynomiale (Kipkorir *et al.*, 2002), les valeurs de K_y sont converties en indices de sensibilité pour le modèle multiplicatif de Jensen (1968). En utilisant la procédure, présentée par Tsakiris (1982), l'effet du stress hydrique sur le rendement relatif pendant une courte période de temps, est dérivé de l'évapotranspiration relative à l'aide du modèle empirique de Jensen (1968).

Un autre avantage du modèle BUDGET est entre autres l'extraction de l'eau différentielle en fonction de la profondeur et du temps. Ainsi la profondeur des racines variable pendant la saison de croissance est scientifiquement correcte.

En calculant la teneur en eau dans un profil du sol en fonction de l'apport et la perte d'eau pendant la période de simulation, le logiciel est apte à :

- estimer le manque d'eau dans des conditions pluviales,
- estimer la réponse des rendements à l'eau,
- concevoir des schémas d'irrigation,
- évaluer des stratégies d'irrigation.

Le logiciel BUDGET a été sélectionné en raison de sa simplicité et de sa robustesse (Raes *et al.*, 2006), et du nombre limité de variables à introduire. Il existe bien des modèles déterministes, mais pour fonctionner correctement, ils exigent des paramètres d'entrée très détaillés qui ne sont pas toujours disponibles quant il s'agit de recherche en milieu rural ('on-farm').

8.2.2 Suivi des teneurs en eau

L'étude concerne 7 parcelles de maïs et de choux dans les localités de Diaradougou et de Badara, la ceinture maraîchère et fruitière de Bobo-Dioulasso. Durant la période de décembre 2006 à avril 2007, des informations concernant l'agriculture et l'irrigation y ont été collectées.

Afin de suivre les teneurs en eau des parcelles, des échantillons de sols remaniés ont été prélevés à différentes profondeurs et à plusieurs reprises tout au long de la campagne agricole. En fonction du type de culture pratiquée, la profondeur maximale atteinte par carottage, imposée par la zone racinaire, est de 60 cm au niveau des parcelles de choux et de 90 cm pour les champs de maïs. En raison de leur importance pratique, les teneurs en eau gravimétriques ainsi obtenues ont été converties en teneur en eau volumique. Les teneurs en eau totale dans un profil ont été obtenues par la règle des surfaces de trapèzes (Wellens *et al.*, 2004).

L'humidité à la surface n'a jamais été mesurée vu qu'elle est trop sujette aux conditions ambiantes (insolation, évaporation, écoulement, ...). Vu que les échantillons n'ont jamais été pris lors d'une journée d'irrigation, les teneurs en eau superficielle sont supposées être inférieures aux valeurs observées à 30 cm et jamais inférieures au point de flétrissement pour être en accord avec la réalité du terrain, étant donné qu'on est en pleine campagne irriguée. Trois règles pour l'estimation de la teneur en eau à 0 cm sont proposées :

$$\theta_{30,i} < \theta_{pf} \Rightarrow \theta_{0,i} = \theta_{0,i-1}$$

$$\frac{\theta_{30,i}}{2} < \theta_{pf} \Rightarrow \theta_{0,i} = \theta_{0,i-1}$$

$$\frac{\theta_{30,i}}{2} > \theta_{pf} \Rightarrow \theta_{0,i} = \theta_{0,i-1}$$

avec θ_{pf} teneur en eau au point de flétrissement et $\theta_{0,i}$ la teneur en eau à 0 cm au jour i .

8.2.3 Paramètres hydro-agricoles

Les calendriers d'irrigation rapportés par les agriculteurs, les mesures de débit à la sortie des tubes des motopompes et la connaissance des durées d'irrigation ainsi que la superficie des parcelles, ont donné les doses d'application. Les calendriers de cultures ont livré l'information sur les dates de semis, de récolte et sur le déroulement de la saison de croissance par champ.

L'évapotranspiration de référence est calculée selon la méthode de Penman-Monteith modifiée (Allen *et al.*, 1998) à l'aide du logiciel ETo (Raes, 2007). Les données de base ont été fournies par la station météorologique de l'INERA à Bama, située à proximité des sites.

Les paramètres des cultures sont présentés dans les tableaux 8.1 à 8.4 : périodes de croissance, périodes de sensibilité, coefficients culturaux (K_c), profondeurs racinaires (Z_r), facteurs de vidage de l'eau de sol (p) et coefficients de rendements (K_y). L'information est issue de Doorenbos et Kassam (1979) et Allen *et al.* (1998) ; les durées des différentes périodes ont été normalisées afin de coïncider avec les constats du terrain.

Tableau 8.1 - Phases de croissance et paramètres culturaux pour le maïs.

Période de croissance	Longueur [jours]	K_c [-]	Z_r [m]	p [-]
Initiale	20	0,17 - 1,10	0,3	0,55
Développement	30	... - 1,12	0,3 - 0,95	0,55
Mi-saison	30	1,12	0,95	0,55
Saison tardive	13	1,12 - 0,32	0,95	0,55
	93			

Tableau 8.2 - Phases de sensibilité et coefficients de rendements du maïs.

Période de sensibilité	Longueur [jours]	K_y [-]
Installation	16	0,7
Végétative (tôt)	11	0,4
Végétative (tard)	11	0,5
Floraison	16	1,5
Formation du produit	32	0,5
Mûrissement	7	0,2
	93	1,25

Tableau 8.3 - Phases de croissance et paramètres culturaux pour les choux.

Période de croissance	Longueur [jours]	K_c [-]	Z_r [m]	p [-]
Initiale	25	0,7	0,1	0,45
Développement	37			0,45
Mi-saison	31	1,05	0,6	0,45
Saison tardive	9	0,95		0,45
	102			

Tableau 8.4 - Phases de sensibilité et coefficients de rendements des choux.

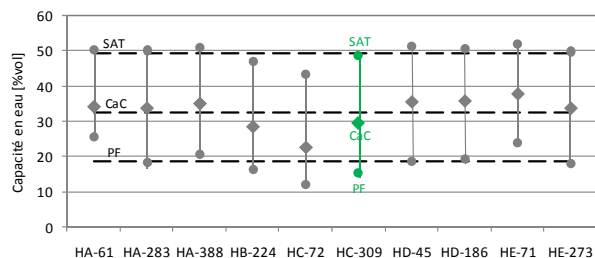
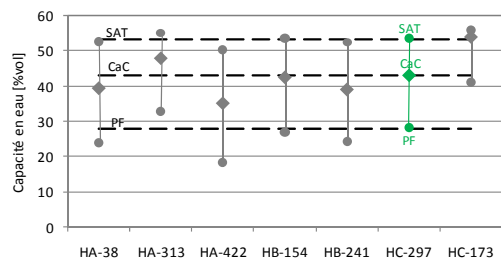
Période de sensibilité	Longueur [jours]	K_y [-]
Installation	15	0,2
Végétative (tôt)	10	0,2
Végétative (tard)	15	0,2
Floraison	22	0,2
Formation du produit	31	0,45
Mûrissement	9	0,6
	102	0,95

8.2.4 Pédologie

La carte morpho-pédologique (BUNASOLS, 2002) montre la présence de deux types de sol pour la zone de l'étude : FLTC et HPGS.

Des sols ferrugineux lessivés à taches et concrétions (FLTC ; lixisol gleyique ferrique (WRB, 1999) sont souvent rencontrés dans les plaines alluviales et dans les cuvettes de décantation. Ils sont poreux. La texture est limoneuse au premier horizon et limono-argileuse au-delà.

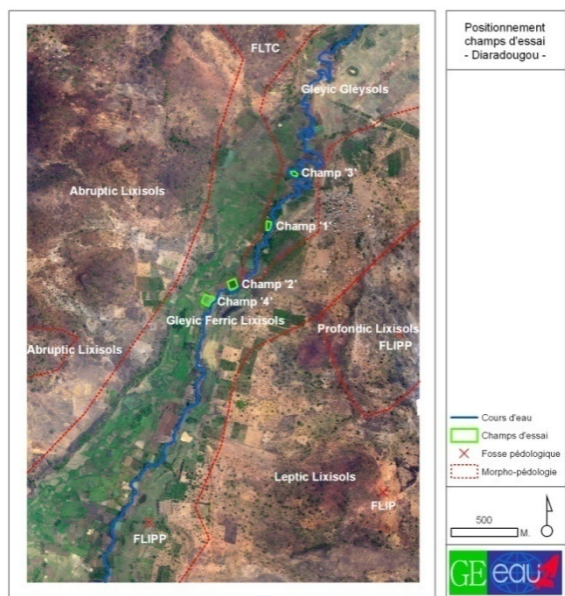
Des sols hydromorphes peu humifères à pseudogley de surface (HPGS ; gleyisol eutrique (WRB, 1999)) sont des sols dont l'évolution est dominée par l'effet d'un engorgement temporaire d'une partie ou de la totalité du profil. Ce sont des sols profonds et peu poreux. La texture est limono-argileuse au-dessus et argileuse dans le reste du profil.



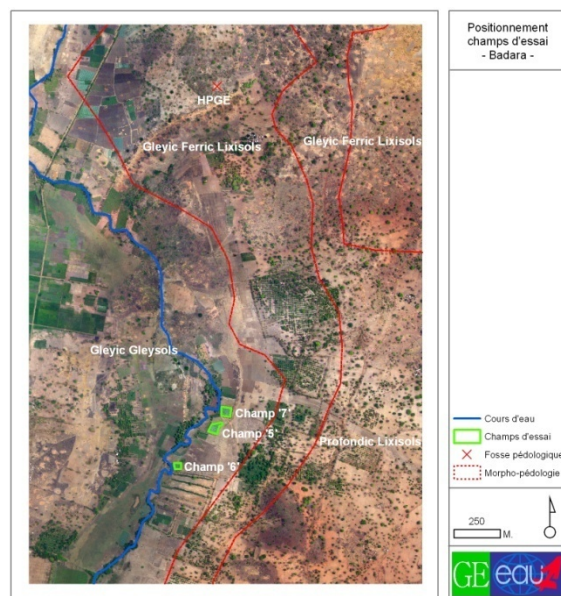
Figures 8.2 & 8.3 - Caractéristiques hydrauliques des sols (points) dans la zone d'étude (BUNASOLS, 2002) par rapport à leurs moyennes (lignes discontinues) et les sols retenus (vert) : HPGS (gauche) et FLTC (droite).

Plusieurs résultats analytiques du profil sont disponibles pour la région de la zone d'étude. Les figures 8.2 et 8.3 présentent les caractéristiques hydrauliques des sols HPGS et FLTC dans la région par rapport à leurs moyennes. Les profils retenus pour la 'vérification' (en vert) ont été choisis à proximité des champs d'essai. Leurs caractéristiques sont en plus représentatives pour ces deux groupes de sols.

Des analyses granulométriques ont été effectuées à plusieurs profondeurs et à plusieurs reprises pour les différentes parcelles d'essai ; à 30, 60 et 90 cm de profondeur pour les champs de maïs et à 30 et 60 cm pour ceux occupés par des choux. Les pourcentages en sable, limon et argile ainsi obtenus, ont permis de calculer les caractéristiques hydrauliques à l'aide des fonctions de pédotransfert (Saxton *et al.*, 1986).



Carte 8.2 - Emplacement des champs d'essai pour la zone de Diaradougou par rapport à la carte morpho-pédologique.



Carte 8.3 - Emplacement des champs d'essai pour la zone de Badara par rapport à la carte morpho-pédologique.

Des prises de points GPS ont permis de localiser les champs d'essai sur la carte morpho-pédologique (cartes 8.1, 8.2 & 8.3). La figure 8.4 montre les caractéristiques granulo-

métriques des champs d'essai et des sols de référence sur le triangle de texture. L'appartenance d'un sol de champ d'essai à un sol de référence est indiquée par une ligne de connexion. On constate des écarts des sols des champs d'essai 2 et 6 par rapport aux sols de référence.

Les figures 8.5 et 8.6 montrent les relations entre les caractéristiques hydrauliques des champs d'essai et les sols de référence. Les champs appartenant géographiquement à la zone morphopédologique représentée sont coloriés en vert. La problématique de compatibilité des champs 2 et 6 se confirme : les caractéristiques du champ 2 s'approchent mieux des valeurs du sol de référence HPGS, malgré son appartenance géographique au groupe FLTC. L'inverse est à constater pour le sol du champ 6.

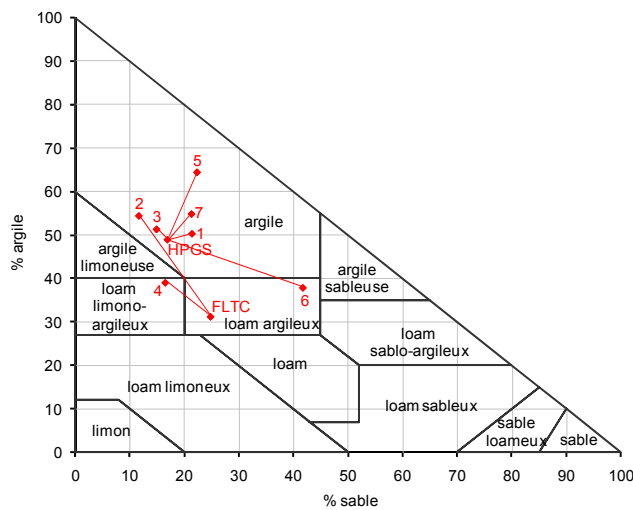
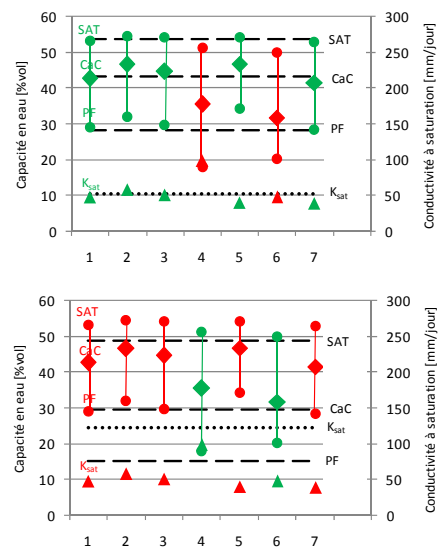


Figure 8.4 - Triangle de texture contenant les caractéristiques granulométriques des champs d'essai et des sols de références, et leurs appartenances (traits rouges).



