

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

SCÉNARIOS D'OPTIMISATION DE L'UTILISATION DES TERRES AGRICOLES
EN MILIEU SUBSAHARIEN : CAS DE L'OFFICE DU NIGER AU MALI

THÈSE
PRÉSENTÉE
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DU DOCTORAT EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
SOULEYMANE DEMBÉLÉ

AVRIL 2013

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

À mes parents,
à ma famille,
pour votre soutien qui ne m'a pas fait défaut

AVANT-PROPOS

Cette thèse vient d'une réflexion profonde et des questions non résolues que nous nous posions toujours après notre mémoire du Diplôme d'Études Professionnelles Approfondies (DEPA) à l'Université Senghor d'Alexandrie en Égypte. En effet nous nous rendîmes compte que les aménagements hydro-agricoles dans la zone de l'Office du Niger, au-delà du fait qu'ils contribuaient à l'accroissement des rendements agricoles, généraient aussi beaucoup d'impacts environnementaux négatifs. Cette préoccupation s'est avérée d'autant plus fondée qu'à la suite d'une revue de littérature abondante, nous avons constaté que toutes les politiques menées jusque là, concernant ces aménagements ne privilégiaient que le rendement agricole. Aménager plus de terres en vue d'accroître les rendements agricoles et, assurer la sécurité alimentaire semble être la seule préoccupation des décideurs. À ce jour, il n'existe pas pour la zone un schéma directeur d'aménagement adéquat quand bien même les problèmes d'occupation et d'utilisation du sol se posent. Un tel schéma pourrait aussi prendre en compte les préoccupations environnementales dans la gestion des aménagements.

C'est fort de tous ces constats et, dans le but de contribuer à la résolution du problème que nous est venu le choix du thème de notre thèse dont l'idée maîtresse est l'optimisation des terres agricoles. Cette optimisation se base sur une analyse de l'occupation du sol afin d'élaborer des scénarios durables et remédier ainsi à la question des impacts qui y sont générés.

La diversité des problèmes qu'engendrent généralement les aménagements hydro-agricoles fait qu'il serait fastidieux de les analyser tous à la fois. Nous nous sommes alors intéressés à la dimension environnementale qui est jusqu'ici insuffisamment abordée dans la zone d'étude.

Nous estimons que le modèle d'optimisation ainsi élaboré, aidera à la prise de décision lorsqu'il s'agira d'aborder la question globale des aménagements en incluant les paramètres environnementaux qui influent sur le processus.

La thèse est un travail de recherche qui demande l'implication d'un certain nombre de personnes et d'organismes sans lesquels la tâche n'aurait pas été possible et, que nous tenons vivement à remercier :

Il s'agit en premier lieu du Programme Canadien des Bourses de la Francophonie (PCBF) pour l'assistance financière et les orientations pédagogiques et en second lieu de la fondation de l'UQAM à travers la bourse GENIVAR;

Du corps professoral de l'UQAM et plus particulièrement de l'ISE (Institut des Sciences de l'environnement) pour la qualité de l'enseignement et des conseils académiques;

Du comité d'encadrement de la thèse en l'occurrence de Monsieur Yann Roche, professeur au Département de Géographie à l'UQAM qui a bien voulu accepter diriger ce travail de recherche. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour le soutien tant académique, financier que moral lors des durs moments que comporte tout travail intense de recherche;

À mon codirecteur Monsieur Yves Baudouin, pour l'assistance et les conseils qui ont permis de mener à bien ce travail;

À Monsieur Minamba Bagayoko qui m'a reçu et encadré à l'antenne régionale de l'IER à l'Office du Niger;

Mes reconnaissances vont à tous mes amis et collègues pour leur soutien indéfectible.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT PROPOS	iii
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	x
RÉSUMÉ	xiii
CHAPITRE I	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 Problématique	3
1.1.1 Problématique environnementale liée à la gestion des aménagement hydro-agricoles et particularités de l'Office du Niger	3
1.1.2 Problématique de l'utilisation optimale des terres aménagées à l'Office du Niger.....	12
1.2 Questions de recherche découlant de ces problématiques.....	16
1.3 Objectifs de la recherche et résultats attendus.....	17
1.3.1 Objectif global.....	17
1.3.2 Objectifs spécifiques.....	17
1.4 Résultats attendus.....	18
CHAPITRE II	
ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	19
2.1 Revue de littérature sur les enjeux environnementaux des aménagement hydro-agricoles.....	19
2.1.1 La gestion des terres agricoles.....	19
2.2 Revue de littérature sur l'optimisation des ressources dans un contexte d'aménagement d'hydro-agricole.....	27
2.3 Territoire d'étude.....	31
2.3.1 Présentation du Mali.....	31
2.3.2 Contraintes agricoles du Mali.....	32
2.3.3 Caractéristiques socio-économiques.....	39

2.3.4	Occupation/utilisation du sol et enjeux environnementaux de l'agriculture.....	40
2.3.5	Présentation de la zone de l'Office du Niger.....	41
CHAPITRE III		
	MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE.....	49
3.1	Méthodologie générale de la recherche.....	49
3.2	Méthodologie spécifique de traitement d'image.....	52
3.2.1	Choix et acquisition des images.....	52
3.2.2	Traitement d'images proprement dit et logiciels utilisés.....	55
3.2.3	Analyse de l'occupation du sol de 1934 à 1990.....	58
3.3	Méthodologie spécifique de la démarche d'identification des enjeux environnementaux	58
3.4	Méthodologie spécifique sur la conception du modèle d'optimisation des terres agricoles.....	69
CHAPITRE IV		
	RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	73
4.1	Occupation du sol à l'Office du Niger et discussion sur le changement observé.....	73
4.1.1	Analyse des résultats des différentes classifications sur l'occupation du sol.....	73
4.1.2	Analyse de l'occupation de 1934 à 1999.....	83
4.2	L'analyse environnementale des aménagements.....	85
4.2.1	Les enjeux environnementaux observés lors de la consultation de la population.....	85
4.2.2	Les indicateurs retenus pour l'analyse environnementale.....	88
4.3	L'évaluation de la qualité des sols à l'Office du Niger.....	91
4.3.1	Évaluation de la qualité des sols en zone non aménagée.....	92
4.3.2	Caractéristiques des sols en zone aménagée.....	93
4.3.3	Dégradation des sols dans la zone de l'Office du Niger suite aux aménagements	96
4.4	Les différents scénarios simulés et critique des résultats.....	103

4.5 Discussion sur les limites du modèle.....	123
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PISTES DE RECHERCHE FUTURE...	126
ANNEXE A	132
PHOTO DE LA ZONE EXONDÉE AU NIVEAU DE BOKY WERE	
ANNEXE B	
LES ÉQUATIONS DES SOUS MODÈLES.....	133
ANNEXE C	
DONNÉES AYANT SERVI À LA SIMULATION DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS.....	135
BIBLIOGRAPHIE	147

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
2.1 Les quatre composantes de base de la gestion des terres	20
2.2 Schéma de l'apprentissage par essai et erreur	27
2.3 Processus d'optimisation	28
2.4 Localisation du Mali	32
2.5 Prise d'eau à partir du barrage de Markala qui dessert les trois principaux canaux (Sahel, Macina et Costes Ongoiba)	43
2.6 Les cinq zones de production de l'Office du Niger (voir encadrés).....	44
3.1 Organigramme de la méthodologie générale de la recherche	51
3.2 Organigramme du processus de traitement d'images	57
3.3 Organigramme de la démarche d'identification enjeux environnementaux..	62
3.4 Carte de la commune de Popo, incluant le sous-bassin de M'Béwany	64
3.5 Carte du sous-bassin de Boky Wéré	66
3.6 Carte du sous-bassin de Molodo	67
3.7 Carte des principaux bassins de l'Office du Niger	67
3.8 Organigramme méthodologique de l'analyse comparée des caractéristiques physicochimiques des sols entre superficies aménagées et superficies non aménagées	68
3.9 Organigramme de la conception du modèle	72
4.1 Spatiocarte de l'image Landsat TM de 1990: Office du Niger.....	75
4.2 Spatiocarte de l'image Landsat ETM+ de 1999 : Office du Niger	76
4.3 Carte d'occupation du sol à l'Office du Niger, 1990	77
4.4 Carte d'occupation du sol à l'Office du Niger de 1999	79
4.5 Récapitulatif des caractéristiques des types de sols avant aménagement	93
4.6 Schéma du sous modèle population	105
4.7 Scénario actuel de l'évolution de la population	106
4.8 Schéma du sous modèle utilisation du territoire	107
4.9 Schéma du sous modèle eau	109
4.10 Scénario actuel sur l'évolution de la qualité de l'eau	110

Figure		Page
4.11	Schéma du modèle revenu	111
4.12	Schéma du scénario du Laisser- Faire (LF)	112
4.13	Schéma du scénario intensif (IN)	113
4.14	Schéma du scénario de développement durable (DD)	114
4.15	Schéma scénario du sous modèle évaluation qualité de vie et de l'écosystème	114
4.16	Modèle du scénario du Laisser- Faire (LF)	116
4.17	Modèle du scénario intensif (IN)	117
4.18	Schéma du scénario de développement durable (DD)	118
4.19	Schéma du modèle intégré	120
4.20	Modèle intégré du scénario du Laisser-Faire (LF)	121
4.21	Modèle intégré du scénario intensif	121
4.22	Modèle intégré du scénario de développement durable (DD)	122

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 Composition chimique des eaux de quelques grands fleuves sahéliens en meq/l	11
2.1 Exemple de cadre logique	22
2.2 Pluviométrie liée à la position latitudinale du FIT (Front Inter Tropical) (1985-90)	34
2.3 L'évolution de la pluviométrie et des températures dans l'espace malien (1954 – 1983)	35
2.4 Paramètres hydrologiques	37
2.5 Effets de la déforestation	38
2.6 Accroissement des superficies cultivées en hectares 1934 – 2002	46
2.7 Situation démographique des villages dans la zone de l'Office du Niger ...	48
3.1 Métadonnées	52
3.2 Nomenclature de la classification à deux niveaux selon la FAO	54
3.3 Liste des thèmes agro-environnementaux présentant un intérêt pour les décideurs	61
4.1 Évaluation de la classification de l'image de 1990	78
4.2 Matrice de confusion de l'image de 1990 avec l'indice de Kappa pour chaque catégorie	78
4.3 Évaluation de la classification de l'image de 1999	80
4.4 Matrice de confusion image de 1999 avec l'indice Kappa pour chaque catégorie	80
4.5 Évolution des thèmes de 1990 à 1999	82
4.6 Comparaison de l'évolution des thèmes (1934-1990 et 1990 et 1999)	83
4.7 Critères de pondération des enjeux	86
4.8 Poids des thèmes (enjeux) par sous bassins versants	86
4.9 Analyse des grands enjeux environnementaux	89

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

ACDI	Agence Canadienne pour le Développement International
AGRHYMET	AGRO-HYDRO-MÉTÉOROLOGIE (Organisme subsidiaire du CILSS)
ARPON	Appui à la Riziculture dans les Périmètres irrigués de l'Office du Niger
ATD	Aménagement des plaines du Delta
AusAID	Australian Agency for International Development
BAD	Banque Africaine de Développement
CFA	Communauté Financière Africaine
CILSS	Comité Inter-états de Lutte Contre la Sécheresse au Sahel
CITE	Classification Internationale Type de l'Éducation
CORINE	Coordination of Information on the Environment
CRDI	Centre de Recherches pour le Développement International
CSCOM	Centre de Santé Communautaire
DADR-ON	Division Aménagement et Développement Rural-Office du Niger
DEPA	Diplôme d'Études Professionnelles Approfondies
DBO	Demande Biologique en Oxygène
DCO	Demande Chimique en Oxygène
EPT	Éducation Pour Tous
FEWS-NET	Family Earning Warning System
FIT	Front Intertropical
GAR	Gestion Axée sur les Résultats
GIT	Gestion Intégrée des Terres
GLASOD	Global Assessment of Soil Deterioration
GPS	Global Positioning System
GTZ	Gesellschaft für Technische Zusammen Arbeit
IDH	Indice de Développement Humain
IER	Institut d'Économie Rurale
IGM	Institut Géographique du Mali
LDI	Land Degradation Index

LFA	Logic Framework Analysis
LOA	Loi d'Orientation Agricole
MDO	Multi-Disciplinary Optimization
NEPAD	New Partnership for Africa's Development
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ON	Office du Niger
PDES	Programme de Développement Économique et Social
PIRL	Programme d'Inventaire des Ressources Ligneuses
PNAE	Programme National d'Action Environnementale
PNIR	Programme National des Infrastructures Rurales
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
PRODEC	Programme Décennal de l'Éducation
PRODESS	Programme Décennal du Secteur de la Santé
RBDO	Reliable-based of Design Optimization
SAVI	Soil Adjustment for Vegetation Index
SIDA	Swedish International Development Agency
SIG	Système d'Information Géographique
STELLA	Strongly Typed Lisp-Like Language
STP-CICGQE	Secrétariat Technique Permanent du Cadre Institutionnel Chargé de la Gestion des Questions Environnementales
UBT	Unité Bétail Tropical
URDOC	Unité Recherche Développement Observatoire du Changement
USAID:	United States Agency for International Development
VIN	Vegetation Index Number
WHO	World Health Organization

RÉSUMÉ

Les aménagements hydro-agricoles constituent un moyen d'accroître le rendement agricole et d'assurer ainsi la sécurité alimentaire des populations. Cependant ces aménagements contribuent dans bien des cas à une détérioration du milieu biophysique car les politiques n'intègrent pas souvent une meilleure gestion environnementale.

Ce constat de dégradation environnementale est aujourd'hui perceptible à l'Office du Niger qui est notre zone d'étude:

- L'afflux massif de nouveaux colons entraînant un taux de croissance (3,2%) ;
- La présence de maladies hydriques (50% d'enfants touchés par le paludisme et 80% qui développent la bilharziose urinaire) ;
- La gestion des parcours est rendue difficile (les capacités de charge sont passées de 8 ha / UBT en 1985 à 5 ha / UBT depuis 1990) ;
- Environ 43% d'eau arrive au niveau des parcelles alors que la norme est de 60%.

Même si les impacts ne sont pas de grande ampleur sur la qualité des sols, la salinisation se manifeste dans la zone de Molodo. La nappe phréatique est aujourd'hui remontée à 3 m.

La pression sur la ressource ligneuse, fait qu'à brève échéance il serait difficile de trouver du bois. Cela nous a amené à nous questionner sur la durabilité de ces aménagements.

Les questions de fonds sont : quelles méthodes et outils utilisés pour concevoir un modèle optimal de l'utilisation des terres? Quels sont les principaux paramètres environnementaux pertinents pour le modèle? Quels sont les scénarios qui minimisent les impacts environnementaux?

L'objectif de la recherche vise à construire des scénarios durables pour aider à la prise de décision en matière d'aménagement agricoles.

L'organigramme méthodologique met en avant l'extraction d'indicateurs et de paramètres environnementaux été intégrées à un modèle d'optimisation.

L'analyse de l'occupation du sol indique une réduction de la couverture végétale, les populations se préoccupent plus du maintien de la productivité des sols, mais font également le constat de la persistance des maladies.

D'autres parts, elles n'ont pas conscience du gaspillage de la ressource eau et la gestion des parcours a plus d'ampleur à Boky Wéré, lieu des animaux transhumants ;

L'évaluation des indicateurs pédologiques démontrent que les aménagements influent peu sur la qualité des sols.

Le modèle propose trois scénarios (actuel, intensif et durable). Les scénarios simulés n'indiquent pas de développement durable mais un développement à impact moindre pour le scénario durable car l'indice global n'est stable pour aucun des scénarios.

Notre approche de modélisation apporte une autre vision pour la gestion des problèmes environnementaux des aménagements hydro-agricoles. Elle a ses limites car elle n'a pas la possibilité de simuler tous les paramètres notamment certains indicateurs pédologiques dont les données sont par nature discontinues dans l'espace et le temps.

Mots clés : aménagements hydro-agricoles, indicateurs environnementaux, changement dans l'occupation du sol, paramètres physicochimiques des sols, scénarios optimaux.

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'un des défis actuels de l'humanité est la satisfaction des besoins fondamentaux des êtres humains. L'accès à une nourriture suffisante fait partie de ces besoins fondamentaux.

Le niveau de satisfaction de ce besoin varie selon que l'on se trouve dans telle ou telle région du globe car dans les pays du Nord, les systèmes agricoles sont caractérisés par la surproduction, tandis que ceux du sud dans leur majorité sont en proie à des déficits alimentaires chroniques (PAM, 1996). Ainsi l'une des voies qui s'offrent à ces pays du Sud est l'intensification de leurs systèmes agricoles en vue d'assurer une sécurité alimentaire (Von Braun *et al.*, 1991).

La plupart des études montrent d'ailleurs que peu de pays ont atteint une croissance économique sans une croissance agricole qui l'accompagne ou qui la précède (Mellor, 2000 ; Pinstrup et Pandya, 2001). Accroître la production agricole suppose la mise en place de moyens scientifiques et techniques, afin de produire quantitativement et qualitativement dans un système agricole intensif et diversifié (Hervieu, 2002). L'intensification agricole ne peut se concevoir aujourd'hui sans la mise en valeur des terres agricoles par la pratique de l'irrigation (Laaroussi, 2005).

En 1998, les terres irriguées étaient estimées à 272 millions d'hectares à travers le monde, soit 18% des terres cultivées. Ces terres irriguées contribuaient pour 40% de la production agricole mondiale.

À cette même période, en Afrique subsaharienne, le pourcentage de terres irriguées correspondait à 3,3 %, des terres cultivées soit 5,2 millions d'hectares (Faurès et Sonou, 2000). Cela montre à la fois toute l'importance de l'irrigation dans le système agricole comme moyen d'accroître la production et d'assurer la sécurité alimentaire mais prouve également que l'Afrique subsaharienne n'a pas encore atteint le niveau mondial d'intensification de son système agricole.

Dans les pays en développement, l'utilisation des terres pour la production agricole est dictée par les besoins économiques de populations à croissance accélérée.

Les projections des Nations-Unies indiquent que 80% de l'accroissement de la population mondiale aura lieu dans les pays en développement (Faurès et Sonou, 2000). La production agricole devra être intensifiée pour répondre à cette situation. L'Afrique subsaharienne dispose d'un fort potentiel en terres irrigables qui n'est pas encore totalement exploité (Dingkuhn et Sow, 1997). Malgré l'existence de ce potentiel, on note cependant une pression déjà forte sur les ressources naturelles (Banque Africaine de Développement, 2008).

À ce rythme, la question se pose de savoir si, dans ces zones, l'objectif d'accroître la production en vue d'assurer la sécurité alimentaire sera applicable à plus ou moins brève échéance. La relation entre le rythme d'accroissement de la population et la disponibilité des ressources naturelles est en effet une équation qu'il convient d'équilibrer. La prise de conscience universelle en vue de conserver les écosystèmes naturels est aussi un aspect avec lequel il faudra compter dans les zones irriguées où la forte intensification agricole est censée soutenir la sécurité alimentaire (Millenium Ecosystem Assessment, 2005).

1.1 Problématique

1.1.1 Problématique environnementale liée à la gestion des aménagements hydro-agricoles et particularités de l'Office du Niger

La nécessité d'accroître la production alimentaire a accru la pression à laquelle sont soumises les ressources naturelles, y compris les terres (FAO, 1997). La mise en valeur des terres s'est traduite généralement par l'aménagement de grands bassins hydrographiques. Cela s'est fait le plus souvent au détriment de l'environnement biophysique et humain (Boulain, 2004).

Parmi les divers types d'irrigation qui existent, notre recherche se focalise surtout sur les enjeux et impacts environnementaux des grands aménagements hydro-agricoles.

Conçus pour la plupart dans le cadre de méga projets pour accroître la production agricole, ces aménagements ont révélé très tôt des défaillances fonctionnelles et structurelles sur le plan environnemental (Aw et Diemer, 2005). Ces dysfonctionnements et impacts environnementaux sont regroupés sous deux aspects :

- **Au plan biophysique**

La salinisation des terres et la pollution des eaux par les intrants agricoles (pesticides et engrais) sont presque une marque de commerce des aménagements hydro-agricoles. L'utilisation incontrôlée des pesticides est tout autant une préoccupation environnementale à cause de leur rémanence dans le sol qu'une source de risques sanitaires de pollution de la nappe phréatique.

Le lien entre la perte d'espèces de poissons et le risque de bioaccumulation pour l'homme sont quelques aspects du danger que représentent l'utilisation des pesticides (Pimental, 1986; Rao et William, 1993 ; Lardon *et al.*, 1998). Il importe de comprendre l'évolution et le devenir de ces pesticides eu égard au type de sol et des conditions climatiques, ainsi que leur interaction chimique avec les autres composantes du sol en vue d'ajuster les normes scientifiques requises pour leur utilisation (Estévez-Torres *et al.*, 2008). L'étendue du niveau de contamination des pesticides a été révélée lors d'une étude faite par le US Geological Survey en 1999 sur les ressources en eau aux États-Unis, laquelle démontrait que plus de 95 % des cours d'eaux et environ 50% des puits trahissent la présence d'au moins un pesticide (Roberto et Locatelli, 1999). Les engrais azotés comme le complexe NPK (Azote Phosphate et Potassium), sont également susceptibles de modifier de façon irréversible les propriétés physicochimiques des sols de culture en cas de surdosage (Quinônes et Huang, 2008). Bien que l'on ne dispose pas d'informations fiables sur l'utilisation des ces engrais dans les pays en développement, le risque demeure à cause de l'intensification de la culture du coton et de la riziculture (Vilain, 2003).

La perte du couvert végétal, suite à la pression anthropique et à l'appropriation de certaines forêts pour la réalisation d'aménagements, représente une autre préoccupation environnementale sur ces terres aménagées. Selon la FAO, durant le siècle passé 16% de la dégradation de la partie arable des terres était dû à l'action de l'homme (FAO, 1997).

Cependant, toutes proportions gardées, il convient d'analyser de façon plus approfondie les causes de cette dévégétalisation pour mieux solutionner le problème. Dans les zones d'aménagements hydro-agricoles, on incriminait au début l'afflux massif de colons dans les terres nouvellement aménagées comme étant la cause de cette dégradation. Aujourd'hui on pense plutôt aux pratiques agricoles, à l'utilisation que l'on fait de ces écosystèmes et aux questions foncières (Seabrook *et al.*, 2007).

- **Au plan social**

Les impacts sociaux se résument pour l'essentiel aux conflits sociaux pour l'utilisation du sol. L'analyse des perceptions des différents acteurs des services écosystémiques aide dans certains cas à une meilleure spatialisation du territoire (O'Farrell, 1997).

À cela s'ajoutent parfois les déplacements de populations associés à certains travaux d'aménagements (canalisation et construction de digues, etc.) (Chalinder, 1998). Il faut noter aussi des problèmes de santé humaine (paludisme, schistosomiase, etc.) dus à la présence quasi permanente d'eau sur les superficies irriguées, phénomène notoirement connu dans le contexte subsaharien (Doumenge, 1992).

Ainsi une pression démographique élevée et l'augmentation concomitante de la compétition entre les différents types d'exploitants des terres ont accru le besoin de planification et de gestion des ressources en terres (Antoine, 1997).

Particularités de l'Office du Niger

Le Mali, qui dispose d'un fort potentiel en terres irrigables, est confronté à ce problème, notamment dans la zone de l'Office du Niger, qui est un delta fossile découvert en 1932, situé au centre du Mali. La zone de l'Office du Niger est sans doute le plus grand espace de terres irrigables du pays et probablement l'un des plus grands en Afrique de l'Ouest (Aw et Dejou, 1997).

Sur un potentiel d'environ un million d'hectares de terres aménageables pour l'irrigation, environ 100 000 ha y ont été déjà aménagés. C'est dire qu'il reste encore beaucoup de travaux à réaliser dans ce domaine.

L'objectif de ces aménagements, comme souligné précédemment, est d'accroître la production rizicole pour la sécurité alimentaire et la sécurisation des revenus paysans.

L'État et ses partenaires (la Banque Mondiale, la Banque Islamique, la coopération néerlandaise, etc.) ont investi des sommes importantes pour réaliser ces réhabilitations et aménagements. Les principaux projets mis en œuvre sont: le projet ARPON (Appui à la Riziculture dans les Périmètres irrigués de l'Office du Niger) depuis 1978; Le projet ATD (Aménagements des Terres du Delta) dans les années 1980 et le PNIR (Programme National d'Infrastructures Rurales) en 2000 (Brondeau, 2004).

- **Au plan organisationnel**

L'Office, à la faveur de la restructuration, a donné plus d'autonomie et de gouvernance aux organisations paysannes et s'est consacré à leur encadrement technique (Koné *et al.*, 1997).

Toutefois, malgré quelques succès (accroissement du rendement de 2t/ha à 6t/ha), au demeurant mitigés, les problèmes persistent et sont liés à l'ampleur du changement des thèmes (bâti, pastoral, forêts et terres agricoles) et à la dynamique spatio-temporelle. Ces aspects n'ont pas toujours été bien pris en compte par les politiques d'aménagements. Si l'on sait que d'importants aménagements sont encore prévus dans la zone (Office du Niger, 2004), le suivi risque de dépasser les capacités de collecte d'information et d'analyse des changements par les méthodes classiques. De plus, la convergence de plusieurs facteurs de dégradation confère à ce processus une dynamique qui échappe aux méthodes conventionnelles de traitement de données (Devineau, 1986 ; Defourny, 1989). Les terres agricoles sont affectées par l'utilisation massive d'intrants agricoles. L'objectif actuel de la direction de l'Office du Niger d'aménager chaque année environ 6 000 hectares entraîne une affluence de populations dans la zone et cela a un impact négatif sur les ressources ligneuses déjà insuffisantes (Office du Niger, 2004).

Le bétail accentue la pression sur la biomasse fourragère, appauvrissant de plus en plus les parcours. Les capacités de charge des parcours sont passées de 8 ha / UBT¹ en 1985 à 5 ha / UBT en 1990 (Brondeau, 1999).

La concentration des populations autour des périmètres aménagés pose un problème de l'utilisation du sol entre les terres agricoles et le bâti. Les conflits entre éleveurs, riziculteurs et agropasteurs témoignent de cette situation.

Le portrait des impacts environnementaux au sein des aménagements se présente spécifiquement de cette façon :

- **La gestion des parcours et les conflits d'espace**

Les problèmes liés à la cohabitation agriculture / élevage extensif entraînent de plus en plus la dégradation du réseau hydraulique et des conflits entre agriculteurs et éleveurs. Le cheptel bovin de la zone est estimé à plus de 300 000 têtes selon le recensement de 2000 (Brondeau, 2000). Le taux d'accroissement annuel est évalué à 10% en moyenne (Haidara, 1993 ; Le Masson, 1997 ; Traoré, 1998 ; Brondeau, 1999). Ces animaux dégradent régulièrement les casiers rizicoles occasionnant les conflits fréquents car aucune mesure n'a été mise en œuvre pour permettre le déplacement des troupeaux dans ces casiers (Brondeau, 2000). Des troupeaux de grande transhumance s'attardent un peu sur les « bourthols » en partant vers le Méma et la Mauritanie avant de rejoindre les pâturages du delta vif. La situation est surtout compliquée par le fait qu'il y a un chevauchement entre calendriers agricole et pastoral.

¹ UBT : Unité Bétail Tropical. Correspond à un bovin de 250 kg de poids vif

- **La santé des populations**

La persistance des maladies liées à l'eau (paludisme, maladies diarrhéiques), la montée des Infections Sexuellement Transmissibles (IST) et du Sida, montée amplifiée par la convergence dans la zone de populations venant de tous les horizons complètent le tableau des contraintes (Keiser *et al.*, 2005). Les populations des périmètres irrigués sont en proie à des maladies endémiques telles le paludisme. L'étude de santé environnementale menée en 1998 (Traoré, 1998) nous donne beaucoup d'informations sur les risques sanitaires de la zone. En effet le paludisme sévit de façon permanente toute l'année contrairement à bien de zones où il est surtout constaté en saison hivernale.

Pendant la saison des pluies, c'est l'anophèle de type gambiansae (*Anopheles gambiae*) qui prolifère, alors qu'en saison sèche c'est l'*anopheles arabiensis* qui est le vecteur de la maladie faisant de la zone une zone endémique de paludisme. 50% des enfants de 2 à 9 ans sont touchés par le paludisme chaque année (Traoré, 1998).

D'autres pathologies, telles la dysenterie et la bilharziose sont aussi fréquentes du fait de la proximité des villages et des eaux stagnantes des mares et canaux d'irrigation (Maïga *et al.*, 1992). La dysenterie est due principalement à la pollution des eaux de boisson et de cuisson par les germes fécaux d'*Entamoeba histolytica*. Des prélèvements effectués dans des échantillons de puits montrent que toutes les eaux de ces puits contiennent des germes de ces parasites. Cette même étude montre que 80% des enfants sont infectés de bilharziose (*Schistosoma hematobium*) ce qui est le taux le plus élevé au Mali (Traoré, 1998).

- **La gestion de l'eau et la pollution**

Le fleuve Niger qui irrigue la zone de l'Office du Niger charrie des boues de moins de 50g / m³, une teneur faible par rapport à celle du Nil, estimée à 1 650 m³ en aval du barrage d'Assouan. La teneur de l'eau en sels est de moins de 100 ppm et le sol a un faible ratio d'absorption de sodium (Aw et Diemer, 2005). Cela donnerait à penser que les risques de salinisation et de sodisation sont faibles, même si le principe de précaution doit être de mise.

La présence de nitrates a été signalée dans les eaux de puits et dans les mares et canaux d'irrigation, et entraîné l'eutrophisation du milieu aquatique, phénomène dont l'indicateur est la présence de jacinthes et de lentilles d'eau (*Jatropha*) (Verdier et Millo, 1994; Dagno, 2006). À Niono et à N'débougou, on a également relevé des traces de pesticides dans les canaux en fin de culture (Dembélé et Diarra, 1997; Traoré, 2006; Karim *et al.*, 2007).

La gestion de l'eau à l'Office du Niger risque de poser à terme un problème de pénurie d'eau. En effet, en raison de la caractéristique du réseau d'irrigation des terres aménagées, l'eau est en grande partie prélevée dans le fleuve Niger à partir du barrage de Markala (Hassane *et al.*, 2000).

Malgré une réduction de la consommation d'eau à l'hectare (13 500 m³/ha en moyenne en 2002) suite aux travaux de réhabilitation du réseau, d'énormes gaspillages de la ressource eau sont perceptibles sur les canaux (Hassane *et al.*, 2000; Kuper et Maïga, 2000).

L'efficacité actuelle du réseau gravitaire n'est que de 30 à 40% ; alors que le taux acceptable est de 50 à 60% (Belières *et al.*, 2001). Seuls 43% de l'eau qui entre dans le canal du Sahel au Point A parvient jusqu'aux arroseurs (réseau tertiaire). Les pertes les plus importantes sont enregistrées au cours du cheminement de l'eau dans le réseau de canaux primaires, pertes évaluées entre 22 et 28 % du volume (Bonneval *et al.*, 2002). Une étude

menée par l'IER dans le cadre de son projet PSI (Pôle Système Irrigué) a évalué les consommations d'eau à l'Office du Niger de 1998 à 1999 (Ouvry *et al.*, 1999). Ces pertes s'élèveraient à 25 m³/s en moyenne dans le réseau adducteur. Elles sont imputables à l'évaporation, à l'infiltration et aux fuites par brèche dans les « falas » sur un réseau dense non protégé et aux volumes déversés en aval des zones aménagées.

La connexion clandestine au réseau dans les zones hors-casiers avec des techniques rudimentaires complique l'entretien du réseau et nécessite des lâchées d'eau supplémentaires (Brondeau, 2004). Si aujourd'hui le problème d'eau ne se pose pas encore, cela pourrait se faire sentir dans les années à venir vu que de nouveaux aménagements sont entrain d'être réalisés.

- **La conservation des sols**

La dégradation des sols à l'Office du Niger est un processus qui est en cours. Certains indices expliquent cet état de fait. Les risques de salinisation et de sodisation des sols ont été rapportés par plusieurs études, et se manifestent à certains endroits par l'apparition de concrétions blanches (Bertrand *et al.*, 1993).

Le déficit d'un système adéquat de drainage y est pour beaucoup. En effet les eaux du fleuve du Niger sont peu minéralisées, ce qui limite le risque d'alcalinisation (Barral *et al.*, 1996). Ce phénomène est circonscrit pour l'instant à certaines localités.

Cependant, malgré le faible taux de minéralisation des eaux sahéliennes, qui fait qu'on les considère comme moins dangereuses pour l'irrigation, elles sont carbonatées de sorte que leur concentration par évaporation conduit à rendre le milieu sodique et alcalin.

Ainsi les études géochimiques actuelles dont les données figurent dans le tableau 1.1, montrent que les grands fleuves sahéliens contiennent une quantité de carbonate, de bicarbonate au chlore et de sulfate qui leur confère une alcalinité résiduelle positive (Droubi *et al.*, 1976; Bertrand, 1993; N'diaye et Guindo, 1998). Cela affecte sur la texture des sols.

Tableau 1.1
Composition chimique des eaux de quelques grands fleuves sahéliens en meq/l.

	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	NO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻ CO ₃ ²⁻	Alcalinité
Fleuve Niger Mali									
- Niono	0,13	0,12	0,03	0,13	0,01	0,005	0,00	-	0,42
- Diabaly	0,97	0,55	0,99	2,95	0,96	2,13	0,04	16,08	3,37
Nappe									
Fleuve Niger au Niger									
Lossa (étiage)	0,37	0,21	0,20	0,59	0,00	0,03	0,00	1,47	1,35
Fleuve Sénégal à									
- Kaédi	0,27	0,46	0,03	0,08	0,24	0,00	-	0,90	0,58
- Bodj	0,23	0,31	0,03	0,14	0,38	0,15	-	0,55	0,18
- Bakao	0,28	0,24	0,02	0,08	0,05	0,19	-	0,08	0,36
- Akibé	0,24	0,39	0,04	0,09	0,32	0,00	-	0,80	0,44
Fleuve Logone à Lai	0,17	0,13	0,04	0,14	0,01	0,01	0,00	0,45	0,47
Fleuve Chari à Shar	0,23	0,19	0,05	0,10	0,01	0,01	0,00	0,54	0,54

Source : N'Diaye et Guindo (1998)

Les données du tableau 1.1 montrent que l'alcalinité est plus élevée à Diabaly qu'à Niono car Diabaly est situé en aval de Niono. La concentration par évaporation de ces eaux est plus intense en atteignant Diabaly et contribue ainsi à une alcalinité plus élevée.

On constate également en observant les données du tableau 1.1. que la plupart des eaux des fleuves ont une faible alcalinité résiduelle positive, qui augmente par évaporation. C'est cette alcalinité qui confère aux sols irrigués une alcalinisation plus élevée que la sodisation des sols (N'diaye et Guindo, 1998; Aw et Diemer, 2005).

Tous ces aspects sont aujourd'hui difficiles à analyser en temps réel par les méthodes classiques de suivi telles que les enquêtes de terrain, ou les observations et mesures ponctuelles. La rapidité et la diversité du changement auquel on assiste nécessitent donc un autre angle d'analyse.

C'est dans cette optique que nous voulons apporter notre contribution parmi la kyrielle de solutions proposées dans la littérature, en analysant les aspects spatio-temporels de la gestion des aménagements et en ciblant certains facteurs clés qui sont à la base des problèmes environnementaux qu'engendrent ces aménagements.

Certes, il faut aménager davantage pour accroître le niveau de production et assurer la sécurité alimentaire, mais cela ne doit pas se faire au détriment de la conservation des ressources naturelles et de la préservation du capital sol sur lequel cette production s'appuie. Il s'agit là de proposer des réponses visant une durabilité de la production sur les parcelles à aménager en se basant sur les réalités environnementales actuelles qui doivent nous servir d'éléments de référence.

1.1.2. Problématique de l'utilisation optimale des terres aménagées à l'Office du Niger

Il existe au plan national un cadre légal et institutionnel et une volonté politique très forte de promouvoir le développement de l'agriculture. Les politiques nationales confirment cette réalité. La nouvelle Loi d'Orientation Agricole (LOA) du Mali adoptée en 2009 qui est le dernier instrument juridique de la politique agricole, comporte des éléments visant au développement de l'agriculture, avec comme finalité la sécurité alimentaire et rendre plus compétitif ce secteur sur le marché international (Ministère de l'agriculture du Mali, 2004). En analysant les dispositions de cette nouvelle loi, certains constats se dégagent :

- Son caractère normatif et contraignant, à la différence des précédents documents (plans, programmes et politiques) qui avaient un caractère plutôt indicatif;
- La volonté commune de l'ensemble des partenaires du développement rural de passer d'une agriculture de subsistance à une agriculture intensive et diversifiée;

- La prise en compte de toutes les activités agricoles au sens large du terme, mais aussi de toutes celles situées en amont et en aval, incluant la recherche, le financement, la transformation, le transport, la commercialisation, etc.;
- Elle se veut une « Loi cadre », un point de convergence des autres lois dont l'objet est de les mettre en œuvre. Au cas où ces dernières n'existeraient pas, il faudrait les élaborer et, si elles existent déjà, il faudra les adapter à la Loi d'Orientation Agricole.
- Elle a également une vocation sous régionale, en s'harmonisant avec les politiques agricoles régionales, notamment avec la vision agricole du Nouveau Partenariat pour le Développement Agricole (NEPAD) et des engagements internationaux (conventions et accords).
- Son élaboration relève non seulement d'une démarche participative, par une consultation de tous les acteurs à tous les échelons du secteur du développement rural et par l'implication de tous les autres départements ministériels mais aussi d'une démarche holistique, par une appréhension globale de tous les problèmes du monde rural.

Bien que n'étant pas parfaite, cette nouvelle loi offre un cadre légal plus solide au secteur agricole en particulier et au monde rural en général en vue de jeter les bases pour son développement.

Cependant, au delà des éléments positifs que comporte la loi d'orientation agricole dans l'optique du développement durable, elle ne prend pas en compte toutes les questions liées à la gestion durable des ressources naturelles (International Resources Group, 2006).

L'intensification agricole proposée par la nouvelle loi vise à accroître le rendement agricole, mais elle n'inclut pas dans sa vision les pratiques de meilleure gestion environnementale car elle ne fournit pas d'indicateurs de gestion des ressources naturelles ou environnementaux et aucun de ses objectifs spécifiques n'est mesurable (IRAM, 2001 ; CNOP, 2005 ; Ève, 2009).

La nouvelle loi n'en fait justement pas cas, quand bien même des impacts environnementaux sont perceptibles dans des lieux où cette intensification agricole existe,

surtout au niveau des périmètres aménagés tels ceux de l'Office du Niger (Keddal et N'dri, 2007).

L'un des traits caractéristiques de cette loi est qu'en optant pour une intensification agricole, elle mise sur la réalisation de grands aménagements hydro-agricoles sur toute l'étendue du territoire partout où cela s'avère possible (Loi d'Orientation Agricole, 2006). On comprend dès lors que cette intensification doit être sous-tendue par des actions durables des terres agricoles, support du développement.

Autant il est vrai, comme le disait le prix Nobel indien Amartya Sen, que la lutte contre la faim est un droit pour les plus démunis (Sen, 1999) ; autant il ne faudrait pas se servir de cette lutte contre la faim pour entamer les ressources au détriment des générations futures. La logique des aménagements à l'Office du Niger à la lumière des engagements politiques se poursuit au détriment des aspects environnementaux et humains.

À ce jour, il n'existe pas de schéma directeur d'aménagement élaboré pour l'Office du Niger. Un tel schéma, s'il était élaboré, devrait prendre en compte les préoccupations environnementales pour les futurs aménagements et servir d'outil d'aide à la prise de décision. La politique d'aménagement se base sur le Plan de Développement Économique et social (PDES) et était à la base des incompréhensions entre l'État et certains de ses partenaires (Banque Mondiale) notamment lorsqu'on a voulu élaborer le Schémas directeur d'aménagement en 1994 (Koné *et al.*, 1997). La Banque Mondiale voulait que ce schéma inclue toutes les préoccupations liées aux aménagements hydro-agricoles y compris celles environnementales alors que l'État mettait surtout l'emphasis sur la rentabilité de la production sur les parcelles aménagées.

Sur le plan de la recherche, peu d'études existent sur la modélisation des impacts environnementaux dans la zone de l'Office du Niger. Les études significatives qui ont été effectuées par quelques chercheurs concernent des problématiques spécifiques.

Il s'agit de l'étude de la modélisation des processus hydrogéochimiques des sols à l'Office du Niger (Condom, 2000) et de la modélisation de la gestion d'eau d'irrigation (Vandersypen *et al.*, 2009).

Malgré la pertinence de ces études, il apparaît évident qu'une intégration de ces différentes problématiques s'avère nécessaire pour comprendre davantage la systémique du milieu et leur interrelation dans une dynamique d'évolution.

Il est important de privilégier une démarche d'ensemble en intégrant toutes les thématiques sectorielles dans les politiques de développement de la zone. L'absence de directives environnementales agricoles au plan national et la prise en compte partielle des paramètres de dégradation des sols et des ressources naturelles nous amène à dire que le chaînon manquant du développement hydro-agricole est la faiblesse d'analyse en matière d'occupation / utilisation du sol. Intégrer dans l'analyse, ces paramètres de dynamique spatio-temporelle et de la stratégie d'acteurs est un impératif si l'on veut concilier développement et conservation des ressources naturelles. L'une des voies possibles dans la multiplicité des solutions qui existent est l'optimisation agricole pour une meilleure gestion des ressources.

Ainsi en abordant ce travail, nous nous posons un certain nombre de questions à la lumière desquelles nous espérons contribuer à l'avancement des connaissances sur le sujet.

1.2. Questions de recherche découlant de ces problématiques

Questions clés

Face aux impératifs de sécurité alimentaire, les aménagements sont une nécessité en vue d'accroître la production alimentaire. Cependant, il faut trouver le moyen de prévenir la dégradation de l'environnement et favoriser une meilleure utilisation du sol.

Les questions qui se posent dans un tel contexte sont donc de savoir :

- Quels sont les principaux facteurs de dégradation des ressources naturelles qui sont à l'origine des impacts environnementaux négatifs au sein des périmètres rizicoles irrigués?
- Quel est le modèle d'aménagement qui serait approprié pour mieux optimiser l'utilisation des terres afin d'assurer une production durable à l'Office du Niger? Mieux optimiser signifie ici minimiser l'impact environnemental de ces facteurs en les contrôlant à l'aide de paramètres qui seront intégrés à un modèle.
- Comment concilier les intérêts parfois divergents des différents acteurs au sein des superficies aménagées?
- Notre approche basée sur une meilleure optimisation de l'utilisation des sols par l'élaboration de scénarios durables répond-elle à un tel souci?

La réponse à ces questions fondamentales a pour ambition de contribuer à la prise de décision en matière d'aménagement et de favoriser une utilisation durable des ressources.

1.3. Objectifs de la recherche et résultats attendus

1.3.1. Objectif global

Chercher à répondre aux questions invoquées précédemment est un défi tant pour les scientifiques, les techniciens que pour les décideurs. Le développement de cette agriculture dans l'optique de durabilité passe à notre avis par des schémas d'aménagement qui tiennent compte de l'équilibre écologique du milieu et de la rentabilité des productions qui à leur tour garantissent un mieux-être des populations.

Comment concilier ces différents aspects qui semblent de prime abord antinomiques? L'élaboration de scénarios optimaux de développement agricole durable nous apparaît comme l'une des voies pour y parvenir.

Dans ce sens, le présent travail de recherche vise à construire sur le plan scientifique un modèle de scénarios durables pour aider à la prise de décision en matière d'aménagement agricoles en se basant sur le cas de l'Office du Niger, la plus vaste zone à potentiel d'irrigation hydro-agricole du Mali. Ce travail, s'il est concluant pour la zone à l'étude, peut être élargi à d'autres zones, tant au Mali qu'en Afrique subsaharienne sous les mêmes conditions géographiques.

1.3.2. Objectifs spécifiques

- OS₁: Analyser le changement dans l'occupation du sol entre 1934 et 1990 par l'utilisation d'études sectorielles déjà effectuées et entre 1990 et 1999 par le traitement d'images satellitales et l'extraction d'informations sur les thèmes : La végétation, l'eau, les zones aménagées et zones non aménagées. Les informations à extraire doivent nous renseigner sur l'évolution du milieu en terme de dégradation, de dynamique spatio-temporelle et sur les taux d'augmentation et/ou de régression de certains thèmes d'analyse.

- OS₂ : Évaluer les impacts environnementaux des changements par la consultation des principaux acteurs et en extraire les facteurs explicatifs. Cette évaluation doit faire ressortir les impacts issus du changement ainsi que les principaux indicateurs ayant occasionné ce changement dans la zone depuis le début des aménagements jusqu'à nos jours.
- OS₃ : Développer des scénarios d'utilisation du sol à l'aide d'un modèle optimal afin de minimiser les impacts environnementaux significatifs.

1.4. Résultats attendus

Au regard des objectifs évoqués ci-haut, les principaux résultats attendus seront :

- Deux cartes de l'occupation du sol entre deux périodes, faisant ressortir les principaux facteurs de dégradation des ressources naturelles par l'analyse de l'évolution des thèmes environnementaux (les ressources ligneuses, l'eau, les zones aménagées et zones non aménagées). Ce résultat est en rapport avec l'objectif OS₁.
- L'identification des principaux impacts significatifs et devant être traduits en paramètres pour le modèle. Ce résultat est en rapport avec l'objectif OS₂.
- Un modèle d'optimisation conçu à l'aide de paramètres et variables du changement et permettant de fournir des scénarios durables pour l'aide à la prise de décision. Ce résultat est lié à l'objectif OS₃.

CHAPITRE II

ÉTAT DES CONNAISSANCES

2.1. Revue de littérature sur les enjeux environnementaux des aménagements hydro-agricoles

2.1.1. La gestion des terres agricoles

La gestion des terres agricoles est aujourd'hui une préoccupation pour de nombreux décideurs (OECD, 2010). Cela est d'autant plus important que l'agriculture fait appel à la fois à des contraintes d'ordre environnemental liées aux méthodes et pratiques les plus diverses mais aussi à des contraintes d'occupation et utilisation du sol dues à la diversité des acteurs dont les intérêts sont parfois divergents, voire opposés (Blaize *et al.*, 2009 ; Djonnewa *et al.*, 2000). Un des exemples qui illustre cette situation est la multiplication des conflits autour de la gestion de l'espace entre agriculteurs et éleveurs dans les zones d'aménagements hydro-agricoles (Torre *et al.*, 2010).

Afin de mieux caractériser la notion de gestion des terres agricoles, nous nous plaçons dans le contexte de l'occupation / utilisation du sol. Cela élargi l'horizon des points de vue en intégrant la gestion des terres agricoles dans la gestion des terres tout court (HLPE, 2011).

La gestion des terres s'analyse également sous plusieurs angles (Dale et McLaughlin, 1999) :

- Le plan de la gouvernance impliquant les méthodes de participation;
- Les fonctions que remplissent les terres ainsi que les modes d'utilisation de ces terres faisant intervenir l'application d'outils.

