

Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel

Typologie

Fonctionnement hydrologique

Potentialités agricoles

Rapport final d'un projet CORAF-R3S



Editeurs et animateurs scientifiques

Jean Albergel

Jean-Marie Lamachère

Bruno Lidon

Abdel Ilah Mokadem

Win Van Driel

CIEH

Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel

Typologie

Fonctionnement hydrologique

Potentialités agricoles

Rapport final d'un projet CORAF-R3S

E *diteurs
scientifiques*

Jean Albergel
Jean-Marie Lamachère

A *uteurs
principaux*

Jean Albergel
François Gadelle
Jean-Marie Lamachère
Bruno Lidon
Abdel Ilah Mokadem
Anne-Marie Ran
Wim Van Driel

A *vec la
participation de*

Honoré Dacosta
Antal Dobos
Mankeur Fall
Jean-Pierre Montoroi
André Nonguierma
Véronique Perez
Pascal Perez
Luc Seguis
Modou Sene
Yacouba Sere
Mamadou Simpara
Prosper Zombre

P *rojet réalisé avec le soutien
de la commission
des communautés européennes
Direction générale XII*

CIEH

Citation correcte

Albergel J. (Ed.), Lamachère J.M. (Ed.), Lidon B. (Ed.), Mokadem A. (Ed.), Van Driel W. (Ed.), 1993.

Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles. Rapport final d'un projet CORAF-R3S. Ouagadougou, Burkina Faso, CIEH, 335 p.

Mots clés : Afrique de l'Ouest, bas-fonds, hydrologie, aménagement hydro-agricole, agronomie, sociologie, économie.

Key words: *West Africa, bottomlands, hydrology, hydraulic engineering, agronomy, sociology.*

© CIEH Janvier 1993

ISBN 2-87614-114-0

Diffusion

CIEH
01-BP 369,
Ouagadougou
Burkina Faso

ou
CIRAD-CA
BP 5035,
34032 Montpellier Cedex 1
France

Photo de couverture
François Blanchet

Abstract

Developing bottomlands in the Sahel

Typology

Hydrological processes

Agricultural potential

Drought, population growth and the deterioration of certain soils have led the farmers of the Sahel to seek out new land to cultivate. The bottomlands — low-lying seasonal wetlands — are therefore increasingly brought into cultivation; the chemical makeup of the soils is good and there is water available. These lands represent an economically interesting alternative for the sahelian farmers who can thus grow maize or sorghum as a safety-net crop in seasons when the rains fail. In the dry season sheep and goats can be grazed there, or market garden crops can be grown.

Agriculture development of these lands is one possible response to the present crisis in the traditional production systems. Even so, effective use of the bottomlands implies water engineering work to protect the land from flooding and to store and distribute irrigation water. The engineering structures must be technically reliable and manageable by the communities that use them, since bottomlands are fragile ecosystems and are easily degraded.

A practical research-and-action program has been led on five representative bottomland sites in the Sahel. Aiming to gain a better knowledge of how they function under natural conditions and the problems currently being encountered, and to identify appropriate water management structures and techniques. The sites concerned are in the Sine Saloum and Casamance in Senegal, in southern Mali, and in Yatenga and Comoe in Burkina Faso.

This research is being carried out under the aegis of CORAF's R3S network. Several associate bodies from North and South are involved, working together to develop methods and tools for the research. Factors already being monitored and analysed are water balance, high-water levels and hydraulic head data in several catchments of each site. The chemical characteristics of water, sediment transport and erosion, impact of the development work on water resources and the land tenure structure are also studied. Alongside this, agronomic experiments have shown crop productivity potentials.

This research has provided an opportunity to design, develop and test new measuring instruments, diagnostic tools and water management methods. A bottomland typology has been achieved, leading to several improved land-management policies.

With techniques for conserving soils and improving their fertility, coupled with controlled supply of water to the crops, it is now possible to consider moving on from the pilot phase to an integrated development project on larger areas. The determining factors for success or failure in these initiatives will then be the socio-economic processes.



Sommaire

Avant-propos	W. Van Driel	..... 7
Résumé	J. Albergel, J.M. Lamachère	..... 9
Introduction	J. Albergel, J.M. Lamachère	..... 17
Le programme de recherche	J. Albergel, J.M. Lamachère	..... 18

Première partie

Les milieux naturels : ressources et contraintes

L'Afrique de l'Ouest du 10 ^e au 15 ^e parallèle	J. Albergel, J.M. Lamachère	..... 31
Un climat tranché	J. Albergel, J.M. Lamachère	..... 43
Une hydrographie diversifiée sur un vieux socle pénéplané	J. Albergel, J.M. Lamachère	..... 53
Des réserves en eaux souterraines inégalement réparties	J. Albergel, J.M. Lamachère	..... 63
Des régimes hydrologiques capricieux	J. Albergel, J.M. Lamachère	..... 75
Des sols à faible potentiel agronomique	J.M. Lamachère, J.P. Montoroi, P. Zombre	..... 93
Atouts et contraintes des milieux naturels pour la mise en valeur agricole des bas-fonds	J. Albergel, J.M. Lamachère	..... 113

Deuxième partie

L'homme et les bas-fonds en Afrique de l'Ouest

Une population jeune et mobile	A.M. Ran, W. Van Driel	..... 121
Des systèmes de production dominés par les cultures de subsistance	A.M. Ran, W. Van Driel	..... 127
Les aménagements : espoirs et désillusions	A.M. Ran, W. Van Driel	..... 139
Conditions sociales et économiques du développement et de l'intensification des cultures de bas-fonds	A.M. Ran, W. Van Driel	..... 151

Troisième partie

La mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest

La mise en valeur agricole traditionnelle :

fruit d'une longue expérience

dans la gestion des risques

B. Lidon

..... 155

L'aménagement des bas-fonds :

un pas vers l'intensification

B. Lidon

..... 173

L'intensification des cultures de bas-fonds :

un pari difficile à tenir

B. Lidon

..... 223

Planches photographiques

.....231

Quatrième partie

Les bas-fonds en Afrique de l'Ouest

• Typologie

J. Albergel, J.M. Lamachère

..... 233

• Régionalisation

..... 249

L'imagerie satellitaire

dans les bas-fonds :

..... 249

– au Siné-Saloum

V. Perez, L. Seguis

..... 250

– au sud du Mali et dans la Comoé

A. Mokadem,
A. Nonguierma

..... 257

Les paramètres climatiques régionaux

J. Albergel, J.M. Lamachère

..... 267

Les paramètres hydrologiques régionaux

J. Albergel, J.M. Lamachère

..... 270

• Quels aménagements pour quels bas-fonds ? F. Gadelle

..... 285

Conclusion

J. Albergel, J.M. Lamachère

..... 299

Références bibliographiques

..... 303

Annexe 1

Liste des participants au programme

« Mise en valeur agricole
des bas-fonds au Sahel »

..... 313

Annexe 2

Publications relatives aux projets pilotes

..... 317

Table des matières

..... 331

LISTE DES SIGLES UTILISES

A	Argileux
AFVP	Association Française des Volontaires du Progrès (France)
AISH	Association Internationale des Sciences Hydrologiques
AUPELF	Association des Universités Partiellement ou Entièrement de Langue Française
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières (France)
BUNASOLS	BUREAU National des SOLS (Burkina Faso)
BV	Bassin Versant
CCE	Commission des Communautés Européennes (CEE)
CECI	Centre d'Etudes et de Coopération Internationale (Canada)
CEE	Communauté Economique Européenne
CEMAGREF	Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural des Eaux et Forêts (France)
CEC	Capacité d'Echange Cationique
CIEH	Comité Inter-africain d'Etudes Hydrauliques (Ouagadougou)
CILSS	Comité Inter états de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (Ouagadougou)
CIRAD	Centre de coopération Internationale de Recherche Agronomique pour le Développement (France)
CMDT	Compagnie Malienne de Développement des Textiles
CNEARC	Centre National d'Enseignement Agricole pour les Régions Chaudes (France)
CORAF	Conférence des responsables de la Recherche Agronomique aFricains (Dakar)
CRPA	Centre Régional de Promotion Agropastorale (Burkina Faso)
DEVE	Département Etudes pour la Valorisation de l'Eau (CIRAD/IRAT)
DEP	Division Etudes et Planification (Ministère de l'eau, Burkina Faso)
DSP	Département Systèmes Productions (CIRAD)
ECU	European Currency Unit
EIER	Ecole inter-états des Ingénieurs de l'Equipement Rural (Ouagadougou)
ENGREF	Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts (France)
ENSHMG	Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble (France)
ETM	Evapo-Transpiration Maximale
ETP	Evapo-Transpiration Potentielle
ETR	Evapo-Transpiration Réelle
FAC	Fonds d'Aide et de Coopération (France)
FAO	Food and Agriculture Organization (Rome)
FED	Fonds Européen de Développement (Bruxelles)
FEER	Fonds de l'Eau et de l'Equipement Rural (Burkina Faso)
FSAGx	Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux (Belgique)
GR	Groupements Rizicoles (Burkina Faso)
GRET	Groupe de Recherche et d'Echange Technologiques (France)
GR3	Gestion rurale à 3 paramètres (Logiciel CEMAGREF)
IDR	Institut de Développement Rural (Burkina Faso)
IER	Institut d'Economie Rurale (Mali)
IIRI	International Institut of Research on Irrigation
ILACO	International LAnd development COnsultants (Arnhem Pays-Bas)
INERA	INstitut d'Etudes et de Recherches Agricoles (Burkina Faso)
IRAT	Institut de Recherches en Agronomie Tropicale et cultures vivrières (France)
ISN	Institut des Sciences de la Nature (Burkina Faso)
ISRA	Institut Sénégalais de Recherches Agricoles
IWACO	International Water and Amenagment CO. (Pays-Bas)
MDR	Ministère du Développement Rural (Burkina Faso)
MH-DAIH	Ministère de l'hydraulique - Direction des Aménagements et des Infrastructures Hydro-agricoles (Mali)
MO	Matière Organique

MRT	Ministère de la Recherche et Technologique (France)
ONG	Organisation Non Gouvernementale
ORC	Opération Riz Comoé (Burkina Faso)
ORD	Office Régional de Développement (Burkina Faso)
ORSTOM	Institut français de recherche scientifique pour le développement en coopération (France)
pH	logarithme de la concentration en ions H ⁺ (hydrogène)
PIDAC	Projet Intégration et Développement Agricole de la Casamance (Sénégal)
pm	Pour mille
PMR	Programme Micro-Réalisations (Canada - Mali)
PNUD	Programme des Nations Unies pour le Développement
RFU	Réserve Facilement Utilisable
RU	Réserve Utile
R3S	Réseau de Recherche sur la Résistance à la Sécheresse
S	Sable
Sb	Somme des bases échangeables
SA	Sablo-Argileux
SALT	SAvanes à Long Terme (Programme scientifique du PIGB, Programme International Géosphère Biosphère)
SOMIDAC	SOciété MIxte d'Intégration et Développement de la Casamance (USA-Sénégal)
SOMIVAC	SOciété MIse en VAleur de la Casamance (USA-Sénégal)
SNV	Association Néerlandaise d'Assistance au Développement (Pays-Bas)
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SRCVO	Section de Recherche sur les Cultures Vivrières et les Oléagineux (Mali)
STD	Sciences et Techniques pour le Développement (Programme de coopération scientifique CEE/PVD)
S/T	Taux de Saturation des bases
VSN	Volontaire du Service National (France)
UAW	Université Agronomique Wageningen (Pays-Bas)
UCAD	Université Cheik Anta Diop (Sénégal)
UGR	Unités de Groupements Rizicoles (Burkina Faso)
UREF	Université des Réseaux d'Expression Française
USA	United States of America
USAID	United States Agency for International Development (USA)
6S	Se Servir de la Saison Sèche en Savane au Sahel (Burkina Faso)

De plus les abréviations du système ISO (international System Organisation) ont également été utilisées.

AVANT-PROPOS

Cette synthèse sur la mise en valeur des bas-fonds au Sahel est le résultat d'un programme de recherche qui a fédéré des institutions africaines et européennes pendant quatre années. Les organismes de recherche travaillant dans la zone intertropicale ont été conscients de la nécessité d'une meilleure connaissance des interactions entre le milieu naturel et les sociétés rurales pour fonder un développement durable des bas-fonds, zones encore marginales pour la production agricole mais très prometteuses, surtout dans le contexte de sécheresse actuelle. Ils ont mobilisé soixante-seize chercheurs et assistants de disciplines différentes pour intensifier leurs efforts de recherche sur les mécanismes du milieu naturel et les systèmes de production, pour élaborer des outils de diagnostic, pour proposer de nouvelles techniques culturales et des variétés de plantes adaptées, pour tester l'efficacité de différents types d'aménagements et proposer des modes de gestion appropriés. Leur problématique scientifique a reposé sur l'idée que le développement des bas-fonds passait d'abord par une identification des contraintes physiques et sociales et ensuite par la proposition de solutions techniques compatibles avec les moyens économiques, l'organisation, et le niveau de technicité des sociétés concernées.

Les grands thèmes de recherche ont visé à mieux connaître les ressources du milieu physique et humain, à comprendre les raisons de la faible utilisation des potentiels agricoles des bas-fonds, à définir une typologie des bas-fonds du Sahel. Toutes ces connaissances sont absolument nécessaires pour la définition d'une politique d'aménagement qui vise la valorisation des ressources, la sécurité alimentaire et l'augmentation du revenu agricole.

Dans ce programme, le Sahel est pris au sens large. Il serait plus juste de parler de l'ensemble de la zone intertropicale de l'Afrique de l'Ouest au Sud du Sahara et ne connaissant qu'une seule saison des pluies. Cette zone est délimitée au nord par l'isohyète 400 mm et exclut les climats désertique ou pré-désertique où les bas-fonds peuvent être des oasis, au sud par l'isohyète 1600 mm et exclut les climats à deux saisons des pluies dont la limite nord correspond à la latitude 9° Nord, à l'ouest par l'océan atlantique et à l'est par le méridien 10° Est. Pour des raisons de commodités, des cartes thématiques sont présentées sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest, mais seule la zone définie ci-dessus intéresse le programme faisant l'objet de cette synthèse.

La Commission des Communautés Européennes, à travers le programme "Sciences et Techniques au service du Développement", a voulu soutenir les efforts de la communauté scientifique et renforcer la coopération Nord-Sud en acceptant de financer un projet élaboré au sein du Réseau de Recherche sur la Résistance à la Sécheresse (R3S), par des chercheurs déjà impliqués dans la problématique "développement des bas-fonds".

Les participants à cette action de recherche fédérée tiennent, en premier lieu, à remercier les quelques hommes qui ont su voir l'intérêt d'associer leurs travaux dans ce grand projet et qui les ont aidés à se connaître et à dépasser les frontières de leurs instituts. P. DUBREUIL, responsable des relations extérieures du CIRAD, a, le premier, proposé un rapprochement des agronomes du CIRAD et des hydrologues de l'ORSTOM sur le thème des bas-fonds et a chargé J.C. LEGOUPIL, Chef de la division Economie et Valorisation de l'Eau au CIRAD (1987-1989) et J. ALBERGEL, hydrologue du Département Eaux Continentales de l'ORSTOM, de recenser les programmes de recherche en cours avec les partenaires africains des Centres Nationaux de la Recherche Agronomique à partir desquels pouvait être définie une stratégie de recherche pluridisciplinaire. J. CLAUDE, animateur de l'atelier "Bassin Versant" du R3S a concrétisé la fédération autour du thème bas-fond en contactant les divers instituts et en organisant l'atelier "Bassin Versant" du R3S à Ouagadougou (1987) qui a donné forme au projet de proposition de recherche soumis à la CCE.

C'est ainsi que l'Université Agronomique de Wageningen et la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat de Gembloux se sont jointes au projet, rendant celui-ci véritablement Européen. En Afrique, le Comité Inter-africain d'Etudes Hydrauliques, CIEH, a été chargé de coordonner les différents intervenants. J. VLAAR, puis moi même avons été accueillis par cette institution pour assurer la coordination scientifique du programme.

Le réseau R3S a contribué activement au lancement, à l'organisation et au suivi de cette recherche. A ce titre, nous remercions L. NETOYO coordonnateur du réseau, F.N. REYNIERS, correspondant du Réseau, L.SARR, L. SOME, S. TRAORE, correspondants nationaux du réseau, respectivement au SENEGAL, au BURKINA FASO et au MALI.

Nous remercions aussi les directions générales des instituts de recherche qui ont permis à leurs chercheurs de travailler ensemble en les encourageant avec tous les moyens dont elles disposaient : le Secrétariat général du CIEH, la Direction de la recherche de l'Université de Wageningen (Pays Bas), la Direction de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux (Belgique), les Directions générales du CIRAD et de l'ORSTOM (France), les Directions générales de l'INERA (Burkina Faso), de l'IER (Mali) et de l'ISRA (Sénégal).

Nous avons reçu l'appui des chefs de départements, de laboratoire, ou responsables suivants:

- S. DAUTREBANDE, responsable du laboratoire de Télédétection et d'Agrohydrologie de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat, Gembloux,
- B. POUYAUD, chef du département "Eaux Continentales" de l'ORSTOM,
- J. CHAROY, chef du programme Hydraulique Agricole de l'IRAT,
- A. CASENAVE et C. VALENTIN, responsables successifs de l'Unité de Recherche 2B de l'ORSTOM,
- L.SARR et J.P. NDIAYE, responsables successifs du Département "Systèmes agraires" de l'ISRA,
- C. BELEM, directeur de l'INERA,
- Z. SANOGO, directeur de la recherche agronomique à l'IER,
- J. VLAAR & W. VAN DRIEL, ingénieurs du Génie Rural de l'U.A.W.
- C. MONCHALIN & F. GADELLE, directeurs techniques successifs du CIEH.

Dans le déroulement de ce programme, différents chercheurs ont été reçus par M. CATIZZONE, responsable à la CCE du suivi des programmes STD. Nous le remercions pour ses conseils et pour son rôle de médiateur lorsque des problèmes sont survenus entre les instituts au sujet des contrats. Nous lui savons gré d'avoir compris l'importance de nos travaux et d'avoir administré ces contrats de recherche avec intelligence.

Nous remercions également J. ALBERGEL & J.M. LAMACHERE d'avoir assuré l'édition scientifique de cet ouvrage.

Je souhaite que cette synthèse ait la diffusion qu'elle mérite afin de servir aux hommes de terrain chargés d'aider les populations à mettre en valeur les bas-fonds. J'espère que des recherches sur ce thème seront poursuivies, étendues aux zones géographiques plus humides, approfondies et élargies à d'autres utilisations (élevage, protection de l'environnement...). L'atelier que le CIEH organisera bientôt sur le thème des bas-fonds devrait permettre le renouvellement de cette thématique scientifique et l'émergence de programmes régionaux de "Recherche/Développement".

W. VAN DRIEL
Ingénieur du Génie Rural
Université Agronomique de Wageningen
Coordonnateur du Projet Bas-Fond au CIEH

RESUME

Dans les pays sahéliens, depuis deux décennies, la péjoration climatique associée à la croissance démographique et à la dégradation des terres ont profondément altéré les conditions des mises en valeurs agricoles traditionnelles. Pour pallier la baisse de fertilité des sols et nourrir une population en croissance rapide, les paysans africains raccourcissent la durée des jachères jusqu'à leur suppression et commencent à généraliser la fumure organique. Pour pallier les déficits hydriques, ils introduisent de nouvelles variétés de plantes cultivées et modifient l'utilisation de leur terroir en plaçant leurs cultures à l'aval des zones génératrices de ruissellement et dans les axes de drainage.

Les bas-fonds, axes de convergence préférentielle des eaux de surface, des écoulements hypodermiques et des nappes phréatiques (RAUNET, 1985), aux sols chimiquement fertiles, présentent désormais aux yeux des paysans sahéliens un intérêt agro-économique grandissant. Dans les régions où les bas-fonds sont traditionnellement mis en culture, la pression sur la terre a augmenté, rendant inadaptée une agriculture trop extensive. Dans les régions où les bas-fonds n'étaient généralement pas exploités, les tentatives spontanées de mise en valeur, individuelles ou collectives, se multiplient. Etant donné le caractère aléatoire des précipitations, les aménagements hydro-agricoles, en améliorant les conditions d'approvisionnement hydrique des cultures et en régularisant les débits des crues, peuvent contribuer de manière non négligeable à sécuriser la production alimentaire et favoriser le développement des cultures de rente.

De nombreux aménagements de bas-fonds ont été réalisés au Sahel sans pour autant avoir fait l'objet d'études et d'analyses comparées pour en tirer des enseignements extrapolables à une échelle régionale. A la suite de l'Atelier du Réseau de Recherche sur la Résistance à la Sécheresse (R3S) tenu en 1987 à Ouagadougou (Burkina Faso), des chercheurs de diverses institutions africaines et européennes, conscients de cette lacune, ont exprimé le souhait de mener une recherche fédérative sur le thème des bas-fonds au Sahel.

Les bas-fonds, objets de cette recherche, ont été définis comme des fonds plats ou concaves des vallons et des axes d'écoulement déprimés, ne possédant pas de cours d'eau important bien marqué, submergés pendant une période de l'année par une nappe d'eau qui s'écoule. Les sols sont d'origine colluviale. Le bassin versant a une superficie variant de 1 à 200 km². Les parcelles appartiennent au même village ou à quelques villages voisins. Les aménagements de régulation de l'eau relèvent d'investissements financiers faibles ou moyens. Ils peuvent être réalisés avec une forte participation paysanne. Leur gestion est compatible avec l'organisation sociale existante.

La recherche a été exécutée par plusieurs organismes européens (CIRAD, FSAGx, ORSTOM, UAW) et africains (CIEH, IER, INERA, ISRA) avec l'aide de la Commission des Communautés Européennes.

Ce programme de recherche pour la mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest a limité son champ d'étude à la zone climatique à une seule saison des pluies entre les isohyètes 600 mm et 1600 mm. Cinq sites pilotes, couvrant cette zone climatique, ont été choisis sur deux grands ensembles géologiques: les formations cristallines (granites, gneiss et migmatites) du vieux bouclier pénéplané ouest-africain, dont l'altitude dépasse rarement 500 mètres, et les formations sédimentaires marines du bassin sénégal-mauritanien dont l'altitude est inférieure à 100 mètres.

LA PLACE DES BAS-FONDS DANS LE PAYSAGE OUEST- AFRICAIN

Les bas-fonds occupent une place limitée au sein des paysages africains: 5 à 10% des surfaces étudiées par télédétection. La zonation climatique, définie dans le chapitre consacré à la typologie des bas-fonds, fixe bien leurs principales caractéristiques et celles de leur environnement.

Au nord de l'isohyète 600 mm, les sols des versants et des plateaux sont de type ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés, très pauvres en matière organique, en azote et en bases échangeables. Leur couvert végétal est constitué d'une steppe à épineux au recouvrement discontinu laissant apparaître des surfaces nues de plus en plus étendues au fur et à mesure que l'on remonte vers le nord sous des pluviométries de plus en plus faibles. La culture vivrière est essentiellement celle du mil. Elle est pratiquée sur les sols sableux éoliens qui recouvrent une partie des versants et les plateaux. L'élevage prend une place importante dans le système de production traditionnel. Il est l'apanage d'ethnies mobiles ou semi-sédentaires, migrant avec leurs troupeaux en période de transhumance. Dans ce milieu semi-aride, les bas-fonds sont des lieux privilégiés où se concentrent les eaux de ruissellement en saison des pluies, où la recharge des nappes aquifères est importante et atteint plus de 3 fois celle des versants les mieux alimentés, mais ne suffit pas toujours à satisfaire les besoins en eau potable des populations pendant toute la saison sèche qui s'étend sur plus de 8 mois (d'octobre à juin). L'actuelle période de sécheresse, qui dure depuis plus de 20 ans en Afrique de l'Ouest, aggrave la situation des régions les moins favorisées. Autrefois réservés à l'élevage, les bas-fonds de cette zone climatique sont de plus en plus mis en culture en saison des pluies. Le sorgho y est la culture la plus répandue là où les sols ne sont pas trop engorgés et là où il peut bénéficier d'une assistance de la nappe aquifère en fin de cycle. En saison sèche, le maraîchage est pratiqué dans des petits jardins enclos de fascines et irrigués à partir de puisards creusés dans les bas-fonds.

Entre les isohyètes 600 mm et 1000 mm, les sols des versants sont de type ferrugineux tropicaux peu lessivés à lessivés. Ils supportent une végétation de savane herbeuse, qui devient de plus en plus couvrante et abondante au fur et à mesure que la pluviométrie annuelle s'accroît, et sur laquelle les paysans pratiquent les feux de brousse depuis des temps immémoriaux. Les principales cultures vivrières sont le mil et le sorgho pratiquées sur des sols plutôt sableux. L'élevage prend une place limitée à la transhumance de saison sèche dans le système agricole traditionnel. Les bas-fonds de cette région présentent à peu près les mêmes caractéristiques morpho-pédologiques que ceux des zones plus sèches. Leurs sols sont sablo-argileux sur matériaux colluvio-alluviaux dans les parties amont des bas-fonds. Ils deviennent très argileux, hydromorphes à pseudo-gley dans les parties aval. Les parties centrales des bas-fonds sont fréquemment utilisées pour la culture du riz bien que celle-ci soit très aléatoire pour une pluviométrie inférieure à 1000 mm. L'écoulement des marigots est essentiellement alimenté par les ruissellements qui provoquent des écoulements brefs et intermittents d'autant plus violents que la proportion des surfaces de bassins versants mises en culture sans protection particulière des sols est importante. Le maïs complète, en marge du bas-fond, la riziculture en saison des pluies. En saison sèche, le maraîchage est pratiqué à proximité des villes et des villages lorsque les réserves en eau sont suffisantes en surface ou en profondeur.

Entre les isohyètes 1000 mm et 1200 mm les sols des versants sont de type ferrugineux tropicaux lessivés et sont associés à des sols ferrallitiques moyennement désaturés. D'une manière générale, ces sols sont très pauvres en matière organique et en éléments nutritifs. La couverture végétale, de type savane arbustive et arborée, est continue et abondante. Des forêts galeries se développent le long des principales rivières. Elles offraient, il n'y a pas si longtemps des niches privilégiées pour les simulis responsables de la transmission de l'onchocercose, maladie appelée aussi "cécité des rivières". Les sols des bas-fonds de cette zone climatique sont limono-argilo-sableux dans les parties amont, argilo-sableux à sableux dans les parties aval. Leur hétérogénéité texturale est une de leurs principales caractéristiques. Leur fertilité chimique et organique y est meilleure que sur les versants. Ils sont moyennement riches en calcium et magnésium mais restent pauvres en matière organique et en azote, très pauvres en sodium et potassium. En cultures vivrières, le mil et le sorgho sont pratiqués sur les versants, le riz est cultivé dans la majeure partie des bas-fonds où il est associé au maraîchage, à l'arboriculture et au maïs. Les marigots sont alimentés dès le mois d'août, quand les bassins versants sont assez grands (de superficie supérieure à 5km²), par les écoulements souterrains le long des versants qui provoquent des suintements en marge des bas fonds par l'affleurement des nappes aquifères. Cette alimentation latérale des bas-fonds en eaux souterraines provoque également une lixiviation des sols dans les bas-versants où ils deviennent très sableux, hydromorphes de couleur grise. La part de l'écoulement souterrain dans l'alimentation en eau de ces marigots dépasse 40% des apports annuels.

Au dessus de l'isohyète 1200 mm, le milieu naturel ressemble beaucoup à celui de la zone climatique décrite précédemment. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement dans cette zone climatique aux régions proches de l'océan Atlantique et aux bas-fonds estuariens soumis à l'influence des marées. La région étudiée, la Casamance, était, avant la période de sécheresse actuelle, le grenier à riz du Sénégal. Dans cette région, les plateaux et les versants sont occupés par une forêt sèche que les paysans ont tendance à couper pour pratiquer la culture du sorgho, de l'arachide et du manioc. Les bas-fonds peu salés sont cultivés en riz. Les bas-fonds soumis à l'influence de la marée sont caractérisés par des sols spécifiques appelés sols de mangrove qui se sont dégradés sous l'effet de l'exondation due à une baisse générale du niveau des nappes aquifères consécutive à la sécheresse des vingt dernières années. Cette catastrophe régionale a stérilisé une bonne partie des terres de bas-fonds anciennement cultivées en riz selon une technique traditionnelle très élaborée.

Les sols des bas-fonds de Casamance sont riches en matière organique et en azote dans l'horizon superficiel. Leur fertilité chimique est moyenne. L'eau des bas-fonds de Casamance provient en grande partie de l'écoulement souterrain le long des versants qui alimente des sources et des suintements sur les bas-versants, en marge des bas-fonds. Le ruissellement superficiel est très faible sur les versants et il n'apparaît que sur les zones engorgées des bas-fonds. En l'absence d'aménagement, le mouvement des marées commande l'enneigement et le déenneigement d'une partie des terres de bas-fonds en eaux douces et en eaux salées.

LES AVANTAGES DES BAS-FONDS OUEST AFRICAINS

Le principal avantage des bas-fonds est de concentrer les écoulements superficiels et souterrains favorisant ainsi leur mise en culture soit avec des variétés plus exigeantes en eau comme le sorgho et le riz dans les zones sahéliennes où la pluviométrie est inférieure à 600 mm, soit avec des variétés à cycle plus long et à plus fort rendement dans les régions les mieux arrosées. L'existence de nappes souterraines à faible profondeur dans les bas-fonds permet également le développement de l'arboriculture et de la culture maraîchère de contre-saison alimentée en eau à partir de puits peu profonds. Ils constituent donc, malgré leurs superficies très limitées, des terroirs marginaux privilégiés, lieux propices aux innovations et aux expérimentations paysannes. Ils présentent en outre l'avantage de sols relativement plus riches que les versants.

Une distinction très nette doit être faite ici entre la zone à pluviométrie annuelle inférieure à 1000 mm et la zone climatique à pluviométrie annuelle supérieure à 1000 mm. Dans la seconde, la culture du riz est pratiquée sans grands risques alors qu'elle reste aléatoire dans la première. Une intensification de la riziculture peut donc être raisonnablement envisagée sous une pluviométrie supérieure à 1000 mm. Elle ne peut être envisagée sans maîtrise totale de l'eau sous une pluviométrie inférieure à 1000 mm/an.

LES CONTRAINTES NATURELLES A LA MISE EN VALEUR AGRICOLE DES BAS-FONDS

Les contraintes naturelles à la mise en valeur agricole des bas-fonds d'Afrique de l'Ouest sont bien identifiées.

En zone sahélienne à pluviométrie inférieure à 1000 mm/an, les fortes crues couplées avec une pente assez forte du bas-fond, de l'ordre de 2 à 5 mètres par kilomètre, conduisent à des vitesses supérieures à 0.6m/s, qui provoquent en début de saison des pluies l'arrachage des jeunes plants de riz ou de sorgho et en fin de saison, leur verse.

En zones soudanienne et guinéenne, pour des pluviométries annuelles supérieures à 1000 mm, des averses successives sur plusieurs jours peuvent submerger les cultures implantées dans les zones basses et les asphyxier. Le riz et le sorgho sont des plantes résistantes à la submersion quand elle est inférieure à 3 jours. Au delà, les dégâts peuvent être irrémediables. L'excès d'eau peut donc être fatal aux plantes cultivées, mais l'insuffisance des pluies peut être tout aussi préjudiciable aux récoltes. En début de cycle végétatif, la jeune plantule a des besoins en eau extrêmement limités et les chutes de pluie satisfont généralement ceux-ci.

Lorsque la plante est en phase de tallage, elle devient très sensible au stress hydrique, mais, là encore, les besoins en eau étant limités et la probabilité d'occurrence des pluies assez forte, les risques de stress sont assez faibles. Par contre, en fin de cycle, pendant les phases de floraison, de fructification et de maturation, les besoins en eau des plantes deviennent élevés, supérieurs puis légèrement inférieurs à l'ETP et les risques de stress hydrique sont importants, d'autant plus importants que la pluviométrie annuelle moyenne est faible et que la plante cultivée dans le bas-fond provient d'une zone climatique plus humide.

En zone semi-aride, l'absence de pluies se traduit par l'absence de crues qui complètent ordinairement l'alimentation hydrique des cultures de bas-fonds. En zone soudanienne, la faiblesse des pluies se traduit par un tarissement précoce des écoulements dans le bas-fond et une baisse rapide des niveaux des nappes aquifères d'autant plus préjudiciable aux cultures que le sol est plus sableux.

Une mention spéciale doit être faite pour la Casamance où la contrainte principale à la mise en valeur agricole est due à la sursalure des sols de bas-fonds et à leur toxicité par acidification très rapide et très poussée consécutive à la longue sécheresse relative qui sévit depuis une vingtaine d'années en Afrique de l'Ouest. Cette sécheresse a provoqué une baisse généralisée des nappes aquifères en basse Casamance, l'exondation des sols de mangrove et leur hyperacidification; elle a facilité la pénétration des eaux salées dans les nappes aquifères des bas-fonds sous l'influence des marées et stérilisé les sols les plus exposés.

A ces contraintes hydro-pédologiques, on peut ajouter une contrainte qui apparaît générale dans toute l'Afrique de l'Ouest et qui concerne la croissance rapide des mauvaises herbes sur les terres cultivées dans les bas-fonds. Cette contrainte est un facteur limitant extrêmement important pour la mise en valeur agricole des bas-fonds car elle entraîne un surcroît de travail pour les agriculteurs et parfois l'abandon des parcelles les plus enherbées. La durée du désherbage d'une parcelle de 0.25ha est de l'ordre de 6 jours, mais peut varier entre 3 et 13 jours pour une personne. Elle se traduit par un coût de production plus élevé en main d'oeuvre pour les cultures de bas-fonds que pour les cultures de terres hautes.

LES CONTRAINTES HUMAINES A LA MISE EN VALEUR AGRICOLE DES BAS-FONDS

Les contraintes humaines à la mise en valeur agricole des bas-fonds de l'Afrique de l'Ouest sont tout aussi nombreuses et tout aussi importantes que les contraintes liées au milieu naturel. Pour des raisons diverses, la culture des bas-fonds tient une place marginale dans les systèmes de culture ouest-africains, mais croissante quand on se déplace du nord au sud, des régions à faible pluviosité vers les régions plus arrosées. Cette marginalité se traduit par une forte proportion de main d'oeuvre féminine pour l'exploitation des terres de bas-fond et une faible proportion des terres cultivées situées dans cette partie du terroir. Cette situation s'explique par la stratégie paysanne ouest-africaine qui vise à minimiser les risques et optimiser l'investissement humain, que l'on peut comptabiliser en journées de travail. L'exploitation d'une parcelle de riz de superficie égale à 0.25ha requiert environ 72 jours de travail dans le Yatenga, 50 dans la Comoé et le sud du Mali, 92 en Casamance. A titre de comparaison, une parcelle de sorgho de même superficie ne requiert que 30 jours de travail au Yatenga, et plus généralement une culture pluviale nécessite moins de 40 jours de travail pour une superficie de 0.25ha. Si, de surcroît, les paysans ont la possibilité de pratiquer sur les terres hautes des cultures de rente comme l'arachide au Sénégal et le coton au Burkina Faso et au Mali, on comprend assez facilement le peu d'intérêt offert par les cultures d'hivernage dans les bas-fonds. Cette partie du terroir retrouve un certain intérêt lorsque les paysans peuvent y pratiquer des cultures maraîchères et fruitières. Le cas le plus frappant est représenté par les bas-fonds situés au sud du Mali où les paysans vont jusqu'à couper le riz en herbe, lorsqu'il est trop tardif, pour le remplacer par la culture des pommes de terre, dont la commercialisation leur rapporte de substantiels profits. Ils ont d'ailleurs mis au point une technique de plantation des tubercules de pommes de terre tout à fait originale en utilisant les yeux des tubercules de manière à profiter au maximum du petit nombre de tubercules de semence.

Une autre contrainte importante à la mise en valeur des bas-fonds est relative au régime foncier. Les paysans africains sont rarement propriétaires du sol au sens occidental du terme. Ils en ont plus souvent l'usufruit avec des contraintes d'autant plus fortes qu'ils se trouvent au bout de la chaîne des prêts successifs que les paysans africains ont l'habitude de s'octroyer. Moussa OUEDRAOGO (1991) a mis en évidence, au Yatenga, trois modes d'appropriation des sols:

- * l'appropriation par antériorité,
- * l'appropriation par conquête,
- * l'appropriation par occupation prolongée.

Le dernier exploitant doit se référer aux maîtres de la terre pour modifier la gestion de sa parcelle, celle-ci lui ayant été octroyée pour un usage bien précis sans qu'il soit possible de le modifier.

LES AMENAGEMENTS HYDRO-AGRICOLES, SOLUTIONS A LA LEVEE DES CONTRAINTES NATURELLES

Afin de lever les contraintes naturelles liées à la mise en valeur des bas-fonds, un grand nombre de solutions techniques sont proposées. Toutes ces solutions visent à la maîtrise plus ou moins complète de l'eau. Les ouvrages les plus simples, digues filtrantes en zone sahélienne, digues en terre pour la zone soudanienne et guinéenne, ne fournissent qu'un premier niveau de sécurisation, l'alimentation hydrique des cultures restant dépendante des conditions climatiques et pédologiques locales.

La digue filtrante permet toutefois de minimiser les risques d'arrachage et de verse. La diguette en terre permet de maintenir assez longtemps un niveau d'eau suffisant à l'alimentation hydrique du riz lorsque les sols ne sont pas trop filtrants et les pluies assez abondantes.

Les ouvrages un peu plus élaborés: barrage demi-souterrain avec digue déversante, micro-barrage avec batardeaux, aménagements avec collecteur central, ouvrages de répartition et barrage anti-sel, sont des aménagements un peu plus coûteux, mais ils assurent une plus grande sécurisation dans l'alimentation hydrique des cultures et une meilleure protection contre les crues. Ces ouvrages nécessitent des études préalables assez approfondies et une bonne technicité hydraulique pour le contrôle des niveaux d'eau.

Les ouvrages les plus élaborés font intervenir des ouvrages de stockage plus importants avec système de répartition de l'eau par des canaux d'irrigation et des ouvrages de protection contre les crues. Ces ouvrages sont beaucoup plus coûteux à l'hectare, nécessitent des études très approfondies, une bonne technicité hydraulique des agriculteurs et une bonne organisation sociale pour le contrôle des niveaux d'eau sur l'ensemble du périmètre irrigué, l'entretien des ouvrages hydrauliques et le suivi de son exploitation.

Les ouvrages étudiés dans le cadre de ce programme, financé par la CCE, sont des ouvrages appartenant au premier et second groupe. Les ouvrages les plus petits ne sont pas forcément les moins coûteux, si on les rapporte à la surface sécurisée par l'aménagement. Le coût total de la digue filtrante de Bidi, au Yatenga, a été évalué à 650.000 CFA par hectare, celui du barrage demi-souterrain de Kambo à 800.000 CFA par hectare. Ils représentent cependant le gros avantage d'être réalisables dans des délais raisonnables avec la main d'oeuvre locale qui contribue pour 50% au financement total de l'ouvrage par le biais d'un investissement en temps de travail. Pour les ouvrages plus importants tels que Moadougou ou le micro-barrage de Gourga, les études préliminaires doivent être très approfondies et devraient permettre, avec les techniques actuelles de modélisation des écoulements (superficiels et souterrains) et de modélisation du bilan hydrique des sols, d'évaluer le degré de sécurisation des cultures, de fixer les normes d'une gestion rationnelle de l'ouvrage en évaluant les gains réels dus à l'aménagement.

LES TECHNIQUES CULTURALES, L'AIDE AU DEVELOPPEMENT ET LA VALORISATION DES TRAVAUX AGRICOLES, SOLUTIONS A LA LEVEE DES CONTRAINTES HUMAINES

S'il existe un certain nombre de recettes techniques et d'outils bien affûtés pour lever les contraintes imposées par le milieu naturel, il en existe bien peu pour lever les contraintes créées par l'homme lui-même. En la circonstance, le hasard, la conjoncture ou l'arbitraire se mêlent avec aisance.

En ce qui concerne les techniques culturales, celles-ci sont bien connues et ont fait leurs preuves ailleurs qu'en Afrique. Elles font appel au labour, à la fumure organique et minérale, à l'utilisation des herbicides pour la lutte contre l'enherbement. En Afrique, l'introduction de ces techniques se heurte à un problème économique. Elles sont utilisées avec succès dans les cultures commerciales: arachide ou coton et sur les cultures maraîchères: pommes de terre, patates douces, oignons ou pour d'autres cultures suffisamment rémunératrices. Sur les cultures vivrières, les revenus tirés de la vente de la production ne permettent pas actuellement l'utilisation d'intrants et d'herbicides. Les cours mondiaux du riz, artificiellement bas, n'autorisent pas non plus l'utilisation d'intrants et d'herbicides qui sont indispensables à l'intensification et pourraient permettre de rentabiliser le surcoût en main d'oeuvre et d'amortir les investissements financiers mobilisés pour la réalisation des aménagements. D'autre part, l'utilisation d'intrants nécessite une meilleure sécurisation de la production que seuls les aménagements hydro-agricoles sont susceptibles de fournir dans les bas-fonds.

L'aide au développement permet la réalisation d'aménagements qui peuvent être productifs et rentabilisés à long terme sous certaines conditions, dont la première passe par une étude préalable sérieuse et honnête prenant en compte non seulement les contraintes naturelles sans les minimiser, mais aussi les contraintes humaines: contraintes financières et contraintes d'exploitation. Bien peu d'aménagements tiennent compte de la nécessité pour les paysans de limiter leurs pertes en répartissant leurs parcelles en fonction des risques encourus; bien peu d'aménagements sont conçus pour satisfaire les besoins des usagers. Ils sont plus souvent conçus pour réduire les coûts de construction et tiennent peu compte des contraintes d'exploitation.

LES ACQUIS SCIENTIFIQUES DU PROGRAMME

Les acquis scientifiques du programme de recherche pour la mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest, en plus des connaissances relatives à ces milieux et à leur fonctionnement, sont:

- la mise au point de nouveaux appareils de mesure,
- la mise au point d'outils de diagnostic pour l'aménagement des bas-fonds,
- la mise au point d'outils de gestion de l'eau dans les bas-fonds,
- la réalisation d'une typologie hydro-agricole des bas-fonds.

Les nouveaux appareils conçus dans le cadre de ce programme sont au nombre de trois: un simulateur de pluie, un enregistreur hydrologique multicapteurs et une centrale d'acquisition des paramètres chimiques du sol.

Les outils de diagnostic sont au nombre de quatre: une chaîne de traitement des données satellitaires (mise au point à Gembloux), une méthode expert pour l'estimation des apports et des crues dans les petits bas-fonds de la basse Casamance, une méthode de simulation des bilans hydriques des sols des bas-fonds couplant la modélisation hydrologique et celle des bilans hydriques des plantes cultivées et une typologie générale des bas-fonds d'Afrique de l'Ouest orientée vers la valorisation agricole.

Les outils de gestion de l'eau sont plus limités en nombre, mais tout aussi «performants» que les outils de diagnostic, auxquels ils peuvent être couplés. Ils comprennent une méthode de gestion des barrages anti-sel qui a fait ses preuves sur le site de Djiguinoum et un modèle de stockage/destockage de l'eau dans une retenue, utilisé pour optimiser la gestion des batardeaux du micro-barrage de Gourga.

LE TRANSFERT DES RESULTATS DE LA RECHERCHE

La forte participation des chercheurs africains à ce programme (40% des chercheurs engagés dans le programme) constitue déjà une manifestation très claire de l'intérêt suscité auprès des institutions de recherches africaines. En outre, 23 stagiaires africains en provenance d'universités et d'écoles d'ingénieurs du continent ont effectué leurs stages de fin d'études ou leurs maîtrises en participant à ce programme. En ce qui concerne la diffusion des résultats, nous avons dénombré actuellement 12 publications scientifiques, 29 participations à des colloques et séminaires et 85 rapports scientifiques. Plusieurs chercheurs européens et africains préparent actuellement leurs thèses à partir des résultats collectés au cours du déroulement des opérations de recherche menées sur les cinq sites pilotes du programme CCE.

La partie la plus intéressante du programme concerne sans aucun doute ses applications au développement. Certaines techniques de gestion de l'eau, des méthodes de diagnostic élaborées dans le cadre de ce programme de recherche, ont déjà fait leurs preuves. Il reste maintenant à les appliquer à plus grande échelle en essayant de généraliser leur portée et à les utiliser de façon opérationnelle en collaboration avec les sociétés de développement, les ONG, les institutions nationales africaines ou internationales intéressées par la mise en valeur agricole des bas-fonds. Parmi les acquis scientifiques, certains suscitent un intérêt reconnu et méritent un approfondissement. On peut citer le couplage des modèles hydrologiques aux modèles de bilan hydrique des cultures et la simulation du fonctionnement d'un ouvrage hydro-agricole en fonction des potentialités de rendement. Ces modèles se sont révélés des outils précieux pour le diagnostic d'une éventuelle intensification agricole. Par ailleurs deux thèmes sont apparus capitaux pour des recherches futures en ce qui concerne la valorisation des bas-fonds : l'intensification et la diversification des cultures.

INTRODUCTION

A partir de l'atelier R3S de Ouagadougou un programme de recherche en vue de la mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel a été élaboré et soumis à la Commission des Communautés Européennes (CCE) : programme de recherche "Sciences et Techniques au service du Développement (STD)" de la DG XII.

Ce programme, fondé sur des résultats acquis et sur des expérimentations en cours, a été basé sur les principes suivants :

- ⇒ utiliser des méthodes et outils de recherche communs,
- ⇒ améliorer les échanges d'informations scientifiques et techniques,
- ⇒ s'appuyer sur les structures existantes en les renforçant, mais sans en créer de nouvelles,
- ⇒ associer au niveau européen plusieurs partenaires pour renforcer la coopération Nord-Sud sur un thème dont la priorité et l'importance font l'unanimité.

Le financement de ce programme ayant été accepté par la CCE, les travaux ont débuté en 1988 sous l'égide du réseau R3S, coordonnés par le Comité Inter-africain d'Etudes Hydrauliques (CIEH) et en s'appuyant sur trois projets pilotes localisés au Burkina-Faso, au Mali et au Sénégal. En 1989, l'accord de la CCE pour le financement d'une seconde tranche a permis d'étendre l'étude à deux autres projets pilotes (Burkina-Faso et Sénégal).

Cette synthèse rassemble les résultats des travaux d'une soixantaine de chercheurs européens et africains : agronomes, hydrologues, pédologues, sociologues, ethnologues. Elle commence par rappeler le cadre et les objectifs du programme de recherche. Elle est structurée en quatre parties suivies d'une conclusion et d'une bibliographie exhaustive:

- ⇒ Les milieux naturels et humains analysés dans les cinq projets pilotes sont décrits dans les deux premières parties. Des cartographies précises ont été réalisées. Différents fonctionnements du milieu naturel ont été modélisés. Les organisations sociales et les systèmes de production ont été comparés. Les contraintes au développement agricole de ces riches terroirs ont fait l'objet d'analyses croisées des facteurs naturels et socio-économiques.
- ⇒ La troisième partie est consacrée aux systèmes de culture, aux aménagements et aux essais agronomiques en milieu paysan. De nouveaux itinéraires techniques sont étudiés, testés et proposés.
- ⇒ La quatrième partie associe une typologie des bas-fonds de l'Afrique de l'Ouest à des méthodes de diagnostic rapide pour leur mise en valeur agricole. Il se termine par des propositions d'aménagements visant à lever les contraintes typiques de chaque bas-fond.

Le vœu des rédacteurs de cette synthèse est d'offrir aux acteurs du développement, aux bailleurs de fonds, aux chercheurs et au lecteur curieux des réalités africaines, un ouvrage spécifique consacré à la mise en valeur agricole des bas-fonds. Après le succès mitigé des aménagements des grandes plaines rizicoles de l'Ouest africain, les bas-fonds se présentent comme une alternative de développement agricole. Ils véhiculent l'idéal d'un développement à l'échelle des communautés rurales, peu coûteux en investissements financiers et permettant une forte participation paysanne. Ces projets attirent les bailleurs de fonds et de nombreuses ONG. Cette synthèse voudrait leur permettre de mieux situer les bas-fonds dans le paysage, d'apprécier leur importance dans les systèmes de production et d'évaluer correctement les contraintes à leur mise en valeur agricole.

LE PROGRAMME DE RECHERCHE

OBJECTIFS ET METHODOLOGIE GENERALE

Les objectifs du programme de recherche étaient les suivants:

- ⇒ Amélioration de la connaissance sur le fonctionnement des bas-fonds.
- ⇒ Mise en évidence de critères pertinents pour une classification des bas-fonds de l'Ouest Africain semi-aride.
- ⇒ Elaboration d'outils de diagnostic et d'aide à la décision en matière de mise en valeur des bas-fonds.

Ces objectifs ont été poursuivis à partir de deux axes complémentaires du programme de recherche.

Le premier axe de recherche a visé, d'une part la connaissance des éléments constitutifs de l'entité bas-fond: nature des sols et des sous-sols, états de surface, structure morphologique, occupation des sols et d'autre part, à décrire son fonctionnement en suivant l'évolution des manifestations hydrologiques (pluies, ruissellement, infiltration) et des actions anthropiques menées par les populations riveraines (agriculture, pêche, élevage, aménagements).

Le second axe de recherche, sur la base des connaissances acquises grâce à la caractérisation, a visé à proposer des stratégies de mise en valeur agricole qui tiennent compte des contraintes climatiques, hydrologiques, pédologiques, sociologiques et économiques locales. Pour ce faire, de nouveaux types d'aménagements hydro-agricoles ont été réalisés et testés, de nouvelles pratiques culturales et de nouvelles variétés ont été introduites; une animation des organisations paysannes a été entreprise pour la réalisation des travaux de construction et leur entretien, l'achat d'intrants et la vente des produits agricoles.

Les recherches se sont développées sur 5 sites d'observations et d'expérimentation, dénommés projets pilotes dans la suite du rapport. Ces sites sont les suivants (figure 1):

- ⇒ le projet Mali Sud (1 bas-fond divisé en deux unités),
- ⇒ le projet Siné-Saloum au Sénégal (2 bas-fonds),
- ⇒ le projet Comoé au Burkina Faso (3 bas-fonds),
- ⇒ le projet Yatenga au Burkina Faso (1 bas-fond divisé en trois unités),
- ⇒ le projet Casamance au Sénégal (1 bas-fond divisé en trois unités).

Les résultats obtenus ponctuellement sur les projets pilotes, pour être comparés puis transposés à l'ensemble de la zone climatique soudano-sahélienne, s'appuient sur un ensemble de techniques de mesures et de méthodes identiques d'observations et d'analyses :

- ⇒ la description morpho-pédologique,
- ⇒ l'analyse du fonctionnement hydrologique,
- ⇒ les études agronomiques,
- ⇒ l'analyse des systèmes de production et du contexte socio-économique,
- ⇒ les études de génie rural.

A ces cinq thèmes s'ajoutent les travaux de télédétection, qui ont permis de régionaliser les paramètres descriptifs du milieu naturel et de son anthropisation. Une chaîne de traitement permettant de croiser l'information satellitaire, la carte au 200 000 ème et les données de terrain a été élaborée au laboratoire de télédétection de la Faculté de Gembloux.

Dans les projets pilotes, chaque chercheur, assisté d'étudiants stagiaires et de techniciens rompus aux méthodes de mesure et d'analyse, s'est vu confier le développement d'un ou deux thèmes de recherche et la rédaction du rapport final couvrant ses thèmes de recherche.

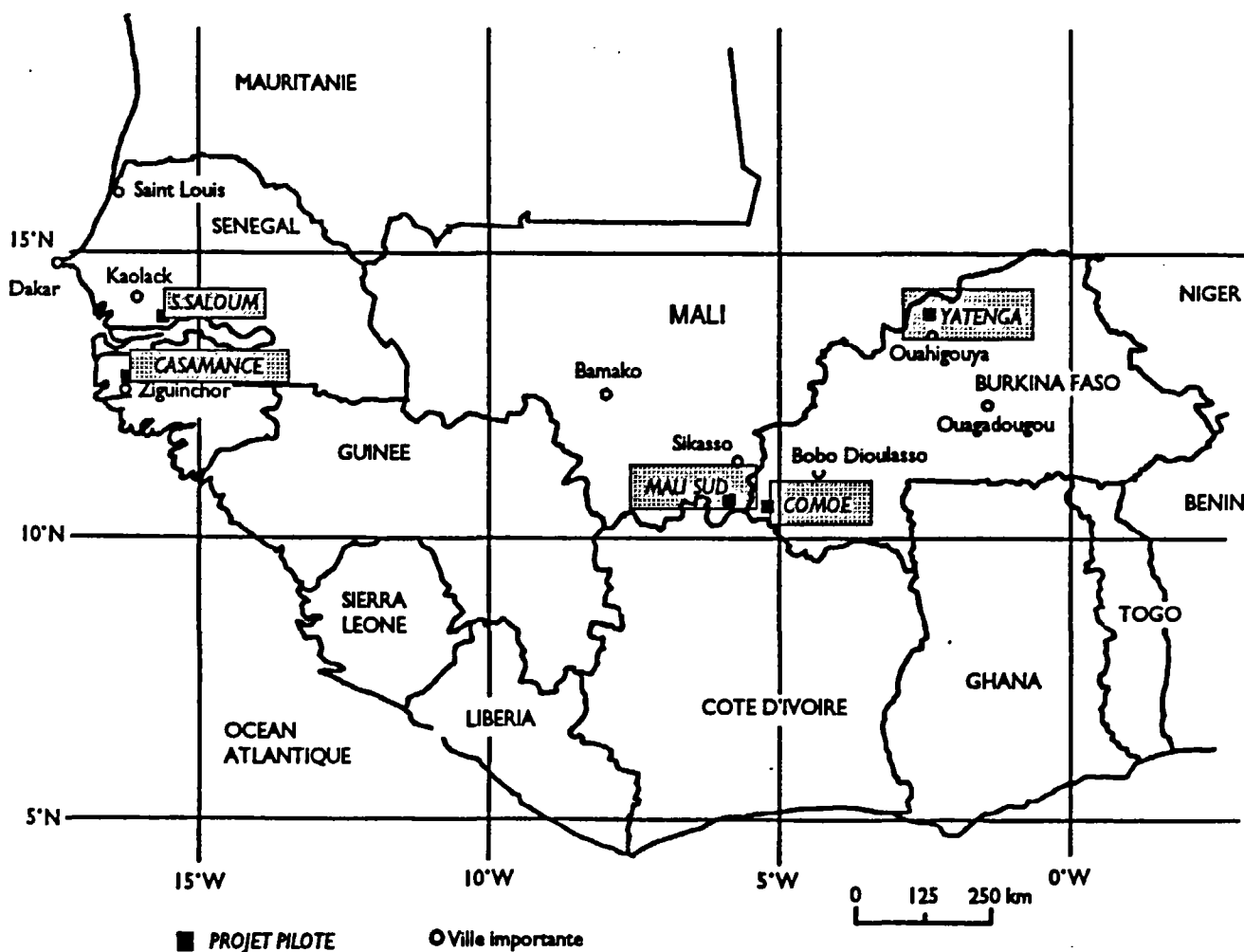
LES PROJETS PILOTES

Le choix des zones servant de support à la recherche et des bas-fonds des projets pilotes a été dicté par :

- ⇒ la perspective d'établir une typologie couvrant une zone assez vaste de bas-fonds aux caractéristiques suffisamment diversifiées,
- ⇒ la possibilité de bénéficier d'une structure de recherche déjà en place sur le terrain ou à proximité,
- ⇒ la recherche d'une collaboration avec des projets d'aménagement et de développement permettant de réaliser et de tester les aménagements en milieu paysan,
- ⇒ les conditions d'accès aux bas-fonds et la possibilité d'y effectuer un travail de terrain dans des conditions convenables.

La figure 1 indique la situation des projets pilotes en Afrique de l'Ouest. La zone couverte est vaste puisqu'elle s'étend, d'est en ouest, de la province du Yatenga au Burkina Faso à l'océan Atlantique (projet pilote Casamance), du sud au nord, de la province de la Comoé (Burkina Faso) proche de la Côte d'Ivoire à celle du Yatenga.

Figure 1 : Situation des projets pilotes



Le tableau I indique les noms des bas-fonds des projets pilotes auxquels il est fait référence dans la suite de cette synthèse ainsi que les aménagements réalisés sur les bas-fonds.

Tableau I : Les bas-fonds des projets pilotes

PROJET PILOTE	NOM DU BAS-FOND	CLIMAT	AMENAGEMENT EXISTANT
Mali-Sud	Kambo	Soudanien	Digue déversante, barrage souterrain
Comoé	Kawara	Soudanien	Diguettes en terres isohypes
Comoé	Moadougou	Soudanien	Collecteur central avec ouvrages à batardeaux
Comoé	Damana	Soudanien	Diguettes en terre traditionnelles
Siné-Saloum	Ndiba Keur Samba Diama	Soudano-sahélien Soudano-sahélien	Aucun aménagement Aménagement de versants
Yatenga	Bidi	Sahélien	Digue filtrante et digue déversante à batardeaux
Casamance	Djiguinoum	Guinéen	Barrage anti-sel

L'échantillon des bas-fonds sélectionnés présente des caractéristiques diversifiées, notamment en ce qui concerne :

- les conditions climatiques: pluviométrie, régime des vents, humidité, du type guinéen maritime en Casamance, au type sahélien au Yatenga,
- la situation géologique: sur terrain sédimentaire au Sénégal, sur socle cristallin au Mali et au Burkina Faso,
- les conditions morpho-pédologiques variables avec les conditions climatiques et la taille des bassins versants,
- le niveau de mise en valeur agricole: nul en Casamance sur les terres sursalées du bas-fond de Djiguinoum, élevé dans le sud du Mali et du Burkina Faso,
- le type d'aménagement mis en place: diguettes en terre traditionnelles à Damana, diguettes en terre isohypes à Kawara, digue déversante avec batardeaux de Kambo, digue déversante et digue filtrante de Bidi, barrage anti-sel de Djiguinoum, collecteur central avec ouvrages à batardeaux de Moadougou.

LES OUTILS ET LES METHODES

Chaque discipline scientifique développe ses propres outils et méthodes adaptés aux phénomènes et à l'échelle d'observation. Il n'est pas question ici de les inventorier de manière exhaustive, encore moins de les décrire. Nous nous contenterons simplement d'énumérer les types d'observations, les types d'enquêtes et les travaux effectués sur les aménagements, en distinguant les opérations communes à tous les projets pilotes de celles qui sont propres à certains projets. Les opérations sont regroupées par thème de recherche.

Pour chacun des six thèmes développés dans le cadre de ce programme de recherche, le tableau II indique l'importance accordée aux échelles d'observation de la région, couvrant des superficies de l'ordre de plusieurs centaines de km², à la parcelle agronomique ou au champ dont la superficie ne dépasse pas 1 à 2 hectares. Les espaces couverts par les thèmes de recherche ne sont pas directement superposables et les objets étudiés pas nécessairement matériels mais les relations entretenues entre tous les objets d'étude donnent une certaine cohérence à l'ensemble, les éléments omniprésents étant l'homme et l'eau.

Tableau II : Importance accordée aux thèmes de recherche aux différentes échelles géographiques

Thème de recherche	Morpho pédologie	Hydrologie Hydrogéologie	Génie rural	Agronomie	Socio économie	Télédétection
Echelle d'observation régionale (>1000km ²)	2	1	1	1	1	2
Bassin versant /terroir (100km ²)	3	3	1	1	3	3
Bas-fond (10ha)	3	3	3	3	3	3
Parcelle (100 à 10000m ²) Unité de production	3	3	3	3	3	0

Importance: 0 nulle, 1 faible, 2 assez forte, 3 fondamentale

Morpho-pédologie et caractérisation physique et chimique des sols

Ce thème de recherche rassemble la cartographie des sols, de leur organisation superficielle, de leur couvert végétal et de leur occupation ainsi que de leur caractérisation physico-chimique.

Dans tous les projets pilotes ont été réalisées des cartes de la végétation et de l'occupation des sols à l'échelle des bassins versants ou de parties de terroirs. Les projets Yatenga et Siné-Saloum ont effectué une description et une cartographie des états de surface de leurs bassins versants selon une méthodologie développée à l'ORSTOM par C. VALENTIN ET A. CASENAVE (1989)

Les projets Comoé et Mali-Sud ont développé très activement l'utilisation de la télédétection, sous l'impulsion des chercheurs de la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, pour l'identification des zones humides, des zones engorgées et des cultures.

Des analyses granulométriques des sols ont été effectuées dans tous les projets pilotes et des analyses chimiques également, à l'exception du projet Comoé. Les projets Casamance et Siné-Saloum ont développé plus particulièrement l'étude du fonctionnement hydrique des sols de bas-fonds en utilisant plusieurs techniques de mesure: infiltromètre Muntz, tensiomètre, sonde à neutrons et simulateur de pluie.

Une technique alliant des mesures ponctuelles de champs magnétiques (magnétomètres de terrain) et la géostatistique a été mise au point sur le projet pilote de Casamance pour établir des cartes de salinité des sols (BOIVIN & BRUNET, 1990)

Hydrologie / hydrogéologie

Ce thème de recherche regroupe les observations pluviométriques, limnimétriques, hydro-métriques et piézométriques ainsi que leur interprétation pour la modélisation du fonctionnement hydrologique des bas-fonds.

Tous les projets pilotes ont effectué des mesures pluviométriques, limnigraphiques et piézométriques assez denses sur leurs bassins versants. Des mesures d'évaporation aux bacs Colorado enterré et flottant ont été faites dans tous les bas-fonds à l'exception de ceux de la Comoé.

Des essais de puits visant à la détermination des paramètres hydrodynamiques des nappes aquifères ont été réalisés par les projets Yatenga, Mali-Sud, Casamance et Sine-Saloum. De nombreux jaugeages ont été exécutés sur toutes les stations hydrologiques, des mesures de transports solides en suspension ont été réalisées au Siné-Saloum et des mesures de transports solides dissous ont été effectuées en Casamance. Un seul projet, le Yatenga, a procédé à l'installation d'une station climatologique complète permettant le calcul de l'évapotranspiration par la méthode de Penman.

La modélisation hydrologique sur les bassins versants s'est attachée à reconstituer les apports et les crues sur tous les projets pilotes par des modèles de corrélations linéaire et non linéaire; sur les projets Yatenga, Mali-Sud et Siné-Saloum par des méthodes déterministes (modèle GR3 du CEMAGREF)

La détermination des paramètres physiques et physiographiques de tous les bassins versants a permis leur insertion dans les grandes classifications utilisées en Afrique de l'Ouest pour la détermination des apports et des crues à l'aide des méthodes ORSTOM (RODIER & AUVRAY, 1965) et CIEH (PUECH & CHABI GONNI, 1984).

Agronomie

Sur l'ensemble des projets pilotes, les études agronomiques se sont attachées essentiellement au suivi des cultures en milieu paysan, à l'analyse des pratiques culturales et des systèmes de culture, ainsi qu'à la réalisation de quelques essais variétaux.

Des essais de fertilisation ont été pratiqués au sud du Mali, en Casamance et dans le Siné-Saloum. Des techniques de lutte contre l'enherbement ont été expérimentées dans le bas-fond de Kambo. La pratique des cultures de contre-saison a été plus particulièrement étudiée dans les bas-fonds de la Comoé et du Siné-Saloum.

L'échantillonnage des parcelles cultivées dans les bas-fonds a été effectué en distinguant les zones hautes rarement submergées par les crues, les zones médianes souvent submergées et les zones basses très engorgées ou submergées. Des analyses pédologiques, des enregistrements de hauteur d'eau des marigots, des mesures piézométriques, des mesures pluviométriques et des mesures d'infiltration sur parcelle ont été associées aux observations agronomiques.

Génie rural

Plusieurs types d'ouvrages hydrauliques ont été réalisés ou réhabilités dans le cadre du programme de recherche pour la mise en valeur des bas-fonds au Sahel:

- une digue filtrante au Yatenga,
- un barrage à demi-souterrain avec digue déversante au sud du Mali,
- un petit barrage avec batardeaux et digue déversante au Yatenga,
- un barrage anti-sel en Casamance.

Les aménagements traditionnels et améliorés de la Comoé, constitués de diguettes en terre, n'ont subi aucune transformation, pas plus que l'aménagement avec collecteur central et batardeaux de la plaine de Moadougou. Le projet du Siné-Saloum n'a pu dépasser le stade de la conception d'une unité de biogaz.

Tous les aménagements existants ont fait l'objet d'une évaluation de leur coût et d'une étude agronomique visant à estimer leur impact sur les rendements des cultures. Plusieurs projets pilote ont participé à leur conception et à leur réalisation.

Economie et sociologie

Tous les projets pilotes ont inclus, dans leurs études sociologiques, des enquêtes démographiques, une étude des systèmes de production et une étude foncière.

Les études des systèmes de production ont porté, en particulier, sur la disponibilité en main d'oeuvre, la répartition sexuelle du travail et l'importance de la riziculture. Les problèmes de commercialisation des produits ont été abordés au Mali et dans la Comoé. Les conditions d'encadrement et de vulgarisation agricole ont été étudiées par les projets Comoé, Yatenga et Casamance. Le projet Comoé a mené une étude des systèmes de crédit et le projet Yatenga une étude de sociologie politique. L'étude du discours des paysans du village de Bidj au Yatenga et le suivi des redistributions foncières autour des aménagements du bas-fond ont permis d'appréhender les règles coutumières et les rapports complexes qui forment la trame des droits et devoirs de chacun dans les sociétés africaines.

Télédétection

Tous les projets pilotes ont utilisé la télédétection comme outil de régionalisation pour l'identification des zones humides telles qu'elles sont définies par A. MOKADEM et S. DAUTREBANDE (1991).

Seuls les projets Mali-Sud et Comoé, grâce à l'appui de la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, ont fait de la télédétection un thème de recherche en créant de nouveaux indices radiométriques bien corrélés avec l'humidité des sols et avec la profondeur de la nappe aquifère. Une cartographie des formations végétales et des types de cultures a été réalisée au sud du Mali, dans la Comoé et au nord du Yatenga. Au nord du Yatenga, la cartographie des formations et des ressources végétales a été réalisée par G. SERPANTIE, L. TEZENAS DU MONTCEL et S. SABATIER (1991) dans le cadre d'un programme de recherche intitulé SALT (SAvane à Long Terme), distinct du programme bas-fonds. En Casamance et au Sine-Saloum, une analyse d'images a été réalisée par l'ORSTOM et le CIRAD.

MOYENS MIS EN OEUVRE

Moyens humains

La coordination générale du projet a été assurée par le Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques (CIEH) de Ouagadougou, la réalisation technique et scientifique par :

- ⇒ des organismes européens de recherche en coopération :
 - le Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD),
 - l'Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération (ORSTOM),
- ⇒ des universités européennes :
 - l'Université Agronomique Wageningen (UAW) aux Pays-Bas,
 - le Laboratoire de Télédétection de la Faculté des Sciences Agronomiques de l'Etat de Gembloux (FSAGx) en Belgique ;
- ⇒ des institutions nationales africaines spécialisées dans la recherche en agronomie :
 - l'Institut d'Etudes et de Recherche Agricole (INERA) au Burkina Faso,
 - l'Institut d'Economie Rurale (IER) au Mali,
 - l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) au Sénégal.

Moyens financiers

Les salaires des chercheurs, ingénieurs et techniciens ayant participé au programme de recherche pour la mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel ont été pris en charge par les instituts de recherche africains et européens impliqués dans le programme ainsi que par le FAC pour quelques ingénieurs et chercheurs français.

Les dépenses relatives à l'exécution des programmes de recherche ont été couvertes en partie (57%) par le budget alloué sur quatre ans par la CCE, en partie par les budgets de recherche alloués sur la même période par les instituts français de recherche en coopération (ORSTOM et CIRAD), par la faculté de Gembloux et l'université de Wageningen. Au total, les contributions de la CCE ont atteint près de 600.000 ECUS, celles des instituts plus de 450.000 ECUS et 40.000 ECUS de diverses sources ont été utilisés pour réaliser ou réhabiliter les aménagements.

VALORISATION DU PROGRAMME DE RECHERCHE

Les auteurs de cette synthèse voudraient donner ici un aperçu des actions menées dans le cadre de la valorisation des travaux qui ont été réalisés à travers la dynamique de ce programme. Il est, bien entendu, un peu tôt pour dresser un panorama complet de toutes les actions de valorisation. Plusieurs thèses sont en cours, tous les projets d'articles scientifiques ne sont pas encore finalisés, les contacts avec les organismes de développement se poursuivent et de nombreux stagiaires sont encore accueillis pour travailler sur des données acquises au cours des expérimentations.

Les chercheurs associés dans le programme se sont engagés dans trois types d'action de valorisation de leur travaux :

- Le transfert des résultats de la recherche (données, outils de diagnostic) vers les organismes de développement,
- La formation par la recherche de chercheurs et cadres pour le développement,
- La diffusion scientifique par la participation à des colloques et séminaires et par la publication dans des revues spécialisées.

TRANSFERT DES RESULTATS DE LA RECHERCHE VERS LE DEVELOPPEMENT

Parmi les résultats directement utilisables on peut citer des nouvelles techniques de mesure avec la conception et la réalisation d'appareils nouveaux, des outils de diagnostic en vue de l'aménagement des bas-fonds, des outils pour la gestion de l'eau dans cette unité de paysage, des apports dans la compréhension des processus de transfert d'eau et de soluté dans les sols tropicaux.

Les appareils nouveaux mis au point et utilisés dans ce programme sont :

- * Un simulateur de pluie de seconde génération, conçu par l'ORSTOM (A. BERNARD) et réalisé par la société d'instrumentation scientifique " Delta Lab " de Grenoble. Un appareil complet a été construit et remis à l'ISRA avec la formation d'un technicien à son maniement.
- * Un limnigraphe qui permet d'enregistrer sur mémoire EPROM les hauteurs, températures et conductivités des eaux à l'amont et à l'aval d'un ouvrage avec la même base de temps. Cet appareil, conçu par J.P. LAMAGAT, a été réalisé par la société ELSYDE.

- * Une centrale d'acquisition des données Eh, pH et température, in situ à quatre profondeurs du profil racinaire (mise au point et réalisée par P. ZANTE).

Les outils de diagnostic pour l'aménagement des bas-fonds en Afrique de l'Ouest:

- * Une chaîne de traitement complète de l'information géographique sur les bas-fonds, synthétisant les informations de l'imagerie satellitaire, des photo-aériennes, des cartes au 1/200000ème et de données collectées sur le terrain, a été mise au point au laboratoire de télédétection et d'hydrologie agricole de Gembloux. Un chercheur Burkinabé a été formé à l'utilisation de ces traitements.
- * Une méthode expert pour la prédétermination des paramètres : écoulement annuel, crue de projet et amplitude maximale de la marée sur un site de barrage anti-sel en Basse Casamance.
- * Un modèle composé d'un module "pluie débit " et d'un module bilan hydrique d'une rizière permettant de simuler les rendements potentiels d'un bas-fond (aménagé et non aménagé).
- * Une typologie des bas-fonds permettant la régionalisation des paramètres de la ressource en eau et de conduire les décideurs vers un type d'aménagement en fonction de paramètres caractérisant le milieu naturel, les systèmes de production et l'organisation sociale des paysans.

Outils pour la gestion de l'eau dans les bas-fonds:

- * Une méthode de gestion des barrages anti-sel a été proposée en Casamance. Appliquée à la vallée de Djiguioum, elle a permis la réhabilitation de 90 hectares de sols sulfatés acides.
- * Un modèle de stockage et destockage de l'eau dans un barrage en vue de simuler le fonctionnement hydraulique et la gestion de l'eau d'une retenue pour une mise en culture. Ce modèle mathématique a été mis au point au Yatenga (JOFFRE 1990).

Des tests variétaux et des innovations dans les techniques culturales :

- * utilisation d'herbicide dans les bas-fonds du sud Mali,
- * culture à plat dans les bas-fonds de Casamance.

Publications à caractère technique, largement diffusées

- * La publication en 1990 de fiches techniques de Défense et Restauration des Sols publiées par le CIRAD, l'ISRA-UNIVAL et R3S ; ces fiches, très pratiques, présentent les mécanismes de dégradation des sols et des techniques pour y remédier. Elles ont été mises au point d'après les expérimentations sur le bassin versant du projet pilote Siné-Saloum.
- * La réalisation par l'ISRA-UNIVAL et R3S d'un diaporama réalisé de la région du Siné-Saloum, sur le même thème que les fiches techniques sus-mentionnées.
- * La participation des chercheurs du projet pilote Yatenga à la publication de l'Agence de Coopération Culturelle (ACCT) et du Groupe de Recherches et d'Echanges Technologiques (GRET): " La maîtrise des crues dans les bas-fonds, petits et micro-barrages en Afrique de l'Ouest" (BERTON, 1988).

Liens étroits avec des projets et des organismes de développement:

Mali-Sud

Les chercheurs ont collaboré avec :

- l'Association Française des Volontaires du Progrès dans le cadre de son Projet Micro-Réalisations (PMR) Kadiolo, en définissant un protocole de suivi commun;
- la Direction Nationale du Génie Rural par des missions communes sur la mise en valeur des bas-fonds et la formation d'agents du Génie Rural;
- la Compagnie Maliennne des Textiles (CMDT) par une présentation annuelle des résultats et des discussions des protocoles, la coordination des activités du projet et de celle du "Bureau d'Etudes Riz" (suivi-évaluation d'aménagements, étude de sites de futurs projets).

Comoé

Le Projet Opération Riz Comoé (Projet ORC), organisme ayant aménagé deux des trois bas-fonds du projet pilote Comoé, a collaboré au programme de recherche par le biais de réunions mensuelles avec les chercheurs, auxquelles prenaient part aménagistes, encadreurs et animatrices, d'une assistance logistique pour les mesures de terrain et d'une grande disponibilité pour renseigner les chercheurs et étudiants. Pour les aspects socio-économiques relatifs à l'exploitation des bas-fonds, le projet a collaboré avec la SNV.

Yatenga

Le projet pilote Yatenga fut l'occasion d'une collaboration entre le Centre Régional de Promotion Agropastorale (CRPA) du Yatenga : un animateur du CRPA a travaillé à la mobilisation paysanne et aux activités agricoles après la construction du barrage et de la digue filtrante de Bidi. L'AFVP et le "Six S" ont participé à la conception et à la construction de ces ouvrages.

Siné-Saloum

Sur ce projet, les contacts avec les organismes de développement se sont établis autour du thème "défense et restauration des sols". Le thème bas-fond a intéressé le Programme National de Vulgarisation Agricole (PNVA). L'AFVP a participé à l'élaboration du projet d'aménagement du bas-fond et des contacts ont été pris avec le Ministère Sénégalais du Développement Rural et de l'Hydraulique et avec la Mission d'Aide et de Coopération Française.

Casamance

Tous les travaux de recherches ont été suivi par le PNVA. Des visites de terrain et des conseils ont été prodigués aux ONG locales. L'USAID a demandé une participation, des chercheurs travaillant dans ce projet pilote, à l'avant-projet de développement des bas-fonds de Casamance (Southern Zone Water Managment Project - 685/0295 - Project Paper USAID, 1988).

Expertises sur d'autres zones

Pendant toute la durée du programme, la coordination hydrologique a été sollicitée pour des expertises sur plusieurs projets d'aménagement de bas-fonds:

En Casamance, une expertise a été réalisée pour le compte de l'USAID sur 11 sites de barrage (ALBERGEL, 1987).

En Guinée, une évaluation et un programme de suivi ont été sollicités par la Banque Mondiale pour le compte du Programme Agricole de Guéckédou (ALBERGEL, 1988).

En Guinée Bissau, l'expérience casamançaise a été utilisée pour évaluer les potentialités hydriques des bas-fonds estuariens dans l'inventaire et l'évaluation des ressources en eau de surface, Projet PNUD GBS/87/002 (ALBERGEL & PEPIN, 1991).

Dans la Comoé, une expertise a été réalisée pour le compte du FED sur cinq bas-fonds agricoles (LAMACHERE, 1987).

D'autres expertises ont été sollicitées sur des aménagements de bas-fonds au sud du Mali et au nord de la Côte d'Ivoire.

FORMATION PAR LA RECHERCHE DE CHERCHEURS ET CADRES DU DEVELOPPEMENT

Chercheurs associés et thèses

Dans le cadre du contrat liant la faculté de Gembloux et le CIEH, un chercheur burkinabé, M. NONGUIERMA, a pu approfondir ses connaissances sur les méthodes et les techniques de la télédétection et les mettre en pratique. Parallèlement à ces travaux, il a obtenu un Certificat d'Etudes Approfondies en agronomie appliquée à l'aménagement et à la gestion des ressources naturelles.

Cinq chercheurs du programme "bas-fonds" ont bénéficié de contrats de chercheurs associés offerts par l'ORSTOM :

- B. BACYE, Chercheur associé ORSTOM 1989-1991.
- E. BARRO, Ingénieur agronome, pédologue du bureau national des sols du Burkina Faso, thèse à l'université d'Abidjan, Yatenga, chercheur associé ORSTOM 1989-1992.
- H. DACOSTA, Assistant à l'université Cheikh Anta Diop de Dakar, Siné-Saloum, chercheur associé ORSTOM 1989-1992,
- M. SENE, Physicien du sol, chercheur à l'ISRA, chercheur associé ORSTOM 1990-1993.
- P. ZOMBRE, Assistant à l'université de Ouagadougou, Institut du Développement Rural, chercheur associé ORSTOM 1989-1992.

Quelques jeunes chercheurs ont pris la décision de valoriser leur participation à ce programme par la rédaction et la soutenance d'une thèse d'université :

- B. BACYE, Pédologue, allocataire de recherche ORSTOM, thèse à l'université d'Atx-Marseille, Yatenga, 1989-1992.
- J.P. MONTOROI, Pédologue à l'ORSTOM, thèse à l'université de Nancy.
- P. PEREZ, Ingénieur agronome du CIRAD, thèse à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier avec la collaboration scientifique de l'ORSTOM.
- M. SENE, Chercheur à l'ISRA, thèse à l'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier avec la collaboration scientifique de l'ORSTOM et de l'INRA d'Avignon.

Mémoires et stages d'étudiants africains et européens

De nombreux étudiants, européens et africains, d'universités et d'écoles d'ingénieurs, ont participé au programme de recherche. Cette participation a le plus souvent pris la forme d'un stage de terrain de durée variable donnant lieu à la rédaction d'un mémoire. Les institutions concernées sont :

au Burkina Faso :

- L'Ecole Inter-états des Ingénieurs de l'Équipement Rural (EIER) de Ouagadougou. Chaque année un étudiant est venu faire un stage sur les terrains du Sénégal et six étudiants ont participé aux travaux du projet pilote du Yatenga en stage court de deux mois.
- L'Institut des Sciences de la Nature et du Développement Rural (ISN/IDR, Université de Ouagadougou): un étudiant a effectué un stage de longue durée (12 mois) sur le projet Yatenga.
- L'Institut des Sciences Humaines et Sociales (Université de Ouagadougou): deux étudiants sur le projet Comoé et un étudiant en stage de longue durée (2 ans) sur le projet Yatenga.
- Le Département de Géographie Physique (Université de Ouagadougou): deux étudiants.

au Sénégal :

- L'Institut National du Développement Rural (INDR) - 1 étudiant.
- L'Université de Dakar - 1 étudiant.
- L'Institut de la Science de la Terre à Dakar (IST) - 1 étudiant.
- L'Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie à Thies (ENSA) - 2 étudiants.

en Europe :

- L'Université Agronomique de Wageningen (UAW) - 8 étudiants.
- La Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux (département du Génie Rural) - 3 étudiants.
- L'Ecole Nationale Supérieure d'Hydraulique et de Mécanique de Grenoble (ENSHMG) - 1 étudiant.
- L'Ecole Nationale du Génie Rural et des Eaux et Forêts de Montpellier, un étudiant a réalisé un Master de maîtrise de l'eau sur le projet Mali-Sud.
- L'Université de Provence Aix Marseille 1, un étudiant a préparé ses mémoires de maîtrise et de DEA en Sociologie du Développement.

VALORISATION SCIENTIFIQUE DE LA RECHERCHE

Depuis le début du programme en 1988, les recherches ont donné lieu à un certain nombre de publications qui ont été présentées à l'occasion de séminaires ou colloques nationaux et internationaux, soumises à des revues à comité de lecture ou proposées aux éditeurs d'ouvrages d'intérêt général.

Vingt et deux chercheurs ont présenté vingt et neuf communications dans treize séminaires, ateliers et colloques entre 1988 et 1991.

Douze articles scientifiques ont été publiés ou sont sur le point de l'être dans des revues à comité de lecture.

Première partie

**Les milieux naturels :
ressources et contraintes**

L'Afrique de l'Ouest du 10^e au 15^e parallèle

LA SITUATION GEOGRAPHIQUE

Les cinq projets pilotes du programme " Mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest" sont répartis entre 10° et 14° de latitude nord, 2° et 17° de longitude ouest. Le tableau III donne la localisation de ces sites qui sont représentés sur les trois cartes montrant, respectivement, les grands ensembles géologiques, phytogéographiques et climatiques de l'Afrique de l'Ouest.

Tableau III : Localisation géographique des projets pilotes

Projet pilote	Pays	Région	Latitude	Longitude	Altitude m
Yatenga	Burkina Faso	Bidi	13°54'	2°30'	315 - 370
Siné - Saloum	Sénégal	Thyssé-Kaymor	13°44'	15°30'	20 - 50
Casamance	Sénégal	Djiguinoum	12°40'	16°10'	0 - 30
Mali - Sud	Mali	Kadiolo	10°37'	5°48'	320 - 340
Comoé	Burkina Faso	Banfora	10°35'	5°10'	300 - 500

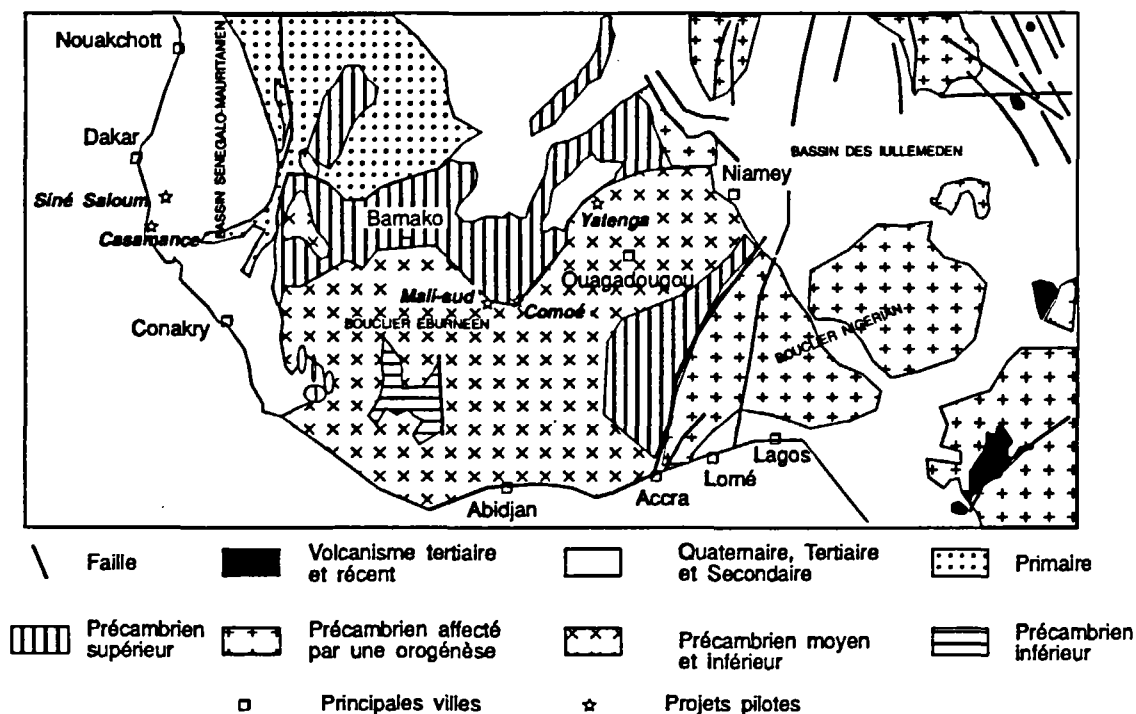
LE CONTEXTE GEOLOGIQUE

Deux sites sont localisés au Sénégal dans le bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien à proximité de l'océan Atlantique: l'un en Casamance, au sud du fleuve Gambie, où l'altitude du plateau sédimentaire ne dépasse pas 25 mètres, l'autre dans le Siné-Saloum, au nord du même fleuve, où l'altitude moyenne du plateau sédimentaire est de l'ordre de 40 mètres.

Les trois autres sites expérimentaux sont localisés à l'est du fleuve Bani, affluent du Niger, sur le bouclier ouest africain constitué de roches granitiques ou sédimentaires métamorphisées du précambrien moyen et inférieur. Deux sites sont localisés au Burkina Faso, l'un au nord-ouest dans la province du Yatenga, à proximité de la plaine sédimentaire du Gondo, l'autre à l'extrême sud-ouest dans la province de la Comoé où il chevauche légèrement le plateau gréseux du précambrien supérieur. Le cinquième site se trouve au sud-est du Mali, dans la région de Sikasso, qui jouxte la province de la Comoé, sur des formations granitiques du précambrien moyen et inférieur identiques à celles qui forment le substratum de la province voisine.

Le bouclier ouest-africain est un vieux socle pénéplané dont l'altitude ne dépasse pas 500 mètres dans l'ensemble des régions étudiées. En observant l'esquisse géologique (figure 2), on remarque que le dispositif expérimental caractérise essentiellement les zones sédimentaires du tertiaire et du quaternaire et les formations métamorphiques du précambrien moyen et inférieur. Il ne prend pas en compte les formations gréseuses du précambrien supérieur qui couvrent toute la frange sud du bassin sédimentaire de Taoudénit situé au nord-ouest du Mali, les formations primaires du nord-ouest du bouclier ouest-africain et les zones d'altitudes caractéristiques de l'orogénèse précambrienne (massifs sud sahariens et bouclier nigérian).

Figure 2 : Esquisse géologique de l'Afrique de l'Ouest (FABRE, 1971)



LE CONTEXTE CLIMATIQUE

LA CIRCULATION ATMOSPHERIQUE

La circulation générale de l'atmosphère au dessus de l'Afrique de l'Ouest dépend à la fois des hautes pressions tropicales et de l'équateur météorologique dont les migrations saisonnières déterminent les caractéristiques des flux d'air et les types de temps résultants.

En hiver boréal:

L'équateur météorologique, sous l'influence puissante des anti-cyclones des Açores et du Sahara, migre vers le sud jusqu'à la latitude de 4° Nord. Se mettent en place deux circulations d'alizé, aux caractères différents, impulsées par les deux anti-cyclones et qui vont commander le temps pendant la saison sèche qui dure de quatre mois dans le sud jusqu'à sept mois dans le nord.

- L'alizé maritime est issu de l'anticyclone des Açores. De direction nord à nord-ouest, il est humide, frais et parfois froid avec une faible amplitude diurne des températures. Ce flux, malgré son humidité, est inapte à engendrer des précipitations, du fait de la position trop basse de l'inversion d'alizé, liée à la subsidence de l'air supérieur interne au flux (LEROUX, 1983). Cet alizé maritime est responsable de l'humidité déposée sous forme de rosée et des journées très claires de saison sèche.

- L'harmattan, de direction est dominante, est l'alizé continental saharien. Il se caractérise par une grande sécheresse, des amplitudes thermiques très accusées: frais la nuit, chaud ou torride le jour. Il est accompagné de brumes sèches. Sa sécheresse s'accompagne d'une très forte capacité d'évaporation.

En été boréal:

Le réchauffement de l'hémisphère Nord, consécutif au mouvement zénithal du soleil, entraîne la mise en place d'une dépression thermique très creuse au Sahara et l'affaiblissement de l'anticyclone des Açores, avec une position septentrionale très marquée. Pendant ce temps, l'anticyclone de Sainte-Hélène, dont la puissance s'est beaucoup accrue du fait de la vigueur de l'hiver austral, opère une migration vers le nord entraînant celle du Front InterTropical vers sa position extrême en Août : 20° Nord.

La circulation aérienne s'inverse et prend une orientation sud-ouest. L'Afrique de l'Ouest est alors envahie par le "flux de mousson". Ce "flux de mousson" résulte en fait de l'alizé issu de l'anticyclone de Sainte-Hélène et dévié par la force de Coriolis en franchissant l'équateur. Son parcours maritime l'a chargé d'un grand potentiel d'eau précipitable. Son influence se fait sentir sur toute la zone intertropicale de mai à octobre pour les régions les plus méridionales et de juillet à septembre pour la frange la plus au nord.

L'installation progressive de la mousson, son épaisseur et ses perturbations, dont le moteur est l'air polaire se déplaçant sous forme de noyaux anticycloniques mobiles avec des trajectoires variables, déterminent les types de précipitations que connaît la région.

L'arrivée du Front InterTropical sur une région se caractérise par l'apparition de cumulus qui prennent de l'épaisseur et provoquent des orages isolés. Au sud de ce front, des bandes de cumulonimbus de direction nord-sud se déplacent d'est en ouest et sont à l'origine d'orages organisés, appelés ligne de grains, dont la formation et l'entretien sont liés aux noyaux anticycloniques. Lorsque l'air de mousson est assez haut, on observe des pluies régulières et moins intenses.

LES CLIMATS

Les cinq projets pilotes se répartissent au delà du 10^{ème} degré de latitude nord, donc typiquement dans cette zone à une seule saison des pluies (hivernage) dont la durée est de sept mois au sud et décroît ensuite progressivement vers le nord (figure 3). Une saison sèche quasi absolue règne de quatre à sept mois. On y distingue les climats régionaux suivants (LEROUX, 1983):

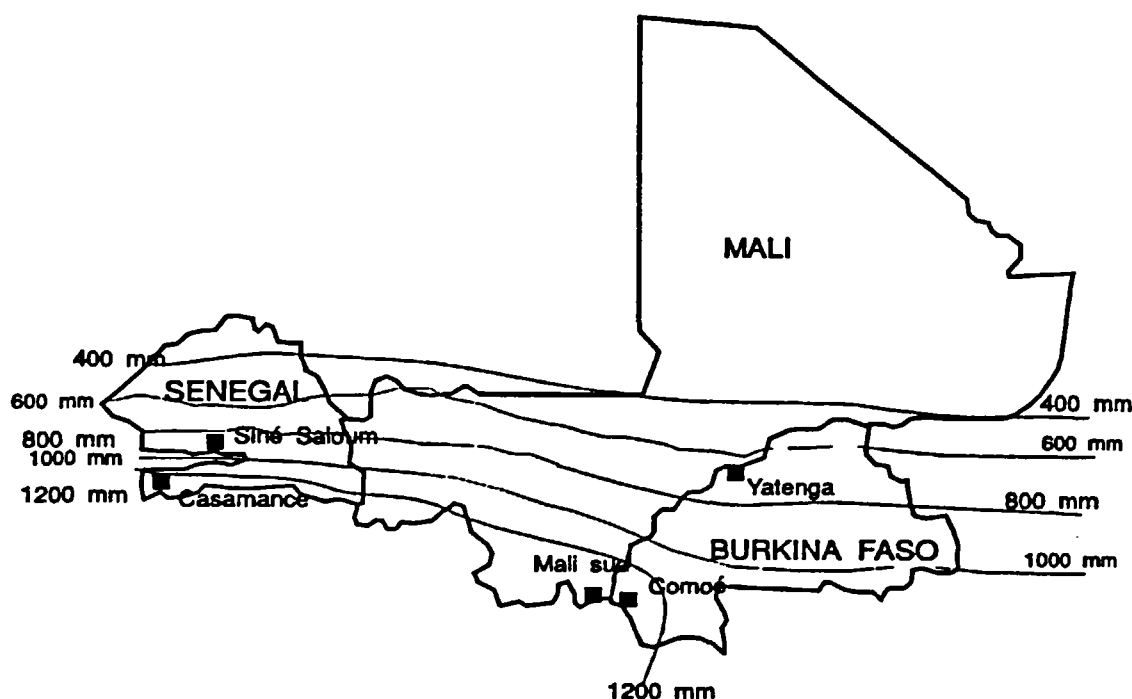
- Le climat subguinéen qui intéresse le littoral des rivières du sud.
- Le climat foutanien qui règne au dessus de 700 à 800 mètres d'altitude.
- Les climats soudanien proprement dits, situés entre les isohyètes (1920-1970) 500 et 1600mm annuels, départagés par l'isohyète 1000 mm en climat sud-soudanien et en climat nord-soudanien.
- Les climats sahéliens, aux précipitations moyennes annuelles inférieures à 500-600 mm, zone de transition entre l'Afrique noire pluvieuse et le Sahara, divisés entre les nuances sud-sahélienne et nord-sahélienne, subdésertique.
- Le climat subcanarien qui intéresse le liseré côtier du Cap-vert à la Mauritanie.

Avec des pluviométries moyennes interannuelles de 720 mm et 850 mm sur la période 1920-1970, des saisons sèches de 8 et 7 mois, les projets "Yatenga" et "Siné-Saloum" sont soumis à un climat nord-soudanien.

Les projets "Comoé" et "Mali-sud" connaissent un climat sud-soudanien avec une pluviométrie moyenne interannuelle de l'ordre de 1200 mm sur la période 1920-1970. La saison sèche dure 5 mois.

Le projet "Casamance" connaît un climat subguinéen caractérisé par une humidité moyenne toujours supérieure à 50%, une nette prédominance des vents d'ouest à sud-ouest et une pluviométrie moyenne interannuelle de l'ordre de 1400 mm (1920-1970). La saison sèche dure 6 à 7 mois.

Figure 3 : Situation climatique des projets pilotes, isohyètes 1920-1970, (ALBERGEL, 1992)



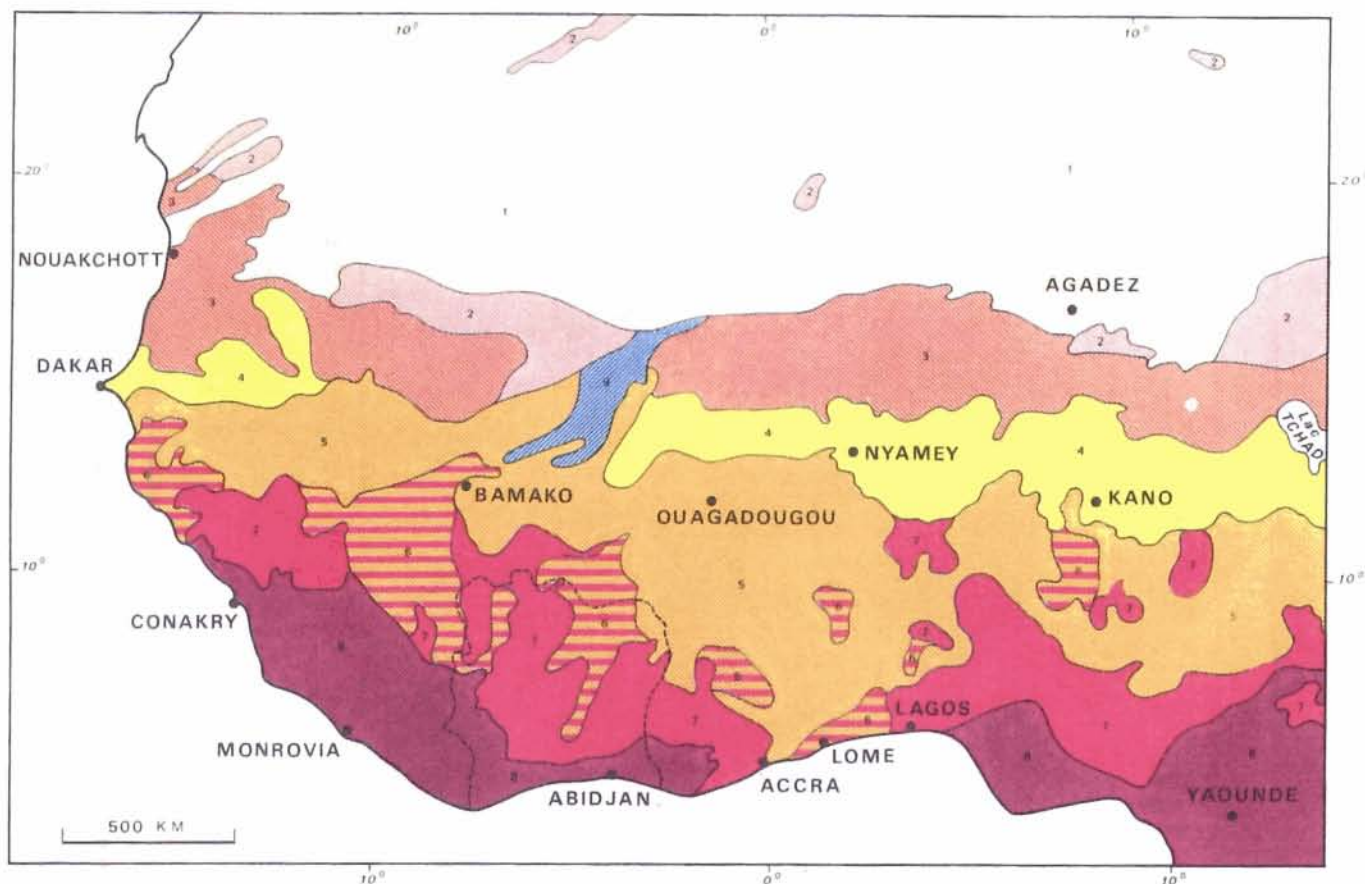
LES SOLS

Les régions intertropicales de l'Afrique de l'Ouest entre 500 et 1800 mm de pluviométrie interannuelle sont caractérisées par des altérations épaisses s'intercalant entre la surface et la roche saine : de quelques mètres en régions sèches, elles atteignent une cinquantaine de mètres en régions humides.