Figures 8.5 & 8.6 - Caractéristiques hydrauliques des champs d'essais (points) par rapport aux sols de références (lignes discontinues) : HPGS (haut) et FLTC (bas); (vert : appartenance géographique).

8.2.5 Critères de qualité

L'évaluation des simulations (calage et vérification) est faite par le calcul des critères de la 'qualité de l'ajustement' ('goodness of fit'), selon trois critères différents (Green and Stephenson, 1986 ; Loague and Green, 1991) :

- l'erreur quadratique sur la moyenne (RMSE), qui est un estimateur statistique montrant les sur- ou sous-estimations des simulations ;
- la corrélation (R^2), qui donne la variance des simulations par rapport à la variance totale observée. R^2 varie de 0 à 1, avec les valeurs plus élevées représentant la bonne relation linéaire entre les valeurs observées et simulées ;
- l'efficacité du modèle (EF) indiquant la robustesse du modèle. EF varie de $-\infty$ à 1, avec les plus hautes valeurs indiquant une meilleure concordance. Si l'efficacité est négative, les observations sont mieux que les résultats de la simulation. Il est exprimé par :

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

avec O_i et P_i respectivement les valeurs observées et simulées à la date i , n la taille de l'échantillon et \bar{O} la moyenne des valeurs observées.

8.2.6 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité peut être considérée comme une investigation systématique de la réaction d'un modèle vis-à-vis des valeurs extrêmes ou des changements drastiques de sa structure (Kleijnen, 1998). En bref, l'analyse permet d'étudier l'action de chaque perturbation des variables d'entrée sur les variables de sortie et à mesurer leur degré de sensibilité afin d'hierarchiser l'importance des paramètres du modèle.

Dans ce cas, l'impact du changement des profils de sol sur les résultats simulés sont étudiés à travers les variations en K_{sat} et du stock d'eau total disponible (TAW) dans la zone racinaire. Tous les autres paramètres sont maintenus à leurs valeurs de référence. L'effet de chaque modification est analysé au niveau de deux sorties du modèle : la teneur en eau totale et l'estimation de rendement. Un pourcentage de variation et un indice de sensibilité sont calculés pour chacune des sorties :

$$\%variation = \left(\frac{S_2 - S_1}{S_1} \right) \times 100$$

$$IS = \frac{\frac{S_2 - S_1}{\bar{S}}}{\frac{E_2 - E_1}{\bar{E}}}$$

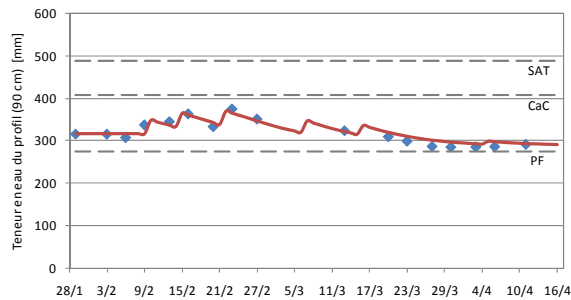
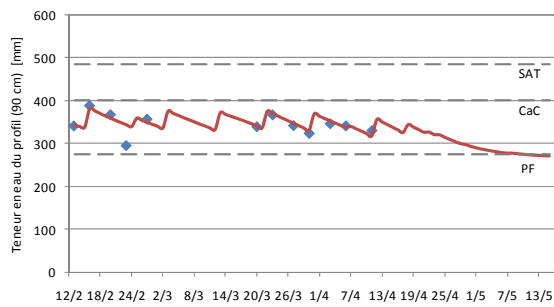
avec S_1 la valeur de sortie correspondant à E_1 ; S_2 la valeur correspondant à E_2 ; \bar{S} la moyenne de S_1 et S_2 ; IS l'indice de sensibilité de la sortie; E_1 la valeur du paramètre d'entrée de référence; E_2 la valeur du paramètre testé et \bar{E} la moyenne de E_1 et E_2 .

Pour le calcul de l'IS, les valeurs d' E_1 et E_2 correspondent respectivement aux valeurs de K_{sat} et TAW des sols de champs d'essais et des sols de BUNASOLS. Quant aux sorties, les valeurs S sont soit le rendement estimé, soit la moyenne de la teneur en eau totale.

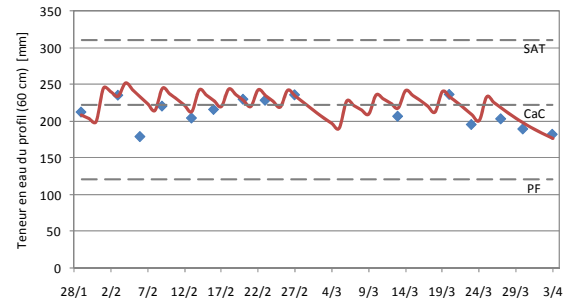
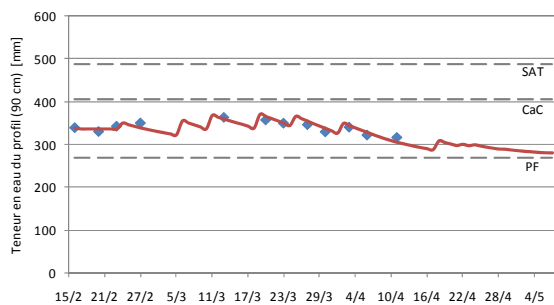
8.3 Résultats et discussions

8.3.1 Calage

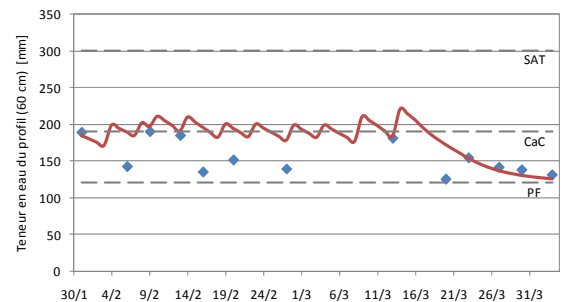
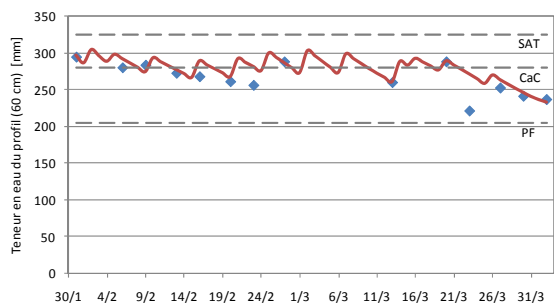
Les teneurs en eau de la zone racinaire simulées et observées sont présentées dans les figures 8.7 à 8.13. Les périodes simulées coïncident avec les périodes des mesures de teneurs en eau sur le terrain et sont par conséquent pas toujours égales aux périodes culturales. Comme les teneurs en eau initiales ont une grande influence sur les simulations (Geerts, 2003), le premier sondage indique la date de début de simulation et la teneur en eau initiale.



Figures 8.7 & 8.8 - Teneurs en eau simulées (lignes rouges) et observées (points bleus) :
(g) champ 1 – maïs et (d) champ 2 – maïs.
(avec ‘SAT’ : teneur en eau à saturation ; ‘CaC’ à capacité au champ et ‘PF’ au point de flétrissement)



Figures 8.9 & 8.10 - Teneurs en eau simulées (lignes rouges) et observées (points bleus) :
(g) champ 3 – maïs et (d) champ 4 – chou.



Figures 8.11 & 8.12 - Teneurs en eau simulées (lignes rouges) et observées (points bleus) :
(g) champ 5 – chou et (d) champ 6 – chou.

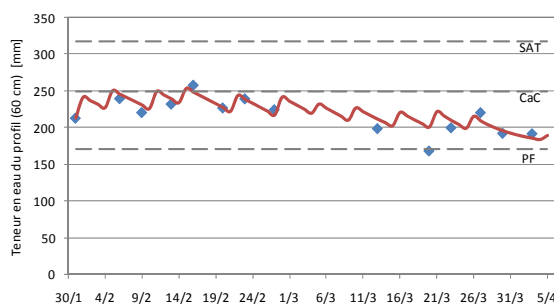


Figure 8.13 - Teneurs en eau simulées (lignes rouges) et observées (points bleus) : champ 7 – chou.

Tableau 8.5 - Critères de qualité pour les différentes simulations de calage au niveau des 7 champs d’essai.

	1	2	3	4	5	6	7
RMSE [mm]	6,57	10,19	7,14	10,41	8,86	29,99	7,73
EF [-]	0,87	0,87	0,73	0,64	0,78	-0,74	0,84
R ² [-]	0,83	0,92	0,78	0,74	0,78	0,24	0,84

Les teneurs en eau des zones racinaires pour les champs de maïs sont remarquablement plus basses que pour les champs de chou, ne dépassant jamais la capacité au champ. Cela est probablement dû à l’intensité des irrigations pour le cas de chou (chaque 4 jours).

La calibration par défaut a pu être conservée en général. Pour quelques champs les débits notés par les agents ont dû être multipliés par un coefficient (0,7 à 0,8) vers le bas. Cette correction peut exprimer l'efficacité d'application à la parcelle et la perte d'efficacité de certaines motopompes due à l'ancienneté. Certaines observations ont également été corrigées quand les différences de teneurs en eau étaient trop grandes pour la même parcelle et/ou ne correspondaient pas avec des observations faites lors des prélèvements. Comme chaque fois plusieurs prélèvements ont été faits par parcelle, les valeurs non-cohérentes ont pu être supprimées.

Les profils de sol pour les champs de choux ont été revus considérablement. Lors des simulations il s'est avéré que les caractéristiques hydrauliques obtenues à partir des échantillons pris à 60 cm de profondeur surestimaient chaque fois les teneurs en eau simulées. En appliquant les caractéristiques de 30 cm à l'ensemble du profil, des résultats satisfaisants ont pu être obtenus.

L'analyse statistique (tableau 8.5) indique que le calage peut être considéré comme bon voire très bon pour la plupart des champs (sauf le champ 6). L'erreur d'estimation des teneurs en eau simulées est négligeable (moins 10 mm pour RMSE), ce qui ne vaut pas une dose d'irrigation goutte-à-goutte. Les valeurs EF confirment la solidité du modèle pour simuler la réalité (Raes *et al.*, 2006).

Les mauvais résultats pour le champ 6 sont dus à une grande hétérogénéité des types de sol à l'intérieur de la parcelle. Lors des prélèvements pour les teneurs en eau (qui changeaient chaque fois d'endroit), des textures variant de sableuses jusqu'à argileuses ont souvent été constatées sur la même parcelle.

8.3.2 Vérification

Les profils de sol détaillés, obtenus pour chaque parcelle à partir des analyses granulométriques, ont été remplacés par ceux du BUNASOLS selon le positionnement des parcelles sur la carte morpho-pédologique. Aucun autre paramètre ni donnée d'entrée n'ont été changés.

Les figures 8.14 à 8.20 montrent les teneurs en eau observées et simulées pour les différentes parcelles d'essai en utilisant les profils du BUNASOLS auxquels sont censées appartenir les parcelles selon la carte morpho-pédologique.

Quatre des sept cas donnent des vérifications satisfaisantes (champs 1, 3, 5 et 7), les profils détaillés et coûteux à obtenir peuvent être substitués par les profils de BUNASOLS. Les simulations n'arrivent par contre pas bien à restituer les teneurs en eau pour le champ 4 (EF négative de -2,56 ; Tableau 8.6), mais suivent quand même les tendances dans les teneurs en eau (R^2 de 0,79). Le triangle de texture plaçait ce sol déjà dans une autre catégorie ; loam limono-argileux au lieu d'argileux ou loam argileux.

Ce qui amène à revoir les vérifications des champs 2 et 6, aussi 'mal' placé dans le triangle de texture. Fort erronées avec les profils imposés par leur positionnement sur la carte morpho-pédologique, les simulations ont été refaites avec les autres profils du BUNASOLS ayant plus de ressemblance quant aux caractéristiques hydrauliques.

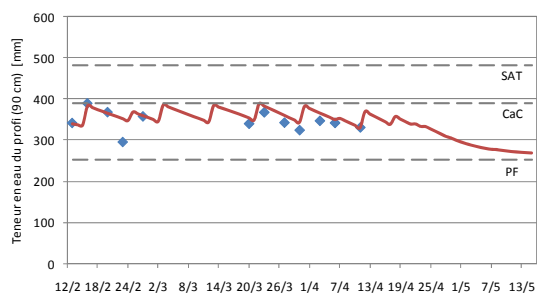


Figure 8.14 - Vérification du calage du champ 1 pour un sol HPGS.