Nous nous limitons à ces aspects car il n'existe pas de système de gestion des terres unanimement accepté à l'échelle internationale. La raison en est que les différents systèmes de gestion des terres sont toujours en train d'être reformés ainsi que les différentes perceptions qu'ont les sociétés par rapport aux terres (Steudler *et al.*, 2004).

Au plan fonctionnel et du mode d'utilisation

La gestion des terres est aussi définie comme le processus d'élaboration, de capitalisation et de dissémination de l'information sur le foncier, d'estimation de la valeur et de l'usage des terres au moment de la mise en œuvre des politiques de gestion (UN- ECE, 2000). Dale et McLaughlin (1999), en plus d'identifier les trois caractéristiques citées dans la définition précédente (propriété foncière, valeur et usage), distinguent quatre fonctions pour les terres : juridique, fiscale, réglementaire et de gestion de l'information. La gestion de l'information est alors transversale par rapport aux trois premières fonctions comme le montre la figure 2.1.

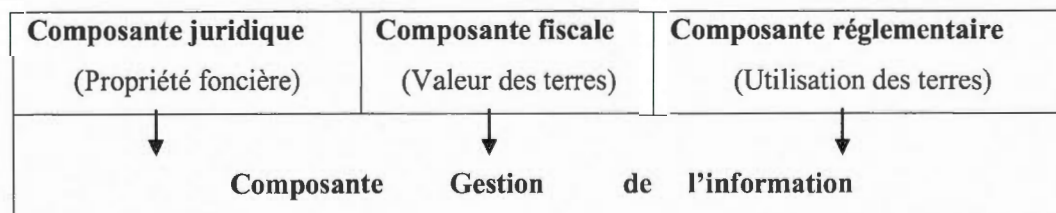


Figure. 2.1 Les quatre composantes de base de la gestion des terres, Source : Adapté de Dale et McLaughlin (1999)

Cependant il faut noter que malgré la pertinence de ces éléments, beaucoup de débats existent dans la littérature sur quel système de gestion des terres retenir et ce avec quels éléments clés, au-delà des particularités socio-économiques, culturelles et du contexte temporel (Lavadenz *et al.*, 2002).

Ainsi la meilleure façon de juger d'un système de gestion est d'évaluer sa performance. Mais dans ce domaine il n'existe pas de normes et tout dépend de l'organisation qui réalise l'évaluation, des objectifs visés, du programme en question, ainsi que du contexte professionnel et de l'expérience des consultants (Steudler *et al.*, 2004).

Il existe cependant une méthode qui requiert l'adhésion de la plupart des intervenants, appelée « Logic Framework Analysis » (LFA) connue également sous le nom de cadre logique en gestion des projets.

C'est une méthode qui intègre dans la gestion des projets de façon générale et la gestion des terres en particulier, les aspects de planification, de suivi et de concertation entre acteurs. La méthode du cadre logique est utilisée par la plupart des agences de développement internationales (ACDI, USAID, SIDA, GTZ, USAID, etc.). Développée par l'USAID à la fin des années 1960, c'est une méthode qui structure les principaux éléments du projet selon un lien logique entre données prévues, activités planifiées et résultats attendus (Norad, 1999). Il existe plusieurs versions du cadre logique, mais le schéma de base se présente comme un tableau matriciel à quatre colonnes et quatre lignes, qui décomposent le projet en extrants résultant des activités, objectifs intermédiaires et objectifs finaux, hypothèses et risques ainsi qu'indicateurs de progrès (Cracknell, 2000). L'intérêt du cadre logique est qu'il aide à résoudre les questions conflictuelles d'ordre foncier qui surviennent généralement lors de la mise en œuvre des projets.

Tableau 2.1
Exemple de cadre logique

Description sommaire des activités	Indicateurs de progrès	Moyens de vérification	Facteurs de Risques / hypothèses de succès
But du projet			
Objectifs du projet			
Résultats produits			
Activités			

Source : Adaptée de Cracknell (2000)

Dans la plupart des pays, c'est ce cadre qui est utilisé et dans l'approche canadienne, on parle plutôt de Gestion Axée sur les Résultats (GAR). Selon Baird (1998), il existe quatre éléments fondamentaux sur lesquels il faut se concentrer lors de l'évaluation de tout système de gestion, à savoir :

- Une bonne définition des objectifs, pour savoir où l'on va;
- Une stratégie claire, pour savoir comment les atteindre;
- Des produits et indicateurs de suivi, pour mesurer les progrès accomplis;
- L'évaluation des résultats, pour apporter des améliorations nécessaires.

La gestion des terres analysée sous l'angle de l'occupation et de l'utilisation du sol fait référence à la dimension spatiotemporelle. Les outils et technologies à référence spatiale tels que les SIG et GPS servent à la fois à mieux définir les limites de l'occupation et aussi à la compilation des données thématiques pour une meilleure utilisation du sol dans le temps (Farley, 2004; Elfick, 2005; Bennet *et al.*, 2008).

Cependant les outils à référence spatiale ne constituent pas à eux seuls le moyen d'expliquer les changements et leur suivi dans l'occupation du sol. Leurs combinaisons avec d'autres approches, y compris qualitatives aident à révéler les tendances dans l'évolution du paysage et fournissent généralement une bonne information pour la planification environnementale (McHugh *et al.*, 2007). Ces outils trouvent cependant toute leur importance dans un contexte d'Agro-Éco-Zonage du territoire (AEZ) en ce sens qu'ils facilitent une élaboration de scénarios tenant compte des enjeux environnementaux et fournissent diverses options surtout en matière agricole (Williams *et al.*, 2008).

Il s'avère donc fondamental de préciser plus avant les deux concepts d'occupation et d'utilisation du sol qui prêtent à confusion car ils sont trop souvent perçus et utilisés comme des synonymes.

L'occupation du sol fait généralement référence aux formes de couverture physique du sol observable soit par vue aérienne, soit par imagerie satellitaire alors que l'utilisation du sol décrit les fonctions et modes d'utilisation des terres et comprend une dimension plus complexe et plus sensible, à savoir les activités entreprises pour produire des biens et services. Ainsi une terre qui a une occupation du sol uniforme, peut avoir plusieurs usages en termes d'utilisation du sol (FAO, 1997).

Au plan de la gouvernance :

Le nouveau paradigme en matière de gestion des terres se base sur les approches de bonne gouvernance, de développement à la base et de durabilité (Zimmermann, 2001). L'histoire de l'évolution de la gestion des terres agricoles est aussi intimement liée au processus d'aide au développement. Les échecs enregistrés au fil des dernières décennies découlent du refus de la plupart des pays bénéficiaires de reconnaître que les aspects institutionnels et décisionnels sont aussi importants que les aspects techniques (Onsrud, 1999). Ces aspects institutionnels requièrent la participation équitable de tous les acteurs y compris des populations locales, la possibilité pour eux d'exercer un contrôle sur la gestion des terres par des moyens tels le plaidoyer et le lobbying afin de défendre leurs intérêts (Lane, 2006). La formation et le renforcement des capacités des acteurs par rapport à leurs besoins afin de les doter des compétences nécessaires est aujourd'hui une condition essentielle pour la bonne gouvernance. Cela figure également en bonne partie dans les priorités des organismes régionaux tels le NEPAD qui au-delà des aspects institutionnel et légal accordent une place importante au développement de compétences pour un management environnemental (Weaver *et al.*, 2003).

La pleine participation des agriculteurs à la gestion des terres et spécifiquement à la gestion de leur terroir requiert la prise en compte des questions économiques qui les touchent,

surtout dans le cadre de l'agriculture de rente. La fluctuation des cours des marchés mondiaux, par exemple, influe beaucoup sur l'amélioration des conditions de vie des agriculteurs et elle a sans doute des conséquences négatives sur la dégradation des terres (Koning et Eric, 2005).

La notion recouvre donc à la fois des aspects de formes de gestion durables ou moins durables, faisant appel à la notion de gestion intégrée des terres (GIT) développée par le CRDI, ainsi qu'à des notions ayant trait aux outils, surtout quand on parle d'agriculture de précision par exemple.

En conclusion, on peut retenir que la gestion des terres s'appuie sur trois conditions indépendantes :

- Une gestion écosystémique dépendante d'une connaissance globale du problème qui se pose en termes de changement (Millenium Ecosystem Assessment, 2005);
- Des solutions technologiques simples et adaptées afin d'innover sur la base des connaissances locales (Hutchinson *et al.*, 2005; Enfors et Gordon, 2007) ;
- Une volonté et une capacité politique de s'engager dans la résolution du problème (Olsson *et al.*, 2006).

Au plan de l'utilisation des outils

La gestion des terres suppose également l'utilisation d'outils pour mieux analyser l'occupation du sol. La détection et la compréhension des variations des processus biophysiques et surtout de l'évolution de l'usage des terres sont d'un intérêt certain pour évaluer l'importance des activités humaines sur les processus essentiels qui gouvernent le système terrestre (Mas, 2000).

Les outils de télédétection jouent également un rôle important pour l'analyse du changement dans l'occupation du sol. L'analyse du changement en appliquant les outils de télédétection consiste en l'identification des différences d'état d'un objet ou d'un phénomène en l'observant à différentes périodes (Singh, 1989; Houet *et al.*, 2003). Ces outils sont

également utilisés en matière d'analyse d'occupation du sol. Les applications couvrent également un large éventail de thématiques (Girard et Girard, 2010). Elles concernent autant l'analyse de la dégradation des sols que l'évaluation et le suivi de la couverture forestière, en passant par l'estimation de la croissance démographique (Koné *et al.*, 2007 ; Benslimane *et al.*, 2008).

Cela aide ainsi à cerner toute la dynamique de l'occupation du sol et dont l'intérêt dans certains cas est d'évaluer la réduction du potentiel productif des sols qui affectent les ressources naturelles (Barrow, 1991). Les études suivantes expliquent comment les données de télédétection (indices spectraux et cartographie des types de sols) servent à l'évaluation de la réduction du potentiel productif des sols.

L'évaluation du niveau de dégradation des sols faite dans le cadre du programme GLASOD (« Global Assessment of Soil Deterioration ») s'appuie également sur des données de télédétection (Oldeman *et al.*, 1991; Hoosbeek *et al.*, 1997). Cette méthode consiste en une cartographie de la dégradation des sols en utilisant l'approche des indices spectraux (Escadafal *et al.*, 1994). Il faut noter que cette étude avait été mandatée par les Nations unies qui ont confié l'exécution à l'International Soil Reference Center (ISRC) et dont l'objectif était d'informer les décideurs sur les risques d'une gestion inappropriée des sols et sur les régions menacées par cette dégradation (ISRIC, 2007 ; Sonneveld et Dent, 2009).

Plusieurs autres études confirment la pertinence de l'utilisation de ces indices, notamment le LDI (« Land Degradation Index ») qui fait une bonne discrimination des propriétés spectrales des sols en rapport avec leur niveau de dégradation et leur composition physico-chimique (Chikhaoui *et al.*, 2005; 2006; 2007).

Ainsi l'étude comparée réalisée dans la vallée du rift marocain (Chikhaoui *et al.*, 2007) a démontré que l'approche des indices spectraux abouti à de meilleurs résultats que l'approche SAM (Spectral Angle Mapper) avec respectivement pour coefficient de Kappa 0.75 et 0.61. D'autres variables thématiques exprimées à l'aide d'indices tels le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) et le

VIN (Vegetation Index Number) existent pour la végétation. Ces indices sont calculés à partir d'une combinaison simple ou complexe entre bandes spectrales (Calloz et Collet, 2001).

L'intérêt de chacune des méthodes utilisées en télédétection est qu'elles permettent de discriminer spécifiquement chaque classe d'objets thématiques. Cela offre ainsi à l'analyste des options de choisir telle ou telle méthode selon l'objet d'étude.

Au-delà des méthodes précédemment citées, il est important de tenir compte de la validation des données, car pour la plupart des approches, on utilise pour l'évaluation des données de télédétection des sources de données préexistantes, surtout pour l'occupation / utilisation du sol. Ces sources préexistantes sont généralement des données vectorielles (courbes de niveau, polygone, vecteurs). En comparant les données vectorielles aux données images de nature matricielle, il existe des problèmes de décalage de géolocalisation, de différences dans les caractéristiques des classes cartographiées, de disparités entre l'échelle de la délimitation polygonale et la résolution spatiale de l'image et des divergences temporelles (Wulder *et al.*, 2006) . L'étude faite par Wulder et ses collaborateurs recommande l'utilisation de cartes dérivées par télédétection pour évaluer la précision des données images. A défaut, il faudra se baser sur les approches tenant compte de l'hétérogénéité des classes à l'intérieur du polygone (Wulder *et al.*, 2006).

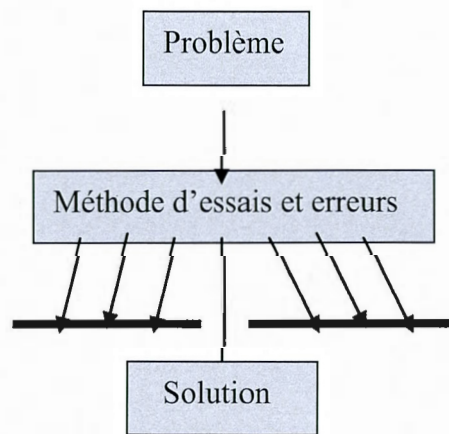
Cependant, dans ce nouveau courant de données multi-sources, la télédétection ne doit plus être considérée comme une fin en soi, mais comme un moyen parmi d'autres servant à l'acquisition d'information utile (Desjardins, 2000).

2.2. Revue de littérature sur l'optimisation des ressources dans un contexte d'aménagement d'hydro-agricole

Le sens que nous donnons ici à l'optimisation, n'est pas son sens mathématique mais celui, plus pragmatique, du point de vue du chercheur ou de l'ingénieur (Desjardins, 2000). L'optimisation devient alors une méthode basée sur la succession d'essais et d'erreurs. Par cette méthode, il s'agit d'observer plusieurs solutions qui s'offrent à nous jusqu'à l'obtention de la solution la plus viable en faisant varier de façon continue les paramètres.

On peut résumer le schéma en trois phases (Popper, 1997) :

- Le problème;
- Les essais;
- L'élimination.



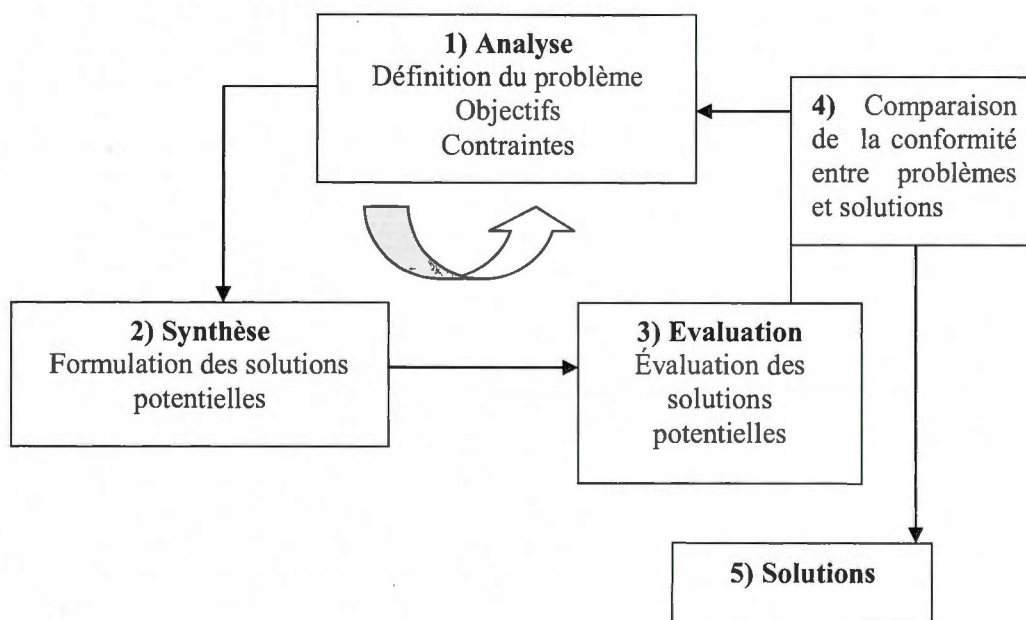
Source : Adapté de Popper (1997)

Figure 2.2 Schéma de l'apprentissage par essai et erreur

Ainsi le processus d'optimisation peut être scindé en trois étapes : analyse, synthèse et évaluation (Balachandran, 1993). Mais auparavant, il importe de bien analyser le problème sous ces différentes facettes et d'effectuer un certain nombre de choix préalables, comme :

- Les variables servant à déterminer les paramètres intéressants à faire varier;
- L'espace de recherche, les limites à l'intérieur desquelles on fera varier les paramètres;
- Les objectifs à expérimenter et à exprimer sous forme de fonctions mathématiques;
- La méthode d'optimisation à choisir en fonction de ces objectifs.

Ces différentes étapes sont schématisées dans la figure suivante :



Source : Adapté de Balachandran (1993)

Figure 2.3 Processus d'optimisation

L'optimisation des ressources dans le contexte agricole fait référence à l'allocation des ressources en rapport avec les intérêts des diverses parties prenantes dans un souci d'équité. Il se base sur l'utilisation d'outils de modélisation pour l'élaboration de scénarios donnant ainsi une large gamme de choix et d'options à la fois aux décideurs et aux autres acteurs. Toutes les méthodologies de recherche concernant l'optimisation des ressources sur l'utilisation des terres agricoles doivent aider à une bonne prise de décision en tenant compte des objectifs de sécurité alimentaire et de sécurisation des revenus des paysans (Keulen, 2007).

La recherche de scénarios durables requiert la collaboration et la coopération de tous les acteurs dans les processus de négociation associée aux méthodologies de recherche et d'analyse de ces scénarios (Van Paassen *et al.*, 2006).

En somme, l'opinion d'experts basée sur le questionnement des outils technologiques intègre également dans les données de base d'une part les données biophysiques et d'autre

part les besoins socioéconomiques de tous les acteurs concernés. C'est après cette étape que les politiques de formulation de gestion sont élaborées sur la base des scénarios proposés par les modèles.

Le processus de recherche comprend différentes phases qui sont :

- Phase de collecte et d'analyse des besoins;
- Élaboration du modèle avec les différentes composantes sociales, économiques et environnementales tenant compte des besoins exprimés;
- Simulation du modèle et production des scénarios optimaux;
- Formulation de politiques logiques de gestion servant de cadre de mise en œuvre pour les différents acteurs.

En fonction des méthodes d'analyse et de traitement, on a recours à des méthodes déterministes ou non déterministes stochastiques, ou à une combinaison des deux, dans des méthodes dites hybrides.

La méthode déterministe se base sur les liens de cause à effet, de sorte que la prédiction des événements futurs par simulation dans un modèle donne les choix opérationnels pour le décideur tandis que la méthode non déterministe évalue les possibilités en tenant compte du fait qu'il existe des phénomènes aléatoires. C'est pourquoi certains chercheurs intègrent de plus en plus en plus dans la modélisation des facteurs qu'on appelle multi-agents, qui associent beaucoup plus les interactions humaines dans les simulations, compte tenu du fait que dans la méthode non déterministe les algorithmes ne peuvent rendre compte du comportement des activités humaines (Ferrand et Deffuant, 1998).

Cependant les systèmes multi-agents n'expliquent qu'en partie les mécanismes qui influencent les prises de décision. Malgré des résultats encourageants associés à la modélisation multi-agent, la validation reste aléatoire pour expliquer de façon satisfaisante les résultats obtenus.

En outre, cette modélisation reste confrontée aux échelles de temps et d'espace. Sa force réside dans le fait qu'elle prend en compte seulement l'échelle d'acteurs (Lardon *et al.*, 1998; Bonnefoy *et al.*, 2000).

Cependant pour compléter l'analyse des informations à traiter, on peut avoir recours à des méthodes complémentaires qui prennent en compte les échelles de temps et d'espace (Parent *et al.*, 1999; Legay, 2000) comme les méthodes d'analyse spatiale qui utilisent les outils de télédétection. Les applications de la télédétection se développent de plus en plus dans le contexte de la modélisation environnementale et les données fournies viennent généralement des satellites qui observent l'évolution des phénomènes terrestres de façon répétitive. Les résolutions spatiales et temporelles des satellites permettent de développer des données cartographiques (spatiocartes) décrivant la situation d'un espace ou d'une zone donnée en un temps donné (Goodchild *et al.*, 1993). Ces données sont disponibles à la fois à l'échelle locale, régionale et internationale et s'inscrivent dans le temps selon les besoins des utilisateurs.

Les capteurs satellitaires offrent un large choix de résolutions spatiale, spectrale et temporelle, pour caractériser et cartographier les couverts végétaux, aussi bien au niveau parcellaire pour l'agriculture de précision, qu'à des échelles plus petites, échelle planétaire par exemple pour les inventaires forestiers mondiaux (Scott *et al.*, 1993). La télédétection contribue ainsi beaucoup à la dynamique de suivi environnemental de phénomènes terrestres.

2.3 Territoire d'étude

2.3.1. Présentation du Mali

Le Mali est situé en Afrique de l'ouest, entre les 10^{èmes} et 20^{èmes} degrés de latitude nord. Il couvre environ 1 241 231 km² de superficie (Coulibaly, 1997) et est bordé par sept (7) États : la Mauritanie, l'Algérie, le Niger, le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire, la Guinée et le Sénégal.

Il est enclavé, au cœur de l'Afrique occidentale, entre le tropique du Cancer et l'Équateur (Benoit, 1989). La plus grande partie de la population vit en milieu rural. La population était estimée à environ 10,7 millions d'habitants en 2000 (Huq *et al.*, 2003) et estimé à 14 159 904 habitants en 2011 (CIA World Factbook, 2011).

Le pays est traversé par deux grands fleuves : le Sénégal et le Niger. Ces deux fleuves offrent d'immenses possibilités en matière de cultures irriguées. C'est notamment le cas pour le delta central du Niger, où la superficie irrigable est d'environ 1 000 000 hectares. C'est une zone de fort peuplement avec une densité de 90 hab. / km² comparativement à la région saharienne du Nord, où elle descend à 5 hab. / km².



Figure 2.4 Localisation du Mali Source: Encyclopædia Britannica (2008).

2.3.2. Contraintes agricoles du Mali

État sahélien par excellence, le Mali a une agriculture très vulnérable aux aléas climatiques. En effet, à l'instar de nombreux voisins de la sous-région ouest africaine, le pays est confronté à une insécurité alimentaire due à la dépendance pluviométrique et à une démographie sans cesse croissante (Berteau, 2007). Les possibilités d'extension de ces terres étant de plus en plus problématique, l'une des alternatives privilégiées par les décideurs est l'intensification agricole. Cependant, cette intensification est souvent perçue comme l'utilisation à outrance d'intrants agricoles (Ouloguem, 2004), engendrant des impacts environnementaux négatifs sur le milieu biophysique et humain.

Cette intensification soulève également des questions de fond relatives à une meilleure répartition dans le temps et dans l'espace de l'utilisation des ressources y afférentes. Dans un

tel contexte, l'agro-climatologie considérée comme une information statistique de nature historique à temps différé fournit des bases pour une planification des opérations agricoles (Franquin, 1984), à la condition toutefois de disposer de chiffres fiables.

Les facteurs influençant l'agriculture au Mali sont :

- **Les ressources en eau**

On estime, pour l'ensemble du Mali, que le volume total des ressources en eau renouvelables des aquifères est de l'ordre de 55 milliards de m³ en année de pluviométrie moyenne (FAO, 1990). L'accès à l'eau souterraine est plus lié à la capacité qu'ont les humains de la mobiliser qu'à sa disponibilité.

- **Le climat**

Le climat constitue ainsi un facteur déterminant car c'est lui qui influence à son tour l'état des sols et de la végétation. Cela a des conséquences sur la mise en valeur des actions humaines (Coulibaly, 1997). Le climat du Mali est influencé par:

- Sa situation en latitude dans la zone intertropicale;
- Sa position en tant que centre d'action des anticyclones maritimes de Sainte-Hélène ; et des Açores d'une part et des basses pressions intertropicales d'autre part.

Ainsi, les courants aériens dominants au Mali sont l'Harmattan, l'alizé continental et l'alizé maritime issu des Açores qui n'engendrent pas de précipitations, et du front de mousson qui s'accompagne de précipitations dans la partie malienne durant la période estivale.

Le climat est ainsi marqué par l'alternance d'une saison sèche (5 mois au Sud et 9 mois au Nord) et d'une saison des pluies (7 mois au Sud et 3 mois au Nord). Les

précipitations annuelles varient de 1 500 mm dans le Sud-Ouest à moins de 50 mm dans l'extrême Nord.

Tableau 2.2
Pluviométrie liée à la position latitudinale du FIT (Front Inter Tropical) (1985-90)

Stations	Hauteur des pluies en mm													
	Avril		Mai		Juin		Juillet		Août		Sept.		Octobre	
	1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	2*	1*	2*
Tombouctou 17°45N- 3° W	0	0	0	0	12,62	3,2	46	9,2	49	7	19,72	4,5	6,44	3
Gao 16° 45N- 0° W	0	0	9	9	0,6	2	29,8	7	85	5	36	3	1,2	I*
Mopti 14°45N- 4° W	0	0	33,12	2,8	54,58	7,2	147,2	12,75	106,87	13	80	7	23,45	1,3
Kayes 14°3N-11°3 W	0	0	5,22	1	66,6	6,6	146,8	10,8	212,8	15	143,2	10	45	
Ségou 13°45N-6° 7W	7	1	44	1	81,3	8,2	113	17,6	132,54	106,7	9,4	2	3,4	3
Bamako 12°3N- 8° W	0,8	0,4	50,46	4	148,7	10	227,5	18	249	17	162	44	5,2	
Sikasso 11° N - 5°40 W	7,5	1,8	107,3	8,3	183,6	18	244	17	263,5	30	100,5	15	67	5

Source : Coulibaly (1997)

Légende : 1* – Hauteur des pluies, 2* - nombre de jours de pluie, I* - Insignifiant

Le tableau 2.2 confirme le fait que la pluviométrie est aussi corrélée à la progression en latitude du FIT, notamment à sa position latitudinale et à l'intensité du front de mousson en Afrique subsaharienne.

Tableau 2.3

L'évolution de la pluviométrie et des températures dans l'espace malien (1954 – 1983)

Années	Noms des stations météorologiques, localisation géographique et éléments climatiques correspondants											
	Kidal		Tombouctou		Mopti		Ségou		Bamako		Sikasso	
	18°30 lat. n		16°45 lat. n		14°35 lat. n		13°45 lat. n		12°30 lat. n		11°8 lat. n	
	0°45 long. w		3° long. w		4°3 long. w		6°7 long. w		8° long. w		5°40 long. w	
	P.a	T.m.a	P.a	T.m.a	P.a	T.m.a	P.a	T.m.a	P.a	T.m.a	P.a	T.m.a
1954	131,1	27,9	380,3	28,9	523,6	27,4	802,6	28,2	1337,8	28,2	1438,5	26,8
1955	99,4	28,8	230	29,4	591	27,4	584,6	27,4	1041,4	28,5	1408	27,1
1956	184,7	28,6	153,9	29,2	699,7	27,6	888,9	27,6	1007,1	28,4	1184,9	26,9
1957	166,3	28,5	247,2	28,9	688,8	27,5	825,6	27,6	1183,9	28,1	1173,3	27,2
1958	173,7	30,1	175,1	29,6	544,1	28,1	684,6	27,5	1272,5	28,4	1449,8	27
1959	203	28,9	234,6	29,5	620	28,3	807,6	27,1	907,4	28,6	1269,8	27,4
1960	95,8	28,6	242,8	29,5	485	27,8	655,2	27,1	907,4	28,6	1269,8	27,4
1961	123,8	27,7	207,5	28,5	416,2	27,4	724,3	27,5	1095,5	28,6	1140,7	26,3
1962	120,8	28,4	175,8	28,6	584,5	27,4	785,2	27,5	1095,5	28,6	1140,7	26,3
1963	125,5	28,8	199,5	29,1	490,9	27,9	765,5	27,9	931,7	26,9	1246,7	26,9
1964	107,3	28,1	216,8	28,7	627,2	27,4	904,4	27,5	1246,8	27,4	1239,9	26,7
1965	161	28,3	143,5	(3)	667,2	27,1	772,8	28,2	950,9	26,6	979,3	25,8
1966	194,4	28,9	100,3	28,7	420,3	28,1	729,9	27,4	1307,9	26,3	1249	26,5
1967	161,4	28,5	141,8	27,6	560,3	27,1	720,5	27,5	1499,5	27,4	1279,4	26,3
1968	124,8	28,8	233,2	27,5	453,8	27,5	558,5	28,2	956,1	26,8	1479,9	26
1969	83,1	29,7	146,7	28,5	514,3	28,5	585,8	27,9	965,7	27,1	1231,6	27
1970	123	29	143,6	28	616,7	28,1	683,1	27,8	848,9	27,5	1347,3	26
1971	89,5	29	171,1	27,9	493,4	28,3	510,1	27,8	1037,7	27,5	888,4	27
1972	92	29	149,8	28,3	390,2	28,5	523,4	27,9	727,6	27,5	1016,8	28
1973	94,4	29	104,5	28,3	326,2	28,8	504,5	28	868,4	28,4	795,8	27,5
1974	193,4	28,1	133,9	27,5	409,4	27,9	615,6	28,3	1260,9	27	1072,1	26,7
1975	95,6	28,6	205,5	27,6	540	27,7	827,5	27,4	975,5	26,6	1098,1	26,2
1976	137,3	28,8	14,5	27,5	511	27,4	704,5	27,3	1116,7	26	1534,8	25,8
1977	128,4	28,1	129,5	28,4	358,3	28,7	682,1	27,3	980,5	26,7	1209,5	26,4
1978	137,5	29,3	119,5	28,7	415,7	28,6	662,8	27,5	1045,1	27,11	1279,6	26,3
1979	128,1	29,4	180,6	28,6	461	28,6	658,5	27,8	1021,5	27,3	1248,5	26,5
1980	197,2	29,3	213,5	28,7	602,7	29,1	508,2	28	922,4	28	1141,8	27,1
1981	157,1	29	161,9	28,1	409,8	26,9	522,2		790,2	27,5	1220,7	26,6
1982	78	29,9	111,6	28,2	324	28,6	391,4		963,3	28	1045,5	26,2
1983			73,8		444,9	29,3					755,5	25,2
	134,5	28,83	174,9	28,48	495	27,96	661,2	27,70	1034	27,54	1112,8	26,6

Moyennes annuelles sur une génération

Source: Direction nationale la Météorologie - années afférentes, tirée de Coulibaly (1997)

Légende : P.a : précipitations annuelles en millimètres; T.m.a : Températures moyennes annuelles en degrés Celsius et 10^{ème}; (3) l'absence de température moyenne pour le mois de mai et rendant difficile l'établissement d'une moyenne annuelle pour l'année 1965. Les cellules non renseignées indiquent qu'il n'existe pas de données pour ces paramètres.

À la lecture du tableau 2.3, on retient les points suivants : en ce qui concerne les températures, les différences entre le nord (Kidal) et le sud (Sikasso) varient légèrement bien que celles du nord soient considérées comme théoriquement plus élevées. Par contre, les différences en matière de précipitations sont très perceptibles. Les moyennes annuelles sur trente ans donnent une variation de 978,3 mm entre le nord (134,5 mm) et le sud (1 112,8 mm).

La caractéristique principale de la pluviométrie est qu'elle n'est pas régulièrement répartie dans le temps ni dans l'espace. Un autre constat est que les plus faibles précipitations enregistrées au sud (suite à la sécheresse de 1983 à 1984) sont supérieures aux précipitations maximales enregistrées au nord (203 mm).

Ces différences de précipitation entre le nord et le sud déterminent les types de climats que l'on rencontre sur le territoire malien. Au nord, c'est un climat saharien de type désertique aride ; au centre, il est de type sahélien ; au sud, il varie de climat soudanien sub-humide à sub-guinéen à l'extrême sud.

L'action humaine a également une répercussion sur les données agroclimatologiques par la déforestation mais aussi par les méthodes et pratiques d'occupation / utilisation du sol. Le tableau 2.4 donne un aperçu des principaux paramètres hydrologiques de la zone centrale de l'Office du Niger. La saison pluviométrique va de mai à octobre, avec 90% de la concentration des pluies entre juin et septembre. Les relevés pluviométriques effectués à Niono, ville principale de la zone indiquent que la moyenne annuelle est de 550 mm avec des limites variant entre 300 et 850 mm (Aw et Diemer, 2005). L'évapotranspiration est très élevée en saison sèche surtout entre les mois de mars et mai, qui est la période de forte chaleur. Le débit au niveau du barrage est à son maximum en période de crue (septembre-octobre) et diminue considérablement en période d'étiage pour atteindre 50m³/sec comme indiqué dans le tableau ci-dessus.

Tableau 2.4
Paramètres hydrologiques

Thèmes	Pluviométrie	Évapotranspiration	Température moyenne	Débit du Niger Markala-barrage
Périodes maximales	550 mm juin-septembre	3 000 mm par an mars-mai	39°Celsius mars-avril	400 m ³ /sec. Septembre- octobre Minimum 50 m ³ /sec. avril-mai

Source : Adaptée de Aw et Diemer (2005)

- La déforestation

Selon l'inventaire de ressources ligneuses (PIRL, 1991), les formations forestières et assimilées occupaient 26,4 % du territoire national, soit 32 797 155 ha en 1990. Cet inventaire estimait aussi que durant la période allant de 1985 -1991, le domaine forestier au Mali de façon globale était évalué à environ 100 millions d'hectares. Sur ces 100 millions d'hectares, 32,4 millions ont réellement une production forestière, soit environ 26 % de la superficie du pays (DNRFFH, 1995). Ces formations ont subi de profondes modifications, dues essentiellement :

- à l'aridité du climat,
- aux sécheresses successives,
- aux activités anthropiques (défrichements agricoles, coupe abusive du bois, surpâturage et émondage, feux de brousse, etc.).

Tableau 2.5
Effets de la déforestation

Années	Production forestière		Observations
	Bois de chauffage contrôlé en stères	Production de charbon contrôlée en quintaux	
1960	95 127	5 492	Moyenne annuelle nationale de la période : 110 281 stères ²
1961	110 310	7 652	
1962	99 316	10 312	
1963	116 805	6 089	
1964	115 345	6 965	
1965	124 786	9 050	
1966	181 431	18 834	Moyenne annuelle de la période : 175 812 stères
1967	177 634	13 167	
1968	non connue	non connue	
1969	164 748	10 465	
1970	181 791	14 169	
1971	155 579	12 053	
1972	193 693	14 797	Moyenne annuelle de 13 années : 455 390 stères
1973	205 433	14 992	
1974	262 815	24 695	
1975	408 568	32 082	
1976	506 139	28 930	
1977	516 379	29 528	
1978	526 033	37 456	
1979	479 101	40 116	
1980	528 181	44 203	
1981	487 104	43 366	
1982	Estimation de cette période à 500 000 stères		
1983			
1984			
1985			
1986	821 472	39 018	Moyenne annuelle : 513 643 stères
1987	53 359	408 049	
1988	311 408	39 895	

Source : FAO (2005)

En analysant le tableau 2.5, on constate que la consommation de bois a surtout augmenté à partir de la décennie 1975. Ainsi les plus fortes consommations de bois pour l'énergie domestique ont eu lieu entre les périodes 1982-1985 et 1986-1988 soit

² Une stère correspond à environ 1m³ de bois.

respectivement 500 000 stères et 513 643 stères. L'accroissement de cette consommation serait sans doute lié à l'accroissement démographique et à la forte demande en consommation énergétique (dépendant du mode de vie d'une société de plus en plus consommatrice).

- Les pratiques agricoles

Les différents systèmes de culture pratiqués au Mali sont généralement l'agriculture itinérante sur brûlis et l'agriculture intensive. L'agriculture itinérante sur brûlis pratiquée de très longue date n'est aujourd'hui plus viable puisque l'augmentation de la densité de population au Mali fait que le pays est dans un contexte de plus de 7 habitants au km² et donc au dessus du seuil de viabilité de ce type d'agriculture (Coulibaly, 1997).

Quant à l'agriculture intensive, elle est surtout pratiquée dans des zones d'aménagements hydro-agricoles où la rareté des surfaces aménagées fait en sorte que les parcelles sont soumises à une exploitation intensive. Cependant, cette exploitation ne s'accompagne pas de mesures qui puissent corriger les impacts environnementaux engendrés par un tel système. Notre travail s'intéresse plus particulièrement à ce système d'agriculture intensive, qui nous semble la voie la plus prometteuse à condition de prendre en compte les effets et conséquences sur l'environnement.

2.3.3. Caractéristiques socio-économiques

La majeure partie des recettes du Mali proviennent de l'exportation du coton (2^{ème} producteur africain) de l'or (3^{ème} producteur africain) et de l'élevage (Aw et Diemer, 2005). La dévaluation du franc CFA en 1990 a par ailleurs entraîné une relance de l'économie avec un taux de croissance de 5,7% par an durant la période 1995 – 2000 (Aw et Diemer, 2005). Il faut aussi noter que cette économie est rurale, pour près de 80% de la population active (Drame, 2004).

C'est pourquoi l'agriculture et ses sous-secteurs d'activités constituent l'un des piliers du développement du Mali. Malgré cela, les indicateurs sociaux restent largement en deçà des attentes. Selon le classement du PNUD sur le critère de l'Indice de développement humain (IDH), le Mali occupe la 175^{ème} place sur 177 (PNUD, 2007) tandis que sur celui de l'Indicateur de pauvreté humaine (IPH-1), il est 81^{ème} sur 88 pays en développement (IPH-1 de 47,3 %) dans le classement de l'année 2000 (PNUD, 2002). Cependant, depuis l'avènement de la démocratie en 1991, des progrès ont été réalisés tant en terme d'accès à l'éducation de base pour rehausser le niveau du taux de scolarisation avec le Programme Décennal pour l'Éducation (PRODEC), qu'en termes d'infrastructures sanitaires, avec le Programme Décennal du Secteur de la Santé (PRODESS) et la mise en place du plateau technique minimum et des Centres de Santé Communautaire (CSCOM) (Traoré *et al.*, 2006).

Le taux brut de scolarisation est passé de 30% en 1991 à 77% en 2005 (UNESCO, 2007) bien qu'il reste encore du travail à faire pour atteindre l'Éducation Pour Tous (EPT) : insuffisance de salles de classes, effectifs pléthoriques, manque d'enseignants, etc.

Sur le plan sanitaire, le constat demeure toujours préoccupant, surtout qu'au Mali, il n'y avait que 0,08 médecins pour 1 000 habitants en 2004, soit un médecin pour 12 500 habitants, et que moins de 50% de la population a accès à l'eau potable (WHO, 2007).

2.3.4. Occupation /utilisation du sol et enjeux environnementaux de l'agriculture

Les préoccupations majeures des agriculteurs et des décideurs des pays en voie de développement sont surtout liées à une meilleure répartition des terres (Ominami, 1986; Zantman, 1990; Koné, 2000). Au Mali, l'agriculture est essentiellement pluviale, avec toutefois d'importantes réalisations de systèmes d'irrigation pour la riziculture, notamment dans le delta du Niger.

Selon l'inventaire de ressources ligneuses (PIRL, 1991), les formations forestières et assimilées occupent 26,4 % du territoire national, soit 32 797 155 ha. Les terres cultivables

représentent 12 % du territoire, soit environ 15 000 000 ha. Le reste, soit 60 %, est constitué de terres de pâturages, d'étendues d'eau (delta intérieur du Niger) et de terres incultes (zone saharienne). C'est dire que le Mali a un fort potentiel en terres agricoles. Depuis la date à laquelle cet inventaire a été dressé, les superficies cultivables ont fortement régressé, principalement à cause de deux facteurs (Koné *et al.*, 1997):

- Le facteur démographique qui a entraîné l'augmentation des établissements humains;
- L'action anthropique due aux méthodes et pratiques culturelles et à la dégradation des ressources naturelles. L'agriculture de rente (coton) pratiquée de façon extensive est à la fois une forme de dégradation et de colonisation de l'espace.

Les conséquences sur les milieux biophysique et humain sont préoccupantes. Cependant, cette maximisation de la production se fait de plus en plus au détriment de l'environnement qui subit davantage des dommages importants. Serait-il alors possible à long terme de produire davantage si les impacts sur le milieu biophysique deviennent de plus en plus négatifs? Ne serait-il pas approprié d'opter dès maintenant pour une logique de développement durable?

2.3.5. Présentation de la zone de l'Office du Niger

- État des lieux des aménagements

L'Office du Niger est le plus ancien des périmètres irrigués de l'Afrique de l'Ouest et l'un des plus étendus. Aménagé à partir des années 1930 dans le delta intérieur du fleuve Niger, sa superficie irrigable est estimée à 1 million d'hectares (Aw et Dimer, 2005). Ce delta intérieur du Niger est probablement l'une des plus grandes réserves de terres alluvionnaires irrigables par gravitation (Aw et Dejou, 1997).

La mise en valeur de ces terres a été rendue possible par la construction du pont barrage de Markala. Conçu pour répondre dans un premier temps à la cotonculture intensive, ses objectifs ont évolué dans un second temps vers la riziculture irriguée intensive (Koné *et*

al., 1997). Le pont barrage de Markala est situé sur le fleuve Niger à 30 Km de Ségou et 270 Km de Bamako (cf. figure 2.5).

Il relève le niveau d'eau d'environ 5 mètres, ce qui permet de couvrir de vastes plaines appartenant au delta intérieur du Niger. A travers les anciens bras morts du fleuve Niger ou « Falas³ » et un réseau dense de canaux d'irrigation et de drainage, ce sont près de 100 000 ha qui sont aménagés à l'heure actuelle et mis en valeur pour la riziculture et le maraîchage comme culture de contre saison.

Cinq zones de production agricole constituent des subdivisions territoriales chargées de la mise en œuvre des activités ayant fait l'objet de plans et programmes approuvés par le Conseil d'Administration. Ces zones jouissent d'une autonomie de gestion se traduisant par la perception directe des fonds de redevance pour des besoins d'entretien du réseau secondaire et la couverture des frais généraux. Il s'agit des zones de Niono, Molodo, Ndébougou au centre, de celle du Macina à l'est et du Kouroumari au Nord (cf., figure 2.6).

Sur le plan des infrastructures, trois principaux canaux desservent l'Office du Niger.

- Le Canal du Sahel qui coule vers le nord, peut transporter jusqu'à 100 m³ d'eau / secondes et après 24 km il atteint une branche fossile d'une rivière appelée « Falas » de Molodo.
- Le canal du Macina coule vers l'est et peut transporter jusqu'à 45 m³ d'eau par seconde. Après un parcours de 20 km, il atteint la branche fossile de la rivière appelée « Falas de Boky wéré », desservant ainsi toute la zone de même nom (zone du Macina).
- Le canal Costes-Ongoïba situé entre les deux précédents, peut transporter jusqu'à 15 m³ d'eau par seconde sur un trajet de 19 km et dessert les plantations de canne à sucre et les nouveaux périmètres de M'Béwani.

Ces chiffres ont été fournis par l'étude menée par Schüttrumpf et Bökkers, (2008).

³ Appellation en langue locale Bamanan de bras morts du fleuve.