Les sols mis en place à partir de ces altérites se différencient à l'échelle du continent en fonction de la pluviométrie annuelle et à l'échelle locale en fonction de la topographie. La planche couleur 1 présente l'esquisse pédologique générale de l'Afrique de l'Ouest (BOULET et al, 1971). Du nord au sud, on distingue, selon la classification française des sols:

- au-dessous de l'isohyète 200 mm, les sols minéraux bruts des déserts;
- entre les isohyètes 200 et 400 mm, les sols peu évolués sub-désertiques et les sols isohumiques bruns sub-arides ou bruns rouges sub-arides;
- entre les isohyètes 400 et 600 mm, les sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés sur lesquels se situe le projet Yatenga;
- entre les isohyètes 600 et 1000 mm, les sols ferrugineux tropicaux lessivés, sur lesquels se situe le projet Siné-Saloum;
- entre les isohyètes 1000 et 2000 mm, les sols ferrugineux tropicaux lessivés et les sols ferrallitiques faiblement à moyennement désaturés sur lesquels se situent les 3 projets Mali-Sud, Comoé et Casamance.

Planche couleur 1 : Esquisse pédologique générale de l'Afrique de l'Ouest
(Par BOULET et al. 1971)



LEGENDE

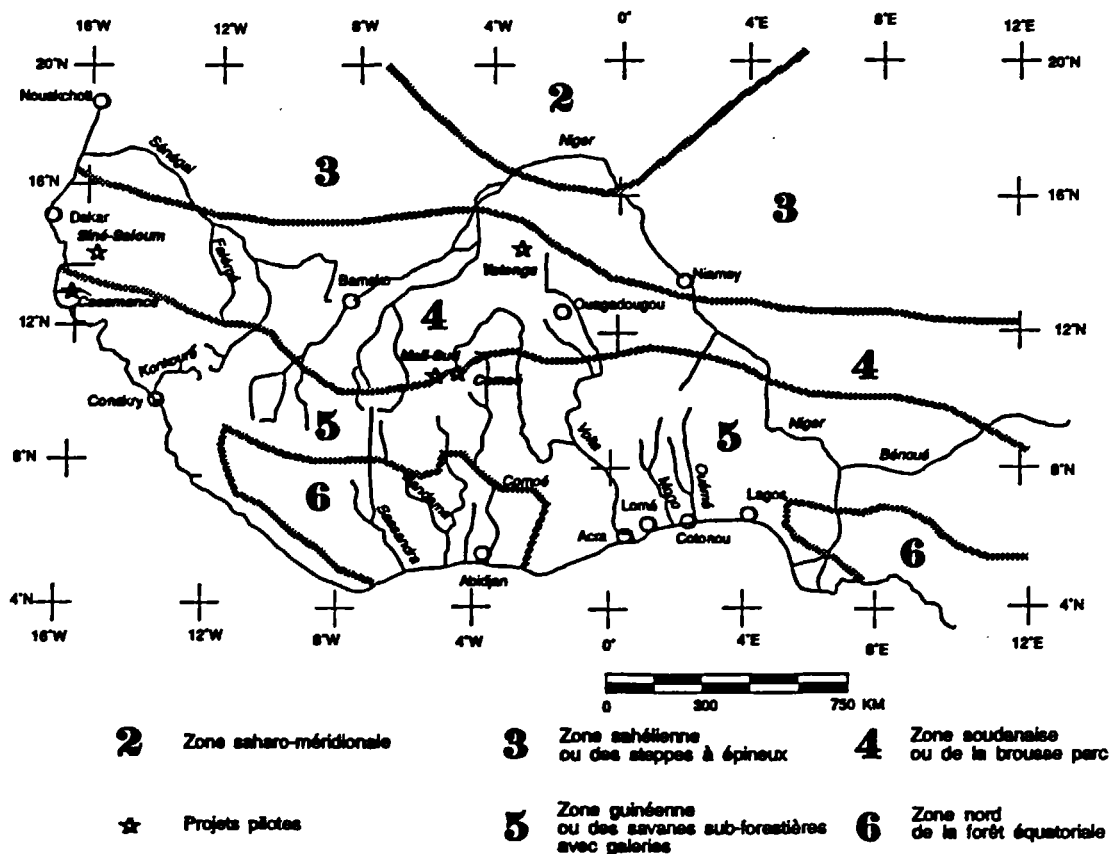
- | | |
|--|--|
|  | 1 Sols minéraux bruts des déserts |
|  | 2 Sols peu évolués subdésertiques |
|  | 3 Sols isohumiques (sols bruns subarides ; sols brun-rouge subarides) |
|  | 4 Sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés |
|  | 5 Sols ferrugineux tropicaux lessivés |
|  | 6 Association de sols ferrugineux tropicaux lessivés et de sols ferrallitiques |
|  | 7 Sols ferrallitiques faiblement et moyennement désaturés |
|  | 8 Sols ferrallitiques fortement désaturés |
|  | 9 Sols hydromorphes |

LA VEGETATION NATURELLE

CHEVALIER, (1938) distingue en Afrique de l'Ouest six domaines phytogéographiques (figure 4) parmi lesquels trois intéressent les projets pilotes du programme:

- La zone des steppes à épineux ou zone sahélienne.
- La zone de la brousse à parcs ou zone soudanaise.
- La zone des savanes subforestières avec galeries, ou zone guinéenne.

Figure 4: Les domaines phytogéographiques d'Afrique de l'Ouest (CHEVALIER, 1938)



LA ZONE SAHELIEENNE

La zone sahélienne est caractérisée par le groupement végétal à *Acacia raddiana* très répandu sur les substrats sableux. Il comprend : *Acacia senegal*, *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*, *Ziziphus mauritiana*, *Capparis decidua*, *Aristida mutabilis* etc... La dégradation du couvert végétal y est marquée par l'extension du *Balanites aegyptiaca* pour le couvert arbustif et du *Cenchrus biflorus* (Cram-Cram) pour le tapis herbacé où il se substitue à *Chloris prieuri* et *Schoenefeldia gracilis*. Le tapis herbacé y est discontinu.

LA ZONE SOUDANAISE

La zone soudanaise peut être subdivisée en trois secteurs (JAEGER, 1968):

- Un secteur soudano-sahélien (500 à 700 mm de pluviosité interannuelle).
- Un secteur soudanien (700 à 1000 mm de pluviosité interannuelle).
- Un secteur soudano-guinéen (1000 à 1600 mm de pluviosité interannuelle).

Le secteur soudano-sahélien est caractérisé par deux types de groupements végétaux : le groupement à *Acacia seyal* sur sols argileux et le groupement à *Combretum glutinosum* sur sols plus légers. Le groupement à *Acacia seyal* comprend des arbres de grande taille : *Adansonia digitata* (baobabs), *Sterculia tomentosa*, dominant des fourrés de *Gulera senegalensis*, *Maytenus senegalensis*, *Combretum glutinosum*, *Anogeissus leiocarpus* et d'espèces épineuses comme *Balanites aegyptiaca*, *Ziziphus mauritiana*. Le groupement à *Combretum glutinosum* varie d'une savane arbustive à une savane arborée comprenant, outre de nombreux *Combretum glutinosum*, *Combretum nigricans*, *Gulera senegalensis*, *Boscia senegalensis*, *Grewia bicolor*, *Ptilostigma reticulatum*, *Bombax costatum*, *Pterocarpus ernaceus*, *Khaya senegalensis*, *Andropogon gayanus* etc...

Le secteur soudanien, proprement dit, est caractérisé par la savane arborée comprenant une strate supérieure constituée d'*Adansonia digitata*, *Khaya senegalensis*, *Parkia biglobosa*, *Pterocarpus ernaceus*, etc... une strate moyenne composée de petits arbres et arbustes : *Lannea acida*, *Ziziphus mauritiana*, *Tamarindus indica*, *Dalbergia melanoxylon*, *Combretum micranthum*, *Combretum glutinosum*, *Combretum aculeatum* etc... et une strate herbacée qui se dessèche après l'hivernage : *Andropogon gayanus*, *Andropogon tectorum*, *Cymbopogon giganteus*, *Imperata cylindrica* etc...

Le secteur soudano-guinéen est occupé par des savanes arborées dans lesquelles on rencontre *Butyrospermum parkii* (Karité) répandu dans toute la zone soudanaise avec *Terminalia macroptera*, *Pterocarpus ernaceus*, *Cordia africana*, *Parkia biglobosa*, *Khaya senegalensis*, etc.. ainsi que des espèces répandues dans les forêts de la zone guinéenne : *Lophira lanceolata*, *Erythrophleum suaveolens*, *Carapa procera*, *Trema guineensis* etc... De petites galeries forestières se développent le long des cours d'eau.

L'action de l'homme aboutit dans le secteur soudano-sahélien à l'abondance de *Faidherbia* (*Acacia*) *albida* et *Adansonia digitata*, dans le secteur soudanien à l'abondance de *Butyrospermum parkii* et de *Parkia biglobosa*, dans le secteur soudano-guinéen à l'abondance de *Borassus aethiopicum* et *Parkia biglobosa*. Les savanes soudanaises, riches en andropogonées, sont parcourues chaque année par les feux de brousse.

LA ZONE GUINEENNE

La zone guinéenne forme une large auréole sur la bordure nord de la forêt équatoriale où seul nous intéresse le district préforestier dont la pluviosité varie de 1000 à 1800 mm. Parmi les espèces représentatives de ces forêts on peut citer: *Lophira lanceolata*, *Vitex doniana*, *Erythrophleum suaveolens*, *Carapa procera* et *Trema guineensis*. Les forêts se distinguent des savanes boisées soudanaises par des boisements plus denses et par la présence, au bord des cours d'eau, de belles galeries forestières.

En Casamance, subsistent les restes d'une forêt sèche et dense à *Parinari excelsa*, *Erythrophleum suaveolens*, *Detarium senegalense* etc..(AUBREVILLE, 1949). Si le relief est peu marqué dans cette région, il est cependant possible de distinguer différents peuplements végétaux en fonction des faibles variations topographiques : sur les terrasses sableuses une végétation à *Parinari macrophylla*, sur les plateaux des forêts à *Cola cordifolia*, *Daniellia oliveri*, *Khaya senegalensis* et *Trichilia pleurtiana*, dans les bas-fonds des forêts marécageuses à *Pseudospondias microcarpa*.

Une note spéciale doit être faite pour la végétation des sols soumis à l'inondation périodique par des eaux marines dans les estuaires des fleuves de l'Afrique de l'Ouest. Les alluvions récentes du milieu fluvio-marin sont le domaine des palétuviers et d'un cortège d'espèces plus ou moins étroitement associées (VIEILLEFON, 1977). Les premiers appartiennent au groupement de type atlantique, avec principalement *Rhizophora racemosa*, le plus haut des palétuviers de la côte occidentale d'Afrique, *Rhizophora mangle*, plus petit que le précédent mais plus largement réparti, et *Avicennia nitida*, le palétuvier blanc. Le plus souvent, à la mangrove pure, succède une formation plus complexe. Vers l'intérieur, à mesure que diminue la submersion par les marées et que s'accroissent les apports d'eau douce dus aux pluies ou aux inondations venant des cours d'eau, se trouvent associées à la mangrove diverses espèces herbacées : *Paspalum vaginatum*, *Achrosticum aureum*, *Scirpus litoralis*, etc...

Le projet "Casamance" se trouve au contact de la zone de mangrove de l'estuaire du fleuve de même nom. Il appartient à la zone phytogéographique guinéenne. Les projets "Comoé" et "Mali-sud" sont représentatifs du secteur soudano-guinéen, le projet "Siné-Saloum" de la zone soudanaise et le projet "Yatenga" de la zone soudano-sahélienne.

LA MISE EN VALEUR AGRICOLE ET PASTORALE

En zone sahéenne, les habitants sont surtout des éleveurs nomades ayant des troupeaux de bovins et d'ovins. Le bétail broute l'herbe mais aussi les pousses des arbres et des arbustes. L'éleveur coupe les branches des arbres pour nourrir ses animaux. Les bas-fonds sont surtout utilisés comme zones de parcours et les mares, constituées à la faveur de seuils naturels ou aménagés, servent à abreuver le bétail. Les bas-fonds fournissent des fourrages ligneux pendant la saison de soudure et une importante réserve de bois utilisé comme éléments de clôture, charpente ou combustible.

En zone soudanaise, les villages sont fixés et la vie sédentaire est rendue possible par les activités agricoles. Les cultures sont surtout céréalières : mil et sorgho (*Pennisetum typhoides*, *Sorghum*), fonio (*Digitaria exilis*). La culture du riz dans les bas-fonds apparaît dans le nord et devient une spéculation plus importante dans le sud de la zone. Au contact de la zone sahéenne, les systèmes sédentaires et éleveurs nomades cohabitent et sont en concurrence pour l'utilisation des bas-fonds. Les cultures de bas-fonds sont perçues comme une production d'appoint, riz pour les fêtes, ou de sécurité les années sèches : sorgho. Plus au sud, l'aménagement des bas-fonds permet une riziculture plus importante et une production de contre-saison, cultures maraîchères ou seconde récolte de riz. Les corps gras sont fournis par les fruits du karité (*Butyrospermum parkii*), arbre non cultivé mais protégé. Sur les terrains défrichés, certaines espèces sont conservées en raison de leur utilité et arrivent à dominer les paysages : *Acacia albidia* et *Adansonia digitata* dans le secteur soudano-sahélien, *Borassus aethiopum* et *Parkia biglobosa* dans le secteur soudano-guinéen, *Butyrospermum parkii* et *Parkia biglobosa* dans le secteur soudanais.

En zone guinéenne, l'agriculture du district préforestier ressemble à celle de la zone sud-soudanaise avec l'introduction plus importante du riz et du manioc. Les galeries forestières sont longtemps restées des zones non valorisées en raison des endémies et notamment de l'onchocercose ou cécité des rivières. Seuls les bas-fonds des domaines estuariens et des zones très plates, où les vitesses du courant ne permettent pas le développement des larves de mouche, vecteur de la maladie, ont fait l'objet d'une mise en valeur, traditionnellement en riziculture. Avec les programmes de lutte contre l'onchocercose, les bas-fonds de la zone guinéenne deviennent des terroirs intéressants.

Le projet pilote "Yatenga" se trouve en zone nord-soudanaise à la limite du Sahel et donc au contact entre éleveurs et sédentaires. La principale culture est le mil. Les bas-fonds sont traditionnellement réservés à l'élevage, à la cueillette et à la production de bois. Une agriculture marginale de bas-fond a toujours été pratiquée (sorgho, riz...). L'arboriculture et le maraîchage de contre-saison s'y développent activement.

Plus au sud, le projet "Siné Saloum" se trouve dans une zone soudanaise avec comme culture principale le mil et l'arachide. L'élevage est très associé à l'agriculture sédentaire et s'est développé avec la généralisation de la culture attelée. L'utilisation traditionnelle des bas-fonds est la même qu'au Yatenga.

Dans la zone soudano-guinéenne, les projets "Comoé" et "Mali-Sud", comme le projet "Casamance" dans la zone guinéenne, connaissent une occupation de type sédentaire. Les cultures vivrières sont essentiellement le sorgho, le maïs et le riz. Les cultures commerciales sont principalement le coton pour la Comoé et le Mali-sud et l'arachide pour la Casamance. L'arboriculture fruitière et la polyculture de contre-saison prennent de plus en plus d'importance.

REPRESENTATIVITE DES PROJETS PILOTES EN AFRIQUE DE L'OUEST

A partir des divisions de l'Afrique de l'Ouest en ensembles géologiques, en climats, en zones phytogéographiques et en mode d'exploitation agricole il est possible d'établir un tableau représentatif de chaque projet pilote.

Tableau IV : Caractéristiques générales de chaque projet pilote

Projet pilote	Géologie	Climat	Sols	Végétation	Occupation humaine
Yatenga	Formations granitiques métamorphiques précambrien moyen et inférieur.	Nord-soudanien à tendance sahélien	Sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés	Soudano sahélien	Nomades et sédentaires, élevage transhumant, mil
Siné - Saloum	Formations sédimentaires récentes	Soudanien	Sols ferrugineux tropicaux lessivés	Soudanaise	Sédentaires, arachide, mil, sorgho élevage associé
Casamance	Formations sédimentaires récentes	Sub-guinéen maritime	Sols ferrugineux tropicaux lessivés sols ferralitiques	Guinéenne d'estuaire avec palétuviers	Sédentaires, arachide, sorgho, maïs, riz
Mali - Sud	Formations granitiques précambrien moyen et inférieur.	Sud-soudanien, sub-guinéen	Sols ferrugineux tropicaux lessivés sols ferralitiques	Soudano guinéenne	Sédentaires, sorgho, maïs, riz, coton, manioc, pommes de terre
Comoé	Formations granitiques métamorphiques précambrien moyen et inférieur.	Sud-soudanien, sub-guinéen	Sols ferrugineux tropicaux lessivés sols ferralitiques	Soudano guinéenne	Sédentaires, sorgho, maïs, riz, coton, manioc,

Un climat tranché

Pour décrire de manière plus approfondie les facteurs climatiques des cinq sites expérimentaux, nous avons sélectionné soit les données climatologiques directement observées sur le site comme celles de la station de Bidi dans la province du Yatenga, soit les données de la station climatologique la plus proche.

Les stations climatologiques de Ziguinchor en Casamance et Nioro du Rip dans le Siné-Saloum sont situées très près des sites expérimentaux. Celles de Banfora dans la Comoé, Ouahigouya dans le Yatenga et Sikasso au sud du Mali en sont plus éloignées.

En Afrique de l'Ouest, le gradient climatique est de direction Nord-Sud, les différences climatiques sont donc d'autant plus sensibles entre les stations climatologiques et les sites, que l'on se déplace sur des grandes distances vers le nord ou vers le sud pour rejoindre la station climatique la plus proche. Ainsi, des différences climatiques sensibles peuvent être prévues entre le site de Kadiolo et la station climatologique de Sikasso localisée 80 km au nord de Kadiolo, entre le site de Bidi et la station climatologique de Ouahigouya localisée 40 km au sud-est de Bidi.

L'altitude, autre facteur important de différenciation climatique, ne joue aucun rôle dans le climat entre les stations de référence et les régions où sont implantés les 5 sites expérimentaux. Les sites choisis se situent en effet dans des zones de très faible relief.

Tableau V : Localisation géographique des stations climatologiques

Projet	Station climatologique	Latitude Nord en °	longitude Ouest en °	Altitude en m	Direction et distance du site en km
YATENGA	BIDI OUAHIGOUYA	13°55'	02°30'	305	sur le site S-E 40
		13°35'	02°26'	329	
SINE-SALOUM	NIORO du RIP KAOLACK	13°44'	15°47'	18	W 20
		14°08'	16°04'	6	W 100
CASAMANCE	ZIGUINCHOR	12°33'	16°16'	26	S-W 15
MALI-SUD	SIKASSO	11°19'	05°41'	377	N 80
COMOE	BANFORA GAOUA	10°37'	04°46'	270	E 40
		10°20'	03°11'	333	E 220

LES TEMPERATURES

Les fluctuations des températures maximales et minimales moyennes mensuelles sont consignées sur le tableau VI.

Du nord vers le sud, l'écart entre les températures maximales et minimales se réduit, les températures maximales diminuent en saison chaude et les températures minimales augmentent légèrement en saison sèche et fraîche. L'écart maximal entre les températures moyennes les plus fortes et les plus faibles est de 28°C à Bidi, 24°C à Kaolack, 22°C à Sikasso et Ziguinchor.

Les températures maximales annuelles sont supérieures à 40° C dans le Yatenga et le Siné-Saloum, de l'ordre de 37 à 38°C dans les autres régions. Les maxima sont observés pendant le mois d'avril sur l'ensemble des stations à l'exception de Bidi où il sont décalés vers le mois de mai. Les températures minimales sont situées au mois de janvier, de l'ordre de 13.5°C à Bidi et 16°C aux autres stations. Du mois de juillet au mois d'octobre, elles sont toutes remarquablement homogènes et oscillent entre 21 et 24°C. Deux maxima sont observés sur les moyennes mensuelles et les températures maximales; le premier en avril, le second en octobre ou novembre. Le maximum d'avril présente une plus forte amplitude que le second.

L'influence océanique se traduit à Kaolack et à Ziguinchor par une atténuation des maxima et une nette diminution des minima en saison chaude: 19 à 20°C en avril à Ziguinchor et Kaolack, 25.4 et 25.5°C à Sikasso et Bidi.

Tableau VI : Températures mensuelles moyennes, maximales et minimales en degrés C aux stations climatiques de référence

	Type	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
YATENGA	Tx	30.9	34.4	37.7	41.0	41.2	38.1	34.5	33.2	34.5	37.5	36.2	31.8
BIDI	Tm	22.1	25.6	29.3	33.2	34.2	32.4	29.0	28.0	28.8	29.8	27.0	23.6
1987-90	Tn	13.4	16.7	20.9	25.5	27.2	26.7	23.5	22.8	23.1	22.1	17.8	15.3
SINE-SALOUM	Tx	34.0	37.0	39.0	40.0	39.0	37.0	34.0	33.0	33.0	35.0	36.0	34.0
NIOURO DU RIP	Tm	25.0	27.0	29.0	31.0	30.0	30.0	29.0	29.0	28.0	29.0	28.0	25.0
1951-85	Tn	16.0	17.0	19.0	20.0	21.0	24.0	24.0	24.0	23.0	23.0	20.0	17.0
CASAMANCE	Tx	33.4	35.9	37.2	37.4	35.9	33.9	31.8	31.2	31.9	33.4	33.8	32.7
ZIGUINCHOR	Tm	24.8	26.4	27.9	28.5	28.6	28.8	27.6	27.3	27.5	28.2	26.9	24.7
1970-90	Tn	16.0	16.8	19.5	19.5	21.2	23.5	23.4	23.3	23.1	23.0	20.1	16.8
MALI SUD	Tx	33.1	35.6	36.8	38.1	36.8	32.2	30.4	29.1	30.8	33.1	34.6	32.4
SIKASSO	Tm	24.8	27.7	30.3	31.5	30.4	27.2	25.6	24.8	25.5	27.0	27.1	24.8
1987-89	Tn	16.0	19.5	23.2	25.4	25.2	22.5	21.6	21.7	22.0	22.0	19.6	17.4
COMOE	Tx	33.9	36.1	36.8	36.4	34.1	31.5	29.9	29.5	30.4	33.0	34.4	33.5
BANFORA	Tm	26.8	29.2	30.7	30.0	28.8	26.9	25.8	25.4	25.8	27.7	27.1	26.7
1970-1990	Tn	18.0	20.6	22.8	24.0	23.5	22.2	21.6	21.5	21.1	21.0	18.5	17.7

Tx : température maximale moyenne mensuelle

Tm : température moyenne mensuelle

Tn : température minimale moyenne mensuelle

LES VENTS

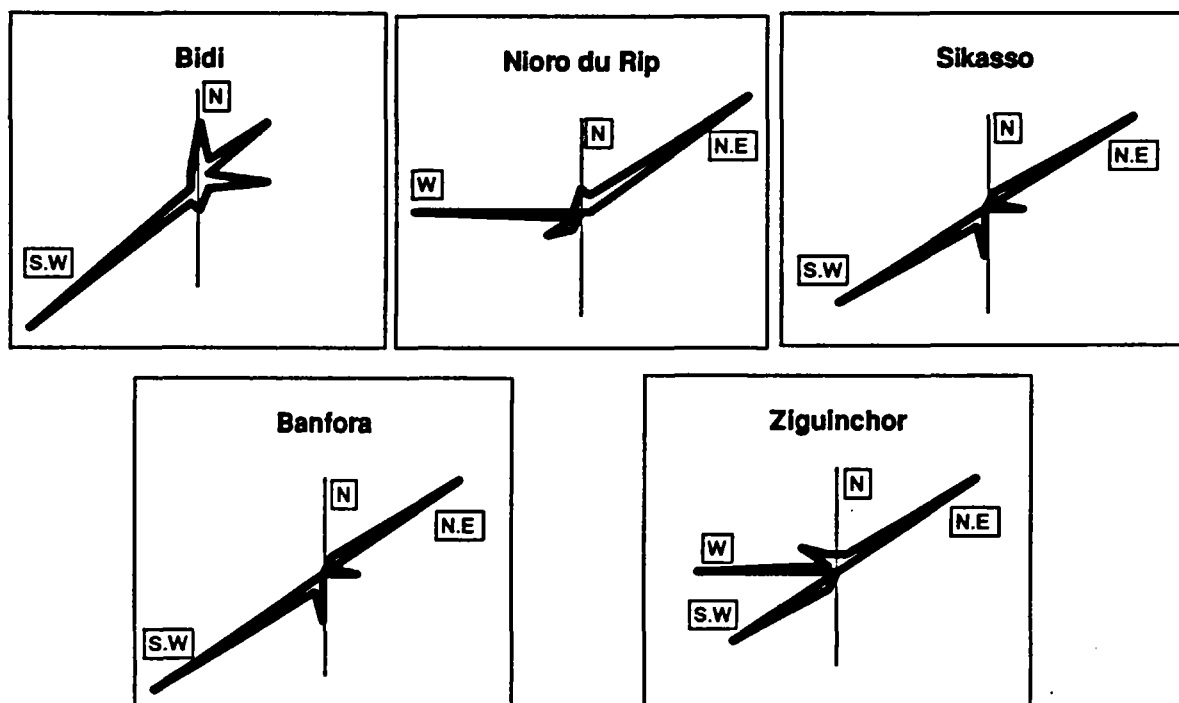
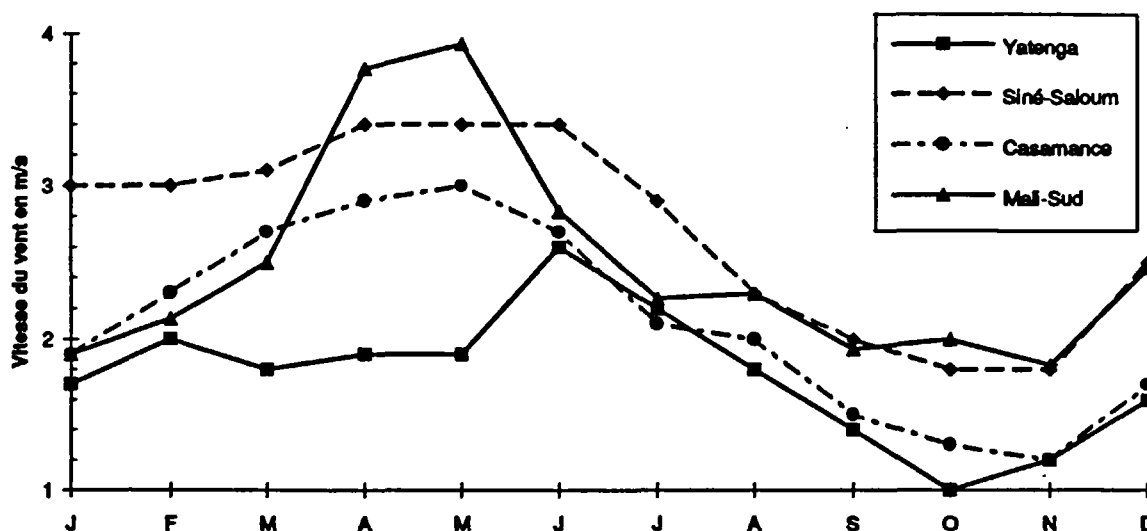
En relation directe avec la circulation générale des masses d'air dans la zone intertropicale, les vents viennent du nord-est en saison sèche dès le mois de novembre sur tous les sites, jusqu'au mois d'avril dans le Yatenga et le Siné-Saloum, jusqu'en mars dans la Comoé et la région de Sikasso et jusqu'en février en Casamance.

Avec l'arrivée du Front Inter-Tropical, les vents viennent du sud-ouest ou du sud à Bidi, Sikasso et Banfora, plutôt de l'ouest ou sud-ouest à Kaolack et Ziguinchor à proximité de la côte atlantique.

Les fluctuations des vitesses moyennes du vent sont reportées sur la figure 5. La tendance générale est à la croissance régulière des vitesses moyennes du vent entre les mois de novembre et d'avril, puis à leur décroissance régulière du mois de juin au mois d'octobre. La station de Bidi fait un peu exception avec une stagnation des vitesses moyennes entre 1.8 et 2 mètres par seconde du mois de février au mois de mai. Les valeurs maximales mensuelles sont les plus fortes à Sikasso et Kaolack (3.9 et 3.4 m/s).

A Bidi et dans toute la zone soudano-sahélienne, les premières pluies en début d'hivernage sont précédées de vents violents chargés de poussières qui soufflent d'est en ouest pendant de courtes durées (0.5 à 1 heure), mais à des vitesses supérieures à 20 m/s.

Figure 5 : Vitesses et directions des vents



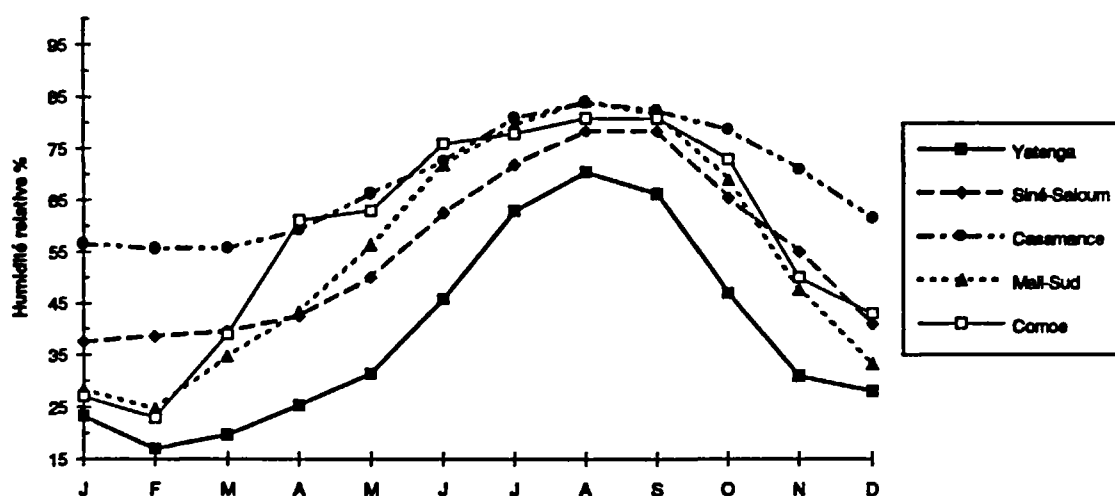
L'HUMIDITE RELATIVE

Les fluctuations des humidités relatives moyennes mensuelles sont reportées sur la figure 6. Les courbes d'humidité présentent toutes un maximum au mois d'août et un minimum en février. Les moyennes mensuelles maximales sont supérieures à 81% à Ziguinchor, Gaoua et Sikasso, proches de 79% à Kaolack et de 71% à Bidi.

Les moyennes mensuelles minimales sont égales à 55.6% à Ziguinchor, 37.5% à Kaolack, 24.7% à Sikasso, 23% à Gaoua et 17% à Bidi. L'influence océanique est donc particulièrement sensible sur les valeurs les plus faibles de l'humidité relative du mois de novembre au mois d'avril.

La période pendant laquelle l'humidité relative est supérieure à 50% dure 5 mois à Bidi, 7 mois à Kaolack et Sikasso, 8 mois à Gaoua et 12 mois à Ziguinchor. A l'exception de Ziguinchor, cette période correspond sensiblement à la durée de la saison des pluies.

Figure 6 : Humidité relative en %



LA PLUVIOMETRIE

LA PLUVIOMETRIE ANNUELLE ET SES FLUCTUATIONS

Pour étudier les fluctuations pluviométriques annuelles, nous avons choisi d'effectuer une étude statistique sur deux périodes distinctes : 1922-1969 et 1970-1990.

Depuis une vingtaine d'années, l'Afrique de l'Ouest connaît en effet une longue période sèche sans équivalent dans la chronique des précipitations observées et il nous a paru intéressant de caractériser cette période en la comparant à celle qui la précède (COUREL, 1984, CARBONNEL & HUBERT, 1985, SIRCOULON, 1985 & 1986).

Les résultats de l'étude statistique sont consignés dans le tableau VII où sont reportées les pluviométries annuelles médianes, décennales sèches et décennales humides sur les deux périodes de référence pour les cinq stations climatologiques représentatives du climat des cinq sites expérimentaux.

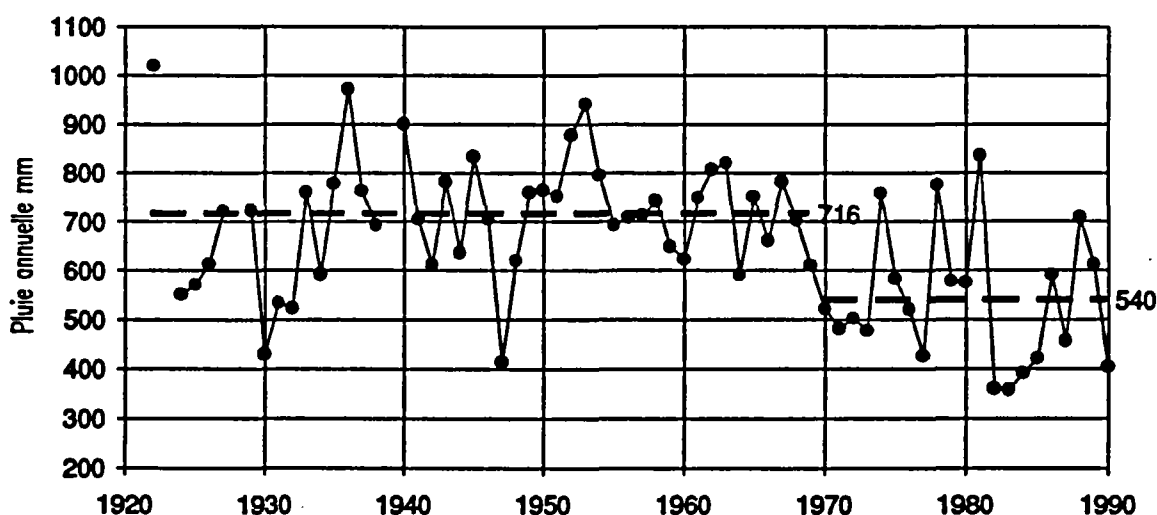
Tableau VII : Pluviométries annuelles en mm aux stations climatiques de référence

STATION	décennale sèche		médiane		décennale humide	
Période	70-90	22-69	70-90	22-69	70-90	22-69
OUAHIGOUYA	375	564	540	716	725	869
NIORO du RIP	469	660	635	900	878	1127
BANFORA	756	961	982	1197	1166	1501
SIKASSO	857	1069	1067	1288	1326	1623
ZIGUINCHOR	859	1194	1173	1564	1425	1933

Ce tableau montre que la pluviométrie annuelle médiane sur la période 1970-1990 correspond à la pluviométrie décennale sèche de la période 1922-1969. L'écart entre les valeurs médianes est considérable. Il augmente avec le total pluviométrique annuel: de 176 mm à Ouahigouya, il passe à 220 mm à Banfora et Sikasso et 390 mm à Ziguinchor.

Cet écart se maintient entre les valeurs décennales sèches des deux périodes et s'accroît entre les pluviométries annuelles décennales humides. La figure 7 montre la différence entre la moyenne calculée sur les périodes 1922-1969 et 1970-1990 au poste de Ouahigouya.

Figure 7 : Pluviométrie annuelle et moyennes calculées sur les périodes 1922-1969 et 1970-1990 au poste de Ouahigouya.



Les effets de la sécheresse actuelle ne se font donc pas sentir uniquement dans la zone sahélienne, mais dans toute l'Afrique de l'Ouest où les paysans doivent s'adapter aux nouvelles conditions climatiques en introduisant de nouvelles variétés de plantes cultivées ou en modifiant leurs techniques culturales. Dans le Yatenga, la sécheresse se traduit par la précarité de la culture sèche traditionnelle du mil dont le cycle végétatif dure 90 jours et qui ne peut se développer sous une pluviométrie annuelle inférieure à 350 millimètres. En Casamance, la sécheresse se traduit par la sur-salure des terres des bas-fonds soumis aux influences de la marée, à leur abandon par les agriculteurs et à la destruction des mangroves, forêts naturelles qui bordent les bas-fonds.

LES PLUVIOMETRIES MAXIMALES

Les pluviométries journalières maximales

Dans le cadre de l'étude des crues exceptionnelles pour la protection des aménagements hydro-agricoles et routiers, une analyse statistique des pluies journalières maximales annuelles a été réalisée aux stations de référence et des intensités pluviométriques maximales en 5, 15, 30 et 60 minutes.

Pour les stations de Ouahigouya et Banfora, les résultats de l'étude statistique des intensités pluviométriques sont extraits des travaux de Y. BRUNET-MORET(1963).

La comparaison des pluies journalières maximales observées sur les période 1922-1969 et 1970-1990 ne permet pas de conclure à une diminution des valeurs maximales de fréquence rare. Si la période sèche actuelle se traduit par une diminution très nette du nombre de pluies journalières (J. ALBERGEL, 1986), les valeurs maximales aux périodes de retour égales et supérieures à 10 ans n'en semblent pas affectées (Tableau VIII).

La tendance générale est à la croissance des valeurs maximales journalières avec la hauteur pluviométrique annuelle mais cette tendance n'est pas régulière, les valeurs observées à Nioro du Rip et à Ziguinchor étant plus fortes que les autres et les valeurs observées à Sikasso étant plus faibles.

Tableau VIII : Pluviométries journalières maximales en mm aux stations climatiques de référence

STATION	Période de retour en années					
	2	5	10	20	50	100
OUAHIGOUYA	59	83	100	117	139	155
NIORO du RIP	84	102	116	130	149	164
BANFORA	93	101	114	128	145	159
SIKASSO	81	104	122	139	160	176
ZIGUINCHOR	115	140	160	177	203	222

Intensités pluviométriques maximales

En ce qui concerne les intensités pluviométriques maximales, les valeurs sont assez proches d'une station à l'autre, à l'exception de Nioro du Rip où les intensités de pluies sont nettement plus fortes qu'ailleurs et de Sikasso où elles sont nettement plus faibles (Tableau IX).

Tableau IX : Intensités pluviométriques maximales en 5, 15, 30 et 60 mn en mm/h

STATION	périodes de retour en années	Intensités en mm/h			
		5mn	15mn	30mn	60mn
OUAHIGOUYA	2	178	103	72	48
	5	204	116	83	58
	10	224	124	91	65
NIORO du RIP	2	200	104	84	59
	5	223	124	101	72
	10	243	139	112	82
SIKASSO	2	150	95	68	49
	5	180	109	77	54
	10	198	114	82	58
BANFORA	2	165	96	67	49
	5	192	110	78	55
	10	214	120	86	61
ZIGUINCHOR	2	184	102	72	52
	5	205	115	82	59
	10	223	128	90	64

LA PLUVIOMETRIE ET L'ÉVAPO-TRANSPIRATION

Pluviométrie et évapo-transpiration mensuelles

Nous avons consigné sur le tableau X les pluviométries moyennes mensuelles calculées sur la dernière période sèche 1970-1990, les évaporations mensuelles et les évapo-transpirations potentielles mensuelles exprimées en millimètres. Les évapo-transpirations potentielles ont été calculées selon la formule de Penman avec un albédo correspondant à un couvert végétal dense ($\alpha=0.25$). A la station de Bidi, les pluies mensuelles correspondent à la période 1985-1990, 1985 étant l'année du début des observations à cette station.

La saison des pluies commence en juin dans le Yatenga, le Siné-saloum et la Casamance, en avril dans la Comoé et dans la région de Sikasso. Elle est terminée en octobre dans le Yatenga, en novembre sur les autres sites. Le mois d'août est le mois le plus pluvieux: il concentre à lui seul 25% de la pluviométrie de Sikasso et jusqu'à 37% de la pluviométrie annuelle à Nioro du Rip, 39% à Bidi. A Ziguinchor, Nioro du Rip et Bidi, les mois de juillet, août et septembre totalisent environ 85% de la pluviométrie annuelle.

Sur l'ensemble des 5 sites expérimentaux, le climat est donc bien caractérisé par une saison des pluies dont la durée décroît du sud vers le nord: elle est de 7 mois à Sikasso et Banfora, 5 mois à Ziguinchor et Nioro du Rip, 4 mois à Bidi. La valeur de la pluviométrie annuelle décroît elle aussi de manière très nette du sud vers le nord avec un gradient pluviométrique de 1 à 2 mm par kilomètre. L'influence océanique se traduit par une remontée des isohyètes interannuelles en latitude quand on se déplace d'est en ouest. Ziguinchor, situé 2° plus haut en latitude que Banfora, reçoit en moyenne 160 à 360 mm de pluies supplémentaires par an.

Tableau X : Pluviométries, évaporations et évapo-transpirations mensuelles en mm aux stations climatiques de référence

	Type	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	An
YATENGA	P	0.0	0.0	0.0	7.0	5.6	38.7	136.4	177.9	77.6	16.7	0.0	0.0	459.9
BIDI	E	279	322	425	459	449	369	291	226	228	282	285	273	3888
1985-90	ETP	146	165	201	213	241	225	196	186	174	176	153	143	2221
SINE-SALOUM	P	0.0	0.5	0.0	0.0	3.2	52.1	139.1	233.0	155.6	49.5	0.5	0.5	634.0
NIORO DU RIP	E	260	241	335	309	301	288	245	202	210	236	201	220	3048
1970-90	ETP	183	186	254	258	248	198	180	158	144	161	150	155	2275
CASAMANCE	P	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	89.0	295.0	379.0	288.0	78.0	6.0	2.0	1143.0
ZIGUINCHOR	E	233	246	285	279	272	226	194	174	177	195	198	208	2687
1970-90	ETP	123	135	182	183	179	145	123	110	115	128	125	111	1659
MALI SUD	P	0.0	7.0	13.0	40.0	92.0	134.0	219.0	273.0	200.0	75.0	13.0	2.0	1068.0
SIKASSO	E	189	-	-	-	221	162	121	108	73	96	109	146	-
1970-90	ETP	158	174	208	189	198	165	149	127	117	121	126	143	1875
COMOE	P	2.0	8.6	15.7	60.0	98.0	115.7	168.4	265.0	170.5	56.0	18.0	4.3	982.2
BANFORA														

P : pluie moyenne mensuelle en mm

E : évaporation mensuelle mesurée au bac colorado en mm

ETP : évapo-transpiration potentielle mensuelle calculée avec la formule de PENMAN en mm avec albédo = 0.25 pour couvert végétal

L'ETP calculée par la formule de Penman avec un albédo de 0.25 correspond à l'évaporation d'un couvert végétal dense bien alimenté en eau. Sur l'ensemble des 5 stations climatologiques, l'ETP mensuelle est maximale de mars à mai, supérieure à 200 mm à Bidi et Nioro du Rip, supérieure à 170 mm à Sikasso et Ziguinchor. A l'exception de Bidi, elle est minimale sur l'ensemble des autres stations d'août à octobre, inférieure à 160 mm à Nioro du Rip, inférieure à 125 mm à Sikasso et Ziguinchor. A Nioro du Rip et Ziguinchor les faibles valeurs de l'ETP se prolongent jusqu'en janvier. A Bidi, dans le Yatenga, les valeurs les plus faibles, inférieures à 160 mm, sont observées de novembre à janvier.

En première approximation, on peut considérer que les cultures se développent sans irrigation quand la pluviométrie mensuelle est supérieure à la moitié de l'ETP et qu'elles souffrent de déficit hydrique à la fin de leur cycle végétatif quand la pluviométrie mensuelle est inférieure à l'ETP. En appliquant ce principe sommaire, on constate que la période favorable aux cultures s'étend de juillet à septembre (90 jours) dans le Yatenga et le Siné-Saloum, de mai à septembre (150 jours) à Sikasso et Banfora, de juin à septembre (120 jours) à Ziguinchor.

Pluviométrie et évapo-transpiration décadaire

En l'absence d'irrigation, le régime des pluies apparaît comme l'élément déterminant qui conditionne la production agricole. La durée de l'alimentation hydrique des cultures en fin de saison des pluies dépend de la réserve en eau du sol sur une épaisseur correspondant à la profondeur d'enracinement. Compte tenu de son faible enracinement, 30 à 50 cm de profondeur, le riz est une plante très sensible aux aléas pluviométriques. Or l'utilisation des moyennes pluviométriques gomme complètement le caractère aléatoire des chutes de pluie.

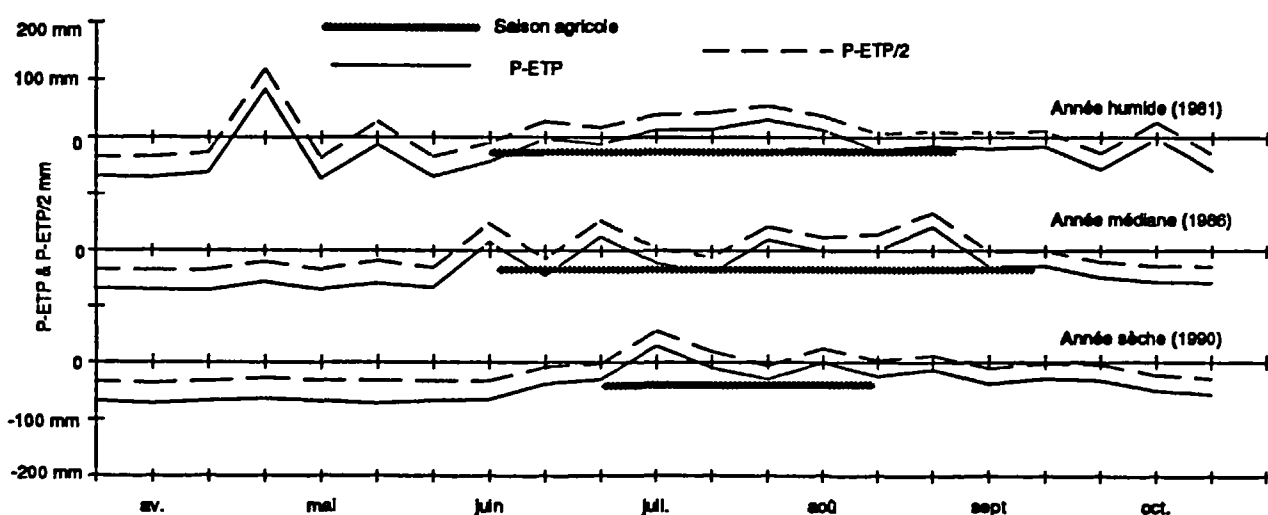
Afin d'apprécier l'effet du caractère aléatoire des précipitations sur les cultures, nous avons choisi le riz pluvial comme culture test et nous avons sélectionné sur la période sèche 1970-1990 trois années correspondant, pour chaque station climatologique de référence, à une pluviométrie annuelle décennale sèche, une pluviométrie annuelle médiane et une pluviométrie annuelle décennale humide.

Nous avons ensuite comparé les pluies décadaires aux valeurs de l'ETP en considérant que la levée des jeunes plants de riz était possible dès que la pluviométrie décadaire dépassait la moitié de l'évapo-transpiration potentielle sans sécheresse ultérieure de plus d'une décade. En fin de cycle cultural, nous avons considéré que les besoins hydriques du riz pluvial étaient satisfaits dans la décade qui suivait la dernière décade au cours de laquelle la pluviométrie dépassait la valeur de l'ETP, ce qui revient à allonger de 10 jours le cycle cultural après l'arrêt des fortes pluies (SERPANTIE, 1992).

Projet Yatenga

Les résultats de ces comparaisons montrent qu'à Ouahigouya , la période favorable à la riziculture pluviale n'est que de 50 jours en 1990 (année décennale sèche), de 95 jours en 1986 (année médiane) et de 85 jours en 1981 (année décennale humide). La durée du cycle végétatif du riz pluvial au Yatenga étant de 90 jours, cette comparaison montre que pour une année décennale humide de la période 1970-1990, le succès de cette culture n'est pas absolument garanti et dépend encore de la répartition temporelle des précipitations (Figure 8).

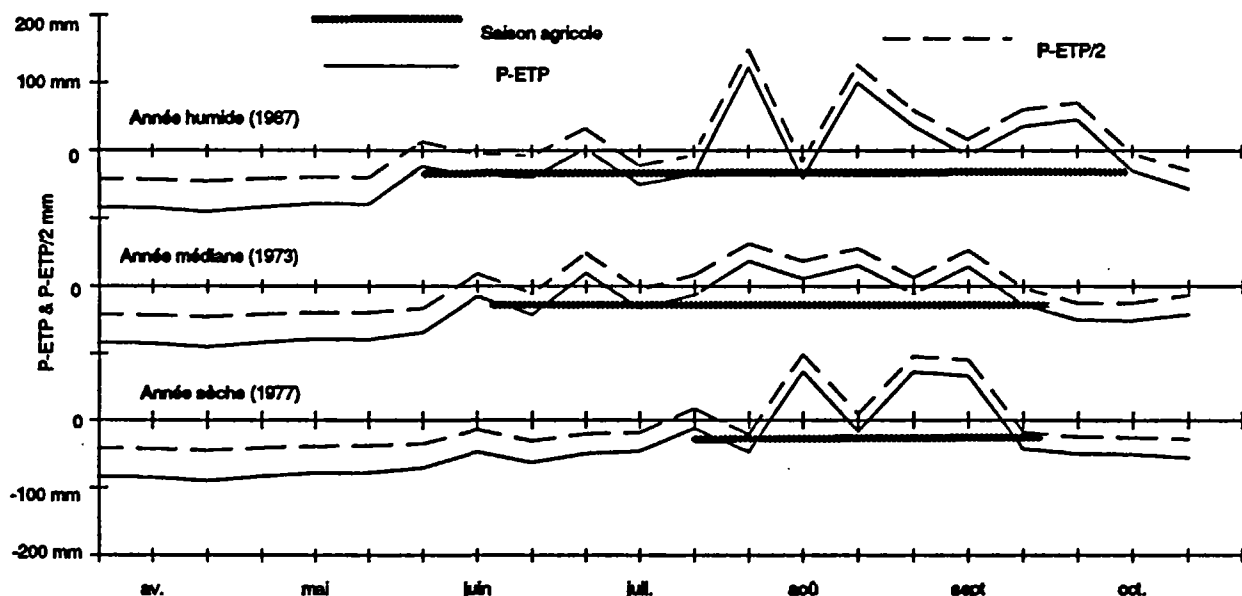
Figure 8 : Définition de la saison agricole dans le Yatenga pour un riz pluvial



Projet Siné-Saloum

A Nioro du Rip, la période favorable à la riziculture pluviale a été de 70 jours en 1977 (année décennale sèche), de 110 jours en 1973 (année médiane) et de 160 jours en 1987 (année décennale humide). Dans le Siné-Saloum, pour des cycles végétatifs de 90 jours, la satisfaction naturelle des besoins hydriques du riz est assurée en moyenne 4 années sur cinq (Figure 9).

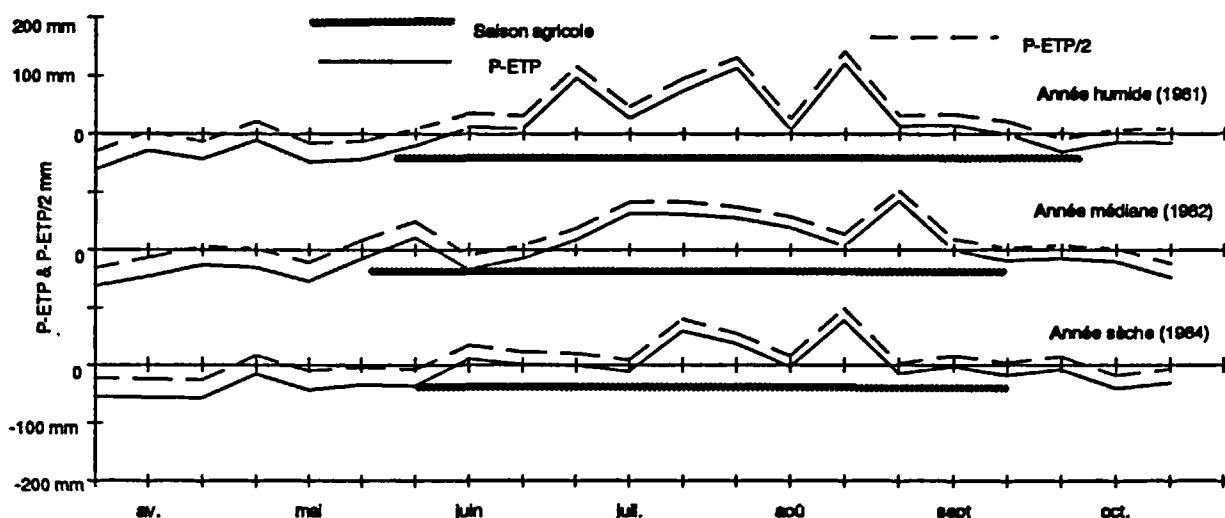
Figure 9 : Définition de la saison agricole dans le Sine-Saloum pour un riz pluvial



Projet Mali-Sud

A Sikasso, la période favorable à la riziculture pluviale est longue de 100 jours en 1984 (année décennale sèche), de 130 jours en 1982 (année médiane) et en 1981 (année décennale humide). Pour des cycles végétatifs de 120 jours, la région de Sikasso se retrouve donc à peu près dans la même situation que Nioro du Rip où les cycles végétatifs sont de 90 jours. (Figure 10).

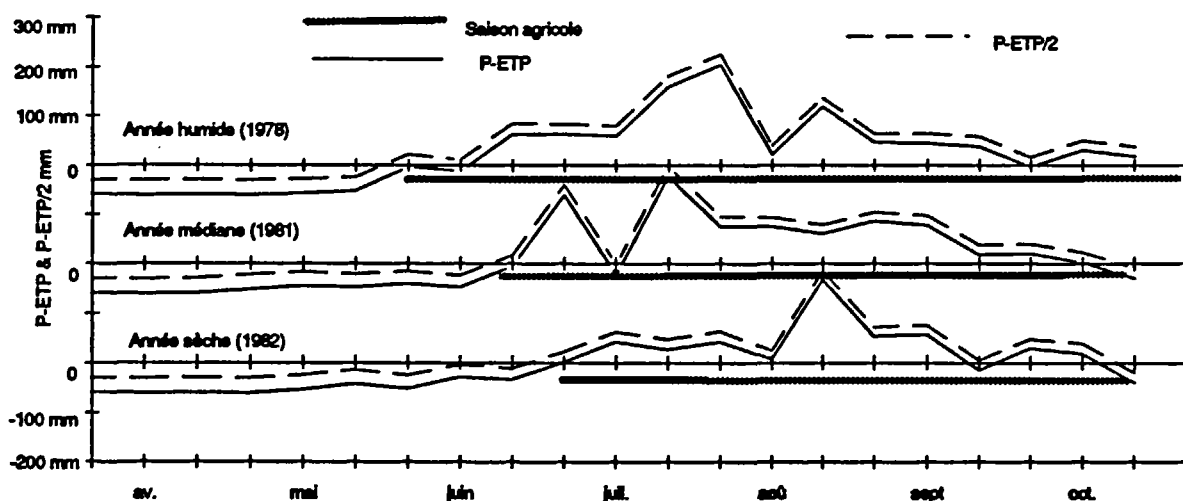
Figure 10 : Définition de la saison agricole au Mali-Sud pour un riz pluvial



Projets Comoé et Casamance

Pour les autres stations, Banfora et Ziguinchor, la période favorable aux cultures du riz pluvial est, dans tous les cas, égale ou supérieure à 120 jours pour les 3 années sélectionnées, de l'année décennale sèche à l'année décennale humide (Figure 11).

Figure 11 : Définition de la saison agricole en Casamance pour un riz pluvial



La sécheresse des vingt dernières années, en augmentant le caractère aléatoire des précipitations, accentue la précarité des cultures même dans les régions assez arrosées comme le Siné-Saloum et le sud du Mali. Cette précarité est d'autant plus prononcée que l'on s'approche de la zone sahélienne.

Une hydrographie diversifiée sur un vieux socle pénéplané

Les bas-fonds sont alimentés en eaux superficielles par les ruissellements et les écoulements souterrains qui proviennent des bassins versants situés topographiquement en amont. Il est donc essentiel d'associer à toute étude hydrologique les descriptions des bassins versants permettant de comprendre la relation qui existe entre le fonctionnement hydrologique des bas-fonds et leur environnement, ceci du point de vue topographique, morphométrique, physiographique et hydrographique (ALBERGEL, 1988 - ALBERGEL & CLAUDE, 1988).

LES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES BASSINS VERSANTS

Les superficies des bassins versants sont celles qui correspondent aux lignes de crête ou aux lignes de partage des eaux qui délimitent la direction des écoulements superficiels entre bassins versants. Elles peuvent différer sensiblement des surfaces fonctionnelles, c'est à dire des surfaces qui participent effectivement au ruissellement. Ainsi, sur les bassins versants de Gourga et de Roulgou Toega dans le Yatenga, de Ndiba et Keur Samba Diama dans le Siné-Saloum, des parties non négligeables des bassins versants sont endoréiques ou semi-endoréiques. Pour ces cas particuliers, il faudrait envisager des corrections de superficie ou développer la notion de bassin versant à "géométrie variable". Nous nous sommes contentés ici de conserver les bassins versants dans leur intégralité physique.

L'indice de compacité est l'indice de Gravelius, communément utilisé par les hydrologues pour caractériser la forme plus ou moins compacte ou allongée du bassin versant. Il est calculé par la formule :

$$I_c = \frac{P}{2\sqrt{\pi s}} \quad \text{où } P \text{ est le périmètre du bassin en km et } s \text{ la surface du bassin en km}^2$$

Pour un cercle $I_c = 1$; pour un carré $I_c = 1.13$; pour un rectangle deux fois plus long que large $I_c = 1.20$; pour un rectangle trois fois plus long que large $I_c = 1.30$.

La longueur du rectangle (L) équivalent correspond à l'une des racines de l'équation :

$$x^2 - \frac{P}{2}x + s = 0$$

Lorsque l'équation n'a pas de racine, le bassin est plus compact qu'un carré ($I_c < 1.13$). On suppose alors que le bassin est un carré et l'on prend L égal à \sqrt{s} afin de pouvoir calculer l'indice de pente global (Ig).

L'indice de pente global (Ig) est égal à la dénivelée globale du bassin versant divisée par la longueur du rectangle équivalent. La dénivelée globale est déterminée en effectuant la différence entre l'altitude qui laisse 5% de la superficie du bassin versant au-dessus d'elle et l'altitude qui laisse 5% de la superficie du bassin versant au-dessous. Compte tenu de la disparité des superficies des bassins expérimentaux, il nous est apparu nécessaire de normaliser les indices de pente globaux en utilisant la table de conversion proposée par P. DUBREUIL (1972). L'indice de pente normalisé Ig25 est égal au produit de l'indice global de pente par un coefficient K, fonction de la superficie du bassin; K=1 pour une superficie de 25 km².

Table de conversion de Dubreuil (Ig25 = KIg)

S en km ²	5	10	25	50	100	250	500
Coefficient K	0.50	0.66	1.00	1.33	2.00	2.85	4.00

L'indice des pentes transversales (IT) est déterminé en prenant la moyenne des pentes transversales du bassin, mesurées sur 60% de la longueur des versants. Cet indice est utilisé pour corriger l'indice global de pente quand les pentes transversales sont nettement plus fortes que les pentes longitudinales.

L'expression de l'indice de pente prend alors la forme : $I_{gcor} = (Ig25 + IT) / 2$

A l'aide de l'indice de pente global corrigé (I_{gcor}), il est alors possible de répertorier tous les bassins versants dans une même classification proposée par P. DUBREUIL (1972); pour les bassins versants de 25 km²:

classe de relief (RODIER & AUVRAY)	Indices de pentes corrigés
R1	I _{gcor} < 2 m/km
R2	2 < I _{gcor} < 5 m/km
R3	5 < I _{gcor} < 10 m/km
R4	10 < I _{gcor} < 20 m/km
R5	20 < I _{gcor} < 50 m/km
R6	50 < I _{gcor} < 100 m/km
R7	I _{gcor} > 100 m/km

Pour tenir compte des différences fréquentes entre l'indice de pente global normalisé et l'indice corrigé et de la position de I_{gcor} par rapport à la valeur moyenne de la classe, nous avons adopté les notations suivantes:

- R2+ : classe de relief R2 avec I_{gcor} proche de 5 (R2 fort)
- R3- : classe de relief R3 avec I_{gcor} proche de 5 (R3 faible)
- R2-R3: classe de relief R2 avec Ig25 , classe de relief R3 avec I_{gcor}.

L'intérêt de cette classification est de permettre de situer les bassins versants du programme bas-fonds parmi les nombreux bassins versants où les données hydrologiques ont été collectées depuis une quarantaine d'années dans toute l'Afrique tropicale.

Les caractéristiques morphométriques et topographiques des bassins versants sont consignées dans le tableau XI.

Tableau XI : Caractéristiques morphométriques et topographiques des bassins versants

Bassins	s en km ²	I _c	a max	a min	L en km	Ig25 m/km	IT m/km	Igcor m/km	Classe de relief
YATENGA									
GOURGA TILLI	45.0	1.31	372	315	12.0	3.9	4.7	4.3	R2+
ROULGOU TOEGA	95.0	1.24	372	298	15.0	5.7	5.6	5.6	R3-
AMENE	157	1.30	372	294	22.0	4.3	5.0	4.7	R2+
SINE-SALOUM									
NDIBA	16.2	1.17	46	19	5.4	3.3	10.0	6.6	R2-R3
KEUR SAMBA DIAMA	75.6	1.13	46	20	13.0	2.9	7.4	5.1	R3
COMOE									
KAWARA	99.8	1.26	493	291	16.0	16.4	20.0	18.2	R4
DAMANA	104	1.18	360	280	14.0	5.2	10.0	7.6	R3
MOADOUGOU	112.0	1.24	370	310	20.0	5.0	14.0	9.5	R3
MALI SUD									
KAMBO amont	4.7	1.23	342	325	3.4	2.0	24.0	13.0	R2-R4
KAMBO barrage	10.0	1.42	342	320	6.5	1.9	24.0	13.0	R2-R4
CASAMANCE									
LE BRUSQ	2.56	1.12	23	2	1.6	4.0	12.0	11.0	R2-R4
DJIGUINOUM	16.8	1.13	25	0	4.6	4.2	12.0	8.1	R2-R3
DJILAKOUN	24.2	1.19	25	0	7.0	3.4	12.0	7.7	R2-R3

S : superficie du bassin versant en km²

a max : altitude maximale en mètres

L : longueur du rectangle équivalent

IT : pente transversale moyenne en m/km

I_c : indice de compacité

a min : altitude minimale en mètres

Ig25 : indice global de pente normalisée en m/km

Igcor : (Ig25 + IT)/2 indice de pente corrigé en m/km.

Les bas-fonds étudiés drainent des bassins versants dont les superficies sont comprises entre 2.5 km² pour le bassin de la vallée Le Brusq en Casamance et 157 km² pour le bassin versant du barrage d'Améné au Yatenga. Certains projets ont choisi une gamme de bassins versants emboîtés, d'autres comme les projets Comoé et Siné-Saloum ont choisi de sélectionner des bas-fonds drainant des bassins versants de même superficie ou de superficies différentes.

Le bassin versant de Djiguinoum en Casamance est le plus compact. Sa forme se rapproche le plus de celle du carré. Les bassins versants de Djilakoun en Casamance, de Moadougou dans la Comoé, de Keur Samba Diama dans le Siné-Saloum et de Roulgou Toega dans le Yatenga ont la forme d'un rectangle 2 fois plus long que large. Les bassins versants de Gourga et Améné dans le Yatenga, de Kawara dans la Comoé ont une forme qui se rapproche d'un rectangle 3 fois plus long que large et le bassin versant de Kambo au droit du barrage possède un bassin versant très allongé dont la longueur dépasse 4 fois la largeur.

Les altitudes extrêmes des bassins versants restent comprises entre 280 et 372 mètres pour les bassins versants du Yatenga, de la Comoé et du Mali sud, si l'on excepte le bassin de Kawara. Les bassins versants de la Casamance ont des altitudes comprises entre 0 et 25 mètres, ceux du Siné-Saloum entre 19 et 46 mètres.

Par sa position à cheval sur des formations gréseuses du précambrien supérieur, qui constituent un plateau dont l'altitude moyenne est de 520 m au nord de la Comoé, le bassin versant de Kawara possède un relief nettement plus accusé que les autres bassins versants (classe R4).

La plupart des autres bassins versants appartiennent à la classe R2 mais possèdent des pentes transversales qui les situent dans la classe R3 ou même R4 pour les plus petits comme les bassins de Kambo et Le Brusq. Les bassins versants du projet Comoé présentent un relief légèrement plus accentué: classe R3 pour le bassin de Damana, classe R3-R4 pour celui de Moadougou.

LES RESEAUX HYDROGRAPHIQUES

L'aspect du réseau hydrographique, sa hiérarchisation et la position des confluences influent très fortement sur la formation des crues. La forme du lit majeur, sa largeur, sa pente et sa capacité de stockage influent sur leur propagation. La caractérisation du réseau hydrographique a donc pour objectif de préciser les conditions de formation des fortes crues et de faciliter la comparaison des paramètres hydrologiques conditionnant leur forme, c'est à dire le temps de base qui correspond à la durée du ruissellement pur et le coefficient de pointe, rapport du débit maximum au débit moyen. Chaque bassin versant ayant ses propres caractéristiques hydrographiques, nous avons choisi de les décrire individuellement.

Bas-fond de Bidi, projet Yatenga :

Le réseau hydrographique (figure 22, p.77) présente ici une orientation tectonique. Dans sa partie amont, sur le bassin versant de Gourga, le réseau hydrographique est radial avec la confluence de 3 affluents d'inégale importance. Dans sa partie médiane, de Gourga à Roulgou Toega, le réseau hydrographique est en arête en rive droite, semi-endoréique en rive gauche. Dans sa partie aval, en amont du barrage d'Améné, le réseau redevient partiellement radial avec la confluence au même point de 2 affluents importants. Le lit majeur du marigot est large de 50 à 100 mètres, sans lit mineur en amont avec une pente longitudinale de 9 m/km. Il s'élargit jusqu'à atteindre 200 à 300 mètres en aval, mais se rétrécit brutalement au passage d'affleurements cuirassés. Le lit mineur, bien marqué dans la partie médiane et aval, se transforme localement en mares qui se maintiennent en eau pendant toute la saison des pluies. Sa pente longitudinale est de 2 m/km dans la partie médiane, 0.7 m/km après Roulgou Toega (LAMACHERE & al, 1991).

Bas-fonds du Siné-Saloum :

Le bassin versant de Ndiba présente un réseau hydrographique dendritique bien hiérarchisé en amont avec une tendance radiale et disposé en arête dans sa partie aval. Le lit du marigot est plat, faiblement concave dans la partie amont, très marqué avec des lits majeur et mineur très encaissés dans leur partie aval où la pente longitudinale est de 3 m/km (ALBERGEL & al, 1991).

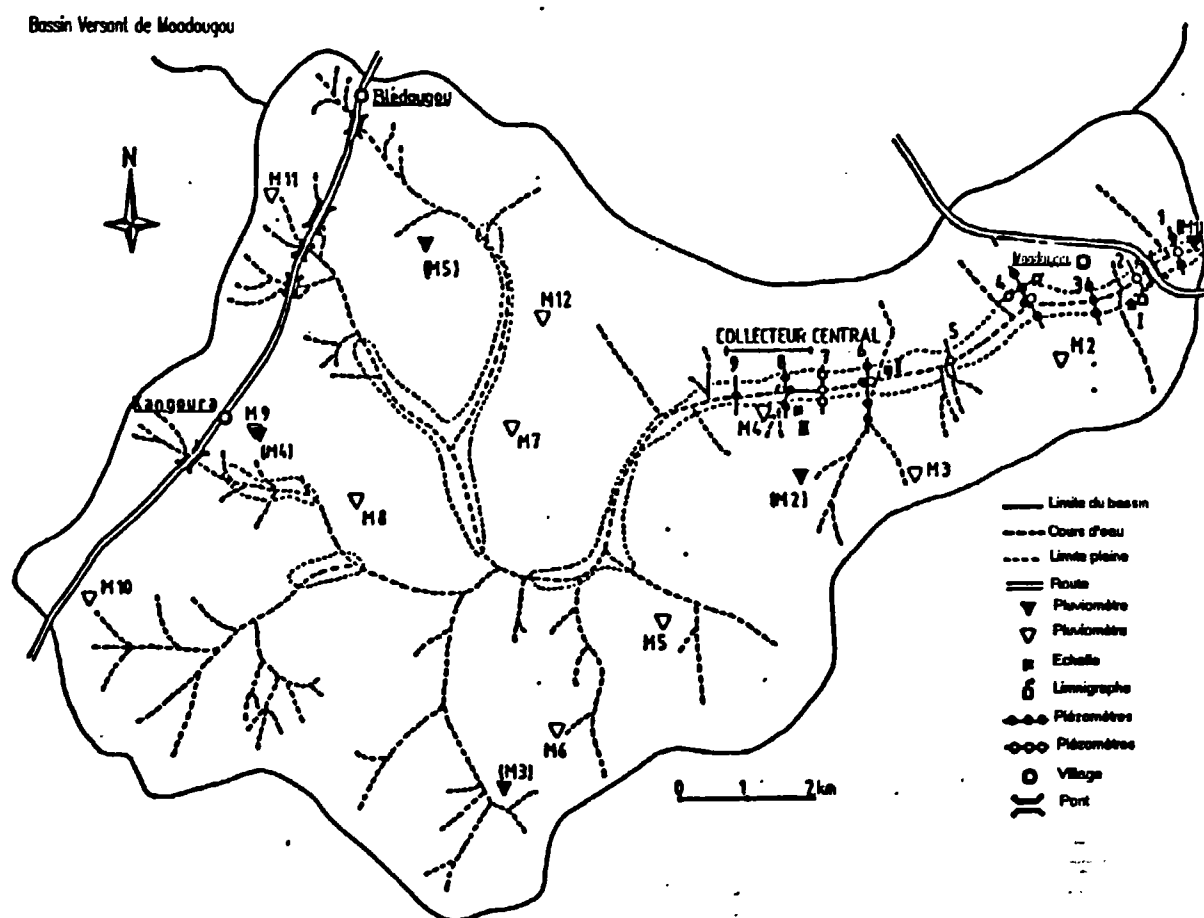
Le réseau hydrographique du bassin versant de Keur Samba Diama est disposé en arête avec des affluents plus importants en rive gauche et une tendance radiale dans sa partie aval. Le lit du marigot présente à peu près les mêmes caractéristiques que celui de Ndiba avec une largeur plus importante et des chapelets de mares dans sa partie aval où la pente varie entre 1.3 et 4 m/km.

Bas-fonds de la Comoé :

Le bassin versant de Damana possède un réseau hydrographique dendritique bien hiérarchisé sans lit mineur avec un lit majeur à fond plat bien encaissé d'une largeur de 200 mètres en amont, 400 mètres à l'aval. Le réseau hydrographique du bassin versant de Kawara est radial en amont avec 2 points de confluence distincts et disposé en arête en aval, sur une courte distance (3 km). Le lit majeur est à fond plat d'une largeur de 100 à 300 mètres sans lit mineur avec une pente longitudinale de l'ordre de 2 m/km.

Le réseau hydrographique du bassin versant de Moadougou est radial en amont avec une tête de bassin hypertrophiée et un tronçon aval en arête sur une longueur de 10 kilomètres. Le lit majeur est étroit, large de 100 à 200 mètres, avec un lit mineur bien marqué rendu rectiligne par l'aménagement de sa partie aval. La pente longitudinale du bas-fond est de l'ordre de 1.2 m/km. La figure 12 montre le réseau hydrographique du bassin de Moadougou (CIEH, 1992).

Figure 12 : Réseau hydrographique du bassin de Moadougou



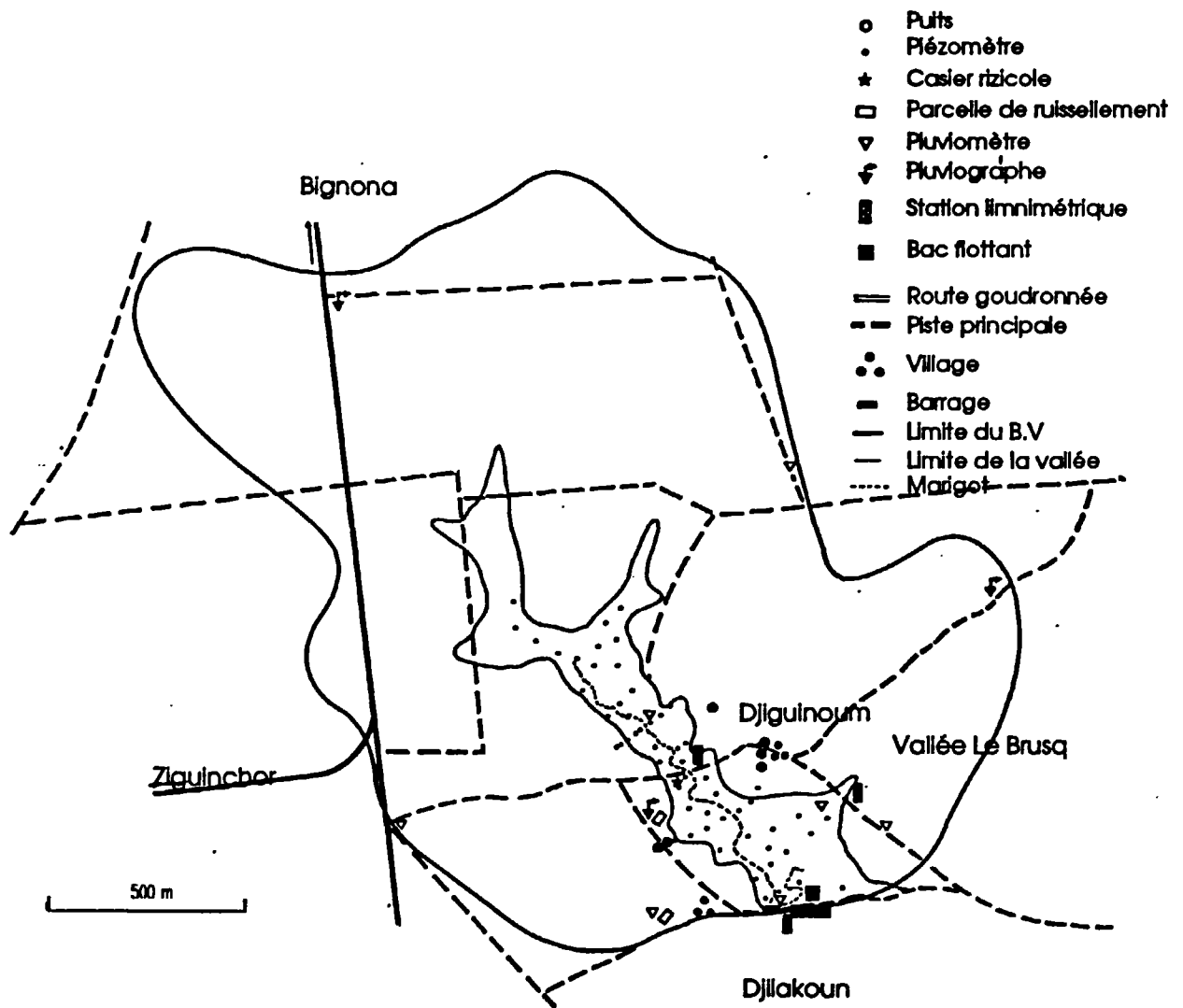
Bas-fond de Kambo, projet Mali sud :

Le petit bassin versant de Kambo est très allongé; son réseau hydrographique est disposé en arête; le lit majeur y est plat, large d'une centaine de mètres, sans lit mineur avec une pente moyenne de 2.5 m/km (GUIGUEN, 1991).

Bas-fond de Djilakoun, projet Casamance:

Le bassin versant de Djilakoun est marqué par l'absence d'un réseau hydrographique constitué, lequel reste tronqué au bas-fond qui se subdivise en petits rameaux spatulés. Le lit mineur du bas-fond est bien marqué sous l'influence des flux et reflux de la marée dans sa partie aval. La figure 13 montre le réseau hydrographique du bassin de Djilakoun (ALBERGEL & al 1991).

Figure 13 : Réseau hydrographique du bassin de Djilakoun.



LES CARACTERISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES

La description physiographique détaillée des bassins versants permet de déterminer leur aptitude au ruissellement et de définir différentes aires contributives de l'écoulement. Les sites expérimentaux du Yatenga et du Siné-Saloum ont bénéficié d'une description physiographique complète de leur bassins versants selon la méthode de caractérisation des états de surface proposée par A. CASENAVE ET C. VALENTIN (1989). Les autres sites expérimentaux n'ont fait l'objet que de descriptions partielles sous la forme de cartes pédologiques, de cartes des formations végétales et de l'occupation des sols. Pour homogénéiser la présentation des résultats, six unités de paysage ont été retenues pour chacun des bassins versants étudiés:

- les zones humides comprenant les bas-fonds,
- les sols cultivés sur versants ou plateaux,
- les jachères récentes,
- la végétation ligneuse dense,
- la végétation ligneuse claire,
- les sols nus.

Un coefficient de ruissellement moyen a été attribué aux sols de chacune des unités de paysage. Ce coefficient de ruissellement correspond à la part de la lame d'eau ruisselée d'une averse de récurrence décennale. Les lames ruisselées ont été établies à partir d'une cartographie des unités paysagiques et du référentiel du catalogue des états de surface (CASENAVE & VALENTIN, 1988) ou des résultats acquis sur les sites de simulation de pluie pour les projets Yatenga, Siné-Saloum et Casamance.

CARTOGRAPHIE DES UNITES PAYSAGIQUES

Sur les bassins versants de la Comoé et du Mali-Sud, l'analyse des images satellitaires réalisée par A.I. MOKADEM ET A. NONGUIERMA (1992) permet de procéder à une classification des paysages en zones humides, zones de cultures et de végétation naturelle sur les versants (Planche couleur 4). La zone des cultures sur versants regroupe l'habitat, les jachères et les cultures. La zone de végétation naturelle sur les versants a été subdivisée, dans la classification numérique de l'image, en 4 classes de recouvrement végétal:

- une classe de végétation très dense au taux de recouvrement supérieur à 70%,
- une classe de végétation dense au taux de recouvrement compris entre 40 et 70%,
- une classe de végétation moyennement dense au taux de recouvrement compris entre 20 et 40%,
- une classe de végétation peu dense au taux de recouvrement inférieur à 20%.

Il est ainsi possible, grâce à l'imagerie satellitaire, d'effectuer une analyse assez fine du taux de recouvrement de la végétation naturelle.

Comme le présentent MOKADEM et al (1991), la notion de zones humides englobe des éléments qui ne peuvent pas être classés dans le concept strict de bas-fond tel que le définit M. RAUNET (1985). Ce sont notamment :

- les plans d'eau et mares,
- les terres humides engorgées qui se localisent dans:
 - * les vallons,
 - * les plaines alluviales à drainage déficient, mais aussi:
 - * sur les plateaux à surface horizontale localement déprimée,
 - * en amont des formations éoliennes allochtones qui perturbent le tracé du réseau hydrographique et le ruissellement.

Dans le Yatenga et le Siné-Saloum, les plateaux cuirassés, appelés "bowés" au Burkina Faso (singulier bowal), sont parsemés de petites dépressions endoréiques qui forment des mares en saison des pluies. Ces dépressions sont souvent entourées d'une abondante végétation ligneuse. Au Yatenga, les formations sableuses éoliennes, par leur accumulation locale sous la forme de micro-dunes, arrivent à perturber l'écoulement naturel des petits marigots des versants faiblement inclinés tel que le versant situé en rive gauche du bas-fond de Bidi. Sur l'ensemble des cinq sites expérimentaux, les bas-fonds constituent cependant la majeure partie des zones humides.

APTITUDE AU RUISSELLEMENT DES UNITES PAYSAGIQUES

Dans le Yatenga, comme dans la zone sahélienne et soudano-sahélienne, les sols nus encroûtés ont des aptitudes au ruissellement extrêmement fortes (des coefficients de ruissellement supérieurs à 75%). Ils se localisent fréquemment de chaque côté des bas-fonds, formant les chanfreins dénudés sur les versants de raccordement aux glacis ou aux pseudo-glacis. Ils occupent environ 30% de la superficie des bassins versants. Leur importance est faible dans le Siné-Saloum, nulle sur les autres bassins versants.

Sur les sols cultivés, le calendrier cultural et les techniques culturales jouent un rôle fondamental sur l'aptitude des sols au ruissellement. Dans le Yatenga et le Siné-Saloum, les cultures sur versants sont pratiquées sur des sols sableux fins qui subissent en général 2 sarclages pour le mil et 3 pour l'arachide au cours de la saison des pluies. J.M. LAMACHERE (1991) a montré que le sarclage et le labour font chuter de manière considérable les coefficients de ruissellement, qui descendent à des valeurs de l'ordre de 20 à 25% pour les fortes pluies après sarclage, mais que sous l'impact des gouttes de pluies, la surface du sol sarclé se transforme rapidement. Après 100 mm de pluie suivant un sarclage, le coefficient de ruissellement atteint 40 à 50% pour une forte pluie et peut culminer à des valeurs de l'ordre de 70 à 80% après 200 mm de pluie sans travail du sol. Un sol cultivé peut donc se comporter comme un sol nu encroûté s'il n'est pas retravaillé après de fortes pluies. Le développement des plantes cultivées et des adventices modère l'augmentation des coefficients de ruissellement mais il existe encore peu d'informations chiffrées sur leur effet réel. Les expérimentations en cours dans le Siné-Saloum par P. PEREZ et al (1992) devraient apporter d'intéressantes informations sur le rôle du couvert arachidier.

Dans la province de la Comoé et le sud du Mali, les sols des versants cultivés sont en général sablo-gravillonnaires sur la partie haute des versants, sableux grossiers à mi-versant et sablo-limoneux sur les bas-versants. Ils sont travaillés en billons isohypses non cloisonnés. On dispose cependant de peu d'informations sur l'évolution de leur aptitude au ruissellement et à l'infiltration. Sur les sols sableux grossiers de la région de Manga au Burkina Faso, J. ALBERGEL (1987) donne des valeurs de coefficients de ruissellement de l'ordre de 10 à 20% pour les pluies moyennes, de 40% pour les pluies extrêmes (fréquence décennale).

Les surfaces naturelles bien couvertes par une végétation herbacée ou ligneuse dense sont peu aptes au ruissellement. Les jachères récentes et les zones à végétation ligneuse dense appartiennent à cette catégorie de surfaces pour laquelle le coefficient de ruissellement, pour des pluies extrêmes, est inférieur à 20%. Les coefficients de ruissellement varient en fonction des taux de recouvrement du tapis herbacé. Pour des pluviométries annuelles inférieures à 600 mm, le tapis herbacé devient discontinu et les coefficients de ruissellement présentent une forte variabilité spatiale.

La dernière ligne du tableau XII fournit des ordres de grandeur des coefficients de ruissellement de chaque unité paysagique pour les pluies journalières de fréquence décennale.

Tableau XII : Les unités paysagiques des bassins versants

	Zones humides bas-fond%	culture sur versant%	jachères %	dense %	végétation claire %	sol nu %
YATENGA						
Gourga Tilli	7	14	6	39	5	29
Roulgou Toéga	7	12	8	30	14	29
Améné	9	12	11	23	15	30
SINE-SALOUM						
Ndiba	3	52	10	10	23	2
Keur Samba D.	6	43	12	5	23	11
COMOE						
Kawara	9	25	15	51		0
Damana	11	15	8	66		0
Moadougou	7	15	7	71		0
MALI SUD						
Kambo	6	34		60		0
CASAMANCE						
Djilakoun	6	15	10	32	37	0
Estimation du Coefficient de Ruissellement décennal	0.8	0.2 à 0.8	0.2	0.2 à *0.1	0.5 à *0.1	0.8

Nb: *0.1 : valeurs adoptées en Casamance (ALBERGEL & al 1991).

Une incertitude importante subsiste sur les valeurs du coefficient de ruissellement des sols cultivés. Nous avons adopté une valeur moyenne égale à 0.4 pour toutes les surfaces cultivées sur versants.

En pondérant les coefficients de ruissellement de chaque unité paysagique par leur taux d'occupation et en effectuant la somme des valeurs résultantes pour chaque bassin, on obtient une estimation des coefficients de ruissellement des sols de fréquence décennale. Cette estimation, qui ne tient pas compte des capacités de stockage du réseau hydrographique fonctionnel, est une valeur limite du coefficient de ruissellement sur le bassin versant. Dans les régions qui présentent des zones endoréiques, on opère un abattement du coefficient de ruissellement en fonction du taux d'occupation de celles-ci sur le bassin versant. Le tableau XIII donne les surfaces de la zone endoréique, du coefficient de ruissellement et de la classe de perméabilité correspondante, suivant la classification de RODIER & AUVRAY (1965) pour les bassins versants du projet.

Cinq classes de perméabilité ont été définies par RODIER & AUVRAY (1965):

- P1: Bassins rigoureusement imperméables, entièrement rocheux ou argileux.
- P2: Bassins imperméables avec quelques zones perméables de faible étendue ou bassins homogènes presque imperméables.
- P3: Bassins assez imperméables comportant des zones perméables étendues ou bassins homogènes assez peu perméables.
- P4: Bassins assez perméables tels qu'on en rencontre en zone de décomposition du granit avec abondance d'arènes.
- P5: Bassins perméables : sables ou carapaces latéritiques très fissurées.

Tableau XIII : Coefficients de ruissellement par bassin

Bassin versant	Superficie bassin km ²	Superficie endoréique km ²	Coef. de ruiss. décennal	Classe perméabilité
Projet Yatenga				
Gourga Tili	45	4	0.42	P3
Roulgou Toega	95	17	0.39	P3
Améné	157	17	0.45	P3
Projet Siné-Saloum				
Ndiba	16.2	2.4	0.34	P3
Keur Samba Diama	75.6	11.3	0.39	P3
Projet Comoé				
Kawara	99.8	0	0.3	P4
Damana	104	0	0.3	P4
Moadougou	112	0	0.27	P4
Projet Mali sud				
Kambo barrage	10	0	0.28	P4
Projet Casamance				
Djilakoun	24.2	0	0.2	P5

Des réserves en eau souterraines inégalement réparties

LE DOMAINE GRANITIQUE

Dans les provinces du Yatenga et de la Comoé au Burkina Faso et dans la région de Kadiolo au sud du Mali, les sites expérimentaux sont localisés sur des socles granitiques du bouclier éburnéen ouest-africain (Figure 2). Le profil des altérations du socle granitique comprend de la surface au substratum :

- des formations superficielles sablo-argileuses,
- des indurations ferrugineuses, carapaces ou cuirasses,
- des argiles latéritiques,
- des argiles sableuses,
- la roche altérée,
- la roche saine.

L'épaisseur des altérites est en moyenne de 10 à 20 mètres et la zone saturée de ce réservoir varie en fonction des saisons, des zones climatiques et de la topographie.

Les formations géologiques, quelles qu'elles soient, sont découpées par des réseaux de fractures majeures dont la longueur peut atteindre plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de kilomètres. Ces fractures très profondes, sub-verticales, sont jalonnées par des zones broyées susceptibles d'intéresser des bandes de terrain larges de quelques dizaines de mètres à quelques centaines de mètres. Elles sont donc le siège d'une circulation d'eaux souterraines.

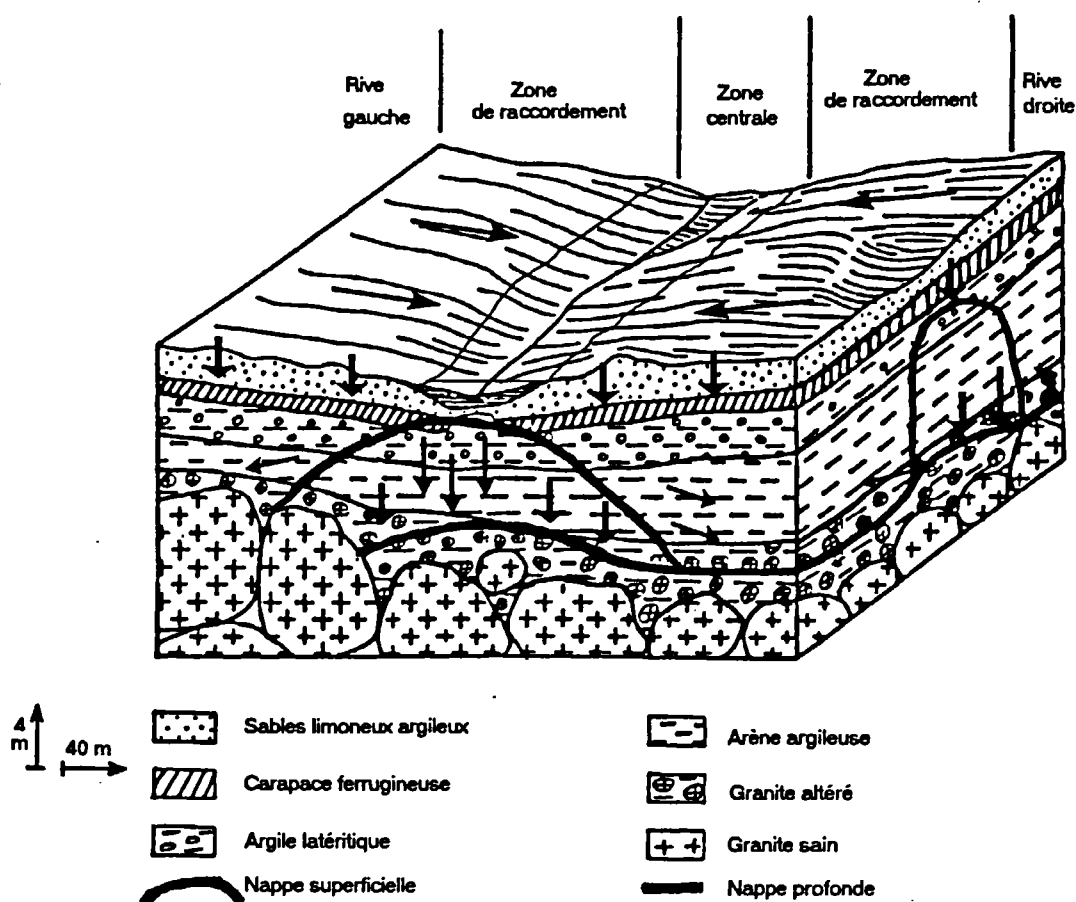
Les caractéristiques hydrauliques des réservoirs sont les suivantes:

	Cuirasse ferrugineuse	Altérites	Fissures
Perméabilité en m/s	8 à 80 10^{-5}	0.1 à 10 10^{-5}	0.1 à 10 10^{-5}
Transmissivité en m^2/s	20 à 200 10^{-5}	1 à 100 10^{-5}	3 à 30 10^{-5}
Coefficient d'emménagement en %	0.5 à 30	2 à 10	1 à 8 10^{-4}

LES AQUIFERES DE LA ZONE SAHELIEENNE

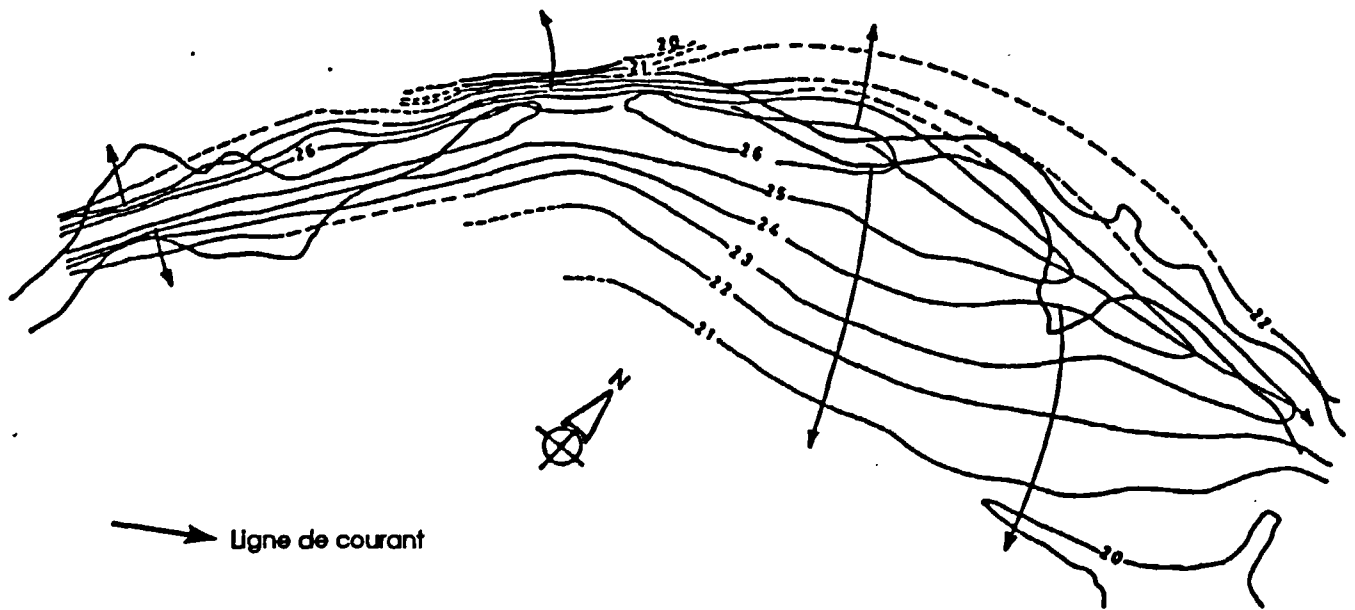
Le bloc diagramme de la figure 14 schématise le fonctionnement hydrologique du système aquifère du bief Gourga Tilli dans la région de Bidi au Yatenga (LAMACHERE & SERPANTIE, 1991). De petites nappes aquifères supérieures sont localisées dans les indurations ferrugineuses et les argiles latéritiques, sous les axes de drainage et les dépressions superficielles. En saison des pluies, ces petites nappes sont en continuité avec un aquifère profond localisé dans la roche altérée, dans les fissures et les fractures de la roche saine. Le niveau statique de l'aquifère profond se situe une vingtaine de mètres au-dessous de la surface du sol. La topographie du socle granitique ne suit pas toujours le modelé superficiel. Des compartiments surbaissés et le croisement de grandes fractures favorisent l'existence d'une nappe inférieure épaisse, d'autant mieux alimentée qu'elle se situe à proximité d'un bas-fond. Dans les compartiments surélevés, où la roche saine est à moins de 10 mètres de profondeur, le réservoir est constitué par les fissures et les diaclases de la roche. Il est alors de faible capacité et difficile à capter.

Figure 14 : Fonctionnement hydrologique du système aquifère du bief Gourga Tilli (Yatenga).



L'étude piézométrique de la nappe aquifère superficielle du bas-fond de Bidi dans le bief Gourga Tilli a montré que le sommet de cette nappe présente, en saison des pluies comme en saison sèche, une forme en dôme allongé dans l'axe du bas-fond avec un fort gradient hydraulique latéral : 10^{-2} à $4 \cdot 10^{-2}$ en rive droite, 10^{-1} à $4 \cdot 10^{-2}$ en rive gauche (figure 15). Dans la partie centrale du bas-fond, la position du niveau piézométrique par rapport au sol varie de 6 à 7 mètres de profondeur en fin de saison sèche, à 50 centimètres en fin d'hivernage. En relation avec le gradient hydraulique, cette profondeur s'accroît rapidement de part et d'autre de la zone inondable (CARLIER & al., 1992).

