



HAL
open science

Conséquences du développement des cultures de contre-saison sur l'irrigation et la dynamique de la nappe phréatique à l'Office du Niger (Mali).

Bréhima Tangara

► To cite this version:

Bréhima Tangara. Conséquences du développement des cultures de contre-saison sur l'irrigation et la dynamique de la nappe phréatique à l'Office du Niger (Mali).. Milieux et Changements globaux. Université de Bamako, 2011. Français. NNT : . tel-00862014

HAL Id: tel-00862014

<https://theses.hal.science/tel-00862014>

Submitted on 15 Sep 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNIVERSITE DE BAMAKO

MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

INSTITUT SUPERIEUR DE FORMATION ET DE RECHERCHE APPLIQUEE (ISFRA)

N° d'ordre / / / / / / /

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'INSTITUT SUPERIEUR DE FORMATION ET DE RECHERCHE

APPLIQUEE

SPECIALITE : Développement Rural

Présentée et soutenue publiquement par

Bréhima TANGARA

Sous la direction du Professeur Amadou Zanga TRAORE, UFAE, ENI et Bruno LIDON, Chargé
de mission CIRAD, UMR-G EAU.

**CONSEQUENCES DU DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON SUR L'IRRIGATION ET
LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE A L'OFFICE DU NIGER (MALI)**

Soutenue le 15 Novembre 2011 à 10h 00 mn

à l'ISFRA

Devant le Jury composé de :

| | |
|----------------------------|-----------------------|
| Dr Mamadou Kabirou N'DIAYE | Président |
| Dr Fatogoma BAMBA | Examineur |
| Dr Hamadoun Bokar MAIGA | Rapporteur |
| Pr Amadou Zanga TRAORE | Directeur de thèse |
| Dr Bruno LIDON | Co-Directeur de thèse |

DEDICACE

*A M^{me} TANGARA Mariam DIAOU, pour sa
patience et son soutien moral.*

A mes enfants : Boubou, Baya et Alimatou.

REMERCIEMENTS

Ces travaux qui font l'objet de cette thèse ont été réalisés grâce aux financements du Service de Coopération et d'Actions Culturelles (SCAC) de l'Ambassade de France au Mali à travers les conventions de Fonds de Solidarité Prioritaire (FSP) Recherche agricole Malienne et d'Echel-Eau.

Inscrit à l'Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée (ISFRA) de l'Université de Bamako, sous l'encadrement du Professeur Amadou Zanga TRAORE de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs (ENI) et de Bruno LIDON du Centre de Coopération International en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD), les travaux ont été effectués au sein de deux structures de recherche, l'Institut d'Economie Rural (IER) au sein d'une vaillante équipe pluridisciplinaire qu'est le PSI/CORAF-Mali et le Cirad à Montpellier au sein de l'équipe UMR-GEAU. Que les autorités de ces structures de recherches trouvent ici leurs sincères remerciements.

Je tiens à remercier particulièrement monsieur Bino TEME, Directeur Général de l'IER et son adjoint monsieur Boureima DEMBELE qui ont accordé une attention particulière à la formation des chercheurs de cette structure qu'est l'IER au service du développement rural au Mali.

Que monsieur le Professeur Amadou Zanga TRAORE, soit vivement remercié d'une part pour m'avoir formé et guidé mes premiers pas dans le domaine de la science de l'ingénierie des eaux souterraines, et d'autre part, pour avoir accepté, malgré ses multitudes préoccupations, de bien vouloir diriger cette thèse. D'une très grande vigilance, son soutien constant, sa rigueur dans le travail et sa disponibilité pour le suivi de toutes les phases des travaux menés ont été pour moi une aide précieuse me permettant d'être dans le temps imparti.

Je voudrais ensuite accorder une attention toute particulière à monsieur Bruno LIDON, le père fondateur de cette thèse, pour avoir toujours été présent et attentif à mes problèmes, pour avoir effectué un suivi constant de mes résultats expérimentaux et pour l'aide qu'il a apporté dans l'interprétation de ces résultats et mes divers travaux de rédaction, me permettant de mener à terme ce travail de recherche. Sa clairvoyance scientifique, son dynamisme, sa disponibilité constante, ses qualités humaines et l'accueil africain de son épouse, m'ont été très utiles et ont contribué à mener à bien ce travail en me

faisant bénéficiaire de ses compétences et de sa grande expérience, qui justifie la qualité de ce travail. Qu'il trouve ici toute ma sympathie et ma reconnaissance.

Mes remerciements vont aussi à monsieur Florent MARAUX de UMR_GEAU du Cirad de Montpellier, également co-encadreur de cette thèse, qui malgré ses nombreuses activités, n'a pas hésité à diriger ce travail en absence ou en présence de son collègue LIDON. Qu'il veuille accepter le témoignage de ma profonde gratitude.

Je tiens à remercier monsieur Mamadou Kabirou N'DIAYE, Directeur de recherche, Coordinateur Scientifique à l'IER, Consultant à AfricaRice, qui m'a appris les tous premiers pas dans le domaine de la recherche agronomique, et qui n'a ménagé aucun effort et a mis tout en œuvre pour assurer ma formation tout au long de ma carrière. Malgré ses multiples préoccupations, il a accepté d'être mon Parrain, d'être un des rapporteurs de cette thèse et a accepté de bien vouloir me faire l'honneur de présider ce jury. Ses connaissances, son savoir faire, sa rigueur dans le travail, son humanisme, ont largement contribué à assurer sereinement ma formation.

Je remercie monsieur Patrick BISSON d'Agropolis et du Cirad de Montpellier pour avoir accepté mon dossier à la candidature des projets Echel-Eau et toujours facilité avec bienveillance l'appui à mes travaux. Sans ce financement complémentaire, je n'aurais pas pu finaliser ce travail, ni de bénéficier de cette formation importante sur la rédaction scientifique en anglais. Que monsieur BISSON trouve ici ma chaleureuse gratitude et qu'il soit assuré de ma sincère amitié.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur le professeur Hama Yacouba MAIGA, Directeur Adjoint des 2iE (Institut Internationale pour l'Environnement et l'Eau) de me faire l'honneur de juger ce travail et d'en être un des rapporteurs. Qu'il soit ici remercié pour sa compétence sans faille et ses judicieux conseils.

Que Messieurs Fatogoma BAMBA, et Hamadoun Bokar MAIGA, tous Maîtres de Conférence au département de Géologie de l'ENI/ABT (Ecole Nationale d'Ingénieurs /Abdramane Baba TOURE) qui, malgré leurs nombreuses occupations, m'ont fait le plaisir de siéger au jury de cette thèse, respectivement en tant qu'examineur et rapporteur de cette thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma gratitude et ma reconnaissance.

J'associe à mes remerciements tous les membres des départements UMR G-EAU du Cirad, qui ont su créer une ambiance cordiale et amicale durant tous mes séjours en France pour la réalisation de ce travail. A ce propos, je tiens à remercier plus particulièrement

Monsieur Jean Yves JAMIN, Directeur adjoint de l'UMR G-EAU, de m'avoir accepté dans l'unité et pour toute l'aide qu'il m'a apportée dans la réalisation de ces travaux.

Je remercie également avec un intérêt particulier, tout le personnel de l'équipe ESPGRN-Niono et particulièrement celui du projet FSP/PSI du Mali. Pour ce faire, mes remerciements vont à Monsieur Dr Minamba BAGAYOKO, Coordinateur National FSP/PSI-Mali et Chef ESPGRN de Niono, à Dr Mohamed DICKO qui m'a initié aux travaux de terrain sur les aménagements hydro-agricoles de l'Office du Niger, à mon technicien confirmé, monsieur Brahim TRAORE sans lequel mes résultats n'auraient aucun sens, aux autres techniciens du projet notamment Seydou CISSE, ATA, Fouraba DOUMBIA, Makan SISSOKO et Moussa GUINDO tous agents techniques de terrain, Yacouba TRAORE, Chauffeur, qu'ils trouvent ici leurs sincères remerciements.

J'adresse mes sincères remerciements à mon oncle Siaka DEMBELE et à toute la famille DEMBELE pour leurs soutiens matériels et moraux.

Enfin, je ne saurais terminer ces remerciements sans rendre un vibrant hommage à un de nos éminents chercheurs arraché à notre affection un certain 14 juin 2008, je nomme Dr Doré GUINDO, Directeur du Centre Régional de Recherche Agronomique de Sotuba. Celui là même, malgré ses multiples préoccupations (conciliant ses travaux de recherche et d'administration), a toujours œuvré pour la bonne marche de cette thèse en siégeant en son temps à tous mes comités de thèse. Que Madame GUINDO, ses enfants et proches trouvent ici l'expression de toute ma reconnaissance.

RESUME

« Conséquences du développement des cultures de contre-saison sur l'irrigation et la dynamique de la nappe phréatique à l'Office du Niger (Mali) ».

Ces 10 dernières années ont été marquée à l'Office du Niger par une augmentation spectaculaire des superficies aménagées et cultivées en contre-saison qui ont engendré un accroissement de la demande en eau en période d'étiage du fleuve. Du fait des caractéristiques structurelles du réseau et de pratiques de gestion peu performantes induisant des pertes substantielles d'eau par infiltration, la nappe phréatique est aujourd'hui quasi sub-affleurante avec toutes ses conséquences néfastes sur les facteurs de productions. L'objectif de ce travail est de mieux comprendre et de quantifier les dynamiques engendrées par les cultures de contre-saison, auxquelles il est communément reproché d'être sur-consommatrices de la ressource en eau et de favoriser des conditions favorables à la dégradation de sols par alcalinisation.

Traduit en termes scientifiques, l'objectif est de développer un modèle permettant d'évaluer l'impact des modes de gestion des cultures de contre-saison sur les performances de l'irrigation et sur la dynamique de la nappe phréatique. La démarche a consisté à collecter et analyser les données secondaires disponibles, mettre en place un dispositif d'enquête et de suivis de terrain sur la base desquels a été développée une modélisation des performances de l'irrigation et de la dynamique d'évolution des caractéristiques la nappe phréatique.

L'analyse des données secondaires descriptives de l'évolution des systèmes de culture de contre saison à l'Office du Niger montre un accroissement notoire des superficies cultivées en contre-saison induisant une disparition du schéma de mise en valeur initialement prévu lors de la conception des aménagements. La recherche d'amélioration de leur autosuffisance alimentaire et de leurs revenus, sont les principaux déterminants de cette évolution des pratiques. Les données secondaires descriptives de la gestion de l'eau montrent que si cette dynamique a eu pour conséquence une augmentation importante du taux de prélèvement des eaux du fleuve Niger, elle a induit une réduction de moitié des

apports par hectare cultivés en contre saison sous l'effet d'une amélioration de l'efficacité de transport qui structurellement tend à s'améliorer en fonction de l'accroissement des superficies irriguées.

Les résultats des études de terrain montrent qu'à l'échelle d'un arroseur cultivé en riz, le type de sol est le principal facteur explicatif de la variabilité des apports d'eau (en moyenne 15 000 m³/ha). L'efficacité moyenne de l'irrigation de l'arroseur à la parcelle, bien que meilleure qu'en hivernage, reste faible (65%) ; elle croît au cours du cycle de 20 à 85% avec le taux de repiquage. Si les pertes dans le réseau de drainage restent généralement faibles (12%), les épandages systématiques d'eau sur les surfaces non encore repiquées en début de campagne sont la principale cause explicative de la valeur de l'efficacité de l'irrigation et représentent de l'ordre 25% de la lame d'eau contribuant à la recharge de la nappe phréatique par hectare rizicultivé (200 mm). Leur réduction par une meilleure maîtrise de l'irrigation diminuerait d'autant contribution de la riziculture de contre-saison au soutien de la nappe. La situation du maraîchage est beaucoup plus critique : les apports par hectares en tête de partiteur (14 500 m³/ha) ne sont pas statistiquement différents de ceux du riz alors que les besoins en eau sont deux fois plus faibles.

L'analyse des données du suivi de la nappe entre 1995 et 2006 à l'échelle du Kala inférieur confirme la continuité entre nappe de surface, alluviale et continentale et montre que le niveau moyen piézométrique de la nappe à l'aplomb des périmètres du Kala inférieur, augmentation de son volume et sommes des surfaces cultivées en saison des pluies et saison sèche sont significativement corrélés malgré la décroissance graduelle du niveau piézométrique de la nappe à mesure qu'on s'éloigne des périmètres.

Ces constatations ont permis de modéliser, sur la base d'un bilan en eau, l'impact combiné des cultures de contre-saison et d'hivernage sur la dynamique de la nappe phréatique. Cette modélisation tend à montrer que les cultures de contre saison n'expliqueraient que de l'ordre de 25% de l'augmentation du volume de la nappe entre 2001 et 2006; le reste est à attribuer à l'irrigation des cultures d'hivernage. Cette remontée de la nappe et la continuité entre nappe de surface et nappe régionale confirmée tendent à diminuer la drainabilité naturelle des zones cultivées particulièrement en contre saison et contribuent à expliquer le faible battement de la nappe dans ces zones entraînant un engorgement pratiquement continu des sols qui contraint les conditions d'exploitation et augmente les risques d'apparition de phénomène d'alcalinisation.

Compte tenu des approches utilisées basées sur des bilans d'eau et des hypothèses de représentativité supposées, les processus biophysiques des tendances que cette étude a permis d'identifier, mériteraient d'être confirmés. La poursuite de campagnes périodiques de suivi de la nappe, une caractérisation de ses propriétés hydrodynamiques ainsi que le développement de la modélisation hydrogéologique de son fonctionnement devraient être envisagés face aux enjeux qu'elle représente en termes de contraintes à la mise en valeur agricole et de risques environnementaux mais aussi de possible exploitation des ressources en eau souterraines pour la double culture.

Mots clés

Culture de contre saison, dynamique, gestion de l'eau, isopièze, modélisation, nappe, Office du Niger, riziculture, transect.

ABSTRACT :

« Effect of dry season cropping development on irrigation performance and groundwater table fluctuation in Office du Niger »

During the last 10 years, the surface area cropped during dry season has considerably increased in Office du Niger while new irrigated areas were equipped. It noticeably increased irrigation water requirement especially during low water period of Niger River. These new operational conditions combined with the poor network design and the weak irrigation management increased the amount of water losses that are percolating towards water table. That consequently contributes to produce the current shallow water table, which is endangering agriculture development. The research goal aims at better characterizing and quantifying conditions of dry season cropping system development which is commonly considered to create high water losses and soil degradation conditions.

The scientific purpose of the research aim at modeling the hydraulic system in order to assess the inter-annual impact of dry season cropping system development on irrigation performance and ground water table behavior.

The developed approach consisted in (i) collecting and analyzing available secondary data, (ii) conducting on site survey and, (iii) setting up a monitoring device so as to get data necessary to a modeling process able to assess irrigation performance and to predict the increase of the ground water table.

The socio economic secondary data analysis shows a significant increase of surface areas cropped during dry season that led to remove the initially designed land use. It brings farmers by developing these new farming practices endeavor to improve their household food self sufficiency and incomes.

The Water management monitoring data analysis shows that dry season cropping development has increased water withdrawal rate from Niger River but conversely has cut the gross water requirement of the irrigated area by half because of the improvement of water conveyance efficiency as the cropped surface area is increasing.

The monitoring of a sample of irrigation canals supplying rice fields show that the soil type of the fields is the main explanatory factor of the variability of their water intake (mean value

15 000 m³/ha). During dry season the irrigation efficiency at irrigation and plot levels is higher than during rainy season although it remains weak (65%); it improves during the cropping period from 20 à 85% as rice transplanting is implemented.

Water losses conveyed by the drainage network are commonly low during dry season. At irrigation canal/plot scale, the weak irrigation efficiency is mainly caused by an over irrigation of the field before transplanting. In case of an irrigation canal supplying rice fields, these water losses provide around 25% of the amount water (200 mm), which percolates towards the groundwater table. Improved irrigation practices should reduce the ground water recharge due to rice cropping during dry season.

Irrigation performances of market gardening are much weaker: the mean volume of water supplied per hectare at tertiary canal intake (14 500 m³/ha). This value is not statistically dissimilar to the rice one although rice water requirement is twice as high.

The monitoring data (Kala inférieur) of the regional ground water level between 1995 and 2006 confirm the connection between the surface water table and the alluvial/continental one. It also demonstrate significant relationships between the increase of the water table volume, the surface area cropped during dry and rainy season and, the groundwater level under the irrigated area in spite of it decreases outside the irrigated area.

These observations have allowed to develop groundwater modeling based on water balance likely to predict the volume of the alluvial/continental water table in proportion to the combined effect of the surface area cropped during dry and rainy season. The outputs of the simulation show that dry season irrigation supplies only 25% of the increase of the regional groundwater table volume between 2001 and 2006; the major part of it has to be ascribed to the rainy season cropping.

The increased volume of the regional groundwater table and its connection with the surface one decrease the natural drainability of the cropped areas mostly during the dry season. It causes the low fluctuation of the phreatic level and results in a quasi continuous water logging of the plot soil, which restrains agricultural potentialities and increases the risk of soil alkalinization. Considering the approach based on a simplified water balance of the water table and representativeness assumptions, the identified explanatory physical processes and trends require to be corroborated. It assumes to carry on new periodic surveys of the phreatic level, and improve the monitoring device, to refine characterization of aquifer properties. These supplementary data would permit to develop a comprehensive

groundwater modeling likely to not only identify management modes to prevent the agricultural constraints and environmental risks caused by the water table rise but also to use the groundwater stored as an opportunity for the further development of dry season cropping.

Key words

Dry season cropping system, water management, isopièze, modeling, groundwater, Office du Niger, rice, transect.

LISTE DES ABREVIATIONS

Av. J.C : Avant Jésus Christ

BREES : Bureau de Recherche et Exploitation des Eaux Souterraines et de Surface

CIRAD : Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le développement

CRRA-N : Centre Régional de Recherche Agronomique de Niono

CS : Contre-Saison

DC : Double Culture

DNH : Direction Nationale de l'Hydraulique

DNHE : Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie

ENI : Ecole Nationale d'Ingénieurs

ESPGRN : Equipe Système de Production et Gestion des Ressources Naturelles

FSP : Fond de Solidarité Prioritaire.

IC : Intensité Culturelle

IER : Institut d'Economie Rural

ISFRA : Institut Supérieur de Formation et de Recherche Appliquée

OERT : Organisation pour l'Entretien du Réseau Tertiaire

ON : Office du Niger

PK : Point Kilométrique

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

PSI : Pôle régional de recherche sur les Systèmes Irrigués

SAF : Service Administratif et Financier

SAU : Superficie Agricole Utile

SC : Simple culture

SCR : Service Conseil Rural

SE : Suivi Evaluation

SERP : Service d'Entretien du Réseau Tertiaire

SGE : Service Gestion de l'Eau

SOGREAH :

UMR G-EAU : Unité Mixte de Recherche Gestion de l'eau, Acteurs et Usagers.

LISTE DES FIGURES

| | |
|---|----|
| Figure 1- 1 : Situation de l'Office du Niger au Mali <i>Source : Touré, 1997</i> | 4 |
| Figure 1- 2 : Variation au cours de l'année des principaux facteurs agro climatiques de la zone Office du Niger. (Données collectées à la station météorologique de Niono Sahel, à l'intérieur de la zone d'étude pour la période 1970-2005). | 6 |
| FIGURE 1- 3: LA BOUCLE DU NIGER ET LA ZONE DU DELTA MORT . SOURCE : ROGNON, 1989 | 8 |
| FIGURE 1- 4 : STRUCTURE HYDRAULIQUE ET HYDROLOGIQUE DES HUIT SYSTEMES HYDRAULIQUES DE L'OFFICE DU NIGER. | 10 |
| FIGURE 1- 5: CARTE DE REPARTITION PHYSIQUE DES PERIMETRES DE L'OFFICE DU NIGER. <i>SOURCE : DADR, 2000</i> | 11 |
| FIGURE 1- 6: STRUCTURE DE LA MAILLE HYDRAULIQUE A L'ECHELLE D'UN CASIER RIZICOLE. <i>SOURCE : TOURE, 1997</i> | 13 |
| FIGURE 1- 7: EVOLUTION DES SUPERFICIES AMENAGEES ET CULTIVEES EN CASIERS ET DU RENDEMENT RIZ D'HIVERNAGE A L'OFFICE DU NIGER DEPUIS SA CREATION (<i>SOURCE : ELABORE A PARTIR DES DONNEES DE L'OFFICE DU NIGER PAR JEAN FRANÇOIS BELIERES, 2000 ET B. TANGARA, 2010</i>)..... | 15 |
| FIGURE 1- 8: EVOLUTION DES SUPERFICIES CULTIVEES PAR TYPES D'AMENAGEMENTS, PAR SAISON ET SPECULATIONS A L'OFFICE DU NIGER DE 1987 A 2006. SOURCE : ELABORE A PARTIR DES DONNEES DE L'OFFICE DU NIGER PAR JEAN FRANÇOIS BELIERS. | 17 |
| FIGURE 1- 9: CONSOMMATION ET EFFICIENCE AU NIVEAU DU PARTITEUR PENDANT LA CAMPAGNE D'HIVERNAGE ET DE CONTRE-SAISON POUR LES DIFFERENTS CASIERS DE LA ZONE DE N'DEBOUGOU (A ET B) ET PENDANT LA CONTRE-SAISON EN FONCTION DE LA SURFACE IRRIGUEE (C ET D). SOURCE : VANDERSYPEN <i>ET AL.</i> 2007. | 26 |
| FIGURE 1- 10: CONSOMMATION ET EFFICIENCE PENDANT L'HIVERNAGE AU NIVEAU DE L'ARROSEUR EN FONCTION DE LA SURFACE IRRIGUEE (A) ET PAR TYPE D'AMENAGEMENT (B) ; SOURCE : VANDERSYPEN, 2007. | 27 |
| FIGURE 1- 11: PERTES (EN M ³) DANS LE RESEAU PRIMAIRE EN FONCTION DU DEBIT ENTRANT ET DU DEBIT PRELEVE PAR LES ZONES (M ³ /s) DE JUIN 1998 A MAI 1999. SOURCE : HASSANE & KUPPER (1999) | 30 |
| FIGURE 2- 1 : ILLUSTRATION DE L'ENCHAINEMENT DES DIFFERENTES ETAPES DE LA DEMARCHE..... | 56 |
| FIGURE 3- 1 : CARTE DU PARCELLAIRE DU CASIER RETAIL DE LA ZONE OFFICE DU NIGER DE NIONO (A PARTIR DU FICHIER CADASTRAL DE L'ON). | 62 |
| FIGURE 3- 2: EVOLUTION DES SUPERFICIES CULTIVEES PAR CAMPAGNE DE CONTRE-SAISON ET PAR TYPE DE CULTURES SUR LES TYPES D'ARROSEURS PREVUS PAR L'AMENAGEMENT AU CASIER RETAIL..... | 66 |

| | |
|---|-----|
| FIGURE 3- 3: EVOLUTION DE LA SUPERFICIE TOTALE DES CULTURES DE CONTRE-SAISON PAR VILLAGE ET PAR CAMPAGNE DANS LE CASIER RETAIL. | 67 |
| FIGURE 3- 4: SUPERFICIE MOYENNE PAR VILLAGE EN FONCTION DES SYSTEMES DE CULTURE DE CONTRE-SAISON (INTEGRANT LE MARAICHAGE) DANS LE CASIER RETAIL. | 68 |
| FIGURE 3- 5: EVOLUTION DES SUPERFICIES EMBLAVEES EN CONTRE-SAISON AU COURS DE CES CINQ DERNIERES ANNEES SUR LES ARROSEURS ENQUETES..... | 71 |
| FIGURE 3- 6 : EVOLUTION DES SUPERFICIES AMENAGEES ET CULTIVEES EN CONTRE-SAISON A L'ON AU COURS DE CES QUINZE DERNIERES ANNEES. | 72 |
| FIGURE 3- 7: TYPOLOGIE DE L'HISTORIQUE DE LA MISE EN VALEUR DES ARROSEURS DE SIMPLE CULTURE (SC)... | 73 |
| FIGURE 3- 8 : TYPOLOGIE DE L'HISTORIQUE DE LA MISE EN VALEUR DES TYPES D'ARROSEURS..... | 74 |
| FIGURE 4- 1 : CARTE DE LA ZONE OFFICE DU NIGER | 81 |
| FIGURE 4- 2 : DRAINS DE SOUS-PARTITEUR ET D'ARROSEUR EQUIPES DE DEVERSOIRS DE TYPE CIPOLETTI ET D'EHELLES LIMNIMETRIQUES..... | 83 |
| FIGURE 4- 3 : SCHEMA D'AMENAGEMENT D'UNE PARCELLE MARAICHERE (SOURCE : TANGARA, 2010) | 87 |
| FIGURE 4- 4 : MODELE D'EVALUATION DES PERFORMANCES DE L'IRRIGATION GRAVITAIRE SUR RIZ DE CS AU SEIN DE L'ARROSEUR | 90 |
| FIGURE 4- 5 : VARIATION DU FACTEUR CORRECTIF EN FONCTION DU RAPPORT h_2/h_1 (SOURCE : HTTP://WWW.FAO.ORG/DOCREP/W2570F/W2570F0C.HTM). | 91 |
| FIGURE 4- 6 : RELATION ENTRE LES DEBITS D'EAU JAUGES DANS LES DRAINS ET LES DEBITS D'EAU THEORIQUES. 91 | |
| FIGURE 4- 7 : CALENDRIER TYPE DE REPIQUAGE DU RIZ SUR UN ARROSEUR RIZICULTIVE EN CONTRE-SAISON | 94 |
| FIGURE 4- 8 : COMPARAISON DES VOLUMES DELIVRES AU POINT A ET EN TETE DU CANAL DU SAHEL ET DES SURFACES CULTIVEES EN CONTRE SAISON. (SOURCES SERP – SUIVI EVALUATION ON) | 95 |
| FIGURE 4- 9 : EVOLUTION ENTRE 2000 ET 2006 DES VOLUMES DELIVRES A DIFFERENTS NIVEAUX DU RESEAU PRIMAIRE PAR HECTARE CULTIVEE EN FONCTION DE LA SURFACE IRRIGUEE. (SOURCES SERP – SUIVI EVALUATION ON) | 96 |
| FIGURE 4- 10 : COMPARAISON DES DEBITS DU FLEUVE NIGER EN AMONT DU BARRAGE DE MARKALA ET DES DEBITS TRANSITANT AU POINT A (SOURCE SERP). | 96 |
| FIGURE 4- 11 : EVOLUTION DES SURFACES DES CULTURES DE CONTRE-SAISON DANS LES PERIMETRES DESSERVIS PAR LE CANAL DU SAHEL..... | 97 |
| FIGURE 5- 1 : ZONE DE SUIVI ET D'ETUDE DE LA NAPPE REGIONALE. | 110 |
| FIGURE 5- 2 : SITES DE SUIVI DE LA NAPPE LOCALE AU SEIN DU CASIER RETAIL | 111 |
| FIGURE 5- 3 : SCHEMA DE CONCEPTION D'UN PIEZOMETRE (SOURCE VALENZA, 1996). | 112 |

| | |
|--|-----|
| FIGURE 5- 4 : PERIMETRES IRRIGUES DU KALA INFERIEUR. | 114 |
| FIGURE 5- 5 : NIVEAU DU TOIT DU CONTINENTAL TERMINAL AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE | 117 |
| FIGURE 5- 6: NIVEAU DU TOIT DU SUBSTRATUM AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE..... | 117 |
| FIGURE 5- 7: COMPARAISON DE L'EVOLUTION DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE REGIONALE DE NOVEMBRE 1995 AVEC CELLE DE NOVEMBRE 2001. | 121 |
| FIGURE 5- 8 : COMPARAISON DE L'EVOLUTION DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE REGIONALE DE NOVEMBRE 2001 AVEC CELLE DE NOVEMBRE 2006..... | 122 |
| FIGURE 5- 9 : CARTE ISOPIEZE DE LA ZONE D'ETUDE EN NOVEMBRE 1995. | 122 |
| FIGURE 5- 10 : CARTE ISOPIEZE DE LA ZONE D'ETUDE EN NOVEMBRE 2001 | 123 |
| FIGURE 5- 11 : CARTE ISOPIEZE DE LA ZONE D'ETUDE EN NOVEMBRE 2006. | 123 |
| FIGURE 5- 12 : COMPARAISON DE L'EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE EN NOVEMBRE 1995, 2001 ET 2006 (TRANSECT 1). | 124 |
| FIGURE 5- 13 : COMPARAISON DE L'EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE EN NOVEMBRE 1995, 2001 ET 2006 (TRANSECT 2). | 125 |
| FIGURE 5- 14 : COMPARAISON DE L'EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE EN NOVEMBRE 1995, 2001 ET 2006 (TRANSECT 3). | 125 |
| FIGURE 5- 15 : COMPARAISON DE L'EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE EN NOVEMBRE 1995, 2001 ET 2006 (TRANSECT 4). | 126 |
| FIGURE 5- 16 : COMPARAISON DE L'EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE EN NOVEMBRE 1995, 2001 ET 2006 (TRANSECT 5). | 126 |
| FIGURE 5- 17 : ILLUSTRATION DE LA CONTIBUTION DU DRAIN PRINCIPAL A LA RECHARGE DE LA NAPPE (TRANSECT 5)..... | 127 |
| FIGURE 5- 18 : TRANSECT OUEST-EST MOYEN DE L'EVOLUTION DE LA NAPPE DANS LA ZONE D'ETUDE ENTRE 1940 ET NOVEMBRE 2006..... | 128 |
| FIGURE 5- 19 : CARTE ISOPIEZE DE LA ZONE D'ETUDE EN MAI 2007. | 129 |
| FIGURE 5- 20 : TRANSECT OUEST/EST MOYEN DE L'EVOLUTION DE LA NAPPE DANS LA ZONE D'ETUDE ENTRE NOVEMBRE 2006 ET MAI 2007 | 130 |
| FIGURE 5- 21 : DYNAMIQUE DE LA NAPPE DANS LES PUIITS DU CASIER RETAIL (CONTRE-SAISON 2006-2007). | 132 |
| FIGURE 5- 22 : DYNAMIQUE DE LA NAPPE DANS LES PUIITS ET PIEZOMETRES DU CASIER RETAIL (CONTRE-SAISON 2006-2007). | 133 |

| | |
|--|-----|
| FIGURE 5- 23 : CONTRIBUTION DES DRAINS A LA RECHARGE DE LA NAPPE DE SURFACE EN CONTRE-SAISON SANS MISE EN VALEUR AGRICOLE (ZONE RETAIL IV, CS 2006-2007). | 134 |
| FIGURE 5- 24 : DYNAMIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE AU NIVEAU DES DIFFERENTS ARROSEURS SUIVIS AU SEIN DU CASIER RETAIL (CONTRE-SAISON 2006-2007). | 135 |
| FIGURE 5- 25 : EVOLUTION DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE EN CONTRE-SAISON 2006-2007 SOUS RIZICULTURE : ARROSEUR N4-6D DESTINE A LA DOUBLE CULTURE (SOL TEXTURE ARGILO LIMONEUSE). . | 136 |
| FIGURE 5- 26 : EVOLUTION COMPAREE DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE REGIONALE ET DE LA NAPPE LOCALE AU SEIN DE LA ZONE ALIMENTEE EN EAU PAR LE DISTRIBUTEUR RETAIL | 136 |
| FIGURE 5- 27 : VOLUMES SIMULES DE LA NAPPE REGIONALE CONTIENTALE-ALLUVIALE AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE DE NOVEMBRE 2001 A MAI 2007..... | 143 |
| FIGURE 5- 28 : COMPARAISON DES VOLUMES SIMULES DE LA NAPPE REGIONALE AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE (KALA INFERIEUR) AVEC ET SANS CULTURES DE CONTRE SAISON. | 144 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|--|----|
| TABLEAU 1- 1 : DIFFERENTES SOURCES DE PERTES DANS LE FALA DE MOLODO..... | 24 |
| TABLEAU 1- 2: NORMES TECHNIQUES DE L'EFFICACITE DE TRANSPORT ; (SOURCE: OFFICE DU NIGER 1995, DANS BARRAL ET TANGARA 1997)..... | 25 |
| TABLEAU 1- 3: BILAN HYDROLOGIQUE ANNUEL (JUN 98 - MAI 99) DU SYSTEME CANAL DU SAHEL DE L'OFFICE DU NIGER (HASSANE & KUPPER, 1999)..... | 30 |
| TABLEAU 1- 4 : BILAN HYDROLOGIQUE DES ZONES DU SYSTEME SAHEL DE L'OFFICE DU NIGER DE JUIN 1998 A MAI 1999 (EN M ³ /S) ; SOURCE : HASSANE & KUPPER (1999), COMPLETE PAR TANGARA (2010). | 31 |
| TABLEAU 1- 5 : MESURES DE DEBITS EFFECTUEES SUR DES DRAINS PAR LE PROJET ARPON (HAMEL ET AL, 1996), BARRAL ET AL, (1997), ET OUVRY ET AL, (1999). SOURCE : HASSANE & KUPPER (1999). | 32 |
| TABLEAU 1- 6 : CONSOMMATION DE L'EAU DANS LE SYSTEME SAHEL A L'OFFICE DU NIGER (EN M ³ /HA/AN) POUR LA SAISON D'HIVERNAGE 1998/99 ET POUR TOUTE L'ANNEE ; SOURCE : HASSANE A. ET KUPPER M. (1999). | 33 |
| TABLEAU 1- 7: VALEURS CALCULEES DE LA FRACTION DE LESSIVAGE PERMISE PAR LE PENDAGE DE LA NAPPE PHREATIQUE (BARRAL ET AL., 1996 [32])..... | 43 |
| TABLEAU 3- 1 : REPARTITION DES SUPERFICIES ET DES EXPLOITATIONS PAR PARTITEUR, PAR VILLAGE ET PAR PERIODE DE REHABILITATION AU CASIER RETAIL..... | 62 |
| TABLEAU 3- 2 : PRINCIPAUX TYPE DE MISE EN VALEUR EN CONTRE-SAISON SUIVANT LA VOCATION INITIALE DE L'ARROSEUR | 66 |
| TABLEAU 3- 3: RECAPITULATIF DE LA MOYENNE DE L'INTENSIFICATION CULTURALE EN CONTRE-SAISON SUR CES CINQ DERNIERES ANNEES (2000 A 2005) DE MISES EN VALEUR DES EXPLOITATIONS RIZICOLES AU CASIER RETAIL..... | 68 |
| TABLEAU 3- 4 : RECAPITULATIF DES RESULTATS D'ENQUETE DE CINQ CAMPAGNES CULTURALES DE CONTRE-SAISON (CS) 2000 A 2005 SUR 10% DES EXPLOITATIONS CHOISIES DANS LES SIX ECHANTILLONS DE VILLAGES RETENUS AU NIVEAU DU CASIER RETAIL..... | 70 |
| TABLEAU 4- 1 : RECAPITULATIF DES ARROSEURS AYANT FAIT L'OBJET D'UN SUIVI AU COURS DE LA CAMPAGNE DE CONTRE SAISON 2007-2008..... | 82 |
| TABLEAU 4- 2 : EXEMPLE D'ABAQUE POUR LA LECTURE DES DEBITS D'EAU AU NIVEAU DES PRISES DE DISTRIBUTEURS OU DE PARTITEURS EQUIPEES DE VANNES PLATES. | 85 |
| TABLEAU 4- 3: RECAPITULATIF DU TEMPS DES TRAVAUX ET DES QUANTITES D'EAU CONSOMMEE SUR DES PARCELLES DE DEMONSTRATION (PD) ET DE TEMOIN (PT) | 88 |

| | |
|--|-----|
| TABLEAU 4- 4 : SURFACES AMENAGEES ET HORS CASIERS ALIMENTEES EN EAU PAR LE CANAL DU SAHEL. | 97 |
| TABLEAU 4- 5 : EVOLUTION DES SURFACES DES CULTURES DE CONTRE SAISON SUR LE CASIER RETAIL DE 2000 A 2006..... | 98 |
| TABLEAU 4- 6 : EVALUATION STATISTIQUE DE LA CONSOMMATION EN EAU DES CULTURES (M3/HA) EN TETE DES ONZE PARTITEURS SUR LE CASIER RETAIL AU COURS DES CAMPAGNES CS 2005-2006 ET 2006-2007... | 99 |
| TABLEAU 4- 7 : RESULTATS DU SUIVI DES VOLUMES APPORTES ET DRAINES EN TETE D'ARROSEURS AU COURS DE LA CAMPAGNE 2006-2007 | 100 |
| TABLEAU 4- 8 : TAUX DE COUVERTURE DES BESOINS EN EAU DU RIZ AU SEIN DE L'ARROSEUR EN FONCTION DU TAUX DE REPIQUAGE..... | 101 |
| TABLEAU 4- 9 : RESULTATS DE LA SIMULATION DES BILANS D'EAU AU NIVEAU DES ARROSEURS (CS 2007-2008). | 102 |
| TABLEAU 4- 10 : CONTRIBUTION DE LA RIZICULTURE AU SOUTIEN DE LA NAPPE EN CONTRE SAISON | 103 |
| TABLEAU 4- 11 : NIVEAUX DE CONSOMMATION D'EAU A LA PARCELLE DE L'ECHALOTE ET DE LA TOMATE SUIVANT DES TECHNIQUES D'IRRIGATION. | 103 |
| TABLEAU 5- 1 : CARACTERISTIQUES DES TRANSECTS PIEZOMETRIQUES SUIVIS..... | 115 |
| TABLEAU 5- 2 : CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS AQUIFERES DE LA ZONE D'ETUDE | 116 |
| TABLEAU 5- 3 : EVOLUTION DES SURFACES CULTIVEES (HA) ENTRE 2001 ET 2007 AU SEIN DES PERIMETRES DU KALA INFERIEUR. | 118 |
| TABLEAU 5- 4 : EVOLUTION DU VOLUME DE LA NAPPE REGIONALE ENTRE 1995 ET 2006 AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE (EN MILLIONS DE M ³). | 129 |
| TABLEAU 5- 5 : EVOLUTION DU VOLUME DE LA NAPPE REGIONALE ENTRE NOVEMBRE 2006 ET MAI 2007 AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE (EN MILLIONS DE M ³). | 130 |
| TABLEAU 5- 6 : EVOLUTION DU VOLUME DE LA NAPPE CONTINENTALE-ALLUVIALE ET DES SURFACES CULTIVEES A L'EST ET A L'OUEST DE L'AXE DU FALA DE MOLODO ENTRE NOVEMBRE 1995 ET NOVEMBRE 2006. | 131 |
| TABLEAU 5- 7 : SURFACES CULTIVEES EN RIVE DROITE ET GAUCHE DU FALA DE MOLODO UTILISEES POUR REALISER LA SIMULATION. | 141 |
| TABLEAU 5- 8 : COMPARAISON ENTRE VOLUMES DE LA NAPPE SIMULES ET ESTIMES. | 142 |

TABLE DES MATIERES

| | |
|---|-------------|
| THÈSE | I |
| DEDICACE | II |
| REMERCIEMENTS | III |
| RESUME | VI |
| ABSTRACT : | IX |
| LISTE DES ABREVIATIONS | XII |
| LISTE DES FIGURES | XIII |
| LISTE DES TABLEAUX | XVII |
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 : PRESENTATION GENERALE DU CONTEXTE BIO-PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE (OFFICE DU NIGER) | 3 |
| 1.1 LOCALISATION ET PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE | 4 |
| 1.2 CONTEXTE CLIMATIQUE | 5 |
| 1.3 CONTEXTE PEDOLOGIQUE | 6 |
| 1.4 LE POTENTIEL IRRIGABLE DE LA ZONE OFFICE DU NIGER | 7 |
| 1.5 CARACTERISTIQUES DU SYSTEME HYDRAULIQUE | 8 |
| 1.5.1 CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE DE LA ZONE OFFICE DU NIGER..... | 8 |
| 1.5.2 CARACTERISTIQUES DES STRUCTURES HYDRAULIQUES ET DU SYSTEME D'IRRIGATION..... | 9 |
| 1.6 EVOLUTION DES SUPERFICIES AMENAGEES ET DES SYSTEMES DE CULTURE | 14 |
| 1.6.1 UNE CROISSANCE DES SUPERFICIES AMENAGEES ET DES RENDEMENTS EN RIZ FAIBLES VARIANT DE 2 A 3 TONNES /HA DE 1932 A 1964..... | 14 |

| | | |
|---|--|------------------|
| 1.6.2 | DE LA CAMPAGNE 1964/65 A LA CAMPAGNE 1990/1991 DES AMENAGEMENTS DEGRADEES ET UN TAUX DE MISE EN VALEUR INFERIEUR A 80%..... | 15 |
| 1.6.3 | UNE POLITIQUE DE REHABILITATION DES AMENAGEMENTS COUPLEE A UNE AMELIORATION DU NIVEAU D'INTENSIFICATION DE 1991 A 2000..... | 16 |
| 1.7 | MODES ET PERFORMANCES DE LA GESTION DE L'EAU A L'OFFICE DU NIGER : ETAT DES CONNAISSANCES | 18 |
| 1.7.1 | PRINCIPES ET MODES DE GESTION DE L'EAU A L'OFFICE DU NIGER..... | 18 |
| 1.7.2 | EFFICIENCE HYDRAULIQUE DE LA GESTION DE L'EAU A L'OFFICE DU NIGER : ETAT DES CONNAISSANCES..... | 22 |
| 1.8 | BILAN HYDROLOGIQUE A L'OFFICE DU NIGER : ETAT DES CONNAISSANCES | 28 |
| 1.8.1 | BILAN HYDROLOGIQUE A L'ECHELLE DU RESEAU PRIMAIRE..... | 29 |
| 1.8.2 | BILAN HYDROLOGIQUE A L'ECHELLE DES ZONES IRRIGUEES..... | 31 |
| 1.9 | CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES NAPPES | 33 |
| 1.9.1 | PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE..... | 33 |
| 1.9.2 | CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE : ETAT DES CONNAISSANCES..... | 35 |
| 1.9.3 | CARACTERISTIQUES GENERALES DES NAPPES ET DE LEUR FONCTIONNEMENT : ETAT DES CONNAISSANCES..... | 36 |
| 1.9.4 | ETUDES DU BILAN HYDROLOGIQUE DE LA NAPPE DU KALA INFERIEUR: ETAT DES CONNAISSANCES.... | 41 |
| 1.9.5 | ETUDES DU BILAN HYDROLOGIQUE DE LA NAPPE AU NIVEAU DE LA MAILLE HYDRAULIQUE : ETAT DES CONNAISSANCES..... | 43 |
| 1.9.6 | CONCLUSION SUR L'HYDROGEOLOGIE ET LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE..... | 45 |
| 1.10 | RISQUES DE DEGRADATION PAR ALCALINISATION DES SOLS SOUS IRRIGATION A L'OFFICE DU NIGER : ETAT DES CONNAISSANCES | 46 |
| 1.11 | REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 1..... | 48 |
| <u>CHAPITRE 2 : PROBLEMATIQUE ET DEMARCHE DE LA THESE.....</u> | | <u>52</u> |
| 2.1 | PROBLEMATIQUE | 53 |
| 2.2 | OBJECTIFS..... | 54 |
| 2.3 | APPROCHE ADOPTEE | 55 |
| 2.4 | REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 2..... | 57 |

CHAPITRE 3 : EVOLUTION DES CULTURES DE CONTRE-SAISON DANS LE CASIER RETAIL DE LA ZONE OFFICE DU NIGER DE NIONO 58

| | | |
|------------|---|-----------|
| 3.1 | INTRODUCTION | 59 |
| 3.2 | MATERIELS ET METHODES | 61 |
| 3.2.1 | CHOIX DES SITES D'ETUDE..... | 61 |
| 3.2.2 | MATERIELS DE SUIVIS ET D'ENQUETES..... | 63 |
| 3.2.3 | METHODE DE COLLECTE DES DONNEES..... | 63 |
| 3.2.4 | METHODES D'ANALYSE DES RESULTATS..... | 65 |
| 3.3 | RESULTATS ET DISCUSSIONS | 66 |
| 3.3.1 | CARACTERISATION DE L'EVOLUTION DES DYNAMIQUES DE LA MISE EN VALEUR D'EXPLOITATIONS RIZICOLES EN CONTRE-SAISON..... | 66 |
| 3.3.2 | CARACTERISATION DE L'EVOLUTION DES DYNAMIQUES DE LA MISE EN VALEUR EN CONTRE-SAISON AU NIVEAU DES DIFFERENTS TYPES D'ARROSEURS..... | 71 |
| 3.3.3 | INTERPRETATION..... | 74 |
| 3.3.4 | DISCUSSIONS..... | 75 |
| 3.4 | CONCLUSION | 76 |
| 3.5 | REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE 3 | 77 |

CHAPITRE 4: IMPACT DU DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON SUR LES PERFORMANCES DE L'IRRIGATION 78

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.1 | INTRODUCTION | 79 |
| 4.2 | MATERIELS ET METHODES..... | 80 |
| 4.2.1 | CHOIX DES SITES..... | 80 |
| 4.2.2 | MATERIELS..... | 82 |
| 4.2.3 | METHODE DE COLLECTE DES DONNEES..... | 84 |
| 4.2.4 | METHODES D'ANALYSE DES RESULTATS..... | 88 |
| 4.3 | RESULTATS ET DISCUSSIONS | 94 |
| 4.3.1 | EVOLUTION DES DEBITS D'EAU A L'ECHELLE DE L'OFFICE DU NIGER..... | 94 |
| 4.3.2 | EVOLUTION DES SYSTEMES DE CULTURE ET DES APPORTS D'EAU A L'ECHELLE DU SYSTEME DU SAHEL (CANAL SAHEL - FALA MOLODO)..... | 96 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.3.3 | EVOLUTION DES SYSTEMES DE CULTURE ET DES APPORTS D'EAU A L'ECHELLE DU DISTRIBUTEUR RETAIL..... | 98 |
| 4.3.4 | COMPARAISON DES APPORTS D'EAU EN TETE DES PARTITEURS DU DISTRIBUTEUR RETAIL..... | 99 |
| 4.3.5 | PERFORMANCES DE L'IRRIGATION DU RIZ DE CONTRE-SAISON AU NIVEAU ARROSEUR (CAS DES ARROSEURS DU PARTITEUR N1 DU DISTRIBUTEUR RETAIL)..... | 100 |
| 4.3.6 | BILAN D'EAU A L'ECHELLE D'UN ARROSEUR RIZICULTIVE : RESULTATS DE LA MODELISATION..... | 101 |
| 4.3.7 | CARACTERISATION DE L'IRRIGATION DES CULTURES MARAICHES A LA PARCELLE..... | 103 |
| 4.4 | CONCLUSION : IMPACT DU DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE SAISON SUR LES PERFORMANCES DE L'IRRIGATION | 104 |
| 4.5 | REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE 4..... | 105 |

CHAPITRE 5 : IMPACT DU DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON SUR LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE **107**

| | | |
|------------|--|------------|
| 5.1 | INTRODUCTION | 108 |
| 5.2 | MATERIELS ET METHODES | 109 |
| 5.2.1 | CHOIX DES SITES..... | 109 |
| 5.2.2 | MATERIELS..... | 109 |
| 5.2.3 | METHODES DE COLLECTE DES DONNEES DESCRIPTIVES DE L'EVOLUTION DE LA NAPPE PHREATIQUE ET DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE..... | 112 |
| 5.2.4 | METHODES D'ANALYSE ET DE TRAITEMENT DES DONNEES..... | 118 |
| 5.3 | RESULTATS ET DISCUSSIONS | 121 |
| 5.3.1 | PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE ENTRE NOVEMBRE 1995 ET MAI 2007..... | 121 |
| 5.3.2 | MODELISATION DE L'IMPACT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON SUR LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE REGIONALE..... | 138 |
| 5.4 | CONCLUSIONS SUR L'IMPACT DU DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON SUR LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE | 145 |
| 5.5 | REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE 5..... | 146 |

CHAPITRE 6 : CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES **148**

| | | |
|------------|--|------------|
| 6.1 | ACQUIS DE CE TRAVAIL | 149 |
| 6.1.1 | UNE DYNAMIQUE SPATIALE DE DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON AU SEIN DES AMENAGEMENTS MIEUX CARACTERISEE..... | 149 |
| 6.1.2 | UNE FORTE EVOLUTION DES PERFORMANCES DE LA GESTION DE L'EAU EN CONTRE-SAISON LIEE A L'AUGMENTATION DES SURFACES EXPLOITEES..... | 149 |
| 6.1.3 | DES PRELEVEMENTS EN CONTRE-SAISON DEJA PROCHES DU MAXIMUM MOBILISABLE EN PERIODE D'ETIAGE..... | 151 |
| 6.1.4 | UN MONTEE PROGRESSIVE DE LA NAPPE REGIONALE CONTINENTAL TERMINAL-QUATERNAIRE ABOUTISSANT A UNE DIMINUTION PROGRESSIVE DE LA DRAINABILITE DES ZONES IRRIGUEES..... | 151 |
| 6.1.5 | UNE CONTRIBUTION DES CULTURES DE CONTRE-SAISON ESTIMEE A 25% DE L'AUGMENTATION DU VOLUME DE LA NAPPE REGIONALE CONTINENTAL TERMINAL-QUATERNAIRE ABOUTISSANT A REMPLACER DANS LE CONTEXTE D'EXPLOITATION DES AMENAGEMENTS EN HIVERNAGE..... | 152 |
| 6.1.6 | VALORISATION SCIENTIFIQUE DES TRAVAUX DE RECHERCHE | 153 |
| 6.2 | PROPOSITIONS POUR L'AMELIORATION DES PERFORMANCES DE LA GESTION DE L'EAU EN CONTRE-SAISON..... | 153 |
| 6.2.1 | AMELIORER LES PRATIQUES D'IRRIGATION A LA PARCELLE EN CONTRE-SAISON | 154 |
| 6.2.2 | SATISFAIRE LES BESOINS D'IRRIGATION ENGENDRES PAR UNE POURSUITE DU DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON DANS LE CONTEXTE DES EXTENSIONS DE ZONES IRRIGUEES..... | 154 |
| 6.2.3 | S'ASSURER DE L'ENTRETIEN DE LA FERTILITE DES SOLS DANS UN CONTEXTE DE DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON..... | 155 |
| 6.3 | LIMITES ET PERSPECTIVES | 155 |
| 6.3.1 | PROBLEMES D'ACQUISITIONS ET CRITIQUES DES DONNEES DE SUIVI DES PERFORMANCES DE LA GESTION DE L'EAU..... | 155 |
| 6.3.2 | ACQUISITIONS ET REPRESENTATIVITE DES DONNEES DE SUIVI DE LA GESTION DE L'EAU AU NIVEAU ARROSEUR..... | 156 |
| 6.3.3 | ACQUISITIONS ET CRITIQUES DES DONNEES DE SUIVI DE LA NAPPE..... | 156 |
| 6.3.4 | NECESSITE DE DEVELOPPER DES INDICATEURS MULTI-EHELLES DES PERFORMANCES DE LA GESTION DE L'EAU AU SENS LARGE..... | 155 |

INTRODUCTION

Depuis 1996, l'Office du Niger (ON) au Mali qui produit plus de 50% du riz malien (*Rapport national sur la mise en valeur des ressources en eau, 2006*), a été le théâtre d'un fort développement agricole. Alors que les surfaces rizicultivées en hivernage ont progressé de 65%, passant de 50 000 ha à près de 90 000 ha et que les rendements augmentaient de 25% (4,6t/ha en 1995/96, 5,7 t/ha en 2003/2004), les surfaces des cultures de contre-saison étaient multipliées par 8 pour atteindre 21 000 ha en 2007 (*Vandersypen, 2007*).

Les études menées à la fin des années 1990 évaluaient l'efficacité de l'irrigation à 23 % en contre-saison (de mi-décembre à mi-mai) et 28% en hivernage (*Barral et Tangara, 1998*). Cette situation avait déjà entraîné une forte remontée du niveau de la nappe (*N'Diaye et al, 1990*), qui est aujourd'hui sub-affleurante dès la mi-campagne quelle que soit la saison culturale, et un engorgement de la majorité des drains. Ces conditions hydrauliques compliquent de façon croissante la riziculture, induisant des surcoûts de production et une diminution de la qualité et de la quantité de la récolte (*Vandersypen, 2007*). En favorisant les remontées capillaires sous l'effet de la forte évaporation potentielle (2430 mm/an), elles augmentent les risques d'alcalinisation-sodisation des sols (*Marlet et N'Diaye, 2002*).

Malgré les enjeux socio-économiques du développement des cultures de contre-saison (CS), tant en termes d'augmentation, de diversification et de répartition annuelle des revenus des irrigants que de taux de rentabilité des investissements (*URDOC, 1999*), leur intérêt, et en particulier celui de la riziculture, est discuté (*Bélières et al 2007*). Il suppose en effet d'adopter de nouveaux modes d'exploitation et de maintenance du système afin de limiter l'effet sur la remontée de la nappe, de planifier les opérations de maintenance dans un contexte d'utilisation quasi-continue du réseau et surtout d'assurer un partage de la ressource en eau qui risque d'être rapidement limitante en période d'étiage du fleuve Niger.

La présente étude contribue à ce débat en faisant le point sur l'évolution des cultures de contre-saison et leur impact sur les performances de l'irrigation du riz en contre-saison et sur la dynamique de la nappe phréatique.

Le présent document comporte un résumé, un abstract, une introduction, une liste d'abréviations, des figures, des tableaux et des références bibliographiques pour chacun des six chapitres.

Le **Chapitre (1)** présente le contexte et l'état des connaissances sur la question. Le **Chapitre (2)** présente les problématiques, la démarche et les objectifs de l'étude.

Sur la base d'analyses des informations issues de la cartographie exhaustive des cultures de contre-saison, de données d'enquête, et de données attributaires collectées par le service du suivi évaluation de l'Office du Niger pendant ces cinq dernières années sur les exploitations rizicoles du casier Retail, le **Chapitre (3)** illustre les principales évolutions des cultures de contre-saison et les déterminants explicatifs.

L'évaluation de l'impact de l'accroissement des cultures de contre-saison sur les performances de l'irrigation gravitaire à différents niveaux d'échelles est présentée par le **Chapitre (4)**. La caractérisation multi-échelles des performances combine des résultats de suivi agronomique et hydraulique d'un groupe de 5 arroseurs avec le traitement de données secondaires fournies par l'Office du Niger (efficacité de l'irrigation, caractérisation du bilan des eaux et du calendrier cultural en fonction de l'occupation des parcelles rizicoles dans le temps et dans l'espace par les cultures de contre-saison, caractérisation de l'irrigation sur des parcelles spécifiquement cultivées en maraîchage).

Le **Chapitre (5)** décrit l'interaction entre performances de la gestion de l'eau liées à l'évolution des systèmes de culture et évolution inter annuelle et inter saisonnière de la nappe phréatique au niveau de cet échelle du Kala inférieur et du casier Retail. L'analyse de ces données aboutit à la proposition d'un modèle multi échelles permettant de quantifier l'impact du développement des cultures de contre-saison sur le bilan d'eau et la dynamique de la nappe locale et régionale (Chapitre 5).

En conclusion le **Chapitre (6)**, analyse les limites et perspectives de ce travail et la nécessité de systématiser le suivi des performances de l'irrigation et de la dynamique de la nappe pour disposer d'informations fiables permettant aux décideurs d'apprécier les risques de dégradation des facteurs de productions (sol, disponibilité en eau d'irrigation) et de prendre les mesures adéquates pour les prévenir.

CHAPITRE 1 : PRESENTATION GENERALE DU CONTEXTE BIO-PHYSIQUE DE LA ZONE D'ETUDE (OFFICE DU NIGER)

1.1 LOCALISATION ET PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

L'Office du Niger (ON) au Mali est l'un des plus grands et plus anciens périmètres irrigués de l'Afrique de l'Ouest. Il est localisé approximativement au centre du Mali, en plein cœur du Sahel, dans le delta central du Niger (*Figure 1- 1*). Elle commence au barrage de Markala sur le fleuve Niger, à environ 260 Km de Bamako et 35 Km de Ségou.

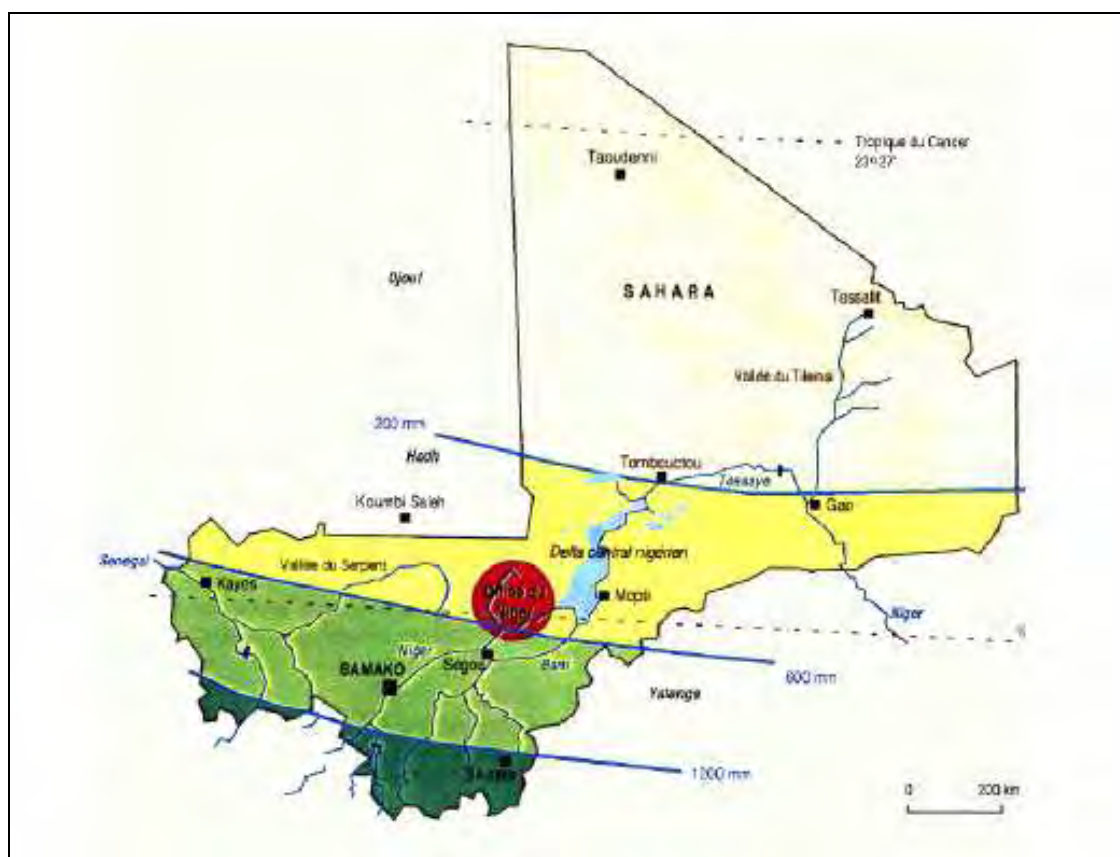


Figure 1- 1 : Situation de l'Office du Niger au Mali *Source : Touré, 1997*

Dans les années 1920, l'identification de cette zone de l'Office du Niger a conduit l'ingénieur français Emile Bélime à concevoir un vaste projet d'aménagement hydro-agricole avec la remise en eau des anciens défluent du Niger qui nécessitait la construction d'un pont barrage de dérivation à Markala sur le fleuve Niger et le creusement d'un canal adducteur et de deux canaux principaux. A l'époque, le projet initial prévoyait l'aménagement de 960 000 ha dont 510 000 ha pour la culture du cotonnier et 450 000 ha pour celle du riz. C'est pour la réalisation de ce vaste programme que fut créé l'Office du Niger en 1932 pour devenir le fournisseur de coton des industries textiles de la France coloniale et le grenier à riz de l'Afrique de l'Ouest. Les grands ouvrages ont été conçus et

construits pour répondre à ces objectifs. En 1960, avec l'accession à l'indépendance du Mali, la gestion de l'ON est effectuée par l'Etat malien qui y introduisit la culture de la canne à sucre. La culture du coton a été supprimée en 1970 et remplacée par celle du riz. Une série de réformes, dont la grande restructuration de 1994, ont considérablement réduit les prérogatives de l'ON qui se limitent essentiellement à la gestion du réseau hydraulique et à la perception de la redevance eau auprès des producteurs. On note tout de même que certaines fonctions, non directement liées à la gestion de l'eau, lui sont toujours confiées par l'Etat en particulier la gestion des terres du delta central, le cadastre et l'appui-conseil aux producteurs entre autres

Les périmètres de l'Office du Niger (*Figure 1- 5*) sont divisés en six zones de production qui correspondent à des unités techniques et administratives : Macina, Molodo, N'Débougou, Niono, Kouroumari et M'Béwani. Chacune d'elles est dotée pour son fonctionnement de services annexes (Service de gestion de l'eau : SGE, Service conseil rural : SCR, Service administratif et financier : SAF, Service de Suivi-Evaluation : SE) qui sont regroupés en une direction locale de l'Office du Niger. Les services des zones sont à l'origine d'une grande partie des informations et des données nécessaires au fonctionnement de l'Office du Niger.