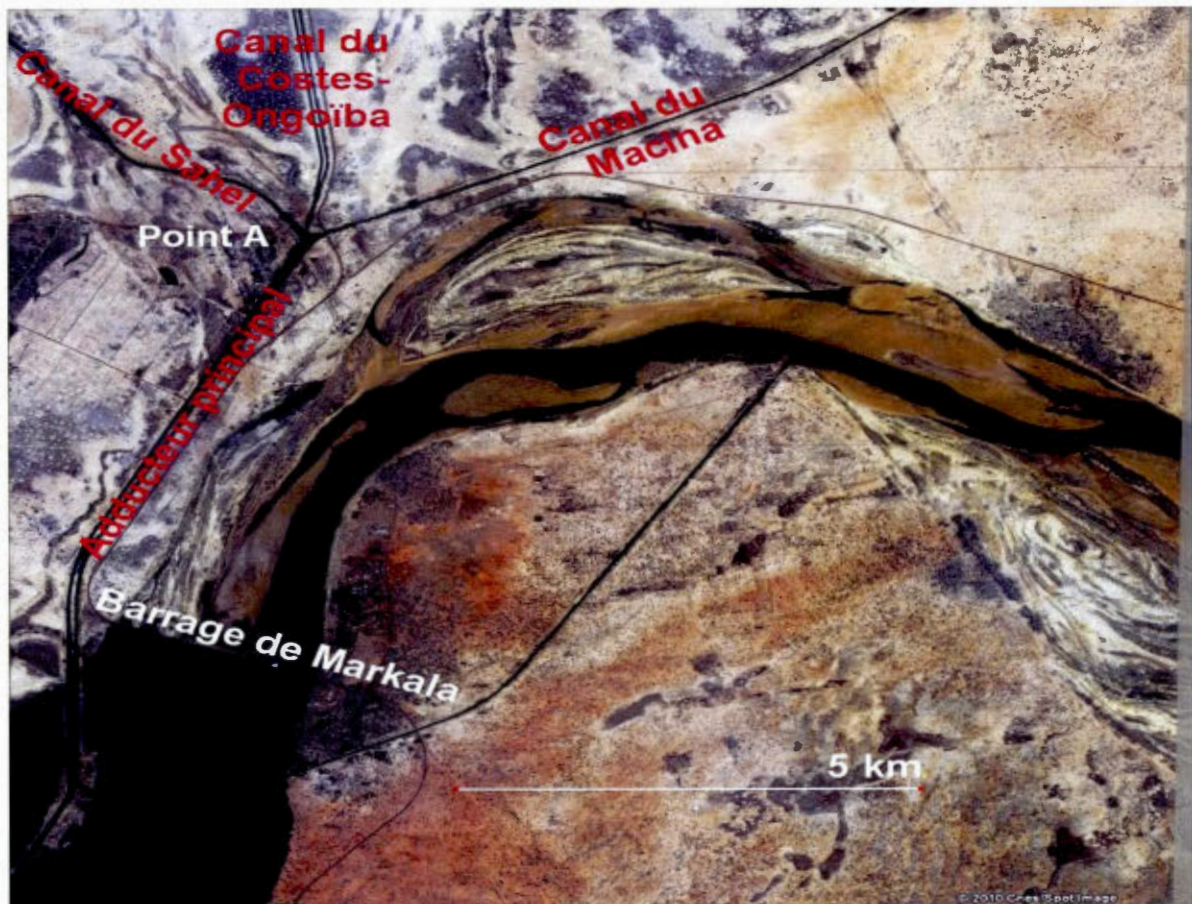


Figure 2.5 Prise d'eau à partir du barrage de Markala qui dessert les trois principaux canaux (Sahel, Macina et Costes Ongoiba), **Source** : Schüttrumpf et Bökkers (2008)

Les périmètres de l'Office du Niger

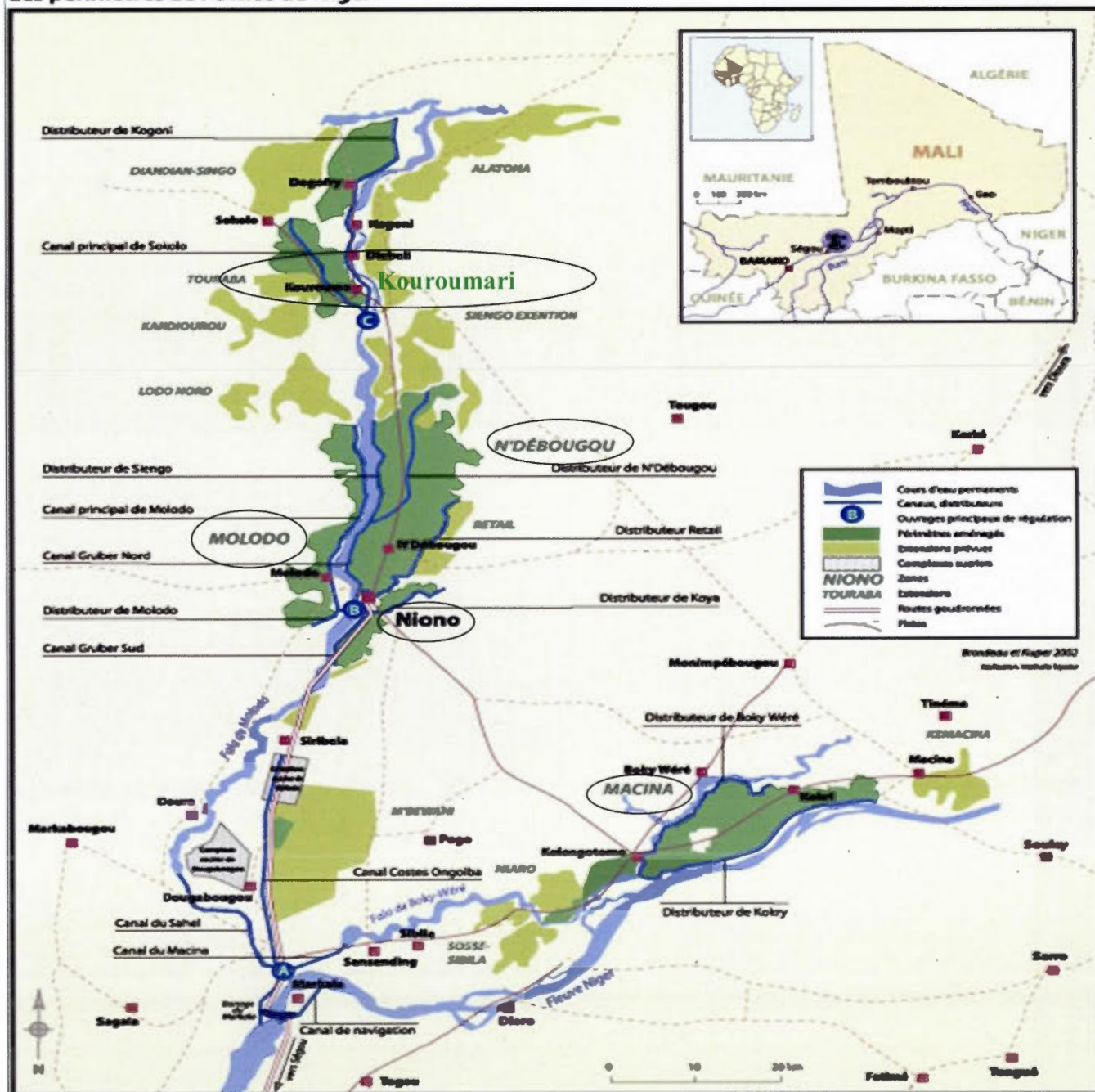


Figure 2.6 Les cinq zones de production de l'Office du Niger (voir encadrés),
Source : Division Aménagement et Développement Rural- Office du Niger (1997)

- Caractéristiques pédo-climatiques

On distingue trois unités morphologiques dans le delta de l'office du Niger (Condom, 2000; Marlet et Ruelle, 2002).

Les hautes levées sableuses, qui sont des sols de type *Seno*, constituées de sables et de limons se trouvent de part et d'autre d'anciens défluent. Elles ont le plus souvent servi à l'installation des canaux d'irrigation comme support.

Les dépressions entre les hauteurs sableuses appelées sols de type *Danga* sont des cuvettes de décantation composées de matériaux limoneux et argilo-limoneux reposant sur des dépôts argileux.

Les cuvettes de décantation ont été soumises à une longue inondation lorsque le delta mort était fonctionnel. Elles comprennent des sols argileux dont la structure est de deux types : une structure sous forme de prisme et grossière (type *Dian*) ou sous la forme de structure à surface grenue et polyédrique fine (type *Moursi*). Tous ces types de sols ont une composante argileuse importante de type illites, kaolinite et smectite (Condom, 2000).

- L'état des aménagements

La superficie cultivée annuellement a progressé de plus de 53% au cours de l'avant dernière décennie : période 1994-1995 à 2002-2003 (Aw et Diemer, 2005). L'augmentation des superficies en riz résulte des récupérations de terres lors des travaux de réhabilitation et d'extension. Par ailleurs la culture de contre saison est en pleine expansion. L'évolution la plus spectaculaire est celle de l'intensification de la production agricole irriguée avec une augmentation constante des rendements en riz depuis plus de dix ans (Aw et Diallo, 1996 ; Bonneval *et al.*, 2002 ; Belières *et al.*, 2006).

La production annuelle du riz paddy a progressé rapidement pour atteindre environ 427 807 tonnes en 2002 / 2003 sur une superficie mise en valeur de 74 504 ha, soit 5,74 tonnes (IER, 1998 ; Boschmann, 2008) à l'hectare alors qu'en 1987, cette même production était estimée à 2,2 tonnes /ha (Ministère de l'Agriculture du Mali, 2004).

Tableau 2.6
Accroissement des superficies cultivées en hectares 1934 - 2002

Période	Moyenne annuelle (ha)	Total cumulé (ha)
1934 - 35	457	457
1935 - 40	2 148	11 198
1940 - 45	2 199	22 195
1945 - 50	289	23 642
1950 - 55	2 463	35 958
1955 - 60	1 766	44 791
1960 - 65	1 694	53 260
1965 - 94	-	53 260
1994 - 95	192	53 452
1995 - 2000	624	56 573
2000 - 02	3 864	64 437
2002 - 2003	10 067	74 504

Source : Aw et Diemer (2005)

N.B. les statistiques concernant les superficies cultivées entre 1965 et 1994 ne sont pas disponibles.

L'analyse du tableau 2.6 montre que les superficies cultivées ont surtout progressé de 1934 à 1965, passant de 457 ha à 53 260 ha soit une augmentation de 52 803 ha, ce qui représente une évolution de plus de 1000%. Cela s'explique par l'engouement qui a prévalu à la création de l'Office du Niger et qui visait à faire de cette zone le grenier de l'Afrique de l'Ouest.

À la faveur de la restructuration de 1984 à 1994, l'Office et ses partenaires ont décidé de redynamiser la production agricole (Mendez del Villar *et al.*, 1995 ; Mariko *et al.*, 1999). L'extension du domaine aménagé est possible au regard des disponibilités importantes en ressources naturelles. Le Mali vise d'une part le maintien de l'autosuffisance alimentaire du riz et d'autre part son exportation vers les autres pays de la sous-région. Pour relever ce défi,

le gouvernement a lancé un important programme d'extension de 50 000 ha à aménager d'ici 2007 dont 26 326 ha à l'Office du Niger (Brondeau, 2009). Par ailleurs, la mise en œuvre du schéma directeur de développement de la zone Office du Niger prévoit l'aménagement de 120 000 ha supplémentaire (Ministère de l'Agriculture du Mali, 2004 ; Troy, 2010).

Cependant, il est important que tous ces aspects soient pris en compte dans les politiques de développement de la zone. L'absence de directives environnementales agricoles au plan national et la prise en compte partielle des paramètres de dégradation des sols et des ressources naturelles dans la gestion des aménagements nous amène à dire que c'est le chaînon manquant du développement hydro-agricole.

- La démographie

Les facteurs évoqués précédemment font de la zone de l'Office du Niger un pôle de développement attractif. Ce qui se traduit par de fortes densités de population. En 1997, l'Office du Niger avait une population d'environ 350 000 habitants (Koné *et al.*, 1997). Les informations sur le nombre de villages encadrés ainsi que la répartition hommes / femmes figurent dans le tableau 2.7. En 1998, les statistiques de l'ON estimaient la population à 360 000 habitants soit une augmentation d'environ 100 000 entre 1997 et 1998, avec une densité moyenne de 17,5 habitants au km² (environ 100 hab. / km² dans le Kala inférieur) contre 6, 2 hab. / Km² au plan national (Office du Niger, 2004, 2009). Le taux d'accroissement annuel était de l'ordre de 4% en milieu urbain et de 2% en milieu rural. Cette forte densité relative s'explique par l'accroissement naturel de la population et de l'immigration.

L'Office du Niger est une zone de brassage culturel avec plus de 21 groupes ethniques recensés (Sanogo *et al.*, 2003; Boschmann, 2008). Les ethnies les plus représentées sont les Bambara (37 %), les Miniankas (14 %), les Marka (12 %), les Peulhs (10 %) et les Bozo (6 %).

Le peuplement de la zone Office du Niger résulte en partie de la colonisation. Les colons ou fils de colons restent majoritaires avec 52 % des chefs d'exploitation (Sanogo *et al.*, 2003). Cependant les autochtones (originaires des villages de la zone antérieure à la colonisation) représentent 24 % et les nouveaux arrivants, venus après la période post-colonisation des années 80 constituent eux aussi une part importante des chefs d'exploitation enquêtés (24 %) (Bélière *et al.*, 2001).

Malgré le fait que les populations affluent dans la zone surtout lorsqu'il y a de nouveaux aménagements, la démographie reste également influencée par les taux de morbidité (24,9%) et de mortalité juvénile (123‰) élevés (Ministère de la santé du Mali, 2002 ; Diarra, 2006). Les causes sont surtout d'ordre sanitaire avec la présence quasi permanente d'eau stagnante dans les périmètres irrigués entraînant une occurrence plus élevée du paludisme et des schistosomiasis telles la bilharziose (Traoré, 1998) :

- 50% des enfants sont touchés annuellement par le paludisme;
- 80% des enfants ont la bilharziose.

Tableau 2.7
Situation démographique des villages dans la zone de l'Office du Niger

Nombre de villages	249
Nombre de familles encadrées	26 435
Population totale	350 079
Hommes	174 471
Femmes	175 608

Source : Koné *et al.* (1997)

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

3.1. Méthodologie générale de la recherche

La méthodologie que nous avons utilisée est une approche quantitative basée sur une modélisation prédictive. En méthodologie de recherche, elle fait partie des méthodes dites déterministes. Les outils et méthodes spécifiques utilisés pour cette étude sont variés : les entretiens avec certains acteurs clés de terrain, la revue de littérature, les relevés terrain et les données numériques. Les raisons qui nous ont amené à utiliser plusieurs outils sont de deux ordres.

Il s'agissait d'une part, de pallier les lacunes (données incomplètes) qui existent en matière de collecte de données dans le contexte africain en n'utilisant qu'une seule méthode. Le choix de plusieurs outils nous aide dans une certaine mesure à faire non seulement un recoupement d'informations, mais aussi à disposer de données particulières qu'un seul outil ne permettrait pas d'obtenir. Les données sociologiques collectées à l'aide de guides d'entretien identifient des manifestations environnementales par les enquêtes d'opinions et seront approfondies par des mesures et relevés terrains (de nature pédologique) qui se font avec les outils spécifiques (sondes, appareil de laboratoire, etc.). Ainsi par exemple lors des enquêtes d'opinions, si une des préoccupations des populations s'avère être la dégradation des terres de culture, ceci est confirmé par des analyses pédologiques qui fourniront plus de détails sur les caractéristiques physicochimiques de cette dégradation. Aussi l'évaluation de certaines thématiques telles le couvert végétal fait par le traitement d'images peut être confrontée à des études similaires d'inventaires forestiers dans la même zone pour compléter ou valider les informations de part et d'autres.

D'autre part, la collecte d'informations, dans un processus de recherche environnementale, se veut plutôt une approche écosystémique, interdisciplinaire eu égard à la dynamique d'évolution des systèmes environnementaux. Il faut nécessairement un dialogue entre les disciplines. Les aspects pour lesquels nous n'avons pas de compétences particulières ont été validés par les résultats d'études spécifiques menées par d'autres chercheurs dans la même zone.

Les raisons évoquées ci haut nous ont ainsi conduit à associer à la fois des méthodes de modélisation environnementale qui relèvent des sciences exactes, les relevés terrain qui sont du domaine des sciences expérimentales et les entretiens ciblés qui sont des sciences sociales.

Les informations collectées sont analysées comme dans le cadre d'un audit environnemental lorsque l'on se place dans une démarche d'évaluation environnementale, en ce sens qu'on évalue les impacts environnementaux et sociaux réels après la mise en œuvre des projets d'aménagement. Ces données collectées et analysées sur les aménagements existants sont ensuite intégrées à un modèle d'optimisation pour la simulation. La finalité du processus est alors de prédire l'évolution des phénomènes environnementaux pour l'aide à la décision lorsqu'il s'agira de concevoir des programmes futurs d'aménagements hydro-agricoles.

Figure 3.1 Organigramme de la méthodologie générale de la recherche

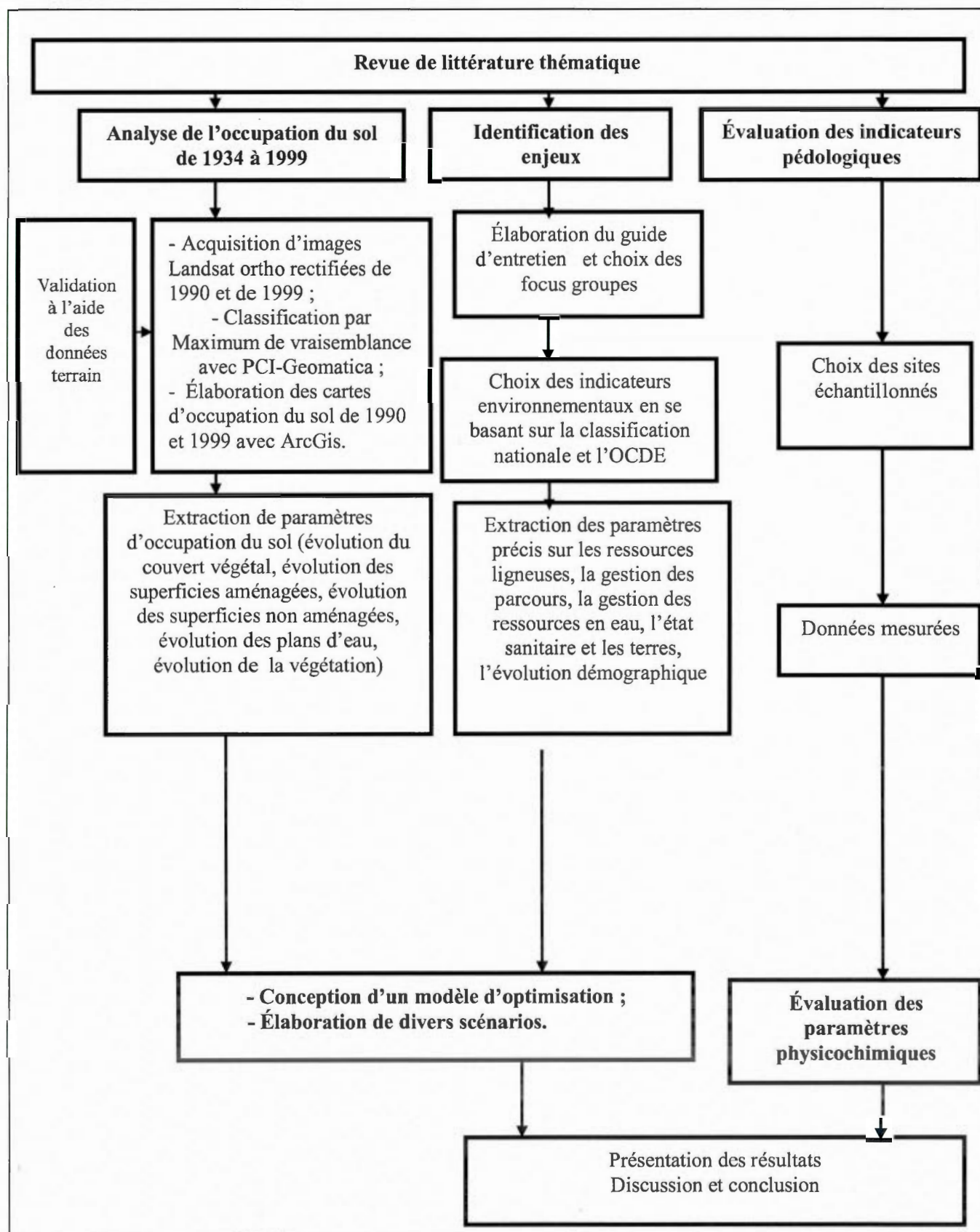


Tableau 3.1
Métadonnées

Type de données	Organismes	Années	Échelle/Résolution
Images Landsat TM	Site de l'Université de Maryland	26/11/1990	30 m
Images Landsat ETM ⁺	Site de l'Université de Maryland	18/10/1999	30 m
Image Spot multispectrale (dans le logiciel ERDAS)	Les désajustements environnementaux à l'Office du Niger (Brondeau, 2004)	1994	10 m
Carte thématique M'Béwani # feuillet ND-30-VII	Institut Géographique du Mali (IGM)	2006	1/200 000
Carte thématique Niono # feuillet ND-30-XIII	IGM	2006	1/200 000
Carte thématique Sokolo# feuillet ND-29-XVIII	IGM	2006	1/200 000
Fichiers vectoriels des thèmes (eau, casiers, superficies non aménagées, couverture végétale) en zone Office du Niger	Cellule SIG de l'Office du Niger	2011	Zone administrative de l'Office du Niger
Données SIG des limites de la zone Office du Niger	Cellule Vision office du Niger	2004	Zone administrative de l'Office du Niger
Indicateurs environnementaux du Mali	STP-CIGQE	2005	Zones agro- écologiques
Données pédologiques (zones non aménagées)	IER	2005	Sous bassin versant
Données pédologiques (zones aménagées)	Sabeh <i>et al.</i> , 2006	2007	Sous bassin versant
Données démographiques	Service de suivi-évaluation de l'Office du Niger	1998, 2009	Zone administrative de l'Office du Niger
Enquête terrain	Souleymane Dembélé	2006	Sous bassin versant
Liste des thèmes agro- environnementaux	OCDE, STP-CIGQE, FAO)	1997, 2001, 2007	International

3.2. Méthodologie spécifique de traitement d'image

3.2.1. Choix et acquisition des images

Au début de l'étude, nous envisagions d'effectuer les traitements sur des images SPOT à haute résolution. Ces images ont pour avantage de fournir à l'analyste une richesse informative (entropie) sur le milieu d'étude. Cependant, après mûre réflexion et compte tenu de l'objectif de recherche, les traitements ont été finalement menés sur des images Landsat.

Les raisons de ce choix sont que, ces dernières, d'une résolution de 60 à 120 m, sont plus adaptées à l'analyse spatio-temporelle de grandes étendues telle que notre zone d'étude, vaste d'un million d'hectares. Les données Landsat sont par conséquent plus adaptées pour la surveillance et la gestion du territoire à l'échelle provinciale, (Goodwin *et al.*, 2008). De plus elles sont gratuites.

L'objectif de cette étape est d'analyser l'évolution du changement dans l'occupation du sol par rapport à un certain nombre précis de thèmes. L'intérêt de ce choix réside surtout dans le fait que comparativement à des images SPOT à haute résolution (10 m), les images Landsat présentent l'avantage de faire abstraction d'une multitude d'informations peu pertinentes pour notre recherche comme les routes, les établissements humains, les ouvrages de régulation d'eau et les carrières.

Justification du choix des thèmes :

Nous avons retenus six thèmes : l'eau, la végétation, les zones aménagées (casiers) et les zones non aménagées. Le choix de ces thèmes se justifie pour deux raisons :

- Sur le plan empirique, ces thèmes constituent actuellement les principaux enjeux environnementaux pour un développement durable en zone Office du Niger (Traoré, 1998 ; Brondeau, 2009) ;
- Sur le plan de la classification d'images, nous avons utilisé une nomenclature qui s'inspire de celle adoptée par la FAO basée sur la classification à deux niveaux (Di Gregorio et Jansen, 2000; Mama et Oloukoi, 2003; Gong et Weber, 2009).

Tableau 3.2
Nomenclature de la classification à deux niveaux selon la FAO

Code	1 ^{er} niveau	Code	2 ^{ème} niveau
1	Forêt dense	1.1.	Galerie forestière
		1.2	Forêt dense sèche
2	Forêt claire	2.0	Forêt claire et savane boisée
3	Savanes	3.1	Savane arborée arbustive
		3.2	Savane saxicole
		3.3	Savane à emprise agricole
4	Espaces agricoles	4.1	Champ et jachère
		4.2	Plantation
5	Agglomération	5.0	Agglomération
6	Hydrographie	6.1	Cours d'eau principal (permanent)
		6.2	Cours d'eau secondaire (temporaire)
		6.3	Plan d'eau
7	Voie de communication	7.1	Route principale
		7.2	Route secondaire
		7.3	Voie ferrée

Source : adaptée de Mama et Oloukoi (2003)

- La forêt dense, la forêt claire correspondent à la strate arborée dans notre classification.
- La savane arborée arbustive correspond à la strate arbustive.
- La savane saxicole et la savane à emprise agricole sont représentées par la steppe herbacée dans notre classification.
- L'espace agricole comprend à la fois les zones aménagées et non aménagées.

Les autres thèmes n'ont pas été pris en compte dans notre classification car ils ne font pas partis des objectifs de notre étude.

Une autre raison importante qui explique ce choix est le nombre de canaux que fournit Landsat (7 pour Landsat TM et 8 pour Landsat ETM⁺). Chacun des canaux a l'avantage de mieux discriminer les informations spécifiques par rapport à chaque thème et cela contribue à l'amélioration des résultats de la classification.

Les images multidates ainsi acquises sont des scènes Landsat TM du 26 novembre 1990 et Landsat ETM⁺ du 18 octobre 1999. Ces images ont une résolution de 30 m sauf le huitième canal, en mode panchromatique d'ETM⁺ qui a une résolution de 15 m. L'intérêt de ce canal panchromatique est qu'il apporte plus de précision par sa haute résolution et ainsi qu'une richesse informative supplémentaire dans l'interprétation des images. Un autre argument pour notre choix d'images est qu'elles ont été obtenues gratuitement auprès de l'Université de Maryland alors que les images SPOT exigeaient des coûts au delà de nos moyens.

Nous avons choisi 1990 comme année de référence car sur le site de l'Université de Maryland, c'est la première image Landsat qui couvre totalement la zone de l'Office du Niger.

Ensuite nous nous sommes dit que l'analyse de l'occupation du sol à partir d'images multidates sur une période de dix ans est susceptible de nous renseigner sur l'évolution des thèmes. C'est cette raison qui a prévalu au choix de la deuxième image pour l'année 1999.

3.2.2. Traitement d'images proprement dit et logiciels utilisés

- Choix du type de traitement

Généralement les images satellitales reçues au niveau des capteurs sont des images brutes qui nécessitent des prétraitements dont le but est soit de corriger les distorsions géométriques et la transformation des données en vraies coordonnées (correction géométrique), soit de corriger les bruits dus au capteur ou à l'atmosphère (correction radiométriques). Dans notre cas, les images étaient déjà orthorectifiées et ne nécessitaient plus de prétraitements. Nous nous sommes donc concentrés sur le traitement proprement dit.

- Justification de la méthode de traitement numérique d'images

La méthode de traitement que nous avons choisie est la classification dirigée par maximum de vraisemblance. Notre choix se fonde sur le fait que dans la littérature, cette méthode est fréquemment suggérée en matière de classification thématique d'images de télédétection (Calloz et Collet, 2001). En outre le processus itératif ajusté dans ce type de classification donne la possibilité à l'interprète de reprendre autant de fois que nécessaire son analyse jusqu'à obtenir les informations voulues.

La classification a d'abord été effectuée sur chaque image séparément. Elle consiste à identifier sur l'image les différents thèmes. Ces thèmes se distinguent sur l'image par leur signature numérique qui les différencie des autres thèmes. Après avoir sélectionné un nombre de sites d'entraînement suffisants pour chaque thème, auxquels on a adjoint une composition colorée pour une meilleure interprétation visuelle, on procède ensuite à une évaluation et à une généralisation de la classification sur l'ensemble de l'image. La généralisation de la classification s'accompagne d'une évaluation statistique de sa qualité à l'aide de la matrice de confusion. Dans l'analyse des résultats de la classification, certains paramètres tels le coefficient de Kappa sont très importants. Ce coefficient permet d'évaluer la qualité des résultats de la classification. Plus ce coefficient se rapproche de 1, plus, on dispose de bons résultats de classification et dans le cas inverse lorsque le coefficient évolue vers 0.6 ou moins, on se trouve face à des résultats moins vraisemblables.

D'autres statistiques de la classification renseignent également sur les omissions et confusions des pixels attribués à chaque thème. Les fichiers vectoriels thématiques disponibles au sein de la cellule SIG de l'Office du Niger ont été superposés à l'image pour mieux sélectionner les thèmes. Les traitements ont été effectués à l'aide du logiciel Géomatica PCI. Les résultats de la classification ont été exportés dans Map-Info pour élaborer les spatio-cartes de 1990 et de 1999 de la zone d'étude. Les différentes étapes du processus de traitement et de production de documents cartographiques sont détaillées dans l'organigramme ci-après.

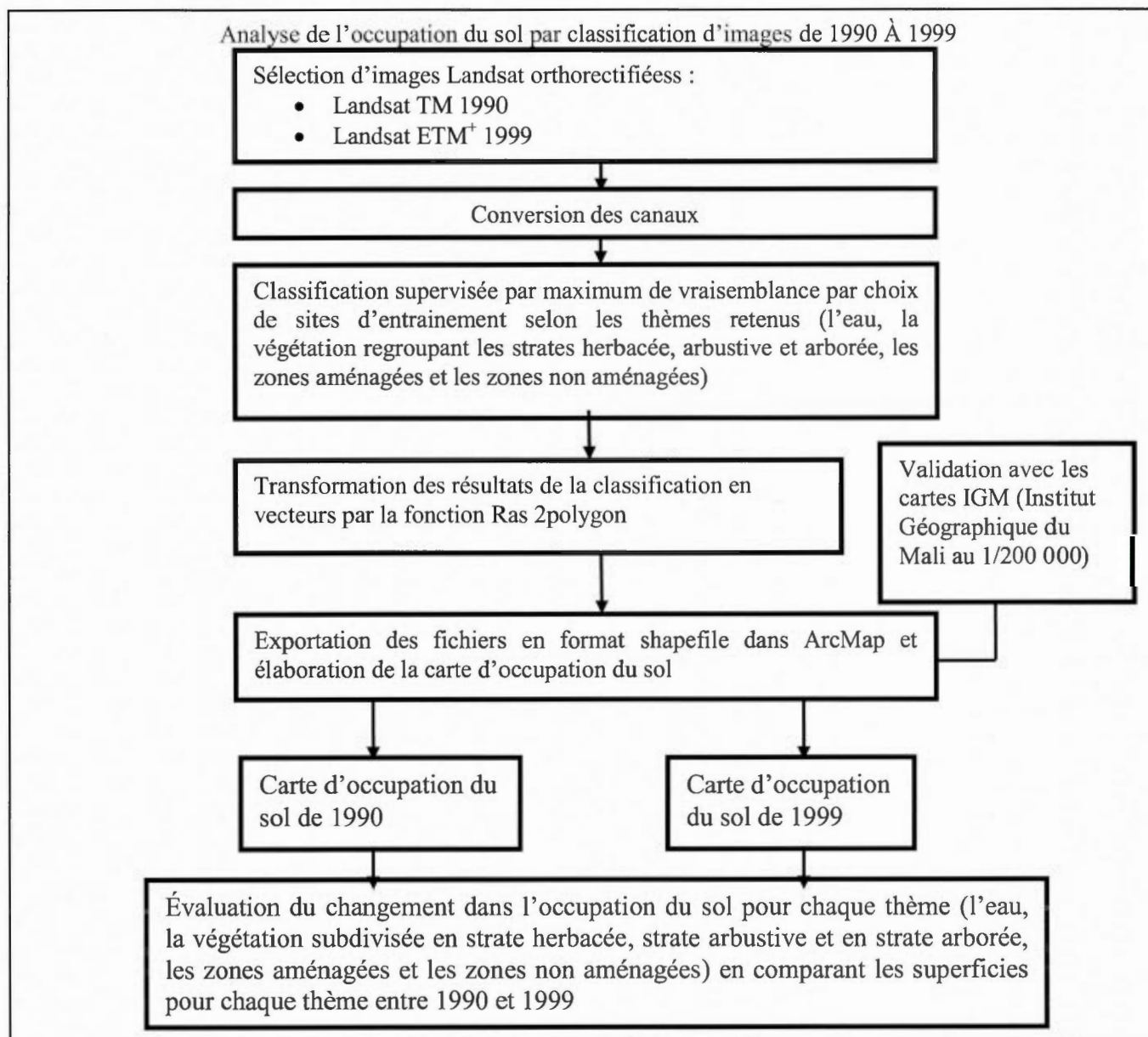


Figure 3:2 Organigramme du processus de traitement d'images

3.2.3. Analyse de l'occupation du sol de 1934 à 1990

L'analyse de l'occupation du sol s'est faite à l'aide de données qui ont été extraites des rapports et études relatifs à la zone d'étude. Ces rapports et études bien que récents par rapport à la date de mise en valeur de l'Office du Niger (1934), font généralement une compilation des données issues des périodes précédant l'étude. L'année 1934 marque le début des aménagements hydro agricoles à l'Office du Niger. De cette date à 1990, l'analyse s'est faite sur la base des études existantes.

Les rapports et études analysés sont :

- ✓ De l'étude sur la filière bois et sur la dynamique de végétation ligneuse (Defourny, 1989; Bouaré, 1999; Sow, 1990; PIRL, 1991);
- ✓ Des études menées sur l'élevage et l'agropastoralisme (Kébé, 1994; Brondeau, 1999 ; 2000 ; 2001);
- ✓ Des études sur l'aménagement hydro-agricole (Keith *et al.*, 1990; Nonguierna *et al.*, 2003, Touré *et al.*, 1997; Vilain, 2003; Aw et Diemer, 2005);
- ✓ De la compilation des différents rapports recensés au sein des archives (PNAE, 1998) et les rapports d'activités annuelles disponibles depuis la création de l'Office du Niger).

3.3. Méthodologie spécifique de la démarche d'identification des enjeux environnementaux

La méthodologie que nous avons utilisée ici a consisté en une consultation du public comme cela se fait lors des évaluations environnementales des projets conformément à la procédure malienne (Décret 08-348/PRM, 2008). Nous n'avons pas fait d'enquête directe en interrogeant les individus un à un mais en échangeant avec eux au cours de rencontres organisées dans chaque village.

L'échantillonnage a porté sur les trois sous bassins qui composent la zone : M'Béwani, Molodo et Boky-Wéré. Dans chacun des sous bassins, les villages ont été sélectionnés de façon qu'ils soient représentatifs des caractéristiques agro-écologiques du sous bassin.

Ainsi :

- ✓ Dans le sous bassin de M'Béwani appelé aussi la zone du « Kala » supérieur, les villages retenus sont : M'Béwani, Kalangola et Bougounam.
- ✓ Dans le sous bassin de Boky-Wéré, les villages retenus sont : Tongolomba et Quinzambougou.
- ✓ Dans le sous bassin de Molodo, le village retenu est Manialé.

La représentativité des personnes rencontrées au niveau des villages a été établie en invitant les représentants des associations dans le village. La structure des associations est presque la même d'un village à l'autre et comprend le syndicat des riziculteurs, l'association des éleveurs, l'association des femmes, l'association des jeunes.

L'entretien a porté sur quarante deux personnes dans le sous bassin de M'Béwani dont quinze (15) personnes à M'Béwani village, douze (12) personnes à Kalangola et quinze (15) personnes à Bougounam. Les personnes ont été choisies parmi les représentants des différents groupes sociaux des villages. Leur nombre tient compte de la taille des populations de chaque village. Les entretiens se sont déroulés du 11 au 20 juillet 2006.

Trente personnes ont participé à ces entretiens dans le sous bassin de Boky-Wéré à raison de quinze (15) personnes par villages. Ces entretiens se sont déroulés durant la période du 24 au 30 juillet 2006.

L'entretien au village de Manialé a regroupé vingt (20) personnes à raison de quatre (4) personnes par association et a eu lieu du 3 au 5 août 2006.

La deuxième partie de notre travail a consisté à valider les enjeux identifiés par les populations lors d'un mini-atelier regroupant uniquement les services techniques. Il s'est agi lors de cette rencontre d'apporter des observations sur la pertinence de ces enjeux sous l'angle de techniciens.

Les services rencontrés sont : la cellule de suivi environnemental de l'Office du Niger, le service d'appui au monde rural relevant du Ministère de l'agriculture, le service local de conservation de la nature, l'antenne régionale de l'Institut d'Économie Rurale (IER) et l'URDOC. L'atelier s'est déroulé du 9 au 11 août 2006 dans les locaux de l'antenne régionale de l'IER à Niono.

A l'issue de ce processus, nous avons effectué une synthèse et fait ressortir les grands enjeux sur lesquels tous les acteurs étaient unanimes.

La troisième partie a consisté en l'élaboration des indicateurs environnementaux qui peuvent être extraits des enjeux identifiés en se basant sur le guide national et la littérature existante sur le sujet.

Les critères choisis pour la sélection des indicateurs sont inspirés de la démarche de l'OCDE sur les indicateurs environnementaux de l'agriculture (OCDE, 1997) et des indicateurs agro-environnementaux (FAO, 2007). Ayant un caractère plus général, ces indicateurs reflètent la réalité des indicateurs pour la plupart des pays. Cependant, dans le souci de prendre en compte les spécificités locales et régionales, ils doivent être adaptés aux conditions particulières d'application de chaque pays ou zone à analyser.

Cette démarche considère quatre critères :

- La pertinence politique (importance et intérêt pour les décideurs);

- La justesse d'analyse (fiabilité des liens établis par l'indicateur entre les activités agricoles et l'état de l'environnement);
- La mesurabilité (se rapporte aux données appropriées dont on dispose pour mesurer l'indicateur);
- Le niveau d'analyse (référence à la détermination de l'échelle à laquelle l'indicateur peut être utilisé de manière significative).

Le tableau 3.3 est une synthèse des principaux indicateurs en rapport avec les différents thèmes que nous avons analysés avec les acteurs terrain.

Tableau 3.3

Liste des thèmes agro-environnementaux présentant un intérêt pour les décideurs

Terre (OCDE, 1997; STP-CIGQE, 2001; FAO, 2007)	Salinisation des sols, acidification, équilibre en oligo-éléments, Contamination toxique, compactage, saturation en eau et teneur du sol en matières organiques, productivité des sols, érosion des sols et glissements de terrains.
Eau (OCDE, 1997; STP-CIGQE, 2001; FAO, 2007)	Qualité des eaux de surface, qualité des eaux souterraines et des eaux marines altérées par le ruissellement ou la lixiviation d'azote, de phosphore, de résidus toxiques de pesticides, des substances acides et des sédiments du sol, utilisation des ressources en eau de surface et souterraines, distribution spatio-temporelle des ressources en eau ainsi que débit solide relatif et débit des eaux de surface.
Nature (OCDE, 1997; STP-CIGQE, 2001; FAO, 2007)	Biodiversité des plantes et animaux domestiqués, biodiversité de la flore et de la faune sauvage. Habitat de la faune et de la flore sauvages sur les terres agricoles, habitats semi-naturels et naturels. Caractéristiques des paysages agricoles découlant des interactions entre les caractéristiques topographiques, le climat, la distribution des biotopes, les systèmes d'exploitation agricoles et les valeurs socioculturelles.

Source : Extrait de : OCDE (1997)

Les différentes étapes de la démarche sont explicitées dans la figure 3.3.

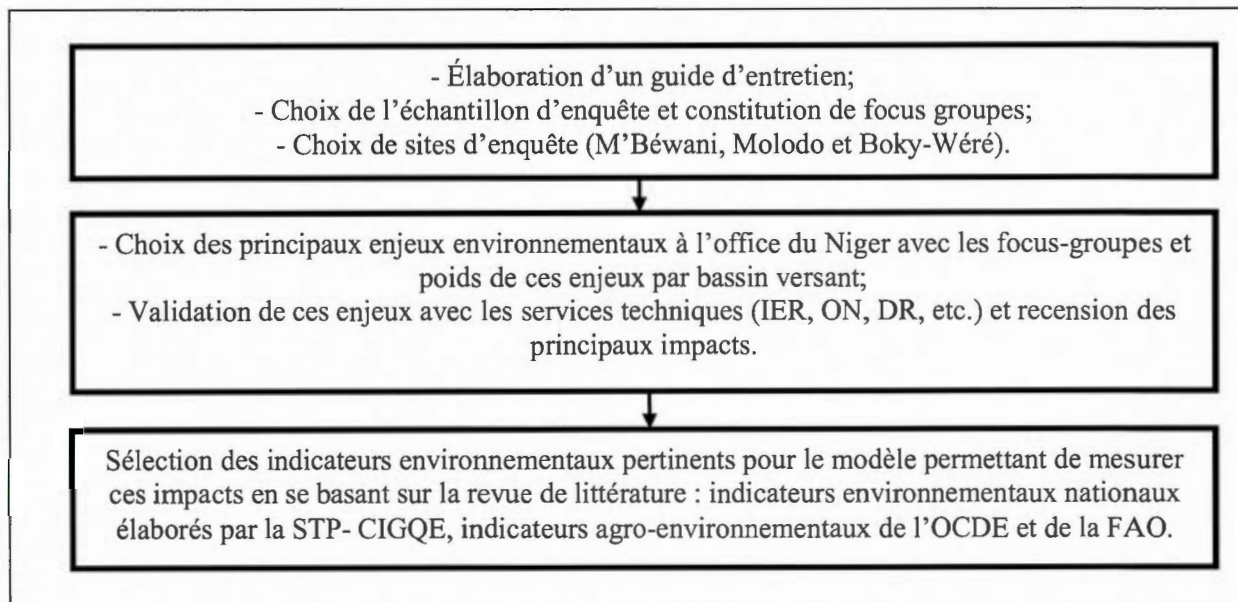


Figure 3.3 Organigramme de la démarche d'identification des enjeux environnementaux

3.4. Méthodologie spécifique d'évaluation comparée des indicateurs pédologiques entre superficies aménagées et superficies non aménagées

L'analyse comparée des caractéristiques physicochimiques des sols entre les zones aménagées et celles non aménagées a pour finalité d'évaluer les impacts environnementaux de nature pédologique générés par les aménagements. Cette analyse se base sur la qualité des sols servant à la production de riz (principale culture). Le rendement agricole dans les casiers est sous l'influence de l'évolution des caractéristiques physico-chimiques des sols dont la connaissance et le suivi permettent non seulement de corriger les pratiques néfastes d'utilisation du sol mais aussi de s'en servir comme directives environnementales lors de la poursuite des aménagements futurs.

Afin de prendre en compte la diversité des modes de production, sur chacun des sous bassins versants étudiés, deux villages ont été choisis pour servir d'échantillons de référence dans le but d'extrapoler les résultats obtenus à tout le sous bassin. Les villages ont été sélectionnés en tenant compte des critères suivants :

- Un des villages se situe au cœur même des aménagements. Les populations de ce village tirent l'essentiel de leurs revenus à partir des productions exclusivement irriguées (maraîchage et riziculture irriguée).
- Par contre le second village est localisé en zone tampon entre les périmètres aménagés et les terres exondées. Les populations des villages situés sur les terres exondées pratiquent le système de cultures pluviales (mil, sorgho, niébé, arachide) et détiennent aussi de petites parcelles rizicoles en irrigué.

Chaque village dispose d'une étendue de terre dont les limites sont connues et appelée terroir villageois. Un transect a été tracé par village échantillon et sur lequel ont été ouvertes les fosses pédologiques. Le transect est choisi de manière qu'il traverse une grande partie de la diversité des ressources naturelles en particulier sols et végétation. Une fois ces précautions prises, on a fait creuser deux fosses par transect à une profondeur de 1,30 mètre dans la mesure où il n'y avait pas d'obstacle (roche dure, nappe phréatique). Chaque profil pédologique est décrit et échantillonné à trois niveaux.

Les différents sous bassins sur lesquels ces échantillons ont porté sont représentés par les cartes des figures 3.4 à 3.6.

Sous bassin de M'Béwani

Commune : POGO / Cercle : NIONO / Région : SEGOU

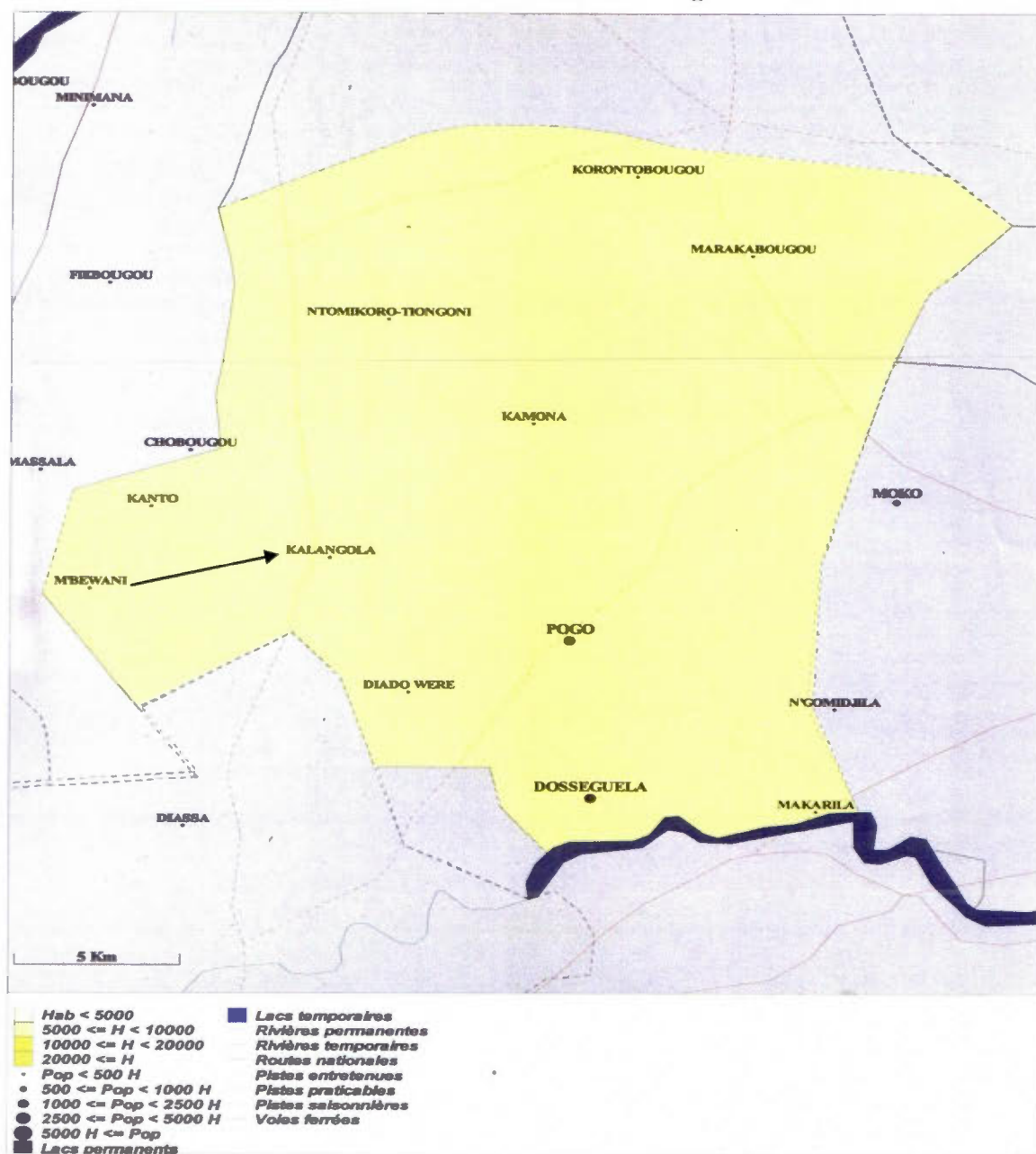


Figure 3.4 Carte de la commune de Pogo incluant le sous bassin de M'Béwani

- Le village tampon est celui de Kalangola et le transect a une longueur de 3 km, orienté Est-Ouest.

- Le village interne est celui de M'Béwani et le transect a une longueur de 2 km, orienté Est-Ouest.