**Figure 15 : Piézométrie dans le bas-fond de Bidi (août 1990)
(BIDJOCKA, 1990)**

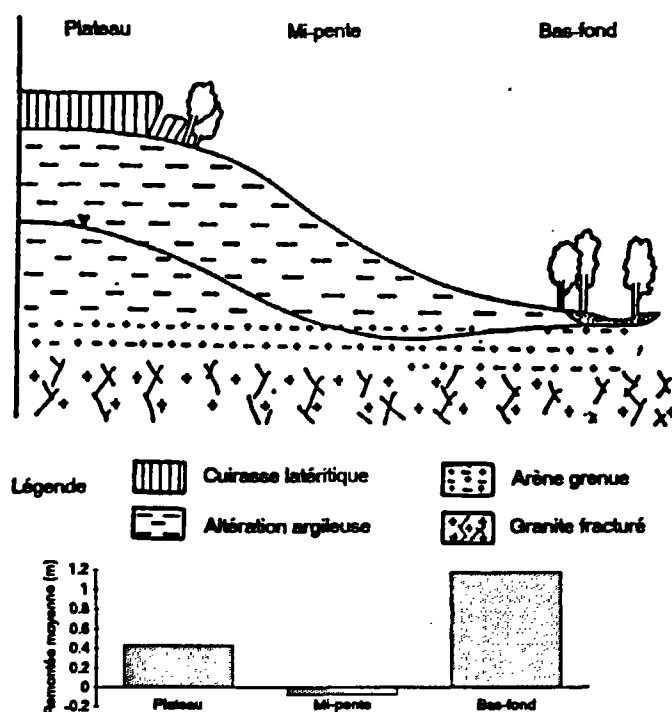


La vidange de la nappe superficielle est plus ou moins rapide en fonction de la nature des matériaux sous-jacents et de l'épaisseur de l'aquifère. La vitesse de descente des niveaux est de 4 à 9 cm par jour en septembre et de 3 à 5 cm par jour en octobre et novembre. A proximité du bas-fond, la nappe inférieure se recharge dès les premières crues avec des vitesses de 3 cm par jour en juillet et 6 à 8 cm par jour en août et septembre, vitesses qui correspondent à la vitesse de décharge de la nappe supérieure. La recharge se prolonge ensuite lentement jusqu'au début du mois de décembre. Avec le tarissement de la nappe supérieure, la descente des niveaux est ensuite très rapide et dès le mois de février la nappe inférieure a retrouvé son niveau d'étiage, à environ 20 mètres sous la surface du sol.

L'étude réalisée par le bureau d'études néerlandais IWACO et le CIEH sous la direction de la DEP du Ministère de l'Eau du Burkina Faso (1990) fournit des renseignements complémentaires intéressant la position des aquifères en fonction de la géomorphologie et les variations inter-annuelles des niveaux piézométriques au Yatenga. La figure 16 schématise la position respective des aquifères dans le paysage. Elle fait apparaître un creux piézométrique au niveau des versants qui correspond à un déficit d'alimentation de la nappe aquifère. Ce déficit local dans l'alimentation hydrique de l'aquifère doit être mis en relation avec la dégradation des versants et l'existence de sols nus encroûtés sur les charfreins qui bordent les bas-fonds.

Les mesures piézométriques anciennes dans le Yatenga mettent en évidence un abaissement progressif de la nappe aquifère entre 1965 et 1985 à la vitesse de 0.2 à 0.7 mètre par an. Entre l'année 1988 et l'année 1989, suite à une pluviométrie favorable, on a observé une remontée moyenne de 0.5 mètre dans les bas-fonds. La recharge des aquifères dans le Yatenga correspondrait actuellement à une lame d'eau annuelle d'environ 50 mm (CARLIER, 1992).

Figure 16 : Position respective des aquifères dans le paysage du Yatenga (IWACO & CIEH, 1990)



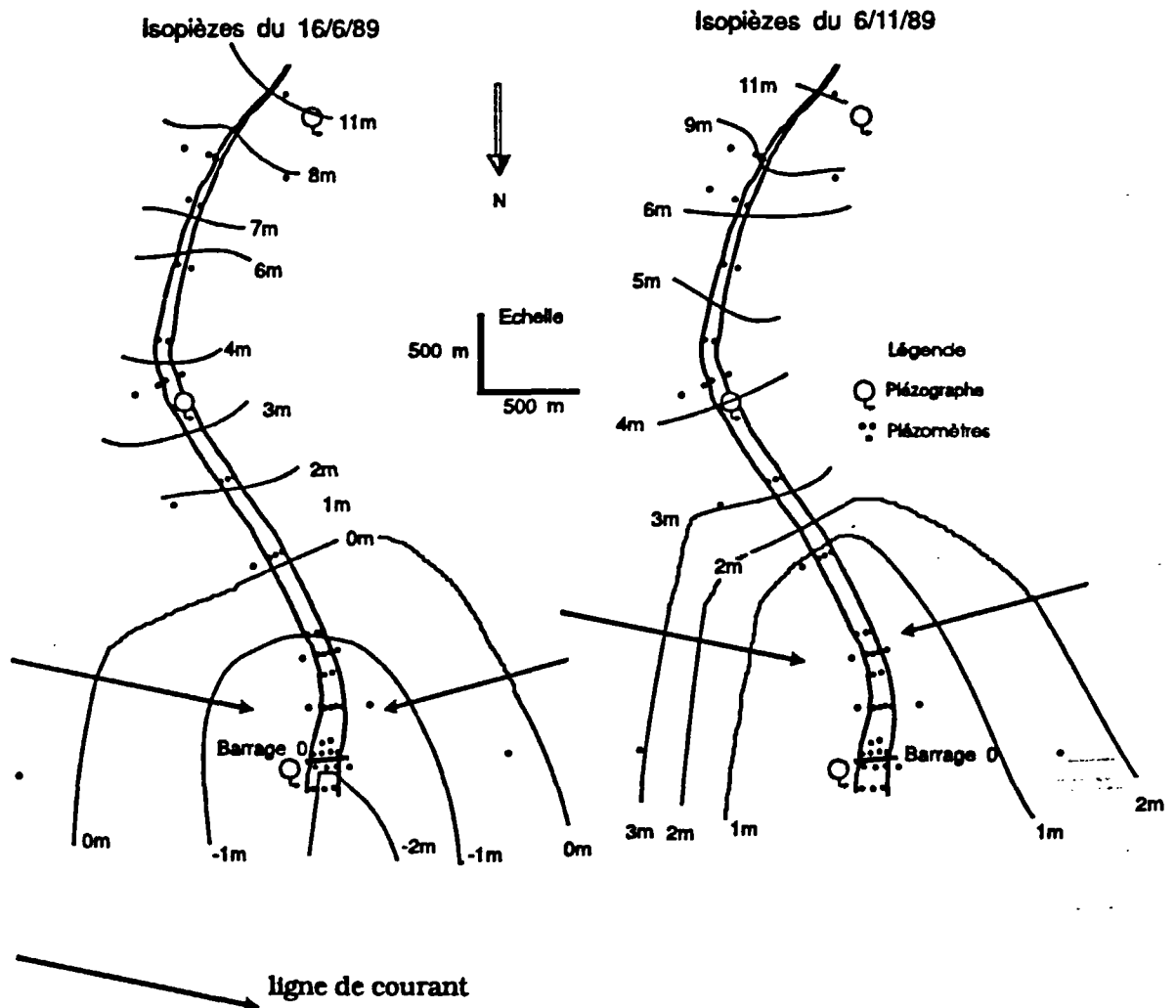
Dans le Yatenga, les puits traditionnels, dont la profondeur varie entre 5 et 20 mètres, captent généralement les couches ferrugineuses indurées, parfois la roche altérée. Ils sont localisés à proximité des bas-fonds. L'accessibilité à l'eau potable et domestique en saison sèche conditionne en effet, dans cette région du Burkina Faso, l'installation et le développement des villages. L'importance accordée à l'existence de nappes aquifères peu profondes et pérennes s'exprime jusque dans le nom des villages. Le mot Bidi, nom du village près duquel est installé le site expérimental du Yatenga, vient du mot fulfuldé "Widizou" qui signifie puits ou puisard peu profond.

LES AQUIFERES DANS LA ZONE SOUDANIENNE

Dans la province de la Comoé et dans le sud du Mali, les altérites sur socles granitiques sont d'épaisseur plus réduite que dans le Yatenga, mais la nappe aquifère, bien alimentée à partir des versants et des reliefs cuirassés, est continue, plus épaisse et suit fidèlement la topographie générale.

Sur le petit bassin de Kambo, le niveau piézométrique de la nappe se situe en saison sèche à une profondeur de 5.5 mètres par rapport au sol du plateau. Il remonte au cours de la saison des pluies pour se stabiliser à la profondeur de 2.80 mètres. Dans le bas-fond, le niveau piézométrique se situe à 2.5 mètres de la surface du sol en fin de saison sèche, remonte lentement en juin et juillet puis rapidement en août. Il affleure dans la partie centrale du bas-fond au début du mois d'août jusqu'au début du mois de novembre dès que la superficie du bassin versant dépasse 8 km² (Figure 17).

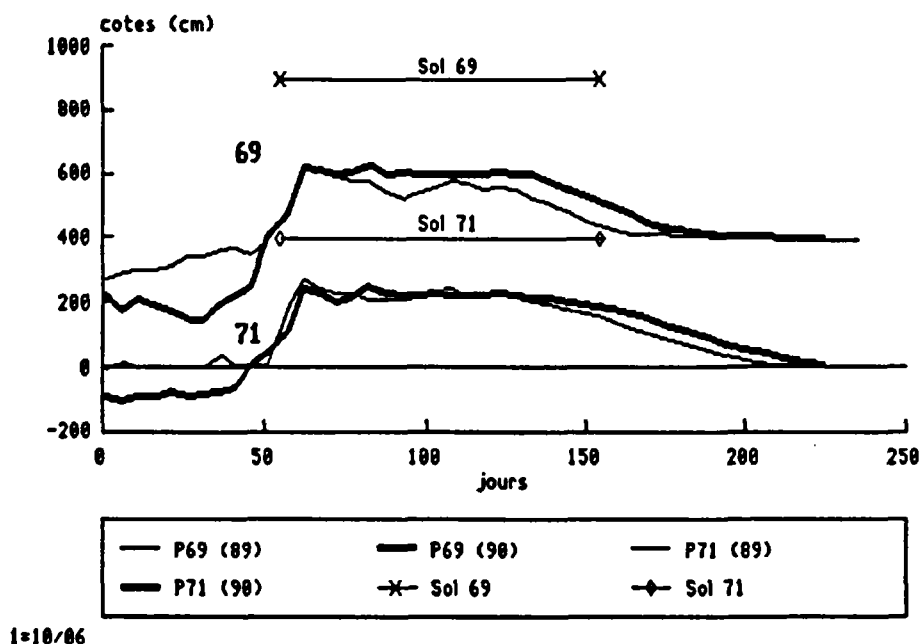
Figure 17 : Isopièzes de la nappe des altérites à Kambo (PEPIN, 1989)



Dans les bas-fonds de Damana, Kawara et Moadougou, pour des bassins versants dont la superficie est voisine de 100 km², le niveau piézométrique se situe à 0.5 mètre de profondeur en dessous du sol en fin de saison sèche. Il remonte rapidement avec les premières grosses pluies et la nappe aquifère alimente l'écoulement des marigots du mois de juillet au début du mois de novembre. En remontant le cours des marigots sur une distance de 10 kilomètres, l'évolution des niveaux piézométriques reste à peu près identique bien que le niveau de base en fin de saison sèche soit plus profond, à 1.5 mètre de la surface du sol. En saison des pluies comme en saison sèche, les bas-fonds de la Comoé se situent en position de drainage, dans un creux piézométrique de la nappe aquifère.

L'étude comparative des chroniques piézométriques du bassin versant de Kambo en 1989 et 1990 (figure 18) montre que la recharge de l'année 1990 est supérieure à celle de l'année 1989 en rive droite du bas-fond, à mi-versant, avec un décalage de 40 cm à 1 mètre (GUIGUEN, 1991). Cette recharge supplémentaire localisée, qui prolonge la durée d'affleurement de la nappe aquifère d'une quinzaine de jours, est à mettre en relation avec une pluviométrie plus importante en 1990 qu'en 1989 sur le versant (150 à 200 mm de pluies supplémentaires). La comparaison des étiages de la nappe aquifère fait apparaître un étiage beaucoup plus prononcé en 1990. L'explication en est simple : l'étiage de l'année 1989 fait suite à une pluviométrie excédentaire en 1988 (1244 mm), alors que l'étiage de l'année 1990 correspond à une pluviométrie déficitaire en 1989 (920 mm).

**Figure 18 : Niveaux statiques de la nappe pour deux isopièzes du bas-fond de Kambo.
(GUIGUEN, 1991)**



Dans la province de la Comoé et le sud du Mali, la nappe aquifère réagit donc rapidement aux excédents pluviométriques mais conserve également assez longtemps les effets de déficits pluviométriques qui sont cumulatifs. Elle alimente le débit de base des marigots du mois d'août au début du mois de novembre, mais la durée et l'importance des débits dépendent à la fois des pluies de la saison en cours et des pluies des saisons antérieures. Ce débit de base conditionne la saison rizicole dans les bas-fonds.

Dans la Comoé, les puits traditionnels captent des aquifères situés dans les altérites où les débits d'exhaure sont médiocres. Sur les socles granitiques, les forages captent le substratum fissuré selon les directions principales de l'orogénie éburnéenne.

LE DOMAINE SEDIMENTAIRE

Les trois-quarts du Sénégal sont recouverts par d'épaisses séries sédimentaires d'âges secondaire et tertiaire, qui appartiennent aux formations du bassin atlantique côtier africain sénégal-mauritanien. L'épaisseur des dépôts est d'autant plus importante que l'on se rapproche de la Casamance où elle peut dépasser 4000 mètres. La série secondaire est constituée par des alternances de marnes, de sables et de calcaires marneux, gréseux ou dolomitiques. Les formations secondaires se terminent par une épaisse série détritique, sableuse, d'âge crétacé supérieur, qui constitue le principal aquifère du Sénégal. Surmontant les sables du maestrichien, ces dépôts, d'épaisseur très variable, atteignent 500 mètres en basse Casamance. Une épaisse série marno-calcaire recouvre des dépôts alternés de sable et d'argile d'âge éocène supérieur à quaternaire.

La partie supérieure altérée de ces dépôts marins est appelée à tort "continental terminal". La partie inférieure des sédiments sablo-argileux enferme plusieurs niveaux sableux aquifères d'un grand intérêt économique. Nous conviendrons d'appeler "continental terminal", l'ensemble de cette série sablo-argileuse. Son épaisseur est d'environ 80 mètres dans la région de Thyse Kaymor, 160 mètres dans la région de Ziguinchor.

HYDROLOGIE DES AQUIFERES

Siné-Saloum :

Dans la région de Thyse Kaymor (Siné-Saloum), le niveau statique de la nappe aquifère, localisée dans le continental terminal, se situe à 11 mètres de profondeur près du marigot Bao Bolon, à près de 50 mètres de profondeur sur le plateau. Sa position en altitude est voisine du niveau marin, légèrement supérieure au S.W. (+3m) et inférieure vers le N.E. (-3m à -6m à Amath Maran) (figure 19). Les variations piézométriques observées de juillet 1989 à février 1990 ont été de l'ordre de 20 centimètres dans les bas-fonds et de quelques centimètres sur les interfluves.

Les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère sont les suivantes:

- transmissivité $T = 5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
- coefficient d'emmagasinement $S = 5 \text{ à } 15\%$

La position de l'aquifère le place en situation de drainage des écoulements superficiels. Sa réalimentation est faible sur l'ensemble de la région et plus importante à proximité des bas-fonds. Une simulation des lames d'eau journalières infiltrées au-dessous du profil racinaire (1.50m) a été réalisée sur la période 1934-1987 (ALBERGEL & al, 1991). Le modèle utilisé, (ALBERGEL & PEPIN, 1991) a été calé sur les données de débit du bassin versant de Ndiba et celles de l'évapotranspiration des parcelles de bilan hydrique sous culture. La lame d'eau disponible pour l'infiltration sur la période 1934-1987 est en moyenne de 150 mm/an, il faut cependant préciser que pour de nombreuses années, aucune réalimentation de la nappe n'est possible. Lorsque ces années sont isolées comme 1941, 44, 56, 57, 68, 72 et 73, le préjudice sur la ressource en eau souterraine n'est pas sensible, tandis que, lorsque ces années sont groupées comme de 1982 à 1985, alors le niveau de l'eau dans les puits descend et certains d'entre eux s'assèchent.

Casamance :

En Casamance, dans la région de Djigoum, la nappe superficielle se trouve dans les différentes formations quaternaires :

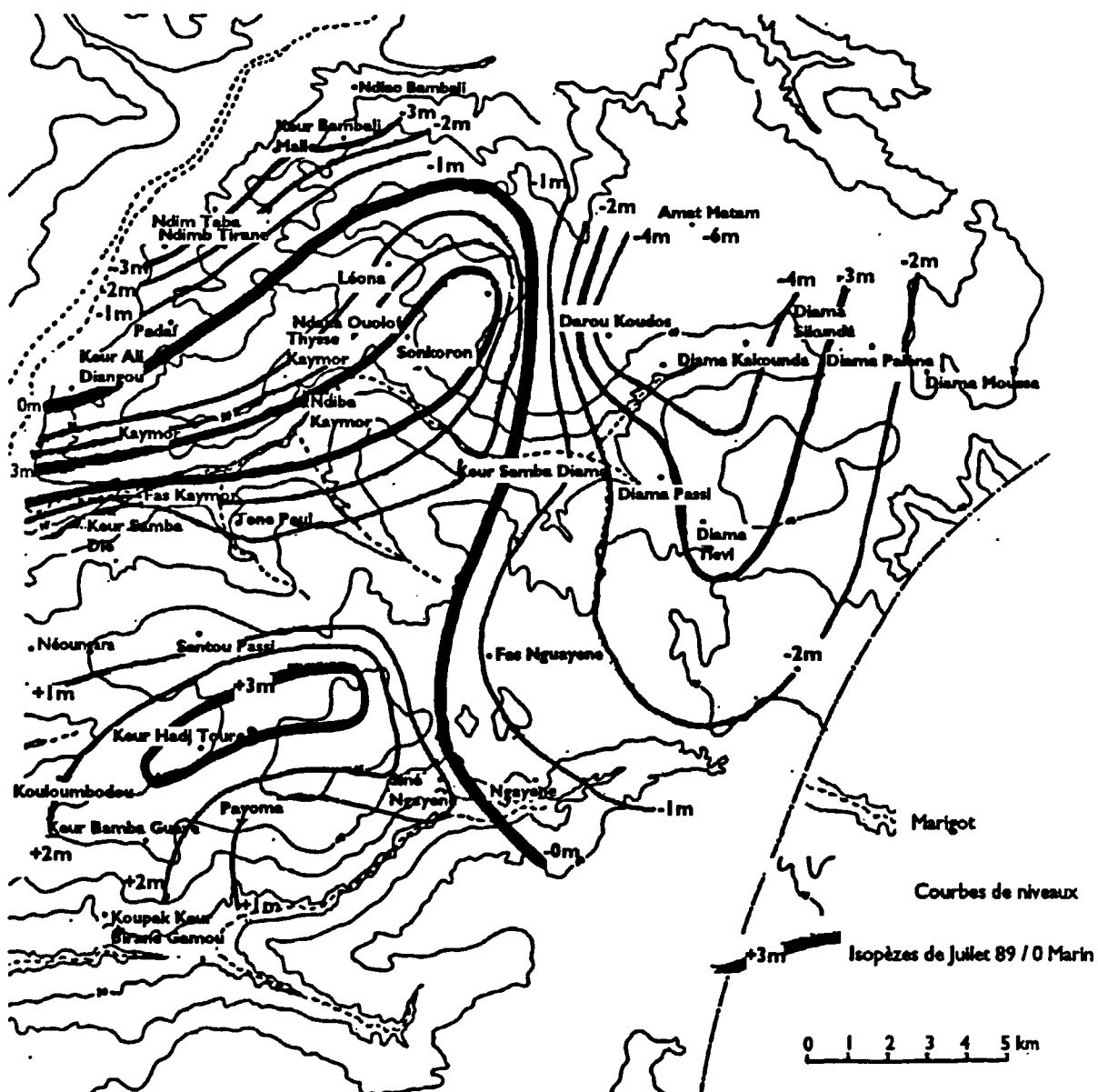
- sables rouges des plateaux,
- couches latéritiques de la base des sables rouges,
- sables des terrasses.

Le niveau imperméable inférieur est constitué par les argiles jaunes du continental terminal.

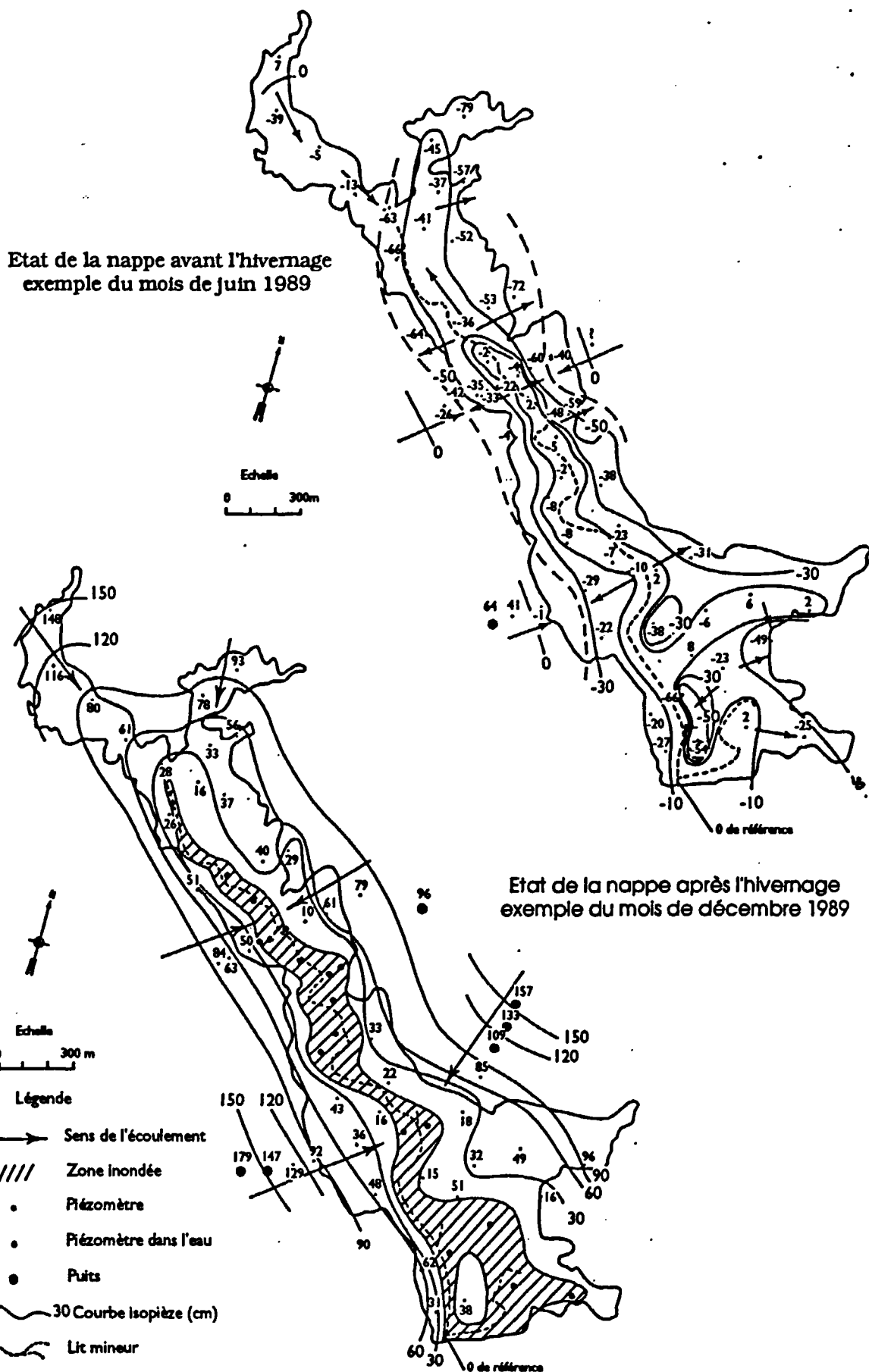
L'observation des cartes piézométriques (figures 20) permet de tirer les grandes lignes du fonctionnement de la nappe superficielle:

- La surface piézométrique reflète fidèlement la morphologie du terrain avec des gradients très faibles sur les plateaux et une accentuation de la pente hydraulique vers les versants.
- Le marigot draine la nappe dès les premières pluies importantes et l'affleurement de la nappe suit les ramifications des marigots. Les rizières inondées longent toutes les berges des marigots.
- Les eaux souterraines douces en provenance des plateaux s'écoulent vers les bas-fonds où elles entrent en contact avec les eaux salées.
- Dans leurs parties amont les bas-fonds sont alimentés en eaux douces durant toute l'année, tandis qu'en aval on remarque de décembre à mai un fort creux piézométrique sous les terrasses alluviales qui bordent le lit mineur où circule l'eau salée.

Figure 19 : Fonctionnement de l'aquifère du continental terminal dans le Siné Saloum (ALBERGEL & al 1991)



Figures 20: Cartes piézométriques de Djigounoum (BRUNET, 1990)



QUALITE CHIMIQUE DES AQUIFERES

Dans le Siné-saloum, la qualité chimique des eaux de la partie supérieure de l'aquifère est excellente (pH de l'ordre de 6.5 et conductivité inférieure à 5 mS/cm), mais sa position par rapport au niveau de la mer et la proximité des marigots sous influence des marées posent un problème pour l'exploitation de cet aquifère.

En Casamance, la caractérisation chimique mensuelle des eaux de la nappe a été exprimée à partir du pH, de la conductivité électrique et de la teneur en aluminium. Les valeurs de chaque paramètre ont été réparties en trois classes définissant les domaines où la contrainte est soit la plus faible, soit la plus forte pour la culture du riz, ainsi qu'un domaine intermédiaire :

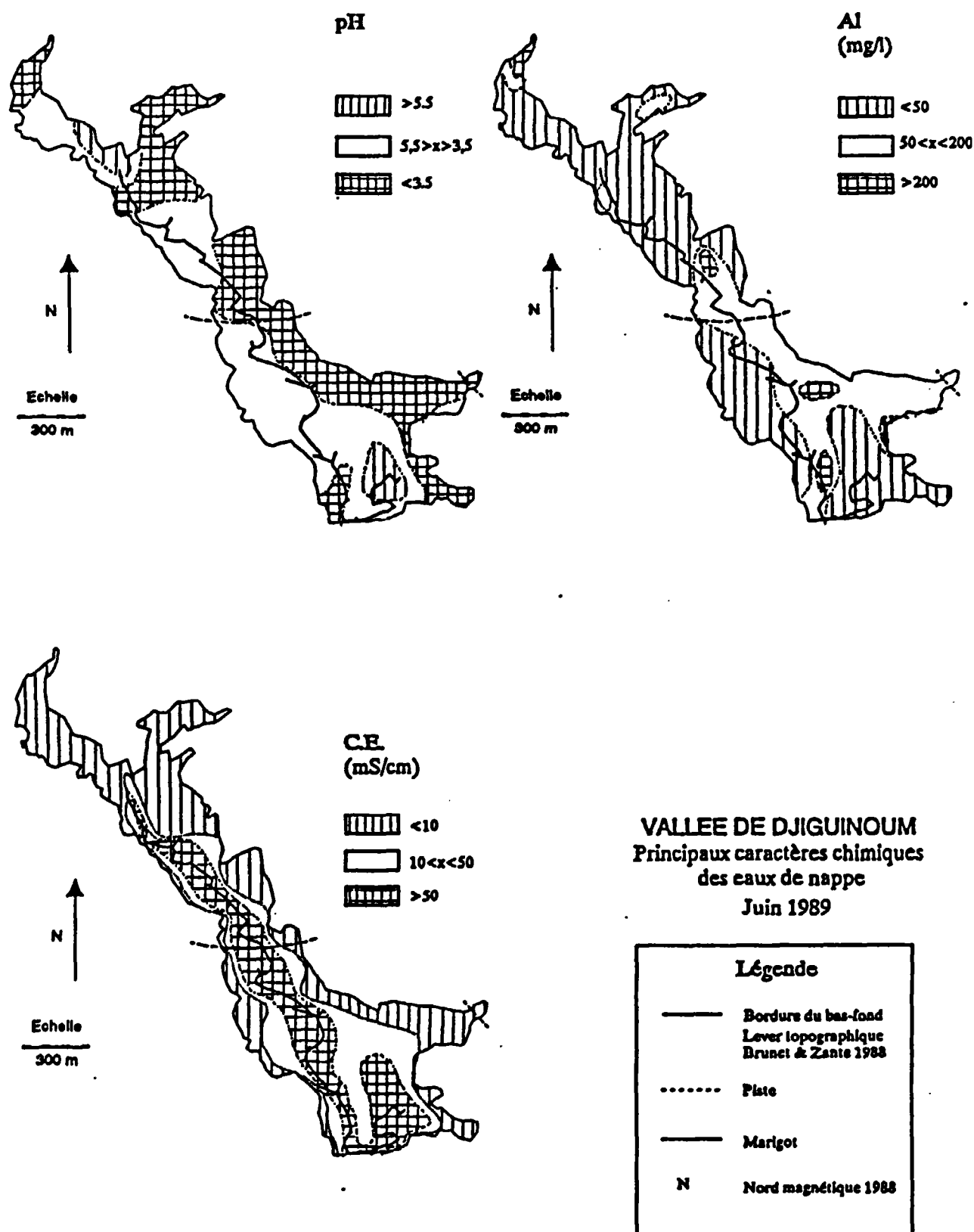
- Une conductivité de 10 mS/cm est le seuil maximal de tolérance du riz et celle de 50 mS/cm correspond à la conductivité de l'eau de mer,
- un pH < 3.5 rend la culture du riz impraticable, un pH entre 3.5 et 5.5 est correct
- une teneur en aluminium entre 50 et 200 mg /l est supportable par les rizières.

Les cartes mensuelles, établies pour chaque paramètre, mettent en évidence les faits suivants (figure 21) :

- une hyper-acidité (pH < 3.5) sur l'ensemble de la vallée lorsque le bas-fond est inondé d'août à décembre,
- de très fortes teneurs en aluminium dans les zones où le pH reste hyper-acide toute l'année,
- de faibles variations de la salinité de la nappe au cours de l'année avec un gradient très net de la salinité du marigot vers le plateau.

L'analyse de la conductivité en fonction de la profondeur montre un fort gradient salin. Au-dessous de 30 cm, la salinité varie très peu. Les échanges entre eaux douces des plateaux et eaux salées de la nappe de bas-fond sont très faibles.

**Figure 21 : Principaux caractères chimiques des eaux de nappe
Djigounoum, Juin 1989. (BRUNET, 1990)**



Des régimes hydrologiques capricieux

LES EQUIPEMENTS HYDROMETRIQUES

Sur les cinq sites du programme CCE pour la mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'ouest, un effort important a été consenti pour l'équipement hydrométrique des bassins versants.

Le climat tropical est caractérisé par une grande irrégularité spatio-temporelle des pluies qui nécessite une forte densité de postes pluviométriques. L'étude du fonctionnement des aménagements hydrauliques requiert l'installation de stations hydrologiques en amont des retenues, sur les plans d'eau et parfois en aval des aménagements. Cette double contrainte a guidé les choix techniques en matière d'équipement hydrométrique. Le tableau XIV récapitule l'état des installations en 1990.

Tableau XIV : Equipements hydrométriques des bassins versants

Sites	Superficie du bassin km ²	Piézo- mètres	pluvio- mètres	pluvio- graphes	stations hydro- logiques	période d'observation
Projet Yatenga						
Gourga Tili	45	54	8	3	3	85-91
Roulgou Toega	95	84	13	5	4	89-91
Améné	157	87	21	7	6	85-91
Projet Siné-Saloum						
Ndiba	16.2	4	11	3	1	83-90
Keur Samba Diama	75.6	15	8	2	1	89-90
Projet Comoé						
Kawara	99.8	30	12	2	2	88-90
Damana	104	24	7	2	1	-
Maodougou	112	28	12	0	3	90
Projet Mali sud						
Kambo barrage	10	55	11	4	2	88-90
Projet Casamance						
Le Brusq	2.56	0	3	1	1	89-90
Djiguinoun	16.8	28	5	2	1	88-90
Djilakoun	24.2	64	10	3	3+1	88-90
Total		307	92	23	21	

+1 Marégraphe

Pour les projets Yatenga et Casamance, le dispositif est constitué d'un ensemble de 3 bassins emboîtés. Le plus grand bassin versant, qui englobe les deux autres, cumule tous les équipements installés. Les pluviographes ont fait l'objet de mesures pluviométriques journalières. Ils sont donc inclus dans le nombre des pluviomètres et ne doivent pas être ajoutés à ceux de la deuxième colonne. Sur le projet Casamance, les dispositifs d'évaluation des bilans hydrologiques ont été complétés par un réseau d'observation de la qualité chimique des eaux.

Sur les bassins versants du Siné-Saloum, un dispositif d'étude du bilan hydrique sur parcelle et un équipement complet de quatre ravines pour suivre l'érosion des versants complètent le réseau d'observation.

Sur les petits bassins versants, la densité des postes pluviométriques varie de 1 poste par km² pour le bassin de Kambo au sud du Mali à 1 poste pour 2 km² pour le bassin de Djilakoum en Casamance.

Sur les grands bassins versants, la densité des postes pluviométriques est d'au moins 1 poste pour 10 km². La densité maximale des pluviographes est de 1 pluviographe pour 4 pluviomètres sur la plupart des bassins, de 1 pluviographe pour 5 pluviomètres pour le projet Comoé.

La figure 22 donne un exemple d'équipement pour les études hydrologiques sur le site du Yatenga.

Le suivi hydrologique des stations

La durée des observations est très variable d'un projet à l'autre. Les projets Yatenga et Siné-Saloum ont en effet bénéficié des données hydrologiques recueillies par l'ORSTOM antérieurement au démarrage du programme financé par la CCE. J. TUINA, (1992) et H. DACOSTA, (1992) ont fait les synthèses de ces observations.

Les données hydrométriques collectées sur le bassin versant de Damana n'ont pu être exploitées faute de mesures des débits pour le tarage des stations hydrologiques. L'enregistrement automatique des hauteurs d'eau n'a pu être réalisé qu'en 1990 à la station de Moadougou.

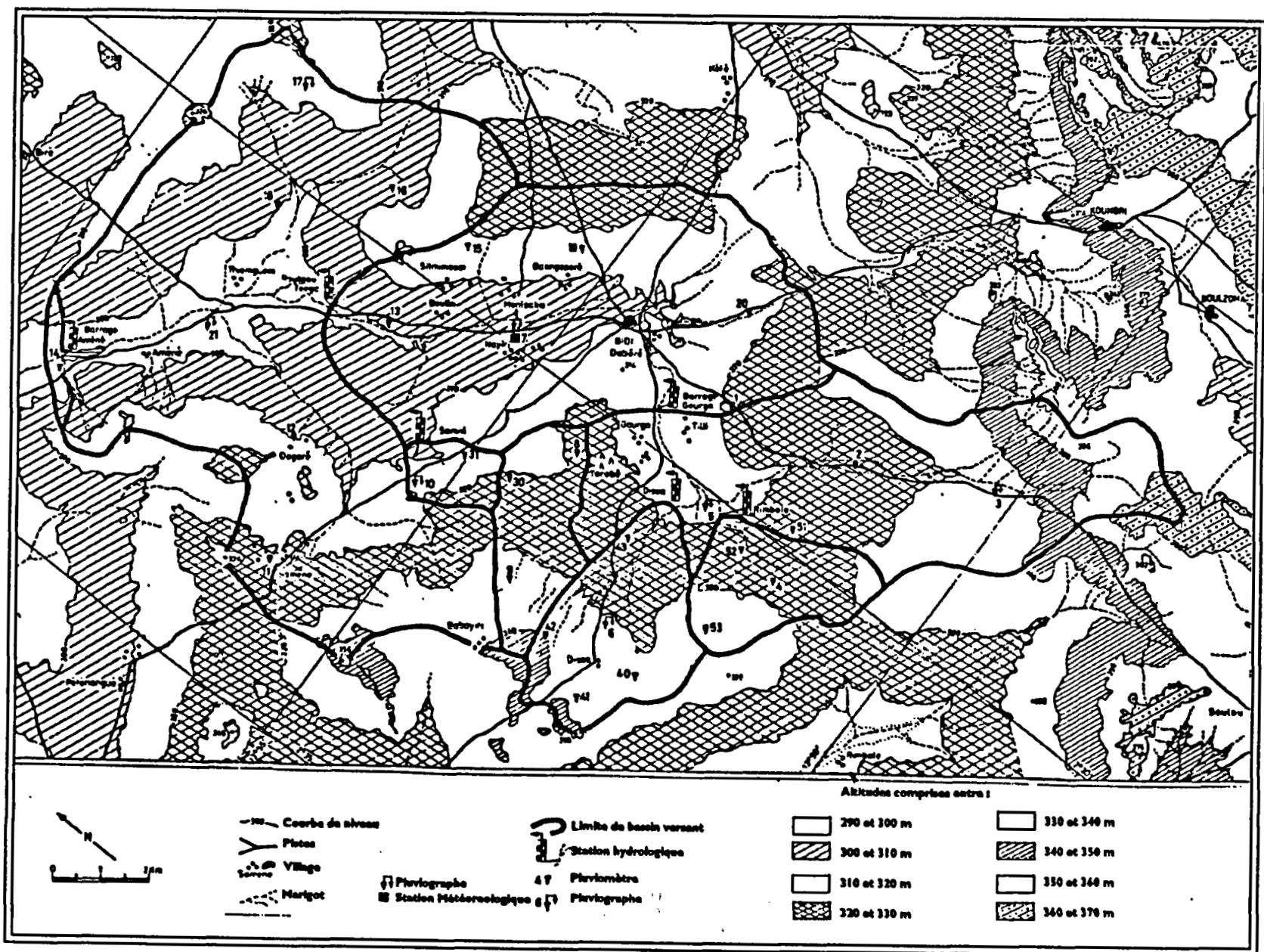


Figure 22 : Equipement hydrométrique sur le site du Yatenga.

LES RESSOURCES EN EAUX SUPERFICIELLES

APPORTS ANNUELS

Les observations :

Les tableaux XV et XVI présentent les écoulements annuels et les pluviométries annuelles sur toute la période d'observation.

Tableau XV : Apports annuels en millions de m3

Années	Yatenga		Siné-Saloum		Comoé		Mali-sud		Casamance	
	Gourga	Roulgou Toega	Ndiba	Keur Samba Diama	Kawara	Moa-dougou	Kambo amont	Kambo aval	Djigui-noum	Djilakoun
1983			0.158							
1984			0.233							
1985	1.29		0.171							
1986	1.45		0.300							
1987	1.92		0.049							
1988	0.57		0.543		>17			0.629		
1989	0.22	2.48	0.386	0.16	8.59		0.0025	0.328	1.03	1.25
1990	0.25	0.82	0.219	0.009	18.5	20.8	0.023	0.354	0.459	0.99

Les pluviométries annuelles du tableau XVI correspondent aux moyennes pluviométriques calculées sur les bassins versants par la méthode de Thiessen qui fait intervenir les aires d'influence polygonales pour chaque pluviomètre.

Tableau XVI : Pluviométries annuelles moyennes sur les bassins versants en mm

Années	Yatenga		Siné-Saloum		Comoé		Mali-sud		Casamance	
	Gourga	Roulgou Toega	Ndiba	Keur Samba Diama	Kawara	Moa-dougou	Kambo amont	Kambo aval	Djigui-noum	Djilakoun
1983			394							
1984			469							
1985	376		555							
1986	493		683							
1987	529		795							
1988	510		820		1110			1244		
1989	450	447	704	765	875		867	920	1144	1148
1990	365	350	465	495	1338	1514	1107	1103	989	1008
1991	605	602								

Toutes les stations hydrométriques ont été équipées d'échelles limnimétriques et de limnigraphes pour l'enregistrement en continu des hauteurs d'eau. Les mesures de vitesse ont été effectuées au moulinet et les jaugeages réalisés en continu selon la méthode des verticales indépendantes dans la section. Les mesures ont été dépouillées de manière identique à l'aide du logiciel HYDROM, réalisé par le laboratoire hydrologique de l'ORSTOM à Montpellier. Les courbes d'étalonnage sont présentées dans les rapports hydrologiques propres à chaque projet : rapports de campagne ou de synthèse hydrologique.

La comparaison des pluviométries annuelles, consignées dans le tableau XVI, et des pluviométries aux stations climatiques de référence (tableau VIII) permet de situer la série des observations effectuées dans le cadre du programme CCE et d'évaluer sa représentativité.

Les stations climatologiques de Ouahigouya dans le Yatenga et de Sikasso dans le sud du Mali sont malheureusement trop éloignées des sites expérimentaux pour être utilisées sans rectification. Dans le Yatenga, le gradient pluviométrique nord-sud peut être évalué à 1.67 mm par km. Le site expérimental de Bidi étant situé à 40 kilomètres au nord de Ouahigouya, la pluviométrie interannuelle observée à Bidi est inférieure d'environ 67 mm à celle de Ouahigouya. Une corrélation établie entre les valeurs observées simultanément à Ouahigouya et à Bidi, malgré une forte dispersion des points, fournit une estimation des valeurs décennale sèche, médiane et décennale humide de Bidi sur la période 1970-1990. Ces valeurs sont les suivantes:

Région de Bidi, Projet Yatenga (1970-1990)		
Pluviométrie annuelle décennale sèche	:	350 mm
Pluviométrie annuelle médiane	:	455 mm
Pluviométrie annuelle décennale humide	:	580 mm

Dans le sud du Mali, une corrélation entre les pluies annuelles à Kadiolo et à Sikasso fournit les valeurs suivantes:

Région de Kadiolo, Projet Mali-sud (1970-1990)		
Pluviométrie annuelle décennale sèche	:	650 mm
Pluviométrie annuelle médiane	:	910 mm
Pluviométrie annuelle décennale humide	:	1260 mm

Les échantillons des pluviométries annuelles observées au Yatenga et dans le Siné-Saloum semblent assez représentatifs de la période 1970-1990, l'échantillon collecté dans la région de Bidi étant légèrement plus étalé vers les années humides que l'échantillon de Thyse Kaymor, plus étalé vers les années sèches.

Les trois années observées dans la province de la Comoé et au sud du Mali sont nettement humides pour la période 1970-1990. Elles sont toutes situées au dessus de la valeur médiane, excepté 1989 dans la province de la Comoé. Sur le bassin de Moadougou, l'année 1990 doit être considérée comme exceptionnellement humide. Avec une valeur annuelle de 1514 mm, elle correspond à la valeur décennale humide de la période 1922-1969 de Banfora.

En Casamance, l'année 1989 est très proche de la valeur médiane, l'année 1990 légèrement inférieure.

Les relations lame écoulée / pluie annuelle

Les couples de valeurs lames écoulées / pluies annuelles ont été reportés sur les figures 23 et 24.

Si l'on excepte les années 1985, 1988 et 1989 sur le bassin de Gourga, années qui s'écartent très nettement de la droite de corrélation entre les lames écoulées et les pluviométries annuelles, il est possible d'établir des relations linéaires entre les lames écoulées par bassin versant.

Les relations établies dans le Siné-Saloum sur le bassin de Ndiba et dans la Comoé semblent les plus fiables en raison de la faible dispersion des points autour de la droite de corrélation et de l'étalement des totaux pluviométriques observés.

En Casamance et au sud du Mali, les valeurs pluviométriques restent trop groupées autour de la valeur médiane, ce qui limite la précision des extrapolations aux valeurs extrêmes.

Le bassin de Keur Samba Diama constitue un cas particulier par la faiblesse de ses écoulements, il est jalonné de grandes mares qui stockent une partie des ruissellements en provenance des versants. Les écoulements qui transitent par la station ne sont donc pas représentatifs des apports qui parviennent dans le bas-fond.

Le petit bassin versant de Kambo, malgré la faiblesse de ses écoulements, doit être considéré comme représentatif des petits bassins de la zone soudanienne où la nappe aquifère reste au-dessous de la surface du sol dans le bas-fond et n'alimente pas l'écoulement superficiel.

Figure 23: Relation lame écoulée pluie annuelle en zone soudano-sahélienne (Pan < 1000 mm)

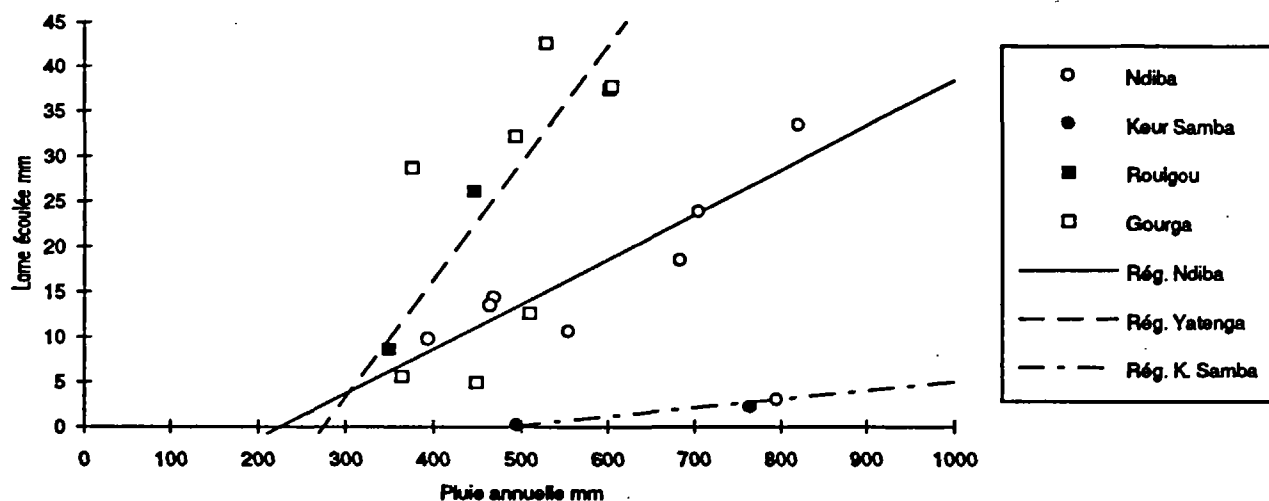
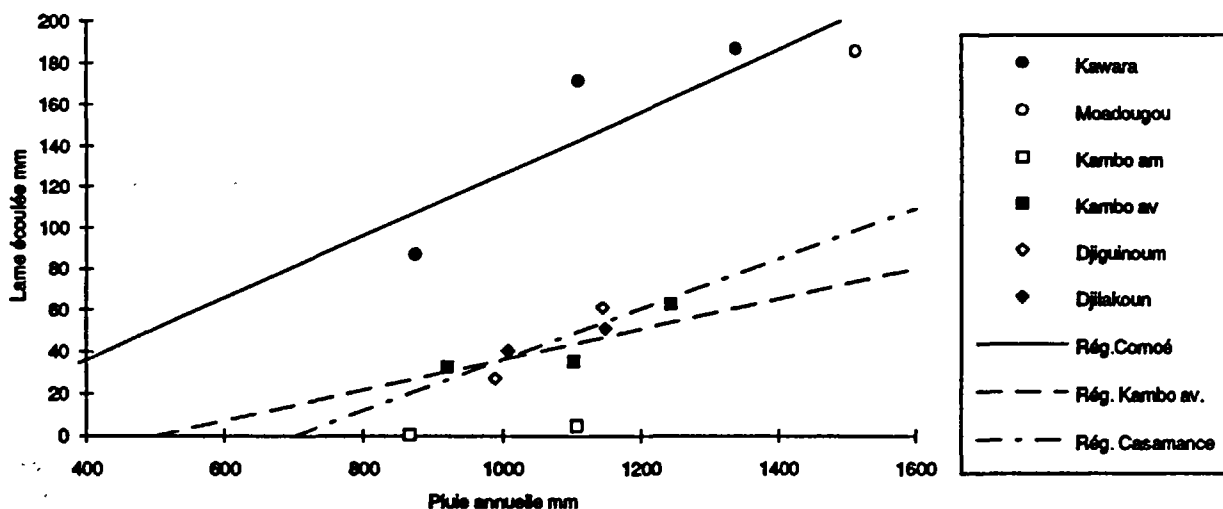


Figure 24 : Relation lame écoulée pluie annuelle en zone soudanienne et guinéenne (Pan > 1000 mm)



L'approche de la lame écoulée annuelle par une régression avec la pluie n'est qu'un moyen grossier d'estimation de la ressource en eau d'un bas-fond pour des années où la pluviométrie est de fréquence connue (Tableau XVII). L'écoulement annuel dépend du total annuel de la pluie mais également de la répartition des averses au cours de la saison, surtout sur les bassins sahéliens où l'essentiel de l'écoulement est constitué par le ruissellement immédiat.

**Tableau XVII : Apports annuels en millions de m³,
Coefficients d'écoulement, période 1970-1990.**

Bassins versants	décennale sèche		médiane		décennale humide		bassin
	Lame mm	Coef écoulée %	Lame en mm	Coef écoulée %	Lame en mm	Coef écoulée %	surface en km ²
YATENGA							
Gourga Tilli	4.2	1.4	23.4	5.2	43.2	7.0	45.0
Roulgou Toéga	7.2	2.4	27.9	6.2	48.3	8.0	95.0
SINE-SALOUM							
Ndiba	11.3	2.4	20.0	3.1	31.3	3.6	16.2
COMOE							
Kawara	88.0	11.6	120.0	12.2	148.0	12.7	99.8
MALI SUD							
Kambo amont	0.5	0.06	4.5	0.4	9.0	0.7	4.7
Kambo barrage	25.0	2.9	45.0	4.2	65.0	4.9	10.0
CASAMANCE							
Djilakoun	5.0	0.6	67.0	5.7	120.0	8.4	24.2

La part des apports souterrains dans l'écoulement superficiel

A partir des valeurs des débits moyens journaliers et en considérant les longues périodes à faible pluviométrie, nous avons séparé le ruissellement de l'écoulement de base généré par l'affleurement des nappes aquifères dans les bas-fonds. Le tableau XVIII donne les résultats obtenus.

**Tableau XVIII : Part du ruissellement et des apports souterrains
dans l'écoulement annuel des marigots.**

Bassin	Ruissellement	Ecoulement de base
Yatenga	100%	0%
Siné-Saloum	100%	0%
Comoé	50 à 60%	40 à 50%
Mali-sud	20 à 40%	60 à 80%
Casamance	0 à 10%	90 à 100%

Dans le Yatenga et le Siné-Saloum, seul le ruissellement est en mesure d'alimenter l'écoulement des marigots. Dans les régions ouest-africaines où la pluviométrie moyenne interannuelle est inférieure à 800 mm, le substratum imperméable doit être situé très près de la surface pour que les nappes aquifères puissent alimenter l'écoulement superficiel.

Dans la Comoé et le sud du Mali, la part de l'écoulement de base est égal ou supérieur à 40% de l'écoulement total : 45% sur les bassins versants de Kawara et Moadougou, 70% sur le bassin versant de Kambo. L'aptitude des sols à l'infiltration joue probablement là un rôle fondamental dans le processus d'alimentation des aquifères et conditionne la répartition des écoulements. En Casamance, l'absence de ruissellement superficiel concorde parfaitement avec l'absence de réseau hydrographique sur le bassin de Djilakoun.

RECONSTITUTION D'APPORTS AU PAS DE TEMPS JOURNALIER.

Pour simuler le fonctionnement d'un ouvrage hydraulique et son impact sur le bilan hydrique des cultures, il est nécessaire de générer des séries d'apports sur des pas de temps inférieurs à l'année. L'information pluviométrique étant disponible au pas de temps journalier sur de longues chroniques, il est possible de reconstituer des séries d'apports sur ce même pas de temps.

La reconstitution des débits à l'échelle journalière fait appel soit à une modélisation de type stochastique, soit à une modélisation de type déterministe. L'utilisation des statistiques permet de fournir rapidement des résultats dont la précision des estimations peut être chiffrée, mais la validité des résultats obtenus reste dépendante de la stabilité des facteurs qui conditionnent les écoulements superficiels et souterrains.

L'utilisation des modèles hydrologiques déterministes permet de faire varier les facteurs conditionnels de l'écoulement. Ils présentent des possibilités d'adaptation intéressantes.

Dans le cadre du projet CCE deux modèles hydrologiques de reconstitution de l'écoulement journalier ont été testés sur les bassins versants des projets Mali-Sud, Sine-Saloum et Yatenga. Le premier de ces modèles repose sur une relation linéaire entre la lame écoulée et la hauteur de pluie corrigée d'un terme caractérisant surtout l'état de saturation préalable des terrains. Ce terme est représenté par l'indice des précipitations antérieures (CHEVALLIER, 1983). Le réglage d'un tel modèle est rapide et possible, même avec seulement un à deux ans d'observations de débits. Le second modèle, de type déterministe est le modèle GR3 - CEMAGREF (MICHEL & EDJATNO, 1989). Un troisième modèle plus complexe a été mis en oeuvre au Yatenga. Il s'agit du modèle à discrétisation spatiale de GIRARD (1982), mais les travaux de calage ne sont pas assez avancés pour que les résultats puissent être présentés dans ce document.

Le premier modèle a donné des résultats satisfaisants sur le bassin de Ndiba dans le Sine-Saloum, tandis que le modèle GR3, calé sur trois années d'observations, a parfaitement convenu pour le bassin de Kambo dans le sud du Mali. L'ajustement d'une relation linéaire entre la lame écoulée et la pluie est d'autant plus satisfaisant que l'écoulement est généré principalement par du ruissellement, ce qui est souvent la réalité des zones les plus sèches du Sahel. Le modèle GR3, quant à lui, reconstitue très bien l'écoulement de base produit par les nappes et moins bien le ruissellement pur. Il convient aux zones de bas-fonds plus arrosées de la zone soudanienne.

Siné-Saloum, bas-fond de Ndiba

La relation entre la lame écoulée (L_e) et la pluie moyenne journalière (P_m) a été ajustée sur les observations 1983-1987 et validée sur la période 1988-1990 (figure 25). Elle s'exprime par la formule suivante :

$$L_e = 0.144 P_m + 0.112 IK - 3.75$$

Coefficient de corrélation $R = 0.73$ (30 couples de valeurs)

où IK est l'indice des précipitations antérieures

$$IK_n = (IK_{n-1} + P_{m_{n-1}}) e^{-0.5 \cdot t}$$

IK_n : indice des précipitations de l'événement n

$P_{m_{n-1}}$: Pluie moyenne de l'événement $n-1$

t = temps en jours entre les événements n et $n-1$

La figure 25 montre que la relation a tendance à sous-estimer les plus forts apports journaliers. La reconstitution est assez imprécise à l'échelle journalière mais devient très satisfaisante à l'échelle mensuelle ou annuelle. Une reconstitution des lames écoulées sur la période 1931-1987 à partir des pluies observées à Nioro du Rip montre que la relation pluie annuelle / lame écoulée n'est pas linéaire, mais qu'elle peut être linéarisée entre les valeurs correspondant aux récurrences décennale sèche et décennale humide (ALBERGEL & al, 1991).

La figure 26 montre les résultats de cette simulation; la droite de régression obtenue sur les valeurs observées est superposée au nuage de points. La figure 27 représente l'ajustement statistique aux lames écoulées.

Figure 25 : Ajustement d'une relation entre pluie et écoulement journaliers pour le bassin versant de Ndiba

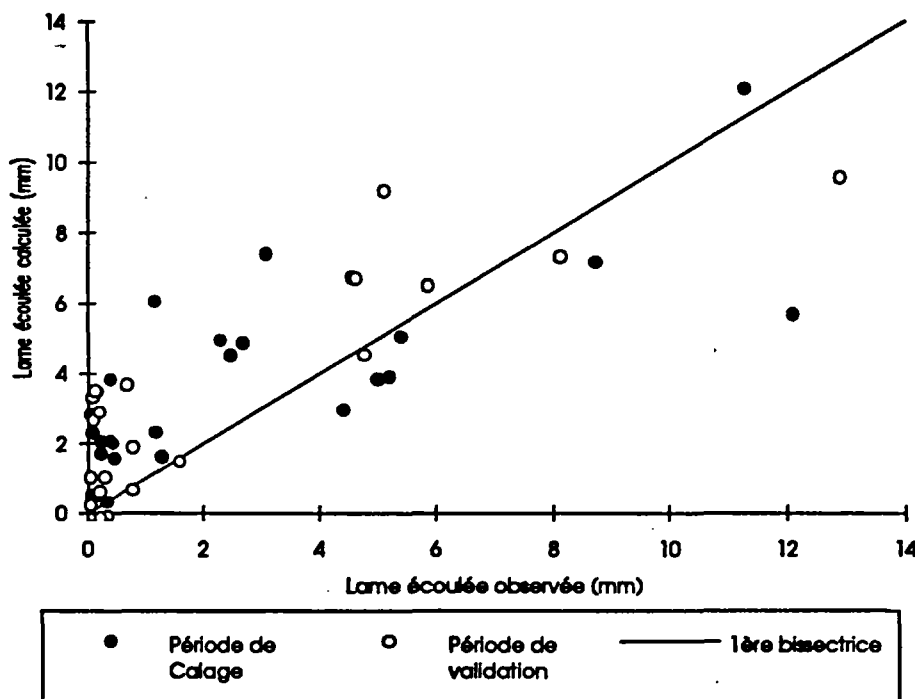


Figure 26 : Simulation des écoulements annuels. Ndiba 1931-1987

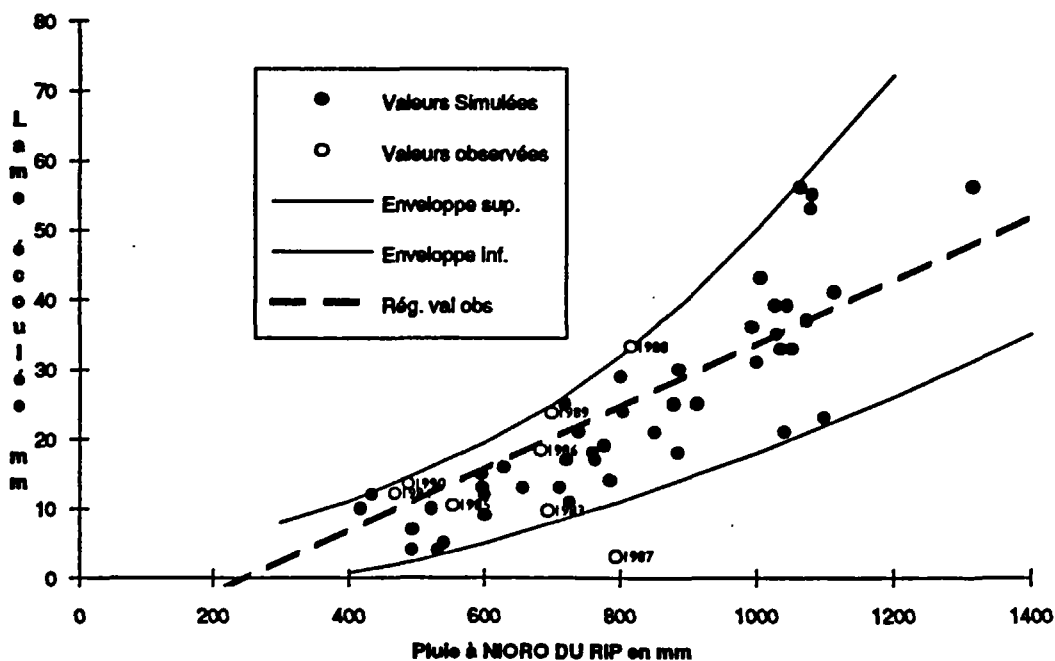
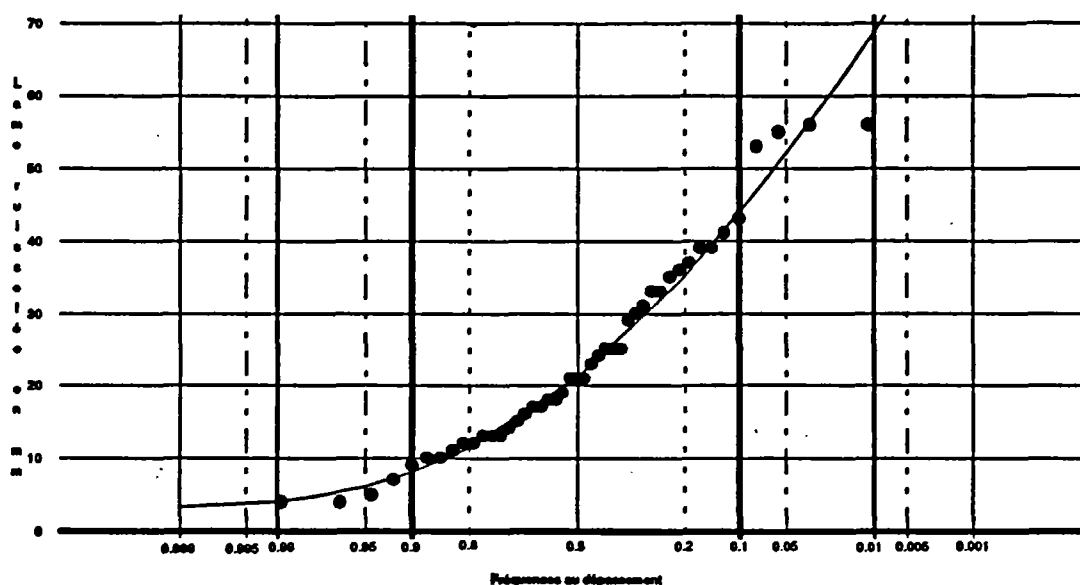


Figure 27 : Statistique des écoulements annuels. Ndiba 1931-1987



Projet Mali Sud, bas fond de KAMBO

Le modèle de reconstitution de l'écoulement journalier "GR3 - CEMAGREF" de MICHEL & EDJATNO (1989), (PARIENTE 1990) est un outil de transformation des pluies en débits à l'exutoire d'un bassin versant. Son architecture repose sur deux réservoirs et un hydrogramme unitaire, soit trois opérateurs qui dépendent chacun d'un seul paramètre :

- Le réservoir sol, dont la seule sortie est le prélèvement dû à l'évaporation potentielle, commande la répartition de la pluie nette (pluie diminuée de l'évaporation) entre lui même et un second réservoir. Il est caractérisé par sa capacité A, exprimée en mm, premier paramètre du modèle. Son niveau S est soumis à la pluie et à l'ETP (E-P); il permet de définir la fraction de pluie qui accèdera au second réservoir « eau gravitaire » : fraction définie par $(S/A)^2$. Le complément à 1 de cette fraction alimente le réservoir sol. L'évapo-transpiration réelle est calculée comme une fraction de l'ETP Penman qui est une fonction du niveau de remplissage du réservoir sol.

- Le réservoir eau gravitaire reçoit pour les premiers pas de temps la majeure partie des débits routés par l'hydrogramme unitaire ; une faible partie des sorties de l'hydrogramme rejoint directement la rivière (ruissellement). Ce second réservoir est caractérisé par sa rétention maximale à un jour B (second paramètre du modèle), exprimée en mm. Sa loi de vidange est quadratique. Son niveau R détermine le débit Q (lambe d'eau journalière) qu'il peut relâcher.

- L'hydrogramme unitaire, décrit la propagation des débits depuis leur formation à partir des pluies nettes jusqu'au deuxième réservoir. Il permet de réaliser un décalage progressif entre l'apparition de la pluie brute et l'introduction de la pluie nette qui en résulte dans le réservoir R pour produire, au même moment, le débit Q. Il dépend d'un seul paramètre (troisième du modèle), sa durée ou temps de base C exprimé en jour. Cet hydrogramme est de forme parabolique.

Le calage du modèle se fait par optimisation des paramètres en utilisant des fonctions critères qui mesurent un écart entre la chronique des débits calculés et observés. Le modèle GR3 utilise 4 critères pour cette optimisation :

- un critère global d'appréciation, critère de NASH & SUTCLIFFE (1970),
- un critère «erreur de bilan», représentant l'erreur de l'évaluation du débit à l'échelle de l'année,
- le rapport des crues; ce critère permet de juger la bonne reconstitution des fortes crues,
- le rapport de durée; ce critère calcule le rapport des durées de crue et d'étiage (calculé/observé); ces rapports doivent être proches de un.

Le calage du modèle a été réalisé sur les trois années d'observation : les valeurs des paramètres sont les suivants :

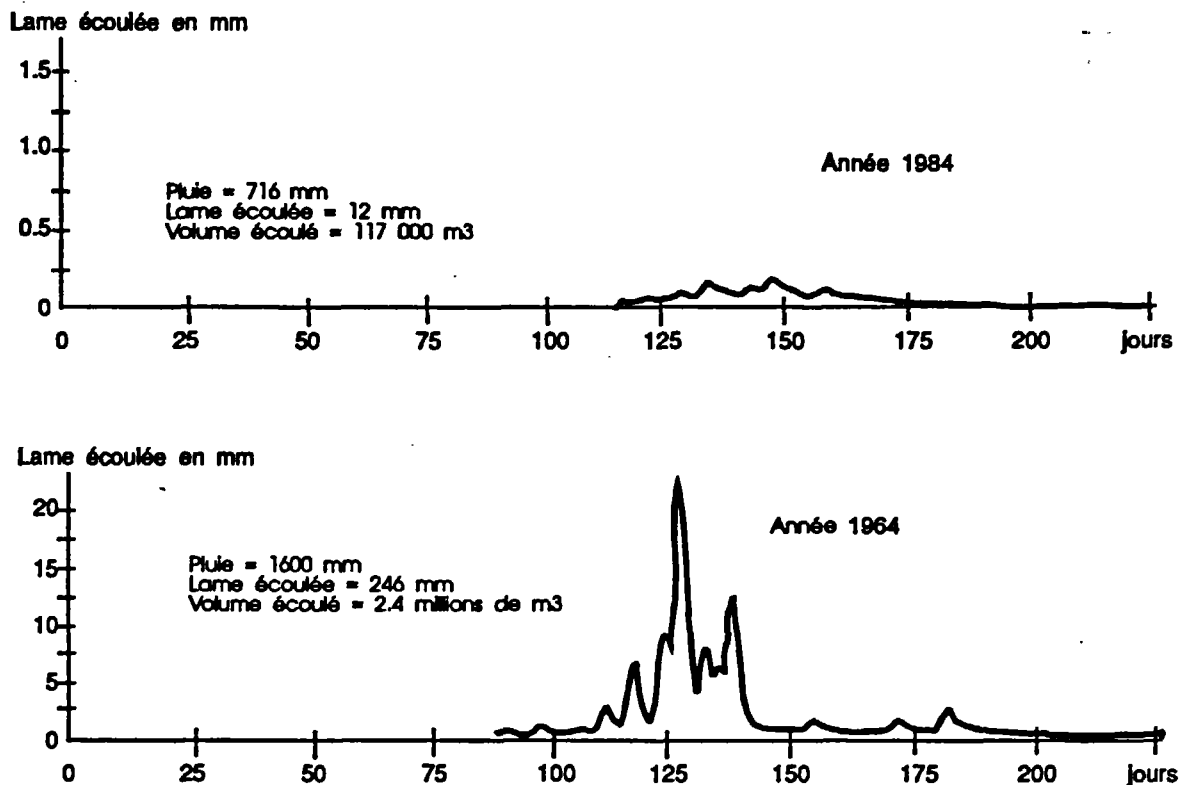
- Réservoir sol $A = 478$ mm
- Réservoir eau gravitaire $B = 32$ mm
- Hydrogramme unitaire $C = 1.34$ jours

Les valeurs des critères sont les suivants:

- Critère de NASH : 54.4%
- Erreur de bilan : 5.2%
- Rapport des crues : 91.3%, ce qui rend compte d'une bonne reconstitution des crues,
- confirmé par le fort rapport des durées de crue : 36 «calculées» pour 31 «observées»
- Le rapport des durées d'étiage est inversé : 459/492

Une simulation a été réalisée à partir des données de pluies journalières observées à Kadiolo (1963-1987). La figure 28 montre la simulation pour une année forte 1964 (1600 mm) et une année faible 1984 (716 mm). Les années 1982 (607 mm) et 1983 (433 mm) ont donné un écoulement pratiquement nul. La lame écoulée en année moyenne est de 84 mm, de 11 mm pour une année décennale sèche et de 200 mm pour une année décennale humide.

Figure 28 : Reconstitution des apports à Kambo (années : 1964 & 1984)



LES CRUES

L'étude des crues a pour objectif principal de fournir aux projets d'aménagement hydraulique une estimation du débit maximum contre lequel on souhaite protéger l'ouvrage afin d'éviter sa destruction ou sa submersion. Lorsque l'ouvrage est de peu d'importance, sa protection n'est assurée que pour les crues de fréquences vicennale ou cinquantennale. Quand l'importance de l'ouvrage augmente ou que sa destruction peut avoir des conséquences dommageables importantes, la protection de l'ouvrage doit être assurée pour les crues de fréquence centennale voire millennale et même décennennale pour les très gros aménagements.

Les hydrologues ont pris l'habitude de se servir des crues de fréquence décennale comme base de calcul pour l'extrapolation aux valeurs extrêmes. Pour les petits bassins versants sur lesquels on ne dispose généralement que de peu d'années observées, ce choix est pleinement justifié. Nous chercherons donc avant toute chose, dans le cadre de cette étude des crues, à caractériser les crues de fréquence décennale sur tous les bassins versants afin de fournir les éléments d'une régionalisation des paramètres hydrologiques liés à la définition des crues exceptionnelles. Les caractéristiques de ces crues sont fournies dans le tableau XIX

Tableau XIX : Crues de fréquence décennale sur les bassins

	Surface en km ²	T _m heure	T _b heure	P moy mm	Kr %	Q _{moy} m ³ /s	Q _{max} m ³ /s	a
YATENGA								
Gourga Tilli	45.0	2.5	9	78	20	22	47.5	2.2
Roulgou Toéga	95.0	3	22	73	16	14	40	2.9
SINE-SALOUM								
Ndiba	16.2	1	3	97	22	30	60	2.0
Keur Samba D.	75.6	3	6	87	26	80	160	2.0
COMOE								
Kawara	99.8	3	16	93	15	24	36	1.5
Moadougou	112.0	3	16	92	20	36	59	1.6
MALI SUD								
Kambo amont	4.7	3.5	8	105	5	0.86	1.7	2.0
Kambo barrage	10.0	7	24	100	10	1.16	2.3	2.0
CASAMANCE								
Le Brusq	2.56	1.25	4	154	8.6	2.4	7.2	3.0
Djiguinoum	16.8	5	30	138	3.6	0.76	1.9	2.5
Djilakoun	24.2	10	37	136	7	1.73	4.3	2.5

T_m = Temps de montée, T_b = Temps de base, P_{moy} = Pluie moyenne sur le bassin versant, Kr = Coefficient de ruissellement, Q_{moy} = débit moyen, Q_{max} = débit de pointe
a = Coefficient de forme (Q_{max}/Q_{moy})

Les paramètres qui caractérisent la durée de la crue, sa forme et sa puissance sont déterminés à partir des fortes crues observées sur les 5 sites expérimentaux. Une attention particulière a été accordée à la détermination des temps de base qui conditionnent l'estimation des débits moyens et du coefficient de forme, rapport du débit maximum au débit moyen. Les temps de base sont fréquemment sur-estimés car il est difficile de déterminer l'arrêt du ruissellement qui se confond d'autant mieux avec l'écoulement de base que celui-ci est important. En règle générale, les valeurs du coefficient de forme des crues se situent entre 2 et 3. Lorsqu'il s'est révélé nettement supérieur à 3, nous avons procédé à une relecture des hydrogrammes de crue.

L'examen des crues observées sur les bassins versants montre que les fortes crues sont peu nombreuses. Les bassins versants de Gourga au Yatenga, Ndiba dans le Siné-Saloum, Kawara et Moadougou dans la Comoé, Le Brusq en Casamance ont connu des crues proches de la fréquence décennale pendant la période d'observation. Sur un total de 33 années d'observation, tous sites confondus (10 bassins), il a été observé 5 fois un événement proche de l'événement décennal.

Le choix du coefficient de ruissellement de fréquence décennale pose cependant un problème qui n'est pas toujours facile à résoudre quand les coefficients de ruissellement observés présentent des valeurs très différentes. Les coefficients de ruissellement indiqués sur le tableau XIX sont légèrement supérieurs (ou égaux) aux valeurs maximales observées sur les bassins à l'occasion des crues les plus fortes. Une exception a été faite pour le bassin de Ndiba où le coefficient de ruissellement de la crue du 17 juin 1989 est égal à 49%. Il est difficile d'oublier cette valeur exceptionnellement forte qui coïncide vraisemblablement, au tout début de la saison des pluies, avec des états de surface cultivée particulièrement aptes au ruissellement. Les bassins versants très cultivés peuvent ainsi réserver quelques surprises désagréables et il n'est pas rare que des aménagements antérieurs à leur mise en culture voient leurs ouvrages de protection sous-dimensionnés pour la période actuelle.

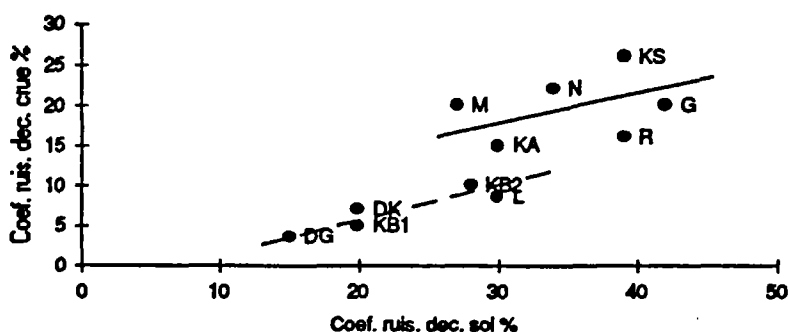
Le tableau 20 compare les estimations des coefficients de ruissellement décennaux obtenus à partir de l'étude des crues et celles calculées à partir de l'analyse des cartes de l'occupation des sols (tableau XIII). La seconde estimation est toujours plus forte que la première. On peut attribuer cette différence aux pertes dans le réseau hydrographique. La figure 29 met en évidence deux familles de bas-fonds :

- Les réseaux hydrographiques constitués principalement par un bas-fond large, sans lit mineur qui caractérisent les bassins de Casamance et du sud Mali.
- Les réseaux hydrographiques bien hiérarchisés, dendritiques avec une tendance radiale en amont qui caractérisent les bassins des projets Comoé, Yatenga et Siné-Saloum.

Tableau XX : Comparaison des coefficients de ruissellement de fréquence décennale

Projets	Coefficients de ruissellement calculés à partir :		Projets	Coefficients de ruissellement calculés à partir :	
	des unités paysagiques	des crues observées		des unités paysagiques	des crues observées
YATENGA Gourga T. Roulgou T.	42 39	20 16	MALI-SUD Kambo amont Kambo barrage	20 28	5 10
SINE-SALOUM Ndiba Keur S.Diama	34 39	22 26	CASAMANCE Le Brusq Djiguinoum Djilakoun	30 15 20	8.6 3.6 7
COMOE Kawara Moadougou	30 27	15 20			

Figure 29 : Comparaison des coefficients de ruissellement décennaux



QUALITE DES EAUX DE SURFACE

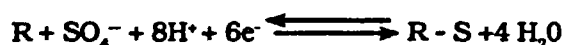
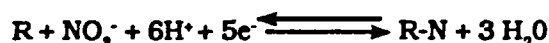
Deux projets pilotes ont réalisé des observations sur la qualité des eaux de surface dans leurs bas-fonds. En Casamance, la qualité chimique des eaux est la contrainte majeure au développement de la riziculture de bas-fond : salinité, ions ferrique et aluminique toxiques pour les cultures. Dans le Siné-Saloum, les forts taux de sable dans les sédiments apportés par les crues limitent les possibilités d'aménagement. Sur les trois autres projets, la qualité des eaux de surface ne pose pas de problème aux aménagements ou aux cultures.

CHIMIE DES EAUX EN CASAMANCE

La qualité des eaux de surface a été suivie pendant 3 années en fonction des exigences agronomiques. D'une part, la salinité, provenant des sels accumulés dans les sédiments lorsque la vallée était ouverte à la marée et des infiltrations marines qui sont toujours possibles au-dessous de la digue, a fait l'objet de mesures régulières. D'autre part, des mesures de pH et des analyses des ions majeurs présents dans l'eau ont été réalisées pour déterminer les niveaux de toxicité ferrique et aluminique pour la culture du riz.

Dans ce milieu très riche en matière organique, les micro-organismes dégradent cette matière en libérant des électrons e^- et des ions H^+ . Ces électrons et ces ions réagissent avec la matière minérale (argile) et des ions métalliques sont libérés dans l'eau.

Les équations chimiques de dégradation de la matière organique peuvent s'écrire simplement sous la forme :



(R étant un radical organique)

Bilan salin

Les mesures de conductivité et de pH ont été réalisées lors de chaque lâcher au barrage, afin d'estimer le poids de sels évacués de la plaine. Ce suivi montre qu'il est possible d'évacuer de grandes quantités de sels au cours d'une saison des pluies. En 1989, par exemple, la salinité des eaux du barrage a baissé d'environ 20 mS/cm (13 g/l) à 2 mS/cm (1g/l) (figure 30). Un bilan pondéral a été établi pour chaque année de l'étude (tableau XXI). En 1988, une seule vanne était fonctionnelle, et les règles de gestion n'étaient pas encore suivies. La salinité est obtenue à partir de la conductivité par la relation suivante :

Salinité (g/l) = $0.5089 \times CE^{1.079}$ (mS/cm) (relation établie statistiquement sur 15 échantillons d'eau de mer $R^2 = 0.999$) (MONTOROI, 1991).

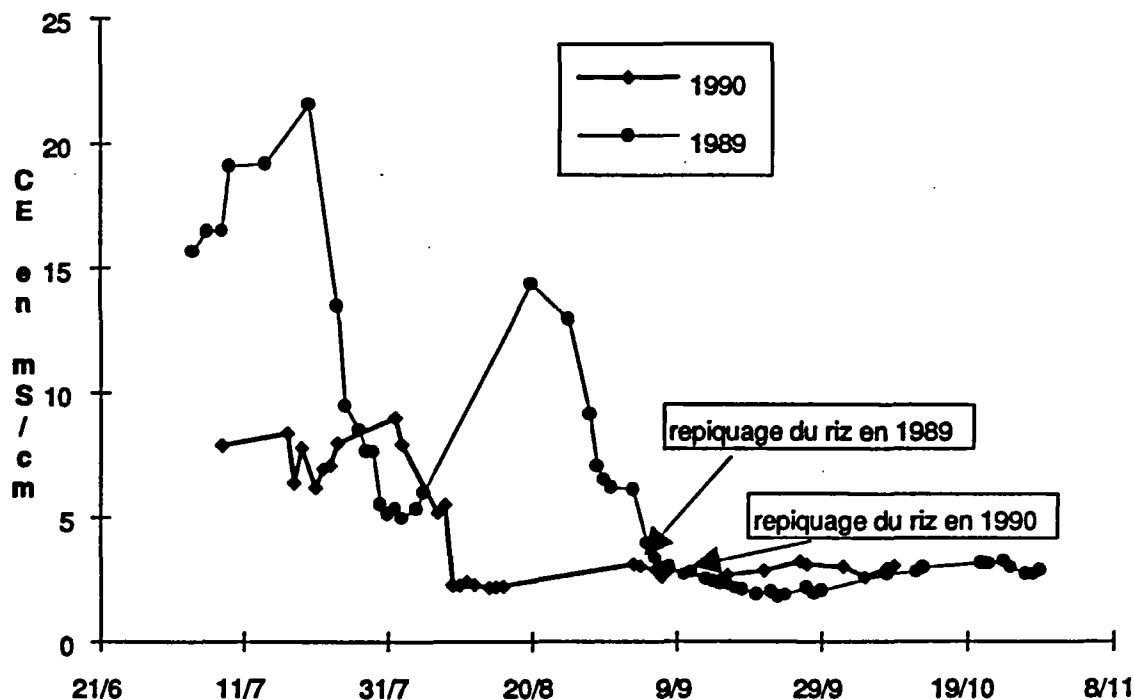
Tableau XXI : Bilan du sel évacué de la vallée de Djiguioum

Année	Nb lâchers	Volume d'eau m3	Masse totale de sel Tonnes	Masse de sel T/ha
1988	24 (1 vanne)	215000	315	2.03
1989	55 (3 vannes)	1026062	2234	14.41
1990	34 (3 vannes)	741900	1409	9.09

NB: le volume par hectare est une moyenne indicatrice sur l'ensemble des sols du bas-fond, la répartition des sels n'étant pas homogène sur tous les sols.

Une période de sécheresse durant la saison des pluies fait remonter rapidement la concentration en sel de la retenue (seconde décade d'août 1989). Une très forte pluie en début de saison abaisse significativement la conductivité. Le repiquage du riz a été réalisé lorsque la salinité des eaux de la retenue est descendue entre 1 et 1.5 g/l.

Figure 30 : Evolution de la conductivité des eaux de la retenue de Djilakoun en 1989 et 1990



Suivi des éléments dissous

Durant la saison des pluies, l'acidité des eaux varie peu, le pH passe de 2.7 à 3.8. Les variations de teneur en ions dissous s'expliquent surtout par la dilution et l'évacuation lors des lâchers. Les légères variations du pH peuvent également avoir une influence en déplaçant les équilibres chimiques présentés ci-dessus. L'acidité des sols diminue avec leur submersion (le pH passe à une valeur légèrement supérieure à 4). Les variations des éléments dissous ont été suivies chaque année dans les eaux de la retenue. Les graphiques 31 et 32 donnent en exemple l'année 1990.

Figure 31 : Composition ionique des eaux de la retenue du barrage de Djilakoun, 1990

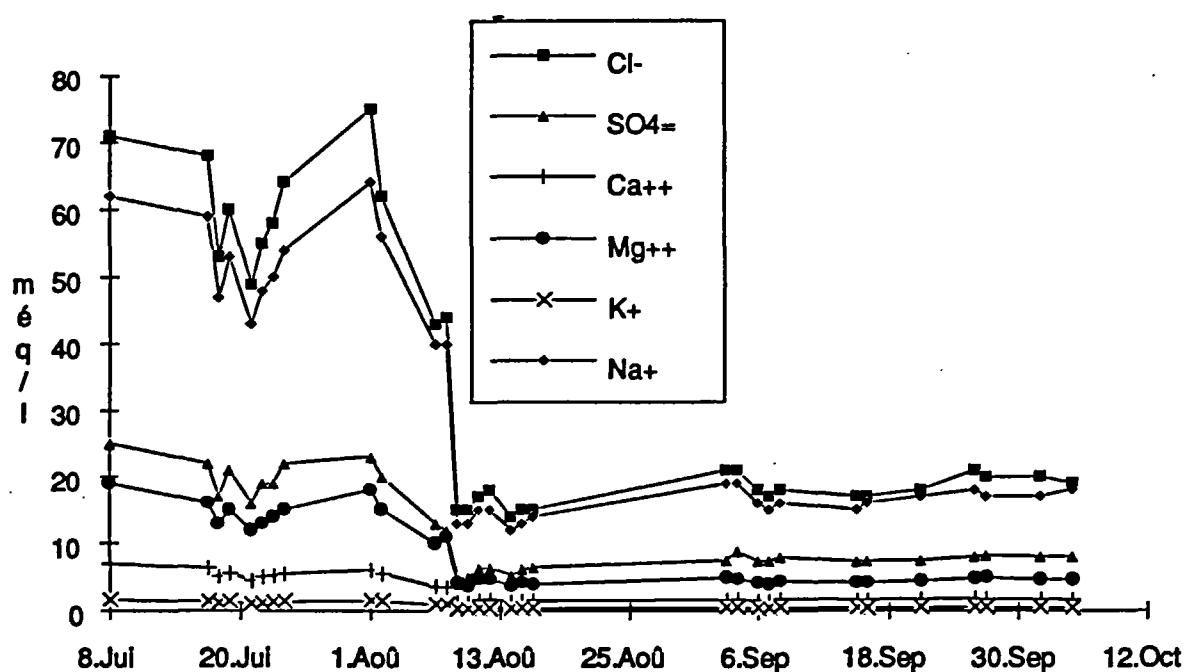
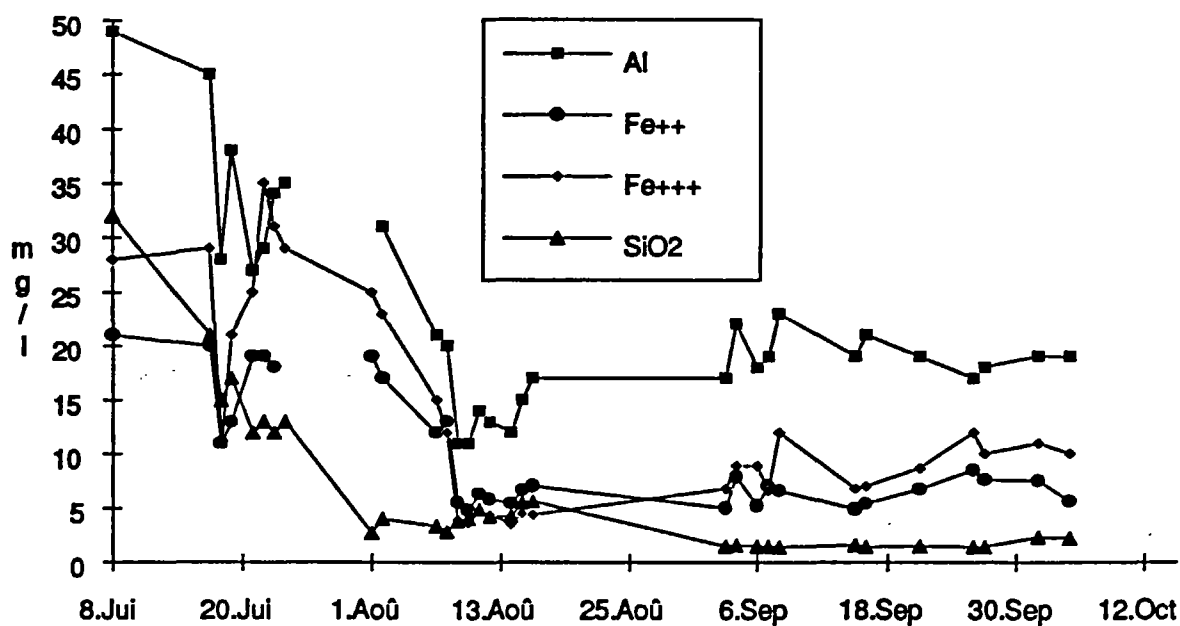


Figure 32 : Teneur en aluminium, fer et silice des eaux de la retenue du barrage de Djilakoun, 1990



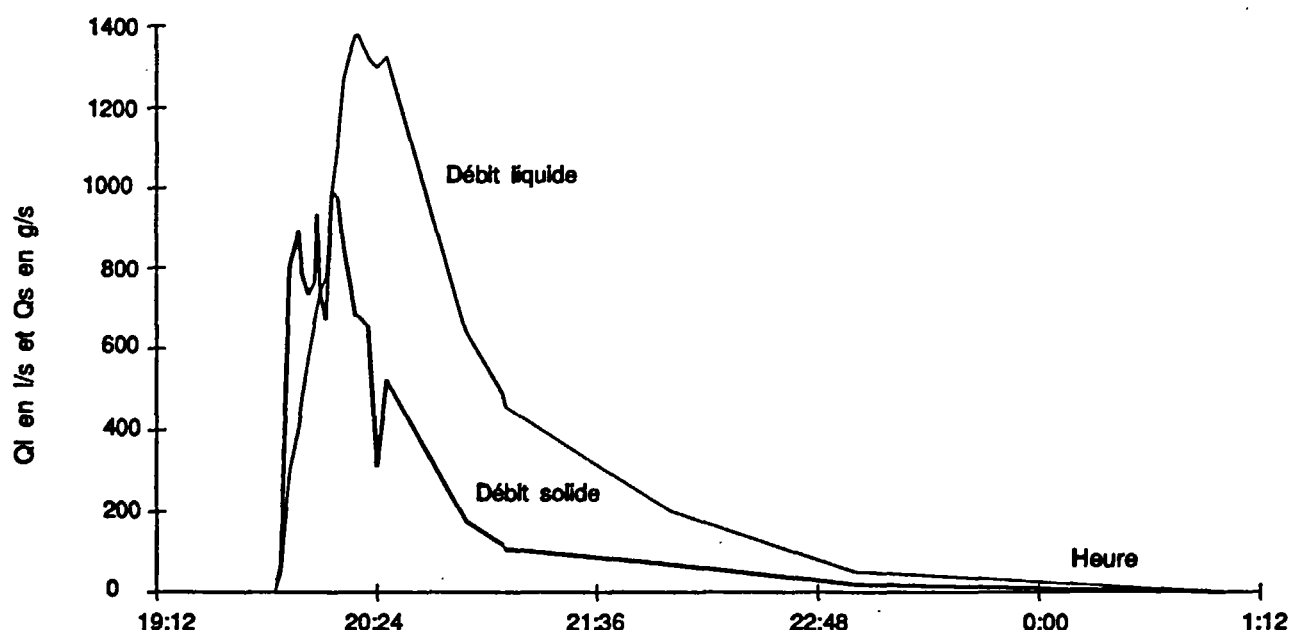
La teneur de l'ensemble des éléments dissous chute dans les 5 premières semaines de la saison des pluies. De légères augmentations ont lieu pendant les périodes de sécheresse. Pour les éléments toxiques du riz, les taux des éléments toxiques pour le riz passent de plus de 50 mg/l en début de remplissage de la retenue à 15-20 mg/l avant la date du repiquage pour l'aluminium total et de 30 mg/l à 5-10 mg/l pour le fer ferreux.

TRANSPORTS SOLIDES DANS LE SINE-SALOUM

Une contrainte à la mise en valeur des bas-fonds au Sine-Saloum est constituée par les apports en matériaux arrachés aux versants par l'érosion. Quatre ravines dont les bassins versants varient de 2.5 ha à 90 ha ont été équipées d'un dispositif de mesure du ruissellement et de l'érosion (fosse à sédiments et mesure des matières en suspension). Avant aménagement anti-érosif, les apports en matières solides ont été évalués à 1.5 t/ha, dont 12 % sont formés de sables grossiers se déposant en cônes de déjections dans le bas-fond. Les concentrations maximales de matières fines en suspension varient entre 20 et 30 g/l et surviennent un peu avant le maximum des premières fortes crues. Ces concentrations diminuent au fur et à mesure que la végétation s'installe durant l'hivernage. La figure 33 montre l'évolution du débit solide durant une forte crue dans une ravine dont le bassin a une superficie de 58 ha.

Les problèmes d'érosion et d'aménagements anti-érosifs ont été étudiés dans le cadre du programme "Economie de l'eau, défense et restauration des sols" qui a donné lieu à plusieurs publications dont on peut citer : ALBERGEL & al, (1990), et RUELLE & al, (1990).

Figure 33 : Transports liquides et solides d'une ravine drainant 58 ha (Keur Dianko) - Crue du 13/07/88



Des sols à faible potentiel agronomique

MORPHO-PEDOLOGIE

MORPHO-PEDOLOGIE LONGITUDINALE

Les sols mis en place à partir des colluvions et des alluvions dans les bas-fond se différencient de l'amont vers aval des axes de drainage selon une dynamique liée aux écoulements de surface dans les régions où la pluviométrie annuelle est inférieure à 1000 mm, selon une dynamique liées aux écoulements superficiels et souterrains dans les régions où la pluviométrie annuelle est supérieure à 1000 mm.

RAUNET (1985) différencie de façon générale les bas-fonds en trois tronçons:

La tête des bas-fonds

La tête des bas-fonds est souvent élargie en "spatule" ou en "amphithéâtre". Les sols y sont sableux, l'altération en place est proche de la surface. L'eau s'écoule librement et disparaît rapidement après les crues.

Le bassin versant a une superficie allant de quelques hectares à quelques kilomètres carrés. On n'y distingue pas encore de réseau hydrographique. Le ruissellement se fait en nappe en suivant des chemins préférentiels marqués par la différenciation des états de surface. (CASENAVE & VALENTIN, 1989).

La partie amont

Une discrète entaille discontinue apparaît au centre du profil transversal qui devient horizontal de part et d'autre de cette entaille. Les flancs sont nettement concaves. Les sols deviennent argilo-sableux et peuvent y acquérir, si le régime hydrique est assez contrasté, des caractères vertiques. Ils contiennent une part de matériaux issus des versants. On ne remarque pas d'alluvions franches, mais des apports colluvio-alluviaux occupent la zone centrale du bas-fond.

La surface du bassin est de 5 à 20 km². Le ruissellement se concentre dans le bas-fond qui est généralement perméable en début de saison des pluies. Cette perméabilité est induite par la végétation, l'activité de la mésofaune et les fentes de retrait lorsque le sol a un caractère vertique. Le bas-fond devient rapidement imperméable lorsqu'il est gorgé d'eau par la remontée du niveau des nappes aquifères.

La partie aval

Le bas-fond s'élargit, son profil transversal s'aplatit. Le lit mineur est bien marqué et encaissé. Il est bordé de diverses levées alluviales. Un véritable remblai colluvio-alluvial de texture argilo-limoneuse, souvent colmaté, parfois à caractère vertique, surmonte la couche sablo-gravillonnaire qui repose sur les altérites. Le bassin versant a une surface de quelques dizaines de km² à 200 km². La perméabilité des sols y est assez faible vu leur texture argilo-sableuse ou argilo-limoneuse. Elle varie en fonction de l'état de surface. Sur les parties non cultivées le sol est couvert d'une pellicule de décantation reposant sur une surface réorganisée comprenant une superposition de pellicules à éléments fins. La perméabilité globale mesurée sous pluie simulée et à l'état saturé est toujours inférieure à 10 mm/h (ALBERGEL, 1987). C'est dans cette partie que l'on trouve le plus fréquemment les cultures. Ces dernières induisent des organisations de surface particulières et des variations dans les paramètres hydro-dynamiques des sols.

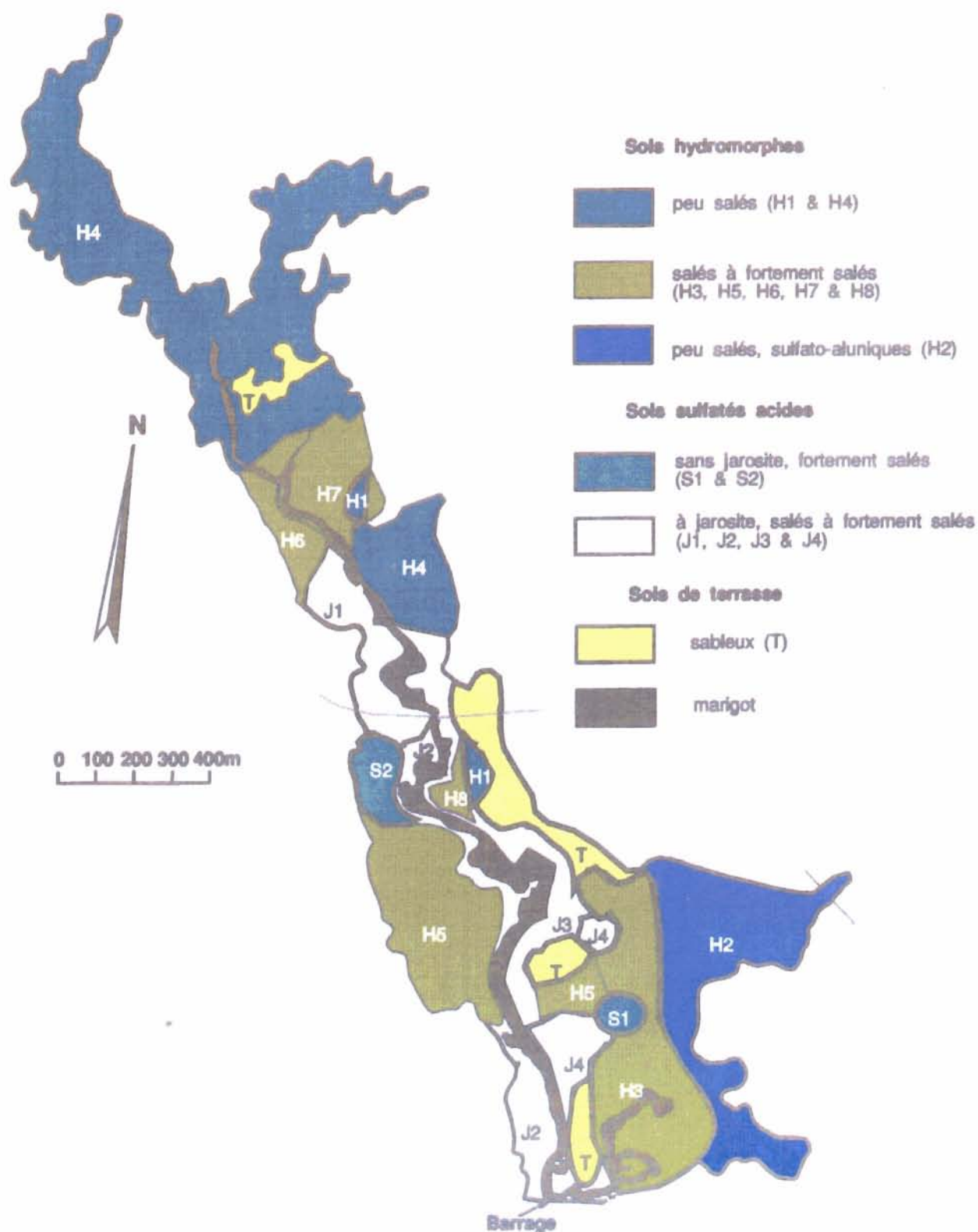
Les alluvions des bas-fonds sont des dépôts de décantation sous strate graminéenne; celle-ci permet l'étalement d'une nappe peu turbulente issue du débordement du cours d'eau enrichi des écoulements provenant des ruissellements sur les versants et des écoulements souterrains provenant de l'affleurement des nappes aquifères dans le bas-fond.