C'est justement dans ces périmètres, et précisément dans les zones de productions de Niono, N'Débougou et Molodo, constituant le Kala inférieur, que se trouvent les sites d'études (*Figure 1- 5*).

1.2 CONTEXTE CLIMATIQUE

L'Office du Niger se situe dans la zone soudano-sahélienne. Le climat est semi aride. Les précipitations sont en moyenne de 433 mm/an (moyenne de 1970 à 2005), centrées sur la saison des pluies appelée hivernage, s'étalant de mai à octobre avec des pluies plus importantes entre juin et septembre (*Figure 1- 5*). Elles varient de 300 à 600 mm ([1] *Dicko, 2005*). Cette pluviométrie connaît une baisse notable dans la zone : 460 mm/an sur les vingt dernières années contre 600 mm/an sur les 20 précédentes ([2] *Jamin, 1994*).

Deux saisons sèches succèdent l'hivernage : la saison sèche froide, de novembre à février avec des températures plus faibles entre 11 et 25°C, puis la saison sèche chaude de mars à avril, avec des températures les plus élevées entre 31 et 42°C. Cette période sèche

(de novembre à avril, voir mai), marquée par la double culture du riz et le maraîchage, est encore appelée contre-saison.

Les facteurs climatiques (hautes températures, faible pluviométrie, forte évapotranspiration) induisent un bilan hydrique largement déficitaire sur quasiment toute l'année. L'évaporation potentielle moyenne, 2430 mm/an est largement supérieure au volume d'eau précipité. L'irrigation reste la seule alternative pour combler ce déficit hydrique.

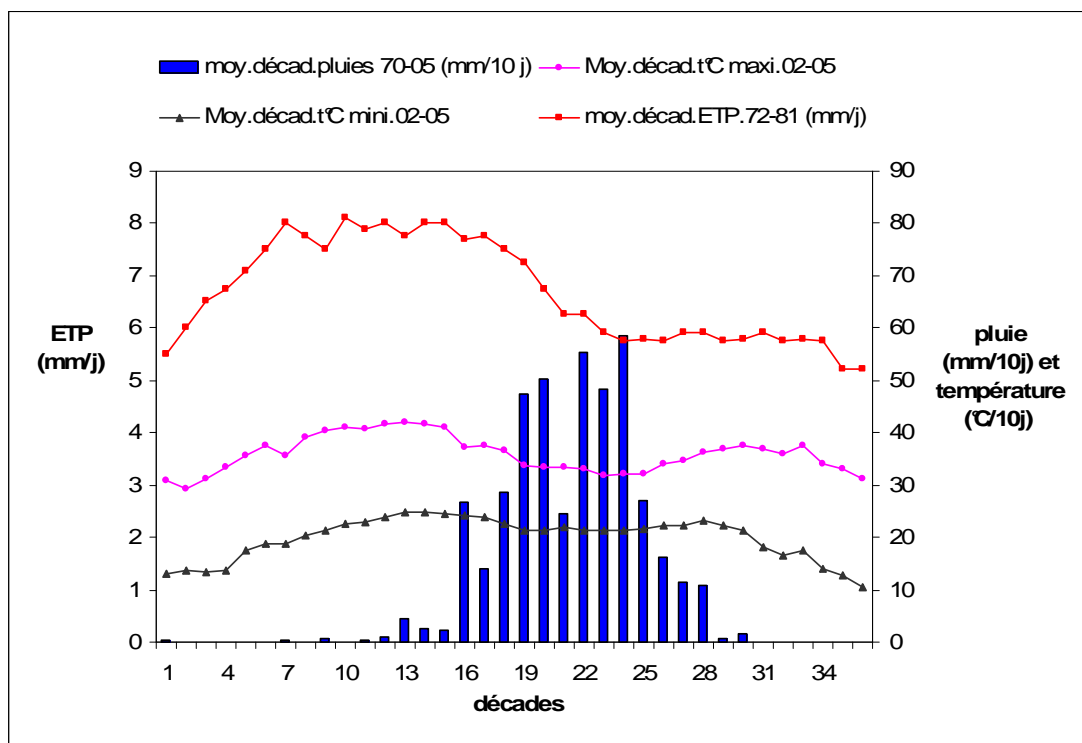


Figure 1- 2 : Variation au cours de l'année des principaux facteurs agro climatiques de la zone Office du Niger. (Données collectées à la station météorologique de Niono Sahel, à l'intérieur de la zone d'étude pour la période 1970-2005).

1.3 CONTEXTE PEDOLOGIQUE

Les sols de l'Office du Niger sont formés sur des alluvions anciennes (Dabin, 1951 dans Dicko M, 2005 [1]). Le milieu est structuré sous la forme de vastes cuvettes argileuses séparées par des bourrelets de berge. Ces cuvettes ont pu ensuite être recouvertes de façon variable par des matériaux plus grossiers : petites levées alluviales ou delta d'épandage lors de la rupture périodique des berges ainsi formées (Keita et al, 1991 [3]). Les sols sont ainsi classifiés selon leur nom vernaculaire en fonction de la nature des matériaux superficiels : *Seno, danga, Dian et Moursi*.

Ainsi dans le delta mort de la zone de l'Office du Niger, trois unités morphopédologiques peuvent être distinguées (Marlet & N'Diaye, 1998 [4]) : les hautes levées sableuses, les dépressions entre les hauteurs sableuses et les cuvettes de décantation.

Les hautes levées sableuses regroupent les sols de type *Seno*. Elles sont constituées de sables et de limons et se trouvent de part et d'autre d'anciens défluent ; elles ont souvent servi de support à l'installation des canaux d'irrigation.

Les sols de type *Danga* sont des petites levées 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 encore fonctionnel. Elles se composent de sols argileux présentant deux types de structures : une structure prismatique grossière (sols de type *Dian*) ou une structure à surface grenue et polyédrique fine (sols de type *Moursi*).

Le niveau de la fraction argileuse va en croissant dans l'ordre suivant des types de sols : *Seno, Danga, Dian* et *Moursi*.

Différents types d'argiles constituent ces sols. Dans les *Seno* et *Danga* l'argile est essentiellement de type kaolinitique. Dans les *Dian* et *Moursi* on trouve une proportion non négligeable d'illite, de smectite et de montmorillonite, ce qui leur confère un caractère vertique avec des fentes de retrait et une capacité d'échange cationique (CEC) élevée (Keita et al, 1991[3]).

1.4 LE POTENTIEL IRRIGABLE DE LA ZONE OFFICE DU NIGER

Le rôle du barrage est de relever le niveau de l'eau à la cote de 300,5 mètres afin d'assurer la mise en eau des *falas* pendant l'étiage. En période de crue, le niveau naturel de l'eau du fleuve est suffisant et le barrage est donc pratiquement sans effet (Djibril AW, 1997[5]). Ainsi, d'après le projet initial de 1929, ces infrastructures (barrage de Markala et Ouvrages annexes) permettraient l'irrigation de 960 000 ha (510 000 ha pour la culture du cotonnier et 450000 ha pour le riz) que les études ultérieures ont porté à 1.105.000 hectares. Ces superficies devraient être totalement aménagées en 1992. Mais aujourd'hui

seulement environ 82 000 hectares sont aménagés et mis en valeur¹ (la riziculture dominante, le maraîchage et la canne à sucre).

Les ressources en eau sont largement excédentaires, puisque d'après l'esquisse du plan directeur hydraulique (*SOGREAH, 1987 [6]*) le débit décennal du fleuve Niger est, à Markala, égal à 594 m³/s pendant l'hivernage (mois de Juillet à Octobre inclus) et à 88 m³/s en saison sèche pendant l'étiage.

1.5 CARACTERISTIQUES DU SYSTEME HYDRAULIQUE

1.5.1 CONTEXTE HYDROGRAPHIQUE DE LA ZONE OFFICE DU NIGER

A l'ère tertiaire, se produisit un événement géologique majeur, la subsidence du coeur du vieux crâton Ouest Africain (550 Ma) qui a laissé place à un fossé que combla progressivement le Niger (*Joliba*). Ce dernier inondait également abondamment les plaines au nord de Tombouctou, dans la région d'Arouane, à plus de 300 km au nord du cours actuel (*Figure 1- 3*).

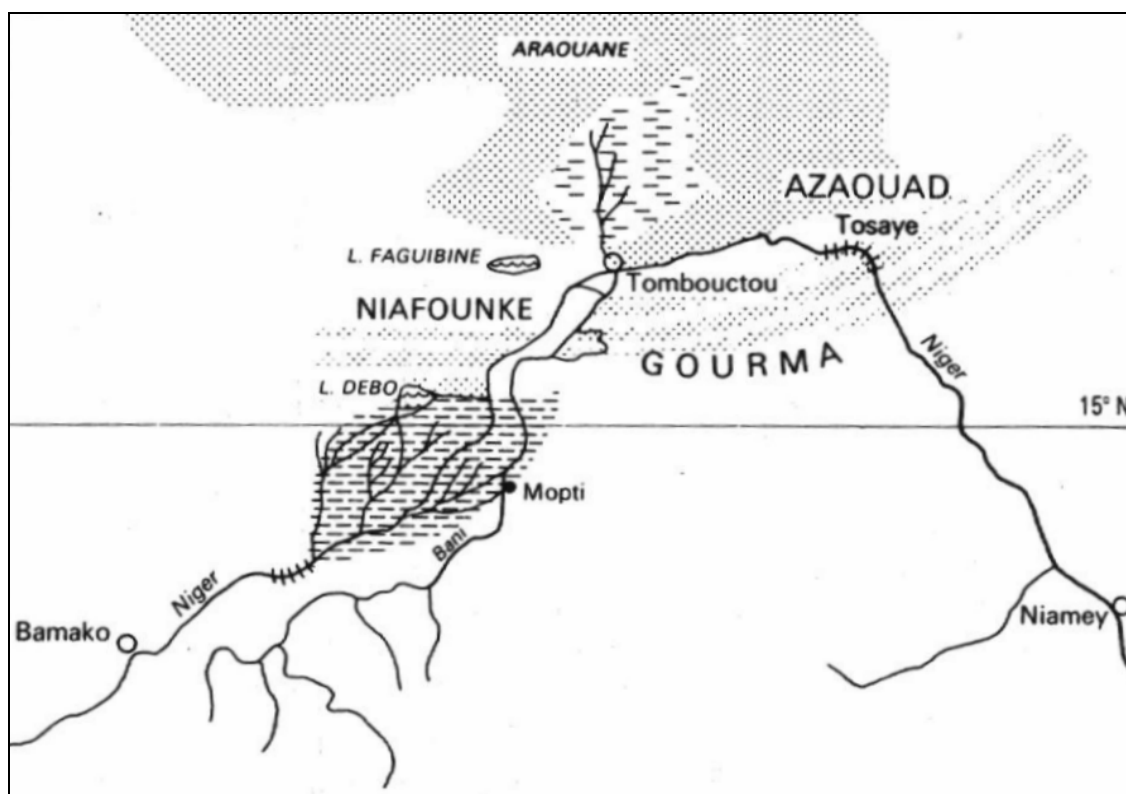


Figure 1- 3: La boucle du Niger et la zone du delta mort. Source : Rognon, 1989

¹ Office du Niger, 2005 : - *Système d'information*. Cellule VISSION 16

Vers 7000 av. J.C., les conditions climatiques devinrent plus arides provoquant la formation rapide d'un erg est-ouest barrant la progression du fleuve vers le nord (Rognon, 1989, cité dans Condom, 2000 [7]). Cet événement, combiné à un basculement du socle géologique vers l'est, entraîna le glissement du cours du Niger vers l'est et la formation de la boucle du Niger, provoquant l'assèchement des plaines délaissées qui constituent aujourd'hui le delta mort.

1.5.2 CARACTERISTIQUES DES STRUCTURES HYDRAULIQUES ET DU SYSTEME D'IRRIGATION

Comme les anciens défluent (Falas de Molodo et de Boky Wéré) coulaient sur des lignes de faite dominant les terres qui les bordent, l'aménagement a consisté à percer ces terres (bourelets de berge qui séparaient les défluent fossiles du fleuve) par les grands canaux du Sahel et du Macina pour disposer des adducteurs naturels permettent l'irrigation par gravité d'une zone allant de Markala jusqu'à Niafunké. C'est ainsi que le barrage de dérivation de Markala et ses ouvrages annexes ont été construits pour dominer les huit (8) systèmes hydrauliques² de l'Office du Niger, couvrant une superficie totale de 1,907 million d'hectares (Figure 1-4).

L'aménagement hydro agricole du delta intérieur fossile de l'Office du Niger (Figure 1-5) est constitué d'un réseau hiérarchisé et d'ouvrages, qui distribuent et drainent de l'eau, et d'un réseau dense de pistes, qui facilite les déplacements à l'intérieur du périmètre.

Le système d'irrigation est entièrement gravitaire. L'irrigation de ce delta intérieur est rendue possible grâce à la remise en eau d'anciens défluent du fleuve Niger (le fala de Molodo dans le Kala et le fala de Boky Wéré dans le Macina) par d'importantes infrastructures primaires comprenant le barrage de Markala, le canal adducteur d'amenée, et de trois systèmes de distribution à partir du point « A » : le système du Sahel (zones de Niono, Molodo, N'Débougou et Kouroumari), le système du Macina (zone du Macina) et le système Costes- Ongoïba.

² Ces huit systèmes hydrauliques sont : le Kala supérieur, le Kala Inférieur, le Kouroumari, le Macina, le Méma, le Farimaké, le Karéri et le Kokéri.



Figure 1- 4 : Structure hydraulique et hydrologique des huit systèmes hydrauliques de l'Office du Niger.

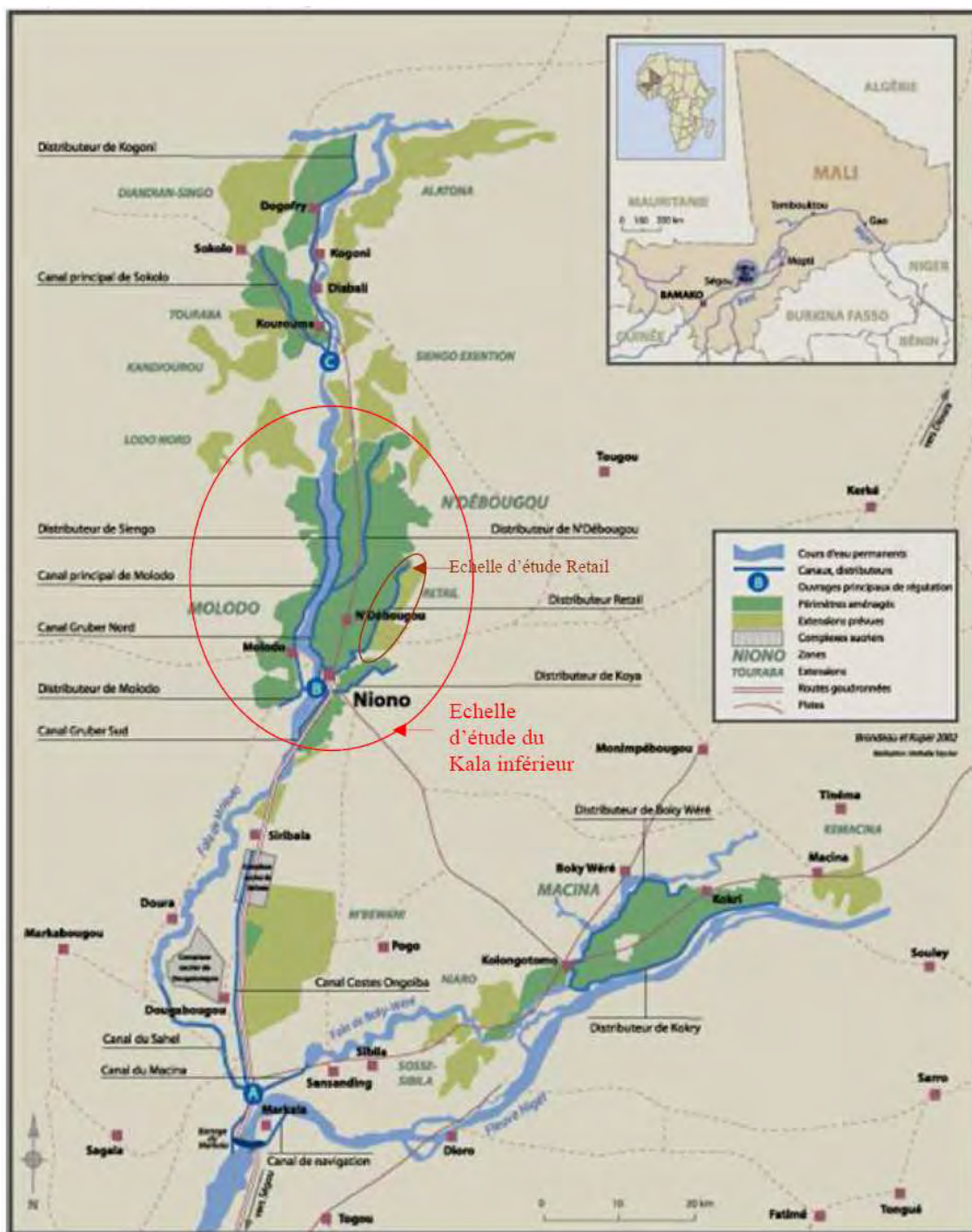


Figure 1- 5: Carte de répartition physique des périmètres de l'Office du Niger. *Source* : DADR, 2000

1.5.2.1 LE BARRAGE DE MARKALA

Le barrage est édifié en 1947 à Markala sous la direction de l'ingénieur Bélimé. Situé sur le fleuve Niger, il constitue la pièce maîtresse des aménagements hydro agricoles de l'Office du Niger (ON). Il relève en son amont le plan d'eau de 5.5 mètres (cote de 300,5

mètres) au-dessus du niveau de l'étiage et permet ainsi de dériver les eaux du fleuve vers les périmètres aménagés en rive gauche.

1.5.2.2 LES PRINCIPALES COMPOSANTES DU RESEAU D'ALIMENTATION EN EAU DES ZONES AMENAGEES

a) Le canal adducteur

Aménagé en 1935, il permet l'alimentation en eau de la zone irriguée à partir du fleuve Niger (rive gauche) juste en amont du barrage de Markala. Son débit maximal actuel de 200 m³/s correspondant à une section (50m) devrait être ultérieurement porté à 100 m de large et 5 m de profondeur pour porter son débit à 500 m³/s. Long de 9 Km, il se termine au point A d'où partent trois canaux principaux : le canal du sahel, le canal du Macina et le canal Coste-Ongoïba.

b) Le système du Sahel

D'une capacité maximale de 110 m³/s, il permet l'irrigation du Kala inférieur (environ 32400 ha aménagées, couvrant les zones de Niono, Molodo, et N'Débougou) et de Kouroumari. Il est creusé et endigué sur 24 Km à partir du point A, qui débouche librement dans un ancien défluent du fleuve Niger, le *Fala* de Molodo. Le *Fala* de Molodo est endigué de part et d'autre et divisé en deux biefs égaux de 56 Km de longueur par un ouvrage régulateur en un point dénommé Point B. Le second bief se termine au point C par une digue transversale et un déversoir de sécurité qui actuellement sert à réguler le plan d'eau et à l'alimentation d'un troisième bief en cours d'aménagement. L'ouvrage du Point B permet de réguler le plan d'eau en son amont et assure l'alimentation des zones de productions de Niono, Molodo et de N'Débougou Il permet également de faire transiter le débit nécessaire dans le second bief pour l'irrigation des terres de la zone de production de Kouroumari.

c) Le système du Macina

D'une capacité de 50 m³/s, ce système comprend un canal, creusé et endigué sur 20 Km qui débouche librement sur un ancien défluent du Niger dénommé le *Fala* de BokyWèrè endigué de part et d'autre sur 50 Km. Avec un potentiel de 25 000 ha, ce système dessert actuellement environ 21000 ha dont 15000 ha de casiers de la zone du Macina. Un déversoir de sécurité situé à 6 Km de Kolongo sur le *Fala* de BokyWèrè rejette les eaux excédentaires dans le fleuve Niger à environ 70 Km en aval du barrage.

d) Le système de Costes-Ongoïba

Bien que sa capacité maximale soit de 48 m³/s, son état actuel d'aménagement ne permet qu'un débit maximum de 13 m³/s.. Il dessert les périmètres sucriers, non gérés par l'Office du Niger et la zone de Bèwani. Son potentiel d'irrigation est de l'ordre de 23 000 ha Outre les 5806 ha aménagés cultivés en canne à sucre dans le Kala Supérieur initialement irrigué par pompage à partir du canal du Sahel qu'il alimente par gravité. Il devrait desservir de nouvelles surfaces de canne à sucre dans les cinq ans à venir ainsi que les projets d'extension de la zone de Bèwani (surface actuellement aménagée 5128 ha) dont la surface potentiellement aménageable est de 15 000 ha sur la rive droite du canal Coste-Ongoïba.

1.5.2.3 LE SYSTEME DE DISTRIBUTION DE L'EAU AU SEIN DES CASIERS

Ces infrastructures primaires (canaux adducteurs) se prolongent par un jeu de canaux (*Figure 1- 6*) qui amènent les eaux d'irrigation dans les terres aménagées.

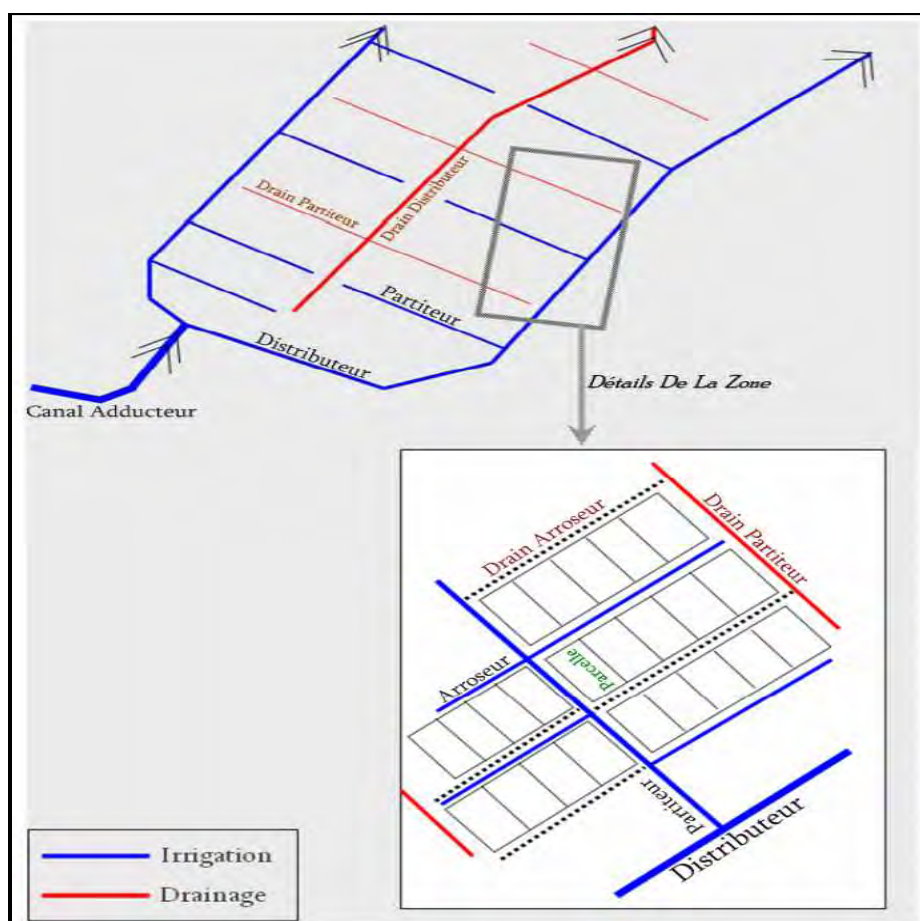


Figure 1- 6: Structure de la maille hydraulique à l'échelle d'un casier rizicole. *Source* : Touré, 1997.

Les zones irriguées sont divisées en casiers (unité hydraulique indépendante) de superficies variables (3000 à 9000 ha).

Chaque casier est desservi par un *distributeur* (réseau primaire d'irrigation) alimenté par un des canaux adducteurs. La longueur des distributeurs varie de 15 à 30 km. Deux ou trois distributeurs desservent une zone de production (ou zone) qui constitue une entité technique et administrative pour le fonctionnement de l'Office du Niger. Les distributeurs desservent les partiteurs (réseau d'irrigation secondaire). Leur longueur varie entre 1 et 8 km. Ils desservent des superficies comprises entre 200 et 600 ha qui correspondent le plus souvent à la superficie attribuée aux exploitants agricoles d'un même village. Les arroseurs (réseau d'irrigation tertiaire) sont alimentés par les partiteurs. Chaque arroseur, d'une longueur d'environ 1 km, et dont la surface desservie varie de 15 à 40 ha assure l'irrigation de plusieurs parcelles) soit directement, soit par l'intermédiaire de *rigoles* (réseau quaternaire d'irrigation dans les aménagements réhabilités). Enfin, les exploitants pour maîtriser la lame d'eau, divisent par des diguettes les parcelles en "bassins" de 0,25 ha en moyenne.

1.5.2.4 LE SYSTEME DE DRAINAGE

Le réseau de drainage est réalisé de façon symétrique au réseau d'irrigation. L'eau est drainée depuis la parcelle par les rigoles d'irrigation (celles-ci ayant la double fonction irrigation et drainage) ou directement par les drains d'arroseurs. Ceux-ci se jettent à leur tour dans les drains de partiteurs. Des grands drains collecteurs assurent ensuite l'évacuation de l'eau vers le Nord où elle disparaît par percolation et par évaporation.

1.6 EVOLUTION DES SUPERFICIES AMENAGEES ET DES SYSTEMES DE CULTURE

1.6.1 UNE CROISSANCE DES SUPERFICIES AMENAGEES ET DES RENDEMENTS EN RIZ FAIBLES VARIANT DE 2 A 3 TONNES /HA DE 1932 A 1964

De la création de l'Office du Niger en 1932 à 1964, les superficies aménagées ont progressé pour atteindre de l'ordre de 53000 ha. Alors que les rendements du riz au cours de cette période sont restés de l'ordre de 2 à 3 tonnes par hectare, rendements faibles pour

un aménagement avec maîtrise totale de l'eau, le taux d'intensification n'a cessé de se dégrader pour atteindre moins de 80% en 1964 (*Figure 1- 7*)

1.6.2 DE LA CAMPAGNE 1964/65 A LA CAMPAGNE 1990/1991 DES AMENAGEMENTS DEGRADEES ET UN TAUX DE MISE EN VALEUR INFERIEUR A 80%.

Sur des aménagements pour la plupart dégradés, les rendements du riz paddy restent faibles (de 2 à 3 tonnes /ha jusqu'en 1990/91), le taux d'intensification inférieur à 80% alors que les superficies aménagées sont stationnaires de la campagne 1964/65 à 1996/97 au tour de 53 260 ha.

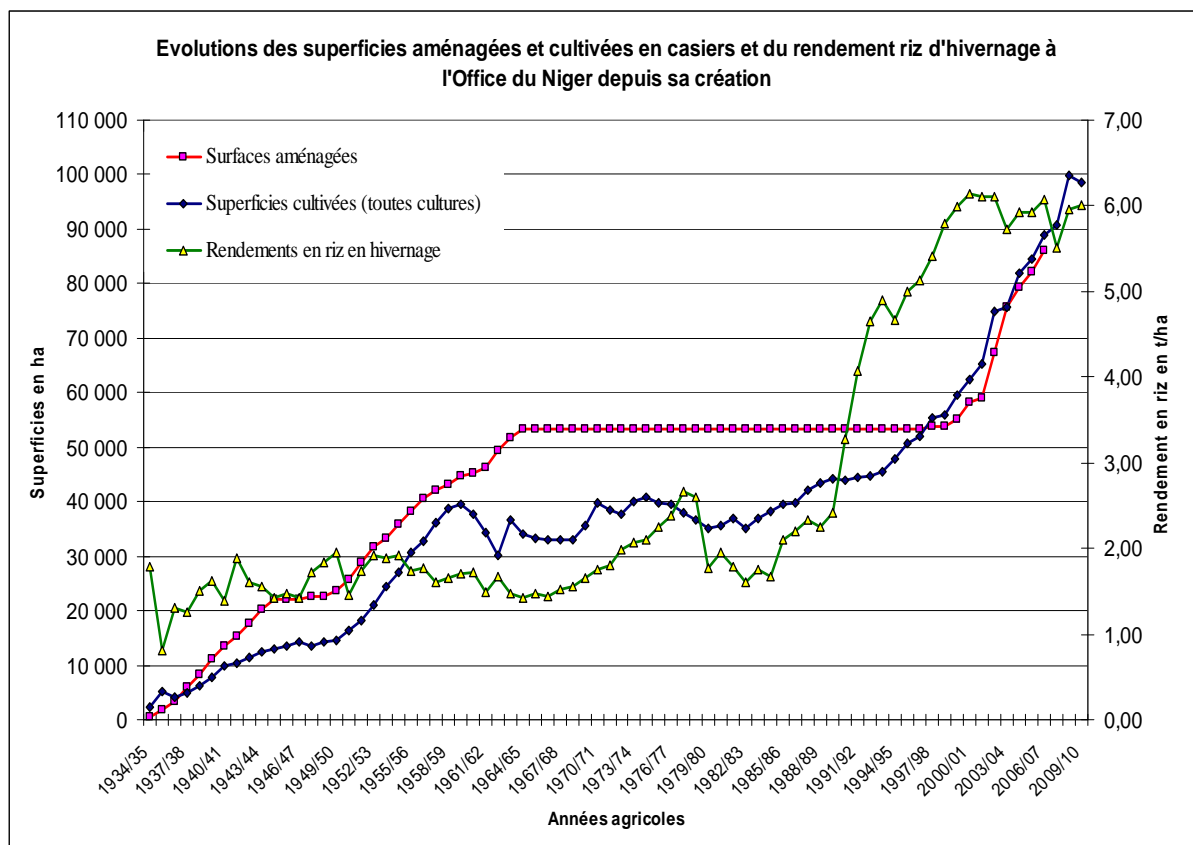


Figure 1- 7: Evolution des superficies aménagées et cultivées en casiers et du rendement riz d'hivernage à l'Office du Niger depuis sa création (*Source : Elaboré à partir des données de l'Office du Niger par Jean François BELIERES, 2000 et B. TANGARA, 2010*).

1.6.3 UNE POLITIQUE DE REHABILITATION DES AMENAGEMENTS COUPLEE A UNE AMELIORATION DU NIVEAU D'INTENSIFICATION DE 1991 A 2000.

La politique de réhabilitation des aménagements, entamée en 1980, a pris un tournant décisif en 1986 avec la création du projet Retail, un projet d'intensification de la riziculture irriguée dans le secteur Sahel de la zone de Niono. Elle s'est traduite par une augmentation spectaculaire des rendements en riz et du taux d'intensification qui ont atteint respectivement 5t/ha et 100% au cours de la campagne 1999/2000.

1.6.3.1 UNE AUGMENTATION DES SURFACES AMENAGEES COUPLEES A UNE ADOPTION GENERALISEE DE L'INTENSIFICATION AGRICOLE A PARTIR DE 2000.

A partir de 2000 les superficies cultivées (toutes cultures) ne cessent d'augmenter et atteignent en 2006/07 86000 ha aménagées pour 89000 ha cultivées. A celles-ci, s'ajoutent des périmètres dits « hors-casiers » (environ 8000ha), qui sont des aménagements sommaires réalisés par des exploitants en bordure des canaux du réseau primaire et des drains principaux.

En 2006/07, avec l'adoption des bonnes pratiques culturales (nouvelles variétés, repiquage du riz, fertilisations adaptées, techniques de labour et de contrôle des nuisibles ...), le rendement moyen du riz paddy a avoisiné les 6 tonnes/ha. On notera néanmoins que cette augmentation spectaculaire des superficies aménagées et cultivées va de paire avec celle des volumes d'eau mobilisés dans le système au profit des cultures.

1.6.3.2 EVOLUTION DES SYSTEMES DE CULTURES A L'OFFICE DU NIGER

A l'Office du Niger, le système de production était initialement basé sur le coton pour satisfaire les besoins de l'industrie textile française. Le riz n'était cultivé que pour satisfaire les besoins de consommation alimentaire locale. Avec l'abandon du coton au début des années 70 (*Jamin, 1994 [2]*), pour des raisons techniques et socio-économiques, le riz est devenu la principale culture. Face à la forte pression foncière menée par les producteurs pour la recherche de leur autosuffisance alimentaire, et l'ambition du gouvernement du Mali de faire de l'Office du Niger un véritable grenier à riz pour la sous-région par l'augmentant la production rizicole, les objectifs affichés par l'Office du Niger sont alors entre autres, d'augmenter progressivement les surfaces et d'intensifier la riziculture. La

réhabilitation des années 80 répondait déjà à cet objectif d'intensification puisqu'à l'époque, les aménagements étaient dans un état de dégradation avancé et la situation économique et sociale des producteurs n'était pas bonne (Fiquet, 2003 [8]). Il fut alors été décidé de consolider l'existant et d'accorder la priorité à la réhabilitation des casiers pour intensifier la production rizicole et ainsi contribuer aux objectifs d'autosuffisance alimentaire du pays.

Avec le projet Retail³ en 1986 dans le secteur sahel de la zone de Niono (Figure 1- 5), la réhabilitation a également favorisé, en plus de la simple culture de riz d'hivernage, la double culture du riz, c'est-à-dire deux cultures de riz successives dans une année (riz d'hivernage et riz de la saison sèche chaude) et l'intégration du maraîchage dans les cultures irriguées. Des parcelles maraîchères et de double culture de riz sont donc dégagées à cet effet pour chaque producteur du casier. Le projet prévoyait pour chaque exploitant au moins 10% de sa superficie pour la double culture.

Les superficies emblavées en riz sont aujourd'hui nettement supérieures à celles exploitées en maraîchage (Figure 1- 8).

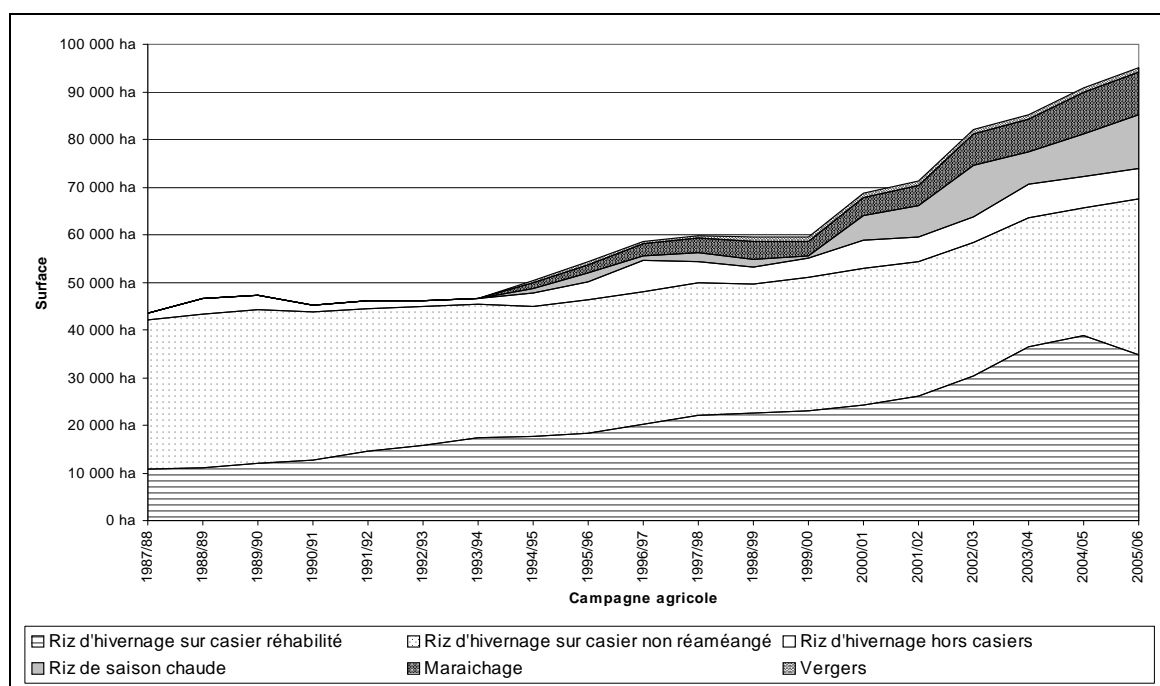


Figure 1- 8: Evolution des superficies cultivées par types d'aménagements, par saison et spéculations à l'Office du Niger de 1987 à 2006. Source : Elaboré à partir des données de l'Office du Niger par Jean François BELIERS.

³ Projet de recherche développement testant en vraie grandeur l'intensification et la diversification (maraîchage) de la riziculture irriguée sur les casiers réhabilités.

Cette culture de diversification connaît un accroissement progressif d'une campagne agricole à l'autre, imputable à l'occupation des parcelles de simple culture de riz d'hivernage. Les superficies cultivées (riz et maraîchage) en contre-saison ont été multipliées par 10 en une douzaine de campagnes agricoles à l'Office du Niger. Cette dynamique s'est traduite par une diversification des successions culturales avec l'apparition du maraîchage dans les parcelles de simple culture de riz en contre-saison froide. Cette nouvelle dynamique de mise en valeur des parcelles n'est pas sans effet sur les bilans en eaux et la dynamique de la nappe phréatique à l'intérieur du système.

1.7 MODES ET PERFORMANCES DE LA GESTION DE L'EAU A L'OFFICE DU NIGER : ETAT DES CONNAISSANCES

1.7.1 PRINCIPES ET MODES DE GESTION DE L'EAU A L'OFFICE DU NIGER

Suite à la restructuration de l'Office du Niger, les tâches du pilotage de l'irrigation et de maintenance du réseau hydraulique sont partagées entre l'Office du Niger et les exploitants.

1.7.1.1 L'ORGANISATION DE LA GESTION DE L'EAU AU NIVEAU DU RESEAU PRIMAIRE

La direction générale de l'Office du Niger à travers le SERP est responsable de l'exploitation et de la maintenance du barrage et des ouvrages de régulation sur les grands axes hydrauliques : régulation et de l'entretien du réseau primaire, exploitation du barrage de Markala pour garantir la côte d'irrigation, régulation du plan d'eau dans les grands canaux adducteurs de transport pour assurer la distribution de l'eau vers les zones de production de l'Office du Niger, entretien des ouvrages et des canaux). Le SERP n'est pas responsable des prélèvements par les zones *via* les prises des différents distributeurs sur le réseau primaire qui alimentent les casiers aménagés des zones de production. Cette logique de commande par aval par les zones, délègue *de facto* une grande responsabilité aux chefs de gestion de l'eau de ces zones dont l'importance des prélèvements peut causer des perturbations importantes sur le réseau primaire.

a) Gestion du barrage de Markala.

Le but de l'ouvrage de Markala étant de rehausser le plan d'eau du fleuve pour permettre d'irriguer les aménagements de l'Office du Niger, c'est surtout le niveau d'eau à l'amont du barrage qui retient l'attention du SERP. Ce paramètre est utilisé pour décider les

manœuvres d'ouverture et de fermeture des vannes du barrage. Le SERP dispose d'un document servant de manuel d'utilisateur pour le barrage (SOGREAH, 1997 [9]), renfermant les règles d'utilisation réactualisées du barrage de Markala par l'Office du Niger

Le SERP collecte les hauteurs d'eau à l'amont et à l'aval du barrage, ainsi que l'ouverture des vannes à hausse basculante⁴ et le cas échéant les hauteurs de pluies à Markala. La lecture du niveau d'eau à l'amont du barrage chaque matin à 7 heures par l'éclusier, permet de comparer le niveau d'eau en amont du barrage à la côte d'irrigation (côte de consigne du barrage). Si une manœuvre est nécessaire, elle est exécutée le même jour. Les opérations de régulation du plan d'eau du barrage se font en trois phases :

1. lecture des échelles par l'éclusier de Markala à l'amont et à l'aval du barrage et transcription manuelle dans le registre et cahier, et puis compte rendu au chef du SERP,
2. appréciation de la variation du plan d'eau par le chef de service, qui ordonne les manœuvres,
3. manœuvre d'ouverture ou de fermeture des passes du barrage pour tenter le réglage du plan d'eau au tour de la côte de consigne du barrage ; l'efficacité de la manœuvre sera appréciée le lendemain.

En général les manœuvres de fermeture commencent en octobre et se terminent en juin. De juillet à septembre, pendant la crue, le nombre de manœuvre d'ouverture est plus élevé pour réguler le plan d'eau au tour de la côte de consigne du barrage.

La gestion du barrage de Markala influence le régime du fleuve Niger en étiage : les 2,6 milliards de mètres cubes prélevés par l'Office du Niger par an, représentent 10% de l'apport total. Sur ce volume, 41% est prélevé en étiage, de janvier à juin (Hassane, 1999 [11]). Cette situation se traduit par des fluctuations brusques des débits du fleuve à l'aval pendant cette période. La gestion du barrage de Markala doit en tenir compte. Le barrage étant commandé par l'amont, l'utilisation des données hydrologiques des stations à l'amont (Sélingué, Banankoro et Koulikoro) est d'une importance capitale pour la sécurité du barrage pendant les crues et aussi que pour assurer la gestion des débits d'étiage. On notera néanmoins que le gestionnaire n'a pas accès d'une façon systématique à ces informations.

⁴ Le degré d'ouverture est défini comme suit : P1, vanne fermé (80°) ; P2, vanne semi-fermée (pas d'utilisée) ; P3, vanne semi-ouverte (45°) ; P4, ouverte (position d'effacement complet).

b) Gestion du réseau des adducteurs.

Le SERP doit réguler le niveau d'eau dans les grands adducteurs en permanence autour des côtes d'irrigation en vigueur pour garantir l'irrigation gravitaire dans l'ensemble de la zone aménagée de l'Office du Niger. Pour cela il dispose des ouvrages de régulation, équipés de vannes et d'échelles de suivi des cotes du plan d'eau. Chaque ouvrage est équipé de vannes jaugées permettant (i) de faire varier les débits, (ii) assécher les canaux en cas de réparation.

Pour assurer la régulation des grands ouvrages, le SERP a disposé en 1980 d'un outil de régulation, le système BIVAL⁵ sur le premier bief du *Fala* de Molodo. Cet outil permettait de raccourcir le temps de réponse du système hydraulique pour mieux répondre aux changements des besoins en eau des zones de production. La régulation BIVAL a été en particulier critiquée par Hamel (*Hamel, 1998.[10]*), qui a souligné qu'elle assimile les falas à un canal plus ou moins uniforme sur toute sa longueur alors qu'ils sont de larges réservoirs à très faible pente (2 à 3 cm/Km), alimentés par des canaux adducteurs étroits à pente relativement forte (6 à 10 cm/Km). Un autre outil de gestion développé avec le soutien du programme ARPON, est basé sur la calcul d'un bilan volumétrique journalier avec apport et prélèvement en fonction des débits des ouvrages de prises, des superficies sous irrigation et la pluviométrie (*Hamel, 1998.[11]*).

Pour les autres biefs, il n'y a pas d'outil précis d'aide à la décision. Le SERP se contente des côtes du jour au barrage, aux points A, B, C et au déversoir de Kolongo pour décider les manœuvres de régulation.

1.7.1.2 GESTION DE L'EAU AU NIVEAU DU RESEAU D'IRRIGATION

a) Organisation institutionnelle de la gestion de l'eau au niveau du réseau d'irrigation

Sous la direction du Directeur de zone, le Service Gestion Eau (SGE) a en charge la gestion de l'eau. La gestion des prises et ouvrages hydrauliques est réalisée par les éclusiers (au niveau distributeur) et aiguadiers (au niveau partiteurs et/ou prises d'arroseur). Outre l'entretien du réseau (distributeur et partiteur), le SGE est chargé du recouvrement de la

⁵ La méthode BIVAL consiste à maintenir le volume d'eau constant dans un bief, en faisant pivoter la ligne d'eau autour d'un point fictif situé au centre du bief (SOGREAH, 1993)

redevance eau dont 55% contribue aux frais d'entretien du réseau et au fonctionnement des zones et du siège et 45% au compte de l'Etat pour contribuer à l'entretien du barrage et de ses ouvrages annexes. Le SGE coordonne les activités et s'assure de la bonne communication entre les différents agents (chef de casier, éclusiers, aiguadiers). L'Office du Niger collabore avec les exploitants par l'intermédiaire du chef d'arroseur ou chef d'OERT (Organisation de l'Entretien du Réseau Tertiaire) qui surveille les opérations d'arrosage, surveille l'état de l'arroseur et du drain d'arroseur et communique avec l'Aiguadier.

Au niveau de l'arroseur, les exploitants sont collectivement responsables de la gestion de l'eau.

b) Règles générales de gestion de l'eau au niveau du réseau d'irrigation

Dans tous les types d'aménagement, le réseau est conçu pour une irrigation de 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7, avec une rotation de l'irrigation prévue au niveau des rigoles d'un arroseur. En dehors des périodes de pointe, le volume d'eau délivré par le débit nominal de l'arroseur est bien supérieur aux besoins. Un réglage régulier des prises d'arroseurs est donc supposé. Actuellement, l'offre en irrigation au niveau de la prise d'arroseur est faite à la demande. Les exploitants peuvent soit régler eux-mêmes la prise d'arroseur (casiers non-réaménagés et du type Arpon) soit contacter l'aiguadier pour l'ouverture et la fermeture de la prise si celle-ci est sécurisée avec un cadenas (casiers du type Retail). A chaque niveau du réseau, les responsables de la gestion de l'eau répondent à la demande en aval en maintenant le niveau d'eau autour d'une cote optimale. La fluctuation de la demande en aval est pondérée par la capacité de stockage considérable des canaux. La programmation d'une gestion de l'eau suppose un calendrier agricole, convenu entre gestionnaires et agriculteurs afin de permettre de connaître les besoins d'irrigation et de drainage des casiers. Ce calendrier agricole est uniforme pour toutes les zones et assez souple pour tenir compte de la double culture du riz. Bien que certains périmètres sont réhabilités, et d'autres en instance de réhabilitation, l'Office du Niger s'est engagé à améliorer la consommation d'eau pour atteindre 15 000 m³/ha au niveau de l'arroseur), voir en dessous (*Keïta N. et al., 1999 [12]*). Cet objectif ne pourra être atteint sans l'engagement des zones en vue de maîtriser la gestion de l'eau, en passant par un suivi de la distribution de l'eau en termes de débits.

c) Principe de la gestion de l'eau dans les zones réhabilitées

La différence entre les projets de réhabilitation est surtout basée sur le choix des ouvrages de prise et de régulation depuis le distributeur jusqu'aux rigoles.

Dans les zones réhabilitées, toutes les prises des distributeurs sont commandées par l'aval soit automatiquement, soit manuellement. Les prises des partiteurs et des arroseurs sont commandées par l'amont. Les prises des arroseurs sont en général sans système de verrouillage pour que l'aiguadier et le chef d'arroseur imposent les principes de gestion prévus pour la gestion de l'eau. Par une régulation automatique à niveau aval constant sur les distributeurs, il est clair que sans une connaissance précise des besoins par partiteur et par arroseur, les débits livrés par le régulateur dépendent du nombre d'agriculteurs qui ouvrent simultanément leurs rigoles d'arrosage. Il peut résulter, par manque de planning d'arrosage, soit un gaspillage d'eau parce qu'elle est disponible à volonté, soit une pénurie d'eau parce que tout le monde veut utiliser en même temps.

d) Principe de la gestion de l'eau dans les zones non réhabilitées

Dans les zones non réhabilitées, le réseau est dégradé. L'ensemble des prises est commandé par l'amont. Les prises sont en général équipées de vannes plates ou de batardeaux ne permettant pas un réglage facile. La maîtrise de l'eau n'est pas totale à cause d'un temps de réponse important et d'un manque de planage des parcelles. Il en résulte des problèmes de drainage pour les parcelles situées en zone basse ou de manque d'eau pour celles situées en zone haute. L'agriculteur adapte alors son calendrier agricole suivant les contraintes liées aux contraintes de gestion de l'eau. Les prises des partiteurs et arroseurs sans fermeture de sécurité sont manipulables par n'importe qui, il est dans ces conditions difficile aux gestionnaires (aiguadier et chef d'arroseur) d'imposer une discipline consensuelle pour l'arrosage (application du tour d'eau).

1.7.2 EFFICIENCE HYDRAULIQUE DE LA GESTION DE L'EAU A L'OFFICE DU NIGER : ÉTAT DES CONNAISSANCES

L'efficacité hydraulique de tout système irrigué est le reflet non seulement des caractéristiques de ce système, mais aussi et surtout des pratiques des différents acteurs en charge de la gestion de l'irrigation. Sachant que ces pratiques régissent l'ossature du bilan hydrique qui gouverne la dynamique hydrique du milieu, il serait intéressant, sur la base des

différentes études déjà menées, d'analyser le niveau actuel de la performance hydraulique à l'Office du Niger.

1.7.2.1 EFFICIENCE HYDRAULIQUE DE L'ENSEMBLE DU SYSTEME HYDRAULIQUE DE L'OFFICE DU NIGER

Les différentes études (Hamel et al, 1998 [10]; Barral & Tangara, 1998 [14]; Van Keulen & Hamel, 1996 [15]; Hamel et al, 1997 [16]; Marlet et al, 1998 [17]; Ouvry & Marlet, 1999 [18]; Tangara, 2001 dans PSI-Mali, 2001 [19]) ont employé une plusieurs d'indicateurs de performance et procédures de calcul qui rendent la comparaison souvent difficile. Néanmoins, à partir des données brutes publiées dans les rapports, des indicateurs de performance uniformes (consommation par hectare, l'efficacité d'irrigation, l'efficacité de transport et le ratio A/B) ont pu être calculés par Vandersypen et al. (2007) [20].

L'efficacité moyenne a été estimée à de l'ordre de 25% (26% pour l'hivernage et 23% pour la contre-saison malgré une consommation par hectare, nettement supérieure par rapport à l'hivernage). La consommation par hectare n'est donc pas un bon indicateur pour comparer la performance hydraulique des deux campagnes (Vandersypen, 2007 [20]).

Selon Barral & Tangara (1998) [14], la mise en eau du réseau pour irriguer des superficies faibles occasionne des pertes énormes pendant la contre-saison. Pour Marlet et al. (1997) [17] et Ouvry & Marlet (1999) [18], considérant une surface cultivée en contre-saison estimée à 20 % de la surface totale, l'efficacité pendant la contre-saison est au même niveau que l'efficacité pendant l'hivernage. En Considérant que la performance du Système Sahel est représentative de celle de l'ensemble de l'Office du Niger, les auteurs ont estimé l'efficacité globale à environ 25 %.

Dans leur étude, Ouvry, Marlet & Tangara (1999) [18] ont estimé les différentes sources de pertes au niveau du Système Sahel sur la base d'un bilan hydrique. Environ 25 % de la consommation en eau annuelle sont effectivement utilisés par les cultures. La plus grande source de perte à l'intérieur du Système Sahel se situe au niveau du *Fala* de Molodo où 44 % se perdent dans le *Fala* (43 % pendant la campagne hivernale et 47 % en contre-saison). Dans ces pertes sont compris l'évaporation et la percolation dans le *Fala* qui constituent des pertes fixes, mais aussi l'eau déversée au niveau du Point C. Ces études confirment les constatations de Hamel et al, 1997 [16]: l'efficacité hydraulique du système

Sahel chute fortement au début et à la fin de la campagne d'hivernage car les pertes physiques (percolation et évapotranspiration) dans les canaux adducteurs, les *Falas* et les canaux de distribution sont peu influencées par le débit transité.

Une synthèse de ces deux études est illustrée par le *Tableau 1-1*. Elle met en évidence que les pertes d'eau par déversement au point C, sont environ de 50 % des pertes totales dans le *Fala en hivernage*. Elles sont évitables par une meilleure gestion de l'eau. Il existe donc un potentiel d'amélioration de l'efficacité de transport du réseau primaire de 56 % à 68 % avec le même volume d'eau transité (*Vandersypen et al. 2007 [20]*). Ce chiffre peut encore monter lorsque la superficie irriguée dépendant du réseau primaire augmente et alors le volume d'eau transité augmente.

Tableau 1- 1 : Différentes sources de pertes dans le Fala de Molodo.

| | Pertes totales | Pertes du Point A à C [#] | | Déversement par le Point C | |
|---|-------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| | M ³ /s | m ³ /s | % des pertes totales | m ³ /s | % des pertes totales |
| Moyenne annuelle | 21 | 13 | 61 | 8 | 39 |
| Moyenne hivernage | 25 | 12 | 50 | 13 | 50 |
| Moyenne contre-saison | 15 | 13 | 87 | 2 | 13 |
| * Source : Ouvry, Marlet & Tangara, 1999 | | | | | |
| # Source : Hamel 1998, dans Marlet <i>et al.</i> 1998 | | | | | |

1.7.2.2 EFFICIENCE HYDRAULIQUE AU NIVEAU DES CASIERS RIZICOLES

Trois études ont évalué la performance hydraulique au niveau du casier rizicole : (1) *Hamel et al. (1998) [10]* ont pris en compte tous les types d'aménagements au niveau des casiers, les hors-casiers et un casier submersible ; (2) *Marlet et al. (1998, 1999) [4] [17]* ont évalué la performance du casier Retail pendant l'hivernage et la contre-saison de plusieurs années et enfin, (3) *Tangara (2001) dans le rapport du PSI-Mali (2001) [19]* a évalué la consommation du casier Retail pour l'hivernage 2000. Il ressort de ces études que l'efficacité au niveau du casier rizicole (moyenne de 45%), calculée à partir du bilan hydrique, varie entre 31 % et 56 %, valeurs basses par rapport aux normes de 50 % à 54 % établies pour les différents types d'aménagements (*Tableau 1-2*).

Tableau 1- 2: Normes techniques de l'efficacité de transport ; (Source: Office du Niger 1995, dans Barral et Tangara 1997)

| Efficacité (%) | Retail | Arpon | N'Debougou | Recommandation mission d'harmonisation |
|----------------|--------|-------|------------|--|
| Arroseur | 80 | 80 | 70 | 80 |
| Partiteur | 83 | 85 | 80 | 83 |
| Distributeur | 80 | 85 | 80 | 80 |
| Total | 53 | 54 | 50 | 53 |

Ces études montrent que l'efficacité au niveau du casier est surtout déterminée par des pertes en aval du distributeur. La consommation par hectare au niveau du casier est bien supérieure pendant la contre-saison (moyenne de 35 000 m³/ha) qu'en hivernage (moyenne de 15 000 m³/ha). L'absence de pluie pendant la contre-saison fait que les besoins sont plus forts, de sorte que l'efficacité est comparable pour les deux campagnes et se situe autour de 45 %. Elles montrent que les casiers réaménagés ne sont pas plus performants que les casiers non réaménagés. Contrairement aux casiers réaménagés, dans les casiers non réaménagés, l'efficacité augmente graduellement du niveau distributeur et partiteur vers le niveau arroseur (*Vandersypen et al, 2007 [20]*). Les pertes se situent donc plutôt au niveau des distributeurs et des partiteurs. Le réaménagement peut ainsi contribuer à une amélioration de la performance hydraulique.

1.7.2.3 EFFICIENCE HYDRAULIQUE AU NIVEAU PARTITEUR

Six études ((1) *Hamel et al, 1998 [10]*; (2) *Van Keulen & Hamel, 1997 [16]*; (3) *Barral & Tanqara, 1997 [22]*; (4) *Ouvry, Marlet & Tanqara, 1999 [23]*; (5) *Tanqara, 2001 [21]*; (6) *Mission d'appui à la zone de N'Débougou, 2000*), couvrant la période 1995 à 2000 ont caractérisé l'efficacité hydraulique à l'échelle du partiteur essentiellement pendant l'hivernage. Les niveaux de consommation d'eau (de 10 000 à presque 19 000 m³/ha) et l'efficacité (40 à 87 %) des partiteurs sont beaucoup plus variables que celle des distributeurs. Le mode de gestion de l'aiguadier, et sa capacité à prendre en compte la pluie, en sont peut être la cause principale. Au regard de ces analyses, l'efficacité de transport au niveau du partiteur se situe autour des normes qui varient de 80 à 85 % (*Tableau 1-2*).

Les données fournies par la zone de N'Débougou ont permis de faire une comparaison de la performance hydraulique au niveau du partiteur entre l'hivernage et la contre-saison. Elles montrent qu'au niveau partiteur l'efficacité pendant cette période de contre-saison est plus élevée sur les trois casiers suivis (*Figure 1- 9*).