Sous bassin versant de Boky Wéré

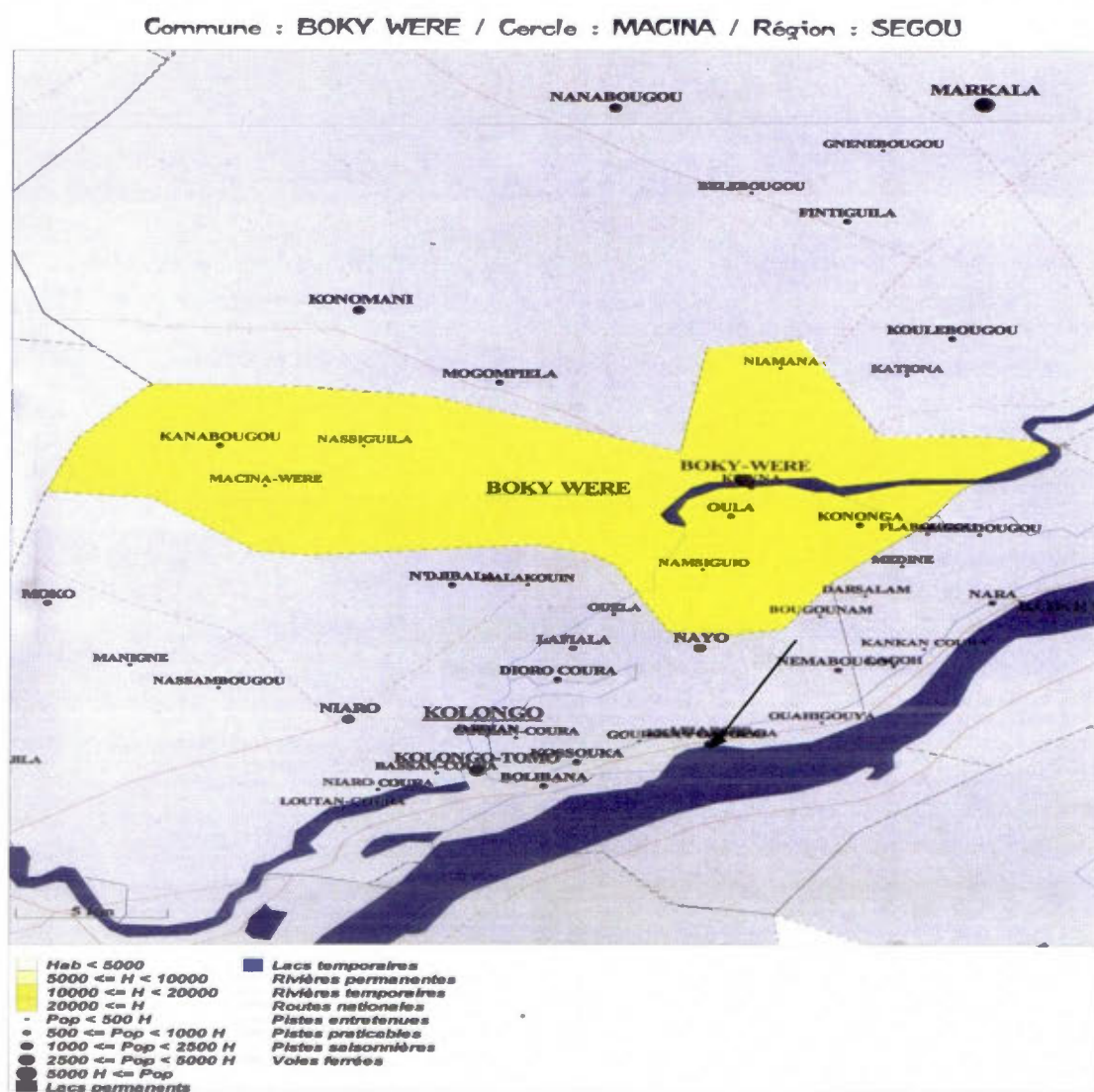


Figure 3.5 Carte du sous bassin de Boky Wéré

- Le village interne est Bougouname et le transect a une longueur de 1,6 km et est orienté d'Est en Ouest.

- Le village tampon est Tongolomba et le transect d'une longueur de 2,5 km est orienté du Nord vers le Sud.

Sous bassin de Molodo

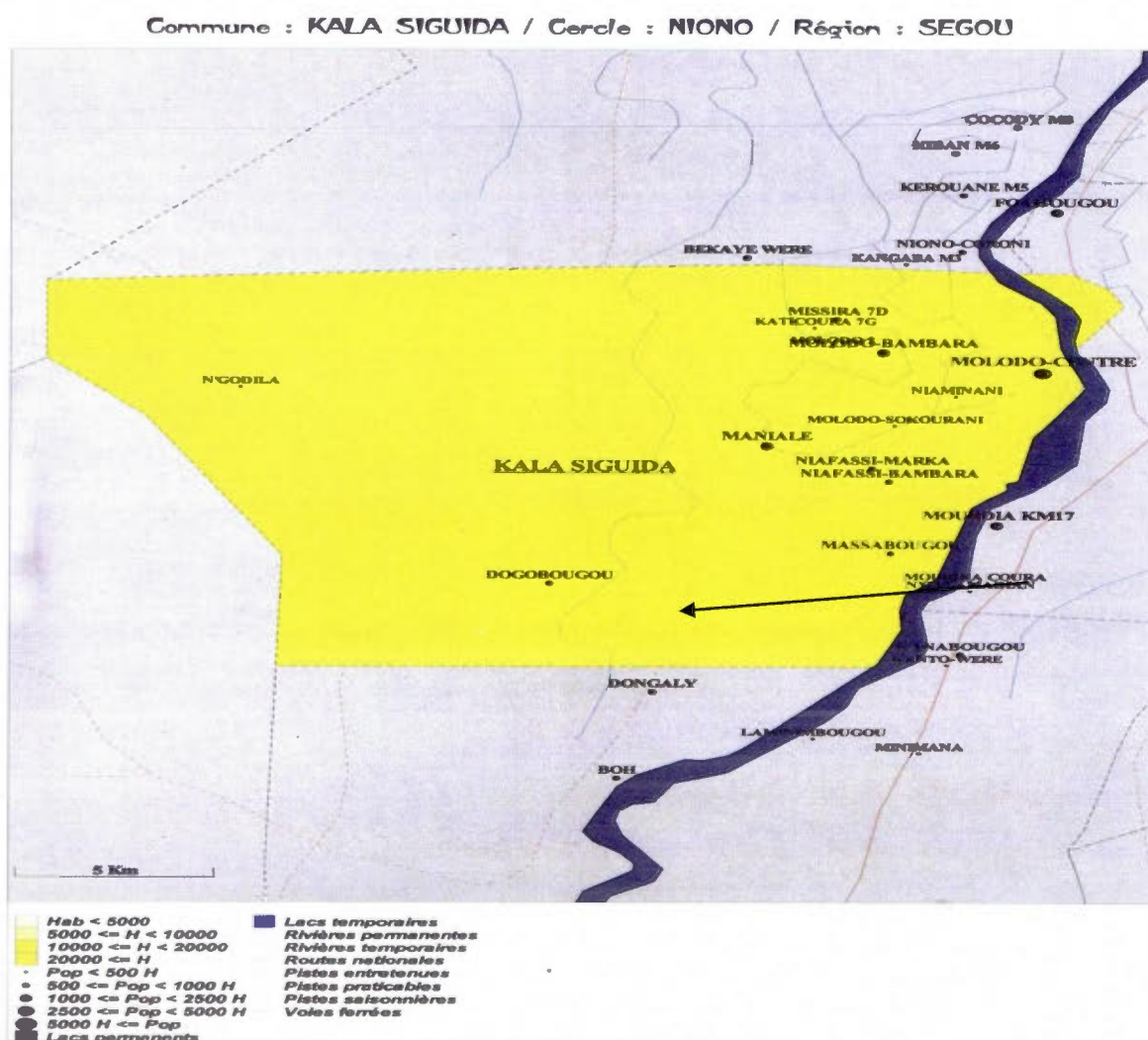


Figure 3.6 Carte du sous bassin de Molodo (commune de kalasiguida)

- Le village interne est Quinzambougou et le transect d'une longueur de 0,5 km est orienté Est-Ouest.

- Le village tampon est Manialé et le transect long de 1 km est orienté Ouest.

Les sols prélevés ont été analysés au laboratoire sol de l'Institut d'Économie Rurale pour identification des indicateurs en rapport avec l'objet de l'étude.

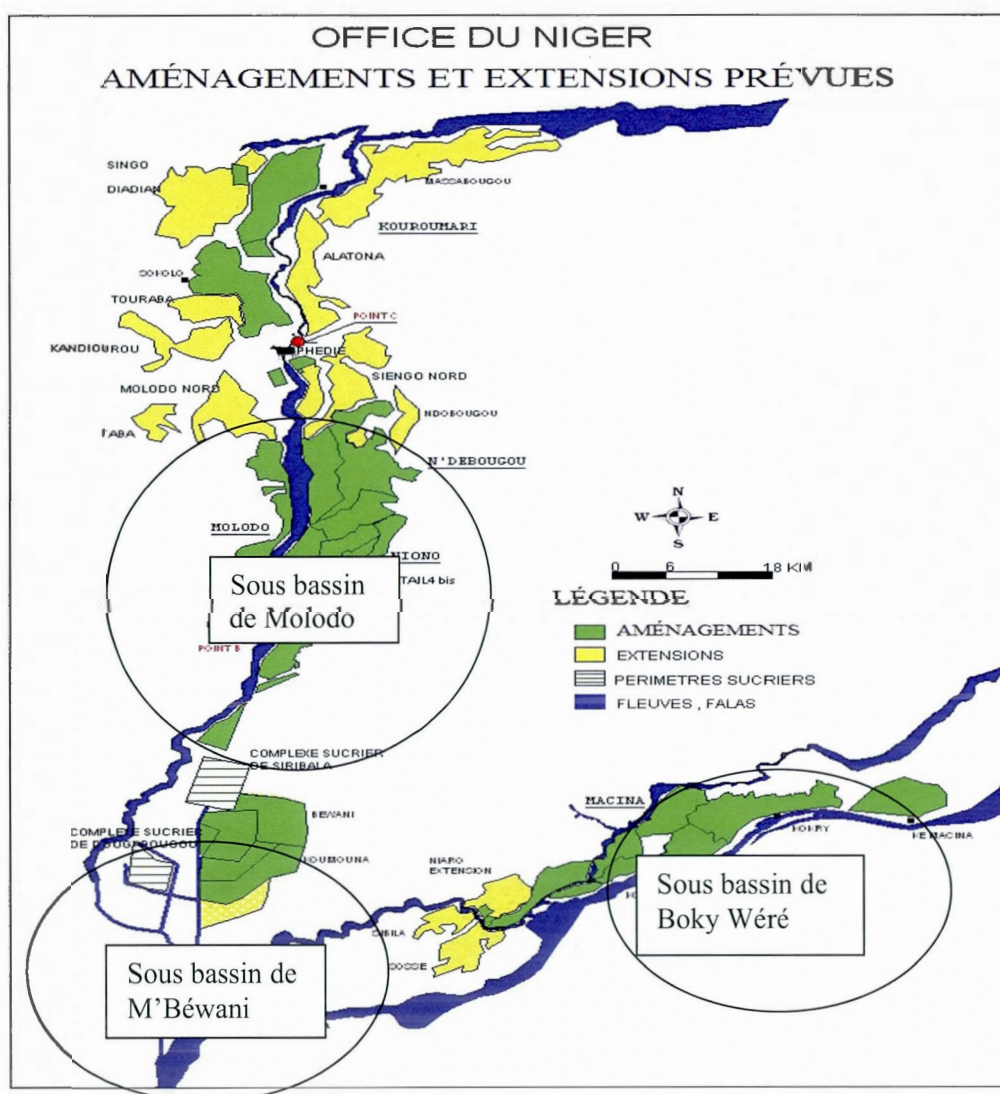


Figure 3.7 Carte des principaux bassins de la zone Office du Niger

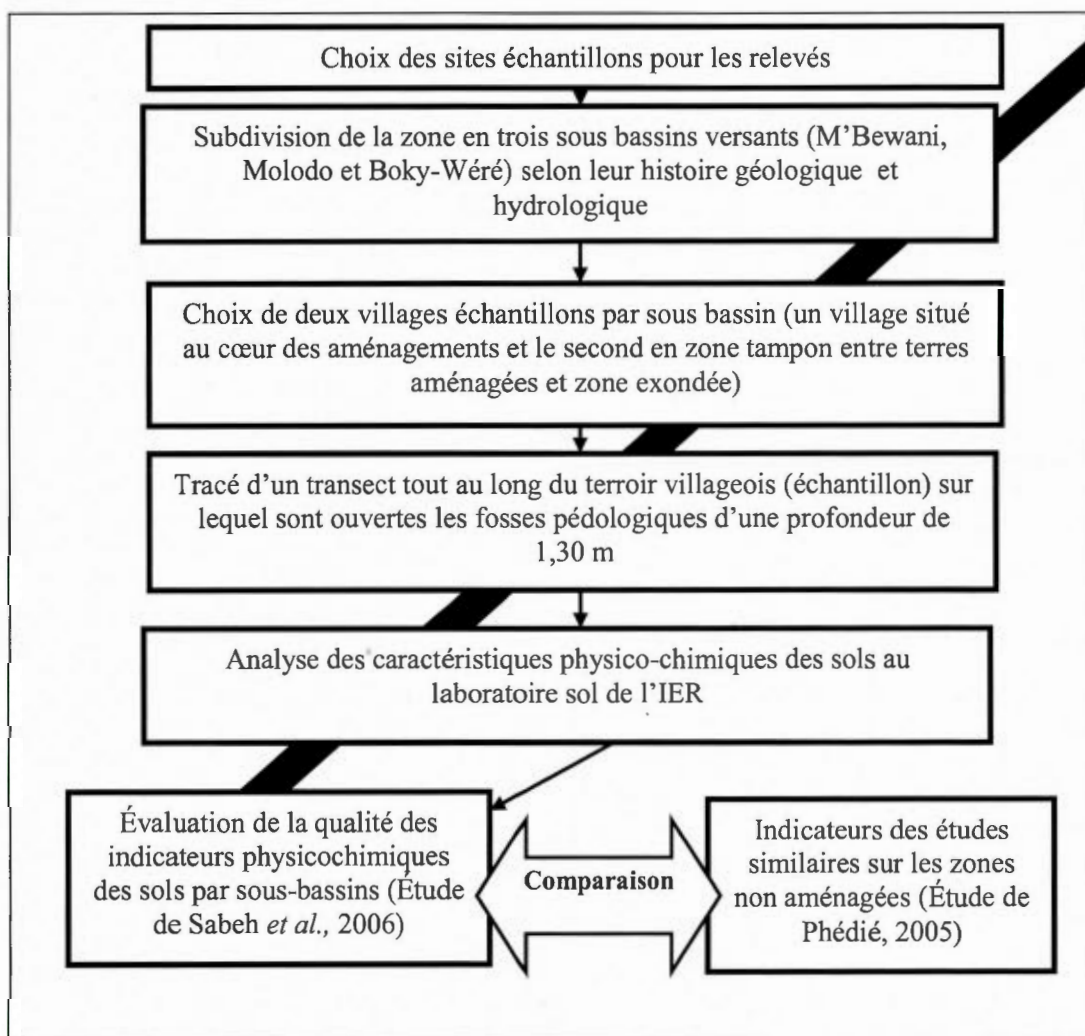


Figure 3.8 Organigramme méthodologique de l'analyse comparée des caractéristiques physicochimiques des sols entre surfaces aménagées et surfaces non aménagées

3.4. Méthodologie spécifique sur la conception du modèle d'optimisation des terres agricoles

Le choix des modèles se base le plus souvent sur le type d'analyse. Cela peut être soit une analyse de sensibilité, soit une analyse de robustesse, soit la combinaison des deux. Les modèles optimaux offrent surtout une analyse de robustesse alors que l'analyse de sensibilité est faite par les modèles multicritères. La robustesse offre généralement deux solutions (seuil minimum et seuil maximum) alors que l'analyse de sensibilité utilise la pondération des critères multi-variés. Les logiciels de modélisation permettent de mener de front ces deux sortes d'analyses.

Notre approche méthodologique de modélisation se réfère au cas des systèmes incertains où il est difficile à priori de définir le scénario adéquat compte tenu des situations diverses. Ainsi il faut élaborer divers scénarios entre le maximum possible et le minimum acceptable de solutions. Cette approche s'appelle aussi l'approche « minimax » de contrôle des solutions à travers une combinaison linéaire de chaque sous modèle jusqu'à l'obtention de la solution optimale pour l'ensemble du modèle global (Poznyak *et al.*, 2007). C'est donc une analyse de robustesse pour le choix d'un scénario optimal. Cependant, le choix des paramètres s'avère une étape cruciale pour l'obtention du scénario voulu. Cela est dû au fait que les systèmes sont intrinsèquement complexes et que les modèles qui doivent les reproduire utilisent des algorithmes qui font une description simplifiée de cette réalité. Par conséquent le choix des paramètres doit être motivé par leur degré d'efficience pour donner une modélisation approximative de cette réalité tout en faisant abstraction de certains paramètres susceptibles d'alourdir le dit modèle (Rutherford, 2006). Dans la littérature, plusieurs approches ont souvent été combinées afin de pallier l'inexactitude des données qui sont utilisées par les modèles mathématiques dans la compréhension des phénomènes physiques (Oakley *et al.*, 1998; Koch *et al.*, 2002).

Ce sont pour la plupart des approches déterministes de résolution des problèmes dans le choix des solutions optimales dans un contexte multidisciplinaire appelés MDO (Multi-Disciplinary Optimization) dont l'analyse se base sur le phénomène des boîtes noires de données qualitatives et par une combinaison avec les modèles d'optimisation fiables relevant des méthodes d'ingénierie connu sous le nom de RBDO (Reliable-based of Design Optimization) dont l'objectif est d'aider à la compréhension des systèmes complexes à modéliser dans un contexte d'incertitudes (Du et Chen, 2004; Chiralaksanakul et Mahadevan, 2007).

Le logiciel « Stella » que nous utilisons présente à la fois l'avantage d'être simple d'utilisation et de modélisation des systèmes complexes. Les données extraites des paramètres d'analyse d'occupation du sol (évolution de la couverture végétale, état de dégradation des terres de culture, évolution des zones aménagées et non aménagées), d'identification des enjeux environnementaux (indicateurs de gestion : forêt, terres, parcours, santé, l'eau) et des analyses pédologiques (indice de qualité des sols agricoles tenant compte des intrants chimiques et revenus) ont servi à simuler les sous modèles.

Trois types de scénarios ont été simulés pour chaque sous modèle:

- Un scénario basé sur la tendance actuelle de l'évolution des paramètres utilisés;
- Un scénario « catastrophe » basé sur une accélération de la dégradation des paramètres utilisés;
- Un scénario plus durable basé sur une réduction de la dégradation des paramètres utilisés.

La nature du logiciel « Stella » fait qu'il ne peut modéliser que les paramètres de temps et d'échelle et non d'espace.

Les séries temporelles des différents paramètres utilisent 1935, comme année de base et 2044, pour année d'horizon pour que les estimations aillent au-delà d'un siècle. Nous avons délibérément choisis l'année de référence et l'année d'horizon qui peuvent être modifiées.

Justification du choix des modèles

Cinq sous modèles ont été retenus et en voici la justification.

- Le sous modèle population

Il a été retenu afin de comprendre les variations du facteur démographique très déterminant dans la gestion des aménagements, car il a été constaté que chaque nouvel aménagement s'accompagnait d'un afflux de populations dans la zone (Office du Niger, 2004).

- Le sous modèle utilisation du territoire

L'un des objectifs de la thèse est d'analyser la dynamique de l'utilisation des sols et à cet effet ce sous modèle doit nous fournir des éléments d'appréciation de cette dynamique à travers les thèmes de forêt, de dégradation et de mise en valeur des terres agricoles au fil du temps. La capitalisation des connaissances sur cette dynamique d'occupation doit servir les décideurs pour l'aide à la décision pour une meilleure gestion écosystémique des ressources naturelles.

- Le sous modèle revenu

La connaissance de l'évolution des revenus par habitant et des revenus globaux engrangés par les populations est un aspect de compréhension non seulement de la productivité agricole des périmètres irrigués mais aussi de la rentabilité financière de la culture irriguée du riz comme spéculation.

- Le sous modèle qualité de vie et de l'écosystème

L'intérêt du sous modèle est d'apprécier la qualité de vie en zone Office du Niger et de voir si on peut parler de développement durable et, si tel n'est pas le cas quels sont les facteurs sur lesquels il faut agir pour évoluer dans ce sens.

- Le sous modèle eau

Ce modèle n'a d'autre intérêt que de comprendre le système de gestion et de savoir si le mode de consommation correspond aux normes requises en la matière et déceler ainsi les points de gaspillage et de perte d'eau sur le réseau d'irrigation.

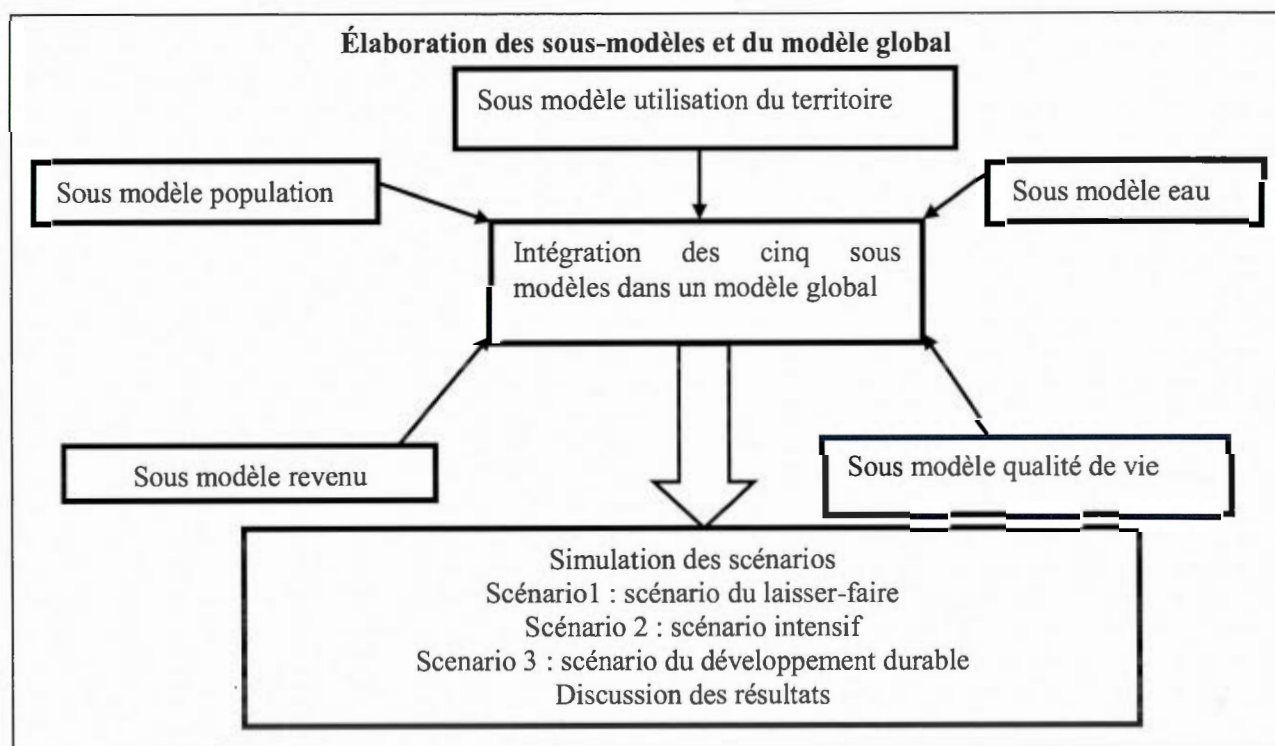


Figure 3.9 Organigramme de la conception du modèle

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre traite des principaux résultats obtenus au cours de cette étude. Ils peuvent être regroupés en trois groupes de paramètres environnementaux : (i) les premiers résultats concernent les paramètres d'occupation du sol, (ii) le deuxième groupe de paramètres concernent les indicateurs environnementaux et sociaux, et (iii) le troisième groupe de paramètres concerne les indicateurs d'ordre pédologiques.

4.1. L'occupation du sol à l'Office du Niger et discussion sur le changement observé

4.1.1. Analyse des résultats des différentes classifications sur l'occupation du sol

Les parties colorées en rouge représentent les zones de végétation, les parties en gris représentent les espaces en eau, les parties en brillance sont des sols nus et le reste représente les parties aménageables dont le teint varie du bleu au vert. Les images ont été colorées en composition fausse (RGB) selon les différents canaux qui permettent de discriminer les thèmes. Ce sont sur ces différentes images que la classification a porté pour produire les spatiocartes d'occupation du sol de 1990 et de 1999 qui sont représentées aux figures 4.1 et 4.2.

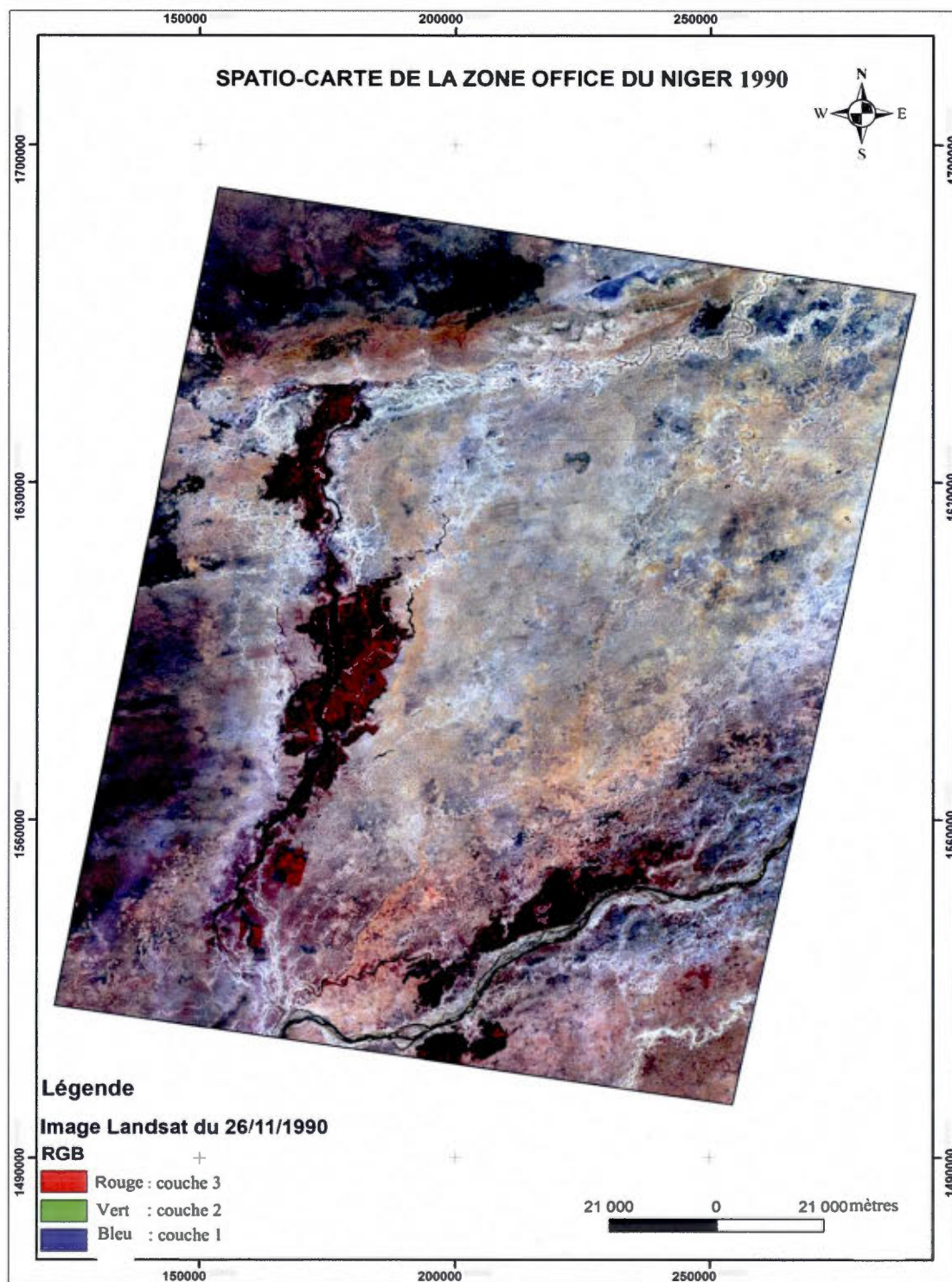


Figure 4.1 Spatiocarte de l'image landsat TM de 1990 : Office du Niger

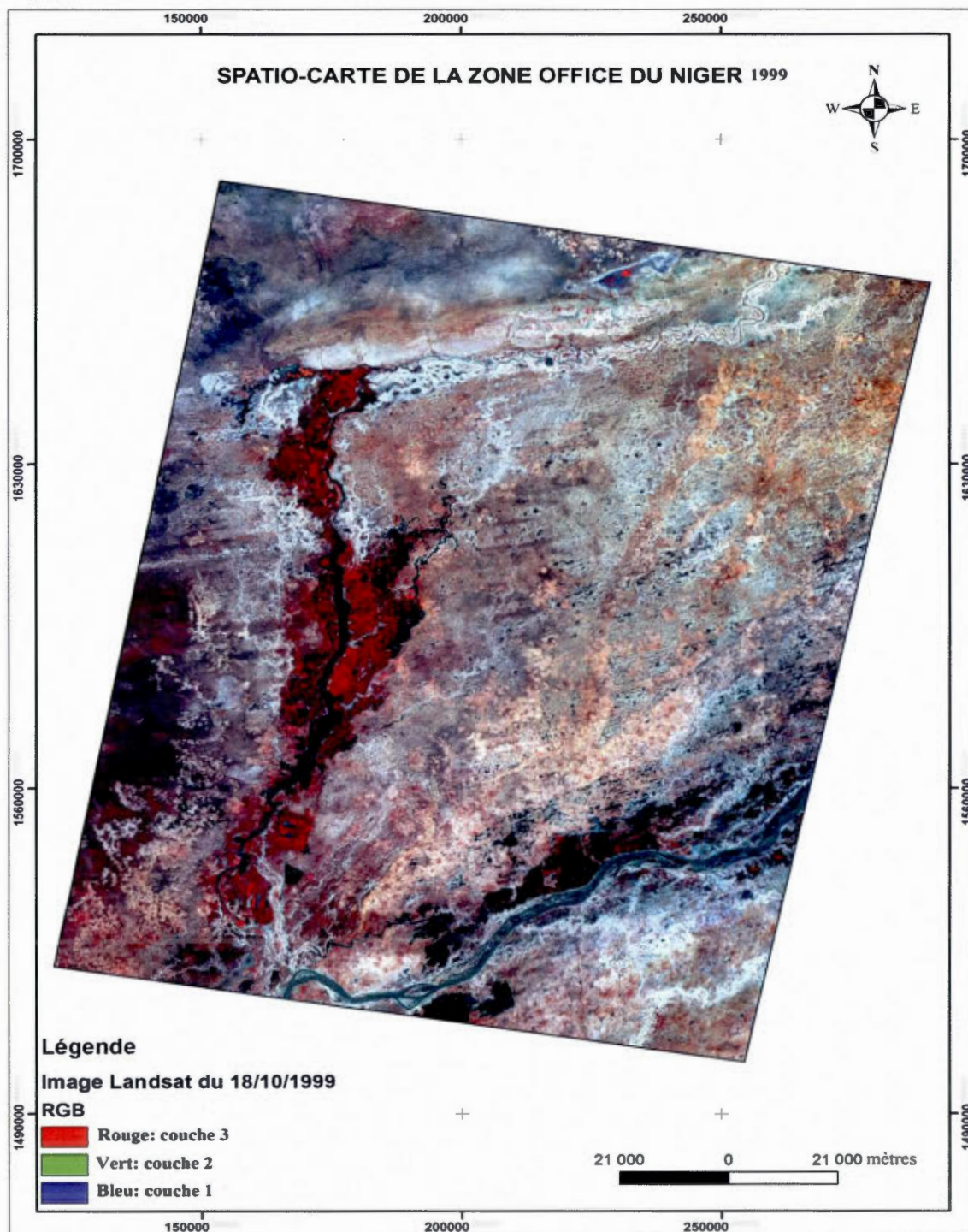


Figure 4.2 Spatiocarte de l'image Landsat ETM⁺ de 1999 : Office du Niger

Ce sont sur ces deux images (1990 et 1999) qu'ont été appliquées les classifications.

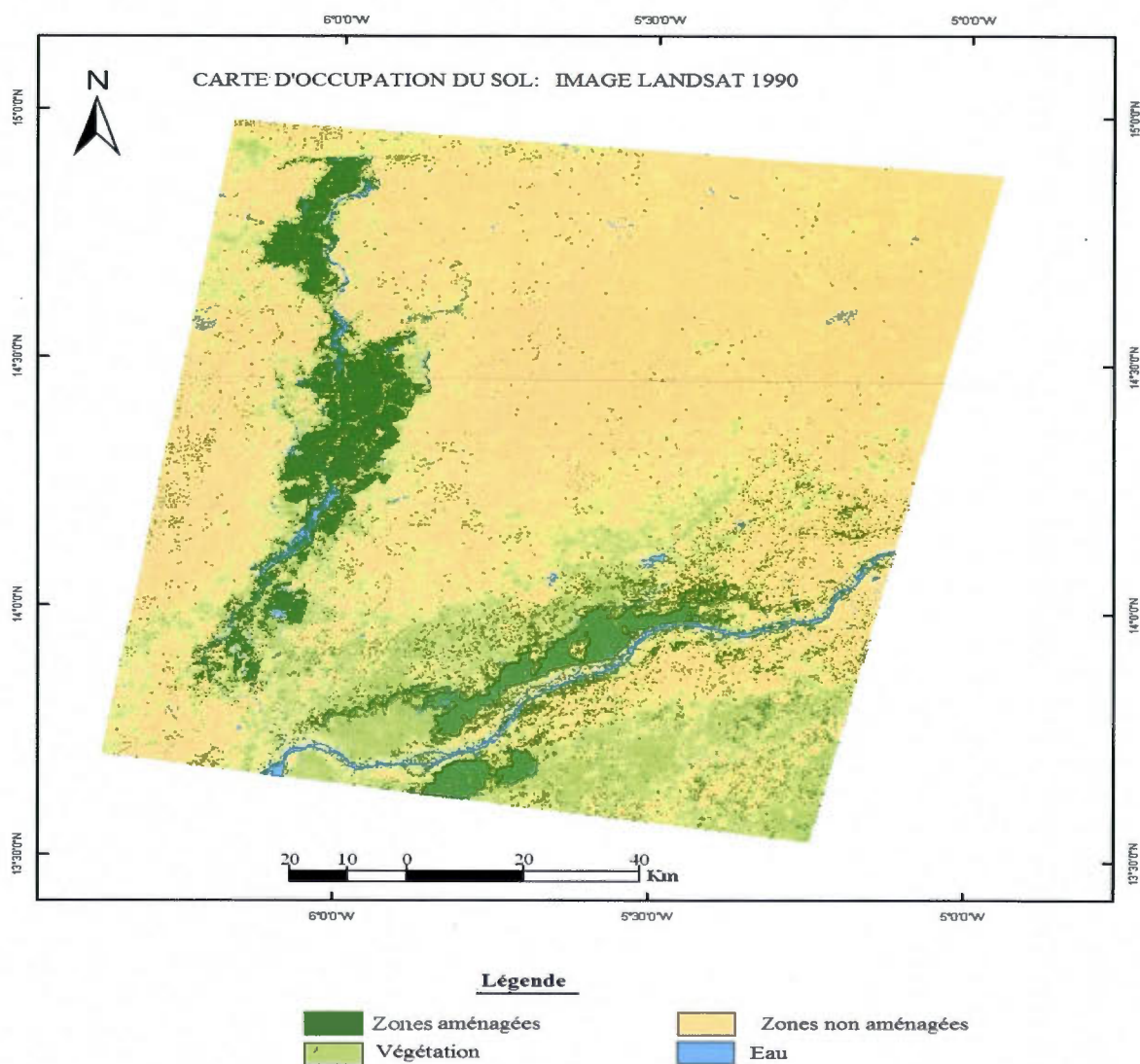


Figure 4.3 Carte d'occupation du sol à l'Office du Niger, 1990

La figure 4.3 représente l'image classifiée de 1990.

Statistiques de classification de l'image de 1990

Tableau 4.1
Evaluation de la classification de l'image de 1990

Thèmes classifiés	Références	Total classifié	Nombres exacts	Précisions pour les utilisateurs	Précisions pour les utilisateurs
Zones aménagées	7	5	5	71.43%	100.00%
Zones non aménagées	44	47	42	95.45%	89.36%
Eau	1	1	1	100%	100%
Végétation	8	7	5	62.50%	71.43%
Total	60	60	53		

Précision globale de la classification = 83,3%

Statistiques KAPPA global ($K^{\wedge}$) = 0.71

Tableau 4.2

Matrice de confusion de l'image de 1990 avec l'indice de Kappa pour chaque catégorie

Thèmes	Kappa
Zones aménagées	1.00
Zones non aménagées	0.60
Eau	1.00
Végétation	0.67

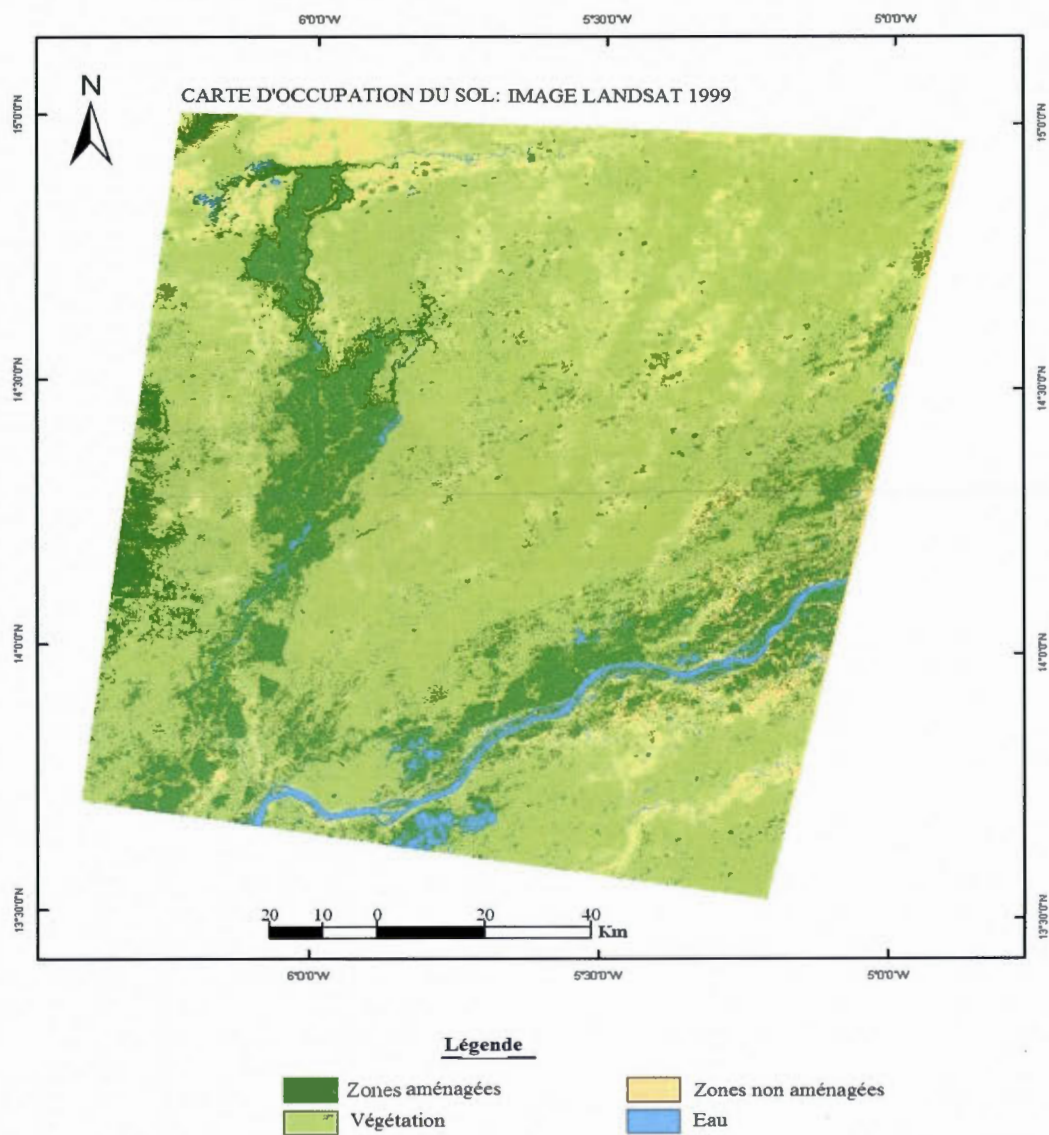


Figure 4.4 Carte d'occupation du sol à l'Office du Niger de 1999

La figure 4.4 représente l'image classifiée de 1999.

Statistiques de la classification de l'image de 1999

Tableau 4.3
Évaluation de la classification de l'image de 1999

Thèmes classifiés	Références	Total classifié	Nombres exacts	Précisions pour les utilisateurs	Précisions pour les utilisateurs
Zones aménagées	9	9	8	88.89%	88.89%
Zones non aménagées	8	7	6	75.00%	85.71%
Eau	2	1	1	50.00%	100%
Végétation	31	33	30	96.77%	90.91%
Total	50	50	45		

Précision globale de la classification = 90.00%

Statistiques KAPPA global ($K^{\wedge}$) = 0.81

Tableau 4.4
Matrice de confusion de l'image de 1999 avec l'indice Kappa pour chaque catégorie

Thèmes	Kappa
Zones aménagées	0.86
Zones non aménagées	0.82
Eau	1.00
Végétation	0.76

Évaluation des résultats de la classification

D'après Pontius (2000), l'indice de Kappa (k) est utilisé pour valider et estimer la précision dans le schéma de classification. Il est l'indicateur de la qualité de la classification. Nous avons obtenu respectivement 0.70 pour l'image de 1990 et 0.81 pour l'image de 1999. Cela veut dire que globalement la classification est bonne pour les deux images.

La matrice de confusion donne le pourcentage de pixels mal classés dans l'un ou l'autre des thèmes. On remarque que de part et d'autres des pixels mal classés peuvent se retrouver dans l'une ou l'autre classe. Ce sont les biais enregistrés par le classificateur. Le fait que l'on observe surtout un pourcentage élevé de pixels mal classé entre l'eau et les superficies aménagées est du à la présence d'eau d'irrigation au sein des parcelles et des canaux d'irrigation.

Dans l'élaboration de la matrice de confusion, l'analyste doit comparer l'image de référence par rapport à l'image classifiée en évaluant la correspondance entre chaque point de l'image classifiée et ce même sur l'image de référence (Campbell, 2007). Cette évaluation donnent des informations sur les erreurs de commission et d'omissions (cf. tableaux 4.1 et 4.3).

Évaluation de la dynamique de l'occupation du sol

L'étude diachronique analyse les grands changements intervenus dans le temps et dans l'espace entre les différents thèmes. Les données obtenues de l'interprétation des images Landsat de 1990 et de 1999 ont été analysées et comparées. Pour chaque unité de l'occupation du sol, le taux d'évolution annuel est calculé selon la formule ci-après :

$$\text{Taux annuel (\%)} = [(Ti1999 - Ti1990)/P] \times 0.1,$$

Où : $Ti1999$ représente la valeur de la superficie du thème i en 1999 ;

$Ti1990$ est la valeur de la superficie du thème i en 1990 ;

P est la durée de la période d'observation entre 1999 et 1990 qui est de 10 ans.

Tableau 4.5
Évolution des thèmes de 1990 à 1999

Thèmes	Superficie en 1990 (ha)	Superficie en 1999 (ha)	Evolution (%)
Strate herbacée	523 335, 30	484 727, 26	-38, 60 %
Strate arbustive	872 754, 87	848 546, 72	-24, 20%
Strate arborée	963 214, 91	1 017 196.04	53, 98%
Eau libre	102 720.01	89 459.73	-13, 26%
Zone aménagée	96 649, 64	102 684, 00	6, 03%
Zone non aménagée	2 262 655,44	2 247 822, 02	-14, 83%

Au cours de la décennie 1990 à 1999, on constate qu'à part les aménagements et les formations boisées, presque tous les autres thèmes ont régressé. Les strates arborées et arbustives régressent respectivement de 38, 60% et de 24, 20%. Ceci s'explique non seulement par la pression anthropique pour les nouveaux aménagements et par le surpâturage dans la zone.

Les zones aménagées ont ainsi progressé de 6,03% soit une augmentation de 6034 ha/an. Ce chiffre est en concordance avec celui indiqué lors de la réhabilitation des terres à savoir 6000 ha/an (Koné *et al.*, 1997). L'augmentation des superficies aménagées entraînent une réduction des superficies non aménagées qui décroît de 14, 83%.

Les formations boisées ont augmenté de 53 981 ha durant la décennie 1990-1999. Elle correspond en partie aux formations repérées par l'image satellite de 1999 dans les terres exondées qui est de 50 460 ha. En partant de ce postulat, il y aurait une augmentation effective des superficies boisées de 3521,13 ha soit une progression de 3%.

Il faut noter que la période de 1990 à 1999 est incluse dans la période globale de restructuration (1986- 2005) où il y a eu à l'Office du Niger des travaux de reboisements intensifs suite à la prise de conscience par rapport à la déforestation et à la pénurie de bois.

Les superficies calculées à partir de l'image de 1999 sont supérieures aux superficies actuelles de l'encadrement de la zone Office du Niger qui sont estimées à environ 100 000 ha en 2011 (Office du Niger, 2011). Les superficies aménagées par l'encadrement de l'Office du Niger n'incluent pas dans leurs statistiques les aménagements effectués en zone exondée qui sont actuellement en train d'être réhabilités (Malybia : 100 000 ha ; Groupe Tomota : 70 000 ha) (Groupement Hydro-Pacte et ECOFOR, 2009 ; Malybia, 2009). L'Office du Niger ne prend en compte dans ces calculs que les superficies réellement mises en valeur et qui sont des superficies en maîtrise totale par submersion contrôlée pour la riziculture. L'irrigation en maîtrise totale de l'eau occupait en 1999 environ 80 000 ha de superficies brutes exploitées dont près de 80 % dans la zone de l'Office du Niger (Ministère de l'Agriculture, 2004). C'est ce qui explique la différence entre les chiffres que nous avons obtenus et ceux évalués par l'encadrement de l'Office du Niger.

4.1.2. Analyse de l'occupation de 1934 à 1999

Le tableau 4.6 fait une comparaison des différentes études menées dans la zone de 1934 à 1990 et l'analyse des images de 1990 à 1999.

Tableau 4.6
Comparaison de l'évolution des thèmes (1934-1990 et 1990 et 1999)

Thèmes	Périodes	
	1934-1990 (Synthèse des études effectuées)	1990-1999 (Analyse d'images satellites)
Strate herbacée	- 34,06%	- 38, 60%
Strate arbustive	7,5%	- 24, 20%
Strate arborée	- 14%	53, 98%
Eau	- 20,12% (débit)	- 13, 26% (surface)
Zone aménagée	2,30%	6,03%
Zone non aménagée	- 20, 7%	-14, 83%

L'analyse de l'évolution des thèmes durant les deux périodes nous amènent aux conclusions suivantes :

- L'évolution de la strate herbacée est sensiblement la même durant les deux périodes, mais elle reste légèrement prononcée pour la seconde période (1990-1999) avec un taux de - 38, 60% tandis que celui de 1934-1990 est de - 34,06%. Ceci pourrait s'expliquer par la pression qui s'accroît sur les ressources d'année en année à cause de l'accroissement démographique et des animaux sur les parcours (Kébé, 1994; PNAE, 1998 ; Brondeau, 1999 ; 2000 ; 2001).
- Les résultats sont très différents pour la strate arbustive. Les études effectuées (1934-1990) sur l'évolution de la couverture végétale concluent que la régression de la strate arborée (-14%) entraîne une augmentation de la strate arbustive (7,5%) (Defourny, 1989; Sow, 1990; PIRL, 1991; AGEFORE-SOCEPI, 1998; Bouaré, 1999).

L'analyse des images satellitales (1990-1999) démontre le contraire avec une régression de 24, 20% (strate arbustive) et une progression de 53, 98% (strate arborée).

En effet l'image satellite de 1999 s'étendait sur une partie des terres exondées et bien avant cette date, on avait commencé avec les reboisements intensifs. Ceci pourrait expliquer les différences d'évolution entre les strates arbustives et arborées durant les deux périodes.