Dans le Yatenga et le Siné-Saloum, les sols de la zone centrale sont de type peu évolué d'apport colluvial en tête de bas-fond, de type peu évolué d'apport colluvio-alluvial hydromorphes dans la partie amont et hydromorphe à pseudo-gley dans la partie aval. De l'amont vers l'aval, les sols des bas-fonds sahéliens et soudano-sahéliens s'enrichissent en éléments fins et présentent des caractères hydromorphes de plus en plus affirmés.

Dans le sud du Mali et dans la Comoé, les sols de la zone centrale sont de type ferrugineux tropical lessivé sur matériaux sablo-argileux et gravillonnaires en tête de bas-fond. Ces mêmes sols deviennent hydromorphes dans la partie amont puis de type hydromorphes à pseudo-gley dans la partie aval où ils peuvent cependant posséder localement une texture grossière sableuse à argilo-sableuse très hétérogène.

En Casamance, les sols de la zone centrale sont hydromorphes peu salés en tête de bas-fond et dans les parties amont ou aval hors de l'emprise des marées. Les sols deviennent salés à fortement salés à proximité du lit mineur quand son altitude est inférieure à celle de la marée haute. La carte des sols du bas-fond de Djiguinoum, présentée sur la planche couleur 2, illustre bien la disposition générale des types de sols dans les bas-fonds de Casamance sous l'influence de la marée.

Planche couleur 2 : Cartes des sols du bas-fond de Djigounoum (BRUNET, 1988)

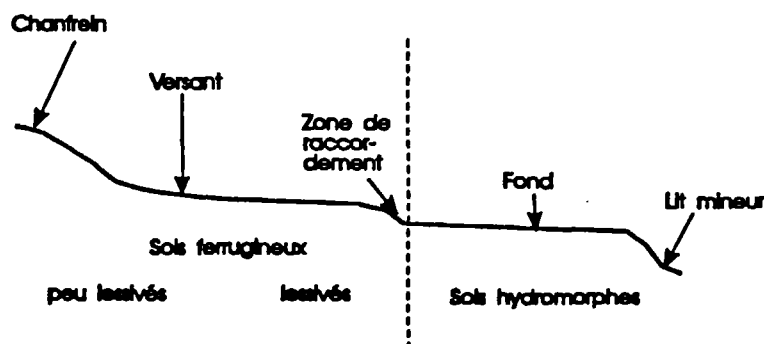


MORPHO-PEDOLOGIE TRANSVERSALE

Traits communs aux cinq projets

Les sols mis en place à partir des altérites se différencient également transversalement des axes des bas-fonds de la zone centrale vers les versants. Plus généralement, les différents sols sur l'ensemble des projets pilotes s'organisent suivant le schéma de la figure 34.

Figure 34: Différents sols suivant la morphologie



Depuis le versant jusqu'à l'axe central d'écoulement, on distingue :

Le chanfrein ou zone de raccordement

Il correspond aux pentes de raccordement entre le versant et le bas-fond au sens strict. Ces pentes sont généralement fortes, de 1 à 5 %. Dans les zones les plus sèches (projets Yatenga et Siné-Saloum), ce sont des surfaces dénudées. La végétation est généralement une savane arbustive très dégradée avec de nombreux champs de culture. Cette dégradation est due à une érosion hydro-éolienne importante facilitée souvent par les labours et le piétinement des animaux. Les sols sont de type ferrugineux tropical peu lessivé avec concrétions ou indurations (cas du Yatenga sur les parties amont et médianes des bas-fonds). Dans les zones plus humides, les sols ferrugineux tropicaux sont lessivés et présentent un faciès sableux généralisé. Les liaisons entre les particules (argile, oxy-hydroxydes de fer, matière organique) sont rompues au cours de la dessiccation extrême de la surface du sol provoquant l'appauvrissement du profil en éléments fins. Le régime hydrique des sols se modifie, favorisant la lixiviation des sols. L'intervention humaine est un facteur supplémentaire qui accélère le processus de déferrallitisation surtout lorsque les conditions climatiques deviennent de plus en plus contrastées.

Les versants du bas-fond

Les versants sont pris en compte jusqu'au changement de pente. Ils peuvent être rectilignes, concaves, convexes, successivement concaves puis convexes ou inversement. Les pentes mesurées y varient de 2 à 10%. Cette observation rejoint celle de KILLIAN & TEISSIER (1973) qui remarquent pour l'ensemble des bas-fonds soudano-sahéliens des pentes variant de 2 à 4 % et de 6 à 10 % suivant les types morphologiques. Les versants reçoivent d'une part les apports sableux, limoneux ou argileux de l'érosion hydrique du chanfrein et, d'autre part, des apports en eau et en matières fines des plus hautes crues des ravines collatérales. Ils restent filtrants et ne sont que temporairement submergés. Le couvert végétal, composé d'arbres et arbustes, est faible dans le Sahel, dense dans la zone soudanienne. C'est le domaine de prédilection pour les vergers (bananerales à Kambo au Mali-Sud, arbres de cueillette au Yatenga). On y retrouve surtout des sols ferrugineux tropicaux plus ou moins lessivés en fonction de la zone climatique.

La zone de raccordement versant/zone centrale

Elle est caractérisée par une rupture de pente plus ou moins nette, spécifique à chaque type de bas-fond. Elle est submergée par les crues d'importance moyenne à forte. La zone de raccordement correspond à des zones de dépôts, principalement colluviaux, plus abondants au débouché des émissaires latéraux qui alimentent en eaux de ruissellement l'écoulement des marigots.

Dans les régions sahéliennes et soudano-sahéliennes, les sols de cette zone sont de type peu évolué d'apport colluvio-alluvial, hydromorphes en profondeur.

Dans les régions soudanaises et guinéennes du sud du Mali, dans la Comoé et en Casamance, les sols de cette zone sont souvent sableux hydromorphes lessivés car ils correspondent aux zones d'affleurement des nappes aquifères. Les sols y sont gris de type éluvial.

La zone centrale

Elle correspond au bas-fond proprement dit. La pente longitudinale est variable et la pente transversale est inférieure à 1%. C'est une zone régulièrement inondée. L'inondation est pérenne durant l'hivernage au sud de l'isohyète 1000 mm, temporaire au Yatenga et au Siné-Saloum. C'est la zone envahie par les marées dans les zones estuariennes (Casamance). Elle comprend généralement une entaille ou drain qui correspond au lit mineur du marigot. La sédimentation des remblais argileux et la bonne production de biomasse de restitution y autorisent la culture là où l'eau ou la violence des crues ne sont pas limitants. Les cultures fréquentes y sont le riz, les cultures maraîchères et le sorgho de bas-fond dans les zones sèches.

Projet Yatenga

La figure 35, qui présente la carte pédologique et la coupe transversale du bas-fond de Bidi-Gourga au Yatenga, donne une idée de cette différenciation.

Projet Casamance

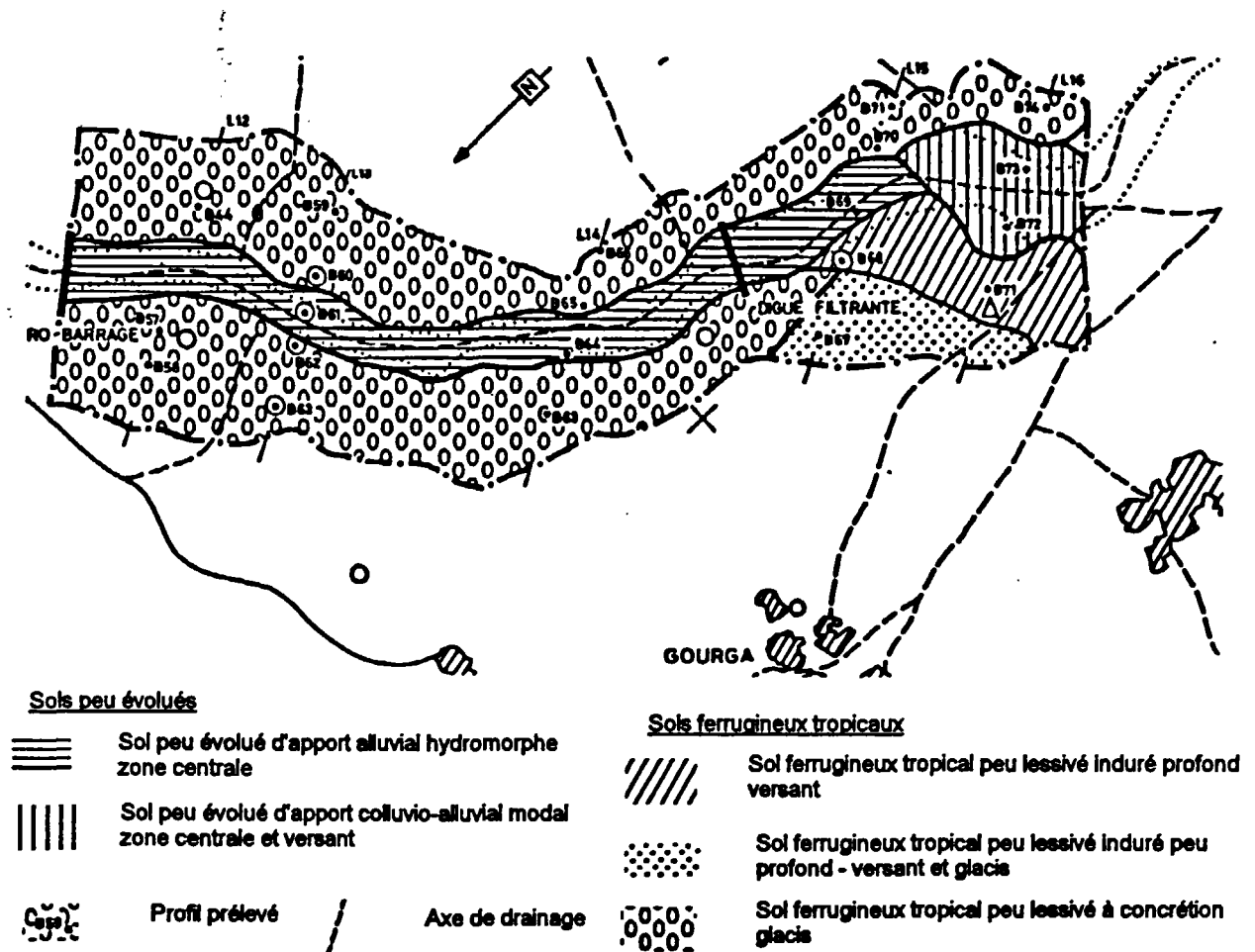
En Casamance, les sols s'organisent de la manière suivante selon la topographie (figure 36).

. Au sommet des plateaux, on trouve le domaine des sols ferrallitiques partiellement désaturés sur matériau argilo-sableux du Continental terminal (I). Ces sols sont profonds (plusieurs mètres) et se caractérisent par leur couleur rouge plus ou moins prononcée et par leur structure pseudo-particulaire. L'horizon supérieur est appauvri en argile et faiblement organique (III).

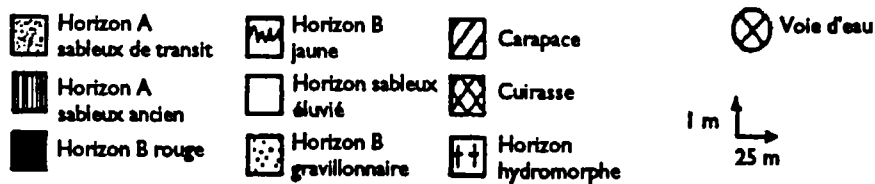
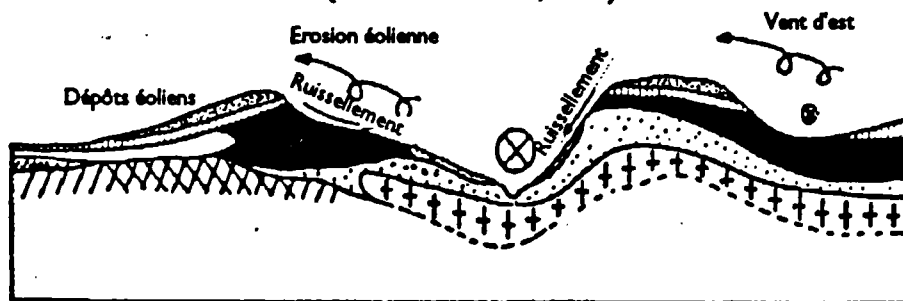
. La bordure du plateau et le versant de la vallée sont occupés par les sols ferrugineux tropicaux qui constituent un terme d'évolution des sols rouges (IV1). Leur couleur ocre ou beige est due au processus de déferrallitisation des sols rouges qui s'opère par suite de la modification de l'organisation des constituants. Les liaisons entre les particules (argile, oxy-hydroxydes de fer, matière organique) sont rompues au cours de la dessiccation extrême de la surface du sol provoquant l'appauvrissement du profil en éléments fins. Le régime hydrique du sol se modifie, favorisant les mécanismes de transformation des sols rouges en sols beiges. L'intervention humaine est un facteur supplémentaire qui accélère le processus de déferrallitisation.

. Le bas de versant est constitué par des sols hydromorphes (IV2) présentant un faciès sableux généralisé. Ils sont appelés sol gris et forment le terme ultime de la transformation précédente. Ils se prolongent dans le bas-fond par les sols sableux hydromorphes de terrasse et par les dépôts argileux et organiques du domaine des sols sulfatés acides (V).

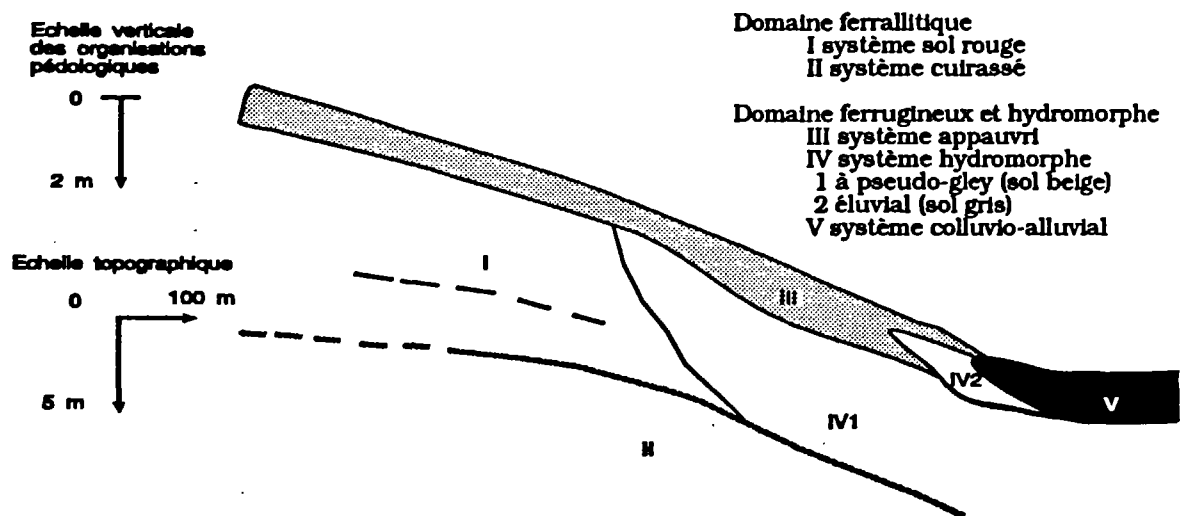
**Figure 35 : Carte et coupe pédologique du bas-fond de Bidi-Gourga
(ZOMBRE, 1991 - SERPANTIE & al, 1992)**



**Coupe pédologique transversale du bas-fond de Bidi-Gourga
(SERPANTIE & al, 1992)**



**Figure 36 : Organisation des sols suivant la topographie en Casamance
(ALBERGEL & al. 1991)**



CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS

GRANULOMETRIE

Le sol apparaît comme un complexe dynamique à trois phases: une phase solide, une phase liquide et une phase gazeuse qui s'interpénètrent et s'influencent réciproquement.

L'étude de la composition de la phase solide du sol conduit à distinguer en première analyse, les particules minérales des particules organiques. L'analyse granulométrique, par la séparation des parcelles minérales selon leur taille, permet de caractériser la texture des sols. Elle s'effectue après une destruction préalable de la matière organique. Le tableau XXII présente les résultats des analyses granulométriques effectuées dans les bas-fonds des projets pilotes. Les fractions granulométriques analysées sont les suivantes:

- * les argiles aux particules de taille inférieure à 2 μm ,
- * les limons (ou silts), de taille inférieure à 50 μm et supérieure à 2 μm ,
- * les sables fins, de taille inférieure à 200 μm et supérieure à 50 μm ,
- * les sables grossiers, de taille inférieure à 2 mm et supérieure à 200 μm ,
- * les éléments grossiers, gravillons, graviers, cailloux, de taille supérieure à 2 mm.

L'utilisation d'un triangle des textures, tel que le diagramme des textures des USA ou le diagramme du GEPPA (1963), permet de classer chaque horizon pédologique selon ses caractéristiques granulométriques. Nous nous sommes limités à la présentation des analyses de 4 horizons pédologiques: 0 à 15cm, 15 à 30cm, 35 à 75cm et 75 à 115cm. Ces quatre horizons permettent d'observer les variations granulométriques en fonction de la profondeur en relation avec l'enracinement des cultures de bas-fond qui est de l'ordre de:

- 25 cm pour le riz inondé,
- 50 cm pour le riz pluvial,
- 100 à 150 cm pour le sorgho.

Tableau XXII: Granulométrie des sols de bas-fond

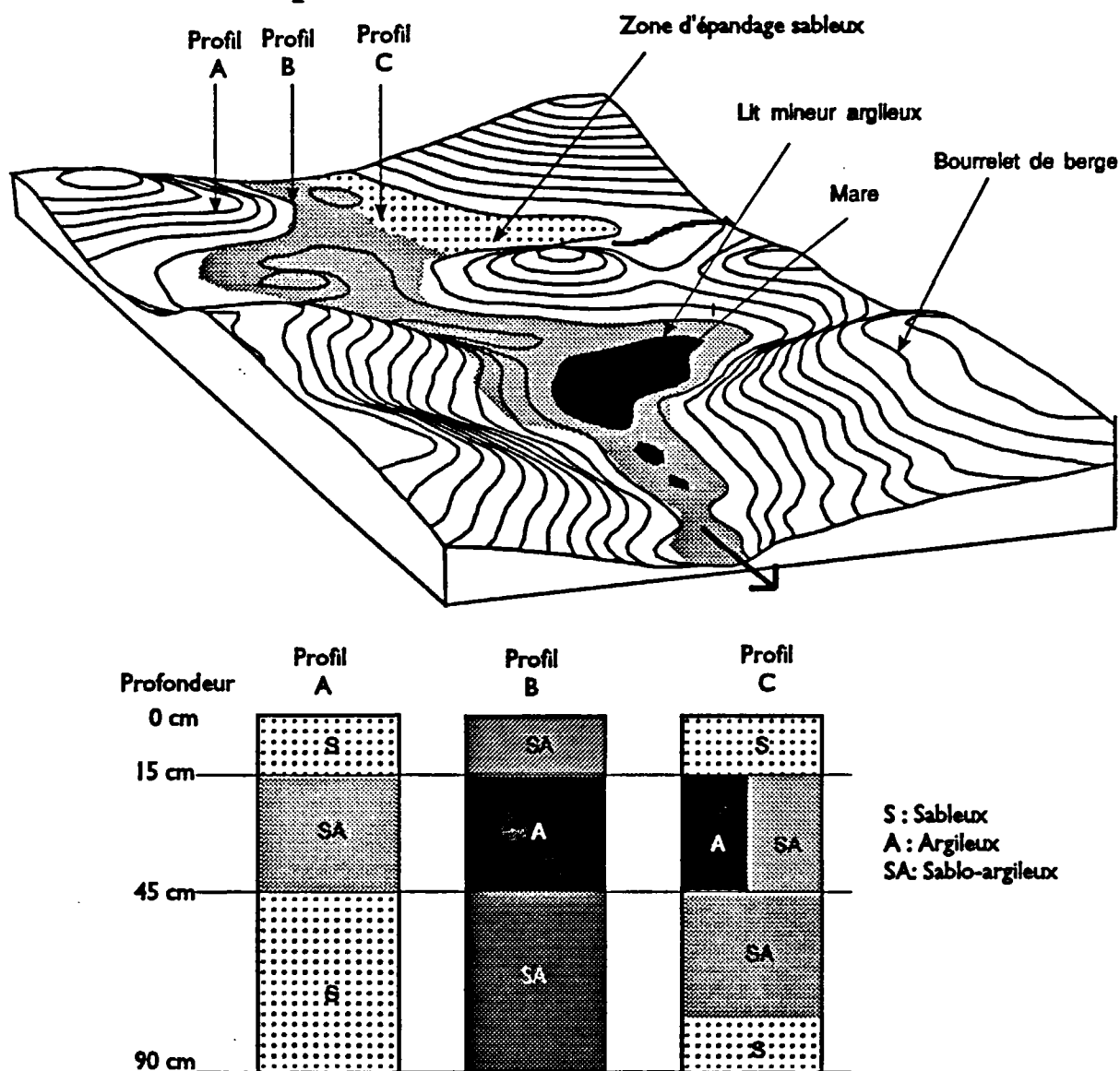
Facès granulométrique	Argiles %				Limons %				Sables fins %				Sables grossiers %				Eléments grossiers
profondeur cm	0-15	15-35	35-75	75-115	0-15	15-35	35-75	75-115	0-15	15-35	35-75	75-115	0-15	15-35	35-75	75-115	
projet Yatenga (partie aval Améné, BV 150km ²)																	
versants	9	10	12	18	17	18	21	19	57	46	45	42	17	25	19	20	40
zone centrale	52	51	47	42	40	39	38	38	6	8	12	15	2	2	3	5	0.5
projet Siné-Saloum (partie aval Keur Samba Diama, BV 75.6km ²)																	
versants	5	5	8	12	35	35	32	39	41	41	41	40	19	19	19	9	40 à 65
zone centrale	25	33	40	50	50	44	38	41	16	16	16	9	9	7	6	0	0.5
projet Mali-sud (zone centrale de Kambo en amont du barrage, BV 10km ²)																	
amont	25	28	30	37	49	37	19	22	20	20	23	13	6	15	28	28	0
aval	10	20	24	29	24	35	36	21	19	17	15	14	45	26	22	35	0
projet Comoé (zone centrale du bas-fond de Damana, BV 100km ²)																	
amont	43	44	43	42	20	16	20	26	32	34	32	22	5	6	5	10	0
aval	8	8	7	7	6	6	6	10	58	58	58	55	28	28	29	28	0
projet Casamance (zone centrale du bas-fond de Djiguioum, BV 24.6km ²)																	
amont	53	71	25	15	25	20	7	5	11	2	50	47	5	2	16	32	0
milieu	69	58	65	51	16	28	19	22	5	6	4	13	0.3	0.5	0.2	0.5	0
aval	60	59	58	45	18	21	20	14	14	15	15	24	1	1	0.3	9	0

Zone sahélienne

En zone sahélienne, à Bidi (Yatenga) et à Keur Samba Diama (Siné-Saloum), les sols des versants sont souvent sableux, sablo-limoneux à sablo-argileux, avec une charge grossière forte (40%) lorsqu'ils sont indurés ou concrétionnés. Dans la partie amont des bas-fonds, les sols d'apport colluvio-alluvial sont sablo-limoneux en surface, argileux en profondeur avec une charge grossière faible (10%).

Dans la partie aval de la zone centrale, les sols hydromorphes à pseudo-gley sont argillo-limoneux sans charge grossière. Compte tenu de la nature sableuse des sols des versants, le colluvionnement, dans les bas-fonds sahéliens et soudano-sahéliens, s'accompagne d'un enrichissement en sables par rapport au matériel en place. Ce phénomène, discontinu dans l'espace, a tendance à prendre localement des proportions inquiétantes. Dans le bas-fond de Keur Samba Diama (figure 37), les horizons allogènes à texture sableuse particulière peuvent atteindre 50 cm d'épaisseur et recouvrent les sols argileux de la zone centrale.

Figure 37 : Morpho-pédologie du bas-fond de Keur Samba Diama (ALBERGEL & PEREZ, 1991).



Zone soudanienne

En zone soudanienne (Mali-Sud et Comoé), les sols des bas-fonds sont limono-argilo-sableux à sablo-argilo-limoneux dans la partie amont. Ils s'enrichissent en argiles dans la partie aval, mais présentent aussi de fortes hétérogénéités granulométriques. Ils peuvent être localement très sableux comme c'est le cas dans la partie centrale aval du bas-fond de Damana. En marge de la zone centrale, les sols des bas-versants sont souvent très sableux de type éluvial et correspondent aux zones d'affleurement des nappes aquifères localisées sur les versants.

Le caractère hétérogène des sols des bas-fonds soudanais constitue une contrainte majeure à leur mise en valeur agricole. En effet, la capacité des sols à l'infiltration augmente très fortement avec la diminution du taux des argiles et limons; elle est de l'ordre de:

- * 0.2 à 5 mm/h sur les sols argileux,
- * 100 mm/h sur les sols sablo-limoneux,
- * 4 000 mm/h sur les sols très sableux.

Zone Guinéenne

En Casamance, les sols de la partie amont du bas-fond de Djigoum sont argileux en surface sur une profondeur d'une trentaine de centimètres, puis sableux en profondeur. Dans la partie aval, le caractère argileux des sols de bas-fond se maintient en profondeur avec cependant un léger enrichissement en sable (texture argilo-sableuse à 30% de sable). L'existence d'un horizon organique enfoui dans certains sols atteste de la présence d'anciennes mangroves et du comblement de la vallée par des matériaux colluvionnés en provenance des plateaux. En marge de la zone centrale, les sols des bas-versants (planche couleur 2) présentent un faciès sableux généralisé. Ils sont appelés gris hydromorphes de type éluvial; ils s'apparentent aux sols des bas-versants de la zone soudanaise et correspondent également aux zones d'affleurement des nappes aquifères.

STRUCTURE DES SOLS DE BAS-FONDS

La structure est décrite à l'échelle macroscopique par la taille des agrégats, leur forme et leur agencement, par la taille et la forme des pores et des fissures. La porosité tubulaire est engendrée par l'activité biologique animale: rongeurs, vers, fourmis, termites et par l'activité biologique végétale sous l'action des racines. La porosité fissurale est engendrée par la dessiccation des argiles gonflantes (vermiculite, montmorillonite).

Seuls les projets Yatenga et Casamance ont procédé à une description structurale assez détaillée des sols de bas-fond et de versant. Au Mali et dans la Comoé, la description des profils pédologiques ne permet que de placer la profondeur des indurations ferrugineuses.

Les indurations ferrugineuses

Dans toute l'Afrique de l'Ouest, l'induration ferrugineuse affecte tous les sols de versant et dans une large partie ceux des plateaux. Selon l'intensité de l'induration, on distingue:

- la cuirasse qui forme une masse compacte très dure, difficile à briser au marteau,
- la carapace, dont la dureté est moindre que celle de la cuirasse et que l'on brise assez facilement au marteau,
- les indurations en taches non jointives formant des masses compactes en sec, friables en humide.

L'existence d'une cuirasse à faible profondeur gêne l'enracinement des plantes et constitue un facteur limitant pour la mise en culture, d'autant plus limitant que la cuirasse constitue également un horizon d'arrêt pour l'infiltration. Au cours d'une averse, la saturation rapide de l'horizon superficiel provoque un fort ruissellement et une aggravation de l'érosion des sols nus mis en culture. Sur carapace, l'enracinement peut profiter des vides existant entre les amas indurés. Il est donc nettement moins entravé que sur cuirasse et la saturation des sols reste localisée. Dans les indurations ferrugineuses en amas non jointifs, l'enracinement est peu gêné par les indurations. L'infiltration peut même être favorisée par une granulométrie plus grossière des horizons supérieurs à l'induration.

Tous les bas-fonds des projets pilotes possèdent sur leur versants des indurations ferrugineuses à des profondeurs variables:

- Au Yatenga, dans la région de Bidi, les indurations ferrugineuses se situent sur les versants à des profondeurs inférieures à 2 mètres; de l'ordre de 50 cm à 1 mètre dans le bas-fond de Bidi-Gourga.
- Au Mali-Sud et dans la Comoé, les indurations ferrugineuses se situent à des profondeurs de 1 m à 1.5m pour Kambo, Moadougou et Kawara, avec des seuils par endroits.
- En Casamance, le système cuirassé est plus profond (figure 36). Il se situe à plus de 4 mètres de profondeur sur les versants du bas-fond de Djiguinoum.

La remontée de la cuirasse ferrugineuse près de la surface du sol de part et d'autre de la zone centrale d'un bas-fond coïncide souvent avec un rétrécissement de la zone centrale et constitue donc un facteur favorable pour l'installation d'un barrage ou d'une digue. Les indurations ferrugineuses, qui résultent des phénomènes de battement de la nappe et de l'alternance des phases de saturation et de dessiccation, disparaissent généralement dans la partie aval de la zone centrale des bas-fonds. Elles réapparaissent dans la zone centrale de la partie amont.

Ainsi, dans la zone centrale du bas-fond de Kambo, dont la superficie est de 10km², la cuirasse se situe entre 2.5 et 4m de profondeur et la remontée de la cuirasse constitue un facteur favorable à l'implantation d'un barrage demi-souterrain.

Description structurale des sols

En zone soudano-sahélienne sèche (Yatenga), les sols ferrugineux tropicaux peu lessivés ont une structure massive quand ils sont sableux, une structure polyédrique subangulaire lorsqu'ils sont sablo-argileux. Les racines y sont peu nombreuses et l'activité biologique peu développée. Au Siné-Saloum, les sols ferrugineux tropicaux lessivés ont une structure massive et une activité biologique intense marquée, dans les profils pédologiques, par de nombreuses galeries de termites et de nombreuses racines. Les sols évolués d'apport alluvial hydromorphes du Yatenga ont une structure polyédrique subangulaire bien marquée, une activité biologique bien développée et une forte densité racinaire sur une profondeur de 60 cm. Les sols hydromorphes à pseudo-gley de la partie aval des bas-fonds soudano-sahéliens ont une structure polyédrique angulaire très fortement développée, des racines présentes sur tout le profil, mais une faible activité biologique.

Dans les bas-fonds de Casamance, les horizons sableux présentent une structure massive, une faible porosité et une absence d'activité biologique. Les horizons argileux profonds sont caractérisés par une absence de structures et de porosité biologique. Les horizons argileux superficiels ont une structure granuleuse fine, localement polyédrique. Ils sont gras au toucher et contiennent beaucoup de matière organique. La porosité biologique y est forte et l'enracinement très développé (BOIVIN P., 1991).

CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DES SOLS

La phase liquide d'un sol se caractérise par une variabilité temporelle et spatiale de son volume et de sa composition (MUSY A. & SOUTTER M., 1991). La dynamique globale de la phase liquide contribue à l'alimentation en eau du sol (pluie, écoulements superficiel et souterrain) ou à la vidange du stock hydrique du sol (évaporation, évapo-transpiration et drainage). La quantification du bilan hydrique des sols constitue un aspect central des applications de la physique du sol. Les principales caractéristiques hydriques des sols du programme de recherche pour la mise en valeur des bas-fonds du Sahel sont reportées dans le tableau XXIII.

Tableau XXIII: Caractéristiques hydriques des sols de bas-fonds

	Humidité volumique %		Réserve utile mm		ETR mm/j	Hydrodynamique			Simulation de pluie	
	PF 4.2	PF 2.5	Sorgho 1m	Riz 50cm	0.8ETP	Muntz mm/h	Casters mm/h	Nappe mm/h	Vi mm/h	Ki %
Projet Yatenga (Bidi - Gourga)										
Versants	19	30	110	---	4.7	---	---	3.3	---	---
Zone centrale	21	36	150	75		---	3.5		---	---
Projet Siné-Saloum (Thyassé Kaymor)										
Versants	9	19	100	---	4.0	100	---	---	30	75 à 50
Zone centrale	10	31	210	107		25	2.0	---	4	15
Projet Mali-Sud (Kambo) zone centrale										
Amont	---	---	---	---	3.3	60	1.7	1.5	---	---
Aval	---	---	---	---		120	3.0	---	---	---
Projet Comoé (Damana) zone centrale										
Amont	27	36	90	50	3.3	13	0.5	0.3	---	---
Aval	9	15	60	30		76	2.5	1.5	---	---
Projet Casamance (Djigulnoum)										
Versants	---	---	100	50	3.3	150	---	0.2	38	57
Zone centrale	---	---	---	---		30	---	0.2	48	82

Vi vitesse moyenne d'infiltration ETR = 0.8 ETP pour une culture en phase de fructification
 Ki coefficient d'infiltration sol humide

Pour pouvoir interpréter les valeurs fournies sur le tableau ci-dessus, nous allons passer en revue les définitions des principaux paramètres qui caractérisent le fonctionnement hydrique des sols.

LA TENEUR EN EAU ET LE POTENTIEL DE PRESSION

La teneur en eau volumique ou humidité volumique.

L'humidité volumique (θ) est égale au rapport entre le volume de la phase liquide (V_e) et le volume total du sol (V_t)

$$(\theta) = V_e/V_t$$

Elle est exprimée en pourcentage. La teneur en eau volumique varie entre une valeur minimale appelée teneur en eau résiduelle (θ_{\min}) et une valeur maximale appelée teneur en eau à saturation (θ_s). Sur une même verticale, la teneur en eau varie en fonction de la profondeur. Le profil hydrique présente graphiquement la distribution des teneurs en eau en fonction de la profondeur sur une même verticale. La surface comprise entre 2 profils hydriques successifs représente la variation de stock hydrique du sol entre les dates correspondant aux deux profils.

Dans la pratique, on caractérise un sol par le stock hydrique disponible pour les plantes en associant à la notion de teneur en eau celle de potentiel de pression.

Potentiel de pression et teneur en eau

La dynamique de la phase liquide d'un sol résulte de l'action des forces auxquelles elle est soumise: forces de gravité, de capillarité et d'adsorption.

- Un sol inondé subit une pression hydrostatique supérieure à la pression atmosphérique.
- Dans un sol exondé non saturé, la phase liquide est soumise à une pression inférieure à la pression atmosphérique qui résulte des forces de capillarité et d'adsorption.

La notion de potentiel de pression fait référence à la pression atmosphérique. Il est positif dans les zones saturées où il est appelé potentiel de gravité. Il est négatif dans les zones désaturées où il est appelé potentiel de pression matricielle. Du fait de la grandeur des forces de capillarité et d'adsorption, le potentiel de pression matricielle (h) atteint les valeurs négatives extrêmement élevées. L'utilisation du logarithme décimal de l'opposé de la charge de pression ($-h$), appelé pF , permet de simplifier son expression:

$$pF = \log_{10} (-h) \text{ où } h \text{ est exprimé en cm.}$$

La figure 38 précise l'allure générale des relations entre la pression matricielle h et la teneur en eau d'un sol sableux et d'un sol argileux.

Pour des potentiels de pression inférieurs à -15850 cm ($pF = 4.2$), les végétaux ne parviennent plus à extraire l'eau matricielle des sols. La teneur en eau du sol correspond à cette capacité maximale moyenne de succion des végétaux, est appelée point de flétrissement permanent (θ_p).

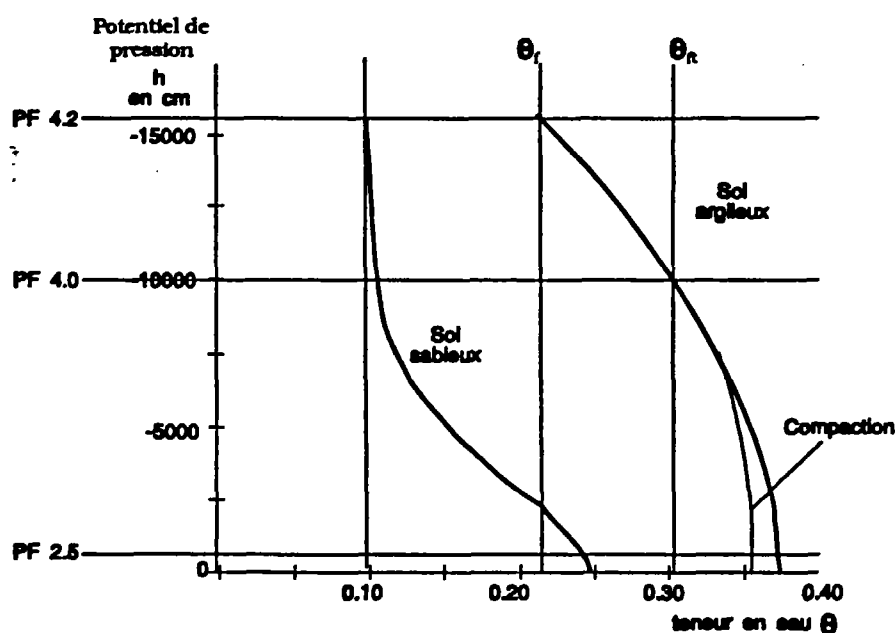
Pour les potentiels de pression inférieurs à -316 cm ($pF = 2.5$), l'écoulement gravitaire s'arrête. La teneur en eau du sol correspondant à l'arrêt de l'écoulement gravitaire est appelée capacité de rétention (θ_r).

La teneur en eau du sol correspondant au seuil d'humidité en deçà duquel commence le flétrissement, sans que la plante ne subisse de dommages irréversibles, est appelée point de flétrissement temporaire (θ_n). En moyenne, elle correspond à un potentiel de pression égal à -10000cm ($pF = 4.0$).

- pour un sol sableux, il y a peu de différence entre le point de flétrissement permanent (θ_p) et le point de flétrissement temporaire (θ_n);
- pour un sol argileux, la différence est sensible et peut atteindre 10%.

Le tableau XXIII fournit les valeurs de l'humidité volumique au point de flétrissement permanent ($pF = 4.2$) et la capacité de rétention ($pF = 2.5$) pour les sols des projets Yatenga, Siné-Saloum et Comoé.

Figure 38 : Potentiel de pression matricielle en fonction de la teneur en eau pour un sol sableux et un sol argileux



Réserve utile et réserve facilement utilisable.

L'évaporation et l'évapo-transpiration des plantes provoquent une diminution de la teneur en eau du sol jusqu'au point de flétrissement temporaire puis jusqu'au point de flétrissement permanent. Au delà de cette limite les plantes annuelles cultivées subissent des dommages irréversibles.

La réserve utile (RU) est l'intégration en fonction de la profondeur, sur l'horizon racinaire (z), des écarts entre la teneur en eau à la capacité de rétention (θ_{max}) et la teneur en eau au point de flétrissement permanent (θ_p).

$$RU = \int (\theta_{max} - \theta_p) dz$$

La réserve facilement utilisable (RFU) est l'intégration en fonction de la profondeur, sur l'horizon racinaire (z), des écarts entre la teneur en eau à la capacité de rétention (θ_{max}) et la teneur en eau au point de flétrissement temporaire (θ_r).

$$RFU = \int (\theta_{max} - \theta_r) dz$$

RU et RFU sont exprimés en mm.

Dans la pratique, on utilise souvent les relations suivantes:

$$RU = 1/2 z \cdot \theta_{max} \text{ et } RFU = 1/3 z \cdot \theta_{max} = 2/3 RU$$

La profondeur d'enracinement des cultures varie selon le type de culture. Pour le riz pluvial, elle est de l'ordre de 50 cm et pour le sorgho, de l'ordre de 1 à 1.5 m. Pour le riz inondé, la notion de réserve utile n'a pas de sens car le riz inondé, en raison du parenchyme lacunaire de ses racines, commence à souffrir de stress hydrique dès que l'humidité du sol est inférieure à environ 80% de l'humidité de saturation (θ_s). Sur le tableau XXIII nous avons reporté la réserve utile sur une tranche de sol de 1 mètre, correspondant à la possibilité de culture du sorgho dans le Yatenga et de maïs dans le Siné-Saloum et le sud du Mali. Les valeurs de la réserve utile pour le sorgho et le maïs sont de l'ordre de 90 à 110 mm. Sur les sols très sableux, en aval du bas-fond de Damana, elle tombe à 60 mm. Pour le riz pluvial, l'enracinement étant de l'ordre de 50 cm, le calcul de la réserve utile a été effectué sur cette profondeur. Elle est égale à 90 mm dans la zone centrale du bas-fond de Bidi, à 50 mm en amont dans le bas-fond de Damana et 30 mm en aval.

En fin de leur cycle végétatif, l'évapo-transpiration réelle des cultures (ETR) étant de l'ordre de 0.8 fois l'ETP, on peut estimer l'ETR à :

- 5 mm par jour au Yatenga,
- 4 mm par jour au Siné-Saloum,
- 3.5 mm par jour dans les autres régions.

Dans ces conditions, la réserve utile du sol ayant correctement été rechargée, les plantes peuvent consommer la réserve facilement utilisable du sol ($RFU = 2/3 RU$) sans subir de préjudice important. Il est donc possible de calculer théoriquement cas par cas la durée de la période de sécheresse supportée par la plante sans recharge des réserves utiles du sol.

- Dans le Yatenga, le sorgho qui dispose d'une réserve utile de 110 mm, peut théoriquement supporter une sécheresse de 15 jours en fin de cycle. Le riz pluvial de la zone centrale du bas-fond de Bidi aurait alors une autonomie de 12 jours.
- Dans la Comoé, le maïs dispose d'une réserve utile de 90 mm et peut théoriquement supporter une sécheresse de 17 jours. Sur les parties sableuses, son autonomie n'est que de 11 jours. Dans le bas-fond de Damana, le riz pluvial, qui dispose d'une réserve utile de 50 mm, peut théoriquement supporter une sécheresse de 9 jours. Sur les sols sableux, son autonomie tombe à 6 jours.

LA CIRCULATION DE L'EAU DANS LES SOLS

Réalimentation superficielle

Contrairement aux cultures de plateau et de versant pour lesquelles l'alimentation hydrique des sols n'est assurée que par la pluie, les cultures de bas-fond bénéficient d'une triple alimentation :

- par infiltration des eaux pluviales,
- par infiltration des eaux de crues des marigots,
- par remontée des nappes aquifères.

Pour estimer les quantités d'eau infiltrées à partir des eaux pluviales, le simulateur de pluie (A. CASENAVE & C. VALENTIN, 1989) constitue un excellent outil de mesure directe. La vitesse d'infiltration (V_i) et le coefficient d'infiltration (K_i) dépendent principalement de l'état de surface des sols et de leur degré d'humectation, secondairement de l'intensité pluviométrique. Des mesures au simulateur de pluie ont été effectuées au Siné-Saloum et en Casamance.

Pour estimer les quantités d'eau infiltrées par submersion des sols, les hydro-pédologues utilisent souvent l'infiltromètre Muntz, qui permet de mesurer la vitesse stabilisée d'infiltration d'un sol qui est comprise entre $1/3$ et $2/3$ de la conductivité hydraulique à saturation (K_s). Les valeurs mesurées in situ figurent sur le tableau XXIII. Sur les sols argilo-limono-sableux, la vitesse d'infiltration stabilisée varie de 150 mm/h à Djiguioum, à 120 mm/h à Kambo et 100 mm/h à Thyse Kaymor.

Le drainage:

dans la zone non saturée

La plupart des processus de transfert d'eau dans les sols se déroulent dans des conditions caractérisées par une teneur en eau inférieure à la saturation ($\theta < \theta_s$) c'est à dire par l'existence d'une phase liquide et d'une phase gazeuse occupant simultanément l'espace poral. La force motrice de l'écoulement en milieu non saturé est alors la somme des potentiels de pression matricielle et de gravité. La conductivité hydraulique, qui caractérise l'aptitude d'un sol à l'écoulement de l'eau, varie alors en fonction de la teneur en eau. Elle croît de façon exponentielle pour atteindre sa valeur maximale à saturation. Les méthodes de caractérisation hydrodynamique in situ des sols non saturés sont maintenant bien au point (VACHAUD & al., 1978) et permettent l'obtention des courbes $K(\theta)$ et $h(\theta)$ avec une bonne précision. Ces méthodes ont été utilisées dans le Siné-Saloum sur les sols de plateau et les versants (ALBERGEL & al, 1989).

dans la zone saturée.

Pour estimer le drainage dans les sols saturés des bas-fonds, les hydrologues et les agronomes du programme CCE ont mesuré directement la descente des niveaux de l'eau dans les casiers rizicoles et dans les piézomètres. Les valeurs observées de descente des niveaux de l'eau dans les casiers rizicoles (tableau XXIII) varient entre 2.0 et 3.2 mm/h au Yatenga et dans le Siné-Saloum, 0.5 et 3.0 mm/h dans la Comoé et le sud du Mali. Elles sont légèrement supérieures aux vitesses de descente des nappes aquifères qui sont de l'ordre de:

- 3.3 mm/h dans le bas-fond de Bidi-Gourga,
- 0.3 à 1.5 mm/h dans les bas-fonds de la Comoé,
- 0.2 à 0.25 mm/h dans le bas-fond de Djigunoum.

La connaissance des vitesses de descente des niveaux de l'eau dans les casiers rizicoles permet de connaître la durée de la période pendant laquelle le riz inondé, en l'absence d'alimentation en eau du casier, peut se développer sans risque de stress hydrique.

En zone soudano-sahélienne, pour un riz inondé, la profondeur d'enracinement étant de 25cm, à partir du jour de dénolement du casier, le système racinaire du riz reste noyé pendant 5 jours à Thyse Kaymor, 3 jours à Bidi-Gourga.

En zone soudanienne, sur les sols argileux, le système racinaire du riz inondé reste noyé pendant 21 jours dans les sols les plus argileux, pendant 6 jours dans les sols argilo-sableux; sur les zones sableuses, le système racinaire peut-être exondé au bout de 3 jours.

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES DES SOLS DE BAS-FONDS

LES ANALYSES CHIMIQUES

Les résultats d'analyses chimiques effectuées sur les sols de bas-fond du programme de mise en valeur des bas-fonds au Sahel sont consignés dans le tableau XXIV.

Tableau XXIV : Chimie des sols de bas-fonds

Types de mesure	Acidité		Eléments nutritifs en meq/100g				Complexe absorbant en meq/100g			Fertilité organique				Conductivité mS/c	Toxicité		
Elément	pH		Ca++	Mg++	K+	Na+	S	CEC (l)	S/T %	Mo pm	N pm	C/N	P2O5 ass		Fe tot	Al3+ meq	S pm
Projet Yatenga (Amont : Gourga, Aval : Améné)																	
Versant	5.9	6.4	2.3	1.0	0.07	0.10	3.5	4.8	73	8.4	0.3	10	4.0	---	88	---	---
Centre Amont	6.0	5.8	2.8	1.5	0.03	0.14	4.5	8.8	51	16.4	0.8	11	---	---	---	---	---
Centre Aval	5.8	6.8	3.8	1.5	0.10	0.13	5.5	9.5	58	12.1	1.2	2.5	5.0	0.05	46	---	---
Projet Siné-Saloum																	
Versant	5.0		0.66	0.19	0.10	0.01	0.96	1.9	50	<10	0.25	---	20	---	---	---	---
Centre	5.7		5.5	1.12	0.14	0.04	6.8	6.9	99	---	1.36	---	129	---	---	---	---
Projet Mali Sud (Zone centrale de Kambo)																	
Centre	5.2	5.0	3.2	0.61	0.20	0.40	4.4	11.0	40	12.6	1.3	10	9.2	---	---	---	---
Projet Casamance (zone centrale)																	
Amont 0-18cm	4.0	6.5	3.1	0.7	0.2	0.6	4.6	6.8	67	37	1.9	11.4	---	0.21	---	3.7	---
Aval 0-12cm	4.0	2.5	Sels solubles				---	---	---	52	1.8	16.8	---	2.4	---	1.3	2.4

Pour être interprétés, ces résultats doivent être comparés aux normes ORSTOM ou à celles du BUNASOLS (1990) utilisées au Burkina Faso. Les deux classifications sont à peu près équivalentes. Nous utiliserons les normes ORSTOM plus complètes que les secondes. Nous examinerons successivement les différents paramètres permettant de caractériser la fertilité chimique des sols de bas-fonds. Un paragraphe spécial sera consacré aux sols sulfatés acides de basse Casamance et à leur régénération par dessalement.

INTERPRETATION DES ANALYSES CHIMIQUES

Acidité, pH

La première colonne du tableau XXIV indique les valeurs de pH mesuré en surface et en profondeur.

Les sols des régions soudano-sahéliennes sont moyennement acides en surface, faiblement acides en profondeur. L'acidité diminue des versants vers les bas-fonds. Seuls les sols des versants dans le Siné- Saloum sont fortement acides.

En zone soudanienne, les sols de bas-fond sont fortement acides en surface et en profondeur. Ils peuvent être localement très acides ou moyennement acides.

En Casamance, les sols hydromorphes de la partie amont du bas-fond de Djigoum sont extrêmement acides en surface, faiblement acides en profondeur. Les sols de la partie aval du bas-fond, extrêmement acides en surface, le sont encore plus en profondeur où les valeurs du pH peuvent atteindre 2.5.

Eléments nutritifs, complexe absorbant

En zone soudano-sahélienne, les sols des versants sont pauvres en calcium et magnésium, carencés en sodium et potassium au Yatenga. Leur pauvreté s'accroît dans le Siné-Saloum. La teneur en sels minéraux s'améliore dans les bas-fonds où les sols sont moyennement riches en calcium et magnésium, mais restent pauvres à très pauvres en sodium et potassium.

Au sud du Mali et en Casamance, les teneurs en sels minéraux sont moyennes dans les bas-fonds, faibles pour le magnésium.

La somme des bases échangeables est moyenne à faible dans tous les bas-fonds. Elle est faible à très faible sur les versants.

La capacité d'échange est faible dans tous les bas-fonds à l'exception du bas-fond de Kambo. Le taux de saturation est moyen; il n'est fort qu'en Casamance.

Tous les sols analysés dans le cadre du programme CCE sont fortement carencés en phosphore assimilable à l'exception des sols du bas-fond de Thyse-Kaymor.

Fertilité organique

Les sols des versants sont très pauvres en matières organiques et en azote avec des teneurs inférieures à 10 pour mille en matière organique, 0.5 pour mille en azote. Les sols des bas-fonds soudano-sahéliens et soudaniens sont relativement plus riches en matières organiques et azote que les versants, mais ils restent pauvres. Les sols des bas-fonds de Casamance sont riches à très riches en matière organique et en azote en raison de la dynamique très particulière de la mangrove.

LES SOLS SULFATES ACIDES DE BASSE CASAMANCE

Genèse

Les sols sulfatés acides de basse Casamance sont des sols de mangrove. Le terme de mangrove désigne une formation végétale composée de palétuviers se développant en milieu fluvio-marin. Les sédiments marins de mangrove sont tous caractérisés par l'accumulation en leur sein de soufre (VIEILLEFON, 1977; MARIUS, 1980). Cette accumulation est favorisée par les racines des palétuviers, plus particulièrement celles de l'espèce *Rhizophora*: le soufre de l'eau de mer est fixé sous forme de pyrite par des bactéries sulfato-réductrices. Lorsque ces sédiments sont exondés, l'oxydation de la pyrite libère des ions SO_4^{--} et H^+ provoquant une chute du pH du sol qui peut passer en quelques semaines de 6 à 2. Au cours de l'oxydation, la pyrite fixée à proximité des racines de *Rhizophora* se transforme en jarosite (minéral jaune pâle) produit des hydroxydes de fer qui épigénisent les racines de *Rhizophora*: formant dans les sols des tuyaux bouchés appelés "iron pipes". La composition chimique et l'état d'oxydo-réduction des sols de mangrove les rendent très fragiles. Leur stabilité est assujettie au maintien des conditions de submersion. Leur conservation interdit donc toute poldérisation ou abaissement naturel des niveaux d'eau (BOIVIN, 1991).

Depuis 1968, le déficit pluviométrique en Casamance se caractérise par une réduction d'environ 25% des précipitations et l'abaissement moyen annuel du niveau des nappes superficielles a été estimé entre 0.5 et 1 mètre (LE PRIOLLE, 1983) entre 1970 et 1980. En saison sèche, le niveau des nappes aquifères se retrouve maintenant à une cote inférieure à celle des eaux salées de surface qui pénètrent dans les bas-fonds à chaque marée. Les nappes salées, qui se retrouvent sous les sols des bas-fonds, ont provoqué la salinisation des sols par remontée capillaire et évaporation. L'abaissement des nappes a favorisé l'oxydation des sols provoquant une violente acidification. En surface, on y observe la précipitation des sulfates d'aluminium, de magnésium et de fer, la capacité d'échange des argiles étant saturée par l'aluminium échangeable. Les fortes teneurs en aluminium étant toxiques pour le riz, de grandes superficies de bas-fond ont ainsi été abandonnées en basse Casamance.

Les sols du bas-fond de Djiguinoum

Dans le bas-fond de Djiguinoum, la présence de sels solubles et de soufre permet de différencier deux grands ensembles de sols:

- les sols hydromorphes,
- les sols sulfatés acides (planche couleur 2).

*** les sols hydromorphes "sensu stricto" (104 hectares)**

Ces sols sont situés dans la partie supérieure de la vallée et dans la zone de raccordement du plateau au bas-fond. Ils sont pour la plupart occupés par les rizières. Ils peuvent présenter des signes de contamination par le sel, notamment dans les horizons inférieurs. Ils sont en général peu salés, sauf lorsqu'ils sont proches du lit du marigot. Certaines zones présentent en surface des efflorescences blanches de sulfates d'aluminium (tamarugite, alunite), mais, dans l'ensemble, l'aluminium échangeable est très peu présent. Le pH est généralement acide avec des valeurs situées entre 4 et 6.5.

*** les sols sulfatés acides (36 hectares)**

Ils sont caractérisés par une teneur en soufre total importante et par la présence ou non d'un sulfate de fer: la jarosite. Ce minéral constitue un indicateur du degré d'évolution chimique des sols sulfatés acides. Cette évolution est liée aux conditions oxydantes favorisées par une exondation artificielle des sols. Leur maturation physique, marquée par une structuration du matériau de surface, en est également une conséquence. L'acidification est généralisée: le pH est inférieur à 4.5 et diminue avec la profondeur, les valeurs pouvant atteindre 2.5. L'aluminium échangeable est partout présent avec des teneurs élevées en profondeur (>10 méq/100 g). Ces sols sont tous salés, les valeurs de salinité augmentant avec la profondeur et pouvant devenir très élevées (>10 mS/cm). Ils se répartissent principalement dans la partie centrale de la vallée, le long du marigot. Ils peuvent être nus ("tanne vif") ou bien occupés par une végétation acidophile ("tanne herbeux"). Celle-ci est composée de cypéracées, en particulier *Eleocharis mutata*.

Un type de sol particulier est mentionné en bordure de vallée et au niveau de petits îlots. Il s'agit des sols de terrasse limono-sableux en surface et sableux en profondeur (13 hectares). Ils ne sont pas salés et présentent un pH compris entre 4 et 5 avec des teneurs en aluminium échangeable inférieures à 1 méq/100g.

Les sols sulfatés acides du bas fond de Djiguinoum ont été abandonnés et ne sont plus cultivés. La réhabilitation de ces sols salés par optimisation du lessivage en suivant l'évolution de leur caractéristiques chimiques pour éviter leur hyper-acidification était l'objectif principal du projet pilote Casamance.

Atouts et contraintes des milieux naturels pour la mise en valeur agricole des bas-fonds

ATOUTS ET CONTRAINTES LIES AU CLIMAT ET A LA RESSOURCE EN EAU

Comparés aux autres climats de la planète, les climats ouest-africains présentent deux atouts majeurs : un ensoleillement dont la durée varie peu au cours de l'année, des températures minimales qui ne sont jamais négatives et descendent rarement au-dessous de 10°C.

Dans la zone qui nous intéresse, entre 10 et 15 degrés de latitude nord, la longueur de la saison des pluies, la répartition des averses et le total pluviométrique annuel déterminent les possibilités agricoles régionales. La répartition de l'eau dans le paysage et son stockage dans les réservoirs superficiels et souterrains dépendent de la géologie, de la géomorphologie et de la physiographie des bassins versants. Les études climatiques et hydrologiques menées sur les cinq sites pilotes ont permis de définir un ensemble de critères à prendre en compte pour hiérarchiser les contraintes dues à la ressource en eau et mettre en évidence ses atouts. Ces critères sont reportés dans le tableau XXV pour chacun des cinq sites du projet.

Tableau XXV : Atouts et inconvénients liés à la ressource en eau

Projet pilote	Longueur de la saison des pluies	Écoulement annuel	Crues	Eaux souterraines	Qualité de l'eau
Yatenga	La durée de la saison des pluies varie entre 50 et 95 jours. Elle est souvent trop courte pour le riz.	De l'ordre de 6% du total pluviométrique en année médiane. Pas d'écoulement de base.	Crues fortes.	Présence de deux nappes dont une peu profonde. Alimentation aléatoire en année sèche.	Bonne pour l'eau de surface comme pour l'eau souterraine.
	- - -	-	-	+	+++
Siné-Saloum	La durée de la saison des pluies varie entre 70 et 160 jours. Suffisante, si bonne répartition.	De 2 à 4% de la pluie annuelle. Peut être insuffisant les années sans fortes crues. Pas d'écoulement de base.	Crues violentes.	Nappe importante mais très profonde (40 m).	Problème des transports solides dans les eaux de surface.
	+	--	---	+	--
Casamance	La durée de la saison des pluies est toujours supérieure à 120 jours. Suffisante pour la majorité des cultures.	Forte irrégularité inter-annuelle. Essentiellement de l'écoulement de base.	Peu de crues fortes.	Nappe douce peu profonde sur les plateaux. Nappes très salées dans le bas-fond. Nappe puissante et profonde du Maestrichien.	Problème de salinité, d'acidité dans les eaux de surface et dans la nappe phréatique du bas-fond.
	+++	-	++	++	---
Mali-Sud	La durée de la saison des pluies varie entre 100 et 150 jours. Risques pour les cycles de 120 jours.	Entre 3 et 5% de la pluie annuelle. Très faible pour les années à pluviométrie inférieure à 800mm.	Crues fortes très rares.	Présence d'une nappe importante dans les altérites. Réalimentation annuelle faible les années sèches.	Bonne pour l'eau de surface comme pour l'eau souterraine.
	++	-	++	++	++
Comoé	La durée de la saison des pluies est toujours supérieure à 120 jours. Suffisante pour la majorité des cultures.	Supérieur à 10% de la pluie annuelle et composé à 50% par de l'écoulement de base qui permet la riziculture.	Risque de crues importantes, par leur volume et leur débit de pointe.	Aquifère peu profond dans les altérites.	Bonne pour l'eau de surface comme pour l'eau souterraine.
	+++	++	-	++	++

- - - à +++ critère allant d'inconvénient majeur à atout majeur

La comparaison entre les ressources pluviales au pas de temps décadaire et les besoins en eau d'une culture de riz pluvial montre une nette différence entre la zone au nord de l'isohyète 1000 mm et celle qui se situe au sud de cette isohyète. Au nord de l'isohyète 1000 mm, la durée de la saison des pluies est souvent trop courte pour assurer la culture du riz. Le développement durable de l'agriculture de bas-fond ne peut pas être envisagé sans une irrigation complémentaire à partir du stockage d'eaux superficielles ou de pompages dans la nappe phréatique. Dans le Yatenga et dans toute la zone où la pluviométrie interannuelle est inférieure à 600 mm, l'existence d'une nappe phréatique superficielle et d'une autre, plus profonde, est un atout, malgré leur alimentation aléatoire pendant les années sèches. Au sud de l'isohyète 1000 mm, la culture du riz pluvial voit ses besoins en eau satisfaits 8 années sur 10 dans la région du Sud-Mali, 9 années sur 10 en Casamance et dans la Comoé.

L'analyse des écoulements annuels et des crues dans les bas-fonds met en évidence la différence entre les zones situées au nord et au sud de l'isohyète 1000 mm. Au nord de cette isohyète, l'écoulement annuel est essentiellement composé par le ruissellement et les bas-fonds s'assèchent complètement entre deux pluies. Cet écoulement est plus faible en zone sédimentaire (2 à 4 % de la pluviométrie annuelle dans le Siné-Saloum) qu'en zone de socle (de l'ordre de 6% du total pluviométrique annuel dans le Yatenga). Dans cette zone, les crues sont violentes, même sur les petits bassins, et nécessitent d'être maîtrisées pour garantir une certaine sécurité aux cultures de bas-fonds. Au sud de l'isohyète 1000 mm, l'écoulement annuel est soutenu par un débit de base important permettant, les meilleures années, une mise en eau des casiers de riz pendant toute la saison agricole. Dans le domaine sédimentaire de cette zone climatique, les crues ne sont pas un danger pour l'agriculture de bas-fond. Dans le domaine cristallin, elles deviennent une contrainte importante pour les bas-fonds lorsque la superficie des bassins versants dépasse 50 km² (cas des bas-fonds de la Comoé).

Les bas-fonds de la zone sèche et ceux des grands bassins (superficie supérieure à 50 km²) de la zone humide dans le domaine cristallin ont des crues violentes. Associées à l'érosion sur les versants, celles-ci favorisent le transport des sédiments et provoquent l'ensablement des champs de bas-fonds qui constitue une contrainte au développement de la riziculture. Ainsi, dans le projet pilote du Siné-Saloum, la violence des crues est-elle la première contrainte à lever par un aménagement car elles provoquent l'arrachage des jeunes plants, la verse après la montaison et la stérilisation des sols.

Les aquifères présentent une ressource en eau non négligeable dans toute notre zone d'étude. Dans les régions sédimentaires sèches, les nappes phréatiques sont puissantes mais profondes; l'exhaure de l'eau nécessite alors une importante dépense énergétique. Dans les bas-fonds estuariens, la contamination des aquifères, par les eaux marines salées, limite les possibilités d'utilisation des eaux souterraines peu profondes. Des réserves de bonne qualité existent dans le Maestrichien mais ne sont accessibles que par des forages profonds. Dans les régions de socle, c'est l'irrégularité de la réalimentation annuelle de la nappe des altérites qui limite son exploitation; les réserves en eau, localisées dans les fissures du socle, sont plus difficiles à exploiter et sont réservées à l'alimentation humaine. Cette irrégularité est d'autant plus prononcée que la pluviométrie interannuelle est faible. Au Yatenga, l'exploitation de la nappe des altérites à des fins agricoles ne peut se concevoir qu'à partir d'un aménagement permettant la réalimentation artificielle des nappes.

La qualité chimique des eaux des nappes, comme celle des eaux de ruissellement, est partout bonne pour l'irrigation comme pour la consommation, excepté dans le domaine marin estuarien de Casamance où les sols des bas-fonds, anciennement colonisés par la mangrove, puis acidifiés par exondation, ont été stérilisés par la toxicité des éléments chimiques libérés après acidification (Al, Fe, SO₄, Cl, etc.).

Les eaux de ruissellement peuvent être très chargées en matières en suspension: plus de 30 g/l dans les eaux des bas-fonds du Siné-Saloum.

ATOUTS ET CONTRAINTES LIES A LA NATURE DES SOLS

Le tableau XXVI rassemble, pour chaque projet pilote, les atouts et les inconvénients liés à la nature des sols de bas-fonds.

De part leur origine et leur histoire récente, la plupart des sols de l'Afrique de l'Ouest ont de faibles qualités agronomiques. Dans l'ensemble des bas-fonds étudiés, on rencontre, suivant la classification française des sols tropicaux:

- des sols ferrugineux tropicaux peu lessivés à lessivés dans les zones de raccordement du bas-fond,
- des sols peu évolués d'apport colluvio-alluvial ou des sols hydromorphes en bordure des zones à inondation prolongée,
- des sols hydromorphes à pseudo-gley dans les parties centrales topographiquement les plus basses.

Pour les bas-fonds estuariens, comme ceux de la basse Casamance, les sols des parties les plus basses ont une pédogenèse liée à la présence actuelle ou ancienne de la mangrove et sont potentiellement sulfatés acides ou déjà acidifiés (cas de la vallée de Djiguinoum). Dans ces bas-fonds, sous influences marines, les sols hydromorphes sont salés.

Les sols hydromorphes à pseudo-gley

Les zones temporairement inondées sont caractérisés par des sols hydromorphes à pseudo-gley avec une texture argilo-limoneuse. Ils présentent une bonne réserve en eau utile, de l'ordre de 50 mm pour un riz à enracinement moyen (50 cm). Leur conductivité hydraulique à saturation est faible: de l'ordre de quelques dixièmes de mm à 2 mm par heure. Elle permet la culture du riz inondé. Ils sont riches en matière organique et en azote, bien que cette richesse soit très relative. Dans les bas-fonds de la zone sahélienne, leur fertilité organique reste faible; elle est meilleure dans les bas-fonds plus humides du Mali-Sud et de la Comoé.

Dans la vallée de Djiguinoum, les sols hydromorphes à pseudo-gley ont évolué vers des sols sulfatés acides après la disparition de la mangrove et le rabattement important de la nappe aquifère durant ces vingt dernières années. L'acidité très élevée de ces sols a induit une toxicité importante pour le riz par l'apparition d'ions ferriques et aluminiques dans les eaux superficielles. Des concrétions de sels ferriques ou aluminiques apparaissent à la surface du sol formant des pellicules blanchâtres, jaunes ou couleur rouille.

Les sols peu évolués d'apport colluvio-alluvial et les sols hydromorphes

Ces sols se trouvent dans les parties centrales situées en amont des bas-fonds. Dans les zones sèches, Yatenga et Siné-Saloum, ce sont des sols peu évolués d'apport colluvio-alluvial. Dans les zones plus humides, Mali-Sud, Comoé et Casamance, la durée de l'inondation dans les parties amont est suffisante pour qu'ils évoluent vers une hydromorphie plus ou moins accusée et qu'ils soient classés dans les sols hydromorphes.

Ces sols ont une texture sablo-limoneuse à argileuse, leur réserve utile en eau dépend du taux d'argiles dans les horizons les moins profonds. La conductivité hydraulique est forte et seul un écoulement hypodermique important ou une irrigation d'appoint permettent de maintenir l'inondation des casters rizicoles.

Ces sols ont une fertilité organique faible. Ils sont pauvres en calcium et magnésium et souvent carencés en sodium et potassium. A l'exception du bas-fond du Siné-Saloum, proche des gisements de phosphates du Sénégal, ils sont également carencés en phosphore assimilable. En Casamance les sols hydromorphes sont peu salés à salés suivant leur position topographique; parfois acides, ils peuvent présenter des caractères de toxicité modérée.

Les sols ferrugineux tropicaux

Ces sols se situent en limite des bas-fonds et se développent sur les pentes des versants jusqu'aux plateaux. Ils ont une texture sableuse à sablo-limoneuse. Dans les zones les plus sèches (Yatenga), ils sont peu lessivés et présentent des concrétions. Leurs horizons superficiels sont composés de sables fins et de limons qui permettent la constitution de réserves utiles en eau encore appréciables. Dans les autres régions, dès que la pluviométrie interannuelle dépasse 800 mm, ils sont lessivés; les sables grossiers y sont dans des proportions plus importantes et les réserves utiles y sont beaucoup plus faibles.

Très pauvres en matière organique, ces sols sont très peu structurés en surface et sujets aux phénomènes de battance. Placés sur les plus fortes pentes, ils sont soumis à une érosion intense dès que le couvert végétal disparaît. Des croûtes de ruissellement s'installent sur toutes les parties de sol nu, limitant l'infiltration vers les horizons plus profonds pour lesquels la conductivité hydraulique serait plutôt forte. En aval des croûtes de ruissellement, apparaissent des croûtes d'érosion, puis des griffes qui se transforment en ravines apportant des sables qui se déposent en cônes de déjection dans les bas-fonds. Ce phénomène, important dans toute la zone au nord de l'isohyète 1000 mm, où le couvert végétal est très discontinu, apparaît dans les régions plus humides et s'accroît avec le défrichage intensif des versants.

Ces sols présentent une fertilité organique pauvre et une fertilité chimique faible. Ils sont très pauvres en calcium et magnésium, carencés en sodium et potassium. Leurs capacités d'échange cationique du complexe absorbant est faible.

Principaux atouts et contraintes liés aux sols rencontrés dans les bas-fonds des projets pilotes

Au Yatenga, les sols des bas-fonds présentent des caractéristiques hydriques et chimiques favorables à leur mise en valeur agricole avec cependant un taux de matière organique un peu faible.

Dans le Siné-Saloum, la principale contrainte à la mise en valeur agricole des bas-fonds est leur envahissement par les apports sableux en provenance des versants et leur très faible teneur en matière organique.

Au Mali et dans la Comoé, l'hétérogénéité granulométrique des sols et leur faible fertilité (chimique et organique) constituent les contraintes majeures pédologiques au développement des cultures.

En Casamance, la salinisation et la toxicité des sols sulfatés acides sont les contraintes majeures au développement de la riziculture. C'est cependant dans ces bas-fonds que les sols ont les meilleures qualités hydrauliques pour la riziculture et la plus forte fertilité organique.

Tableau XXVI : Atouts et inconvénients liés à la nature des sols.

Projet pilote	Type de sol classification française	Localisation dans le bas-fond	Texture	Caractéristiques hydriques		Qualité chimique		
				Réserve utile	Conductivité hydraulique	Bases	MO	Toxicité
Yatenga	Sols ferrugineux tropicaux peu lessivés à concrétions	Bas versants	Sableux à sablo- limoneux	+	-	-	--	++
	Sols peu évolus d'apport colluvio-alluvial	Zone centrale amont	Sablo- limoneux à argileux	+	+	-	-	++
	Sols hydromorphes à pseudo-gley	Zone centrale aval	Argilo- limoneux	+	++	+	-	++
Siné- Saloum	Sols ferrugineux tropicaux lessivés	Versants	Sableux à sablo- limoneux	-	--	--	--	++
	Sols peu évolus d'apport colluvio-alluvial	Zone centrale	Sableux en surface sablo- argileux	--	-	+	--	++
	Sols hydromorphes à pseudo-gley	Zone centrale mare	Argilo- limoneux	++	+	+	--	++
Casamance	Sols ferrugineux tropicaux lessivés, beiges	Bas versants	Sableux	--	--	--	-	+
	Sols hydromorphes peu salés	Zone centrale amont	Argileux en surface Sableux en profon- deur	+	+	-	++	+
	Sols sulfatés acides	Zone centrale aval	Argileux à argilo- sableux	+	+	-	++	---
Mali-Sud Comoe	Sols ferrugineux tropicaux lessivés	Bas versants	Sableux	--	--	--	--	++
	Sols hydromorphes	Zone centrale amont	Limono- argilo- sableux à sablo- limoneux	-	-	-	-	++
	Sols hydromorphes à pseudo-gley	Zone centrale aval	Argilo- sableux à sableux	+	++	-	-	++
Réserve utile du sol + bonne - faible -- très faible Conductivité hydraulique ++ faible + normale - forte -- très forte				Teneurs en bases et matières organiques(MO) -- très faible - faible + moyenne ++ forte Toxicité --- très forte + moyenne ++ nulle				

Deuxième partie

**L'homme et les bas-fonds
en Afrique de l'Ouest**

Une population jeune et mobile

DENSITE

La densité de population est variable selon les régions étudiées, comme l'indique le tableau XXVII. Elle est cependant très supérieure à la moyenne des pays concernés (15 à 30 hab./km², même en éliminant les zones désertiques du Mali).

**Tableau XXVII : Densité de population
et nombre d'habitants par village des bas-fonds étudiés.**

VILLAGE	HABITANTS	DENSITE (hab/km2)
Bidi	3200	42
Keur Samba Diama	334	62
Kambo	1317	68
Moadougou	3293	65
Kawara	9669	65
Djiguinoun/Djilakoun	1234	49

Il est difficile de déterminer la disponibilité en terres de bas-fond par habitant. En règle générale, la superficie exploitée dans le bas-fond n'est pas fonction du nombre d'habitants d'un village. Il arrive qu'un bas-fond soit cultivé par des paysans issus de plusieurs villages, de même qu'un village exploite (des parties de) plusieurs bas-fonds. Le village de Kawara par exemple est relativement peu peuplé (par rapport au terroir disponible) mais dispose de 2 grands bas-fonds. Cependant cette situation n'est pas sans créer des tensions car ces bas-fonds sont convoités par les paysans des villages voisins.

ETHNIES

Le bas-fond, au centre de la vie des villageois, est fréquenté par plusieurs groupes ethniques qui habitent dans les environs. Le tableau XXVIII indique les ethnies présentes dans les bas-fonds étudiés.

Tableau XXVIII : Les principales ethnies présentes dans les villages étudiés

VILLAGE	ETHNIE	POURCENTAGE DE LA POPULATION
Bidi	Mossi	70 %
	Rimaibé	19 %
	Peul	11 %
Thyasse Kaymor	Toucouleur	20 %
	Wolof	80 %
Kambo	Sénoufo	100 %
Moadougou	Sénoufo	71 %
	Gouin	29 %
Kawara	Sénoufo	100 %
Djiguinoum	Dioula	40 %
	Mandingue	60 %

Il existe des différences entre les ethnies à divers niveaux :

- les activités économiques ou la répartition entre agriculteurs (cultures de rente ou cultures vivrières), éleveurs ou commerçants;
- les religions : animisme, islam, christianisme, ou un mélange de plusieurs religions;
- le régime foncier, les modes d'organisation et de collaboration, etc...

La cohabitation ethnique provoque des frictions en cas de pénurie ou de partage inégal des moyens de production (terres fertiles ou points d'eau par exemple) et rend la collaboration durable entre les ethnies difficile à réaliser. Ce problème se pose surtout entre éleveurs (sédentaires ou transhumants) et agriculteurs, les premiers étant tentés de faire paître leur bétail dans le bas-fond, même en période d'intense activité agricole. A Bidi par exemple, l'augmentation des surfaces défrichées au profit de l'agriculture a accru la charge pastorale, provoquant des querelles entre éleveurs et agriculteurs : la sécheresse pousse les troupeaux vers les abords des champs cultivés ou mis en jachère au début de la saison des pluies.

A titre d'exemple, le périmètre maraîcher de Bidi, destiné à l'ensemble de la collectivité (population hétérogène), est à l'abandon puisque les épouses du chef Mossi, traditionnellement propriétaire des terres, se réservaient toujours le droit de cueillette à l'emplacement du périmètre en n'hésitant pas à se servir parmi les légumes plantés par d'autres personnes (AUTISSIER & MONIN, 1987).

Un autre exemple illustre les difficultés de la cohabitation entre ethnies : celui de la Comoé où, selon le village, l'ethnie et la religion, les paysannes sont soumises à un régime de jours fixes dans la semaine pendant lesquels le travail à la houe et la manipulation des ouvrages hydrauliques leur est interdit (RAN, 1990). Dans le cas d'un aménagement hydro-agricole, cela est très préjudiciable à la réalisation des travaux collectifs d'entretien car souvent l'attribution des parcelles dans le bas-fond se fait indépendamment des considérations ethniques.

DEMOGRAPHIE ET MISE EN VALEUR AGRICOLE

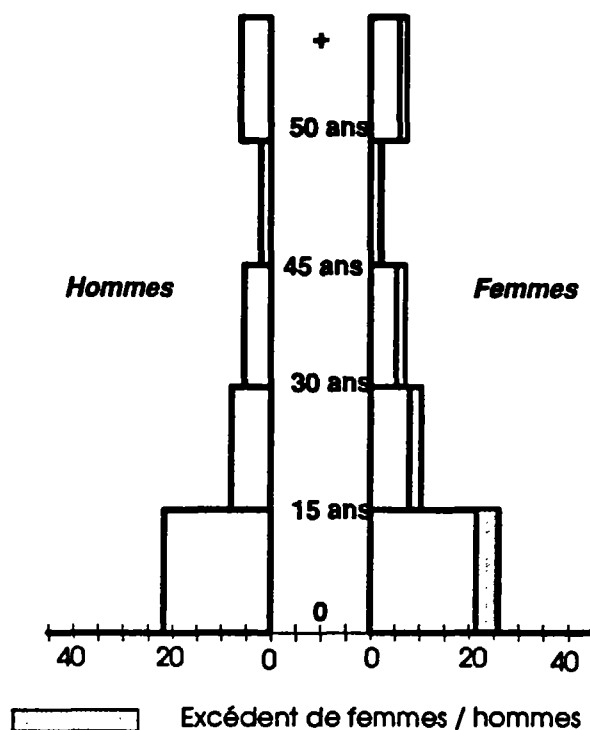
LE PHENOMENE MIGRATOIRE

Les phénomènes de migrations influencent fortement la démographie dans ces régions : il peut s'agir d'une "émigration" vers un pays (ou une région) demandeur de main d'oeuvre bon marché, ou d'un déplacement forcé de familles des régions sahéliennes sèches vers les régions plus arrosées. Ce deuxième cas de figure contribue à créer une pression sur les terres agricoles, notamment dans les bas-fonds.

Au Mali, au Sénégal et au Burkina Faso, le taux de migration saisonnière ou quasi-permanente (pour quelques années) - est remarquablement élevé; en 1985 les immigrés représentaient déjà 10% de la population totale de la Comoé. Les flux migratoires provoqués par les possibilités d'embauche, générateurs de revenus supplémentaires, ont pour destination principale la Côte-d'Ivoire en ce qui concerne les Maliens et les Burkinabè. Les Sénégalais sont attirés par Dakar, la province du Cap-Vert, la France mais également d'autres pays d'Europe, l'Amérique du Nord et les pays arabes pétroliers.

Cette migration entraîne l'absence des membres actifs d'un ménage et un surplus de femmes par rapport aux hommes. A Kambo par exemple, cet exode rural touche plus de 73 % des ménages dont 1 à 5 membres sont temporairement absents. Les hommes de Thyssé Kaymor représentent seulement 43 % de la population contre 57 % de femmes (SARR, 1991). La pyramide des âges de la population villageoise des bas-fonds de Kawara et de Moadougou montre également un «excédent» de femmes par rapport aux hommes (figure 39).

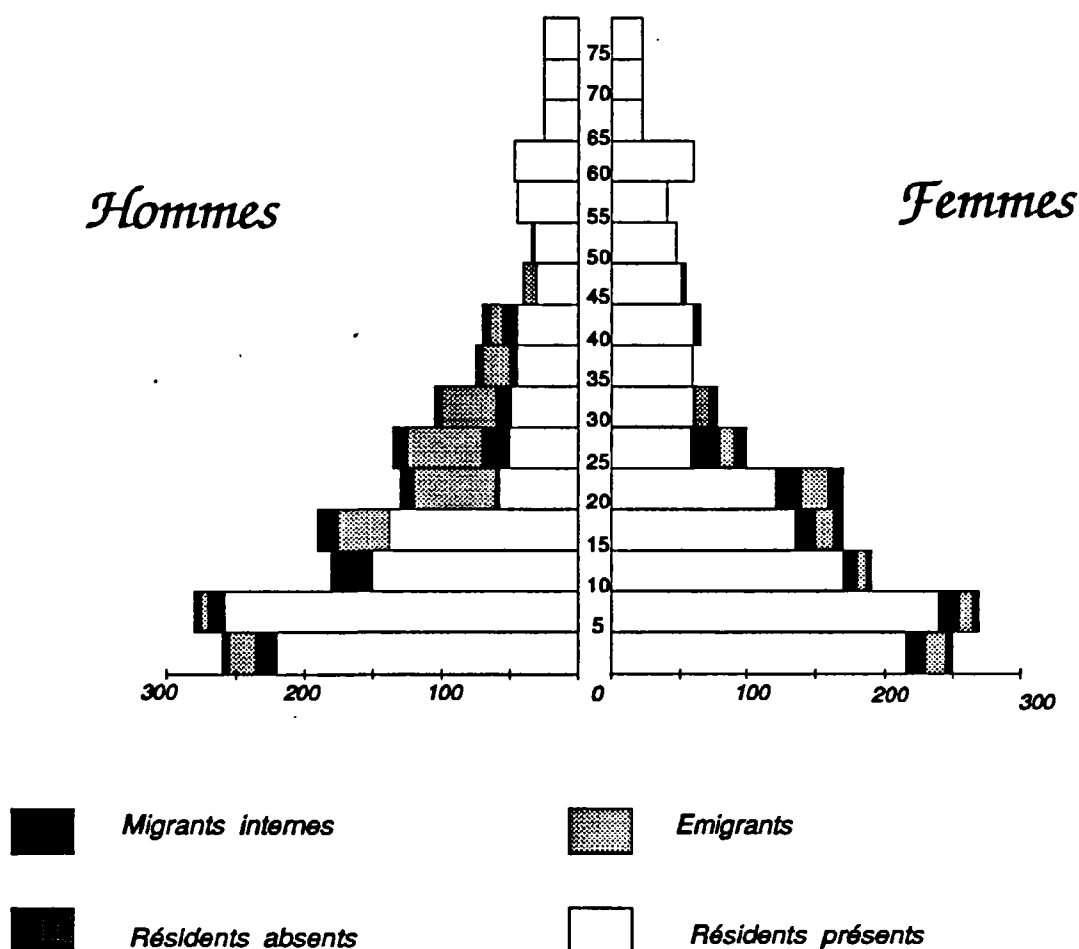
Figure 39 : Pyramide des âges de la population des villages des bas-fonds de Kawara et de Moadougou (SAWADOGO, 1990).



L'importance de la migration dépend aussi de l'ethnie : dans la Casamance, les zones sous influence mandingue connaissent un taux de migration de 5,6 % contre 18 % dans les zones occupées par les Dioulas. Dans le cas des premiers, les jeunes sont pris en charge par le groupe domestique ; le contrôle de leurs mouvements et l'influence des comportements dictés par l'islam limitent les départs. Le taux de migration élevé des Dioulas est imputable à l'émancipation économique précoce des jeunes et à la contrainte foncière plus aiguë dans les villages dont l'activité principale est la riziculture (SALL & DIOP, 1991).

La pyramide des âges de Bidi, assez représentative des autres régions, illustre l'influence des migrations : la tranche d'âge entre 15 et 40 ans, surtout pour les hommes, est fortement concernée par ces migrations.

**Figure 40 : Pyramide des âges dans le village de Bidi (décembre 1985)
(SERPANTIE & al, 1987)**



L'EXTENSION DES CULTURES DANS LES BAS-FONDS

Plusieurs facteurs démographiques entraînent une augmentation de la densité de la population autour des bas-fonds :

- une migration des familles ou des individus des zones sèches et dégradées vers des régions plus humides;
- la croissance de la population locale liée à l'augmentation de l'espérance de vie et à la baisse de la mortalité infantile;
- un déplacement des activités des terres hautes vers les bas-fonds.

Dans la Comoé, le taux de croissance de la population est estimé à 5 % par an, à Kambo à 2,6 %, en Casamance à 2,4 % et dans le Siné Saloum à 2,7 %.

Dans le Sahel, depuis quelques années, on constate une migration des villageois des zones soumises à la dégradation du milieu naturel et à la sécheresse vers des zones plus fertiles et plus humides. La baisse de la pluviométrie provoque une concentration des diverses cultures dans les bas-fonds où le taux d'humidité est plus élevé que sur les terres hautes. Cela entraîne à la longue une diminution des périodes de jachère des terres de bas-fonds et une détérioration de la fertilité du sol. Le tableau XXIX présente la différence d'occupation des terres du bas-fond de Bidi entre 1952 et 1984 ; la diminution des superficies de pâturage et jachère et l'exploitation du bas-fond pour une culture de subsistance (le sorgho) au lieu d'une culture commerciale (le coton) est remarquable.

Tableau XXIX : Estimations des surfaces cultivées en pourcentage du bas-fond de Bidi (SERPANTIE & al, 1987).

Culture	1952 % des surfaces cultivées	1984 % des surfaces cultivées
Sorgho et coton	55 (surtout coton)	49 (uniquement sorgho)
Pâturage et jachère	43	12
Riz	2	5
Jardins	0	9
Vergers	0	25

La pression démographique sur les terres de bas-fonds entraîne d'autres problèmes qu'un manque de terre et des frictions foncières :

- des coupes de bois excessives (puisque les besoins des villages augmentent) ;
- le refus opposé aux étrangers pour l'accès aux terroirs villageois ;
- des complications sociales lorsque différentes ethnies doivent cohabiter.

La pression sur les terres, constatée dans tous les projets pilotes, n'est pourtant pas en contradiction avec une éventuelle sous-exploitation de ces mêmes terres. En effet, chaque ménage aspire à exploiter le maximum de parcelles afin de sécuriser sa production alimentaire. Le manque de main d'oeuvre, engendré par l'émigration, peut empêcher une exploitation correcte des bas-fonds. Chaque famille, compte tenu des contraintes liées à la mise en valeur agricole des bas-fonds ne peut prendre en charge qu'une superficie limitée dans cette partie du terroir: un hectare par famille dans la région de Bidi.

Des systèmes de production dominés par les cultures de subsistance

Le système de production est formé de toutes les activités productives d'un ménage, agricoles et non agricoles. Il se caractérise par les moyens techniques utilisés (outils agricoles, intrants, etc...), les facteurs de production (terre, main-d'oeuvre et capital financier) et le niveau de production atteint (rendements, revenus financiers). Le ménage est considéré comme l'unité de production et de consommation. Les membres d'un ménage participent aux travaux familiaux sous la responsabilité du chef de famille et consomment les céréales des greniers familiaux. Le système de production comprend aussi les activités des membres individuels si celles-ci profitent au ménage.

ACCES A LA TERRE

LE REGIME FONCIER TRADITIONNEL

Le personnage central régissant les aspects du droit foncier est le chef de terre dans les bas-fonds étudiés au Mali et au Burkina Faso, le chef d'exploitation au Sénégal. Il est l'autorité statuant sur tous les problèmes relatifs à la terre du terroir villageois (accès et propriété, querelles foncières, limites des parcelles, etc...). Le chef de terre est un descendant des premiers habitants venu s'installer dans la zone. Il est considéré comme le responsable de l'exploitation du terroir villageois. Il décide de l'attribution des parcelles en fonction des demandes des individus, qui, eux-mêmes, doivent passer par l'intermédiaire des chefs de famille (OUEDRAOGO M., 1990). Ce schéma fréquent vaut pour les terres cultivées du bas-fond, des versants et du plateau. Outre la gestion du terroir, les chefs de terre font les sacrifices pour débiter la campagne agricole. Officiellement les chefs de terre sont des hommes mais dans la Comoé la gestion de la rizière est, dans la pratique, une affaire de chefs de terre féminins (à l'exception des sacrifices qui restent du domaine des hommes). Celles-ci sont d'ailleurs directement apparentées aux chefs de terre masculins.

La mise en place de la population à proximité du bas fond de Bidi a créé un habitat et un régime foncier particulier. Chaque groupe ethnique a constitué son terroir de quartier à partir d'un segment de bas-fond. Les résidences ont été construites à proximité immédiate du bas-fond. Terminée en 1930, cette phase primaire de peuplement fut suivie jusqu'en 1960 d'une fragmentation de l'habitat et des terres cultivables. Il est probable que la modification des données politiques après la conquête coloniale et la longue sécheresse du début du siècle furent les déclencheurs de cette migration vers les terres nouvelles. Le parc agro-forestier, observé sur les photographies aériennes de 1952, suggère que le bas-fond a été défriché dès les premières années de l'installation pionnière. De manière coutumière, les premiers arrivés sont dépositaires du domaine foncier qu'ils défrichent pour en marquer les limites et redistribuer les jachères à leurs descendants ou aux immigrants installés après eux. Contrairement à l'espace ouvert des terres hautes, dont les limites foncières des différents segments lignagers rayonnent vers les brousses les plus éloignées, l'espace linéaire du bas-fond est actuellement découpé en tronçons dont aucun ne dépasse deux hectares. Cette superficie correspond grossièrement à la limite maximale de ce que peut cultiver en sorgho une famille de 5 actifs, si elle ne veut pas nuire à l'entretien du mil. (LAMACHERE J.M. & al, 1991).

La plupart des champs sur les terres hautes sont propriétés familiales. Le travail est organisé par le chef de famille et incombe à tous les membres actifs. La récolte des champs est stockée dans les greniers familiaux et consommée en famille. Sur les terres hautes, le pourcentage de parcelles possédées individuellement est faible (au Mali-Sud les parcelles familiales occupent 95 % de la superficie cultivée contre 5 % pour les parcelles individuelles). La situation est autre dans les bas-fonds où le pourcentage des champs individuels est nettement plus élevé : 100 % dans la Comoé et 46 % dans le bas-fond de Kambo. Cela prouve le caractère secondaire des cultures de bas-fonds par rapport à celles de terres hautes.

Les principaux modes traditionnels d'acquisition de parcelles sont l'héritage et le don. Dans la Comoé, les femmes ont, en dehors d'un héritage matrilineaire, plusieurs autres possibilités pour cultiver une parcelle dans le bas-fond : par l'intermédiaire d'une demande au chef de terre, en bénéficiant d'un don ou d'un prêt, en défrichant une partie de la plaine non soumise au contrôle du chef de terre. Le tableau XXX présente les différents modes d'obtention d'une parcelle dans 3 plaines non aménagées de la Comoé (Damana, Lomangara et Nerfendougou). Au total, 148 exploitantes ont été questionnées.

Tableau XXX : Modes d'obtention traditionnelle d'une parcelle de bas-fond dans la Comoé (OUEDRAOGO, 1990).

Plaine	héritage	chef de terre	intermédiaire mari	cession	prêt
Damana	22	44	34	0	0
Lomangara	22	24.3	46.5	4.8	2.4
Nerfendougou	25	38.4	36.6	0	0

En Casamance, dans 90 % des cas les parcelles sont acquises par héritage. A Bidi, l'accès à la terre est lié à l'ethnie et aux quartiers : le quartier de la chefferie, celui des Rimañbé, dispose d'un terroir de village et de bas-fond très important en superficie, que la richesse relative de ses propriétaires permet d'exploiter de manière relativement intensive. A l'inverse, les quartiers moins favorisés ont vu leurs terroirs et leurs rendements fondre rapidement. Certains quartiers Mossi cultivent des terrains possédés par leur "clientèle" Peul en migration. Il est à noter qu'à Bidi, les terres dont les Peuls sont propriétaires sont rarement situées dans le bas-fond.

LE BAS-FOND, OBJET DE CONVOITISE

Dans bien des cas, l'accès aux terres de bas-fond est assez inégalitaire. Ainsi dans la Comoé, certains groupes sont exclus de la rizière (Forgerons et Griots). Au Mali-Sud, cette inégalité est due à une raison spécifique à la zone : le bas-fond a été déboisé dans les années 1940 pour satisfaire la fourniture d'un quota de riz imposé par le chef de canton. Les familles qui ont déboisé une partie du bas-fond, devenaient attributaires de ces parcelles. A l'heure actuelle, 22 % des ménages ne disposent d'aucune parcelle dans le bas-fond. La plus grande partie des ménages ont une seule parcelle (47,5 %), 10,9 % ont 2 parcelles et 19,6 % ont 3 parcelles ou plus. Les ménages qui disposent de plus de 2 parcelles dans le bas-fond sont pour la plupart de très grande taille (plus de 30 personnes).

Avec l'augmentation de la pression sur la terre, les problèmes de nature foncière se sont intensifiés. La terre des bas-fonds, garantie d'un seuil minimal de production, devient l'objet de nombreuses transactions ou emprunts qui dépassent le cadre du groupe ethnique, parfois même celui du village ; il est fréquent qu'un bas-fond soit exploité par des habitants de plusieurs villages. Le régime foncier suivi est celui du chef de terre du village "gérant" du bas-fond. Pourtant les emprunts et transactions de terre provoquent de multiples confusions et frictions entre les chefs de terre, les propriétaires des parcelles en question et ceux qui aspirent à exploiter et aménager des terres de bas-fonds. Les querelles portent surtout sur les limites de terrain et le droit de propriété.

Le prêt d'une terre de bas-fond est accompagné de multiples conditions ou restrictions de la part des propriétaires:

- une enquête révèle que, de peur de perdre leur parcelle, les 8 propriétaires du bas-fond de Thyse Kaymor acceptent de prêter leurs parcelles irriguées à d'autres personnes aux conditions suivantes : le bénéficiaire devra s'engager à restituer la parcelle prêtée (41 %), le prêt doit être réalisé en présence des initiateurs du projet (23 %), le bénéficiaire devra être un parent (18 %), un homme de confiance (18 %). La durée du prêt est alors limitée et l'appropriation garantie (SARR D., 1991);
- en Casamance, dans le passé, certains conflits ont opposé les habitants des deux villages de Djiguinoum et Djiacoun. L'origine de ces problèmes est variée, allant du refus de rendre la parcelle jadis prêtée à la confusion entre prêt et don, en passant par l'appropriation pure et simple de la parcelle d'autrui (SALL & DIOP, 1991).

LES SYSTEMES DE PRODUCTION

ACTIVITES EN MILIEU RURAL

Agriculture

Dans toutes les régions étudiées, l'agriculture est la première occupation des ménages. Par exemple au Mali-Sud, 2 % seulement de la population exerce une activité autre que l'agriculture notamment la chasse et le commerce. L'agriculture est pratiquée sur les terres hautes (versants ou plateaux) et dans les bas-fonds. Les cultures vivrières, qui garantissent une certaine sécurité alimentaire, prédominent largement. Les cultures de rente sont plus rares. Sur les terres hautes (agriculture pluviale), on cultive surtout le mil, le sorgho et le maïs (cultures vivrières), les arachides au Siné-Saloum et en Casamance, un peu de coton au Mali-Sud et au Siné-Saloum (cultures commerciales). Dans les bas-fonds, c'est surtout le riz inondable qui est cultivé, sauf à Bidi où le sorgho est également pratiqué dans les zones les moins humides du bas-fond. Le tableau XXXI indique l'occupation des terres cultivées pour les projets Mali-Sud, Casamance et Yatenga.

Tableau XXXI : Répartition des spéculations sur les terres cultivées

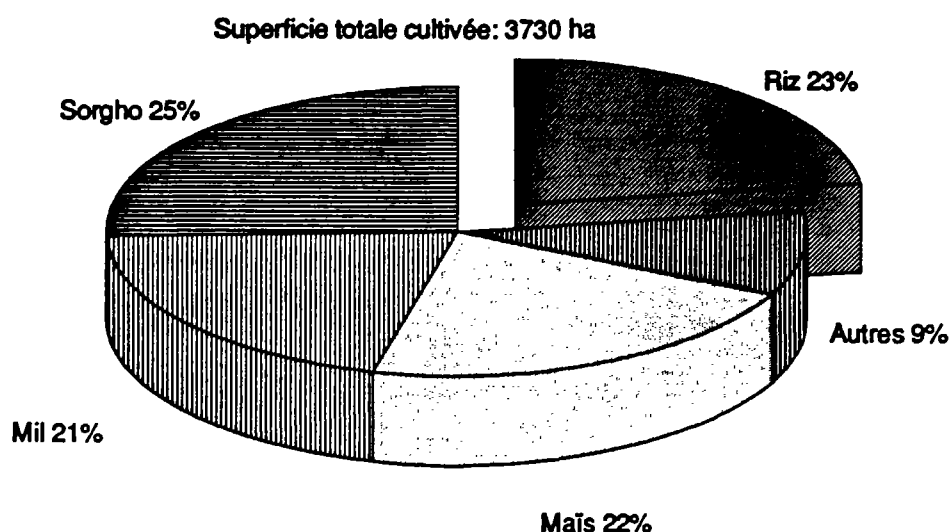
CULTURES	MALI-SUD % de la surface du bassin	CASAMANCE % de la surface du bassin	YATENGA % de la surface du bassin
Mil/sorgho/maïs	59	20	80
Riz	6	11	4
Coton	25	—	—
Arachide, niébé	- -	69	16
Autres cultures	10	—	—

— = culture non pratiquée ou en quantité négligeable

NB : Au Mali-Sud, les données de riz incluent le riz pluvial et le riz inondé (bas-fond).