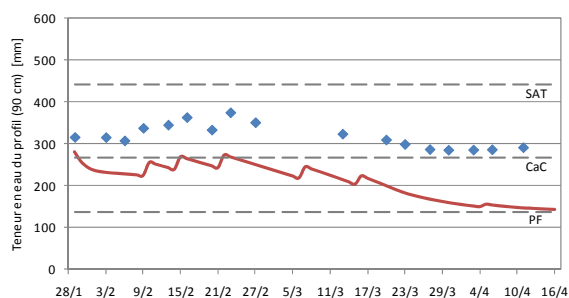


Figure 8.15 - Vérification du calage du champ 2 pour un sol FLTC.

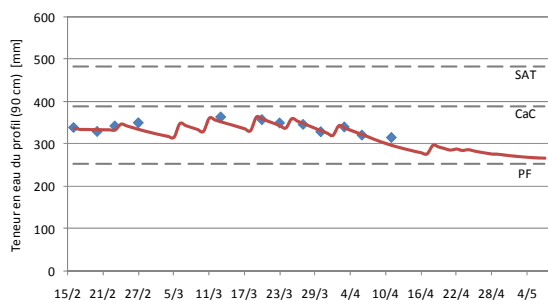


Figure 8.16 - Vérification du calage du champ 3 pour un sol HPGS.

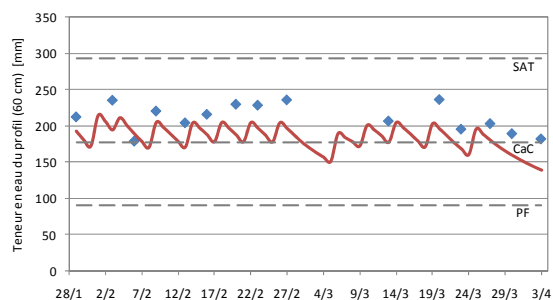


Figure 8.17 - Vérification du calage du champ 4 pour un sol FLTC.

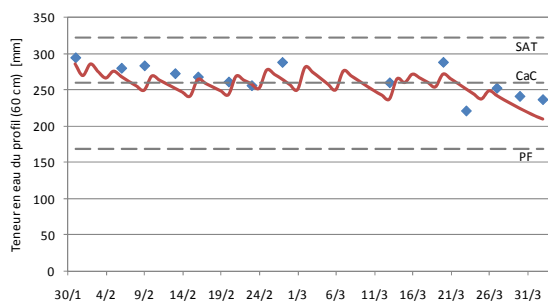


Figure 8.18 - Vérification du calage du champ 5 pour un sol HPGS.

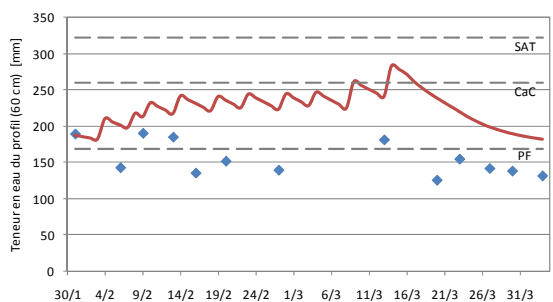


Figure 8.19 - Vérification du calage du champ 6 pour un sol HPGS.

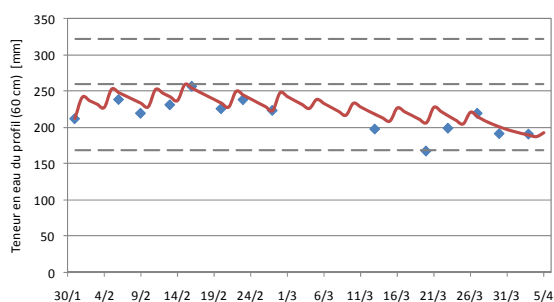


Figure 8.20 - Vérification du calage du champ 7 pour un sol HPGS.

Tableau 8.6 - Critères de qualité pour les différentes simulations de vérification.

	1	2	3	4	5	6	7
RMSE [mm]	13,13	107,32	8,40	32,83	19,60	66,45	14,12
EF [-]	0,50	-13,54	0,63	-2,56	-0,10	-7,55	0,62
R ² [-]	0,70	0,72	0,77	0,76	0,79	0,00	0,77

Un sol HPGS au lieu d'un FLTC résout la vérification pour le champ 2 (Figure 8.21) : EF devient 0,78 et R² donne 0,92. En plus selon la Carte 2, le champ 2 se trouve sur la frontière de deux zones morpho-pédologiques différentes. Un FLTC remplaçant le sol HPGS pour le champ 6 donne un meilleur résultat visuel (Figure 8.22), mais les critères de qualité restent

discutables (EF est -0,34 et R^2 est 0,26). Le champ 6 donnait déjà des difficultés lors du calage.

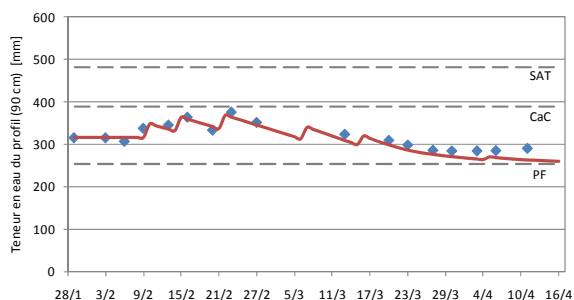


Figure 8.21 - Vérification du calage du champ 2 pour un sol HPGS.

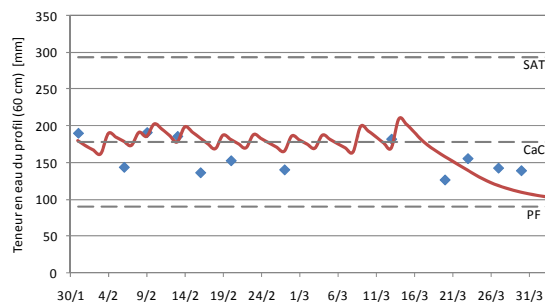


Figure 8.22 - Vérification du calage du champ 6 pour un sol FLTC.

8.3.3 Analyse de sensibilité

Tenant compte des corrections proposées dans les allocations des sols du BUNASOLS ci-dessus, une étude de sensibilité a été effectuée afin de connaître l'impact de ces changements de profils de sol sur les résultats simulés. La solidité du modèle à simuler les estimations de rendements et les teneurs en eau totales par rapport aux variations en K_{sat} et de la teneur en eau disponible (TAW), a été analysée pour deux scénarii différents :

- l'attribution des sols du BUNASOLS se déroule correctement ('bien jugé'). C'est-à-dire, que le profil original est substitué par le profil bibliographique qui lui ressemble le plus en respectant également son appartenance géographique.
- l'allocation est erronée. Ce dernier scénario permet d'avoir une idée des grandeurs d'erreur possibles à cause des mauvaises délimitations sur la carte morpho-pédologique.

Les figures 8.23 à 8.26 montrent les variations des sorties 'estimation de rendement' et 'teneur totale en eau' pour les deux scénarii. Les différences en cas d'une bonne allocation sont minimales, sauf à limite la variation en teneur totale en eau pour le champ 4. La vérification de ce cas a également montré une sous-estimation dans les teneurs en eau simulées (figure 8.17).

L'augmentation significative de rendement en cas d'une mauvaise attribution s'explique par les différences en caractéristiques hydrauliques. Les sols FTLC, erronément attribués aux champs 1, 2 et 3 par exemple, nécessitent moins d'eau pour rester stables autour de la teneur en eau à capacité au champ qu'un sol HPGE, résultant dans un meilleur rendement et un gain en teneur en eau totale (figure 8.26). Les figures 8.15 (champ 2 avec un FLTC erroné) et 8.21 (champ 2 avec un HPGS 'bien jugé') visualisent mieux cet effet ; pour le premier cas la teneur en eau tend vers la capacité au champ, tandis que pour le dernier cas elle varie entre le point de flétrissement et la capacité au champ.

Les variations en K_{sat} et TAW (colonnes vides) et les indices de sensibilités du rendement et de la teneur en eau totale y correspondant (colonnes colorées) sont présentés dans les figures 8.27 à 8.34. En cas de 'bon jugement', les indices de sensibilités sont tous négligeables peu importe la grandeur de la variation dans les paramètres d'entrée. Au cas contraire, les rapports variations – indices de sensibilités sont tellement variables qu'aucune hiérarchisation dans l'impact des deux paramètres sur le modèle ne peut être établie.

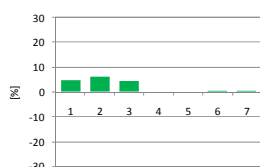


Figure 8.23 - Variation du rendement (bien jugé).

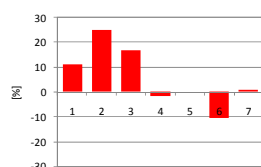


Figure 8.24 - Variation du rendement (mal jugé).

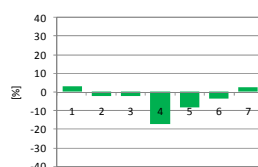


Figure 8.25 – Variation teneur en eau totale (bien jugé).

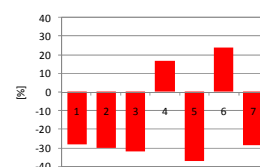


Figure 8.26 – Variation teneur en eau totale (mal jugé).

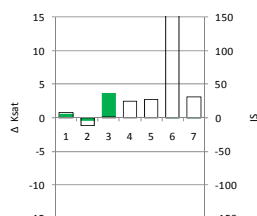


Figure 8.27 – Variation K_{sat} et IS du rendement (vert) (bien jugé).

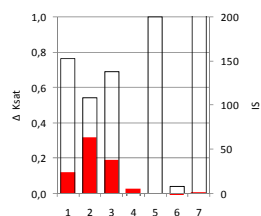


Figure 8.28 – Variation K_{sat} et IS du rendement (rouge) (mal jugé).

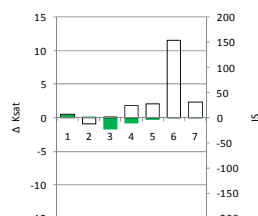


Figure 8.29 – Variation K_{sat} et IS de la teneur en eau (vert) (bien jugé).

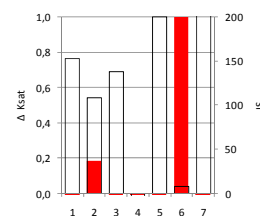


Figure 8.30 – Variation K_{sat} et IS de la teneur en eau (rouge) (mal jugé).

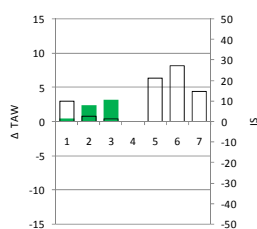


Figure 8.31 – Variation TAW et IS du rendement (vert) (bien jugé).

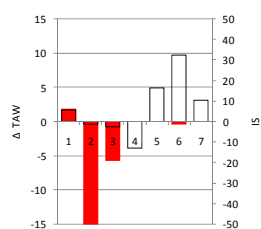


Figure 8.32 – Variation TAW et IS du rendement (rouge) (mal jugé).

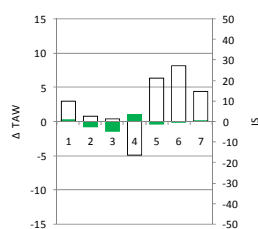


Figure 8.33 – Variation TAW et IS de la teneur en eau (vert) (bien jugé).

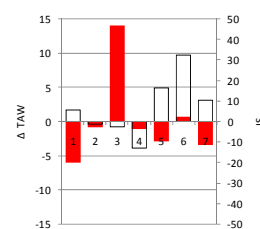


Figure 8.34 – Variation TAW et IS de la teneur en eau (rouge) (mal jugé).

8.4 Conclusion

L'objectif principal de l'étude était d'étudier la compatibilité et la sensibilité des paramètres pédologiques expérimentaux et bibliographiques pour le logiciel BUDGET en vue d'une spatialisation permettant un suivi régional des estimations de rendements ainsi que de la consommation en eau.

A cet effet, le modèle a été calé avec des données collectées sur le terrain et analysées au laboratoire. Pour 6 des 7 champs, le calage a été satisfaisant. Pour un seul cas, la très grande hétérogénéité des types de sol à l'intérieur de la parcelle rendait le calage impossible.

Par la suite l'adaptabilité du modèle a été étudiée par une simulation des résultats du calage appliquée à une cartographie morpho-pédologique mise en place par le BUNASOLS. Cette étape qui entre dans le cadre de la vérification a fourni des résultats discutables en ce sens que la reproductibilité de la réponse du modèle est assez bonne dans l'ensemble, mais un écart entre les valeurs de la simulation avec les données issues du laboratoire et celles du BUNASOLS persiste pour certains cas. Les résultats étaient satisfaisants pour 5 des 7 champs, passables pour 1 et problématiques pour un dernier. En le reclassifiant, la concordance s'améliorait fortement.

Si l'analyse de sensibilité a montré de faibles variations dans les rendements et les teneurs en eau totales, et des gains de toute sorte en cas d'attribution erronée ; les causes sont à trouver

dans l'ensemble des caractéristiques hydrauliques différentes et ne peuvent pas être différenciées.

Dans une perspective de spatialisation, la cartographie des types de sol doit être la plus fiable possible. La plupart des parcelles agricoles de la région tombent malheureusement dans la zone frontière de deux groupes morpho-pédologiques (FLTC et HPGS). Vu la relative grande variation en sortie de simulations pour une attribution de sol erronée, la recherche vers une délimitation plus précise s'avère fort utile. Par exemple, des séries temporelles d'images satellitaires à moyenne résolution peuvent aider à mieux délimiter les zones fréquemment inondées et ainsi redéfinir la zone hydro-morphe (zone pédologique de gleysol eutrique (HPGS)).