- Les méthodes d'analyse diffèrent pour le thème eau. Les études effectuées au cours de la période de 1934 à 1990 se sont intéressées à la variation du débit du fleuve près du barrage (Konaté, 1990; Birquet *et al.*, 1996) alors que l'analyse d'images satellitales s'intéressait au plan d'eau. Dans les deux cas, on constate une régression qui est de l'ordre de 20, 12% pour le débit et de 13, 26% pour le plan d'eau.

Nous estimons que le débit du fleuve renseigne mieux sur la rareté de la ressource eau que les plans d'eau car le débit est un indicateur de diminution de la quantité d'eau disponible alors qu'à priori rien n'indique que la diminution du plan d'eau soit liée au volume d'eau disponible.

C'est l'intérêt d'utiliser les données multisources avec les données de télédétection (Desjardins, 2000). Dans notre modèle nous n'avons retenu que la variation du débit comme paramètre au profit de la décroissance du plan d'eau.

- Les aménagements ont progressé dans les deux cas mais plus durant la période 1990-1999 (6,03%) qu'au cours de la période 1934-1990 (2,30%) (Keith *et al.*, 1990; Touré *et al.*, 1997; Nonguierma *et al.*, 2003, Vilain, 2003; Aw et Diemer, 2005). De 1987 à 1999, le gouvernement s'était engagé à effectuer de nouveaux aménagements et cela s'est concrétisé par l'accroissement des superficies aménagées (DADR-ON, 1991). Aussi à la faveur de la restructuration de 1987, le taux d'accroissement des superficies aménagées augmente au fil des ans (Koné *et al.*, 1997). On comprend pourquoi ce taux est plus élevé pour la période 1990-1999 que pour la période 1934-1990.

4.2. L'analyse environnementale des aménagements

4.2.1. Les enjeux environnementaux observés lors de la consultation de la population

Au cours des rencontres organisées avec les focus groupes dans les différents villages échantillons, la question a été posée d'identifier au niveau de leur terroir, les contraintes environnementales qui se posent à eux pour un meilleur développement de la riziculture irriguée. Nous avons regroupé ces contraintes en cinq thèmes à la suite d'un exercice de « brainstorming ». Ces contraintes sont :

- A Maintien du capital productif des terres agricoles
- B Gestion des ressources pastorales
- C Gestion des ressources ligneuses
- D Gestion de la ressource eau
- E Situation sanitaire.

La deuxième étape a consisté en l'évaluation de ces thèmes par les mêmes focus groupes, qui leur ont attribué des poids allant de 1 à 5 selon l'importance de l'enjeu pour eux.

Tableau 4.7
Critères de pondération des enjeux

1	2	3	4	5
Faible	Passable	Moyen	Important	Très important

L'annotation abécédaire des thèmes a pour but de faciliter la compréhension des informations du tableau 4.8. Au cours des focus groupes, il a été demandé aux participants d'un même sous-bassin de s'entendre sur le poids à attribuer à chaque thème.

Tableau 4.8
Poids des thèmes (enjeux) par sous bassins versants

Thèmes	Sous bassins															Total des poids
	M'Béwani					Molodo					Boky Wéré					
	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	
Maintien du capital terre	5					5					5					15/15
Gestion des parcours		3					3					5				11/15
Gestion ressources ligneuses			4					5					5			14/15
Gestion ressources en eau				3					3						4	7/15
État sanitaire					4					5					5	14/15

Au total 77 personnes ont participé à ces entretiens dont 42 personnes dans le sous bassin de M'Béwani, 15 personnes dans le sous bassin de Boky Wéré et 20 personnes dans le sous bassin de Molodo.

A la lecture du tableau 4.8, l'enjeu environnemental principal évoqué dans tous les villages est le maintien du capital productif des terres avec une côte de 15 sur 15. Les aménagements réalisés ne couvrent pas les besoins des populations en terres cultivables. D'autres catégories (commerçants et fonctionnaires) sont venues s'ajouter et avec leurs grands moyens, disposent de plus de parcelles au détriment de ces villageois.

Les deux autres enjeux qui viennent ensuite sont les ressources ligneuses disponibles et la situation sanitaire (fréquence accrue de schistosomiasés et d'accès palustres) avec une côte de 14 sur 15.

La zone ne disposait pas jadis de végétation abondante et les aménagements avec l'afflux de population ont contribué à réduire davantage les ressources ligneuses, de sorte que souvent certains ont recours à la bouse de vache pour satisfaire à la consommation énergétique. La présence quasi permanente d'eau dans les canaux, drains et partiteurs a accru le risque de maladies hydriques car les populations en font beaucoup usage pour les besoins domestiques.

La gestion des parcours est également une préoccupation environnementale même si l'enjeu est moindre que les trois précédentes, sa côte étant de 11 sur 15 selon la valeur qui a été attribuée par les focus groupes. C'est une zone de transhumance, surtout dans la partie exondée. Les superficies aménagées augmentent chaque année, et avec elles le risque de conflits souvent mortels entre éleveurs transhumants et populations locales à cause de la diminution de l'espace jadis réservé aux parcours d'animaux et aux pistes de transhumance. Les troupeaux transhumants entrent aussi en compétition pour l'utilisation de l'espace avec les troupeaux des agro-éleveurs qui augmentent également en effectif au fil des ans.

L'eau ne semble pas trop un enjeu environnemental pour eux à cause de sa disponibilité. C'est peut être l'une des raisons pour lesquelles, on accorde peu d'attention à la gestion de cette ressource, ce qui se manifeste par une irrigation excessive (parcelles submergées d'eau et déversement d'excédents d'eau au niveau des drains) et par le manque d'entretien du réseau d'irrigation.

En effet, certaines populations installent des barrages en travers des drains, en aval des casiers, pour pouvoir pratiquer l'inondation de leurs rizières non officielles (Sangaré et Coulibaly, 2002).

L'eau est prioritairement destinée à l'agriculture, mais elle connaît aussi de multiples autres usages. Pour des milliers d'animaux, les canaux d'irrigation constituent le principal point d'abreuvement, ce qui n'est pas sans poser de problèmes tant pour l'entretien des canaux que pour les parcelles situées à proximité des points d'abreuvement (Lemasson, 1997).

Une remarque intéressante à signaler est que selon la réalité des bassins versants, certains thèmes n'ont pas forcément les mêmes valeurs. L'exemple le plus marquant est le cas de la gestion des parcours qui a un poids plus élevé dans le sous bassin de Boky-Wéré (5) alors qu'il ne l'est pas pour les autres sous-bassins versants. Le sous bassin de Boky-Wéré comprend une grande partie de la zone exondée où les cheptels transhumants transitent et où la gestion des parcours a plus d'ampleur que dans les autres sous bassins versants.

Ces thèmes ont par la suite été analysés conjointement avec les services techniques lors d'un atelier pour mieux comprendre les relations de cause à effet, réflexion plus difficile à mener avec les focus groupes compte tenu de leur niveau d'études.

4.2.2. Les indicateurs retenus pour l'analyse environnementale

A la suite de l'identification des thèmes (enjeux environnementaux) par les focus groupes, l'étape suivante a consisté en la réflexion sur les causes probables ayant conduit à la manifestation de ces enjeux et au recensement des indicateurs d'appréciation. Le niveau de réflexion qu'un tel exercice demande nous a amené à choisir d'autres cibles notamment les services techniques pour le faire. Il est vrai que les focus groupes ont aussi un niveau de savoir, mais la réflexion pour établir ces indicateurs est un exercice académique qui demande un certain niveau d'instruction que la plupart des gens qui composaient les focus groupe dans les villages n'avaient pas.

Le tableau 4.9 fait une synthèse des informations analysées avec les services techniques selon la logique de cause à effet. Cela veut dire que pour chaque enjeu, il s'agissait d'analyser les causes, de décrire les manifestations environnementales et les conséquences sur l'environnement biophysique et humain et enfin retenir les indicateurs de mesure pour chaque manifestation environnementale.

Tableau 4.9
Analyse des grands enjeux environnementaux

Enjeux environnementaux	Causes	Manifestations environnementales	Conséquences	Indicateurs
Maintien du capital productif des terres agricoles	- Mauvais planage des parcelles, - Piétinement des infrastructures d'irrigation par les troupeaux ; - Fréquence de vents très forts	- Érosion hydrique caractérisée par la migration de l'argile et des fertilisants dans les parcelles et la dégradation des canaux - Érosion éolienne	- Sols de + en + appauvris, - Risques de salinisation / sodisation des sols et des eaux	Salinisation, alcalinité /sodisation des sols
Gestion des ressources pastorales	Aménagements agricoles	Disparition progressive des pâturages, des pistes de transhumance et de points d'exhaures	Rareté de l'espace entre multi-acteurs, Conflits agriculteurs /éleveurs	Capacité de charge des parcours, Superficies des parcours, Taux d'accroissement du cheptel bovin
Gestion des ressources ligneuses	Pression démographique sur la végétation	Insuffisance de ligneux et rareté de bois de chauffe et de bois d'œuvre	- Faible satisfaction de la consommation énergétique, - Difficulté d'accès au bois pour les ouvrages,	Taux de couverture végétale, % de consommation en bois, % de reboisement et superficies des forêts classées

Tableau 4.9
Analyse des grands enjeux environnementaux (suite 1 et fin)

Enjeux environnementaux	Causes	Manifestations environnementales	Conséquences	Indicateurs
Gestion des ressources ligneuses (suite 1 et fin)	Aménagements agricoles	Espaces de plus en plus déboisés, déforestation et dévégétalisation	Accentuation de la pression sur les ressources ligneuses; difficulté d'approvisionnement, disparition d'aires protégées et de forêts villageoises à des fins médicinales et culturelles, perte de la biodiversité et des fonctions écologiques d'équilibre des écosystèmes	
Gestion de la ressource eau	- Déficience du réseau gravitaire, - Manque d'optimisation dans l'irrigation parcellaire	Perte d'eau par évaporation, fuite à travers les drains, surplus d'eau au niveau des parcelles	Perturbation du régime hydrique du fleuve, contribution à la remontée de la nappe et des salins par endroits, facteurs de pullulation de vecteurs de maladies et de pollution par stagnation d'eau dans les drains et canaux	Quantité d'eau prélevée, consommation annuelle d'eau en m ³ , quantité d'eau par hectare irriguée
L'état de santé	Présence quasi permanente d'eau dans le système d'irrigation	Occurrence plus élevée de maladies hydriques et de paludisme	Zones endémique de paludisme, diminution des revenus imputables aux coûts de traitement, une grande partie des enfants ont développé des signes cliniques de la bilharziose urinaire	Nombre de cas de maladies endémiques, % de mortalité et de morbidité par pathologie Qualité des eaux (pollution par les parasites, les pesticides et DBO/DCO)

Source : Atelier de validation avec les services techniques de l'Office du Niger en 2006

L'analyse environnementale effectuée dans la zone de l'Office du Niger s'est déroulée de façon participative avec les acteurs clés (populations, ONG et services techniques). Cette analyse fait ressortir un certain nombre de constats importants qui sont :

- La productivité des terres est influencée principalement par les pratiques agricoles (utilisations abusives d'intrants) et le séjour des troupeaux au sein des casiers et cela entraîne des risques de salinisation / sodisation.
- La réduction des parcours caractérisée par une disparition progressive des « *bourthols* » et qui serait causée par une progression des aménagements. Les conséquences sont les risques de conflits fréquents suite à la rareté des points d'eau et de parcours pour les animaux de sorte que les éleveurs empiètent sur les espaces agricoles.
- Les ressources ligneuses sont soumises à la pression démographique et les manifestations visibles sont la rareté du bois qui est la principale source énergétique dans la zone (Traoré, 1998).
- L'eau d'irrigation est mal gérée et cela se traduit par une plus grande évaporation sur le circuit à cause des drains défectueux et souvent par un surplus d'eau au niveau de certaines parcelles par manque d'optimisation de la quantité d'eau.
- La situation sanitaire au sein de la zone se caractérise par une présence quasi permanente d'eau dans le système d'irrigation faisant que l'Office du Niger est considéré comme une zone endémique de paludisme et de maladies hydriques telles que la bilharziose urinaire fréquente surtout chez les enfants.

4.3. L'évaluation de la qualité des sols à l'Office du Niger

Le choix de faire l'analyse de la qualité des sols se justifie pour les raisons suivantes :

- L'évaluation de la fertilité des sols a pour objectif de connaître les cultures appropriées pour chaque type de sol dans un contexte de diversification culturale ;
- La connaissance des défauts et qualité du sol nous renseigne sur les besoins des sols pour entreprendre les amendements nécessaires ;

- L'analyse du sol vise enfin à déterminer la nature et la concentration des éléments nutritifs dans le sol et de juger de l'état de la pollution.

Pour comprendre la dynamique de l'évolution des caractéristiques physicochimiques des sols, nous avons comparé les résultats d'analyse faites en zone non aménagée et en zone aménagée.

L'évaluation de la qualité des sols prend en compte plusieurs paramètres (teneur en pH, Conductivité Électrique, rapport C/N, M.O, etc.).

Cependant les deux études effectuées en zone non aménagée (IER, 2005) et en zone aménagée (Sabeh, 2006) ont démontré que la qualité des sols reste influencée par la teneur en pH. Les autres paramètres ont peu varié aussi bien en zone non aménagée qu'en zone aménagée. Cette teneur en pH est l'indicateur, en certains endroits, du début de la salinisation.

4.3.1. Évaluation de la qualité des sols en zone non aménagée

Nous avons analysé ici les caractéristiques physicochimiques d'une étude déjà effectuée en zone non aménagée par l'IER appelée étude de Phédié. Les résultats de cette étude ont été par la suite comparés avec ceux obtenus par l'équipe de Sabeh (Sabeh *et al.*, 2006), à laquelle nous avons participé lors de notre collecte de données sur le terrain.

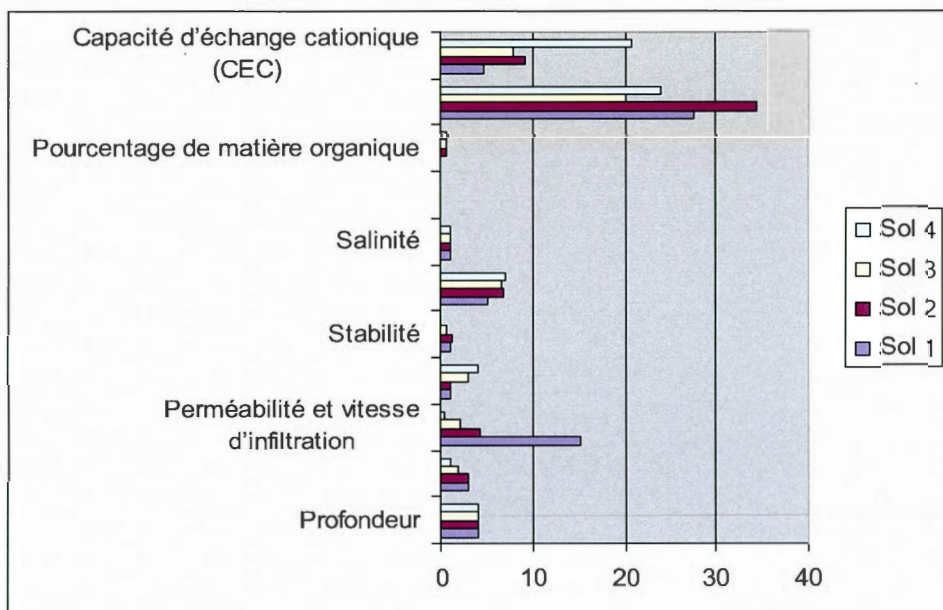


Figure 4.5 Récapitulatif des caractéristiques des types de sols avant aménagement

Ainsi en récapitulant les résultats ci-dessus analysés, on constate que :

- Le sol 1 est un sol à fertilité chimique faible, à capacité de rétention en eau faible soumis à l'érosion éolienne, au lessivage et à la lixiviation hydrique.
- Le sol 2 a une fertilité chimique faible à moyenne, une capacité de rétention en eau faible, susceptible à l'érosion éolienne et hydrique. Ce type de sol peut être mis en valeur sous certaines conditions.
- Le sol 3 a une grande sensibilité à l'érosion (battance), un mauvais drainage interne, une capacité de rétention en eau peu importante, une fertilité chimique naturelle assez moyenne. La mise en valeur de ce sol est envisageable sous certaines conditions.
- Le sol 4 a une fertilité chimique assez élevée avec une capacité de rétention en eau importante et peut être mis en valeur sous certaines conditions.

4.3.2. Caractéristiques des sols en zone aménagée

L'évaluation s'est faite pour un même type de sol dans les différents sous bassins (M'Béwani, Molodo et Boky Wéré). Le seul paramètre sur lequel notre analyse a porté est le

pH. Les sols analysés sont de quatre types : Sol à recouvrement sableux épais sur limon en profondeur (Sol 1), Sol à recouvrement sableux passant à une texture limoneuse à faible profondeur (Sol 2), Sol limoneux à recouvrement peu épais (Sol 3) et Sol argileux à recouvrement peu épais (Sol 4).

a) Sol 1

Les sols à recouvrement sableux épais sont acides à fortement acides (sous bassins de Boky Wéré et Molodo). Les valeurs du pH eau varient de 5.3 à 4.1. L'acidité potentielle, pH (eau) – pH (KCL) est ici faible (moins d'une unité de pH). La CE obtenue sur les échantillons testés est de 0.03 mmhos/cm en moyenne pour les horizons de surface et 0.02 mmhos/cm dans les couches profondes. Cela indique un très faible taux de salinité de ces sols. Ils sont considérés comme non salins.

b) Sol 2

Cette unité géomorphologique est un versant long à pente faible se terminant en biseau vers les plaines rizicoles. Elle n'a pas été observée sur les « transects » du sous bassin versant du «Fala» de Molodo.

Les sols analysés ont une réaction acide en surface et faiblement acide en profondeur. Les valeurs du pH sont respectivement de 4.6 et 5.1. Quant au risque d'acidité potentiel, avec moins d'une unité de pH entre pH eau et pH KCl, il est considéré comme faible.

Les sols ont un très faible taux de salinité. En effet les conductivités électriques déterminées sont très faibles avec des valeurs comprises entre 0.02 mmhos/cm et 0.03 mmhos/cm. Ce résultat est valable aussi bien dans les couches de surface que dans les horizons profonds. Ces valeurs permettent de conclure que les sols de ce versant à pente faible sont non salins.

c) Sol 3.

Ces types de sols (hydromorphes à gley oxydé) se rencontrent dans les zones d'épandage sur matériau limoneux entourant les cuvettes argileuses. Le terrain y est quasiment plat. Ils sont aménagés pour la riziculture.

Les sols sont acides dans les horizons de surface et moyennement acides dans les couches sous jacentes à M'Béwani et Boky Wéré. Par contre dans le sous bassin du Fala Molodo, ces sols sur épandages limoneux sont alcalins entre 60 et 120 cm de profondeur avec un pH atteignant 9.1. Les différences entre pH eau et pH KCl sont inférieures à l'unité dans toutes les couches examinées sauf dans l'horizon 60-120cm de la fosse ouverte à Manialé dans le Fala de Molodo où elle dépasse l'unité (1.2). Cela indique l'existence d'une forte acidité potentielle.

Les valeurs mesurées de la conductivité électrique varient de 0.01 à 0.05 mmhos/cm dans tous les échantillons analysés sauf celui de l'horizon 60-120 cm du site de Manialé où la CE mesurée est de 0.6 mmhos/cm. Cette situation indique que l'on est en présence respectivement de sols non salins et de sols salins à Manialé.

d) Sol 4

Ce sont des sols argileux à recouvrement limono argileux peu épais.

Les pH des horizons de surface sont légèrement acides à neutres. Les couches sous jacentes avec des pH variant de 7.1 à 7.9 ont une tendance à l'alcalinisation. Cette tendance s'explique par le fait que la différence entre les pH eau et pH KCl n'atteint pas l'unité dans aucun des trois sous bassins versants aussi bien dans les horizons de surface que dans ceux plus profonds.

Les valeurs mesurées de la conductivité électrique (CE) sont faibles dans les horizons de surface à M'Béwani et Boky Wéré (0.03 mmhos/cm). Dans ces mêmes sous bassins versants, la CE mesurée varie de 0.13 à 0.18 mmhos/cm dans les couches sous jacentes. Ces augmentations sensibles de la CE ne font pas nécessairement de ces sols, des sols salins. Les valeurs de la CE mesurées sur des échantillons dans le sous bassin de Molodo donnent pour les horizons de surface 0.13 mmhos/cm et 0.27 mmhos/cm dans les couches inférieures. Ces sols sont donc légèrement salins.

4.3.3. Dégradation des sols dans la zone de l'Office du Niger suite aux aménagements

Les états de dégradation des sols les plus fréquemment relatés par les études sur les terres de l'Office du Niger sont la salinisation, l'alcalinisation et sodisation, l'acidification, l'érosion éolienne (la déflation) et l'érosion hydrique. L'importance de la dégradation est telle qu'elle remet en cause la pérennité du système. Une étude réalisée en 1992 sur 25 000 ha a indiqué que 50% des sols sont alcalinisés ou en cours d'alcalinisation (Bertrand *et al.*, 1993). Les facteurs à prendre en compte pour comprendre le phénomène en vue de le combattre sont d'après ces auteurs, le type de sol, le type d'aménagement, le système de culture et la qualité des eaux d'irrigation.

a) Salinisation

La salinisation stricto sensu, accumulation dans les sols de sels solubles n'est pas le type de dégradation le plus développé sur les terres de l'Office du Niger. Cependant il faut noter que la faible structuration des sols « danga » (Sol brun subaride), le rapport Na/Ca qui augmente des horizons de surface vers les couches profondes et devient élevé, la présence de « salant noir » sont autant d'indices de l'existence du phénomène.

La présence de sels solubles dans le sol entraîne deux conséquences majeures. La première est une augmentation de la pression osmotique qui se traduit par des difficultés

d'alimentation des plantes. Celles-ci réagissent de manière très différente suivant les espèces. Le riz est une culture très sensible à cette augmentation de la pression osmotique, il y réagit par une diminution importante du rendement. A l'opposé les palmiers dattiers sont très résistants. Cette expérience de plantation de palmier dattiers est très utilisée pour gérer les effets de la salinisation sur les terres salées du delta du Nil en Égypte.

La deuxième conséquence résulte de la présence du sodium qui est un des éléments chimiques les plus fréquents des sels à forte solubilité. Le sodium a une action particulière sur les argiles qu'il fait gonfler et qu'il dé-flocule. Le sol devient imperméable et asphyxiant. L'ambiance physico-chimique du milieu édaphique n'est plus favorable au bon développement des cultures.

On mesure la salure par la conductivité électrique d'une pâte de sol saturée d'eau et l'alcalinité par le taux de sodium en pourcent du complexe d'échange du sol. On peut lutter contre le sodium par des apports de cations flocculants : calcium (sous forme de gypse) par exemple. Pour corriger la salure, il est courant de laver le sol avec un surplus d'eau d'irrigation (20 à 30% en plus de la dose d'arrosage nécessaire aux plantes) combinée avec un drainage efficace. Le drainage interne n'est possible que si la perméabilité du sol est bonne, ce qui impose de contrôler l'alcalinisation.

b) Alcalinisation / sodisation

Une étude réalisée par BECIS (BECIS, 2000) a montré qu'en saison sèche, des efflorescences blanches et noires apparaissent sur l'ensemble des périmètres irrigués de l'Office du Niger, et ce de façon disparate. Ces sels qui sont liés aux phénomènes de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation ont été la cause d'abandon de nombreuses parcelles par les paysans du fait des faibles rendements causés par la dégradation de la fertilité des sols.

Sur 343 profils pédologiques examinés à des profondeurs de 0-20, 20-60, 60-100cm dans le sous bassin de Molodo, zone de Niono, il est ressorti que le pH et la conductivité électrique avaient des valeurs fortes (pH supérieur à 9) (N'Diaye *et al.*, 2002).

Ces faits sont confirmés par l'analyse des échantillons dans la même zone par l'apparition de salins à Manialé (sous bassin de Molodo) avec un SAR qui varie entre 10 et 18. C'est donc dans une modalité d'adaptation de gestion de l'eau (irrigation / drainage) et de techniques qui lui sont associées (travail du sol et planage) qui permettront de prévenir sinon d'amoindrir les effets négatifs de l'alcalinisation / sodisation. Le calcul du coefficient d'absorption du sodium d'un sol (SAR, Sodium Absorption Ratio) permet d'apprécier le danger d'alcalinisation des sols. Le SAR se calcule à partir de la formule suivante :

$$SAR = \frac{Na^+}{(\sqrt{Ca^{++} + Mg^{++}}) / 2}$$

Quatre classes correspondant à des niveaux de danger d'alcalinisation sont généralement acceptées :

- Peu de danger d'alcalinisation : $0 < SAR < 10$
- Danger d'alcalinisation : $10 < SAR < 18$
- Fort danger d'alcalinisation : $18 < SAR < 26$
- Très fort danger d'alcalinisation : $SAR > 26$.

c) Acidité des sols à l'Office du Niger

L'acidité des sols se mesure par l'évaluation du pH. Le pH des sols peut varier de 2 (sol contenant des sulfures qui s'oxydent en H_2SO_4) à 10 environ (sol contenant des sels alcalins tels que Na_2CO_3). Entre ces deux extrêmes, on note pour la plupart des sols des pH compris entre 4 et 8.

La valeur du pH traduit notamment l'état de saturation du complexe absorbant. De ce point de vue, on peut distinguer quatre zones dans l'échelle 4 à 14.

- 8,4 à 8,6 : sol alcalin
- 8,4 à 6,8 : sol modérément alcalin à neutre
- 6,8 à 5 : sol modérément acide
- En dessous de 5 : sol acide à extrêmement acide.

Sur les terres de l'Office du Niger, le phénomène d'acidification des sols est rare en zones aménagées irriguées. Par contre, il s'observe sur les terres non aménagées particulièrement dans les horizons de surface.

Ainsi sur certains deltas d'épandage, des sols sableux passant à du limon en profondeur ont révélé des pH extrêmement acide (4.7) et modérément acide (5.2) respectivement entre 0 – 30 cm et 30 – 90 cm. Sur la même unité géomorphologique avec sol SL passant à du limon à mi- profondeur des pH faiblement acide (5. 0) et neutre (7.6) ont été observés sur des horizons de surface (Sabeh *et al.*, 2006). Par contre dans les cuvettes (zone dépressionnaire), la même étude indique que les sols sont quasiment neutres en surface. Les auteurs proposent que les sols à texture grossière et en position topographique haute n'entrent pas dans les aménagements comme entité à irriguer.

d) Compactage et dégradation de la structure du sol

Le compactage et la dégradation de la structure des sols sont liés au travail du sol, à la salinisation, alcalinisation / sodisation des terres irriguées. En pratique sur le terrain, le pédologue évalue ces paramètres de façon qualitative. Par exemple en enfonçant le bout du couteau dans un matériau sec, il oppose une certaine résistance à sa pénétration. En fonction de l'importance de cette résistance, on considère le matériau: meuble, peu compact, compact, ou très compact. Concernant la structure, elle peut être qualifiée par trois modalités : particulaire, massive, fragmentaire (polyédrique, prismatique, en colonnes, cubique, lamellaire grumeleuse, grenue).

Le compactage et la dégradation de la structure diminuent l'espace poral, réduisent l'infiltration de l'eau dans le profil pédologique, favorisent le ruissellement donc l'érosion hydrique. En s'asséchant les sols limoneux, sablo limoneux prennent masse et deviennent de plus en plus compacts avec l'air sec.

Dans le sous bassin versant de M'Béwani sur le transect de Kalangola, en zone tampon, la levée sableuse, dans un champ de mil, en dessous de l'épaisseur labourée, le reliquat de l'horizon organo- minéral est apparu très compact dans une structure massive (semelle de labour).

A Bougounamé aussi à l'intérieur des aménagements, dans le sous bassin versant de Boky Wéré, dans un périmètre maraîcher, cette situation de compactage a été observée. Dans ce même sous bassin versant à Togolonba en zone tampon, l'horizon sous jacent au labour était compact.

Concernant les sols à texture fine, la structure fragmentaire n'est pas complètement fondue dans les horizons de surface, des macropores liés à la fissuration ou à des fentes de retrait sont nettement visibles. Le matériau se révèle compact seulement dans les espaces intra structuraux.

En zone non aménagée, les paramètres compacité et dégradation de la structure n'ont pas été signalés par l'étude de Phédié (IER, 2005) comme contraintes majeures. Les matériaux des horizons de surface sont qualifiés de peu compacts, les structures fragmentaires sont les plus couramment décrites.

e) Matière organique du sol

La matière organique dans le sol est essentiellement d'origine végétale et animale. La matière animale se décompose rapidement par putréfaction au contraire de celle végétale qui

connaît une évolution complexe au cours de laquelle, elle joue un rôle très important dans la dynamique du sol.

- ✓ Avec sa teneur de 2,5 à 12% d'azote assimilable, la matière organique améliore le niveau d'azote du sol,
- ✓ Elle est aussi une source d'éléments fertilisants variés,
- ✓ Elle joue un rôle important dans la dynamique de la structure du sol,
- ✓ Elle constitue une source d'énergie pour les micro-organismes du sol.

La matière organique est évaluée en laboratoire par le dosage du carbone organique. Sur le terrain, les horizons de surface du profil se distinguent par leur couleur généralement sombre due à l'incorporation à la matière minérale de la matière organique décomposée et transformée en humus. Issus d'une même roche mère, les horizons de surface dont les matériaux sont plus sombres sont généralement plus pourvus en matière organique. On discrimine ainsi les horizons organo-minéraux par l'importance de leur épaisseur.

En zone aménagée, les sols sablo-limoneux ou sableux en surface ont en moyenne 24 cm d'horizon organo-minéral contre 25 pour les mêmes types de sol en milieu vierge. La différence de 1 cm est aujourd'hui peu importante, cependant sur le long terme, avec les facteurs d'érosion sous culture, son augmentation deviendra significative. Dans les rizières sur sol à texture fine, la situation est de 20 cm en moyenne pour les horizons organo-minéraux contre 35 cm en zone non aménagée. Il y a donc une réelle diminution de l'épaisseur de cette couche que l'on lierait à la culture continue du riz depuis des décennies.

Quant aux couleurs des matériaux de surface, elles sont encore plus parlantes. En zone non aménagée, sur sol argileux le matériau de surface est de couleur gris olive contre le brun sombre dans les rizières.

Les sols de textures SL, S ou LAS montrent des couleurs brun sombres à brunes en milieu vierge contre de l'orange au brun mat sur les levées sableuses des cultures sèches. Le

travail du sol a ramené en surface du matériau sous jacent ne contenant pas de matière organique et l'a homogénéisé avec celui organo- minéral donnant ainsi des couleurs moins sombres qu'en zone non aménagée.

f) Autres évolutions liées à l'aménagement

Texture des horizons de surface

Sur les levées sableuses (sol 1 et sol 2), le travail du sol (labour pour préparer le lit des semences, sarclage des cultures sèches) semble favoriser le lessivage de matériaux fins (argile, limon très fin) vers le bas. Cela expliquerait leur importance relative dans les horizons sous jacents des sols des périmètres aménagés comparativement à leur proportion dans les mêmes couches de sol en milieu non aménagé.

Quant aux rizières, le labour semble avoir ramené en surface du matériau sous jacent plus fin (argile). Ainsi en zone aménagée, le sol 3 a en surface une texture LAS alors que cet horizon est LS en zone non aménagée.

Pour le sol 4, la texture de la couche de surface est AL en zone aménagée contre LA en milieu « vierge ». Tout se passe donc comme si dans les rizières, le travail du sol homogénéisait les horizons de surface tout en augmentant leur teneur en argile. Cette homogénéisation mécanique est d'autant plus favorisée que la position topographique des rizières est dépressionnaire et que le matériau argileux fin se trouve à faible profondeur.

g) Classification des sols

Comme indiqué dans l'étude menée en 2005 par le Projet de faisabilité des périmètres de Phédié et de Sabalibougou (IER, 2005), des sols en position topographique

dépressionnaire mais sur matériau d'épandage, classés brun subarides, sont désignés dans les aménagements par le vocable sols hydromorphes à gley oxydé, cela à cause de la nouvelle dynamique hydrique qui prévaut dans les matériaux. Les vertisols topo morphes identifiés en « zone vierge » sont appelés sols hydromorphes à gley.

De toute évidence, il apparaît que les aménagements ont contribué surtout à la modification texturale que des caractéristiques physicochimiques des sols en comparant les résultats de l'étude phédié en zone non aménagée (IER, 2005) à celle de Sabeh sur terres aménagées (Sabeh et *al.*, 2006). Le seul paramètre physico-chimique qu'on peut indexer comme témoin de la dégradation de la qualité des sols est le pH qui lui-même est dépendant de la variabilité des sels solubles. Le facteur qui occasionne cette variation est l'apport d'intrants conjugué au système de drainage, de sorte qu'aujourd'hui à l'Office du Niger, il existe un problème de salinisation qui d'ailleurs n'est pas général et est surtout localisé dans la zone de Molodo précisément dans le village de Manialé. Vu que ce phénomène de salinisation est par ailleurs synonyme d'une agriculture intensive, nous avons tenu compte dans l'élaboration des scénarios.

4.4. Les différents scénarios simulés et critique des résultats

Nous avons simulé trois types de scénarios:

- Un scénario actuel basé sur la tendance actuelle d'évolution des thèmes, appelé scénario du laisser-faire ;
- Un deuxième scénario basé sur l'exploitation intensive des ressources, appelé scénario intensif ;
- Et enfin un troisième scénario basé sur une réduction de consommation, appelé scénario de développement durable.

Cependant les trois scénarios ont été simulés pour sous modèles revenu, utilisation du territoire et modèle intégré. La raison en est que ce sont ces sous modèles qui illustrent le mieux les interactions entre plusieurs paramètres et du dynamisme de l'évolution des indicateurs.

Les modèles sont présentés de la façon ci-après :

- a) La population;
- b) Les trois formes de terres (agricoles, dégradées, forêts);
- c) Le sous modèle eau;
- d) Le sous modèle revenu (total, par personne, par exploitant);
- e) Le sous modèle qualité de vie et de l'écosystème;
- f) Le modèle global intégré.

Les comparaisons entre les scénarios sont présentées sous formes de séries temporelles par des graphiques élaborés dans microcal origin. Les données utilisées sont compilées dans un fichier Excel que nous retrouvons à l'annexe 3.

a) Sous modèle population

L'évolution de la population est mesurée généralement par le taux de croissance démographique. Ce dernier lui-même est sous l'effet des facteurs suivants : le taux de natalité, le taux de mortalité et le taux de migration nette (exode et afflux de nouveaux colons dans le cas de l'Office du Niger).

Ainsi la natalité représente l'accroissement naturel de la population alors que la migration représente l'accroissement migratoire. Le solde des deux accroissements traduit l'accroissement démographique sur une période donnée.

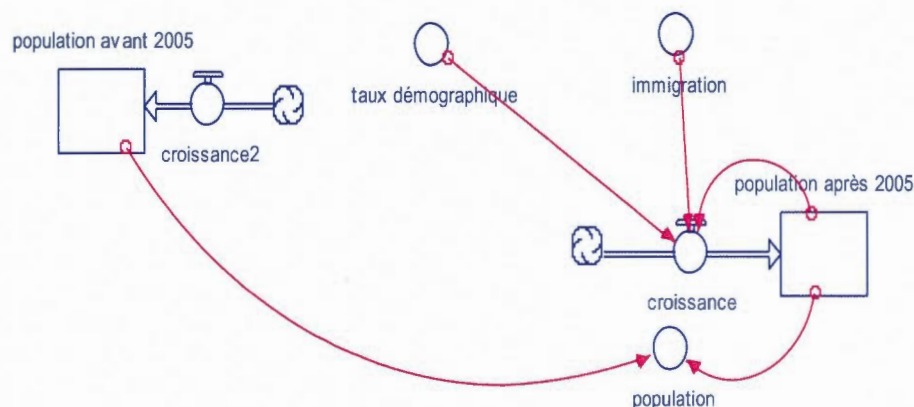


Figure 4.6 Schéma du sous modèle population

Les données utilisées dans le sous modèle population sont détaillées de la façon suivante :

- Population en 2005: 227 000 (dans la thèse, chiffre de l'Office du Niger);
- Population en 1934: 5 000 (estimé);
- Croissance 2: 3 127 pers/année (calculé $227\,000 - 5\,000 / 2005 - 1934$);
- Taux démographique de 3% (dans la thèse, Office du Niger), ne tient pas compte de l'immigration;
- Taux immigration actuel: 1 000 (estimé).

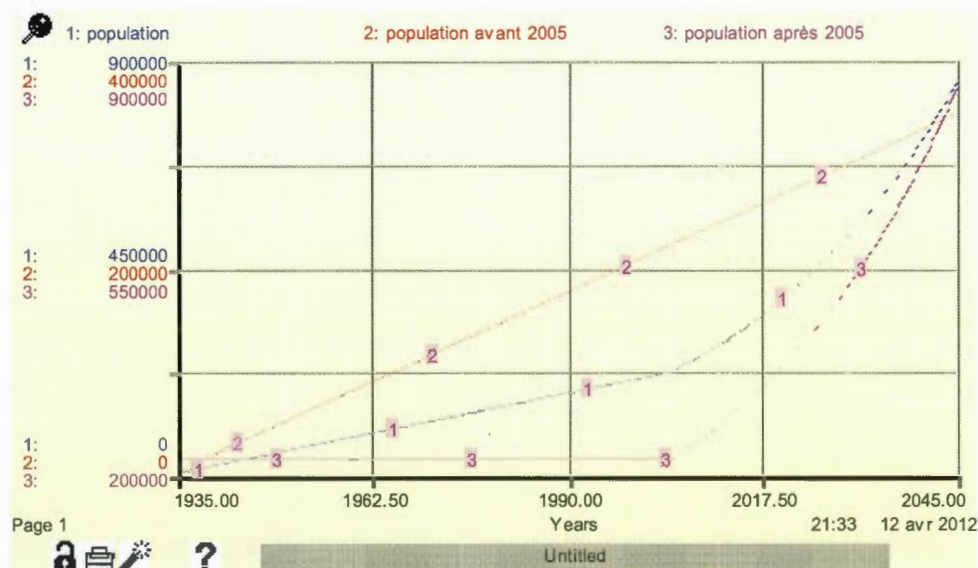


Figure 4.7 Scénario actuel de l'évolution de la population

Dans le sous modèle population, l'évolution de la population a été simulée en tenant compte de la croissance calculée entre 1934 et 2005. Après 2005, on ne dispose pas de statistiques fiables sur la population de la zone car aucune étude n'existe dans ce sens. Ainsi à partir de cette date, la simulation a pris en compte les facteurs d'immigration sous forme d'estimé (absence de données) et de taux démographique pour suivre l'évolution jusqu'à l'horizon 2044.

Cela n'entame en rien à l'intérêt du sous modèle, car lorsque des données exactes seront disponibles, on simulera une meilleure évolution de ce paramètre pour l'aide à la décision.

b) Sous modèle utilisation du territoire

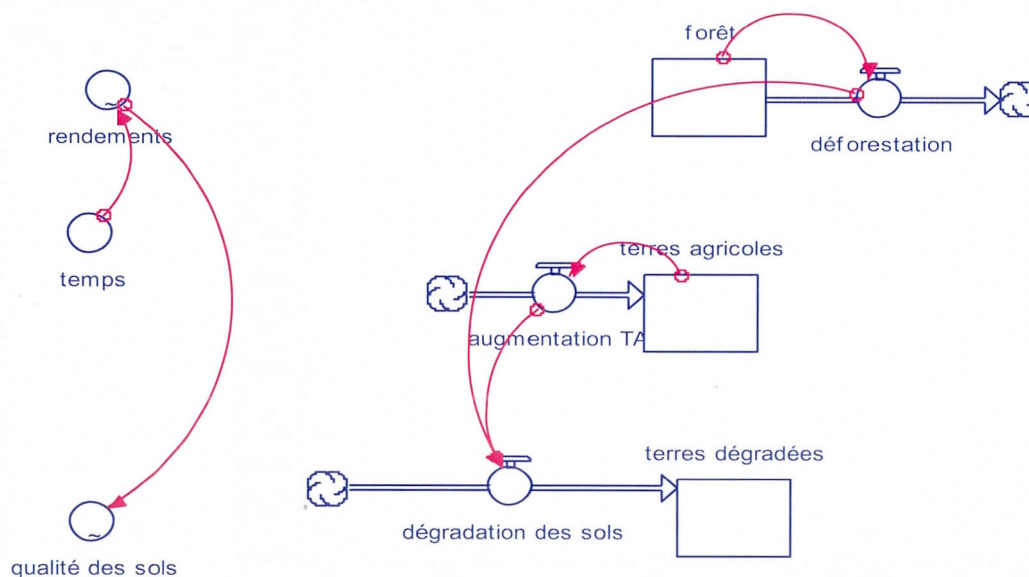


Figure 4.8 Schéma du sous modèle utilisation du territoire

Les données utilisées pour le modèle sont :

Les forêts

- Forêt initiale 2 500 000 ha (calculé à rebours d'après les taux de déforestation historique 1934-1990, 1990-1999 et la forêt en 1998);
 - Déforestation 1934-1990: -34% donc 0.61% par an (selon les études faites sur l'Office du Niger);
 - Déforestation 1990-1999: -38% donc 7.4% par an (Analyse d'images satellites en zone Office du Niger);
 - Déforestation 2000 et après estimée à 3.7%, soit la moitié de 1990-1999;
- Déforestation sont des données nettes, incluent donc les programmes de reforestation.

Les terres agricoles

Les terres agricoles sont modelées d'après les données historiques du Tableau 2.6.

À partir de 2002, le chiffre de 6 000 ha/an (objectif annuel, Office du Niger, 2004) est utilisé. Il pourra être révisé à la baisse pour la période 2002-2010 si les décideurs estiment qu'il est trop optimiste. Pour le futur, il s'agit d'un paramètre de décision important. Les terres agricoles sont limitées à 1 million d'ha, superficie de l'Office du Niger.

Les terres dégradées sont la résultante entre la perte de forêt et les terres agricoles (cela inclut aussi les terres bâties, mais la quantité est probablement négligeable). Les terres dégradées ne sont pas infertiles, mais utilisées pour différentes cultures.

Transhumance: la politique d'aménagement actuelle ne prend pas en compte la perturbation des couloirs migratoires. L'impact pourrait être réduit en réservant des couloirs. Les capacités de charge des parcours sont passées de 8 ha / UBT en 1985 à 5 ha / UBT en 1990 (Brondeau, 1999). Le bétail est estimé à 300 000 têtes selon le recensement de 2000 (Brondeau, 2000). Le taux d'accroissement annuel est évalué à 10% en moyenne (Haidara, 1993 ; Le Masson, 1997 ; Traoré, 1998 ; Brondeau, 1999).

Caractéristiques de la nappe phréatique: 45 mètres de profondeur en 1950 et remontée à 3 mètres vers 2000 (Bertrand *et al.*, 1993).

Quant à la dégradation des sols, elle provient principalement de la salinisation des sols et lié donc à la teneur en pH.

Actuellement, les indicateurs de qualité des sols agricoles n'indiquent pas de détérioration de la qualité, mais il est envisageable qu'une utilisation intensive impliquant des intrants chimiques en grande quantité et des récoltes élevées pourraient réduire la qualité des sols agricoles. Ce paramètre est donc lié à la production. Nous estimons que jusqu'à 4 t/ha, les sols resteront en pleine santé, et que leur qualité diminuera après pour atteindre 50% de la valeur optimale à un taux de production maximal de 10 t/ha. Nous n'incluons pas de rétroaction entre la qualité des sols et la production, qui existe certainement, mais peut être compensée par les intrants chimiques.

Actuellement, la productivité est de 2 t/ha, 4 t/ha pour la riziculture contrôlée par gravité (FAO, 2005), le potentiel étant de 8-10 t/an (Poussin *et al.*, 2005).

c) Sous modèle eau

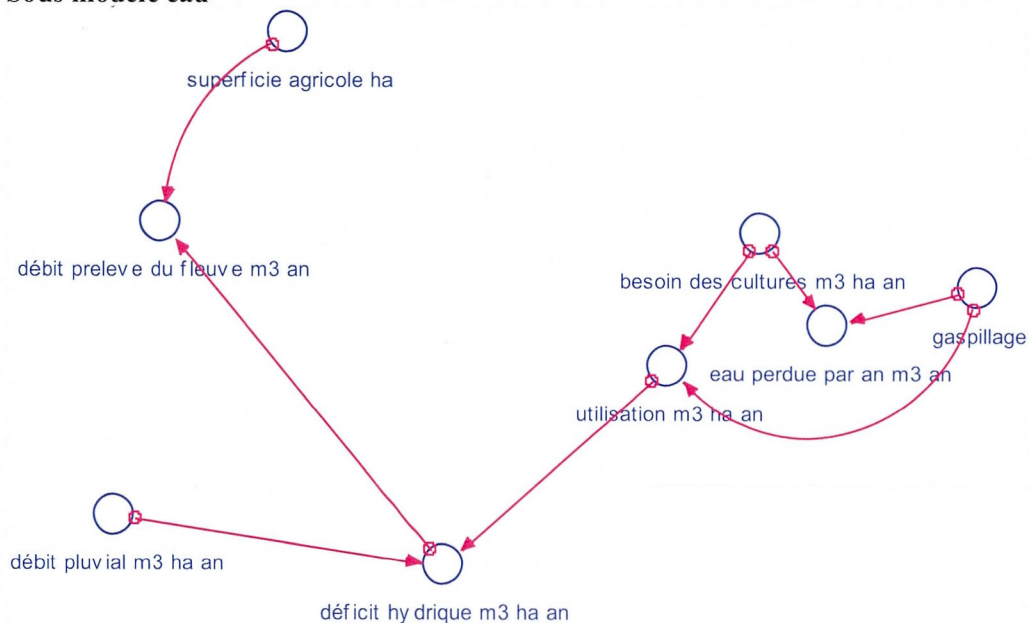


Figure 4.9 Schéma du sous modèle eau

La demande en eau des cultures est assurée par l'eau de pluie et par l'eau d'irrigation. Nous calculons d'abord le déficit hydrique en $\text{m}^3/\text{ha}/\text{an}$, qui est : utilisation d'eau = débit pluvial. La totalité du débit prélevé au barrage de Markala est donc le déficit hydrique * la superficie agricole évalué en m^3/an .

L'utilisation d'eau est supérieure aux besoins à cause des différentes sources de perte d'eau entre le prélèvement sur le Niger et le réseau d'irrigation: pertes dans les canalisations, évaporation, connections clandestines. Actuellement 57% de l'eau est perdue, dont 22-28% lors du cheminement dans les canaux primaires (Kuper *et al.*, 2002).

La consommation d'eau actuelle $13\,500\text{ m}^3 / \text{ha} / \text{an}$ en 2002 (besoin des cultures incluant le gaspillage, l'évaporation et les autres usages).