Pour la Comoé, les superficies des terres cultivées par bassin versant ne sont pas connues. Cependant on dispose de ces superficies pour les terroirs villageois. La figure 41 montre les pourcentages des superficies occupées par les différentes cultures sur le terroir de Konadougou, village principal du bas-fond de Kawara.

Figure 41 : Pourcentage des superficies occupées par les différentes cultures sur le terroir de Konadougou (VOLKERT ET DE WIT, 1991).



Le jardinage de contre-saison froide n'est pas encore très répandu dans les bas-fonds étudiés quoique les actions de promotion menées ces dernières années par les projets de développement aient une influence positive. La nappe phréatique est suffisamment élevée en saison sèche pour cultiver les tomates, les pommes de terre (très pratiquées au Mali-Sud), le gombo, l'oseille, les oignons et la laitue (FARATS, 1991). A Bidi, la culture du manioc et de l'aubergine amère (Kumba) est pratiquée en petits jardins individuels depuis 1950. Cette culture de saison sèche, arrosée à partir de puisards de 15 m de profondeur, peut rapporter de 50 000 à 100 000 FCFA par actif (AUTISSIER & MONIN, 1987). Au Siné-Saloum, le jardinage de contre-saison est pratiqué à partir de puits profonds, le puisage de l'eau se faisant par traction animale.

Le niveau d'équipement agricole diffère fortement d'une région à l'autre. L'emploi de la traction animale pour le labour et le semis est régulier dans la Casamance, au Siné-Saloum et au Mali-Sud. Cela permet la mise en culture de grandes superficies. Dans la Comoé, la houe est le seul outil utilisé. Au Mali-Sud, le travail avec la charrue est très répandu : 86,5 % des ménages possèdent un ou plusieurs boeufs de labour. Pourtant seulement 19 % des parcelles dans le bas-fond sont labourées à l'aide d'une charrue. Ceci est probablement lié au fait que le labour dans le bas-fond est un travail féminin et que, en général, les femmes ne manipulent pas la charrue. Une autre raison est la plus grande importance accordée aux terres hautes par rapport au bas-fond.

A Bidi, les plus vastes des parcelles cultivées dans le bas-fond appartiennent aux paysans pratiquant la culture attelée sur les terres hautes de sorte que plus de main-d'oeuvre est disponible dans le bas-fond pour les activités au début de la campagne. Ces paysans ont aussi des revenus commerciaux qui leur permettent d'entretenir un attelage coûteux. La sous-exploitation des terres cultivables au Siné-Saloum est attribuée au sous-équipement en matériel agricole.

Le taux de commercialisation des cultures vivrières est en général faible. La priorité est donnée à l'auto-consommation. En cas de surplus par rapport aux besoins familiaux, une partie de la récolte peut être vendue. Il n'y a qu'au Sénégal que la production et la commercialisation des arachides jouent un rôle important dans le système de production : la quasi-totalité de la récolte est vendue aux coopératives, le reste auto-consommé (SARR, 1991). Les autres produits agricoles et issus de l'élevage sont écoulés sur les marchés locaux où se rencontrent aussi de temps en temps des commerçants de villes importantes qui achètent les produits en grandes quantités. Dans la zone Mali-Sud, la dynamique de commercialisation "coton-maïs", qui a porté le développement agricole ces dernières années, est freinée par la forte diminution du prix du coton sur le marché international et la disparition des subventions aux intrants.

Elevage

Bien que l'élevage soit une activité secondaire pour les paysans (en temps et en travail consacré à cette activité), elle n'est pas négligeable à l'échelle du ménage : chaque famille possède des volailles, souvent quelques ruminants, dont les boeufs pour la culture attelée au Mali-Sud, au Siné-Saloum, au Yatenga et en Casamance. En cas de besoin ou au moment des fêtes, les animaux sont vendus ou tués pour être consommés. A Bidi, 11 % de la population sont des éleveurs sédentaires (les Peuls), si bien que la concentration de (gros) bétail y est plus élevée que dans les autres zones étudiées (TEZENAS DU MONTCEL, 1987). Des éleveurs transhumants traversent les régions du Yatenga, de la Comoé et du Mali-Sud. La présence de la trypanosomiase bovine dans ces deux dernières régions constitue un sérieux handicap pour l'élevage.

Autres activités

Les vergers se trouvent dans les bas-fonds ou sur les bas de pente. Les différents fruits et légumes des jardins contribuent à varier l'assortiment alimentaire. Les arbres sont exploités pour la coupe du bois, les besoins médicaux traditionnels et comme fourrage en période de soudure. Quelques petites forêts servent de lieux de sacrifices et ont alors une fonction sacrée comme dans la Comoé et le Siné-Saloum.

Les activités non agro-forestières sont la vente de produits agricoles transformés ou non (bière de sorgho, beurre de karité, pâte d'arachides, etc), les autres formes de commerce, la chasse, la pêche, l'artisanat, l'orpaillage, le travail journalier ou saisonnier (surtout en Côte d'Ivoire) comme main-d'oeuvre agricole, la forge, la médecine traditionnelle ou la contrebande. Il est à noter que quatre projets pilotes sur les cinq sont situés près de frontières. Ces activités, secondaires par rapport à l'agriculture, sont pourtant celles qui permettent de fournir des revenus en espèces, afin de satisfaire les dépenses immédiates et quotidiennes, ou d'économiser pour des projets à long terme.

PLACE DES BAS-FONDS

Les superficies cultivées dans les bas-fonds

Bien que les superficies des bas-fonds soient réduites par rapport aux terres hautes (tableau XXXII), que le travail y soit relativement ingrat et que le riz, principale céréale cultivée, soit secondaire au niveau du ménage par rapport aux céréales des terres hautes dans tous les cas étudiés, leurs caractéristiques spécifiques permettent d'y mener des activités agricoles ou pastorales: riziculture, pâturage précoce, maraichage, qui, dans le système de production, peuvent acquérir une importance toute particulière.

Tableau XXXII : Pourcentage des terres de bas-fonds par rapport à la surface totale cultivée du terroir villageois.

Bas-fond	Pourcentage
Bidi	12 %
Keur Samba Diama	5 %
Kambo	7 %
Kawara	14 %
Moadougou	11 %
Djiguinoum	6 %

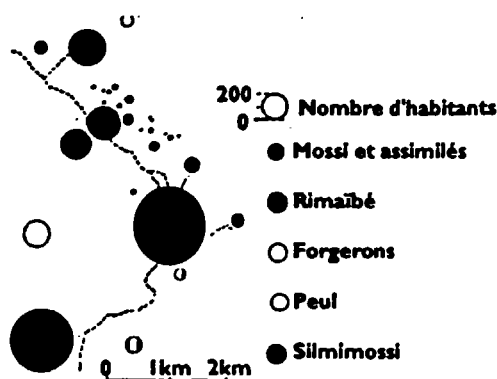
Bien que le pourcentage des terres de bas-fonds par rapport aux terres hautes ne soit pas élevé, la production de riz peut représenter une partie non négligeable de la production agricole totale par ménage: 25 % en moyenne dans la Comoé.

En ce qui concerne le type et le niveau d'exploitation des bas-fonds, les situations des projets pilotes sont très variables. Les exemples ci-après illustrent la diversité de l'usage des bas-fonds et l'évolution de leur importance dans le temps dans le système de production. En particulier, le nombre d'individus ou de ménages concernés par l'exploitation des bas-fonds et la motivation qui les poussent à mener cette activité sont très variables.

Dans la Casamance, la sécheresse des 15 dernières années a contribué à diminuer le potentiel foncier rizicultivé. Bien que ces terres jouent un rôle déterminant dans le système de production, elles sont par la force des choses devenues moins importantes en raison de la baisse du niveau de la nappe de bas de pente et la remontée du sel sur les sols de vastes dans la Casamance. Avec l'aide de différents projets de développement et la participation de la population, on essaie actuellement de sécuriser les zones de production et de réhabiliter celles qui sont dégradées avec l'objectif que la culture de riz occupe de nouveau sa place antérieure dans le système de production.

Le bas-fond de Bidi a joué des rôles très divers dans les systèmes de production des groupes qui s'y sont succédé : pour les forgerons, anciens Dogons, l'accès à l'eau était primordial. L'essentiel de ce groupe a quitté la région lors du développement des royaumes Kurumba (XVI^{ème} siècle) et Mossi. Au XIX^{ème} siècle, la région de Bidi est une zone frontalière dangereuse, parcourue par des Peul nomades, leurs captifs Rimaïbe et leurs troupeaux, qu'ils abreuvent aux puisards et alimentent aux pâturages du bas-fond. Des chasseurs, quelques cultivateurs saisonniers et quelques forgerons occupent la région. C'est à la fin du siècle dernier qu'un groupe Rimaïbe (captifs des Peul) s'installe à demeure, sur un territoire contrôlé traditionnellement par la maîtrise de terre Kurumba de Koumbri, fondée au XVI^{ème} siècle. Bien que musulmans et nomades, les Peul toléraient les pratiques animistes Kurumba de sacralisation de la terre et de division du domaine foncier entre lignages, pratiques entérinées par le pouvoir Mossi du Yatenga considéré comme prééminent. Cette installation fut suivie par une immigration d'origine variée (Mossi, Silmimossi, Forgerons, Maransé, Yarsé, Kurumba), population régie par une chefferie Mossi dès 1930. Pour ces pionniers sédentaires du début du siècle, puis les "producteurs" de mil des années 50, les commerçants musulmans (culture du coton) et enfin la société agro-pastorale actuelle, le caractère agricole prédominait. A la fin des années 60, dès que se sont manifestées les premières sécheresses, le bas-fond est devenu un élément de diversification du système de production vivrier. La culture du sorgho y est devenue possible suite à la réduction du risque de submersion prolongée. La figure 41 montre la localisation et les effectifs des principaux groupes ethniques du bas-fond de Bidi.

Figure 41 : Localisation et effectifs des principaux groupes et ethnies du bas-fond de Bidi (SERPANTIE G. et al, 1987).



Avant la colonisation, la majorité de la production alimentaire du Mali-Sud provenait de l'exploitation des terres de versants (avec les cultures de mil et de sorgho), les bas-fonds étant réservés à des productions de sécurité. Les structures d'encadrement technique de l'Etat ont introduit des cultures de rente sur les terres hautes (coton, maïs). Le rôle du bas-fond est alors devenu marginal dans les régions où ce type d'encadrement a réussi. Par contre, là où les terres hautes ne garantissent pas une sécurité économique suffisante, les bas-fonds redeviennent un élément prioritaire du système de culture (LEPLAIDEUR, 1991). Dans la Comoé comme au Mali-Sud, les bas-fonds sont rizicultivés systématiquement chaque année par des centaines de femmes, avec ou sans le soutien d'organismes de développement.

La riziculture, une affaire de femmes

Les inondations fréquentes sinon permanentes des bas-fonds pendant la saison des pluies sont favorables à la riziculture. Selon les besoins de la population, les conditions physiques (pluviométrie, hydrogéologie, morpho-pédologie) et la concurrence avec d'autres usages (vergers, pâturage etc.), des superficies plus ou moins vastes sont exploitées pour la culture du riz. Les bas-fonds dans la Comoé et le Sud du Mali sont intégralement utilisés comme rizières tandis que les autres bas-fonds connaissent des contraintes pour une exploitation totale : à Bidi, il y a le problème du manque d'eau, dans la Casamance celui du sel et de l'acidité et au Siné-Saloum celui de l'ensablement du lit majeur.

La riziculture des bas-fonds au Burkina Faso et au Mali est une activité principalement féminine. Cet état de fait est assez général en Afrique de l'Ouest. A Kawara, 7 % des exploitants sont des hommes, à Moadougou 4 % et à Kambo 9 %. Ce fait est imputé probablement à la nature du travail (le travail est physiquement dur et "sale" à cause de la boue) et à la place assez marginale, quant à la production totale céréalière et au rendement, occupée par le riz dans le système de production. En Casamance, bien que les propriétaires des terres rizicoles soient des hommes, 50 % des parcelles sont cultivées par les femmes et les enfants (la préparation du terrain est faite par des hommes) (SALL, 1990).

La production de riz, comme celle des autres céréales, est surtout auto-consommée. Dans la Comoé et au Mali-Sud une infime partie de la récolte est vendue pour couvrir les besoins immédiats des femmes en liquidités. A Bidi, c'est le contraire : la production de riz des femmes est largement destinée à la vente. Par contre, il revient aux hommes de fournir le riz des jours de fête. Le tableau XXXIII montre l'origine et la destination du riz de novembre 1990 à avril 1991.

Tableau XXXIII : Origine et destination du riz de novembre 1990 à avril 1991
(VOLKERT et DE WIT, 1991).

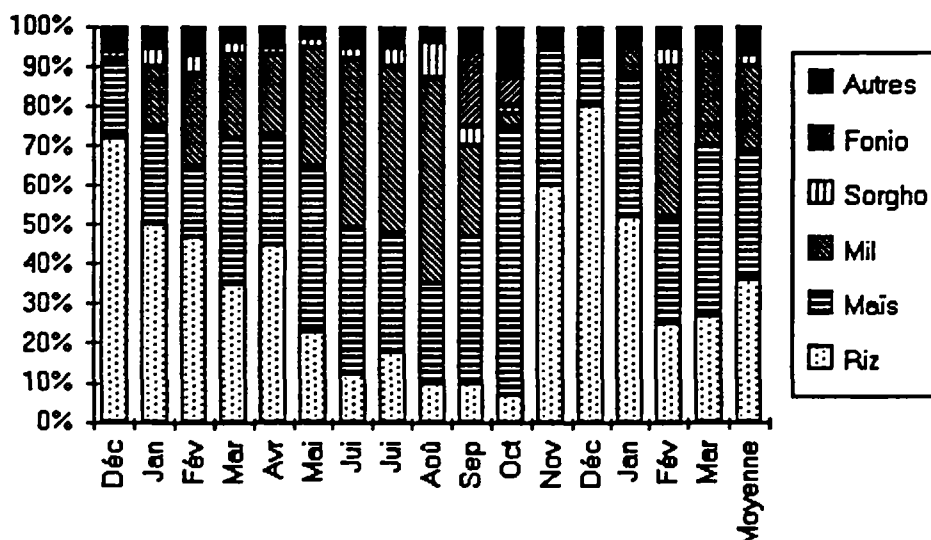
Origine	N	Destination	N
Culture	47	consommation	47
Don	10	vente aux commerçants	9
Achat	5	vente au marché	18
Echange	*	vente à la CGP	2
		vente total	26
		cérémonies	30
		échange	7
		don à des proches	22
		don au chef de terre	*
		semences	44

N = Nombre de personnes concernées (total des personnes enquêtées = 47)

* = données non disponibles

Dans la Comoé, la plus grande partie du riz est consommée directement après la récolte, avant que soient trop entamées les autres récoltes de céréales. Il ressort de la figure 43, qui montre la composition moyenne par mois d'un repas pour l'ensemble de 4 ménages suivis pendant 16 mois, que la fluctuation de la consommation du riz est plus prononcée que celle des autres céréales qui sont consommées de manière plus égale pendant l'année. La quantité de riz consommée est élevée juste après la récolte (novembre et décembre) et pendant le mois de carême musulman (mois d'avril en 1990). De manière générale, bien que dans le système de production le riz ne soit pas la culture la plus importante en termes de production totale, il occupe partout une place privilégiée. Il est consommé aux jours de fête, offert aux étrangers et utilisé lors des manifestations socio-culturelles (funérailles par exemple). Au Sénégal, le riz est l'alimentation de base dans la majorité des foyers. Les productions rizicoles des bas-fonds sont surtout auto-consommées l'année de culture ou stockées pour être consommées les années défavorables et à l'occasion des grandes fêtes d'initiation en Casamance (JOLLY & al 1985).

Figure 43 : Composition moyenne par mois d'un repas pour 4 ménages, suivis de décembre 1989 à mars 1991 (Comoé) VOLKERT & DE WIT, 1991.



Dans la Comoé, les femmes tirent une certaine fierté de l'exploitation de leur parcelle rizicole. Une femme doit être capable d'approvisionner son ménage en riz pour les occasions qui se présenteront au cours de l'année. Ce sentiment est présent, indépendamment des rendements obtenus ainsi que des conditions hydrologiques locales qui peuvent être très défavorables.

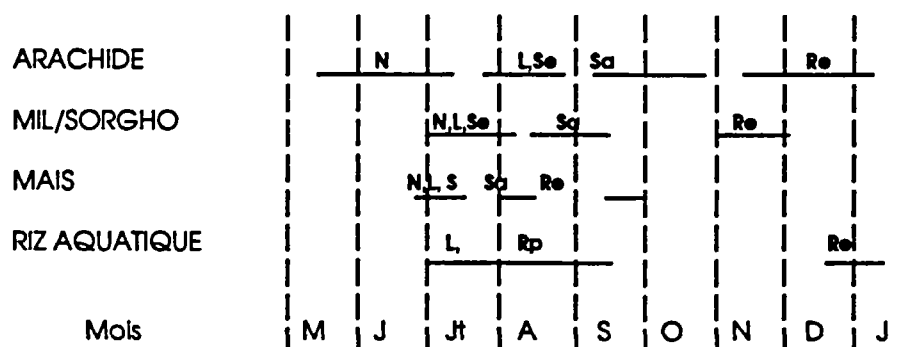
Concurrence entre terres hautes et terres de bas-fonds

Il existe une forte concurrence sur les investissements humains et financiers entre les champs des terres hautes et ceux situés dans les bas-fonds. Etant donné que les moyens financiers et la disponibilité en main-d'oeuvre sont des facteurs limitants, un choix doit être fait. Les terres hautes ont toujours la priorité par rapport aux bas-fonds parce que la riziculture est surtout une occupation féminine sur des parcelles individuelles tandis que les champs des terres hautes sont familiaux.

Le calendrier cultural

Le problème de disponibilité en main-d'oeuvre se pose aux moments où les différentes activités agricoles sur les terres hautes et le bas-fond coïncident, en particulier pour le labour, le semis et la récolte. En Casamance le labour des bas-fonds vient directement en concurrence avec le labour ou le sarclage des céréales sur les terres hautes. La figure 44 présente le calendrier cultural pour les terres hautes et les bas-fonds de Casamance.

Figure 44 : Calendrier cultural pour les terres hautes et les bas-fonds de Casamance. (SALL & DIOP, 1991)



N=Nettoyage; L=Labour; Se=Semis; Rp=Repiquage; Sa=Sarclage; Re=Récolte.

La stricte division des tâches agricoles entre hommes et femmes (le semis est par exemple exclusivement une tâche féminine dans la Comoé) fait que les femmes sont obligées de travailler sur les champs de leur mari ou du chef de famille avant de commencer à travailler dans le bas-fond. Dans une famille les moyens pour payer la main-d'oeuvre salariée et acheter des intrants sont rarement disponibles pour le bas-fond. La situation financière marginale des femmes ne leur permet pas des investissements monétaires importants dans le bas-fond (NUGTEREN, 1991). Le tableau XXXIV présente le calendrier cultural et la division des tâches agricoles entre les hommes et les femmes dans la Comoé.

Tableau XXXIV : Calendrier cultural et division des tâches agricoles dans la Comoé (FOKKER & WILLE, 1988)

Décade	Mai			Juin			Juil.			Août			Sept.			Oct.			Nov.			Déc.		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Maïs																								
Labour																								
Semis																								
Désherbage																								
Récolte																								
Mil																								
Labour																								
Semis																								
Désherbage																								
Récolte																								
Sorgho																								
Labour																								
Semis																								
Désherbage																								
Récolte																								
Arachide																								
Labour																								
Semis																								
Désherbage																								
Récolte																								
Coton																								
Labour																								
Semis																								
Désherbage																								
Récolte																								
Riz																								
Labour																								
Semis																								
Repiquage																								
Récolte																								

—— travail des hommes == travail des femmes === travail collectif

Les exigences en main-d'oeuvre

La riziculture dans le bas-fond est une activité qui requiert une main-d'oeuvre plus importante que les céréales cultivées sur les terres hautes. Le tableau suivant permet de comparer à Bidi le temps consacré aux activités culturales sur les terres hautes et les bas de pente (mil, sorgho, maïs et arachide) d'une part, et dans le bas-fond (riz) d'autre part.

Tableau XXXV : Temps consacré aux différentes activités agricoles à Bidi (homme-jour/ha).

CULTURE	PREPARATION ET SEMIS	ENTRETIEN ET SARCLAGES	RECOLTE	TOTAL
Mil	12	60	35	107
Sorgho	12	90	35	137
Mais	12	60	35	107
Arachide	20	35	20	75
Riz	60	150	80	290

NB : la durée d'une journée de travail est d'environ 6 heures (de 8 h à 14 h)

Dans la Comoé, les activités sur les terres hautes (maïs, sorgho, mil) exigent en moyenne 140 jours/ha contre 243 jours/ha pour la riziculture dans le bas-fond. La différence entre les chiffres de la Comoé et de Bidi s'explique en partie par le fait :

- que les cultures des terres hautes sont exécutées sans préparation du sol ou à l'aide d'une charrue à Bidi alors qu'on utilise la houe dans la Comoé, ce qui exige plus de temps de travail ;
- que les parcelles rizicoles dans la Comoé sont inondées en permanence durant la campagne culturale, ce qui, créant des conditions relativement défavorables pour le développement des adventices, réduit le temps de sarclage, contrairement à Bidi où l'entretien du riz est plus difficile du fait de l'enherbement des parcelles et de l'encroûtement des sols.

De toutes les céréales, le riz est celle qui donne les rendements les plus élevés à l'hectare ; ainsi, en prenant en compte les exigences en main-d'oeuvre, sa productivité (rendement en kg/jour de travail) est du même ordre que celle du sorgho et du maïs. L'arachide donne le meilleur rapport production/temps de travail. Cela est confirmé en Casamance où le manque de main-d'oeuvre favorise le développement des cultures de rente telles que l'arachide.

Un certain nombre de facteurs limitent le temps que les paysannes peuvent consacrer aux travaux dans la rizière :

- D'autres tâches incombant aux femmes sont souvent prioritaires : ménagères, économiques, familiales, agricoles sur les terres hautes. Ce n'est que lorsque les femmes ont dépassé l'âge de la ménopause ("femmes libérées"), qu'elles sont dispensées des travaux sur les terres hautes et peuvent passer plus de temps dans la rizière. Effectivement l'âge des exploitantes au Mali-Sud se situe entre 41 et 60 ans (NIJSEN, 1989). L'exploitation collective au Mali-Sud (54 % de la superficie du bas-fond) dépend complètement du calendrier cultural des terres hautes : les actifs interviennent tant que les travaux sur les terres hautes le permettent. Les exploitants individuels travaillent également sur les champs des terres hautes mais peuvent organiser leur emploi du temps plus facilement (de manière indépendante à celui des autres membres de la famille) et ils disposent d'une certaine aide familiale si le riz est destiné aux greniers collectifs.
- L'absence d'hommes, due à l'émigration, a entraîné un important transfert des tâches dans la répartition entre hommes et femmes, ce qui a pour effet d'augmenter la charge de travail des femmes.

- Traditionnellement, les exploitantes de la Comoé sont soumises à un régime de jours interdits (interdiction d'utiliser la houe et de manipuler les ouvrages du collecteur à Moadougou par exemple) et jours de repos. Le nombre de ces jours varie selon l'ethnie, la religion et le village. Il est de l'ordre de 2 à 3 jours par semaine.

- La situation financière ne permet pas d'avoir recours à de la main-d'oeuvre salariée. En Casamance, le labour de la rizière est exécuté par la main-d'oeuvre familiale, tandis que pour le repiquage on fait appel à la main-d'oeuvre extérieure (essentiellement à des associations de travail).

Dans la Comoé, 81 % des opérations culturales dans le bas-fond sont réalisées par la main-d'oeuvre familiale, 11 % par le biais de l'aide mutuelle entre exploitantes et 8 % par la main-d'oeuvre salariée. L'entraide est pratiquée au sein de la famille élargie (filles, soeurs, co-épouses, etc...).

Les aménagements : espoirs et désillusions

LA MISE EN PLACE DES AMENAGEMENTS

Les cinq projets pilotes diffèrent par les procédures de mise en place des aménagements. Ces différences sont liées à l'historique du site et au degré de complexité technique de l'aménagement. Une participation de la population rurale a toujours été sollicitée mais à des degrés divers et suivant des modalités adaptées à chaque cas.

Les critères suivants permettent de caractériser la participation villageoise :

- l'existence d'une demande formelle de la population pour qu'un aménagement soit réalisé sur son terroir (dans la phase "initiation") ;
- le niveau de consultation de la population (ou de ses représentants) dans les études techniques, afin de choisir, parmi plusieurs options, celle qui correspond le mieux aux besoins des futurs exploitants (dans les phases "préparation" et "conception") ;
- la participation effective de la population à la construction des infrastructures (dans la phase "exécution") ;
- l'autogestion de l'aménagement par les exploitants après la mise en place des infrastructures (dans les phases "gestion" et "entretien").

Le tableau XXXVI résume pour les projets pilotes les modalités de la mise en place, de la gestion et de l'entretien des aménagements.

Tableau XXXVI : Modalités de la mise en place, de la gestion et de l'entretien des aménagements.

Projet pilote	Initiative	Préparation	Conception	Exécution	Entretien	Gestion
Siné-Saloum	ISRA	Paysans	ISRA	-	-	-
Casamance	Barrage PIDAC Amélioration ORSTOM ISRA	ORSTOM ISRA	ORSTOM ISRA	ORSTOM ISRA Paysans	ORSTOM ISRA Paysans	ORSTOM ISRA
Mali-Sud	AFVP PMR	AFVP	AFVP	Paysans AFVP	Paysans	Paysans
Comoé	Projet ORC	Projet ORC	Projet ORC	Villageois Projet ORC	Paysans Comité de gestion	Paysans Comité de gestion
Yatenga	Paysans ORSTOM	Paysans ORSTOM	ORSTOM CECI ORD	Paysans Six S AFVP CECI ORD	Groupeement villageois Encadreur	Groupeement villageois Encadreur

DEMANDE ET PARTICIPATION PAYSANNE

L'expérience montre qu'un des facteurs déterminants pour le succès d'un aménagement est l'échange d'informations et d'idées entre la population concernée et les agents des projets d'exécution. Il est important, voire impératif, de demander l'avis de la population sur ses besoins, de recueillir ses idées et souhaits pendant la phase de préparation. L'aménagement n'est pas seulement une réponse technique à un problème physique; mais il doit correspondre également aux aspirations de ses futurs utilisateurs. En Afrique de l'Ouest, la mise en place des aménagements se fait avec une participation de plus en plus active et importante de la population. L'acceptation précoce de l'aménagement a une influence positive sur sa mise en oeuvre et sa durabilité.

Projet Yatenga

A Bidi, l'intensification de la culture du riz exige la maîtrise de l'eau. La demande paysanne portait essentiellement sur la réalimentation de la nappe phréatique à des fins domestiques. Les chercheurs de l'ORSTOM, en concertation avec le groupement villageois, ont proposé deux aménagements. Le premier, une digue déversante avec batardeaux, répond à la demande immédiate des paysans et permet une régulation du niveau d'eau dans la retenue, indispensable à la valorisation agricole du bas-fond. Le second, une digue filtrante, permet d'étendre les superficies cultivables à un moindre coût. Ces deux aménagements expérimentaux ont été réalisés avec une forte participation paysanne (SERPANTIE, 1988).

Projet Comoé

Dans la Comoé, la méthode de mise en place des aménagements a évolué dans le temps. Durant la première phase, le projet ORC se concentrait essentiellement sur le nombre d'hectares à aménager. L'obligation contractuelle d'aménager une certaine quantité d'hectares par an entraînait une certaine précipitation. Les agents du projet choisissaient les sites à aménager, définissaient l'aménagement, le système d'attribution des parcelles, la façon d'organiser les exploitantes, etc. Les choix de la conception et de la gestion des aménagements étaient basés sur des critères techniques et des expériences étrangères à la Comoé. Cette méthode de travail permettait au projet d'aménager rapidement le nombre d'hectares souhaité; sans qu'une réflexion sur des alternatives ait été entreprise. Cette approche n'a satisfait ni le projet ORC, qui n'a pas pu réaliser ses objectifs: des rendements en riz de 3 tonnes/ha et l'autogestion des aménagements, ni les paysannes.

Des changements étaient indispensables et actuellement:

- les exploitantes sont impliquées dans toutes les phases de mise en place des aménagements;
- l'organisation des paysannes est mieux adaptée aux formes traditionnelles d'organisation: une partie de la plaine est donnée à un quartier qui forme une UGR (Unité de Groupement Rizicole);
- la sensibilisation des exploitantes commence un an avant la mise en place de l'aménagement;
- l'inscription des candidates, qui ont droit à une parcelle aménagée, commence largement avant la mise en place de l'aménagement (six mois à un an);
- la distance entre la parcelle aménagée et la maison est réduite autant que possible;
- les femmes d'une même concession ont des parcelles adjacentes dans la plaine et sont membres d'un même groupement;
- un programme spécial de formation des exploitantes à l'entretien de l'aménagement et à la gestion de l'eau a été créé;
- les techniciens du projet ORC suivent des formations adaptées à la conception des aménagements;
- des ajustements techniques et des aménagements complémentaires ont été réalisés afin d'habituer les usagers à leur utilisation;
- le cahier des charges, explicitant les droits et devoirs du projet ORC et des exploitantes, est mis en application dans les plaines nouvellement aménagées.

La nouvelle approche demande relativement plus de temps mais elle évite une grande partie des problèmes techniques et fonciers.

Projet Casamance

En Casamance, les aménagements de type "digue anti-sel" étaient fortement demandés par les paysans au début des années 80 après l'apparition de la sur-salure des sols. Ils ont été mis en place soit par des ONG (AFVP), soit par des sociétés d'aménagement SOMIVAC, PIDAC, CADEF... Des comités villageois avaient été mis en place pour la gestion et l'entretien des ouvrages. Avec la dégradation des conditions naturelles et souvent une mauvaise adéquation de l'ouvrage à la gestion des eaux pour le dessalement, ces comités se sont démobilisés et dissous. A Djiguinoum, il fallait prouver qu'une modification de l'ouvrage et la réalisation d'aménagements secondaires permettraient une réhabilitation des sols sulfatés acides de rizière. Ces aménagements, préconisés à titre expérimental, ont été réalisés par des paysans rémunérés sous la direction des chercheurs de l'ORSTOM et de l'ISRA. Un volontaire de chacun des deux villages concernés a été formé aux techniques de gestion. Des visites spontanées, puis organisées, ont eu lieu sur les parcelles expérimentales. Les bons résultats observés dans ces parcelles ont encouragé une remise en rizière du bas-fond. Une mise en culture de 25% du potentiel foncier rizicultivable dans les sols sulfatés-acides s'est effectuée de manière spontanée, dès la troisième année du projet.

Projet Mali-Sud

Dans la zone Mali-Sud, les aménagements de type "barrage souterrain" ont été promus par la coopération canadienne et réalisés par des ONG (AFVP) avec une forte participation paysanne. La CMDT, société locale de développement, assure un encadrement important des paysans (3 encadreurs agricoles à Kambo).

Projet Siné-Saloum

Au Siné-Saloum, région où le système de production est largement tourné vers la culture commerciale de l'arachide sur les versants, la possibilité d'aménager le bas-fond de Keur Samba Diama a été analysée dans le cadre de l'ensemble de la demande paysanne. La sécurisation de la production rizicole est un souci mineur. Les paysans voudraient développer la culture maraîchère de contre-saison et créer des vergers. Ils réclament en premier lieu une source d'énergie pour l'exhaure de l'eau et en seconde position des aménagements pour réduire l'érosion sur les zones de jonction entre le bas-fond et les versants. A Keur Samba Diama, une étude de faisabilité d'un aménagement, comprenant d'une part l'acquisition d'une unité de production de biogaz pour le pompage de l'eau et la mouture du grain, et, d'autre part, la mise en place de digues filtrantes pour étaler les crues a été réalisée (FARINET & al, 1991). Le programme de recherche, n'ayant pas eu les moyens de financer l'ensemble de l'aménagement, a préféré, à titre expérimental, concentrer ses efforts sur les essais agronomiques et les possibilités d'améliorer la riziculture et le maraîchage dans un contexte de "non maîtrise de l'eau" plutôt qu'imposer à un village des travaux coûteux en journées de travail pour sécuriser une production rizicole dont le risque de production nulle, une année sur cinq, est tout à fait accepté.

REORGANISATION SOCIALE

L'introduction d'un aménagement hydro-agricole exige un certain niveau d'organisation des exploitants, surtout si l'autogestion de l'aménagement et l'intensification de la production sont visées. L'organisation des paysans est facilitée lorsqu'on peut s'appuyer sur des formes de collaboration traditionnelle et sur des structures déjà mises en place par l'état et par les projets de développement. La structure la plus fréquemment rencontrée est celle du groupement villageois.

En Casamance, la population est fortement mobilisée au sein des associations organisées en groupes d'âge et par sexe. Ces groupements existants peuvent former la base des organisations nécessaires à la gestion des aménagements. Au Yatenga, depuis 1966, le Ministère de l'Agriculture et de l'élevage a mis en place une structure d'intervention en milieu rural par le biais d'un encadreur sur place pour animer les groupements villageois.

A Bidi dans le Yatenga et à Kambo au Mali-Sud, les mises en place des aménagements expérimentaux ont suivi un scénario similaire. Le travail de chantier était organisé et contrôlé par des intervenants extérieurs (techniciens) mais la mobilisation et l'organisation quotidienne étaient sous la responsabilité de chefs de chantier formés par une ONG locale. La main-d'oeuvre était villageoise. La répartition des tâches en fonction des catégories de personnes correspondait au partage des corvées domestiques : les jeunes pour le chargement des camions et des charrettes, les femmes pour le transport d'eau, de terre et de pierres et les hommes pour le terrassement, le damage, le béton et le montage des gabions. L'organisation du chantier n'était donc pas en rupture avec l'organisation habituelle, villageoise ou institutionnelle.

Dans le projet pilote "Comoé", les aménagements réalisés par l'ORC étaient en place avant l'intervention du programme de recherche. En Casamance, les modifications de l'aménagement principal et la mise en place des aménagements extérieurs ont été organisés et contrôlés par le programme. Ils ont été réalisés par les villageois rétribués pour leur travail.

REORGANISATION FONCIERE

L'introduction d'un aménagement hydro-agricole dans un bas-fond modifie nécessairement le schéma foncier préétabli, que ce soit dans le cas de Kawara et Moadougou (Comoé), où l'ensemble de la plaine rizicole a été soumis à un nouveau régime foncier, ou dans les autres cas lorsque la zone concernée par les bouleversements est plus restreinte.

En Casamance, avec la réhabilitation du bas-fond, le risque de voir resurgir les anciennes querelles foncières peut constituer un réel blocage dans l'exploitation de la vallée (SALL & DIOP 1991). A Kawara comme à Moadougou, l'accès à la terre a été fondamentalement modifié par l'action du projet ORC. Les modifications concernant Kawara, au moment de la mise en place de l'aménagement, sont résumées dans le tableau XXXVII.

Tableau XXXVII : Accès à la terre dans le bas-fond de Kawara (VAN ETEN 1992).

	Avant aménagement	Prévu par l'aménagement	Réalisé en 1990
Attribution des parcelles	chef de terre	Comité de gestion	Encadreurs de l'ORC
Acquisition des parcelles	défrichement, demande, héritage matrilineaire	inscription sur une liste d'attente	liste d'attente, héritage, présidente UGR, encadreur
Obligations	rente foncière (1 tne de riz), 1 jour de travail par an sur les parcelles du chef de terre	cotisation au comité de gestion, suivre les directives de l'encadreur, participer aux travaux d'entretien, champs collectifs	suivre les directives de l'encadreur, participer aux travaux sur champs collectifs
Confiscation des parcelles	si les parcelles ne sont pas cultivées	si les obligations du cahier des charges ne sont pas respectées	si la parcelle n'est pas cultivée pendant quelques années, si les directives de l'encadreur ne sont pas suivies
Nombre de parcelles	plusieurs réparties dans le bas-fond	une seule	une parcelle (plusieurs illégales)

Au moment de la mise en place de l'aménagement, le projet ORC a confisqué l'ensemble des terres de bas-fonds, puis les a redistribuées en parcelles d'environ 0,2 ha, à raison d'une parcelle par exploitante. Une étude menée dans 3 plaines non aménagées dans la même région (Damana, Nerfendougou, Lomangara) indique que la superficie moyenne par exploitante varie de 0,17 à 0,25 ha (OUEDRAOGO E., 1990)

Les parcelles sont théoriquement attribuées par le Comité de Gestion selon les directives du cahier des charges régissant les droits et devoirs des exploitantes des plaines aménagées par le projet ORC. En réalité, l'attribution, par tirage au sort, a été dirigée par les encadreurs. Le seul moyen pour obtenir une parcelle après la première attribution est l'inscription sur une liste d'attente. Mis à part la taille des parcelles qui est équivalente, l'attribution des parcelles a été réalisée indépendamment de toute règle coutumière.

Traditionnellement les exploitantes disposent de plusieurs parcelles réparties dans diverses zones de la plaine : 60 % parmi elles ont 2 parcelles ou plus. Le tableau XXXVIII présente le nombre de parcelles par exploitante dans 3 plaines non aménagées de la région (Damana, Lomangara et Nerfendougou). Les chiffres sont basés sur un échantillon de 20 femmes par plaine.

Tableau XXXVIII : Pourcentages d'exploitantes ayant 1 à 6 parcelles dans les plaines non aménagées de Damana, Lomangara et Nerfendougou (OUEDRAOGO E., 1990).

Bas-fond	Nombre de parcelles					
	1	2	3	4	5	6
Damana	40	20	10	15	10	5
Lomangara	0	45	25	30	0	0
Nerfendougou	40	40	5	5	10	0

Etant donné la disparité des conditions pédologiques et hydrologiques dans le bas-fond, ce système a pour avantage de minimiser le risque pour une exploitante de voir toute sa récolte réduite à zéro à cause d'inondations prolongées, d'un fort courant lors d'une crue ou de périodes de sécheresse. L'exploitation d'une seule parcelle après aménagement peut être un handicap, notamment pour les femmes possédant une parcelle dans une zone "défavorable". Pourtant la multiplication du nombre des parcelles éloignées les unes des autres exige plus de temps pour les travaux de culture.

Pour les femmes, les obligations envers le projet ORC sont plus contraignantes qu'envers le chef de terre. La participation aux travaux d'entretien et aux réunions de vulgarisation et de formation sur le terrain, la cotisation en espèces à verser à la caisse du Comité de Gestion et l'utilisation des intrants vulgarisés par le projet sont autant d'obligations jugées comme des contraintes. De plus, la redistribution aléatoire des parcelles engendre des problèmes de voisinage qui peuvent nuire à un entretien et à une gestion efficace de l'eau dans l'aménagement hydro-agricole.

L'introduction d'un aménagement de bas-fond, ou même une simple redéfinition ou modification de l'utilisation d'un bas-fond par un projet de développement (sous la forme d'une intensification), peut rencontrer une résistance liée aux problèmes fonciers (problèmes d'investissements, d'usufruit et de droit de propriété), même si ces actions de développement sont menées dans un souci d'égalitarisme face à l'accès à la terre. D'un autre côté, le respect du régime foncier traditionnel maintient l'inégalité existante.

L'EXPLOITATION DES AMENAGEMENTS

GESTION ET ENTRETIEN DES AMENAGEMENTS : UN PROBLEME SOCIAL ?

Dans tous les cas étudiés, le manque de main-d'oeuvre est le facteur limitant pour réaliser certaines opérations liées aux aménagements. La main-d'oeuvre familiale est réduite à cause des flux migratoires mais également parce que la superficie totale cultivable a nécessairement augmenté pour obtenir la même production totale (à cause de la diminution de la fertilité du sol et de la baisse de la pluviométrie). Ce manque de main-d'oeuvre ne permet pas aux paysans de la Casamance, par exemple, de construire des digues plus solides dans les aménagements secondaires.

L'entretien des aménagements de la Comoé, la construction de l'aménagement de Bidi et l'entretien des billons dans la Casamance modifient la répartition de la main-d'oeuvre entre les diverses activités du système de production, surtout pendant la campagne culturale, lorsque les paysans sont surchargés. Pour cela, la période la plus favorable pour réaliser certaines activités liées à l'aménagement (mise en place, entretien) est la morte saison agricole (saison sèche). Cependant la période qui suit directement la récolte est chargée en activités: construction des maisons, visites familiales, maraichage, funérailles, mariages, etc.

Projet Casamance

En Casamance, pour les travaux d'entretien et d'aménagement, les paysans préfèrent: le début de l'hivernage (44 %), directement après la récolte du riz (44 %) et à la submersion des parcelles pour entretenir les billons (11 %). Du point de vue des paysans, certaines initiatives pourraient aider à atténuer l'impact des travaux d'aménagement:

- le paiement d'une main-d'oeuvre spécialisée pour la confection des billons ;
- la diminution des superficies cultivées sur le plateau si on arrive à lever la contrainte de salinité dans le bas-fond ;
- l'utilisation concertée du système d'entraide réciproque entre les exploitants.

Si des moyens, pour économiser le travail sur d'autres activités (ménagères par exemple) ou pour alléger le travail dans la rizière, sont introduits, il est plus probable que les paysans consacreront plus de temps au bas-fond. Ces moyens peuvent être des semoirs pour les terres hautes, des charrues pour le labour ou des forages proches des concessions.

En Casamance, après la construction du barrage anti-sel, un Comité de Gestion de l'Aménagement a été formé mais, étant donné que la riziculture n'a pas pu reprendre sur les terres salées, il a perdu sa raison d'être. Par la suite, deux personnes ont été recrutées, par les chefs de villages et le chercheur en socio-économie, pour suivre la gestion du barrage et être formées aux techniques de gestion de l'aménagement.

Projet Comoé

Dans la Comoé, les exploitantes sont organisées en Groupements Rizicoles (GR), 1 pour la plaine de Moadougou et 2 pour la (plus vaste) plaine de Kawara. Les GR sont subdivisés en Unités de Groupement Rizicole (UGR) composées de 15 à 30 personnes. Un Comité de Gestion par plaine, composé des responsables des UGR, devrait être mis en place pour superviser et coordonner les activités d'autogestion de l'aménagement à l'échelle de l'ensemble de la plaine. Afin d'encadrer les UGR, transmettre l'information concernant l'utilisation des nouvelles techniques agricoles et veiller à l'application du cahier des charges (définissant les droits et devoirs des exploitantes et du projet), le projet ORC utilise les services d'encadreurs et d'animatrices dans chaque plaine aménagée (OUEDRAOGO E., 1990). Ceux-ci sont chargés de l'organisation des réunions de vulgarisation et d'animation et de la transmission de l'information pratique sur des champs-école. Les UGR servent également d'intermédiaires à l'obtention des crédits pour les intrants (semences de variétés améliorées, engrais et produits phyto-sanitaires).

En réalité, les groupements sont confrontés à plusieurs contraintes:

- Le taux de participation des exploitantes aux réunions de vulgarisation/sensibilisation est faible: 30 à 40% à Moadougou et 10% à Kawara. La participation aux formations dans les champs "école" est plus élevée car les paysannes se sentent moralement obligées d'y assister pour prétendre à leur part de récolte : participation de 40 à 80% selon le type de formation (NUGTEREN, 1990).
- Il n'existe pas de réelle relation de confiance entre l'encadrement et les paysannes. Celle-ci est pourtant indispensable à l'apprentissage des nouvelles techniques. Les paysannes craignent les encadreurs qui s'octroient la prérogative de leur retirer des parcelles quand elles ne suivent pas leurs indications. De plus, le niveau des connaissances techniques des encadreurs est parfois insuffisant et l'information fournie aux paysannes n'est pas toujours applicable (RAN, 1990).
- Le Comité de Gestion n'a pas toujours été installé et les tâches des groupements ne sont pas exécutées ou restent une affaire de petits groupes ou d'individus. Les activités des UGR diffèrent par groupement et dépendent fortement de la motivation des présidentes.
- Le nombre d'encadreurs et d'animatrices est insuffisant: 2 encadreurs pour 1142 exploitantes à Kawara et 2 pour 337 exploitantes à Moadougou (FOKKER ET WILLE, 1988). Le nombre d'exploitantes par UGR peut atteindre 97 au lieu de 15 à 30 prévu (NUGTEREN, 1990). Dans de telles conditions, le transfert technologique et l'animation sociale sont plus qu'aléatoires.

Projet Mali-Sud

A Kambo, un agent du projet est le responsable local de la gestion pour l'aménagement. Cependant, toutes les décisions concernant cette gestion sont prises en collaboration avec la structure traditionnelle du village qui assure le rôle de "comité de gestion informel" (surtout pour des problèmes de gestion des batardeaux et petits travaux d'entretien).

L'INTENSIFICATION DES CULTURES DE BAS-FONDS : UN PROBLEME ECONOMIQUE ?

Nature des revenus et dépenses des ménages

La multiplicité des activités économiques des ménages et la quantification difficile des revenus et dépenses relatives aux opérations économiques rendent complexe le bilan monétaire d'un ménage. Cependant, les exemples des différents projets pilotes fournissent des informations sur les aspects financiers de l'exploitation des bas-fonds et sur l'effet d'un aménagement hydro-agricole.

Dans tous les cas étudiés, la vente des produits agricoles est secondaire et surtout une activité féminine. Pour les hommes, le commerce, l'élevage des petits ruminants et l'émigration de la main-d'oeuvre fournissent la plus grande partie du revenu monétaire. Le tableau XXXIX présente d'une manière qualitative les types de revenus et dépenses pour un ménage (Comoé, Yatenga).

**Tableau XXXIX : Revenus et dépenses au niveau d'un ménage (Comoé et Yatenga).
SERPANTIE & al, 1985; VOLKERT, WIT, 1991**

REVENUS	1	2	DEPENSES	1	2
petit bétail	f/h	f/h	céréales	f/h	h
gros bétail	h	h	frais de scolarité	f/h	h
produits de la cueillette	f	f	condiments, sauce	f	f
produits agricoles transformés	f	f	médicaments	f/h	f/h
produits agricoles non-transformés	f/h	f/h	main-d'oeuvre	f/h	h
produits artisanaux	f/h	f/h	intrants agriculture	f/h	h
bois de chauffe	f	f	petit bétail	f/h	f/h
main-d'oeuvre	f/h	h	transport	h	h
dons du mari	f	f	construction logement	h	h
émigration	f/h	h	bière de sorgho	h	--
pêche	h	--	vêtements	f/h	f/h
chasse	h	--			
jardin	h	f/h			
commerce	h	h			

f = plutôt réservé aux femmes

1 Comoé 2 Yatenga

h = plutôt réservé aux hommes

La part du riz de bas-fond commercialisée est variable. A Bidi, la production de riz des femmes est largement destinée à la vente. Les hommes fournissent le riz des jours de fête, seules occasions de consommer du riz. L'aménagement du bas-fond et la distribution des parcelles aux femmes ont amélioré la situation financière des exploitantes. Actuellement leurs revenus atteignent 10.000 FCFA pour 4 ares de riz local, si le riz est vendu pendant la période de fête. Dans la Comoé, 58 % des exploitantes vendent une partie de leur récolte, en moyenne 13 %, en petites quantités et en plusieurs fois. Le prix de vente du riz varie pendant l'année sur les lieux de production. Il est bas après la récolte en décembre et augmente les jours de fête et avant la nouvelle récolte. A Douna et Konadougou, celui-ci atteignait 190 FCFA/kg en août 1990 et chutait à 155 FCFA/kg à partir d'avril après les récoltes des grands périmètres irrigués. Le prix du riz est généralement stabilisé sur les principaux marchés des grandes villes (175 FCFA/kg à Ouagadougou).

Les investissements liés à l'intensification

Les investissements préconisés par le projet ORC dans la Comoé pour obtenir le niveau d'intensification désiré sont, pour une parcelle de 0,2 ha :

- les frais d'engrais (NPK et urée) s'élèvent respectivement à 4400 FCFA et 1200 FCFA (40 kg/ 0,2 ha et 12 kg/ 0,2 ha) ;
- les semences de variétés améliorées : 1650 FCFA (13 kg/ 0,2 ha);
- la contribution annuelle au Comité de Gestion de 1200 FCFA par exploitante.

Le coût total par campagne culturale est de 8450 FCFA pour 0,2 ha, somme très importante par rapport au faible niveau de monétarisation des ménages. Il est intéressant de noter que, dans la réalité, la somme totale moyenne des dépenses réelles en intrants ne dépasse pas 1460 FCFA pour une parcelle de 0,2 ha (1280 FCFA pour l'engrais, 180 FCFA pour les semences de variétés améliorées) soit 17 % des dépenses jugées nécessaires par le projet ORC pour l'intensification de la riziculture. Environ 13 % de la production de riz est vendue, soit, pour une parcelle cultivée de 0,2ha et un rendement moyen de 2,5 t/ha, dans les conditions actuelles d'exploitation, une quantité vendue égale à 65 kg de riz et un revenu annuel de 10075 FCFA (pour un prix de vente de 155 FCFA/kg). Le taux d'investissement financier est donc de 26% avec la contribution annuelle au comité de gestion.

Pour atteindre l'objectif de 3 t/ha, fixé par le projet ORC, l'exploitante devrait investir un supplément de 5790 FCFA pour 0,2 ha de riz. Son gain réel supplémentaire, sans tenir compte des risques encourus, seraient de 15550 FCFA, soit un taux d'investissement de 37%, taux jugé très peu attractif par les exploitantes.

Le nombre de femmes cultivant une variété améliorée n'est pas encore très élevé. Le tableau XL présente le pourcentage de femmes qui cultivent le riz amélioré dans leurs parcelles.

Tableau XL : Pourcentage de femmes cultivant une variété améliorée de riz dans leurs parcelles (FOKKER et WILLE, 1988).

Superficie par variété	Moadougou	Kawara
100% traditionnelle	32	38
> 50% traditionnelle	9	38
> 50% améliorée	25	16
100% améliorée	24	8

Pourtant, le projet ORC offre la possibilité de crédits pour l'achat d'intrants: la femme qui veut en bénéficier doit passer par l'intermédiaire du groupement rizicole auquel elle appartient. Elle s'acquitte de sa dette avec un taux d'intérêt de 10 % après la campagne culturale. Si elle n'y parvient pas, les membres du groupement se portent garants pour le remboursement. Ce système rencontre un faible écho car les exploitantes ont peur de ne pas pouvoir rembourser et d'avoir ainsi des problèmes avec les autres membres du groupement.

Le cas de la Comoé

A l'heure actuelle, la faiblesse des investissements humains et financiers dans la riziculture ne permet pas au projet ORC d'atteindre les objectifs fixés. Ceci peut être expliqué par le grand nombre de risques et contraintes auxquels les exploitantes sont confrontés. Dans la Comoé une étude a révélé la complexité des rapports entre les risques et contraintes d'un côté et les facteurs déterminant le succès des mesures d'intensification suite à l'aménagement de l'autre côté. Dans la matrice suivante on signale, d'une façon indicative, l'influence des risques et contraintes de natures différentes sur l'application des mesures d'intensification.

Tableau XLI : Relation entre l'application des mesures d'intensification et les causes des risques et contraintes (VAN DRIEL, RAN et FRAVAL, 1991).

Nature de risques et contraintes	Maîtrise de l'eau	Techniques agricoles	Organisation
Performance des aménagements	*	*	
Apport du sable	*		
Position financière		*	
Emploi de temps chargé	*	*	*
Relation entre exploitantes	*		*
Préférences variétés		*	
Relation exploitantes / encadreurs	*	*	*
Nombre d'encadreurs	*	*	*
Structure d'entretien	*		

Les mesures d'intensification envisagées par le projet ORC sont les suivantes:

- la maîtrise partielle de l'eau par la mise en place d'aménagements hydro-agricoles;
- l'introduction de nouvelles techniques agricoles (utilisation de l'engrais, introduction de variétés améliorées et de cultures maraîchères, repiquage en ligne);
- l'organisation des productrices pour réaliser l'autogestion des aménagements, pour faciliter le transfert des nouvelles techniques agricoles et installer une structure d'accès au crédit.

La performance non satisfaisante de l'aménagement

Dans les bas-fond de Kawara et de Moadougou, une maîtrise totale de l'eau n'est pas envisageable en l'état actuel des aménagements. L'irrégularité inter-annuelle des pluies entraîne une grande incertitude en ce qui concerne la quantité d'eau à attendre dans les parcelles. Le risque de sécheresse ou d'inondation est toujours considérable pour un bon nombre d'exploitantes. Le risque encouru est augmenté car les exploitantes ne possèdent plus qu'une seule parcelle au lieu de plusieurs. De ce fait les exploitantes minimisent les risques en diminuant les investissements dans leur parcelle. Leur investissement dans les rizières, en main d'œuvre, en achat d'intrants et de semences améliorées, n'est pas suffisant et ne permet pas d'augmenter les rendements.

L'apport de sable du bassin versant

A cause des processus d'érosion, le sable en provenance du bassin versant se sédimente dans la plaine et dans le collecteur central. La conséquence en est l'obstruction du collecteur et des écarts topographiques dans les parcelles de telle sorte que la gestion de l'eau à l'intérieur des parcelles devient plus difficile.

La position financière des femmes et le degré de l'auto-consommation du riz

La quantité d'argent disponible pour investir dans la riziculture dépend des revenus des exploitantes, de leurs obligations familiales et de leurs propres besoins. Différentes enquêtes montrent que l'obstacle le plus important pour l'usage des intrants est un manque de moyens financiers. Les investissements pour la riziculture ne constituent pas une priorité dans l'ordre des dépenses courantes. Les femmes ne disposent que de petites quantités d'argent à la fois, dépensées au jour le jour en fonction des besoins immédiats. Une augmentation de la production ne profite pas tellement aux femmes mais d'avantage aux hommes: le riz est auto-consommé avant les productions des cultures des terre hautes (mil, sorgho, maïs), et les surplus en riz sont rares.

Les risques naturels sont tels (engrais emportés par une crue, période de sécheresse nuisible aux cultures, asphyxie des variétés améliorées à courtes tiges en cas d'inondation prolongée) que les exploitantes n'ont pas la garantie suffisante de rentabiliser leurs investissements.

L'emploi du temps chargé des femmes

Les femmes sont chargées de différentes tâches dont l'une d'entre elles est la riziculture. L'emploi du temps obéit à un régime de priorités où les réunions de vulgarisation, l'entretien des aménagements, le respect du calendrier culturel passent après les travaux ménagers, l'éducation des enfants et le bien-être familial. Les femmes préfèrent, par exemple, utiliser des variétés à cycles végétatifs différents pour étaler dans le temps les travaux de récolte, plutôt que des variétés à meilleur rendement.

Les relations entre les exploitantes

Les exploitantes de même parenté sont moralement obligées de s'aider dans la plaine, de partager l'eau, de s'informer des problèmes et des réunions. L'attribution, plus ou moins arbitraire des parcelles après l'aménagement, fait que les femmes d'une même concession (parentes) ne sont pas regroupées dans la même partie de la plaine; ce qui entraîne un refus de collaborer avec les exploitantes voisines pour l'entretien de l'aménagement et la gestion de l'eau.

La préférence pour certaines variétés

Les paysannes ne portent pas seulement leur choix sur le rendement potentiel d'une variété donnée. Elles utilisent d'autres critères: le temps de cuisson du riz, la possibilité de conserver les grains, la durée du cycle de la croissance du riz, la résistance aux maladies et aux attaques des insectes, le goût de la graine et la taille de la tige. Pour ces raisons, les variétés améliorées, plus exigeantes en intrants et en temps de travail, ne sont pas systématiquement préférées.

La relation entre les exploitantes et l'encadrement du projet

Souvent il n'existe pas, entre les exploitantes et l'encadreur, la relation de confiance nécessaire à la transmission des nouvelles techniques. Parfois, les encadreurs abusent de leur pouvoir de retrait des parcelles pour forcer les exploitantes à exécuter certaines tâches. Les paysannes n'assistent plus aux réunions; elles n'informent pas l'encadrement des dégâts survenus dans l'aménagement et préfèrent régler entre elles les problèmes d'héritage et de distribution des terres.

L'absence d'une structure d'entretien

L'autogestion des plaines devrait être assurée par les responsables des Groupements Rizicoles, et l'entretien garanti par la mise en place d'une structure spéciale. Cette structure, inexistante, devrait posséder des techniciens d'exécution et les matériaux nécessaires aux interventions sur les aménagements. Elle devrait être agréée par les exploitantes.

Le nombre d'encadreurs et d'animatrices par plaine est insuffisant

Pour la transmission de nouvelles pratiques de culture, un suivi régulier et une assistance intensive sont essentiels. L'encadrement actuel est nettement insuffisant. Chez les paysannes de la Comoé, le principe d'intensification n'est pas admis. Elles continuent pour la plupart à augmenter leurs superficies en cultivant le riz dans les parties non aménagées du bas-fond ou dans des parcelles marginales : en bas de pente, dans les dépressions inondées. Ce constat est confirmé par un nombre assez élevé de femmes à Kawara et à Moadougou qui possèdent une deuxième parcelle (Tableau XLII).

Tableau XLII : Pourcentage de femmes possédant une deuxième parcelle dans deux bas-fonds de la Comoé (FOKKER & WILLE, 1988).

Type de deuxième parcelle	Moadougou	Kawara
Aménagée	23	34
Non aménagée	9	2

Le nombre d'exploitantes possédant une deuxième parcelle, est probablement plus élevé que ne le révèle l'enquête vu l'acuité des problèmes fonciers dans ces plaines récemment aménagées.

Les niveaux d'intensification fixés par les projets de développement ne seront jamais atteints si on ne tient pas compte de la diversité et de l'importance des risques naturels et des contraintes sociales liés à la riziculture.

Conditions sociales et économiques du développement et de l'intensification des cultures des bas-fonds

Les caractéristiques des bas-fonds leur confèrent une place et un rôle à part dans le système de production des villages avoisinants, même si la superficie des bas-fonds n'est pas très vaste par rapport à celle des terres hautes. Ces dernières années, la chute de la pluviométrie et la dégradation des terres de versants dans tous les pays sahéliens ont accru l'importance des bas-fonds.

Les caractéristiques hydrologiques et pédologiques distinguent clairement les terres de bas-fonds des terres hautes (ou terres de plateau). Ces deux terroirs ont toujours offert la possibilité de diversifier les cultures (riz, sorgho, légumes), les activités (agriculture, élevage, culture de contre-saison) et donc de minimiser le risque de pénurie alimentaire en cas de sécheresse. L'évolution de la mise en valeur agricole des bas-fonds dans les régions étudiées montre que les systèmes de production sont des systèmes dynamiques qui s'adaptent assez rapidement aux changements climatiques, techniques et économiques.

Afin de lever les contraintes hydrologiques à la mise en valeur agricole des bas-fonds, augmenter et stabiliser leur production, un certain nombre d'aménagements ont été mis en place par des projets de développement. Plusieurs facteurs, sociaux et économiques, déterminent leur succès au sein des systèmes de production:

- ➡ La participation de la population à un stade précoce (initiative, préparation) et une étroite collaboration avec les agents des projets de développement sont essentiels pour le choix d'un aménagement adapté aux futurs exploitants. La création de structures paysannes permanentes est nécessaire dans les différentes phases, de la réalisation à la gestion de l'aménagement. L'organisation du travail doit être aussi proche que possible des formes de collaboration déjà existantes.
- ➡ L'analyse du rôle du bas-fond dans l'ensemble du système de production est primordiale. Lorsque le bas-fond occupe une place marginale dans le système de production, les risques de perte des récoltes sont acceptés. L'intensification des cultures doit se faire avec une introduction progressive des investissements qui doivent rester compatibles avec les moyens financiers des ménages. Lorsque, suite à une intensification des cultures, le bas-fond occupe une place importante dans le système de production, la sécurisation des productions doit être assurée par une pérennisation de l'aménagement et une stabilité d'accès aux intrants et aux crédits.

- ➡ Le régime foncier a toujours été un point de dissension entre les paysans en raison des nombreux emprunts de terre qui provoquent des confusions dans le droit de propriété. Les parcelles empruntées sont difficiles à aménager en raison des problèmes d'investissement et d'usufruit. Une redistribution des parcelles est souvent nécessaire après l'aménagement d'un bas-fond. Cette redistribution doit tenir compte des propriétés et de l'usage des terres avant l'aménagement.
- ➡ Dans toutes les régions étudiées, le manque de main-d'oeuvre est une contrainte majeure pour réaliser les travaux qui accompagnent un aménagement (construction, gestion et entretien).
- ➡ Souvent la période d'exécution des activités agricoles dans un bas-fond correspond à celles des cultures principales sur les terres hautes. Cette concurrence est désavantageuse pour le bas-fond. Une économie de temps dans les travaux agricoles sur les terres hautes et dans les occupations non-agricoles peut stimuler une concentration des activités dans le bas-fond.
- ➡ Une augmentation de la production de riz n'entraîne pas systématiquement une amélioration financière des exploitants car la plus grande partie de la production est destinée à l'auto-consommation. Dans le cas de rendements plus élevés, la consommation du riz augmente de sorte que la vente des autres céréales augmente également. Mais les investissements financiers (achats d'intrants, de semences, de produits phytosanitaires) indispensables à l'intensification de la riziculture dans le bas-fond constituent une contrainte économique importante. Sauf à Bidi, où la récolte du riz des femmes est largement vendue et les investissements minimaux, une augmentation des rendements n'améliore pas automatiquement la situation financière du ménage.
- ➡ La riziculture n'est pas toujours la seule spéculation sur laquelle il soit possible de compter pour la valorisation d'un aménagement de bas-fond. On a vu l'importance des possibilités de recharge de la nappe aquifère dans le Yatenga, des cultures maraîchères dans le Siné-Saloum, des cultures de contre-saison dans le sud du Mali et du développement de l'arboriculture à Kambo.
- ➡ Les aménagements de bas-fonds sont souvent associés à l'amélioration des infrastructures régionales (routes, équipements sociaux...).

L'introduction d'un aménagement est une modification importante dans un système de production traditionnel. L'aménagement influence le régime foncier, l'organisation des exploitants, le rôle du bas-fond dans le système de production et implique des nouvelles techniques agricoles. Ces facteurs sociaux et économiques influencent, en retour, le fonctionnement de l'aménagement. L'analyse des processus interactifs entre l'aménagement et l'organisation sociale et économique est primordiale avant tout investissement humain et financier. Elle intéresse non seulement les exploitants mais aussi les projets de développement.

Troisième partie

**La mise en valeur agricole
des bas-fonds
en Afrique de l'Ouest**

La mise en valeur agricole traditionnelle : fruit d'une longue expérience dans la gestion des risques

LES CULTURES DANS LES BAS-FONDS

L'étude de la mise en valeur paysanne des bas-fonds a eu pour objectif de comprendre les caractéristiques et le fonctionnement des systèmes de culture actuellement pratiqués afin d'identifier les difficultés rencontrées par les agriculteurs et les solutions susceptibles de les lever.

Elle nécessite la prise en compte:

- De l'évolution des systèmes de culture de bas-fond en fonction des conditions climatiques.
- Des caractéristiques générales du système de production et de l'importance relative du bas-fond pour comprendre les priorités et les stratégies paysannes.
- Des risques hydrauliques liés à la mise en valeur des bas-fonds sans aménagement qui expliquent largement les pratiques et les contraintes culturelles.
- De l'évolution récente de la finalité de la mise en valeur des bas-fonds face aux évolutions des systèmes de production.

SUPERFICIES

Le système de culture de bas-fond est, en général, un système mineur du système d'exploitation: Le tableau XLIII illustre cette situation dans les différentes zones d'intervention du projet. La mise en valeur agricole des bas-fonds est essentiellement féminine. Les exploitants donnent, dans leur calendrier de travail, systématiquement, la priorité aux cultures pluviales strictes.

Tableau XLIII : Importance du bas-fond dans les systèmes traditionnels d'exploitation.

	Zones écologiques			
	Guinéenne	Soudanienne	Soudano-sahélienne	Sahélienne
Superficies en %				
Cultivées sur le terroir	15	66	83	34
Bas-fonds dans le terroir	6	2.5	3	17
Du terroir, cultivées dans les bas-fonds	1.7	2.0	0.8	4.1
Culture de subsistance				
Type	mil sorgho	mil-sorgho maïs	mil	mil
Situation	pluvial	pluvial	pluvial	pluvial
Culture de rente				
Type	arachide	coton	arachide	---
% Surface cultivée	69	33	40 à 50	---
Situation	pluvial	pluvial	pluvial	---

TYPES DE CULTURES

En fonction des zones écologiques, le système de culture de bas-fond évolue et passe d'un système de culture de type agro-pastoral, en zone sahélienne à un système uniquement rizicole en zone guinéenne. L'apparition de surfaces rizicoles significatives correspond à la zone soudanienne (isohyète 1000 mm) où l'écoulement de base régularise les apports. Le tableau XLIV donne la répartition des cultures de bas-fond dans les différentes zones climatiques.

En zone soudanienne, la part prise par le maraîchage (principalement patate douce) et le maïs précoce dépend du type de bas-fond, de la présence de bourrelets de berge et de l'extension des zones où la nappe reste à moins de 1.50 m de la surface du sol en saison sèche.

En contre-saison l'utilisation des bas-fonds est avant tout pastorale (abreuvement des animaux au niveau des mares et puits implantés en bordure du bas-fond, utilisation par le bétail des résidus de culture et de jachère). Cette utilisation est néanmoins remise en cause par le développement:

- du maraîchage (jardins en zone sahélienne et soudano-sahélienne), qui prend une grande importance en zone soudanienne;
- des cultures fruitières dans les bas-fonds: manguiers, goyaviers dans la partie centrale en zone sahélienne; manguiers, agrumes, bananiers en zone soudanienne et palmiers en zone guinéenne en marge du bas-fond.

**Tableau XLIV: Type de mise en valeur des bas-fonds
suivant les zones climatiques.**

Zones écologiques	Guinéenne	Soudanienne		Soudano-sahélienne	Sahélienne
Sites	DJIGUINOUM	KAMBO	PENIASSO	KEUR SAMBA	BIDI
% bas-fond mis en culture/ST	40	80	94	36	50
% sorgho/SC	---	---	----	-----	60
% maïs/SC	---	---	9	31	---
% mil/SC	---	---	----	35	20
% riz/SC	---	96	48	32	2
% arboriculture/ST	---	2	4.5	---	14
% patate douce/PT	---	---	26	---	---
% jachères/ST	60*	20	6	63	50
% utilisé en contre-saison/ST	---	1	45	1	1

PT: surface du bas-fond cultivée en pomme de terre

ST: surface totale du bas-fond (zone inondable ou soumise à l'influence de la nappe)

SC: surface du bas-fond mise en culture ou en arboriculture durant la saison des pluies

* : terres stériles

Les agriculteurs raisonnent l'implantation de ces différentes cultures dans le bas-fond en fonction de la situation topographique des parcelles et donc des risques liés aux crues; cette localisation correspond bien souvent à des unités morpho-pédologiques différentes.

LES PRATIQUES CULTURALES TRADITIONNELLES

Plus les écoulements dans les bas-fonds sont réguliers et l'alimentation en eau des cultures sécurisée, plus la technicité des paysans est développée.

EN ZONE SOUDANO - SAHELIENNE:

RISQUES IMPORTANTS, PRATIQUES MINIMALES

Le sorgho, principale culture de bas-fond, est cultivé dans les zones topographiquement moyennes à l'exclusion des resserrements du lit mineur et des plaines d'épandage. La culture est semée sans travail du sol, en poquets, sans fertilisation après la 1^{re} crue (figure 45).

Ce semis précoce permet à la culture de se développer avant les adventices mais nécessite un sarclage moins d'un mois après le semis. Ce travail est difficile en bas-fond (terre lourde, enherbement dense, sol boueux en conditions humides, dur en sec et plantules fragilisées par les crues). Le temps de travail que peut consacrer l'agriculteur au sarclage du sorgho est limité par la nécessité d'intervenir dans les champs de mil dès que les adventices s'y développent.

Cette compétition Mil-Sorgho explique que l'agriculteur ne met pas en culture de grandes superficies de sorgho et que souvent l'un des 2 sarclages nécessaires est négligé. Aucune fertilisation n'est pratiquée et les variétés sont photo-périodiques. Les rendements varient suivant la pluviométrie:

Année humide: 0.8 à 1.1t/ha,
Année moyenne: 0.5 à 0.8t/ha,
année sèche: moins de 0.5t/ha.

Le riz est semé dans les zones topographiquement basses après la fin de la mise en place des cultures de mil (figure 45). Le sol est alors enherbé et nécessite un travail à la daba (ustensile agricole ressemblant à une large pioche). Le semis est effectué en poquets (10 à 30 poquets/m²) ce qui facilite les désherbages ou sarclages nécessaires à l'entretien de la culture. Les parcelles ne sont pas planées tout au plus certaines sont endiguées. Il n'y a généralement aucune fertilisation. La récolte est progressive du 1^{er} au 15 octobre afin de soustraire les panicules mûrs aux ravageurs ou à l'égrenage. Les rendements dépendent de la régularité de la saison des pluies et de la date du semis qui doit être effectué avant le 10 juillet. Le tableau XLV illustre les rendements obtenus à Bidi, ces six dernières années (SERPANTIE, 1992).

Tableau XLV : Rendements en riz de 1986 à 1991 (Bidi)

Année	1986	1987	1988	1989	1990	1991
Rendement (T/ha)	1.6	1	<0.1	<0.1	<0.1	1.7 à 2

Une riziculture encore plus extensive est pratiquée essentiellement par les hommes, sur les plaines d'épandage où les rendements obtenus dépassent rarement 0.5 t/ha.

Les variétés de riz utilisées sont de cycle court, de 90 à 100 jours (mouf pelga et kienda).

Les pratiques culturales sont réduites au minimum, mais l'importance des fluctuations inter-annuelles des rendements explique largement cette stratégie des paysans. Les temps des travaux consacrés à la riziculture sont néanmoins importants et expliquent la préférence donnée au sorgho (tableau XLVI).

Figure 45 : Distribution des cultures suivant la topographie dans les bas-fonds-sahéliens (exemple du Yatenga).

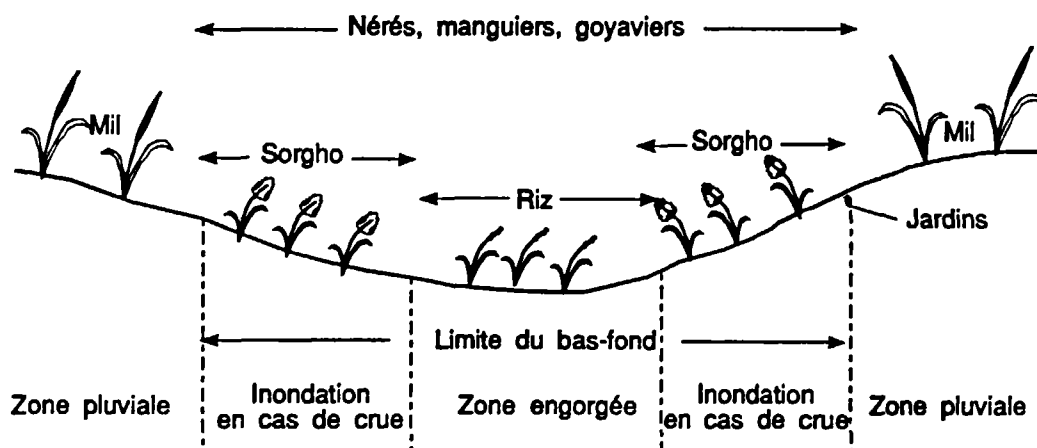
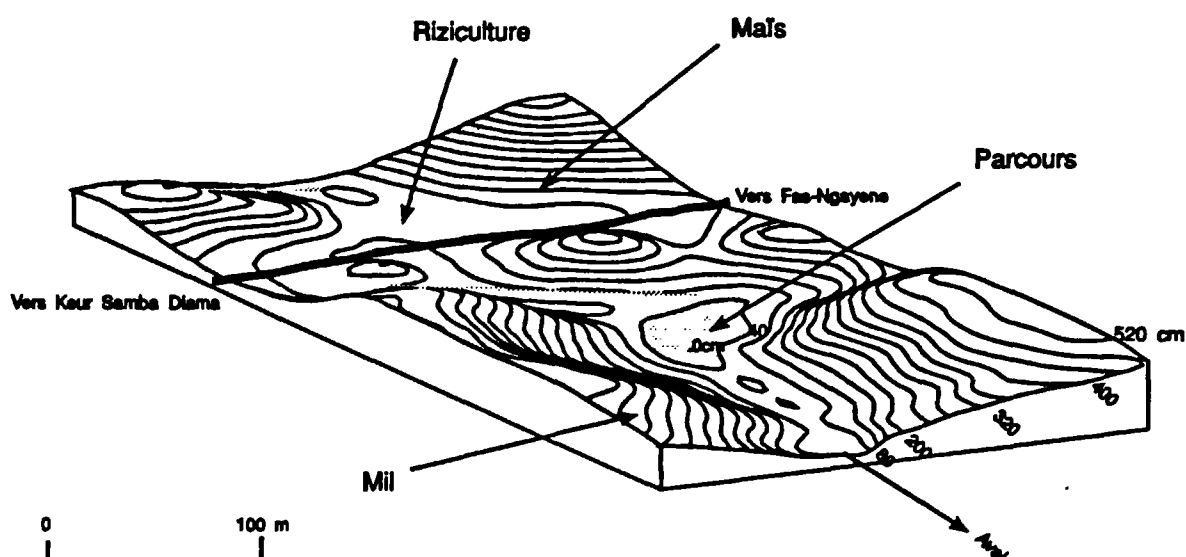


Tableau XLVI : Temps des travaux pour une parcelle de 0.25 ha en Hommes.jours (Bidi)

	Riz	Sorgho
Préparation et semis	15	3
Entretien et sarclage	37	15
Récolte	20	9
TOTAL	72	27

Au Siné-Saloum, les pratiques de mise en valeur du bas-fond sont à peu près identiques à celles de la région de Bidi, si ce n'est que la riziculture est pratiquée de façon encore plus extensive (semis direct) et que le sorgho est remplacé par le maïs sur la frange du bas-fond très rarement inondée (figure 46). Un colluvionnement important hypothèque les chances d'installer un système rizicole durable, d'autant plus que les quelques crues annuelles sont violentes et brèves, avec une forte capacité de déracinement des cultures (PEREZ & al, 1991).

Figure 46 : Distribution des cultures suivant la topographie dans le bas-fond de Keur Samba Diama (Siné-Saloum).



EN ZONE SOUDANIENNE :

UNE MAITRISE PARTIELLE DES RISQUES

Le riz et la patate douce sont les principales cultures pratiquées dans les bas-fonds. L'arboriculture (manguiers, bananiers) occupe les franges du bas-fond et les bourrelets de berges du lit mineur lorsque celui-ci existe (cas des bassins versants plus grands). Lorsque la proximité des nappes phréatiques permet des cultures de contre-saison, le maraîchage est pratiqué. Les figures 47 & 48 montrent les systèmes de culture d'un bas-fond soudanien de petite taille, uniquement rizicole (Kambo ou Damana), et ceux d'un bas-fond plus grand (Pentiasso).

Figure 47 : Distribution des cultures suivant la topographie dans les bas-fonds soudanais rizicoles (exemple de Kambo ou Damana).

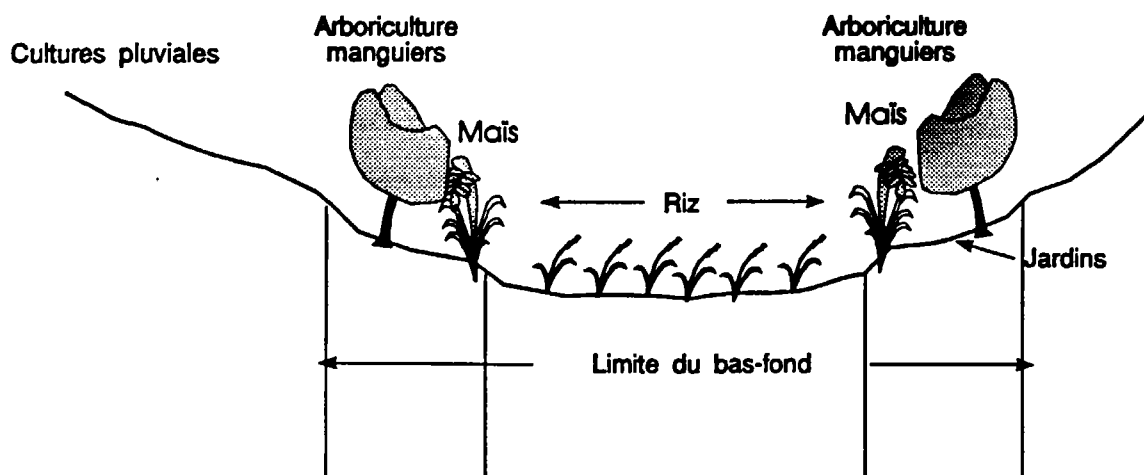
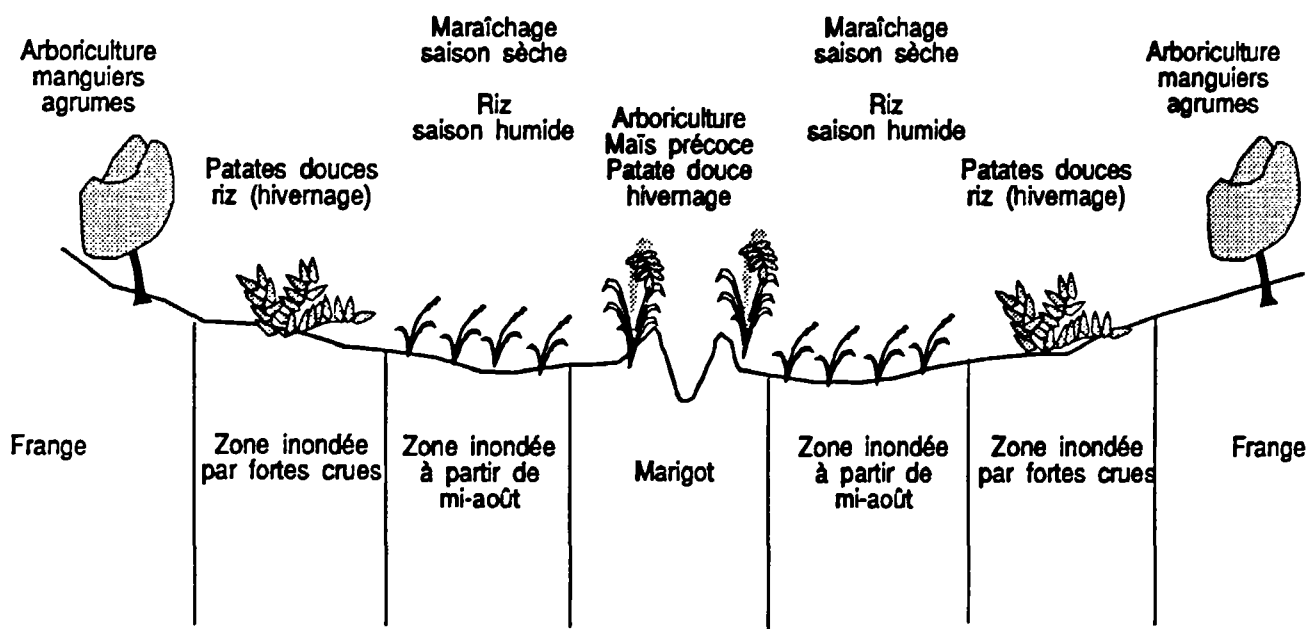


Figure 48 : Distribution des cultures suivant la topographie dans les bas-fonds soudanais à plusieurs cultures (exemple de Péniasso).

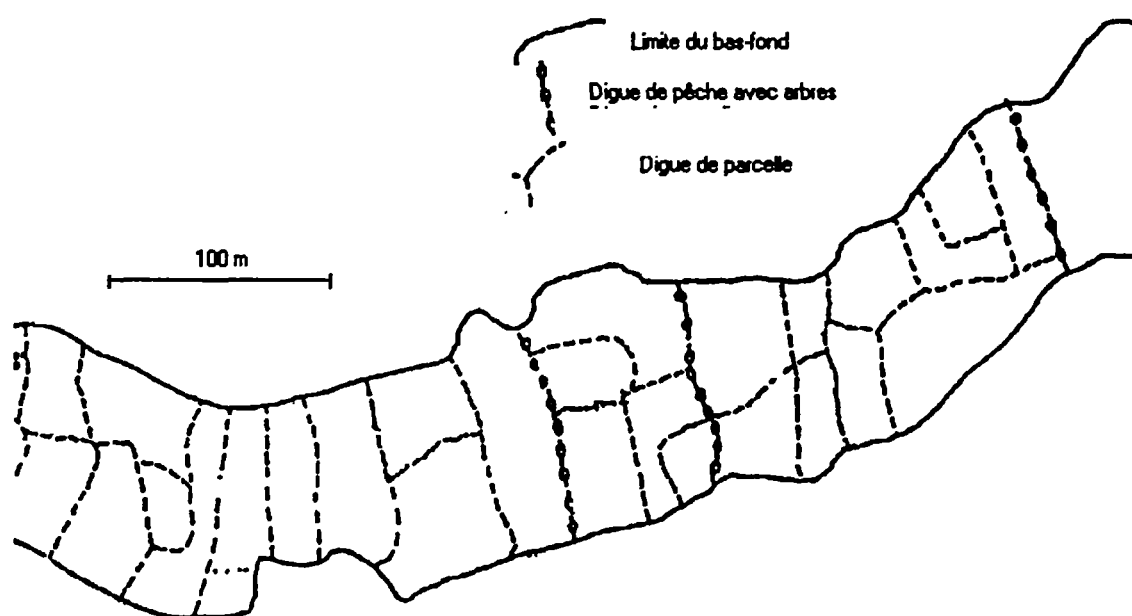


L'itinéraire technique pratiqué par les paysans dépend du type de bas-fond et plus particulièrement de la régularité des écoulements.

Sur les bas-fonds longilignes (Kambo et Damana) dont la surface du bassin versant est inférieure à 100 km², des aménagements sont souvent réalisés par les paysans. Ils se composent:

- De "digues de pêche", grosses digues barrant le bas-fond, plantées d'arbres et munies d'une ou deux passes obturées, si nécessaire, par des fascines (hauteur de la digue 0.6 à 1m).
- D'un endiguement systématique des parcelles de 3 à 10 ares par des diguettes (hauteur: 0.3 à 0.5 m) suivant plus ou moins régulièrement les courbes de niveau dans le bas-fond de Kambo ou servant simplement à délimiter les parcelles dans le bas-fond de Damana. La figure 49 illustre ce type d'aménagement (LIDON & al, 1989).
- De rigoles (profondeur: 0.1 à 0.2 m) destinées à limiter les parcelles dans la partie centrale du bas-fond de Damana.

Figure 49 : Aménagement traditionnel sur les petits bas-fonds en zone soudanienne (exemple de Kambo).



Ce type d'aménagement a pour principal intérêt, outre la délimitation des parcelles, d'écarter les crues et de permettre une meilleure répartition de l'eau sur l'ensemble de la rizière (en particulier des écoulements différés). La maîtrise de l'eau ainsi obtenue permet aux paysans de pratiquer le repiquage. Le tableau XLVII illustre le déroulement du calendrier culturel.

Tableau XLVII : Calendrier culturel du riz dans les bas-fonds de la zone soudanienne

Types de bas-fond	Intervention	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Petits bas-fonds aménagés traditionnellement	pépinières	—						
	labour	—	—					
	repiquage		—	—				
	désherbage			—	—			
	récolte						—	—
Petits bas-fonds sans aménagements	labour	—	—					
	semis	—	—					
	désherbage		—	—	—			
	récolte						—	—

Le principal intérêt de la maîtrise de l'eau dans les parcelles est de limiter l'enherbement. Le labour à la daba, quelquefois à la charrue, est effectué après la levée de la première vague d'adventices (labour mi-juin, démarrage des pluies en avril-mai).

L'effet des diguettes permet de maintenir de façon plus ou moins continue une lame d'eau sur les parcelles qui réduit le développement des mauvaises herbes après le repiquage et facilite le désherbage.

Les pépinières sont souvent implantées en bordure du bas-fond ou sur une partie de la parcelle (dans ce cas, le repiquage sera celui des plants obtenus après démarrage d'un semis direct).

Les variétés utilisées sont choisies suivant les zones avec des cycles de 130 à 150 jours. Elles sont pour la plupart photo-périodiques.

La hauteur de la lame d'eau n'étant pas maîtrisée, cela implique de repiquer des plants de taille suffisante, âgés de 40 à 60 jours, ce qui diminue notablement le tallage de la culture (3 à 5 talles/pied en moyenne) et limite les rendements à 1.6 t/ha en moyenne et 2 t/ha les bonnes années. Il n'y a généralement aucune fumure minérale; en revanche le parquage d'animaux et l'apport de "poudrette de parc" tendent à se répandre. La récolte est faite au couteau par les femmes.

Ce type de riziculture, par les soins qui lui sont apportés, par les petites superficies exploitées par famille (2 à 3 ares), se rapproche d'une activité de jardinage plutôt que rizicole classique.

Les temps des travaux nécessités par ce type de riziculture sont très élevés (tableau XLVIII) et sont très variables suivant les parcelles (FOKKER & WILLE, 1988)

**Tableau XLVIII : Temps de travaux pour une parcelle de 0.25 ha
Région de Kadiolo (24 parcelles) et enquête Comoé**

Désignation des activités	Région de Kadiolo temps de travaux en jours	Comoé temps de travaux en jours
Pépinière (entretien/arrosage)	3 à 9	1 à 3
Labour	4 à 12	8 à 12
Repiquage	11 à 21	20 à 30
Désherbage	5 à 13	2 à 7
Récolte	11 à 21	2 à 7
Total	35 à 76	35 à 59

Sur ce type de bas-fond, le riz est pratiquement la seule culture vivrière pratiquée, mis à part des petits jardins, manguiers et manioc sur les bords.

Sur les bas-fonds aux bassins versants de plus grande taille, en l'absence d'aménagement, les risques de crues sont plus importants et les paysans ont tendance à pratiquer une riziculture extensive. Dans les zones les plus basses, dès les premières pluies et après un travail du sol à la daba, des riz locaux photo-périodiques sont semés à la volée. Les semis sont échelonnés jusqu'à la mi-juillet et se terminent sur les parcelles hautes avec des variétés de cycle plus court (130 jours). Les désherbages sont difficiles en sols boueux et ils n'ont lieu qu'après l'inondation du bas-fond, à partir de la mi-août. La concurrence des adventices est importante (riz à rhizomes, cypéracées). Elle est la cause de l'abandon fréquent des parcelles les plus enherbées.

Ce désherbage tardif diminue le tallage et la densité de la culture, expliquant les faibles rendements obtenus en moyenne (600 à 700 kg/ha). Son exécution demande comparativement plus de main-d'oeuvre que le repiquage (Ref. Mali, région de Sikasso) (HUSSON, 1990):

- la durée du désherbage d'une parcelle de 0.25ha, semée directement en riz, varie de 3 à 9 jours;
- la quantité d'adventices désherbées est en moyenne de 198 kg/0.25ha avec un écart-type de 45 kg.

Les rizicultrices exploitent très souvent 3 à 6 parcelles réparties dans les différentes zones du bas-fond et elles interviennent en priorité sur celles où les conditions hydriques sont les plus favorables. La stratégie des paysans en riziculture dans ce type de bas-fond vise à minimiser les risques hydriques liés à la sécheresse ou à l'inondation. Les zones moyennes et basses du bas-fond sont réservées à la riziculture. Les zones hautes sont de plus en plus utilisées pour d'autres spéculations, en particulier pour les patates douces cultivées sur les buttes, le maïs précoce sur les terrains rarement inondés.

En contre-saison, lorsque la décrue de la nappe n'est pas trop rapide, les zones basses et moyennes de nombreux bas-fonds sont utilisées (FARATS, 1991):

- Pour la culture des pommes de terre sur planches (10x5m) irriguées à la calebasse à partir de puisards (technique possible si la profondeur de l'eau est inférieure à 1.5m).
- Pour la culture de la patate douce en décrue (alimentation par remontée capillaire de la nappe utilisée par l'enracinement puissant de la patate).
- Pour un petit maraîchage se diversifiant en aubergines, tomates, concombres...

Le tableau XLIX illustre cette mise en valeur paysanne sur le bas-fond de Peniasso (région de Sikasso). Bien que la riziculture reste la principale culture des bas-fonds en saison des pluies, l'intérêt des agriculteurs semble prioritairement se porter sur le développement des autres cultures (tubercules, maraîchage, fruits) qui leur permettent des revenus monétaires (rendements en tubercules supérieurs à 20 t/ha) et pour lesquelles ils investissent en intrants (achat de semences, fertilisation pour la pomme de terre). Mais il est à noter que cette tendance semble beaucoup plus nette au Mali qu'au Burkina Faso.

Tableau XLIX : Calendrier d'utilisation des terres de bas-fond en zone soudanienne
Nappe utilisable pour les cultures de contre saison
Peniasso, surface totale 146 ha (BLANCHET, 1992)

Cultures	Surface %	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Fév.	Mars	Av.
Riz	48												
Patate douce SH	25												
Patate douce SS	20												
Manioc	8												
Arboriculture	6												
Paturages	4.5												
d'hivernage	4												
Maïs précoce	9												
Lit du marigot	7.5												

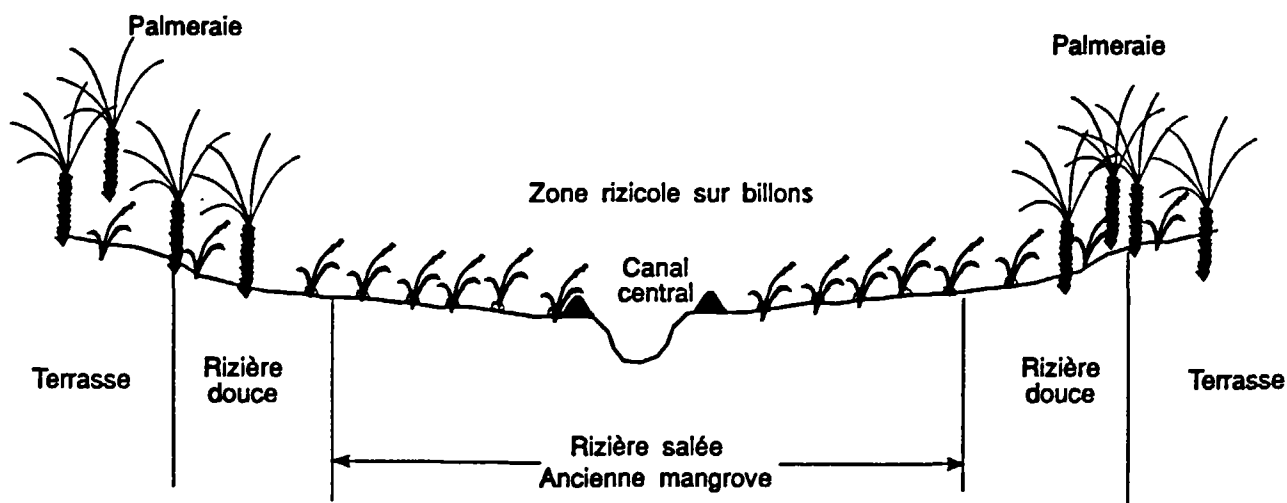
SH = Saison humide, SS = Saison sèche
surface en %

surface agricole : 135ha, surface cultivée au cours de l'année 205 ha, taux d'utilisation 152%

EN ZONE GUINEENNE: RISQUES FAIBLES, HAUTE TECHNICITE

La mise en valeur des bas-fonds dans les zones fluvio-marines est exclusivement rizicole. On y distingue deux types de riziculture, la riziculture douce de bordure de bas fond qui profite des suintements de la nappe des plateaux et la riziculture salée de mangrove (figure 50).

Figure 50 : Distribution des rizières dans un bas-fond de basse Casamance

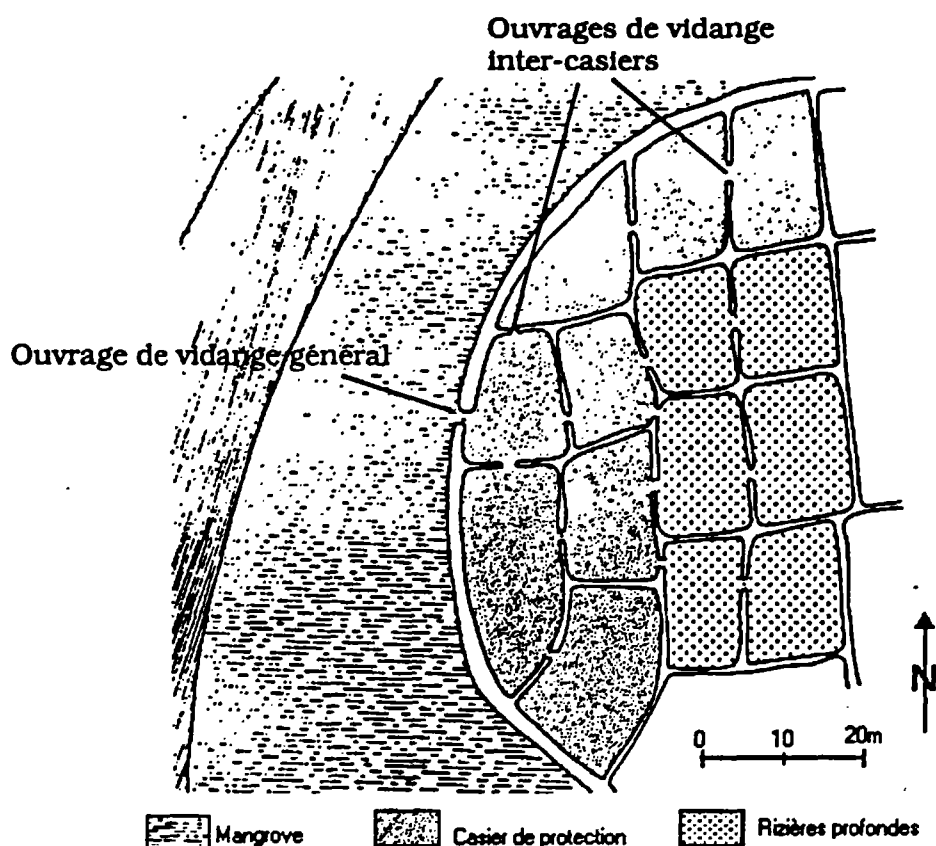


La riziculture a été développée sur des sols de mangrove salés, dans les zones où la teneur en sel de l'eau des marigots ne permet le développement du riz qu'au cours d'une partie de l'hivernage (conductivité inférieure à 3 mmhos/cm). Avant la période de sécheresse des années 1970, la période favorable à la riziculture démarrait à partir d'un cumul pluviométrique de l'ordre de 200 à 250mm et durait de 100 à 120 jours (BRUNET & al 1991).

L'objectif des pratiques culturelles traditionnelles est de renforcer, par de petits aménagements, le lessivage des sels par les eaux de pluie et de caler le cycle de culture de telle sorte que les phases végétatives du riz, les plus sensibles au sel (tallage et montaison), se trouvent coïncider avec le moment où la salinité de l'eau du marigot est minimale. Les petits aménagements traditionnels se composent (figure 51):

- d'un endiguement du casier rizicole par une digue de 0.6m de haut, munie de dalots faits traditionnellement de troncs de rônier évidés situés aux points bas des castiers;
- d'un système de drainage inter-castiers;
- d'un billonnage à l'intérieur des parcelles, réalisé à l'aide de la pelle traditionnelle des Diolas, le "Kajando", (hauteur des billons 0.4m). Dans le cas des rizières exploitées par les mandingues, la riziculture est pratiquée à plat.