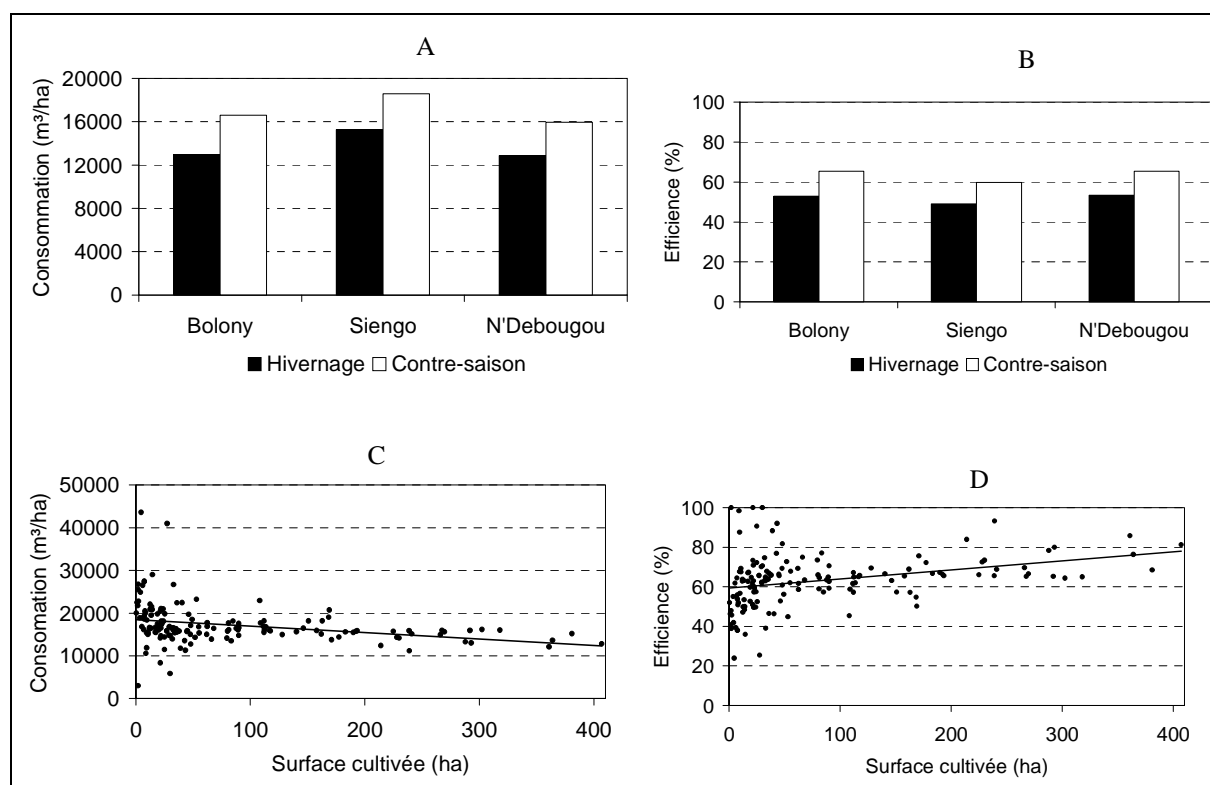


Figure 1- 9: Consommation et efficacité au niveau du partiteur pendant la campagne d'hivernage et de contre-saison pour les différents casiers de la zone de N'Débougou (A et B) et pendant la contre-saison en fonction de la surface irriguée (C et D). Source : Vandersypen *et al.* 2007.

1.7.2.4 EFFICACITÉ HYDRAULIQUE AU NIVEAU ARROSEUR

L'échelle de l'arroseur a fait l'objet de plus d'une dizaine d'études couvrant une période allant de 1987 à 2004 (Vandersypen *et al.*, 2007 [20]). L'efficacité moyenne (46%) reste bien en dessous des normes stipulées pour les différents types d'aménagements (Tableau 1-2). Elles montrent que la plus grande partie des pertes d'eau se situent au niveau de l'arroseur.

La consommation en eau (moyenne de 18200 m³/ha) et l'efficacité de l'irrigation (moyenne de 46%) au cours de ces vingt dernières années à l'échelle de l'arroseur montrent une tendance statut quo au moins depuis 1995 (Vandersypen *et al.*, 2007 [20]). Tant que l'eau reste abondante, il sera très difficile de motiver les acteurs à modifier leur comportement. La consommation en eau étant relativement stable comparée à l'efficacité, suggère qu'elle n'est pas adaptée en fonction de la pluviométrie.

L'effet de la réhabilitation n'est pas marqué (*Figure 1- 10*). Bien au contraire, avec une consommation moyenne inférieure à 10 000 m³/ha, les arroseurs non-réaménagés sont les moins consommateurs avec une efficacité d'irrigation beaucoup plus forte.

La raison est à chercher surtout dans l'état du réseau de drainage. En particulier, l'absence d'un réseau de drainage fonctionnel empêche la surconsommation dans les casiers non réaménagés.

La marge de progression reste importante. Un test réalisé au niveau du partiteur K5 (*Van Keulen & Hamel, 1997 [15]*) dans le casier de Kogoni conçu pour améliorer l'efficacité à travers une communication institutionnalisée entre l'aiguadier et les exploitants concernant le planning des irrigations, a permis d'augmenter l'efficacité de façon spectaculaire pour les arroseurs concernés (45 % en 1995 contre 96 % en 1996).

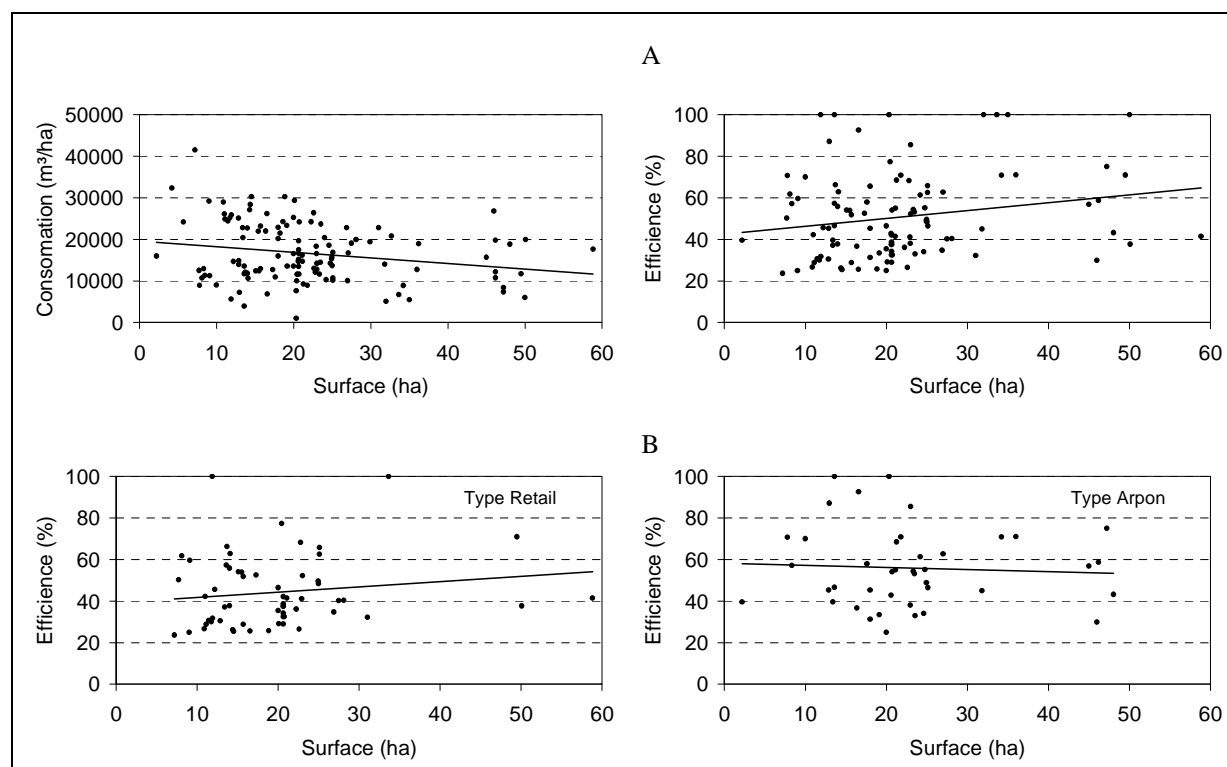


Figure 1- 10: Consommation et efficacité pendant l'hivernage au niveau de l'arroseur en fonction de la surface irriguée (A) et par type d'aménagement (B) ; Source : Vandersypen, 2007.

1.7.2.5 CONCLUSIONS SUR L'EFFICACITÉ HYDRAULIQUE DE LA GESTION ACTUELLE DE L'EAU.

L'ensemble des études disponibles concluent que l'efficacité globale de l'irrigation à l'échelle de tout l'Office du Niger peut être estimée à environ 25 % cela veut dire que seulement 25 % de l'eau dérivée au niveau du Point A sont effectivement utilisés par les

cultures, tandis que 75 % de cette eau se perd. La principale source de pertes d'eau à l'Office du Niger est les *Falas*, qui représentent 60% des pertes. Si les pertes par percolation et évaporation sont inévitables, minimiser les débordements au point C permettrait d'améliorer significativement l'efficacité du transport de l'eau du *Fala* de Molodo en passant des 56% actuels à 68% pour le même volume d'eau transité.

Environ 40 % des pertes se situent au niveau des casiers. La plupart de ces pertes se situent au niveau de l'arroseur. L'efficacité à ce niveau est très variable et surtout fonction des possibilités de drainage et du mode de gestion de l'eau de tous les acteurs (Aiguadiers et Exploitants) concernées.

Ces études mettent toutes en évidence que :

- a) Les pratiques de gestion de l'eau à tous les niveaux sont caractérisées par l'objectif principal de satisfaire la demande en eau avec un minimum de contraintes (Vandersypen, 2007 [24]) qu'elles qu'en soient les conséquences sur les pertes. Ceci n'est possible que parce que l'offre en eau dépasse largement la demande. Les pratiques de gestion de l'eau sont donc le principal coupable des pertes.
- b) Compte tenu des pratiques de gestion de l'eau actuelle, le type d'aménagement a un impact faible sur la performance hydraulique bien que des structures hydrauliques plus sophistiquées facilitent la gestion de l'eau.
- c) En contre-saison, souvent accusée d'être trop consommatrice en eau, l'efficacité globale au niveau de l'Office du Niger est au même niveau pendant la contre-saison que pendant l'hivernage.

Une gestion rationnelle de la ressource en eau à l'Office du Niger s'impose en vu de l'extension des surfaces irriguées et de la demande en eau croissante dans le bassin du fleuve Niger.

1.8 BILAN HYDROLOGIQUE A L'OFFICE DU NIGER : ETAT DES CONNAISSANCES

D'après Rey (1996), cité dans Hassane (1999) [11], tout système d'information d'irrigation a une fonction *de commande* (gérer la distribution de l'eau en temps réel) et une fonction *d'évaluation* (efficacité de la gestion de l'eau). C'est dans ce contexte que l'évaluation du bilan hydrologique à l'Office du Niger a été abordée aux différentes échelles

du réseau. Ces études se sont limitées aux simples évaluations des éléments du bilan pour apprécier la gestion actuelle de l'eau et son impact à l'instant T sur le système, avant de faire des propositions d'améliorations. Par contre, elles n'ont pas pris en compte, ou du moins faiblement, l'impact de cette gestion à long terme sur la dynamique de la nappe phréatique en fonction du développement des systèmes de cultures et de l'accroissement des superficies aménagées et cultivées, que cette thèse se propose de faire.

1.8.1 BILAN HYDROLOGIQUE A L'ECHELLE DU RESEAU PRIMAIRE

Au niveau des grands systèmes hydrauliques (adducteurs) de l'Office du Niger, le système Sahel (Canal du Sahel et *Fala* de Molodo) est supposé être représentatif de la totalité de l'Office du Niger en termes de performance hydraulique (Vandersypen et al, 2007[20]), compte tenu du fait qu'une partie de l'eau consommée par le canal du Macina, jusque là non évaluée, est déversée à nouveau dans le fleuve Niger.

Plusieurs études ont été menées au niveau du système Sahel, de 1993 à 2000 (Hamel, 1998 [10]; Barral & Tanqara, 1997 [14]; Marlet et al, 1998 [4]; Ouvry & Marlet 1999 [18]; Hassane & Kupper, 1999 [25]). Elles sont basées sur l'établissement du bilan d'eau utilisant l'équation suivante :

$$I_{am}-I_{av}-D=E+If+dS-P, \quad \text{équation (1)}$$

avec:

I_{am} : apports d'irrigation à point A (m^3) ;

I_{av} : volume d'eau (m^3) fourni aux zones de Molodo, Niono, N'Débougou, Kouroumari et aux hors- casiers ;

D : Drainage (point C) en m^3 ;

E : Evaporation de la nappe libre (m^3), calculée en prenant un taux d'évaporation de 2675 mm (Ouvry et al, 1999[18]) et une surface du plan d'eau du réseau primaire de 3000 ha (H'ND, 1998[26]) ;

If : infiltration (valeur positive) ou restitution (valeur négative), déterminée par le bilan hydrologique.

P : pluviométrie (m^3), déterminée en prenant la moyenne des pluies (350 mm) pour les stations de la zone, multipliée par la surface de 3000 ha du réseau primaire.

dS : Stockage en m^3 (peut être négatif), est la différence entre le volume stocké dans le réseau primaire (canal du sahel-*Fala*) entre le début et la fin de la période choisie

Les valeurs des différents termes sont illustrées par le Tableau 1- 3

Tableau 1- 3: Bilan hydrologique annuel (juin 98 - mai 99) du système canal du Sahel de l'Office du Niger (Hassane & Kupper, 1999).

| Unités | I_{am} | P | E | I_f | D | dS | I_{av} |
|-------------------------------------|----------|------|-------|--------|-------|-------|----------|
| Volume (million de m ³) | 1837.57 | 10,5 | 80,25 | 235,72 | 96,69 | -4,32 | 1439,74 |
| Débit (m ³ /s) | 58,3 | 0,3 | 2,5 | 7,5 | -0,1 | -1,6 | 4,7 |

On remarque l'importance des incertitudes, la valeur des pertes annuelles variant du simple au double suivant les auteurs, ($I_{am} - I_{av}$) égale à 12,7 m³/s, soit 22% du débit entrant dans le réseau primaire (canal du Sahel-Fala de Molodo) selon Olivry (1994) et Hamel (1998) [10]; , tandis que Ouvry & Marlet (1999) [18] trouvent une valeur de 25 m³/s de juin à octobre, et 15 m³/s de novembre à mai. Tous les auteurs démontrent que les pertes sont significativement plus importantes pendant la contre-saison comme l'illustre la Figure 1- 11.

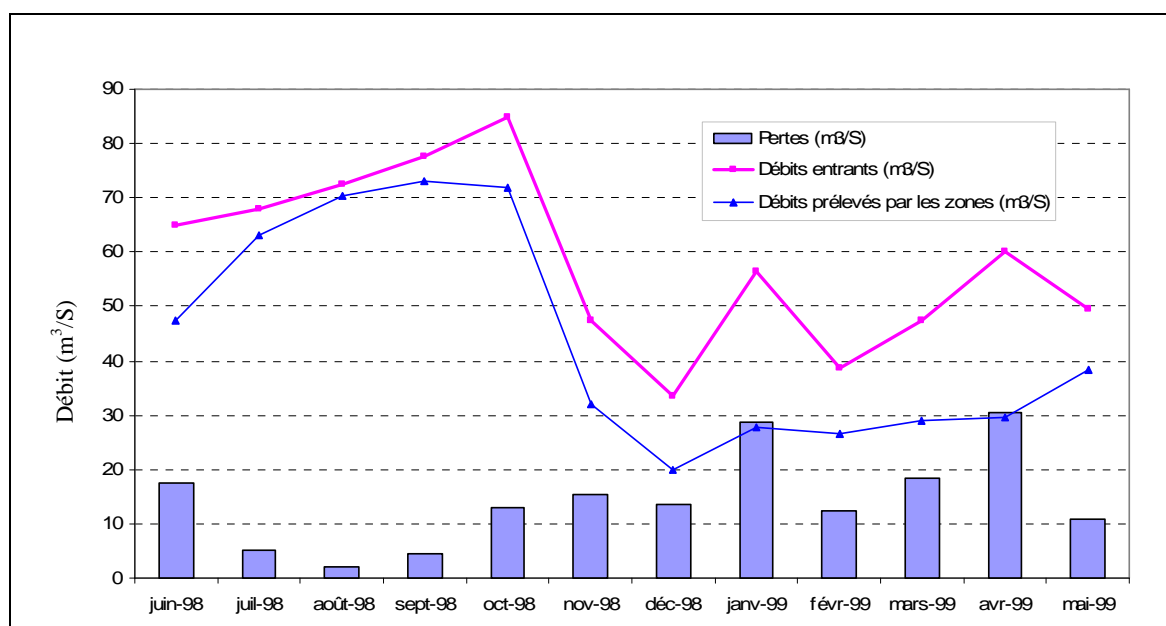


Figure 1- 11: Pertes (en m³) dans le réseau primaire en fonction du débit entrant et du débit prélevé par les zones (m³/s) de juin 1998 à mai 1999. Source : Hassane & Kupper (1999)

1.8.2 BILAN HYDROLOGIQUE A L'ECHELLE DES ZONES IRRIGUEES

L'équation du bilan au niveau du réseau primaire (équation 1) devient :

$$I - B - D = E + Pe - P \quad \text{équation (2)}$$

avec :

I, les prélèvements d'irrigation des zones (I_{av}) ;

B, les besoins en eau, composés de l'ETr et de la pré irrigation, estimés à 13600 m³ pour l'hivernage et 15400 m³ pour la contre-saison (Ouvry *et al.*, 1999) ;

D: Drainage en m³

Pe, la percolation estimée à 1 mm/j

P: pluviométrie (m³).

L'estimation des termes de ce bilan sont illustrés par le Tableau 1- 4 (Hassane et Kupper 1999) [25]. Cette approche permet d'estimer le débit des drains qui évacuent 24,9 m³/s en moyenne par an, soit 785 millions de m³, 49% de la disponibilité ($I+P$) en eau.

Des mesures de débit effectuées par Hamel et al. 1997 [10];, Barral et al. (1997) [14], et Ouvry et al. (1999) [18] (Tableau 1-5) au niveau des sept drains principaux du système du Sahel confirme les résultats du bilan hydrologique.

Tableau 1- 4 : Bilan hydrologique des zones du système Sahel de l'Office du Niger de juin 1998 à mai 1999 (en m³/s) ; Source : Hassane & Kupper (1999), complété par Tangara (2010).

| Zones | P | I | B (hivernage) | B(contre-saison) | Pe | D |
|----------------------|-----|------|---------------|------------------|-----|------|
| Niono | 1,3 | 10,4 | 4,7 | 0,5 | 0,6 | 5,9 |
| Molodo | 0,9 | 3,1 | 3,4 | 0,02 | 0,5 | 0,2 |
| N'Débougou | 1,1 | 15,1 | 4,4 | 0,5 | 0,6 | 10,7 |
| Kouroumari | 1,1 | 10,5 | 5,6 | 0,6 | 0,7 | 4,7 |
| Hors casiers | 0,8 | 6,4 | 3,1 | 0,4 | 0,4 | 3,3 |
| Total Kala Inférieur | 4,1 | 35,2 | 15,6 | 1,62 | 2,1 | 20,1 |
| Total Sahel | 5,2 | 45,7 | 21,2 | 2,0 | 2,8 | 24,9 |

Tableau 1- 5 : Mesures de débits effectuées sur des drains par le projet ARPON (Hamel *et al*, 1996), Barral *et al*, (1997), et Ouvry *et al*, (1999). Source : Hassane & Kupper (1999).

| Drains | Casiers | Zones | Superfici es (ha) | Débit spécifique (l/s/ha) | Débits (m ³ /s) | Dates |
|--------------|-----------------------------|----------------|----------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------|
| Siébougou | Kolodougou | Niono | 1500 | 1 | 1.5 | 8/11/95 |
| Kouia | Kouia/Kolodougou | Niono | 1150 | 0.65 | 0.7 | 5/8/98 |
| Niono-Grüber | Grüber et Retail partiel | Niono | 4000 | 0.7 | 2.7 | 4/10/95 |
| Niono-Grüber | Grüber et Retail partiel | Niono | 4200 | 0.95 | 3.9 | 30/7/96 |
| Niono-Grüber | Grüber et Retail partiel | Niono | 4200 | 0.95 | 4 | 20/10/95 |
| Siengo | N'Débougou | N'Débou gou | 4300 | 0.8 | 3.3 | 30/8/95 |
| Bolodiani | Boky Wéré | Macina | 7500 | 0.9 | 7.2 | 8/11/95 |

D'après le Tableau 1-5, Barral *et al.* (1997) [14] estiment que le volume total d'eau évacué par le drain Niono-Grüber du 1^{er} juin au 15 novembre s'élève à 36,5 millions de m³. Ouvry *et al.* (1999) estiment le volume évacué du 1^{er} juin au 31 décembre 1998 par le drain de Kouia à 7,2 millions de m³. Pour la même période, le drain de Niono-Grüber évacuerait 26,4 millions de m³.

Les consommations d'eau au niveau du point A et des zones ainsi déterminées sont illustrées par le Tableau 1- 6 (Hassane et Kupper 1999) [25]. Ce tableau montre une forte consommation à l'entrée du système Sahel (point A) et à l'entrée des zones de production par rapport aux besoins théoriques des cultures. Pendant la saison d'hivernage, les débits entrant dépassent de 77% les besoins en eau au niveau des parcelles. Pour toute l'année, en considérant une superficie en double culture sur 10% de l'ensemble des superficies cultivées en hivernage, les débits entrants des zones dépassent de plus de 86% ces besoins. En croisant les informations du SERP avec les données évaluées par Ouvry *et al.* (1999) [18], l'efficacité de l'irrigation pendant la saison d'hivernage est de $12060 / 28200 = 0,43$. C'est-à-dire que seulement 43% de l'eau qui entre dans le canal du Sahel arrive dans les arroseurs aménagés. Cette analyse est à nuancer puisqu'une partie de l'eau perdue est destinée à

d'autres besoins agricoles. Aussi dans des casiers non réhabilités, la consommation des arroseurs pourrait augmenter, ce qui diminuerait le pourcentage de perte dans les réseaux primaires et secondaires.

Tableau 1- 6 : Consommation de l'eau dans le système Sahel à l'Office du Niger (en m³/ha/an) pour la saison d'hivernage 1998/99 et pour toute l'année ; Source : Hassane A. et Kupper M. (1999).

| Niveau | Consommation culture hivernage (m ³ /ha/saison) ⁶ | Consommation annuelle (m ³ /ha/an) |
|------------------------------------|---|---|
| Point A | 28200 | 34200 |
| Entrée zones : | | |
| Niono | 23300 | 27700 |
| Molodo | 10300 | 12700 |
| N'Débougou | 39500 | 42800 |
| Kouroumari | 20900 | 23400 |
| Moyenne zones | 24100 | 27100 |
| Partiteurs | 12540 | |
| Arroseurs | 12060 | |
| Parcelles (théorique) ⁷ | 13600 | 23240 |

Le bilan hydrologique s'avère la méthode la plus adaptée pour juger les performances d'un système irrigué. Sa mise en œuvre s'avère encore difficile en zone Office du Niger pour raison de disponibilité et de fiabilité des informations collectées. La plupart de ces informations traitées sont axées sur la saison rizicole et peu sur la contre-saison.

1.9 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET HYDRODYNAMIQUE DES NAPPES

1.9.1 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE

A l'Office du Niger, comme dans beaucoup de périmètres irrigués, le développement de l'irrigation et les pratiques agricoles y afférant (forte intensification des pratiques culturales et leurs modalités de gestion, implantation progressive et diversification des cultures de contre-saison et notamment le développement du maraîchage, gestion insuffisante des apports d'eaux et de drainage modifiant leur régime, faible efficacité et dysfonctionnement du réseau de drainage, etc...) ont provoqué une remontée générale du

⁶ La saison hivernage 1998/99 est prise entre avril et novembre.

⁷ Selon Ouvry *et al.*(1999) et Keïta *et al.*(1999).

niveau des nappes, favorisant ainsi l'apparition des facteurs de risque de la dégradation par alcalinisation des sols sous irrigation (remontées capillaires dans les franges d'humectation des sols, engorgement des sols, etc...).

Les pratiques de gestion de l'eau ont modifié fortement la dynamique des eaux et des sols et celles de la nappe régionale (au niveau des périmètres du Kala inférieur⁸ de l'Office du Niger) et locale (à l'intérieur des mailles hydrauliques du casier Retail du Kala inférieur). Le flux de percolation des eaux d'irrigation est l'élément essentiel du bilan hydrique qui gouverne cette dynamique, ce dernier est influencé par les modes de gestion des eaux d'irrigation et de drainage, les systèmes de cultures, la morphologie des aquifères (faciès des sols) et les facteurs agro-climatiques.

Par méconnaissance de ce risque au moment des aménagements, le drainage a été négligé et on s'est contenté de mettre en place un réseau d'évacuation des eaux excédentaires (réseau d'assainissement par opposition à un véritable réseau de drainage profond des sols). Cependant Bélimé E.L (1940) [27] concepteur de l'aménagement a justifié ce choix lors de la création des aménagements par le fait que la nappe se trouvait alors à plusieurs dizaines de mètres de profondeur et que, dans ces conditions, on pouvait faire, provisoirement, l'économie d'un tel réseau de drainage. Cet ingénieur affirmait d'ailleurs qu'il laissait la place pour l'installer lorsque la nappe deviendrait gênante. Il prévoyait donc implicitement la remontée inéluctable des nappes (R.Bertrand et al, 1993 [28]).

Aujourd'hui, les constats et les différentes études menées (Bélimé E.L., 1940 [27]; N'Diaye K., 1987; DNHE, 1990 [30]; Tréa C. et al., 1990 [31]; R. Bertrand et al., 1993 [28]; Barral, 1996 [32]; Valenza, 1996 [29];) montrent que sous l'effet de la conduite de l'irrigation le niveau de la nappe est passé de 40 mètres environ à moins de 2 mètres de profondeur en 50 ans. La nappe atteint rapidement la position quasi subaffleurante actuellement dès la mi-campagne de toutes les saisons culturales à l'Office du Niger (Barral, 1996 [32]; Tanqara & Dicko, 1995 [33] et Tanqara 2001 [21]).

Une coupe transversale de l'évolution de la côte de la nappe au cours de ces 50 dernières années (Bertrand et al, 1987[28]), perpendiculairement à l'axe du Fala de Molodo dans la direction ouest et centrée sur les aménagements du Kala inférieur montre que la

⁸ Le Kala inférieur, 26000 ha aménagé, englobe les zones de Niono, Molodo et N'Débougou de l'Office du Niger.

nappe descend rapidement en s'éloignant du Fala et des périmètres irrigués. Cette évolution de la nappe est confirmée par d'autres études (*Barral, 1996 [32]; Tanqara, 2001 [21]*).

1.9.2 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE : ETAT DES CONNAISSANCES

1.9.2.1 LES DIFFERENTS NIVEAUX D'ECHELLE AYANT FAIT L'OBJET D'ETUDES

La compréhension des dynamiques interannuelles et inter saisonnières des nappes, étudiées à différentes échelles dans la zone irriguée de l'Office du Niger, passe par la connaissance de la structure géomorphologique des aquifères de cette région de l'Office du Niger au sein du delta mort. Pour ce faire, des études plus approfondies ont été entreprises de 1995 à 1999 par le projet Pôle régional de recherche sur les Systèmes Irrigués au Mali (PSI/CORAF-Mali). Les études ont été menées à trois échelles : (i) échelle régionale (entre les longitudes $-7,00^{\circ}$ et $-5,20^{\circ}$ W et les latitudes $15,50^{\circ}$ et $13,40^{\circ}$ N, englobant toutes les zones de l'Office du Niger et une partie de Ségou) où le substratum, la structure et la géométrie des aquifères sont caractérisées. (ii) échelle du Kala inférieur de l'Office du Niger (sur 100 Km de côté englobant les aménagements des trois zones à savoir : Niono, Molodo et N'Débougou, entre les longitudes $6^{\circ}40'$ et $5^{\circ}30'4''$ W et les latitudes $14^{\circ}50'$ et $13^{\circ}40'$ N) où la structure, la géomorphologie et la caractérisation des paramètres hydrodynamiques des aquifères sont étudiées en vue de pouvoir apprécier le drainage naturel de la nappe et enfin (iii) à l'échelle de la maille hydraulique⁹ pour comprendre la dynamique et la concentration des nappes en rapport avec le type de sol et le système de culture.

1.9.2.2 LES DIFFERENTS STRATES GEOLOGIQUES IDENTIFIEES

Ainsi, la dynamique de la nappe phréatique des aquifères du delta mort et de l'Office du Niger met en jeu trois strates géologiques dont l'épaisseur est très variable selon les zones (*Barral et al., 1996 [32]*) : le substratum infracambrien, le Continental Terminal et la couverture alluviale.

⁹ Une maille hydraulique une entité hydraulique couvrant l'ensemble des superficies d'un partiteur. Elle est composée d'un partiteur (canal secondaire) et de l'ensemble de ces arroseurs, d'un drain de partiteur et des drains d'arroseurs.

a) Le substratum infracambrien

Le *substratum infracambrien*, formé au début du primaire (580-400 Ma), est constitué de grès et de schistes et est parcouru de systèmes de fractures, de diaclases et de failles permettant d'importantes circulation d'eau. Le toit de cet horizon se situe à une profondeur moyenne de 30 m. Ces grès ne sont ni poreux, ni perméables, mais leur réseau de fissures, de diaclases et de failles, très important, est à l'origine d'une circulation d'eau intense, formant un régime de nappe d'interstices.

b) Le Continental Terminal

Le *Continental Terminal*, formé par des dépôts à la fin du tertiaire (25 à 2 Ma), est représenté par des alternances d'argiles, d'argiles sableuses et de sables, intercalés de niveaux constitués par des graviers de quartz et d'horizons latéritiques argileux ou concrétionnés. Son épaisseur varie de 10 à 60 mètres. Des observations faites sur une carte régionale du mur du Continental (intercalaire et terminal), montrent qu'au droit des périmètres du Kala inférieur, le continental a une épaisseur d'une vingtaine de mètres (20 mètres); il s'épaissit à l'Est des périmètres, atteignant une épaisseur de 40 mètres (Valenza, 1996 [29], Barral et al., 1996 [32];).

c) La Couverture alluviale

La *Couverture alluviale*, formée au quaternaire sur le craton Ouest africain affaissé, comprend des alluvions anciennes ou récentes apportées par le Niger, fossile ou actuel. Son épaisseur est comprise entre 5 et 10 mètres, avec une moyenne de 8 mètres dans le Kala inférieur.

1.9.3 CARACTERISTIQUES GENERALES DES NAPPES ET DE LEUR FONCTIONNEMENT : ETAT DES CONNAISSANCES

1.9.3.1 LES PRINCIPAUX AQUIFERES PRESENTS DANS LA ZONE D'ETUDE

La principale formation aquifère¹⁰ de la zone du delta mort et en particulier de la région de l'Office du Niger est le Continental Terminal-Quaternaire¹¹, où se trouvent la

¹⁰ Les formations quaternaires d'origine alluviales, lacustres ou éoliennes ne sont aquifères et en liaison hydraulique avec la nappe principale que dans les zones inondables, ou les zones irriguées à l'occurrence l'Office du Niger.

plupart des forages productifs. Les limites de l'aquifère sont constituées par les affleurements du substratum gréseux infracambrien.

L'aquifère est de type libre et multicouche. En dehors des zones sous l'influence directe des eaux de surface, la nappe est déprimée avec des niveaux piézométriques situés à des profondeurs supérieures à 40 mètres. Ces nappes se situent dans des terrains d'origine continentale. Les formations continentales sont relativement peu épaisses (30 à 80 m) en raison d'une remontée d'un haut-fond gréseux du substratum gréseux infracambrien. C'est au niveau de la bordure ouest de ce secteur du Continental, avec ses formations peu épaisses à dominance argileuse, que se situent les aménagements hydro-agricoles de l'Office du Niger, alimentés par les eaux du canal du Sahel, dérivées du fleuve Niger au barrage de Markala et qui participent à la recharge des nappes.

En effet, plus on se rapproche des zones d'infiltration, plus les niveaux piézométriques se rapprochent de la surface, et plus les variations saisonnières ont une amplitude importante. Amplitude qui est quasiment imperceptible pour des niveaux piézométriques à 40 ou 50 mètres de profondeur (Valenza, 1996 [29]).

Les périmètres du Kala inférieur sont donc situés sur un haut fond du substratum. Si on considère le substratum comme le mur du Continental Terminal, l'épaisseur de cet aquifère est relativement plus faible au droit des périmètres irrigués qu'à l'Est de ceux-ci. Cela a pu favoriser la remontée de la nappe phréatique, le remplissage du niveau du Continental étant rapide du fait de sa faible épaisseur.

1.9.3.2 CARACTERISTIQUES PIEZOMETRIQUES DES AQUIFERES

L'analyse des cartes piézométriques de 1991 et 1995 (Valenza, 1996 [29], Barral et al., 1996 [32]) montre que l'infiltration liée à la percolation au droit du fleuve Niger et le *fala* de Molodo provoque un bombement de la nappe qui de ce fait se rapproche de la surface du sol, jusqu'à devenir sub-affleurante par endroit. Trois zones principales d'apport d'eau sont identifiées : le complexe sucrier de Siribala (Kala supérieur), la zone de Niono-Molodo-N'Débougou (Kala inférieur) et la zone de Diabaly (Kouroumari). Ces zones ont, outre un

¹¹ La similitude des faciès et l'absence de niveaux repères ont conduit à l'association des aquifères dans certains bassins lorsqu'ils étaient en continuité hydraulique, ce qui est le cas du delta intérieur du Niger, où l'on parle d'aquifère du Continental Terminal-Quaternaire.

apport d'eau par percolation à travers les canaux, un apport d'eau lié à l'irrigation elle-même au niveau des parcelles rizicoles et maraîchères.

Donc l'aquifère du Continental Terminal-Quaternaire est alimenté par les eaux du fleuve Niger et les eaux utilisées pour l'irrigation dans les périmètres de l'Office du Niger. Le niveau de la nappe baisse rapidement avec l'éloignement des périmètres de l'Office, ce qui traduit la faible transmissivité du milieu (*Barral et al., 1996 [32]*).

Cette carte piézométrique du Kala inférieur, élaborée en fin de campagne d'hivernage (novembre 1995), a permis de montrer qu'avec l'éloignement des périmètres, la nappe affleurante sous les rizières, décroît rapidement et de façon régulière, ce qui confirme la continuité hydraulique des différentes nappes (*Barral et al., 1996 [32]*). L'écoulement des eaux souterraines, alimentées par la percolation des eaux d'irrigations suit le bombement du substratum imperméable (*Valenza, 1996 [29]*). Les directions d'écoulement sont donc définies de la zone irriguée vers l'extérieur, avec des axes d'écoulement disposés radialement au sommet du bombement. La surface piézométrique montre une forme conique. La nappe est de type radial et les filets liquides sont divergents dans toute la zone. Une carte piézométrique de la fin de la contre-saison (mai 96), donc en situation d'étiage enregistre une décroissance des profondeurs d'eau des puits dans la zone irriguée pouvant aller jusqu'à 1 mètre. A l'extérieur de la zone, les profondeurs d'eau dans les puits sont sensiblement les mêmes. Ainsi, la carte piézométrique en mai 96 est pratiquement identique à celle de novembre 95. Cela suggère que les apports d'eau d'irrigation à la nappe phréatique sont restés importants (le *Fala* et les principaux canaux sont toujours en eau pendant la contre-saison, et près de 5000 ha de riz ont été cultivés en double culture) et que la faible perméabilité du milieu tamponne les variations saisonnières de l'alimentation. Les analyses ont montré que la nappe décroît avec un gradient faible perpendiculairement au *Fala* estimé à 40 mètres pour 20 km soit 2‰ lorsqu'on s'éloigne des périmètres. Ce pendant, au Nord de la zone le gradient passe à 4‰, ce qui n'est pas négligeable (*Valenza, 1996 [29]*). Etant donnée la géométrie du mur du continental faible, les variations de gradient sont dues principalement aux variations de pente du substratum gréseux.

1.9.3.3 CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE L'AQUIFERE REGIONAL

D'après une étude du PNUD en 1990 (*(PNUD (1990) [30])*), l'évaporation est d'autant plus marquée que l'on est proche de la surface d'inondation et que la surface piézométrique est peu profonde. La vitesse d'écoulement réelle, de l'ordre de 15 à 20 m par an est faible ce qui signifie que la perméabilité moyenne globale des formations du Continental Terminal-Quaternaire est plus petite que ne le laisse supposer les pompages d'essai.

Un modèle développé par la DNHE en 1990 (*(PNUD (1990) [30])*), permet de rendre compte du fonctionnement de l'aquifère du Continental Terminal-Quaternaire entre le Kala inférieur et le Niger. Les apports du modèle sont représentés par l'infiltration de la pluie (dans les secteurs où la surface piézométrique est située à moins de 30 m de profondeur), la percolation des eaux de surface (pour les mailles couvrant la zone d'inondation du delta intérieur) et le retour des eaux d'irrigation (pour les mailles où sont localisés les périmètres de l'Office du Niger et la zone de recharge du canal du Sahel). Les sorties sont représentées par l'évapotranspiration. Le calage du modèle a permis de reconstituer les principales caractéristiques piézométriques du secteur, et notamment : (i) la dépression piézométrique localisée dans le delta fossile, (ii) les niveaux d'eau peu profonds dans la zone d'inondation et, la remontée locale du niveau des nappes à l'aplomb des périmètres irrigués.

Deux valeurs de transmissivité ont été adoptées : $5.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ dans la zone du delta fossile et $7.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ dans le reste du secteur modélisé.

1.9.3.4 CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DE L'AQUIFERE DANS LA ZONE DU KALA INFERIEUR

Après cette approche régionale de la dynamique de la nappe du Continental Terminal-Quaternaire, permettant de comprendre son fonctionnement à grande échelle, des études ont été réalisées pour caractériser la dynamique de la nappe phréatique dans le Kala inférieur. Elles ont eu pour objet de caractériser la structure des différents horizons qui constituent l'aquifère de cette zone du Kala, ainsi que les liens pouvant exister entre les aquifères de chaque horizon. Une observation morphologique de la zone a montré qu'elle est relativement plane (*(Valenza, 1996 [29])*) et que la frange d'humectation des sols en bordure des zones irriguées se limite en général à 2 ou 3 Km en lisière des casiers. Une prospection géophysique faite par le Bureau de Recherche et d'Exploitation des Eaux

Souterraines (BRESS 1996 [34]) a permis de déterminer les épaisseurs de ces différents horizons (quaternaire, continental, et substratum gréseux) et de caractériser aussi les liens pouvant exister entre les différentes nappes. Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux d'une prospection électro-sismique (PNUD 1979 [35]) en bordure des périmètres irrigués sur le ranch de Niono. C'est ainsi que le substratum gréseux, plus accidenté a une profondeur moyenne de 40 m, et seulement 20 ou 10 mètres à plusieurs endroits. Ce substratum gréseux disparaît parfois, remplacé par un niveau schisteux configuré en biseau. Le Continental, est tributaire de la morphologie du substratum, car aux zones de haut-fond du substratum, correspond une moindre épaisseur du continental. Les résistivités apparentes du continental vont du simple au quintuple, traduisant une forte hétérogénéité des terrains, que l'on sait hétérogènes par la nature sableuse, argileuse, argilo-sableuse et conglomératique des dépôts. L'épaisseur maximale du continental est de 40 mètres dans la zone, avec une moyenne à 25 mètres et un minimum de 10 mètres. Au niveau du Quaternaire alluvial, on a pu différencier deux couches lors des sondages électriques : la couche de surface indurée (plus résistante que la couche profonde), plus sèche, de 2 mètres d'épaisseur environ, superposée à une couche de 5 à 8 mètres, de résistivité plus faible. Par endroit, l'horizon alluvial peut être très peu épais (2 mètres), en liaison avec une remontée du toit du substratum. L'épaisseur moyenne du quaternaire alluviale est de 8 m, augmentant légèrement dans les dépressions du continental.

Les études ont montré une grande variation des épaisseurs et de la morphologie des différents horizons à l'intérieur du Kala inférieur. Certains sites, caractérisés par une faible épaisseur d'alluvions sablo-limoneuses, sont particulièrement perméables. Ils constituent une zone d'écoulement préférentielle, réalimentant la nappe phréatique. Ces zones ont aussi contribué à la remontée rapide de la nappe phréatique de 40 m en moins de 30 ans. Les faibles contrastes de résistivité électrique entre le système alluvionnaire et le Continental argilo-sableux sous-jacent d'une part; l'absence de rupture de pente observée sur les courbes de remontée des sondages électriques entre Continental argilo-sableux et bed-rock gréseux d'autre part, montrent qu'une continuité hydraulique existe entre ces trois horizons.

L'irrigation a pour conséquence, lorsqu'elle n'est pas réalisée à partir de pompage dans la nappe, d'augmenter ponctuellement le niveau piézométrique, créant un bombement

local, avec plus ou moins d'amplitude, en fonction de la structure de l'aquifère, de ses limites et des paramètres hydrauliques de cet aquifère. Ainsi, il serait intéressant d'évaluer l'un des paramètres important qu'est la transmissivité du niveau alluvial afin de pouvoir calculer la fraction de lessivage permise par ce gradient de 2‰ de décroissance de la nappe. Pour cela, il faut évaluer les perméabilités des différents niveaux aquifères, ainsi que leur épaisseur, pour en déduire les transmissivités (produit de la perméabilité d'un niveau aquifère par son épaisseur). Déjà, le modèle sectoriel de simulation du delta mort (PNUD, 1990) a permis d'établir une transmissivité moyenne pour le Continental terminal, égale à 5.10^{-4} m²/s. Pour l'aquifère alluvial, sa profondeur moyenne est de 8 mètres. Pour estimer sa perméabilité, des essais de pompage ont été tentés (Valenza, 1996), mais la faible perméabilité du milieu n'a pas permis de les mener à bien. Pourtant, avec la méthode de Porchet (Tanqara, B., Dicko, MK. 1995 [33]) ont pu trouver des valeurs moyennes de perméabilité de l'ordre de 10^{-5} m/s sur les levées sableuses, et 10^{-6} à 10^{-7} m/s dans les cuvettes limono-argileuses du Kala Inférieur. Des tests par choc hydraulique ou slug test (Bouwer and Rice, 1976 [36]; Valenza, 1996 [29]) ont permis d'évaluer la perméabilité moyenne du niveau alluvial à 3.10^{-6} m/s, pour une épaisseur de 8 mètres environ. La transmissivité moyenne de l'aquifère alluvial est donc de $2,4.10^{-5}$ m²/s, soit 20 fois moins que l'aquifère du Continental Terminal (Barral et al., 1996 [32]).

1.9.4 ETUDES DU BILAN HYDROLOGIQUE DE LA NAPPE DU KALA INFÉRIEUR: ETAT DES CONNAISSANCES

Au niveau du Kala inférieur, il a été réalisé une estimation du débit d'eau évacué par drainage naturel et par conséquence la fraction de lessivage permise par ce drainage, connaissant le débit entrant dans les périmètres irrigués du Kala inférieur pour une période donnée.

Ainsi, selon Barral et al., 1996 [32], le débit en sortie de la nappe est estimé à 0,0048 m³/s pour l'alluvial et 0,10 m³/s pour le Continental Terminal, soit un volume total annuel d'eau souterrain de $3,3.10^6$ m³ évacué par la nappe phréatique du Kala inférieur. Ce volume annuel est légèrement supérieur ($4,5.10^6$ m³) au vue des résultats de Valenza, 1996 [29]. La différence de valeur est liée à l'appréciation des paramètres hydrodynamiques des formations aquifères telle que la transmissivité des horizons aquifères. Malgré ces

variabilités, la contribution de l'horizon alluvial est minime (5 %) dans ce volume d'eau évacué, puisque les 95% sont assurés par l'aquifère du Continantal Terminal.

Pour le calcul de la fraction de lessivage $Fl = 1/FC = \text{Drainage/Irrigation}$ (Valenza, 1996 [29], Barral et al., 1996 [32]), un bilan d'eau annuel et saisonnier a été calculé pour quantifier et qualifier la situation et estimer les paramètres qui ont conduit à une telle remontée, afin de prévoir éventuellement le devenir de cette nappe, dans le cas d'une absence ou d'une abondance d'évolution des apports d'eau. Le calcul du bilan correspond à une estimation des apports de l'irrigation, de l'évacuation de cette eau par le complexe aquifère et par évaporation et évapotranspiration (facteurs majeurs au sein de cet équilibre) s'avère nécessaire. Mais en l'état des connaissances, les auteurs n'ont pas pu établir un bilan en eau complet de la zone. L'équation du bilan nécessitant en effet la connaissance des termes suivants : (i) l'évaporation mesurée sur la zone par les canaux, les casiers, (ii) l'évapotranspiration, (iii) la RFU (Réserve Facilement Utilisable), (iv) le ruissellement superficiel, (v) le ruissellement souterrain sur les interfaces imperméables, (vi) la mesure exacte des précipitations¹² et (vii) la mesure exacte de l'apport des irrigations non pas du point A, mais en tête du périmètre du Kala Inférieur.

Pour ces études, les calculs se sont limités au rapport du débit en sortie de nappe estimé sur le débit d'apport annuel et saisonnier des canaux.

Le débit entrant dans les périmètres irrigués du Kala inférieur a été établi à partir de l'équation suivante (Barral et al., 1996 [32]):

$$Q_{\text{Kala}} = Q_A - Q_B - \text{Pertes}_{A-B} - Q_{\text{drainé}}$$

Dans ce bilan global, l'alimentation de la nappe par la portion du *Fala* située au droit des périmètres du Kala inférieur¹³ est négligée. Pour les apports d'eau d'irrigation, les valeurs des débits mensuels des années 1992, 1993, 1994 du service de gestion du réseau hydraulique primaire (SERP) de l'Office du Niger à Markala ont été utilisées.

¹² Les précipitations sont négligeables, voir nulles en contre saison.

¹³ La nappe étant très proche de la surface dans les périmètres irrigués, la différence de charge entre le Fala et la nappe est faible, limitant la percolation; en revanche entre le Point A et le Point B, la nappe est quasi-exclusivement alimenté par le Fala. Son niveau décroît donc rapidement quand on s'éloigne du Fala, augmentant les percolations.

Les résultats synthétiques du calcul de la fraction de lessivage sont consignés dans le Tableau 1- 7.

Tableau 1- 7: Valeurs calculées de la fraction de lessivage permise par le pendage de la nappe phréatique (Barral et al., 1996 [32]).

| Pertes | Volume annuel irrigation (10^6 m^3) | Fraction de lessivage (Q_{dn} / Q_{kala}) |
|--------|---|---|
| 10 % | 850 | 1 / 270 |
| 20 % | 750 | 1 / 230 |
| 30 % | 665 | 1 / 200 |

Le drainage naturel dû au pendage de la nappe phréatique permet l'évacuation d'environ 1 / 230 des eaux amenées pour l'irrigation.

Les estimations des études menées sont bien plus faibles que celle de Van Hoorn (1992) [37], qui avait surestimé la transmissivité du milieu ($100 \text{ m}^2/\text{jour} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) pour une fraction de lessivage de 1/40.

1.9.5 ETUDES DU BILAN HYDROLOGIQUE DE LA NAPPE AU NIVEAU DE LA MAILLE HYDRAULIQUE : ETAT DES CONNAISSANCES

A l'échelle de la maille hydraulique à l'intérieur des périmètres du Kala inférieur, plusieurs études ont été entreprises sur la dynamique et la concentration des nappes en rapport avec le type de sol et les systèmes de culture.

1.9.5.1 EFFET DE LA CONDUITE DE L'IRRIGATION

N'Diaye et al 1990 [38] ; Tangara, B., Dicko, MK. 1995 [33] ; Barral et al., 1996 [32], ont montré que le niveau de la nappe fluctue selon les conduites d'irrigation et de drainage. Au début du cycle de riz, l'ensemble du système hydraulique (canaux et bassins rizicole) contribue à la recharge de la nappe. Avec la saturation, on obtient une continuité hydraulique avec la nappe profonde ; localement, la nappe devient affleurante. Le niveau piézométrique submerge souvent les rizières, alors, le profil est saturé et le toit de la nappe est alors au-dessus de la surface topographique.

1.9.5.2 INTERACTION AVEC LE SYSTEME DE DRAINAGE

La nappe devient alors une source d'eau qui est récupérée dans le système de drainage. Au fur et à mesure que la nappe monte sous l'effet de la poussée de l'eau qui s'infiltré à partir des canaux, les gradients horizontaux dirigés vers les parcelles, plus forts au début (4.10^{-3}), deviennent de plus en plus faibles jusqu'à atteindre une valeur négative de -1.10^{-3} (Bécue, 2001). A la fin de la saison rizicole avec le drainage des parcelles, le niveau de la nappe baisse avec une vitesse dépendant de l'état des canaux de drainage et d'irrigation et du type de sol. Une augmentation des gradients est observée. Ils ne sont jamais verticaux dans l'aquifère mais plutôt dans la zone non saturée. Les gradients horizontaux sont, quant à eux, fréquents dans la zone saturée. Ils sont donc faibles pendant la phase de tarissement (1.10^{-3}). Pendant cette période, les flux fondamentaux sont les flux ascendants de remontée capillaire dans la zone non saturée.

1.9.5.3 IMPACT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON SUR LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE

En contre-saison, les gradients horizontaux augmentent car les canaux d'irrigations en eaux alimentent encore la nappe. Dans les zones de double culture riz, le niveau de la nappe baisse très peu (environ 0,2 à 0,5 mètre du sol) pendant la contre-saison car l'irrigation se poursuit. Cette baisse est fonction des types de sol. Elle est plus rapide dans les sols argileux, où la macroporosité et les fentes de retrait entraînent une plus forte remontée par capillarité. En culture maraîchère, on observe la même dynamique, mais la profondeur de la nappe fluctue (0,3 à 0,7 mètre du sol) moins qu'en riziculture. En contre-saison, le niveau de la nappe est plus bas qu'en double culture riz, mais plus haut qu'en culture simple.

1.9.5.4 IMPACT DU TYPE DE SOL SUR LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE

La couverture pédologique a également un impact sur le niveau de stabilisation de la nappe. Après quelques semaines d'irrigation, sur les formations sableuses le niveau de la nappe se stabilise, tandis que sur les formations argileuses il continue à monter. Le tarissement de la nappe phréatique sous l'influence de l'évapotranspiration (ETP) dépend du type de sol. La baisse serait plus rapide avec les sols argileux (comme au niveau de l'arroiseur G5-2d) qui, avec la macroporosité et les fentes de retrait entraînent une plus forte remontée par capillarité. Les fissures dues à l'assèchement du profil, constituent des voies d'appel

d'eau en augmentant les surfaces de contact avec l'atmosphère. Elle est lente dans les sols sablo limoneux (l'arroiseur Kl3-7d1). Le niveau minimal de la nappe est compris entre 0,70 et 1,30 mètre de la surface du sol. Il dépend de la durée de l'assec, du type de sol et de la proximité des canaux en eau.

1.9.6 CONCLUSION SUR L'HYDROGEOLOGIE ET LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE

A l'Office du Niger comme dans beaucoup de périmètres irrigués, le développement de l'irrigation et les pratiques culturales qui l'accompagnent, ont provoqué une remontée générale du niveau de la nappe phréatique des aquifères sous irrigation. Des études menées, depuis le début des aménagements de l'Office du Niger jusqu'à nos jours ont confirmé cette hypothèse. Le niveau de la nappe phréatique est monté et est devenue sub-affleurante en une vingtaine d'années sous l'influence de l'irrigation dans les périmètres du Kala (inférieur et supérieur) et du Kouroumari, localisés dans les plaines asséchées, ou delta mort (Marlet & N'Diaye, 2002 [39]). Cette remontée est liée non seulement au retour des eaux d'irrigations dans les anciens défluent du delta mort (*Falas*), mais aussi au maintien permanent en eaux des canaux d'irrigation, à l'évolution des systèmes de cultures et à la faible capacité de drainage naturel de la nappe évaluée à 1/230 avec une lame d'eau équivalente de 15 mm/an (Marlet & N'Diaye, 2002 [39]). Cette évacuation est très faible, comparée aux hypothèses émises par Van Hoorn en 1992 [37]. Bien que faible, ce drainage permis par un gradient de 2‰ vers l'extérieur des périmètres, permet un léger abaissement du niveau de la nappe. Le facteur principal qui régit cette remontée liée à l'alimentation des nappes est le bilan hydrique avec comme élément essentiel l'infiltration des eaux. Cette dernière est fonction des caractéristiques hydrodynamiques et de la charge hydraulique au-dessus des principaux aquifères qui constituent la nappe.

Si ces études ont pu caractériser les dynamiques des nappes en rapport avec la dégradation des sols par alcalinisation/sodisation, ainsi que la fraction de lessivage permise par drainage naturel des nappes en saison d'hivernage, elles ont abordé faiblement ou pas cette dynamique à différentes échelles du réseaux hydraulique en fonction du développement des cultures de contre-saison, et en rapport avec les bilans d'eau et les efficacités des irrigations pour mieux expliquer les tendances.

1.10 RISQUES DE DEGRADATION PAR ALCALINISATION DES SOLS SOUS IRRIGATION A L'OFFICE DU NIGER : ETAT DES CONNAISSANCES

En milieu aride et semi-aride, l'irrigation des terres entraîne un risque de dégradation par salinisation, alcalinisation ou sodisation des sols. Les dysfonctionnements qui en résultent, conduisent à une élévation du niveau de la nappe phréatique et à une dégradation des sols.

La remontée des nappes, associée à la forte évaporation potentielle (2430 mm/an), favorise les remontées capillaires et le dépôt des sels, issus de la concentration des eaux dont l'alcalinité résiduelle est considérée positive (Marlet & N'Diaye, 2002 [39]). Le pH, et la sodicité des sols augmentent. Les cultures maraîchères et la canne à sucre sont plus gravement affectées par la dégradation des sols, mais aussi par l'effet de l'engorgement.

Différents travaux portant sur les bilans en eaux et en sels à la surface, et sur la dynamique de la nappe phréatique permettent d'analyser les processus à l'origine de ces évolutions. Le bilan des sels apparaît négatif pendant la saison rizicole en raison d'importantes sorties d'eau et de sels par le système de drainage : 45% des eaux et 73% des sels, sont issus d'un drainage de surface par la vidange (*flushing*) des bassins rizicoles. Le bilan des sels apparaît positif pendant la contre-saison, notamment du fait d'importantes pertes par infiltration dans les canaux d'irrigation. Ces pertes ont lieu principalement au cours de trois périodes : à la mise en eau du système hydraulique au début de la campagne rizicole, car la remontée rapide de la nappe précède la mise en eau des parcelles ; après la vidange des bassins rizicoles, car les canaux d'irrigation contribuent à soutenir la nappe dont le tarissement se produit sous l'influence de l'évaporation ; en contre-saison, car les canaux d'irrigation alimentent la nappe qui s'établit alors près de la surface, notamment pour les parcelles non cultivées. Selon Marlet & N'Diaye, 2002 [39], ce flux correspondrait à une lame d'eau équivalente moyenne d'un millimètre par jour. Il varie en fonction de la période de l'année et de la perméabilité des matériaux : la lame d'eau journalière est supérieure à 1,5 millimètre par jour pour les formations sableuses, mais inférieure à 0,5 millimètre par jour pour les formations argileuses. Le bilan annuel des sels apparaît proche de l'équilibre. Il serait néanmoins excédentaire sur les formations sableuses les plus perméables, en raison d'une forte recharge de la nappe par le réseau hydraulique, et déficitaire sur les formations

argileuses, sous l'influence de la vidange des bassins rizicoles. Si les performances de la riziculture sont généralement satisfaisantes, à l'exception des points hauts où la maîtrise insuffisante de l'irrigation et du drainage favorise la dégradation des sols (augmentation du pH *in situ*), sur les parcelles maraîchères, les techniques de culture et d'irrigation ne permettent pas de prévenir ou de contourner le problème posé par l'alcalinisation et l'engorgement des sols.

Actuellement, le risque de dégradation des sols apparaît limité aux situations locales où la conduite de l'irrigation et du drainage est insuffisamment maîtrisée : sol sableux, point haut, ou secteur maraîcher, où les évolutions sont les plus préoccupantes. A l'avenir, les paramètres de risque dans les périmètres irrigués pourraient augmenter. Un accroissement des superficies qui va de paire avec l'accroissement des besoins et une moindre disponibilité en eau, peut influencer la dynamique de la nappe phréatique d'une part, et limiter le lessivage des sels d'autre part. Aussi, le transfert aux exploitants de la responsabilité des aménagements tertiaires et du planage risque d'influencer sur la qualité des infrastructures hydrauliques. Cette hypothèse est pratiquement confirmée par Vandersypen (2007) [24] qui trouve que la consommation moyenne des arroseurs conçus avec la participation paysanne est bien en dessus des autres arroseurs. L'efficacité de transport de l'eau et l'efficience de l'irrigation sont faibles, bien que ces résultats soient interprétés avec prudence vu la taille de l'échantillon étudié. Enfin les cultures de diversification à l'occurrence le maraîchage sont plus sensibles à la dégradation des sols.

Ces prévisions plaident en faveur d'une part, à approfondir les investigations pour mieux comprendre la dynamique de la nappe phréatique en rapport avec l'évolution des superficies aménagées et le développement des cultures de contre-saison, ces dernières étant incriminées pour avoir favorisé le plus de pertes d'eau soutenant le niveau de la nappe phréatique et favorisant du coup la dégradation des sols, et d'autre part, à développer un modèle qui puisse raisonner du fonctionnement hydrologique du système pour une éventuelle adaptation des pratiques à un environnement qui se modifie.

1.11 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 1

AW Djibril, 1997 : Synthèse de la conférence sur l'Office du Niger [5].