Débit pluvial $676 \text{ mm/an} = 6760 \text{ m}^3 / \text{ha} / \text{an}$ (serait idéalement remplacé par des données historiques).

- $6\,220\,800\,000 \text{ m}^3$ d'eau par an pour un débit de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ comme apport d'eau par le fleuve.
- $1\,080\,000\,000 \text{ m}^3$ d'eau sont utilisées pour l'irrigation.

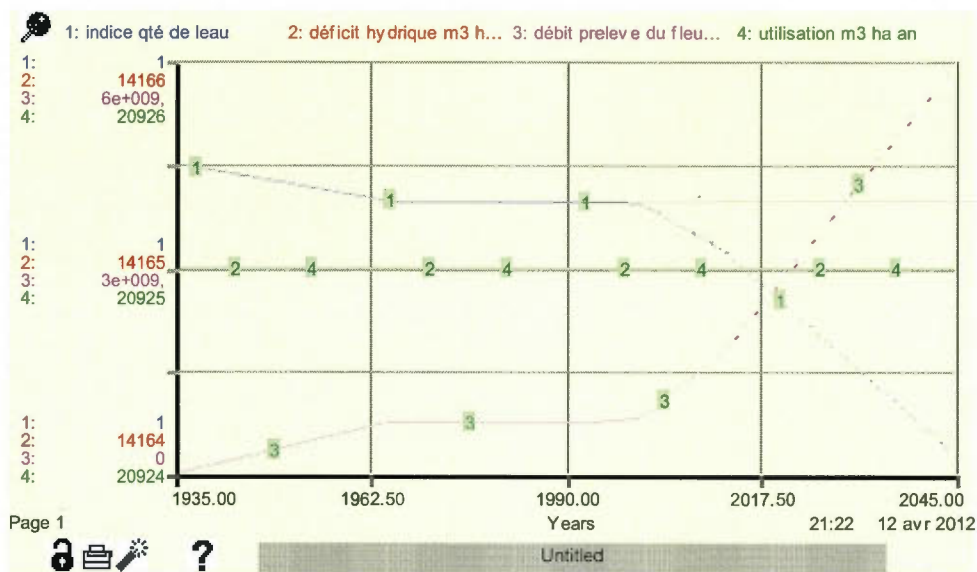


Figure 4.10 Scénario actuel sur l'évolution de la qualité de l'eau

La qualité de l'eau est fortement corrélée à la quantité prélevée (débit). Cette quantité elle-même est sous l'effet de la péjoration climatique (déficit hydrique) et de l'ampleur de l'utilisation qui en est faite par les agriculteurs.

d) Sous modèle revenu

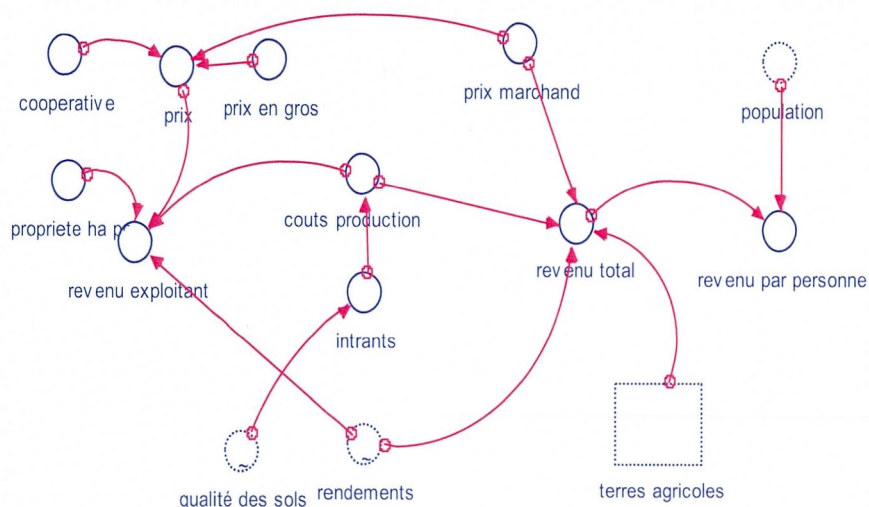


Figure 4.11 Schéma du modèle revenu

- Le revenu total est obtenu en multipliant la quantité totale de riz (superficie agricole multiplié par le rendement) avec le prix marchand (au détail) obtenu sur les marchés moins les coûts de production. Le prix marchand est de 226 FCFA/kg.
- Le revenu individuel des petits paysans est obtenu en multipliant leur récolte (nombre d'ha par personne multiplié par le rendement) par le prix en gros que les intermédiaires leurs accordent, ou le prix en détail s'ils sont organisés en coopératives moins les coûts de production. Le prix de vente en gros est 149 FCFA/kg.

Les coûts de production sont 130 FCFA/kg, dont 23%, soit 29.5 FCFA pour les intrants (urée et phosphates). Dans le modèle, une mauvaise qualité des sols fait augmenter l'utilisation d'intrants proportionnellement (qualité du sol limitée à 0.5 dans le "pire" scénario).

Ces chiffres sont ceux du Ministère de l'agriculture du Mali (2009). Stratégie nationale de développement de la riziculture.

NB : Nous avons utilisé un facteur de 1000 pour les revenus car les rendements sont en t/ha et les prix en FCFA/kg.

Le revenu par exploitant est obtenu en multipliant la propriété (en ha/personne) avec le rendement (t/ha) et le prix du riz (FCFA/kg) *1000 (conversion kg en tonnes). Selon le ministère de l'agriculture du Mali (2005), le prix de vente en gros est de 149 FCFA/kg et le prix en détail est de 226 FCFA/kg, laissant une marge de profit de 77 FCFA/kg. Cette marge bénéficiaire est bien au-dessus de celle du Sénégal qui est de 22 FCFA/kg ou du Niger (11 FCFA/kg). Selon le scénario, les producteurs paieront le pris au gros ou le prix de vente, s'ils s'organisent en coopératives. Comme l'évolution future du prix est impossible à prévoir, il sera laissé constant.

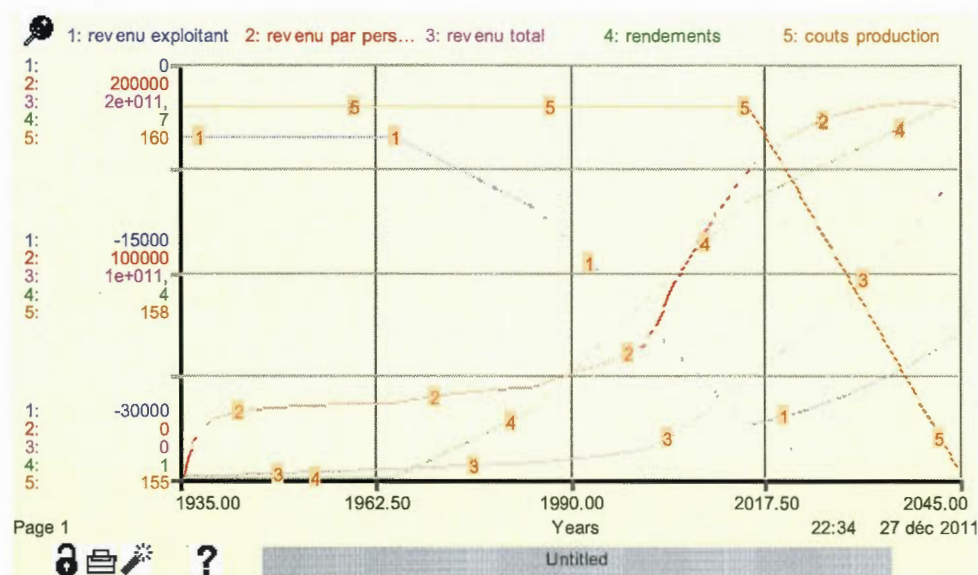


Figure 4.12 Schéma du scénario du Laisser-Faire (LF)

Tous les revenus augmentent, mais le revenu par personne augmente moins vite et finit par s'infléchir car la population augmente plus vite que la production. Les prix et coûts sont laissés fixes, l'actualisation et l'inflation ne sont pas inclus, nous avons donc supposé que la valeur par parité d'achat du riz reste semblable.

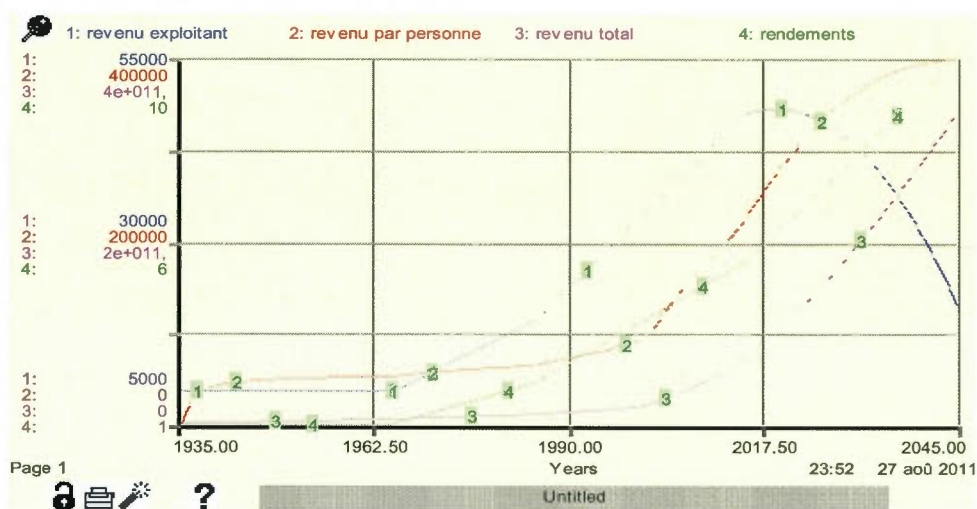


Figure 4.13 Schéma du scénario intensif (IN)

Les tendances observées sont les mêmes que pour le scénario du Laisser-Faire (LF), mais plus prononcées. Le revenu par personne ne diminue pas en absolu car l'augmentation des terres agricoles (+50% par rapport au LF) compense l'augmentation de la population (+50%) et en plus, l'augmentation de la productivité (rendements) fait augmenter les revenus. En revanche, à cause de la diminution de la qualité de sols qui fait augmenter les intrants et donc les coûts de production, les revenus des petits exploitants chutent sévèrement après être passés par un pic autour de 2017.

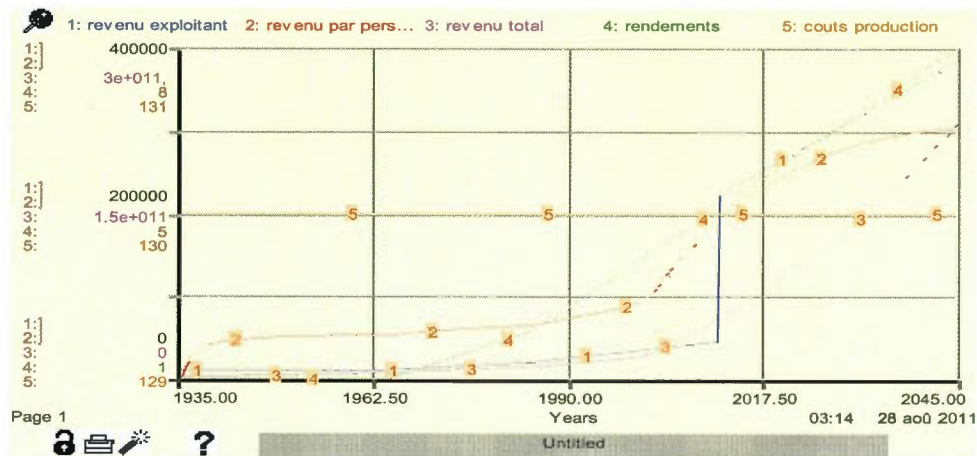


Figure 4.14 Schéma du scénario de développement durable (DD)

Le revenu des exploitants augmente continuellement puisque la qualité des sols est maintenue et aucun intrant supplémentaire n'est nécessaire, les coûts de production restent donc constants.

e) Sous modèle évaluation de la qualité de vie et de l'écosystème

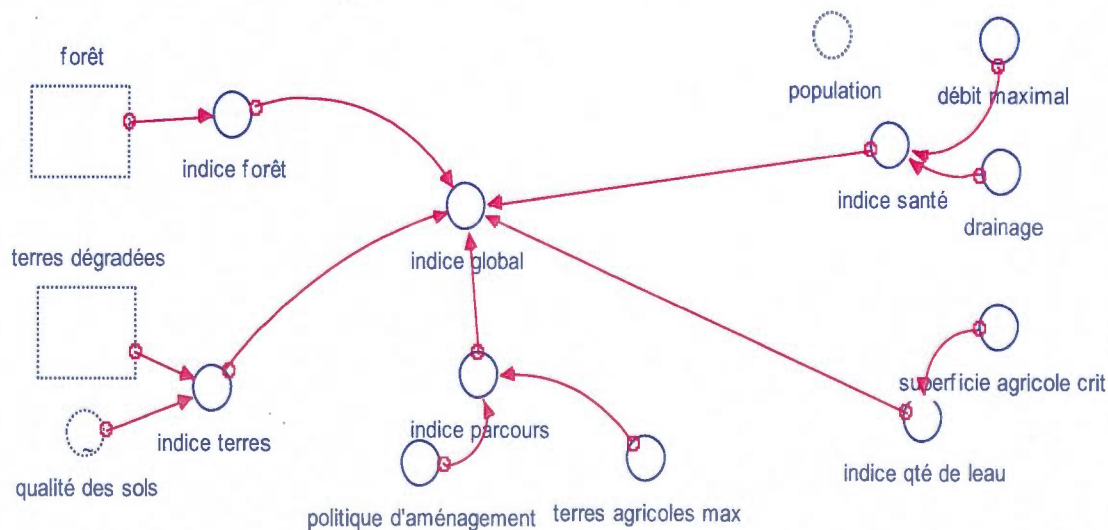


Figure 4.15 Schéma du scénario du sous modèle évaluation qualité de vie et de l'écosystème

Les facteurs de pondération sont issus de questionnaires et reflètent l'importance que la population accorde aux différents aspects abordés.

Les indicateurs de qualité sont traduits en indices unitaires (c'est à dire variant de 0 à 1 avec 0 correspondant à la plus faible valeur de l'écosystème et 1 à l'état idéal) et multipliés par le facteur de pondération pour obtenir l'indice composite.

L'indice forêt dénote la portion restante de la forêt originale (en 1934) entre 2 500 000 ha et 0 ha.

L'indice terres dégradées sera 1 lorsque 0 ha sont dégradés et 0 lorsque 2 500 000 ha, soit la totalité du territoire (Office du Niger incluant les zones exondées) seront dégradées.

L'indice parcours sera 1 en absence de terres agricoles et 0 lorsqu'une quantité maximale de terres agricoles (*terres_agricoles_max*) aura été atteinte qui rend la transhumance impossible. Cependant, la politique d'aménagement peut atténuer l'impact des terres agricoles. Concrètement, la politique d'aménagement équivaut à la fraction des parcours préservés lors de l'établissement des terres agricoles.

L'indice qualité de l'eau se compose à moitié par l'impact des terres agricoles (pesticides, engrais, etc.) et à moitié par le gaspillage d'eau (mauvaise gestion du réseau). L'impact de la superficie agricole atteint sa limite à partir d'une superficie agricole faisant que l'eau prélevée ne correspond plus aux normes d'utilisation humaines.

L'indice santé est fonction du débit du fleuve prélevé, puisque les principales maladies sont d'origine hydrique. Il est 1 en absence de prélèvement d'eau et 0 lorsqu'un débit maximal (à déterminer) est atteint. Le drainage, en évitant les eaux stagnantes, réduit proportionnellement l'impact du prélèvement d'eau.

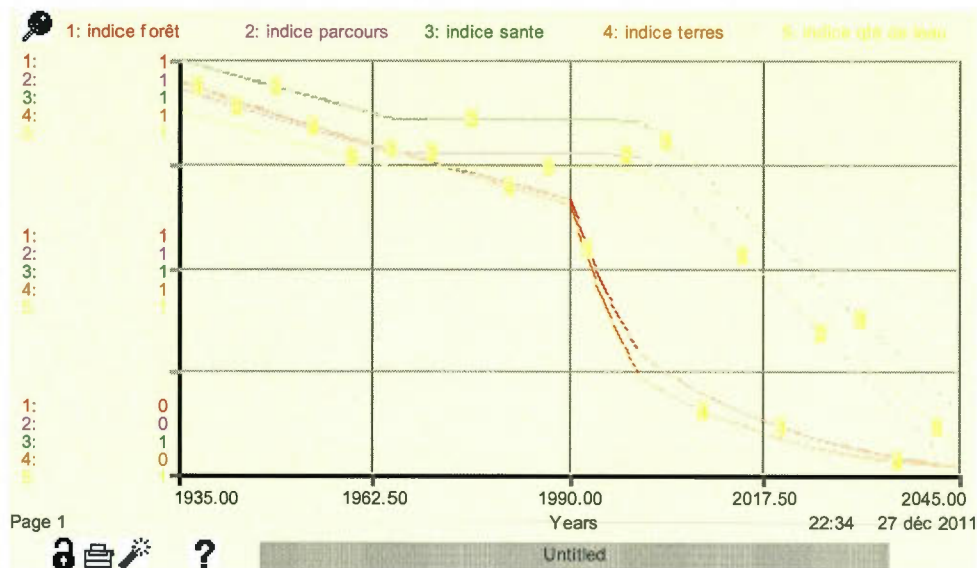


Figure 4.16 Modèle du scénario du Laisser-Faire (LF)

Les données utilisées pour le scénario du laisser-Faire:

- L'augmentation des terres agricoles au même rythme (6000 ha/an);
- La déforestation au même rythme (3.7% par an);
- Le rendement subit une légère augmentation (0.5 tous les 5 ans) jusqu'à 6.5 t/ha;
- La qualité des sols diminue à partir de 0.5 t/ha au rythme de 10% par t/ha supplémentaire;
- L'immigration suit la même cadence (1000 par an);
- Le prix est le prix en gros.

Commentaires sur le scénario du Laisser-Faire

Tous les indices diminuent. Les indices forêt et terre diminuent au fur et à mesure que la superficie de forêt et la superficie de terres dégradées augmentent. Dans ce scénario, la qualité des sols n'est pas encore affectée. Les indices qualité de l'eau et santé diminuent au fur et à mesure que la superficie agricole et la quantité d'eau prélevée augmentent. L'indice parcours diminue également avec l'augmentation de la superficie agricole

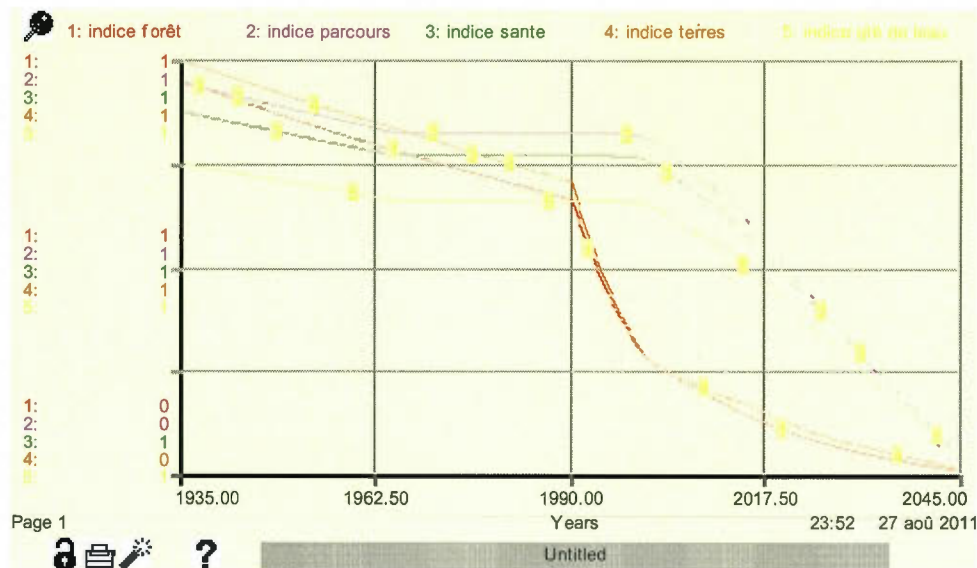


Figure 4.17 Modèle du scénario intensif (IN)

Les données utilisées pour le scénario intensif :

- L'augmentation des terres agricoles est estimée à plus de 50% (9 000 ha/an);
- La déforestation progresse au même rythme (3.7% par an);
- Le rendement augmente jusqu'à 10 t/ha;
- La qualité des sols diminue à partir de 0.5 t/ha au rythme de 10% par t/ha supplémentaire. Quant à l'immigration, elle augmente de plus de 50% (1500 par an). Le prix utilisé est le prix en gros.

Commentaires sur le scénario intensif

Le revenu par personne ne diminue pas en absolu car l'augmentation des terres agricoles (+50% par rapport à LF) compense l'augmentation de la population (+50%) et en plus, l'augmentation de la productivité (rendements) fait augmenter les revenus. En revanche, à cause de la diminution de la qualité de sols qui fait augmenter les intrants et donc les coûts de production, les revenus des petits exploitants chutent sévèrement après être passés par un pic autour de 2017.

Il y a moins de terres dégradées que dans le scénario LF car, bien que la déforestation soit 10% plus élevée, l'augmentation des terres agricoles l'est de 50% qui ne comptent pas comme terres dégradées.

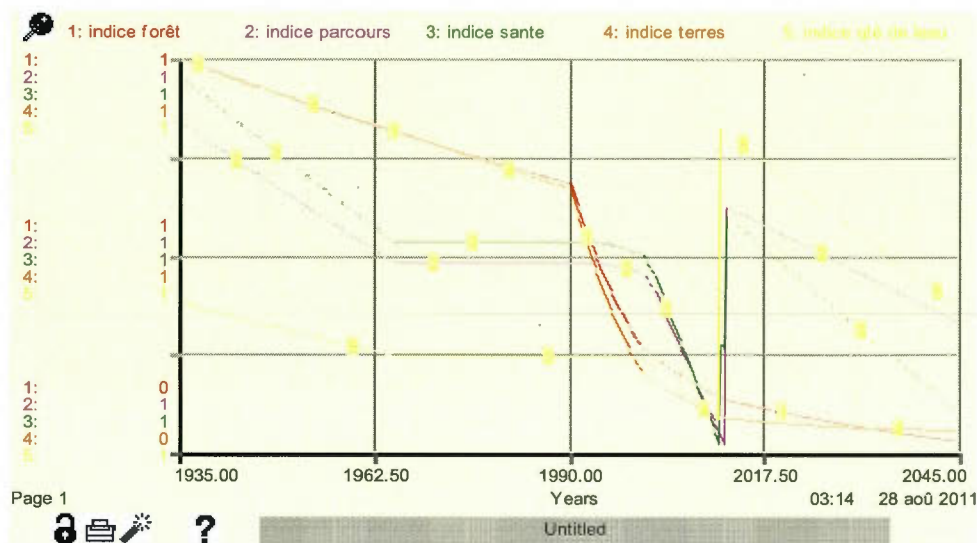


Figure 4.18 Schéma du scénario de développement durable (DD)

Les données utilisées sont :

- L'augmentation des terres agricoles est de 10% plus lentement (5400 ha/an).
- La déforestation diminuée de moitié (1.75%) alors que le rendement augmente jusqu'à 8 (Poussin *et al.*, 2005 : gestion de l'eau et des calendriers culturaux). En conséquence l'impact est de moitié moindre sur la qualité des sols et sans augmentation des intrants. Le rythme d'augmentation reste le même que depuis milieu des années 1980.
- L'immigration est freinée lorsque la population dépasse 500 000 (1000 par an taux maximal, 0 à 500 000, -1000 à 1 million).
- Le gaspillage d'eau est réduit à 25% (de 55%).
- La politique d'aménagement des parcours prône la préservation jusqu'à 75%.
- Le drainage influence l'indice santé et on considère que 50% de l'eau est drainée.
- Le prix est le prix au détail.

- Les paramètres de contrôle gaspillage, drainage, politique d'aménagement des parcours et coopérative ainsi que les taux de déforestation et d'augmentation des terres agricoles ne changent qu'après 2011.
- L'indice terre se stabilise puisque la qualité des sols diminue et avec le temps, la déforestation aussi.

Commentaire sur le scénario durable

Malgré la régulation par l'afflux de population, la population augmente toujours à cause du taux démographique élevé. Cet afflux de population n'en représente qu'une petite part (moins de 10%).

L'indice terre se stabilise puisque la qualité des sols diminue et avec le temps, la déforestation aussi. Le revenu des exploitants augmente continuellement puisque la qualité des sols est maintenue et aucun intrant supplémentaire n'est nécessaire, les coûts de production restent donc constants.

f) Modèle intégré de l'indice global

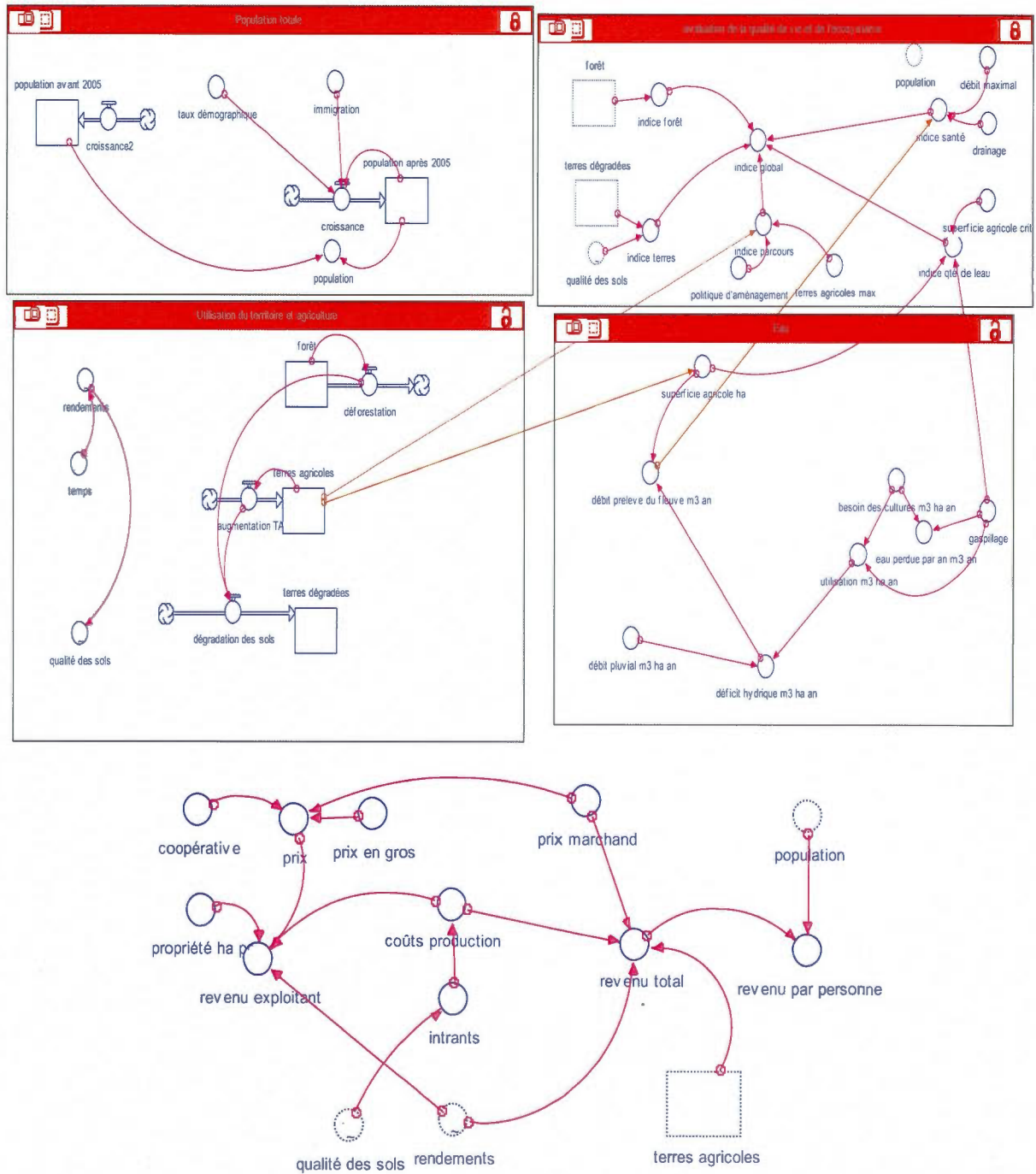


Figure 4.19 Schéma du modèle intégré

L'indice global est un indice composite de tous les paramètres auxquels on a affecté les facteurs de pondération qui ont été attribués par les populations lors des différentes consultations.

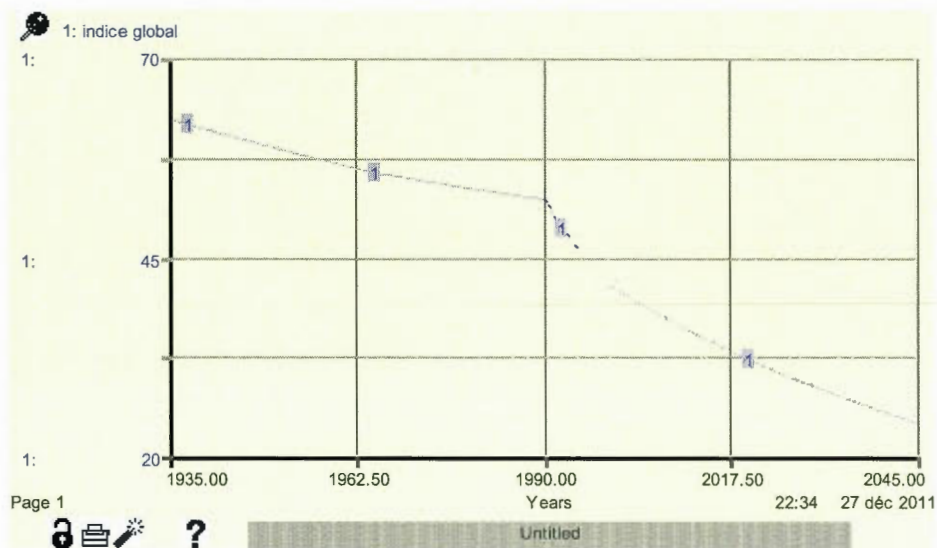


Figure 4.20 Modèle intégré du scénario du Laisser-Faire (LF)

Dans ce scénario l'indice global varie entre 23 et 62.

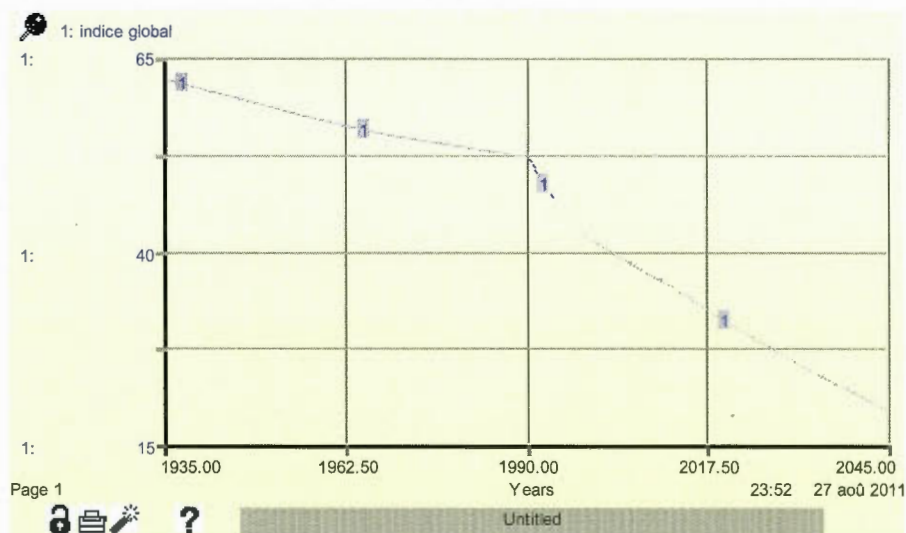


Figure 4.21 Modèle intégré du scénario intensif

L'indice global varie entre 19 et 62 dans le scénario intensif.

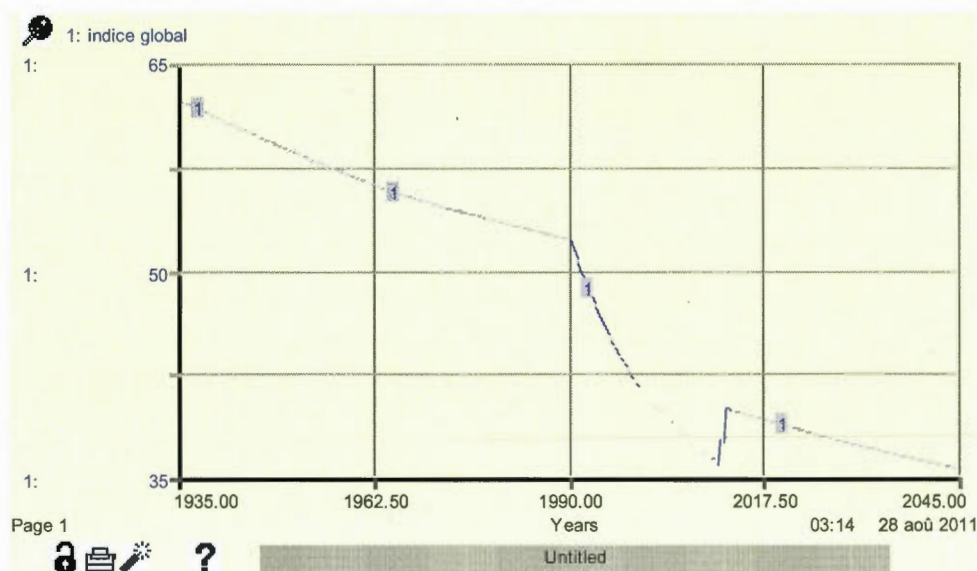


Figure 4.2.2 Modèle intégré du scénario de développement durable (DD)

Ici l'indice global oscille entre 32 et 62.

En définitive, on remarque que pour aucun des scénarios, l'indice global ne reste stable, et pour tous, le revenu total augmente, il n'y a donc pas de vrai développement durable quelque soit le scénario, mais un développement à impact moindre. L'indice total peut atteindre 65 au maximum.

Entreprendre un véritable développement durable exigerait un certain nombre de mesures dont la mise en œuvre dépend d'une grande volonté politique des décideurs et de sérieux efforts de la part des autres acteurs. Ces mesures pourraient être par exemple :

- Maintenir l'augmentation des terres agricoles au même rythme (6 000 ha/an);
- Stopper la déforestation par le reboisement et le réaménagement de terres dégradées;
- Augmenter le rendement jusqu'à 8t /ha;
- Faire en sorte que l'indice sur la qualité des sols soit égal à 1 et sans augmentation des intrants;

- La population est limitée à 500 000;
- Le gaspillage d'eau est réduit à 25% (de 55%);
- La politique d'aménagement des parcours préserve les parcours à 100%;
- Le drainage qui influence l'indice santé à cause de la stagnation d'eau dans les drains comme niche des vecteurs est effectué à 100%;
- Le prix reste le prix au détail.

Avec ces dispositions on peut espérer entreprendre un développement durable car l'indice global restera constant.

4.5. Discussion sur les limites du modèle

Le logiciel Stella comme la plupart des logiciels récents utilise la programmation « orientée objet ». L'intérêt de ce genre de modèle est qu'il est possible de simuler séparément chaque objet (thème). C'est un avantage vu qu'on se trouve généralement en face de données qui n'ont pas le plus souvent les mêmes échelles de valeurs. Stella simule également des paramètres dont les valeurs ne sont pas continues et c'est à la suite de la simulation que les valeurs engendrées peuvent être continues.

Cette simulation est une possibilité pour l'aide à la décision car les différentes courbes qui sont produites montrent une vision à long terme de l'évolution des thèmes et des impacts environnementaux associés. Le choix des politiques peut se baser ainsi sur des objectifs globaux et spécifiques de réduction des différents paramètres que l'on voudrait adopter par la simulation d'autres scénarios pour concilier le développement rizicole et la gestion optimale des ressources.

Il revient en dernier lieu aux décideurs d'opter pour tel ou tel scénario en agissant sur les paramètres concernés vu l'importance de leur enjeu.

Aussi, le logiciel Stella ne simule que certains paramètres et non des paramètres de nature pédologique qui sont généralement des données discontinues. Dans notre cas, après avoir analysé l'évolution des paramètres pédologiques par une comparaison entre zones aménagées et zones non aménagées, nous avons constaté qu'il y a une différence surtout au niveau de la teneur en pH se manifestant par un début de salinité en certains endroits, les autres paramètres ont peu changé. Nous n'avons donc retenu que ce paramètre (teneur en pH) dans notre modèle pour l'évaluation de la qualité des sols.

Le modèle nous a édifié sur certains aspects :

- Gestion de l'eau

Le sous modèle sur l'eau démontre qu'à l'état actuel, l'irrigation des parcelles se fait sans prendre en considération les quantités de pluies qui sont recueillies au niveau des parcelles.

Si dans les prévisions on prenait en compte les quantités d'eaux tombées, on réduirait davantage la quantité d'eau prélevée au niveau du barrage et on réduirait ainsi le gaspillage d'eau.

L'eau du fleuve à notre avis devait servir à compléter le déficit hydrique des cultures et non en ignorant la quantité de pluies que reçoivent déjà les cultures. Ceci engendre également des problèmes d'évacuation de surplus d'eau en aval car la riziculture en submersion contrôlée nécessite une évacuation de ce surplus d'eau.

- Le revenu

Le revenu par personne est dépendant du prix du riz sur le marché et du rendement à l'hectare.

Le prix du riz est d'environ 300 CFA/kg au Mali (prix grossiste) selon le Réseau des Systèmes d'Information des Marchés en Afrique de l'Ouest. (http://www.resimao.org/html/fr/Mali/price_actual/product_id/3).

Par contre, historiquement, sur les marchés mondiaux, le prix du riz a doublé entre 2005 et 2009, après une longue période de stagnation/déclin des prix. Si cette tendance est maintenue, le revenu par personne va augmenter au fil des années. Cependant, il faudra conserver le potentiel productif des sols à long terme (en mettant en œuvre des pratiques agricoles appropriées de restauration de la fertilité) si l'on veut que cette tendance se maintienne par une préservation du rendement actuel à l'hectare.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PISTES DE RECHERCHE FUTURE

Notre travail de recherche a pour but essentiel d'aider les décideurs à une gestion durable des ressources naturelles en Afrique subsaharienne en partant de l'étude du cas des aménagements en zone Office du Niger au Mali.

Ainsi nous nous sommes proposés d'analyser l'évolution des thèmes environnementaux (végétation, l'eau, la population, les zones aménagées et les zones non aménagées) depuis la mise en œuvre des aménagements en zone Office du Niger vers les années 1934.

Ces thèmes ont été analysés en utilisant un certain nombre de méthodes et outils (analyse d'études sectorielles déjà effectuées, analyse d'images, consultation des populations lors des entretiens et ateliers, analyse de paramètres pédologiques et enfin simulation de tous ces aspects par différents scénarios). La finalité de ces scénarios est de fournir les options possibles pour une gestion durable des ressources. La problématique des aménagements est telle que chaque nouvel aménagement engendre des impacts environnementaux caractérisés par :

- l'afflux de colons,
- la pression sur la végétation,
- le gaspillage et la stagnation d'eau et les conséquences sur la santé humaine,
- la dégradation de la qualité des sols par l'utilisation abusifs d'intrants,
- la réduction des parcours et du temps de séjour des animaux,
- et enfin les conflits persistants à cause de l'utilisation de l'espace par les acteurs nombreux.

L'enjeu devient important dans la mesure où l'Office du Niger après la restructuration en 1984 (Koné *et al.*, 1997) envisage d'aménager 6 000 ha chaque année.

L'analyse de l'occupation du sol montre une fois de plus une convergence de plusieurs dynamiques et, à terme d'autres types de questions spatio-temporelles se poseront vis-à-vis de la poursuite des aménagements.

Les objectifs que nous nous sommes fixés pour résoudre les questions qui se posent se réfèrent à plusieurs méthodes.

Ces méthodes utilisées relèvent à la fois des sciences sociales par les questionnaires d'entretien et de consultation de la population, l'analyse d'images satellitales qui relèvent des sciences appliquées, les analyse de laboratoire qui sont des sciences expérimentales et enfin de la simulation par la transcription des données dans un langage mathématique qui sont des sciences exactes.

Notre démarche trouve ainsi son originalité dans le fait que nous utilisons une approche interdisciplinaire par l'application de plusieurs méthodes et outils pour l'analyse et la résolution des problèmes environnementaux. Le concept « d'objet frontière » où toutes les disciplines communiquent autour d'une même problématique n'a pas encore été étudié dans la zone. C'est pourquoi nous pensons que notre approche est novatrice. L'optimisation des terres agricoles est une nécessité si l'on veut poursuivre un développement soutenu à long terme.

Cette approche interdisciplinaire a abouti aux résultats suivants :

(i) L'analyse de l'occupation du sol effectuée entre 1934 et 1990 et entre 1990 et 1999 respectivement par l'analyse des données issues d'études sectorielles et le traitement d'images satellites donnent sensiblement les mêmes résultats quant à l'évolution des strates

herbacées (34% de régression pour les études menées et 38% de régression suite à l'analyse des images satellitales); les résultats sont différents pour les autres strates arbustives et arborées. Cette différence s'explique par le fait que non seulement les analyses ont été effectuées sur deux périodes différentes mais aussi par différentes méthodes et outils et de l'étendue de la zone couverture.

Dans le contexte subsaharien, où le plus souvent, on est confronté au manque de données fiables, il serait intéressant d'approfondir la réflexion sur le degré de fiabilité de chacune des méthodes et outils. Il s'agira de mener la même analyse avec des méthodes différentes et faire une comparaison pour évaluer la fiabilité de chacune des méthodes dans l'analyse de la dynamique de l'occupation du sol. C'est une question de recherche pour le futur en choisissant un certain nombre de méthodes et d'outils et analyser des thèmes du milieu et opter pour tel ou tel méthode ou outil pour non seulement analyser tel ou tel thème selon leur degré de fiabilité.

Dans notre cas chacune des méthodes présente un intérêt particulier. Les études sectorielles utilisent des approches classiques d'analyse basées sur des procédés d'échantillonnage en premier lieu et en second lieu par la généralisation sur toute la zone. Dans ce cas la fiabilité dépend des critères de choix des échantillons et des équations scientifiques sur lesquelles on se base (les études d'inventaires floristiques).

(ii) L'analyse d'images a comme avantage la couverture de la totalité de la zone mais ici également on reste dépendant des données qu'on intègre dans le logiciel pour l'analyse et du choix du type de traitement dont la fiabilité dépend du thème, de la validation avec les données terrain et la connaissance du terrain par l'analyste / interprète.

Ainsi toutes ces méthodes gagneraient à être évaluées séparément par thème et servir de référence pour les chercheurs dans les études futures.

Un exemple intéressant est la gestion de l'eau où les études classiques s'intéressent à la variation du débit qui est plus indicatif de la quantité d'eau disponible que l'analyse d'images qui se base sur l'évaluation de la superficie du plan d'eau qui à priori n'indique rien quant à la disponibilité de l'eau. L'analyse d'images nous renseigne sur beaucoup d'aspects concernant les zones aménagées et non aménagées car on dispose d'informations réelles sur le milieu. Ces informations sont fournies par les satellites alors que les études classiques font une compilation de données collectées par les techniciens terrain qui dans certains cas ne sont pas les bonnes informations et induisent en erreur. Ce fut le cas en 2008 avec le programme initiative riz lancé par le gouvernement pour assurer la sécurité alimentaire où les techniciens de l'Office du Niger ont fourni des résultats de rendement à l'hectare très différents de la quantité réelle récoltée (Office du Niger, 2009).

(iii) L'analyse environnementale par l'identification et l'évaluation des enjeux environnementaux par les populations pour qui la principale préoccupation reste le maintien du capital productif des terres car la riziculture est avant tout une activité économique essentielle dans la vie des populations qui se soucient beaucoup plus de la productivité et du rendement des parcelles qu'elles exploitent.

La rareté des ressources ligneuses et les questions de santé font aussi partie de leurs préoccupations.

La gestion des parcours vient en troisième lieu des préoccupations environnementales car faisant intervenir la gestion de l'espace dont l'un des impacts est la résurgence des conflits et l'ampleur de ces conflits varie selon les sous bassins. Les conflits sont très fréquents dans le sous bassin de Boky Wèrè situé à la lisière avec les zones exondées et lieu de séjour temporaire des animaux transhumants.

L'eau par contre ne semble pas un enjeu important pour les populations et cela se vérifie par le gaspillage au niveau des drains et des parcelles et corroborées également par d'autres études (Bélière *et al.*, 2001; Vandersypen *et al.*, 2009). Cependant les études menées sur la question prouvent que la disponibilité de la ressource n'est pas assurée pour autant

surtout que le fleuve Niger qui sert de source pour l'irrigation est non seulement sous l'effet des péjorations climatiques mais aussi tributaire de la gestion en aval et en amont des autres États traversés.

L'évaluation des indicateurs pédologiques par une comparaison entre zones aménagées et zones non aménagées et dont la principale conclusion est que le seul paramètre qui varie à cause des pratiques culturelles par l'utilisation abondante d'intrants est la teneur en pH engendrant la salinité /sodisation des sols par endroits.

La simulation des données par l'élaboration de scénarios pour déterminer l'optimisation des ressources. Ces scénarios simulés pour un certain nombre d'aspects tels, l'utilisation du territoire, les revenus et la qualité de vie proposent trois options : le scénario du laisser-faire basé sur les tendances actuelles d'évolution des thèmes, le scénario intensif basé sur une augmentation de la pression sur les ressources et le scénario de développement durable basé sur une diminution des modes de consommation et de production. La conclusion qu'on en tire est qu'aucun des scénarios ne garantit un véritable développement durable mais un développement à impact moindre car l'indice global formé de l'ensemble des indicateurs n'est pas stable (cf. figures 4.17, 4.18 et 4.19). Pour qu'il y ait un véritable développement durable, il faudrait d'autres mesures qui relèvent non seulement d'une volonté politique mais aussi d'une implication et d'une adhésion réelle des populations.

Ces mesures concerneront le maintien de l'augmentation des terres agricoles au rythme de 6 000 ha/an, le reboisement et le réaménagement de terres dégradées, l'accroissement du rendement jusqu'à 8t /ha, amener l'indice sur la qualité des sols à 1 et sans augmentation des intrants, limiter la population à 500 000, réduire le gaspillage d'eau de 25% (de 55%), préserver les parcours à 100%, le drainage effectif et le prix du riz évalué au prix au détail.

La question qui se pose est alors de savoir si les décideurs et les populations sont prêts à s'engager pour cette option, d'autant plus que le paradigme actuel est la productivité et le rendement pour assurer la sécurité alimentaire ?

En conclusion la modélisation par la simulation des scénarios élargit les points de vue des gestionnaires en proposant un certain nombre d'options dans la gestion optimale des ressources, et c'est à ce stade que s'arrête généralement le travail du chercheur pour aider à la prise de décision.