- Impact de la maîtrise de l'eau sur la lutte contre la pauvreté -

9

Impact de la maîtrise de l'eau sur la lutte contre la pauvreté rurale¹⁵

Dans la perspective de la réalisation des objectifs de développement du millénaire, la maîtrise de l'eau en agriculture est souvent considérée comme un levier très important pour la réduction de la pauvreté en milieu rural.

La relation entre ce paquet technologique et la lutte contre la pauvreté a été testée à l'aide d'un échantillon de 221 répondants dans le bassin du Kou au Burkina Faso. L'analyse des données fait ressortir qu'il existe une relation positive entre l'engagement des pouvoirs publics, la participation des producteurs et les investissements réalisés dans le cadre de la maîtrise de l'eau en agriculture. Ces derniers exercent une influence positive sur les indicateurs de lutte contre la pauvreté rurale.

Il a par conséquent été recommandé que la maîtrise de l'eau soit placée au centre des actions visant la lutte contre la pauvreté en milieu rural à travers une mobilisation concomitante des producteurs et des moyens publics.

9.1 Introduction

La lutte contre la pauvreté est l'un des principaux objectifs du millénaire. Il est question de réduire de moitié à l'horizon de 2015 le nombre de personnes vivant dans l'extrême pauvreté (FIDA, 2001).

Bien que l'eau soit seulement un élément de l'équité de la pauvreté rurale, elle y joue un puissant rôle par ses solides impacts sur des facteurs comme la production, la sécurité alimentaire et l'environnement (Intizar et Hanjra, 2003). L'impossibilité de sécuriser les productions agricoles à travers une alimentation normale des plantes en eau constitue dans les pays du Sahel un frein considérable à l'intensification, en s'opposant à toute prise de risque des producteurs et par voie de conséquence à tout investissement (Laomaïbao, 2009). Elle est également la cause principale des faibles revenus, des famines et de la pauvreté chronique des populations rurales.

La maîtrise de l'eau en agriculture permet de palier ces problèmes en participant à remplir les objectifs assignés à l'agriculture dans les pays du Sud : renforcer la sécurité alimentaire et favoriser les développements économique et social (Hoffman et Sadoulet, 2000 ; Madhusudan *et al.*, 2002 ; Intizar et Hanjra, 2003). De façon directe, l'irrigation bénéficie aux populations rurales par le biais d'une production accrue, des rendements plus élevés, d'un faible risque d'échec cultural et d'une répartition de ce risque sur toute l'année.

¹⁵ Avec la contribution d'A. Bayighomog (Université de Yaoundé II), J. Wellens (APEFE), K. Zougrana (AEDE), M. Diallo (AEDE), D. Dakouré (OE), N.F. Compaoré (VREO), F. Traoré & B. Tychon (ULg).

La littérature économique enseigne que la lutte contre la pauvreté passe essentiellement par la croissance (OCDE, 2001). La croissance, pour qu'elle soit durable, doit s'appuyer sur l'investissement dans le capital humain, technique, et naturel qui relève les capacités de production (Vinod *et al.*, 2002 ; Domar, 2003 ; Kaldor et Robinson, 2003).

La maîtrise de l'eau est assortie d'un ensemble d'investissements susceptibles d'améliorer les capacités de productions tant à partir de l'outil technique, que de l'amélioration du confort technologique des bénéficiaires. Elle permet ainsi d'avoir une croissance stable et de qualité, bénéficiant aux populations rurales pauvres sur le long terme. Une synergie des actions des pouvoirs publics et des populations bénéficiaires est nécessaire pour la réalisation des investissements dans la maîtrise de l'eau en milieu rural (Hoffman et Sadoulet, 2000 ; Sonou, 2000 ; FAO, 2003).

L'objectif de l'étude est de procéder à l'évaluation de la contribution de la maîtrise de l'eau en agriculture dans la lutte contre la pauvreté pour le cas du bassin du Kou au Burkina Faso. De manière plus spécifique, il est question de :

- i) ressortir le lien entre la participation des masses rurales et l'intervention de l'Etat dans la mise en place et la préservation des infrastructures hydrauliques, et le niveau d'investissement en maîtrise de l'eau dans l'agriculture burkinabé ;
- ii) apprécier le lien entre le niveau de pauvreté des individus et le degré de maîtrise de l'eau dans la production agricole.

9.2 Données & modules d'analyses

Les données ont été obtenues de la base de données de l'enquête menée par l'AEDE dans le cadre du programme FNPP de la FAO (AEDE, 2004). L'échantillon est formé de 221 répondants répartis dans 3 zones différentes (Tableau 9.1) :

Tableau 9.1 - Données générales sur les exploitants de l'échantillon.

Indicateur	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total
Nombre	144	41	36	221
Pourcentage	65	19	16	100
Migrants hors bassin	15	23	5	43
Superficies irriguées [ha]	201	46	47	294
Achat semences améliorées [F CFA]	3 664 595	471 750	495 950	4 632 295
Achat engrais [F CFA]	22 575 145	4 990 475	5 828 875	33 394 495
Achat pesticides [F CFA]	3 702 761	656 575	656 400	5 015 736
Ouvriers employés	857	310	291	1 458
Salaires payés [F CFA]	2 008 650	842 950	847 850	3 699 450
Couverture partielle des besoins en eau	83	11	12	106
Libre accès à l'eau en saison sèche	100	22	20	142
Revenus déclarés en 2002 [F CFA]	93 892 725	7 855 000	17 680 500	119 428 225
Déficit alimentaire en saison de pluies	52	22	20	94
Déficit alimentaire en saison sèche	7	7	0	14
Mobilisation de l'eau de pluies	144	41	36	221
Mobilisation de l'eau par barrage	4	28	0	32
Mobilisation de l'eau par pris dans les rivières	59	7	10	76
Stations de pompage	11	1	2	14
Mobilisation de l'eau des lacs/marres	1	0	0	1
Mobilisation de l'eau par forages	3	0	0	3
Mobilisation de l'eau de la nappe phréatique	4	1	1	6
Mobilisation de l'eau par les puits	44	2	8	54
Montant d'investissement [F CFA]	48 763 950	17 883 250	70 778 250	137 425 450
Disponibilité à payer la redevance eau en saison sèche	101	34	19	154
Montant de la redevance payée [F CFA]	3 380 400	565 500	747 500	4 693 400
Existence d'un service d'encadrement	79	30	20	129
Pratique de l'irrigation d'appoint	23	5	8	36
Pratique de l'irrigation de complément	22	8	2	32
Contribution à la pratique de l'irrigation [F CFA]	31 580 000	7 032 500	9 852 000	48 464 500

- Zone I : région englobant tous les villages situés en amont de la prise d'eau du périmètre rizicole ;
- Zone II : région correspondant au périmètre rizicole aménagé par les pouvoirs publics ;
- Zone III : région à l'aval du périmètre irrigué.

La zone située le long du canal d'amenée n'a pas pu être appréhendée vu son statut particulier. Bien que l'investissement pour ce canal ait été réalisé par l'état, les agriculteurs y prélèvent frauduleusement l'eau pour l'irrigation à l'aide des siphons ou des motopompes. Compte tenu du caractère déséquilibré de l'échantillon, deux dispositions ont été prises pendant les analyses :

- l'analyse zone par zone a été menée pour compléter l'analyse globale des données de tout le bassin ;
- la pondération des données : des coefficients de 2 pour la zone 1, 5 pour la zone 2 et 6 pour la zone 3 ont été affectés.

Les hypothèses nulles à infirmer ou à confirmer à travers des tests de corrélation entre les différents indicateurs, conformément au modèle d'analyse, sont :

H_0^1 : l'investissement réalisé dans la maîtrise de l'eau en agriculture est indépendant de l'intervention publique et de la participation des producteurs ;

H_0^2 : l'investissement réalisé dans la maîtrise de l'eau en agriculture n'a pas d'effet sur les indicateurs de lutte contre la pauvreté.

La première hypothèse peut être écrite comme la résultante de deux sous hypothèses :

SH_0^{11} : l'investissement réalisé dans la maîtrise de l'eau en agriculture est indépendant de l'intervention publique ;

SH_0^{12} : l'investissement réalisé dans la maîtrise de l'eau en agriculture est indépendant de la participation des producteurs.

Les hypothèses se construisent comme indiqués dans les tableaux 9.2 et 9.3 ci après.

L'exploitation des données comprend aussi bien l'analyse du contenu des entretiens que le test des hypothèses de recherche. Les variables du modèle étant essentiellement des variables nominales, le test des hypothèses destiné à déceler les liaisons statistiques entre elles est fait sur la base du Chi deux, calculé et comparé à l'aide du programme SPSS. Le degré de dépendance des variables lui a été mesuré par le calcul du coefficient de contingence.

9.3 Test de la première hypothèse

9.3.1 Vérification de la sous hypothèse SH_0^{11}

L'intervention publique étant mesurée ici par une seule variable tandis que l'investissement dans la maîtrise de l'eau en agriculture est mesuré par une série d'indicateurs, le test de cette sous hypothèse consiste en la vérification des corrélations entre l'encadrement offert par

Tableau 9.2 - Construction de la première hypothèse.

Variable explicative				Variable expliquée			
Variable	Indicateur	Source de variation	Modalités	Variable	Indicateurs	Source de variation	Modalités
Intervention de l'Etat	Producteurs encadrés	Répondants	- Oui - Non	Investissements réalisés en maîtrise de l'eau en agriculture	Superficie irriguée	Répondants	- Tiers supérieur - Tiers médian - Tiers inférieur
					Prise d'eau dans les rivières	Répondants	- Oui - Non
Participation des producteurs	Contribution à la pratique de l'irrigation	Répondants	- Tiers supérieur - Tiers médian - Tiers inférieur		Forages	Répondants	- Oui - Non
					Stations de pompage	Répondants	- Oui - Non
	Disponibilité à payer une redevance eau en saison de pluie	Répondants	- Oui - Non		Exploitation de la nappe phréatique	Répondants	- Oui - Non
					Mobilisation de l'eau par les puits	Répondants	- Oui - Non
	Disponibilité à payer une redevance eau en saison sèche	Répondants	- Oui - Non		Exhaure par gravité	Répondants	- Oui - Non
					Exhaure manuelle	Répondants	- Oui - Non
Redevance eau payée	Répondants	- Tiers supérieur - Tiers médian - Tiers inférieur	Exhaure mécanisée		Répondants	- Oui - Non	
			Irrigation d'appoint		Répondants	- Oui - Non	
				Irrigation de complément	Répondants	- Oui - Non	

Tableau 9.3 - Construction de la deuxième hypothèse.

Variable explicative				Variable expliquée			
Variable	Indicateur	Source de variation	Modalités	Variable	Indicateurs	Source de variation	Modalités
Investissements réalisés en maîtrise de l'eau en agriculture	Superficie irriguée	Répondants	- Tiers supérieur - Tiers médian - Tiers inférieur	Lutte contre la pauvreté	Migrant hors bassin	Répondants	- Oui - Non
	Prise d'eau dans les rivières	Répondants	- Oui - Non		Emplois directs créés	Répondants	- Tiers supérieur - Tiers médian - Tiers inférieur
	Forages	Répondants	- Oui - Non		Coût des semences	Répondants	- Tiers supérieur - Tiers médian - Tiers inférieur
	Stations de pompage	Répondants	- Oui - Non		Coût des engrais	Répondants	- Tiers supérieur - Tiers médian - Tiers inférieur
	Exploitation de la nappe phréatique	Répondants	- Oui - Non		Coût des pesticides	Répondants	- Tiers supérieur - Tiers médian - Tiers inférieur
					Revenus générés	Répondants	- Tiers supérieur - Tiers médian - Tiers inférieur
	Mobilisation de l'eau par des puits	Répondants	- Oui - Non		Salaires payés aux ouvriers	Répondants	- Tiers supérieur - Tiers médian - Tiers inférieur
					Satisfaction des besoins en eau	Répondants	- Totallement - Partiellement - Rarement
	Exhaure par gravité	Répondants	- Oui - Non		Accès à l'eau en saison sèche	Répondants	- Oui - Non
	Exhaure manuelle	Répondants	- Oui - Non		Déficit alimentaire en saison sèche	Répondants	- Oui - Non
	Exhaure mécanisée	Répondants	- Oui - Non		Déficit alimentaire en hivernage	Répondants	- Oui - Non
	Irrigation d'appoint	Répondants	- Oui - Non		Excédent alimentaire en saison sèche	Répondants	- Oui - Non
Irrigation de complément	Répondants	- Oui - Non	Excédent alimentaire en hivernage	Répondants	- Oui - Non		

l'Etat et les différents indicateurs mesurant l'investissement. Les résultats sont résumés dans le tableau 9.4.

Sur l'ensemble du bassin, les superficies irriguées, la mobilisation de l'eau par prise d'eau dans les rivières et le développement des différents systèmes d'exhaure sont influencés par l'encadrement apporté par l'Etat. Plus cet encadrement est présent, plus importants ou nombreux sont ces investissements. SH_0^{11} est donc confirmée.

L'analyse peut varier lorsqu'elle est faite zone par zone. Mais il demeure vrai, quelle que soit la zone, que la mobilisation de l'eau par le creusement des puits est indépendante de l'encadrement apporté, alors que le développement de l'exhaure mécanisée, lui, est entièrement dépendant de l'encadrement.