Figure 51 : Aménagement des rizières profondes de la basse casamance (PELISSIER, 1966)



L'effet conjugué de la pluviométrie et des écoulements de nappe permet de dessaler le sol du billon, avant le repiquage du riz. Le tableau L illustre le calendrier culturel du riz en Casamance.

Tableau L : Calendrier culturel du riz en Casamance (BRUNET & al, 1991)

Interventions	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv
Entretien des digues	—							
Confection des billons	—							
Travail du sol		—						
Pépinière		—	—					
Travail du sol avant repiquage			—	—				
Repiquage			—	—				
Desherbage				—	—	—		
Récolte							—	—

Les variétés de riz utilisées traditionnellement ont des cycles de 150 jours et sont photopériodiques pour pallier les variations de la date de repiquage en fonction des aléas climatiques de début de campagne. La faible maîtrise de l'eau induit des repiquages avec des plants bien développés (risque d'asphyxie) et donc âgés de 40 à 60 jours.

Les pépinières, réalisées aux abords des villages, sont arrosées; le transport des plants augmente la pénibilité du travail déjà fort importante pour des rendements moyens (1.5 t/ha dans les années 1960). Le tableau LI donne les temps de travaux.

**Tableau LI : Temps de travaux pour une parcelle de 0.25 ha
région de Djiguinoum**

Désignation des activités	Temps de travaux en hommes.jours
Entretien des digues	1 à 3
Confection des billons	15 à 20
Travail du sol	15 à 20
Pépinière	2 à 5
Travail du sol avant repiquage	15 à 20
Repiquage	15 à 20
Désherbage	2 à 5
Récolte au couteau	10 à 15
Total	75 à 108

Les billons sont reconstitués après les premières pluies tandis que le riz est semé en pépinières. Chaque année, le billon est retourné sur son inter-billon, ce qui assure l'enfouissement des résidus de culture et des adventices. Le billonnage est réalisé par les hommes au kayendo (pelle Diola). Les femmes repiquent le riz au mois d'août. Le repiquage peut s'étaler jusqu'à la fin septembre en fonction de la pluviométrie. La lame d'eau d'inondation est ensuite contrôlée pour éviter l'ennoelement des plants de riz et une stagnation trop longue de l'eau provoquant des toxicités dues au fer ferreux et ferrique (PRADE 1987). Ce contrôle est réalisé en ouvrant les petits dalots ou en pratiquant des brèches dans la digue.

La récolte du riz est réalisée manuellement de décembre à janvier par les femmes. Les pailles de riz, laissées sur place, sont consommées par les animaux.

LES CONTRAINTES AU DEVELOPPEMENT DES CULTURES DE BAS-FONDS

La hiérarchisation des contraintes techniques auxquelles se heurte la mise en valeur des bas-fonds fait apparaître que les variations inter-annuelles des écoulements et leur répartition au cours de la saison de culture sont les principales causes de leur sous-valorisation.

Ces contraintes seront classées en 2 types:

- Les contraintes annuelles liées au déroulement de la saison des pluies;
- Les contraintes liées à une dégradation durable de la pluviométrie et à ses conséquences sur les flux hydriques.

CONTRAINTES CLIMATIQUES

La répartition des averses

Un retard dans le démarrage de la saison des pluies

L'adaptation du matériel végétal et de la stratégie de mise en valeur du bas-fond sont les deux solutions dont disposent les paysans pour pondérer l'effet d'un retard dans le démarrage de la saison des pluies mais la mise en valeur des bas-fonds est handicapée par la priorité que donnent les paysans aux cultures de plateau pour rattraper le retard de début de campagne. .

Si le retard n'atteint pas des dates seuils (exemple 2ème décade de juillet pour la riziculture au Yatenga), les variétés traditionnelles, pour la plupart photo-périodiques (sorgho au Burkina Faso, riz locaux au Burkina Faso, Mali et Casamance), permettent de pallier cet aléa. La culture réduira son cycle sans remettre en cause de façon importante la production finale, à condition que ce cycle soit assez long pour lui permettre de produire suffisamment de matériel végétal.

Avec le retard au démarrage de la saison des pluies, la mise en valeur des zones basses devient aléatoire. En zone soudanienne, le risque est alors grand que le riz n'ait pas un développement suffisant pour supporter la montée des crues. En zone sahélienne, le sorgho est alors semé dans les zones rizicoles, où le riz n'a que peu de chance de boucler son cycle.

Démarrage précoce de la saison des pluies

En cas de démarrage précoce de la saison des pluies, le matériel végétal photo-périodique, traditionnellement utilisé, et la relative résistance à la sécheresse des jeunes plants permettent à l'agriculteur de commencer la mise en valeur du bas-fond dans les zones basses. Cette pratique lui permet, en particulier dans le cas d'un semis direct, de mieux maîtriser les adventices qui croissent dès les premières pluies et d'obtenir une culture déjà bien développée et résistante aux crues.

Les périodes de sécheresse

L'effet d'une période de sécheresse sur le rendement dépend de la phase physiologique de la culture durant laquelle elle se produit. Pendant les 20 premiers jours du cycle, l'impact est minimum une fois que la levée du semis s'est effectuée. Au cours du cycle, l'effet sera particulièrement marqué, en particulier pour le riz, au moment du tallage, de la montaison et de la floraison.

Face à ce type d'aléa, seule la stratégie consistant à répartir ses parcelles sur les différentes zones topographiques du bas-fond (les parcelles basses étant a priori moins touchées) permet de pondérer partiellement l'effet de la sécheresse. En zone sahélienne et soudanienne, le recours à l'endiguement des parcelles n'est une solution que lorsque la sécheresse n'est pas trop longue et que la décrue de la nappe ne provoque pas la vidange des parcelles (cas de sols peu filtrants).

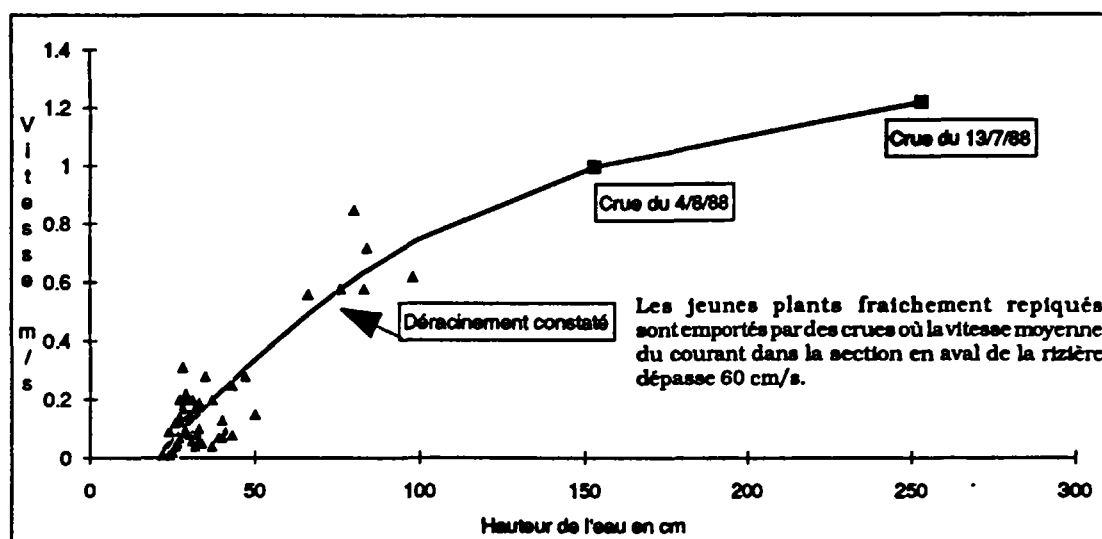
Le manque d'eau induit, particulièrement en riziculture, des problèmes phyto-sanitaires (pyriculariose), des stress physiologiques dus à l'effort d'adaptation que doit faire la culture pour passer successivement d'un milieu inondé à un milieu exondé ou à la remontée du taux de la salinité (Casamance). Le redémarrage des adventices, dès que le sol de la parcelle n'est plus sous eau, aggrave la situation. Les variétés traditionnelles sont bien souvent les mieux adaptées à ces conditions défavorables. Face à ce type d'aléas, seul le recours à un aménagement permet de sécuriser la production.

Crues exceptionnelles

Les crues en début de cycle sont un facteur de risque important dans les bas-fonds. Plus que la durée d'inondation, c'est surtout leur effet mécanique sur les jeunes plants peu développés (arrachage...) qui crée de gros dégâts (en particulier au Siné-Saloum où la violence des crues est forte) (figure 52). En cours de cycle, si ce n'est au moment de l'initiation paniculaire et de la fécondation, le riz supporte des durées de semi-noyade de 5 à 6 jours dont le principal effet négatif est la verse. La stratégie paysanne consiste à répartir les parcelles dans les différentes zones topographiques du bas-fond de manière à minimiser les risques en cultivant des parcelles hautes, moyennes et basses.

Face à ce type d'aléa, seul le recours à des aménagements, laminant les crues ou favorisant l'écoulement des eaux en protégeant les parcelles, permet de sécuriser la mise en valeur du bas-fond.

**Figure 52 : Vitesse du courant et arrachage des cultures
à Keur Samba Dïama (Sine-Saloum) (ALBERGEL & PEREZ, 1991)**



La péjoration climatique

Les effets dus à la dégradation durable de la pluviométrie sur la mise en valeur agricole ont pris des formes diverses suivant les zones écologiques. Elles sont néanmoins, dans la plupart des cas, liées au déficit d'écoulement et de recharge de la nappe d'inféoflux qui permettait la sécurisation hydrique des cultures par remontée capillaire en zone sahélienne sous sorgho, par écoulement de la nappe en zone soudano-sahélienne ou permettait de créer des conditions de salinité favorable au développement de la riziculture (Casamance).

Au Yatenga

La recharge des nappes de bas-fond est directement liée à la durée des crues et aux surfaces submergées. Le ruissellement est fonction de la hauteur pluviométrique tombée au cours de l'averse et de l'état hydrique des sols des versants. Ces deux facteurs ont un effet cumulatif sur l'importance des écoulements qui permettent de sécuriser les cultures de bas-fond. Les tableaux LII et LIII illustrent ce phénomène.

**Tableau LII : Evaluation par simulation du bilan hydrique de la
sécurisation du rendement d'une culture de sorgho de bas-fond.
Fréquence des différents rendements, Ouahigouya 1971-1990.**

Rendement	Fréquence des rendements		Indice de satisfaction hydrique
	Pluvial strict	Bas-fond	
très faible	0.3	0.2	< 0.5
médiocre	0.45	0.15	0.5 à 0.7
bon	0.25	0.65	> 0.7

Tableau LIII : Fréquence d'apparition de bonnes ou mauvaises récoltes dans les bas-fonds suivant le type d'année, Ouahigouya 1971-1990.

Type de récolte dans les bas-fonds	Année très déficitaire	Année médiocre	Année bonne
très déficitaire	0.66	0	0
médiocre	0.16	0.44	0
Bonne	0.16	0.56	1.00

Ces comparaisons ont été réalisées par simulation du bilan hydrique d'une culture de 100 jours en pluvial strict dans le bas-fond, en supposant que la réserve utile était systématiquement remplie après chaque écoulement. La pluviométrie et l'ETP sont celles de Ouahigouya sur la période 1971-1990.

En pluvial strict, 1 année sur 4, l'alimentation de la culture est satisfaisante (ETR/ETM du cycle supérieur à 0.7). Dans le bas-fond cette récurrence passe à près de 7 années sur 10; d'où le choix justifié des paysans d'y cultiver le sorgho. Par contre, en pluvial strict, la sécurisation des cultures dans le bas-fond reste faible les années déficitaires (3 années sur 10); dans 66% des cas l'alimentation hydrique de la culture reste très déficitaire et ne lui permet pas de jouer un rôle de sécurisation pour l'autosuffisance alimentaire des populations. Il est à noter que, dans ces conditions de sécheresse, le sorgho ne pourra pas être alimenté par les remontées capillaires provenant de la nappe qui aura été elle-même très peu rechargée (COULIBALY, 1992).

L'alimentation hydrique d'une culture de riz (tableau LIV) est très aléatoire. Un rapport ETR/ETM du cycle supérieur à 70% et un rapport ETR/ETM supérieur à 75% durant la phase montaison-floraison sont nécessaires pour obtenir de bons rendements (FOREST F., REYNIERS F.N., 1985). Ces conditions ne sont obtenues qu'une année sur cinq au cours des 20 dernières années. Cela justifie pleinement l'évolution du système de culture qui accorde la majorité des surfaces à la culture du sorgho, mis à part dans l'axe central où, les bonnes années, l'engorgement des sols est un facteur limitant pour le sorgho (ZIDA, 1992).

Tableau LIV : Evaluation par simulation du bilan hydrique de la qualité de la récolte en riziculture. Station Ouahigouya 1971-1990.

ETM/ETR cycle	< 0.55	entre 0.55 et 0.7	> 0.7
ETM/ETR période critique	<0.75	>=0.75	>=0.75
Type de rendement	très faible	médiocre	bon
Fréquence en bas-fond	0.6	0.2	0.2

La mise en culture d'un bas-fond sahélien ne sécurise pas vraiment la production. Seule la réalisation de petits aménagements permet le stockage d'eaux de surface et la recharge des nappes aquifères. Ces réserves sont la condition nécessaire à une sécurisation, une diversification et une intensification de la production agricole tout en améliorant l'alimentation en eau des populations et du cheptel (LAMACHERE & al, 1991).

Dans le Siné-Saloum

La baisse de la pluviosité des années 1970 a entraîné un défrichage massif généralisé. C'est à partir de cette date que les problèmes de dégradation des versants deviennent primordiaux et ne cessent de s'aggraver. Au risque de sécheresse en cours de cycle vient s'ajouter la difficulté d'implanter la culture du riz dans les bas-fonds du fait des fortes crues de début d'hivernage, à un moment où les orages de forte intensité sont les plus probables. Ils provoquent l'érosion des versants et des colluvionnements sableux qui rendent encore plus aléatoire la culture du riz. Face à ces contraintes, la stratégie paysanne d'adaptation est:

- La culture du maïs et du mil sur les zones non inondables (stratégie à rapprocher de celle des paysans du Yatenga, le sorgho étant remplacé par le maïs du fait de la pluviométrie plus faible).
- Le développement des cultures de contre-saison, commencées en décrue et irriguées ensuite à partir de puits profonds (30 à 40m) creusés autour du bas-fond.

La dégradation du milieu prend de telles proportions que la mise en valeur du bas-fond ne peut être envisagée que couplée à des actions de défense et de restauration des sols des versants (SENE & PEREZ, 1991).

Au sud du Mali

La baisse de pluviométrie a provoqué une chute spectaculaire des rendements en riz, principalement dans les années 1980. Les années 1981 à 1985 ont été particulièrement mauvaises et les rendements en 1982 et 1983 pratiquement nuls. Les bas-fonds sans cours d'eau semi-permanents ont été les plus touchés. L'effondrement du niveau de la nappe, dont l'écoulement différé assure la presque totalité de l'alimentation en eau du bas-fond à partir d'août, couplé à sa vitesse de descente importante en décrue (2cm/jour) n'ont plus permis au riz de boucler son cycle (KRIER, 1991).

Une évolution s'est effectuée très nettement au profit de maïs précoce dans les zones hautes et des cultures de contre-saison irriguées à partir de puisards en amont de seuils naturels dans les zones où la nappe est à moins de 2 m du niveau du sol à la fin du mois de mars. La mise en place de ces cultures est facilitée par la décrue plus rapide, les paysans cherchant à finir la culture de saison sèche avant le mois de mars pour éviter les fortes évaporations et les chaleurs néfastes au maraîchage. Cette stratégie est à rapprocher de celle pratiquée au Siné-Saloum; les conditions plus favorables (profondeur de la nappe, surface des bas-fonds) expliquent que, dans ces bas-fonds, des surfaces importantes soient consacrées au maraîchage. Le développement de ce type de mise en valeur se heurte aux irrégularités dans la vitesse de descente des nappes, en relation avec la texture des sols, et à l'irrégularité interannuelle de leurs niveaux (KRIER & SIMPARA, 1990).

La sécurisation de la riziculture et des cultures de contre-saison nécessite le développement d'aménagements couplant la régulation des eaux de surface et celle des eaux souterraines (plus particulièrement dans les bas-fonds perméables).

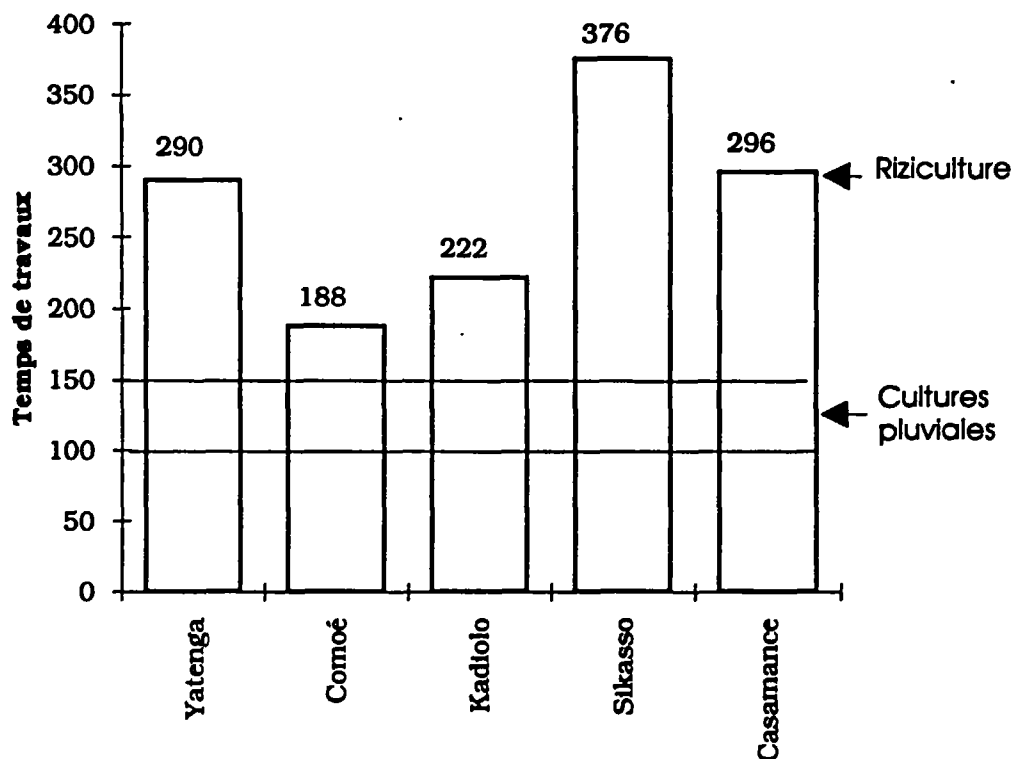
En Casamance

La baisse de la pluviométrie annuelle d'environ 300mm a induit une baisse générale du niveau des nappes de plateau, provoquant une diminution de la charge hydraulique des eaux douces dans les zones les plus basses, laissant les intrusions marines pénétrer plus longtemps dans les bas-fonds pendant la saison des pluies et provoquant l'exondation des sols de mangroves, leur acidification et la salinisation des rizières installées dans les parties basses des bas-fonds. Cette situation a entraîné l'abandon de la riziculture sur plus de 60% des terres anciennement cultivées en riz: 90 hectares du bas-fond de Djiguioum. Seul le recours à des aménagements de type "barrage anti-sel" peut enrayer, dans le contexte climatique actuel, l'avancée des eaux salées et permettre la réhabilitation des sols sulfatés-acides.

LES TEMPS DE TRAVAUX : UNE CONTRAINTE ECONOMIQUE

Les calendriers agricoles des cultures de bas-fonds et des cultures pluviales se chevauchent au moment des semis et des sarclages. Dans tous les cas, la priorité est accordée aux cultures pluviales par rapport à la riziculture qui est une activité essentiellement féminine, sauf en Casamance. L'importance des temps de travaux qu'elle nécessite et la faible valorisation du travail qu'elle procure, comparativement aux cultures des terres hautes, expliquent largement cette situation. Les techniques culturales traditionnelles (figure 53) nécessitent pour les cultures de bas-fonds, à superficies égales, de 1.5 à 3 fois plus de travail que pour les cultures pluviales. Ces dernières, dans bien des cas, ont fait l'objet d'améliorations permettant d'augmenter significativement la valorisation du travail (culture attelée, fertilisation, variétés améliorées) et sa rétribution financière (cultures commerciales) (ALBERGEL et al, 1991).

Figure 53 : Comparaison des temps de travaux en Hommes*jours/hectare en riziculture et en culture pluviale



Type de riziculture : repiquage dans la Comoé, à Kadiolo (Mali-Sud) et en Casamance; semis direct au Yatenga et à Sikasso (Mali-Sud).

Le contrôle de l'enherbement est le principal obstacle auquel se heurtent les exploitants quand les parcelles ne sont pas inondées. Il explique les temps de travaux. Cet obstacle est en partie levé par le repiquage qui permet:

- de retarder la date de mise en place de la culture après le démarrage de la première vague d'adventices qui sera détruite par le travail du sol;
- de ne pas pénaliser, par un semis tardif, la sécurisation de la culture en fin de cycle.

Mais le repiquage allonge les temps de travaux comparativement à ceux de la culture pluviale. Il nécessite l'inondation préalable des parcelles et pour que l'effet de l'inondation sur l'enherbement soit optimal, une maîtrise minimale de l'eau est indispensable; chaque assèchement permet en effet aux adventices de se développer à nouveau.

Le travail du sol en culture attelée est pratiqué (Siné-saloum, Mali sur certaines parcelles) mais ne permet pas de diminuer significativement les temps de travaux qui restent nettement supérieurs à ceux de la culture pluviale.

- Temps de travaux H^j/ha: 222
(travail à la daba + repiquage)
- Temps de travaux H^j/ha: 202
(labour, reprise + repiquage)

La fertilisation organique et minérale augmente de façon sensible la pression des adventices. Le tableau LV en fait la preuve (AHMADI et al, 1991).

Tableau LV : Comparaison des temps de travaux nécessaires au désherbage (semis direct à la volée) en fonction de la fertilisation organique et minérale. (projet Riz Inondé IER-CIRAD, Mali)

Type de traitement	1	2	3	4	5
Herbicide de prélevée	0	+	+	+	+
Fertilisation minérale NPK	0	0	0	+	++
Fertilisation organique t/ha	0	0	5	0	0
Temps de travaux H.j/ha *	68	51	59	55	61

+ dose vulgarisée ++ dose forte.

La mise au point de techniques culturales plus performantes (utilisation d'herbicides) permet de déplacer la demande en main-d'oeuvre en dehors du "goulot d'étranglement" des semis et des premiers sarclages des cultures pluviales. Mais cette utilisation n'est possible qu'à la condition d'une bonne maîtrise de l'eau permettant de garantir la production et de valoriser ainsi les intrants.

L'aménagement des bas-fonds : un pas vers l'intensification

LES AMENAGEMENTS

PRINCIPAUX TYPES REGIONAUX

Depuis les années 1970, face à la dégradation de la pluviométrie de nombreux aménagements de bas-fond ont été réalisés dans les différentes régions concernées par l'étude. Leurs objectifs et leur conception sont directement liés à la problématique des zones concernées en matière d'hydraulique agricole, humaine et pastorale et à leurs caractéristiques hydrologiques, pédologiques et hydrogéologiques.

Plus l'aridité est importante, plus l'hydraulique humaine et pastorale prend le pas sur l'utilisation agricole.

Au Yatenga

Les aménagements réalisés sont essentiellement des petits barrages. Pour 75% d'entre eux, l'objectif est d'améliorer l'alimentation en eau des populations et du bétail sans que soit envisagée une mise en valeur agricole. Le tableau LVI résume les volumes stockés et la vocation des ouvrages réalisés dans la zone.

**Tableau LVI : Caractéristiques générales et vocation
des petits barrages réalisés au Yatenga**

Volume de la retenue milliers de m³	Nombre	Vocation de l'aménagement				
		H	H & P	A, H, P	A, H, P non utilisé pour l'agriculture	A, H, P surface cultivée /aménagement
<100	48	1	41	6	0	1.3ha
100 à 1000	10	0	6	4	1	9.7ha
>1000	7	0	1	6	1	21.6ha
% du total	100	1.6	73.8	24.6	---	---

A = Agricole

H = Hydraulique humaine

P = Hydraulique pastorale

Dans le Siné-Saloum

Pratiquement aucun aménagement de bas-fond n'a été réalisé dans le Siné-Saloum. Cette constatation s'explique par:

- * L'existence d'une nappe aquifère puissante dans des terrains sédimentaires et la possibilité de creuser des puits profonds de 40 à 50 mètres, permettant d'assurer, en toutes circonstances, l'alimentation en eau des populations; contrairement au Yatenga, situé en zone de socle, où les disponibilités en eaux souterraines sont limitées et difficiles à mobiliser.
- * Des problèmes techniques et de coûts liés:
 - à la petite taille des bas-fonds,
 - à la faiblesse et à la répartition des écoulements naturels,
 - à la violence des crues nécessitant des ouvrages d'évacuation très importants par rapport aux volumes stockés et aux surfaces sécurisées,
 - à d'importants transports solides limitant la durée de vie des ouvrages.

Dans la Comoé

En zone soudanienne, les aménagements hydro-agricoles jouent un rôle important. Ils ont pour objectif d'améliorer l'épandage et l'évacuation des crues. Parmi les 856 hectares de surfaces aménagées avec maîtrise partielle de l'eau dans la Comoé, 40% le sont avec un collecteur central et 60% avec des diguettes suivant les courbes de niveau. Une deuxième phase d'aménagement, sur 1000 ha de bas-fonds, est en cours depuis 1991 dans cette province.

Tableau LVII : Aménagements dans la province de la Comoé

Type	Volume retenu milliers de m³	Nb	Utilisation	Surface en ha	Maîtrise de l'eau
Barrages	<100	2	P	----	----
		1	HP	----	----
		1	HPA	2	totale
	<10000	2	I	----	----
		1	PAI	100	totale
		1	HPA	30	totale
	>10000	1	AP	400	totale
Aménagements	sans stockage		A	856	partielle

P: pastoral H: humaine I: industriel A: agricole

Au sud du Mali

Dans le cas du Mali, les interventions concernent essentiellement les bas-fonds rizi-
coles. Elles sont de trois types:

- Type 1: Barrages à batardeaux dans le lit mineur, réalisés dans les années 1970 sur des petites plaines. Ils représentent 18% des aménagements et 51% des surfaces.
- Type 2: Barrages demi-souterrains barrant le lit majeur, réalisés à la fin des années 1980 sur des petits bas-fonds et construits avec une importante participation paysanne. Ils représentent 50% des aménagements et 2% des surfaces aménagées.
- Type 3: Barrages demi-souterrains complétés par des aménagements hydro-agricoles simplifiés (réseaux secondaires). Ils représentent 32% des aménagements et 47% des surfaces aménagées.

Tableau LVIII : Types d'aménagements réalisés dans la zone Mali-Sud.

Type d'ouvrage	Périmètres hydro-agricoles	Surface en ha sous influence ou aménagée	Nombre	Surface en ha
Ouvrage d'épandage de crues	sans	<50	0	0
		50 à 200	4	660
		>200	2	1800
Micro-barrage demi-souterrain	sans	<5	10	24
		5 à 10	5	29
		>10	2	22
Ouvrage d'épandage des crues	avec	<50	3	145
		50 à 200	6	948
		>200	1	1200
		TOTAL	33	4828

En Casamance

Les aménagements réalisés sont surtout de type barrage anti-sel et exclusivement destinés à réhabiliter et protéger des zones traditionnellement rizicultivées. Les premières interventions ont eu lieu dans les années 1963-1975. Elles avaient pour objet de reprendre les méthodes traditionnelles à une plus grande échelle et d'y adjoindre des techniques plus performantes, en particulier en matière de drainage, afin de provoquer un meilleur dessalement des sols. Cette expérience s'est soldée par un échec dû à la non prise en compte des processus d'acidification des sols exondés (ILACO, 1967).

Pour mieux contrôler la gestion de l'eau dans les vallées affluentes du fleuve Casamance, il a été construit des barrages dont la gestion devait permettre l'introduction des eaux salées à l'occasion des marées en période sèche afin d'éviter l'acidification des sols et d'évacuer les eaux de dessalement des rizières en saison des pluies. Des barrages de ce type ont été réalisés à Guidel, Affinian et dans les zones de Boukiling et de Sédhio. Ils ont été mis en service de 1983 à 1990.

*Le bilan du barrage de Guidel fait état d'une modification de la gestion préconisée initialement. Les terres en amont s'étant acidifiées (BARRY, 1989; SOMIVAC, 1985), il fonctionne maintenant comme un barrage anti-sel limitant l'entrée des eaux salées.

*Le barrage d'Affinian, avec une gestion de retenue d'eau en saison sèche, fonctionne également comme barrage anti-sel uniquement.

Face à la dégradation climatique qui s'est affirmée dans les années 1980, les petites vallées qui se ramifient dans le plateau continental ont été touchées par l'avancée des eaux salées. Pour enrayer le phénomène, les populations ont entrepris la construction de digues anti-sel avec un appui technique et financier extérieur (projet PIDAC puis projet SOMIVAC). La figure 54 donne la localisation de ces barrages anti-sel en Casamance et le tableau LIX décrit (sur 25 aménagements) leurs principales caractéristiques.

Figure 54 : Localisation des principaux aménagements anti-sel de Casamance

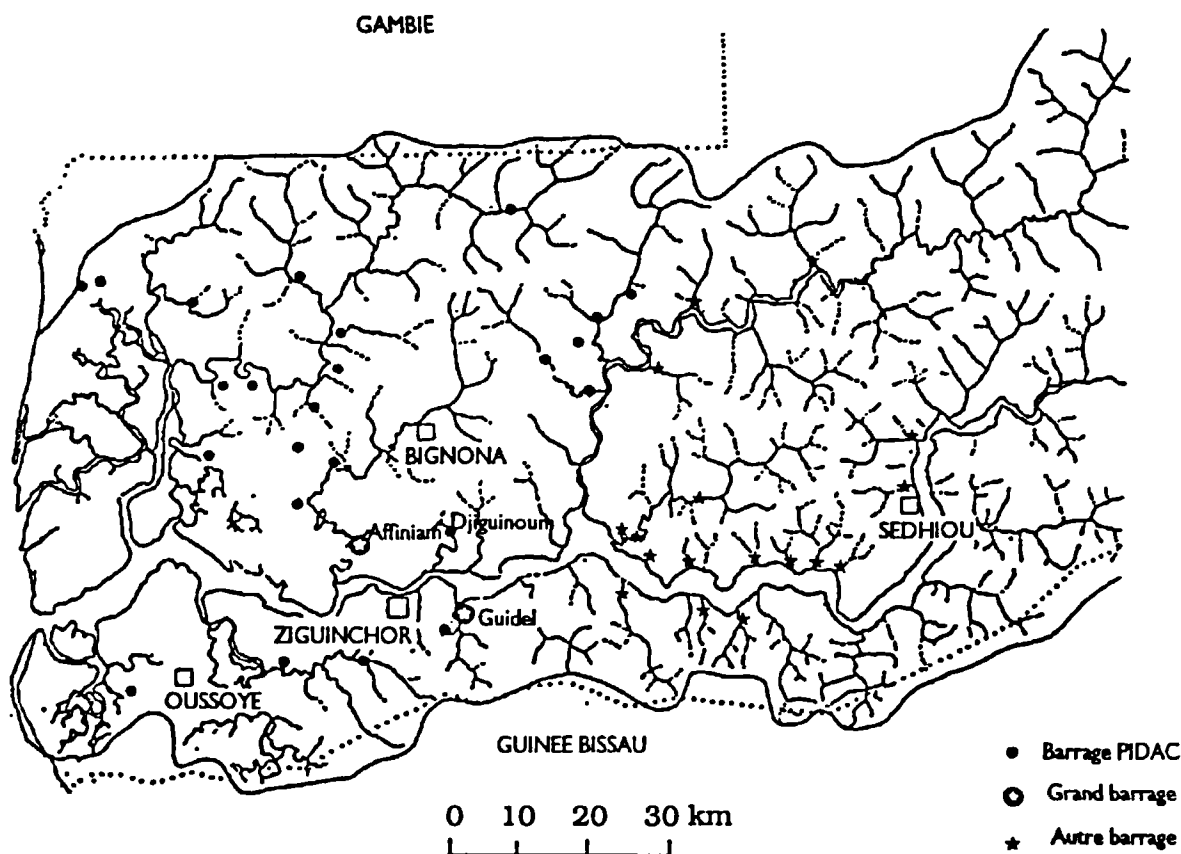


Tableau LIX : Caractéristiques moyennes des barrages anti-sels réalisés en Casamance (barrages PIDAC).

Surface protégée en ha	Nb	Terres salées en %	Longueur digue moyenne en m	Volume d'eau stocké moyen en m ³	Participation paysanne en H [°] j/ha protégé
<100	5	37	187	115 600	3.5
100 à 200	6	15	274	238 000	4.1
200 à 500	9	38	850	839 300	3.1
>500	5	19	510	2 966 700	3.9

PROBLEMES DE GESTION ET DE MISE EN VALEUR AGRICOLE

Dans toutes les zones concernées, les aménagements réalisés ont rarement atteint les objectifs de mise en valeur qui avaient été initialement fixés et n'ont résolu que partiellement les problèmes auxquels ils étaient sensés apporter des éléments de solution.

Les causes de ce relatif échec varient suivant la problématique agro-écologique de la zone.

En zone sahélienne

L'utilisation de l'eau à des fins d'hydraulique humaine et pastorale est de loin la priorité des populations. Sur 11 barrages enquêtés permettant l'irrigation de 236 ha, seuls 84 ha sont effectivement mis en valeur, soit 35%. Les sites favorables à de tels ouvrages et leur coût en limitent la possibilité de multiplication. Outre les opérations "puits et forages", la recherche d'alternatives s'oriente vers les micro-réalisations telles que celles testées sur le projet pilote de Bidj, dont l'objectif initial est la recharge de la nappe superficielle des bas-fonds alimentant les puits villageois tout en sécurisant les cultures traditionnelles.

En zone soudanienne

Au Mali

Les difficultés semblent liées aux caractères spécifiques du milieu naturel et à la forte concurrence des systèmes pluviaux basés sur le coton. Les études menées par le projet Eau-Sol-Plante ont montré que sur les grands bas-fonds aux sols perméables:

- * Le maintien d'une lame d'eau dans les rizières nécessite un apport de 3 à 9 fois les seuls besoins en eau de la culture. Ces constatations sont tout à fait explicables par les très fortes perméabilités de ces sols:
 - perméabilité horizontale de l'ordre de 10^{-3} m/s;
 - perméabilité verticale de l'ordre de 10^{-4} m/s.
- * La maîtrise de l'eau de surface nécessite de concevoir des aménagements ou une gestion de l'eau permettant de régulariser le niveau de la nappe.
- * La mauvaise maîtrise de l'eau obtenue sur les aménagements limite les possibilités d'intensification (les rendements obtenus sur 35 parcelles paysannes en 1988 étaient de 2.1 T/ha), même si un essai agronomique effectué sur le même site avec apport de 5 T/ha de matière organique a permis des rendements de 5 T/ha. Hors aménagement des tests en milieu paysan obtiennent des rendements identiques.

Dans tous les cas, sauf innovations techniques, les cultures pluviales restent plus rémunératrices pour le paysan, en terme de valorisation du travail. Ces difficultés s'accompagnent de l'envahissement des périmètres aménagés par les adventices, essentiellement *Oriza longistaminata*, rendant encore plus problématique leur mise en valeur. Les aménagements paysans sont de ce fait utilisés à moins de 50%, ce qui ne permet pas de rentabiliser leur coût, même lorsqu'il est inférieur à 250.000 Fcfa/ ha.

Seul le grand aménagement de Kléla (1200 ha) échappe à ce phénomène. Outre un fonctionnement hydraulique plus régulier dû à sa grande superficie, sa mise en valeur par des exploitants non ruraux, pouvant disposer d'intrants et d'herbicides et intervenant à coût marginal, explique son fonctionnement satisfaisant. Face à cette situation et faute d'un référentiel technique suffisant (autant en matière agronomique que d'aménagement), la CMDT (Compagnie Malienne de Développement des Textiles), organisme chargé de l'encadrement et de l'animation rurale dans la zone Mali-Sud, a décidé:

- * de porter ses efforts sur la réhabilitation des aménagements existants;
- * de privilégier la mise en valeur des "petits bas-fonds" dans lesquels, particulièrement lorsque les sols sont filtrants, des aménagements en "barrages semi-souterrains" permettent:
 - de réguler la hauteur de la lame d'inondation,
 - de diminuer les phénomènes de drainage en amont de la digue par la réalisation d'une tranchée d'étanchéité,
 - d'intégrer l'aménagement dans les actions de gestion des terroirs visant à stabiliser les systèmes de production.

Le coût relativement faible des aménagements de bas-fonds peut être pris en charge à 50% par les paysans. Evaluer l'intérêt de ce type d'aménagements et les problèmes que posent leur gestion ont été les objectifs du projet pilote "Mali-Sud".

Au Burkina Faso

La moins grande concurrence des cultures pluviales, reflétée par l'importance du riz dans le bilan alimentaire, fait que les aménagements réalisés par l'Opération Riz Comoé sont mis en valeur à près de 80% (superficie totale aménagée: 856 ha, superficie exploitée: 670 ha). L'aménagement de 6 nouveaux bas-fonds représentant une superficie de 1000 ha est en cours. Evaluer les possibilités d'optimiser la mise en valeur de ce type d'aménagement et les problèmes que posent leur gestion ont été les objectifs principaux du projet pilote "Comoé".

En zone Guinéenne

Cas de la Casamance.

Si certains petits barrages anti-sel ont bien fonctionné, surtout lorsque les sols étaient légers, les gains de production obtenus sont loin de ceux attendus. La mauvaise gestion de nombreux petits barrages a conduit, dans certains cas, à amplifier la dégradation des sols.

Les gros aménagements, type Guidel ou Affiniam, demandent des investissements lourds par rapport aux résultats obtenus en matière de production rizicole. Le coût du barrage de Guidel est de 1 milliard de FCFA pour 800 ha de terres salées encore à aménager, celui d'Affiniam de 6 milliards de FCFA.

A l'inverse, un petit barrage représente une dépense relativement modeste, moins de 10 millions de FCFA, et protège quelques centaines d'hectares. La demande est forte, ce qui nécessite la réalisation d'un grand nombre d'ouvrages.

Le principal problème auquel se heurte la valorisation des aménagements est celui de la gestion des barrages, car aucune solution n'est idéale et unique. C'est à ce problème que le projet pilote "Casamance" s'est prioritairement intéressé.

LES PROJETS PILOTES ET LA PROBLEMATIQUE D'AMENAGEMENT

L'analyse des difficultés rencontrées en matière d'aménagement de bas-fond montre que dans chacune des zones, les projets pilotes ont été choisis pour apporter des éléments de réponse qui tiennent compte des perspectives locales de développement et ont permis d'évaluer les problèmes techniques, agricoles et socio-économiques inhérents à la conception des aménagements et à la mise en valeur des terres de bas-fonds. Le tableau LX classe les projets pilotes relativement à la taille des aménagements et à leur impact écologique.

Tableau LX : Place des projets pilotes dans la problématique d'aménagement

		Taille de l'aménagement	
		Micro-réalisation de surface inférieure à 20 ha	Aménagement hydro-agricole
Impact écologique	Restauration de zones en voie de stérilisation	Projet Yatenga	Projet Casamance
	Amélioration de la mise en valeur agricole	Projet Mali-Sud	Projet Comoé

LES PROJETS PILOTES ET LEURS AMENAGEMENTS: DESCRIPTION

L'objet du présent chapitre est, pour chacun des aménagements suivis dans le cadre du projet, de:

- rappeler les idées de base, les critères de choix et les objectifs de développement qui ont abouti aux différents types d'aménagement;
- décrire, pour chacun des aménagements, les différents éléments, les critères de dimensionnement utilisés et leur fonctionnement prévisionnel;
- de donner les coûts de réalisation et l'organisation des travaux;
- de décrire le système de mise en valeur agricole qu'ils permettent et le système d'attribution des parcelles qu'ils impliquent.

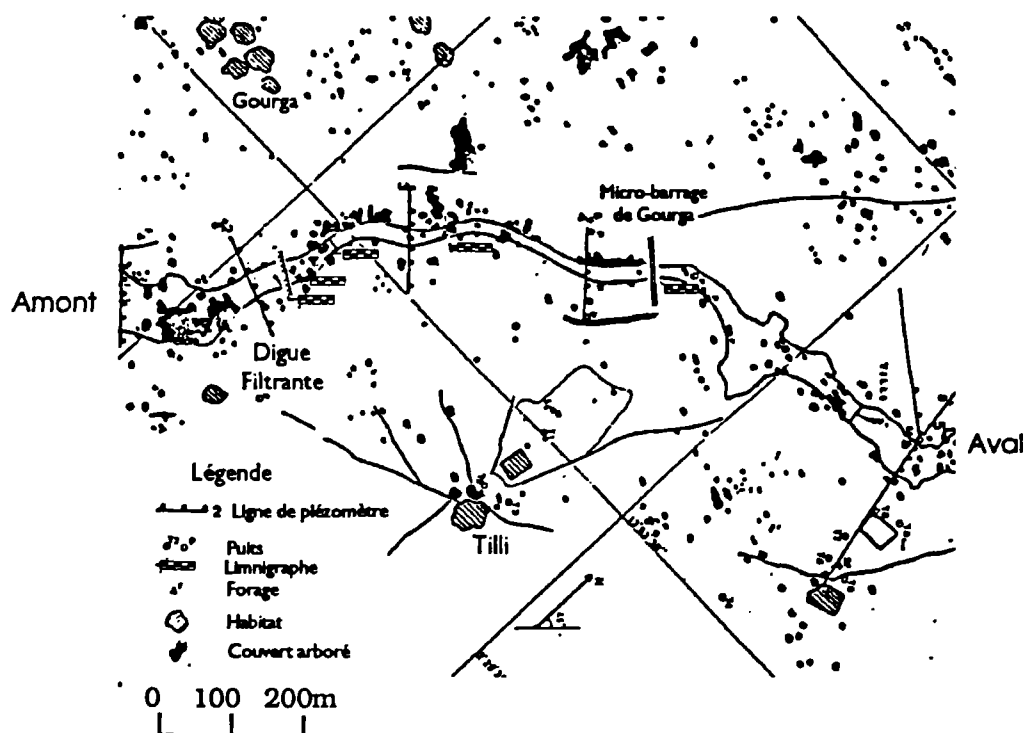
LE SITE PILOTE DE BIDI AU YATENGA

Deux types d'aménagements ont été testés et évalués sur le bas-fond de Gourga. La figure 55 en donne le plan de situation:

- * une digue filtrante dans la zone amont, réalisée en 1986,
- * un micro-barrage à digue déversante en aval, terminé en 1988.

L'objectif était d'évaluer l'intérêt de ce type d'aménagement qui constitue une alternative aux petits barrages, pour améliorer, au niveau d'un village, la recharge de la nappe tout en permettant de sécuriser l'alimentation hydrique des cultures traditionnellement réalisées par les paysans dans les bas-fonds.

Figure 55 : Plan de situation des aménagements du programme Yatenga



La digue filtrante

Critères de choix et objectifs retenus

Une digue filtrante est un micro-barrage perméable, en pierres libres ou en gabions qui freine l'eau de crue et l'épand sur les terres cultivables du bas-fond. L'eau y stagne quelques heures après la pluie, tout en s'écoulant progressivement vers l'aval.

Son rôle est triple:

- augmentation des surfaces sous l'influence de la crue (rôle d'épandage);
- amélioration de l'alimentation hydrique des cultures pluviales; après chaque crue, le temps de présence de l'eau sur les parcelles augmente et permet aux sols d'être rechargés complètement sans être ennoyés, l'eau de surface s'écoulant progressivement à travers la digue;
- augmentation de la durée et de la surface d'infiltration permettant d'espérer une recharge locale de la nappe du bas-fond.

Pour être plus démonstratif, cet ouvrage a été réalisé sur le site où l'exploitation du bas-fond avait été abandonnée suite à la dégradation des conditions climatiques.

Caractéristiques de l'ouvrage réalisé.

Le tableau LXI résume les caractéristiques de la digue filtrante réalisée. Les hauteurs, longueurs et techniques de réalisation ont été choisies en fonction:

- Des contraintes liées à l'évacuation de la crue décennale, estimée à 48 m³/s.
- De la vocation des sols en amont de la digue, l'objectif retenu étant d'augmenter la sécurisation des cultures et d'étendre la surface inondable, sans noyer les zones sableuses cultivées en mil.

La longueur utile de la digue est de 100m, pour une hauteur maximum de la crête par rapport au terrain naturel de 0.5m (figure 56). Elle est prolongée sur chaque rive pour éviter les contournements en cas de forte crue, de 14 mètres en rive gauche et 11m en rive droite. La hauteur de la lame déversante, correspondant à la crue décennale, a été estimée à 49cm. Cela conduit (figure 57):

- * à réaliser la digue en gabions,
- * à se servir du gabion inférieur pour éviter les phénomènes d'érosion régressive; un enrochement en pierre libre a été considéré comme insuffisant compte tenu de la hauteur de la lame déversante.

La réalisation d'un bassin de dissipation n'a pas été jugée utile, compte tenu de la faible hauteur de la digue.

Tableau LXI : Caractéristiques de la digue filtrante de Bidi-Gourga

Longueur totale	125 m
Longueur utile	100 m
Hauteur maximum/terrain nu	0.5 m
Surface amont sécurisée	4.0 ha
Sorgho	2.6 ha
Riz	1.4 ha

La vocation des surfaces agricoles a été déterminée a priori par rapport à la crête de la digue:

+ 25 à - 15cm	sorgho	2.6 ha
- 15 à - 35cm	riziculture à cycle très court	0.9 ha
<- 35cm	riziculture	0.5 ha.

Les surfaces sous influence de la digue représentent environ 4ha. Elles sont réduites d'un tiers dans la pratique (2.7ha) pour un problème de parcellaire (manguiers).

Figure 56 : Plan de la digue filtrante

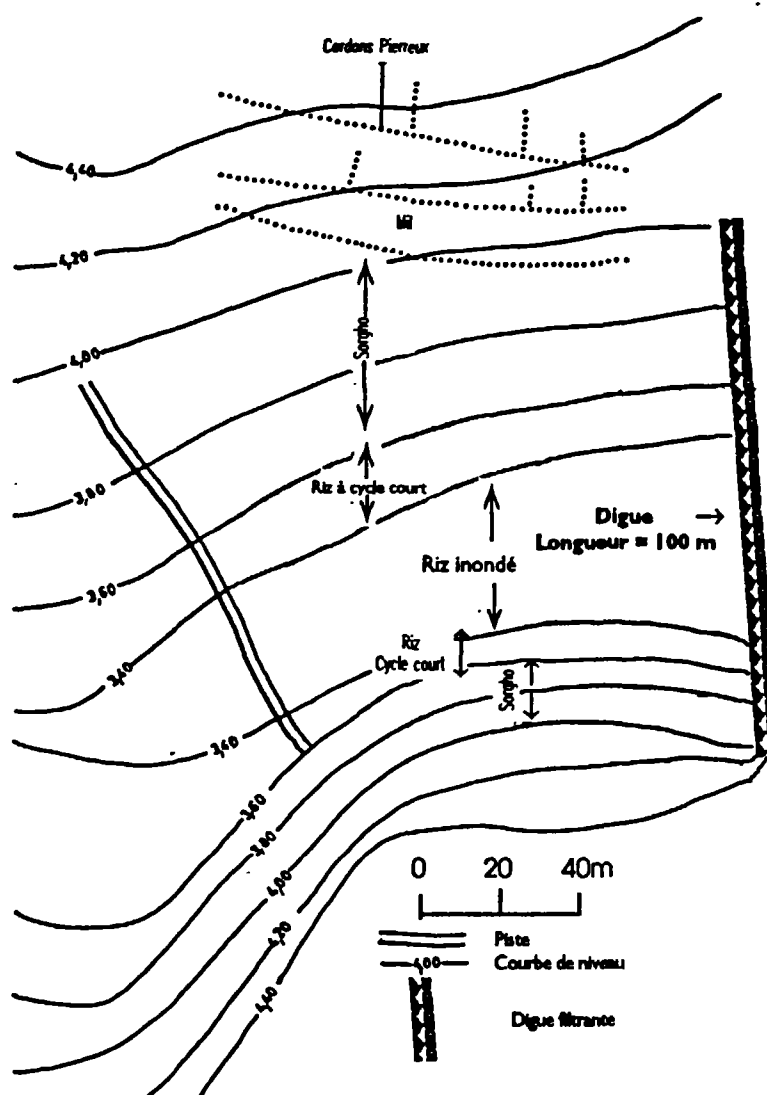
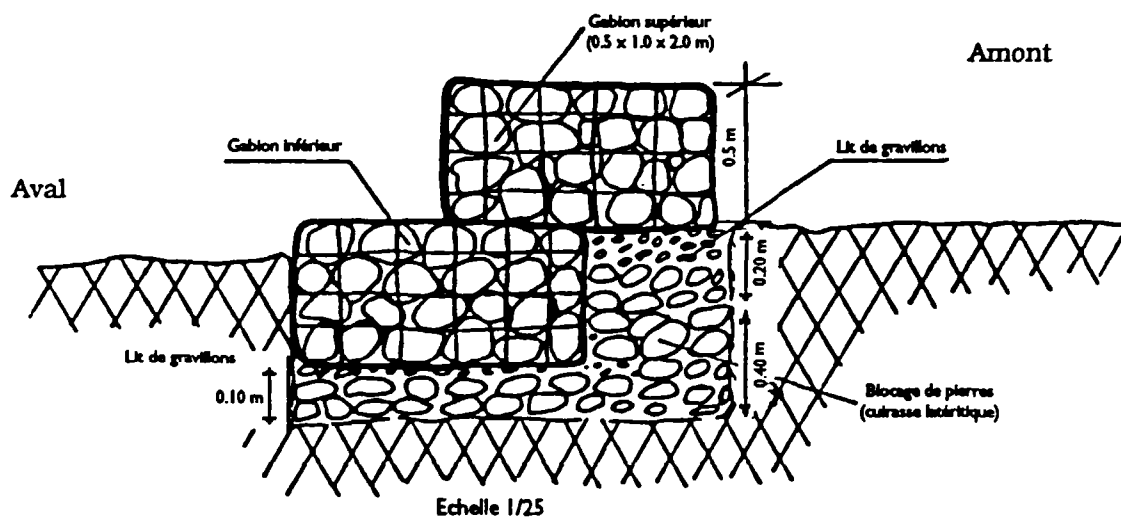


Figure 57 : Coupe transversale de la digue filtrante



Devis estimatif des travaux de réalisation.

Les travaux ont été réalisés avec la participation du groupement villageois. Le tableau LXII récapitule les travaux effectués par les villageois et ceux effectués par des agents extérieurs au village. Le coût de la digue est estimée à 2 600 000 FCFA, la main d'oeuvre du village en représentant 46% pour une rétribution de 800 FCFA par jour de travail. Le coût financier de l'hectare sécurisé est de 518 700 FCFA (financement extérieur au village).

Tableau LXII : Devis estimatif des travaux de réalisation de la digue filtrante de Gourga en FCFA.

	Désignation	Quantité	Unité	Coût réalisation des travaux par main d'oeuvre extérieure au village ou achat de matériaux		Réalisation des travaux par les villageois			Coût total Fcfa
				Coût unitaire Fcfa	Coût Fcfa	Temps de travail unitaire (h*)	Temps de travail	Valeur reflet du travail Fcfa	
1	Terrassements								
1.1	Déblais	225	m3			3	675	540000	540000
2	Enrochements								
2.1	Gabions 200x100x50	100	m3	7500	750000				750000
2.2	Remplissage gabions	100	m3			3	300	240000	240000
2.3	Pierres de blocage	75	m3			1.5	112.5	90000	90000
3	Filtre								
3.1	Pose filtre	60	m3			0.5	30	24000	24000
4	Collecte des matériaux								
4.1	Moellons latérite	175	m3			1.5	262.5	210000	210000
4.2	Gravillons & sable	60	m3			2.5	150	120000	120000
5	Transport (5km)	235	m3	1750	411250				411250
6	Frais, étude & suivi				240000				240000
	Total				1401250		1530	1224400	2625250

Réalisation des travaux

Le chantier de réalisation s'est étalé de septembre 1985 à juillet 1986. La fréquence de fonctionnement du chantier a été faible (2 jours sur 3). L'efficacité du travail par rapport aux normes d'un travail salarié n'a été que de 20%. Hommes, femmes et jeunes se sont répartis des tâches différentes comme l'indique le tableau LXIII (SERPANTIE, 1988).

Tableau LXIII : Répartition des tâches

Catégorie	Travaux
Hommes Femmes Jeunes (12à15ans)	Terrassement, damage, remplissage des gabions Transport de pierres, terre et eau Chargement camions et charrettes

Attribution des parcelles

La zone amont de la digue a été divisée en 23 parcelles. Un accord préalable a été conclu entre le groupement des riziculteurs et le propriétaire pour une mise en valeur uniquement rizicole en saison des pluies (MAIZI, 1991).

Le micro-barrage de Gourga

Critères de choix et objectifs

Entre la digue filtrante et le barrage de grande dimension, la digue déversante semble une alternative intéressante dans la mesure où elle concilie:

- le stockage des eaux de surface en saison des pluies et en début de saison sèche pour assurer les besoins des populations et des animaux,
- la sécurisation des cultures sur le pourtour de l'aménagement et du maraichage en début de saison sèche,
- la recharge des nappes du bas-fond, par infiltration de l'eau stockée dans le barrage.

Caractéristiques de l'ouvrage réalisé.

La topographie du site choisi a induit la détermination de la hauteur de l'ouvrage de déversement afin de concilier:

- la fonction réservoir;
- l'utilisation agricole de la retenue.

Dans le cas de cet ouvrage, 60% de la surface de la retenue est rizicultivable dans la zone où la hauteur de l'eau est comprise entre 0 et 50cm quand la retenue pleine (Figure 58). Afin d'assurer la valorisation agricole de la retenue, le déversoir a été muni d'un pertuis batardable permettant, en début de campagne, de réguler le niveau de l'eau pour éviter de noyer la culture.

Le tableau LXIV donne les caractéristiques de la digue déversante. La figure 59 montre le plan de l'aménagement et la figure 60 donne la coupe transversale du micro-barrage

Figure 58 : Relation Surfaces/cotes de la retenue de Gourga

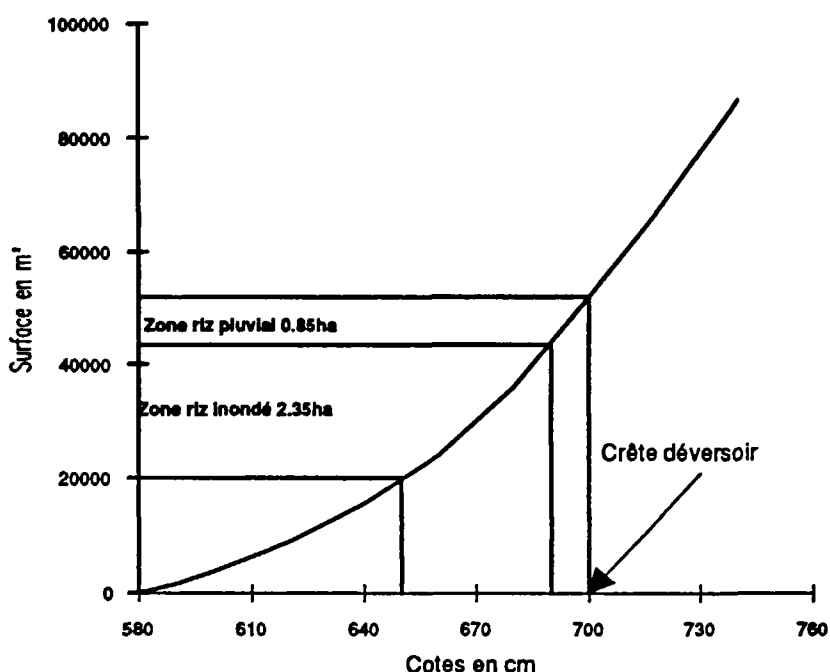


Figure 59 : Plan du micro-barrage de Gourga

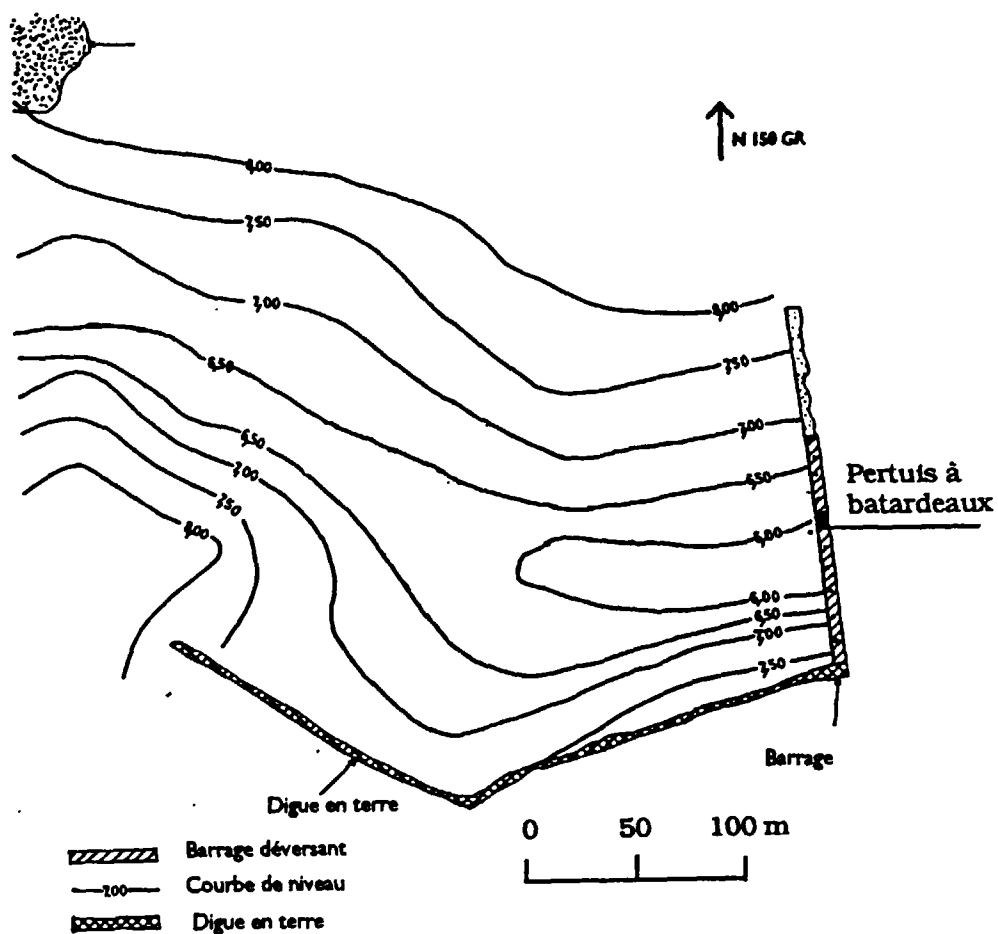


Figure 60 : Coupe transversale du micro-barrage de Gourga (AGNAME, 1991)

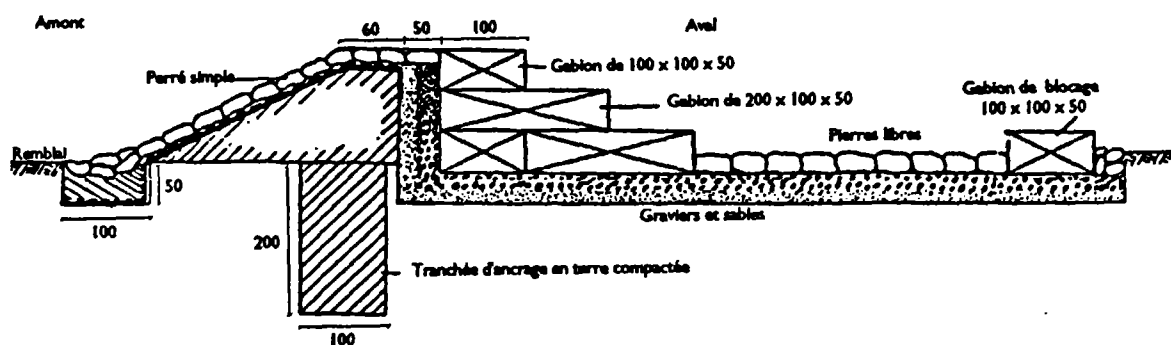


Tableau LXIV : Description du micro-barrage de Gourga

Volume maximal stocké	24 000 m ³
Surface de la retenue	5 ha
Surface agricole utile	3 ha
Longueur totale du barrage	170 m
- partie centrale en gabion	100 m
- partie rive gauche	70 m
Hauteur maximale (crête de la digue)	1 m
Passe centrale à batardeaux	
- largeur	1.50 m
Fosse de dissipation	
- largeur	3.80 m
- longueur	100 m
Digue latérale de protection en rive droite	
- longueur	300 m

Pour minimiser le coût de l'ouvrage et compte tenu de l'expérience burkinabé dans la réalisation des gabions, cette technique de construction du déversoir évacuateur de crue a été utilisée. D'une largeur de 100 m, le déversoir permet d'évacuer la crue décennale avec une lame d'eau sur la crête de 0.49 m pour un débit de 48 m³/s. Les autres caractéristiques de la digue sont (figure 60):

- un parement aval en gradins (pente un pour deux) et massif totalement gabionné,
- un bassin de dissipation en dépression (0.2 m) par rapport au terrain naturel, dont le fond est revêtu de pierres libres et muni d'un mur anti-ressaut réalisé en gabion pour éviter les affouillements en aval.

La crête de la digue en terre a été calée à 1 m au dessus de la partie déversante, ce qui assure l'évacuation des pointes de crue d'un débit d'environ 100 m³/s, soit un débit maximum évacué deux fois supérieur au débit maximum de fréquence décennale.

Devis estimatif des travaux et réalisation

Les travaux ont été réalisés avec la participation du groupement villageois comme pour la digue filtrante. Le tableau LXV récapitule les travaux effectués par les villageois et ceux effectués par les agents extérieurs au village. Le coût du micro-barrage déversant est estimé à 13.650.000 FCFA, la main-d'oeuvre villageoise en représentant 52% pour une valeur reflet de 800 FCFA/jour et des temps de travaux unitaires correspondant à une main d'oeuvre salariée. Le coût à l'hectare sécurisé a encore moins de signification que pour la digue filtrante, l'aspect hydraulique villageoise et pastorale étant bien plus l'objectif de l'aménagement que la valorisation agricole de l'eau (2.174.100 CFA de financement extérieur par ha sécurisé). Un puits sur la rive gauche a d'ailleurs été sur-créusé et busé pour permettre l'exhaure de l'eau dans de bonnes conditions sanitaires.

La réalisation des travaux s'est étalée sur 3ans:

1986: études préliminaires réalisées par l'ORSTOM.

1987: extraction des blocs de latérite nécessaires à la confection des gabions à 5km du site, fondation du micro-barrage.

1988: construction du barrage.

Tableau LXV: Devis estimatif et quantitatif du micro-barrage déversant de Bidi-Gourga

				Réalisation des travaux par la main d'oeuvre extérieure au village		Réalisation des travaux par les villageois			
	Désignation	Quantité	unité	Coût unitaire Fcfa	Coût Fcfa	Temps de travail unitaire h°j	Heures de travail	Coût reflet du travail Fcfa	
1	Terrassements								
1.1	Déblais								
1.1.1	Tranchée d'ancrage	300	m3			3	900	720000	720000
1.1.2	Bassin de dissipation	68	m3			3	204	163200	163200
1.2	Remblais compactés								
1.2.1	Tranchée d'ancrage	300	m3			6	1800	1440000	1440000
1.2.2	Digue centrale	300	m3			6	1800	1440000	1440000
1.3	Remblais non compactés								
1.3.1	Digue Rive droite	300	m3			3	900	720000	720000
2	Maçonneries								
2.1	Passerelle centrale	6	m3	52000	312000	10	60	48000	360000
2.2	Bajoyers	5.8	m3	52000	301600	10	58	46400	348000
3	Enrochements								
3.1	Gabions 100x100x50	300	u	5000	1500000				1500000
3.2	Gabions 200x100x50	210	u	6000	1260000				1260000
3.3	Remplissages Gabions	360	m3			3	1080	864000	864000
3.4	Perré aval	200	m3			0.5	100	80000	80000
3.5	Perré amont	150	m3			0.5	75	60000	60000
4	Filtre								
4.1	Sables et graviers bassin de dissipation	50	m3			0.5	25	20000	20000
4.2	Sables et graviers filtre vertical	150	m3			1	150	120000	120000
4.3	Sables et graviers sous gabions	75	m3			0.5	37.5	30000	30000
5	Collecte des matériaux								
5.1	Moellons de latérite	710	m3			1.5	1065	852000	852000
5.2	Graviers et gravillons	275	m3			2.5	687.5	550000	550000
6	Batardeaux	7	u	25000	175000				175000
7	Transport sur 5km	985	m3	1750	1723750				1723750
8	Frais étude et suivi				1250000				1250000
	Total				6522350		8942	7153600	13675950

L'organisation du chantier a été prise en charge par un ingénieur des travaux publics de la coopération canadienne. Le nombre de journées de présence sur le chantier est de l'ordre de 15300 h*, soit une efficacité de travail de 58% par rapport aux normes de chantier. La moyenne de 100 travailleurs sur le chantier en saison chaude correspond à 50% de la main d'oeuvre théoriquement mobilisable en saison sèche dans les quartiers de Gourga et Tilli, ce qui peut être considéré comme très élevé, compte tenu des autres activités quotidiennes.

Attribution des parcelles

Une première attribution de 67 parcelles de 2 ares a été faite au début de l'hivernage 1988 à 30 bénéficiaires. La cession de leur droit de culture par les propriétaires s'est effectuée dans les mêmes conditions que pour la digue filtrante, c'est à dire pour la culture exclusive du riz (MAIZI, 1991).

LES AMENAGEMENTS DE LA COMOÉ

L'Opération Riz Comoé, chargée du développement de la riziculture dans la province de la Comoé, a développé deux types d'aménagement de bas-fond (HEBIE, 1986):

- un aménagement avec collecteur central, testé à Moadougou,
- un aménagement avec diguettes disposées suivant les courbes de niveau, testé à Kawara.

Le but des aménagements hydro-agricoles a été d'améliorer la maîtrise de l'eau pour lever les deux principales contraintes à la riziculture dans les plaines:

- une répartition inégale de l'eau sur la plaine: inondations en aval et dans le lit mineur, tarissements en amont et sur les bords du bas-fond;
- un tarissement de l'eau dans la rizière à la fin et parfois au cours de la saison culturale.

Trois types de critères sont pris en compte pour déterminer le choix de l'aménagement:

- Des critères techniques, il s'agit essentiellement du régime hydrologique du bassin versant pendant la saison culturale et de la largeur de la plaine qui conditionne la possibilité de construire un collecteur central. Une plaine étroite ne peut contenir une telle infrastructure qui diminue la superficie de terre disponible pour la riziculture.
- Des critères socio-économiques, ils reposent sur le principe que l'aménagement doit être aussi facile que possible à gérer par les utilisateurs et que l'entretien doit être simple et peu coûteux. De ce fait, si les critères techniques le rendent possible, un aménagement en courbes de niveau est préféré, parce que plus facile à gérer et à entretenir.
- Des critères financiers qui concernent essentiellement les frais d'investissement. Un aménagement avec diguettes selon les courbes de niveau coûte en effet 3 fois moins cher à l'hectare que celui avec collecteur central.

L'aménagement avec collecteur central de Moadougou

Caractéristiques de l'ouvrage réalisé et critères de conception

L'aménagement de Moadougou concerne 14% des sols du bas-fond (106 ha sur 750 ha) et 74% de sa longueur. L'aménagement est composé d'un collecteur central, d'environ 9 km de long, situé dans le lit mineur, pour accélérer l'évacuation des crues exceptionnelles. Il est interrompu en deux endroits par un bois sacré et par une mare (figure 61). Le bois sacré a été préservé, le marigot y est encaissé. La mare n'a pas été aménagée en raison de son inondation permanente.

Figure 61 : Aménagement du bas-fond de Moadougou

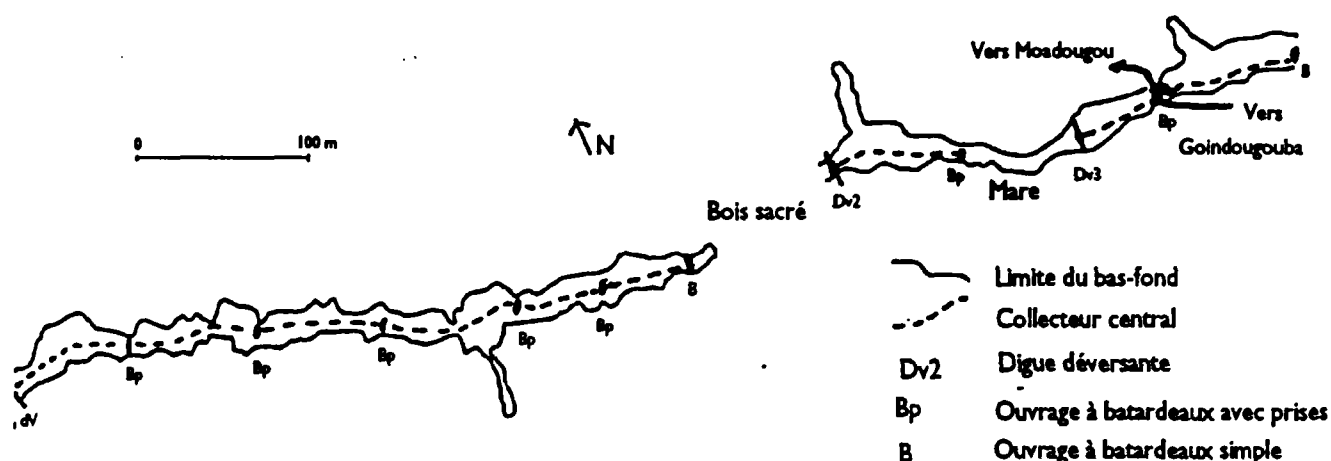
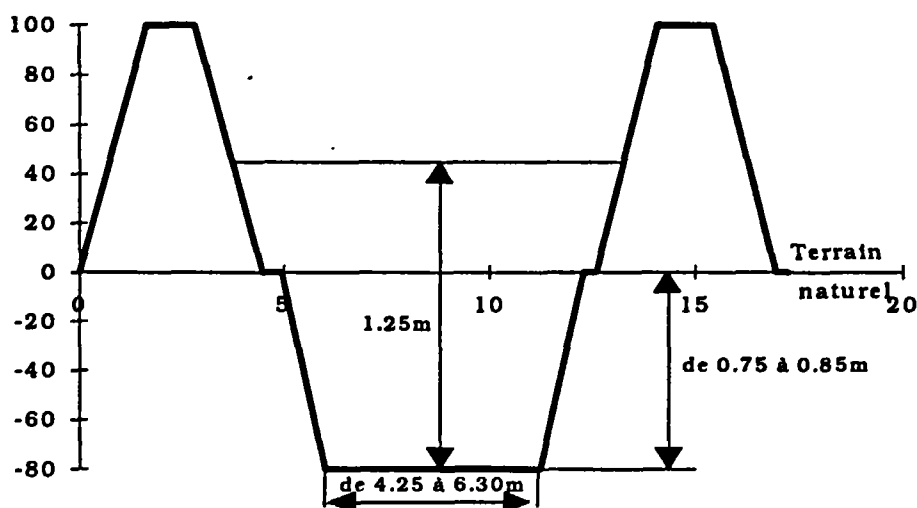


Figure 62 : Caractéristiques du collecteur, coupe transversale



Le collecteur a été dimensionné (figure 62) pour évacuer le volume de la crue décennale en 3 jours, soit un débit variant de $7.57\text{m}^3/\text{s}$ en tête de la plaine aménagée (bassin versant de 70km^2) à $10.35\text{m}^3/\text{s}$ dans le tronçon aval de l'aménagement (bassin versant de 100km^2). La pente du terrain naturel varie d'amont vers l'aval sur le premier tronçon de 0.12 à 0.05%, sur le second de 0.14 à 0.13%.

Pour éviter le sur-drainage de la plaine par le collecteur central, la profondeur en déblai a été maintenue constante de 0.75 à 0.85m sur toute la longueur du canal. En cas de forte crue, l'épandage est assuré par 3 digues déversantes: une en tête d'aménagement, une en aval du bois sacré et la dernière en aval de la mare. Elles sont constituées de remblais de terre compactée, protégés par des perrés maçonnés.

Pour assurer un niveau de l'eau correct dans la rizière, douze ouvrages à batardeaux sont répartis le long du collecteur (environ tous les 700 mètres). Le corps de ces ouvrages de régulation est constitué d'un mur de béton supportant les glissières des batardeaux. Les batardeaux ont une longueur de 1.4 à 1.9m, une hauteur de 0.2m. Ils permettent de remonter la cote de déversement de l'eau de 1m au maximum. Pour faciliter leur manèment, une passerelle enjambant le canal a été construite au droit de chaque ouvrage. Leur fermeture permet de relever le niveau de l'eau, de freiner le drainage du bas-fond et d'éviter la vidange de la nappe.

L'eau stockée dans les différents tronçons peut être utilisée grâce à des systèmes "prise/vidange" pour soutenir le niveau d'inondation dans les rizières en cas de sécheresse et à la fin de la saison des pluies.

Sept ouvrages sont munis de ces systèmes "prise/vidange" (figure 63), ceux situés en aval de chaque tronçon n'en n'ont pas. Trois ouvrages, situés au niveau des digues d'épandage, sont équipés de prises à vannettes près du bord du bas-fond et permettent d'irriguer les parcelles les plus excentrées (figure 64).

Au cours de la saison des pluies, l'évacuation des eaux en excès dans la rizière est assurée par des ouvrages de vidange des deux côtés du collecteur. Ils sont placés à des endroits où les écoulements latéraux en provenance des parcelles sont particulièrement importants et de manière à éviter des débordements qui dégraderaient les cavaliers du collecteur. Les ouvrages avec système de "prise/vidange" décrits précédemment ont un rôle identique en cas d'excès d'eau.

Au niveau de la route Moadougou<->Goindougouba, un ouvrage spécifique a été réalisé pour permettre aux eaux accumulées derrière le radier de transiter par le collecteur sans le détériorer.

En plus des infrastructures hydrauliques, ont été réalisés les aménagements suivants :

- planage des parcelles,
- pistes d'accès,
- curage du marigot en aval des tronçons aménagés de la plaine.

Figure 63 : Ouvrage à batardeaux avec ouvrage de prise/vidange

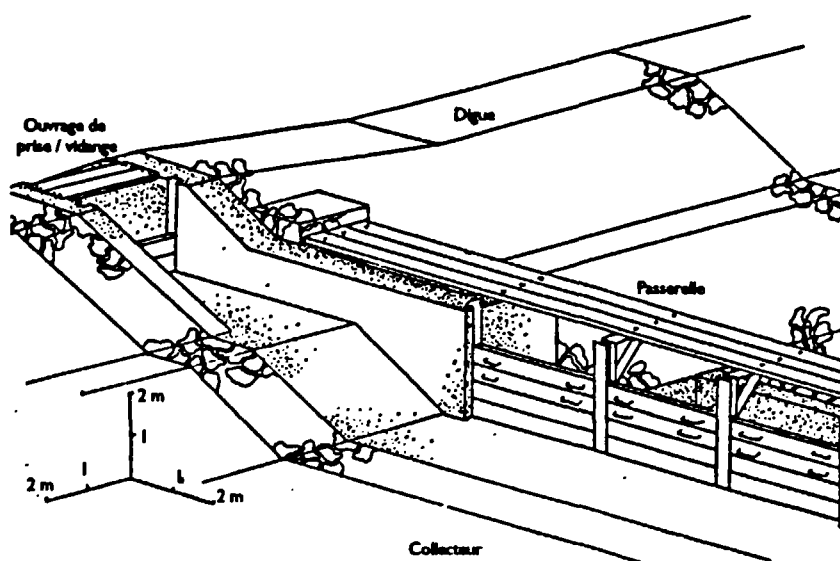
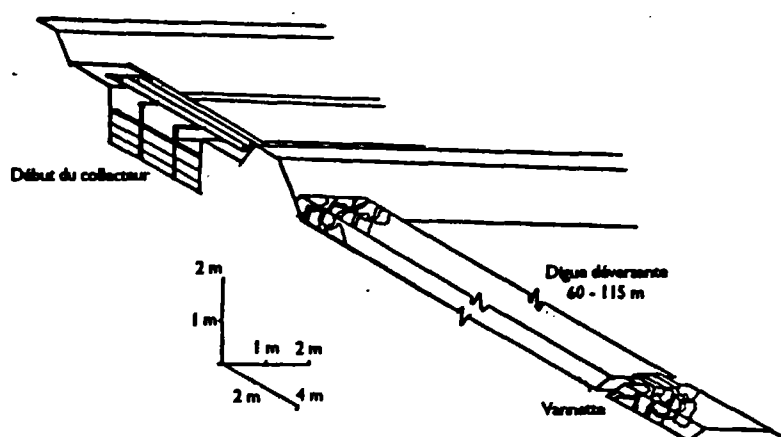


Figure 64 : Digue déversante avec ouvrage à batardeaux



Coût et réalisation de l'aménagement

L'aménagement a été réalisé durant la saison sèche 1983-1984. Un planage grossier des parcelles a été effectué avant la construction de l'aménagement.

- Le collecteur a été entièrement réalisé à la main.
- Le projet ORC s'est chargé de la quasi-totalité des études et travaux de réalisation (aménagistes, chefs de chantiers, ouvriers et manoeuvres payés à la semaine).
- La participation des exploitantes aux travaux s'est limitée à la construction des diguettes parcellaires dont le projet ORC a assuré l'implantation.

Le coût de l'aménagement de Moadougou est estimé à 635 700 FCFA/ha (FED décembre 1986, communication personnelle, NIJBURG C.). Ce coût comprend la main d'oeuvre, les matériaux et les frais de transport (carburants); ne sont pas inclus l'amortissement du matériel utilisé, ni le coût des études, ni le suivi des travaux. Aussi, on retiendra un chiffre de l'ordre de 900 000 FCFA/ha pour ce type d'aménagement.

Distribution des parcelles

La taille de la parcelle attribuée est d'environ 0.2 ha. L'attribution des parcelles a été faite par un comité réuni à cet effet par l'Opération Riz Comoé et comprenant des représentants de l'encadrement, du groupement villageois, des administratifs et des politiques. Les exploitantes possédant une parcelle avant la mise en place de l'aménagement ont été prioritaires.

Un cahier des charges définit les conditions d'exploitation à remplir et à respecter par les rizicultrices dans les zones aménagées. Une redevance annuelle de 1200 FCFA pour une parcelle de 20 ares doit être acquittée par les attributaires.

L'aménagement en courbes de niveau de Kawara

Caractéristiques de l'ouvrage réalisé et critères de conception

L'aménagement de Kawara concerne 36% de la plaine, soit une superficie de 226 ha, 78% de la longueur de la plaine (figure 65).

Le dimensionnement de l'aménagement, constitué par des diguettes en courbes de niveau, a été fait en se basant sur l'étude de SENNEMA (1983), qui estime les pertes de rendement du riz en fonction de la fréquence inter-annuelle de submersion du riz, et de l'étude hydrologique de ce bas-fond (CLAUDE & GUALDE, 1980). Les données d'une station limnimétrique étalonnée en 1980 ont permis d'établir des relations:

- entre la pluie de 3 jours consécutifs et le débit moyen sur la même période, décalée d'une journée;
- entre ce débit et le niveau de l'eau dans la plaine pour différentes hauteurs des diguettes;
- entre la perte de production rizicole et le niveau d'eau dans la plaine provoquant une submersion totale de la culture (Bulletin irrigation et drainage FAO n°33).

La perte de rendement n'ayant été estimée en moyenne qu'à 8%, la différence de coût de réalisation, entre un aménagement avec collecteur central et des diguettes suivant les courbes de niveau, a justifié cette dernière solution. La largeur de la plaine, de l'ordre de 380m (longueur des diguettes selon les courbes de niveau de l'ordre de 500m), rendait possible cette solution qui permet d'évacuer le débit maximum de la crue décennale avec une lame d'eau théorique, déversant sur la diguette, de 0.15m et de répandre uniformément l'eau sur l'ensemble de la plaine. Les diguettes sont en terre compactée, sans ouvrage de déversement renforcé. L'espacement des diguettes a été choisi en fonction de la pente du terrain (Tableau LXVI).

Tableau LXVI : Espacement des diguettes selon les courbes de niveau à Kawara
(Communication personnelle NLJBURG, ORC, 1988)

Pente du terrain %	Distance entre les diguettes en m	Hauteur des diguettes après planage en m	
		amont	aval
0.9	25	0.14	0.36
0.4	45	0.16	0.34
0.1	65	0.22	0.28

Figure 65 : Aménagement de la plaine de Kawara

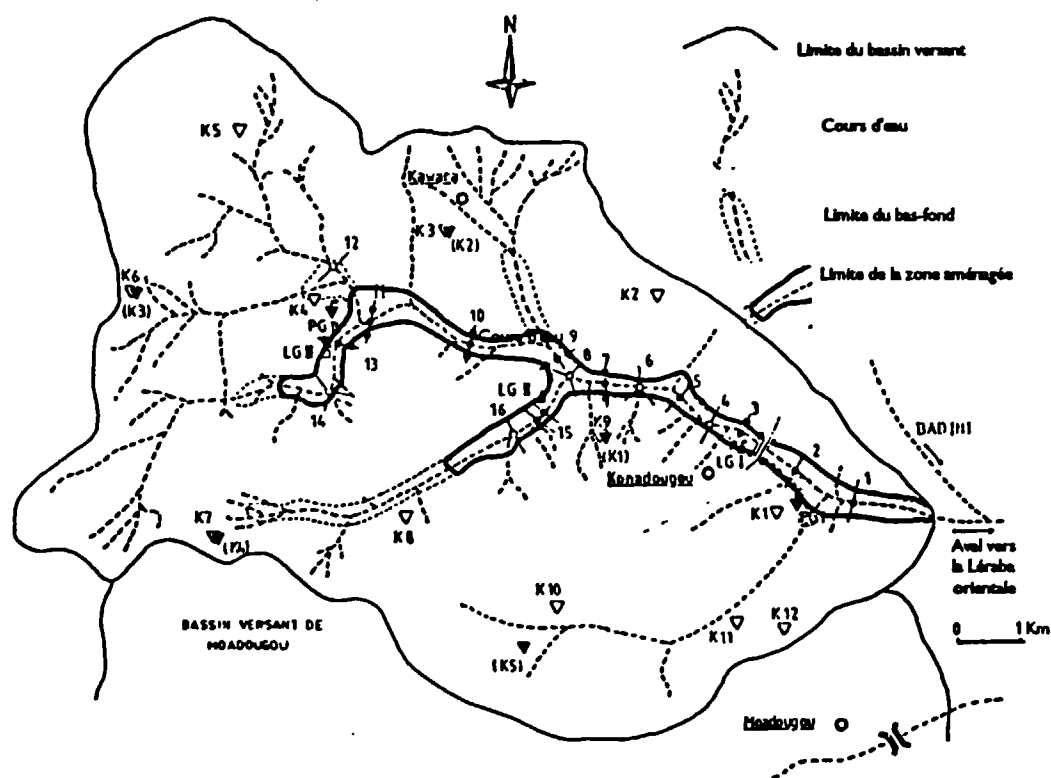
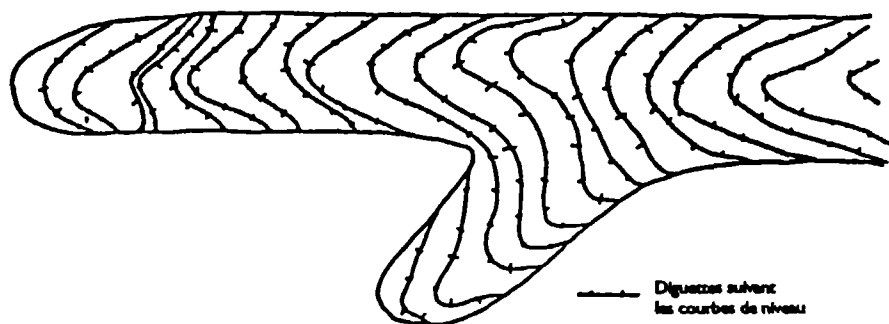


Figure 66 : Schéma d'aménagement avec diguettes suivant les courbes de niveau (FOKKER & WILLE, 1988)



Coût et réalisation de l'aménagement

Le bas-fond de Kawara a été aménagé pendant la saison sèche 1984-1985. Un levé topographique du bas-fond (12.5 points/ha) a servi de base à l'implantation des diguettes par rapport à l'axe de la plaine.

Les diguettes ont été montées et compactées à la main en se servant du sol du lieu d'implantation. Après exécution des diguettes, un planage a été réalisé.

Le coût de l'aménagement de Kawara est estimé à 202 600 FCFA/ha (FED décembre 1986, communication personnelle de NIJBURG); l'amortissement du matériel, les frais d'études et de suivi des travaux n'étant pas compris dans cette estimation, nous retiendrons un coût à l'hectare de 300 000 FCFA.

Attribution des parcelles

La taille des parcelles attribuées n'est en moyenne que de 0.2ha et les conditions d'attribution sont les mêmes qu'à Moadougou.

LE SITE PILOTE DE KAMBO AU SUD DU MALI

Le barrage demi-souterrain

Critères de choix et objectifs retenus

Pendant 5 années consécutives, de 1981 à 1985, le riz cultivé traditionnellement dans le bas-fond de Kambo avait souffert d'un assèchement précoce de la rizière. Cette sécheresse de fin de cycle avait remis en cause la pratique de cette culture. Lorsque les écoulements de surface cessent, la descente de la nappe est très rapide, de 1.5 à 4 cm/jour, et ne permet pas une sécurisation de la culture. Pour éviter cette descente rapide de la nappe et réguler le niveau de l'eau dans la rizière, un aménagement de type micro-barrage demi-souterrain a été réalisé.

Il a été construit à la demande des villageois avec l'appui technique du projet Micro-réalisations de Kadiolo (financement canadien) et de l'AFVP (1987).

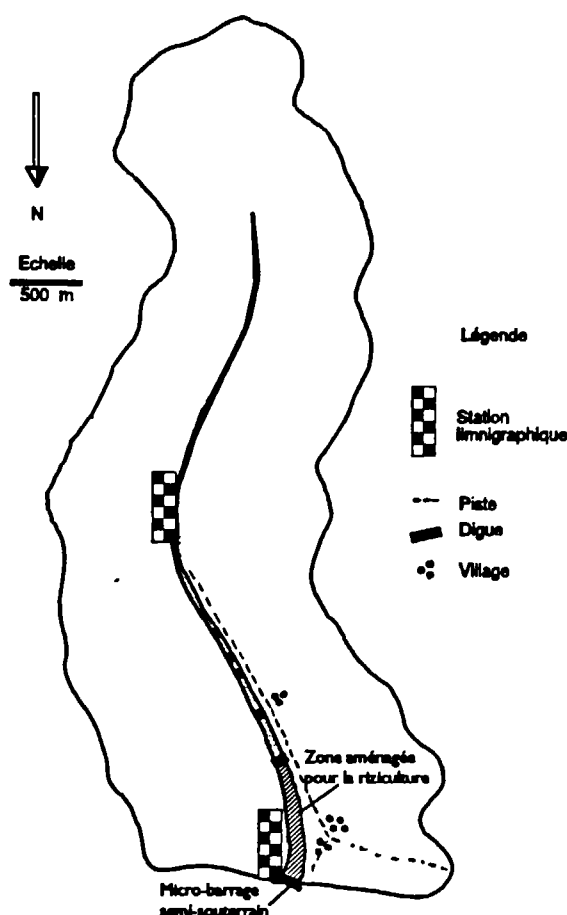
Cet ouvrage avait pour objectif de maintenir une lame d'eau sur 5.5ha en amont par la construction:

- * d'une digue déversante permettant de régulariser le niveau de l'eau en amont et de pratiquer la riziculture sur l'ensemble de la surface de la retenue (profondeur maximale de l'eau 0.64m);
- * d'un parafouille sous le corps de la digue permettant de diminuer les infiltrations et de ce fait la vitesse de vidange de la retenue;
- * de sécuriser la culture sans remettre en cause le parcellaire traditionnel.

Caractéristiques de l'ouvrage

La surface du bas-fond de Kambo est d'environ 25ha, pour une longueur de 5.5km et une largeur variant dans la zone rizicultivée de 60m à l'amont à 120m à l'aval (figure 67).

Figure 67 : Place de l'aménagement dans le bas-fond de Kambo



L'ouvrage est composé:

- * D'un muret déversoir en béton cyclopéen (hauteur maximale par rapport au terrain naturel 0.64 m, largeur 0.50 m), ancré de 0.50 m dans le terrain naturel. Il coupe tout le bas-fond, 113.50 m, et permet d'évacuer la crue décennale (12 m³/s) avec une lame déversante de 0.17 m. Ce muret est protégé en amont par un massif en terre compactée recouvert d'une paroi maçonnée (talus de pente 1 m pour 2) et en aval par un massif de pierres libres. Ce dernier choix sous-entend un coefficient de sécurité décennal faible de 1.3.
 - * D'un parafouille placé sous la digue et réalisé en argile compactée ayant une profondeur maximum de 1.70 m et une largeur de 1 m. La profondeur a été décidée après reconnaissance des sols du site (affleurement des carapaces latéritiques).
 - * D'un pertuis batardable de 1 mètre de large muni de bajoyers en maçonnerie et permettant de réguler le niveau de l'eau en amont.
- Les figures 68 et 69 représentent respectivement une vue d'ensemble et une coupe du barrage demi-souterrain.

Figure 68 : Schéma d'un aménagement type barrage demi-souterrain (AFVP, 1987)

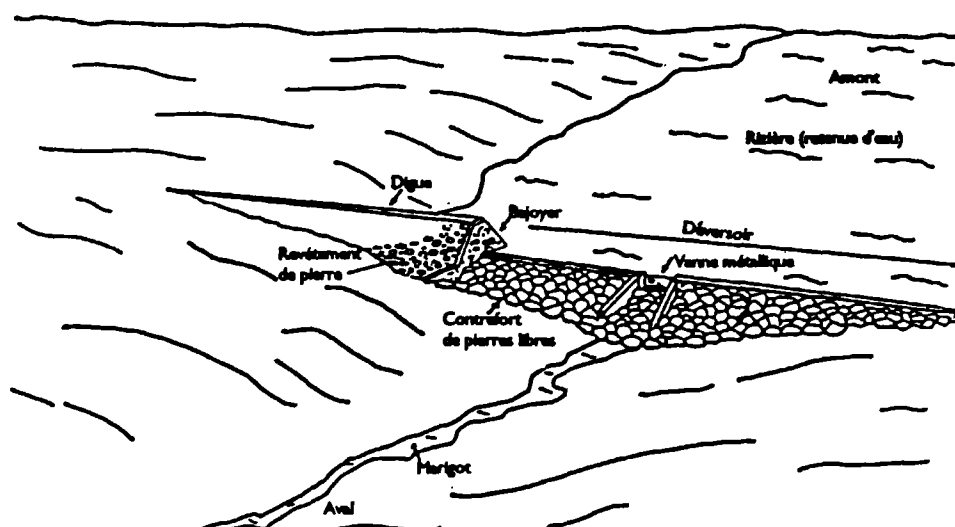
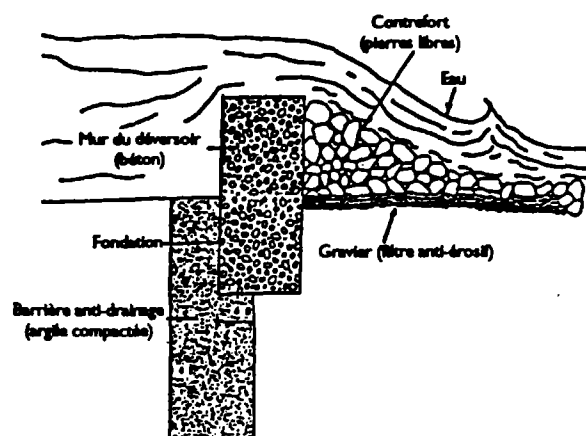


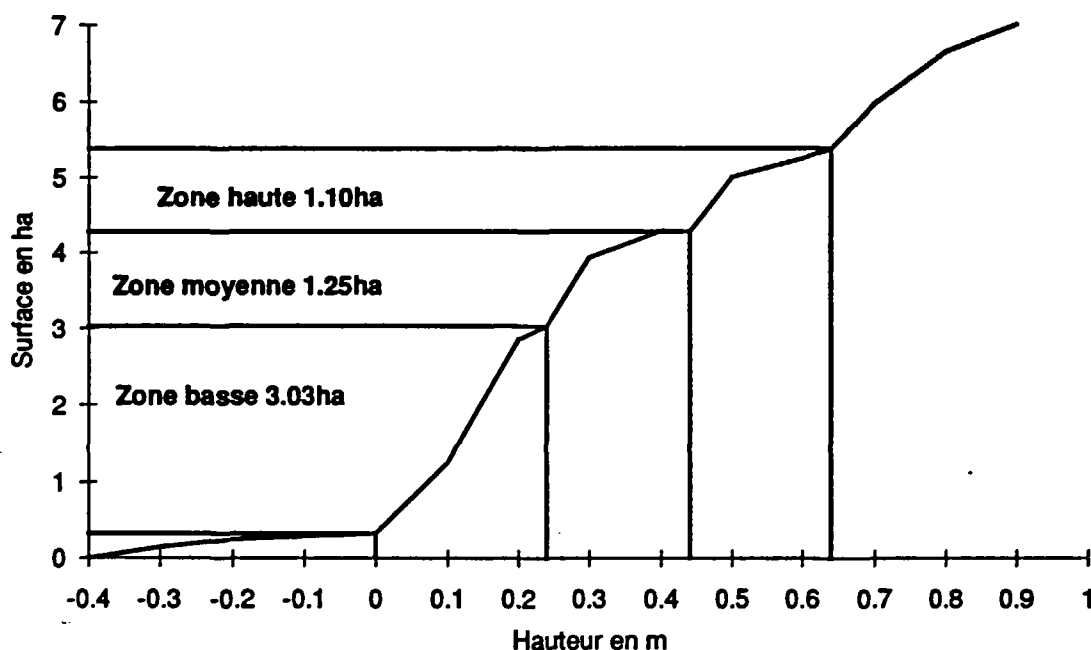
Figure 69 : Coupe schématique du barrage de Kambo (AFVP, 1987)



La zone sécurisée a été divisée en 3 franges suivant la hauteur du plan d'eau (figure 70):

- 3.3 ha en zone basse, hauteur maximale de l'eau 0.64 m: riz semé en pluvial, variété à paille longue photo-périodique;
- 1.25 ha en zone moyenne, hauteur maximale de l'eau 0.40 m: riz repiqué, variété à cycle de 130-140 jours;
- 1.1 ha en zone haute, hauteur maximum de l'eau 0.20 m: riz repiqué ou pluvial à cycle de 120-130 jours.

Figure 70 : Courbe hauteur-surface au barrage de Kambo



Coût et réalisation de l'aménagement

L'aménagement a été réalisé au cours de la saison sèche 1987-1988. Le tableau LXVII donne le devis estimatif de l'aménagement et de la participation paysanne. Celui-ci s'est élevé à 4 161 900 FCFA pour 5.38 ha, soit 774 000 FCFA/ha, dont 2 114 400 FCFA en travail non rémunéré et 2 047 500 FCFA en dépenses effectives.

En plus de l'investissement humain, le groupement villageois de Kambo a contribué au financement des travaux pour un montant de 600 000 FCFA. Le coût financier de l'hectare sécurisé est de 386 500 FCFA dont 70% ont été subventionnés par le projet micro-barrage. Le groupement villageois a participé à 65% de la valeur de l'ouvrage incluant argent et travail humain.

Une étude sur les aménagements de bas-fonds (GADELLE, 1989) a estimé qu'avec un encadrement malien, le coût moyen d'un aménagement de bas-fond serait de 5 000 000 FCFA, dont 1 000 000 FCFA en travail non rémunéré.