Cependant, la réflexion doit porter sur le choix d'autres thématiques à simuler et questionner directement les décideurs pour les amener à choisir entre un développement qui satisfait à leur objectif immédiat et dont ils seront comptables demain ou opter pour un développement plus durable des ressources en faisant fi des calculs politiques. C'est un autre sujet et une piste de réflexion pour le futur et cela amène le chercheur à aller au delà du travail pur de recherche pour que les résultats obtenus servent davantage les utilisateurs.

D'autres pistes de recherche existent par rapport à la gestion de l'eau. L'intérêt du modèle est de faire une comparaison entre le riz et d'autres spéculations et comparées les consommations d'eau au niveau des parcelles pour chaque spéculation en proposant d'autres options possibles pour l'aide à la décision.

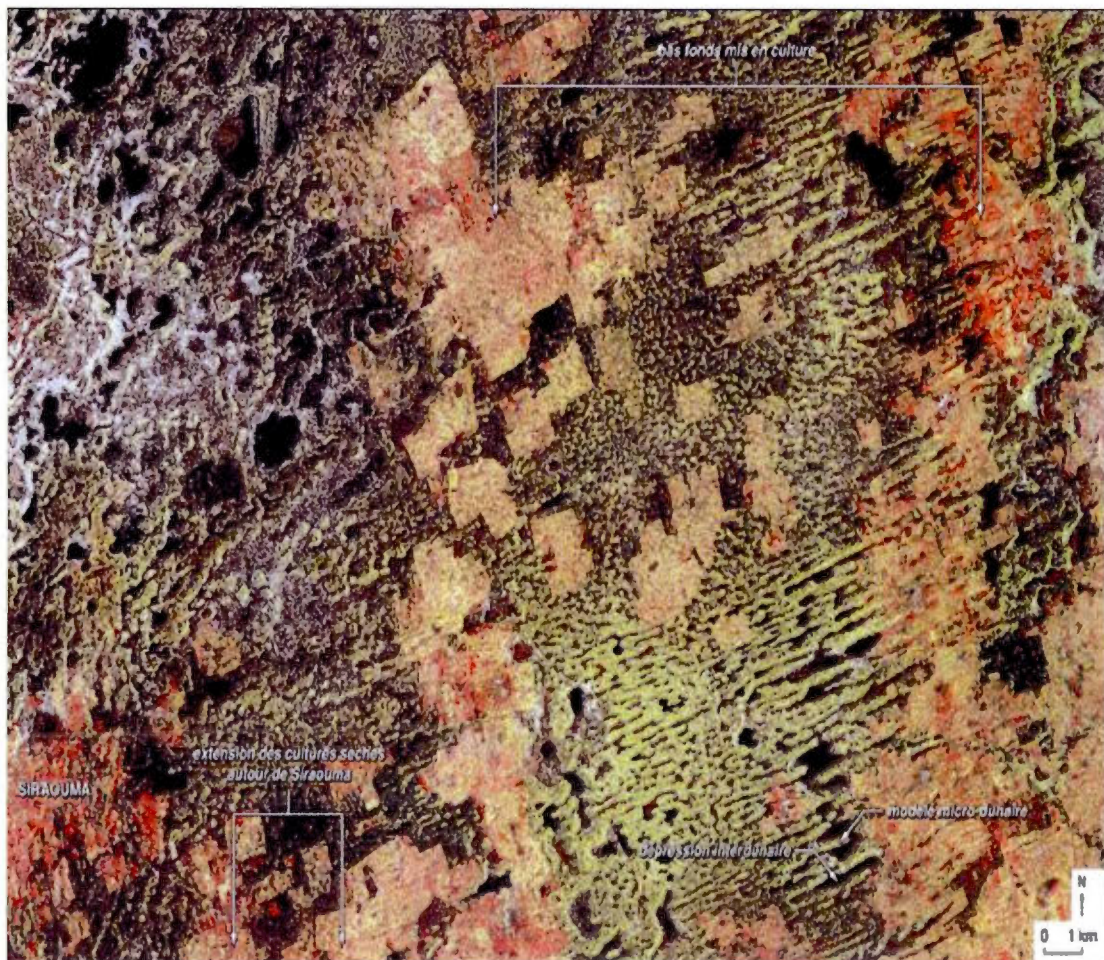
En définitive, nous pensons que le modèle simule des scénarios utiles pour l'aide à la décision et peut servir à envisager d'autres options dans le cadre de recherche future en se référant à l'objectif global que nous nous sommes fixés.

Cependant comme toute œuvre humaine, il est encore perfectible et ouvre la voie à d'autres pistes de recherche que nous espérons poursuivre dans l'intérêt du colonat malien et partout ailleurs en Afrique subsaharienne pour évoluer vers le développement durable qui n'est pas encore une réalité dans la zone d'étude.

La poursuite du travail nous inspire bien ce proverbe arabe qui dit : « *Cherche bien dans le désert de ton malheur, tu finiras par trouver une oasis* ».

ANNEXE A

PHOTO DE LA ZONE EXONDÉE AU NIVEAU DE BOKY WERE



ANNEXE B

LES ÉQUATIONS DES SOUS MODÈLES

Eau

besoin_des_cultures_m3_ha_an = 13500

debit_pluvial_m3_ha_an = 6760

debit_preleve_du_fleuve_m3_an = déficit_hydrique_m3_ha_an*superficie_agricole_ha

déficit_hydrique_m3_ha_an = utilisation_m3_ha_an-debit_pluvial_m3_ha_an

eau_perdue_par_an_m3_an = besoin_des_cultures_m3_ha_an*gaspillage

gaspillage = .55

superficie_agricole_ha = terres_agricoles

utilisation_m3_ha_an = besoin_des_cultures_m3_ha_an*(1+gaspillage)

Évaluation de la qualité de vie et de l'écosystème

debit_maximal = 18000000000

drainage = 0

indice_forêt = foret/2500000

indice_global

14*indice_terres+15*indice_sante+15*indice_forêt+11*indice_parcours+10*indice_qté_de_l'eau

indice_parcours = (1-(1-politique_daménagement)*terres_agricoles/terres_agricoles_max)

indice_qté_de_leau = if(superficie_agricole_ha<superficie_agricole_crit) then 0.5*(1-gaspillage)+0.5*(1-superficie_agricole_ha/superficie_agricole_crit) else

0.5*(1-gaspillage)

indice_sante = (1-((1-drainage)*debit_preleve_du_fleuve_m3_an/debit_maximal))

indice_terres = qualité_des_sols*(2500000-terres_dégradées)/2500000

politique_daménagement = 0

superficie_agricole_crit = 1000000

terres_agricoles_max = 500000

Population totale

population_apres_2005(t) = population_apres_2005(t - dt) + (croissance) * dt

INIT population_apres_2005 = 227000

INFLOWS:

croissance = if (TIME<2005) then 0 ELSE

population_apres_2005*taux_demographique+immigration

population_avant_2005(t) = population_avant_2005(t - dt) + (croissance2) * dt

INIT population_avant_2005 = 5000

INFLOWS:

croissance2 = 3127

immigration = 1000

```
population = IF(TIME<2005) THEN population_avant_2005 ELSE population_apres_2005
taux_demographique = 0.03
```

Revenus

```
coopérative = 0
couts_production = 100.5+intrants
intrants = 29.5*(1+qualité_des_sols)
prix = if (cooperative>0) then prix_marchand
else prix_en_gros
prix_en_gros = 149
prix_marchand = 226
propriete_ha_pp = .5
revenu_exploitant = (prix-couts_production)*propriete_ha_pp*rendements*1000
revenu_par_personne = revenu_total/population
revenu_total = (prix_marchand-couts_production)*terres_agricoles*rendements*1000
```

Utilisation du territoire et agriculture

```
foret(t) = foret(t - dt) + (- deforestation) * dt
```

```
INIT foret = 2500000
```

OUTFLOWS:

```
deforestation = IF (time < 1990) THEN 0.0061*foret
```

```
ELSE IF (time <2000) THEN 0.074*foret
```

```
ELSE 0.037*foret
```

```
terres_agricoles(t) = terres_agricoles(t - dt) + (augmentation_TA) * dt
```

```
INIT terres_agricoles = 0
```

INFLOWS:

```
augmentation_TA = if (terres_agricoles < 1000000) then
```

```
if (time <1965) then 1775.333
```

```
else if (time <1994) then 0
```

```
else if (time<1995) then 192
```

```
else if (time<2000) then 624
```

```
else if (time<2002) then 3863
```

```
else 6000
```

```
else 0
```

```
terres_dégradées(t) = terres_dégradées(t - dt) + (degradation_des_sols) * dt
```

```
INIT terres_dégradées = 0
```

INFLOWS:

```
degradation_des_sols = deforestation-augmentation_TA
```

```
temps = time
```

```
qualité_des_sols = GRAPH (rendements)
```

```
(0.00, 0.995), (1.00, 1.00), (2.00, 1.00), (3.00, 1.00), (4.00, 1.00), (5.00, 1.00), (6.00, 0.9),  
(7.00, 0.8), (8.00, 0.7), (9.00, 0.6), (10.0, 0.505)
```

```
rendements = GRAPH (temps)
```

```
(1935, 1.00), (1945, 1.00), (1955, 1.00), (1965, 1.00), (1975, 1.50), (1985, 2.00), (1995,  
3.00), (2005, 4.00), (2015, 5.00), (2025, 5.50), (2035, 6.00), (2045, 6.50).
```

ANNEXE C

DONNÉES AYANT SERVI À LA SIMULATION DES DIFFÉRENTS SCÉNARIOS

Table des données pour le scénario du Laisser-Faire

Revenu par personne	Coûts production		Indice forêt	Indice terres	Indice parcours	Indice santé	Indice qté eau	Indice global
0	130	1935	1	1	1	1	0,725	62,25
20 971,08	130	1936	0,993914	0,994624	0,996449	0,998603	0,724112	62,01456
30 288,25	130	1937	0,987865	0,989285	0,992899	0,997206	0,723225	61,78019
35 553,57	130	1938	0,981853	0,983983	0,989348	0,995809	0,722337	61,54688
38 938,08	130	1939	0,975877	0,978718	0,985797	0,994412	0,721449	61,31464
41 296,82	130	1940	0,969938	0,973489	0,982247	0,993015	0,720562	61,08346
43 034,75	130	1941	0,964035	0,968296	0,978696	0,991617	0,719674	60,85332
44 368,47	130	1942	0,958168	0,963139	0,975145	0,99022	0,718786	60,62422
45 424,30	130	1943	0,952336	0,958017	0,971595	0,988823	0,717899	60,39616
46 280,90	130	1944	0,94654	0,952931	0,968044	0,987426	0,717011	60,16913
46 989,79	130	1945	0,940779	0,947881	0,964493	0,986029	0,716123	59,94312
47 586,15	130	1946	0,935054	0,942865	0,960943	0,984632	0,715236	59,71813
48 094,81	130	1947	0,929363	0,937885	0,957392	0,983235	0,714348	59,49415
48 533,78	130	1948	0,923707	0,932939	0,953841	0,981838	0,71346	59,27117
48 916,47	130	1949	0,918085	0,928027	0,950291	0,980441	0,712573	59,04919
49 253,05	130	1950	0,912498	0,92315	0,94674	0,979044	0,711685	58,8282
49 551,38	130	1951	0,906944	0,918306	0,943189	0,977647	0,710797	58,6082
49 817,63	130	1952	0,901424	0,913497	0,939639	0,976249	0,70991	58,38918
50 056,71	130	1953	0,895938	0,908721	0,936088	0,974852	0,709022	58,17114
50 272,58	130	1954	0,890485	0,903978	0,932537	0,973455	0,708134	57,95406
50 468,45	130	1955	0,885066	0,899269	0,928987	0,972058	0,707247	57,73794
50 647,00	130	1956	0,879679	0,894592	0,925436	0,970661	0,706359	57,52279
50 810,41	130	1957	0,874326	0,889949	0,921885	0,969264	0,705471	57,30858
50 960,53	130	1958	0,869004	0,885337	0,918335	0,967867	0,704584	57,09531

Table des données pour le scénario du Laisser-Faire (suite 1)

Revenu par personne	Coûts production		Indice forêt	Indice terres	Indice parcours	Indice santé	Indice qté eau	Indice global
51 098,93	130	1959	0,863716	0,880759	0,914784	0,96647	0,703696	56,88299
51 226,92	130	1960	0,858459	0,876212	0,911233	0,965073	0,702808	56,6716
51 345,64	130	1961	0,853234	0,871698	0,907683	0,963676	0,701921	56,46114
51 456,05	130	1962	0,848041	0,867215	0,904132	0,962279	0,701033	56,2516
51 559,00	130	1963	0,84288	0,862764	0,900581	0,960882	0,700145	56,04297
51 655,23	130	1964	0,83775	0,858344	0,897031	0,959484	0,699258	55,83526
51 745,36	130	1965	0,832652	0,853956	0,89348	0,958087	0,69837	55,62845
52 665,93	130	1966	0,827584	0,848888	0,89348	0,958087	0,69837	55,48149
53 531,70	130	1967	0,822548	0,843852	0,89348	0,958087	0,69837	55,33543
54 347,43	130	1968	0,817541	0,838845	0,89348	0,958087	0,69837	55,19025
55 117,33	130	1969	0,812566	0,83387	0,89348	0,958087	0,69837	55,04596
55 845,16	130	1970	0,807621	0,828925	0,89348	0,958087	0,69837	54,90254
56 534,27	130	1971	0,802705	0,824009	0,89348	0,958087	0,69837	54,76
57 187,67	130	1972	0,79782	0,819124	0,89348	0,958087	0,69837	54,61833
57 808,07	130	1973	0,792964	0,814268	0,89348	0,958087	0,69837	54,47752
58 397,92	130	1974	0,788138	0,809442	0,89348	0,958087	0,69837	54,33756
58 959,40	130	1975	0,783342	0,804646	0,89348	0,958087	0,69837	54,19846
59 494,52	130	1976	0,778574	0,799878	0,89348	0,958087	0,69837	54,0602
60 005,09	130	1977	0,773836	0,79514	0,89348	0,958087	0,69837	53,92279
60 492,77	130	1978	0,769126	0,79043	0,89348	0,958087	0,69837	53,78621
60 959,06	130	1979	0,764445	0,785749	0,89348	0,958087	0,69837	53,65046
61 405,33	130	1980	0,759793	0,781097	0,89348	0,958087	0,69837	53,51554
61 832,86	130	1981	0,755169	0,776473	0,89348	0,958087	0,69837	53,38144
62 242,79	130	1982	0,750573	0,771877	0,89348	0,958087	0,69837	53,24815
62 636,19	130	1983	0,746005	0,767309	0,89348	0,958087	0,69837	53,11568
63 014,04	130	1984	0,741464	0,762768	0,89348	0,958087	0,69837	52,98401
63 377,24	130	1985	0,736952	0,758256	0,89348	0,958087	0,69837	52,85315
65 280,94	130	1986	0,732467	0,753771	0,89348	0,958087	0,69837	52,72308
67 113,61	130	1987	0,728009	0,749313	0,89348	0,958087	0,69837	52,5938
68 879,15	130	1988	0,723578	0,744882	0,89348	0,958087	0,69837	52,46531
70 581,17	130	1989	0,719174	0,740478	0,89348	0,958087	0,69837	52,3376
72 223,06	130	1990	0,714797	0,736101	0,89348	0,958087	0,69837	52,21067
73 807,93	130	1991	0,663352	0,684656	0,89348	0,958087	0,69837	50,71876
75 338,71	130	1992	0,61561	0,636914	0,89348	0,958087	0,69837	49,33423
76 818,12	130	1993	0,571303	0,592607	0,89348	0,958087	0,69837	48,04934

Table des données pour le scénario du Laisser-Faire (suite 2)

Revenu par personne	Coûts production		Indice forêt	Indice terres	Indice parcours	Indice santé	Indice qté eau	Indice global
78 248,70	130	1994	0,530186	0,55149	0,89348	0,958087	0,69837	46,85693
79 919,91	130	1995	0,492027	0,513408	0,893096	0,957936	0,698274	45,74396
82 213,34	130	1996	0,456615	0,478246	0,891848	0,957445	0,697962	44,69629
84 494,89	130	1997	0,423752	0,445632	0,8906	0,956954	0,69765	43,72253
86 765,12	130	1998	0,393254	0,415383	0,889352	0,956463	0,697338	42,81737
89 024,53	130	1999	0,36495	0,38733	0,888104	0,955972	0,697026	41,97586
91 273,62	130	2000	0,338684	0,361313	0,886856	0,955481	0,696714	41,19342
98 808,47	130	2001	0,326326	0,3505	0,87913	0,952441	0,694783	40,70676
106 469,41	130	2002	0,314418	0,340137	0,871404	0,949401	0,692851	40,23317
117 833,02	130	2003	0,302945	0,331064	0,859404	0,944679	0,689851	39,70123
129 396,54	130	2004	0,291891	0,32241	0,847404	0,939958	0,686851	39,18142
139 217,75	130	2005	0,28124	0,314159	0,835404	0,935236	0,683851	38,67332
147 53,77	130	2006	0,270977	0,306297	0,823404	0,930514	0,680851	38,17648
156 441,49	130	2007	0,26109	0,298809	0,811404	0,925793	0,677851	37,69051
164 675,98	130	2008	0,251562	0,291682	0,799404	0,921071	0,674851	37,215
172 653,32	130	2009	0,242383	0,284902	0,787404	0,916349	0,671851	36,74957
180 370,47	130	2010	0,233538	0,278458	0,775404	0,911628	0,668851	36,29385
187 825,23	130	2011	0,225017	0,272336	0,763404	0,906906	0,665851	35,8475
195 016,14	130	2012	0,216806	0,266525	0,751404	0,902184	0,662851	35,41016
201 942,43	130	2013	0,208895	0,261014	0,739404	0,897463	0,659851	34,98151
208 603,98	130	2014	0,201272	0,255791	0,727404	0,892741	0,656851	34,56123
215 001,20	130	2015	0,193928	0,250847	0,715404	0,888019	0,653851	34,14902
218 630,64	130,15	2016	0,186851	0,24494	0,703404	0,883298	0,650851	33,72735
221 957,31	130,29	2017	0,180033	0,239335	0,691404	0,878576	0,647851	33,31378
224 993,39	130,44	2018	0,173464	0,234019	0,679404	0,873854	0,644851	32,908
227 750,64	130,59	2019	0,167134	0,22898	0,667404	0,869133	0,641851	32,50968
230 240,41	130,74	2020	0,161035	0,224206	0,655404	0,864411	0,638851	32,11853
232 473,63	130,88	2021	0,155159	0,219684	0,643404	0,859689	0,635851	31,73426
234 460,89	131,03	2022	0,149498	0,215404	0,631404	0,854968	0,632851	31,35659
236 212,39	131,18	2023	0,144042	0,211355	0,619404	0,850246	0,629851	30,98526
237 737,99	131,33	2024	0,138786	0,207527	0,607404	0,845524	0,626851	30,61999
239 047,21	131,47	2025	0,133722	0,203909	0,595404	0,840803	0,623851	30,26056
240 149,26	131,62	2026	0,128843	0,200493	0,583404	0,836081	0,620851	29,90671
241 053,02	131,77	2027	0,124141	0,197269	0,571404	0,831359	0,617851	29,55823
241 767,08	131,92	2028	0,119611	0,194228	0,559404	0,826638	0,614851	29,21488

Table des données pour le scénario du Laisser-Faire (suite 3 et fin)

Revenu par personne	Coûts production		Indice forêt	Indice terres	Indice parcours	Indice santé	Indice qté eau	Indice global
242 299,72	132,07	2029	0,115247	0,191362	0,547404	0,821916	0,611851	28,87647
242 658,98	132,21	2030	0,111041	0,188664	0,535404	0,817194	0,608851	28,54278
242 852,60	132,36	2031	0,10699	0,186124	0,523404	0,812473	0,605851	28,21362
242 888,05	132,51	2032	0,103085	0,183736	0,511404	0,807751	0,602851	27,88881
242 772,58	132,66	2033	0,099324	0,181493	0,499404	0,803029	0,599851	27,56816
242 513,17	132,8	2034	0,0957	0,179388	0,487404	0,798308	0,596851	27,2515
242 116,57	132,95	2035	0,092208	0,177414	0,475404	0,793586	0,593851	26,93866
241 589,30	133,1	2036	0,088843	0,175565	0,463404	0,788864	0,590851	26,62948
240 937,66	133,25	2037	0,085601	0,173835	0,451404	0,784143	0,587851	26,3238
240 167,75	133,39	2038	0,082477	0,172218	0,439404	0,779421	0,584851	26,02149
239 285,43	133,54	2039	0,079468	0,170709	0,427404	0,774699	0,581851	25,72239
238 296,39	133,69	2040	0,076568	0,169301	0,415404	0,769978	0,578851	25,42636
237 206,11	133,84	2041	0,073774	0,167991	0,403404	0,765256	0,575851	25,13329
236 019,89	133,98	2042	0,071082	0,166773	0,391404	0,760534	0,572851	24,84303
234 742,82	134,13	2043	0,068488	0,165643	0,379404	0,755813	0,569851	24,55547
233 379,85	134,28	2044	0,065989	0,164595	0,367404	0,751091	0,566851	24,27049
231 935,74	134,43	Final	0,063581	0,163619	0,355404	0,746369	0,563851	23,98789

Table des données sur le scénario intensif

Revenu par personne	Coûts production		Indice forêt	Indice terres	Indice parcours	Indice santé	Indice qté eau	Indice global
0	130	1935	1	1	1	1	0,725	62,25
20 971,08	130	1936	0,993914	0,994624	0,996449	0,998603	0,724112	62,01456
30 288,25	130	1937	0,987865	0,989285	0,992899	0,997206	0,723225	61,78019
35 553,57	130	1938	0,981853	0,983983	0,989348	0,995809	0,722337	61,54688
38 938,08	130	1939	0,975877	0,978718	0,985797	0,994412	0,721449	61,31464
41 296,82	130	1940	0,969938	0,973489	0,982247	0,993015	0,720562	61,08346
43 034,75	130	1941	0,964035	0,968296	0,978696	0,991617	0,719674	60,85332
44 368,47	130	1942	0,958168	0,963139	0,975145	0,99022	0,718786	60,62422
45 424,30	130	1943	0,952336	0,958017	0,971595	0,988823	0,717899	60,39616
46 280,90	130	1944	0,94654	0,952931	0,968044	0,987426	0,717011	60,16913
46 989,79	130	1945	0,940779	0,947881	0,964493	0,986029	0,716123	59,94312
47 586,15	130	1946	0,935054	0,942865	0,960943	0,984632	0,715236	59,71813
48 094,81	130	1947	0,929363	0,937885	0,957392	0,983235	0,714348	59,49415
48 533,78	130	1948	0,923707	0,932939	0,953841	0,981838	0,71346	59,27117
48 916,47	130	1949	0,918085	0,928027	0,950291	0,980441	0,712573	59,04919
49 253,05	130	1950	0,912498	0,92315	0,94674	0,979044	0,711685	58,8282
49 551,38	130	1951	0,906944	0,918306	0,943189	0,977647	0,710797	58,6082
49 817,63	130	1952	0,901424	0,913497	0,939639	0,976249	0,70991	58,38918
50 056,71	130	1953	0,895938	0,908721	0,936088	0,974852	0,709022	58,17114
50 272,58	130	1954	0,890485	0,903978	0,932537	0,973455	0,708134	57,95406
50 468,45	130	1955	0,885066	0,899269	0,928987	0,972058	0,707247	57,73794
50 647,00	130	1956	0,879679	0,894592	0,925436	0,970661	0,706359	57,52279
50 810,41	130	1957	0,874326	0,889949	0,921885	0,969264	0,705471	57,30858
50 960,53	130	1958	0,869004	0,885337	0,918335	0,967867	0,704584	57,09531
51 098,93	130	1959	0,863716	0,880759	0,914784	0,96647	0,703696	56,88299
51 226,92	130	1960	0,858459	0,876212	0,911233	0,965073	0,702808	56,6716
51 345,64	130	1961	0,853234	0,871698	0,907683	0,963676	0,701921	56,46114
51 456,05	130	1962	0,848041	0,867215	0,904132	0,962279	0,701033	56,2516
51 559,00	130	1963	0,84288	0,862764	0,900581	0,960882	0,700145	56,04297
51 655,23	130	1964	0,83775	0,858344	0,897031	0,959484	0,699258	55,83526
51 745,36	130	1965	0,832652	0,853956	0,89348	0,958087	0,69837	55,62845
52 665,93	130	1966	0,827584	0,848888	0,89348	0,958087	0,69837	55,48149
53 531,70	130	1967	0,822548	0,843852	0,89348	0,958087	0,69837	55,33543
54 347,43	130	1968	0,817541	0,838845	0,89348	0,958087	0,69837	55,19025

Table des données sur le scénario intensif (suite 1)

Revenu par personne	Coûts production		Indice forêt	Indice terres	Indice parcours	Indice santé	Indice qté eau	Indice global
55 117,33	130	1969	0,812566	0,83387	0,89348	0,958087	0,69837	55,04596
55 845,16	130	1970	0,807621	0,828925	0,89348	0,958087	0,69837	54,90254
56 534,27	130	1971	0,802705	0,824009	0,89348	0,958087	0,69837	54,76
57 187,67	130	1972	0,79782	0,819124	0,89348	0,958087	0,69837	54,61833
57 808,07	130	1973	0,792964	0,814268	0,89348	0,958087	0,69837	54,47752
58 397,92	130	1974	0,788138	0,809442	0,89348	0,958087	0,69837	54,33756
58 959,40	130	1975	0,783342	0,804646	0,89348	0,958087	0,69837	54,19846
59 494,52	130	1976	0,778574	0,799878	0,89348	0,958087	0,69837	54,0602
60 005,09	130	1977	0,773836	0,79514	0,89348	0,958087	0,69837	53,92279
60 492,77	130	1978	0,769126	0,79043	0,89348	0,958087	0,69837	53,78621
60 959,06	130	1979	0,764445	0,785749	0,89348	0,958087	0,69837	53,65046
61 405,33	130	1980	0,759793	0,781097	0,89348	0,958087	0,69837	53,51554
61 832,86	130	1981	0,755169	0,776473	0,89348	0,958087	0,69837	53,38144
62 242,79	130	1982	0,750573	0,771877	0,89348	0,958087	0,69837	53,24815
62 636,19	130	1983	0,746005	0,767309	0,89348	0,958087	0,69837	53,11568
63 014,04	130	1984	0,741464	0,762768	0,89348	0,958087	0,69837	52,98401
63 377,24	130	1985	0,736952	0,758256	0,89348	0,958087	0,69837	52,85315
65 280,94	130	1986	0,732467	0,753771	0,89348	0,958087	0,69837	52,72308
67 113,61	130	1987	0,728009	0,749313	0,89348	0,958087	0,69837	52,5938
68 879,15	130	1988	0,723578	0,744882	0,89348	0,958087	0,69837	52,46531
70 581,17	130	1989	0,719174	0,740478	0,89348	0,958087	0,69837	52,3376
72 223,06	130	1990	0,714797	0,736101	0,89348	0,958087	0,69837	52,21067
73 807,93	130	1991	0,663352	0,684656	0,89348	0,958087	0,69837	50,71876
75 338,71	130	1992	0,61561	0,636914	0,89348	0,958087	0,69837	49,33423
76 818,12	130	1993	0,571303	0,592607	0,89348	0,958087	0,69837	48,04934
78 248,70	130	1994	0,530186	0,55149	0,89348	0,958087	0,69837	46,85693
79 919,91	130	1995	0,492027	0,513408	0,893096	0,957936	0,698274	45,74396
82 213,34	130	1996	0,456615	0,478246	0,891848	0,957445	0,697962	44,69629
84 494,89	130	1997	0,423752	0,445632	0,8906	0,956954	0,69765	43,72253
86 765,12	130	1998	0,393254	0,415383	0,889352	0,956463	0,697338	42,81737
89 024,53	130	1999	0,36495	0,38733	0,888104	0,955972	0,697026	41,97586
91 273,62	130	2000	0,338684	0,361313	0,886856	0,955481	0,696714	41,19342
98 808,47	130	2001	0,326326	0,3505	0,87913	0,952441	0,694783	40,70676
106 69,41	130	2002	0,314418	0,340137	0,871404	0,949401	0,692851	40,23317

Table des données sur le scénario intensif (suite 2)

Revenu par personne	Coûts production		Indice forêt	Indice terres	Indice parcours	Indice santé	Indice qté eau	Indice global
117 33,02	130	2003	0,302945	0,331064	0,859404	0,944679	0,689851	39,70123
129 96,54	130	2004	0,291891	0,32241	0,847404	0,939958	0,686851	39,18142
139 17,75	130	2005	0,28124	0,314159	0,835404	0,935236	0,683851	38,67332
147 53,77	130	2006	0,270977	0,306297	0,823404	0,930514	0,680851	38,17648
156 41,49	130	2007	0,26109	0,298809	0,811404	0,925793	0,677851	37,69051
164 75,98	130	2008	0,251562	0,291682	0,799404	0,921071	0,674851	37,215
172 53,32	130	2009	0,242383	0,284902	0,787404	0,916349	0,671851	36,74957
180 70,47	130	2010	0,233538	0,278458	0,775404	0,911628	0,668851	36,29385
187 25,23	130	2011	0,225017	0,272336	0,763404	0,906906	0,665851	35,8475
194 60,27	130	2012	0,215997	0,265717	0,751404	0,902184	0,662851	35,38671
205 72,01	130	2013	0,20734	0,260659	0,733404	0,895102	0,658351	34,8368
216 79,96	130	2014	0,199029	0,255948	0,715404	0,888019	0,653851	34,29695
227 85,91	130	2015	0,191051	0,25157	0,697404	0,880937	0,649351	33,76676
239 59,60	130,49	2016	0,183393	0,243389	0,679404	0,873854	0,644851	33,18811
250 32,45	130,98	2017	0,176042	0,235639	0,661404	0,866772	0,640351	32,62012
261 90,53	131,47	2018	0,168986	0,228295	0,643404	0,859689	0,635851	32,06221
272 22,55	131,97	2019	0,162212	0,221329	0,625404	0,852607	0,631351	31,51385
282 19,67	132,46	2020	0,15571	0,214718	0,607404	0,845524	0,626851	30,97453
292 75,21	132,95	2021	0,149469	0,208439	0,589404	0,838442	0,622351	30,44376
301 84,51	133,44	2022	0,143478	0,202468	0,571404	0,831359	0,617851	29,92107
310 44,65	133,93	2023	0,137727	0,196785	0,553404	0,824277	0,613351	29,40601
318 54,38	134,42	2024	0,132206	0,19137	0,535404	0,817194	0,608851	28,89815
326 13,88	134,91	2025	0,126907	0,186204	0,517404	0,810112	0,604351	28,39709
334 28,48	135,41	2026	0,12182	0,181265	0,499404	0,803029	0,599851	27,90241
341 96,97	135,9	2027	0,116937	0,176539	0,481404	0,795947	0,595351	27,41376
347 23,10	136,39	2028	0,11225	0,172008	0,463404	0,788864	0,590851	26,93079
354 11,56	136,88	2029	0,107751	0,167659	0,445404	0,781782	0,586351	26,45317
359 67,90	137,37	2030	0,103432	0,163474	0,427404	0,774699	0,581851	25,98056
365 98,41	137,87	2031	0,099286	0,159441	0,409404	0,767617	0,577351	25,51267
370 10,06	138,36	2032	0,095306	0,155544	0,391404	0,760534	0,572851	25,04919
374 10,39	138,85	2033	0,091486	0,151772	0,373404	0,753452	0,568351	24,58984
378 07,48	139,34	2034	0,087819	0,148112	0,355404	0,746369	0,563851	24,13436
382 09,84	139,83	2035	0,084299	0,144499	0,337404	0,739287	0,559351	23,68174

Table des données sur le scénario intensif (suite 3 et fin)

Revenu par personne	Coûts production		Indice forêt	Indice terres	Indice parcours	Indice santé	Indice qté eau	Indice global
385 26,36	140,32	2036	0,08092	0,140886	0,319404	0,732204	0,554851	23,23123
388 66,28	140,82	2037	0,077677	0,137273	0,301404	0,725122	0,550351	22,78276
391 39,08	141,31	2038	0,074563	0,13366	0,283404	0,718039	0,545851	22,33624
393 54,52	141,8	2039	0,071574	0,130047	0,265404	0,710957	0,541351	21,89159
395 22,50	142,29	2040	0,068705	0,126434	0,247404	0,703874	0,536851	21,44873
396 53,08	142,78	2041	0,065952	0,122821	0,229404	0,696792	0,532351	21,0076
398 56,44	143,27	2042	0,063308	0,119208	0,211404	0,689709	0,527851	20,56813
398 42,82	143,77	2043	0,06077	0,115595	0,193404	0,682627	0,523351	20,13025
399 22,52	144,26	2044	0,058335	0,111982	0,175404	0,675544	0,518851	19,69389
399 05,83	144,75	Final	0,055996	0,108369	0,157404	0,668462	0,514351	19,259

Table des données sur le scénario du développement durable

Revenu par personne	Coûts de production		Indice foret	Indice terres	Indice parcours	Indice santé	Indice qté eau	Indice global
0	130	1935	1	1	1	1	0,725	62,25
20 971,08	130	1936	0,993914	0,994624	0,996449	0,998603	0,724112	62,01
30 288,25	130	1937	0,987865	0,989285	0,992899	0,997206	0,723225	61,78
35 553,57	130	1938	0,981853	0,983983	0,989348	0,995809	0,722337	61,55
38 938,08	130	1939	0,975877	0,978718	0,985797	0,994412	0,721449	61,31
41 296,82	130	1940	0,969938	0,973489	0,982247	0,993015	0,720562	61,08
43 034,75	130	1941	0,964035	0,968296	0,978696	0,991617	0,719674	60,85
44 368,47	130	1942	0,958168	0,963139	0,975145	0,99022	0,718786	60,62
45 424,30	130	1943	0,952336	0,958017	0,971595	0,988823	0,717899	60,4
46 280,90	130	1944	0,94654	0,952931	0,968044	0,987426	0,717011	60,17
46 989,79	130	1945	0,940779	0,947881	0,964493	0,986029	0,716123	59,94
47 586,15	130	1946	0,935054	0,942865	0,960943	0,984632	0,715236	59,72
48 094,81	130	1947	0,929363	0,937885	0,957392	0,983235	0,714348	59,49
48 533,78	130	1948	0,923707	0,932939	0,953841	0,981838	0,71346	59,27
48 916,47	130	1949	0,918085	0,928027	0,950291	0,980441	0,712573	59,05
49 253,05	130	1950	0,912498	0,92315	0,94674	0,979044	0,711685	58,83
49 551,38	130	1951	0,906944	0,918306	0,943189	0,977647	0,710797	58,61
49 817,63	130	1952	0,901424	0,913497	0,939639	0,976249	0,70991	58,39
50 056,71	130	1953	0,895938	0,908721	0,936088	0,974852	0,709022	58,17
50 272,58	130	1954	0,890485	0,903978	0,932537	0,973455	0,708134	57,95
50 468,45	130	1955	0,885066	0,899269	0,928987	0,972058	0,707247	57,74
50 647,00	130	1956	0,879679	0,894592	0,925436	0,970661	0,706359	57,52
50 810,41	130	1957	0,874326	0,889949	0,921885	0,969264	0,705471	57,31
50 960,53	130	1958	0,869004	0,885337	0,918335	0,967867	0,704584	57,1
51 098,93	130	1959	0,863716	0,880759	0,914784	0,96647	0,703696	56,88
51 226,92	130	1960	0,858459	0,876212	0,911233	0,965073	0,702808	56,67
51 345,64	130	1961	0,853234	0,871698	0,907683	0,963676	0,701921	56,46
51 456,05	130	1962	0,848041	0,867215	0,904132	0,962279	0,701033	56,25
51 559,00	130	1963	0,84288	0,862764	0,900581	0,960882	0,700145	56,04
51 655,23	130	1964	0,83775	0,858344	0,897031	0,959484	0,699258	55,84
51 745,36	130	1965	0,832652	0,853956	0,89348	0,958087	0,69837	55,63
52 665,93	130	1966	0,827584	0,848888	0,89348	0,958087	0,69837	55,48
53 531,70	130	1967	0,822548	0,843852	0,89348	0,958087	0,69837	55,34
54 347,43	130	1968	0,817541	0,838845	0,89348	0,958087	0,69837	55,19

Table des données sur le scénario du développement durable (suite 1)

Revenu par personne	Coûts de production		Indice foret	Indice terres	Indice parcours	Indice santé	Indice qté eau	Indice global
55 117,33	130	1969	0,812566	0,83387	0,89348	0,958087	0,69837	55,05
55 845,16	130	1970	0,807621	0,828925	0,89348	0,958087	0,69837	54,9
56 534,27	130	1971	0,802705	0,824009	0,89348	0,958087	0,69837	54,76
57 187,67	130	1972	0,79782	0,819124	0,89348	0,958087	0,69837	54,62
57 808,07	130	1973	0,792964	0,814268	0,89348	0,958087	0,69837	54,48
58 397,92	130	1974	0,788138	0,809442	0,89348	0,958087	0,69837	54,34
58 959,40	130	1975	0,783342	0,804646	0,89348	0,958087	0,69837	54,2
59 494,52	130	1976	0,778574	0,799878	0,89348	0,958087	0,69837	54,06
60 005,09	130	1977	0,773836	0,79514	0,89348	0,958087	0,69837	53,92
60 492,77	130	1978	0,769126	0,79043	0,89348	0,958087	0,69837	53,79
60 959,06	130	1979	0,764445	0,785749	0,89348	0,958087	0,69837	53,65
61 405,33	130	1980	0,759793	0,781097	0,89348	0,958087	0,69837	53,52
61 832,86	130	1981	0,755169	0,776473	0,89348	0,958087	0,69837	53,38
62 242,79	130	1982	0,750573	0,771877	0,89348	0,958087	0,69837	53,25
62 636,19	130	1983	0,746005	0,767309	0,89348	0,958087	0,69837	53,12
63 014,04	130	1984	0,741464	0,762768	0,89348	0,958087	0,69837	52,98
63 377,24	130	1985	0,736952	0,758256	0,89348	0,958087	0,69837	52,85
65 280,94	130	1986	0,732467	0,753771	0,89348	0,958087	0,69837	52,72
67 113,61	130	1987	0,728009	0,749313	0,89348	0,958087	0,69837	52,59
68 879,15	130	1988	0,723578	0,744882	0,89348	0,958087	0,69837	52,47
70 581,17	130	1989	0,719174	0,740478	0,89348	0,958087	0,69837	52,34
72 223,06	130	1990	0,714797	0,736101	0,89348	0,958087	0,69837	52,21
73 807,93	130	1991	0,663352	0,684656	0,89348	0,958087	0,69837	50,72
75 338,71	130	1992	0,61561	0,636914	0,89348	0,958087	0,69837	49,33
76 818,12	130	1993	0,571303	0,592607	0,89348	0,958087	0,69837	48,05
78 248,70	130	1994	0,530186	0,55149	0,89348	0,958087	0,69837	46,86
79 919,91	130	1995	0,492027	0,513408	0,893096	0,957936	0,698274	45,74
82 213,34	130	1996	0,456615	0,478246	0,891848	0,957445	0,697962	44,7
84 494,89	130	1997	0,423752	0,445632	0,8906	0,956954	0,69765	43,72
86 765,12	130	1998	0,393254	0,415383	0,889352	0,956463	0,697338	42,82
89 024,53	130	1999	0,36495	0,38733	0,888104	0,955972	0,697026	41,98
91 273,62	130	2000	0,338684	0,361313	0,886856	0,955481	0,696714	41,19
98 808,47	130	2001	0,326326	0,3505	0,87913	0,952441	0,694783	40,71
106 69,41	130	2002	0,314418	0,340137	0,871404	0,949401	0,692851	40,23

Table des données sur le scénario du développement durable (suite 2)

Revenu par personne	Coûts de production		Indice foret	Indice terres	Indice parcours	Indice santé	Indice qté eau	Indice global
117 33,02	130	2003	0,302945	0,331064	0,859404	0,944679	0,689851	39,7
129 96,54	130	2004	0,291891	0,32241	0,847404	0,939958	0,686851	39,18
139 17,75	130	2005	0,28124	0,314159	0,835404	0,935236	0,683851	38,67
148 47,05	130	2006	0,270977	0,306297	0,823404	0,930514	0,680851	38,18
157 61,04	130	2007	0,26109	0,298809	0,811404	0,925793	0,677851	37,69
165 53,28	130	2008	0,251562	0,291682	0,799404	0,921071	0,674851	37,21
174 18,31	130	2009	0,242383	0,284902	0,787404	0,916349	0,671851	36,75
182 51,53	130	2010	0,233538	0,278458	0,775404	0,911628	0,668851	36,29
190 49,22	130	2011	0,225017	0,272336	0,763404	0,906906	0,665851	35,85
197 08,37	130	2012	0,216806	0,266525	0,937851	0,965076	0,812851	39,9
204 82,12	130	2013	0,213037	0,264916	0,935151	0,963558	0,810151	39,75
210 33,38	130	2014	0,209333	0,263372	0,932451	0,962041	0,807451	39,59
216 61,63	130	2015	0,205693	0,261893	0,929751	0,960524	0,804751	39,43
222 66,83	130	2016	0,202117	0,260477	0,927051	0,959007	0,802051	39,28
227 49,35	130	2017	0,198603	0,259123	0,924351	0,957489	0,799351	39,13
233 09,94	130	2018	0,195151	0,25783	0,921651	0,955972	0,796651	38,98
238 49,72	130	2019	0,191758	0,256597	0,918951	0,954455	0,793951	38,83
243 70,11	130	2020	0,188424	0,255423	0,916251	0,952938	0,791251	38,69
247 72,85	130	2021	0,185148	0,254307	0,913551	0,95142	0,788551	38,54
252 59,93	130	2022	0,181929	0,253249	0,910851	0,949903	0,785851	38,4
256 33,58	130	2023	0,178766	0,252246	0,908151	0,948386	0,783151	38,26
260 96,26	130	2024	0,175658	0,251298	0,905451	0,946869	0,780451	38,12
264 50,63	130	2025	0,172605	0,250404	0,902751	0,945351	0,777751	37,98
268 99,51	130	2026	0,169604	0,249563	0,900051	0,943834	0,775051	37,85
271 45,90	130	2027	0,166655	0,248774	0,897351	0,942317	0,772351	37,71
274 92,95	130	2028	0,163758	0,248037	0,894651	0,9408	0,769651	37,58
278 43,90	130	2029	0,160911	0,24735	0,891951	0,939282	0,766951	37,45
280 02,15	130	2030	0,158113	0,246712	0,889251	0,937765	0,764251	37,32
283 71,17	130	2031	0,155364	0,246124	0,886551	0,936248	0,761551	37,19
286 54,52	130	2032	0,152663	0,245582	0,883851	0,934731	0,758851	37,06
288 55,85	130	2033	0,150009	0,245088	0,881151	0,933213	0,756151	36,93
290 78,84	130	2034	0,147401	0,24464	0,878451	0,931696	0,753451	36,81
292 27,27	130	2035	0,144838	0,244238	0,875751	0,930179	0,750751	36,69
294 04,91	130	2036	0,14232	0,24388	0,873051	0,928662	0,748051	36,56

Table des données sur le scénario du développement durable (suite 3 et fin)

Revenu par personne	Coûts de production		Indice foret	Indice terres	Indice parcours	Indice santé	Indice qté eau	Indice global
295 15,62	130	2037	0,139846	0,243565	0,870351	0,927144	0,745351	36,44
297 63,24	130	2038	0,137415	0,243294	0,867651	0,925627	0,742651	36,32
298 51,66	130	2039	0,135026	0,243065	0,864951	0,92411	0,739951	36,2
299 84,76	130	2040	0,132678	0,242877	0,862251	0,922593	0,737251	36,09
300 66,45	130	2041	0,130372	0,242731	0,859551	0,921075	0,734551	35,97
301 00,61	130	2042	0,128105	0,242624	0,856851	0,919558	0,731851	35,86
302 91,13	130	2043	0,125878	0,242557	0,854151	0,918041	0,729151	35,74
302 41,88	130	2044	0,123689	0,242529	0,851451	0,916524	0,726451	35,63
303 56,74	130	Final	0,121539	0,242527	0,848751	0,915006	0,723751	35,52

BIBLIOGRAPHIE

- AGEFORE-SOCEPI, 1998. Étude environnementale de la zone de l'Office du Niger, volet bois énergie. Niono, Mali, URDOC, 110 p.
- Al Droubi A., Grondin J.L., Fritz B. et Y. Tardy. 1978. «Calcul des équilibres dans le système $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O-CO}_2$: rappel des conditions de dissolution et de précipitation de la calcite». *Bulletin des Sciences géologiques*. Vol. 4, n° 31, p. 195 - 202.
- Antoine, M. J. 1997. *Bulletin Pédologique de la FAO*, no. 73.
- Aw, D. et A. Diallo. 1996. Recent developments at the Office du Niger, Mali. Presentation at the World Bank Water Seminar, Washington. DC.
- Aw, D. et C. Dejou. 1997. L'Office du Niger: Assurer la sécurité alimentaire pour le Mali. Findings, n°61, Banque Mondiale. En ligne. < <http://www.worldbank.org>.
- Aw, D. et G. Diemer. 2005. Making a large irrigation scheme work. Washington: World bank, 156 p.
- BAD. 2001. Indicateurs sur le genre, la pauvreté et l'environnement sur les pays africains. Banque Africaine de Développement, 306 p.
- Bader, J-C. 1997. «Le soutien de crue mobile dans le fleuve Sénégal à partir du barrage de Manatali». *Hydrological Sciences*. Vol. 6, no 42, p. 815 - 831.
- Baird, M., 1998. «The role of evaluation. In: Mackay, K. (Ed.), Public Sector Performance the Critical Role of Evaluation. World Bank Operations Evaluation Department. Washington DC, p. 7-12.
- Baize, D., Bellanger, L. et Tomassone, R. 2009. Relationships between concentrations of trace metals in wheat grains and soil. *Agronomy for Sustainable Development*, Vol. 29, p. 297-312.
- Balanchandran, M. 1993. *Knowledge-based optimum design*. Coll. «Topics in Engineering», n° 10. Southampton: Computational Mechanics Publications, 165 p.
- Banque africaine de développement. 2008. *Rapport sur le développement en Afrique, 2007. Les ressources naturelles au service du développement durable en Afrique*, Paris, Economica. [http://ariane2.bibl.ulaval.ca/ariane/Rapport sur le développement en Afrique les ressources naturelles au service du développement durable en Afrique /](http://ariane2.bibl.ulaval.ca/ariane/Rapport%20sur%20le%20d%C3%A9veloppement%20en%20Afrique/).
- Barral, J.P., Marlet, S. et N'diaye, M.K. 1996. «Fonctionnement des nappes en relation avec la dégradation des sols à l'Office du Niger. » Bamako-Mali: Coraf, collection PSI-Mali, Travaux et études n°2, 50 p.
- Barrow, C. J. 1991. Land degradation: development and breakdown of terrestrial environments. New York: Cambridge University press, 295 p.
- BECIS. 2000. Évaluation de la salinité sur les sols de l'Office du Niger. 53 p.
- Bélières, J. F., Barret L., Sama Z. C., Kuper, M. 2006. *Organisation et rôle de la profession agricole dans le développement des systèmes irrigués - quelques enseignements tirés du cas de l'Office du Niger au Mali*. In L'avenir de l'agriculture irriguée en Méditerranée. Nouveaux arrangements institutionnels pour une gestion de la demande en eau. Actes du séminaire Wademed, Cahiers, p 6-7. Cirad, Montpellier, France.