Tableau 9.4 - Test de l'indépendance entre l'encadrement apporté par l'Etat et l'investissement en maîtrise de l'eau en agriculture.
(vert : dépendance ; rouge : indépendance)

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total
Superficie irriguée	■	■	■	■
Irrigation d'appoint	■	■	■	■
Irrigation de complément	■	■	■	■
Prise d'eau dans les rivières	■	■	■	■
Stations de pompage	■	■	■	■
Utilisation de la nappe phréatique	■	■	■	■
Puits	■	■	■	■
Exhaure par gravité	■	■	■	■
Exhaure manuelle	■	■	■	■
Exhaure mécanisée	■	■	■	■

9.3.2 Vérification de la sous hypothèse SH_0^{12}

La participation des producteurs étant mesurée ici par un ensemble d'indicateurs, la vérification de SH_0^{12} se fait à travers une matrice de corrélation entre les indicateurs de participation et les indicateurs de l'investissement réalisé en maîtrise de l'eau en agriculture (Tableau 9.5).

La matrice montre qu'il existe une corrélation entre l'engagement des producteurs et la nature des investissements réalisés. Plus la contribution à la pratique d'irrigation est élevée, plus les investissements sont importants. Cependant, cette relation est parfois inverse. Les producteurs bénéficiant de certaines infrastructures, notamment les forages et les stations de pompage sont peu disposés à payer la redevance.

Toutefois, la proportion des producteurs disposés à payer la redevance eau quelle que soit la saison, est toujours plus élevée que celle de ceux qui ne sont pas disposés. De plus, parmi les producteurs ne bénéficiant pas encore d'une technologie donnée, ceux qui sont disposés à payer pour l'avoir sont les plus nombreux.

9.3.3 Résultat

Les deux sous hypothèses SH_0^{11} et SH_0^{12} étant infirmées, l'on peut conclure qu'il existe une relation de dépendance entre l'intervention publique, la participation des producteurs et l'investissement réalisé dans la maîtrise de l'eau en agriculture.

Tableau 9.5 - Test de l'indépendance entre l'encadrement apporté par l'Etat et l'investissement/participations des agriculteurs en maîtrise de l'eau.
(vert : dépendance ; rouge : indépendance ; 1,2 et 3 les différentes zones ; T : ensemble du bassin)

	Contribution à la pratique d'irrigation				Disponibilité à payer une redevance eau en saison de pluie				Disponibilité à payer une redevance eau en saison sèche				Redevance eau payée			
	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T
Superficie irriguée	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T
Irrigation d'appoint	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T
Irrigation de complément	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T
Prise d'eau dans les rivières	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T
Forages	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T
Stations de pompage	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T
Exploitation de la nappe phréatique	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T
Mobilisation de l'eau par des puits	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T
Exhaure par gravité	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T
Exhaure manuelle	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T
Exhaure mécanisée	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T	1	2	3	T

Tableau 9.6 - Vérification de l'interdépendance entre la mobilisation de l'eau par barrage (g.) la prise d'eau sur rivière (m.), les stations de pompage (d.) et les indicateurs de lutte contre la pauvreté.
(vert : dépendance ; rouge : indépendance ; - : analyse non praticable)

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total
Migration de la main d'œuvre	1	2	-	2	1	2	2	2	1	2	2	2
Emplois directs créés	1	-	-	1	1	-	-	1	1	-	-	1
Commerce des semences améliorées	1	2	-	2	1	2	2	2	1	2	2	2
Commerce des engrais	1	2	-	2	1	2	2	2	1	2	2	2
Commerce des pesticides	1	2	-	2	1	2	2	2	1	2	2	2
Revenus générés aux producteurs	1	2	-	2	1	2	2	2	1	2	2	2
Salaires payés aux ouvriers agricoles	1	2	-	2	1	2	2	2	1	2	2	2
Satisfaction des besoins en eau	1	2	-	2	1	2	2	2	1	2	2	2
Libre accès à l'eau	-	2	-	2	1	2	2	2	1	2	2	2
Déficit alimentaire en saison sèche	-	2	-	2	1	2	2	2	-	-	-	-
Déficit alimentaire en saison des pluies	-	2	-	2	1	2	2	2	1	-	-	2
Excédent alimentaire en saison sèche	-	2	-	2	1	2	2	2	1	-	-	2
Excédent alimentaire en saison des pluies	-	2	-	2	1	2	2	2	1	-	-	2

Tableau 9.7 - Vérification de l'interdépendance entre les forages (g.) la mobilisation de l'eau de la nappe phréatique (m.), les puits (d.) et les indicateurs de lutte contre la pauvreté.
(vert : dépendance ; rouge : indépendance ; - : analyse non praticable)

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total
Migration de la main d'œuvre	1	-	-	1	1	2	2	2	1	2	2	2
Emplois directs créés	1	-	-	1	1	2	2	2	1	-	-	1
Commerce des semences améliorées	1	2	-	2	1	2	2	2	1	-	-	1
Commerce des engrais	1	2	-	2	1	2	2	2	1	-	2	2
Commerce des pesticides	1	2	-	2	1	2	2	2	1	-	-	1
Revenus générés aux producteurs	1	2	-	2	1	2	2	2	1	2	2	2
Salaires payés aux ouvriers agricoles	1	2	-	2	1	2	2	2	1	2	2	2
Satisfaction des besoins en eau	-	2	-	2	1	2	2	2	1	-	-	1
Libre accès à l'eau	-	2	-	2	1	2	2	2	1	-	-	1
Déficit alimentaire en saison sèche	-	2	-	2	1	2	2	2	-	-	-	-
Déficit alimentaire en saison des pluies	-	2	-	2	1	2	2	2	1	-	-	2
Excédent alimentaire en saison sèche	-	2	-	2	1	2	2	2	1	-	-	2
Excédent alimentaire en saison des pluies	-	2	-	2	1	2	2	2	1	-	2	2

9.4 Test de la deuxième hypothèse

Pour tester H_0^2 , l'interdépendance entre chaque indicateur de l'investissement réalisé dans la maîtrise de l'eau en agriculture et les différents indicateurs de lutte contre la pauvreté, retenus dans le modèle, est examinée.

9.4.1 Les investissements réalisés en termes de mobilisation de l'eau et leur impact sur la lutte contre la pauvreté

Il convient ici de distinguer les influences des investissements par technique ou approche de mobilisation, étant donné que celles-ci ne connaissent pas le même degré d'utilisation dans les différentes zones. Les cas des indicateurs pertinents suivants peuvent être distingués : les barrages, les prises d'eau, les stations de pompage, les forages, la mobilisation de l'eau de la nappe phréatique et les puits.

L'effet de la mobilisation de l'eau par **barrage** sur les indicateurs de lutte contre la pauvreté est perceptible en gros dans tout le bassin (tableau 9.6), bien que cette technique ne s'applique qu'aux zones 1 et 2. Si dans la deuxième zone, l'effet est ressenti dans tous les indicateurs, il y a des indicateurs de lutte contre la pauvreté dont la dépendance avec la présence ou non des barrages n'a pas été prouvée en zone 1.

Globalement, la **prise d'eau sur les rivières** a un effet positif sur les indicateurs de lutte contre la pauvreté. Cette tendance générale est confirmée dans l'analyse zone par zone, mais elle laisse apparaître des poches d'indépendance. La synthèse de ces analyses est donnée par le tableau 9.6.

D'un point de vue général, l'investissement dans les **stations de pompage** a un effet positif sur les indicateurs de lutte contre la pauvreté (tableau 9.6). En dehors des déficits alimentaires dont l'indépendance est révélée, les autres indicateurs évoluent favorablement avec le développement des stations de pompage.

L'analyse de l'influence des **forages** n'a été possible que dans la zone 1. Comme le montre le tableau 9.7, le développement de ces investissements favorise l'emploi direct mais ses effets demeurent faibles sur les autres indicateurs.

La **mobilisation de l'eau de la nappe phréatique** n'a pas d'effet perceptible sur la lutte contre la pauvreté dans la zone 1. Dans la zone 2, elle influence les indicateurs liés à l'emploi et aux revenus, mais pas sur ceux liés aux conditions de vie ou au commerce des intrants agricoles. Par contre, ces derniers indicateurs sont influencés par l'investissement dans la zone 3, simultanément avec ceux retenus dans la zone 2 (tableau 9.7).

Comme le montre le tableau 9.7, l'impact des **puits** est positif pour les indicateurs de lutte contre la pauvreté dans l'ensemble, sauf quelques exceptions (commerce des intrants, ...).

9.4.2 Les types d'exhaure de l'eau et leur impact sur la lutte contre la pauvreté

Trois types d'exhaure de l'eau ont été retenus dans les analyses : l'exhaure par gravité, l'exhaure manuelle et l'exhaure mécanisée. Chacune de ces technologies influence différemment les indicateurs de lutte contre la pauvreté dans les zones ciblées.

Sur le plan global, l'**exhaure par gravité** influence les indicateurs de lutte contre la pauvreté, en dehors de l'accès à l'eau en saison sèche et des déficits alimentaires dans la même période. L'analyse par zone fait ressortir que cette influence ne touche pas les indicateurs liés aux

conditions de vie, mais touche particulièrement ceux liés à la génération des revenus (tableau 9.8).

L'**exhaure manuelle** est en relation de dépendance avec les indicateurs de lutte contre la pauvreté, sauf les excédents alimentaires. Toutefois l'analyse par zone lui dénie toute influence sur les revenus générés aux producteurs et sur les déficits alimentaires (tableau 9.8).

En dehors des excédents alimentaires en saison de pluies, tous les autres indicateurs de lutte contre la pauvreté sont en corrélation favorable avec la pratique de l'**exhaure mécanisée** (tableau 9.8). Cette influence est confirmée par l'analyse zone par zone.

Tableau 9.8 - Vérification de l'interdépendance entre l'exhaure par gravité (g.) l'exhaure manuelle (m.), l'exhaure mécanisée (d.) et les indicateurs de lutte contre la pauvreté.
(vert : dépendance ; rouge : indépendance ; - : analyse non praticable)

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total
Migration de la main d'œuvre	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Emplois directs créés	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Commerce des sémences améliorées	■	■	-	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Commerce des engrais	■	■	-	■	■	-	■	■	■	-	■	■
Commerce des pesticides	■	■	-	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Revenus générés au producteurs	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Salaires payés aux ouvriers agricoles	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Satisfaction des besoins en eau	-	■	-	■	■	■	■	■	■	-	■	■
Libre accès à l'eau	-	■	-	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Déficit alimentaire en saison sèche	-	■	-	■	■	-	-	■	-	-	-	■
Déficit alimentaire en saison des pluies	■	■	-	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Excédent alimentaire en saison sèche	-	■	-	■	■	-	-	■	■	-	■	■
Excédent alimentaire en saison des pluies	■	■	-	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Tableau 9.9 - Vérification de l'interdépendance entre l'irrigation d'appoint (g.) l'irrigation de complément (m.), les superficies irriguées (d.) et les indicateurs de lutte contre la pauvreté.
(vert : dépendance ; rouge : indépendance ; - : analyse non praticable)

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Total
Migration de la main d'œuvre	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Emplois directs créés	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Commerce des sémences améliorées	■	■	■	■	■	■	-	■	■	■	■	■
Commerce des engrais	■	-	■	■	■	■	-	■	■	■	■	■
Commerce des pesticides	■	■	■	■	■	■	-	■	■	■	■	■
Revenus générés au producteurs	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Salaires payés aux ouvriers agricoles	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Satisfaction des besoins en eau	-	■	-	■	-	■	-	■	■	■	■	■
Libre accès à l'eau	■	■	■	■	■	■	-	■	■	■	■	■
Déficit alimentaire en saison sèche	-	-	-	■	-	■	-	■	-	■	-	■
Déficit alimentaire en saison des pluies	■	■	■	■	■	■	-	■	■	■	■	■
Excédent alimentaire en saison sèche	■	-	■	■	■	■	-	■	■	■	■	■
Excédent alimentaire en saison des pluies	■	■	■	■	■	■	-	■	■	■	■	■

9.4.3 Les types d'irrigation et leur impact sur la lutte contre la pauvreté

Deux types d'irrigation sont considérés dans cette étude : l'irrigation d'appoint et l'irrigation de complément. Les résultats obtenus montrent que quel que soit le type considéré, l'irrigation a un impact favorable sur les indicateurs de lutte contre la pauvreté (tableau 9).

Le tableau 9.9 montre également qu'il existe une relation de dépendance entre les superficies irriguées et les différents indicateurs de lutte contre la pauvreté. Plus les superficies irriguées par exploitant sont grandes, plus les indicateurs de lutte contre la pauvreté sont positifs.

9.4.4 Résultat

En conclusion, il apparaît que l'hypothèse H_0^2 est partiellement infirmée, donc son alternative est vraie. L'on peut ainsi déclarer que dans le bassin du Kou, il existe une relation de dépendance entre l'investissement réalisé dans la maîtrise de l'eau et les indicateurs de lutte contre la pauvreté. La présence et l'importance de ces investissements influencent favorablement les indicateurs de lutte contre la pauvreté.

9.5 Conclusion

Les résultats montrent que l'intervention de l'Etat et la participation des populations bénéficiaires sont indispensables au développement des investissements en maîtrise de l'eau dans l'agriculture. La lutte contre la pauvreté sous toutes ses formes trouve une source considérable dans la maîtrise de l'eau en agriculture.