Attribution des parcelles

Pratiquement toutes les parcelles rizicultivées avant l'aménagement ont pu être restituées aux paysannes; aucune redistribution n'a été effectuée, évitant en cela tout problème foncier auquel se heurte bien souvent la mise en valeur ultérieure des aménagements.

Tableau LXVII : Devis estimatif et quantitatif du barrage semi-souterrain de Kambo

Désignation	Quantité	Unité	Réalisation des travaux par la main d'oeuvre extérieure au village ou achat matériaux		Réalisation des travaux par les villageois			Coût total
			Coût unitaire Cfa	Coût cfa	Temps de travail unitaire	Temps de travail en jours	Valeur reflet	
1 Terrassements								
1.1 Déblai: tranchée étanchéité	188	m3			3	564	451 200	451 200
1.2 Remblai compacté								
1.2.1 Tranchée étanche	188	m3			6	1 128	902 400	902 400
1.2.2 Digué	53	m3			6	318	254 400	254 400
2 Maçonneries								
2.1 Mur digue et perré	34	m3	40 000	1 360 000	10	340	272 000	1 632 000
3 Enrochements								
3.1 Perrés	20	m3			0.5	10	8 000	8 000
3.2 Pierres libres	88	m3			0.5	44	35 200	35 200
4 Batardeaux	2	unit	75 000	150 000				150 000
5 collecte des matériaux moellons de latérite, sable/graviers, moellons, enrochement	28 14 108	m3			1.5 2.5 1.5	42 35 162	33 600 28 000 129 600	33 600 28 000 129 600
6 Frais de transport matériaux (3km)	150	m3	1 050	157 500				157 500
7 Frais étude et suivi				380 000				380 000
Total				2 047 500		2643	2 114400	4 161 900

LE SITE PILOTE DE DJIGUINOU EN CASAMANCE

Le barrage anti-sel

Objectifs de développement et choix du type d'aménagement

L'objectif de l'aménagement était la récupération des sols salés afin d'y réintroduire la riziculture ainsi que la protection des zones exploitées contre les intrusions marines.

Sur le site de Djiguinoum:

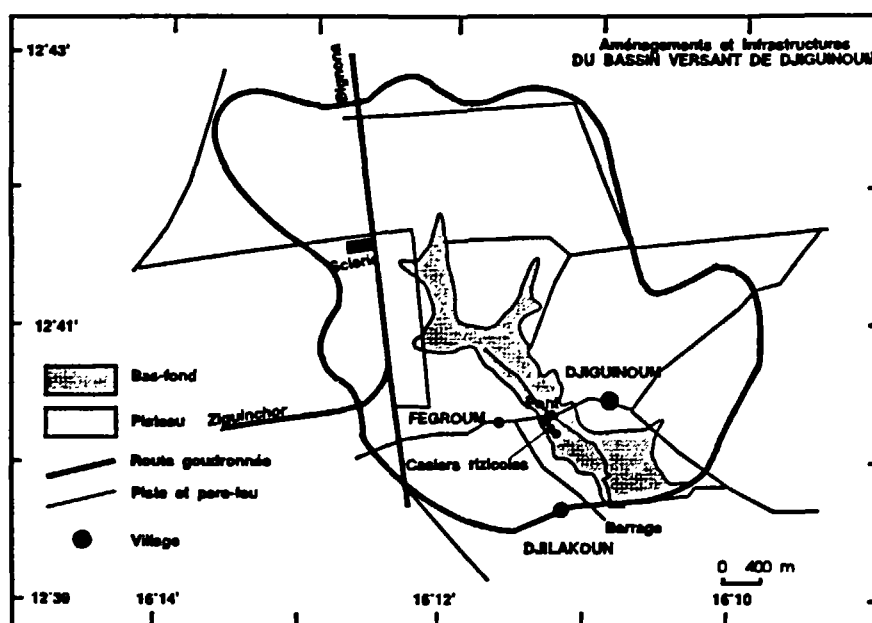
- 90ha de sols sont à récupérer,
- 50ha de sols sont à protéger.

Pour remédier à cette situation, il a été réalisé, à l'aval de la vallée, une digue munie d'une passe batardable ayant pour objectif:

- de stopper l'intrusion des eaux marines,
- d'évacuer les sels lessivés pendant toute la période de culture en profitant des niveaux d'eau de la marée basse en aval de l'ouvrage.

La figure 71 montre la situation de l'ouvrage anti-sel et les infrastructures du bassin versant de Djiguinoum.

Figure 71 : Aménagements et infrastructures du bassin versant de Djiguinoum



Caractéristiques de l'ouvrage

Le barrage anti-sel comprend:

- une digue en terre compactée, sans tranchée d'étanchéité, le tableau LXVIII en donne les caractéristiques;
- une passe, au niveau du lit principal, présentant 3 ouvertures munies de batardeaux dont la hauteur est prévue pour empêcher l'intrusion des plus hautes marées.

Tableau LXVIII : Caractéristiques de la digue anti-sel.

Longueur de la digue:	245	m
Largeur en crête:	2.2	m
Largeur d'assise:	5	m
Hauteur moyenne:	1	m
Volume de la retenue	300 000	m ³

De 1985, date de réalisation de l'ouvrage, à 1987, aucun dessalement tangible des sols n'a été observé (BOIVIN & BRUNET, 1990). A partir de cette constatation, il est apparu indispensable d'initier une gestion rationnelle de ce barrage. A cette fin, en 1988, le dispositif à batardeaux d'un des pertuis a été modifié pour permettre la vidange par le fond des eaux stockées par la digue.

Il s'agit d'une porte pleine actionnée verticalement par une crémaillère. Ce système a l'avantage d'être fonctionnel pendant tout l'hivernage et simple d'utilisation. Les deux autres pertuis ont été équipés de ce dispositif en 1989. La figure 72 donne le plan des pertuis, la figure 73 celui des portes levantes de régularisation du niveau d'eau en amont de la digue.

Figure 72 : Plan du pertuis du barrage anti-sel de Djigounoum

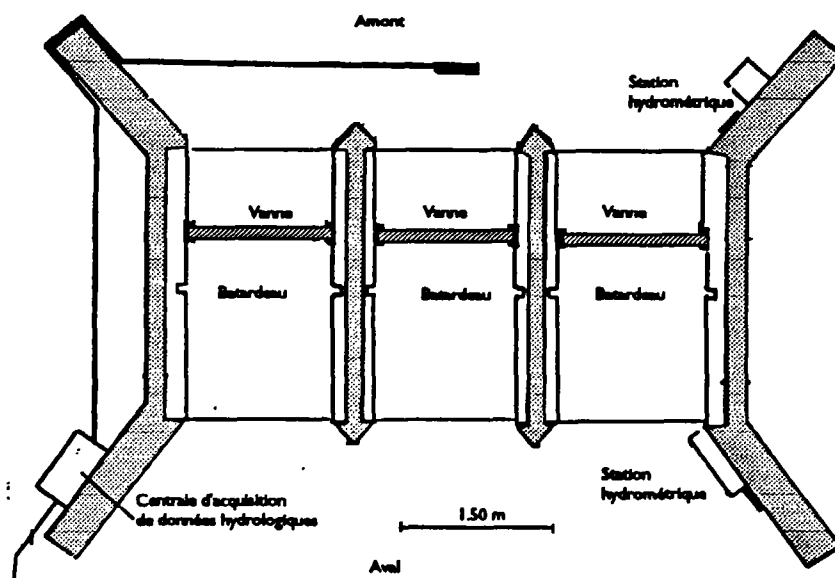
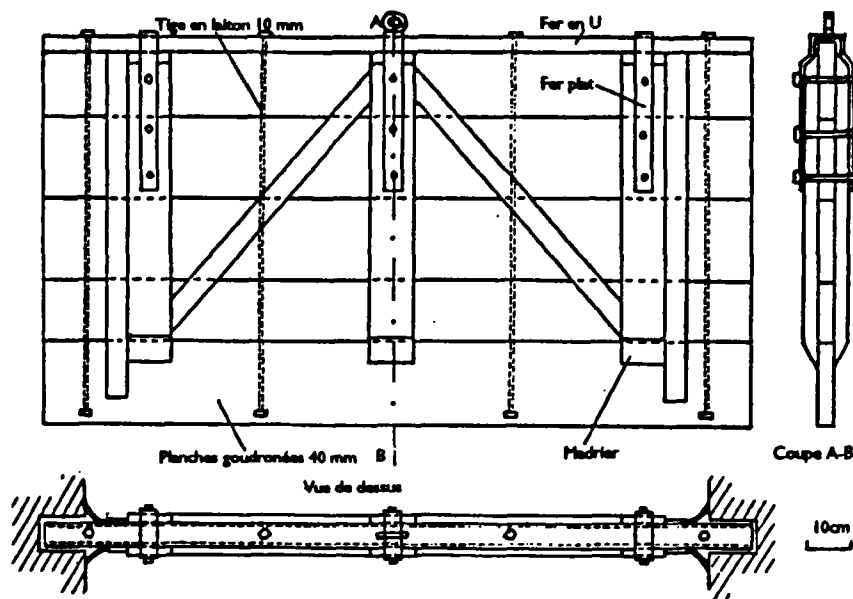


Figure 73 : Plan des portes levantes du barrage anti-sel de Djigounoum



Coût et réalisation de l'aménagement

Une route en remblai existait sur le site de la digue. Elle a été utilisée, ce qui explique l'absence d'un massif d'étanchéité. L'estimation du coût de l'ouvrage a été fait sans tenir compte de la piste préexistante. Elle intègre les travaux de rectification des chenaux de drainage et de reconstruction des casiers par les paysans dans la zone stérile. Ces travaux n'ont pas été réalisés à l'exception de ceux à titre expérimentaux faits par le projet. Le coût global de l'aménagement serait de:

- 102 315 FCFA/ha récupéré,
- 76 736 FCFA/ha protégé.
- 32% de la valeur des travaux ont été réalisés par les paysans (prix reflet de la main-d'oeuvre: 2 100 FCFA/jour). Le tableau LXIX donne un devis estimatif du coût de l'aménagement.

Tableau LXIX : Devis estimatif des aménagements nécessaires à la réhabilitation du bas-fond de Djigounoum.

Désignation	Unité	Quantité	Entreprise		Paysan			Total Fcfa
			Prix unitaire Fcfa	Prix Fcfa	Main d'oeuvre unitaire h ^{ij}	Main d'oeuvre h ^{ij}	Prix Fcfa	
1 Terrassements								
Excavation	m3	493	1 500	739 500				739 500
Remblais en terre	m3	546	1 200	655 200				655 200
Remblais en latérite	m3	434	1 600	694 400				694 400
Fourniture d'eau d'arrosage	m3	250	50	12 500				12 500
Compactage	m3	980			0.5	490	1 029 000	1 029 000
Débroussaillage, nettoyage, scarification	m2	2394			0.175	418	877 800	877 800
2 Génie civil								
Matériaux (PIDAC)	Unité	1	1 360 600	1 360 600				1 360 600
Main d'oeuvre (PIDAC)	Unité	1	912 500	912 500				912 500
Réfection des vannes	Unité	3	345 800	1 037 400				1 037 400
3 Aménagement rizière	ha	90			3.5	315	661 500	661 500
4 Rectification des chenaux de drainage	ha	90			2	180	378 000	378 000
5 Frais de chantier	unité	1	850 000	850 000				850 000
Total				6 262 100		1 403	2 946 300	9 208 400

COMPARAISON ENTRE AMENAGEMENTS

Les coûts

Le tableau LXX récapitule, pour chacun des sites suivis, les coûts des aménagements à l'hectare, la part prise en charge par des subventions (financement extérieur) et celle fournie par les paysans sous forme de main-d'oeuvre ou de financement villageois.

Tableau LXX : Coûts de réalisation des aménagements en FCFA/ha

Site	Yatenga digue filtrante	Yatenga micro-barrage	Comoé collecteur central	Comoé digues de courbe de niveau	Mali-Sud barrage semi-souterrai	Casamance barrage anti-sel
Surface aménagée en ha	3	3	106	226	5	120
Coût total à l'hectare Fcfa	875 417	4 558 650	900 000	300 000	832 380	76 236
Subventions Fcfa	467 084	2 174 117	900 000	300 000	289 500	52 185
Investissement Humain Fcfa	408 333	2 384 533	0	0	422 880	24 051
Financement paysan Fcfa	0	0	0	0	120 000	0
Homme*jour par hectare Fcfa	510	2 980	0	0	530	12

Le tableau LXXI récapitule, en pourcentage du coût total de l'aménagement, la part des subventions, celle des investissements humains et celle du financement paysan.

Tableau LXXI : Ventilation du coût de l'aménagement entre les différents intervenants

Site	Yatenga digue filtrante	Yatenga micro-barrage	Comoé collecteur central	Comoé digues de courbes de niveau	Mali-Sud barrage semi-souterrai	Casamance barrage anti-sel
% Subventions	53	48	100	100	35	68
% Investissement Humain	47	52	0	0	50	32
% Financement paysan	0	0	0	0	15	0

Ce tableau montre que dans le cas des micro-aménagements de régulation des écoulements dans un bas-fond, la part de l'investissement humain représente en moyenne 50% du coût des ouvrages.

Les objectifs de production

Le coût de l'ouvrage, sa répartition entre les différents intervenants et le temps de travail investi pour sa réalisation permettent de définir les objectifs de production à atteindre pour assurer leur rentabilité (tableau LXXII & LXXIII), en partant des hypothèses suivantes:

- le surcroît de production doit permettre, au cours de la vie de l'ouvrage, le remboursement de la subvention accordée;
- le surcroît de production doit être, au cours de la vie de l'ouvrage, au moins égal à l'investissement humain réalisé par les paysans, ou de même niveau que la production sur les sols non dégradés lorsque le bas-fond a été réhabilité;
- la durée de vie des ouvrages est de 15 ans;
- le prix moyen du paddy sur le marché international est de 40 FCFA/kg sur les 15 prochaines années;
- le prix moyen du paddy dans les pays concernés est de 65 FCFA/kg sur les 15 prochaines années;
- le taux d'intérêt est de 8.5% pour les crédits;
- lorsque l'objectif de production dépasse 2 T/ha, on prendra en compte des charges d'intensification (coût des intrants) évaluées, en 1991, à 44 000 FCFA/ha pour le riz, 25 000 FCFA/ha pour le sorgho;
- le rendement initial est nul pour le riz au Yatenga, de 400 kg/ha pour le sorgho; en riz, il est de 800 kg/ha dans la Comoé et au Mali-Sud, de 600 kg/ha en Casamance sur les zones non dégradées;
- toute la surface sous influence de la digue filtrante au Yatenga est mise en valeur;
- les coûts annuels d'entretien sont de 2% du coût initial de l'aménagement (5% en Casamance);
- tous les frais financiers de culture doivent avoir un taux de rentabilité de 100% pour être acceptés par les paysans.

Tableau LXXII : Evaluation des objectifs de production en t/ha pour rentabiliser les investissements extérieurs.

Site	Yatenga digue filtrante	Yatenga micro-barrage	Comoé moyenne	Mali-Sud barrage demi-souterrain	Casamance zone non cultivée	Casamance zone cultivée
Surplus de production pour rentabiliser la subvention	0.83	5.17	1.18	0.68	0.12	0.12
Production initiale	0.4	0	0.8	0.8	0	0.6
Charge d'entretien	0.19	1.01	0.11	0.18	0.02	0.02
Encadrement exploitation	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Evaluation intermédiaire, objectifs de production	1.49	6.25	2.16	1.73	0.21	—
Encadrement vulgarisation	—	0.07	0.07	—	—	—
Charge d'intensification	—	0.88	0.88	—	—	—
Objectif de production pour rentabiliser la subvention et assurer la gestion de l'aménagement	1.49	7.20	3.11	1.73	0.21	0.81

Tableau LXXIII : Evaluation des objectifs de production en t/ha pour rentabiliser les investissements paysans.

Site	Yatenga digue filtrante	Yatenga micro-barrage	Comoé moyenne	Mali-Sud barrage semi-souterrain	Casamance zone non cultivée	Casamance zone cultivée
Surplus de production pour rentabiliser l'investissement villageois	0.31	2.44	0.00	0.70	0.02	0.02
Production initiale	0.4	0.00	0.80	0.80	0.00	0.60
Charge d'entretien	0.19	1.01	0.11	0.18	0.02	0.02
Encadrement exploitation	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
Evaluation intermédiaire, objectif de production	0.97	3.52	0.98	1.75	0.11	0.71
Encadrement vulgarisation	---	0.07	0.07	---	---	---
Charge d'intensification	---	0.88	0.88	---	---	---
Objectif de production paysan	0.97	5.35	2.81	1.75	0.71	0.71

Ces tableaux conduisent aux commentaires suivants:

➡ Au Yatenga, les aménagements de type micro-barrage ont avant tout une vocation hydraulique, humaine et pastorale. La seule valorisation agricole ne permet pas de rentabiliser le travail investi ni le montant des subventions. Le suivi de la mise en valeur agricole aura pour objectif d'évaluer la part de l'alimentation en eau des populations et des animaux dans le coût du barrage et de la comparer avec des solutions alternatives (forages, puits, etc).

➡ La digue filtrante de Bidi semble permettre la rentabilité du travail des villageois, la rentabilité des subventions est plus difficile. L'évaluation du fonctionnement de l'aménagement et de sa mise en valeur devra confirmer ces hypothèses et montrer si, pour rentabiliser les subventions, l'intensification est nécessaire.

- ➡ La rentabilité des aménagements réalisés par l'Opération Riz Comoé passe nécessairement par l'intensification; cette analyse rejoint la politique incitative de l'ORC (attribution des parcelles, cahier des charges...). L'évaluation aura pour objectif d'estimer les performances et l'intérêt des rizicultrices à adhérer au processus d'intensification, compte tenu des contraintes du système agraire.
- ➡ Dans le cas des micro-barrages réalisés dans la zone Mali-sud, la rentabilité de la subvention, de l'investissement humain et financier des paysans coïncident. Il s'agira d'évaluer si cet objectif de production peut-être atteint sans intensification par le seul fait d'améliorer le niveau de la maîtrise de l'eau.
- ➡ L'intérêt du barrage anti-sel est flagrant, encore faudra-t-il confirmer que les zones salées peuvent effectivement être mises en valeur uniquement par la gestion hydraulique appropriée et les techniques culturales adaptées.

Cette analyse, en ne retenant que des objectifs de rendements moyens, ne prend pas en compte les variations inter-annuelles des rendements. Un des objectifs de l'aménagement est de sécuriser la production pour les années à faible pluviométrie et de permettre ainsi:

- une meilleure valorisation du travail dans la rizière;
- l'intensification de la riziculture, dans la mesure où son risque économique devient acceptable pour les cultivateurs.

Deux politiques différentes de mise en valeur agricole des bas-fonds ont donc été étudiées. La première, illustrée dans le projet Comoé, a pour objectif l'adaptation du système de production aux innovations proposées. Elles misent sur une intensification qui est indispensable pour assurer la rentabilité des investissements. Cette politique est justifiée par la part qu'occupe le riz dans la consommation locale.

Au contraire, la seconde, illustrée dans les projets Mali-Sud et Casamance, vise seulement la sécurisation ou la réhabilitation des conditions traditionnelles de mise en valeur. La décision de l'intensification est laissée à l'initiative des agriculteurs. Ce type d'intervention s'intègre tout à fait dans une démarche de gestion des terroirs.

LA MAITRISE DE L'EAU ET SON IMPACT SUR LA PRODUCTION AGRICOLE

Les thèmes suivants sont étudiés dans ce chapitre :

- le niveau de maîtrise de l'eau obtenu dans les aménagements et la gestion des ouvrages de régulation;
- l'évaluation du niveau de sécurisation interannuelle de la production et ses conséquences sur l'intensification des cultures;
- la comparaison entre les objectifs hydrauliques initiaux et ceux réellement atteints sur les différents sites.

EN ZONE SAHELIENNE AU YATENGA

Aménagement de type digue filtrante

L'évaluation de l'impact de la digue filtrante sur l'alimentation en eau des cultures a été faite en comparant, pour une même année et pour un même indice de rendement: les surfaces concernées par cet indice en amont de la digue.

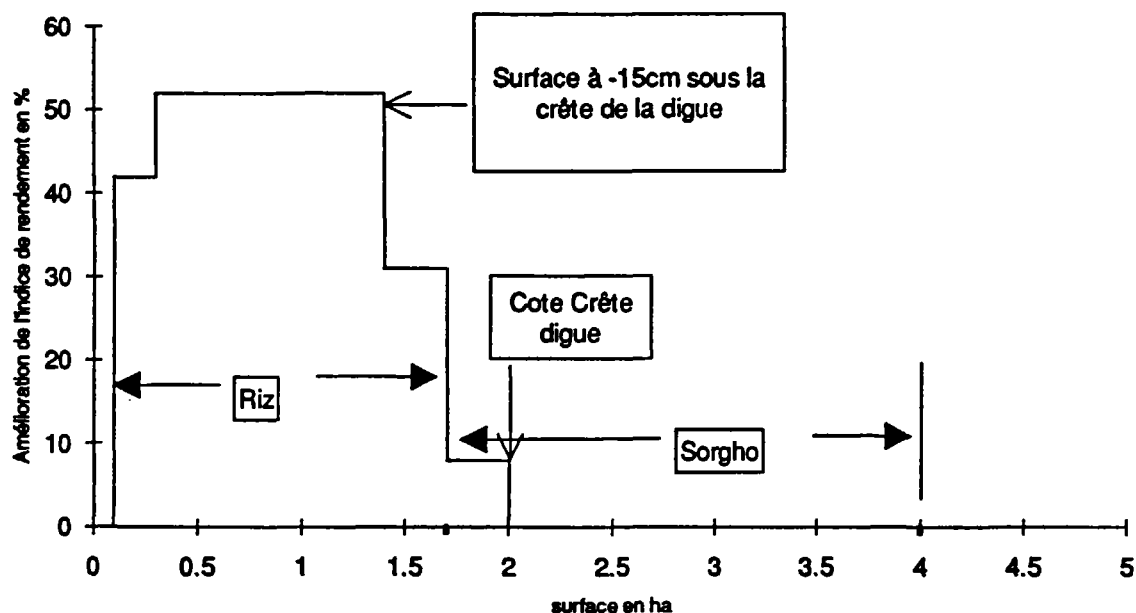
Le bilan hydrique des cultures a été calculé pour un sorgho de 120 jours (RU=100 mm) et un riz semé en même temps (RU=50 mm). L'année pluviométrique retenue a été 1989, année dont la pluviométrie cumulée est moyenne, mais mal répartie. L'indice de rendement utilisé rend compte du niveau de satisfaction des besoins en eau de la culture pendant le cycle végétatif et pendant la période critique (floraison, maturation). En culture pluviale, il est statistiquement lié au rendement par une relation de type linéaire (FOREST & REYNIERS, 1985). Le tableau LXXIV fournit, pour les cultures de riz et de sorgho, les indices de rendement et les surfaces concernées avec et sans aménagement.

**Tableau LXXIV : Variation de l'indice de rendement des cultures
sur la surface sous influence de la digue (4ha).**

Culture	Rendement		Surface ha	
	indice	type	avec digue	sans digue
Riz	0.78	bon	1.7	0.1
	0.55	médiocre	--	0.3
	0.51	faible	2.3	3.6
Sorgho	0.84	bon	1.7	0.5
	0.69	médiocre	0.3	0.35
	0.64	faible	2.0	3.15

La figure 74 illustre l'amélioration de l'indice de rendement en fonction de la surface sous influence de la digue en tenant compte des objectifs initiaux de l'aménagement: 1.4 ha de riz et 2.6 ha de sorgho.

Figure 74 : Pourcentage d'amélioration de l'indice de rendement en fonction de la surface sous influence de la digue.

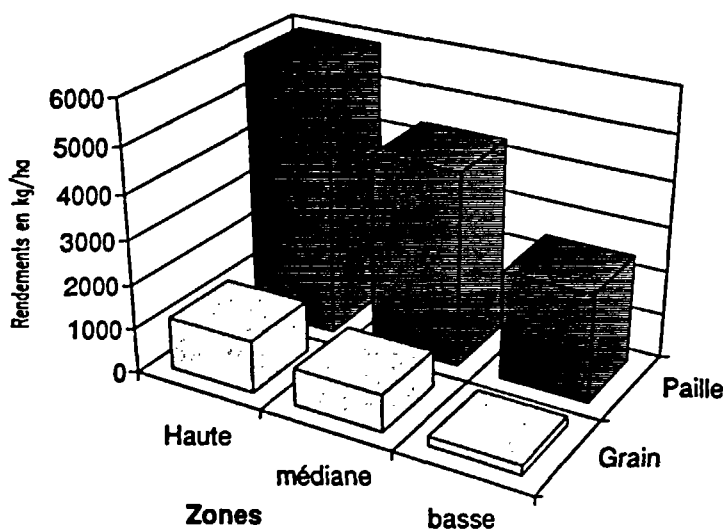


Cette figure et le tableau précédent montrent:

- que l'indice maximum de rendement n'est guère amélioré par la digue filtrante, mais sa surface d'application a augmenté (x1.89);
- que l'effet de la digue se limite à la surface correspondant à la cote de la crête et non à la surface qui correspond à une cote de 25cm supérieure à celle de la digue.

La culture du sorgho ne doit pas être pratiquée à un niveau inférieur à 15cm au-dessous de la crête de la digue. Au-dessous de cette cote, les problèmes d'engorgement des sols nuisent à la culture du sorgho (figure 75).

Figure 75 : Rendements en grain et en paille d'une variété locale de sorgho selon la position topographique dans le bas-fond de Bidi en saison des pluies 1991 (ZIDA M., 1992)



En conclusion, la surface effectivement sous influence de la digue filtrante se limite à celle qui correspond à la crête de la digue. Aucun problème d'entretien ne s'est posé depuis sa construction en 1987.

Aménagement de type micro-barrage

La gestion du barrage a fait l'objet d'un calendrier de pose des batardeaux qui avait pour objectif de concilier la mise en valeur agricole et le stockage des eaux superficielles dans la retenue auquel les villageois sont très attachés. Il était prévu (SERPANTIE, 1988):

- une ouverture complète de la passe jusqu'à la fin du mois de juillet (surface minimum inondée: 0.5ha);
- une fermeture de la passe sur une hauteur de 40cm à partir du 1^{er} août, par la pose de 2 batardeaux (surface minimum inondée: 1.25ha);
- une fermeture de la passe sur une hauteur de 70cm le 15 août, par la pose de 2 batardeaux supplémentaires (surface minimum inondée: 3ha);
- une fermeture complète de la passe à partir du 1^{er} septembre (hauteur 1m, surface minimum inondée: 5ha).

Cette gestion devait permettre une extension maximale de la riziculture. Cette extension s'est révélée très difficile à mettre en oeuvre, du fait de la mauvaise répartition des pluies et des crues.

- En 1988, les pluies déficitaires jusqu'à la mi-juillet ont retardé les semis du riz, qui ont été noyés dans les zones basses en août, période où les pluies ont été excédentaires. La dernière crue (31 août) n'a pas permis de remplir la retenue, ni de sécuriser l'alimentation en eau du riz dans les parcelles hautes. Seules 20% des parcelles ont été récoltées.
- En 1989, sous la pression des villageois, la passe centrale a été totalement fermée dès le début juillet. Dans les zones basses de la retenue, la riziculture a donc été abandonnée (0.5ha). La culture du riz n'a souffert d'un manque d'eau qu'en fin de cycle du fait de l'absence de forte crue après le 15 août. Les rendements en riz ont été estimés en moyenne à 1T/ha, pour une superficie cultivée d'environ 0.9ha.
- En 1990, un mois d'août exceptionnellement sec (53mm) a provoqué un assèchement de la retenue à partir du 20 septembre. Seule une frange de 0.75ha a fourni un rendement de 0.4 à 0.6T/ha.
- En 1991, la passe centrale a été fermée encore plus précocement sous la pression des anciens du village. La fermeture complète de la passe n'a permis la culture du riz que sur une dizaine de parcelles en amont du barrage (0.2ha), mais une superficie à peu près équivalente a été cultivée en aval de la digue (fuites). Les rendements en grain ont été de 1.4 à 2 tonnes par hectare.

En conclusion, le barrage, dans les conditions actuelles de son utilisation, n'est exploité que sur 0.5ha, (0.4ha en riziculture, 0.1ha en culture de contre-saison).

L'effet du barrage sur la recharge de la nappe est indéniable. Il a été évalué à partir de 5 lignes piézométriques:

- n° 1, en amont de la digue filtrante;
- n° 2, au niveau de la digue filtrante;
- n° 3 et 4, en amont du barrage,
- n° 5, en aval du barrage.

Dans la zone centrale du bas-fond de Bidi, sur la ligne n° 4, dans le bief Gourga-Tilli en amont du micro-barrage, on observe une remontée de 1.3m, de 1987 à 1990, du niveau des basses eaux de la nappe phréatique superficielle. Ce rehaussement n'est observé ni sur la ligne 3, ni sur la ligne 2. Sur la ligne 1 et sur la ligne 5, on observe plutôt une chute de 0.40 à 0.50m du niveau des cotes piézométriques, consécutive à deux années de faible hydraulicité: 1988 & 1989. Ce rehaussement du niveau des basses eaux de la nappe phréatique place celle-ci à 4 mètres du sol dans la zone centrale du bas-fond en amont du barrage au lieu de 5.6 m sur la ligne n°3 et plus de 8 m sur les lignes 5, 2 & 1 (CARLIER & al, 1992).

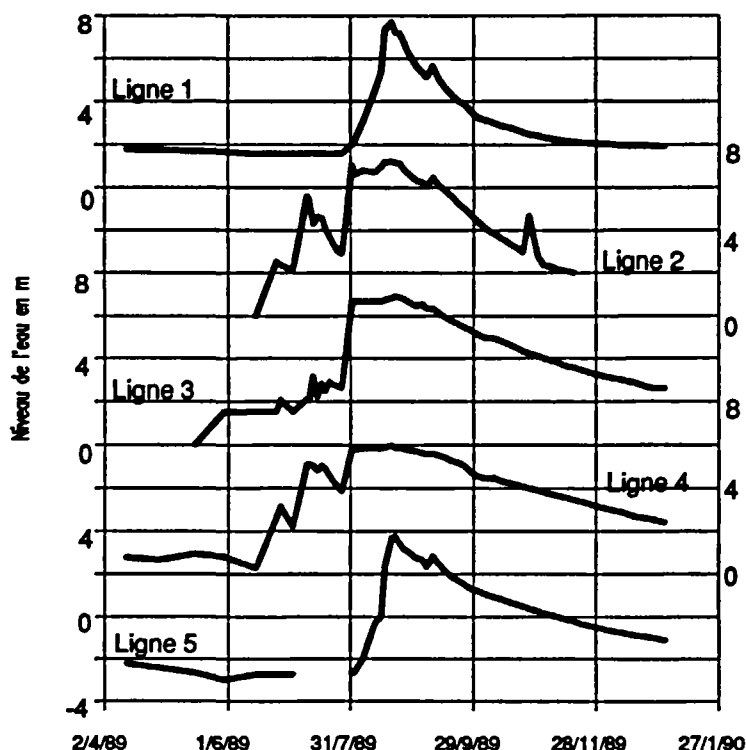
Si l'on considère les variations latérales des niveaux piézométriques, l'effet du barrage, sur la recharge de la nappe superficielle, est encore plus net. En position de recharge maximale, comme en position d'étiage, la surface piézométrique présente des courbes isopièzes allongées parallèlement à l'axe du bas-fond avec un dôme centré sur le bas-fond qui s'élargit légèrement au niveau de la digue filtrante et beaucoup plus nettement au niveau du barrage. En considérant une amplitude de 2 mètres par rapport au sommet du dôme, les largeurs atteintes latéralement par la nappe sont indiquées sur le tableau LXXV (LAMACHERE & al, 1991).

Tableau LXXV : Largeurs atteintes (en m) par le dôme piézométrique pour une dénivelée de 2 mètres

Numéro de ligne	1	2	3	4	5
En recharge maximale en 1989	60	120	150	300	100
En position d'étiage	100	100	100	200	150
Largeur atteinte par une crue moyenne	65	110	100	140	90

L'allure des isopièzes, avec des gradients assez élevés de part et d'autre du bas-fond, indique que la recharge de la nappe superficielle s'effectue exclusivement à partir des zones inondées par les crues, ce que confirme la dernière ligne du tableau LXXV. Ceci montre également qu'au niveau de la digue filtrante, l'extension de la nappe superficielle ne dépasse guère la zone habituellement inondée; alors qu'en amont du micro-barrage, l'extension latérale de la nappe est plus du double de la largeur atteinte par une crue moyenne. Nous avons représenté sur la figure 76, les variations des niveaux piézométriques au cours de l'année 1989.

Figure 76 : Variations piézométriques de l'année 1989 dans la partie centrale du bas-fond de Bidi-Gourga

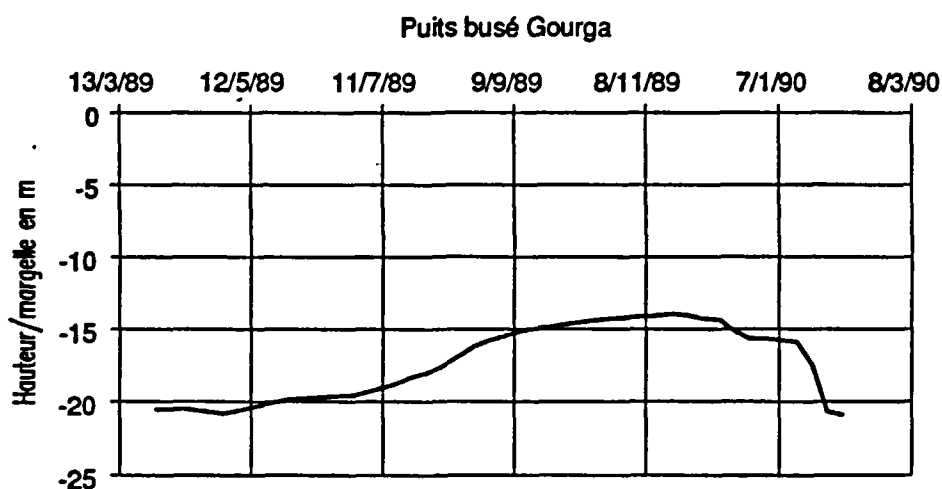


**Tableau LXXVI : Caractéristiques des fluctuations piézométriques
de la zone centrale du bas-fond de Bidi en 1989**

Numéros de ligne	1	2	3	4	5
Amplitude de la recharge (m)	6.4	(7)	5.5	5.5	7.5
Vitesse de descente (cm/j) Septembre 89	8.7	6.4	4.3	3.3	4.7
Oct-novembre 89	2.3	5.0	4.2	2.7	3.2

L'examen des fluctuations piézométriques fait apparaître une assez forte hétérogénéité; la descente des niveaux est rapide sur les lignes n° 1 et 2, plus lente sur les lignes 3 et 5 et deux fois plus lente pour la ligne 4 que sur la ligne 2. Cette hétérogénéité du comportement des niveaux piézométriques est certainement liée à des hétérogénéités locales de la perméabilité des terrains. Les fluctuations de la nappe profonde sont représentées sur la figure 77, pour l'année 1989 et le début de 1990. Le niveau d'étiage se stabilise à une profondeur d'environ 20 m par rapport au niveau du sol. La montée des niveaux commence lentement (3cm/j), est plus rapide en août et septembre (6 à 8cm/j), se stabilise en fin novembre et chute très rapidement en décembre pour atteindre son niveau d'étiage fin janvier. L'amplitude de variation des 2 nappes est à peu près identique.

Figure 77 : Fluctuations de la nappe profonde en 1989.



Depuis sa réalisation, le micro-barrage n'a pas posé de problème d'entretien majeur; sa durée de vie dépend essentiellement de celles des gabions. Le principal problème rencontré est celui des fuites à travers la digue en terre, certainement mal compactée et qui devrait être reprise. Elles représentent environ 5 fois les pertes par évaporation. Leur importance est fonction de la hauteur d'eau dans la retenue (70 l/s quand la retenue est pleine).

EN ZONE SOUDANIENNE

Aménagement de type diguettes suivant les courbes de niveau, plaine de Kawara

Comme la digue filtrante, les diguettes en courbes de niveau sont des ouvrages passifs. L'intérêt de cet aménagement a été évalué par enquête auprès des rizicultrices et par comparaison avec les résultats agricoles dans la plaine de Damana, aménagée de façon traditionnelle. La même démarche a été réalisée dans la plaine de Moadougou (RAN A.M.; 1990).

On constate dans ces trois bas-fonds des dégradations causées par la vitesse de l'eau, particulièrement dans le lit mineur où les diguettes sont régulièrement détruites et où le riz verse.

Une campagne d'observations menée en 1989 (année relativement sèche) sur 17 parcelles réparties dans le bas-fond de Kawara a démontré que les parcelles contenaient toutes une lame d'eau et restaient humides jusqu'au moment de la récolte, (RAN, 1990). Une analyse des données des piézomètres (placés dans le lit mineur) en 1989 et 1990 montre que, même si certaines parcelles sont encore sèches en juin, toutes avaient de l'eau jusqu'en novembre et la plupart jusqu'en décembre, voire même plus longtemps. Une enquête menée en 1988 auprès de 45 exploitantes montre que pour 69% d'entre elles, leurs parcelles n'ont pas souffert d'"à sec" prolongé de plus de 3 jours (FOKKER & WILLE, 1988). Les "à sec" en cours de cycle ne constituent plus un problème dans le bas-fond de Kawara, ce qui est, en partie, à mettre à l'actif de l'aménagement. La comparaison avec la plaine de Damana aménagée traditionnellement (tableau LXXVII) illustre l'allongement de la période favorable à la riziculture dans le bas-fond de Kawara.

Tableau LXXVII : Comparaison des dates moyennes d'apparition d'un fort taux d'humidité dans les parcelles et de l'assèchement général du bas-fond. (Kawara, Damana).

Site	Forte humidité	Assèchement en fin de cycle	Longueur moyenne du cycle pour le riz
Kawara	mi-juin mi-juillet	mi-novembre début décembre	120 à 160 jours
Damana	début août mi-août	fin octobre	65 à 90 jours

Les problèmes du bas-fond de Kawara résident plus dans l'excès d'eau:

- La capacité de drainage en aval du bas-fond est insuffisante. Plusieurs parcelles du lit mineur, et surtout de la partie aval du lit mineur (à peu près 15% de la plaine), sont tellement submergées que la culture du riz y est tout à fait impossible (RAN, 1990).
- Les eaux latérales, venant surtout des bras non aménagés, détruisent les diguettes aux endroits de jonction avec la partie aménagée du bas-fond.
- Les dimensions des diguettes sont partout les mêmes, indépendamment du type de sol (et en particulier de sa perméabilité) avec lequel elles ont été réalisées. Celles construites avec des matériaux aux teneurs en sables relativement importantes ne remplissent pas leur rôle et s'érodent très rapidement. Vu l'hétérogénéité de la perméabilité des sols, la capacité de stockage en eau des castiers est très variable.

Malgré cette faible maîtrise de l'eau à la parcelle, les rizicultrices, en cassant les diguettes ou en réalisant des trous à travers celles-ci, parviennent à mettre en valeur leurs parcelles sans trop de difficultés. Le rendement moyen de la plaine est en effet de l'ordre de 2.35 t/ha (moyenne 1983-1988). L'entretien des diguettes est réalisé essentiellement en début d'hivernage sans difficulté majeure, c'est une pratique traditionnelle (Damana).

Aménagement avec collecteur central: le bas-fond de Moadougou

L'évacuation rapide des eaux excédentaires en période de crue a été le critère déterminant de cet aménagement.

Malgré l'aménagement, une grande partie des parcelles situées en aval (environ 12% de la superficie aménagée) sont fréquemment noyées; 56% des exploitantes de la plaine se plaignent que leur riz est noyé plusieurs jours à plus de 3 reprises durant la campagne (FOKKER & WILLE, 1988). Le niveau d'eau dans le collecteur est souvent élevé pendant la saison pluvieuse, l'eau déborde régulièrement le cavalier, les ouvrages de prise et de vidange. Cette difficulté d'évacuation des eaux est due à:

- l'interruption du collecteur en 2 endroits du bas-fond;
- l'influence de la crue de la Léraba Orientale qui freine l'évacuation des eaux en aval du collecteur;
- l'impossibilité d'évacuer, par plusieurs ouvrages de vidange, les eaux de ruissellement en provenance des versants;
- un manque d'entretien du collecteur qui, envahi par la végétation pendant la saison pluvieuse, n'a plus un débit suffisant.

Les problèmes d'assèchement précoce en fin de campagne ne sont pas entièrement résolus par l'aménagement. Des observations sur 21 parcelles (campagne 1989) ont montré que certaines parcelles souffraient d'assèchement 1 mois avant la récolte. Cette situation résulte d'une mauvaise gestion globale de l'aménagement et en particulier des batardeaux. En fin de cycle et pendant les longues périodes sèches de la saison des pluies, le niveau de l'eau dans le collecteur n'est que de quelques dizaines de centimètres; il entraîne alors le drainage des parcelles.

Diverses raisons expliquent que l'aménagement n'assure ni une bonne répartition de l'eau sur la plaine, ni une régulation de la fourniture d'eau dans le temps (RAN, 1990):

- Un nivellement imparfait des parcelles et une mauvaise distribution des eaux entre les exploitantes provoque leur concentration à l'approche du collecteur.
- Une gestion difficile des ouvrages:
 - * Les batardeaux des ouvrages centraux sont lourds, donc difficiles à manipuler par des femmes.
 - * Il arrive que des vannettes soient volées ou utilisées à des fins non rizicoles.
 - * La partie non aménagée en amont de la digue est cultivée par des femmes (généralement issues d'un autre village et non attributaires de parcelles par le projet ORC) qui manipulent les vannettes en fonction de leurs propres contraintes (elles tentent d'éviter les inondations sans tenir compte des besoins des autres exploitantes "régulières" dont les parcelles sont en aval de la digue).
 - * Une vulgarisation essentiellement axée sur les techniques d'intensification et n'abordant que très peu la gestion hydraulique de l'aménagement.

L'entretien des aménagements reste un problème majeur:

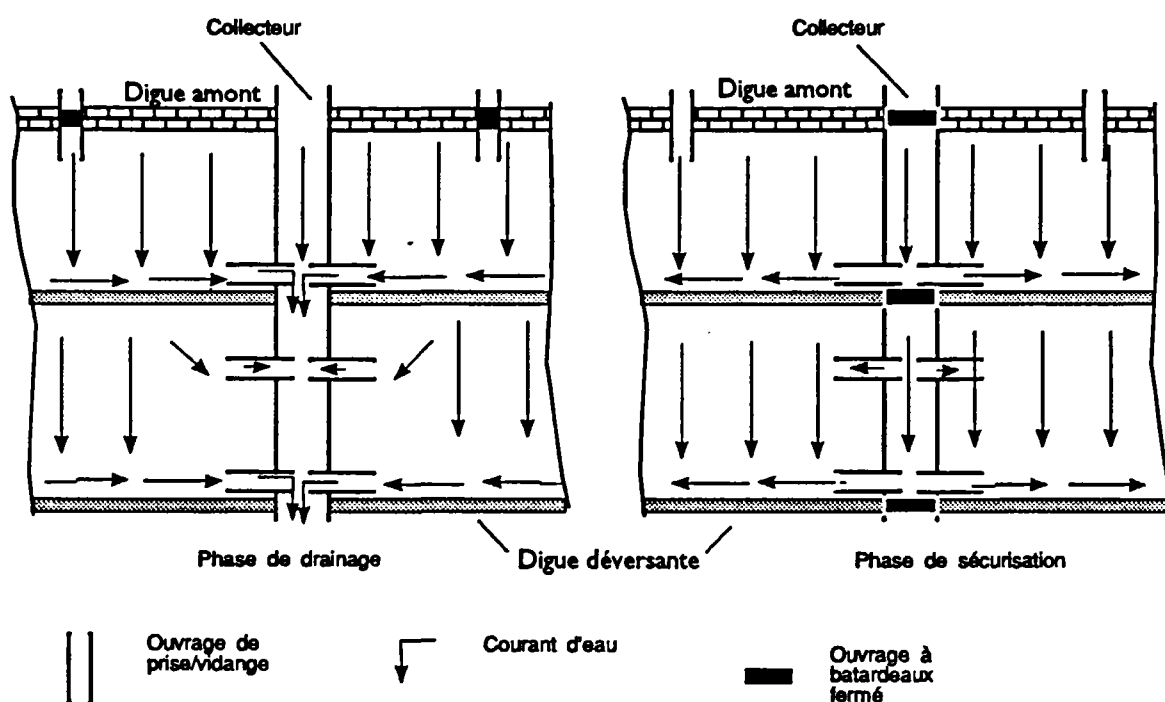
- les maçonneries des digues sont abîmées;
- le nettoyage du collecteur est difficile en saison des pluies et nécessite l'organisation de chantiers communautaires;
- les rizicultrices ne connaissent pas toujours les techniques nécessaires à la réparation des petits ouvrages;
- l'organisation des travaux communautaires est compliquée par les diversités ethniques, villageoises et familiales des exploitantes.

Ces difficultés se traduisent par une période favorable à la riziculture moins longue qu'à Kawara. Le tableau LXXVIII illustre cette situation. La figure 78 montre le principe de la gestion de l'aménagement de Moadougou.

Tableau LXXVIII : Comparaison des dates moyennes d'apparition d'un fort taux d'humidité dans les parcelles et de l'assèchement général des bas-fonds de Kawara et Moadougou (RAN, 1990).

Site	Forte humidité	Assèchement en fin de cycle	Longueur moyenne du cycle pour le riz
Kawara	mi-juin mi-juillet	mi-novembre début décembre	120 à 160 jours
Moadougou	fin juillet début août	fin octobre début novembre	80 à 130 jours

Figure 78: Principe de la gestion de l'aménagement de Moadougou



Les rendements à Moadougou sont de 1.87 t/ha, soit 80% des rendements observés à Kawara (moyenne de 1983 à 1987). Les différences sont plus marquées les années excédentaires. En 1986, les rendements observés à Moadougou ont été de 37% inférieurs à ceux de Kawara, alors qu'en 1987 (année légèrement déficitaire), les rendements étaient identiques. Cela montre que les difficultés de vidange de la plaine ne sont que très partiellement résolues par l'évacuateur central.

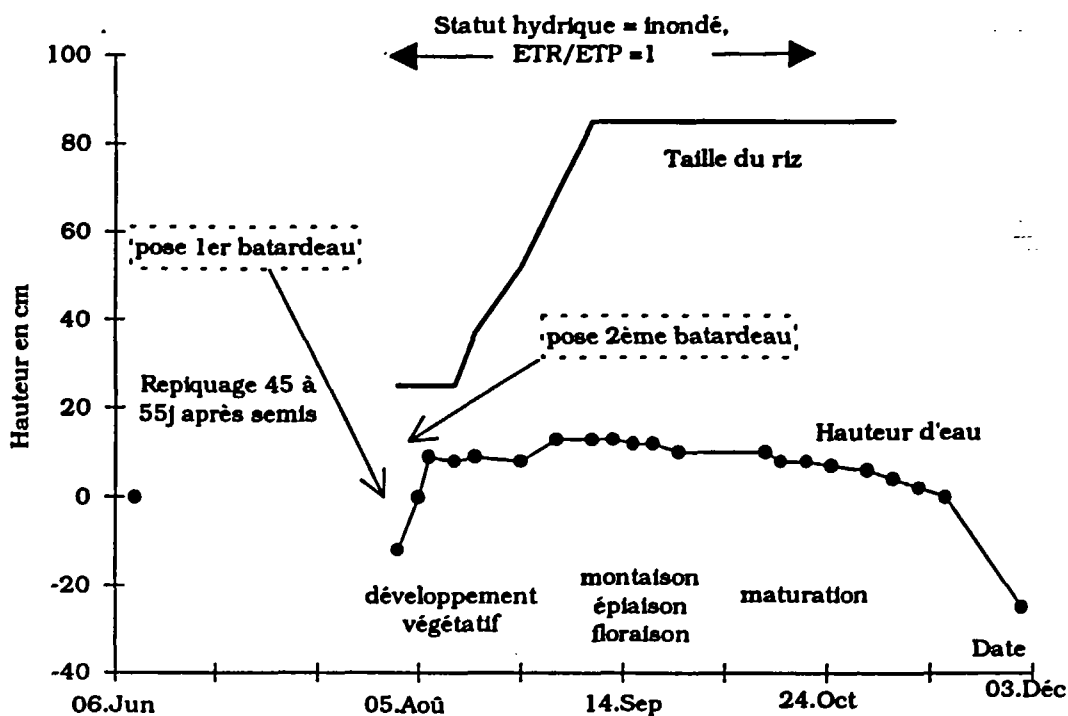
Aménagement de type barrage demi-souterrain: site de Kambo

La gestion de l'aménagement a fait l'objet d'un plan discuté avec les paysans et se résumant en 5 points:

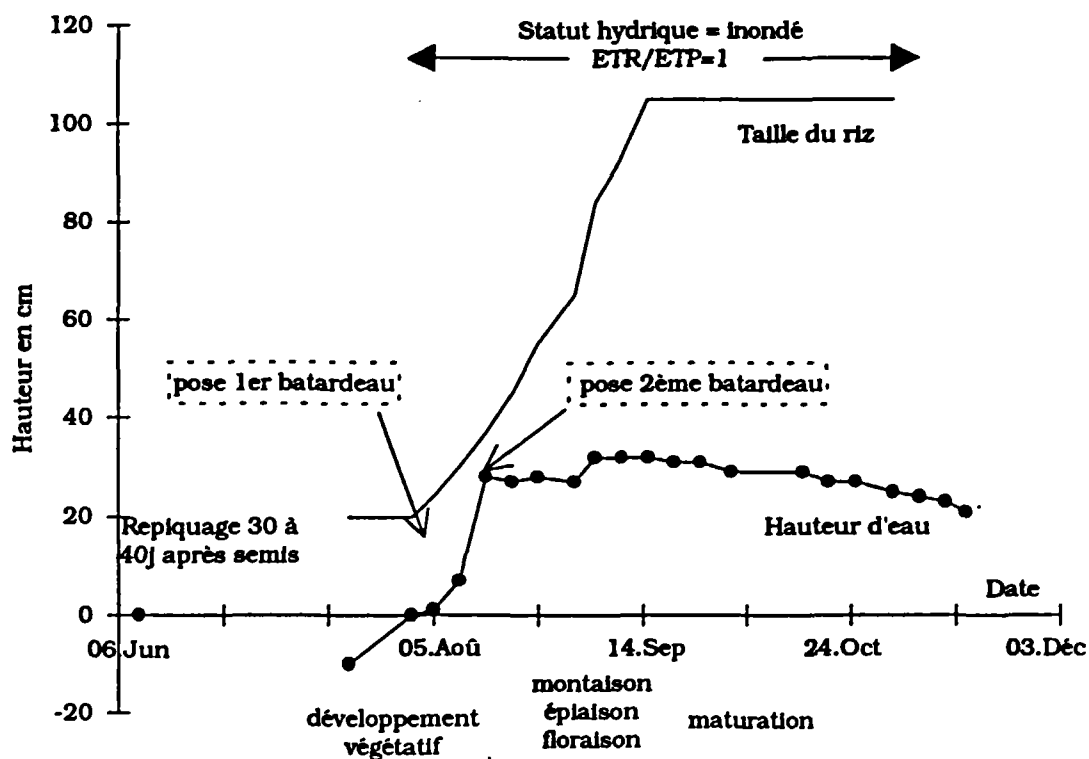
- la pose du premier batardeau après le 1^{er} août;
- la pose du second batardeau avant le 15 août;
- le semis en pluvial à partir de la mi-juin dans la zone basse (en fonction de la pluviométrie) avec des variétés d'immersion profonde à cycle long;
- le repiquage sur les zones hautes et moyennes selon la pratique traditionnelle;
- la vidange du barrage après le 1^{er} novembre pour faciliter la récolte.

Les 4 premiers points ont été suivis par les paysans. Par contre, la vidange a été systématiquement retardée pour permettre la pêche dans la retenue après la récolte du riz. Les figures 79 à 81 récapitulent le niveau de la maîtrise de l'eau obtenu dans les différentes zones et les rendements moyens obtenus pour une année humide (1988) dans la zone basse où on pouvait redouter que le riz soit noyé et pour une année déficitaire (1989) qui démontre la sécurisation de l'alimentation hydrique des cultures dans les zones moyennes et hautes. Les rendements médiocres en zone haute sont plus imputables à des problèmes de repiquage tardif et de fertilité des sols qu'à la maîtrise de l'eau. L'aménagement de Kambo semble donc permettre un niveau de maîtrise de l'eau satisfaisant.

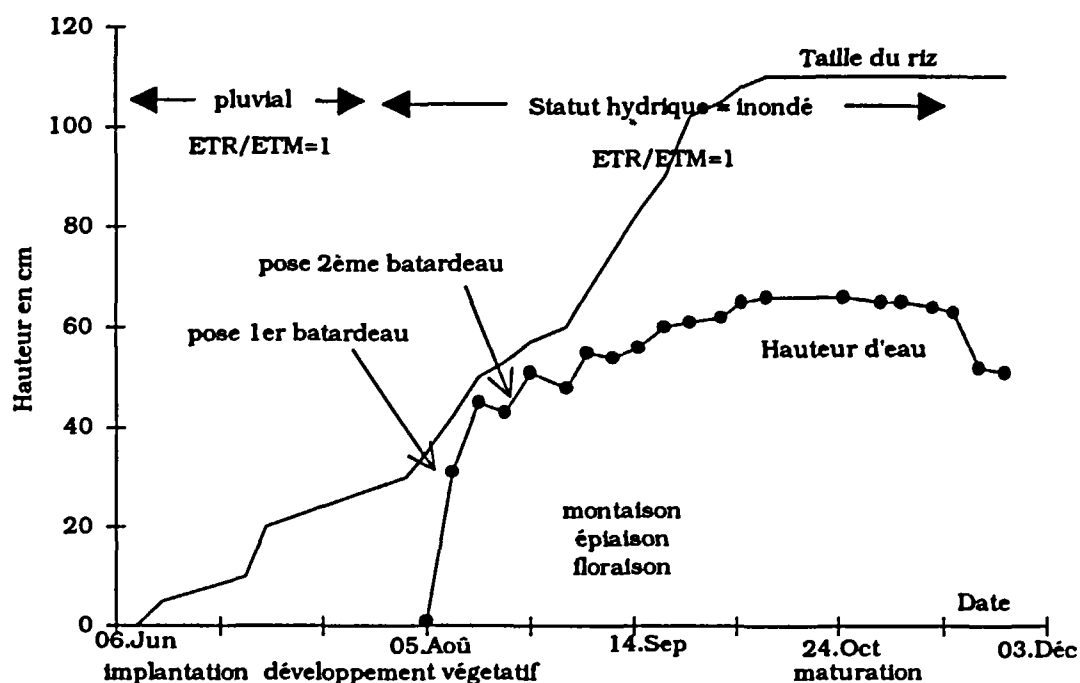
**Figure 79 : Kambo zone haute: évaluation de la maîtrise de l'eau à la parcelle (1989 année déficitaire) (riz de cycle moyen avec repiquage)
rendement moyen 1.04 T/ha, cote parcelle = crête digue -10cm.**



**Figure 80 : Kambo zone moyenne: évaluation de la maîtrise de l'eau à la parcelle (1989 année déficitaire)(riz de cycle moyen avec repiquage)
rendement moyen 2.8 T/ha, cote parcelle = crête digue -29cm.**



**Figure 81 : Kambo zone basse: évaluation de la maîtrise de l'eau à la parcelle (1988 année humide) (riz de cycle long avec semis direct)
rendement moyen 3.3 T/ha, cote parcelle = crête digue -65cm.**



L'exploitation des données piézométriques en amont et aval du barrage et l'évaluation par essai de pompage de la perméabilité (de l'ordre de $3.8 \cdot 10^{-3}$ m/s) ont permis d'estimer l'intérêt de la tranchée d'étanchéité sur la sécurisation des cultures (tableau LXXIX).

Tableau LXXIX : Evaluation de la durée de présence de la nappe en phase de vidange (en jours) avec ou sans tranchée d'étanchéité.

	Sans tranchée	Avec tranchée	Différence
Zone basse	10	30	20
Zone moyenne	5	18	13
Zone haute	3	13	10

Ces données démontrent nettement l'intérêt de l'ouvrage pour sécuriser la culture en amont de la digue. Une régulation des flux hydriques est également importante en aval de la digue sur environ 1 ha. Elle est due à la fois aux écoulements régularisés par la retenue et aux infiltrations sous la digue provoquant un affleurement de la nappe pratiquement jusqu'en fin de cycle. Quatre ans après sa réalisation, les seules dégradations sur le barrage concernent la chape cimentée égalisant la crête de la digue. Ce phénomène semble général à ce type d'ouvrage et doit faire l'objet d'une amélioration de sa technique de construction.

EN ZONE GUINEENNE ESTUARIEENNE

Aménagement de type barrage anti-sel en Casamance

L'ensemble de l'aménagement a deux fonctions:

- une fonction anti-sel qui permet de protéger 150ha des intrusions marines et de récupérer 90 ha dégradés et devenus improductifs ;
- une fonction de régulation du niveau de l'eau dans les rizières qui favorise le développement de la culture.

De 1984 à 1988, avant la modification de l'ouvrage avec des portes levantes, aucun dessalement tangible n'a été observé malgré des hivernages relativement favorables. La modification du système de vannes a permis de définir des règles strictes de gestion du barrage. Quatre règles de gestion, traduites en cotes lues sur les différentes échelles limnimétriques du dispositif, ont été définies:

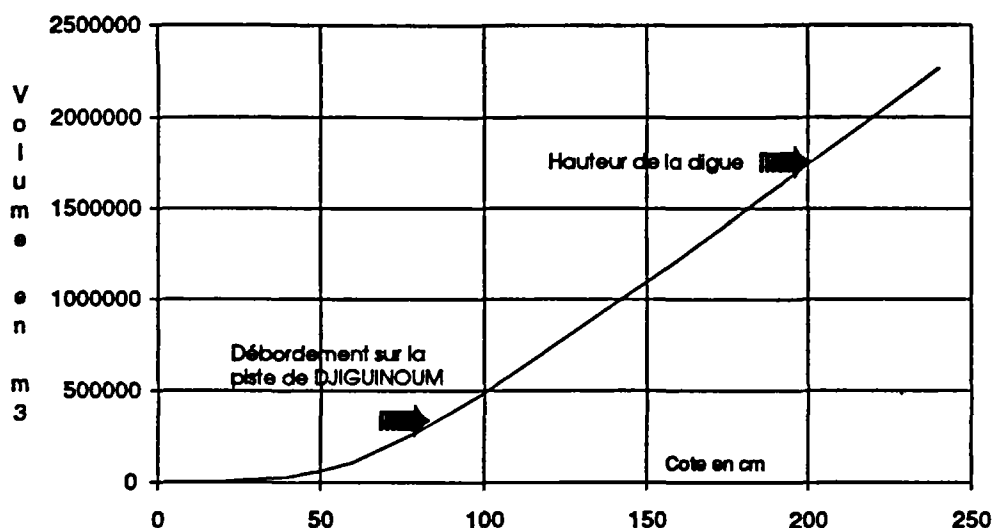
- La première règle répond à une préoccupation des villageois de Djiguinoum: éviter l'inondation de la piste qui relie ce village à la route de Ziguinchor. Il a donc été décidé de réaliser des lâchers d'eau, à marée basse, afin de maintenir une cote inférieure à 90 cm à l'échelle située dans le drain principal du casier rizicole (figure 82)

- La seconde règle a été dictée par la nécessité d'empêcher la marée de remonter dans le bas-fond au cours d'un lâcher d'eau. Un ensemble de jaugeages, avec des niveaux amont et aval différents et pour tout le marnage, a montré qu'il était nécessaire de conserver une cote amont 3 cm au-dessus de celle aval pour éviter toute pénétration saline. Les lâchers débutent donc à marée descendante dès que le niveau marin est 3 cm au-dessous de celui du lac et se terminent au plus tard pendant la marée remontante avant que cette condition ne soit plus remplie.

- La troisième règle est de conserver une quantité d'eau suffisante pour la pratique du riz inondé. La fréquence des vidanges est ralentie lorsque la cote à l'échelle du casier rizicole se situe en-dessous de 90 cm et que le repiquage du riz est effectué. En 1990, on a modifié cette limite à 95 cm.

- La quatrième règle est d'évacuer le maximum de sel en faisant des lâchers. La mesure du pH montre que ce paramètre augmente légèrement lorsqu'une nappe d'eau est maintenue en surface. Donc, on n'assèchera pas la nappe du bas-fond où se trouve les casters rizicoles, même en début de saison des pluies.

Figure 82 : Courbe hauteur / volume de la retenue de Djiguioum



Pour tester l'efficacité de la gestion de l'eau proposée sur la conduite de la culture du riz, deux types de casters ont été mis en place en 1988 dans des zones où les sols sont très dégradés, sulfatés acides sur matériaux argileux.

- Le 1^{er} type, micro-polder Diola ou système traditionnel, a une superficie de 2500 m². Il est constitué de 8 parcelles de 220m² (environ 20m x 10m) (figure 83). Celles-ci sont ceinturées par une digue et cultivées en billons de 10m de long, de 50cm de large et de 40cm de haut. Elles sont séparées par des fossés drainants connectés à un fossé périphérique qui est lui-même relié au lit du marigot par un drain d'évacuation.
- Le 2^{ème} type, caster rizicole amélioré (figure 84), est une variante du précédent. Il est construit en forme d'hexagone et permet de minimiser la longueur de la digue de ceinture par rapport à la surface protégée.

Figure 83 : Casier rizicole traditionnel

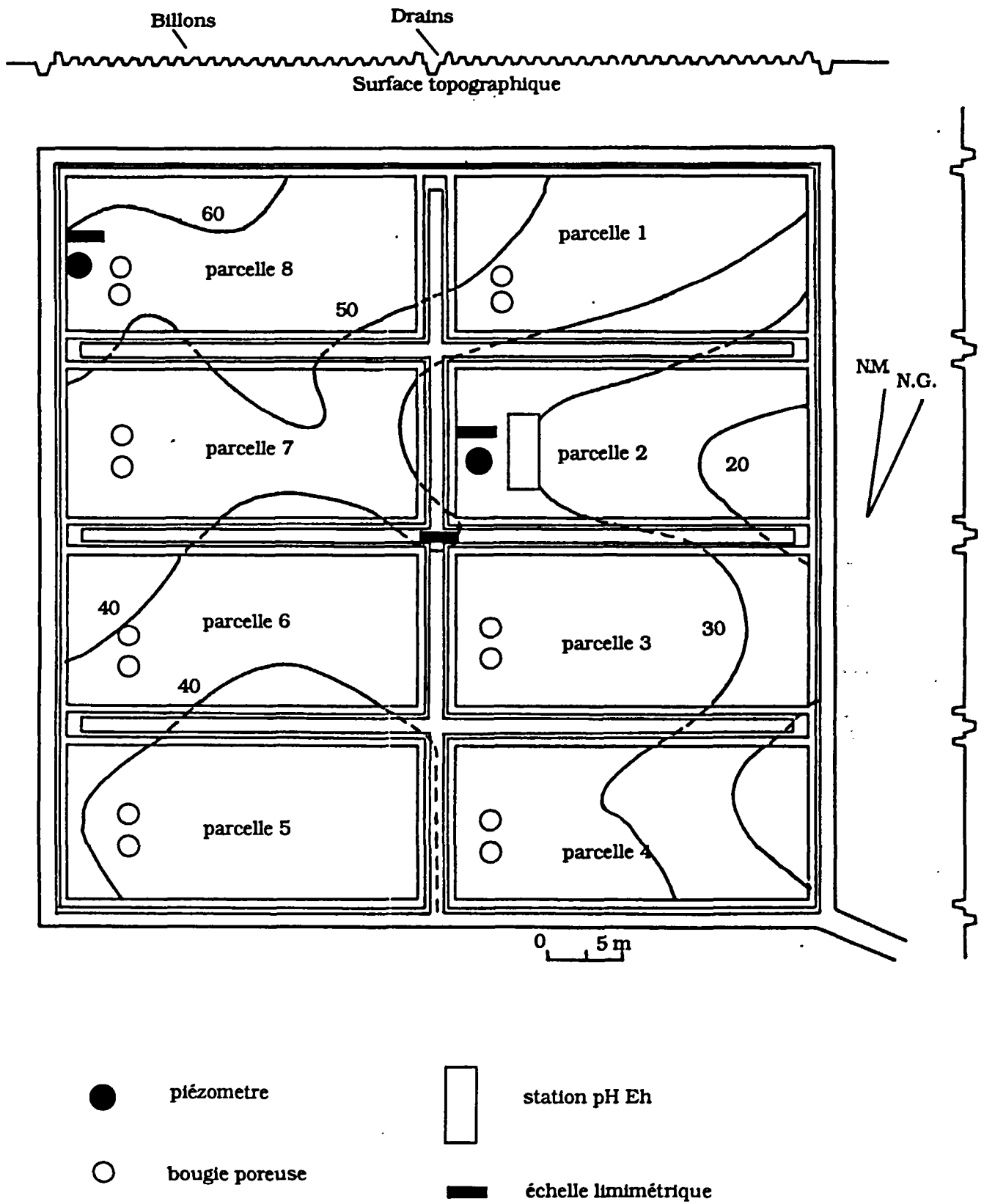
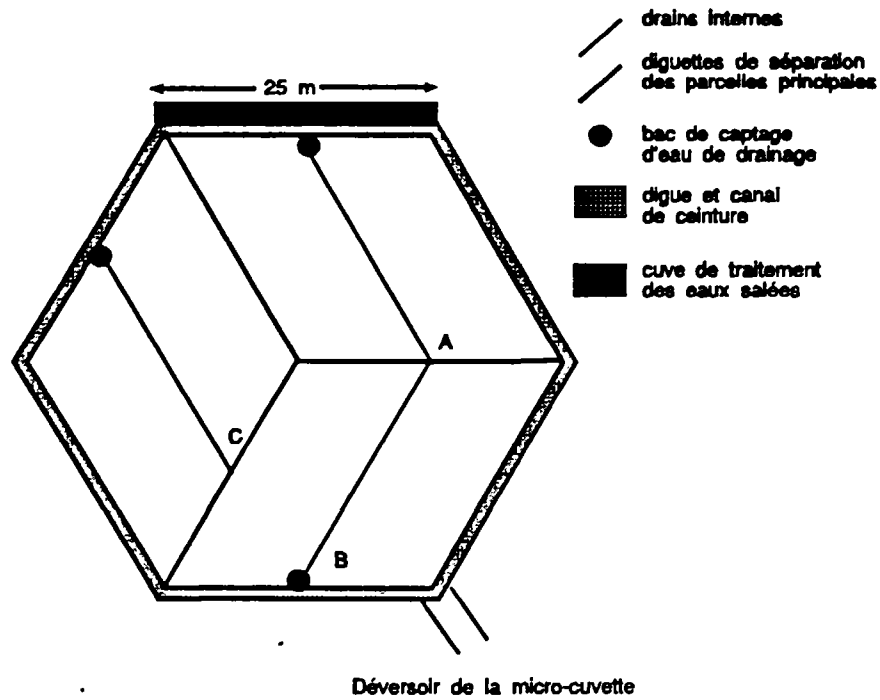
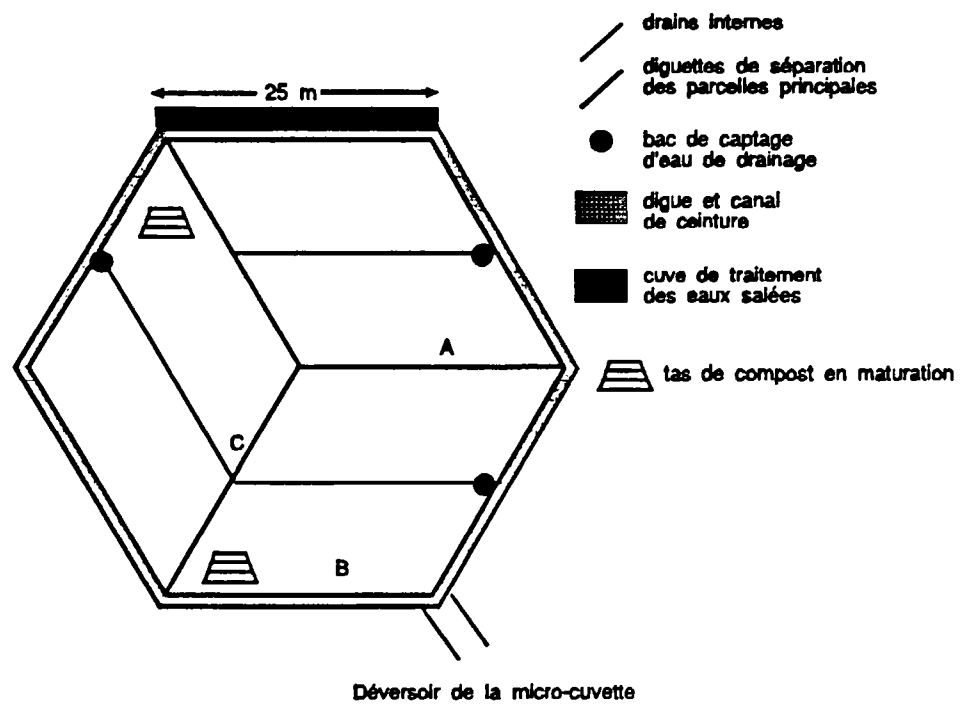


Figure 84 : Casiers rizicoles améliorés

Casier rizicole - Culture sur billons



Casier rizicole - Culture à plat



Les mesures de conductivité et de pH ont été réalisées lors de chaque lâcher au barrage, afin d'estimer le poids des sels évacués hors de la plaine. Ce suivi montre qu'il est possible d'évacuer de grandes quantités de sels au cours d'une saison des pluies. En 1989, par exemple, la salinité des eaux du barrage a baissé de 20 mS/cm (13 g/l) à 2 mS/cm (1g/l) (figure 30). Un bilan pondéral a été établi pour chaque année de l'étude.

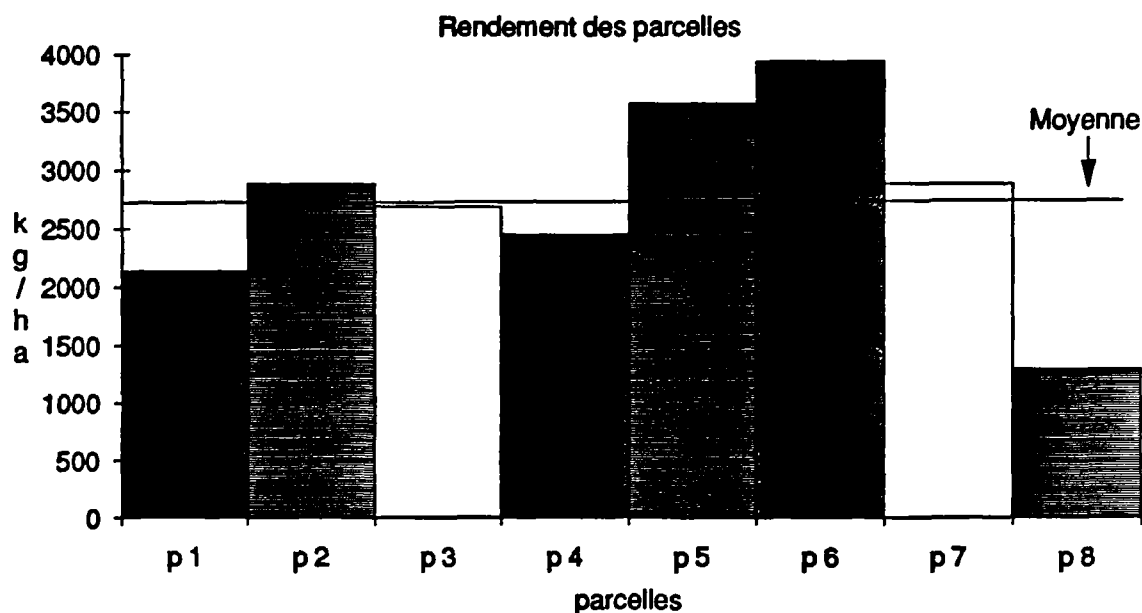
La gestion hydraulique du barrage anti-sel a permis d'obtenir une production de riz satisfaisante dans une zone particulièrement dégradée par la sécheresse et abandonnée par les paysans depuis une quinzaine d'années.

En 1989, le rendement moyen des parcelles d'essai (figure 85) a été de 2.7 T/ha avec une grande hétérogénéité d'une parcelle à l'autre. Comparé aux données existantes dans la région, où l'on a enregistré un rendement moyen de 0.7T/ha en 1986 et de 1.1 T/ha en 1987 (source: Direction des statistiques, Ministère de l'économie et des finances du Sénégal, 1989), ce résultat peut être considéré comme satisfaisant. On est tenté d'attribuer la diminution de la salure des sols en 1989 à la gestion du barrage, mais ce résultat doit être confirmé (tableau LXXX).

Tableau LXXX : Evolution de la salure des sols sur le bas-fond de Djiguioum (surface en ha)

Salure (mS/cm)	1987	1988	1989
<300	46.35	43.92	58.95
<500	25.83	28.53	25.83
<700	23.13	29.1	23.76
<900	22.50	17.73	16.60
>900	14.04	12.60	6.75

Figure 85 : Rendements du casier rizicole de Djiguioum - 1989



Malgré la mise en place du comité de gestion du barrage, peu d'entretien a été réalisé depuis sa construction. La digue est restée en bon état.

Les eaux étant très agressives, un entretien des parties métalliques du nouveau système d'ouverture a été réalisé chaque année (peinture anti-corrosion et étanchéification avec du goudron). Les treuils ont été graissés.

La partie en béton est toujours en bon état, malgré des traces de détérioration sur les coquillages, qui remplacent les graviers dans le béton en Casamance. Le pont de Djiguioum, construit de la même façon, a été fortement dégradé pendant l'hivernage 1990 et le tablier s'est effondré pendant l'hivernage 1991. Les eaux acides dissolvent les coquillages du béton. Des infiltrations se font jusqu'au ferrailage. Le fer à béton s'effrite et l'ouvrage se disloque. Ce processus de dégradation est évidemment favorisé par les vibrations dues aux véhicules qui passent sur le pont, ce qui n'est pas le cas du barrage. Il serait prudent d'envisager de refaire régulièrement les enduits de ciment sur les parties bétonnées (tous les cinq ans).

COMPARAISON ENTRE AMENAGEMENTS

Afin de comparer les performances des aménagements, il a été évalué successivement 3 indices:

- 1: le niveau de sécurisation de la culture comparativement aux objectifs fixés pour l'aménagement;
- 2: le rapport entre la surface sur laquelle une mise en valeur agricole a été effectivement pratiquée et la surface exploitable;
- 3: un indice global, produit des deux précédents, permettant de comparer les aménagements entre eux.

Le tableau LXXXI récapitule les conclusions de cette analyse.

Tableau LXXXI : Comparaison des performances des différents aménagements

Type	Site	Indice sécurisation	Indice surface	Indice global
Digue filtrante	Bidi	1	1	1
Micro-barrage	Bidi	0.7	0.16	0.11
Digue de niveau	Kawara	1	0.85	0.85
Collecteur central	Moadougou	0.7	1	0.7
Barrage demi-souterrain	Kambo	1	1.2	1.2
Barrage anti-sel	Djiguioum	1	-	-

L'objectif de la digue filtrante n'est pas d'améliorer le niveau de sécurisation, mais d'étendre la surface inondée par les crues. L'évaluation de la digue filtrante réalisée à Bidi a montré que les superficies initialement prévues pour être cultivées en riz n'ont pas toujours été mises en culture.

Le micro-barrage de Bidi n'a permis de sécuriser les cultures que 1 année sur 2, alors qu'on pouvait estimer à 3 années sur 4, ce niveau. Les surfaces exploitées (0.5ha) ne représentent que 17% des surfaces exploitables. La priorité donnée par les paysans à la satisfaction des besoins en eau des populations explique largement cette situation.

L'aménagement de Kawara semble avoir rempli les objectifs initialement fixés, même si quelques problèmes subsistent. Par contre, dans sa partie aval (15% de la plaine), la hauteur de l'eau interdit toute mise en valeur.

L'aménagement de Moadougou semble par contre ne pas permettre une sécurisation aussi bonne qu'à Kawara, malgré son coût à l'hectare 3 fois plus élevé. L'indice de sécurisation a été pris proportionnel à la différence de rendement moyen sur les deux plaines: 80%.

L'aménagement de Kambo a permis la sécurisation sur 6ha au lieu de 5 initialement prévus et le suivi agro-hydraulique des parcelles montre que les problèmes rencontrés sont plus agronomiques (âge des plants repiqués) qu'hydrauliques.

Dans le cas du barrage anti-sel de Djiguinoum, les résultats obtenus sur les différents casters pilotes permettent d'envisager l'extension du dispositif à l'ensemble du bas-fond salé, soit environ 90ha. Mais privilégier cet objectif en ne prenant pas suffisamment en compte les besoins en eau des rizières en tête de vallée, ne peut constituer une solution à long terme. Des retenues d'eau supplémentaires doivent être mises en place pour gérer harmonieusement la ressource en eau sur l'ensemble de la vallée. Un modèle de gestion en cascade pourrait alors être mis en fonction.

Le tableau LXXXII récapitule les problèmes de gestion et d'entretien des ouvrages sur les différents sites.

Sur le micro-barrage de Bidi, les règles de gestion définies par la modélisation du fonctionnement interannuel du barrage ne sont pas appliquées par les paysans, ce qui explique les valeurs très faibles (0.16) de l'indice de surface. Sur l'aménagement à collecteur central de Moadougou, un effort de vulgarisation et une organisation des rizicultrices devrait permettre d'améliorer la situation actuelle.

Tableau LXXXII : Tableau récapitulatif des problèmes de gestion et d'entretien hydrauliques

Type d'aménagement	Site	Problèmes de gestion	Problèmes d'entretien
Digue filtrante	Bidi	0	0
Micro-barrage	Bidi	3	2
Digues de niveau	Kawara	1	3
Collecteur central	Moadougou	3	2
Barrage demi-souterrain	Kambo	1	1
Barrage anti-sel	Djiguinoum	3	2

0: nul, 1: peu important, 2: important et 3: grave.

Le tableau LXXXIII compare les objectifs initiaux et les résultats de l'évaluation des aménagements.

Les différences entre les pourcentages de réalisation des objectifs démontrent nettement que les aménagements de bas-fonds ne sont rentabilisés que dans les zones où la pluviométrie est supérieure à 1000 mm. Il faut néanmoins noter qu'au Yatenga, trois années observées sur les quatre ont été particulièrement défavorables. Le recours à la modélisation hydrologique du fonctionnement des ouvrages et à celle du bilan hydrique des cultures permet de mieux appréhender l'intérêt économique de l'aménagement en simulant des chroniques de résultats agricoles.

Tableau LXXXIII : Comparaison entre objectifs et résultats de l'évaluation

	Objectifs de production (T/ha) pour rentabiliser		Surfaces réellement exploitées %	Rdt évalué T/ha	Réalisation des objectifs en % par rapport à	
	la subvention	l'investissement paysan			la subvention	l'investissement humain
Yatenga Digue fil- trante	1.49	0.97	100	0.3	20	30
Micro- barrage	7.20	5.35	40	1.38	8	10
Comoé Moyenne des 2 sites	3.11	1.05	95	2.15	64	203
Mali-sud Barrage demi-souter	1.73	1.75	120	2.55	177	175
Casamance Barrage anti-sel	0.21	0.71	---	2.35	1119	331

Le micro-barrage a été comparé à des aménagements hydro-agricoles, il devrait plutôt l'être avec ceux réservés à l'hydraulique villageoise. Le coût de la digue filtrante est largement explicatif du faible taux de rentabilisation de l'investissement humain. L'utilisation de gabions, nécessaires à l'évacuation des crues sans dommage pour l'ouvrage, explique la sous-valorisation de l'investissement; il serait souhaitable de réaliser ce type d'ouvrage lorsque les gabions ne sont pas nécessaires (bassin versant plus petit) où lorsque la surface sous influence de la digue est importante (ici une pente de $0.5^\circ/\infty$ serait optimale). L'autre solution serait de placer ce type d'ouvrage au niveau d'un verrou afin de diminuer la longueur de la digue.

Les résultats très prometteurs en Casamance sont à relativiser; ils n'ont été calculés qu'à partir d'essais qui sont toutefois confirmés par une réoccupation du bas-fond par les usagers. SALL (1991) notait une remise en culture spontanée de 25% des surfaces de rizières salées dès la deuxième année du programme.

L'intensification des cultures de bas-fonds : un pari difficile à tenir

Sur chacun des sites, un suivi des agriculteurs et des tests agronomiques ont été réalisés dans le but:

- d'évaluer les contraintes liées à l'intensification des cultures de bas-fonds et rencontrées par les agriculteurs;
- d'identifier les innovations susceptibles de lever ces contraintes.

LA VALORISATION DU TEMPS DE TRAVAIL:

PRINCIPALE CONTRAINTE A L'INTENSIFICATION

Le tableau LXXXV récapitule sur chacun des sites les rendements moyens et les techniques culturales enregistrées lors des enquêtes menées en milieu paysan. De ces données est déduite la valorisation du travail.

Une moyenne par zone du périmètre a été établie et pondérée par la surface qu'elle représente pour obtenir un rendement moyen sur l'aménagement. Le tableau LXXXIV explicite la méthode pour le cas de l'aménagement de Kambo. Dans le cas du Siné-Saloum et de la Casamance, les rendements pris en compte correspondent aux essais réalisés avec les variétés locales et des techniques traditionnelles.

Tableau LXXXIV : Estimation du rendement annuel sur l'aménagement de Kambo

	Surface ha	Rendement moyen tonnes/ha	Production tonnes
1988			
Zone haute	1.1	1.46	1.61
Zone basse	3.03	3.24	9.82
Zone moyenne	1.25	2.81	3.51
Surface totale aménagée	5.28	2.83	14.94
1989			
Zone haute	2.1	1.63	3.42
Zone basse	3.03	3.64	11.09
Zone moyenne	1.25	2.37	2.96
Surface totale aménagée	6.28	2.77	17.41
1990			
Zone haute	2.1	1.42	2.98
Zone basse	3.03	2.51	7.60
Zone moyenne	1.25	1.91	2.39
Surface totale aménagée	6.28	2.06	12.97

Les variations interannuelles des rendements sont importantes. L'évaluation de la part à attribuer à l'aménagement dans la régulation des rendements sera abordée dans le paragraphe suivant.

Les techniques culturales, lorsqu'elles sont diverses comme au Mali, ont été affectées d'un pourcentage relatif à la surface sur laquelle elles sont pratiquées.

L'utilisation d'intrants, dans le cas de la Comoé et du Mali-Sud, est exprimée par leur valeur en tonne de paddy à l'hectare. Au Mali, environ 200 kg/ha de poudrette de parc sont apportés à la rizière. Sa valeur marchande est de l'ordre de 8 FCFA/kg, soit 0.023 t/ha de paddy. Dans la Comoé, la fertilisation préconisée par la recherche est: 200kg/ha de NPK, 35 kg/ha d'urée au sarclage, 51 kg/ha d'urée en couverture. Les enquêtes ont montré que ce niveau de fumure n'atteignait en 1988 que 10 kg/ha à Moadougou et seulement 7.5 kg/ha à Kawara, soit, converti en tonne de paddy par hectare, respectivement 0.012 et 0.010 tonne/ha.

L'utilisation des variétés améliorées (IR 15-29) dans la zone de la Comoé a été évaluée à partir d'enquêtes. 53% des surfaces à Moadougou et 28.5% à Kawara sont ensemencées avec ces variétés. Dans la plupart des sites, les riziculteurs préfèrent les variétés traditionnelles dans la mesure où les techniques culturales qu'elles pratiquent ne sont pas intensifiées. Les variétés traditionnelles supportent mieux que les variétés améliorées les effets:

- de la faible maîtrise de l'eau,
- du faible niveau de fertilisation,
- des attaques des maladies (en particulier pyriculariose).

Le tableau LXXXV fait le bilan de la production sur les sites étudiés et donne les résultats économiques des aménagements. Il met nettement en évidence que la riziculture en zone sahélienne reste très aléatoire et gardera, sans une totale maîtrise de l'eau, une place marginale dans les systèmes de culture. Les années 1988-1990 ont été particulièrement sèches au Yatenga, ce qui biaise fortement l'évaluation des résultats en amont de la digue filtrante. Le sorgho semble la culture la plus appropriée aux bas-fonds de cette région.

**Tableau LXXXV : Production, techniques culturales et résultats économiques
en milieu paysan sur les différents projets pilotes**

Régions	Yatenga	Yatenga	Comoé	Comoé	Mali-sud	Sinc Saloum	Casamance
Type d'aménagement	digue filtrante	micro- barrage	digues de niveau	collecteur central	barrage demi- souterrain	-	barrage anti-sel
Rendements tonne/ha							
1988	< 100kg	2.0	2.5	2.5	2.83	1.35	2.8
1989	< 100kg	1.0			2.78	0.52	1.9
1990	< 100kg	0.5			2.06	-	2.0
1991	1.5	2.0			-		
Moyenne	0.3	1.38	2.35	1.87	2.55	0.93	2.23
Technique culturale	semis direct	semis direct	repi- quage	repiquage	52%semis direct et 48% repiquage	semis direct	repiquage
Utilisation fumure d'intrants minérale en t/ha de fumure paddy organique	0	0	0.01	0.012	0	0	0
	0	0	0	0	0.023	0	0
Redevance en t / ha	0	0	0.056	0.056	0	0	0
Variétés	locale	locale	améliorée 28%	améliorée 53%	locale	locale	locale
Main-d'oeuvre hommes.jour/ha	290	290	188	188	315	280	296
Homme . jour par tonne produite	966	250	80	100	123	301	125
Charges d'intensification en tonne / ha	0	0	0.66	0.68	0	0	0
Valorisation du travail en Kg de riz / H . J	1	4	12.1	9.5	8.0	3.3	7.9

Dans la Comoé, le Mali-Sud et la Casamance, l'ordre de grandeur de la valorisation du travail en riziculture est semblable, même si l'effet sur la valorisation du travail est plus important avec l'aménagement par diguettes suivant les courbes de niveau (Tableau LXXXVI).

**Tableau LXXXVI : La valorisation du travail en riziculture:
évaluation de l'effet de l'aménagement**

Régions	Comoé	Comoé	Mali-Sud
Type d'aménagement	digue de niveau	collecteur central	barrage demi-souterrain
Valorisation du travail avant aménagement en kg de riz/h*j	4.25	4.25	4.25
Valorisation du travail avec aménagement en kg de riz/h*j	12.1	9.5	8.0
% d'amélioration avec aménagement	185	124	88

L'aménagement augmente, en moyenne, de 132% la valorisation du travail en zone soudanienne. Néanmoins, cette augmentation ne permet pas à la riziculture d'être compétitive avec les cultures pluviales où la culture attelée permet une meilleure valorisation du travail. Au sud du Mali, la valorisation de la journée de travail en maïsiculture avec le niveau de fumure vulgarisé par la CMDT, est de l'ordre 1400 FCFA/homme*jour. Elle n'est que de 588 FCFA/homme*jour en riziculture (cas de Kambo). Pour être compétitif, le temps de travail pour 1 hectare de riz devrait être de l'ordre de 132 jours par hectare si la fertilisation n'est pas utilisée. L'objectif a donc été de rechercher des techniques culturales et des variétés adaptées permettant de diminuer les temps de travail en riziculture.

LES INNOVATIONS TECHNIQUES ET VARIETALES AUGMENTENT-ELLES LA PRODUCTIVITE?

Les tests agronomiques ont pour objectif d'identifier:

- * les techniques culturales adaptées permettant de réduire les temps de travail : au Mali, l'utilisation de l'herbicide; au Sénégal (Casamance) la pratique de la culture à plat du riz.
- * les variétés adaptées à la riziculture de bas-fond : Comoé, Mali-Sud, Yatenga, Casamance et Siné-Saloum.

Les essais menées au Mali avaient pour objectif de démontrer l'intérêt de l'utilisation de l'herbicide pour contrôler les adventices et permettre des temps de travail en semis direct comparables à ceux obtenus par repiquage. L'herbicide utilisé a été le Ronstar PL à la dose de 41 kg/ha (coût 19000 FCFA/ha). Les rendements obtenus (2991 Kg/ha) ont été du même ordre que dans les parcelles désherbées manuellement (2998 kg/ha). L'effet sur les temps de travaux de désherbage est par contre hautement significatif: 145 hommes*jours au lieu de 250 h*j (moyenne de 6 répartitions). Appliqué dans le bas-fond de Kambo, l'emploi de cet herbicide ramènerait les temps de travail à 276 h*j/ha en zone basse et à 249 h*j/ha sur l'ensemble de l'aménagement. En prenant en compte le coût du désherbage (135 kg de riz/ha), la valorisation du travail passerait à 10.14kg de paddy par journée de travail (+23.8%).

Les essais menés en Casamance ont porté sur un test comparatif entre le repiquage à plat et le repiquage sur billon. L'influence du billonage du sol ne semble pas être déterminant lorsqu'un bon dessalement a été opéré (tableau LXXXVII).

Tableau LXXXVII : Rendements moyens par façon culturale en Casamance

Travail du sol	Variété	1989	1990
Billonnage	Rock 5	2.8	2.8
	DJ684D	2.6	1.0
	Ethoual	2.8	1.9
Culture à plat	Rock 5		2.2
	DJ684D		0.8
	Ethoual		2.1

Sur l'ensemble des sites, des suivis de tests variétaux ont été mis en place. Le tableau LXXXVIII illustre par région les variétés les mieux adaptées.

Tableau LXXXVIII : Résultats des tests variétaux

Région	Variétés	Observations
Yatenga	variétés locales mouli pelga 90j mouli kienda 100j	mieux adaptées compte tenu de la faible sécurisation de la riziculture
Comoé		
Zone haute	BR51-319-9 4456	cycle semis maturation 125 à 130j ***
Zone moyenne et basse	4456	***
	4418	***
	BR 51-319-9	***
	ITA 234	***
Mali-Sud		
Zone haute	IRAT 216	cycle semis maturation 135j
Zone moyenne	BG90-2	cycle semis maturation 120j
	Bouake 189	cycle semis maturation 130j
Siné-Saloum	DJ684D DJ8341	cycle semis maturation 130j cycle semis maturation 90j
Casamance	Rock 5 Ethoual	cycle semis maturation 150j cycle semis maturation 150j

Sur la plupart des sites suivis, la riziculture occupe une place marginale dans le système de culture. La faible valorisation du travail que procurent les techniques traditionnelles de la riziculture explique largement cette situation. L'amélioration de la rentabilité du travail permise par les aménagements devrait pouvoir être significativement amplifiée par l'intensification. **Mais le risque économique est-il justifié compte tenu du risque hydraulique qui persiste néanmoins malgré l'aménagement?**

LA MODELISATION DU FONCTIONNEMENT D'UN AMENAGEMENT: UNE AIDE A LA DECISION

Le cas traité sera celui du bas-fond de Kambo au Mali. Les apports journaliers reconstitués par le modèle GR3 ont été utilisés pour simuler les variations des hauteurs d'eau dans le bas-fond avec ou sans aménagement. Cette modélisation a été couplée à celle :

- de l'évolution hydrique du sol sans aménagement,
- du bilan hydrique des cultures pour les trois zones de l'aménagement:

* Avec aménagement, on a considéré que la réserve en eau du sol utilisable par la plante (RU) était pleine lorsque le niveau de l'eau dans la retenue était à moins de 0.2 m de la surface du sol (profondeur correspondant à l'enracinement du riz);

* Sans aménagement, on a considéré que, lorsqu'il y avait écoulement, la nappe était affleurante et descendait de 0.02 m/jour dès que les écoulements s'arrêtaient de façon significative.

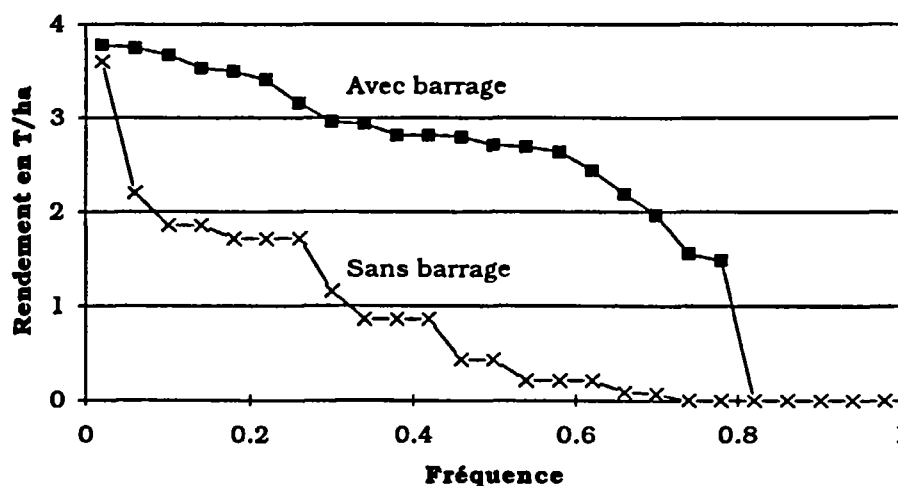
Cette simulation combinée a été réalisée sur les 25 années pluviométriques disponibles. Le tableau LXXXIX illustre les résultats de cette simulation.

Tableau LXXXIX : Moyennes et écart-types des indices de satisfaction en eau pour chaque zone (en %)

	Zone	Moyenne	Ecart type
Avec aménagement	Zone haute	78.60	16.69
	Zone moyenne	81.40	16.52
	Zone haute	83.16	16.51
Sans aménagement	Zone haute	68.44	14.31
	Zone moyenne	71.00	14.91
	Zone haute	73.00	14.91

Les variations interannuelles des rendements ont été évaluées par une simulation calée sur les résultats d'enquêtes. Les rendements moyens simulés sur l'aménagement ont ainsi été estimés à 2.4 t/ha, mais la probabilité de rendement nul reste forte: 15% (figure 86).

Figure 86 : Fréquences au dépassement des rendements estimés par simulation à Kambo



Le gain de rendement varie de façon importante suivant la zone aménagée (tableau XC).

Tableau XC : Variation des rendements interannuels moyens simulés avec ou sans aménagement

	Rendements estimés en tonnes par hectare		
	Zone haute	Zone moyenne	Zone basse
Sans aménagement	0.52	1.00	1.27
Avec aménagement	1.68	2.23	2.63
Gain dû à l'aménagement en %	223	123	107
Années à très faible rendement en %	16	16	24

Compte tenu des rendements espérés, le premier problème sera d'entretenir la fertilité des sols pour assurer la productivité souhaitée. En estimant les exportations à 40 unités d'azote, 15 unités de phosphore et 45 unités de potassium, les charges en fertilisants seraient de l'ordre 0.02 tonne de riz par hectare, ce qui, sur le plan strictement économique, reste attractif comparé au total des charges: 1.95 tonnes de paddy par hectare et au rendement interannuel estimé à 2.4 tonnes par hectare. Encore faudra-t'il que les riziculteurs disposent des capacités financières pour assurer cette fertilisation. Malgré l'aménagement, la valorisation financière reste déficitaire une année sur cinq.

L'emploi d'herbicides et d'une fumure vulgarisée équivaut à une charge de 0.88 tonne de paddy par hectare, mais permet un rendement moyen de 3.5 tonne par hectare (AHMADI & al, 1991), ce qui fait passer le taux de valorisation financière à 1.57 au lieu de 1.17.

Bien qu'intéressante, l'intensification de la riziculture implique:

- que les exploitants aient une disponibilité et un équilibre financiers suffisants pour assumer le risque interannuel de perte sèche une année sur cinq;
- qu'il existe une demande domestique ou un réseau de commercialisation du riz qui permette de valoriser la production.

L'intérêt du barrage demi-souterrain est de permettre l'intensification productiviste, mais celle-ci ne sera vraiment attractive pour les paysans que lorsque la productivité du travail dans les bas-fonds sera au moins égale ou supérieure à celle des hautes terres.