- Bélieres, J.F., Keita, I. et. Sidibé, S. 2001. « Gestion du système hydraulique de l'Office du Niger : évolutions et perspectives. » communication Colloque PCSI 22-23 janvier « La gestion des périmètres irrigués collectifs à l'aube du 21^{ème} siècle : enjeux, problèmes, démarches. » Montpellier: Cemagref/Cirad/Ird Agropolis. *Cahiers Agricultures* [en ligne], vol. 20, n° 1-2, 2011 : 144-149, consulté en octobre 2011. URL : <http://dx.doi.org/10.1684/agr.2011.0473>
- Belloncle, G. 1985. *Participation paysanne et aménagements hydro-agricoles: les leçons de cinq expériences africaines*. Paris: Éditions Khartala, 340 p.
- Bennett, R., Wallace, J. et I. Williamson. 2008. «Organising land information for sustainable land administration». *Land Use Policy*, n° 25, p. 126 - 138. En ligne. <www.elsevier.com/locate/landusepol>.
- Benoit, J. R. 1989. LE MALI. Paris: L'Harmattan, 265 p.
- Benslimane, M., Hamimed, A., El Zerey, W., Khaldi, A., Mederbal, K. 2008. Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord. *Vertigo*, vol. 8, n°3.
- Berteau, G. 2007. «Dynamique locale et transformation de l'environnement: le cas de la gestion des conflits fonciers à Mopti au Mali dans un contexte d'adaptation au changement climatique». *Maîtrise en sciences de l'environnement*. Montréal: Université du Québec À Montréal, 107 p.
- Bertrand, R., Keittab, et N'diaye, M.K., 1993. La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sub-sahariennes (cas de l'Office du Niger). *Cahiers de l'agriculture*. 1993- n° 2, p 318-329.
- Bonn, F. et G. Rochon. 1992. *Précis de télédétection. Principes et méthodes*, no 1. Saint Foy: Presses de l'Université du Québec / AUPELF, 485 p.
- Bonnefoy, J.L., Lepage, C. et F. Bousquet. 2000. «Modelling spatial practices and social representations of space using multi-agents». In *Application to simulation to social science*, p. 155-168. Paris: Hermès.
- Bonneval, P., Kuper, M., Tonneau, J-P. 2002. *L'Office du Niger, grenier à riz du Mali*. Succès économique, transitions culturelles et politiques de développement, Paris, Karthala, 251 p.
- Bouaré, S., 1999. *Système des informations sur l'état des ressources naturelles au Mali*, SP/PNAE-CID, Bamako, 40 p.
- Boulain, N. 2004. «Effet des facteurs climatiques et anthropiques dans l'évolution récente des écosystèmes tropicaux : modélisation spatialisée du bilan hydrique d'un petit bassin versant sahélien ». Thèse de doctorat à l'université de paris IV.
- Boschmann, N. 2008. *Ex ante Poverty Impact Assessment : Office du Niger*. Coopération allemande. Berlin. 83 p.
- Briquet J.P., Mahe G., Bamba F., Olivry J.C., 1996. Changements climatiques récents et modifications du régime hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro (Mali). *Iahs Publications*, n° 238, p. 157-166.
- Brondeau, F. 2000. À propos de la gestion du bétail dans le Macina, Office du Niger, Mali. *Sécheresse*, n° 1, Volume 3, p.199-212.
- Brondeau, F. 2001 : Les périmètres irrigués sahéliens à la recherche d'une nécessaire intégration régionale: exemple du Macina (Office du Niger, Mali) : In *Cahiers d'Outre Mer*, vol215.
- Brondeau, F. 2004 : « Les désajustements environnementaux dans la région de l'Office du Niger: évaluation et perspectives ». *Cybergeog*, mars 2004, n° 263.

- Brondeau, F. 2009. « Les désajustements environnementaux dans la région de l'Office du Niger : évaluation et perspectives », *Cybergeo, Environnement, Nature, Paysage*, article 263, mis en ligne le 24 mars 2004, modifié le 14 mai 2009. URL : <http://www.cybergeo.eu/index5006.html>. Consulté le 24 août 2009.
- Brondeau, F. 2009. *Un « grenier pour l'Afrique de l'Ouest » ? Enjeux économiques et perspectives de développement dans les systèmes irrigués de l'Office du Niger (Mali)*. Géocarrefour, vol. 84, [En ligne], p 1-2. <http://geocarrefour.revues.org/index7213.html>.
- Cairo, Egypt, Boundary Surveying TS39.1. En ligne. http://www.fig.net/pub/cairo/papers/ts_39/ts39_01_elfick_etal.pdf. Consulté le 20 octobre 2008.
- Calloz, R. et C. Collet. 2001. Précis de télédétection: traitements numériques d'images de télédétection. Coll. «Précis de télédétection», n° 3. Québec: AUF, 218 - 229 p.
- Campbell, J.B., 2007. Introduction to remote sensing. Guildford press: New York. 626 p.
- Cannon, M.R., Nimick, D. A., Cleasby, T. E., Kinsey, S. M., Lambing, J. H. 2007. Measured and Estimated Sodium Adsorption Ratios for Tongue River and its Tributaries, Montana and Wyoming. Virginia: U.S. Geological Survey, 56 p.
- Carter, G., Knapp, A.K., Anderson, J.E., Hoch, G.A. et M.D. Smith. 2005. «Indicators of plant species richness in AVIRIS spectra of a mesic grassland». *Remote Sensing of environment*, no 98, p. 304 - 316.
- Chalinder, A. 1998. Good Practice Review 6: Temporary Human Settlement Planning for Displaced Populations in Emergencies. (*Analyse 6 sur les bons usages: aménagement de zones d'installation temporaire au profit de personnes déplacées, en cas d'urgence*). Overseas Development Institute/Relief and Rehabilitation Network. Londres.
- Chikhaoui, M., Bonn, F., Bokoye, A.I. et A. Merzouk. 2006. «Comparaison des capteurs ASTER et ETM+ pour la cartographie de la dégradation des sols à l'aide de l'indice LDI». *Canadian journal of remote sensing*. Vol. 32, n°2, p. 74 - 83.
- Chikhaoui, M., Bonn, F., Bokoye, A.I. et A. Merzouk. 2005. «A spectral index for land degradation mapping using ASTER data: application to a semi arid Mediterranean catchment». *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. Vol. 7, p. 140 - 153.
- Chikhaoui, M., Merzouk, A., Lacaze, B. et C. A. Madramootoo. 2010. Étude de la dégradation des sols en milieu semi-aride à l'aide de l'approche neuronale et de données multi sources. *Revue Télédétection*, vol. 9, n° 2, p. 139 – 150.
- Chiralaksanakul, A. et S. Mahadevan. 2007. «Decoupled approach to multidisciplinary design optimization under uncertainty». *Springer science*. vol. 10, no 8, p. 21 - 42.
- CIA World Factbook, 2010. Population du Mali. Site internet : http://www.indexmundi.com/fr/mali/population_profil.html+population+du+mali+2011&ct=clnk. Consulté le 11 mai 2011.
- Condom, N. 2000. «Analyse et modélisation couplée des processus hydro-géochimiques de la salinisation des sols. Application aux sols rizicoles irrigués de l'Office du Niger au Mali». Thèse de Doctorat. Montpellier: École Nationale Agronomique de Montpellier, 240 p.
- Coulibaly, S. 1999. La problématique de la mise en valeur du delta intérieur du Niger. Mémoire, Histoire et Géographie DER Géographie-Université de Bamako, 45 p.

- Coulibaly, T. 1997. L'espace malien: le milieu naturel et le peuplement. Paris: «Éditions des Écrivains associés», 245 p.
- Cracknell, B.E., 2000. Evaluating Development Aid-Issues, Problems and Solutions. SAGE Publications, New Delhi, London, 386p.
- Dabo A., Doucouré B., Koita O., Diallo M., Kouriba B., Klinkert M.Q., Doumbia S. et O. Doumbo. 2000. «Réinfections par schistosoma Haenatobium et mansoni à l'Office du Niger au Mali malgré la prise répétée de praziquantel». *Médecine tropicale*. Vol. 60, n° 4, p. 351 - 355.
- DADR-ON. 1991. Situation des aménagements en zone Office du Niger: période 1987-1990. Étude sectorielle, 77p.
- Dagno K. 2006. *Évaluation des microorganismes fongiques en tant qu'agents de lutte biologique contre Eichhornia crassipes (Martius) Solms-Laubach dans le bassin du fleuve Niger au Mali*. DEA Doc. Sci. agron. Gembloux, Belgique : Gembloux Agricultural University – FUSAGx, 102 p.
- Dagno, K., Lahlali R., Damien, F., Bajji, M. et Jijakli, M. H. 2007. «Synthèse bibliographique : problématique de la jacinthe d'eau, *Eichhornia crassipes*, dans les régions tropicales et subtropicales du monde, notamment son éradication par la lutte biologique au moyen des phytopathogènes», *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, Vol.11, n° 4, p 299-311.
- Dale, P., McLaughlin, J.D., 1999. Land Administration Systems. Oxford University Press, Oxford, 169 p.
- Daniel, S., Abbas, R., et I. P. Williamson. 2004. «Evaluation of land administration systems». *Land use policy*, n° 21, p. 371 - 380. En ligne. <www.elsevier.com/locate/landusepol>.
- Décret 08-348/PRM, 2008. Procédure d'Étude d'impact environnemental et social. Ministère de l'environnement.
- Defourny, P. 1989. Étude dynamique de la végétation ligneuse en région soudano-sahélienne à partir des données Landsat. Photo-interpretation, n° 89, fasc.4.
- Dembélé B., Diarra A. 1997. Projet d'appui à la lutte contre la jacinthe d'eau et autres plantes aquatiques au Mali. Mali. CILSS, Bulletin bimestriel de l'Institut du Sahel. *Sahel IPM*. 13, p. 3-10.
- Desjardins, R. 2000. *La télédétection: perspective analytique*. Paris: ESTEM, 226 p.
- Devineau, J.C. 1986. Impact écologique de la recolonisation des zones libérées par l'onchocercose des vallées burkinabé. Paris: ORSTOM" Vol 2. 151 p.
- Di Gregorio, A. et L.J.M. Jansen. 2000. Land Cover Classification System (LCCS): Classification Concepts and User Manual, FAO. En ligne. <http://www.fao.org/docrep/003/x0596e/x0596e00.htm>. Consulté le 10 mars 2011.
- Diarra, A. 2006. Étude de la mortalité et de la morbidité infanto-juvénile au centre de santé de référence de Niono de 2000 à 2004. Thèse de Doctorat soutenu à la Faculté de Médecine et d'odontostomatologie de l'université de Bamako. 83 p.
- Dingkuhn, M. et A. Sow 1997. Potential yields of irrigated rice in the Sahel. In : Miézan K.M., Wopereis M.C.S., Dingkuhn M., Deckers J., Randolph T.F. (Eds), *Irrigated rice in the Sahel : Prospects for sustainable development*. WARDA, Bouaké, Côte d'Ivoire, p. 361-379.
- Directions in Development, 2005. Making a Large Irrigation Scheme Work. Washington DC: The World Bank: 156 p.

- Djonnewa A., Tarla, F., Havard, M. et Zébazé, I. 2000. Les exploitations agricoles dans les terroirs de référence du Prasac au Cameroun en 1999. Garoua, Cameroun, PRASAC, 35 p.
- DNRFFH, 1995. Rapport annuel sur l'évaluation des ressources forestières au Mali. 115p.
- Doumenge, J-P. 1992. Aménagements hydro-agricoles et santé : peut-on concilier les deux ? Cahiers d'études et de recherches francophones / Santé. Vol. 2, n° 2, p. 85-90.
- Drame, A. 2004. «Les déterminants des investissements directs étrangers au Mali». Maîtrise en sciences économiques. Montréal: Université du Québec À Montréal, 62 p.
- Droubi, A., Fritz B. et Y. Tardy. 1976. «Équilibre entre minéraux et solutions. Programmes de calcul appliqués à la prédiction de la sature des sols et des doses optimales d'irrigation». *Cahier de l'ORSTOM, séries pédologiques*. Vol. 14, n° 1, p. 13 - 38.
- Droubi, A., Grondin, J.L., Fritz, B. et Y. Tardy., 1978. «Calcul des équilibres dans le système $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O-CO}_2$: rappel des conditions de dissolution et de précipitation de la calcite». *Bulletin des Sciences géologiques*. Vol. 4, n° 31, p. 195 - 202.
- Du, X. et W. Chen. 2004. «Sequential optimisization and reliability assessment method for efficient probabilistic design». *J Mech Des*. Vol. 2, n° 126, p. 225- 233.
- Duveiller, G., Defourny, P., Desclée, B. et P. Mayaux. 2008. «Deforestation in Central Africa: Estimates at regional, national and landscape levels by advanced processing of systematically-distributed Landsat extracts». *Remote Sensing of environment*, no 112, p. 1969 - 1981.
- Elfick, M. 2005. Managing a cadastral SDI framework built from boundary dimensions. FIG Working Week 2005. Cairo: Egypt, TS39.1 Boundary Surveying. En ligne. <http://www.fig.net/pub/cairo/papers/ts_39/ts39_01_elfick_et_al.pdf>.
- Encyclopaedia Britannica. 2008. En ligne. go.hrw.com/atlas/norm_hm/mali.htm.
- Enfors, E.I. et L.J. Gordon. 2007. «Analysing resilience in dryland agro-ecosystems: a case study of the Makanya catchment in Tanzania over the past 50 years». *Land Degradation & Development*, n° 18, p. 680 - 696. En ligne. <<http://www.interscience.wiley.com>>.
- Escadafal, R., Belghith, A. Et Ben Moussa H. 1994. *Proceedings of the 6th International Symposium of Physical Measurements and signatures in Remote Sensing*, (du 17 au 24 janvier 1994, Val d'Isère, France CNES ESA publication.).
- Estévez-Torres, T., Le Saux, C. Gosse, A. Lemarchand A. et Bourdoncle, L. Jullien. 2008. Fourier transform to analyse reaction-diffusion dynamics in a microsystem. Pesticides in The Hydrologic System, Vol 3, p. 1-11.
- Ève, F. 2009. Le double paradoxe de la mise en place de politiques agricoles communes en Afrique. Un cas improbable de transfert de politique publique. CEPEL (CNRS-UMR 5112) et (CIRAD-UMR 1110), Montpellier. Pôle Sud, n° 31, 174 p.
- FAO, 1990. An international action program on water and sustainable agricultural development. A strategy for the implementation of the Mar del Plata action of the 1990s. Rome, Italie. <<http://search.fao.org/cached.jsp?idx=0&id=687120&lang=fr&query=ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/amehyag.pdf>>. Consulté le 15 décembre 2007.
- FAO, 1997. «Planification et gestion intégrée des terres». Rome: FAO. En ligne <http://www.fao.org/sd/FRdirect/EPre0029.htm>. Consulté le 27 avril 2007.
- FAO, 2005. Consultation d'experts sur les critères et indicateurs pour l'aménagement durable des forêts. <http://www.fao.org.WDOCREP/MEETTNG/008/J2123F/J2123FI6.htm>. Consulté le 30 décembre 2009.

- FAO. 2001. L'économie de la productivité des sols en Afrique subsaharienne. <http://www.fao.org/DOCREP/003/X8827F/X8827F00.HTM>.
- Farley, J.A. 2004. «Location enabled platform technology: integrated LIS and core enterprise information». GIM International: USA, p.1-3.
- Faurès, J.M. et M. Sonou. 2000. Les aménagements hydro-agricoles: situation actuelle et perspectives, FAO. En ligne.
- Ferrand, N. et G. Deffuant, 1998. *Actes du Colloque Gestion des territoires locaux - connaissances et méthodes pour la décision publique*. Clermont-Ferrand: Cemagref, p.373 - 385.
- Franquin, P. 1984. «Agroclimatologie et agrométéorologie en zone tropicale sèche d'Afrique». *L'Agronomie tropicale*. Vol. 39, n° 4, p. 301 - 307.
- Gong, X. et J-L Weber. 2009. Land Cover and Land Use Classifications in the SEEA Revision. Paper on Fourth Meeting of the UNCEEA. New York. En ligne <http://unstats.un.org/unsd/envaccounting/ceea/meetings/UNCEEA-4-11.pdf>. Consulté le 10 mars 2011.
- Goodchild M., R. Haining and S. Wise, 1992. Integrating GIS and spatial data analysis problems and possibilities. *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 6, n°5, p. 407-423
- Goodwin, N. R., Coops, N.C., Wulder, M.A., Gillanders, S., Schroeder, T.A., Nelson, T. 2008. Estimation of insect infestation dynamics using a temporal sequence of Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 112, p. 3680-3689. En ligne. <www.elsevier.com/locate/rse>.
- Groupe Hydro-Pacte et ECOFOR, 2009. Rapport du projet d'aménagement et de mise en valeur des terres de l'Office du Niger. 111 p.
- Hagner, O. et H. Reese. 2007. «A method for calibrated maximum likelihood classification of forest types». *Remote Sensing of environment*, n° 110, p. 438 - 444. En ligne. <www.elsevier.com/locate/rse>.
- Haidara, Y. 1993. « Étude sur la divagation des animaux dans la zone du Macina. Office du Niger » Niono: URDOC, 60 p.
- Hassane, A., Martin, P. and Reij, C. 2000. Water harvesting, land rehabilitation and household food security in Niger: IFAD's soil and water conservation project in Illela District. Rome: International Fund for Agricultural Development, and Vrije Universiteit Amsterdam.
- Hem, J.D. 1985. «Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water». *US' Geological Survey Water-Supply Paper*, no 2254, p. 264.
- Hervieu, B. 2002. La multifonctionnalité de l'agriculture : genèse et fondements d'une nouvelle approche conceptuelle de l'activité agricole. 8 p. http://www.agronaute.com/dossiers/societe/biblio/multif_hervieu.pdf
- HLPE, 2011. Régimes fonciers et investissements internationaux en agriculture. Rapport du Groupe d'experts de haut niveau sur la sécurité alimentaire et la nutrition, Comité de la sécurité alimentaire mondiale, Rome.
- Hoosbeek, M.R., Stein, A. et R.B. Bryant. 1997. «Mapping soil degradation» *In Methods for assessment of soil degradation*. CRC Press: Boca Raton, Fla. *Advances in soil Science*, p. 407 - 423.

- Houet, T., Laurence, H.-M. et G. Mercier. 2003. « Modélisation du changement d'échelles en télédétection par une méthode neuronale : application à l'étude de l'évolution de l'occupation hivernale des sols en Bretagne », *Cybergeog : European Journal of Geography*, 6èmes Rencontres de Théo Quant, Besançon, France. Articles sélectionnés par Cybergeog, article 271. URL : <http://cybergeog.revues.org/3617>. Consulté le 03 octobre 2011.
- Huq, S., Reid, H. et L. Murray. 2003. *Mainstreaming Adaptation to Climate Change in Least Developed Countries (LDCs)*. Londres: International Institute for Environment and Development, 60 p.
- Hutchinson, C.F., Hermann, S.M., Maukonen, T. et J. Weber. 2005. «The "greening" of the Sahel». *Journal of Arid Environments*, n° 63, p. 535 - 537. En ligne. <<http://www.elsevier.com/locate/jaridenv>>.
- IER, 2005. Étude de faisabilité des projets d'aménagements des périmètres de Phédié et de Sabalibougou. in cooperation with the secretariat HBP/WP.7/200 1/6, Geneva 19-20 November,
- IER.1998. Étude des coûts de production du paddy à l'Office du Niger: résultats partiels. Centre de Recherches Agricoles (CRA) de Ségou.75 p.
- International Resources Group. 2006. Rapport général : processus de diagnostique et d'amendement de la loi d'orientation agricole du Mali. United States Agency for International Development (USAID), Washington DC, 98 p.
- IRAM. 2001. Étude de la définition des grandes orientations de la politique agricole de l'UEMOA. Vol. 1. Paris, 130 p.
- Jacq, C. 1998. *Barrage sur le Nil*, 402 p.
- John, R., Chen J., Lu, N., Guo, K., Liang C., Wei, Y., N., Ma, K. et X. Han. 2008. «Predicting plant diversity based on remote sensing products in the semi-arid region of Inner Mongolia». *Remote Sensing of environment*, n° 112, p. 2018 - 2032.
- Kébé, D. 1994 : Modélisation de l'impact technico-économique de l'introduction de *Stylosanthes hamata* dans les systèmes agraires villageois au Sud-Mali. Proceedings of a regional workshop on the use of *Stylosanthes* in West Africa, 26-31 Oct 1992, Kaduna, Nigeria. International Livestock Centre for Africa, Addis Ababa, Ethiopia. p. 231-246.
- Keddal, H. et J. Y. N'dri. 2007. Impacts de l'intensification agricole sur la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. *Revue HTE* n°138. P 13.
- Keiser, J., Castro, MC, Maltase, M.F., Bos. R, Tanner, M, Singer, B.H. et Utzinger J. 2005. Effect of irrigation and large dams on the burden of malaria on a global and regional scale. *Trop. Med. Hyg*, Vol.72, p. 392-406.
- Keith, P. B. T., Paul G. et S. Samaké. 1990. Évaluation des images TM et SPOT pour le suivi de l'étalement du fleuve Niger (Mali) dans une perspective d'aménagement hydro-agricole. Télédétection et sécheresse. Éd. AUPELF-UREF : Paris. n° 25, p. 273-28.
- Keulen, H. V. 2007. «Quantitative analyses of natural resource management options at different scales». *Agricultural systems*. Vol. 94, n° 3, p. 768 - 783. En ligne. <www.elsevier.com/locate/agsy>.
- Koch, P.N., Wujeck, B., Golovidov, O. et T.W. Simpson. 2002. «Facilitating probabilistic multidisciplinary design optimization using Kriging approximation models». In *9th AIAA/ISSMO symposium on multidisciplinary analysis and optimization*: Atlanta AIAA p 2002 - 5415.

- Konaté, S. 1990. Gestion de l'eau et suivi des activités de l'unité d'entretien dans le secteur du Sahel de l'Office du Niger. 60 p.
- Koné, F., Touré, A. et Zanen, S. 1997. La restructuration de l'Office du Niger. Coopération Néerlandaise, Office du Niger: 154 p.
- Koné, M. M. 2000. «L'échec du développement en Afrique, une responsabilité à partager. le cas du Mali (1960 - 1997)». Maîtrise en Sociologie. Montréal: Université du Québec à Montréal, 160 p.
- Koné, M., Anan, A., Adou, C. Y., Coulibaly, L. et N'Guessan, K. E. 2007. Suivi diachronique par télédétection spatiale de la couverture ligneuse en milieu de savane soudanienne en Côte d'Ivoire. *Revue Télédétection*.
- Koning, N. et S. Eric. 2005. «Environmental crisis or "lie of the land"? The debate on soil degradation in Africa». *Land Use Policy*, no 22, p. 3 - 11. En ligne. <www.elsevier.com/locate/landusepol>.
- Kuper, M. et H. Maïga. 2000. Commercialisation du riz traditionnel dans le delta intérieur du Niger au Mali. Rapports techniques et scientifiques, Etudes n° 13. IRD : Laboratoire des eaux continentales. Bamako, Mali.
- Laaroussi, M. 2006. Maîtrise de l'irrigation pour une gestion durable du périmètre irrigué du tadla. *Revue HTE*, n°133.
- Lahmar, R. Gestion durables des sols africains : Négligence, ignorance, inconscience ou irresponsabilité. La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sud sahariennes. En ligne. http://www.alliance21.org/2003/article.php3?id_article=921. Consulté le 10 mai 2009.
- Lane, M. B. 2006. «The role of planning in achieving indigenous land justice and community goals». *Land use policy*, n° 23, p. 385 - 394. En ligne. <www.elsevier.com/locate/landusepol>.
- Lardon, S., Baron, C., Bommel, P., Bousquet, F., Lepage, C., Lifran, R., Monestiz, P. et P. Reitz. 1998. *Actes du Colloque SMAGET, Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires*. Clermont-Ferrand: Cemagref, p169-185.
- Lavadenz, I., Sanjak, J., Bames, G., Adlington, G., 2002. Concept paper and annexes comparative study of land administration systems. Unpublished report, prepared by the World Bank, January (cited in World Bank, 2003).
- Lemasson, A. 1997. « Mise en place d'une plate-forme de concertation sur le problème de cohabitation riziculture-élevage à l'Office du Niger. » Rapport de mission du 5 au 16 mars 1997. Montpellier: CIRAD-IEMVT, 49 p.
- Leduc, G. et M. Raymond. 2000. *L'évaluation des impacts environnementaux: un outil d'aide à la décision*. Coll. «Éditions Multimondes»: Québec, Canada, 403 p.
- Legay, J.M. 2000. *Les temps de l'environnement*. Paris: Presses Universitaires du Mirail. 547 p.
- Loi d'Orientation Agricole. 2006. DÉCRET N°07-/P-RM Fixant les procédures d'enregistrement et d'immatriculation des exploitations Agricoles familiale et des entreprises Agricoles. Loi n° 06-045 du 05 septembre 2006 portant Loi d'Orientation Agricole au Mali. 22 p.
- Girard, M. C. et C. M. Girard. 2010. Traitement des données de télédétection : environnement et ressources naturelles. Collection Technique et Ingénierie, Dunod. 576 p.

- Magnin, V. 2005. Contribution à l'étude et à l'optimisation de composants optoélectroniques. Thèse de doctorat: Université des Sciences et Technologie de Lille. En ligne. <http://www.polytech-lille.fr/~vmagnin/publis/these.pdf>.
- Maiga, M.A., Diallo, H., et Y.I. Maiga, 1989. «Paludisme en zone irriguée: enquête épidémiologique dans les villages colons de Kolongotomo (Office du Niger au Mali)». *Médecine d'Afrique noire*. Vol. 36, n° 3, p. 206 - 209.
- Maïga, M.A., Sanogo, N., Koné, N. et S Sissoko. 1992. PNCLS – Niger. Étude de facteurs socio-sanitaire et économique pour un meilleur rendement dans les villages colons de l'Office du Niger dans le cadre de la lutte contre la schistosomiase. *Med. Afr. Noire*, Vol. 39, n° 6.
- Malybia, 2009. Rapport d'étude d'impact environnemental et social du projet de mise en valeur de 100 000 ha en zone Office du Niger. 87 p.
- Mama, V. J. et J. Oloukoi. 2003. Évaluation de la précision des traitements analogiques des images satellitaires dans l'étude de la dynamique de l'occupation du sol. *Télédétection*, vol. 3, n° 5, p. 429-441.
- Mariko, D., Kuper A., Kelly V., 1999. La filière riz à l'Office du Niger au Mali : une nouvelle dynamique depuis la dévaluation du FCFA. IER-INSAH, Bamako, Mali, 37 p.
- Marlet, S. et P. Ruelle. 2002. Vers une maîtrise des impacts environnementaux de l'irrigation. Actes de l'acte du PCSI, 28-29 mai. CEMAGREF, CIRAD, IRD. Montpellier: France.
- Mas, J.-F. 2000. «Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement». *Canadian journal of remote sensing*. Vol. 26, n° 4, p. 349-369.
- Mchugh, O.V., Mchugh, A.N., Eloundou-Enyegue, P.M. et T.S. Steenhuis. 2007. «Integrated qualitative assessment of wetland hydrological and land cover changes in a data scarce dry ethiopian highland watershed». *Land Degradation & Development*, n° 18, p. 643 - 658. En ligne. <<http://www.interscience.wiley.com>>
- Mellor, J. 2000. *Faster More Equitable Growth: The Relation between Growth in Agriculture and Poverty Reduction*, Discussion Paper CAER II n° 70, Harvard Institute for International Development, Cambridge, Massachusetts, p. 10, 13 et 29.
- Mendez Del villar P., Sourisseau, J.-M., Diakite, L., 1995. Les premiers effets de la dévaluation sur les filières riz irrigué au Sahel. Le cas du Mali. IER/Cirad, Montpellier, France, 183 p.
- Michel, R. 1981. «Sodium Adsorption ratio et estimation du pouvoir alcalinisant des eaux». *Cahiers de l'ORSTOM, Séries pédologiques*. Vol. 18, n° 2, p. 123 - 128.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. «Ecosystems and human well-being: Desertification Synthesis». Washington D.C., World Resources Institute, UN: 36 p. En ligne. <<http://www.millenniumassessment.org/documents/document.355.aspx.pdf>>.
- Ministère de l'agriculture du Mali. 2004. <http://www.maliagriculture.org/environ/amenagement-hydro.html>. Consulté le 9 janvier 2007.
- Ministère de la santé du Mali. 2002. *Annuaire Statistiques du Système d'information Sanitaire DNSP-DE 1992-2000 et rapports d'activités du Centre National des Immunisations*.
- N'diaye, M.K. et D. Guindo. 1998. Étude et gestion des sols. Vol 5, n°4.
- N'Diaye, M.K., Marlet, S. et M. Dicko, 2002. Étude pédologique dans la zone de Niono à l'Office du Niger. 57 p.

- Nicholas, R., Goodwin, N., Coops, C., Wulder, M. A., Gillanders, S., Todd, A. et T. N. Schroeder. 2008. «Estimation of insect infestation dynamics using a temporal sequence of Landsat data». *Remote Sensing of environment*, n° 112, p. 3680 - 3689.
- Nonguienna, A., Mariko, A., Mahé, G., Orange, D., Royer A. Amani, A. et Servat, E., 2003. Suivi des zones d'inondation du delta intérieur du Niger: perspectives avec les données de basse résolution NOANAVHRR. In: Orange, D., Arfi, R., Kuper, M., Morand, P., Poncet, Y. (Eds.) *Proceedings of the international seminar on Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales*. IRD : Paris, p. 231-244.
- Norad, J. 1999. "The Logical Framework Approach", *Handbook for Objectives-oriented Planning* », 4th edition, 792 p.
- O'Farrell, F., 1997. *Penser la folie, essais sur Michel Foucault*, Paris, Gallilée, coll. « Débats », 195 p.
- Oakley, D.R., Sues, R.H., et G.S. Rhodes. 1998. «Performance optimization of multidisciplinary mechanical systems subject to uncertainties». *Probab Eng Mech*. Vol. 13, n°1, p. 15 -26.
- OCDE, 1997. *Indicateurs environnementaux pour l'agriculture*. Les Éditions de l'OCDE: Paris. 70 p.
- OCDE, 1999. *Indicateurs environnementaux pour l'agriculture, vol.1. Concepts et cadres d'analyse*. Paris: Les Éditions de l'OCDE, 50 p.
- OCDE.1991. *Indicateurs d'environnement: une étude pilote*. Organisation de Coopération et de Développement Économiques. OCDE: Paris.
- OECD, 2010. *Paying for Biodiversity: Enhancing the Cost-Effectiveness of Payments for Ecosystem Services (PES)*. Paris: OCDE. 196 p.
- Office du Niger, 2004. *Présentation de l'Office du Niger*. www.office-du-niger.org.ml. Consulté le 7 mars 2007. Consulté le 10 octobre 2009.
- Office du Niger, 2009. *Bulletin bimensuel d'informations -Info SIGON N° 17 Août-Septembre 2009*. <http://www.office-du-niger.org.ml>. Consulté le 10 octobre 2009.
- Office du Niger, 2011. <http://www.office-du-niger.org.ml/internet/index.php?> Consulté le 8 avril 2012.
- Oldeman, L.R., Hakkeling, R.T.A. et W.G. Sombroek. 1991. *World map of the status of human-induced soil degradation: An explanatory note*. Global assessment of soil degradation (GLASOD). 2e éd. Dd. ISRIC, UNEP.
- Olsson, P., Gunderson, L.H., Carpenter, S.R., Ryan, P., Lebel, L., Folke, C. et C.S. Holling. 2006. «Shooting the rapids: Navigating transitions to adaptive governance of social-ecological systems». *Ecology and Society*, n° 11, p. 1 -18. En ligne. <<http://www.ecologyandsociety.org>>.
- Ominami, C. 1986. *Le Tiers-Monde dans la crise*, Découvertes. Paris, 246 p.
- Onsrud, H. 1999. «Ensuring success in land administration projects in countries in transition.». In *Paper prepared for the first session of the UN-ECE (15-16): Working Party on land Administration*. En ligne. <<http://www.unece.org/env/hs/wpla/s-1999/session1.html>>. Consulté le 2 février 2008.
- Ouloguem, M. 2004. «Impacts de la culture du coton sur l'environnement et la société au Mali». *Maîtrise en sciences de l'environnement*. Montréal: Université du Québec À Montréal, 140 p.

- Ouvry, F., Marlet, S., Tangara, B. et O. Goita. 1999. Suivi de l'irrigation et du drainage : Etude des règles de gestion de l'eau et bilans hydro-salins à l'Office du Niger. (cas de la zone de Niono, Mali). Niono : IER/PSI, 30 p.
- Ozdogan, M. et G. Gutman. 2008. «A new methodology to map irrigated areas using multi-temporal MODIS and ancillary data: An application example in the continental US». *Remote Sensing of environment*, n° 112, p. 3520-3537.
- PAM. 1996. *Le scandale de la faim dans un monde qui regorge d'aliments: l'aide alimentaire a de quoi faire*. Document préparé pour le Sommet mondial de l'alimentation. Rome. Volume 10, n°1, p. 1- 25.
- Parent, C., Spaccapietra, S. et E. Zimanya. 1999. Spatio-temporal conceptual models: data structures. *Advance in GIS*. Kansas City.
- Phillips, L.B., Andrew, J., Hansen, C. et H. Flather. 2008. «Evaluating the species energy relationship with the newest measures of ecosystem energy: NDVI versus MDIS primary production». *Remote Sensing of environment*, n° 112, p. 3538 - 3549.
- Pimental, D., 1986. Plant and animal invasions in agriculture. in Mooney, H. A. and J. Drake, eds., *Ecology of Biological Invasions of North America and Hawaii*. SpringerVerlag, New York, NY. p. 149-162
- Pinstrup, A. et Pandya, L. 2001. *The Unfinished Agenda*, IFPRI. 274 p.
- PIRL, 1991. Synthèse régionale. Phase B. BDPA, SCET, AGRJ, CTFT, SYSAME, 327 p.
- PNAE-Ministère de l'environnement, 1998. Rapport synthèse du PNAE. 177 p.
- PNUD, 2002. Contribution to the implementation of the LOC-III Programme of Action. PNUD-Mali. 47 p.
- PNUD, 2007. Rapport annuel sur le développement humain durable. 2006. New-York: PNUD, 40 p.
- Pontius, Jr.R.G. 2000. Quantification error versus location in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 66, n° 8, p.1011-1016.
- Popper, K. 1997. *Toute vie est résolution de problèmes*. Paris: Actes Sud, 166 p.
- Poussin, J.C., Diallo, Y., Legoupi, J.C. 2005. Gestion collective et productivité des périmètres irrigués villageois. Actes du séminaire Euro Méditerranéen. 22 p.
- Poznyak, A., Bejarano, F. J. et L. Fridman. 2007. «Numerical method for weights adjustment in minimax multi-model LQ-control». *Wiley interscience*. Vol. 10, n° p. 289- 300 En ligne. <www.interscience.wiley.com>.
- Projet climat CNRST, 2003. Étude sur les variations climatiques au Mali et influences su la pluviométrie. 49 p.
- Projet Energie Domestique. 2000. « Schéma Directeur d'Approvisionnement en bois-énergie de Niono, SDA ». Montpellier: SEED, Cirad Forêt, BTG, Afritec, Beagges, 21 p.
- Quinônes, E. et Q. Huang. 2008." Assessment of the stability and unfolding pathways of azurin from *Pseudomonas aeruginosa* through the combination of denaturing osmolytes". *Archives of Biochemistry and Biophysics*, Vol. 477, n° 1, P. 175-182. En ligne.<http://dx.doi.org/10.1016/j.abb.2008.05.003>.
- Ranjeet, J., Chen, J., Lu, N., Guo, K., Liang, C., Wei, Y., Noormets, M., et H. X. Keping, 2008. «Predicting plant diversity based on remote sensing products in the semi-arid region of Inner Mongolia». *Remote Sensing of environment*, no 112, p. 2018 - 2032.
- Rao, P. S. C. et M. A. William,. 1993. 'Pesticides', in W. M. Ailey (ed.), *Regional Groundwaler Quality*, VNR, New York, p. 345-382.

- Ren Liliang, an Ru, Jiang Hongmei, Yuan Fei, Wang Meirong 2004. «Application of remote sensing information about land use - land cover in flood forecasting with the Xin' anjiang model». *Canadian Journal of remote sensing*. vol. 30, no 5, p. 788 - 796.
- Roberto, Z. et M. B. Locatelli., 1999. "Investment in Paintings: A Short-Run Price Index," *Journal of Cultural Economies*, Springer, vol. 23, n°3, p. 209-219.
- Rutherford, B. 2006. «A response-modelling approach to global optimization». *Springer science*, no 7, p. 367 - 384.
- Sabeh, J., Coulibaly, M., Sidibé, A. et Dembélé, S., 2006. Étude sur le suivi environnemental de l'état des ressources naturelles, sols et couvert végétal à l'Office du Niger. 84 p.
- Sangaré Y. et Y.M. Coulibaly. 2002. Complémentarités et antagonismes entre agriculture et élevage en zone de savane irriguée. Du diagnostic à l'intervention dans le contexte de la décentralisation en zone Office du Niger. Niono (Mali), Urdoc, 9 p.
- Sanogo, O., Kergna, A. O., Kébé, D., Kouriba, A. 2003. Viabilité sociale: incidence de la transformation de l'agriculture sur les mouvements migratoires au Mali. Paper prepared for the Roles of Agriculture International Conference 20-22 October, 2003 – Rome, Italy Agricultural and Development Economics Division (ESA) Food and Agriculture Organization of the United Nations. 30 p.
- Schüttrumpf, R. et Bökkers, T. 2008. Analyse du potentiel d'irrigation lors de la saison sèche dans la zone de l'Office du Niger. Office du Niger, Mali, p 41-45.
- Scott, D.W., W.H. Miller and C.E. Griffin, 1993. Parasitic Skin Diseases. In: Muller and Kirk's Small Animal Dermatology, W.B. Saunders, Philadelphia, pp: 423-516.
- Seabrook, L. McAlpine, C. et R. Fensham. 2007. Cattle, crops and clearing: Regional drivers of landscape change in the Brigalow Belt, Queensland, Australia, 1840-2004. *Landscape and Urban Planning*, vol 4, n°78, p. 373-385.
- Sen, A., 1999. Development as freedom. Oxford: Oxford University Press, 386 p.
- Sesnie, S. E., Gessler, P. E., Finegan, B. et T. Sirpa. 2008. «Integrating Landsat TM and SRTM_DEM derived variables with decision trees for habitat classification and change detection in complex neotropical environments». *Remote Sensing of environment*, n° 112, p. 2145 - 2159.
- Seto, K.C., Fleishman E., Fay, J.P., et C.J. Bretus, 2004. «Linking spatial patterns of bird and butterfly species richness with Landsat TM derived NDVI». *International Journal of Remote Sensing*, n° 25, p. 4309 - 4324.
- Singh, A. 1989. «Digital change detection techniques using remotely sensed data». *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 10, n° 6, p. 989-1003.
- Sonneveld, B.G.J.S. et D.L. Dent. 2009. How good is GLASOD? *Journal of Environmental Management* Vol. 90, n° 1, P. 274-283. En ligne. Elsevier Science direct.
- Sow, H. 1990. Énergie bois au Sahel. « coll. Économie et développement. » Paris. 170 p.
- Sposito, G. et S.V. Mattigold. 1977. «On the chemical foundation of the sodium adsorption ratio.». *American journal of Soil Sciences*. Vol. 41, p. 323 - 329.
- Steudler, D., Rajabifard, A. et Ian P. Williamson, I. 2004. «Evaluation of land administration systems». *Land use policy*, no 21, p. 371 - 380. En ligne. <www.elsevier.com/locate/landusepol>.
- Tanji, K.K. 1990. Nature and extent of agricultural salinity. In KK Tanji (éd.) *Agricultural salinity assessment and management*. New York: ASCE, p1-17.

- Tomppo, E., Olsson, H., Göran, S., Mats, N., Hagner, O. et K. Matti. 2008. «Combining national forest inventory field plots and remote sensing data for forest databases». *Remote Sensing of environment*, n° 112, p. 1982 - 1999.
- Torre A., Melot, M., Bossuet, B., Cadoret, A., Caron A., Darly, S., Jeanneaux, Ph., Kirat, T., Pham, H.V. 2010. « Comment évaluer et mesurer la conflictualité liée aux usages de l'espace ? Eléments de méthode et de repérage », *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, Vol. 10, n° 1 [En ligne]. <http://vertigo.revues.org/9590>.
- Touré, A., Koné, N., et S. Zanen. 1997. Étude sur la restructuration de l'Office du Niger. 186 p.
- Toutin, C. C. 2008. «Tutoriel: Notions fondamentales de télédétection». Ressources naturelles Canada. En ligne.
<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_f.php>. Date. Consulté le 12 janvier 2008.
- Traoré, F. 1998. « Étude environnementale de la zone de l'Office du Niger, volet bois énergie » Niono: URDOC, 110 p.
- Traoré, M. S. 1998. Étude environnementale de la zone de l'Office du Niger : Aspects liés à la santé humaine. INRSP - Bamako. 46 p.
- Traoré, M., Landouré A., Diarra, A., Kanté, B., Sacko M., Coulibaly, G., Sangho, A., et Y. Simaga. 2006. La diversité écoclimatique et l'épidémiologie des schistosomiasés au Mali: implications pour un programme de contrôle. Genève: OMS/AFRO, 7 p.
- Traoré, HT. 2006. *Un problème environnemental transformé en source de revenus, cas de la jacinthe d'eau douce en compost chez des jardiniers de Jarela, Bamako, Mali* [en ligne]. Afrique-Gouvernance 2006. Disponible sur <<http://www.afrique-gouvernance.net/fiches/dhp/fiche-dhp-188.html>>. Consulté le 4/06/2006.
- Troy, B. 2010. *Office du Niger : quelles réalités entre accaparement des terres et développement agricole ?* Fondation pour l'Agriculture et la Ruralité dans le Monde. 96 p.
- Turner, W., Spector, S., Gardiner, N., Fladeland, M., Sterling, E., Steninger, M. 2003. «Trends in Ecology and Evolution». *Remote Sensing of environment*, n° 10, p. 23 - 32.
- UN-ECE, 2000 . Land Administration Reviews. Note prepared by Mr. P. Creuzer (Germany) (http://www.unece.org/env/documents/2001/hbp/wp7/hbp_wp7.200_1.6.c.pdr). Consulté le 10 octobre 2002.
- UNESCO, 2007. Rapport du Mali. www.ibe.unesco.org/International/ICE47/English/.../mali.pdf. Consulté le 26 octobre 2006.
- United Nations, 1999. Indicateurs du développement durable. Structure générale et aspects méthodologiques. New York: Nations Unies. 443 p.
- Van Paasen, A., Van, K.H., Roetter, R.P. et C.T. Hoanh. 2006. «Can computer models stimulate learning about sustainable land use? Experience with LUPAS in the humid sub-tropics of Asia». *Agricultural systems*. vol. 94, no 3, p. 874-887. En ligne. <www.elsevier.com/locate/agsy>.
- Van, B., et B. Van. 1973. «The alkalinity of soils». *journal of soil sciences*. Vol. 1, n° 24, p. 129 - 136.
- Vandersypen, K., Raes, D. et J.Y., Jamin. 2009. «Simulating Water Management and Supply Effects at the Office du Niger Collective Canal Irrigation Scheme». *Journal of Irrigation and Drain*. Volume 135, n°1, p. 50-57.

- Vilain, L. 2003. *La méthode IDEA : indicateurs de durabilité des exploitations agricoles*. Dijon: « Educagri Editions », 151 p.
- Von Braun, J., Teklu, T. et Webb, P. 1991. *Labor-intensive public works for food security: experience in Africa*. Working papers on Food Subsidies n°. 6. IFPRI, Washington. 40 p.
- Waring, R.H., Coops, N.C., Fan, W. et J.M. Nightingale. 2006. «MODIS enhanced vegetation index predicts tree species richness across forested ecorégions in the contiguous USA». *Remote Sensing of environment*, n° 103, p. 218 - 226.
- Weaver, A., Chonguica, E., Rukato, H. et P. Tarr. 2003. «NEPAD and environmental assessment». *AJEAM-RAGEE*. Vol. 7, p. 1-13. En ligne. <<http://www.ajeam-ragee.org/>>.
- Weber, B., Olehowski, C., Knerr, T., Hill, J., Deutschewitz, K., Wessels, D.C.J., Eitel, B. et B. Büdel. 2008. «A news approach gfor mapping of Biological Soil crust in Semidesert areas with hyperspectral imagery». *Remote Sensing of environment*, n° 112, p. 2187 - 2201.
- WHO. 2007. Core Health Indicators. http://apps.who.int/whosis/database/core/core_select_process.cfm?country=ml i&indicators=healthpersonnel. Consulté le 8 septembre 2009.
- Williams, C., William, L., Hargrove, Liebman, W. et D. James. 2008. «Agro-ecoregionalization of Iowa using multivariate geographical clustering». *Agriculture Ecosystems & Environment*, n° 123, p. 161 - 174. En ligne. <www.elsevier.com/locate/agee>.
- Wulder, M. A., White, J. C., Luther, J. E., Strickland, G., Tarmo, K. et W.M. Scott. 2006. «Use of vector polygons for the accuracy assessment of pixel-based land cover maps». *Canadian journal of remote sensing*. Vol. 32, n° 3, p. 268 - 279. www.ibe.unesco.org/International/ICE47/English/.../mali.pdf. Consulté le 26 octobre 2008.
- Xavier, M. et C. Tribes. 2006. «Variable-fidelity optimization: Efficiency and robustness». *Springer science*. Vol. 10, n° 7, p. 479 - 500.
- Zantman, A. 1990. *Le Tiers-Monde: les Stratégies de développement à l'épreuve des faits*. Paris:Hatier, 391 p.
- Zimmermann, W. 2001. «FIG co-operation with UN organisations and other international agencies- the approach of the German agency for technical co-operation GTZ.». In *Proceedings to "New Technology for a New century"* (8-10 May): FIG working. En ligne. <<http://www.fig.net/figtree/pub/proceedings/Korea/full-papers/plenary2/zimmermann.htm>>. Consulté le 2 février 2008.