Barral, J.-P. and Tangara, B. (1996). La Gestion de l'Eau dans les Périmètres Irrigués de l'Office du Niger. J. C. Legoupil, B. Lidon, I. M. Maïga, and S. Ndiaye (eds) Gestion Technique, Organisation Sociale et Foncière de l'irrigation. PSI/CORAF, Dakar, Senegal, 228-253. [22]

Barral, JP., Tangara, B.(1997) "Evolution des sols sous irrigation à l'Office du Niger ; la gestion de l'eau sur les périmètres irrigués de l'Office du Niger, Rapport d'activités 96/97", IER/PSI-Mali, Travaux et Etudes n°3. 73 pages et annexes : 58-72.; [32]

Barral JP, Tangara B. (1998) La Gestion de l'Eau dans les Périmètres Irrigués de l'Office du Niger.in Legoupil C et al (ed) Gestion Technique, Organisation Sociale et Foncière de l'irrigation.Dakar :PSI/CORAF, 1998, p 228-253. [14];

Béline E.L. 1940. Les travaux du Niger, Gouvernement général de l'A.O.F. Publication de l'Office du Niger, 219 Pages. [27]

Bertrand, R., B. Keïta and M. K. N'diaye (1993). "La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sud-sahariennes (cas de l'Office du Niger au Mali)." Cahiers Agricultures 2: 318-329. [28]

Bouwer, H. and Rice R.C., (1976). A Slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. Water Resource Research, vol.12, 3 : 423-436. [36]

BREESS (Bureau de Recherche et Exploitation des Eaux Souterraines et de Surface), (1996). Rapport de prospections géophysique dans le cadre du projet d'appui au système irrigué (PSI) à l'Office du Niger (Niono) station du Sahel. 10 pages, annexes. [34]

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 (Mali). Thèse de Doctorat, École Nationale Agronomique de Montpellier, 240 pages.[7]

Dicko M., 2005 : Analyse du fonctionnement d'une parcelle de riz irrigué sur sol alcalin. Application à la gestion intégrée de la fertilisation azotée et du calendrier cultural dans le delta intérieur du fleuve Niger (Mali), Thèse. 153 pages + annexes. [1]

- Ducrot R., Coulibaly Y.M., Keïta M., Bah S., Traoré O.B., Traoré M., (1997).** URDOC : Rapport d'activités, contre-saison 1995/1996-hivernage 1996, 132p
- Fiquet, S. (2003).** "Etude préalable à la mise en place d'un système d'information pour la gestion de l'eau à l'Office du Niger." Mémoire de fin d'études, Ecole Polytechnique, Palaiseau, France. [8]
- Hamel, E., Sidibé, M., et Kaloga, K. (1998).** «Suivi de la gestion de l'eau à l'Office du Niger », rapport principal et Annexes, Office du Niger (programme ARPON), Ségou, Mali. [10]
- Hassane A. 1999.** Influence des aménagements hydrauliques et hydro-agricoles du Niger supérieur sur l'inondation du delta intérieur du Niger (Mali). Mémoire de fin d'études, Ecole Nationale d'Ingénieurs, Bamako, Mali.[11]
- Hassane A. et Kupper M.,(1999).** Impact de la disponibilité en eau du fleuve Niger sur la gestion de l'eau dans le périmètre irrigué de l'Office du Niger au Mali : cas de l'étiage 1999. Aspects hydrauliques, 57 pages. [25]
- Jamin, J.-Y. (1994).** De la norme à la diversité : intensification rizicole face à la diversité paysanne dans les périmètres irrigués sahéliens : utilité d'une typologie à l'Office du Niger (Mali). Agronomie. Paris-Grignon, INA, INA-PG: 2 vol 318. [2]
- Kéïta N., K.Kaloga, J.F.Bélières. 1999.** D'une gestion étatique de l'eau à une gestion paritaire Etat/Usagers : le cas de l'Office du Niger au Mali. HYDROTOP 99, Marseille du 15 au 17 juin 1999. [12]
- Keita, B., Kounkandi B. and Dioni L. (1991).** Etude morphopédologique du Kala inférieur au 1/20000, IER/MALI: 77 pages + annexes. [3]
- Marlet, S. and N'Diaye, M. K. (2002).** Des risques d'alcalinisation liés à l'irrigation et aux pratiques culturales. L'Office du Niger, grenier à riz du Mali. P. Bonneval, M. Kuper and J.-P. Tonneau, Cirad/Karthala: 163-167. [39]
- Marlet, S., Tangara, B., Ouvry, F.(1998a).** *Bilan des eaux et des sels à l'échelle des périmètres irrigués à l'Office du Niger.* Pôle Système Irrigué, compte rendu d'expérimentation. 16 p. [17]
- N'Diaye M.K., Van Slobbe E., Risselada D., Y.Doumbia, et Traoré A., (1990).** Identification de l'alcalinisation et de la sodisation des sols de l'Office du Niger. Document de l'IER. 27 Pages et Annexes. [38]

Ouvry, F., Marlet, S., Tangara B. (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) : Tome 1: Synthèse des résultats. Tome 2: Compte-rendu d'expérimentation - Annexes". Travaux et études N°8 PSI-Mali. [23]

Ouvry, F., Marlet, S., Tangara, B., and Berete, O. 1999. Analyse du fonctionnement hydraulique d'un grand aménagement, proposition d'amélioration des performances de la gestion de l'irrigation à l'Office du Niger. JC. Legoupil, C. Dancette, P. Godon, IM. Maïga [18]

Programme des Nations Unis pour le Développement : PNUD (1979). Etude géophysique par méthode électro-sismique du ranch de Niono. Rapport géophysique, 10 pages, 5 cartes. [35]

Programme des Nations Unis pour le Développement : PNUD (1990). Synthèse hydrologique du Mali. Rapport, 300 pages. Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie (DNHE), Bamako, Mali. [30]

SOGREAH. 1987 Périmètre rizicole du distributeur Retail : Réhabilitation d'une première tranche de 1315 ha. Manuel de gestion de l'eau. Ségou, Mali : Office du Niger, 1987.[6]

Tangara, B., Dicko, MK. (1995). Suivi hydrodynamique de la nappe phréatique à l'Office du Niger (zone de Niono), 10 pages, annexes. .[33]

Tangara, B (2001). Amélioration des performances des systèmes irrigués au Mali Pour une gestion conservatoire des sols à l'Office du Niger : Etude comparative de la dynamique de la nappe régionale du continental terminal quaternaire de 1995 à 2001.Rapport final 2001 (travaux et étude N°10, PSI-Mali), 33 pages, annexes : 22-25. [19]

Tangara B.(2001) "Amélioration des performances des systèmes irrigués au Mali " : volet « gestion hydraulique des réseaux de distribution de l'eau ».Rapport technique des travaux et études N°9, PSI-Mali. [21]

Tréa, C. et E. Kharbotty-Rhill, (1990). Identification de salinisation, d'alcalinisation et de sodisation des terres à l'Office du Niger, 46 pages, annexes. [31]

Valenza, A. (1996). Rôle des eaux souterraines et d'irrigation dans les processus de salinisation / alcalinisation des sols en zone sahélienne : cas du Delta Intérieur du Niger

(MALI). Diplôme d'Etudes Approfondies, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 75 pages et annexes. [29]

Vandersypen, Klaartje, (2007). Improvement of collective water management in the Office du Niger irrigation scheme (Mali) : Development of decision support tools. Thesis. [24]

Vandersypen K, Keita ACT. Etude bibliographique de l'efficience hydraulique à l'Office du Niger. Rapport d'étude. Ségou, Mali, Office du Niger, 47 pages 2007. [20]

Van Hoorn, J.W., (1992). Evaluation de la première phase au sujet de l'identification des problèmes d'alcalinisation/salinisation des sols à l'Office du Niger et proposition pour une deuxième phase d'études et d'essai. Université Agronomique de Wageningen, 10 pages. [37]

Van Keulen, A. et Hamel, E. (1997). *Rapport sur le suivi de la gestion de l'eau sur partiteur K5. Campagne 1996.* Office du Niger (programme ARPON), Ségou, Mali. [15]

Van Keulen A, Hamel E. Rapport sur le suivi de la gestion de l'eau sur partiteur K5. Campagne 1996. Ségou, Mali : Office du Niger/ARPON, 1997. [16]

CHAPITRE 2 : PROBLEMATIQUE ET DEMARCHE DE LA THESE

2.1 PROBLEMATIQUE

Depuis plus d'une vingtaine d'années, la réhabilitation des aménagements, la libéralisation des filières et l'amélioration des pratiques culturales ont conduit à une augmentation spectaculaire des performances de l'agriculture à l'Office du Niger. Cela s'est traduit à la fois par un accroissement des rendements de la riziculture en hivernage, un développement de la riziculture de contre-saison et du maraîchage, une augmentation de près de 30% des superficies cultivées et d'environ 220 % de la population de petits exploitants, attirés par les opportunités d'amélioration de leur revenu. Le développement des cultures de contre-saison a été initié dans le cadre du projet Retail¹ qui a été lancé en 1986 dont l'objectif était d'atteindre un taux d'intensification culturale de 125%, c'est à dire 100% des terres cultivées en hivernage et 25% des terres cultivées également en contre-saison. L'extension des cultures de contre-saison concerne de plus en plus fréquemment des parcelles initialement prévues pour la seule culture du riz (SC). Le contexte de cette expansion des cultures de contre-saison (riz et maraîchage) à l'échelle de l'Office du Niger et en particulier sur le Kala inférieur et le casier Retail laisse à penser que leur importance pourrait encore s'accroître considérablement si des opportunités commerciales porteuses venaient à se présenter (Molle, F. 1993 [41]).

Face à ce niveau de mise en valeur, les débits prélevés sur le fleuve Niger au cours de la campagne de contre-saison sont d'ores et déjà proches du maximum possible, alors que la demande en eau continue de croître dans le bassin. L'Office du Niger prélevait en 1999 2,56 milliards de m³ d'eau par an, soit environ 35 000 m³/ha/an, si l'on considère l'ensemble des superficies irriguées à partir des eaux dérivées du barrage de Markala (SOGREAH/BCEOM/BETICO, 1999 [9]). D'autres études menées montrent que la gestion du barrage de Markala influence le régime du fleuve Niger en étiage. Si ces prélèvements représentent moins de 10% des apports du fleuve Niger pendant la période de crue de juillet à décembre, ils représentent plus de 30% des apports du fleuve (jusqu'à 50% de février à mai) pendant l'étiage alors que les superficies cultivées en contre-saison étaient encore marginales (Marlet, Tangara & Ouvry, 1998 [17]). On peut donc s'interroger sur l'évolution

¹ Du nom du canal d'irrigation primaire desservant la zone concernée ; superficie concernée par Retail 11 315 ha, superficie totale desservie par le distributeur Retail 4 115 ha.

de cette situation au cours de la dernière décennie et l'avenir du développement des cultures de contre saison.

Outre le problème de l'accès à l'eau, l'un des enjeux majeurs à l'Office du Niger est aujourd'hui de maintenir la productivité du milieu (*H.N'D Ingénieurs Conseils, 1998 .[26]*) dans ce nouveau contexte de culture quasi-continu. Même s'il a été démontré qu'elle est de faible ampleur, la dégradation des sols par sodisation, alcalinisation, et érosion des sols est réelle (*N'Diaye, 1987 [40]; Marlet, Tangara, & Ouvry, 1998 [17]*). Le développement des cultures de contre-saison est néanmoins souvent associé à une accélération de la remontée du niveau des nappes et des surfaces des zones engorgées.

Face à l'augmentation des surfaces tant en hivernage qu'en contre-saison, le risque d'une dégradation des sols pourrait à terme être renforcé par une diminution prévisible des volumes d'eau disponibles qui conduiront certainement à chercher à diminuer les quantités d'eau utilisées pour le lessivage des sels.

Bien que l'avenir du développement des cultures de contre-saison soit considéré comme un facteur clé de la problématique de maintien de la productivité du milieu à l'Office du Niger, peu d'analyses de l'impact de son développement sur la dynamique de la nappe on jusqu'ici été réalisée. Dans ce contexte, cette étude vise à contribuer à analyser les conséquences biophysiques du développement des cultures de contre-saison à l'attention des décideurs.

2.2 OBJECTIFS

L'**objectif général** de ce travail est d'acquérir les connaissances et de produire des méthodes permettant de mieux comprendre et quantifier les dynamiques engendrées par les cultures de contre-saison. L'hypothèse de travail formulée est que les modes de gestion (mise en place et irrigation) des cultures de contre-saison qui sont de plus en plus diversifiés conduisent à une faiblesse notoire de l'efficience de l'irrigation qui induit un bilan d'eau propice à l'alimentation et au soutien du niveau de la nappe phréatique et favorise les risques de dégradation des conditions de production. Il s'agira d'apporter des éléments de réponse à cette hypothèse de travail et aux questionnements de recherche y afférant ; construire des modèles de fonctionnement d'une part (i) de l'irrigation à différents niveaux d'échelles et d'autre part (ii) de la dynamique de la nappe en fonction des scénarios d'évolutions de mise en valeur agricole. Ces modèles permettront d'apporter des conseils

de gestion pratiques pour une amélioration durable de la productivité dans les systèmes de production irrigués à l'Office du Niger.

L'**objectif finalisé** est de développer un modèle multi échelles de l'impact des modalités de gestion des cultures de contre-saison sur les performances de l'irrigation et la dynamique de la nappe phréatique pour une prise de décision.

2.3 APPROCHE ADOPTÉE

Peu d'études ont jusqu'à présent abordé l'interaction entre évolution du niveau de la nappe et développement des cultures de contre-saison et des superficies aménagées emblavées.

Pour aborder ce problème la démarche s'articule en trois étapes articulées en fonction du niveau d'échelle (*Figure 2-1*) :

1. La première étape a consisté à caractériser l'évolution des cultures de contre-saison et les déterminants qui sont à la base de cette dynamique. Pour cela, nous avons procédé à une analyse des données du suivi-évaluation de la zone Office du Niger de Niono sur la mise en valeur agricole des exploitations pendant ces cinq dernières années (2000-2005) de contre-saison au niveau du casier Retail. Elle a permis de choisir un échantillon de villages représentatifs, faisant le maximum de cultures de contre-saison dans le casier. Dix pourcent (10%) des exploitations rizicoles de chaque échantillon de village est enquêté ainsi que les chefs d'OERT (Organisation pour l'Entretien du Réseau Tertiaire) de tous les arroseurs contenus dans ces échantillons d'exploitations. Le but est de pouvoir connaître les déterminants qui sont à la base de l'évolution des cultures de contre-saison. La cartographie exhaustive des cultures en place pendant la contre-saison 2005-2006 au niveau des échantillons d'exploitations des six villages nous a permis non seulement de valider les informations de la base de données du suivi-évaluation de l'Office du Niger au cours de ces cinq dernières années de mise en valeur, mais aussi d'apprécier l'évolution des rotations culturales pratiquées et de celle des superficies emblavées.

2. La deuxième étape a eu pour but d'appréhender l'impact des cultures de contre-saison sur les performances de l'irrigation à différentes échelles. Les données du service de la gestion de l'eau de l'Office du Niger au niveau adducteurs, distributeurs et partiteurs ont été mises à disposition et analysées. Pour mieux cerner les modes d'irrigation, cinq arroseurs, et leurs drains correspondants, ont fait l'objet d'un suivi rapproché pendant la

contre-saison 2007-2008 au niveau du partiteur N1. Ces suivis ont permis une modélisation explicative de la variabilité spatiale et temporelle des performances de l'irrigation et de ses composantes à l'échelle de l'arroseur. Ainsi les éléments du bilan qui participent à la recharge de la nappe locale, voir régionale, sont identifiés et quantifiés.

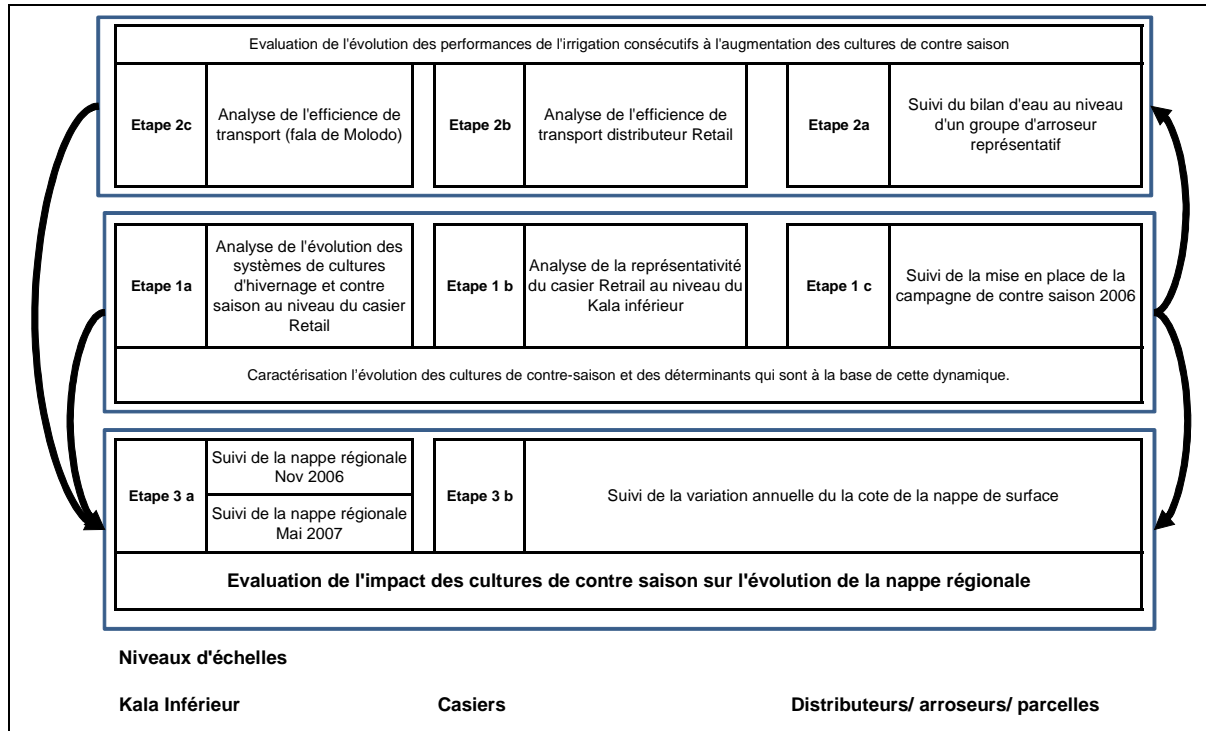


Figure 2- 1 : Illustration de l'enchaînement des différentes étapes de la démarche.

Les questionnements à l'échelle régionale ont aussi nécessité la conception d'un autre modèle qui raisonne du fonctionnement de la nappe régionale en rapport avec les niveaux de mise en valeur.

3. La troisième étape a consisté à établir une relation entre évolution des surfaces de contre-saison et la remontée de la nappe entre 2001 et 2007. Pour établir cette relation, outre un suivi de la dynamique des nappes locales réalisé au cours des campagnes 2005 et 2006, il a été effectué un suivi de la nappe régionale en Novembre 2006 et Mai 2007. Les résultats des analyses de ces suivis intégrés à ceux de la caractérisation de l'évolution des systèmes de cultures de saison des pluies et de contre-saison et des performances de l'irrigation induites, ont permis d'appréhender l'impact des cultures de contre-saison sur l'évolution du niveau de la nappe régionale.

2.4 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES DU CHAPITRE 2

H.N'D.(1998) Ingénieur conseil .Etude environnementale de la zone Office du Niger. Ministère du développement rural et de l'eau. [26].

Marlet, S., Tangara, B. & Ouvry, F. (1998). Bilan des eaux et des sels à l'échelle des périmètres irrigués à l'Office du Niger (Compte-rendu d'expérimentation), IER/PSI-Mali Travaux et études n°7. [4]

Molle, F. (1993) *Mission d'appui au projet Retail - Office du Niger (Mali). Volet Recherche-Développement.* Compte-rendu de mission 01-09 avril 1993 CIRAD (Montpellier, France) Rapport de mission 55 p. [41]

N'Diaye, M. K. (1987). Evaluation de la fertilité des sols à l'Office du Niger (Mali). Contribution à la recherche des causes et origines de la dégradation des sols dans le Kouroumari. Thèse de Docteur Ingénieur, INP Toulouse, 133 pages. [40]

SOGREAH/BCEOM/BETICO 1999. Etude du Schéma Directeur d'Aménagement pour la Zone de l'Office du Niger, 1° Etape: Diagnostique de la situation actuelle, Hydrologie. SOGREAH/BCEOM/BETICO, Ségou, Mali. .[9]

CHAPITRE 3 : EVOLUTION DES CULTURES DE CONTRE-SAISON DANS LE CASIER RETAIL DE LA ZONE OFFICE DU NIGER DE NIONO

3.1 INTRODUCTION

L'intensification du système de production, promu à l'Office du Niger et en particulier dans le cadre du projet Retail (*Jamin, Zerbo, Berete, Sanoqo & Keïta, 1990 ; Jamin & Molle, 1993[1]*), s'est, entre autres, axée sur la promotion des cultures de contre-saison : développement de la riziculture, diversification des cultures, en particulier encouragement au maraîchage. Des arroseurs spécialisés pour la simple culture du riz (SC), la double culture du riz (DC) et pour le maraîchage (M), ont été créés à cet effet. Pendant plus de deux décennies, les cultures de contre-saison (20% des surfaces) et particulièrement la double culture du riz ont été ainsi encouragées par l'Office du Niger. La culture de riz de contre-saison, techniquement plus difficile, n'a jamais atteint la rentabilité de celle du riz d'hivernage. Par contre les cultures maraîchères de saison froide, de novembre à avril, se sont révélées très rentables (*Chohin-Kuper, Kelly & Mariko, 1999 [2]*) et constituent une source de revenus individuels importants spécialement pour les femmes et les jeunes.

A l'origine, localisé à proximité des villages sur des arroseurs spécifiques, et dévolus aux femmes pour satisfaire les besoins de la famille, le maraîchage s'est ensuite étendu aux casiers prévus pour la seule culture de riz, où il alterne avec le riz d'hivernage. En 1997, environ 35% des superficies maraîchères occupent les casiers de riz, 37% les hors casiers et 28% les soles maraîchères. Les cinq zones de l'Office du Niger ont vu leurs superficies maraîchères augmenter entre 1994 et 2000, de 1 700 à près de 4 000 hectares (*source : Office du Niger & URDOC, 2000*). Parmi ces zones, Niono est la zone sur laquelle la diversification est la plus importante. Les superficies cultivées en maraîchage sur la zone de Niono durant la contre-saison 1995/1996 couvraient près de 677 ha dont près de 300 ha dans le casier Retail (*Ducrot, Coulibaly, Keïta, Bah, TraoréB. & Traoré M., 1997 [3]*).

La culture de riz reste au sein de l'Office le pivot du système de culture et la diversification de contre-saison reste encore marginale (10 à 20% des terres aménagées) et ne concerne qu'un nombre restreint de spéculations : les cultures d'échalote et de tomate. Néanmoins, de culture de subsistance, le maraîchage est devenu une réelle activité de diversification, offrant aux producteurs une perspective de revenus supplémentaires. De plus en plus de personnes sont impliquées dans cette production, y compris les chefs d'exploitations, qui détiennent 25% des parcelles ; mais plus de la moitié des parcelles sont encore cultivées par les femmes (*Chohin-Kuper, Kelly & Mariko, 1999 [2]*). L'activité demeure

individuelle ; le chef de la concession attribue une parcelle, en début de saison, à chacun des dépendants intéressés.

Une enquête faite par le projet URDOC en 1996 [5] sur onze exploitations ayant presque les mêmes superficies en riz et en maraîchage en contre-saison, a permis de mettre en évidence que le maraîchage, plus générateur de revenus, est essentiellement pratiqué dans un but monétaire et peut être fait à titre individuel. Son développement s'inscrit bien souvent dans une stratégie d'intégration de l'agriculture et de l'élevage dans la mesure où l'investissement requis est financé à partir des revenus acquis grâce au riz et à l'élevage. Le surplus de revenu généré par le maraîchage devrait permettre d'augmenter la capacité de contribution financière des agriculteurs aux charges d'exploitation et de maintenance des infrastructures hydrauliques (*Sourisseau, 2000 [6]*). Aussi, tant par le renforcement de l'intégration des activités d'agriculture et d'élevage que par l'augmentation de la capacité des usagers à participer aux charges d'exploitation et de maintenance du réseau, le développement du maraîchage semble pouvoir constituer une solution permettant de consolider sur le moyen terme la durabilité des aménagements.

L'ensemble des résultats de suivi-évaluation et de recherche illustrent que, bien que marginales en terme de surface en comparaison à la riziculture, les cultures de contre-saison, et en particulier le maraîchage, représentent un enjeu important quant à la durabilité des systèmes de production paysans à l'Office du Niger. En sont pour preuve l'intégration de leur développement dans des stratégies paysannes d'augmentation des revenus par une plus forte intégration des activités agricoles et d'élevage et la diffusion de la pratique des cultures maraîchères sur des parcelles initialement rizicoles, les agriculteurs ne se contentant plus des parcelles de culture purement maraîchères. Mais les travaux de synthèse les plus récents concernent essentiellement la période 1998-2000 et peu les dynamiques plus récentes. Aussi, pour évaluer l'impact à moyen terme du développement des cultures de contre-saison sur l'efficience du système hydraulique et sur les paramètres de risque de la dégradation des facteurs de production, comme on se le propose dans le cadre de ce travail, il serait nécessaire de prendre en compte l'évolution récente de ses modes de conduite et les stratégies qui les sous-tendent.

Le présent chapitre a pour **objet** de connaître et de caractériser les dynamiques actuelles des cultures de contre-saison, et les déterminants qui sont à la base de cette

dynamique. Pour cela nous avons **procédé** à (i) une analyse des données existantes sur la mise en valeur agricole du casier, (ii) et à une enquête et cartographie exhaustive des échantillons d'exploitations rizicoles. Ces études sont menées pour permettre de vérifier **l'hypothèse** que les conditions spatiales de mise en place des cultures de contre-saison sont de plus en plus diversifiées.

3.2 MATERIELS ET METHODES

3.2.1 CHOIX DES SITES D'ETUDE

Le choix des sites d'étude intègre les résultats d'études antérieures, avec comme critères, la zone de production et le casier rizicole qui font le maximum de cultures de contre-saison (riz et maraîchage) à l'Office du Niger. Ainsi, selon les statistiques de l'Office du Niger et de l'URDOC (Unité de Recherche Développement et Observatoire pour le Changement), les superficies maraîchères cultivées sont passées du simple (1700 ha) à plus du double (4000 ha) dans les zones de production rizicoles avec la zone de Niono en tête en une dizaine d'année. Cette dynamique est particulièrement forte sur le casier Retail qui a été le premier à bénéficier de l'intensification du système de production avec le projet Retail en 1986.

Le casier Retail (*Figure 3-1*) a de ce fait été choisi comme première échelle d'étude pour appréhender l'évolution des cultures de contre-saison à l'Office du Niger.

Le casier totalise (*Tableau 3-1*) une superficie d'environ 5604 ha aménagées en quatre phases : Retail 1, Retail 2, Retail 3, et enfin Retail 4, plus les parcelles expérimentales de la station de recherche agronomique de l'Institut d'Economie Rural (IER) de Niono (N2). Quatorze partiteurs et sous partiteurs irriguent plus de 2000 exploitations réparties entre quinze villages.

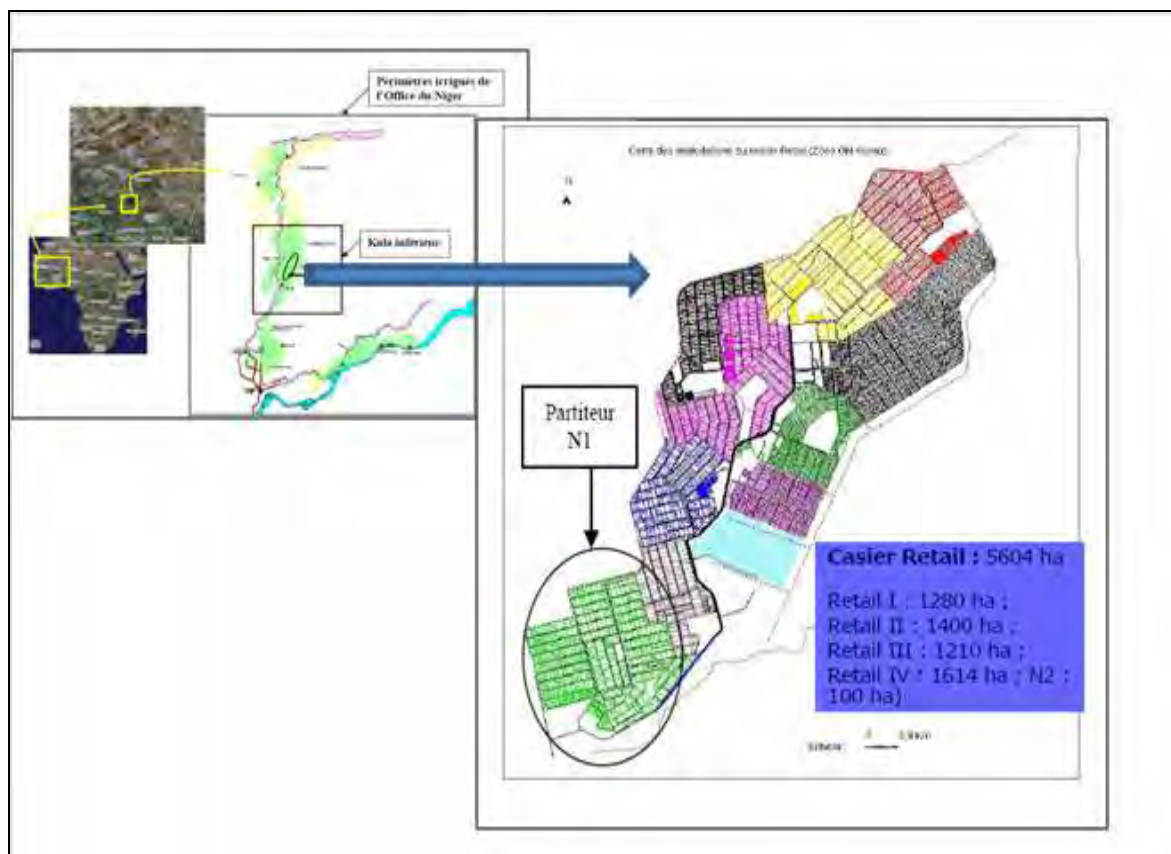


Figure 3- 1 : Carte du parcellaire du casier Retail de la zone Office du Niger de Niono (à partir du fichier cadastral de l'ON).

Tableau 3- 1 : Répartition des superficies et des exploitations par partiteur, par village et par période de réhabilitation au casier Retail.

| Libellé | Superficie (ha) | Partiteurs/distributeur | Superficie (ha) | Nombre exploitations (2003-2004) | Année réhabilitation | Villages |
|---------------|-----------------|-------------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------|---|
| Retail 1 | 1280 | N1 | 580 | 297 | 1986 | Coloni |
| | | N3 | 216 | 77 | | Nango |
| | | N4 | 273 | 101 | | Sassagidji |
| Retail 2 | 1400 | N6 | 426 | 238 | 1991 | Sagnona |
| | | N6 bis | | 94 | | Niéssoumana |
| | | N9 | 585 | 137 | | Tissana |
| | | N10 | 151 | 154 | | Ténégué |
| Retail 3 | 1210 | N3 bis | 170 | 195 | 1997 | Niono et autres |
| | | N5 | 241 | 85 | | Tigabougou |
| | | N7 | 221 | 153 | | Wélintiguila |
| | | N8 | 444 | 165 | | Wérékélé |
| | | N8 bis | 134 | | | |
| Retail 4 | 1614 | Retail 4 | 1614 | n.c | 2004 | N8 Coura, N'Djella, siraouma, Bamada, et autres |
| Station Sahel | | N2 | 100 | IER | | Station |
| Casier | Retail | Distributeur | 5604 | n.c | | Tous les villages |

nc : non connu

3.2.2 MATERIELS DE SUIVIS ET D'ENQUETES

Le report cartographique des résultats du suivi de l'implantation des cultures de contre-saison (riz et maraîchage) a été réalisé à partir des fonds de carte issus de la base de données du cadastre de l'Office du Niger. A chaque parcelle élémentaire du casier sont associés : le nom de l'attributaire, le numéro de famille de l'attributaire, le numéros d'identification de la parcelle, la superficie, le nom des réseaux d'irrigation et de drainage dont elle dépend.

L'historique (2000 à 2005) des données descriptives de la mise en valeur agricole de contre-saison fournies par le service suivi évaluation de la zone de Niono ont été critiquées puis insérées dans une base de données développée sous Excel.

Six enquêteurs et un cartographe ont été utilisés pour réaliser le travail d'enquête de terrain en 2006.

3.2.3 METHODE DE COLLECTE DES DONNEES

Les données historiques et d'enquête ont été structurées dans une base de données développée sous EXCEL. Cette base de données a permis (i) de rassembler et d'ordonner les données existantes par arroseur afin de décrire le plus exhaustivement possible les dynamiques (évolution et mode de gestion) des systèmes de culture de contre-saison au cours des cinq dernières campagnes sur le casier Retail, (ii) d'identifier des sites d'études sur lesquels ont été réalisées les recherches de terrain et (iii) de structurer l'extrapolation des résultats à l'ensemble du casier afin d'évaluer les tendances d'évolution de la durabilité des systèmes de culture de contre-saison à court et moyen terme.

La base de données a été ensuite interfacée à la base de données cartographique du système d'Information Géographique (SIG) de l'Office du Niger. Cela a permis, outre une représentation cartographique de toutes les informations attributaires qui caractérisent chaque parcelle élémentaire (nom de l'exploitant, numéros de famille de l'exploitant, numéros d'identification de la parcelle élémentaire, réseau d'irrigation et de drainage afférant à la parcelle, type de sol, etc...), d'intégrer leurs modes de mise en valeur agricole (cultures pratiquées, calendrier cultural, quantités et qualités d'intrants apportés, niveau de consommation d'eau, etc...).

Le Retail IV ne faisant pas de culture de contre-saison depuis sa première année de réhabilitation est exclu de l'échantillon d'étude.

L'analyse a été faite en prenant pour échantillon l'ensemble des dix villages du casier Retail. Ces données hiérarchisées, sont caractérisées par les superficies mises en culture de riz ou de maraîchage sur les parcelles de double culture riz, de simple culture riz et de maraîchage. Chaque superficie parcellaire, emblavée ou pas, est fichée par un numéro d'identification parcellaire, un numéro de famille et le nom de l'attributaire de la parcelle.

Cette base de données a été croisée à la base de données cadastrale de l'Office du Niger, ayant permis une caractérisation complète de chaque parcelle dans le réseau hydraulique. Ainsi, chaque parcelle est liée à la rigole (réseau quaternaire), à l'arroseur (réseau tertiaire), au partiteur (réseau secondaire) et enfin au distributeur (réseau primaire) qui la dessert. Deux types de données (attributaires et cartographiques) permettront donc de caractériser chaque parcelle.

L'analyse de cette base de données a permis de retenir un échantillon de six villages sur les dix initialement considérés sur lesquels a été réalisée une enquête afin de connaître, de comprendre et de trouver des explications aux différentes modes de rotations que les producteurs font sur leurs parcelles en contre-saison.

Le choix de l'échantillon a été réalisé en prenant pour critères (i) l'intensité culturelle en contre-saison, (ii) l'importance des superficies cultivées en contre-saison par le village et (iii) les phases de réhabilitation du casier. Vu la faible diversité des pratiques entre les exploitations dans le casier, 10% des exploitations rizicoles de chaque village ont été enquêtées en prenant comme critère (i) la taille et (ii) la position géographique de l'exploitation par rapport au réseau d'irrigation et (iii) le statut du chef d'exploitation (résident, chef d'arroseur).

L'enquête réalisée auprès des chefs de ces exploitations a eu pour objet de les caractériser : (i) intensité culturelle, (ii) systèmes de culture, (iii) historique de l'exploitation, (iv) motivation pour les pratiques des cultures de contre saison,

Une autre enquête a été parallèlement réalisée au niveau de tous les chefs d'arroseurs ou d'OERT¹ pour connaître l'historique de la mise en valeur des parcelles de chaque arroseur pendant ces cinq dernières années de contre-saison (2000 à 2005), et le type de sol dominant sur l'arroseur. Ces informations recoupées avec celles données par la carte morpho pédologique de l'ON à l'échelle du Kala inférieur (zone de Niono, Molodo,

¹ Organisation pour l'Entretien du Réseau Tertiaire

N'Débougou) a permis de rattacher les parcelles de chaque arroseur à un type de sol dominant.

Ces enquêtes ont permis une cartographie exhaustive de la mise en valeur des exploitations rizicoles dans les six villages retenus en contre-saison 2005-2006 en utilisant comme support la carte cadastrale fournie par l'ON.

3.2.4 METHODES D'ANALYSE DES RESULTATS

La caractérisation des tendances et des dynamiques d'évolution des cultures de contre-saison, ainsi que les déterminants qui sont à sa base ont été identifiés en considérant quatre niveaux d'analyses des données, à savoir :

1. L'appréciation de la tendance d'évolution des superficies cultivées par type d'arroseur (arroseur de simple culture, de double culture, et de maraîchage) pendant ces cinq dernières années de mise en valeur en contre-saison afin d'apprécier les nouvelles dynamiques de mise en valeur par rapport à celle prévue lors de la réhabilitation.
2. L'appréciation de la superficie totale mise en cultures (riz et maraîchage) par village pendant les cinq dernières campagnes de contre-saison ; le taux d'intensification culturelle (rapport de la superficie cultivée sur la superficie aménagée) et la période de réhabilitation ont été pris en compte.
3. L'analyse des résultats d'enquête auprès des 10% d'exploitations de chacun des échantillons de village et auprès des chefs d'arroseurs afin d'identifier les principaux déterminants qui motivent les exploitants à faire les cultures de contre-saison, et de trouver des explications à ces nouvelles dynamiques d'assolement au niveau des différents types d'arroseurs.
4. L'analyse des résultats de la cartographie des cultures pendant la contre-saison 2005-2006 afin de valider les résultats de la base de données du suivi évaluation de l'Office du Niger au cours de ces cinq dernières années de mise en valeur, et d'apprécier l'évolution des rotations culturales pratiquées et des superficies emblavées.

3.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

3.3.1 CARACTERISATION DE L'EVOLUTION DES DYNAMIQUES DE LA MISE EN VALEUR D'EXPLOITATIONS RIZICOLES EN CONTRE-SAISON.

Les résultats d'analyse de la base de données du suivi-évaluation de l'ON au cours des cinq dernières années de contre-saison (2000 à 2005) ont permis de réaliser une première typologie des dynamiques de la mise en valeur des exploitations rizicoles dans laquelle six types principaux (*Tableau 3-2*), relevant des trois types d'arroseurs (arroseurs maraîchers, arroseurs de simple culture riz et arroseurs de double culture riz) ont été identifiés (*Figure 3-2*).

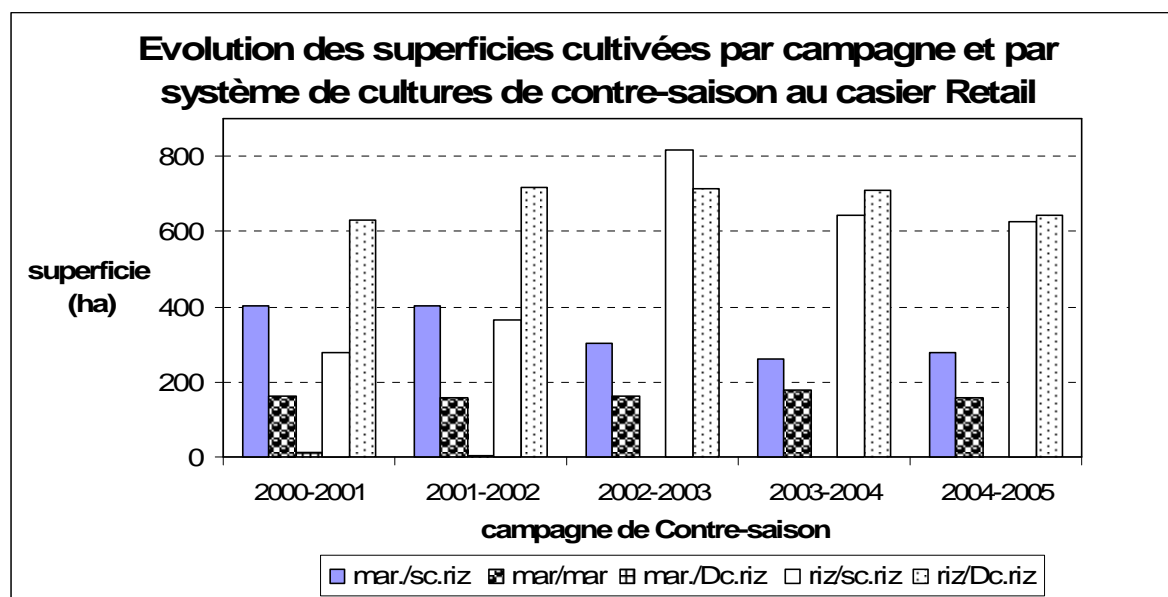


Figure 3- 2: Evolution des superficies cultivées par campagne de contre-saison et par type de cultures sur les types d'arroseurs prévus par l'aménagement au casier Retail.

Tableau 3- 2 : Principaux type de mise en valeur en contre-saison suivant la vocation initiale de l'arroseur

| Arroseur | Type de mise en valeur en CS | |
|-----------------------------------|------------------------------|---|
| Arroseur maraîcher | 1 | Maraîchage de contre-saison et jachère en hivernage, donc il n'y a que du maraîchage sur ces parcelles maraîchères en contre-saison |
| Arroseur de double culture riz | 2 | Maraîchage de contre-saison et riz en hivernage, |
| | 3 | Riz de contre-saison et riz en hivernage |
| Arroseur de simple culture de riz | 4 | Maraîchage de contre-saison sur une portion de la parcelle et riz en hivernage; |
| | 5 | Riz de contre-saison et riz en hivernage. |
| | 6 | Riz de contre-saison sur une portion de la parcelle et riz en hivernage |

L'apparition de nouvelles rotations se situe essentiellement au niveau des parcelles de simple culture (SC) de riz (*Figure 3-2*).

L'analyse de ces mêmes données a permis de retenir six échantillons de villages dans le casier Retail. Il s'agit des villages de Coloni (N1) et Sassagodji (N4) au niveau du Retail 1, Tissana (N9) et Ténégué (N10) au niveau du Retail 2 et enfin Wélintiguila (N7) et Wérékela (N8) au niveau de Retail 3.

Les critères de sélection retenus ont été: (i) superficies maximum emblavées par village en contre-saison (*Figure 3-3*), (ii) superficies maximum mises en cultures (*Figure 3-4*) avec le type de rotation dominant intégrant le maximum de cultures maraîchères (échalote/oignon, tomate), (iii) intensités culturales maximum (*Tableau 3-3*), et enfin (iv) les phases de réhabilitation².

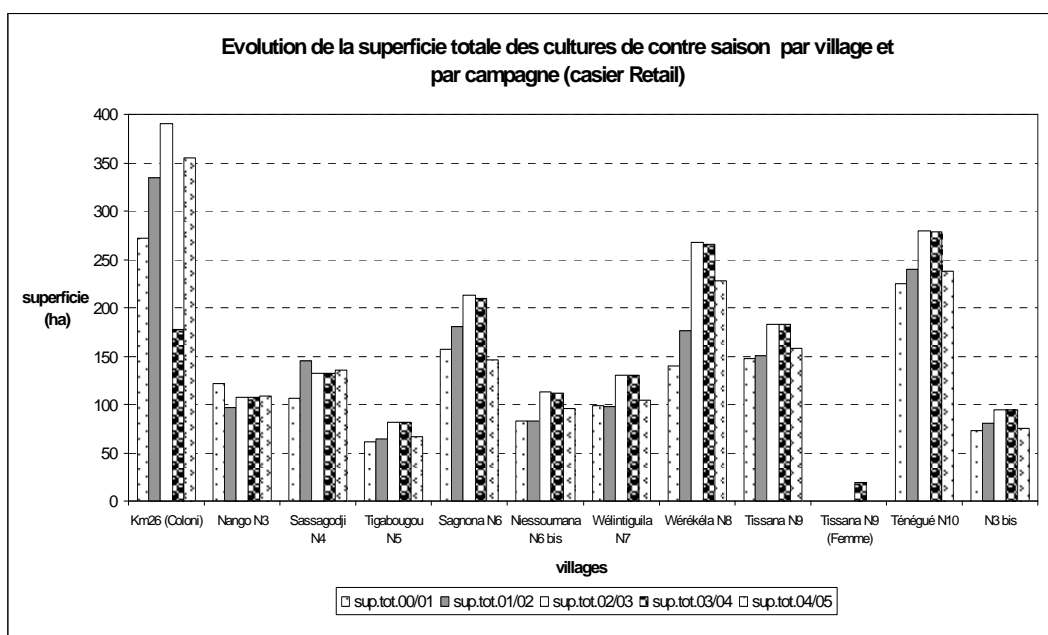


Figure 3- 3: Evolution de la superficie totale des cultures de contre-saison par village et par campagne dans le casier Retail.

² Le casier rizicole de Retail a été réhabilité en quatre phases : Retail 1, 2, 3, 4.

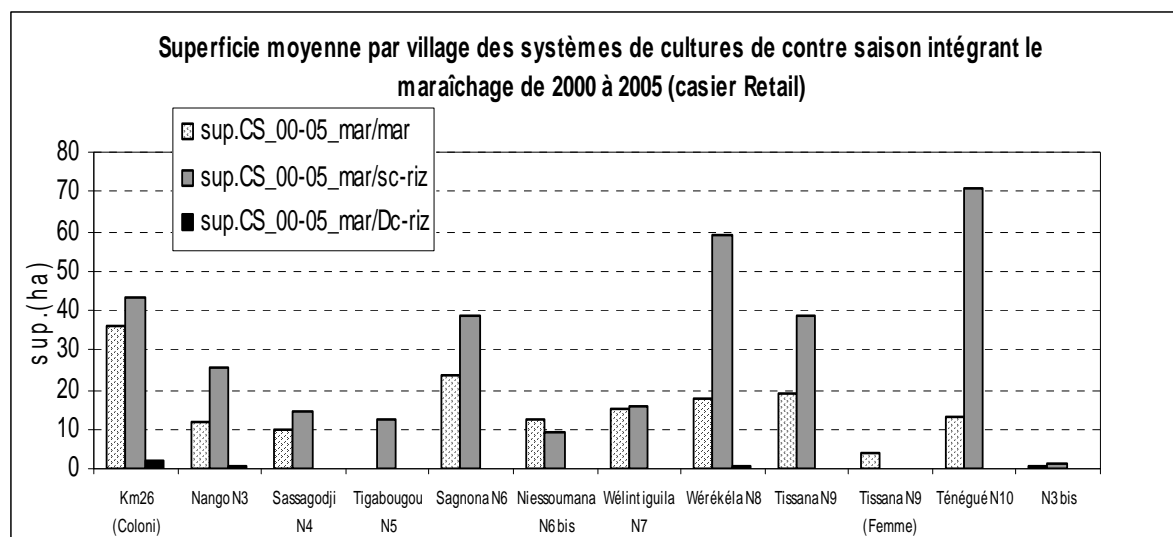


Figure 3- 4: Superficie moyenne par village en fonction des systèmes de culture de contre-saison (intégrant le maraîchage) dans le casier Retail.

Tableau 3- 3: Récapitulatif de la moyenne de l'intensification culturelle en contre-saison sur ces cinq dernières années (2000 à 2005) de mises en valeur des exploitations rizicoles au casier Retail.

Récapitulatif de la moyenne de l'intensification culturelle en contre-saison sur les cinq dernières années au Retail

| | |
|---------------------|--|
| sup.CS_00-05 | intensité culturelle |
| mar/mar | superficie contre saison_2000-2005 |
| mar/sc-riz | maraîchage sur parcelles maraîchère |
| riz/Dc-riz | maraîchage sur parcelles de simple culture riz |
| | riz sur parcelles de double culture riz |

| village | Aménagement | sup.CS_00-05 mar/mar | sup.CS_00-05 mar/sc-riz | sup.CS_00-05 mar/Dc-riz | sup.CS_00-05 riz/sc-riz | sup.CS_00-05 riz/Dc-riz |
|--------------------|-------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Km26 (Coloni) | rétail.1 | 95,13 | 9,90 | 1,17 | 19,77 | 79,99 |
| Nango N3 | rétail.1 | 94,74 | 15,29 | 1,00 | 15,52 | 94,29 |
| Sassagodji N4 | rétail.1 | 51,88 | 7,04 | 0,00 | 23,02 | 88,69 |
| Tigabougou N5 | rétail 3 | - | 6,26 | - | 8,74 | - |
| Sagnona N6 | rétail 2 | 81,50 | 13,17 | 0,00 | 13,22 | 88,51 |
| Niessoumana N6 bis | rétail 2 | 159,77 | 5,31 | 0,00 | 16,29 | 82,30 |
| Wélintiguila N7 | rétail 3 | - | 13,72 | 0,00 | 19,61 | 105,25 |
| Wérékéla N8 | rétail 3 | - | 10,80 | 1,77 | 13,59 | 129,41 |
| Tissana N9 | rétail 2 | 77,63 | 16,23 | 0,00 | 14,44 | 83,53 |
| Tissana N9 (Femme) | rétail 2 | - | - | - | - | - |
| Ténégué N10 | rétail 2 | 67,54 | 21,57 | 0,00 | 24,74 | 119,17 |
| N3 bis | rétail 3 | - | 0,56 | 0,00 | 46,72 | 0,00 |

Au regard des enquêtes faites au niveau des Chefs d'exploitations dans le cadre de l'identification des déterminants des dynamiques d'évolution des systèmes de cultures de contre-saison (*Tableau 3-4*), il ressort que dans les échantillons de villages étudiés, 31% de la moyenne sur cinq ans (2000 à 2005) des superficies totales aménagées, disponibles sont emblavées en contre-saison. Ce taux d'intensité culturelle moyen (31%) dépasse la valeur de 20% prévue par l'aménagement. Cette dynamique d'accroissement des superficies cultivées

en contre-saison est notoire dans les parcelles de simple culture de riz avec une diversité importante de rotations culturales. Il est à noter une disparition du schéma de mise en valeur initialement prévu par l'aménagement.

Plusieurs raisons sont mises en évidence pour expliquer ces nouvelles dynamiques. Il s'agit :

- du manque de superficies de double culture riz,
- de la recherche de l'amélioration de l'autosuffisance alimentaire et des revenus des exploitations agricoles,
- du risque lié à la commercialisation du maraîchage par rapport à la riziculture ;
- de la libération de la vocation des arroseurs au cours de ces cinq dernières campagnes de contre-saison (2000 à 2005).

Tableau 3- 4 : Récapitulatif des résultats d'enquête de cinq campagnes culturelles de contre-saison (CS) 2000 à 2005 sur 10% des exploitations choisies dans les six échantillons de villages retenus au niveau du casier Retail.

| Libellés | Echantillons de villages du casier Retail | | | | | |
|--|--|--|---|---|--|---|
| | Coloni (N1) | Sassagodji (N4) | Tissana (N9) | Ténégué (N10) | Wérékéla (N8) | Wélintiguila (N7) |
| Nombre d'exploitations enquêtées | 15 | 26 | 16 | 13 | 18 | 16 |
| Superficie moyenne en riz sur cinq campagnes de CS (ha) | 7,35 | 19,39 | 14,55 | 20,77 | 27,5 | 20,60 |
| Superficie moyenne en maraîchage sur cinq campagnes de CS (ha) | 2,02 | 7,20 | 4,78 | 2,87 | 4,15 | 8,29 |
| Moyenne des superficies emblavées sur cinq campagnes de CS (ha) | 9,37 | 26,59 | 19,32 | 23,64 | 31,65 | 28,89 |
| Moyenne des superficies disponibles sur cinq campagnes de CS (ha) | 37,48 | 82,52 | 54,85 | 71,91 | 107,65 | 86,52 |
| % de superficie moyenne emblavée en CS | 25 | 32 | 35 | 33 | 29 | 33 |
| % de superficie moyenne en riz de CS | 78 | 73 | 75 | 88 | 87 | 71 |
| % de superficie moyenne en maraîchage de CS | 22 | 27 | 25 | 12 | 13 | 29 |
| Superficie moyenne en riz de CS sur parcelles de SC (ha) | 0 | 3,5 | 2,25 | 5,5 | 5 | 5 |
| Superficie moyenne en maraîchage de CS sur parcelles de SC (ha) | 0 | 1,45 | 1,02 | 1,61 | 0,95 | 1,80 |
| % de riz de CS sur la moyenne des superficies de SC cultivées | 0 | 71 | 69 | 77 | 84 | 74 |
| % de maraîchage de CS sur la moyenne des superficies de SC cultivées | 0 | 29 | 31 | 23 | 16 | 26 |
| % de la superficie moyenne cultivée sur parcelles de SC | 0 | 8 | 8 | 13 | 7 | 11 |
| Rotations culturelles sur parcelles de SC (% exploitation) | RJ (99) ; RJ et RR (1) | RJ (42) ; RR et RJ (42) ; RR, RM et RJ (12) ; RM et RJ (4) | RJ (56) ; RJ, RR et RM (31) ; RJ et RM (13) | RJ et RM (15) ; RR, RJ et RM (46) ; RJ (39) | RR et RJ (28) ; RJ (56) ; RJ et RM (17) | RJ (37), RM et RJ (31), RR, RJ et RM (19) ; RJ et RR (13) |
| Rotations culturelles sur parcelles de DC (% exploitation) | RR (100) | RR (100) | RR (100) | RR (100) | RR (100) | RR (100) |
| Rotations culturelles sur parcelles de maraîchère (% exploitation) | MM (73) ; JM (26) ; RM (1) | MM (62) ; JM (27) ; RM (11) | MM (56) ; RM (31) ; pas de parcelles maraîchères (13) | MM (46) ; JM (15) ; RM (23) ; pas de parcelles maraîchères (15) | MM (83) ; JM (6) ; pas de parcelles maraîchères (11) | MM (31) ; JM (25) ; RM (44) |
| Raisons de ces rotations | <ul style="list-style-type: none"> - insuffisance ou absence de parcelles de contre-saison (DC ou maraîchage) ; - libéralisation des systèmes de cultures riz-maraîchage avec le riz comme spéculation de base ; - recherche de l'autosuffisance alimentaire avec une intensification agricole basée sur la rotation riz-maraîchage ; augmentation du revenu des exploitations agricoles ; - assurer les besoins de l'exploitation (paiement de la redevance eau, assurer les charges d'exploitation des parcelles) ; - nouvelles stratégies de gestion des exploitations rizicoles face aux coûts élevés des engrais minéraux et à l'usage abusive des sols ; - respect du statut d'affectation de la parcelle, inondation des certaines parcelles en saison. | | | | | |

RJ : riz/jachère ; RR : riz/riz ; RM : riz/maraîchage ; MM : maraîchage/maraîchage ; JM : jachère/maraîchage

3.3.2 CARACTERISATION DE L'EVOLUTION DES DYNAMIQUES DE LA MISE EN VALEUR EN CONTRE-SAISON AU NIVEAU DES DIFFERENTS TYPES D'ARROSEURS

Les résultats d'enquêtes conduites tant auprès des Chefs d'arroseurs ou d'OERT (Organisation pour l'Entretien du Réseau Tertiaire) qu'au niveau des exploitations montrent un accroissement des surfaces cultivées en contre-saison passant pratiquement du simple au double au cours de ces cinq dernières années (2000 à 2005) de mise en valeur des parcelles, avec une forte prédominance du riz sur le maraîchage (*Figure 3-5*).

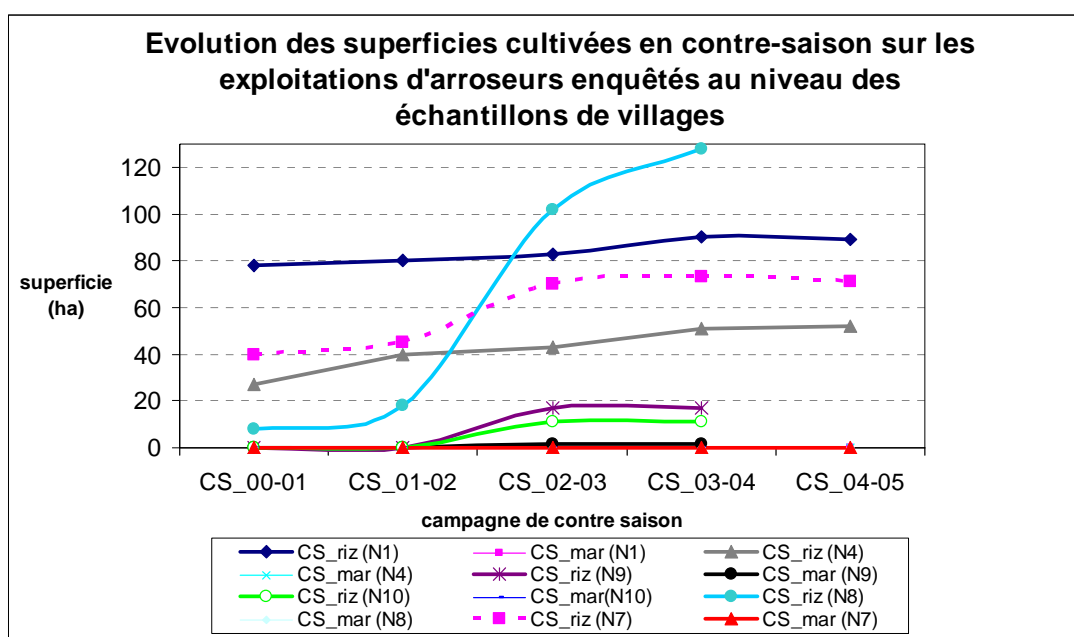


Figure 3- 5: Evolution des superficies emblavées en contre-saison au cours de ces cinq dernières années sur les arroseurs enquêtés.

Dans le cadre du schémas directeur de l'ON avec l'aménagement de 200 000 ha prévu d'ici l'année 2020 et l'installation d'opérateurs privés et d'agro industriels, ces superficies cultivées en contre-saison pourraient encore augmenter avec un taux d'accroissement moyen de 29,45% calculé entre la campagne culturale 1995/96 et 2006/07 (*Figure 3-6*).

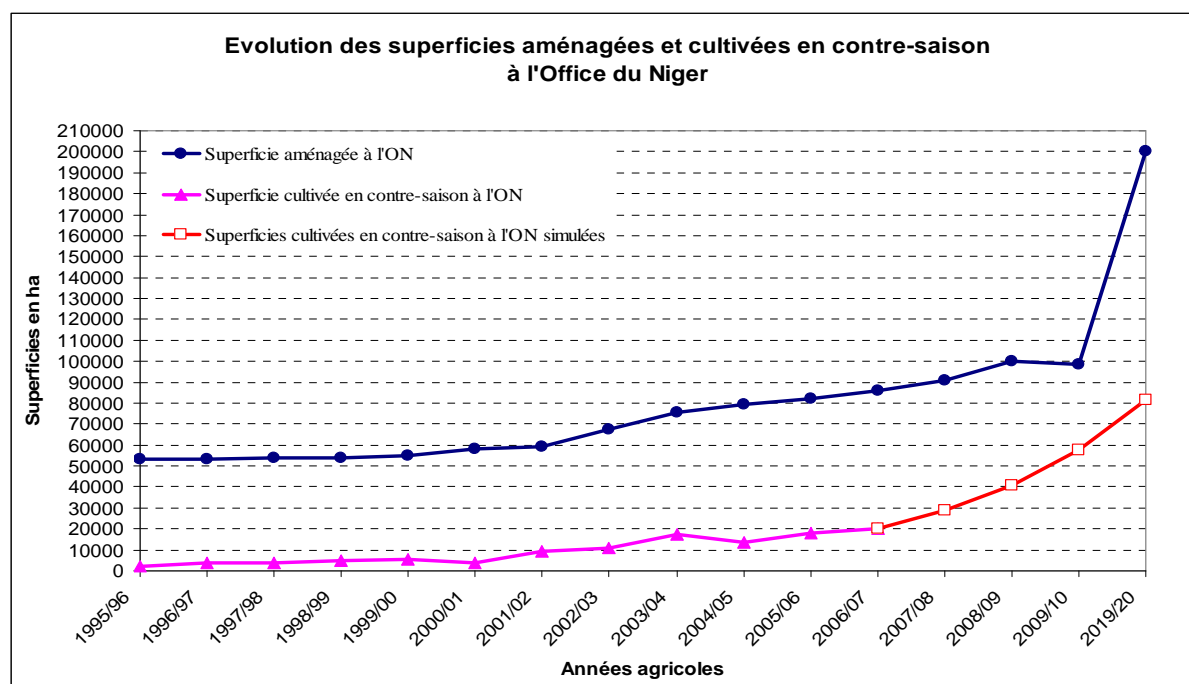


Figure 3- 6 : Evolution des superficies aménagées et cultivées en contre-saison à l'ON au cours de ces quinze dernières années.

L'analyse combinée des informations issues du suivi-évaluation de l'ON sur cinq années : 2000 à 2005 et de la cartographie des cultures sur la mise en valeur des parcelles du casier Retail en contre-saison 2005-2006 a permis de faire ressortir six classes de mise en valeur des arroseurs en fonction de l'intensité culturale (IC)³ et de la spéculation (Riz ou maraîchage) en place (*Figure 3-7*). Il s'agit de la :

1. classe A : IC faible riz dominant,
2. classe B : IC faible, maraîchage dominant,
3. classe C : IC moyenne, riz dominant
4. classe D : IC moyenne, maraîchage important,
5. classe E : IC forte, riz dominant
6. classe F : IC forte, maraîchage important.