L'importance de l'étude réside dans sa potentielle capacité à orienter les décideurs au sujet de la pertinence des investissements dans la maîtrise de l'eau pour l'agriculture et pour le contexte de développement actuel. Le gouvernement a axé sa politique dans le sens de la lutte contre la pauvreté, et il serait judicieux de lui fournir des éléments scientifiquement justifiés pour servir de base à l'élaboration de sa stratégie et à la répartition des ressources rares en sa possession. L'étude sert également aux décideurs du secteur privé et de la société civile comme base de choix stratégiques des partenaires ou des zones d'intervention.



- Problématique de la sécurité foncière : un compte-rendu

10

Problématique de la sécurité foncière¹⁶

Sécurité foncière sur les périmètres irrigués : les leçons de l'affaire du quartier 5 du périmètre aménagé rizicole de la Vallée du Kou (PAVDK) au Burkina Faso.

10.1 Introduction à la problématique de la sécurité foncière

Au Burkina Faso pays agricole et sahélien, l'accès à la terre, à la propriété foncière est un élément capital dans la dynamique quotidienne des populations rurales. Cet accès est resté de nos jours encore une question non résolue. Les différentes législations mises en œuvre sur la question foncière soit sont restées formelles, soit ont cohabité avec un complexe juridique d'essence coutumière. Les conflits des droits qui en ont résulté ont placé les populations rurales dans une insécurité foncière permanente. La mise en œuvre effective de procédures d'accès et d'exploitation de la terre efficace, efficiente et durable est sans nul doute aujourd'hui une demande urgente du développement agricole et rural.

La sécurisation foncière renvoie à l'ensemble des mécanismes juridiques et sociologiques (processus, actions et mesures) permettant à un usager de jouir paisiblement de ses droits fonciers.

Cette situation est loin d'être une réalité même sur les terres aménagées par l'Etat et exploitées par des petits producteurs agricoles.

C'est ce qui ressort de la situation des producteurs exploitant le périmètre aménagé rizicole de la Vallée du Kou dans la province du Houet.

10.2 L'affaire dite du quartier 5 du périmètre aménagé rizicole de la Vallée du Kou : compte rendu

Il s'agit en substance, d'un conflit entre monsieur KYM, membre de la coopérative n°05 (quartier 5) de la PAVDK qui en compte 8, et ladite coopérative à propos de la prise en location par ce coopérateur, de la parcelle rizicole d'un autre membre de la coopérative monsieur NyA.

Monsieur NyA était attributaire d'une parcelle et comptable villageois du quartier 5 ; suite à des démêlés avec la grande coopérative, il a vendu sa parcelle d'habitation pour s'installer à Bobo et mis en location sa parcelle rizicole avec monsieur KYM pour six (6) campagnes agricoles de production sur le PAVDK pour une somme de 500.000 FCFA. Cette location a fait l'objet d'une convention sous seing privé en date du 19 avril 2001.

Le bureau de la coopérative ayant constaté ce fait, et puisque cette pratique est interdite par le règlement intérieur de la coopérative, a initié une démarche d'information auprès de monsieur

¹⁶ Avec la contribution de M. Diallo & B. Sawadogo (AEDE).

KYM qui s'est soldée par une altercation violente entre le président de la coopérative et ce dernier ; ce qui a donné lieu à une plainte de la coopérative auprès du Préfet de Bama.

Le Préfet de Bama pour sa part, a indiqué qu'en ce qui concerne la parcelle rizicole de monsieur NyA, après le départ de ce dernier du quartier, la coopérative était seule compétente pour procéder à une nouvelle attribution. Il a en outre saisi la Gendarmerie pour la suite à donner quant à la menace d'agression au pistolet dont a été victime le président de la coopérative de la part de monsieur KYM.

A ce stade, l'incident fut clos par une demande d'excuse de monsieur KYM.

Cependant, quelques jours après ces différentes interventions, la coopérative est convoquée par le Préfet pour se voir signifier de la part de monsieur Ouék, un colonel de l'armée, l'injonction de rembourser à monsieur KYM la somme de 500.000 FCFA payée à NyA pour la location de sa parcelle.

Cette injonction sera suivie quelques jours plus tard par une convocation du Procureur du Faso sur plainte de monsieur KYM.

Le président de la coopérative a donc répondu es qualité à ladite convocation.

Le procureur du Faso tout en reconnaissant le bien fondé de l'attitude de la coopérative au regard de son règlement intérieur, a recommandé un règlement amiable à savoir, le remboursement à monsieur KYM du montant versé à monsieur NyA en location de sa parcelle.

Le président a alors demandé un délai de 10 jours pour consulter le bureau de la coopérative afin de pouvoir procéder au remboursement.

Le Bureau de la coopérative consulté, a estimé que la somme à rembourser viendrait en déduction des dettes de monsieur KYM en tant que coopérateur et exploitant de la parcelle de monsieur NyA.

Ces dettes ont été évaluées à la somme de Quatre Cent Soixante Cinq Mille (465000) francs CFA se décomposant en (i) 372000 FCFA d'impayés de redevances hydro-agricoles pour 12 campagnes de production sur le PAVDK pour sa parcelle propre (ii) 93000 FCFA d'impayés de redevances hydro-agricoles pour 3 campagnes de production sur la parcelle de NyA en tant que locataire.

Selon cette approche, la coopérative restait devoir à monsieur KYM la somme de 35000 FCFA qu'elle était disposée à lui payer.

Malgré l'accord du procureur du Faso pour cette procédure de remboursement, monsieur KYM refusera d'entériner une telle modalité d'apurement de la dette de la coopérative à son égard.

Le procureur du Faso lui indiquera en conséquence qu'il était en droit de recourir à toute autre la procédure légale pour la solution éventuelle au problème.

Ainsi s'ouvrait une nouvelle étape dans l'affaire dite du quartier 5 du PAVDK.

Par acte d'huissier en date du 18 mars 2002, monsieur KYM ayant pour conseil la Société Professionnelle d'Avocats Karambiri-Niamba, Avocats associés, assignait la coopérative représentée par le cabinet d'avocats associés Sawadogo-Ouédraogo à comparaître devant le Tribunal de Grande Instance (TGI) de Bobo à l'effet de la voir condamnée à lui payer la somme de 500.000 FCFA en remboursement de la valeur locative d'une parcelle aménagée rizicole sur la PAVDK et de celle de 500.000 FCFA à titre de dommages et intérêts.

Malgré l'invocation de la nullité de la convention de métayage résultant de la violation de l'article 11 du règlement intérieur de la coopérative, cette dernière se verra condamnée le 30 Octobre 2002 par le Tribunal à payer la somme de 500.000 FCFA à monsieur KYM.

La coopérative a donc tout naturellement interjeté appel d'un tel jugement dès le 05 Novembre 2002.

La procédure de jugement en appel sera conduite à son terme le 06 Décembre 2004 avec une confirmation de la condamnation de la coopérative à payer la somme de 500.000 FCFA à monsieur KYM.

La cour d'appel de Bobo-Dioulasso tout en reconnaissant que la convention de métayage a été établie en violation de l'article 11 du règlement intérieur de la coopérative, a cependant établi par les moyens de la procédure que, 80% des parcelles rizicoles étaient données en location.

La cour a en conséquence estimé qu'on ne pouvait reprocher à monsieur KYM d'avoir reçu en location la parcelle de monsieur NyA qui en réalité, n'a fait qu'agir comme les autres coopérateurs qui par cette pratique généralisée ont opéré en réalité une modification des dispositions réglementaires de la coopérative.

C'est pour faire suite à ce jugement que, à la requête de monsieur KYM, Maître Kouanda Moussa Huissier de justice près le TGI de Bobo-Dioulasso a engagé le 21 février 2005, une procédure de recouvrement sous la forme d'une « signification-commandement de payer afin de saisie-vente ».

Cette procédure restera pendante jusqu'au 14 mars 2007, date à laquelle, Maître Kouanda se rendra au quartier 5 accompagné des forces de l'ordre pour retirer la parcelle de monsieur NyA attribuée à d'autres exploitants par la coopérative alors que sur ces parcelles, le riz était au stade lait pâteux.

Cela a bien entendu provoqué des remous au quartier 5, vite maîtrisés par le président de l'Union des Coopératives Rizicoles de Bama (UCRB) dont est membre la coopérative du quartier 5.

Ce jour même, une délégation de la coopérative accompagnée du président de l'UCRB se rendra à la préfecture pour s'enquérir de la conduite à tenir en pareille circonstance. Le préfet conseillera à la délégation de rejoindre le plus tôt possible à Bobo-Dioulasso, Maître Kouanda Huissier de justice.

Ce que le président fera quelques jours plus tard afin de s'enquérir auprès de monsieur Kouanda, s'il était possible de suspendre la saisie en attendant que la coopérative vienne régler la somme de 500.000 FCFA due à monsieur KYM.

L'huissier a requis une somme de 80 000 francs pour la composition du dossier de demande de retardement.

Le président de l'UCRB a alors consulté l'avocat de la coopérative qui a recommandé d'une part, de surseoir à toute démarche auprès de l'huissier et d'autre part, la mise en route d'une procédure judiciaire. L'UCRB dès le lendemain versera auprès de l'avocat la somme de 250.000 FCFA exigée par cette nouvelle procédure.

Suite à cela, le président de l'UCRB a été appelé à la gendarmerie pour audition avec six autres personnes du quartier 5 en lien avec les remous et l'opposition à la procédure de saisie de la parcelle engagée par l'huissier de justice.

Au cours de cette audition, le président de l'UCRB a souligné la solidarité de l'Union avec la coopérative n°05 et réaffirmé le refus général des coopérateurs d'accepter la procédure de saisie de la parcelle au profit de monsieur KYM.

Une telle attitude est fondée sur le fait que nul ne contestait ni le fait que la convention de métayage avait été établie en violation des règlements en vigueur de la coopérative, ni les prérogatives de la coopérative et de l'Union d'organiser l'exploitation du périmètre aménagé.

Après cette audition, l'avocat a indiqué à l'Union que la date du procès au terme de cette nouvelle procédure était fixée au 13 juin 2007.

Cependant, le président de l'Union et six autres personnes de la coopérative recevront des convocations de la part du procureur Faso pour une comparution le 8 juin 2007.

Une ligne de défense est établie de concert avec l'avocat pour cette nouvelle procédure engagée par le procureur du Faso qui reproche à ces sept (7) personnes leur opposition à l'exécution d'une décision de justice.

Le procureur du Faso après une brève entrevue avec les sept personnes, leur notifiera leur comparution immédiate. Elles seront ainsi conduites sous escorte en salle d'audience où elles seront jugées et condamnées avec mandat de dépôt.

Le président de l'UCRB ainsi que les six autres membres de la coopérative n°05 seront incarcérés à compter du 8 juin 2007 à la maison d'arrêt et de correction de Bobo-Dioulasso.

Le mardi 12/06/07 deux des personnes détenues, à savoir le président de la coopérative n°05 et le président de l'Union bénéficieront d'une liberté provisoire afin de pouvoir prendre part le 14/06/07 au forum sur le riz organisé par le Ministère de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques.

Le 15/06/07, la relaxe de toutes les personnes détenues interviendra après une audience de la cour d'appel après que l'avocat de l'Union ait produit devant la cour les preuves du versement de la somme de 500.000 CFA entre les mains de Maître Kouanda en remboursement de la valeur locative d'une parcelle aménagée rizicole sur la PAVDK.

L'avocat de l'Union demandera en outre et en conséquence du versement, que la parcelle anciennement exploitée par NyA revienne de plein droit à la coopérative. Ce qui fut accepté et clôturé ainsi, l'affaire dite du quartier 5 du périmètre aménagé de la vallée du kou.

10.3 Enseignements à retenir

« Règlement des conflits dans la perspective d'un enracinement progressif de l'Etat de droit »

Avec l'affaire dite du quartier 5 du périmètre aménagé de la Vallée du Kou, l'exploitation agricole sur le périmètre rizicole est entrée de plein pied dans une approche de gestion fondée sur le droit dit moderne.

Il faut ainsi s'attendre à une certaine montée en puissance de cette forme d'action pour le règlement des contentieux sur le périmètre.

C'est dans une large mesure une bonne chose car consacrant l'enracinement progressif des principes de l'Etat de droit dans le pays.

Une telle perspective amène aussi à s'interroger sur la nature des droits réels des coopérateurs sur les parcelles aménagées et partant, la validité de toute la procédure engagée devant les tribunaux dans l'affaire dite du quartier 5 du périmètre aménagé de la vallée du Kou.

Le périmètre hydro-agricole de la Vallée du Kou, dans la province du HOUET, est régi par les dispositions du décret N°2000-070/PRES/PM/AGRI/MEE/MRA/MEF du 03 Mars 2000 portant adoption du Cahier Général des Charges pour la gestion des petits aménagements hydro-agricoles.

A cet égard, les coopérateurs en l'état actuel d'absence d'un cahier spécifique des charges adopté en vertu du cahier général des charges ne sont titulaires d'aucun droit réel sur les parcelles ; et celles-ci restent parties intégrantes du domaine public de l'Etat et sont au terme de l'article 34 de la Loi N°014/96/ADP du 26 mai 1996 portant Réorganisation Agraire et Foncière (RAF) au Burkina Faso, inaliénables, imprescriptibles et insaisissables.

Peut-on dans ces conditions donner en location sans autorisation quelque chose qui ne vous appartient pas ? Peut-on saisir un bien qui par nature est insaisissable ?