Les fourchettes d'intensité culturale sont caractérisées par rapport à la norme de 20% (valeur moyenne entre 15 et 25%) affichée par le projet Retail en 1986. Ainsi, L'IC est faible quand la superficie totale mise en valeur en contre-saison est inférieure à 15% de la superficie totale aménagée et mise en valeur en saison hivernale. Elle est forte quand cette valeur dépasse 25%.

³ Rapport en pourcentage entre superficie cultivée et superficie totale aménagée

Sur les différents types d'arroiseurs à l'échelle des six échantillons de villages retenus dans le casier, la superficie emblavée sur les parcelles de simple culture riz occupe 76% de la superficie agricole utile (SAU) tandis que les parcelles de double culture de riz et de maraîchage n'occupent respectivement que 19 et 5% (*Figure 3-8*). Toute la dynamique des cultures de contre-saison se situe au niveau des parcelles des arroiseurs de simple culture riz où les six classes de mise en valeur se trouvent. A ce niveau, la classe A (IC faible, riz dominant) occupe 26% de la SAU à l'échelle des six villages. Les classes E (IC forte, riz dominant) et F (IC forte, maraîchage important) n'occupent que de faibles pourcentages : 3 et 2%.

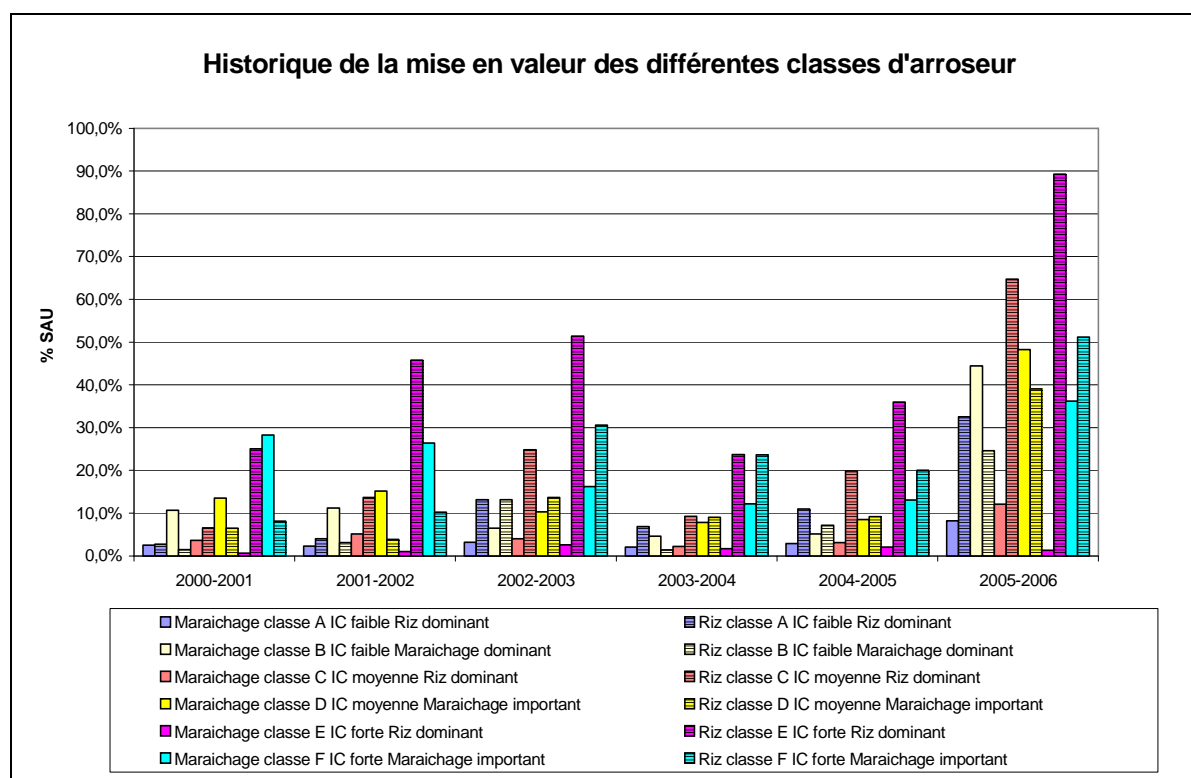


Figure 3- 7: Typologie de l'historique de la mise en valeur des arroiseurs de simple culture (SC).

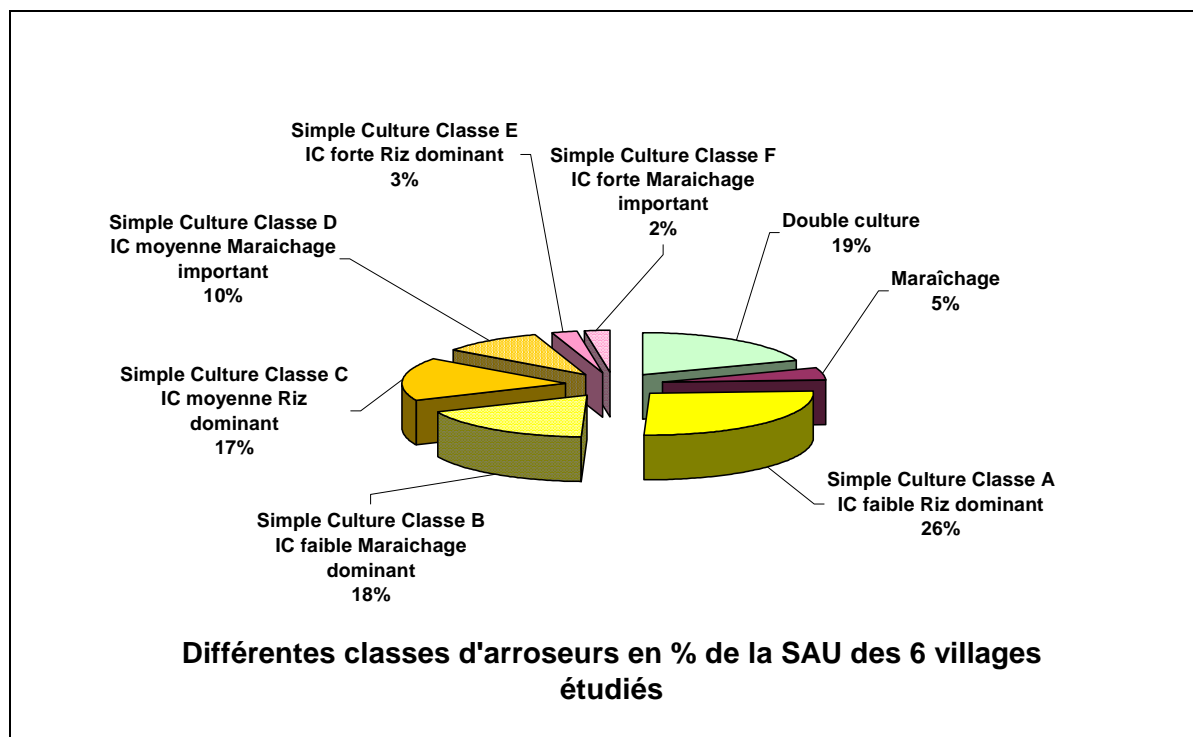


Figure 3- 8 : Typologie de l'historique de la mise en valeur des types d'arroseurs.

3.3.3 INTERPRETATION

L'analyse des données de l'évolution de la dynamique de mise en valeur des différents types d'arroseurs a montré six systèmes de culture ou rotations (source : Suivi-évaluation ON Niono). Ces résultats sont confirmés par ceux de l'enquête. Les deux sources d'informations ont également mis en évidence que ces dernières années (2000 à 2006), les superficies emblavées en contre-saison ont augmenté, passant presque du simple au double. Cette dynamique de mise en valeur des cultures de contre-saison se situe essentiellement au niveau des parcelles des arroseurs de simple culture riz. Par contre cette analyse ne montre ni de relation significative entre types de sols et mise en valeur des parcelles, ni de logique de rotations culturelles ; toutes les alternatives de rotations riz et maraîchage existent actuellement dans le casier rizicole du Retail.

Face à la recherche des agriculteurs à améliorer leur autosuffisance alimentaire, ainsi que leurs revenus, l'apparition de la mise en valeur des parcelles sur les arroseurs de simple culture est imputable au manque de superficies de double culture riz. Le risque lié à la commercialisation du maraîchage est certainement aussi la cause du constat que la riziculture de contre-saison progresse plus vite sans que soit significative une recherche de

valorisation de l'arrière effet du maraîchage sur la culture du riz. On notera que la libération de la vocation des arroseurs au cours de ces dernières années de contre-saison (2000 à 2006) est aussi un facteur explicatif de cet accroissement spectaculaire des superficies mises en cultures en contre-saison.

Aujourd'hui, sur le casier Retail, l'intensité culturelle dépasse la norme de 120% (100% de mise en valeur en hivernage et 20% en contre-saison) prévue par le projet au moment des différentes phases de réhabilitation du casier. Le cas de ce casier est un exemple développé par les agriculteurs qui répond aux objectifs du gouvernement de la république du Mali d'amélioration de l'autosuffisance alimentaire et du revenu des populations rurales.

3.3.4 DISCUSSIONS

Il est à noter que les superficies totales de simple culture (SC), de double culture (DC) et de maraîchage (M) déclarées par la plupart des Chefs d'exploitation enquêtés, sont généralement inférieures aux normes d'attribution par l'Office du Niger à l'issue des réhabilitations. Cette situation dénote la scission de la famille en plusieurs petites familles ou ménages au cours du temps. Chaque chef de ménage de l'ex-grande famille est devenu un chef d'exploitation. Les superficies de SC, DC et maraîchère allouées à la grande famille sont par conséquent morcelées entre les ménages. Chacun reçoit un nouveau numéro de famille. L'enquête n'a pas pris en compte cette évolution, et a utilisé les données attributaires de la base de l'Office du Niger, en son état d'actualisation. De ce fait, les superficies déclarées dans la plus part des cas ne concernent que celles qui reviennent à la personne interviewée. L'analyse comparée des données du bureau du suivi-évaluation⁴ de l'ON et de la recherche nationale⁵ (IER) relatives à l'échantillon de villages représentatifs, montre que, pour la même campagne de contre-saison 2005-2006, les surfaces sont sous estimées par les services de l'ON, 1661 ha contre 1860,53 ha, soit une marge d'erreur de 10%.

Bien que cette marge d'erreur soit acceptable, on peut s'interroger sur son origine : l'échantillonnage des six villages semble assez représentatif de la situation des cultures de contre-saison sur dix au total pour ne pas en être la cause principale. La faiblesse de

⁴ Les superficies déclarées dans cette base de données sont basées sur la facturation automatique (cas des superficies de double culture et maraîchères), le dégrèvement des superficies à problème (infestation du champs, crise d'eau ou noyade de la parcelle,...) bien que cultivées et la cartographie des cultures (cas des parcelles de simple cultures de riz).

⁵ Les superficies déclarées dans cette base de données sont issues d'une cartographie exhaustive des cultures en place).

l'échantillon d'exploitations à enquêter (10%) semble tout à fait appropriée du fait qu'en zone Office du Niger, il n'y a pas de grande variabilité de pratiques culturelles d'un producteur à l'autre producteur, bien que les non résidents aient été exclus. C'est plutôt au niveau des enquêtés que la marge d'erreur semble trouver une explication : pour la même exploitation, l'enquête IER a été réalisée à trois niveaux (Chef d'exploitation, cultivateur de la parcelle et une femme impliquée dans les travaux champêtres) alors que celle de l'ON ne concerne que les chefs d'exploitation⁶, ce qui pourrait limiter les informations données sur l'exploitation.

3.4 CONCLUSION

Les résultats d'étude montrent qu'à l'Office du Niger et précisément dans le casier Retail, l'augmentation des surfaces cultivées et l'évolution des systèmes de culture en contre-saison sont imputables à 4 facteurs :

1. La remise en cause du schéma de mise en valeur prévu par l'aménagement encouragé face au manque de surface de DC et à la pression des agriculteurs à la recherche de moyens leur permettant d'améliorer leur autosuffisance alimentaire et leurs revenus ;
2. La disparition de la contrainte au développement du maraîchage que constituait la dégradation des sols sur les parcelles dédiées du fait de la disparition du schéma permettant la culture de légumes sur les zones rizicoles ;
3. Le développement simultané de la riziculture et du maraîchage qui progresse plus vite que ce dernier du fait des difficultés épisodiques de commercialisation qui l'affectent ;
4. La reconnaissance institutionnelle de cette dynamique par la libéralisation de la vocation des arroseurs en 2005-2006 qui a provoqué un accroissement spectaculaire des superficies mises en cultures en contre-saison.

Ainsi, les superficies emblavées en cultures de contre-saison (riz et maraîchage) ont augmenté du simple au double au bout de sept ans, et continueront d'accroître avec l'ambition affichée de l'ON d'augmenter progressivement les superficies aménagées.

Face à cette dynamique, la question fondamentale est de savoir comment assurer l'utilisation rationnelle des ressources en eau mobilisées au niveau du barrage de Markala pour satisfaire l'ensemble des besoins (agricoles et domestiques) à moyen et long terme. D'après l'analyse des données sur le suivi d'irrigation des cinq campagnes (2000-2001 à

⁶ Après l'interview du Chef d'exploitation, aucun autre membre de la famille n'ose parler.

2004-2005) de contre-saison dans le casier Retail (Mission d'Assistance ATH international Groupe AG, 2005), il ressort que le casier Retail prélève en moyenne⁷ un volume d'eau de 25 419 306 m³ en contre-saison sur une prévision de 13 022 450 m³, soit 2 fois plus d'eau. Ce niveau de consommation est le reflet d'une gestion de l'eau inadéquate. Outre les dommages comme l'engorgement des parcelles, la dégradation des sols par alcalinisation due à la remontée des nappes qu'elle risque d'aggraver, cette gestion de l'eau inadéquate risque à très court terme de limiter les conditions d'accès à l'eau en contre-saison et les potentialités de développement de la double culture. Des alternatives doivent être recherchées, comme dans le cadre de cette thèse pour améliorer la gestion du système.

3.5 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE 3

Chohin-Kuper A., Kelly V., Mariko D., 1999. Le maraîchage dans la zone de l'Office du Niger au Mali. Quelle évaluation depuis la dévaluation du franc CFA ? Bamako, Mali ler-Insah, 33p.[2]

Ducrot R., Coulibaly Y.M., Keïta M., Bah S., Traoré O.B., Traoré M., (1997). URDOC : Rapport d'activités, contre-saison 1995/1996-hivernage 1996, 132p [3]

Jamin J-Y, Zerbo A.D, Berete O., Sanogo M.K., Keïta M., 1990 Conditions de l'intensification de la culture irriguée sans les grands périmètres sahéliens : cas du projet Retail à l'Office du Niger. Cahiers de recherche développement (14-15) : 132-139 [1]

Sourisseau, J.M., 2000 Les stratégies de diversification des revenus sur les grands aménagements hydro-agricoles sahéliens. Les cas de l'office du Niger au Mali et du delta du fleuve Sénégal Thèse 593-[75] p[6].

URDOC (1996) : Résultat sondage statistique maraîchage 1995/96. [5]

⁷ Prélèvement moyen sur cinq campagnes de contre-saison (2000-2001 à 2004-2005)

CHAPITRE 4: IMPACT DU DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON SUR LES PERFORMANCES DE L'IRRIGATION

4.1 INTRODUCTION

La mise en valeur des terres par l'irrigation a créé les conditions du développement agricole de la zone mais a aussi entraîné une forte exploitation des ressources naturelles (eau, sol). Malgré la restructuration de l'Office du Niger ayant pour but d'en améliorer l'exploitation et la maintenance, la marge de progrès reste encore très forte.

La contre-saison est en particulier souvent accusée d'être trop consommatrice en eau (Vandersypen et al, (2007)[1]) bien que l'efficience globale au niveau de l'Office du Niger soit du même ordre de grandeur 45 % pendant la contre-saison que pendant l'hivernage, les besoins en eau des rizières y sont en effet largement dépassés.

L'ensemble des études montre que ces fortes consommations sont en particulier le fait de la faible efficience du réseau primaire (biefs du fala de Molodo) dont l'importance relative varie en fonction du débit en saison des pluies et de la contre-saison (Hamel, Sidibé & Kaloga, 1998[2]). En 1998, les pertes estimées dans le seul fala de Molodo (Marlet, Tanqara & Ouvry, 1998 [3]) seraient de l'ordre de 41.8% pendant la contre-saison soit, de l'ordre de 18,9 m³/s pour un débit 46,2 m³/s; contrario on pourrait se demander si une augmentation de la surface irriguée en contre-saison modifierait beaucoup le niveau de ces pertes dans la mesure où dès à présent une grande partie du réseau reste en eau toute l'année.

Les données de consommation en eau en contre-saison sont peu nombreuses, la plupart des études antérieures s'étant focalisée sur la période d'hivernage; elles concernent essentiellement des sous partiteurs de N9-Tissana alimentant des parcelles rizicultivées (alimentation en tête d'arroseur de l'ordre de 16 000 m³/ha). Les consommations en eau à la parcelle sur maraîchage sont évaluées à de l'ordre de 6 mm par jour (Ouvry & Marlet, 1998 [4]). Selon Vandersypen et al.(2007) [1], L'origine de 40 % des pertes est au niveau des casiers, l'efficience au niveau des partiteurs étant de l'ordre de 90%.

Evaluer les performances de l'irrigation et en identifier les facteurs explicatifs est d'autant plus important que la campagne de contre-saison coïncide avec l'étiage du Fleuve Niger (Kuper, Olivry & Hassane, 2002 [5]) et que les énormes pertes d'eau qu'elle génère, en contribuant à l'alimentation de la nappe phréatique, sont la principale cause de sa remontée. Cette dynamique de la nappe, outre les risques d'engorgement des parcelles,

favorise des flux ascendants d'eau par remontées capillaires qui entraînent la concentration de sels au niveau de la zone racinaire des cultures.

Aussi, l'un des objectifs de ce travail de thèse a été, dans le cadre de ce chapitre, de rassembler les données disponibles concernant la contre-saison et d'effectuer des mesures complémentaires pour mieux appréhender les performances du réseau secondaire et ses modes d'exploitations en contre-saison afin d'être à même de mesurer l'impact des cultures de contre-saison.

Cette étude d'impact du développement des cultures de contre-saison sur les performances de l'irrigation vise dans ce cadre à caractériser, quantifier et modéliser les modes de gestion de l'irrigation des cultures et de leurs impacts sur les bilans en eau et les risques sur la dynamique de la nappe phréatique à différents niveaux d'échelles du réseau. Pour cela une analyse des données disponibles de suivi de la gestion de l'eau des réseaux primaires et secondaires a été combinée à une modélisation de la conduite de l'irrigation sur cinq échantillons d'arroseurs.

L'objectif de ces travaux a été de vérifier l'hypothèse selon laquelle les modes de gestion des cultures de contre-saison sont la principale cause de la faible efficacité de l'irrigation qui en contribuant au soutien de la nappe phréatique constitue un facteur de risque de dégradation des conditions de production du milieu.

4.2 MATERIELS ET METHODES

4.2.1 CHOIX DES SITES

La gestion de l'irrigation en contre-saison a été caractérisée à six niveaux d'échelles du réseau hydraulique (*Figure 4-1*).

Les six niveaux d'échelles concernés par cette étude sont respectivement :

1. l'échelle des aménagements de tout l'Office du Niger (88 880 ha),
2. l'échelle du réseau primaire du système canal du Sahel- fala de Molodo comprenant le Kala inférieur (zones de Niono, N'Débougou et Molodo) et le Kouroumari, soit au total 49 452 ha,
3. l'échelle du distributeur Retail (irrigant au total les onze partiteurs du casier Retail) pour une superficie de 5 059 ha,
4. L'échelle du partiteur (où, les onze partiteurs, du distributeur Retail, ont été étudiés),

5. L'échelle tertiaire (arroseur) au niveau du partiteur de N1 (580 ha), où des groupes d'arroseurs témoins (au nombre de 18 sur 27, soit 67%) sont choisis sur le partiteur pour le suivi des cultures (les dix huit arroseurs) et le suivi de l'irrigation et du drainage (cinq arroseurs supposés en bon état¹ et leurs drains correspondants, soit 30% des échantillons).
6. L'échelle parcellaire, où les calendriers culturaux de toutes les parcelles élémentaires des dix huit arroseurs ont été suivis au cours de la campagne de contre-saison 2007-2008.

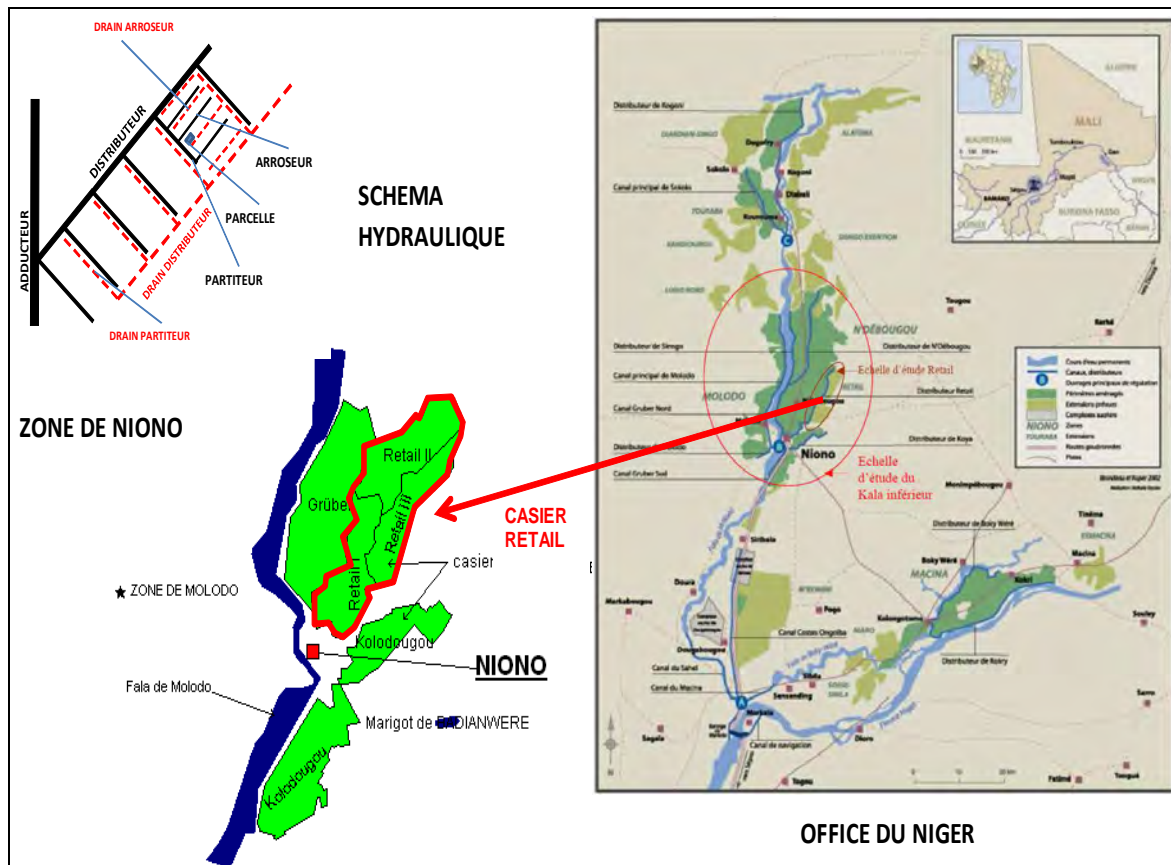


Figure 4- 1 : Carte de la zone Office du Niger

Le choix de ces arroseurs est réalisé en fonction de la représentativité de chaque type d'arroseurs (SC, DC), de l'historique de la mise en valeur de ces arroseurs (chapitre 3), les études antérieures menées, et d'autre part en prenant en compte la possibilité de mettre

¹ La majeure partie des prises d'arroseurs du casier Retail et particulièrement celles du partiteur N1 sont endommagés, délabrés (troués sur les prises de modules à masque, vannettes arrachées, calage modifié, etc)

en place un bilan d'eau permettant de caractériser les dynamiques évolutives liées aux pratiques des cultures de contre-saison.

Des dix huit (18) arroseurs retenus sur le partiteur N1 pour réaliser un suivi exhaustif du calendrier cultural (cf. chapitre 3), cinq arroseurs non troués et supposés avoir un fonctionnement correct ont été sélectionnés pour réaliser le suivi des apports d'eau et du drainage (*Tableau 4-1*). Ainsi, sept drains (cinq drains d'arroseur, un drain de partiteur, et un drain de sous partiteur) ont fait l'objet de suivi pendant cette campagne de contre-saison 2007-2008 dans le casier Retail. Ils ont pu être jaugés bien que de faibles débits d'eau drainés soient souvent enregistrés.

Tableau 4- 1 : Récapitulatif des arroseurs ayant fait l'objet d'un suivi au cours de la campagne de contre-saison 2007-2008

| | Arroseur | | Type | Suivi | |
|----------------------|----------|-----------------------|------|------------------------|------------------------|
| Partiteur N1 | 1 | N1-2g | DC | Calendrier cultural | Irrigation et drainage |
| | 2 | N1-3g, | | | |
| | 3 | N1-4g | | | |
| | 4 | N1-5g | | | |
| | 5 | N1-6g | | | |
| | 6 | N1-7g | | | |
| | 7 | N1-8g | | | |
| | 8 | N1-9g | | | |
| | 9 | N1-3d | SC | | Irrigation et drainage |
| | 10 | N1-4d | | | |
| | 11 | N1-5d | | | |
| | 12 | N1-6d | | | |
| | 13 | N1-7d | | | |
| | 14 | N1-8d | | | |
| | 15 | N1-9d | | | |
| Sous partiteur N1-2D | 16 | N1-2D-1g,) | | Irrigation et drainage | |
| | 17 | N1-2D-2g (2g1 et 2g2) | | | |
| | 18 | N1-2D-3g | DC | Irrigation et drainage | |

DC : Double Culture ; SC : Simple Culture

4.2.2 MATERIELS

Plusieurs matériels de travail ont été utilisés pour réaliser la collecte des données. Ces matériels sont :

- Pour le suivi des pratiques culturales :
 - un registre de bord élaboré pour la collecte de données attributaires caractérisant les parcelles de chaque arroseur,

- un fond de carte du parcellaire de chaque arroseur avec des numéros d'identification de chaque parcelle pour la cartographie des cultures ;
- Pour le suivi des irrigations :
 - les registres tenus par les Aiguadiers (en charge de la gestion de l'eau sur les partiteurs et sous partiteurs), les éclusiers (en charge de la gestion de l'eau sur les prises de distributeur et le point B), et le SERP en charge des grands ouvrages (barrage, et ouvrages annexes du point A) sont mis à disposition par l'Office du Niger.
 - des réglettes et fiches de terrain élaborées pour le technicien chargé du suivi des irrigations sur les prises d'arroseurs.
- Pour le suivi du drainage :
 - En vue d'assurer des mesures plus précises de débit d'eau drainés, le drain secondaire du partiteur N1 drainant les parcelles de double culture du riz (drain N1(DC)), le drain secondaire du sous partiteur N1-2D drainant les parcelles de simple culture du riz du partiteur N1 et les parcelles situées à gauche du sous partiteur N1-2D, ainsi que les drains tertiaires (arroseurs), ont été équipés de déversoirs à paroi mince de type Cipoletti, installé à leur extrémité, auxquels ont été associées en amont et aval des échelles limnimétriques afin de connaître leurs conditions hydrauliques de fonctionnement (noyées ou dénoyées). (*Figure 4-2*).



Figure 4- 2 : Drains de sous-partiteur et d'arroseur équipés de déversoirs de type Cipoletti et d'échelles limnimétriques.

Les côtes du zéro et du sommet de chaque échelle ont été déterminées, ainsi que celles du sommet des seuils déversants.

A la conception des déversoirs, compte tenu des caractéristiques techniques de ces drains, la largeur de seuil déversant a été fixée à 20 cm pour les drains d'arroseur et à 50 cm pour les drains de partiteur et de sous partiteur.

- Un micro-moulinet de type M1 a servi à mesurer, à jauger les débits d'eau drainés.

4.2.3 METHODE DE COLLECTE DES DONNEES

4.2.3.1 ECHELLE DE L'OFFICE DU NIGER ET DU SYSTEME SAHEL-FALA DE MOLODO

Les mesures de débit utilisées sont issues :

- en tête des grands adducteurs au niveau du point A et B, les mesures effectuées entre 2000 et 2007 et archivées par SERP de l'Office du Niger.
- en tête du réseau primaire et secondaire de distribution (distributeur Retail et ses partiteurs) des observations quotidiennes qui ont été collectées par l'Eclusier et les Aiguadiers de la zone Office du Niger de Niono (souvent assistés par des services d'appui à la gestion de l'eau). Ces observations concernent (i) l'ouverture en l/s pour les prises équipées de module à masque, (ii) les côtes amont et aval lues sur des échelles limnimétriques placées en amont et en aval pour ce qui est des vannes plates et leur ouverture en nombre de dents de la crémaillère. Pour ces dernières, à partir de ces observations, la perte de charge (valeur de la côte amont lue retranchée de celle de la côte avale lue sur l'échelle) a été calculée et le débit estimé en utilisant un abaque préétabli et adapté aux caractéristiques de chaque prise (Tableau 4-2) élaboré à partir de la formule du débit suivante :

$$Q = \mu \times h \times L \times \sqrt{2g \times \Delta h} \text{ (m}^3\text{/s)} ; \text{ avec}$$

Q : débit d'eau (m³/s)

μ : coefficient de débit avec comme valeur 0,65

h : ouverture de la vanne : hauteur d'une dent x nombre de dents (m)

L : largeur de la vanne plate (m)

g : l'accélération de la pesanteur : 9,81(m/s)

Δh : perte de charge : côte amont – côte avale (m)

Tableau 4- 2 : Exemple d'abaque pour la lecture des débits d'eau au niveau des prises de distributeurs ou de partiteurs équipées de vannes plates.

| Vanne de Prise | | | Mesure de Débit de la Vanne Plate | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--------|-------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|--------------|-------|-------|
| Larg. (m) = | 3.00 | | Prise Distributeur Retail (Sup. = 5.500 ha) | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 Dent (cm) = | 2.7 | | Débit de Partiteur: $Q_p = \mu \times h \times L \times \sqrt{2g \times \Delta h}$ (m3/s) | | | | | | | | | | | | $\mu =$ 0.65 | | |
| Crém. | Haut. | Sect. | Pertes de Charge = Δh (cm) | | | | | | | | | | | | | | |
| N° | h(ov.) | S=hxL | 5 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 55 | 50 |
| Dents | cm | m2 | Q (m3/s) | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 3 | 0.08 | 0.05 | 0.06 | 0.07 | 0.07 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.10 | 0.11 | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.15 | 0.17 | 0.17 |
| 4 | 8.1 | 0.24 | 0.16 | 0.17 | 0.20 | 0.22 | 0.24 | 0.26 | 0.28 | 0.30 | 0.32 | 0.35 | 0.39 | 0.42 | 0.45 | 0.52 | 0.50 |
| 6 | 13.5 | 0.41 | 0.26 | 0.29 | 0.33 | 0.37 | 0.41 | 0.44 | 0.47 | 0.50 | 0.53 | 0.59 | 0.64 | 0.70 | 0.74 | 0.87 | 0.83 |
| 8 | 18.9 | 0.57 | 0.37 | 0.40 | 0.47 | 0.52 | 0.57 | 0.62 | 0.66 | 0.70 | 0.74 | 0.82 | 0.90 | 0.97 | 1.04 | 1.22 | 1.16 |
| 10 | 24.3 | 0.73 | 0.47 | 0.52 | 0.60 | 0.67 | 0.73 | 0.79 | 0.85 | 0.90 | 0.95 | 1.06 | 1.16 | 1.25 | 1.34 | 1.57 | 1.50 |
| 15 | 37.8 | 1.13 | 0.74 | 0.81 | 0.93 | 1.04 | 1.14 | 1.23 | 1.32 | 1.40 | 1.47 | 1.65 | 1.80 | 1.95 | 2.08 | 2.44 | 2.33 |
| 20 | 51.3 | 1.54 | 1.00 | 1.10 | 1.26 | 1.41 | 1.55 | 1.67 | 1.79 | 1.90 | 2.00 | 2.24 | 2.45 | 2.65 | 2.83 | 3.32 | 3.16 |
| 25 | 64.8 | 1.94 | 1.26 | 1.38 | 1.60 | 1.79 | 1.96 | 2.11 | 2.26 | 2.40 | 2.53 | 2.82 | 3.09 | 3.34 | 3.57 | 4.19 | 3.99 |
| 30 | 78.3 | 2.35 | 1.53 | 1.67 | 1.93 | 2.16 | 2.36 | 2.55 | 2.73 | 2.90 | 3.05 | 3.41 | 3.74 | 4.04 | 4.32 | 5.06 | 4.83 |
| 35 | 91.8 | 2.75 | 1.79 | 1.96 | 2.26 | 2.53 | 2.77 | 2.99 | 3.20 | 3.39 | 3.58 | 4.00 | 4.38 | 4.73 | 5.06 | 5.93 | 5.66 |
| 40 | 105.3 | 3.16 | 2.05 | 2.25 | 2.60 | 2.90 | 3.18 | 3.43 | 3.67 | 3.89 | 4.10 | 4.59 | 5.03 | 5.43 | 5.80 | 6.81 | 6.49 |
| 45 | 118.8 | 3.56 | 2.32 | 2.54 | 2.93 | 3.27 | 3.59 | 3.87 | 4.14 | 4.39 | 4.63 | 5.18 | 5.67 | 6.13 | 6.55 | 7.68 | 7.32 |
| 50 | 132.3 | 3.97 | 2.58 | 2.82 | 3.26 | 3.65 | 3.99 | 4.31 | 4.61 | 4.89 | 5.16 | 5.77 | 6.32 | 6.82 | 7.29 | 8.55 | 8.15 |
| 55 | 145.8 | 4.37 | 2.84 | 3.11 | 3.59 | 4.02 | 4.40 | 4.76 | 5.08 | 5.39 | 5.68 | 6.35 | 6.96 | 7.52 | 8.04 | 9.42 | 8.99 |
| 60 | 159.3 | 4.78 | 3.10 | 3.40 | 3.93 | 4.39 | 4.81 | 5.20 | 5.55 | 5.89 | 6.21 | 6.94 | 7.61 | 8.21 | 8.78 | 10.30 | 9.82 |
| 65 | 172.8 | 5.18 | 3.37 | 3.69 | 4.26 | 4.76 | 5.22 | 5.64 | 6.02 | 6.39 | 6.74 | 7.53 | 8.25 | 8.91 | 9.53 | 11.17 | 10.65 |
| 70 | 186.3 | 5.59 | 3.63 | 3.98 | 4.59 | 5.14 | 5.63 | 6.08 | 6.50 | 6.89 | 7.26 | 8.12 | 8.89 | 9.61 | 10.27 | 12.04 | 11.48 |
| 75 | 199.8 | 5.99 | 3.89 | 4.27 | 4.93 | 5.51 | 6.03 | 6.52 | 6.97 | 7.39 | 7.79 | 8.71 | 9.54 | 10.30 | 11.01 | 12.92 | 12.31 |
| 80 | 213.3 | 6.40 | 4.16 | 4.55 | 5.26 | 5.88 | 6.44 | 6.96 | 7.44 | 7.89 | 8.31 | 9.30 | 10.18 | 11.00 | 11.76 | 13.79 | 13.15 |
| 85 | 226.8 | 6.80 | 4.42 | 4.84 | 5.59 | 6.25 | 6.85 | 7.40 | 7.91 | 8.39 | 8.84 | 9.88 | 10.83 | 11.70 | 12.50 | 14.66 | 13.98 |
| 90 | 240.3 | 7.21 | 4.68 | 5.13 | 5.92 | 6.62 | 7.26 | 7.84 | 8.38 | 8.89 | 9.37 | 10.47 | 11.47 | 12.39 | 13.25 | 15.53 | 14.81 |
| 93 | 248.4 | 7.45 | 4.84 | 5.30 | 6.12 | 6.85 | 7.50 | 8.10 | 8.66 | 9.19 | 9.68 | 10.83 | 11.86 | 12.81 | 13.69 | 16.06 | 15.31 |
| Vitesse d'eau (m/s) | | | 0.65 | 0.71 | 0.82 | 0.92 | 1.01 | 1.09 | 1.16 | 1.23 | 1.30 | 1.45 | 1.59 | 1.72 | 1.84 | 2.15 | 2.05 |

4.2.3.2 ECHELLE DE L'ARROSEUR

4.2.3.2.1 Suivi de l'irrigation

La collecte des données (campagne culturale 2007-2008) a été réalisée par les techniciens de l'Institut d'Economie Rurale (IER) de la recherche agronomique de Niono (IER/CRRA-Niono). Le suivi journalier des apports en tête d'arroseurs équipés de modules à masque a consisté à relever les types de modules ouverts et à mesurer la lame d'eau sur le radié afin de corriger leur débit théorique à partir de leurs abaques d'étalonnage (SOGREAH, 1987 [6]) suivant leur condition de fonctionnement (noyée ou libre).

Les données ainsi collectées ont été au fur et à mesure enregistrées sur un fichier pour en faciliter le traitement et l'estimation des débits.

4.2.3.2.2 Suivi du drainage

Vu la faiblesse des débits d'eau drainés au cours de cette contre-saison 2007-2008 au niveau des drains d'arroseurs, les jaugeages (hebdomadaire), ont été réalisés aux moments de forts drainages constatés sur les sites. Ces mesures viennent en complément des lectures

quotidiennes faites et relevées sur les échelles de crues placées en amont et aval du déversoir.

4.2.3.3 ECHELLE DE LA PARCELLE

4.2.3.3.1 Suivi des opérations culturales (essentiellement riz de contre-saison)

Outre une reconnaissance du type de sol dominant, une cartographie des spéculations (riz et maraîchage) cultivées (contre-saison 2007-2008) a été réalisée pour chaque parcelle élémentaire des exploitations rizicoles des arroseurs concernés. Les enquêtes menées à cette fin au niveau de chaque parcelle visaient à déterminer les superficies cultivées et le calendrier cultural : suivi dates des grandes opérations de cultures rizicoles telles que la pré-irrigation, les opérations de labour, de mise en boue, de repiquage, d'éventuels à secs au cours et en fin de campagne et de récolte.

4.2.3.3.2 Caractérisation de la conduite de l'irrigation des cultures maraîchères

La caractérisation de la conduite de l'irrigation des cultures maraîchères a été réalisée dans le cadre d'un projet collaboratif IER-PCDA (Institut d'Economie Rural - Programme de Compétitivité et de Diversification Agricole). La conduite paysanne des deux principales cultures maraîchères à savoir l'échalote/oignon et la tomate à l'Office du Niger et principalement leur irrigation a été caractérisée au cours de la contre-saison 2008-2009. Le dispositif expérimental réalisé en plein champ est composé au niveau parcellaire d'une rigole de 0,3 m de largeur, 0,2 m de profondeur pour une longueur de 48 à 50 m en moyenne divise chaque bassin de 1000 m² (50 m x 20 m) en 4 planches de 230 m² environ chacune (*Figure 4-3*). Sur ces planches, le repiquage de l'échalote a été réalisé en lignes distantes de 20 cm avec un écartement de 5 à 10 cm sur la ligne. Pour ce qui est de la tomate, les plants ont été repiqués en lignes avec un écartement de 0,5 à 0,80 m environ entre les lignes et 0,25 à 0,50 m environ entre les plants de la même ligne. Des billons sont ensuite faits le long des lignes de tomate.

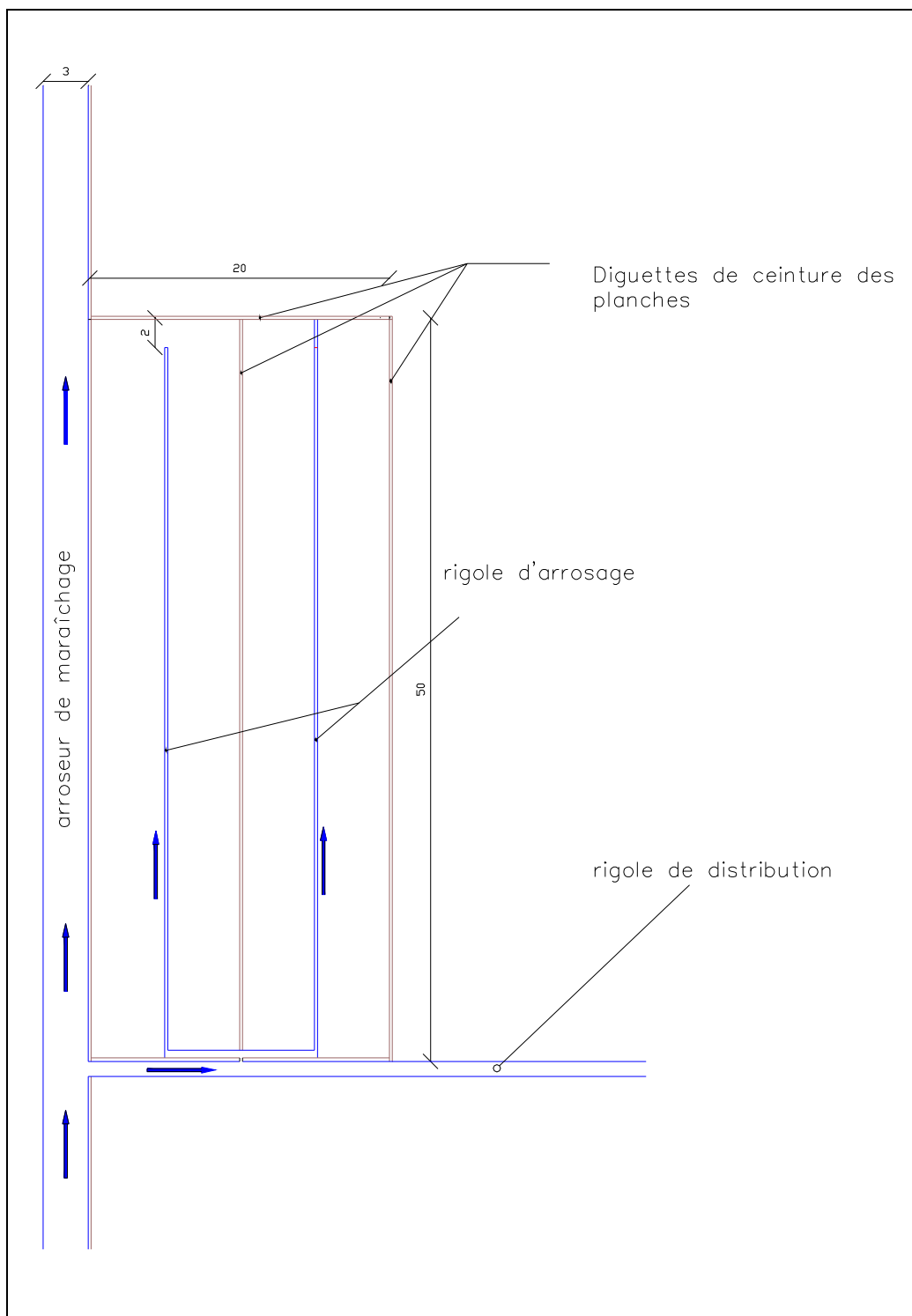


Figure 4- 3 : Schéma d'aménagement d'une parcelle maraîchère (source : Tangara, 2010)

Les pratiques d'irrigation et temps de travaux ont été suivies et caractérisées dans des parcelles de démonstration PD (parcelles améliorées) et témoins PT (parcelles gérées suivant la pratique paysanne) (Tableau 4-3). Pour l'irrigation de ces cultures, les producteurs

utilisaient chacun un seau. Le temps d'arrosage et de travaux, ainsi que le nombre de seau d'eau utilisée (seau de 8 litres) pour chaque irrigation ont été enregistré.

Tableau 4- 3: Récapitulatif du temps des travaux et des quantités d'eau consommée sur des parcelles de démonstration (PD) et de témoin (PT)

Site de : Niono

Structure chargée du suivi de la collecte des données : Office du Niger ; Direction Régionale d'Agriculture

Agent chargé du suivi et de la collecte des données : Mme DIOP Mariam TRAORE, Seydou TANGARA

Période de collecte : Novembre 2008 à Avril 2009

| Noms producteurs | | Djénébou Samaké | Moustapha Tangara | Bakary Diarra |
|---|----|-----------------|-------------------|----------------|
| Spéculations | | Tomate | Oignon/échalote | Tomate |
| Superficies (m ²) | PD | 200 | 300 | 200 |
| | PT | 200 | 300 | 200 |
| Système d'irrigation | PD | goutte à goutte | Californien | Californien |
| | PT | Manuel au seau | Manuel au seau | Manuel au seau |
| Temps des entretiens culturaux (heures) | PD | 17 | 88 | 29 |
| | PT | 40 | 109 | 53 |
| Temps d'arrosage (heures) | PD | 28 | 25 | 10 |
| | PT | 30 | 41 | 32 |
| Quantités d'eau consommées (litres) | PD | 72000 | 121920 | 106882 |
| | PT | 97000 | 147680 | 135500 |

4.2.4 METHODES D'ANALYSE DES RESULTATS

Compte tenu de l'objectif finalisé de ce travail, à savoir de développer un modèle multi échelles de l'impact des modalités de gestion des cultures de contre-saison sur les termes du bilan d'eau et la dynamique de la nappe locale et régionale, la méthode d'analyse des résultats a consisté à déterminer les termes (apports, évapotranspiration par les cultures, différences de stock d'eau du sol et pertes) du bilan d'eau afin d'identifier l'importance des infiltrations contribuant à la recharge et à la dynamique de la nappe phréatique à toutes les échelles d'étude.

4.2.4.1 METHODE D'ANALYSE DES RESULTATS AU NIVEAU DU RESEAU DE DISTRIBUTION

A toutes les échelles d'étude, les débits d'eau enregistrés quotidiennement au niveau des prises (point A, point B) du réseau primaire d'adduction d'eau et des prises du réseau d'irrigation (grands adducteurs, distributeurs, partiteurs) ont été évalués en volume total d'eau entrée et sortie à chaque niveau d'échelle.

Le traitement des données a consisté pour chaque niveau d'échelle (ensemble de l'Office, point A, Kala Inférieur et Kouroumari, point B, tête du distributeur Retail et tête de partiteurs) à estimer (i) le volume des apports par hectare cultivé, (ii) leur variation en fonction de la surface cultivée et (iii) l'efficacité de transport par le rapport entre apports par hectare cultivés au niveau d'échelle inférieur et supérieur.

4.2.4.2 METHODE D'ANALYSE DES RESULTATS AU NIVEAU ARROSEUR

La méthode de traitement des données visant à établir les termes du bilan d'eau (*Figure 4-4*) au niveau arroseur a consisté à :

1. Concevoir une base de données, développée sous Excel (BD) (suivi cultures) pour stocker les informations sur les opérations culturales rizicoles : date et durée de la pré-irrigation, des opérations de labour, de mise en boue, de repiquage, d'éventuels à secs au cours et en fin de campagne et de récolte ;
2. Concevoir une base de données, développée sous Excel (BD) (Suivi Hydraulique) permettant le calcul automatique des débits à partir des équations de jaugeage des déversoirs et leur éventuelle correction.
3. Calculer les termes du bilan d'eau au niveau arroseur en développant un modèle de bilan hydrique intégrant les données cultures et de flux d'eau de ces deux bases de données.

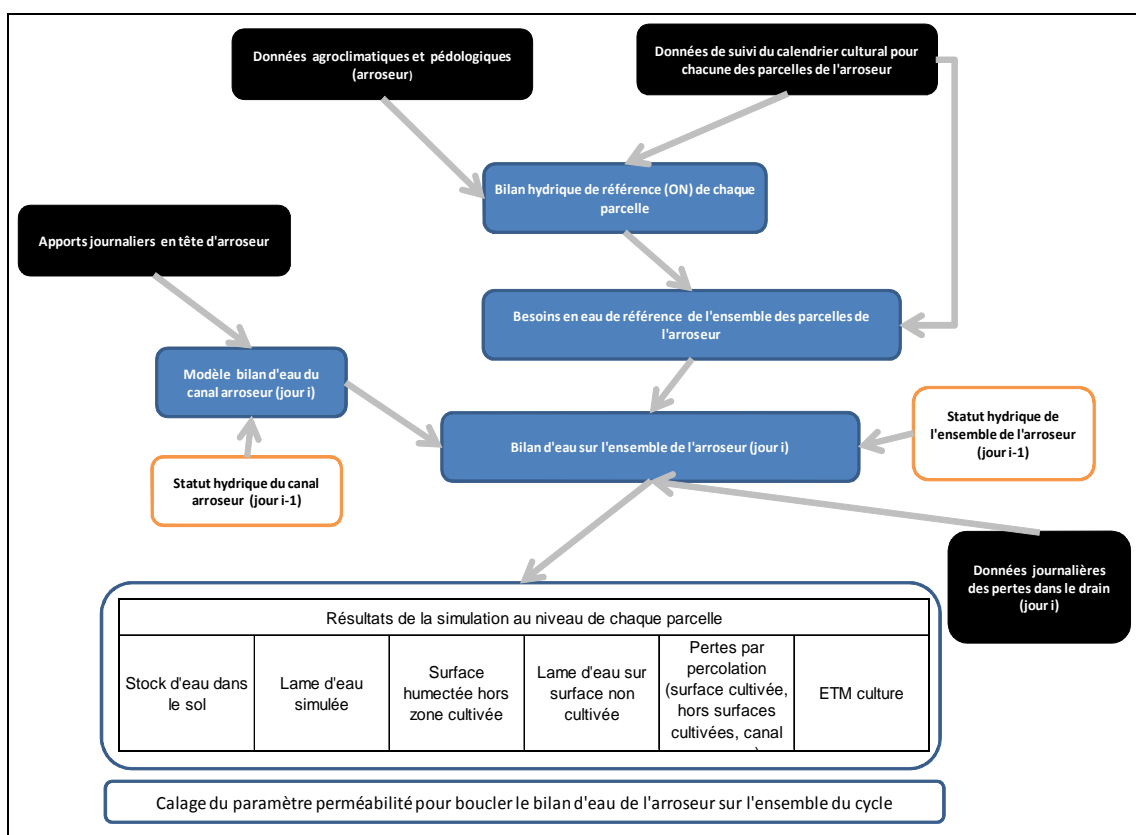


Figure 4- 4 : Modèle d'évaluation des performances de l'irrigation gravitaire sur riz de CS au sein de l'arroseur

4.2.4.2.1 Méthode d'analyse des débits drainés

Compte tenu de la variabilité des conditions d'écoulement au niveau des drains (écoulement libre ou noyé suivant les conditions de débits et d'engorgement), les débits d'eaux réellement drainées ont été calculés en apportant un facteur correctif à la formule théorique ci-dessous d'un déversoir de type Cipoletti :

$$Q = C * 1,86 * L * h_1^{3/2}, \text{ où}$$

Q : débit théorique d'eau drainé (m³/s),

L : largeur déversante du seuil (m),

h₁ : hauteur de l'eau au-dessus du seuil du déversoir (m).

C : facteur correctif² du coefficient de débit théorique en fonction des caractéristiques de l'écoulement. Ce facteur correctif, qui est de 1 lorsque h₂/h₁<0,2 (écoulement libre), a été estimé par la relation expérimentale illustrée par la (Figure 4-5) lorsque l'écoulement est noyé avec :

h₂ : hauteur de l'eau aval au-dessus du seuil du déversoir (m).

² <http://www.fao.org/docrep/w2570f/w2570f0c.htm>

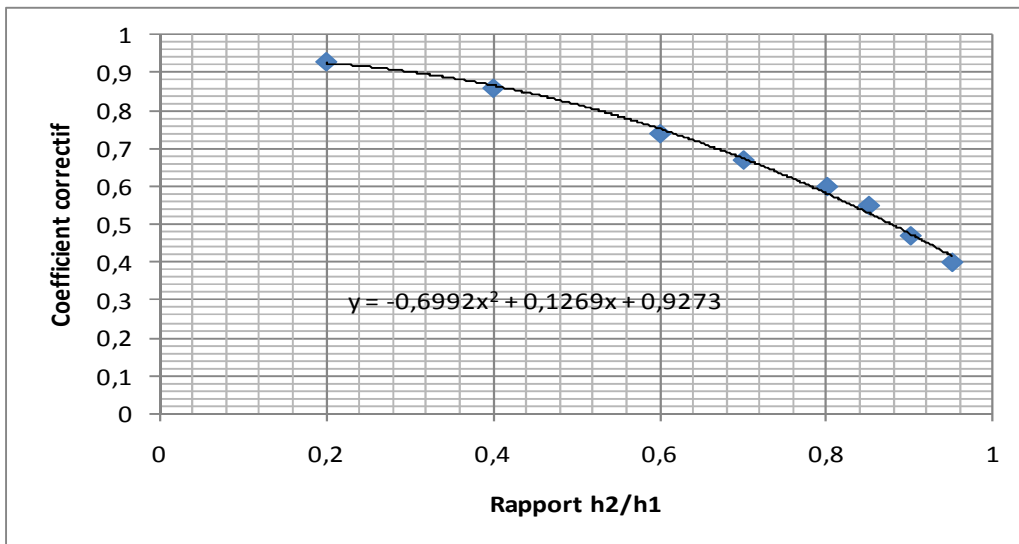


Figure 4- 5 : Variation du facteur correctif en fonction du rapport h2/h1 (source : <http://www.fao.org/docrep/w2570f/w2570f0c.htm>).

Cette formule théorique a été utilisée pour estimer les débits dans la mesure où son adéquation aux conditions d'écoulement a été validée par des mesures de débits (jaugeages au moulinet) (*Figure 4-6*).

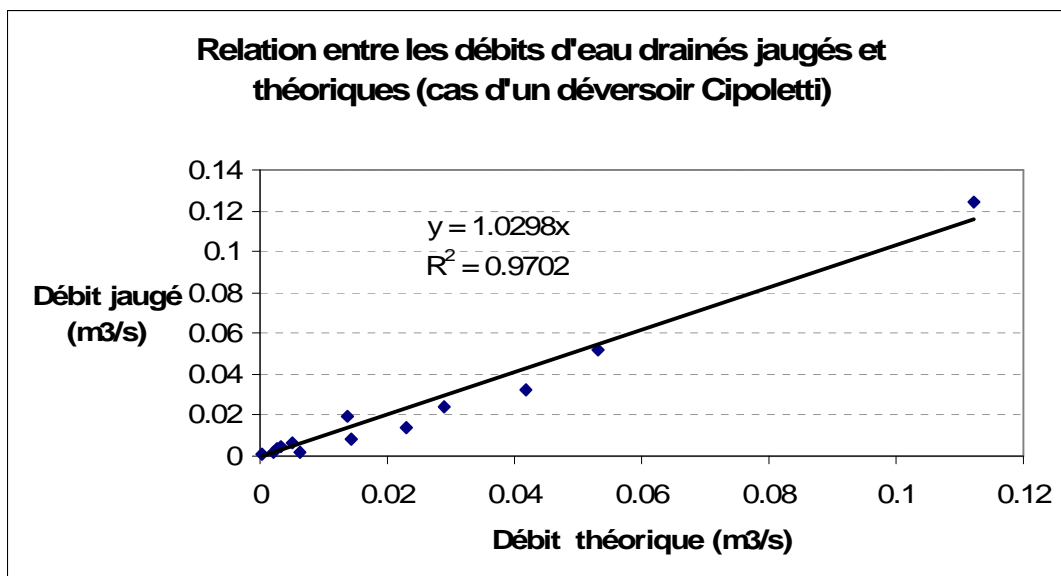


Figure 4- 6 : Relation entre les débits d'eau jaugés dans les drains et les débits d'eau théoriques.

4.2.4.2.2 Méthode d'évaluation du bilan d'eau au niveau arroseur :

Pour évaluer les termes du bilan d'eau au niveau arroseur, le traitement des données a été réalisé en trois étapes :

1. Evaluation des besoins en eau de référence en fonction du calendrier cultural,

2. Détermination par calage de la perméabilité moyenne au sein de l'arroiseur.
3. Modélisation de l'état hydrique des parcelles de l'arroiseur après repiquage et au cours des phases de préparation du sol et repiquage (surfaces inondées non cultivées, humidité du sol, le cas échéant lame d'eau) :
4. Evaluation des termes du bilan hydrique au cours des différentes phases du cycle.

- **Evaluation des besoins en eau de référence en fonction du calendrier cultural**

Cette évaluation a été réalisée au niveau de chacune des parcelles de l'arroiseur en fonction de son calendrier cultural extrait de la base de données (BD cultures), des caractéristiques hydrodynamiques du sol dominant de l'arroiseur et des données agro-climatiques de la station météorologique de Niono.

On a pour cela utilisé un modèle de bilan hydrique journalier reprenant les algorithmes du modèle FAO CROPWAT (Allen R. G et al., 1998.[6]) qui a été développé à cet effet sous Excel en intégrant les spécificités de la riziculture (pré irrigation et lame d'eau).

Grâce au développement de « macro » ce modèle permet de calculer pour l'ensemble des parcelles d'un même arroiseur les besoins en eau pour un jour donné.

Le modèle est basé sur un certains nombre d'hypothèses à savoir que :

- la durée du cycle du riz après le repiquage est en moyenne de 100 jours,
- la montée du plan d'eau est de 10 jours après le repiquage du riz,
- l'humidité de la parcelle au point de flétrissement est de 20%,
- l'humidité à la capacité au champ est de 35%,
- l'humidité à la saturation de la parcelle est de 40%,
- les sols sont dans un état d'engorgement avant le repiquage du riz.

Les paramètres d'entrée du modèle sont : les facteurs agro climatiques du milieu (l'évapotranspiration journalière, la vitesse journalière du vent et l'humidité relative minimale), les paramètres caractéristiques des pratiques et calendriers culturaux des producteurs sur chaque arroiseur (suivi de la date des opérations principales de la riziculture : les dates de la mise en place des pépinières, les superficies des pépinières, les dates de labour et de pré irrigation, les dates de mise en eau des parcelles et du repiquage, les dates de récolte du riz), les paramètres caractéristiques de la spéculation riz (Coefficient cultural en fonction du stade de développement du riz), et enfin les paramètres hydro

pédologiques, à l'occurrence la perméabilité verticale ou vitesse d'infiltration K et les types de sols dominants sur les parcelles de l'arroseur.

- **Détermination par calage de la perméabilité moyenne au sein de l'arroseur.**

En riziculture irriguée, la perméabilité verticale est un des paramètres le plus important du bilan d'eau dans la mesure où les pertes d'eau liées à l'infiltration sous lame d'eau en dépendent et par conséquent les flux d'eau susceptibles de contribuer à la recharge de la nappe.

Connaissant les apports d'eau, les pertes en eau de surfaces et les besoins en eau du riz en pleine période de culture (suivi des volumes d'apport et de drainage), le calage de ce paramètre a été réalisé en bouclant le bilan volume d'eau au niveau de l'ensemble de l'arroseur après repiquage de l'ensemble des parcelles et montée du plan d'eau (lame d'eau considérée constante au cours de la période) et sur une période de 30 jours soient 3 cycles d'irrigation de l'ensemble des parcelles de sorte à éviter toute variation importante du volume stocké dans le canal arroseur. On notera que cette évaluation a pris en compte les pertes par infiltration dans le canal arroseur.

- **Modélisation de l'état hydrique des parcelles de l'arroseur après repiquage et au cours des phases de préparation du sol et repiquage (surfaces inondées non cultivées, humidité du sol, le cas échéant lame d'eau) :**

Le terme perte par percolation des besoins en eau de la culture qui avait été déterminé préalablement a été corrigée en prenant en compte la perméabilité moyenne calée en appliquant la loi de Darcy avec comme hypothèse que la profondeur de la nappe est à environ 1 mètre.

Il a ensuite été considéré que le niveau d'eau dans les parcelles, en cas d'excès de l'offre par rapport à la demande pouvait atteindre au maximum 3 fois l'épaisseur de la lame recommandée. En cas de surplus d'eau, les volumes ont été répartis sur les zones non encore repiquées sur lesquelles ; en cas de saturation du sol, la hauteur de la lame d'eau et les pertes par percolation ont été estimées.

- **Estimation des termes du bilan hydrique au cours des différentes phases du cycle.**

Le repiquage étant l'une des opérations déterminantes pour la riziculture, les apports bruts, les apports nets corrigés et les besoins en eau corrigés, ont été calculés au cours des trois phases (*Figure 4-7*) du calendrier agricole du riz au sein de l'arroseur à savoir :

- Phase 1 : démarrage de la campagne culturale, où 50% des superficies de l'arroiseur ne sont pas encore repiquées ;
- Phase 2 : les superficies repiquées sur l'arroiseur sont supérieures à 50% et inférieure à 100% ;
- Phase 3 : Toutes les superficies à cultivées sur l'arroiseur sont repiquées (100%).

Pour chacune de ces phases, la modélisation a permis d'estimer les différents termes du bilan hydrique (apports bruts, besoins culture, pertes dans le drain, pertes canal arroseur, pertes dues épandage hors zone cultivée, différence stock, Efficience) et en particulier d'identifier les flux qui participent à l'alimentation de la nappe.

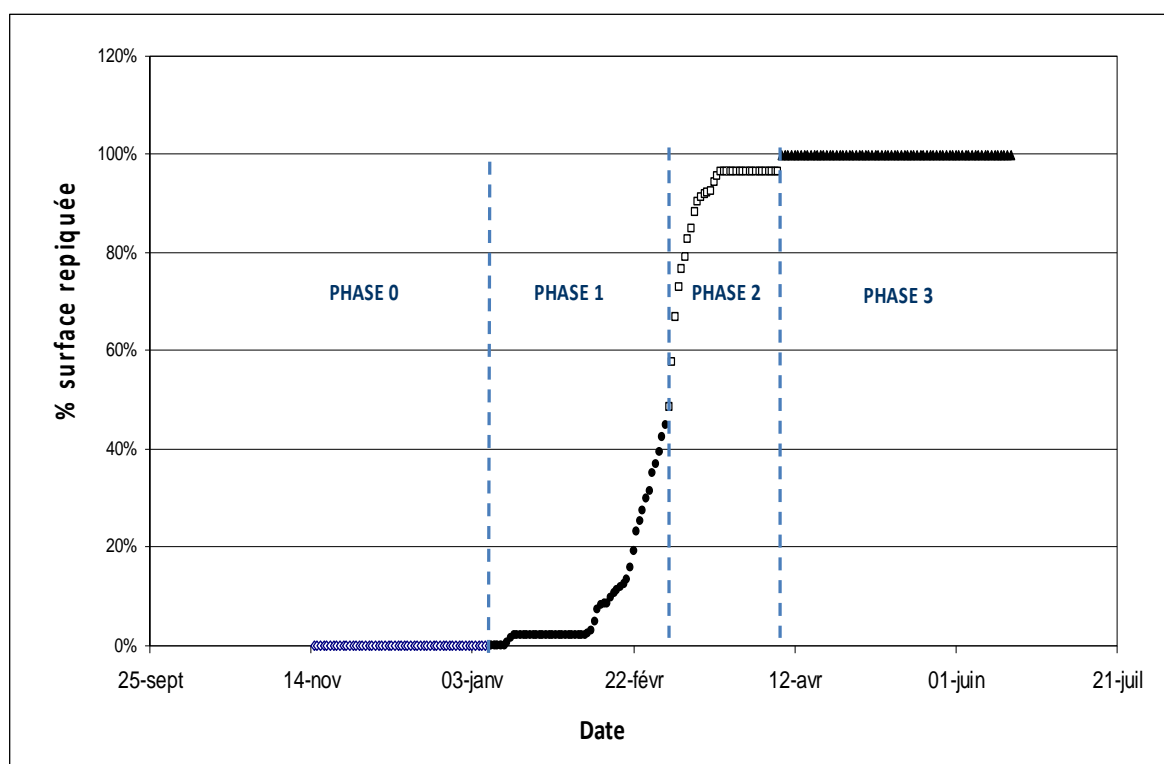


Figure 4- 7 : Calendrier type de repiquage du riz sur un arroseur rizicultivé en contre-saison

4.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.3.1 EVOLUTION DES DEBITS D'EAU A L'ECHELLE DE L'OFFICE DU NIGER

Entre 2000 et 2006 les surfaces de culture de CS sont passées de 4500 à 21 000 ha alors que les apports en contre-saison ont moins que doublé passant de 496 à 850 millions de m³ par campagne (*Figure 4-8*).

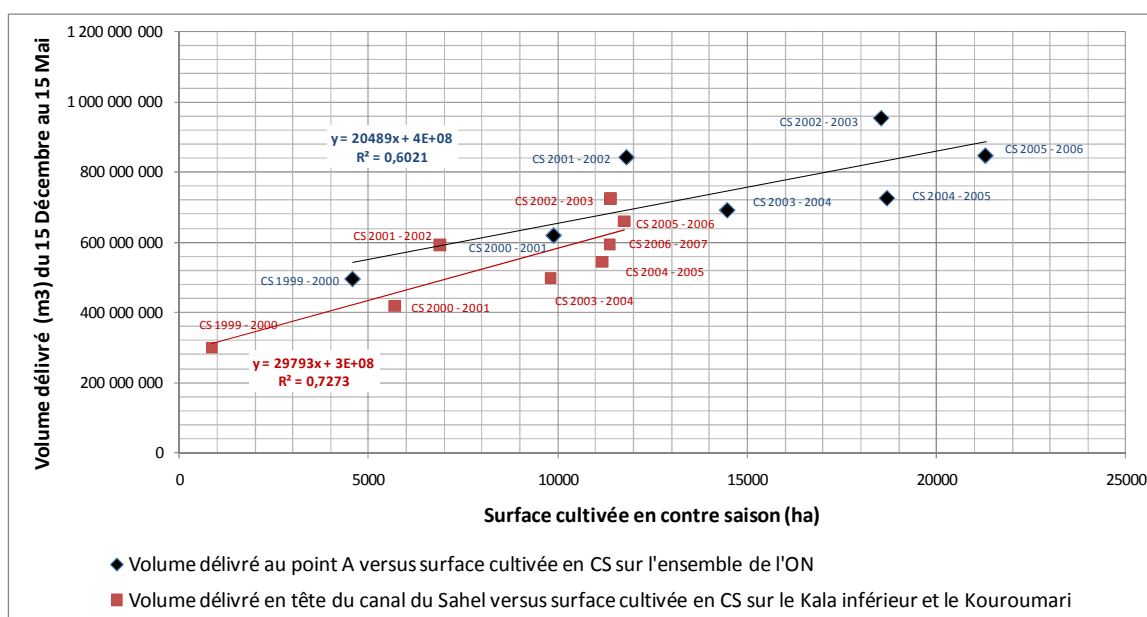


Figure 4- 8 : Comparaison des volumes délivrés au point A et en tête du canal du Sahel et des surfaces cultivées en contre saison. (sources SERP – Suivi évaluation ON)

Cette augmentation de la surface cultivée a entraîné une amélioration de l'efficacité de transport (*Figure 4-9*) ; un facteur 4,5 d'accroissement des surfaces induit une diminution de l'ordre de 60% des apports par hectare (110 000 m³/ha pour une surface cultivée de 4500 ha, 43 000 m³/ha pour 21000 ha). Ce constat confirme les analyses faites antérieurement faisant l'hypothèse de pertes fixes due aux pertes par percolation et évaporation (*Barral & Tanqara, 1998.[7]*).

Les prélèvements sur le Niger au cours de la campagne de contre-saison ont représenté en moyenne de l'ordre de 50% des disponibilités en eau [source SERP] entre 2000 et 2006. Ce taux augmente de façon très importante en période d'étiage (de Mars à Mai) comme l'illustre la *Figure 4-10* ; significativement corrélé à la surface cultivée ($R^2=0,64$), il a atteint une valeur maximum de l'ordre de 87% en 2003, valeur bien supérieure aux 50% relevés avant 2000 (*Marlet, Tanqara & Ouvry, 1998 [3]*).

Le niveau actuel des prélèvements est d'ores et déjà proche du maximum possible face à une demande en eau croissante dans le bassin du fleuve Niger.

Malgré un accroissement des superficies emblavées (cinq fois plus) en contre-saison (période d'étiage du fleuve Niger), entraînant une augmentation du taux de prélèvement d'eau sur le fleuve Niger, les apports d'eau par hectare cultivé ont pratiquement diminué de moitié et l'efficacité de transport de l'eau des grands adducteurs s'est de facto améliorée.

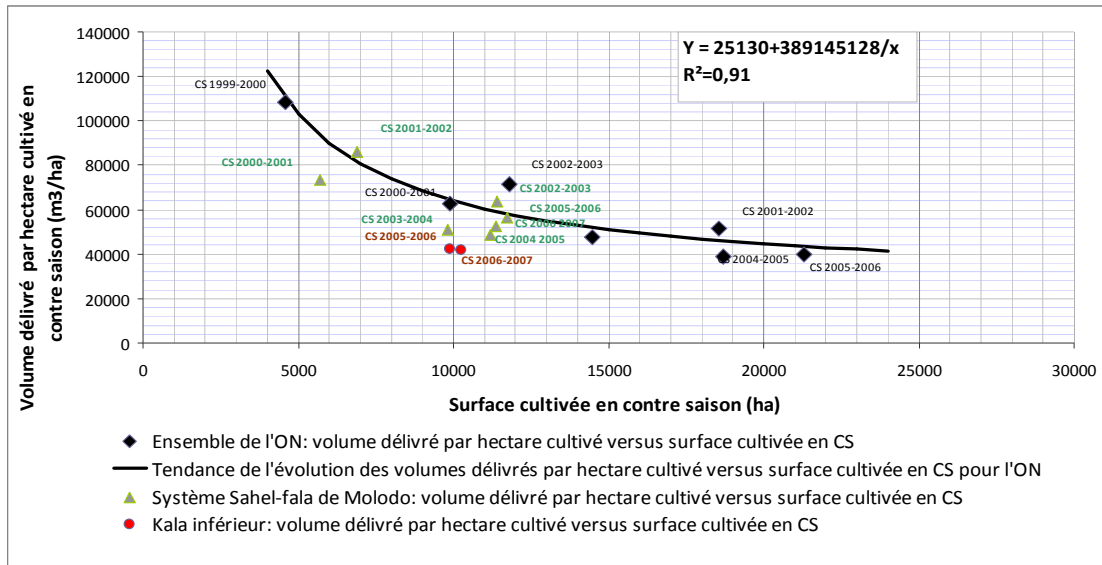


Figure 4- 9 : Evolution entre 2000 et 2006 des volumes délivrés à différents niveaux du réseau primaire par hectare cultivée en fonction de la surface irriguée. (sources SERP – Suivi évaluation ON)

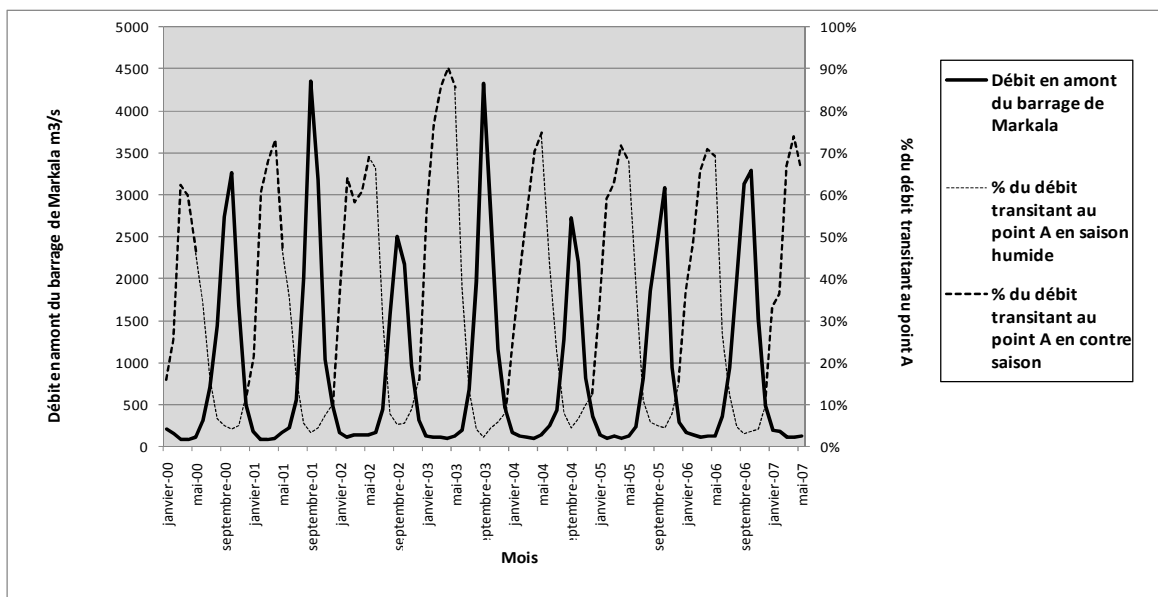


Figure 4- 10 : Comparaison des débits du fleuve Niger en amont du barrage de Markala et des débits transitant au point A (source SERP).

4.3.2 EVOLUTION DES SYSTEMES DE CULTURE ET DES APPORTS D'EAU A L'ECHELLE DU SYSTEME DU SAHEL (CANAL SAHEL - FALA MOLODO)

Le système Sahel alimente en eau les zones de Niono, N'Débougou, Molodo (Kala inférieure) en amont du point B et en aval le Kouroumari (*Tableau 4-4*). Les surfaces y sont passées de 874 ha en 1999-2000 à en moyenne 11 000 ha à partir de 2004, soit un taux

d'intensification culturale de 122%. La riziculture y a été prépondérante, en moyenne 66% des surfaces cultivées (*Figure 4-11*).

Tableau 4- 4 : Surfaces aménagées et hors casiers alimentées en eau par le canal du Sahel.

| Secteur | Surface aménagée | Hors casier | Total |
|------------|------------------|-------------|-----------|
| Niono | 13 338 ha | 550 ha | 13 888 ha |
| Ndebougou | 11 165 ha | 592 ha | 11 757 ha |
| Molodo | 7 865 ha | 632 ha | 8 497 ha |
| Kouroumari | 14 189 ha | 1 121 ha | 15 310 ha |
| Total | 46 557 ha | 2 895 ha | 49 452 ha |

L'évolution de ces systèmes de cultures n'est pas sans effet sur la demande en eau. La *Figure 4-8* et la *Figure 4-9* illustrent que, comme pour l'ensemble de l'Office du Niger, l'accroissement des surfaces a induit une diminution des apports par hectare cultivé passés de plus 73 000 m³/ha (CS 2000-2001 et 2001-2002) à 52 500 m³/ha (CS 2004-2005 à 2006-2007) pour des surfaces cultivées respectivement inférieures à 7000 ha et en moyenne de 11400 ha. Cette valeur supérieure à celle évaluée pour l'ensemble de l'Office est imputable à l'incertitude sur les surfaces irriguées (Kouroumari et hors casiers) en amont du point B et à la non prise en compte des lâchés au niveau du point C. Les apports, pour le seul Kala inférieur, ont été du même ordre de grandeur que ceux évalués pour l'ensemble de l'ON (42 000 m³/ha au cours des CS 2005-2006 et 2006-2007).

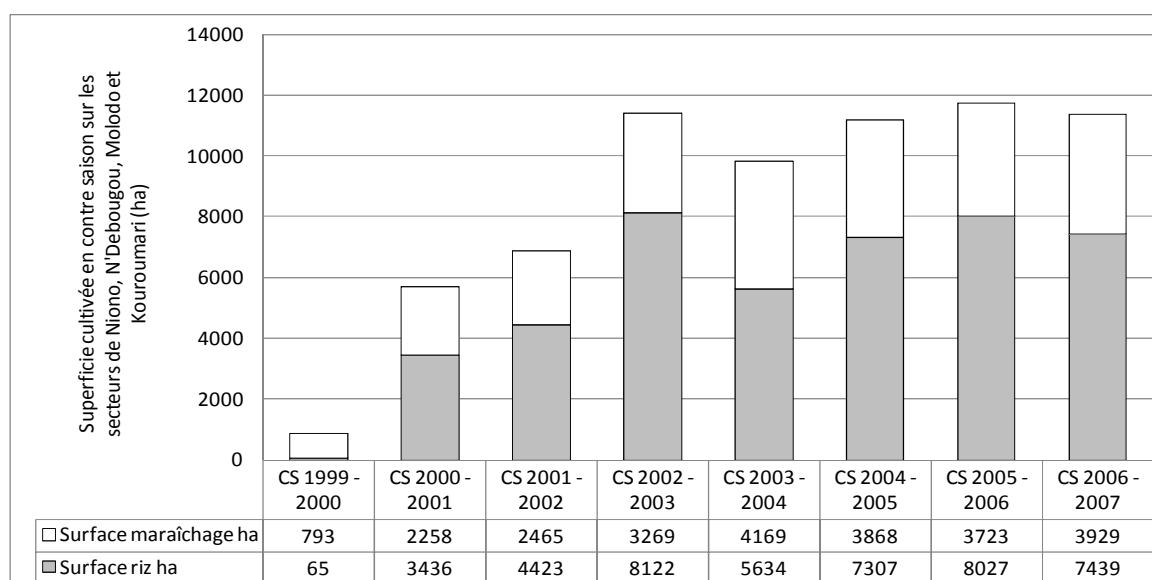


Figure 4- 11 : Evolution des surfaces des cultures de contre-saison dans les périmètres desservis par le canal du Sahel.

A l'échelle du système Sahel comme à celui de l'Office du Niger, l'accroissement des surfaces cultivées en contre-saison (marqué par la prédominance de la riziculture) a induit une diminution des apports d'eau par hectare emblavée et une évolution de la demande en eau semblable à ces deux niveaux d'échelles.

4.3.3 EVOLUTION DES SYSTEMES DE CULTURE ET DES APPORTS D'EAU A L'ECHELLE DU DISTRIBUTEUR RETAIL

Pour les campagnes 2005-2006 et 2006-2007 les cultures de CS ont occupé de l'ordre de 1990 ha sur le casier Retail, dont 77% rizicultivés, soit une intensité culturelle de 139% (*Tableau 4-5*), valeur supérieure à celle de l'ensemble de la zone alimentée en eau par le canal du Sahel.

Les apports en tête du distributeur Retail y ont été en moyenne de 18148 m³/ha, soit une efficacité moyenne de transport du système Sahel-fala de Molodo en amont du point B de 44%. Cette valeur, bien que ne concernant que le distributeur Retail, est nettement supérieure à celle de 13% évaluée en 1998 (Hamel, 1998).

L'augmentation des surfaces cultivées en contre-saison a induit une augmentation importance de l'efficacité de transport du système Sahel en amont du point B.

Tableau 4- 5 : Evolution des surfaces des cultures de contre saison sur le casier Retail de 2000 à 2006

| Période | Surface (ha) | | | Intensité culturelle |
|--------------|--------------|------------|--------|----------------------|
| | Riz | Maraîchage | Totale | |
| CS 2000-2001 | 910 | 575 | 1485 | 129% |
| CS 2001-2002 | 1083 | 567 | 1650 | 133% |
| CS 2002-2003 | 1532 | 464 | 1995 | 139% |
| CS 2003-2004 | 1525 | 416 | 1941 | 138% |
| CS 2004-2005 | 1420 | 500 | 1920 | 138% |
| CS 2005-2006 | 1606 | 404 | 2010 | 140% |
| CS 2006-2007 | 1561 | 413 | 1974 | 139% |

4.3.4 COMPARAISON DES APPORTS D'EAU EN TÊTE DES PARTITEURS DU DISTRIBUTEUR RETAIL

Cette comparaison a été faite au cours des campagnes de contre-saison 2005-2006 et 2006-2007 période pour laquelle des données sont disponibles.

L'analyse statistique des données de suivi des apports en tête de partiteurs en fonction des surfaces et du type de cultures (*Tableau 4-6*) montre que les valeurs des apports par hectare pour le riz et pour le maraîchage ne sont pas significativement différents (15 516 m³/ha). L'importance de la plage d'incertitude dans le cas du maraîchage est illustrative de la faible maîtrise de l'irrigation de cette spéculon dont les besoins à la parcelle, et dans les conditions hydriques actuelles de l'Office du Niger (nappe phréatique à moins de 2 mètre du sol) ne sont au maximum que de l'ordre de 4500 m³/ha (*Tableau 4-11*).

Tableau 4- 6 : Evaluation statistique de la consommation en eau des cultures (m³/ha) en tête des onze partiteurs sur le casier Retail au cours des campagnes CS 2005-2006 et 2006-2007.

| Culture | Période | Consommation m ³ /ha | Limite inférieure | Limite supérieure |
|----------------|----------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------|
| | | | Seuil détermination 95% | |
| Maraîchage | CS 2005-2006 | 15 649 | 6 845 | 24 452 |
| | CS 2006-2007 | 13 439 | 5 753 | 21 125 |
| | <i>Moyenne</i> | <i>14 544</i> | <i>6 299</i> | <i>22 789</i> |
| Riz | CS 2005-2006 | 17 014 | 14 847 | 19 182 |
| | CS 2006-2007 | 15 217 | 13 070 | 17 364 |
| | <i>Moyenne</i> | <i>16 116</i> | <i>13 958</i> | <i>18 273</i> |
| Riz+Maraîchage | CS 2005-2006 | 16 186 | 15 536 | 16 753 |
| | CS 2006-2007 | 14 846 | 14 156 | 17 319 |
| | <i>Moyenne</i> | <i>15 516</i> | <i>14 846</i> | <i>17 036</i> |

La comparaison des volumes moyens apportés par hectare en tête de distributeur (18 148 m³/ha) à ceux apportés en tête de onze partiteurs exploités (15 516 m³/ha) permet d'estimer à de l'ordre 85% l'efficacité de transport du distributeur pour deux années de suivi. Ce chiffre, beaucoup plus élevé que celui de 63% calculé en 1998 pour 459 ha irrigués (*Ouvry & Marlet, 1999 [8]*), conduit à penser que comme dans le cas des adducteurs, l'efficacité des distributeurs, maintenus systématiquement en eau pour assurer les besoins des populations, augmente en fonction de la surface cultivée desservie.

En résumé, les volumes d'eau apportés par hectare en tête des partiteurs sont indépendants du type de culture. L'efficacité de transport du distributeur, nettement plus

élevée (85%), s'améliore en fonction de l'accroissement des superficies irriguées en culture comme dans le cas des grands adducteurs.

4.3.5 PERFORMANCES DE L'IRRIGATION DU RIZ DE CONTRE-SAISON AU NIVEAU ARROSEUR (CAS DES ARROSEURS DU PARTITEUR N1 DU DISTRIBUTEUR RETAIL)

Les apports d'eau mesurés en tête d'arroseurs au cours de la campagne (*Tableau 4-7*) ont varié de 14 270 m³/ha à 32 494 m³/ha ; les plus fortes consommations correspondent aux sols les plus perméables dont la mise en culture est d'ailleurs déconseillée en contre-saison (*Van Keulen & Hamel, 1997[9]*).

Tableau 4- 7 : Résultats du suivi des volumes apportés et drainés en tête d'arroseurs au cours de la campagne 2006-2007

| Arroseurs | | N1-3g | N1-5g | N1-3d et N1-2D-1g | N1-2D-3g |
|----------------------------|----------------------|-----------------|---------|-----------------------|-----------------------|
| Surface aménagée (ha) | | 44 | 12 | 40 | 9 |
| Type de module à masque | | X2_90 | X2_60 | 2 X2_60 | X2_60 |
| Superficie riz (ha) | | 43,45 | 21,22 | 36,13 | 7,30 |
| Superficie maraîchage (ha) | | 0,13 | 0,09 | 2,77 | 0,8 |
| Superficie cultivée (ha) | | 43,58 | 21,31 | 38,90 | 8,1 |
| Vocation initiale | | Double culture | | Simple culture | |
| Type de sol | | limono argileux | | levée limono sableuse | levée sablo limoneuse |
| Volume Apports | (m ³) | 621 881 | 313 759 | 596 366 | 263 197 |
| | (m ³ /ha) | 14 270 | 14 724 | 15 330 | 32 494 |
| Volumes drainés | (m ³) | 80 164 | 34 538 | 66 424 | 7 502 |
| | (m ³ /ha) | 1 839 | 1 621 | 1 708 | 1 028 |

Ces apports d'eau en tête d'arroseurs (14 960 m³/ha) en fonction des types de sol dominants des arroseurs du partiteur N1 (2% levée sablo limoneuse, 20% levée limono sableuse et 78% sols limono argileux), rapportés aux volumes délivrés en tête de partiteur (15 516 m³/ha), a permis à l'estimation d'une efficacité de transport du partiteur N1 de 96%. Elle est du même ordre de grandeur que celles enregistrées en hivernage (*Vandersypen et al., 2007 [1]*).

Lorsque les surfaces repiquées en riz sont inférieures à 50% de la surface totale desservie de l'arroseur (*Tableau 4-8*), les taux de couverture des besoins en eau de la culture sont de 4,5 à 10 fois supérieurs aux besoins en eau exprimés. Ces taux sont certainement à

expliquer par une stratégie délibérée des producteurs d'inonder les parcelles bien avant la réalisation du travail du sol et de la mise en boue pour éviter des problèmes d'accès à l'eau pour la réalisation de ces opérations.

Tableau 4- 8 : Taux de couverture des besoins en eau du riz au sein de l'arroiseur en fonction du taux de repiquage.

| % de la surface repiquée | Arroseurs | | | |
|--------------------------|-----------|-------|-------------------|----------|
| | N1-3g | N1-5g | N1-3d et N1-2D-1g | N1-2D-3g |
| Moins de 50% | 455% | 455% | 455% | 1000% |
| De 50 à 99% | 145% | 130% | 145% | 108% |
| 100% | 111% | 128% | 130% | 106% |

Les volumes d'eau drainés varient de 1 839 à 1 028 m³/ha (*Tableau 4-7*). Le volume le plus faible correspond à l'arroiseur dont le sol est le plus perméable. Leur valeur pondérée en fonction de la représentativité des différents types de sol au sein de l'arroiseur N1 est de 1740 m³/ha, soit 12 % des apports pondérés en tête d'arroiseur (14 960 m³/ha). Plus de 50% des volumes drainés ont lieu lorsque l'ensemble des parcelles est repiqué alors qu'au cours de la phase de repiquage ils ont été minimums (moins de 13%).

En résumé, à l'échelle d'un arroiseur rizicultivé en contre-saison, les niveaux d'apport d'eau sont très liés au type de sol dominant sur les parcelles de l'arroiseur. L'efficacité de transport du partiteur (96%), est du même ordre de grandeur qu'en l'hivernage. Les taux de couverture des besoins en eau du riz sont très liés aux taux de repiquage. Les volumes d'eau drainés représentent 12% des volumes d'eau apportés en tête d'arroiseur.

4.3.6 BILAN D'EAU A L'ECHELLE D'UN ARROISEUR RIZICULTIVE : RESULTATS DE LA MODELISATION

L'efficacité de l'irrigation estimée par modélisation au niveau des parcelles - arroiseurs rizicultivés varie de 59 à 74%, soit une valeur pondérée en fonction des types de sol de 65 % (*Tableau 4-9*). Ces chiffres bien supérieurs à ceux mesurés en 2004 en hivernage (39%) (*Vandersypen, 2007[10]*) sont explicables par le fait qu'en contre-saison le problème d'anticipation des apports liés aux événements pluvieux ne se pose pas et facilite la gestion de l'eau au niveau de l'arroiseur.

Tableau 4- 9 : Résultats de la simulation des bilans d'eau au niveau des arroseurs (CS 2007-2008).

| Arroseurs | N1-3g | | N1-5g | | N1-3d et N1-2D-1g | | N1-2D-3g | |
|--|-------------------------|----------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|
| Perméabilité (m/s) | 5,75 10 ⁻⁹ | | 1,63 10 ⁻⁸ | | 2,00 10 ⁻⁸ | | 2,13 10 ⁻⁷ | |
| <i>Unités</i> | <i>m³/ha</i> | <i>%</i> | <i>m³/ha</i> | <i>%</i> | <i>m³/ha</i> | <i>%</i> | <i>m³/ha</i> | <i>%</i> |
| Apports bruts | 14 786 | 100% | 15 374 | 100% | 16 506 | 100% | 32 494 | 100% |
| Besoins culture | 9 342 | 63% | 9 076 | 59% | 10 415 | 63% | 24 142 | 74% |
| Pertes dans le drain | 1 628 | 11% | 1 982 | 13% | 1 838 | 11% | 965 | 3% |
| Pertes canal arroseur | 269 | 2% | 107 | 1% | 287 | 2% | 1 064 | 3% |
| Pertes dues épandage hors zone cultivée | 2 882 | 19% | 3 016 | 20% | 3 649 | 22% | 6 332 | 19% |
| Différence stock | 666 | 5% | 1 193 | 8% | 317 | 2% | -10 | 0% |
| Efficiéce | 66% | | 64% | | 64% | | 74% | |

Le Tableau 4-10 illustre les résultats de la simulation de la contribution des cinq arroseurs suivis au soutien de la nappe en contre-saison qui est très dépendante du type de sol dominant. Leur valeur pondérée au niveau partiteur est de 2014 m³/ha. Les surfaces non cultivées de l'arroseur contribuent de 18 à 36% de ces pertes (540 m³/ha valeur pondérée au niveau partiteur).

En résumé, l'efficiéce de l'irrigation au niveau parcelle – arroseur, de l'ordre de 65% est bien meilleure qu'en hivernage. Par contre, des pertes d'eau par percolation sur les surfaces non cultivées contribuent significativement au soutien du niveau de la nappe.

Tableau 4- 10 : Contribution de la riziculture au soutien de la nappe en contre-saison

| Arroseurs | N1-3g | | N1-5g | | N1-3d et N1-2D-1g | | N1-2D-3g | |
|----------------------------------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|-------------------------|------|
| | <i>m³/ha</i> | % | <i>m³/ha</i> | % | <i>m³/ha</i> | % | <i>m³/ha</i> | % |
| Infiltration sous culture | 470 | 73% | 1 332 | 61% | 1 797 | 77% | 17 250 | 78% |
| Infiltration canal | 9 | 1% | 83 | 4% | 75 | 3% | 842 | 4% |
| Epandage sur zone non en culture | 167 | 26% | 780 | 36% | 449 | 19% | 4 030 | 18% |
| Total | 646 | 100% | 2 195 | 100% | 2 322 | 100% | 22 121 | 100% |

4.3.7 CARACTERISATION DE L'IRRIGATION DES CULTURES MARAICHÈRES A LA PARCELLE

Le système d'irrigation paysan consiste à puiser de l'eau dans la rigole avec un sceau et d'éprender cette eau sur les cultures. Les consommations liées à cette pratique conduisent à des consommations en eau qui sont pratiquement le double de celles mesurées en utilisant un système d'irrigation californien (*Tableau 4-11*), respectivement 9 300 m³/ha et 4 250 m³/ha. Les résultats de cet essai tendent à montrer qu'il n'y a pas de différence significative entre niveau des apports nets en eau non seulement entre la tomate et l'échalote, mais aussi entre pratique paysanne et technique améliorée. La cause de cette surconsommation n'est donc pas à attribuer à un sur-arrosage.

L'analyse de ces résultats tend à montrer que cette surconsommation d'eau à la parcelle est à attribuer à la technique d'aménagement parcellaire, les pertes structurelles étant en moyenne de 3310 m³/ha (*Tableau 4-11*). Elles sont en particulier la résultante du volume d'eau tampon nécessaire pour le remplissage des rigoles préalable à chaque irrigation (2 fois 2,88 m³ + 0,6 m³) soit 6,40 m³ à multiplier par le nombre d'irrigation moyen (49 irrigations pour l'échalote et 55 pour la tomate) pendant la campagne de contre-saison.

Tableau 4- 11 : Niveaux de consommation d'eau à la parcelle de l'échalote et de la tomate suivant des techniques d'irrigation.

| Paramètres | Parcelle démonstration (PD) | | Parcelles témoins (PT) | |
|--|-----------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | <i>Tomate</i> | <i>Échalote/oignon</i> | <i>Tomate</i> | <i>Échalote/oignon</i> |
| Apport net sur culture (m ³ /ha) | 4 500 | 4 064 | 6 000 | 5 000 |
| Pertes structurelles dues à l'aménagement parcellaire (m ³ /ha) | 00 | 00 | 3 500 | 3 121 |
| Total consommation. (m ³ /ha) | 4 500 | 4 064 | 9 500 | 8 121 |

La valeur des volumes d'eau délivrés en tête de distributeur par hectare de maraîchage est de l'ordre de 14 500 m³/ha (Tableau 4-6), soit 13 800 m³/ha en tête d'arroseur en prenant comme hypothèse que l'efficacité moyenne de transport du partiteur est de 95%, identique à celle déterminée dans le cadre du suivi des arroseurs rizicultivés. En supposant la moyenne de consommation des parcelles de démonstration proche des besoins en eau d'irrigation de la culture, l'efficacité de l'irrigation au niveau parcelle-arroseur ne serait que de 34%, soit deux fois plus faible que celle de la riziculture.

Ces pertes très importantes (deux fois plus que sous riziculture) favorisent la remontée de la nappe phréatique et les phénomènes de dégradation des sols par alcalinisation comme l'atteste l'état des sols sur les parcelles conduites en maraîchage de façon continu (Marlet et al, 1998 [3]). Il y a dans ce contexte tout lieu de penser que le développement du maraîchage sur les parcelles rizicoles, outre le fait qu'elle répond à des problèmes de pression foncière, constitue une stratégie d'évitement des problèmes de dégradation des sols.

4.4 CONCLUSION : IMPACT DU DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON SUR LES PERFORMANCES DE L'IRRIGATION

L'intégration des efficacités de transport et de l'efficacité au niveau arroseur conduit à une efficacité globale de l'irrigation du riz de 23%, sous réserve de la représentativité des arroseurs suivis et de 20% en prenant en compte les cultures maraîchères. Les évaluations antérieures de 23% (Ouvry & Marlet, 1999 [11]) étaient très certainement surestimées du fait de besoins en eau du riz de contre-saison de 13 500 m³/ha (SOGREAH, 1987 [6]) surévalués si on se réfère aux résultats du suivi des bilans d'eau. Ces bases de calcul antérieures conduiraient à une efficacité globale de 32%, illustrant l'augmentation de l'efficacité de transport constatée au niveau des grands adducteurs.

Les importants épandages hors zones cultivées dès que l'ensemble de l'arroseur n'est pas encore ou plus en culture, sont le principal facteur explicatif de la faible efficacité de la riziculture ; les réduire de 80% permettrait d'atteindre une efficacité du même ordre qu'en hivernage, 28%, et de diminuer de 25 % la contribution de la riziculture de contre-saison au soutien de la nappe. Comme en hivernage, cette situation illustre la nécessité, depuis longtemps soulignée (Van Keulen & Hamel, 1997 [12]), d'améliorer l'efficacité par une

communication institutionnalisée entre l'Aiguadier et les exploitants. Des disponibilités en eau jusqu'ici abondantes sont la raison la plus souvent avancée pour expliquer la faible adhésion des usagers à une organisation plus stricte de la gestion de l'eau (Vandersypen et al., 2009[13]). Les forts taux de prélèvement du débit d'étiage du Niger que le développement des cultures de contre-saison risque d'induire en période d'étiage, devraient permettre d'amener les usagers à modifier leurs pratiques sous peine d'un risque de crises d'eau récurrentes. Dans ce contexte, il y a tout lieu de penser que l'augmentation de la demande en eau due au développement futur des cultures de contre-saison devra, comme dans tous les grands périmètres irrigués du monde (Llamas & Martinez-Santos, 1997[14]), être en partie satisfaite par l'exploitation de la nappe, faisant de sa remontée un atout.

4.5 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE 4

Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M. FAO Irrigation & Drainage Paper 56. Rome, Italie : FAO,1998.[6]

Barral JP, Tangara B. La Gestion de l'Eau dans les Périmètres Irrigués de l'Office du Niger.in Legoupil C et al (ed) Gestion Technique, Organisation Sociale et Foncière de l'irrigation.Dakar :PSI/CORAF, 1998, p 228-253.[7]

Hamel, E., Sidibé, M., et Kaloga, K. (1998). «Suivi de la gestion de l'eau à l'Office du Niger », rapport principal et Annexes, Office du Niger (programme ARPON), Ségou, Mali.[2]

Llamas MR, Martinez-Santos P. Intensive groundwater use: a silent revolution that cannot be ignored. Water Science and Technology 2005; 51: 167-74 [14]

Marlet, S., Tangara, B. & Ouvry, F. (1998a), Bilan des eaux et des sels à l'échelle des périmètres irrigués à l'Office du Niger (Compte-rendu d'expérimentation), IER/PSI-Mali Travaux et études n°7.[3]

Marlet, S., Tangara, B., Ouvry, F.(1998a). Bilan des eaux et des sels à l'échelle des périmètres irrigués à l'Office du Niger. Pôle Système Irrigué, compte rendu d'expérimentation. 16 p.[4])

Ouvry, F., Marlet, S., Tangara B. (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) :

Tome 1: Synthèse des résultats. Tome 2: Compte-rendu d'expérimentation - Annexes".
Travaux et études N°8 PSI-Mali. [\[11\]](#)

Ouvry, F., N'Djim, H., Kuper, M., Hamel, E., and Barral, J.-P. 2002. La gestion de l'eau: un équilibre entre apports et drainage. [\[5\]](#)

Ouvry F, Marlet S. 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). In Synthèse des résultats PSI. Niono, Mali : IER, 1999. [\[8\]](#)

SOGREAH. Périmètre rizicole du distributeur Retail : Réhabilitation d'une première tranche de 1315 ha. Manuel de gestion de l'eau. Ségou, Mali : Office du Niger, 1987. [\[6\]](#)

Vandersypen, K., Keita, A.C.T., (2007). Etude bibliographique de l'efficacité hydraulique à l'Office du Niger. Rapport d'étude, 47 pages [\[1\]](#)

Vandersypen, Klaartje, (2007). Improvement of collective water management in the Office du Niger irrigation scheme (Mali) : Development of decision support tools. Thesis. [\[10\]](#)

Vandersypen K, Verbist B , Keita ACT, Raes D, Jamin JY. Linking Performance and Collective Action: The Case of the Office du Niger Irrigation Scheme in Mali Water Resour manag 2009, 23: 153-168 [\[13\]](#)

Van Keulen, A. et Hamel, E. (1997). Rapport sur le suivi de la gestion de l'eau sur partiteur K5. Campagne 1996. Office du Niger (programme ARPON), Ségou, Mali. [\[9\]](#)

Van Keulen A, Hamel E. Rapport sur le suivi de la gestion de l'eau sur partiteur K5. Campagne 1996. Ségou, Mali : Office du Niger/ARPON, 1997 [\[12\]](#).

CHAPITRE 5 : IMPACT DU DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON SUR LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE

5.1 INTRODUCTION

Après la réhabilitation des périmètres, le développement des cultures de contre-saison rizicoles et maraîchères, notamment sur le secteur Retail de la zone de Niono a créé une nouvelle dynamique des conditions d'évolution de la fertilité des sols. Les principaux déterminants en sont (i) les modes de gestion du réseau d'irrigation qui favorise une augmentation des pertes par infiltration qui augmente le lessivage des sols, contribuent à recharger la nappe et (ii) la capacité de drainage limitée du système ayant pour conséquence l'engorgement des parcelles (*Keita, Belières & Sidibe, 2001 [1]*). Cette situation se traduit en particulier par une augmentation des surfaces présentant des conditions favorables au développement du processus d'alcalinisation-sodisation du fait d'une nappe dont la faible profondeur quasi générale tout au long de l'année favorise l'accumulation de sels en surface sous l'effet des phénomènes de remontée capillaire (*Marlet & N'Diaye, 2002 [2]*). Il a en effet été démontré que le bilan salin au sein de l'aménagement est positif (accumulation) pendant la contre-saison (*Ouvry & Marlet, 1999[3]*), notamment du fait d'importantes pertes par infiltration dans les canaux d'irrigation.

L'objectif de ce chapitre est de quantifier et d'apprécier dans le cadre de l'extension des superficies aménagées et cultivées, les conséquences du développement des cultures de contre-saison et de leurs modes d'irrigation sur la dynamique de la nappe.

Considérant que le processus de remontée de la nappe était bien antérieur au développement des cultures de contre-saison (*Bertrand, R., B. Keita and M. K. N'diaye (1993) [4]*), la démarche adoptée a consisté en une analyse multi échelles des tendances d'évolution de la nappe phréatique en rapport avec l'évolution des apports d'eau, des superficies aménagées et mises en valeur tant en hivernage qu'en contre-saison au cours de la période 2001-2007. Cette analyse, qui vise à évaluer la part de la remontée de la nappe imputable au développement des cultures de contre-saison, a pour but d'infirmer ou de confirmer l'hypothèse que la pratique des cultures de contre-saison et leurs modes de gestion de l'eau, participent au soutien permanent du niveau de la nappe phréatique et crée un environnement favorable aux processus de dégradation des facteurs de production du milieu.

5.2 MATERIELS ET METHODES

5.2.1 CHOIX DES SITES

Le choix des sites d'études de la dynamique de la nappe s'inscrit dans la même approche multi-échelles que celui des chapitres 3 et 4. Il s'agit dans le cas de la caractérisation de la dynamique de la nappe de :

- l'échelle régionale¹ des aménagements de l'Office du Niger et de la zone d'étude du Kala inférieur (*Figure 5-1*).
- l'échelle locale du casier Retail et des arroseurs de la maille hydraulique des partiteurs N1, N4 (Retail 1), N9 (Retail 2) qui sont toujours emblavés en contre-saison depuis leur réhabilitation et du distributeur Retail 4, jamais exploité en contre-saison, il y a de cela cinq campagnes agricoles (*Figure 5-2*).

5.2.2 MATERIELS

Les matériels utilisés dans le cadre de cette étude sont :

- Des points de suivis constitués par :
 - **Un réseau de puits à grand diamètre** dont la distribution spatiale est illustrée par la *Figure 5-1*. Ces puits de grand diamètre ont été conçus par la Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie du Mali (DNHE) et à défaut de puits artisanaux les plus proches de ces derniers.
 - **Un réseau de transects piézométriques constitué de ligne de piézomètres²** conçus (*Figure 5-3*) et installés au niveau de certains arroseurs, qui permettent de suivre le niveau dynamique de la nappe phréatique. Leur distribution spatiale est illustrée par la *Figure 5-2*.
- Des équipements de mesure :
 - **Une sonde électrique** : un appareil qui permet de mesurer le niveau d'une nappe phréatique.
 - **Un GPS** (Global Position Système) : un appareil qui permet de donner la position et les coordonnées géographiques d'un point.

¹ Sur une longueur de Sud Nord de 122,31 Km (entre les latitudes 14°50' et 13°40' N) et une largeur Est Ouest de 70,5 Km (entre les longitudes -6°40' et -5°30' W).

² Ce sont d'ouvrages de captage d'eau souterraine. De petit diamètre, ils permettent de suivre le niveau dynamique de la nappe phréatique.

- Et enfin **un registre de bord** pour noter les informations caractéristiques des points de mesures.

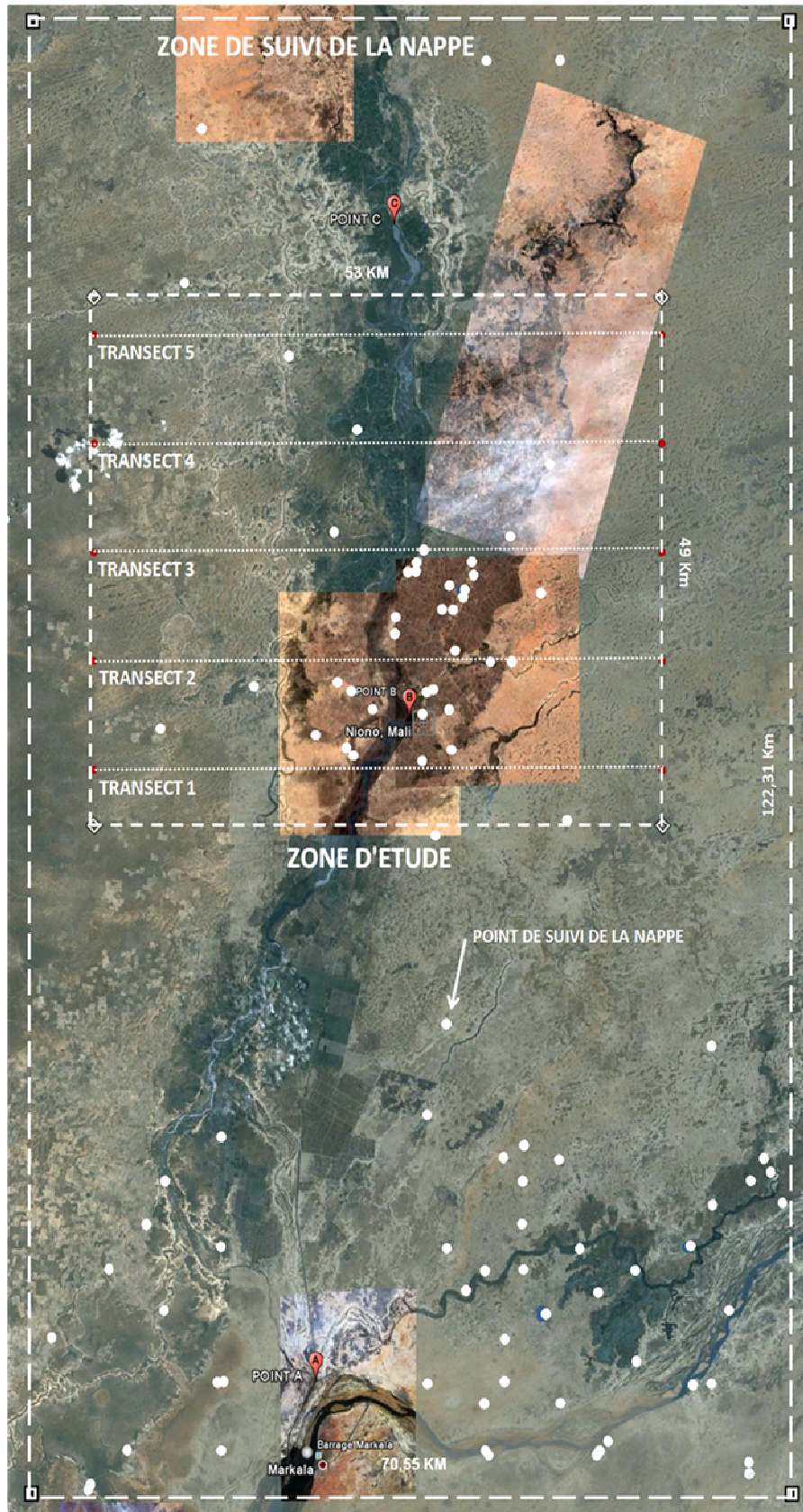


Figure 5- 1 : Zone de suivi et d'étude de la nappe régionale.

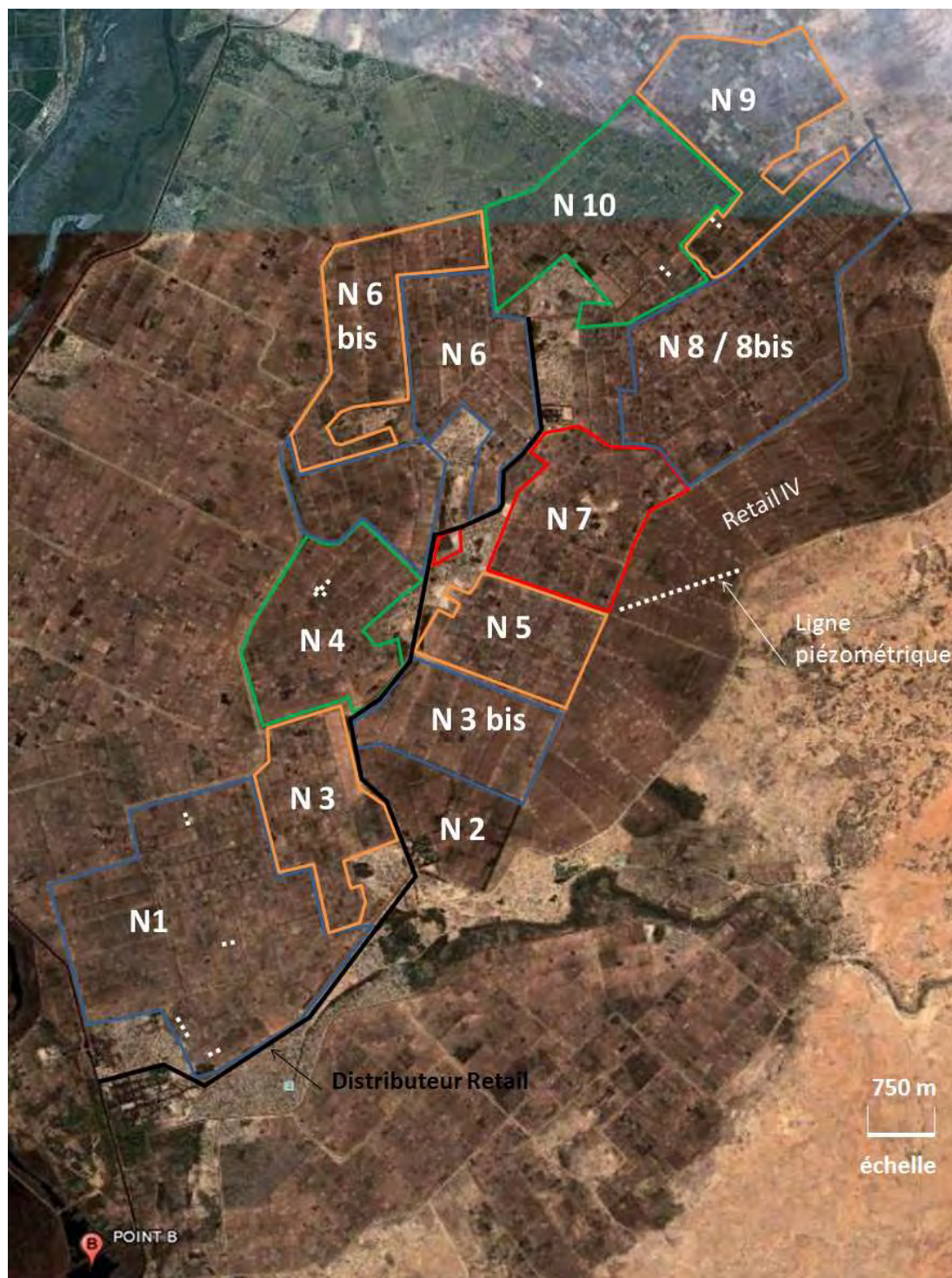


Figure 5- 2 : Sites de suivi de la nappe locale au sein du casier Retail

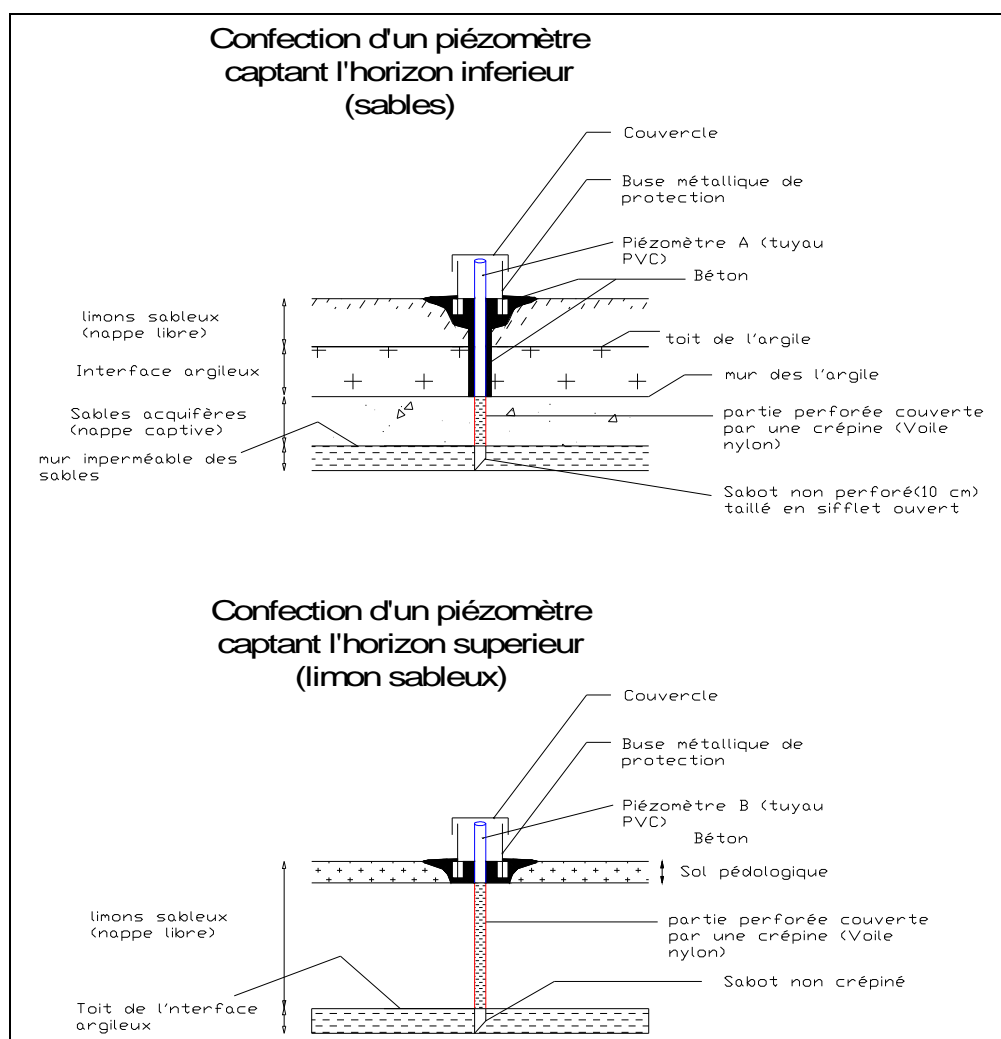


Figure 5- 3 : Schéma de conception d'un piézomètre (Source Valenza, 1996).

5.2.3 METHODES DE COLLECTE DES DONNEES DESCRIPTIVES DE L'EVOLUTION DE LA NAPPE PHREATIQUE ET DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE

L'étude a consisté à combiner l'analyse :

1. des données de suivis de la nappe régionale réalisés à l'échelle de l'ensemble de la zone de l'Office du Niger en fin d'hivernage en Novembre 1995, 2001 et 2006 (fin des cultures de saison d'hivernage) et en Mai 2007 (fin de période de culture de contre-saison) ;
2. des données de suivi de la nappe locale mesurées sur le casier Retail entre Novembre 2006 et mai 2007 ;
3. des données descriptives de la distribution spatiale et topographique des différents faciès géologiques au sein de la zone d'étude ;

4. d'un récapitulatif des surfaces mises en culture en hivernage et en contre-saison sur les périmètres de la zone d'étude du Kala inférieur³ de 2001 à 2007 (*Figure 5-4*).

5.2.3.1 DONNEES DESCRIPTIVES DE L'EVOLUTION DU TOIT DE LA NAPPE REGIONALE ENTRE NOVEMBRE 1995 ET MAI 2007

Le réseau de suivi est constitué de 221 puits profonds productifs situés au sein d'un rectangle encadrant les aménagements de l'ON ayant une longueur de Sud Nord de 122,31 Km (entre les latitudes 14°50' et 13°40' N) et une largeur Est Ouest de 70,5 km (entre les longitudes 6°40' et 5°30' W) (*Figure 5-1*). Ce dispositif, qui est constitué des sites qui avaient fait antérieurement l'objet d'un suivi en 1995 dans le cadre du Pôle régional de recherche sur les Systèmes Irrigués (PSI) et en 2001 du projet FSP/PSI-Mali, a permis d'intégrer les données qui avaient été précédemment collectées. Sur chaque site, préalablement caractérisé par ses coordonnées géographiques (altitude de la margelle ou d'un repère fixe, longitude, latitude), la profondeur de l'eau a été systématiquement mesurée en utilisant une sonde électrique. Les niveaux d'eau mesurés ont été considérés comme ceux du toit de l'aquifère du Continental Terminal-Quaternaire⁴ conformément aux conclusions de l'étude réalisée par la Direction National de l'Hydraulique et de l'Energie du Mali (*PNUD DNHE 1990 [5]*) se basant sur la similitude des faciès et la continuité hydraulique des aquifères du continental et du quaternaire le cas du delta intérieur du Niger.

³ Sur une largeur de Sud Nord de 49 Km (entre les latitudes 14,54211518 et 14,15544° N) et une longueur Est Ouest de 53 Km (entre les longitudes -6,299414 et -5,7783631° W).

⁴ La similitude des faciès et l'absence de niveaux repères ont conduit à l'association des aquifères dans certains bassins lorsqu'ils étaient en continuité hydraulique, ce qui est le cas du delta intérieur du Niger, où l'on parle d'aquifère du Continental Terminal-Quaternaire.



Figure 5- 4 : Périmètres irrigués du Kala inférieur.

5.2.3.2 DONNEES DESCRIPTIVES DE LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE LOCALE ENTRE NOVEMBRE 2006 ET MAI 2007 AU SEIN DU CASIER RETAIL

Outre un suivi mensuel du niveau de la nappe régionale réalisé sur 11 puits au cours de la contre-saison (mi Décembre à mi Mai), la dynamique de la nappe locale a été caractérisée au sein du casier Retail le long de 4 transects piézométriques implantés au sein des mailles hydrauliques des partiteurs N1, N4 (Retail 1), N9 (Retail 2), qui ont toujours été

exploités en contre-saison depuis leur réhabilitation et d'un transect implanté sur la zone alimentée par le distributeur Retail 4 qui n'a jamais été exploité au cours de cette campagne depuis 5 ans (*Figure 5-2*).

Les caractéristiques de chacun de ces transects sont illustrées par le *Tableau 5-1*.