« Une désorganisation totale de la production preuve de carence d'autorité reconnue »

Dans l'état actuel d'exploitation du périmètre rizicole de la vallée du Kou, il convient de noter que ni les coopératives, ni l'UCRB ne sont en mesure d'enrayer la désorganisation totale de la mise en valeur agricole consécutive à la liquidation de la grande coopérative et au désengagement de l'Etat.

Autant pour le paiement de la redevance -malgré les baisses successives de son montant- que pour les autres dispositions adoptées pour l'exploitation agricole et l'entretien du périmètre (location des parcelles, calendrier agricole, variétés, tours d'eau, travaux d'entretien etc...), on note un non respect systématique des règlements édictés et une réelle carence d'autorité reconnue.

La cour d'appel de Bobo-Dioulasso a du reste fondé sur cette situation, sa décision de confirmer le jugement de condamnation de la coopérative n°05 au profit de monsieur KYM.

Que faut-il alors penser de l'avenir d'un périmètre irrigué où 80% des parcelles attribuées aux coopérateurs sont louées et mises en exploitation par des tiers (non coopérateurs) et où aucune règle pour une bonne mise en valeur agricole n'est observée ?

Cela conduira à terme à une perte du capital productif que constitue une telle infrastructure hydro-agricole.

« Une insécurité juridique qui ne fait pas l'affaire des producteurs honnêtes »

La situation des coopérateurs est aujourd'hui caractérisée par une insécurité juridique qui expose leur grande majorité ainsi que les responsables des organisations paysannes à l'arbitraire et aux conséquences de pratiques néfastes.

Cette situation ne fait pas donc l'affaire des producteurs honnêtes, décidés à s'engager dans l'adoption et le respect des principes coopératifs et de mise en valeur efficace, efficiente et durable des terres aménagées.

Elle constitue par conséquent une entrave essentielle à la bonne mise en valeur agricole du périmètre qui accentuera sans nul doute, la paupérisation de la grande majorité des coopérateurs.

« Nécessité de remise à plat des règles pour l'exploitation du périmètre rizicole »

L'affaire du quartier 5 souligne sans équivoque l'urgence pour les coopérateurs du périmètre rizicole de se doter, en concertation avec les autorités compétentes et conformément aux dispositions légales en vigueur, d'un cahier de charges spécifiques pour l'exploitation des parcelles.

Un tel cahier de charges devra organiser une mise en valeur efficace, efficiente et durable de la plaine aménagée de la vallée du Kou en prenant en compte :

- ✓ La sécurisation foncière des producteurs en leur permettant de jouir paisiblement de droits fonciers réels.
- ✓ La mise en œuvre effective sous une organisation et une autorité adaptées de principes d'une bonne mise en valeur agricole (spéculations, calendrier agricole, gestion de l'eau et des infrastructures, redevances).
- ✓ La mise en œuvre de bons principes coopératifs (règlements et gouvernance).

Références bibliographiques

- AEDE, 2004. Rapport sur la gestion des ressources en eau. Rapport établi pour le programme FNPP – sous thème 10 'Eau et Sécurité Alimentaire'. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 49 p.
- Allen, R., L.S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper N° 56. Rome, Italy. 300p.
- Allen R.G., W.O. Pruitt, D. Raes, M. Smith and L.S. Pereira, 2005. Estimating evaporation from bare soil and the crop coefficient for the initial period using common soil information. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 131:1, p. 14-23
- American Society of Photogrammetry, 1980. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, XLVI (10). 1249 p.
- Arcement, G.J.J. and Schneider, V.R., 1990. Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. United States Geological Survey Water-supply Paper: 2339. USA. 67 p.
- Bastiaanssen W.G.M., 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. Doctoral thesis, Wageningen Agricultural University. Wageningen, The Netherlands, 273 p.
- Bazongo B. A., 2006. Etude des pertes d'eau par évapotranspiration des groupes de cultures et des formations forestières en contre-saison dans le bassin versant du Kou, dans l'Ouest du Burkina Faso. Mémoire d'ingénieur en agronomie. Institut du Développement Rural, GEeau plus. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 61 p.
- Belmans, C., J.G. Wesseling and R.A. Feddes, 1983. Simulation of the water balance of a cropped soil: SWATRE. *Journal of Hydrology*, 63: 271-286.
- Berthiaud, A., 2001. Contribution pour une évaluation des relations entre l'usage des eaux de surface et l'occupation de l'espace : Bassin du Mouhoun Supérieur. Maîtrise de Géographie. Université Paul Valéry. Montpellier, France. 122 pp.
- Bieupoudé, G. P., 2008. Mapping groundwater intrinsic vulnerability using a new physically based modelling in Kou basin (Bobo-Dioulasso, Burkina Faso). Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'Equipement Rural. Institut International de l'Eau et de l'Environnement (2iE). 83 p.
- Bos, M.G. and Nugeteren, J., 1990. On Irrigation efficiencies. ILRI publication 19. Wageningen, the Netherlands. 117 p.
- Brouyère S., P.Y. Jeannin, A. Dassargues, N. Goldscheider, I.C. Popescu, M. Sauter, I. Vadillo et F. Zwahlen, 2001. Evaluation and validation of vulnerability concepts using a physically based approach. Actes du 7ème Colloque d'Hydrogéologie en Pays Calcaire et Milieu Fissuré, Besançon, France, 20-22 sept 2001.
- Bureau National des Sols, 2002. Etude morpho-pédologique des provinces du Houet et du Tuy. Rapport Technique N° 126. Ministère de l'Agriculture. Ouagadougou, Burkina Faso. 75 p. + Annexes.
- Carl Bro, (2001). Etat des lieux des ressources en eau du Burkina Faso et de leur cadre de gestion. GIRE (Gestion Intégrée des Ressources en Eau). Direction Régionale de l'Hydraulique, Burkina Faso – DANIDA. 243 p.
- Chemin Y., 2003. Evapotranspiration of crops by remote sensing using the energy balance based algorithms. http://www.iwmi.cgiar.org/assessment/Publications/conference_papers.htm, 10p.
- Choudhury B.J. and N.E. Di Girolamo N.E., 1994. Relations between SMMR 37 GHz polarization difference and rainfall, and atmospheric carbon dioxide concentration. *Int. J. Remote Sensing*, 15, 3643-3661
- CIEH/USAID, 1987. Savanna regional water resources and land use: savanna resources. Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques, Ouagadougou, Burkina Faso. 1282 p.
- Courault D., P. Clastre, J.P. Guinot, and B. Seguin, 1992. Utilisation d'images thermiques NOAA pour estimer l'évapotranspiration à large échelle. Application à la télédétection des effets de sécheresse en France de 1988 à 1990 ; VIIIe journées hydrologiques – ORSTOM ; Septembre 1992. 35-52
- Courault D., B. Seguin, and A. Olioso, 2005. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: from empirical to numerical modeling approaches. *Irrigation and Drainage Systems* 19 (2005) : 223-249.
- Dakouré, D., 2003. Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure Sud-Est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina Faso – Mali) – Essai de modélisation. Thèse de doctorat, Université Paris VI, France.
- Dembélé Y., 1991. Etude des besoins en eau du riz irrigué dans différentes conditions pédoclimatiques du Burkina Faso. Actes semin. Intern. 'L'influence du climat sur la production des cultures tropicales', Ouagadougou (Burkina Faso), 23-28 sept. 1991, CTA Wageningen (Pays-Bas), ISESCO Rabat (Maroc). p. 118-127.
- Dembélé Y., 1995. Modélisation de la gestion hydraulique d'une retenue d'irrigation : application au périmètre rizicole de Mogtédou (Burkina Faso). Thèse de docteur de l'Ecole Nationale supérieure Agronomique de Rennes. France. 156 p.

- Dembélé, Y., H. Kambiré et M. Sié, 2005. Gestion de l'eau et de l'azote en riziculture irriguée au Burkina Faso. Cahiers Agricultures, Vol. 14 N° 6. p. 569-572.
- Denis, A. et B. Tychon, 2007. Projet SAGRIWATEL II bis : Suivi de l'Etat de l'Agriculture wallonne par télédétection. Etude prospective de reconstitution du parcellaire agricole wallon par télédétection et utilisation de géo-identifiants parcellaires dans un contexte de système bloc. Université de Liège, Unité d'Agro-Météorologie, Arlon, Belgique. 62 p.
- Derouane, J. et D. Dakouré, 2006. Etude hydrogéologique et modélisation mathématique du système aquifère du bassin sédimentaire de Taoudéni au Burkina Faso. International Symposium Darcy 2006, Aquifers Systems Management. 17 p.
- Dezetter A. (1991). Modélisation globale de la relation pluie débit. Application en zone de savane soudanaise (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat, Université de Montpellier II. 422 p.
- Dicko D., 2004. Evaluation des performances sur le périmètre de la Vallée du Kou. Projet APPIA-EIER-GEeau. Ouagadougou, Burkina Faso. 39 p.
- Domar E., 2003. Capital Expansion, Rate of Growth and Employment. Editions Breal. 74 p.
- Doorenbos, J. et A.H. Kassam, 1979. Réponse des rendements à l'eau. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage N° 33. Rome, Italie. 193 p.
- ERDAS, 2002. IMAGINE OrthoBASE User's Guide. ERDAS, Inc., Atlanta, USA. 484 p.
- FAO, 2001. Lecture notes on the major soils of the world. World Soil Resources Reports N° 94. FAO. Rome, Italy. 334 p.
- FAO, 2002. Archives de la FAO : Eau et Agriculture. Produire plus avec moins d'eau. L'eau source de sécurité alimentaire – Journée Mondiale de l'Alimentation, 16 octobre 2002. Visité sur www.fao.org (2 octobre 2008).
- Feddes, R.A., P.J. Kowalik and H. Zaradny, 1978. Simulation of field water use and crop yield. Pudaoc, Simulation Monographs, Wageningen, The Netherlands. 189 p.
- Feyen, J., 1987. Field validation of soil water and crop models. In: J. Feyen (Ed.) Simulation models for cropping systems in relation to water management. Proceedings of a symposium in the Community programme for coordination of agricultural research, Nov. 1986, Louvain, Belgium. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg. p. 105-131.
- FIDA, 2001. Mettre fin à la pauvreté rurale. Rapport 2001. 268 p.
- Floyd T., 2001. Transpiration Benefits for Urban Catchment Management. Stormwater Industries Association, Bulletin No 92, Aug. 2001.
- Fortin, J.P., R. Charbonneau, J. Levefre et G. Girard (1971). Proposition et analyse de quelques critères adimensionnels d'optimisation. IASH publication 101 : 458-557.
- Gardin, N., M. Diallo, J. Derouane et S. Brouyère, 1988. Appui à la gestion et à la protection des ressources en eaux souterraines exploitées dans la région de Bobo-Dioulasso. Document de projet DRI. Burkina Faso. 33 p. + Annexes.
- Gommes, R.A., (1983). Pocket computers in agrometeorology. FAO Plant Production and Protection Paper N° 45. FAO, Rome, Italy. 140 p.
- Green, I.R.A. and D. Stephenson, 1986. Criteria for comparison of single event models. Hydrol. Sci. J. 31, 395-411.
- Hoffman J.-M. et D. Sadoulet, 2000. Stratégie Française de l'eau pour le développement. Chambre de l'Agriculture, Paris, France. 30 p.
- Hoogland, J.C., C. Belmans, and R.A. Feddes, 1981. Root water uptake model depending on soil water pressure heads and maximum water extraction rate. Acta Hort. 119: 123-135.
- Horton, A.J. and G.A. Jobling, 1984. Farm Water Supplies Design Manual – Volume II Irrigation Systems (second edition). Farm Water Supplies Section, Irrigation Branch, Queensland Water resources Commission.
- Huete, A.R., 1997, Extension of soil spectra to the satellite: atmosphere, geometric, and sensor considerations, Photo-interpretation, 1996/2:101-118.
- IGN-FI et IGB, 2005. Guide technique de la nomenclature BDOT. Ouagadougou, Burkina Faso. 40 p.
- IIMI, 1997. Analyse diagnostic et performances de cinq périmètres irrigués autour des barrages au Burkina Faso. Projet d'Appui Institutionnel au Ministère de l'Environnement et de l'Eau pour la Recherche-Développement en Management de l'Irrigation au Burkina Faso. Ouagadougou, Burkina Faso. 203 p.
- Illy, L. 1997. La place de la riziculture irriguée dans le système de production agricole et animale au Burkina Faso. p. 131–135. In K.M. Miézan, M.C.S. Wopereis, M. Dingkuhn, J. Deckers, and T.F. Randolph (ed.) Irrigated rice in the Sahel: Prospects for sustainable development. West Africa Rice Dev. Assoc. (WARDA), Bouaké, Ivory Coast.