Tableau 5- 1 : Caractéristiques des transects piézométriques suivis

| <i>Transects piézométriques</i> | <i>Type de sol /texture</i> | <i>Type de mise en valeur</i> | <i>Position du transect</i> |
|---------------------------------|--|---|------------------------------|
| N9-8D-1d | Limoneuse en surface, argileuse puis sableuse avec la profondeur | Double culture riz | Arroseur-Drain arroseur |
| N4-6d | Argilo limoneuse | | |
| N9-7D-1g | Limono argileuse | | |
| N4-1g | Partiteur (amont) située sur une levée limono sableuse, drain partiteur (aval) située sur une cuvette limono argileuse, sableuse en profondeur | Destiné à la simple culture mis en double culture riz /maraîchage depuis 1999 | Partiteur-Drain partiteur |
| N1-1d | Levée sablo-limoneuse | Destiné au maraîchage, rotation riz -culture maraîchère depuis 1998. | Arroseur-Drain arroseur |
| N1-8d | Cuvette argileuse très peu perméable | | |
| N1-2D-3g | Levée sableuse très hétérogène | Destiné à la simple culture, double culture riz depuis 1999 | |
| Retail IV | Sols hétérogènes | Simple culture depuis 2001 | Distributeur-Drain principal |

5.2.3.3 DONNEES DESCRIPTIVES DES FACIES GEOLOGIQUES AU SEIN DE LA ZONE D'ETUDE

Les caractéristiques des faciès géologiques (quaternaire alluvial, continental argilo-sableux, et substratum constitué par un bed-rock gréseux) prises en compte dans le cadre de cette étude sont issues des prospections géophysiques (*BREESS, 1996 [6]*) et électro-sismiques (*PNUD-DNHE, 1979 [7]*) réalisées respectivement en 1996 et 1979. Le *Tableau 5-2* illustre leurs principales caractéristiques (*Valenza, 1996 [8]*).

Tableau 5- 2 : Caractéristiques des différents aquifères de la zone d'étude

| <i>Aquifère</i> | <i>Caractéristiques</i> | <i>Puissance</i> | <i>Transmissivité</i> |
|-----------------|---|------------------------------|--|
| Alluvial | Alluvions anciennes ou récentes du fleuve Niger : dépôts de sable dunaire et alluvions fluviales (quaternaire) | 5 à 10 m | $4 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| Continental | Formation argilo-sableuse (sables fins à grossiers, à disposition lenticulaire, localement grésifiés) du continental terminal (début tertiaire) | 10 à 60 m (moy. 35 m) | $5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| | Formation argilo-sableuse (sables fins à grossiers, à disposition lenticulaire, localement grésifiés) du continental intercalaire (fin du secondaire) | | |
| Substratum | Sédiments gréseux : grès de Koutiala et de Bandiagara (Ordovicien) : | 20 à 40 m (10 m par endroit) | Imperméable |
| | Schistes de Toun (400 millions d'années) | 100 m | |

Les cartes de la cote du toit du continental terminal (*Figure 5-5*) et du substratum (*Figure 5-6*) établies dans ce cadre ont été digitalisées et utilisées pour prendre en compte la variabilité spatiale de la puissance du quaternaire alluvial et du continental au sein de la zone d'étude.



Figure 5- 5 : Niveau du toit du continental terminal au sein de la zone d'étude

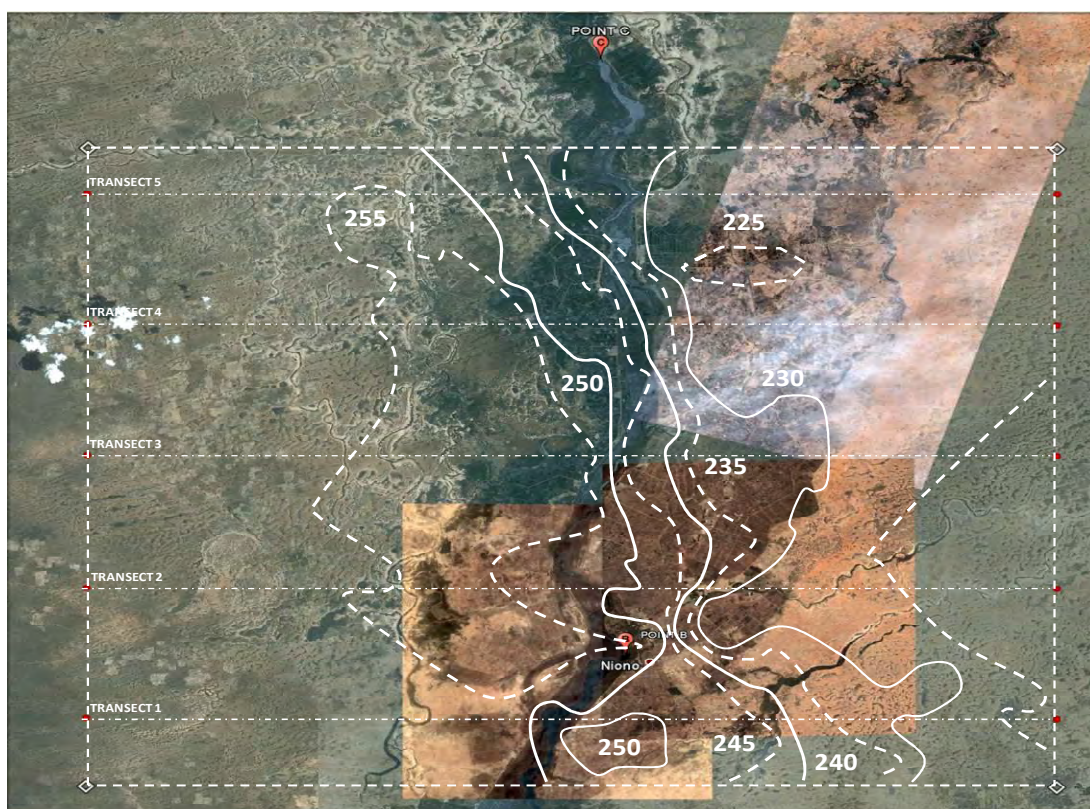


Figure 5- 6: Niveau du toit du substratum au sein de la zone d'étude

5.2.3.4 DONNEES DESCRIPTIVES DE L'AUGMENTATION DE LA MISE EN VALEUR AGRICOLE DES PERIMETRES DU KALA INFERIEUR DE 2001 A 2007

Entre 2001 et 2007 les surfaces des cultures d'hivernage et de contre-saison sont passées respectivement de 31 000 à 35 000 ha et de 6000 à 10 000 ha dans le Kala inférieur (*Tableau 5-3*).

Tableau 5- 3 : Evolution des surfaces cultivées (ha) entre 2001 et 2007 au sein des périmètres du Kala Inférieur.

| Campagne | | Zone | | | | | | Total |
|-----------------------------|---------------|--------|------------|------------|------------|--------|------------|---------------|
| | | Niono | | N'Débougou | | Molodo | | |
| | | Riz | Maraîchage | Riz | Maraîchage | Riz | Maraîchage | |
| 2001-2002 | Hivernage | 12 256 | - | 10 202 | - | 8 571 | - | 31 029 |
| | Contre Saison | 2 004 | 1 500 | 1 799 | 585 | 226 | 101 | 6 216 |
| 2002-2003 | Hivernage | 13 753 | - | 7 943 | - | 8 963 | - | 30 659 |
| | Contre Saison | 3 300 | 1 564 | 3 223 | 714 | 1 298 | 191 | 10 290 |
| 2003-2004 | Hivernage | 13 668 | - | 10 865 | - | 9 012 | - | 33 545 |
| | Contre Saison | 2 500 | 1 696 | 2 021 | 1 258 | 657 | 284 | 8 416 |
| 2004-2005 | Hivernage | 14 668 | - | 11 462 | - | 9 175 | - | 35 305 |
| | Contre Saison | 3 500 | 1 713 | 2 380 | 967 | 971 | 407 | 9 938 |
| 2005-2006 | Hivernage | 14 691 | - | 11 328 | - | 9 264 | - | 35 283 |
| | Contre Saison | 2 600 | 1 289 | 3 258 | 1 049 | 1 365 | 342 | 9 903 |
| 2006-2007 | Hivernage | 14 700 | - | 11 449 | - | 9 264 | - | 35 413 |
| | Contre Saison | 2 500 | 1 947 | 3 261 | 1 005 | 1 178 | 377 | 10 268 |
| <i>Moyenne par campagne</i> | | | | | | | | 21 355 |

Ces données ont été collectées auprès des différents services de suivi-évaluation des trois zones concernées (Niono, N'Débougou, Molodo).

5.2.3.5 FONDS DE CARTE ET DONNEES DESCRIPTIVES DES AMENAGEMENTS

Les points de suivi de la nappe ayant été géo référencés, la spatialisation des résultats a été réalisée en utilisant des fonds de carte des aménagements fournis par l'Office du Niger ainsi que les images satellites extraites de Google Earth (image de Novembre 2002).

5.2.4 METHODES D'ANALYSE ET DE TRAITEMENT DES DONNEES

En vue de mieux cerner et de pouvoir modéliser l'impact des cultures de contre-saison sur la dynamique de la nappe phréatique, les analyses ont été menées à deux niveaux d'échelles (régional pour la nappe profonde et local pour la nappe superficielle alluviale).

5.2.4.1 TRAITEMENT ET ANALYSE DES DONNEES A L'ECHELLE LOCALE (NAPPE SUPERFICIELLE ALLUVIALE)

5.2.4.1.1 Traitement des données à l'échelle locale

Le traitement des données a consisté à exploiter les données de suivi de la nappe superficielle aux niveaux des différents transects et à les représenter sous forme de transects piézométriques permettant d'identifier les principaux flux et leur origine.

5.2.4.1.2 Analyse des données à l'échelle locale

L'analyse de la dynamique intra annuelle de la nappe décrite par les transects piézométriques a consisté à :

1. identifier, pour chacun des transects, les facteurs explicatifs de la dynamique de la nappe : systèmes de cultures (riz, maraîchage, sans culture), des calendriers culturaux et de la localisation des infrastructures hydrauliques (partiteurs, arroseurs, drains) ;
2. comparer au niveau d'échelle du casier Retail la dynamique locale de la nappe et celle de la nappe régionale afin de valider (i) l'hypothèse de leur continuité hydraulique et (ii) de l'interaction entre capacité de drainage souterrain des parcelles et niveau de la nappe régionale.

5.2.4.2 ANALYSE ET TRAITEMENT DES DONNEES POUR LA NAPPE PROFONDE REGIONALE.

5.2.4.2.1 Traitement des données descriptives de la nappe régionale.

Le traitement des données au niveau de la nappe régionale a consisté à :

1. déterminer, à partir des données de suivi géoréférencées, les lignes isopièzes descriptives de l'évolution de la nappe régionale en Novembre 1995, Novembre 2001, Novembre 2006 (fin de la campagne d'hivernage) et Mai 2007 (fin de la campagne d'hivernage).

Compte tenu de la distribution spatiale non homogène des points de suivi et des effets de bordure importants induits lors de l'utilisation de logiciels de krigeage tels que Surfer, la détermination des courbes isopièzes a successivement consisté à :

- mailler l'ensemble de la zone de suivi de la nappe en pixels carrés de 1 km de côtés ;
- définir une sous zone au sein de laquelle le centre des pixels est à moins de 5 Km d'au moins 2 points de mesure. La sous zone ainsi définie est constituée par un rectangle

de 53 km de longueur Ouest-Est et 49 km de large Nord-Sud encadrant les zones aménagées du Kala inférieur ;

- calculer par interpolation la cote du centre de chacun de ces pixels ;
 - utiliser ce jeu de données pour déterminer les isopièzes avec le logiciel Surfer.
2. digitaliser et géo référencer les cartes du niveau topographique du toit du substratum et du continental terminal élaborées par la DNHE (*PNUD-DNHE, 1979 [7]*) ;
 3. estimer les volumes des nappes du continental terminal et de l'alluvial pour les 5 dates de suivi (utilisation du logiciel Surfer validée par un calcul par pixel).

5.2.4.2.2 Analyse des données descriptives de la nappe régionale.

L'analyse des données a successivement consisté à :

1. générer 5 transects permettant d'analyser la variabilité de la dynamique de la nappe au sein de la zone d'étude. On notera que cette analyse a entre autre permis de constater que la ligne de raccordement de la nappe du continental terminal avec le substratum était extérieure à la zone de suivi critiqué⁵ de la nappe ;
2. générer un transect moyen du niveau de la nappe au sein de la zone d'étude sur lequel les bornes de l'aquifère continental ont été déterminées en extrapolant la pente de la nappe et du toit du substratum ;
3. estimer les volumes corrigés des nappes du continental terminal et de l'alluvial pour les 5 dates de suivi pour les 2 rives du Fala de Molodo à partir des caractéristiques du transect moyen précédemment déterminé ;
4. caler un modèle de type « bilan d'eau » permettant de simuler l'évolution du niveau de la nappe entre Novembre 2001 et Mai 2007 en fonction de l'évolution des surfaces mises en culture en saison des pluies et en contre-saison au cours de cette période ;
5. extrapoler les résultats du modèle pour évaluer l'impact du développement des cultures de contre-saison sur la dynamique de la nappe.

⁵ La sous zone de 53 Km de longueur Ouest-Est et 49 Km de large Nord-Sud, définie au sein de l'ensemble de la zone de suivi du Kala inférieur à partir des données simulées satisfaisant la condition que le centre du pixel carré de 1 Km de côtés est à moins de 5 Km d'au moins 2 points de mesure.

5.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.3.1 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'EVOLUTION DU NIVEAU DE LA NAPPE ENTRE NOVEMBRE 1995 ET MAI 2007

5.3.1.1 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'EVOLUTION DE LA NAPPE REGIONALE AU SEIN DU KALA INFERIEUR ENTRE NOVEMBRE 1995 ET NOVEMBRE 2006

5.3.1.1.1 Caractérisation de la dynamique de la montée de la nappe régionale

La comparaison des profondeurs de la nappe mesurées sur chacun des 211 puits profonds suivis illustre l'accélération de sa remontée : diminution de sa profondeur de 6% entre 1995 et 2001 (*Figure 5-7*) et de 16% entre 2001 et 2006 (*Figure 5-8*).

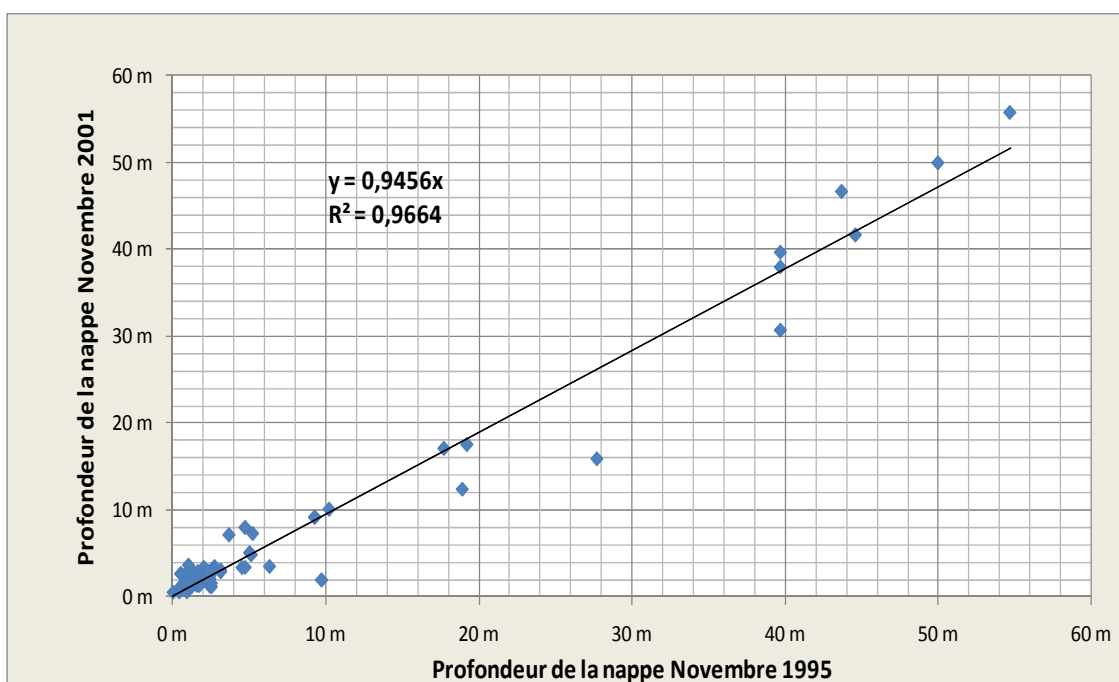


Figure 5- 7: Comparaison de l'évolution de la profondeur de la nappe régionale de Novembre 1995 avec celle de Novembre 2001.

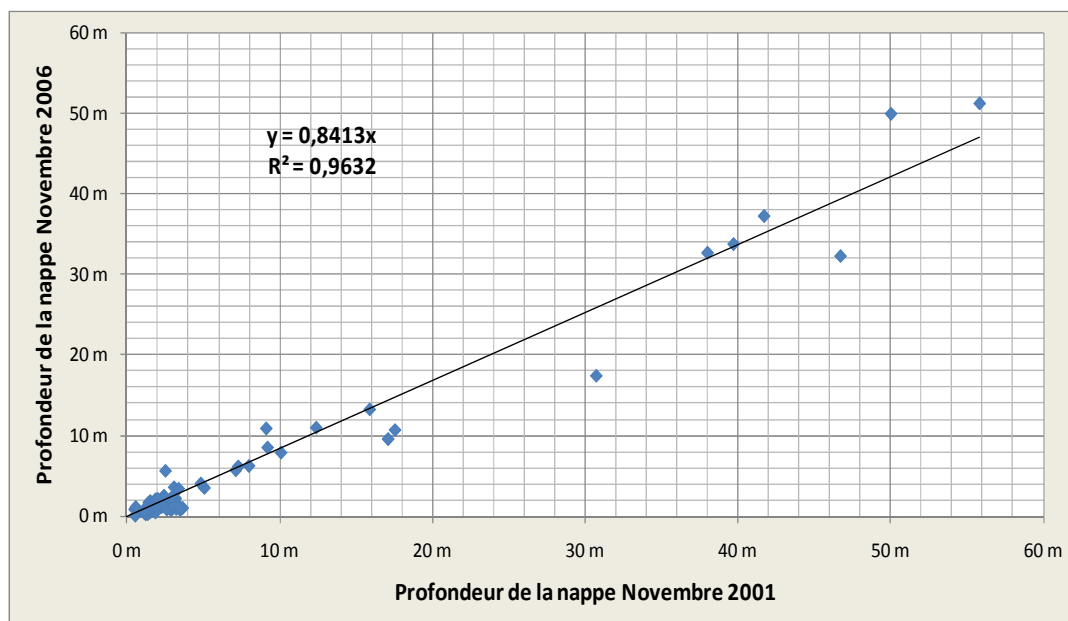


Figure 5- 8 : Comparaison de l'évolution de la profondeur de la nappe régionale de Novembre 2001 avec celle de Novembre 2006

Les relations linéaires établies illustrent que la remontée a été pratiquement proportionnelle à la profondeur initiale de la nappe. Elle est beaucoup plus forte dans les zones périphériques extérieures aux périmètres irrigués pour lesquelles la profondeur initiale était la plus importante. La comparaison des cartes isopièzes de 1995 (*Figure 5-9*), 2001 (*Figure 5-10*) et 2006 (*Figure 5-11*) confirme ce constat.

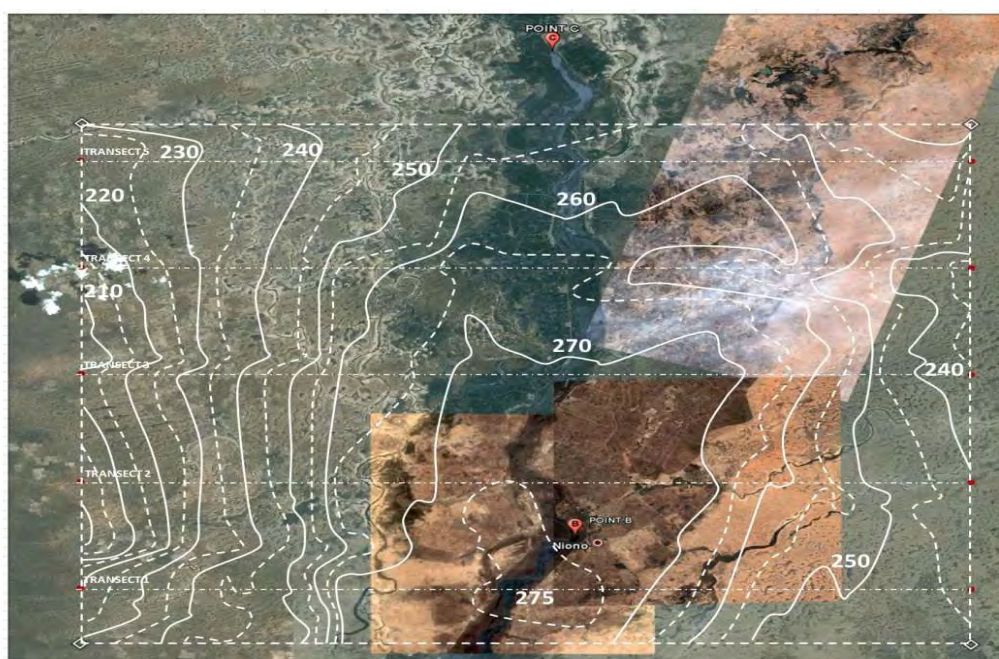


Figure 5- 9 : Carte isopièze de la zone d'étude en Novembre 1995.

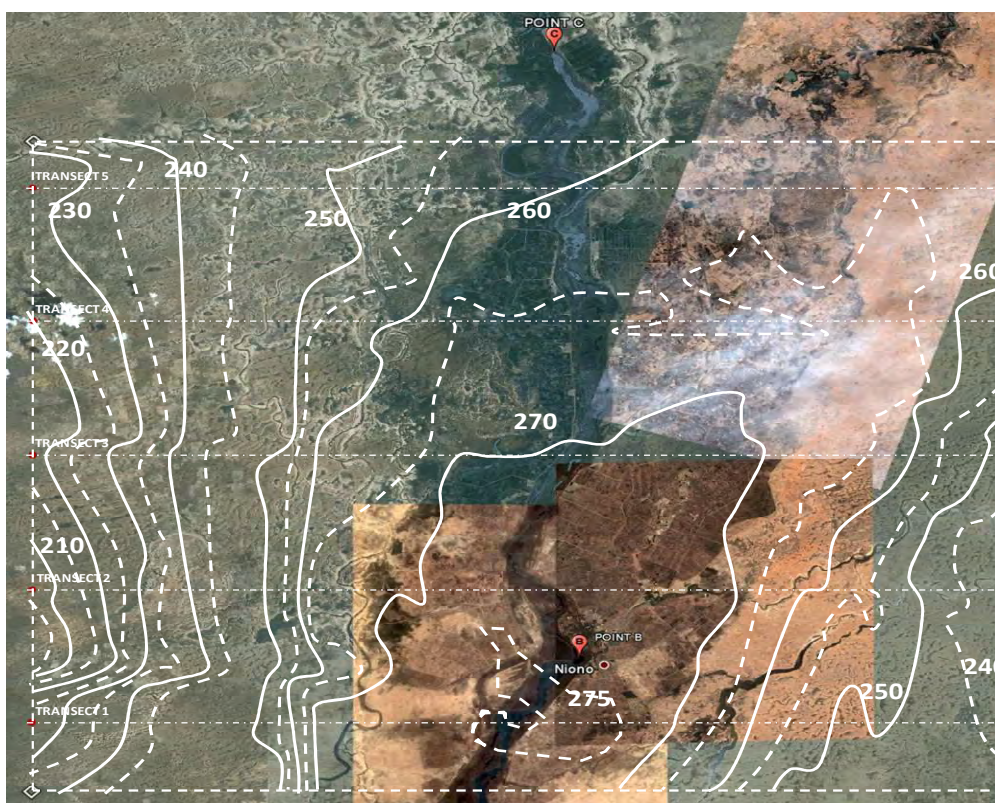


Figure 5- 10 : Carte isopièze de la zone d'étude en Novembre 2001

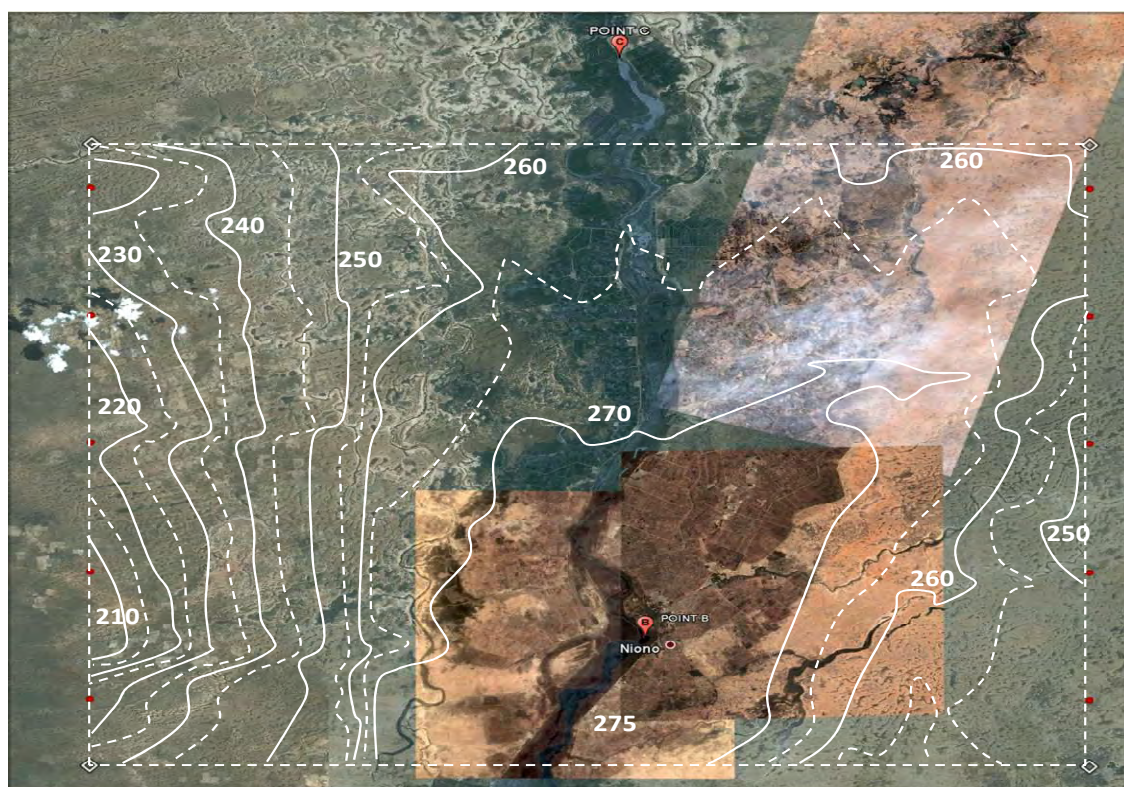


Figure 5- 11 : Carte isopièze de la zone d'étude en Novembre 2006.

Le niveau de la nappe régionale a varié en 11 ans de moins de 5 mètres dans les périmètres et au niveau du *Fala*, où la nappe de surface est très proche du niveau du sol, alors que dans les franges Est et particulièrement Ouest de la zone d'étude le toit de la nappe qui était à une profondeur de plus de 40 m est remontée de plus de 10 mètres (*Figure 5-18*).

La forme de la nappe en dôme, ayant pour axe le *Fala* et sommet du bombement les périmètres irrigués, et sa descente graduelle à mesure qu'on s'éloigne de ces structures (cartes isopièzes *Figure 5-9* à *Figure 5-11*) et transects isopièzes (*Figure 5-12* à *Figure 5-16*) illustrent l'origine de son alimentation par les infiltrations d'eau au niveau du *Fala* et des zones irriguées.

Le plus important développement de la nappe à l'Est qu'à l'Ouest illustre l'interaction du pendage du substratum sur la forme de la nappe et confirme la thèse d'une évacuation principale liée à la géométrie (variation de pente) du mur de l'aquifère du Continental (toit du substratum) (*Valenza, 1996 [8]*).

Ce constat est conforme aux observations antérieures faites par *Barral et al, 1996[9]*. La baisse régulière de la nappe et la similitude des différents transects tendent à confirmer la continuité hydraulique des aquifères du continental et du quaternaire dans le delta intérieur du Niger (*PNUD, DNHE 1990 [8]*).

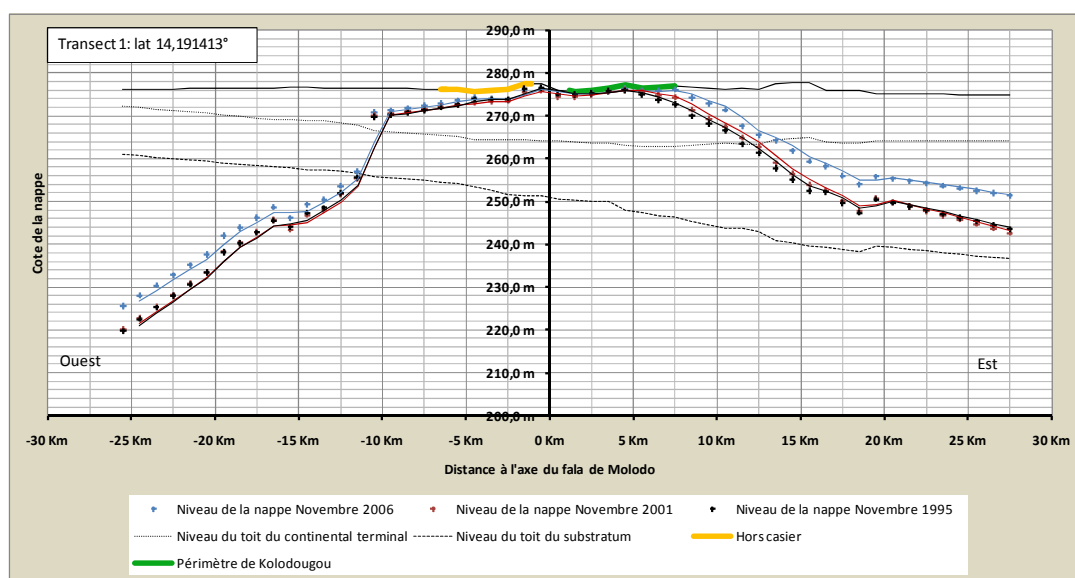


Figure 5- 12 : Comparaison de l'évolution du niveau de la nappe en Novembre 1995, 2001 et 2006 (transect 1).

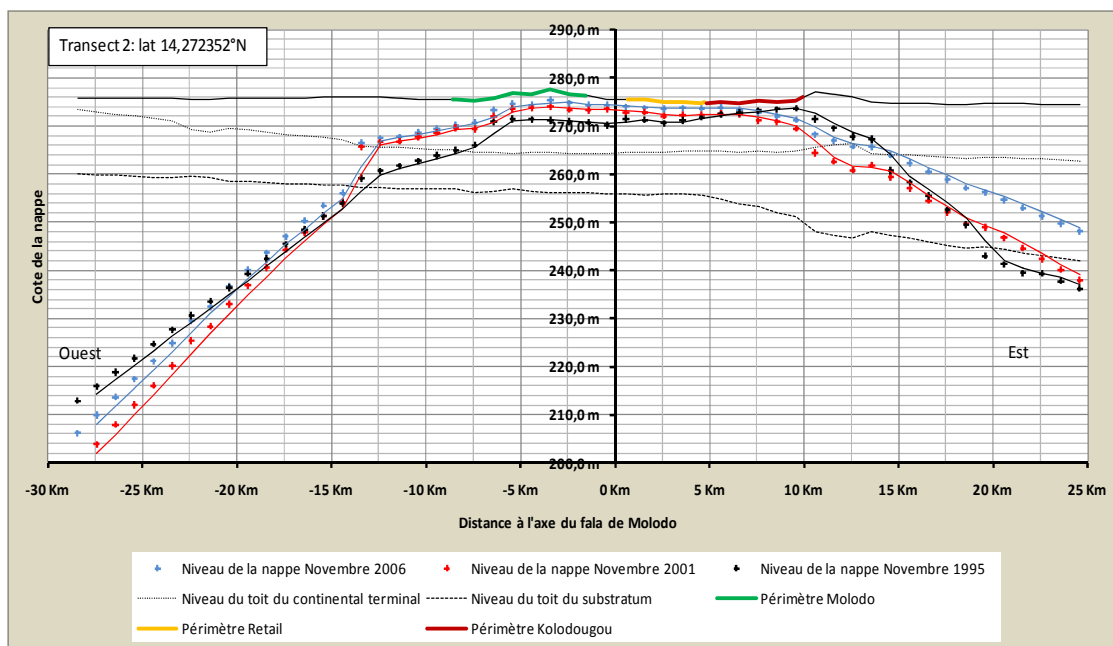


Figure 5- 13 : Comparaison de l'évolution du niveau de la nappe en Novembre 1995, 2001 et 2006 (transect 2).

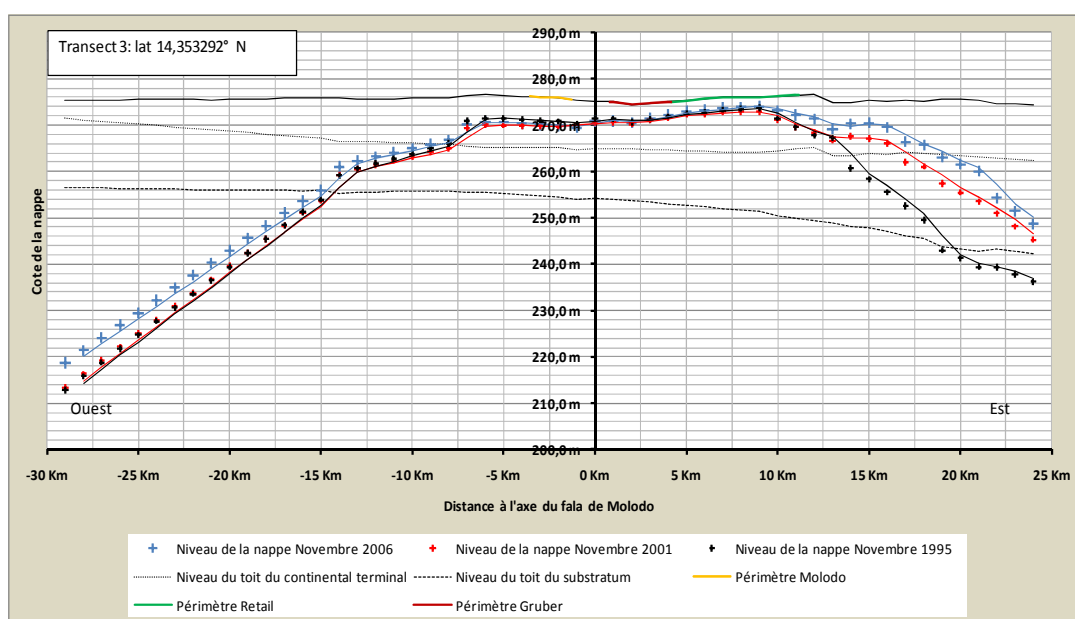


Figure 5- 14 : Comparaison de l'évolution du niveau de la nappe en Novembre 1995, 2001 et 2006 (transect 3).

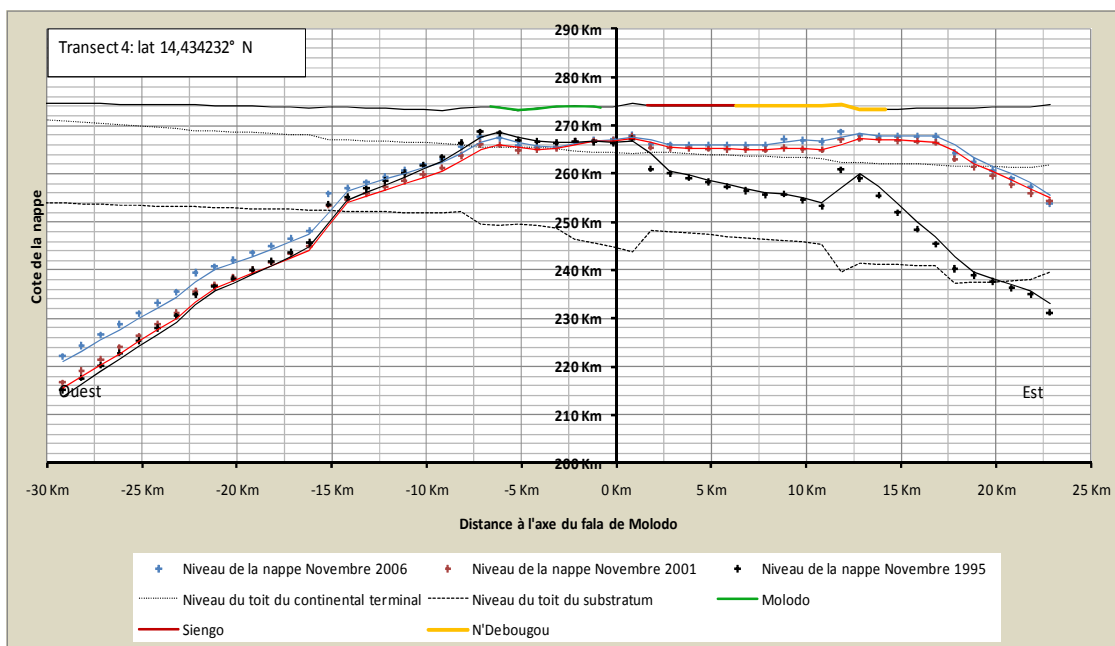


Figure 5- 15 : Comparaison de l'évolution du niveau de la nappe en Novembre 1995, 2001 et 2006 (transect 4).

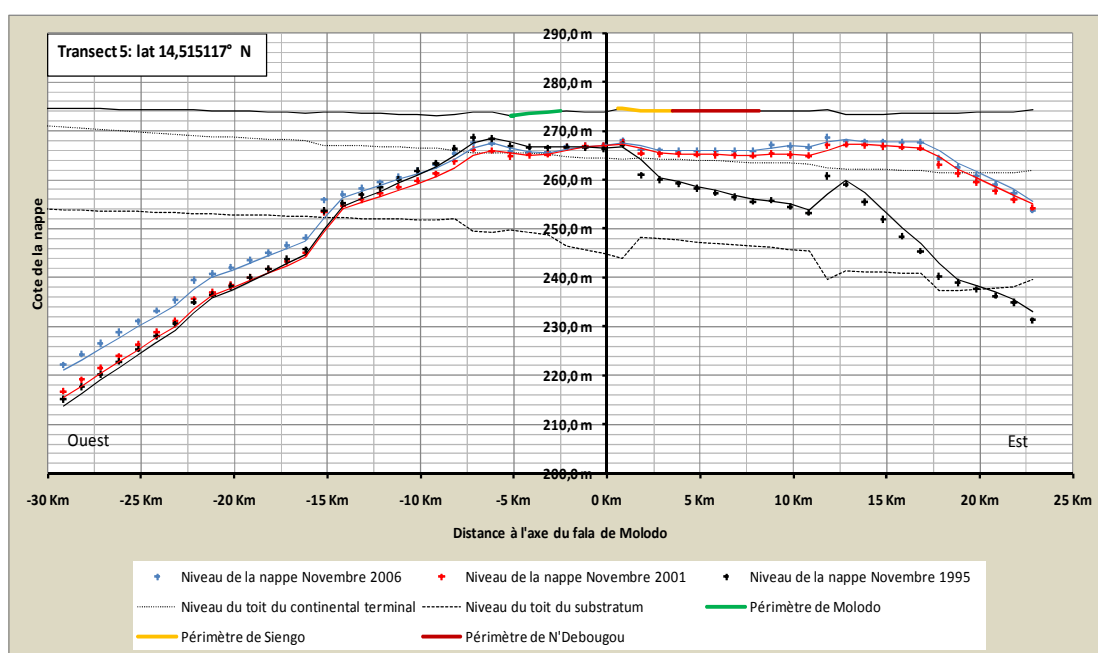


Figure 5- 16 : Comparaison de l'évolution du niveau de la nappe en Novembre 1995, 2001 et 2006 (transect 5).

On notera que les transects piézométriques mettent en évidence une contribution non négligeable des drains principaux à l'alimentation de la nappe. Elle est particulièrement perceptible en rive droite (coté Est du *Fala*) où elle augmente du Nord au Sud à mesure que la zone drainée par le drain s'accroît (*Figure 5-17*).

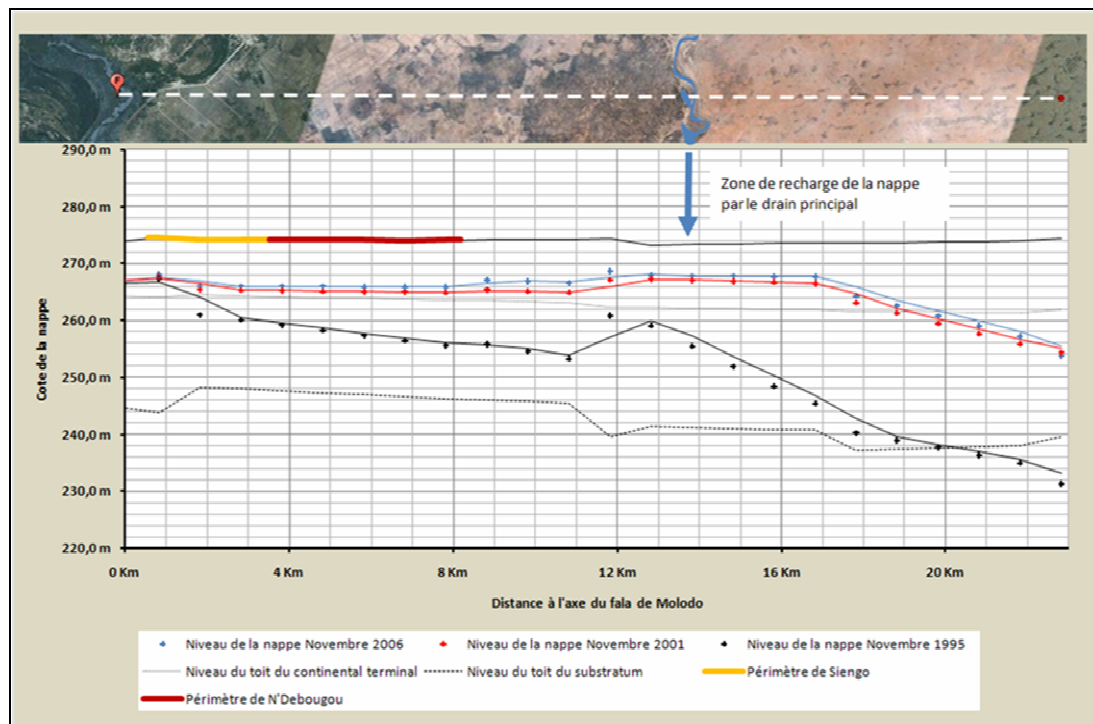


Figure 5- 17 : Illustration de la contibution du drain principal à la recharge de la nappe (transect 5)

Ces résultats illustrent :

- que les sources d'alimentation de la nappe régionale sont, la combinaison des infiltrations d'eau venant du Fala, des zones irriguées et des principaux drains.
- que le volume de la nappe augmente, les apports étant supérieurs à la capacité d'infiltration du substratum,
- que le dôme que forme la nappe du continental alluvial au niveau du Kala inférieur tend à augmenter son volume et à élargir sa base,
- que la drainabilité naturelle des zones irriguées tend à diminuer entre 1995 et 2006 du fait d'une diminution du gradient hydraulique, le niveau de la nappe à la périphérie des zones aménagées augmentant plus rapidement qu'à leur aplomb.

5.3.1.1.2 Estimation de l'augmentation du volume de la nappe régionale entre Novembre 1995 et Novembre 2006

Comme illustré par les cinq transects Est-Ouest descriptifs de l'évolution de la nappe au sein de la zone d'étude, l'augmentation du niveau de l'aquifère du continental a été telle que sa ligne de raccordement à la nappe du substratum est à partir de 2001 extérieure à la zone d'étude. L'ordre de grandeur de ces volumes a de ce fait été estimé à partir d'un profil piézométrique Est-Ouest moyen de façon à pouvoir déterminer les bornes de l'aquifère continental en extrapolant la pente de la nappe et du toit du substratum comme illustré par la *Figure 5-18*.

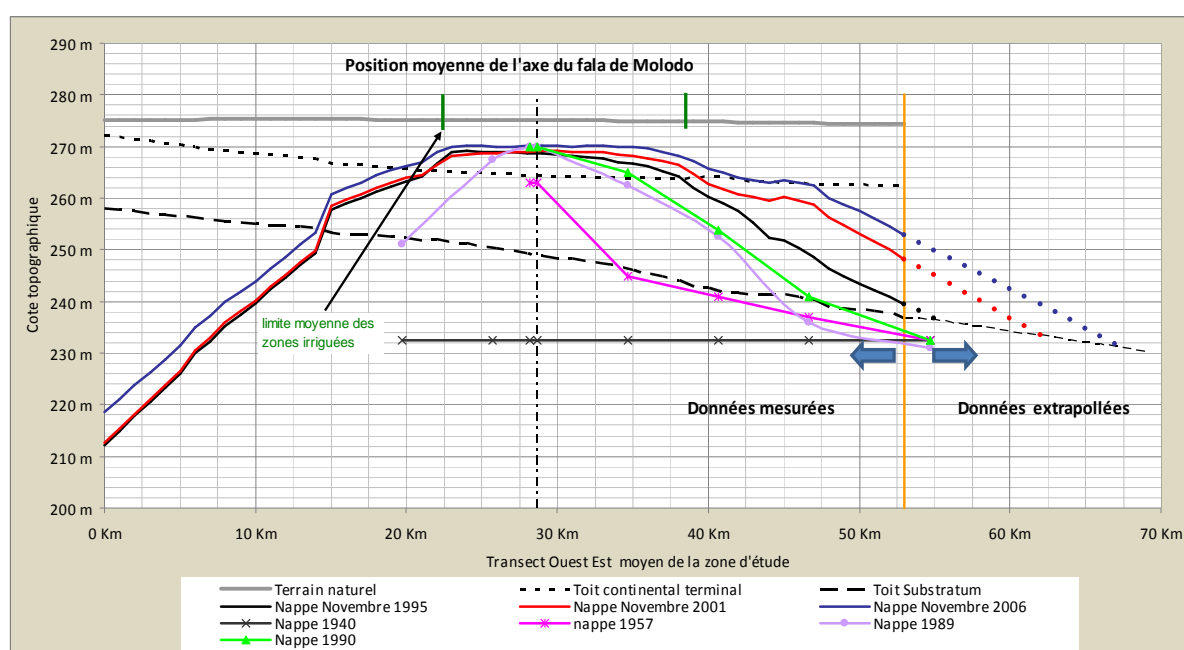


Figure 5- 18 : Transect Ouest-Est moyen de l'évolution de la nappe dans la zone d'étude entre 1940 et Novembre 2006.

L'estimation du volume de l'aquifère alluvial-continental réalisée sur cette base montre une augmentation progressive non seulement entre 1940 et 1990, mais aussi et surtout entre Novembre 1995 et 2006 (*Tableau 5-4*). Courant cette dernière période, son volume est passé de 26 400 à 34 600 millions de mètres cube entre 1995 et 2001 pour atteindre 42 330 millions de mètres cube en Novembre 2006, les parts respectives de la nappe alluviale et de la nappe du continental restant à peu près constantes, respectivement de l'ordre de 10% et 90% du volume total.

Tableau 5- 4 : Evolution du volume de la nappe régionale entre 1995 et 2006 au sein de la zone d'étude (en millions de m³).

| Date | Volume de la nappe en millions de m ³ | | |
|------------------------------|--|---------------|---------------|
| | Novembre 1995 | Novembre 2001 | Novembre 2006 |
| Nappe alluviale | 2 710 | 3 279 | 4 911 |
| Nappe du continental | 23 670 | 31 299 | 37 415 |
| Nappe alluviale-continentale | 26 380 | 34 578 | 42 326 |

5.3.1.1.3 Caractérisation de l'évolution de la nappe régionale entre Novembre 2006 et Mai 2007

5.3.1.1.3.1 Caractérisation de la dynamique de rabattement de la nappe régionale en contre-saison.

La carte isopièze de la nappe en Mai 2007 et son transect moyen au sein de la zone d'étude sont respectivement illustrés par la (Figure 5-19) et la Figure 5-20. Le rabattement moyen de la nappe est de l'ordre d'un mètre mais plus prononcé à, de l'ordre de 2 mètres, à la périphérie des zones d'apports (aménagements).

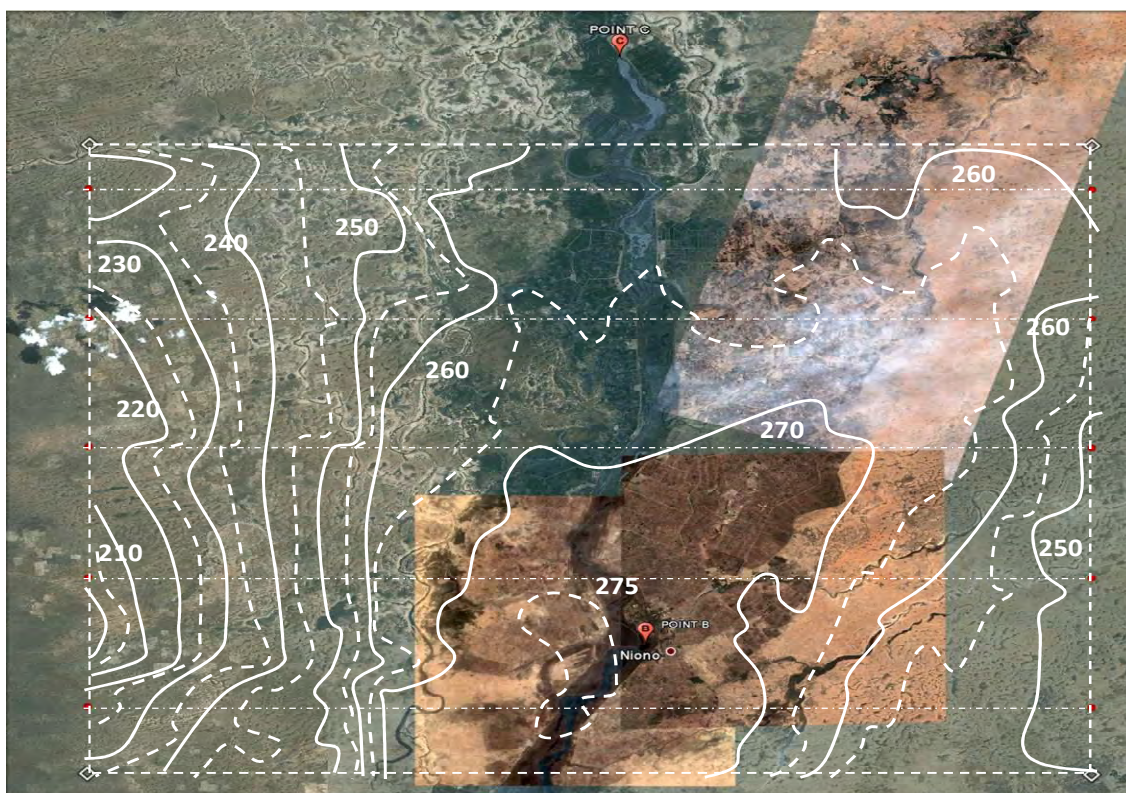


Figure 5- 19 : Carte isopièze de la zone d'étude en Mai 2007.

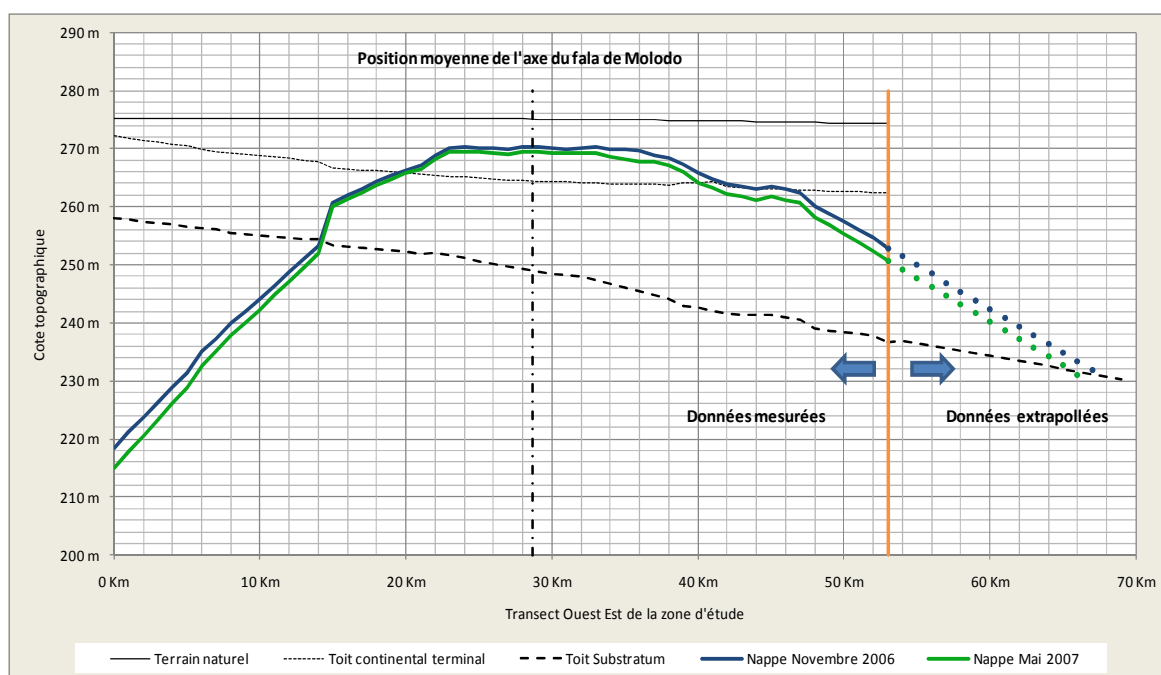


Figure 5- 20 : Transect Ouest/Est moyen de l'évolution de la nappe dans la zone d'étude entre Novembre 2006 et Mai 2007

5.3.1.1.3.2 Caractérisation de l'évolution du volume de la nappe régionale au cours de la contre-saison 2006-2007.

La nappe régionale du Continental Terminal-Alluviale en Mai 2007 a été évaluée à 38 552 millions de m³. Par rapport au 42 330 millions de m³ estimés en fin Novembre 2006, la perte est estimée à 9% (Tableau 5-5).

Tableau 5- 5 : Evolution du volume de la nappe régionale entre Novembre 2006 et Mai 2007 au sein de la zone d'étude (en millions de m³).

| Date | Volume de la nappe régionale en millions de m ³ | |
|-------------------------------|--|---------------|
| | Novembre 2006 | Mai 2007 |
| Nappe alluviale | 4 911 | 3 831 |
| Nappe du continental terminal | 37 415 | 34 721 |
| Nappe alluviale-continentale | 42 326 | 38 552 |

5.3.1.1.4 Relation entre évolution du volume de la nappe régionale, surface mise en valeur et intensité culturale entre Novembre 2001 et 2006.

Le Tableau 5-6 illustre en rive droite et rive gauche du Fala l'évolution du volume de la nappe entre Novembre 1995, 2001 et 2006 ainsi que les surfaces moyennes cultivées en hivernage et en contre-saison.

Il confirme que le développement de la nappe alluviale-continentele à l'Ouest du *Fala* est beaucoup moins important qu'à l'Est où elle constitue de l'ordre de 66%, 73% et 75% de son volume total à ces différentes dates et permet de mettre en évidence que ces chiffres du même ordre de grandeur que ceux du rapport entre surfaces aménagées sur les deux rives, la surface aménagée en rive droite représentant de l'ordre de 75% des surfaces aménagées du Kala inférieur. La comparaison des surfaces mises en valeur et augmentation de volume permet de mettre en évidence une relation de cause à effet entre ces variables significatives au seuil 5% ($R^2=0,94$ et $R^2=0,83$).

Tableau 5- 6 : Evolution du volume de la nappe continentale-alluviale et des surfaces cultivées à l'est et à l'ouest de l'axe du fala de Molodo entre Novembre 1995 et Novembre 2006.

| | <i>Rive Gauche (Ouest) zone de Molodo</i> | <i>Rive droite (Est) zones de Niono et N'Debougou</i> |
|---|---|---|
| <i>Volume de la nappe en millions de m3</i> | | |
| Novembre 1995 | 9011 | 17369 |
| Novembre 2001 | 9150 | 25428 |
| Novembre 2006 | 10513 | 31812 |
| <i>Surface cultivée moyenne (ha) entre Novembre 1995 et Novembre 2001</i> | | |
| Hivernage | 8124 | 21152 |
| Contre-saison | 171 | 3535 |
| Intensification culturale | 102% | 117% |
| <i>Surface cultivée moyenne (ha) entre Novembre 2001 et Novembre 2006</i> | | |
| Hivernage | 8997 | 24905 |
| Contre-saison | 1168 | 7784 |
| Intensification culturale | 113% | 131% |

La répartition dissymétrique de la nappe de part et d'autre du *Fala* de Molodo est donc essentiellement attribuable à l'importance des surfaces aménagées et cultivées, ce qui permet d'émettre l'hypothèse que l'importance des surfaces mises en cultures en hivernage et en contre-saison est explicative de l'évolution du volume de la nappe.

5.3.1.2 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DE L'EVOLUTION DE LA NAPPE ENTRE NOVEMBRE 1995 ET NOVEMBRE 2006 AU SEIN DU CASIER RETAIL

5.3.1.2.1 Echelle du casier Retail

La profondeur de la nappe phréatique suivie dans les dix neuf puits du casier Retail, à raison de deux puits en moyenne dans chacun des dix villages, montre que pendant toute la

campagne de contre-saison, l'amplitude moyenne de variation du niveau de la nappe est faible (0,52 m en moyenne) (*Figure 5-21*). Les côtes piézométriques varient entre 274,60 mètres (en moyenne à 1 m de la surface du sol) au niveau des puits proches des sources d'eau (canaux) et 272,06 mètres (moyenne de 2,74 m du sol) au niveau des plus éloignés.

Le niveau de cette nappe diminue très progressivement (- de 20 cm) au cours de la campagne de contre-saison alors que la nappe de surface devient progressivement sub-affleurante dans les parcelles emblavées en riz et maraîchage de contre-saison (*Figure 5-22*). Ceci tend à confirmer l'hypothèse de la continuité entre cette nappe et la nappe régionale.

La remontée progressive de la nappe depuis 1990 est perceptible : alors qu'au cours des années de faible mise en valeur agricole (de la contre-saison 1990-1991 à 2000-2001), la nappe phréatique dans les puits était en moyenne à 2,20 mètres du sol, en années de forte mise en valeur (contre-saison 2006-2007) elle n'était plus qu'en moyenne à 1,8 mètre soit une hausse de 0,4 mètre.

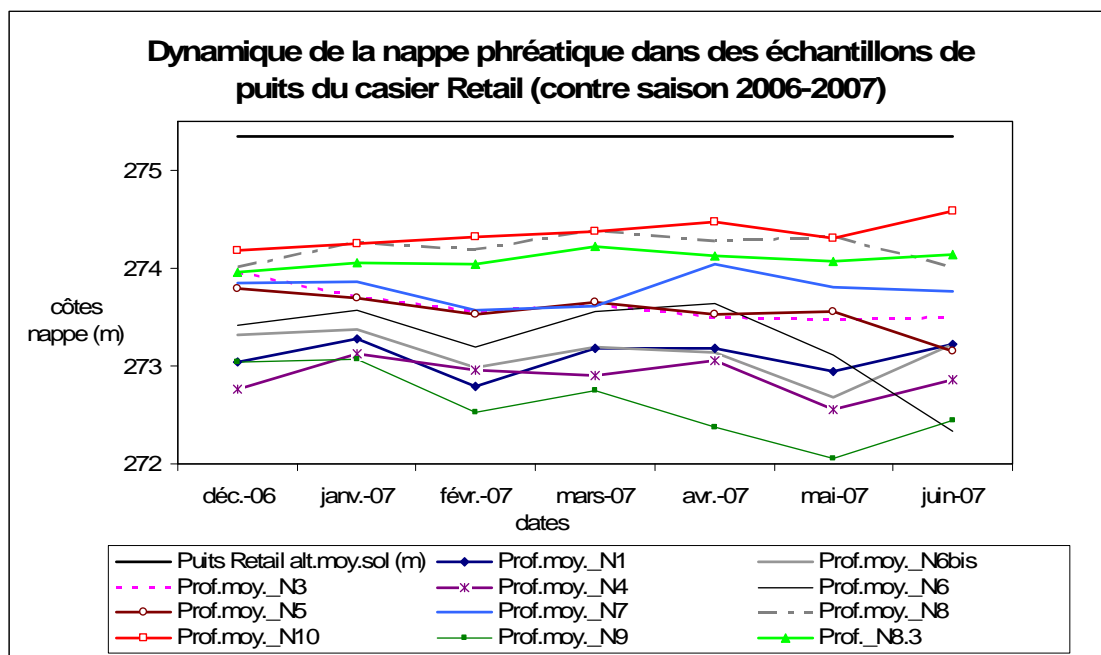


Figure 5- 21 : Dynamique de la nappe dans les puits du casier Retail (contre-saison 2006-2007).

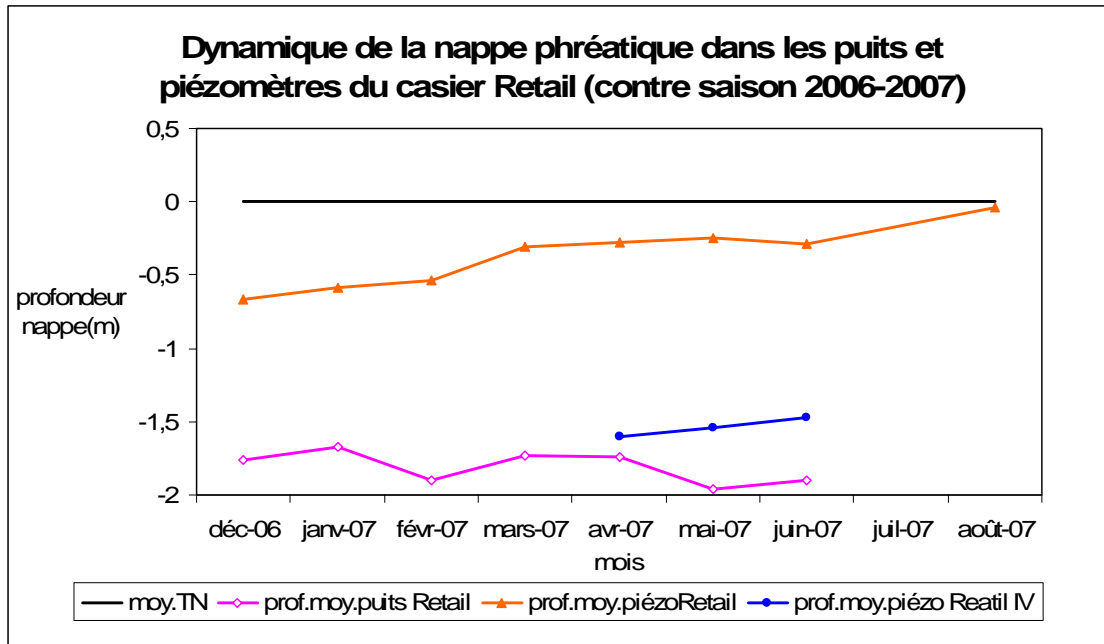


Figure 5- 22 : Dynamique de la nappe dans les puits et piézomètres du casier Retail (contre-saison 2006-2007).

L'effet des canaux et particulièrement des drains est clairement mis en évidence par la [Figure 5-23](#) qui illustre le niveau de la nappe sur un transect allant du partiteur Retail IV au drain principal Niono-Retail (NR). A part les apports d'entretien (talon), le partiteur est permanence à sec. Le niveau piézométrique monte du partiteur vers le drain principal. Le drain principal, engorgé sous l'effet des apports d'eau de la contre-saison en partie sur les exploitations des partiteurs de N9, N8, N8bis, N7, N5 et N3bis, ne joue plus efficacement son rôle ; au contraire il recharge la nappe. Son effet se fait sentir sur les piézomètres P10, P9 et P8, donc alimente la nappe dans un rayon de 400 m environ. Le partiteur à sec, draine la nappe dans les piézomètres P1, P2.

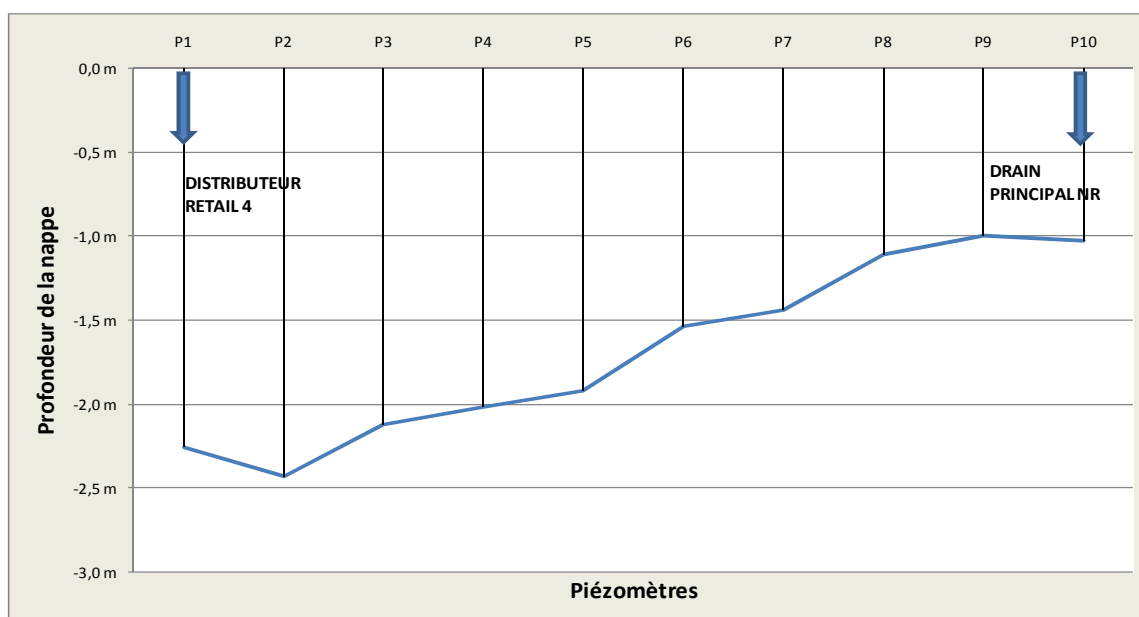


Figure 5- 23 : Contribution des drains à la recharge de la nappe de surface en contre-saison sans mise en valeur agricole (zone Retail IV, CS 2006-2007).

5.3.1.2.2 Echelle de l'arroseur

L'ensemble des suivis de la nappe réalisés au niveau arroseur est résumé par la [Figure 5-24](#). La nappe phréatique évolue pratiquement de la même manière sur l'ensemble des arroseurs suivis. A moins d'un mètre de la surface du sol en général au début de la campagne culturale (période de mise en place des pépinières et de la pré-irrigation pour le labour), elle monte au fur et à mesure que les cultures se mettent en place (période de pleine irrigation du maraîchage et de maintien de la lame d'eau après le repiquage du riz) pour devenir finalement affleurante, à environ 0,30 mètre en dessous de la surface du sol sous cultures maraîchères et au niveau du sol voir au dessus sous culture de riz.

En général sur parcelles rizicoles (exemple arroseur N4-6d), les infiltrations au niveau de l'arroseur contribuent en début de campagne à l'alimentation de la nappe alors que le drain jouant son rôle à tendance à rabattre son niveau. A contrario, dès que les parcelles sont en eau, le drain d'arroseur étant rapidement engorgé participe aussi à l'alimentation de la nappe comme l'illustre la [Figure 5-25](#). On retrouve au niveau arroseur le même type de contribution du système de drainage à l'alimentation de la nappe qu'aux autres niveaux du réseau, drain Niono Retail ([Figure 5-23](#)) ou drain principal ([Figure 5-17](#)).

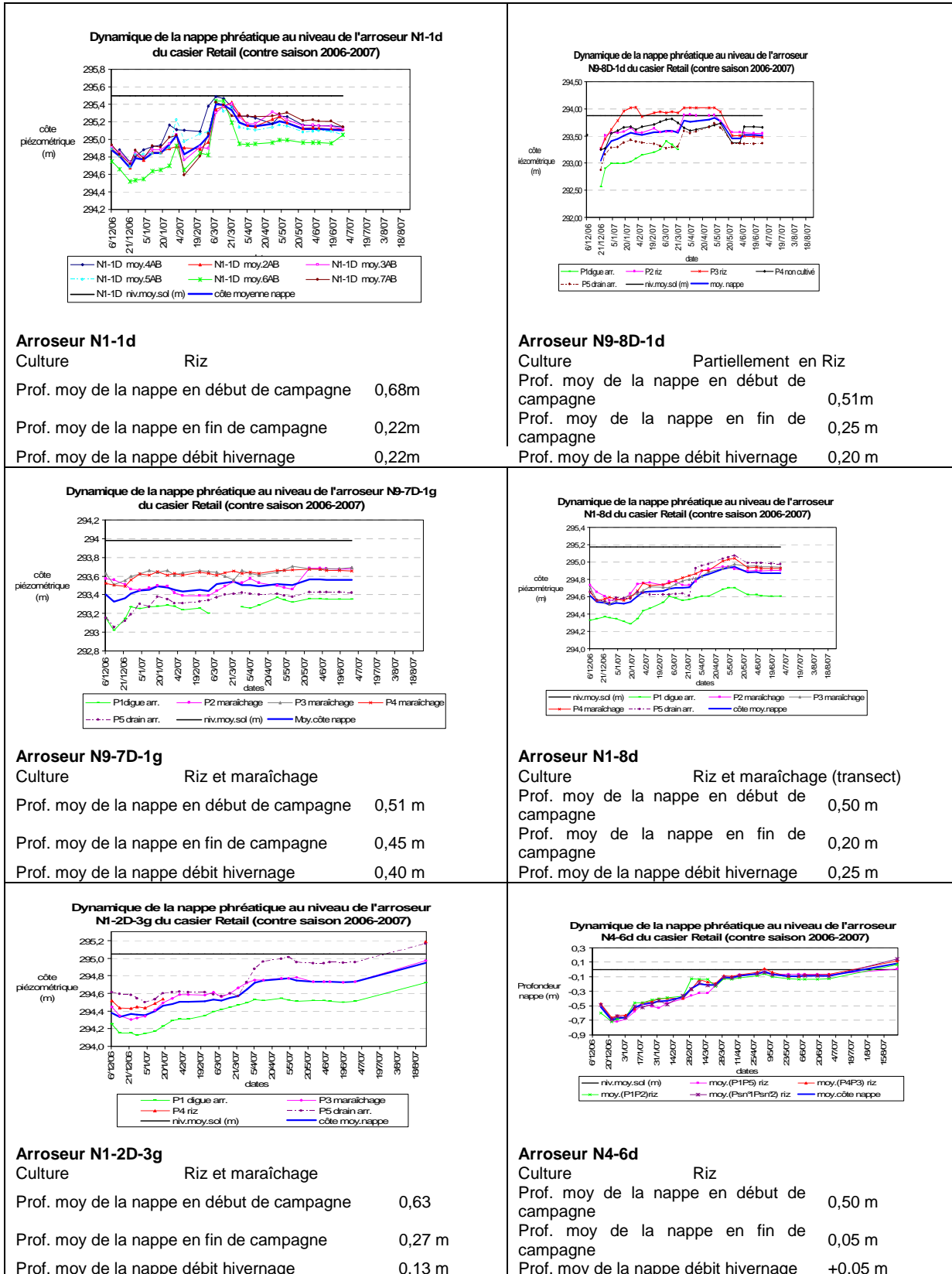


Figure 5- 24 : Dynamique de la nappe phréatique au niveau des différents arroseurs suivis au sein du casier Retail (contre-saison 2006-2007).

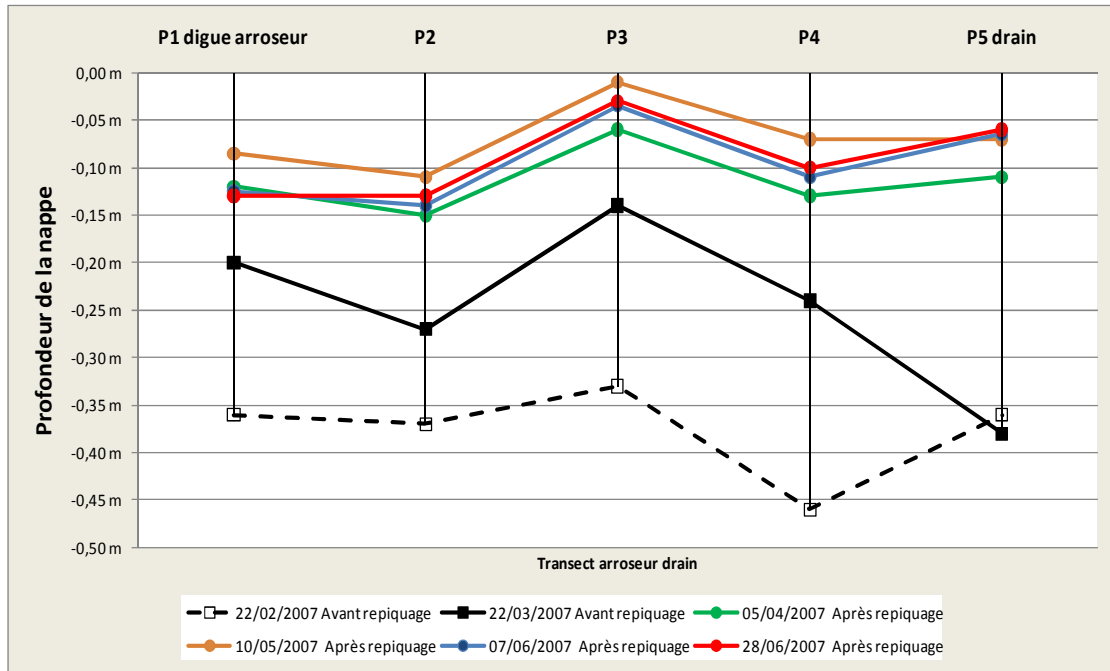


Figure 5- 25 : Evolution de la profondeur de la nappe en contre-saison 2006-2007 sous riziculture : Arroseur N4-6d destiné à la double culture (sol texture argilo limoneuse).

5.3.1.3 INTERACTION ENTRE NAPPE LOCALE ET NAPPE REGIONALE

Au sein du casier Retail, la profondeur de la nappe, en absence et sous cultures de contre-saison (double culture), a été comparée à celle de la nappe régionale au cours de la campagne culturale 2006-2007 (*Figure 5-26*).

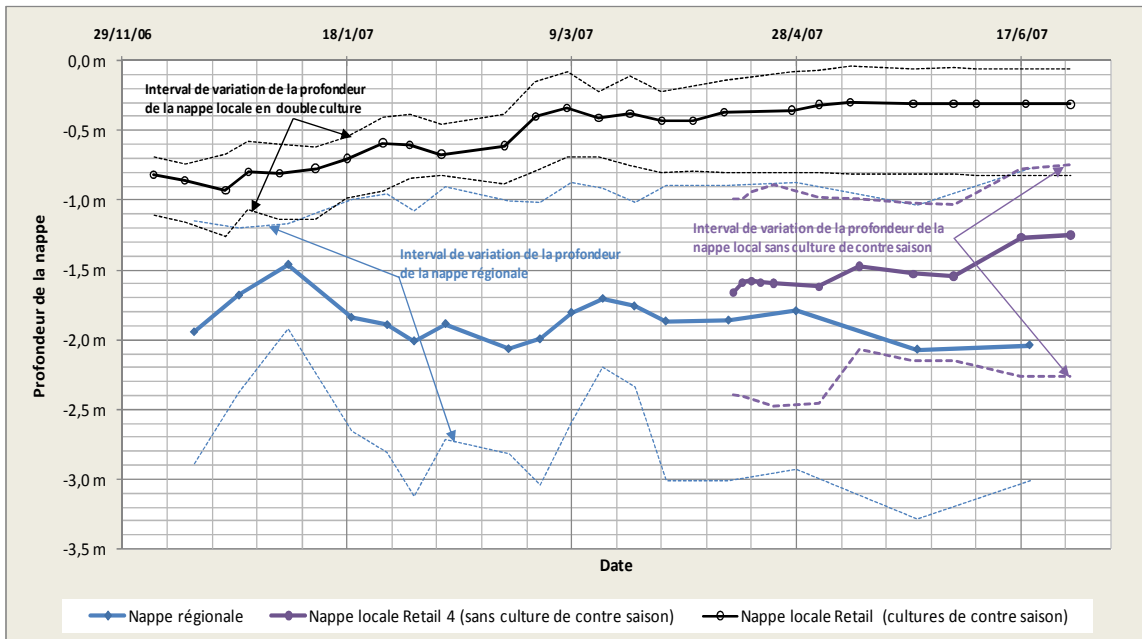


Figure 5- 26 : Evolution comparée de la profondeur de la nappe régionale et de la nappe locale au sein de la zone alimentée en eau par le distributeur Retail

Il ressort de cette analyse comparative que la plage de variation du battement de la nappe locale (moyenne de 1,5 mètre du sol) sans culture de contre-saison est incluse dans celle de la nappe régionale. L'intervalle de variation de cette dernière est le plus grand avec une moyenne de 1,75 mètre. Il y a donc tout lieu de faire l'hypothèse que les niveaux piézométriques mesurés dans les parcelles sans contre-saison sont assimilables à ceux de la nappe régionale de l'alluvial-continental terminal.

Sous cultures de contre-saison, la profondeur de la nappe diminue progressivement du début et à la fin de la campagne culturale. Le fait que la plage de variation du battement de cette nappe locale sub-affleurante chevauche au début et vers la fin de la campagne celle de la nappe régionale, tend à confirmer la continuité hydraulique entre les deux nappes (*Barral & al, 1996 [9]*).

Cette continuité hydraulique nous permet :

- d'estimer que l'évaluation faite du volume de la nappe est quelque peu sous estimée à l'aplomb des périmètres dans la mesure où le niveau de la nappe a été estimé à partir de points de mesure situés hors des parcelles irriguées (puits situés au niveau des villages).
- de valider l'hypothèse que les performances de l'irrigation à la parcelle et en particulier l'importance des pertes par percolation sont explicatives de l'augmentation du niveau de la nappe, cette dernière étant linéairement corrélée avec les surfaces cultivées en contre-saison et saison des pluies, comme mis en évidence au paragraphe § 5.3.1.1.4.
- à faire l'hypothèse qu'une partie significative des eaux de surface transitant dans les drains contribue à la recharge de la nappe, volume à priori proportionnel à la surface irriguée en saison sèche et en hivernage.
- de valider l'hypothèse que la remontée générale de la nappe régionale et l'engorgement du système de drainage, sont effectivement à l'origine des difficultés rencontrées à la parcelle (engorgement des sols, risque d'alcalinisation), par le fait qu'en diminuant le gradient hydraulique entre niveau de la nappe en zone irriguée et nappe régionale, ils diminuent leur drainabilité naturelle.

5.3.2 MODELISATION DE L'IMPACT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON SUR LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE REGIONALE

5.3.2.1 CONCEPTION DU MODELE DE SIMULATION

5.3.2.1.1 Calcul du bilan d'eau simplifié

Le modèle de simulation est composé d'un bilan d'eau simplifié de la nappe permettant de simuler l'évolution du volume de la nappe alluvial-continentale en cours pour chaque campagne en fonction des apports (percolation au niveau des surfaces cultivées, apport des défluent et drains) et des pertes (percolation). Le bilan d'eau simplifié de la nappe est établi à partir de l'équation suivante:

$$\Delta V_{eau} = Surf_c \cdot Linf + App(Defluents, Drains) - Pert(substratum)$$

Avec :

ΔV_{eau} : Différence de volume d'eau stocké dans la nappe entre le début et la fin d'une campagne en m³;

$Surf_c$: Surface mise en culture au cours de la campagne en ha

$Linf$: Volume d'eau percolé vers le substratum en m³ par campagne

$App(Defluents, Drains)$: Apports des défluent et ou des drains en m³ par campagne.

$Pert(substratum)$: Infiltration d'eau dans le substratum en m³ par campagne.

Faute de disposer de tous les termes d'un bilan d'eau exhaustif, ce modèle est simplifié dans la mesure où le terme $App(Defluents, Drains)$, qui sert au calage du modèle, intègre à la fois les apports à la nappe dus au *fala* et défluent, les apports dus au réseau de drainage et à la pluviométrie.

5.3.2.1.2 Calcul de la variation de volume de la nappe au cours d'une campagne

La variation de volume de la nappe est calculée en fonction de la variation du stock d'eau dans la nappe.

Lorsque celui-ci est positif (accroissement du volume de la nappe), elle est calculée par l'équation :

$$\Delta V_{nappe} = \frac{\Delta V_{eau}}{\frac{P_t}{2}}$$

Seulement 50% de la porosité totale a été prise en compte pour tenir compte du fait de l'effet d'humectation du sol par la nappe de surface antérieure à la remontée de la nappe.

Dans le cas contraire, phase de récession, elle est calculée par l'équation :

$$\Delta V_{nappe} = \frac{\Delta V_{eau}}{P_{eff}}$$

Avec :

ΔV_{nappe} : Variation du volume de la nappe m³

P_t : Estimation de la porosité totale de l'aquifère continental/alluvial

P_{eff} : Estimation de la porosité efficace de l'aquifère continental/alluvial

Faute de disposer de mesures spécifiques, les valeurs de la porosité totale et efficace ont été choisies dans la gamme de celles généralement retenues pour ce type de formation géologique dans la littérature (Castany 1998 [10]), 20 à 40% pour la porosité totale, moins de 5% pour la porosité efficace.

5.3.2.1.3 Estimation des pertes par infiltration dans le substratum.

L'infiltration d'eau dans le substratum en m³ par campagne est estimée par la valeur du flux d'infiltration dans le substratum exprimé en m³ par m² en considérant que compte tenu de son hétérogénéité il serait illusoire d'estimer le flux en considérant une perméabilité moyenne et appliquant la loi de Darcy.

Le volume d'eau infiltré dans le substratum est estimé par l'équation suivante :

$$L_{inf} = Surf_{inf} * Flux_{infiltration}$$

Avec :

Flux infiltration : Flux d'eau infiltrée dans le substratum en m³/s par m² de surface de l'interface entre nappe continentale et toit du substratum,

Surf_{inf} : surface de l'interface entre la nappe continentale et le toit du substratum en m² calculée en fonction du volume de la nappe à partir des données descriptives de la nappe en Novembre 1995, 2001 et 2006, par les équations :

Dans le cas de la rive gauche du *fala* (zone de Molodo)

$$Surf_{inf} = -6,0805. (Vol_{nappe})^2 + 132113. Vol_{nappe}$$

Dans le cas de la rive droite du *fala* (zones de Niono et N'Debougou)

$$Surf_{inf} = -1,0041. (Vol_{nappe})^2 + 91214. Vol_{nappe}$$

Avec

Vol_{nappe} : Volume de la nappe continentale alluviale exprimée en millions de m³.

5.3.2.2 METHODE ET HYPOTHESES DE CALAGE DU MODELE.

Le calage du modèle a été réalisé :

- en appliquant le modèle simplifié de bilan d'eau en rive droite et rive gauche :
 - en période de récession entre Novembre 2006 et Mai 2007 d'une part en considérant les surfaces exploitées en contre-saison au cours de cette période respectivement 1555 ha et 8713 ha.
 - entre Novembre 2001 et Novembre 2006 en considérant la superficie moyenne mise en valeur en contre-saison et en hivernage au cours de cette période respectivement 10 165 ha en rive gauche et 32 689 ha en rive droite.
- en prenant comme ordre de grandeur de l'apport à la nappe par hectare cultivé 2000 m³/ha en contre-saison et 6000 m³/ha en hivernage.

- en prenant comme ordre de grandeur de la porosité totale et efficace respectivement 30% et 0,025%.

5.3.2.3 RESULTATS DU CALAGE DU MODELE.

Les résultats du calage du modèle conduisent à estimer :

- à $2,1 \cdot 10^{-9}$ m/s le flux d'infiltration dans le substratum, valeur cohérente avec le fait qu'il soit considéré comme quasi imperméable (*PNUD-DNHE, 1979 [7]*).
- qu'entre Novembre 2001 et Novembre 2006 l'augmentation moyenne du volume d'eau stocké annuellement dans la nappe est de 708 millions de m³, dont 66% est directement imputable aux surfaces cultivées.

5.3.2.4 APPLICATION DU MODELE A L'EVALUATION DE L'IMPACT DU DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE SAISON SUR LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE REGIONALE.

5.3.2.4.1 Données prises en compte pour réaliser la simulation

La simulation du bilan d'eau a été réalisée pour chaque campagne de Novembre 2001 à Mai 2007 en utilisant les paramètres précédemment calés et les données de l'évolution des surfaces cultivées en contre-saison et en saison des pluies sur les rives gauches (Molodo) et droite (Niono, N'Debougou) du Fala de Molodo (*Tableau 5-7*).

Tableau 5- 7 : Surfaces cultivées en rive droite et gauche du Fala de Molodo utilisées pour réaliser la simulation.

| Campagne | | Superficies cultivées ha | |
|-----------|---------------|----------------------------|---|
| | | Rive gauche Zone Molodo | Rive droite Zones Niono et N'Debougou |
| 2001-2002 | Hivernage | 8 571 | 22 458 |
| | Contre-Saison | 327 | 5 888 |
| 2002-2003 | Hivernage | 8 963 | 21 696 |
| | Contre-Saison | 1489 | 8 801 |
| 2003-2004 | Hivernage | 9 012 | 24 533 |
| | Contre-Saison | 941 | 7 475 |
| 2004-2005 | Hivernage | 9 175 | 26 130 |
| | Contre-Saison | 1378 | 8 560 |
| 2005-2006 | Hivernage | 9 264 | 26 019 |
| | Contre-Saison | 1707 | 8 196 |
| 2006-2007 | Hivernage | 9 264 | 26 149 |
| | Contre-Saison | 1 555 | 8 713 |

5.3.2.4.2 Qualité de la simulation.

La qualité des résultats de la simulation a été estimée en ramenant l'erreur sur la prédiction du volume de la nappe en Novembre 2006 et Mai 2007, à l'augmentation du volume estimé à partir de l'analyse des données piézométriques (*Tableau 5-8*).

Tableau 5- 8 : Comparaison entre volumes de la nappe simulés et estimés.

| Date | | Novembre 2001 | Novembre 2006 | Mai 2007 |
|---|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Volume nappe estimé | Molodo | 9 150 10 ⁶ m ³ | 10 513 10 ⁶ m ³ | 10 292 10 ⁶ m ³ |
| | Niono N'Débougou | 25 428 10 ⁶ m ³ | 31 812 10 ⁶ m ³ | 28 259 10 ⁶ m ³ |
| | Total | 34 578 10 ⁶ m ³ | 42 325 10 ⁶ m ³ | 38 552 10 ⁶ m ³ |
| Volume nappe simulé | Molodo | 9 150 10 ⁶ m ³ | 10 543 10 ⁶ m ³ | 10 322 10 ⁶ m ³ |
| | Niono N'Débougou | 25 428 10 ⁶ m ³ | 32 070 10 ⁶ m ³ | 28 536 10 ⁶ m ³ |
| | Total | 34 578 10 ⁶ m ³ | 42 612 10 ⁶ m ³ | 38 858 10 ⁶ m ³ |
| Variation de volumes estimés | Molodo | | 1 363 10 ⁶ m ³ | 1 142 10 ⁶ m ³ |
| | Niono N'Débougou | | 6 384 10 ⁶ m ³ | 2 831 10 ⁶ m ³ |
| | Total | | 7 747 10 ⁶ m ³ | 3 974 10 ⁶ m ³ |
| Différence entre volume estimé et simulé | Molodo | | 30 10 ⁶ m ³ | 29 10 ⁶ m ³ |
| | Niono N'Débougou | | 258 10 ⁶ m ³ | 277 10 ⁶ m ³ |
| | Total | | 287 10 ⁶ m ³ | 306 10 ⁶ m ³ |
| Différence entre volume estimé et simulé ramenée à la variation des volumes estimés | Molodo | | 2,2% | 2,6% |
| | Niono N'Débougou | | 4,0% | 9,8% |
| | Total | | 3,7% | 7,7% |

Le fait que les différences entre volumes estimés et simulés ramenés à la variation des volumes estimés au cours des 2 périodes considérées soient inférieurs à 10% tend à montrer que les résultats de la simulation sont acceptables (*Tableau 5-8*).

5.3.2.4.3 Résultats de la simulation interannuelle du volume de la nappe.

La *Figure 5-27* illustre l'évolution simulée du volume de la nappe régionale de Novembre 2001 à Mai 2007 et ses fluctuations en fonction de la saison de culture.

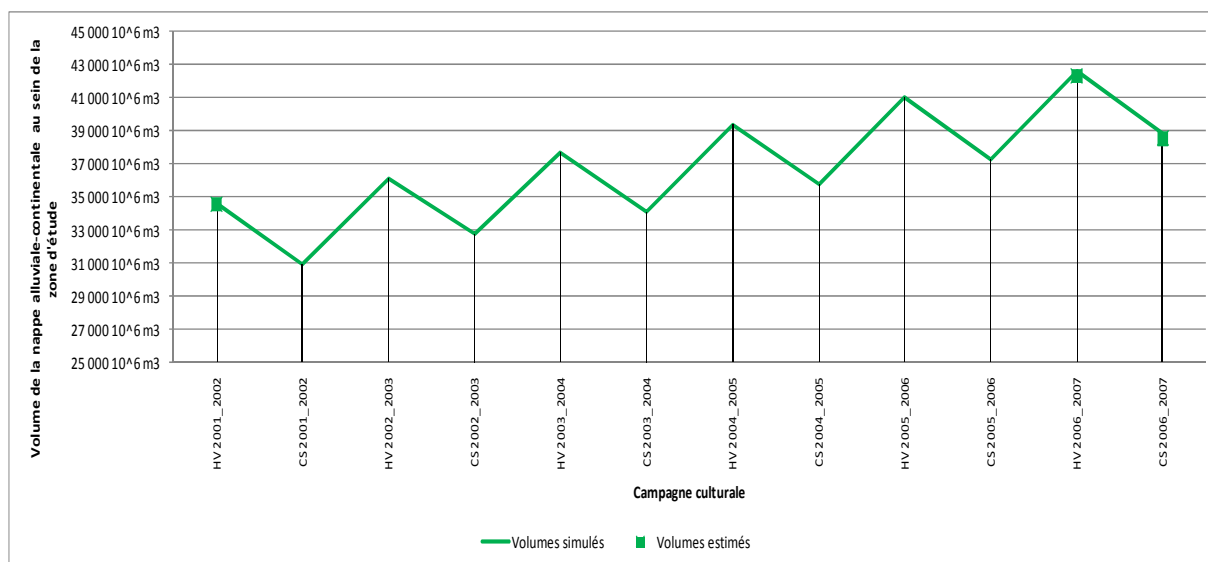


Figure 5- 27 : Volumes simulés de la nappe régionale continentale-alluviale au sein de la zone d'étude de Novembre 2001 à Mai 2007.

Elle rend compte des fluctuations de la nappe et de son augmentation progressive tant en hivernage qu'en contre saison.

5.3.2.4.4 Simulation de l'impact de la contre-saison sur la dynamique de la nappe

Sur la base des paramètres de calage précédent, la *Figure 5-28* illustre les résultats de la simulation de l'évolution du volume de la nappe régionale au sein de la zone d'étude sans culture de contre saison. On note une persistance de l'augmentation du volume de la nappe : sa valeur simulée en Mai 2007 sous cette hypothèse augmente de 1 644 millions de m³ au lieu de 4 280 millions de m³ précédemment estimés avec une mise en valeur en saison sèche.

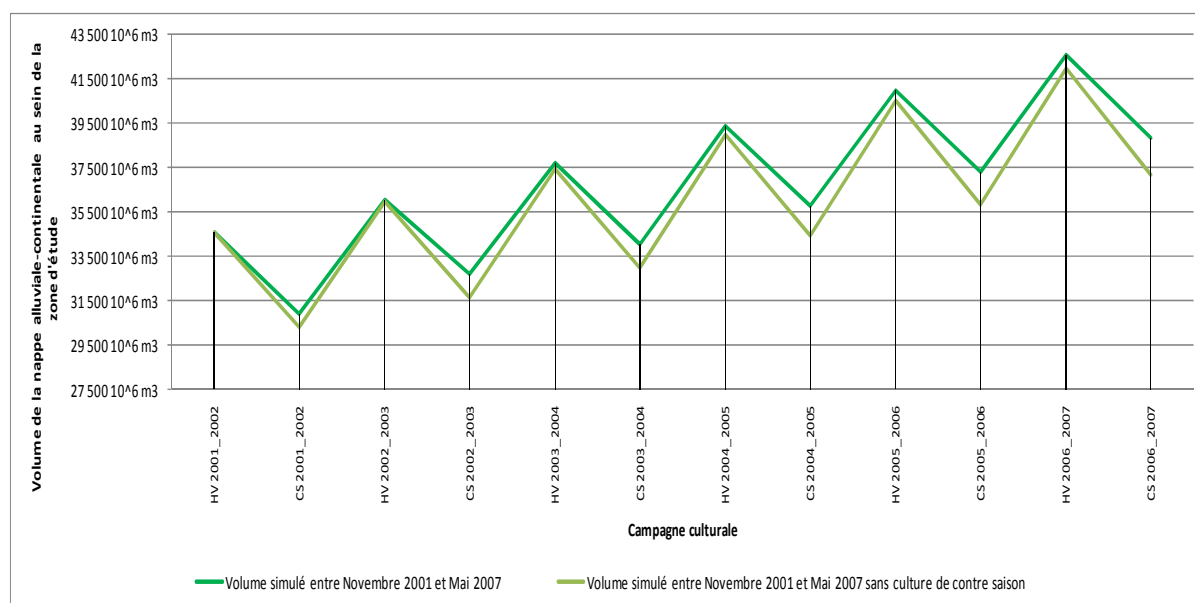


Figure 5- 28 : Comparaison des volumes simulés de la nappe régionale au sein de la zone d'étude (Kala inférieur) avec et sans cultures de contre saison.

Les résultats de cette simulation tendent à montrer que seulement 25% de l'augmentation du niveau de la nappe sont attribuables au développement des cultures de contre-saison au cours de la période 2001-2006.

Malgré les limites de la modélisation proposée, le poids des cultures d'hivernage sur la remontée de la nappe est tout à fait concordant avec l'augmentation du volume de la nappe enregistrée au cours de la période 1995-2001 au cours de laquelle il avait augmenté de 8 198 millions de m³ sous pratiquement le seul effet des cultures d'hivernage 29 276 ha pour une intensité culturale de l'ordre de seulement 112% (*Tableau 5-6*).

5.4 CONCLUSIONS SUR L'IMPACT DU DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON SUR LA DYNAMIQUE DE LA NAPPE PHREATIQUE

Ce chapitre a permis de remettre l'interaction entre dynamique de la nappe et augmentation des surfaces cultivées en contre-saison dans le contexte d'augmentation des superficies aménagées, de développement des cultures de contre-saison et des pratiques agricoles et d'irrigation y afférant qui ont caractérisé la mise en valeur des périmètres du Kala inférieur au cours de la dernière décennie.

Les sources d'alimentation de la nappe au niveau d'échelle du Kala inférieur sont la combinaison des infiltrations d'eau venant du Fala, des zones irriguées et des principaux drains. Ce constat repose le problème de l'efficacité du système de drainage de surface à l'Office du Niger d'une façon générale. L'augmentation constatée du niveau de la nappe continentale-alluviale a été de paire avec une augmentation progressive du volume de la nappe due à des apports supérieurs à la capacité d'infiltration du substratum.

Face à cette augmentation, la géométrie de la nappe a effectivement évolué : outre une remontée progressive du sommet du dôme qu'elle forme à l'aplomb des zones aménagées, la base de ce dôme a eu tendance à s'élargir en particulier à l'Est dans le sens de la pente du toit du substratum. Du fait de la continuité hydraulique entre nappe de surface et régionale validée par la comparaison de l'évolution de la nappe de surface et régionale, cette évolution de la nappe a entraîné une diminution du gradient hydraulique de l'écoulement de la nappe régionale et de la nappe de surface qui combinés, aggravent les risques d'engorgement et d'alcalinisation des sols.

Les conclusions de cette étude, basée sur une modélisation simplifiée du bilan d'eau de la nappe, relativisent l'importance de l'impact de la pratique des cultures de contre-saison et leurs modes de gestion de l'eau sur sa dynamique. Sans culture de contre-saison, du fait de l'importance des cultures d'hivernage au cours de la période considérée, le niveau de la nappe aurait continué à augmenter : seuls 25% de cette augmentation sont attribuables au développement des cultures de contre-saison.

Ce résultat est logique si on se réfère à la remontée de la nappe antérieure au développement des cultures de contre-saison. L'importance relative de son impact est néanmoins sujet à caution compte tenu de la qualité et de la disponibilité des données

utilisées aux différents niveaux d'échelles qui ont impliqués le recours à des extrapolations et simplifications dans l'analyse, la quantification et la modélisation des processus biophysiques. On notera en particulier :

- la non adéquation de la distribution spatiale des points de mesure du niveau de la nappe régionale à un suivi de son évolution compte tenu de son développement vers l'Est,
- des données très partielles de caractérisation des propriétés hydrogéologiques des différents aquifères,
- le manque de série de données de suivi des débits entrants et sortants de la zone exploitée relatives à au moins 2 cycles complets de culture (saison d'hivernage et de contre-saison), conditions nécessaire à une validation des hypothèses avancées.

Faute de disposer de ces informations, une modélisation simplifiée a dû être utilisée sans qu'il ait été véritablement possible d'en valider les hypothèses et résultats. Si elle permet d'identifier des hypothèses, elle ne permet pas de quantifier le poids de chacun des facteurs influençant directement ou indirectement l'évolution de la nappe comme pourrait le faire une modélisation couplée des différents flux d'eau de surface et du fonctionnement de la nappe.

Mieux apprécier l'impact des pratiques agricoles et d'irrigation sur l'évolution de la nappe et améliorer la capacité de prévenir les risques qui y sont liés, nécessiterait la mise en place d'un renforcement des dispositifs de suivi et d'une mise en commun et en cohérence systématique des informations recueillies à différents niveaux d'échelles.

5.5 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CHAPITRE 5

Barral, J-P., Marlet, S., N'diaye, M.K., Valenza, A., Dicko MK., Tangara, B., Grillot, J-C., (1996). Fonctionnement des nappes en relation avec la dégradation des sols à l'Office du Niger, rapport technique travaux et études N°2 PSI-Mali., 38 pages et annexes. [9]

Bertrand, R., B. Keïta and M. K. N'diaye (1993) "La dégradation des sols des périmètres irrigués des grandes vallées sud-sahariennes (cas de l'Office du Niger au Mali)." Cahiers Agricultures 2: 318-329. [4]

BREES (Bureau de Recherche et Exploitation des Eaux Souterraines et de Surface), (1996). Rapport de prospections géophysique dans le cadre du projet d'appui au système irrigué (PSI) à l'Office du Niger (Niono) station du Sahel. 10 pages, annexes. [6]

G. Castany Principes et méthodes de l'hydrogéologie (1998) 238 p"[10]

Kéïta N., K.Kaloga, J.F.Bélières. 1999. D'une gestion étatique de l'eau à une gestion paritaire Etat/Usagers : le cas de l'Office du Niger au Mali. HYDROTOP 99, Marseille du 15 au 17 juin 1999.[1]

Marlet S, N'Diaye MK La fertilité des sols. Des risques d'alcalinisation liés à l'irrigation et aux pratiques culturales in L'Office du Niger, grenier à riz du Mali. Montpellier : CIRAD, p. 163-168. [2]

Ouvry F, Marlet S. 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). In Synthèse des résultats PSI. Niono, Mali : IER, 1999.[3]

Programme des Nations Unis pour le Développement : PNUD (1990). Synthèse hydrologique du Mali. Rapport, 300 pages. Direction Nationale de l'Hydraulique et de l'Energie (DNHE), Bamako, Mali. [5]

Programme des Nations Unis pour le Développement : PNUD (1979). Etude géophysique par méthode électro-sismique du ranch de Niono. Rapport géophysique, 10 pages, 5 cartes. [7]

Valenza, A. (1996). Rôle des eaux souterraines et d'irrigation dans les processus de salinisation / alcalinisation des sols en zone sahélienne : cas du Delta Intérieur du Niger (MALI). Diplôme d'Etudes Approfondies, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 75 pages et annexes. [8]

CHAPITRE 6 : CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

6.1 ACQUIS DE CE TRAVAIL

6.1.1 UNE DYNAMIQUE SPATIALE DE DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON AU SEIN DES AMENAGEMENTS MIEUX CARACTERISEE.

Face à l'important développement des cultures de contre-saison motivée par la recherche de solutions d'amélioration de l'autosuffisance alimentaire et des revenus, l'intensité culturale est, de nos jours, supérieure à 1,25 sur l'ensemble des zones irriguées du Kala inférieur entre 2001 et 2006. Les 2/3 des superficies emblavées sont en riz au sein de ces périmètres du Kala inférieur. L'accroissement des surfaces cultivées en contre-saison s'est essentiellement traduit par un emblavement progressif des parcelles de simple culture de riz en contre-saison avec la libéralisation de la vocation des arroseurs. La vocation des arroseurs prévue par le schéma de mise en valeur lors de la conception des aménagements a été de ce fait totalement modifiée. Cette pratique a permis de faire disparaître la contrainte au développement du maraîchage que constituait la forte dégradation des sols par alcalinisation sur les parcelles dédiées. Néanmoins, l'analyse de l'historique de la mise en valeur des parcelles a montré que mis à part les arroseurs de double culture ou la rotation riz-riz est pratiquement de règle, sur les arroseurs de simple culture exploités en contre-saison, il n'existe pas encore une autorisation de pratiques véritables de rotations entre riz d'hivernage et cultures de contre-saison maraîchère (échalote ou tomate) telle que se pratique à l'Office du Niger, bien que ces pratiques de diversification soit actuellement un moyen d'améliorer les sols de rizière à moindre coût, une source complémentaire de revenu permettant de faire face aux besoins de l'exploitation (Y. DOUMBIA *et al.*, 1999).

6.1.2 UNE FORTE EVOLUTION DES PERFORMANCES DE LA GESTION DE L'EAU EN CONTRE-SAISON LIEE A L'AUGMENTATION DES SURFACES EXPLOITEES.

6.1.2.1 Une forte amélioration de l'efficacité de transport dans les grands adducteurs et les distributeurs en contre-saison liée à l'augmentation des surfaces exploitées

Malgré un fort accroissement des surfaces cultivées en contre-saison pour des prélèvements d'eau importants, l'analyse des données a montré qu'à l'échelle des grands adducteurs et des distributeurs, l'efficacité de transport s'est améliorée du fait de

l'accroissement des volumes d'eau transportés. Au niveau du canal du Sahel, un facteur 4,5 d'accroissement des surfaces desservies a induit une diminution de l'ordre de 60% des apports par hectare ($110\,000\text{ m}^3/\text{ha}$ pour une surface cultivée de 4500 ha, $43\,000\text{ m}^3/\text{ha}$ pour 21000 ha). Ce constat confirme les analyses faites antérieurement faisant l'hypothèse de pertes par percolation et évaporation quasi fixes au niveau des grands adducteurs pour lesquels, du fait de leur conception, l'augmentation de débit influence peu les valeurs de la charge hydraulique, de leur périmètre mouillé et de la largeur de la surface de l'eau. Le même constat a été fait au niveau du distributeur Retail pour lequel l'efficacité de transport est passée de 65% à 85% pour respectivement 450 ha et 950 ha desservis.

6.1.2.2 De faibles performances de l'irrigation en aval de la prise d'arroiseur favorisant la recharge de la nappe et largement tributaires des pratiques d'irrigation.

- **Cas de la riziculture**

Les performances de l'irrigation en aval de la prise arroiseur ont été évaluées grâce à une modélisation des bilans d'eau développée dans le cadre de cette étude. Elle prend en compte les apports, pertes dans le drain et pratiques culturales (calendrier) du riz de contre-saison au sein de la surface desservie par un même arroiseur. Dans le cas d'un arroiseur majoritairement cultivé en riz, le traitement de données de suivi par ce modèle a permis d'évaluer à 65% l'efficacité de l'irrigation à ce niveau d'échelle, valeur supérieure à celle évaluée en hivernage. La plus grande partie des pertes est le fait d'un épandage systématique d'eau sur les parcelles non encore repiquées, les volumes d'eau mobilisés pouvant dépasser 4,5 à 10 fois les besoins de la pré-irrigation. Ces résultats comparés à ceux de l'hivernage tendent à montrer que l'efficacité de transport (96%) est du même ordre de grandeur et que les volumes d'eau drainés (en moyenne 12% des apports) sont faibles et significativement inférieurs en contre-saison. L'analyse montre que ces importants épandages, sont le principal facteur explicatif de la faible efficacité (65%) de la riziculture en contre-saison et de sa contribution à la recharge de la nappe ($2000\text{ m}^3/\text{ha}$) ; les réduire de 80% permettrait de diminuer de 25 % la contribution de la riziculture de contre-saison au soutien de la nappe.

- **Cas du maraîchage**

L'analyse des apports d'eau en tête de partiteur tend à montrer que les volumes délivrés par hectare de riz ne sont pas significativement différents de ceux apportés par hectare de maraîchage, alors que les besoins en eau de ces derniers sont inférieurs de moitié. Les techniques d'irrigation utilisées à la parcelle (irrigation au sseau à partir de rigoles maintenues en eau) sont à l'origine de ces importantes pertes d'eau, tendent à évaluer à moins de 35% l'efficacité de l'irrigation de parcelles maraîchères en aval de la prise d'arroseur. Ces pratiques conduisent à estimer que la contribution par hectare des cultures maraîchères au soutien de la nappe est au moins du même ordre de grandeur que dans le cas de la riziculture.

6.1.3 DES PRELEVEMENTS EN CONTRE-SAISON DEJA PROCHES DU MAXIMUM MOBILISABLE EN PERIODE D'ETIAGE.

L'analyse comparée des débits du fleuve Niger en amont du barrage de Markala et des débits en amont du point A, a montré que si les prélèvements sur le Niger au cours de la campagne de contre-saison n'ont représenté en moyenne de l'ordre de 50% des disponibilités en eau entre 2000 et 2006, on a néanmoins montré que ce taux augmente de façon très importante en période d'étiage (de Mars à Mai) et a atteint une valeur maximum de l'ordre de 87% en 2003. Il y a donc tout lieu de penser que sans une amélioration de l'efficacité de l'irrigation, la disponibilité des ressources en eau risque de bloquer rapidement toute possibilité d'une plus importante expansion des cultures de contre-saison.

6.1.4 UN MONTEE PROGRESSIVE DE LA NAPPE REGIONALE CONTINENTAL TERMINAL-QUATERNAIRE ABOUTISSANT A UNE DIMINUTION PROGRESSIVE DE LA DRAINABILITE DES ZONES IRRIGUEES.

6.1.4.1 Une remontée de la nappe Continental Terminal-Quaternaire allant de paire avec l'augmentation de son volume et une baisse de sa drainabilité latérale naturelle.

Par l'analyse des données piézométriques relevées sur 221 puits productifs en Novembre 1995, 2001 et 2006 et en Mai 2007 au sein de la zone, les travaux ont permis d'améliorer les connaissances sur la dynamique et la géométrie de la nappe du continental terminal-quaternaire à l'intérieur et à l'extérieur des systèmes irrigués de l'Office du Niger à l'échelle

du Kala inférieur. Basées sur l'établissement et l'exploitation des cartes piézométriques, les études menées ont abouti à montrer au cours des périodes 1995-2001 et 2001-2006 une remontée progressive du toit de la nappe proportionnelle à sa profondeur initiale (respectivement 6% et 16%) parallèlement à une augmentation de son volume (respectivement 31% et 22%). Ces augmentations du volume de la nappe illustrent des apports supérieurs à sa capacité de drainage.

Bien qu'on ait mis en évidence que l'importance des superficies irriguées est un facteur explicatif de l'augmentation du volume de la nappe, l'analyse des transects piézométriques nous a permis de montrer que les sources d'alimentation de la nappe au niveau d'échelle du Kala inférieur sont aussi la combinaison des infiltrations d'eau venant du Fala, des zones et des principaux drains, ce qui repose le problème de l'efficacité du système de drainage de surface à l'Office du Niger d'une façon générale.

Cette évolution de la géométrie de la nappe s'est traduite par une remontée progressive du sommet du dôme qu'elle forme à l'aplomb des zones aménagées, et par un élargissement de la base de ce dôme en particulier à l'Est dans le sens de la pente du toit du substratum. Ces transformations, en diminuant le gradient hydraulique latéral contribuent à amoindrir la capacité de drainage naturel de la nappe déjà insuffisante pour permettre une stabilisation de la cote du toit de la nappe.

6.1.4.2 Une remontée de la nappe Continental Terminal-Quaternaire induisant un engorgement quasi permanent des zones de double culture.

Du fait de la continuité hydraulique entre nappe de surface et nappe régionale, la remontée de la nappe régionale a entraîné une diminution du gradient hydraulique de l'écoulement de la nappe de surface qui se traduit sur les zones de cultures de contre-saison par un accroissement du niveau de la nappe phréatique d'environ 1,10 m, aggravant les risques d'engorgement et d'alcalinisation des sols.

6.1.5 UNE CONTRIBUTION DES CULTURES DE CONTRE-SAISON ESTIMÉE À 25% DE L'AUGMENTATION DU VOLUME DE LA NAPPE RÉGIONALE CONTINENTAL TERMINAL-QUATÉRNAIRE ABOUTISSANT À REMPLACER DANS LE CONTEXTE D'EXPLOITATION DES AMÉNAGEMENTS EN HIVERNAGE.

Au regard de toutes ces informations, un modèle de fonctionnement de la nappe, basé sur la méthode des bilans d'eau, a été développé afin d'évaluer l'impact des cultures de

contre-saison sur l'évolution du volume de la nappe. Les résultats de cette modélisation tendent à montrer que le développement des cultures de contre-saison n'expliqueraient que 25% de l'augmentation du volume de la nappe alors que les 75% restants seraient dus à l'importance des surfaces cultivées en hivernage.

6.1.6 VALORISATION SCIENTIFIQUE DES TRAVAUX DE RECHERCHE

Dans le cadre de la valorisation des ces travaux de recherche, des communications sous forme de poster ainsi que des propositions d'articles ont été faites. Il s'agit de :

- Présentation d'un poster « conséquence du développement des cultures de contre saison sur la gestion de l'eau et la dynamique de la nappe phréatique à l'Office du Niger (Mali) » au congrès mondial de l'eau tenu à Montpellier (France) du 01 au 04 septembre 2008 ;
- Soumission au Cahier d'Agriculture sous le N° [Caa100180] d'un article intitulé ; « Evolution des performances de l'irrigation en riziculture et extension des cultures de contre-saison à l'Office du Niger :
- Elaboration d'un article intitulé : «Impact du développement des cultures de contre-saison sur la dynamique de la nappe phréatique à l'Office du Niger».

6.2 PROPOSITIONS POUR L'AMELIORATION DES PERFORMANCES DE LA GESTION DE L'EAU EN CONTRE-SAISON

Les résultats de cette étude montrent que l'amélioration des performances de la gestion de l'eau est une condition nécessaire pour assurer la poursuite du développement des cultures de contre-saison. Les solutions à trouver devront en priorité viser à :

1. améliorer l'efficacité de l'irrigation à la parcelle dans le but d'économiser la ressource en eau et diminuer la contribution des cultures à la recharge de la nappe,
2. s'assurer de la capacité du réseau à satisfaire les besoins d'irrigation des cultures en place en particulier dans le contexte des extensions et/ou à identifier des ressources en eau d'appoint (i.e pompage dans la nappe)
3. s'assurer que la pratique du maraîchage en rotation avec un riz d'hivernage qui constitue une solution d'évitement au problème d'alcalinisation des sols est une

solution durable dans un contexte de remontée générale de la nappe et d'engorgement des sols et des drains.

6.2.1 AMELIORER LES PRATIQUES D'IRRIGATION A LA PARCELLE EN CONTRE-SAISON

6.2.1.1 Améliorer les pratiques d'irrigation de la riziculture en contre-saison

L'amélioration des pratiques de gestion de l'eau en riziculture de contre-saison a essentiellement pour objet la diminution des pertes massives d'eau en début de campagne culturale avant repiquage. Bien que la double culture diminue les besoins en eau de la pré-irrigation, il y a tout lieu de penser que cette pratique permet de les anticiper et de faciliter la mise en eau des parcelles dans un contexte où la qualité du service de l'eau est variable. Aussi, convaincre les agriculteurs d'abandonner cette pratique, nécessiterait d'aborder le problème par la mise en place d'une communication institutionnalisée entre l'aiguadier et les exploitants, problème récurrent à l'Office du Niger tant en saison sèche qu'en hivernage (Van Keulen & Hamel, 1997).

6.2.1.2 Améliorer les techniques d'irrigation du maraîchage en contre-saison

L'expérimentation de techniques « modernes » d'irrigation (goutte à goutte, système californien) montre qu'il est possible de réduire de plus des deux tiers les volumes d'eau d'irrigation nécessaires à la conduite du maraîchage. L'adoption de ces techniques permettrait de plus que doubler les superficies maraîchères sans augmenter la demande en eau et de quasi faire disparaître leur contribution à la recharge de la nappe. La définition des conditions de diffusion de ces technologies semble le principal problème à résoudre face aux aléas du marché auquel est confronté la commercialisation des cultures maraîchères, aux coûts des équipements face à la capacité d'investissement individuelle des agriculteurs, aux problèmes d'entretien qu'elles induisent.

6.2.2 SATISFAIRE LES BESOINS D'IRRIGATION ENGENDRES PAR UNE POURSUITE DU DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON DANS LE CONTEXTE DES EXTENSIONS DE ZONES IRRIGUEES

En prévision des risques de manque d'eau d'irrigation liés aux forts taux de prélèvement du débit d'étiage du Niger que le développement des cultures de contre-saison va induire, il y a lieu de penser à l'instar de tous les grands périmètres irrigués du monde

(Llamas & Martinez-Santos, 1997), que la demande en eau ne pourra être satisfaite que par l'exploitation de la nappe, faisant de sa remontée un atout. La faisabilité technico-économique du pompage dans la nappe, reste un problème à aborder et on peut s'interroger si dans ce contexte la riziculture ne devrait pas être associée avec le développement de céréales moins consommatrices d'eau telle que le blé ou le maïs.

6.2.3 S'ASSURER DE L'ENTRETIEN DE LA FERTILITE DES SOLS DANS UN CONTEXTE DE DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE CONTRE-SAISON.

La remontée générale de la nappe mise en évidence dans le cadre de cette étude et l'engorgement de plus en plus fréquent des sols risquent d'être accentués par les extensions des zones irriguées. Dans ce nouveau contexte, il y a tout lieu d'évaluer les risques de dégradation des sols sous des rotations de type maraîchage - riz d'hivernage afin d'identifier les pratiques adéquates de gestion de l'eau et des drains.

6.3 LIMITES ET PERSPECTIVES

6.3.1 PROBLEMES D'ACQUISITIONS ET CRITIQUES DES DONNEES DE SUIVI DES PERFORMANCES DE LA GESTION DE L'EAU

Compte tenu de l'approche multi-échelles développée dans le cadre de cette étude, le rassemblement et la critique des données secondaires collectées par les différents services de l'Office du Niger (superficies cultivées en contre-saison, et les apports d'eau d'irrigation) et leur mise en cohérence avec les mesures réalisées ont constitué les principaux problèmes auquel ce travail s'est heurté. Leur analyse multi-échelles s'est souvent heurtée à des séries chronologiques souvent incomplètes et des données contradictoires du fait que ces informations ont été produites par de services différents, pour des objectifs souvent spécifiques et sur des supports ayant évolués au cours du temps.

La réalisation systématique d'une synthèse multi-échelles des performances de la gestion de l'eau après chaque campagne permettrait d'analyser et de critiquer ces informations qui constituent la base de la compréhension de toutes les dynamiques de fonctionnement du système hydraulique tout en assurant leur valorisation sous forme d'indicateurs de performance.

6.3.2 ACQUISITIONS ET REPRESENTATIVITE DES DONNEES DE SUIVI DE LA GESTION DE L'EAU AU NIVEAU ARROSEUR.

Les mesures de terrain utilisées pour la modélisation de la conduite de l'irrigation des cultures de contre-saison se sont limitées à un échantillon de cinq arroseurs en bon état de fonctionnement alors que sur le casier d'étude la plupart des arroseurs se trouvaient en situation de dysfonctionnement suite des dégradations faites pour faciliter l'accès à l'eau en période de pénurie. La prise en compte cette réalité de terrain est certainement indispensable pour mieux appréhender les conditions de gestion de l'eau réalités du terrain. Une telle évaluation, compte tenu de la non-normalisation des conditions d'accès à l'eau nécessiterait une étude spécifique utilisant des capteur-enregistreurs automatiques à acquisition numérique.

6.3.3 ACQUISITIONS ET CRITIQUES DES DONNEES DE SUIVI DE LA NAPPE

Le traitement des données de suivi de la nappe a mis en évidence :

- la non adéquation de la distribution spatiale des points de mesure du niveau de la nappe régionale à un suivi de son évolution compte tenu de son développement vers l'Est,
- des données très partielles de caractérisation des propriétés hydrogéologiques des différents aquifères,
- un nombre limité des périodes de suivi limitant la possibilité de calibrer et valider un modèle de fonctionnement hydrogéologique de la nappe.

Mieux apprécier l'impact des pratiques agricoles et d'irrigation sur l'évolution de la nappe, nécessiterait de rationaliser le choix des puits suivis et d'en réaliser un suivi plus systématique.

6.3.4 NECESSITE DE DEVELOPPER DES INDICATEURS MULTI-EHELLES DES PERFORMANCES DE LA GESTION DE L'EAU AU SENS LARGE.

Ne disposant que d'un jeu de données limité, une modélisation simplifiée a dû être utilisée dans le cadre de cette étude sans qu'il ait été véritablement possible d'en valider les hypothèses et résultats.

Si elle permet d'identifier des hypothèses qui semblent cohérentes mais non validées, la modélisation ne permet pas de quantifier le poids de chacun des facteurs influençant directement ou indirectement l'évolution de la nappe.

L'analyse des données réalisée dans le cadre de cette étude et les limites méthodologiques identifiées constitue une étape préalable à la conception d'une modélisation couplée des différents flux d'eau de surface et du fonctionnement qui seule permettrait (i) de générer des indicateurs multi-échelles des performances de la gestion de l'eau et (ii) d'identifier leur évolution en fonction des extensions et politiques de mise en valeur.