- Intizar, H. et M.A. Hanjra, 2004. Irrigation and poverty alleviation. Revue of the empirical evidence. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka. 15 p.
- IWACO/BERA, 1988. Etude de prélèvements d'eau entre la Guinguette et la prise de Diaradougou. Projet Vallée du Kou – Mission Néerlandaise, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 32 + annexes p.
- IWACO, 1989. Etude du bilan du Burkina Faso – Tome 2 : Inventaire des ressources en eau. Ministère de l'Eau, Burkina Faso.
- IWACO/BURGEAP, 1998. Diagnostic des grands périmètres irrigués dans le sud-ouest du Burkina Faso : Vallée du Kou – Banzon – Karfiguéla. Tome 1 : Rapport général de synthèse. Programme RESO.
- IWACO/BURGEAP, 1998. Diagnostic des grands périmètres irrigués dans le sud-ouest du Burkina Faso : Vallée du Kou – Banzon – Karfiguéla. Tome 2 : Vallée du Kou. Programme RESO. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 47 p. + Annexes.
- Jackson, R.D., R.J. Reginato, and S.B. Idso, 1977. Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resource Res.* 13, 651–672
- Jackson, R.D., S.D. Idso, R.J. Reginato, and P.J. Pinter Jr, 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resource Res.* 17, 1133–1138
- Jensen, M.E., 1968. Water consumption by agricultural plants. Chap. 1 in *Water Deficits and Plant growth*, Vol II, T. Kozlowski, ed., Academic Press, New York, p. 1-22.
- Kaldor N. et J. Robinson, 2003. Théories économiques, les grands courants, les thèmes majeurs, les nouvelles théories. Editions Breal. 75 p.
- Klemes, V., 1988. A hydrological perspective. *Journal of Hydrology* 100: p. 3-28.
- Kipkorir, E.C. and D. Raes, 2002. Transformation of Doorenbos and Kassam's yield response to water factor to Jensen's sensitivity index. *Irrigation and Drainage systems* 16(1): 47-52.
- Kleijnen J.P.C., 1998. Experimental design for sensitivity analysis, optimization and validation of simulation models. *Handbook of Simulation*, ed. J. Banks, Wiley, 173-223.
- Lahcen O., 2000. Exploitation et entretien des réseaux d'irrigation du périmètre irrigué de la Vallée du Kou. Programme spécial pour la sécurité alimentaire, FAO-Maroc- Burkina Faso. 52 p.
- Laomaïbo, N.. RPM AGROSOC : <http://www.insah.org/pdf/maîtriseau.htm>
- Loague, K. and R.E. Green, 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: Overview and application. *J. Contam. Hydrol.* 7, 51-73.
- Lorenzini G., 2007. Etude du bassin d'alimentation des sources de Nasso (Bobo-Dioulasso, Burkina Faso) - Etat des lieux des ressources en eaux souterraines du bassin du Kou. Mémoire d'Ingénieur civil géologue. Université de Liège. 117 p.
- Lorup, J.K., J.C. Refsgaard and D. Masvimavi, 1998. Assessing the effect of land use change on catchment runoff by combined use of statistical tests and hydrological modeling: Cases study from Zimbabwe. *J. Hydro.* 205: p. 147-163.
- Madhusuban, B., R. Sakthivadivel et H. Intizar. Irrigation impacts of income inequality and poverty alleviation : Policies issues and options for improved management of irrigation systems. Working paper 29. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, 30 p.
- MAHRH, 2004. Les Comités Locaux de l'Eau – Document guide de conception, création et fonctionnement. Ouagadougou, Burkina Faso. 36 p.
- Mamadou Cherif, I., 2006. Bilan en eau et étude comparative des écoulements du bassin versant du Kou. Mémoire d'ingénieur, Groupe des Ecoles EIER-ETSHER, Burkina Faso. 164 p.
- Manley, R.E., 2003. A guide to using HYSIM. Water resource association Ltd. Great-Britain. 105 p.
- Mateos, L., I. Lopez-Cortijo and J.A. Sagardoy, 2002. SIMIS: the FAO decision support system for irrigation scheme management. *Agricultural Water Management*, Vol. 56, Is. 3. p. 193-206.
- Mementi, M. et B.J. Choudhury, 1993. Parameterization of land surface evapotranspiration by means of location dependent potential evapotranspiration and surface temperature range. *Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Space and Time Scales (Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993)*. IAHS Publ. no. 212
- Ministère de l'Action Coopérative Paysanne, 1989. Etude agro-socio-économique des rives du Kou. Projet Sensibilisation et Formation des Paysans autour des Barrages. Burkina Faso. 49 p. + Annexes.
- Molden, D.J. and Gates, T.K., 1990. Performance measures for evaluation of irrigation water delivery systems. *Journal for Irrigation and Drainage* 116: 804-823.

- Monfodji, P.S., 2004. Comparaison de deux outils de modélisation hydrologique au pas de temps mensuel. Essai d'application dans un contexte opérationnel avec peu voire pas de données hydro-pluviométriques. Application au Burkina Faso. Mémoire de fin d'études EIER. 206 p.
- Nagler, P.L., R.L. Scott, C. Westenburg, J. Cleverly, E. Glenn and A. Huete, 2005. Evapotranspiration on western U.S Rivers estimated by the Enhanced Vegetation Index from MODIS and data from eddy covariance and Bowen ratio flux towers. *Remote Sensing of Environment* 97 (3): 337-351.
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual modes. Part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 27(3): p. 282-290.
- N'Diaye D., 2008. Description et évaluation de la réalimentation des aquifères de la région de Bobo-Dioulasso par les précipitations météorologiques. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur de l'Equipement Rural. Institut International de l'Eau et de l'Environnement (2iE). 83 p.
- New House Internet Services B.V., 2008. On-line: www.ptgui.com. The Netherlands.
- Niamian, M.-J, 2008. Analyse critique des principaux composants du bilan d'eau du bassin versant du Kou. Mémoire d'ingénieur, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Burkina Faso. 75p.
- OCDE, 2001. Politiques agricoles des pays de l'OCDE : Suivi et évaluation 2001. OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development. p. 297.
- OCDE, 2001. La réduction de la pauvreté. Les lignes directrices du CAD. Paris, France. 153 p.
- Oubib, L., 2000. Exploitation et entretien des réseaux d'irrigation du périmètre rizicole irrigué de la Vallée du Kou. Coopération Sud-Sud. FAO-Maroc-Burkina Faso. 42 p.
- Ouédraogo S., 1993. Analyse économique de l'allocation des facteurs de production dans les exploitations rizicoles de la Vallée du Kou. CNRST/INERA. Ouagadougou, Burkina Faso. 61 p.
- Popescu I.C. et M. Dachy, 2004. Tests d'une méthode de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque applicables aux nappes aquifères de la Région Wallonne. Application à l'aquifère calcaire du Néblon. Rapport final. Université de Liège. 155 p.
- Puissant, A., 2003. Information géographique et images à très haute résolution : utilité et applications en milieu urbain. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Géographie, Strasbourg, France. 349 + annexes p.
- Raes, D., 1982. A summary simulation model of the water budget of a cropped soil. *Dissertationes de Agricultura* n° 122. K.U.Leuven University, Leuven, Belgium. 110 p.
- Raes, D., B., Deckers, (1995). Simulation of Irrigation Water Requirements of Rice Schemes in the Senegal River Delta and Valley. *Irrigated Rice in the Sahel: Prospects for Sustainable Development*. (Miézan, K.M., Woporeis, M.C.S, Dingkuhn, M., Deckers, J., et Randolph, T.F., eds.) WARDA, Dakar, Senegal. 411-420.
- Raes, D., Mallants, D. and Song, Z., 1996. RAINBOW – a software package for analyzing hydrologic data. W.R. Blain ed. *Hydraulic Engineering Software VI*. Computational Mechanics Publications. Southampton, Boston, p. 525-534.
- Raes, D., 2002. BUDGET, a soil water and salt balance model: Reference manual. (Version 5.0, June 2002). Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, Institute for Land and Water Management, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium. 83 p. (voir aussi: <http://www.iupware.be>)
- Raes, D. and P. Deproost, 2003. Model to assess water movement from a shallow water table to the root zone. *Agricultural Water Management*, Vol. 62, Is. 2. p. 79-91.
- Raes, D., S. Geerts, E. Kipkorir, J. Wellens and A. Sahli, 2006. Simulation of yield decline as a result of water stress with a robust soil water balance model. *Agricultural Water Management*, 81, 335-357.
- Raes, D., 2007. Reference manual for the ETo calculator, Version 2.3 – May 2007. K.U.Leuven, Belgique. 37 p. (voir aussi www.iupware.be)
- Rana G. and N. Katerji, 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy* 13 (2000) 125-153.
- Ritchie, J.T., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resource Research*, 8: 1204-1213.
- Roche, M., 1963. *Hydrologie de surface*. Ed. Gauthier-Villars, Paris, France. 125 p.
- SahelConsult/F.E.T., 1997. Inventaire des ressources en eau : Rapport Final. Programme RESO. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 503 p.
- Sauret E., 2008. Contribution à la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du système aquifère dans le bassin du Kou. Mémoire de fin d'étude de Diplôme d'Etudes Approfondies en Sciences appliquées. Université de Liège (Belgique). 96 p.

- Sauret, E. Etude hydrogéologique et modélisation des potentialités en eaux souterraines de la plaine alluviale du Kou. Thèse de Doctorat. ULg. Belgique. (recherche en cours)
- Saxton, K.E., W.J. Rawls, J.S. Romberger and R.I. Papendick, 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50(4):1031-1036
- Servat E. et A. Dezetter, 1990. Sélection de critères numériques de calage dans le cadre d'une modélisation pluie-débit en zone de savane soudanaise. *Hydml. Continent.*, ml. 5, no 2 : 147-165.
- Steenhuis, T.S., M. Winchell, J. Rossing, J.A. Zollweg et M.F. Walter, 1995. SCS Runoff equation revisited for variable-source runoff areas. *Journal of Irrigation and Drainage Eng.* 121(3):234-238.
- Traoré S. et P. Gombert, 1997. Variations des débits interannuels de la source de la Guinguette. Rapport Interne : Direction Régionale de l'Hydraulique des Hauts-Bassins. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 8 p.
- Traoré, F., 2007. Méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle à l'échelle du bassin versant du Kou au Burkina Faso. Mémoire de DEA en Sciences de l'Environnement, Université de Liège, Belgique. 119 p.
- Tsakiris, G.P., 1982. A method for applying crop sensitivity factors in irrigation scheduling. *Agricultural water management.* 5: 335-343.
- USDA, 1964. Estimation of direct runoff from storm rainfall. *National Engineering Handbook*, Washington DC, USA. Section 4 hydrology, Chapter 4: 1-24.
- U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, 2001. *Water Measurement Manual*. U.S. Government Printing Office, Washington, DC. 317 p.
- Vinod, T. et al., 2002. Qualité de la croissance. Nouveaux horizons. De Boeck Université, Bruxelles, Belgique. (Publié pour la Banque Mondiale). 282 p.
- Warner, W.S., R.W. Graham et R.E. Read, 1996. *Small format aerial photography*. Whittles Publishing, UK. 348 p.
- Wassenaar, T., A. Olioso, C. Hasager, F. Jacob and A. Chehbouni, 2002. Estimation of evapotranspiration on heterogeneous pixels. First International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing, 16-20 September 2002, Valencia, Spain. J.A. Sobrino (Ed.). *Publicacions de la Universitat de València, España*. 458-465.
- Wellens, J. et Compaoré N.F., 2003. Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation – GEeau. Rapport Annuel No 1 (décembre 2001 – Novembre 2002). Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Hauts Bassins, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso & K.U.Leuven, Leuven, Belgique. 123 p.
- Wellens, J. et Compaoré N.F., 2004. Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation – GEeau. Rapport Annuel No 2 (décembre 2002 – Novembre 2003). Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Hauts Bassins, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso & K.U.Leuven, Leuven, Belgique. 141 p.
- Wellens, J. et Compaoré N.F., 2004. Renforcement de la capacité de gestion des ressources en eau dans l'agriculture moyennant des outils de suivi-évaluation – GEeau. Rapport Annuel No 3 (décembre 2003 – Octobre 2004). Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Hydraulique et des Ressources Halieutiques des Hauts Bassins, Bobo-Dioulasso, Burkina Faso & K.U.Leuven, Leuven, Belgique. 124 p.
- Wellens, J., M. Diallo, D. Dakouré et N.F. Compaoré, 2007. Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou. Rapport Technique 1. APEFE-DRI/CGRI. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 127 p.
- Wellens, J. et M.N. Nitcheu, 2008. SIMIS : Guide d'utilisateur et Etudes de Cas. Projet GEeau. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 54 p.
- Wellens, J., F. Traoré, M. Diallo, D. Dakouré et N.F. Compaoré, 2009. Renforcement structurel de la capacité de gestion des ressources en eau pour l'agriculture dans le bassin du Kou. Rapport Technique 2. APEFE-DRI/CGRI. Bobo-Dioulasso, Burkina Faso. 131 p.
- Wiyo, K.A., Z.M. Kasomekera and J. Feyen, 1999. Effect of tied-ridging on the soil water status of a maize crop under Malawi conditions. *Agricultural Water Management* 45: 101-125

Promouvoir des approches innovantes de recherche-développement en matière de gestion intégrée des ressources en eau au Burkina Faso :



Le bassin du Kou, situé dans le sud-ouest du Burkina Faso, est depuis quelques décennies le théâtre de différentes formes de conflits liés à toute une série de problèmes que l'on rencontre généralement dans des zones irriguées.



Dans le bassin du Kou, les aménagements hydro-agricoles recensés couvrent une superficie totale de près de 3.200 ha. Il s'agit pour l'essentiel de périmètres privés formant la ceinture maraîchère, horticole et fruitière de Bobo-Dioulasso et d'un grand périmètre de 1.200 ha réalisé par l'Etat à Bama et spécialisé dans la production du riz.



Outre l'abondance en eau liée à la présence de sources importantes, d'une nappe phréatique facilement exploitable, d'un cours d'eau pérenne et un hivernage à caractère sub-humide, la plupart des utilisateurs d'eau se retrouvent régulièrement en pénurie d'eau à cause d'une augmentation de la population et d'une intensification de l'agriculture irriguée.

Ceci conduit les gestionnaires du bassin à rechercher des outils de contrôle et de suivi.