J.M. LAMACHERE



Culture de sorgho dans le bas-fond de Bidi, chanfrein dénudé et érodé



J.M. LAMACHERE

Micro-barrage à digue déversante de Bidi, passe centrale à batardeaux

J.M. DELFIEU



Crue dans le bas-fond de Bidi

J.M. LAMACHERE



Rizière en aval du micro-barrage de Bidi, dispositif de mesure des fuites



J.M. LAMACHERE

Bac à évaporation et station limnimétrique en amont du microbarrage de Bidi

P. PEREZ



Orage tropical dans le Siné-Saloum

J. ALBERGEL



Décruie rapide dans le bas-fond de Keur-Samba-Diama

J. ALBERGEL



Dégâts des eaux dans un bas-fond du Siné-Saloum

J. ALBERGEL



Mesure piézométrique dans un puits du bas-fond de Keur-Samba-Diama

J. ALBERGEL



Culture attelée sur les terres hautes du Siné-Saloum

W. VAN DRIEL



Pépinières en buttes



W. VAN DRIEL

Travail du sol collectif par
un groupe de jeunes

W. VAN DRIEL



Collecteur central à batardeaux de Moadougou

W. VAN DRIEL



Diguettes en courbes de niveau à Kawara

W. VAN DRIEL



Limnigraphe dans le bas-fond

B. LIDON



Barrage demi-souterrain dans le bas-fond de Kambo

B. LIDON



La riziculture, un travail féminin dans le Sud du Mali

J. ALBERGEL



Diversification, la culture de patates douces dans les bas-fonds du Sud du Mali

B. LIDON



Digue de pêche avec batardeau à Kambo

B. LIDON



Bac à évaporation et pluviomètre à Kambo

D. BRUNET



Récolte du riz à Djiguinoum



J. ALBERGEL

Essai rizicole en milieu paysan,
casier rizicole traditionnel diola
à Djiguinoum

D. BRUNET



Evacuation des eaux salées au
barrage anti-sel de Djilakoun

Toxicité ferrique et aluminique
des eaux et des sols, vallée Le Brusq

J. ALBERGEL



J. ALBERGEL



Station hydrologique du pont de Djiguinoum

Quatrième partie

**Les bas-fonds
en Afrique de l'Ouest**

Typologie

L'objectif final de l'action de recherche coordonnée sur les bas-fonds est l'élaboration d'une typologie permettant de classer les bas-fonds de l'Afrique de l'Ouest en fonction des caractéristiques déterminant leurs potentialités de mise en valeur agricole. Sur chaque site pilote, des équipes pluridisciplinaires ont mené simultanément des études de caractérisation du fonctionnement des milieux naturels, des descriptions des systèmes de production, des essais agronomiques et des tests sur les aménagements hydro-agricoles. Ces travaux ont permis d'identifier les variables pertinentes à prendre en compte dans la mise en valeur agricole des bas-fonds. L'analyse des relations existantes entre ces variables constitue le fondement de la typologie proposée.

Dans ce chapitre, nous analyserons les différentes typologies de bas-fond proposées dans la littérature pour ces milieux et nous chercherons à les orienter en fonction des travaux effectués sur les sites représentatifs. Nous présenterons les principaux résultats des études de régionalisation des variables du fonctionnement des bas-fonds. Enfin nous indiquerons quels aménagements semblent appropriés à chaque type de bas-fond et pour quel usage.

LES TYPOLOGIES USUELLES

CARACTERISATIONS GEOLOGIQUE ET CLIMATIQUE

ALBERGEL & CLAUDE

A partir des données hydrologiques recueillies par l'ORSTOM sur les bassins versants représentatifs de l'Afrique de l'Ouest (DUBREUIL, 1972), ALBERGEL & CLAUDE (1988) proposent de distinguer cinq grandes familles de bas-fonds. Ce découpage basé sur des critères géologiques et climatiques permet de créer des ensembles cohérents pour expliquer le fonctionnement hydrologique. Dans chacun de ces ensembles, les paramètres de la ressource en eau dépendent principalement de la taille et du relief du bassin versant. Ces familles de bas-fonds sont les suivantes :

- Dans les zones de socle ancien
 - 1 - les bas-fonds sahéliens (pluviométrie annuelle entre 300 et 700 mm), famille des bas-fonds du Yatenga,
 - 2 - les bas-fonds des régions soudano-sahéliennes (pluviométrie annuelle entre 700 et 1100 mm),
 - 3 - les bas-fonds de la zone soudano-guinéenne (pluviométrie annuelle entre 1100 et 1400 mm), famille des bas-fonds de la Comoé et du Mali-Sud
- Dans les zones sédimentaires tertio-quaternaires
 - 4 - les bas-fonds des formations sédimentaires du continental terminal (pluviométrie annuelle entre 300 et 900 mm dans les parties non désertiques des bassins sénégal-mauritanien et Iullemeden), famille des bas-fonds du Sine-Saloum
 - 5 - les bas-fonds des zones fluvio-marines dans les estuaires des fleuves et rivières depuis l'embouchure du fleuve Sénégal (pluviométrie 200 mm) aux rivières de la Guinée-Bissau (pluviométrie 1600 mm), famille des bas-fonds de Casamance.

Deux classifications plus détaillées existent pour les familles 1, 2 et 3: celles de RAUNET (1982, 1985) et de KILLIAN & TEISSIER (1973)

CARACTERISATIONS CLIMATIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE DE RAUNET

La classification de RAUNET est basée sur des critères morpho-géologiques permettant de mettre en évidence les contraintes à la riziculture et de proposer des types d'aménagement appropriés. Il distingue quatre familles de bas-fonds en Afrique et à Madagascar sur les surfaces d'aplanissement granito-gneissiques. Les différences qui permettent de distinguer ces quatre familles vis à vis des caractères morphologiques, hydrologiques et pédologiques tiennent aux actions respectives, d'une part des eaux de surface et d'autre part des nappes phréatiques (hydrolyse, dégradation des argiles ...). Ces quatre familles sont les suivantes :

- 1 - les bas-fonds des régions sèches sur remblai d'ennoyage argileux horizontal,
- 2 - les bas-fonds de la zone plus humide comprenant une partie centrale horizontale à remblai argileux et franges latérales concaves sableuses (entrent dans cette famille les bas-fonds du Yatenga, de la Comoé et du Mali-Sud),
- 3 - les bas-fonds de l'Afrique de l'Est à gouttière centrale argileuse à genèse de montmorillonite,
- 4 - les bas-fonds des zones humides à substrat horizontal "sablo-tourbeux" sur arène non ou très peu remblayée.

CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE ET PHYTOECOLOGIQUE DE KILLIAN & TEISSIER

La classification de KILLIAN & TEISSIER concerne essentiellement la zone climatique 1000 à 1400 mm. Elle est basée sur des caractères morphologiques (pente, largeur du bas-fond, encaissement), auxquels sont associées les compositions végétales rencontrées. Elle distingue cinq familles :

- 1 - les bas-fonds étroits et peu marqués dont la zone centrale est occupée par une forêt galerie et les franges par une savane herbacée,
- 2 - les bas-fonds étroits et marqués dont la zone centrale est occupée par une forêt galerie et les franges par une forêt plus claire; font partie de cette famille les bas-fonds étudiés au Sud du Mali (Kambo),
- 3 - les bas-fonds larges et peu marqués dont la zone centrale est occupée par une forêt galerie claire et les franges par une savane herbacée,

4 - les bas-fonds larges et marqués dont la zone centrale est occupée par une forêt galerie et les franges par un recru forestier en concurrence avec les plantations; font partie de cette famille les bas-fonds étudiés dans la Comoé et dans le Sud Mali (Pentasso),

5 - les bas-fonds de jonction avec de vastes étendues marécageuses; la zone centrale est occupée par une forêt galerie, claire sur les bourrelets de berge. De part et d'autre du marigot, s'étendent de vastes étendues de savane marécageuse bordée de forêts ou de palmiers; font partie de cette famille les bas-fonds étudiés en Casamance.

Au regard de ces classifications, on remarque que le choix des projets pilotes correspond plutôt à la typologie générale qui regroupe les bas-fonds sur des critères de nature géologique et climatique. Dans les deux autres typologies, les bas-fonds étudiés sont regroupés différemment. Chacune de ces typologies met en évidence un caractère fondamental des bas-fonds:

- pour la première, le fonctionnement hydrologique des bas-fonds;
- pour la seconde, des critères morphopédologiques en relation avec le fonctionnement hydrogéologique;
- pour la troisième, des critères de forme en relation avec l'écologie du bas-fond.

Aucune ne tient compte des critères agronomiques et socio-économiques pour une mise en valeur des bas-fonds.

CRITERES TYPOLOGIQUES POUR UNE MISE EN VALEUR AGRICOLE

A partir des études menées sur les sites des projets pilotes, il est possible de dresser une liste des critères à prendre en compte pour caractériser un bas-fond et envisager une amélioration de sa mise en valeur. Ces critères sont de trois ordres : des critères physiques, des critères socio-économiques et des critères agronomiques. Le tableau XCI donne la liste de ces critères et montre les liaisons qui sont explicitées dans la suite du texte.

De l'analyse des critères pertinents et des relations qu'ils entretiennent, il ressort deux ensembles de critères que l'on peut hiérarchiser de la façon suivante :

- Des critères régionaux :

- 1- La zonation climatique,
- 2- Le substrat géologique et le relief,
- 3- La démographie,
- 4- Le degré d'intégration à l'économie de marché.

- Des critères locaux

- 5- La taille des bassins versants et la morphologie des bas-fonds,
- 6- L'organisation sociale et foncière,
- 7- La technicité des populations vis à vis de la maîtrise de l'eau,
- 8- Les possibilités d'accès aux sources de financement

**Tableau XCI : Critères pour la typologie des bas-fonds
et relations avec les paramètres de la mise en valeur**

Paramètres à étudier pour la mise en valeur des bas-fonds	Critères régionaux				Critères locaux			
	Zonation climatique	Géologie et relief	Démographie	Intégration à l'économie de marché	Tailles des bassins et morphologie des bas-fonds	Organisation sociale et foncière	Technicité des cultures / à la maîtrise de l'eau	Possibilité d'accès aux sources de financement
Fonctionnement hydrologique	++	++	0	0	++	0	+	0
Fonctionnement hydrogéologique	++	++	+	0	+	0	+	0
Sols	++	++	+	0	+	+	+	0
Végétation	++	+	+	+	+	+	0	+
Système de cultures dans le bas-fond	++	+	+	++	+	+	++	++
Place du bas-fond / système de production	++	+	+	++	++	++	++	++
Possibilité d'intensification	++	0	++	++	+	++	++	++
Niveau technique de l'aménagement	+	+	+	+	++	++	++	++

0 pas dépendant, + dépendant, ++ très dépendant

CRITERES REGIONAUX

La zonation climatique et ses conséquences

L'ensemble de la zone concernée est soumise à un climat tropical caractérisé par une seule saison des pluies plus ou moins longue. Le bilan entre la pluviométrie et l'évaporation a une conséquence sur la ressource en eau et les potentialités agricoles des versants. Dans les bas-fonds l'alimentation hydrique des cultures est complétée par la remontée des nappes aquifères et l'inondation par les crues du marigot.

Les études de cas bien étagés dans cette région climatique où la pluviométrie inter-annuelle varie entre 600 et 1400 mm montrent qu'une séparation par l'isohyète 1000 mm environ est pertinente pour classer les bas-fonds.

Au nord de cet isohyète les bas-fonds sont caractérisés par:

- la longueur de la saison des pluies qui n'est pas suffisante pour assurer des cultures dont le cycle végétatif est supérieur à 90 jours,
- une recharge des nappes d'autant plus aléatoire que l'on s'éloigne vers le nord,
- un régime hydrologique et un fonctionnement hydrique des sols qui se différencient par le contexte géologique, les formations superficielles et les états de surface,
- un système de production où l'élevage et l'agriculture sont concurrentiels,
- des cultures de bas-fonds où la riziculture n'est pas prédominante; maïs, sorgho, arboriculture et maraîchage de contre-saison tiennent une place importante,
- un niveau de technicité très faible des agriculteurs quant à la maîtrise de l'eau.

Au sud de cet isohyète les bas-fonds sont caractérisés par :

- la possibilité de cultiver des plantes dont le cycle végétatif est supérieur à 120 jours,
- le rôle des nappes dans le fonctionnement hydrologique du bas-fond qui devient important aussi bien dans les régions de socle que dans les régions sédimentaires,
- un système de production qui fait une place moins négligeable aux cultures de bas-fond,
- des cultures de bas-fond basées sur la riziculture mais également sur des spéculations de contre-saison. Elles varient suivant la morpho-pédologie des bas-fonds et l'organisation des sociétés rurales.

En pédologie

La pédogénèse est largement tributaire du contexte géologique et climatique. Sur les formations pénéplanées du précambrien moyen et inférieur, composées de roches métamorphiques et d'intrusions granitiques ou de gabbros, on retrouve la classification réalisée par RAUNET, avec des bas-fonds argilo-sableux sur les substrats granitiques, et des bas-fonds très argileux sur les substrats schisteux.

Les organisations superficielles des sols de versants ont un rôle prépondérant dans la genèse des crues observées dans les bas-fonds des zones sèches. Les organisations internes de la couverture pédologique commandent les apports en eau de surface dans les zones plus humides.

Les principaux sols de versants rencontrés en Afrique de l'Ouest sont:

- entre les isohyètes 400 et 600 mm, les sols ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés sur lesquels se situe le projet Yatenga;
- entre les isohyètes 600 et 1000 mm, les sols ferrugineux tropicaux lessivés, sur lesquels se situe le projet Siné-Saloum;
- entre les isohyètes 1000 et 2000 mm, les sols ferrugineux tropicaux lessivés et les sols ferralitiques faiblement à moyennement dessaturés sur lesquels se situent les 3 projets Mali-Sud, Comoé et Casamance.

L'état de dégradation des sols de versants comme de bas-fonds est fonction de la pression démographique et des modes de culture.

Ces distinctions recoupent la zonation climatique.

En écologie végétale

La végétation suit la répartition spatiale de la pluviométrie. Elle n'est pas apparue dans nos études comme un critère pertinent de typologie. Elle permet d'identifier les bas-fonds sur les images satellitaires. Elle serait un critère de classification des zones d'un même bas-fond : inondées, engorgées ou sèches (MOKADEM & NONGUIERMA, 1991).

Avant l'aménagement d'un bas-fond, il est nécessaire d'inventorier la végétation naturelle. Dans les zones climatiques sèches de nombreuses espèces arbustives et arborées sont utilisées comme fourrage pendant la période de soudure. Partout les arbres sont utilisés pour la cueillette (fruits, médicaments) et pour la ressource en bois (énergie, charpente, clôtures...). L'état de la végétation naturelle dépend de son niveau d'utilisation par les populations.

Notons également que la végétation naturelle, surtout le tapis herbacé, joue un rôle important dans la genèse des crues à l'échelle du bassin versant.

En hydrologie

La limite climatique de 1000 mm de pluie annuelle semble également très pertinente pour classer les régimes hydrologiques des marigots, dont les écoulements sont sporadiques au dessous de l'isohyète 350 mm, brefs et intermittents au dessous de l'isohyète 1000 mm puis semi-pérennes au-dessus avec une période d'écoulement de plusieurs mois. Sous une pluviométrie inférieure à 1000 mm, les nappes aquifères ne remontent pas suffisamment sur les versants pour alimenter l'écoulement des marigots dans les bas-fonds. Avec la décroissance de la pluviométrie, la réalimentation des nappes aquifères s'affaiblit encore sur les versants et les bas-fonds deviennent, avec les dépressions topographiques, les principales zones d'infiltration pour la réalimentation des aquifères à partir de la surface. Sous une pluviométrie supérieure à 1000 mm, la remontée des nappes aquifères sur les versants provoque leur affleurement dans les bas-fonds dès que la taille du bassin versant est suffisante (5 km² sur le bassin de Kambo).

En agronomie

Sur les cultures

Une première division est encore réalisée par l'isohyète 1000 mm. Au nord de cet isohyète la mise en culture la plus courante part de l'axe central du bas-fond (riz) jusqu'à sa zone de raccordement (sorgho, mil). Le maïs remplace le sorgho lorsqu'on se rapproche de l'isohyète 1000 mm. Au sud de l'isohyète 1000 mm on distingue essentiellement trois modes de culture :

- la riziculture et l'arboriculture des petits bas-fonds soudanais marqués,
- la riziculture, la patate douce, l'arboriculture, le maraîchage des bas-fonds soudanais plus larges,
- les palmeraies, les rizières douces et les rizières salées des zones d'estuaire.

Sur les systèmes de production

Dans tous les cas étudiés, les bas-fonds occupent une place marginale dans le système de production. Les décideurs cherchent à augmenter la part de production des bas-fonds parce que ceux-ci présentent des potentialités intéressantes et des possibilités de réduire la pression sur les terres hautes et, par conséquent, de freiner leur détérioration. Ce sont des terroirs qui se prêtent à une agriculture plus intensive dès que l'alimentation hydrique des cultures y est sécurisée.

L'étude des systèmes de production dans les projets pilotes montre que l'on peut adopter une première classification qui recoupe le zonage climatique. En effet, au nord de l'isohyète 1000 mm les bas-fonds sont vraiment très marginaux par rapport aux cultures de versant. Au sud de cet isohyète la place d'un bas-fond dans la production d'une société rurale dépend de facteurs physiques, comme la dimension et la forme du bas-fond, la nature des sols (typologie de KILLIAN & TEISSIER), mais aussi de facteurs humains comme la démographie, l'organisation des producteurs, la possibilité de satisfaire les besoins des producteurs (crédit, accès aux semences et aux intrants...) et de la présence ou non d'un aménagement réussi.

Sur la maîtrise de l'eau

On retrouve la zonation climatique. Les agriculteurs de la zone sahélienne connaissent traditionnellement peu les techniques d'irrigation du riz. La maîtrise de l'eau est d'autant plus courante et techniquement élevée que les bas-fonds se situent dans des zones humides; les riziculteurs de Casamance ont développé des techniques très élaborées de gestion de l'eau (quantité et qualité).

Le tableau XCII résume la zonation climatique et montre les domaines étudiés.

Tableau XCII : Zonation climatique et conséquences pour les bas-fonds

Distribution des pluies	Pluviométrie annuelle mm	Sol	Végétation	Cultures pluviales	Système agricole traditionnel	Régime hydrologique	Projet pilote
Une saison des pluies	< 350	Ferrugineux tropicaux non ou peu lessivés	Très discontinue	Pas de culture pluviale	Elevage oasis	Ecoulements sporadiques	Non étudié
	350 à 600		Steppe à épineux discontinue	Mil 90 jours	Elevage, agriculture, sorgho ou maïs de bas-fond, riz très rare, maraichage, arboriculture	Ecoulements brefs et intermittents, part du ruissellement: 90 à 100%	Yatenga
	600 à 1000	Ferrugineux tropicaux lessivés	Discontinue savane herbeuse	sorgho			Sine Saloum
	1000 à 1200	Association sols ferrugineux tropicaux et sols ferralitiques moyennement désaturés	Continue, savane arbustive et arborée forêts galeries forêts sèches mangrove	Céréales 120 jours	Agriculture, pêche, riz de bas-fond, maraichage, arboriculture	Ecoulements semi-pérennes, écoulement de base pour 40 à 90%	Mali Sud Comoté
	1200 à 1600						Casamance
Deux saisons des pluies	1200 à 2000	Pour mémoire					Non étudié
	2000 à 4000						Non étudié

La zonation géologique et ses conséquences

En Afrique de l'Ouest, dans les limites étudiées qui correspondent géographiquement à la zone comprise entre 9° et 15° de latitude Nord, 5° de longitude Est et 18° de longitude Ouest, les principales formations géologiques sont constituées (figure 2):

- de granites, gneiss et migmatites du précambrien inférieur et moyen,
- de séries schisto-gréseuses ou volcano-sédimentaires du précambrien moyen au birrimien,
- de séries gréseuses allant du précambrien supérieur au primaire,
- de séries sédimentaires marines dans le bassin Sénégal-Mauritanien,
- de séries sédimentaires continentales dans le delta central du fleuve Niger, dans le bassin de Taoudéni au Mali et dans le bassin des Iullemmeden au Niger

Le tableau XCIII présente les principales formations géologiques rencontrées en Afrique de l'Ouest entre les isohyètes 600 et 1600 mm à une seule saison des pluies, avec les altitudes correspondantes, leur localisation géographique et les surfaces occupées exprimées en pourcentage total de la zone.

Tableau XCIII : Zonation géologique et altitude

Formations géologiques	Substratum	Altitudes en m	Superficie %	Localisation	Projet pilote
Précambrien 76 %	Granites, gneiss, migmatites (25%)	200 à 500 500 à 1000	20 5	Burkina Faso, Bénin, Côte d'Ivoire, Guinée, Mali Guinée, Côte d'Ivoire	Yatenga, Comoé Mali-Sud
	Schisto-gréseux ou volcano-sédimentaire (25%)	200 à 500 500 à 1000	20 5	Burkina Faso, Bénin, Côte d'Ivoire, Guinée Guinée, Côte d'Ivoire	Non étudié
	Gréseux (26%)	0 à 200 200 à 500 500 à 1000	5 14 7	Ghana Mali, Guinée, Burkina Faso Guinée, Burkina Faso, Mali	Non étudié
Primaire au Quaternaire (24%)	Sédimentaire marin (12%)	0 à 100	12	Sénégal, Gambie, Guinée	Siné-Saloum, Casamance
	Sédimentaire continental (12%)	200 à 500	12	Mali, Niger	Non étudié

Les séries sédimentaires sont caractérisées par des aquifères continus de grande extension qui couvrent 85% du Sénégal, 65 % de la Mauritanie, 75% du Niger, 64% du Mali.

Les formations cristallines et cristallophylliennes sont caractérisées par la présence d'un aquifère discontinu lié à l'altération et à la fracturation. Elles occupent 97% de la Côte d'Ivoire, 95% du Burkina Faso, 94% du Togo et 83% du Bénin. L'épaisseur d'altération est assez faible sur les roches granitiques. La frange d'altération est plus épaisse et plus argileuse sur les roches cristallophylliennes. Elle croît vers le Sud.

Quand on considère la zone géographique couverte en Afrique de l'Ouest par le climat à une seule saison des pluies entre les isohyètes 600 et 1600 mm, chaque tranche d'altitude correspond au pourcentage suivant de la superficie totale:

- altitude supérieure à 500 m : 17%
- altitude comprise entre 200 et 500 m : 66%
- altitude comprise entre 100 et 200 m : 5%
- altitude inférieure à 100 m : 12%

Deux domaines ont été explorés dans le cadre de ce programme de recherche : le domaine granito-gneissique ou migmatitique dans la tranche d'altitude 200 à 500m et le domaine sédimentaire marin dans la tranche des altitudes inférieures à 100m. La zone à laquelle peuvent être étendus nos résultats du point de vue de la géologie et du relief couvre 32% de l'Afrique de l'Ouest à une seule saison des pluies entre les isohyètes 600 et 1600 mm.

La densité de population

La démographie apparaît comme un facteur régional important à prendre en compte en relation avec la place occupée par le bas-fond dans le système de production.

Au Nord de l'isohyète 1000 mm, les bas-fonds ont une place très marginale dans le système de production et ils ne sont cultivés que si la densité de population est supérieure à 40 habitants au km², c'est à dire à proximité des villes et des gros villages.

Au Sud de l'isohyète 1000 mm, la place des bas-fonds dans le système de production est d'autant plus importante que la densité de population est forte (50 à 60 habitants au km² pour l'Afrique de l'Ouest). Une population assez nombreuse constitue une force de travail disponible pour la réalisation des aménagements et la valorisation agricole des bas-fonds. Cette force de travail est d'autant plus importante que la population présente est dans la tranche d'âge 20 à 40 ans. Une forte émigration vers les centres urbains ou à l'étranger constitue un handicap à la valorisation agricole des bas-fonds, même si les capitaux en provenance de cette émigration sont investis dans des aménagements.

L'accroissement de la population n'entraîne pas forcément une intensification des cultures, mais plutôt, en Afrique de l'Ouest, une extension des superficies cultivées au détriment des jachères et du milieu naturel.

Le degré d'intégration à l'économie de marché

D'une manière générale, les productions céréalières de saison des pluies sont destinées à l'auto-consommation. Seuls de faibles surplus sont commercialisés, les paysans ayant tendance à stocker leurs vivres de manière à garantir leur alimentation sur des périodes de 2 à 3 ans.

Les productions de contre-saison sont plutôt commercialisées. Les facteurs favorables à cette commercialisation sont la proximité de centres urbains, l'existence de structures commerciales actives (coopératives) ou, de façon plus particulière (Casamance), la présence de centres touristiques.

De manière plus régionale, les sociétés rurales sont intégrées dans une économie de marché dans les zones où se pratiquent la culture de rente: zones cotonnières du Mali, du Burkina Faso, du Sénégal, de la Côte d'Ivoire, du Bénin et du Togo, zone arachidière du Sénégal et de la Gambie. Dans ces régions, les paysans disposent de ressources financières, ont accès au crédit, aux intrants etc. De plus, les sociétés cotonnières sont devenues des sociétés de développement qui cherchent à diversifier les productions dans les territoires où elles sont présentes. Elles incitent les paysans à la mise en valeur agricole des bas-fonds. Des projets régionaux (ORC au Burkina Faso) peuvent jouer temporairement le même rôle.

Le degré d'intégration des sociétés paysannes à l'économie de marché a des conséquences sur le système de production, les cultures pratiquées dans les bas-fonds, les possibilités d'aménagement et d'intensification des cultures.

CRITERES LOCAUX

La taille des bassins versants et ses conséquences

A l'intérieur d'une même zone de climat, de formation géologique et de relief, les caractéristiques morphologiques, pédologiques et hydrologiques des bas-fonds varient avec leur surface, leur forme et leur position topographique. Ces facteurs locaux influencent la mise en culture et le type d'aménagement.

En morpho-pédologie

Sur le socle granitique, les têtes de bas-fonds ont des bassins versants de superficie inférieure à 5 km², leur largeur est inférieure à 50 m et leurs sols sont sablo-limoneux, formés sur les altérites en place. Les parties amont se caractérisent par des bassins versants dont la superficie varie de 5 à 50 km², des bas-fonds de largeur comprise entre 100 et 200 m, et des sols argilo-sableux formés sur apports colluviaux-alluviaux. Les parties aval se caractérisent par des bassins versants dont la superficie est comprise entre 50 et 200 km², des largeurs de bas-fonds souvent supérieures à 200 m et des sols d'apport alluvial argileux dans les zones sahéliennes, très hétérogènes dans les régions où la pluviométrie annuelle est supérieure à 1000 mm.

Dans le domaine fluvio-marin des larges estuaires de l'Afrique de l'Ouest, les têtes de bas-fond et les parties amont, non influencées par la marée, ont des sols hydromorphes peu salés; les parties amont et aval assujetties aux battements des marées ont des sols de mangrove chimiquement très instables, très sensibles à l'exondation et aux fluctuations interannuelles des nappes aquifères. Exondés, les sols de mangrove deviennent très rapidement sulfatés acides et se sursalent en surface. Les bas-fonds qui sont de véritables rias marines sont très larges et à faible pente.

Dans le domaine sédimentaire, sous pluviométrie comprise entre 600 et 1000 mm, les bas-fonds sont très étroits. Les parties les plus exploitables sont les jonctions entre affluents et les méandres. Les sols y présentent les mêmes caractéristiques que ceux des bas-fonds sur socle granitique de la même zone climatique, avec des colluvionnements sableux plus importants. La principale différence entre les domaines sédimentaire et granitique tient au fonctionnement hydrogéologique.

Sur le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique

Dans chaque zone climatique, les fonctionnements hydrologique et hydrogéologique sont interdépendants. La nature du substrat géologique conditionne la position des nappes aquifères, leur capacité de stockage et leur productivité.

Outre l'affleurement des nappes aquifères dans les bas-fonds, l'écoulement des marigots est alimenté par le ruissellement sur les versants. Les facteurs conditionnels du ruissellement, générateurs des crues, sont les suivants :

- les sols, leur organisation superficielle et leur couverture végétale qui déterminent leur perméabilité et règlent l'importance des ruissellements en fonction des chutes de pluie.
- les caractères morphométriques du bassin versant et du bas-fond (surface, relief, pentes) règlent le mode de transfert et de propagation des crues.

Dans le chapitre "ressources en eaux de surface", 5 classes de perméabilité, 7 classes de relief et 2 familles de réseaux hydrographiques ont été définies. Dans une classe de perméabilité et de relief, la prédétermination de la crue décennale se fait à partir de la surface du bassin versant.

L'organisation sociale et foncière

Les sociétés africaines sont pluri-ethniques. Chaque ethnie joue un rôle social bien particulier en fonction de son importance numérique, de son poids politique, des activités qui lui sont propres et de son ancienneté dans le terroir. Le travail est également réparti au sein de l'unité de production, constituée par la famille, en fonction du sexe et de l'âge. La riziculture est essentiellement assurée par les femmes ainsi que le maraîchage de contre-saison quand la production ne fait pas l'objet d'une commercialisation trop poussée.

A l'organisation traditionnelle de la société s'ajoute l'existence plus récente d'organismes d'encadrement, et de structures associatives et coopératives. L'encadrement paysan peut être assuré par des structures nationales d'encadrement, dépendantes du ministère compétant (développement rural, agriculture et élevage, etc): CRPA au Burkina Faso, PNVA au Sénégal ..., des sociétés nationales de développement: CMDT au Mali, SOFITEX au Burkina Faso..., des ONG: AFVP, 6S, ENDA ... Très récemment, encouragées par des ONG et les gouvernements, se mettent en place des structures associatives de producteurs (GIE du Sénégal...). Chaque structure d'encadrement a une stratégie qui lui est propre en fonction d'objectifs dont doit tenir compte tout projet d'aménagement.

A l'échelle du bas-fond, la distribution foncière joue un rôle fondamental. On distingue les bas-fonds régis par un droit traditionnel où les parcelles sont morcelées et réparties dans plusieurs zones afin de minimiser les risques, et les bas-fonds où une réforme foncière a été effectuée suite à un aménagement. Lorsqu'une redistribution des terres est imposée après un aménagement ou par une politique dirigiste en matière d'intensification agricole, elle est toujours délicate à mettre en oeuvre et à pérenniser.

La technicité des populations vis à vis de la maîtrise de l'eau

La technicité des populations d'Afrique de l'Ouest vis à vis de la maîtrise de l'eau est très faible au Nord de l'isohyète 1000 mm. La stratégie paysanne est l'adaptation aux conditions du milieu. Les paysans déplacent leurs champs et modifient la gestion de leurs terroirs en fonction des aléas climatiques. En période de sécheresse, ils changent les variétés cultivées tout en sélectionnant des variétés robustes et photopériodiques.

Au Sud de l'isohyète 1000 mm, la technicité des populations vis à vis de la maîtrise de l'eau s'améliore du fait de la généralisation de la riziculture. Le niveau technique reste cependant assez faible, sauf dans les domaines estuariens des grandes rivières côtières (Casamance, Guinée Bissau) où les techniques traditionnelles de mise en valeur agricole sont élaborées mais ont été fortement perturbées par la récente sécheresse et une forte émigration.

Les possibilités d'accès aux sources de financement

La présence de structures de développement dans une région favorise l'accès des paysans au crédit, aux intrants et aux semences. Elle améliore également très nettement les possibilités de financement d'un ouvrage hydro-agricole pour lequel les paysans doivent toujours faire appel aux sources extérieures de financement qui sont multiples: coopération bi-latérale ou internationale, ONG, migrants, etc. Les structures de développement (ministères, sociétés de développement, ONG, associations ou coopératives de paysans) constituent les intermédiaires indispensables à la constitution des dossiers, à la réalisation des travaux, au suivi et à l'évaluation des aménagements.

LA TYPOLOGIE HYDRO-AGRICOLE

L'étude menée dans le cadre du programme CCE a permis de caractériser cinq types de bas-fonds bien répartis sur toute la zone climatique tropicale à une saison des pluies entre les isohyètes 600 mm et 1400 mm. A partir de ces caractéristiques pertinentes pour la valorisation agricole des bas-fonds, listées ci-dessus, et en tenant compte de leur caractère régional ou local nous avons cherché à résumer la typologie des bas-fonds en trois tableaux :

- Le premier tableau (XCIV) donne les caractères du milieu naturel à prendre en compte pour classer les bas-fonds.
- Le second tableau (XCV) récapitule les caractéristiques du milieu humain.
- Le troisième tableau (XCVI) propose une typologie en vue de la mise en valeur agricole des bas-fonds en s'appuyant sur les variables les plus pertinentes, et en simplifiant la caractérisation du bas-fond pour offrir une vue synoptique.

CARACTERES DU MILIEU NATUREL

Deux classes de caractères apparaissent pour décrire le fonctionnement naturel d'un bas-fond : les caractères descriptifs du bassin versant qui permettent de prévoir le fonctionnement hydrologique en relation avec les caractères régionaux, et les caractères descriptifs du bas-fond proprement dit qui permettent de décrire sommairement le site d'un aménagement.

Nous avons limité la superficie des bassins versants à 200 km² en considérant qu'au delà de cette superficie les bas-fonds deviennent des plaines alluviales dont la problématique de valorisation agricole sort de notre cadre d'étude. Les valeurs de 10 à 50 km² sont des limites qui correspondent bien à des modifications dans le comportement hydrologique et dans les possibilités d'aménagement.

Sept classes de relief ont été définies dans les études hydrologiques. Elles correspondent à des valeurs d'indices de pentes normalisés (ou corrigés) définies dans ce même paragraphe. Cinq classes de perméabilité ont été également définies dans les études hydrologiques. Elles sont encore utilisées dans la méthode RODIER & AUVRAY (1965), mais pourraient être remplacées par une classification plus objective basée sur la télédétection et la description de l'état de surface des sols. Une étude en cours sur l'ensemble de la zone (FAO / CIEH, ORSTOM, CEMAGREF) devrait fournir une typologie fiable des bassins en vue de la prédétermination des crues décennales.

En ce qui concerne le réseau hydrographique, il est apparu important au cours de cette étude de tenir compte de deux types de caractères : d'une part l'endoréisme qui se caractérise par des discontinuités dans le réseau hydrographique et l'existence de mares sur les plateaux et les versants, d'autre part le degré de concentration du réseau hydrographique qui influe sur le temps de base des crues, paramètre essentiel à la définition des formes de crue. Le pourcentage de la surface du bassin versant soumis à l'endoréisme permet de caractériser son influence sur le ruissellement.

Dans la classe des caractères liés au bas-fond nous avons retenu 3 caractères morphologiques : deux caractères décrivant le profil transversal et un critère décrivant le profil longitudinal. Les deux caractères décrivant le profil transversal correspondent à la classification de KILLIAN et TEISSIER (1973) avec les correspondances suivantes :

- Bas-fond étroit : zone centrale de largeur inférieure ou égale à 50 m,
- Bas-fond large : zone centrale de largeur supérieure à 100 m,
- Bas-fond peu marqué : pentes des versants inférieures à 4 %,
- Bas-fond marqué : pentes des versants supérieures à 4 %.

Le critère décrivant le profil longitudinal du bas-fond est tout simplement sa pente moyenne exprimée en mètres par kilomètre. Avec une pente de 2m/km, une digue de hauteur 1 m fait remonter le plan d'eau sur une distance de 500 m.

Le dernier critère typologique local est extrait des travaux de télédétection sur l'état d'engorgement des sols de bas-fond.

Tableau XCV : Typologie du milieu naturel

Caractères régionaux				Caractères liés au bassin versant				
Distribution des pluies	Pluviométrie annuelle mm	Géologie	Altitude m	Superficie du bassin versant km²	Relief 7 classes	Pérméabilité 5 classes	Réseau hydrog.	Endoréisme % de la surface
Une saison des pluies	< 350	granitique granites, gneiss, migmatites	0-200	<10	R1	P1 P2 P3 P4 P5	radial dentritique	0
	10 à 50			R2	0 - 10			
	50 à 200			R3	10 - 20			
				R4				
				R5				
Deux saisons des pluies	350 à 600	schisto-gréseux volcano sédimentaire gréseux	200-500	Caractères liés au bas-fond				
	600 à 1000			Largeur de la zone centrale en m	Pentes transversales	Pente longitudinale m/km	Etat d'engorgement (Profondeur de la nappe)	
	1000 à 1200							
	1200 à 1600							
Deux saisons des pluies	1200 à 2000	sédimentaire marin sédimentaire continental	500-1000	<50	< 2%	> 5	>- 50 cm	
	2000 à 4000			50 à 100	2 à 4%	2 à 5	50 à 0 cm	
				100 à 200	4 à 10%	< 2	0 à +50 cm	
				> 200	> 10%		< 50 cm	

CARACTERES DU MILIEU HUMAIN

Les critères typologiques concernant le milieu humain, sont plus difficiles à délimiter même s'ils ont été bien identifiés. Les limites sont peu quantifiables ou font appel à des statistiques rarement disponibles. Un même critère n'a pas la même signification sur le plan régional que sur le plan local.

A l'échelle régionale deux paramètres du milieu humain ont été retenus: la démographie et l'intégration à l'économie de marché.

En ce qui concerne la densité de population, dans les régions où la pluviométrie annuelle est inférieure à 1000 mm, le chiffre de 40 habitants au km² correspond à une valeur limite au dessus de laquelle les bas-fonds prennent une certaine importance dans les systèmes de culture. Il faudrait probablement réduire cette limite à l'échelle de la préfecture ou du cercle. La valeur brute de la densité de population doit être pondérée par une estimation du taux d'occupation des sols ou mieux encore par le taux d'occupation des terres cultivables qui donne une indication de la pression humaine sur l'espace exploitable pour les cultures. Pour tenir compte des phénomènes migratoires, on peut différencier l'émigration de longue durée, l'émigration saisonnière ou au contraire l'immigration. Dans toutes nos études, les zones rurales ne sont pas des zones d'immigration et lorsqu'on signale une émigration c'est que le phénomène prend une importance significative que l'on peut fixer à 20% de la population active. Le niveau d'intégration économique peut être mesuré par le revenu. En l'absence de statistiques, il est possible de le caractériser par trois autres variables :

- La place occupée par la culture de rente dans le système de culture. Avec un taux de surface mise en culture commerciale supérieur ou égal à 50 % des terres cultivées, le taux d'intégration économique peut être considéré comme fort; au dessous de 20% il peut être considéré comme faible.
- La présence de structures d'encadrement étatiques ou privées susceptibles d'aider les paysans à réaliser puis à gérer un aménagement et de leur faciliter l'accès aux programmes de vulgarisation agricole.

- La possibilité d'accéder à des sources extérieures de financement. Ce facteur va souvent de pair avec la présence de structures d'encadrement performantes. Il varie au cours du temps en fonction des politiques régionales, nationales ou internationales de mise en valeur agricole et d'aide au développement.

Les caractères locaux liés au milieu humain sont appliqués à l'échelle des villages qui exploitent un même bas-fond. En matière de main d'oeuvre agricole, nous avons retenu deux caractères :

- le premier fixe la disponibilité locale en main d'oeuvre pour de gros chantiers d'aménagement,
- le second hiérarchise la concurrence entre les cultures sur les hautes terres des versants ou des plateaux et les cultures de bas-fond.

Pour l'organisation sociale au niveau local nous n'avons retenu que le caractère d'appartenance des usagers d'un même bas-fond à un ou plusieurs groupes sociaux : ethnique, village, quartier.

En matière de techniques culturelles, nous avons regroupé sous une même rubrique la technicité hydraulique et agricole des paysans. La technicité hydraulique rend compte de l'aptitude des usagers d'un bas-fond à gérer l'eau. La technicité agricole rend compte de l'adaptation des techniques culturelles à la culture des bas-fonds. Une des principales contraintes agricoles à la mise en valeur des bas-fonds étant l'enherbement, sa maîtrise va de pair avec celle de l'eau.

Les deux derniers caractères humains décrivent le taux d'occupation du bas-fond par sa mise en culture et la taille du parcellaire. Le taux de mise en culture des sols d'un bas-fond indique l'intérêt porté par les paysans à cette partie de leur terroir et la taille du parcellaire dans le bas-fond fixe les conditions actuelles de la mise en culture, son caractère extensif ou intensif.

Tableau XCV : Typologie du milieu humain

Caractères régionaux					
Démographie			Intégration économique		
Densité hab/km ²	Taux d'occupation des sols ou de mise en culture	Déplacement de population	Importance des cultures de rente	Structure d'encadrement	Accès aux sources extérieures de financement
< 40	< 40%	émigration de longue durée	forte	forte	difficile
> 40	40 à 60%	émigration saisonnière	moyenne	moyenne	possible
	> 60%	immigration	faible	faible	facile
Caractères locaux liés au village ou au terroir					
Organisation sociale, technicité, capacité de travail				Organisation foncière	
Disponibilité en main d'oeuvre	Concurrence entre les cultures pour la main d'oeuvre	Groupes sociaux	Technicité hydraulique et agricole	Taux de mise en culture du bas-fond %	Taille des parcelles
forte	forte	homogène	forte	< 40	> 2 ha
moyenne	moyenne	hétérogène	moyenne	40 à 60	1 à 2 ha
faible	faible		faible	> 60	4 à 30 ares

SYNTHESE

Un tableau à entrées multiples permet de déterminer les principales familles de bas-fonds étudiés (tableau XCVI). La zonation climatique donne un ensemble de traits communs tant du point de vue fonctionnement naturel que du point de vue utilisation. La géologie permet de distinguer des familles de bas-fonds aux comportements hydriques similaires.

Il est à noter que seule la zone climatique à une saison des pluies a été explorée et que tous les grands ensembles géologiques n'ont pas été étudiés. Les sites à choisir pour compléter cette typologie seraient :

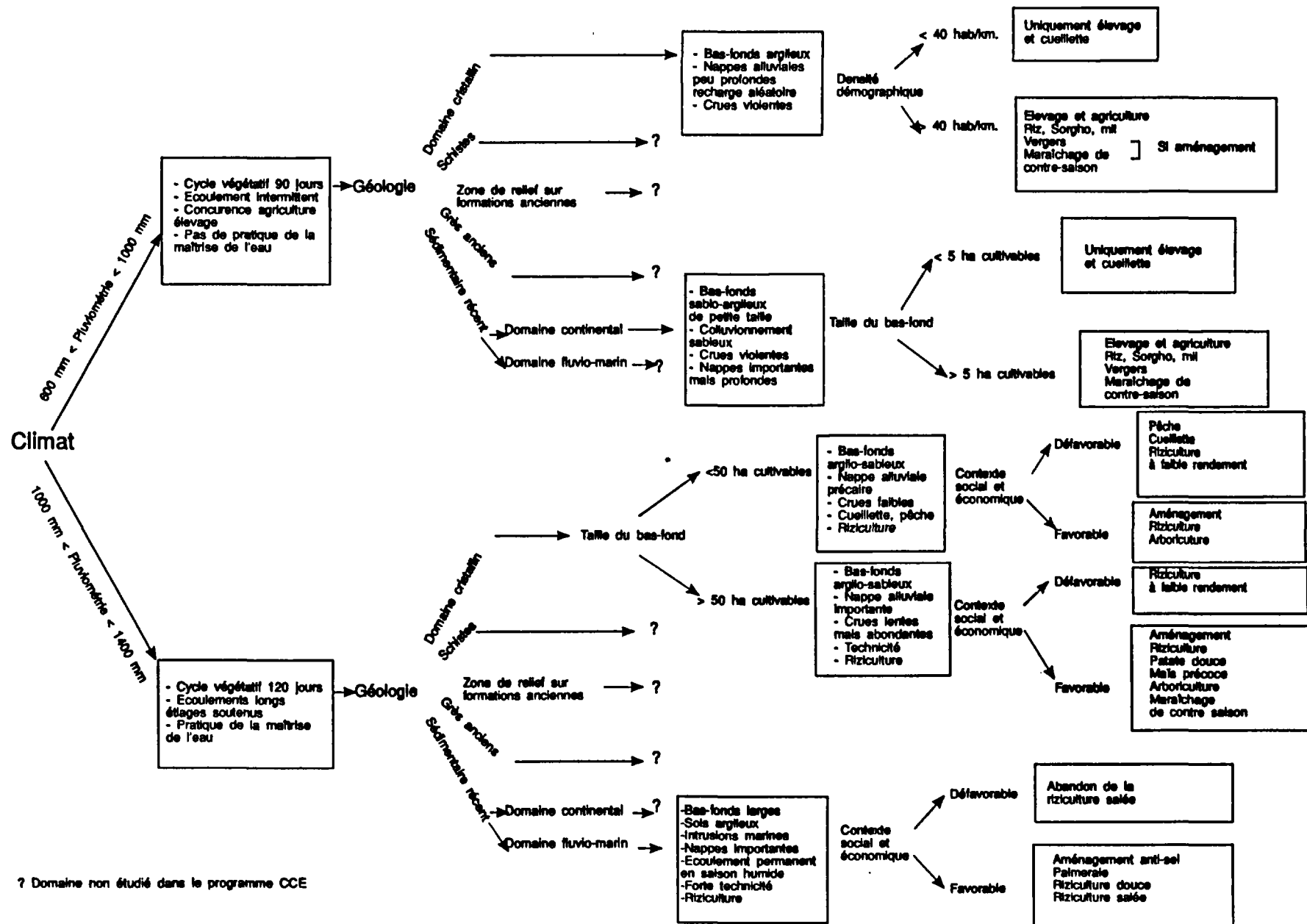
- les bas-fonds sur formation schisteuse en zone sèche et humide à une saison des pluies;
- les bas-fonds sur formation gréseuse en zone sèche et humide à une saison des pluies;
- les bas-fonds en zone de relief en zone sèche et humide à une saison des pluies;
- les bas-fonds en zone sédimentaire, influencés par la mer, en zone sèche à une saison des pluies;
- les bas-fonds en zone sédimentaire, non influencés par la mer, en zone humide à une saison des pluies;
- les bas-fonds de la zone climatique à deux saisons des pluies.

Après la discrimination par la zonation climatique et géologique, les critères typologiques deviennent variés:

- La densité démographique est le critère déterminant de la mise en valeur agricole des bas-fonds en zone sèche du domaine cristallin,
- La taille du bas-fond, ou de sa partie cultivable, définit son utilisation en zone sédimentaire sèche,
- Dans les autres cas la valorisation du bas-fond dépend à la fois de sa dimension et de l'organisation sociale des agriculteurs.

Cette classification est utilisée dans les chapitres suivants pour proposer une régionalisation des paramètres nécessaires aux projets d'aménagement de bas-fond, et surtout pour proposer différents types d'aménagements pour chaque famille de bas-fonds et en discuter les avantages et les inconvénients.

Tableau XCVI : Typologie des bas-fonds de l'Afrique de l'Ouest entre les pluviométries annuelles 600 et 1400 mm



Régionalisation

Trois thèmes d'extension spatiale des résultats ont été abordés au cours de ce programme. Le premier concerne la reconnaissance et la caractérisation des bas-fonds par l'imagerie satellitaire. Il permet de déterminer les potentialités agricoles des bas-fonds dans une région, et de guider les décideurs pour promouvoir l'agriculture de bas-fond au niveau d'un avant-projet. Le second thème est la spatialisation des données climatiques intéressant la valorisation agricole des bas-fonds. Le troisième thème est la régionalisation des paramètres hydrologiques dont la prédétermination est nécessaire pour la réalisation d'aménagements hydrauliques et l'optimisation de leur fonctionnement.

L'IMAGERIE SATELLITAIRE DANS LES BAS-FONDS

Deux études ont été menées pour caractériser les potentialités des bas-fonds par télédétection. La première a été réalisée par PEREZ & SEGUIS (1991) sur la région sud du Sine-Saloum dans des bas-fonds de la zone sédimentaire au nord de l'isohyète 1000 mm. La seconde s'est intéressée aux zones humides du domaine cristallin du Mali-Sud et de la Comoé (MOKADEM & NONGUIERMA, 1991) Nous donnons ici un résumé de ces travaux.

AU SINE-SALOUM

Ce travail a eu pour but de déterminer dans quelle mesure une image du satellite de télédétection SPOT peut servir à mettre en évidence les bas-fonds dans la région de Thyssé-Kaymor (Sénégal). Un bas-fond est une zone inondable de bas de toposéquence, aménagée éventuellement, comme actuellement celui de Keur Samba Diama, pour la culture du riz en hivernage et le développement de cultures irriguées de contre saison. Deux zones ont été étudiées: sur la première zone la méthodologie a été mise au point et les calages radiométriques réalisés à partir de prospections sur le terrain (zone de Thyssé Kaymor); la même méthodologie a été utilisée dans la zone de Birkélane sans travaux de vérité sol.

Région de Thyssé Kaymor

La zone extraite, sur l'image SPOT d'avril 1987, a une superficie de 150 km² (15 km d'Est en Ouest et 10 km du Nord au Sud). Sur l'ensemble de cette zone, les réflectances dans les canaux XS1, XS2, XS3 (respectivement dans le bleu-vert, le rouge et le proche infrarouge) sont caractérisées par les valeurs indiquées sur le tableau XCVII.

Tableau XCVII : Réflectances des canaux SPOT sur la zone de Thyssé Kaymor

Canal	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
XS1	34	81	50.1	6.6
XS2	26	93	50.8	8.9
XS3	18	89	60.9	9.0

Définition des classes

D'après les repérages antérieurs effectués sur le terrain, 5 types de paysages sont indexés à l'aide de zones-test tracées par la visualisation du canal XS3 de l'image.

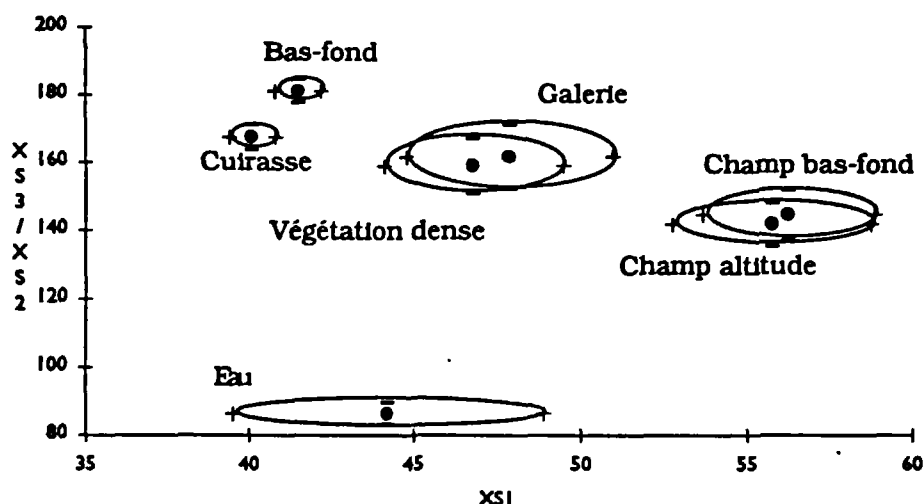
- «végétation dense» : surfaces non cultivées avec un important couvert végétal
- «cuirasse» : surfaces non cultivées avec peu de végétation = parcours dégradés,
- «eau» : eau libre du Bao-bolong,
- «galeries» : forêt galerie le long du réseau hydrographique,
- «bas-fond» : zone test choisie dans le bas-fond de Keur Samba Diama (superficie de 4 ha).

L'objectif de ce travail étant de mettre en évidence les zones de bas-fond, nous avons voulu savoir si les surfaces cultivées à proximité immédiate d'un bas-fond avaient des réflectances significativement différentes des autres champs. Nous créons donc 2 classes de champs :

- «champs de bas-fond» : surfaces cultivées situées en bas de toposéquence,
- «champs d'altitude» : surfaces cultivées situées sur des plateaux en haut de toposéquence.

Le rapport XS3/XS2 permet de faire ressortir la végétation, puisque celle-ci a une réflectance plus forte dans le canal XS3 et plus faible dans le canal XS2. La figure 87 représente la moyenne des luminances des pixels des zones-test, au centre, avec les écart-types de part et d'autre pour visualiser la dispersion.

Figure 87 : Dispersion des zones tests - 7 classes



L'eau se différencie des autres classes. Les écart-types importants sont dûs au fait que la partie Sud du Bao-bolong est salée, ce qui introduit des réflectances dispersées pour l'ensemble de la zone-test. La zone-test «bas-fond» est trop petite - 44 pixels seulement - mais elle se différencie également bien. En effet, pour l'analyse de l'hétérogénéité spatiale, il est nécessaire que l'élément de résolution soit tel que l'on puisse disposer d'au moins une centaine de pixels. (M.C. GIRARD et C.M. GIRARD, 1989). Certaines classes sont presque identiques : «végétation dense» et «galeries», «champ d'altitude» et «champ de bas-fond». Leur réunion donne 2 nouvelles classes : «végétation dense» et «champs».

Carte thématique

Pour éditer une carte thématique de la zone, la méthode de la classification supervisée a été utilisée.

La classification utilisée est la méthode Euclidienne : à chaque pixel est affectée la classe la plus proche par la distance euclidienne. Les calculs ne font donc intervenir que la luminance moyenne des classes. Une autre méthode faisant intervenir la variance a été testée - la méthode Sebestyen - mais les résultats ont été moins bons : davantage de confusion, la classe «bas-fond» disparaît presque complètement, la classe «cuirasse» est très réduite. Une carte couleur a été réalisée. (Planche couleur 3)

Tableau XCVIII : Classification de la zone de Thyssé Kaymor sur l'image SPOT d'avril 1987

Thème	Classe	Nombre de pixels	Superficies en %
«végétation dense»	1	205 918	36,5
«cuirasse»	2	61 000	10,8
«eau»	3	18 239	3,2
«champs»	4	262 015	46,5
«bas-fond»	5	16 829	3,0

Tableau XCIX : Matrice de confusion des classes sur la zone de Thyssé Kaymor

		Classes affectées				
		1	2	3	4	5
Classes	1	0,78	0,11	0	0	0,04
définies	2	0	0,96	0	0	0,04
pour les	3	0	0	1	0	0
zones	4	0,06	0	0	0,94	0
tests	5	0	0,02	0	0	0,98

C'est pour la classe 1 (végétation dense), que l'on observe le plus de confusion. La classe 5 (bas-fond) est bien distincte, mais n'oublions pas que la zone-test bas-fond ne fait que 44 pixels. Sur la carte, on retrouve des bas-fonds le long du réseau hydrographique, ce qui est tout à fait satisfaisant.

Région de Birkélane

Définition des classes

Les caractéristiques des classes «végétation dense», «culrasse», «eau», «champs», et «bas-fonds» sont conservées. Deux nouvelles classes doivent être ajoutées :

- «brûlis», du fait de la présence d'une importante zone brûlée à l'Ouest de Birkelane,
- «méandre», qui correspond au fond du lit d'un bras du Saloum.

Le tableau C donne la répartition des luminances des zones types choisies pour définir les classes.

Tableau C : Répartition des réflectances des zones types choisies pour définir les classes dans la région de Birkélane

Classe	nb pixels	XS1	écart-type	XS2	écart-type	XS3	écart-type	XS3/XS2	écart-type
végétation dense	5326	47	2.8	44.8	3.5	59.8	3.6	156.5	8.5
culrasse	595	40.1	0.7	36.6	1.2	53.1	2.5	167.5	3.8
brûlis	12282	44	1.6	43.5	2.5	46.3	3.3	135	7.5
méandre	366	61.3	2.5	59.3	3.2	57.7	5.5	123.6	7.8
eau	5733	44.2	4.7	34.3	4.2	23.3	3.1	86.4	3.3
champs	8409	56	2.8	58.8	3.7	66.5	3.2	142.6	6.9
bas-fonds	44	41.5	0.7	34.4	1.3	59.4	2.4	181.2	3.5

Carte thématique

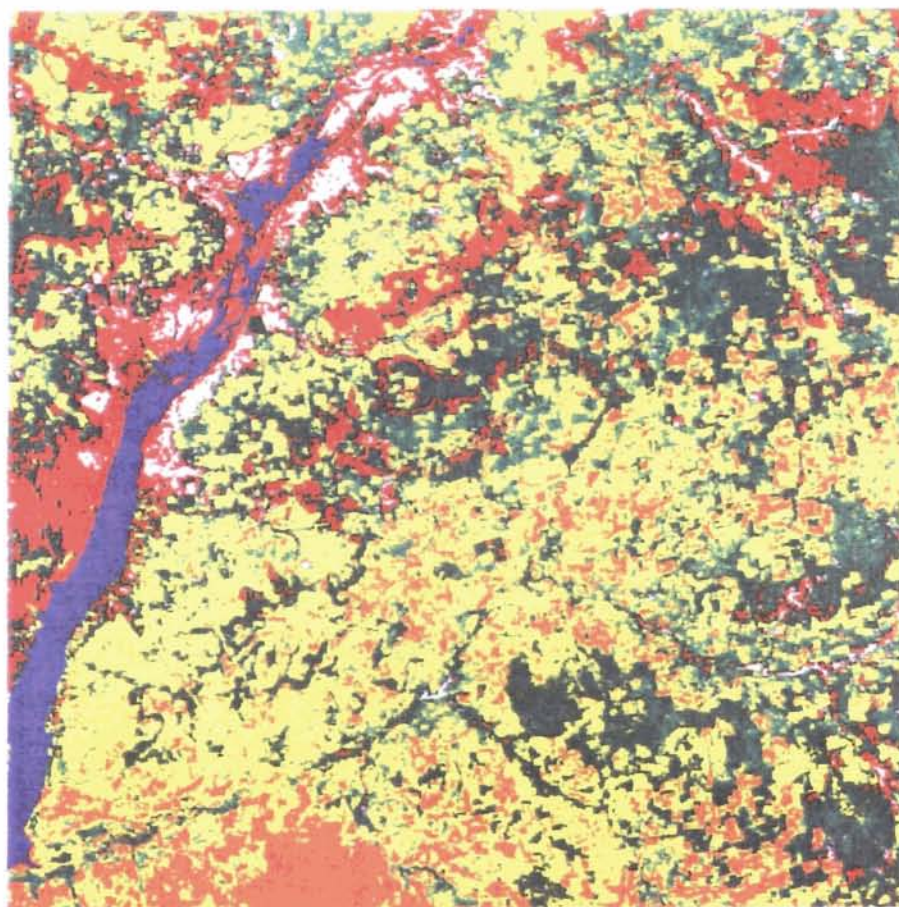
Le résultat de la classification supervisée est donné par la carte thématique de la planche couleur 3. On retrouve des bas-fonds le long de l'ancien cours du SALOUM, ainsi que dans les zones topographiques correspondant à cette unité. On retrouve cette même unité dans des zones de végétation dense ailleurs que sur le réseau hydrographique. Il est possible qu'il s'agisse de dépressions plus humides sur le plateau cuirassé. La vérification sur le terrain faite par LAMACHERE (1992) confirme l'existence de dépressions humides sur le plateau cuirassé.

CONCLUSION

Les classes «eau», «cuirasse» et «bas-fond» semblent correctement définies sur la zone de Thyssé-Kaymor. Il y a une légère confusion entre les classes «végétation dense» et «champs», mais l'ensemble reste satisfaisant. La classe «bas-fond» a donné de bons résultats dans la zone de Thyssé-Kaymor. Ce résultat positif nous encourage à penser qu'il devrait être possible d'utiliser les images satellites pour mettre en évidence les zones de bas-fond dans le type de paysage agricole rencontré.

Les zones de bas-fond potentiellement exploitables représentent moins de 5% des superficies de la région étudiée (150 km², centrés sur Thyssé-Kaymor et la zone de Birkélane). D'autre part, les sites utilisables excèdent rarement 5 ha d'un seul tenant. Cette caractéristique régionale doit être prise en compte dans les modes d'intensification agricole et dans les aménagements proposés.

**Planche couleur 3 : Classification supervisée de la région
de Thyse Kaymor sur l'image SPOT d'avril 1987**



AU SUD DU MALI ET DANS LA COMOE

Trois niveaux de recherche ont été explorés :

- Reconnaissance et mise en évidence des zones humides au sein du continuum paysager;
- Identification et caractérisation des composantes physiographiques et agro-écologiques des zones humides.
- Analyse des relations entre dynamique de l'eau et information satellitaire dans les parties rizicoles des zones humides.

Les méthodes mises en oeuvre sont basées sur le choix des images et des dates de prise de vue répondant le mieux aux objectifs à atteindre. Pour l'ensemble des sites: une image LANDSAT TM de fin de saison des pluies (octobre 1989) et une image LANDSAT TM de fin de saison culturale (décembre 1990). Pour le sud du Mali: une image SPOT multispectrale de saison sèche (mars 1990). Pour la Comoé (Burkina Faso): une image SPOT multispectrale de fin de saison culturale (janvier 1990) et une image SPOT multispectrale de saison sèche (mars 1990).

Neuf bassins situés au Burkina Faso et au Mali ont servi de cadre à la recherche : Damana, Kawara et Moadougou au Burkina; Kambo, Farako, Lotio, Banankoni, Samogossoni et Sikasso au Mali.

Mise en évidence des zones humides

La méthode est résumée par la figure 88. Il s'agit d'une démarche intégrée de télédétection combinant les phases de photo-interprétation, d'observations sur le terrain et de traitements analogiques et numériques d'images satellitaires.

Une approche comparative a permis de tester la pertinence de deux procédures d'analyse de l'information satellitaire pour reconnaître et inventorier les zones humides au sein du paysage: traitement analogique et traitements numériques d'images.

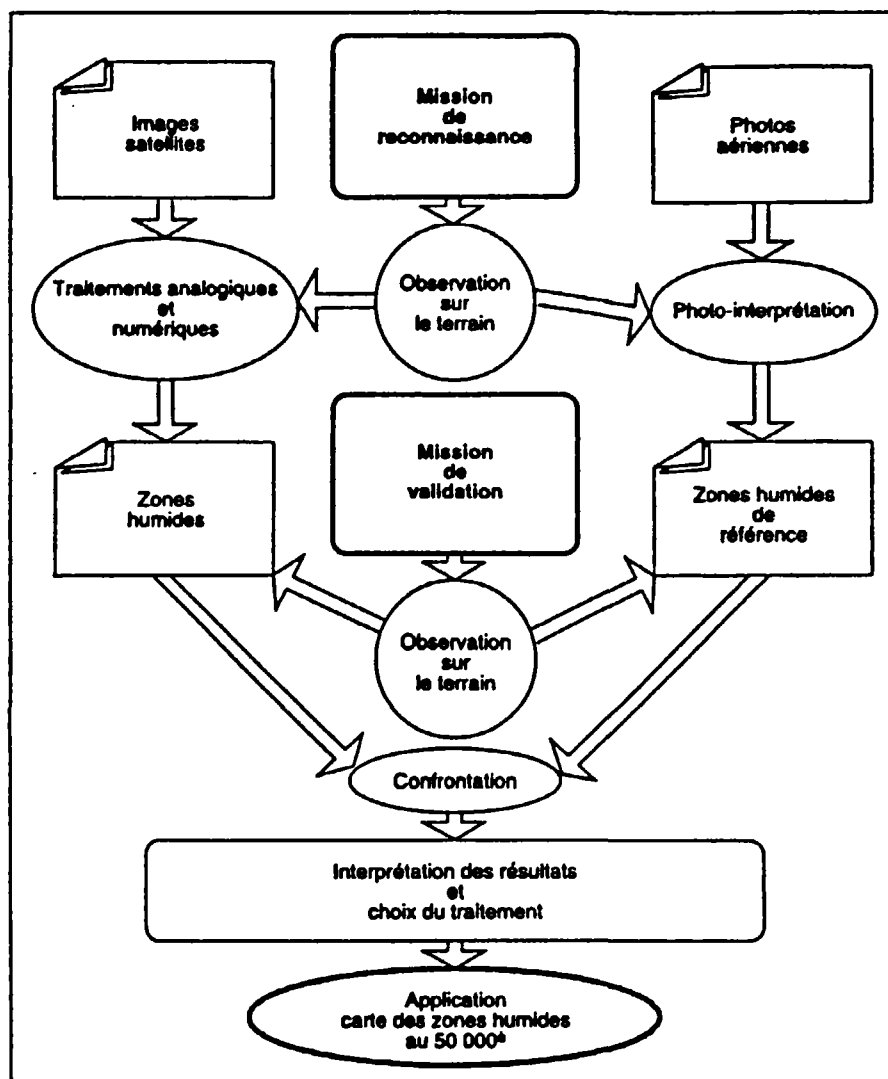
Le traitement analogique s'est effectué sur la base d'une simple interprétation visuelle des images restituées en composites colorés : pour l'image TM de novembre, la combinaison des canaux du moyen infrarouge (TM5), du rouge (TM3) et du bleu (TM1), s'est révélée optimale ; les zones humides s'y reconnaissant par leur teinte sombre et leur morphologie rubanée ou filiforme, qui tranche le plus souvent avec l'unité du paysage qu'elles longent ou traversent. L'individualisation des zones humides est réalisée en s'appuyant sur des critères de teinte, de texture, de forme des objets et sur l'environnement global.

Les traitements numériques testés sont de deux types : classification et seuillage.

- Les classifications ont consisté à regrouper les objets sur les images en fonction d'un caractère ou de caractères communs préalablement définis. Nous avons utilisé les procédures usuelles de la classification dite non supervisée (l'algorithme utilisé est la classification ascendante hiérarchique) et supervisée (l'algorithme associé est le classement par "Distance Minimum", utilisant l'équation de la distance euclidienne pour les calculs).

. Le seuillage consiste à extraire sur une image l'ensemble des points élémentaires (pixels) dont les valeurs sont incluses entre deux seuils, maximal et minimal, définis par l'opérateur. La détermination des seuils se base sur l'examen des signatures spectrales des zones observées sur le terrain qui appartiennent au thème à extraire. Sur la figure 89, on peut constater que les thèmes appartenant aux zones humides, présentent dans les canaux infrarouge thermique (TM6), infrarouge moyen (TM5) et rouge (TM3), une ressemblance par des comptes radiométriques faibles qui les démarquent en bloc des autres unités du paysage.

Figure 88 : Méthode suivie pour la mise en évidence des zones humides



A chacun de ces niveaux de traitement de l'information, la qualité numérique des résultats obtenus est acceptable. Les zones humides s'individualisent avec suffisamment de satisfaction comme le montre le tableau CI. La vérification de ces résultats sur le terrain montre cependant que le traitement analogique se révèle plus performant pour mettre en évidence les zones humides d'une région et minimiser les risques d'erreurs par omission et par confusion.

**Tableau CI : Appréciation numérique des traitements de mise en évidence
des zones humides sur l'image Landsat TM du 05/11/88 et
sur les photographies aériennes du 10/11/89.
Confrontation avec la "réalité-terrain" issue d'un sondage au sol**

Traitements	N1	N2	E1	E2
Photo-interprétation	29	27	6.9	3.6
Traitement analogique	31	27	12.9	3.6
Seuillage sur TM6	30	27	10.0	3.6
Classification supervisée	25	24	5.0	15.3
Classification non supervisée	25	23	8.0	17.9

Nombre total de parcelles d'observation : 200

Nombre de parcelles appartenant, sur le terrain, aux zones humides : 28 = N

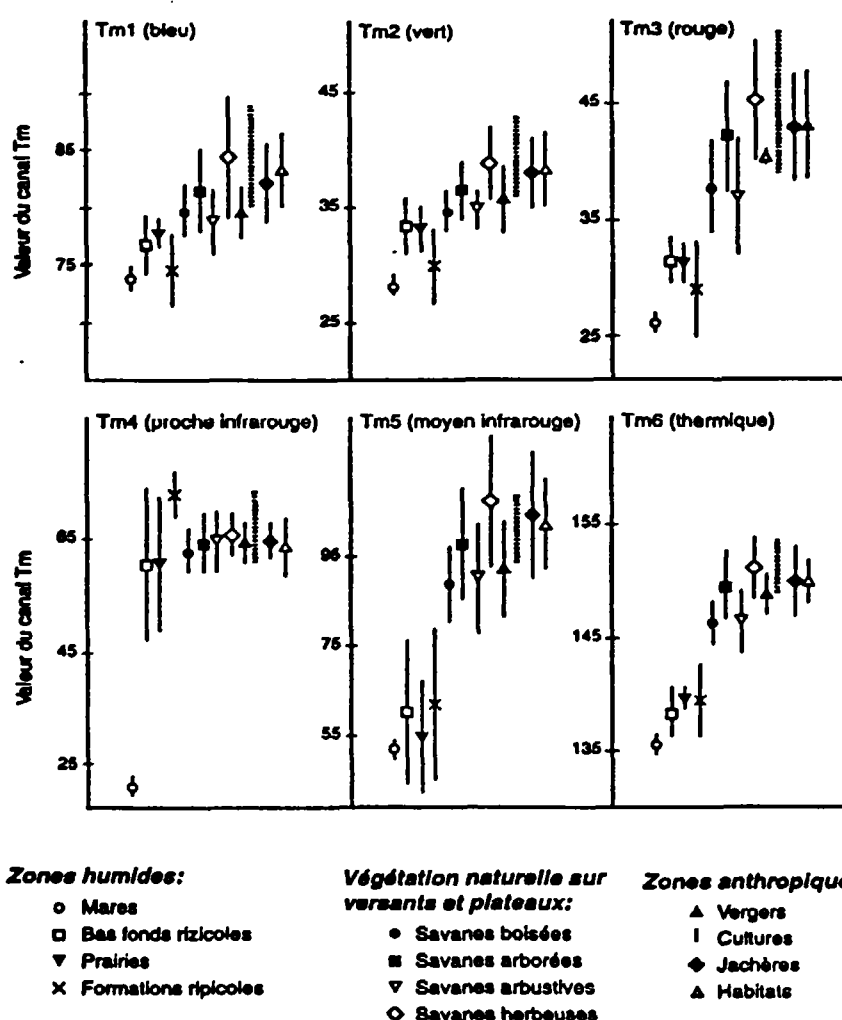
N1 : nombre de parcelles d'observation appartenant, sur le traitement, aux zones humides.

N2 : nombre de parcelles d'observation appartenant, sur le terrain, comme sur le traitement, aux zones humides.

E1 : erreur de confusion, en % : $E1 = (N1 - N2) * 100 / N1$

E2 : erreur d'omission, en % : $E2 = (N - N2) * 100 / N$

Figure 89 : Signatures spectrales extraites de l'image LANDSAT-TM du 05/11/88 pour quelques thèmes dans les plaines et bassins versants de :

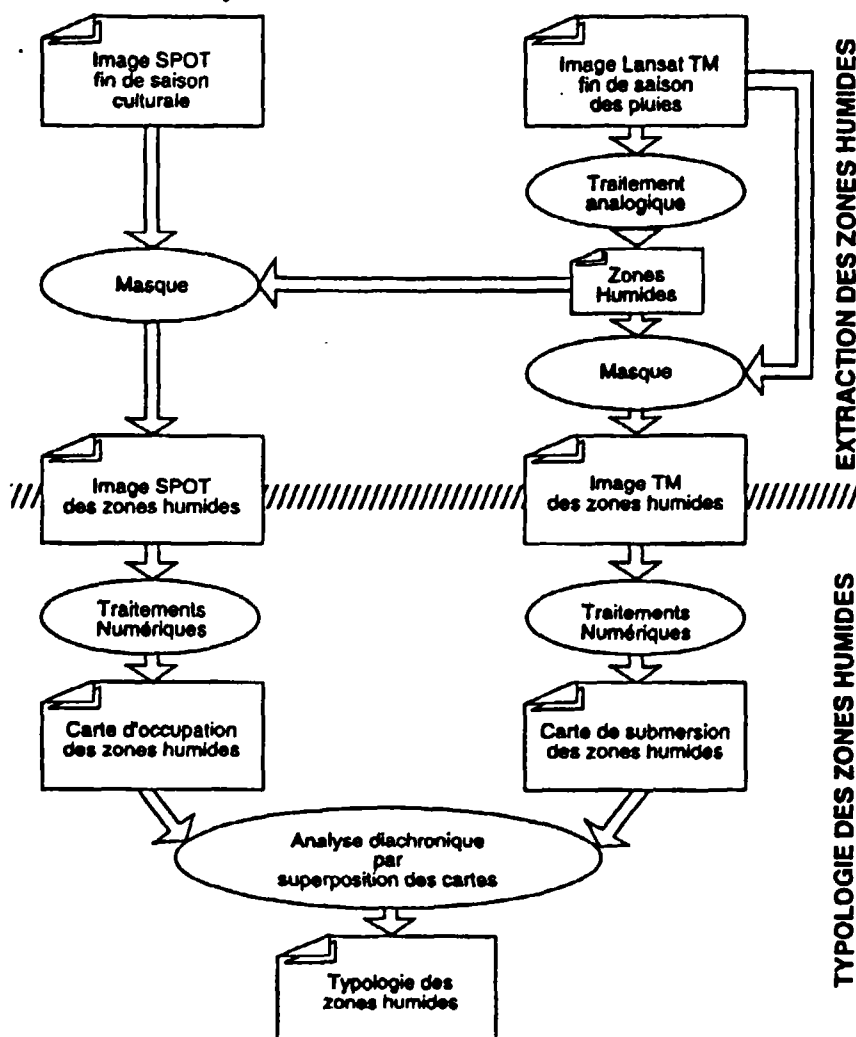


Les principales unités agro-écologiques des zones humides

Les procédures ci-devant, ont conduit à discriminer l'élément "zones humides" au sein du paysage. La détermination de l'aire d'extension de ces zones qui en découle, permet à présent d'effectuer une hiérarchisation de l'information dans ces milieux en classes thématiques discrètes. Une démarche (Figure 90) d'analyse bitemporelle supervisée d'une image LANDSAT-TM et d'une image SPOT-XS permet d'opérer un zonage agro-écologique au sein des zones humides, en regroupant l'information selon les critères spectraux définis préalablement lors de la phase d'entraînement. Le résultat de cette partition à la fois sur l'image TM de fin de saison des pluies et l'image SPOT de fin de saison culturale est une stratification des zones humides en classes qui rendent compte à la fois du type d'occupation du sol (traitements sur SPOT) et de son niveau de submersion (traitement sur TM). La nomenclature et la signification des classes sont légèrement ajustées pour tenir compte des spécificités propres à chacun des 9 bassins étudiés. Globalement les classes thématiques suivantes sont distinguées (MOKADEM A. & al, 1991):

- 1°) Les plans d'eau libre, les mares ou les marigots.
- 2°) Les marécages : sols nus à engorgement plus ou moins temporaire.
- 3°) Les rizières : parties emblavées en riz dans les zones humides.
- 4°) Les cultures maraîchères : essentiellement dans la plaine de Sikasso.
- 5°) Les formations prairiales : formations herbeuses.
- 6°) Les formations ripicoles denses : formations végétales ligneuses de recouvrement supérieur à 50%.
- 7°) Les formations ripicoles peu denses : formations végétales ligneuses de recouvrement inférieur à 50%.

Figure 90 : Méthode suivie pour la discrimination des états de surface au sein des zones humides



La qualité des résultats obtenus lors de cette analyse diachronique a été validée au cours d'une mission sur le terrain. La construction des matrices de confusion entre les observations de terrain et la classification permet de constater une précision globale pour l'ensemble des sites de l'ordre de 90%.

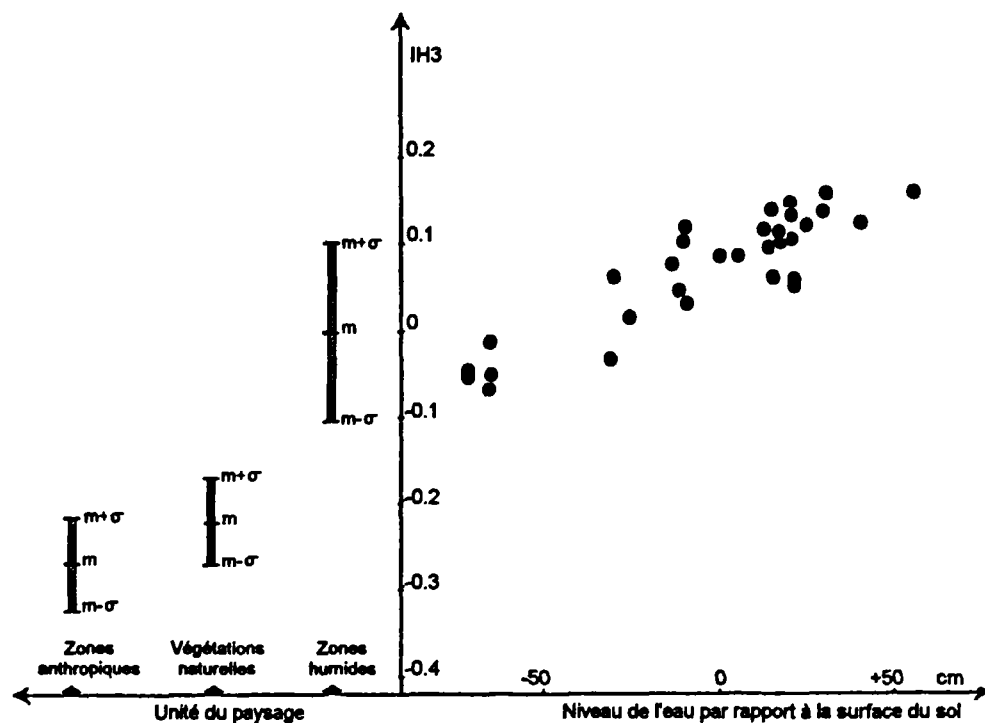
Dynamiques de l'eau et radiométrie satellitaire

Il s'agit dans cette étape de la démarche, de définir et d'analyser au sein des zones humides rizicoles les relations éventuelles entre dynamique de l'eau (traduite par le niveau de fluctuation de la nappe) et l'information satellitaire brute ou indicielle.

L'information satellitaire utilisée est celle de l'image LANDSAT-TM du 05 novembre 1988. A cette période, nous disposons de données de terrain reprenant les valeurs de fluctuation de la nappe sur 31 points de mesure piézométrique dans les parties rizicoles des bas-fonds de Kawara et de Moadougou.

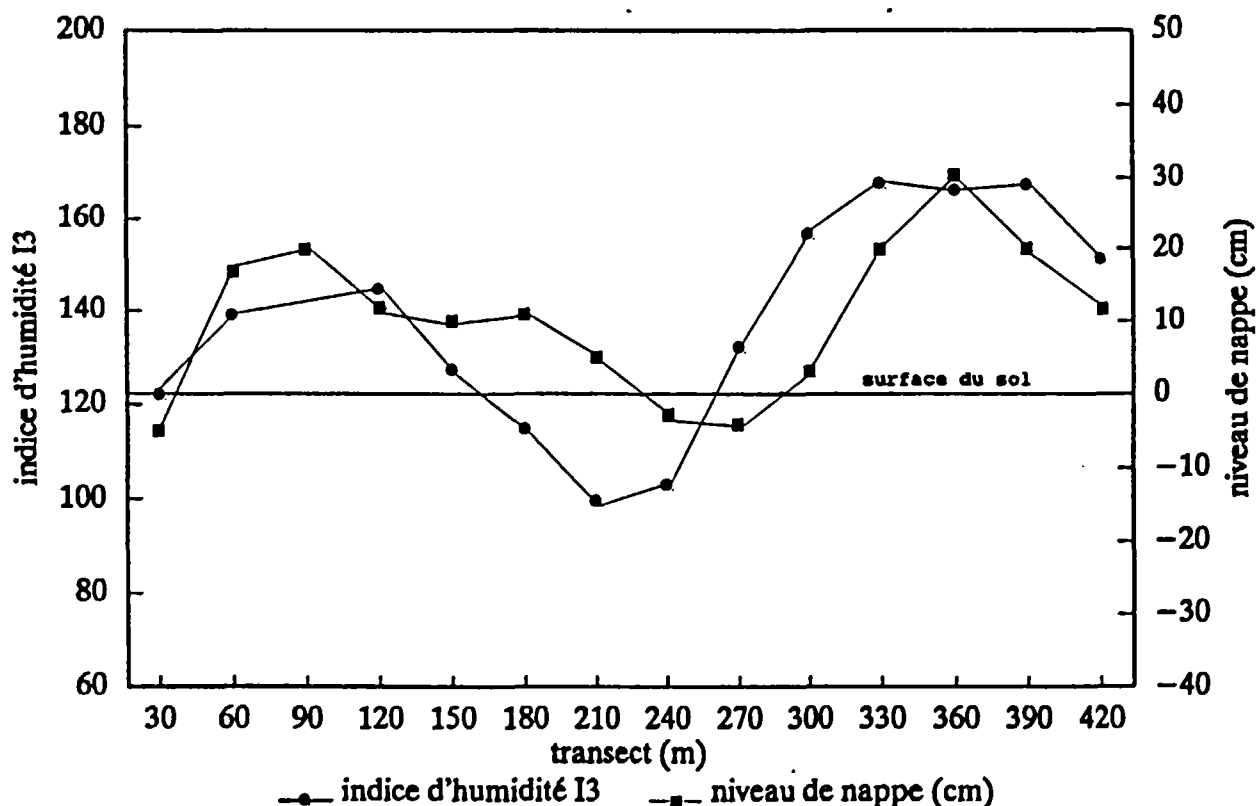
Ces points de mesure sont répartis spatialement de façon à représenter différentes situations géomorphologiques des bas-fonds (amont, aval..., berge, lit mineur...). La valeur radiométrique extraite en chaque point est un compte moyen du pixel le représentant et de son voisinage immédiat (connexité d'ordre 4). La détermination des relations entre valeurs des niveaux de l'eau par rapport à la surface du sol et données télédéteectées brutes ou dérivées procède du calcul de corrélation entre ces deux variables. Nous retiendrons que les relations sont très peu significatives au niveau des canaux bruts de TM et des indices classiques du type NDVI, RVI, DVI, SLI, PVI, Brillance (la valeur du coefficient de corrélation la plus élevée a été obtenue avec le canal infrarouge moyen, TM5 : $r = -0.574$). En revanche, nous avons obtenu avec de nouveaux indices que nous avons intitulés "Indices d'Humidité (IH)" des coefficients de corrélation élevés qui sont favorables à l'existence d'une relation significative entre valeurs des niveaux de la nappe et données satellitaires. Pour l'indice (IH3) le mieux corrélé aux valeurs des niveaux de nappe ($r = 0.89$), une régression simple est calculée par la méthode des moindres carrés. La relation établie est satisfaisante comme l'illustre la figure 91 ci-après.

**Figure 91 : Relation entre l'indice satellitaire IH3 et le niveau d'engorgement des rizières (partie droite)
Domaine radiométrique des grandes unités du paysage suivant ce même indice (partie gauche)**



Une campagne de mesures sur le terrain a été effectuée en novembre 1990 (soit deux ans après la prise de l'image TM), pour tester le niveau de validité des résultats issus de l'utilisation de l'indice d'humidité. Les observations sur 16 transects répartis d'amont en aval du bas-fond de Kawara, permettent de noter que l'indice d'humidité varie avec le degré d'engorgement des sols comme le suggère la figure 92.

Figure 92 : Confrontation des données recueillies au sol et des données satellitaires dans le bas-fond de Kawara (Burkina Faso)



transect n° 8

Vérité-terrain: nov 1990 & image Landsat TM: nov 1988

Il découle de ce qui précède la possibilité de se servir de cette relation pour effectuer une caractérisation des bas-fonds rizicoles en zones hydrologiques homogènes. La partition permet de constater l'existence d'un gradient d'engorgement des sols entre les berges et le lit central des bas-fonds. Cette tendance passe d'un niveau phréatique très bas (engorgement nul) à un niveau plus proche de la surface du sol (engorgement total) dans l'axe central du bas-fond (Planche couleur 4).

Utilisation des images satellitaires pour la mise en valeur agricole des bas-fonds

A chacun de ces trois niveaux d'abstraction de l'information, nous avons pu faire correspondre une fonction de typologie des bas-fonds à un ou deux critères, et des perspectives d'application pratique des résultats dégagés.

Dans l'objectif d'élaboration d'une typologie des bas-fonds, le travail a permis de mettre en évidence plusieurs critères pertinents de caractérisation de ces zones :

- **dimensionnel** : largeur moyenne des bas-fonds;
- **morphologique** : compacité des bas-fonds;
- **chorologique** : intensité de l'activité anthropique;
- **descriptif** : potentiel de ruissellement sur les versants;
- **hydrologique** : niveau de submersion (ou d'engorgement) des bas-fonds.

Au niveau pratique les résultats peuvent connaître les applications suivantes:

- Le rendu cartographique des zones humides à une échelle appropriée est un outil de base utile pour les décideurs et les aménageurs dans l'optique de la mise en valeur des bas-fonds au Sahel. L'échelle du 1:50000ème par exemple suffit pour estimer les potentialités d'une région en zones humides en vue d'une politique globale de mise en culture de ces zones.
- La répétition périodique de la démarche par ailleurs, permet de suivre l'évolution des zones humides face à l'impact général de la sécheresse et de l'intervention humaine.
- La détermination des principales composantes agro-écologiques à l'intérieur des zones humides permet d'évaluer la superficie du secteur rizicole et contribue ainsi à l'amélioration des statistiques agricoles d'une région ou d'un pays.

La carte des états de surface facilite également le choix d'emplacement des nouvelles surfaces à aménager en vue d'une meilleure exploitation des terres et de l'orientation des activités des communautés rurales. Sur les versants, la carte d'occupation du sol est très utile pour des actions locales de compréhension et de modélisation des phénomènes d'écoulement superficiel.

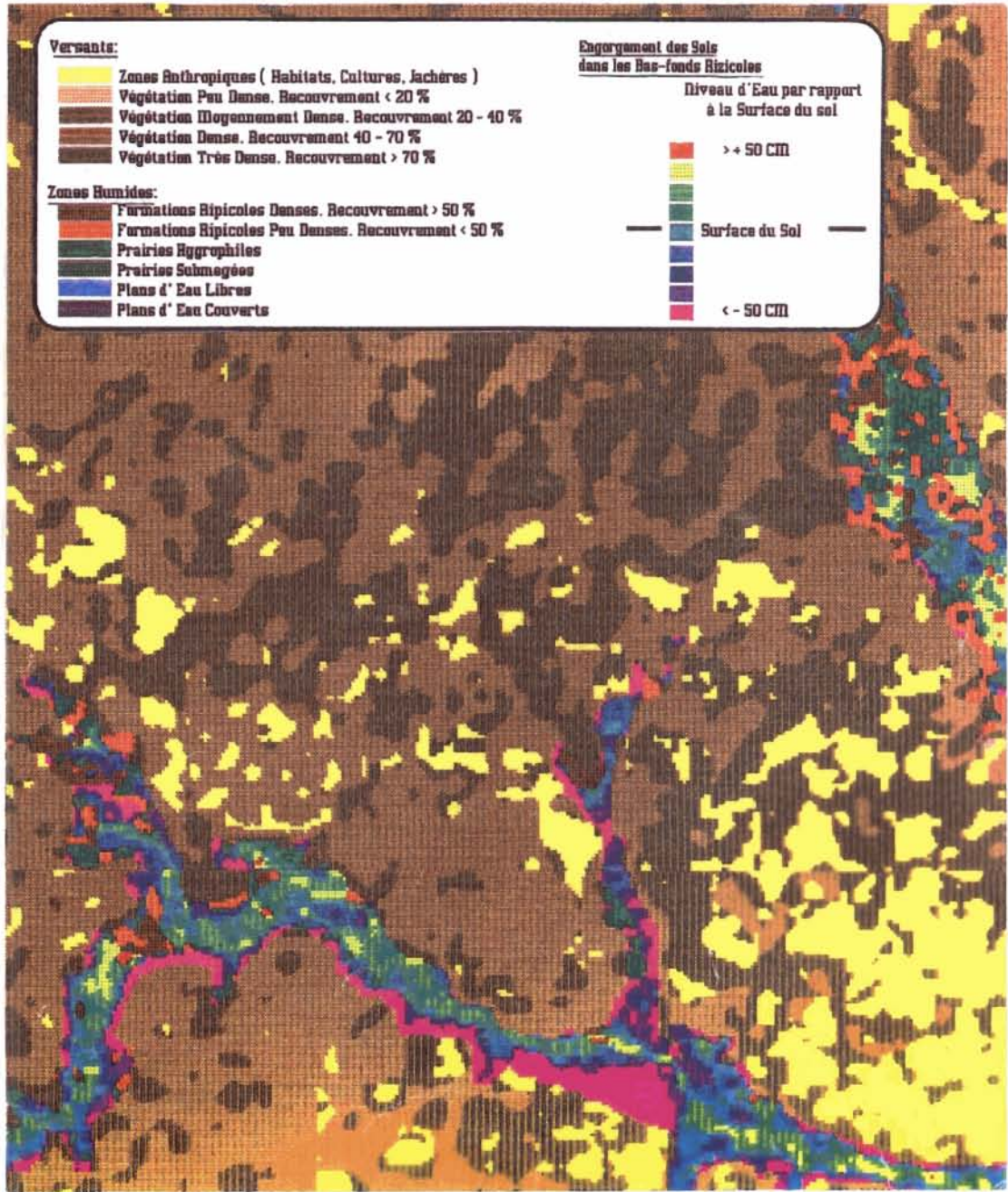
Les résultats dégagés au cours de l'analyse de l'engorgement des bas-fonds sont également importants. En effet, l'efficacité des principales opérations agricoles est liée au bilan hydrique de la plante et du sol. Le défaut ou l'excès d'eau se répercute immédiatement sur la physiologie des cultures et, dès lors, présente une incidence significative sur les productions attendues. Cela est particulièrement vrai dans le cas de la culture du riz où le facteur limitant au développement de cette production est essentiellement l'eau. C'est dire donc que déterminer des gradients d'engorgement à l'intérieur des rizières est particulièrement utile pour:

- faciliter la découverte de secteurs qui requièrent d'urgents besoins d'aménagement;
- suggérer les emblavures à mettre en riz (ou en d'autres spéculations agricoles) et donc programmer en temps utile tous les intrants nécessaires pour les cultures.
- moduler les calendriers culturels en fonction de l'état d'engorgement des sols au cours de la saison.
- éveiller l'attention de l'aménageur sur les difficultés susceptibles de gêner son action (humidité excessive par exemple).

Intégrés à d'autres données cartographiques numériques (climatiques, géologiques, démographiques, ...), nos résultats peuvent servir à alimenter un Système d'Information Géographique (S.I.G.) qui permettrait de définir une typologie pragmatique des zones humides, en fonction de la localisation, de la morphologie, de la superficie, de l'état des surfaces, de la dynamique hydrologique... Identifiés par la télédétection et d'autres caractéristiques recensées dans les autres couches de la base de données ainsi constituée.

En guise de conclusion, nous avons montré à travers une démarche simple d'analyse bitemporelle d'images satellitaires haute résolution sur des sites pilotes au Burkina Faso et au Mali, les possibilités offertes par les satellites d'observation de la terre pour la recherche d'informations spatialisées en termes qualitatifs (nature, signification, état...) ou quantitatifs (superficie, intensité, densité...) sur des objets de la surface terrestre, notamment au niveau des bas-fonds. Les résultats obtenus indiquent qu'il est possible d'obtenir de bons critères de diagnostic sur les bas-fonds à partir de la reconnaissance, de l'analyse et de l'interprétation des états de surface de ces milieux par télédétection. Ils révèlent ainsi la contribution que peut apporter l'information satellitaire pour la typologie des bas-fonds et la généralisation de leurs caractères descriptifs.

Planche couleur 4 : Caractérisation du bas-fond de Kawara selon le niveau d'engorgement du sol et les grandes unités agro-écologiques du paysage.



LES PARAMETRES CLIMATIQUES REGIONAUX

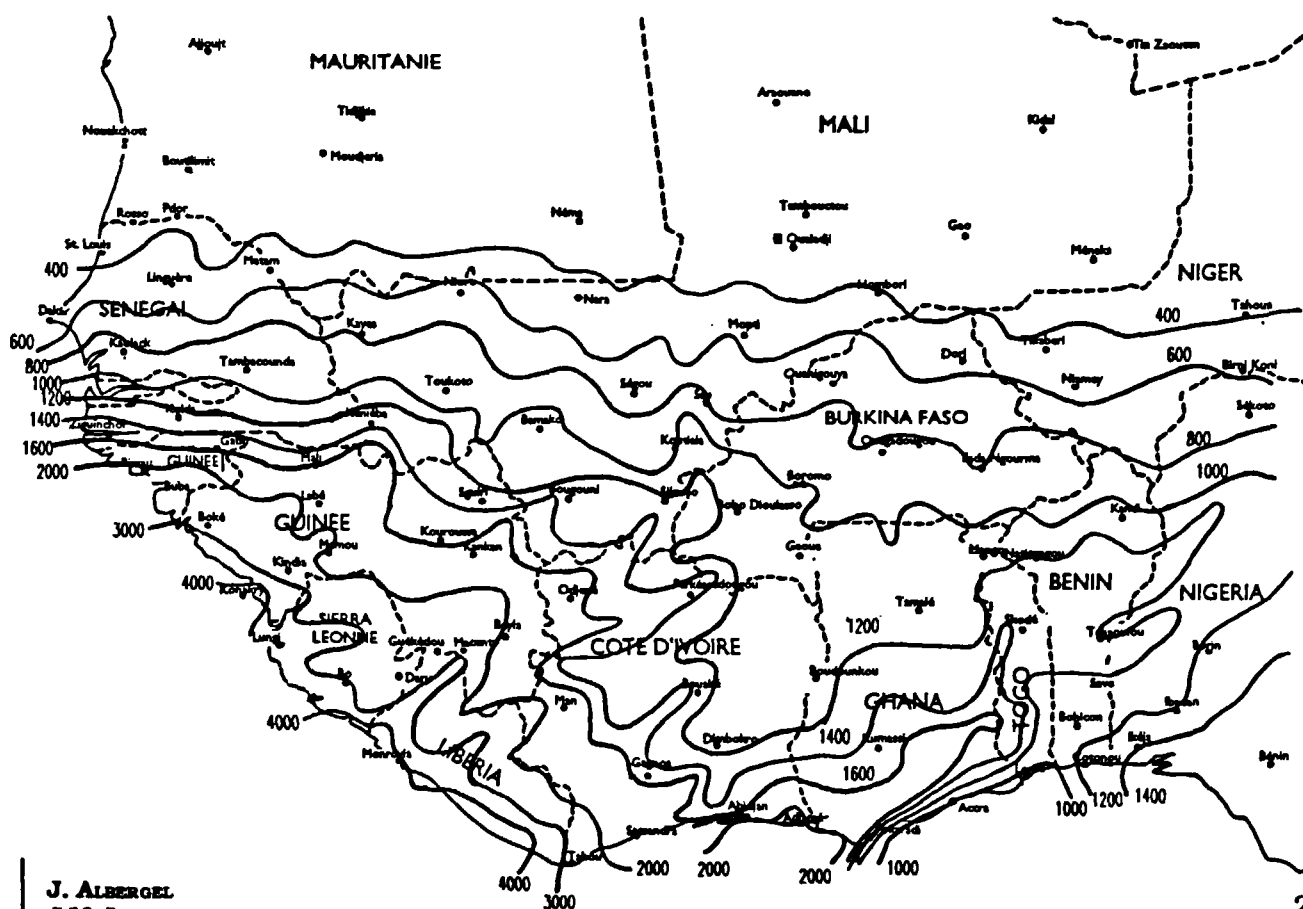
Les paramètres climatiques intéressant la ressource en eau et la valorisation agricole des bas-fonds sont :

- La pluviométrie annuelle, qui donne un ordre de grandeur de la longueur du cycle de croissance de la végétation et sur laquelle se base la prédétermination des volumes écoulés dans les bas-fonds.
- La pluviométrie journalière maximale de récurrence décennale qui est la donnée de base des méthodes de prédétermination des paramètres des crues de projet pour le dimensionnement des ouvrages hydro-agricoles.
- L'évapotranspiration potentielle qui est une donnée de base pour les modèles hydrologiques et les modèles de bilan hydrique des cultures.

LA PLUVIOMETRIE ANNUELLE

La carte des isohyètes la plus complète et la plus précise sur l'Afrique de l'Ouest est celle dressée par Leroux en 1983 à partir de l'ensemble des données critiquées et homogénéisées sur la période 1931 à 1970 (figure 93). Cette carte montre bien la situation climatique de l'Afrique de l'Ouest; cependant, elle ne tient pas compte des épisodes de sécheresse des deux décennies 70 et 80. Nous avons calé une méthode simple de calcul des pluviométries médianes, décennales sèches et décennales humides valables sur la période 1970-1990 à partir de cette carte et de quelques stations synoptiques (tableau CII). Le nombre de stations prises en compte dans ce calage n'étant pas suffisant pour donner les intervalles de confiance (3 par zone considérée), nous invitons l'utilisateur à s'en servir avec prudence.

Figure 93 : Isohyètes annuelles en Afrique de l'Ouest (LEROUX, 1983)



**Tableau CII : Estimation de la pluviométrie annuelle sur la période 1970-1990
à partir des valeurs figurant sur la carte de LEROUX**

Pluviométrie carte LEROUX	Pluviométrie annuelle de fréquence		
	décennale sèche	médiane	décennale humide
Entre 400 et 800 mm	PI x 0.51	PI x 0.73	PI
Entre 800 et 1200 mm	PI x 0.63	PI x 0.81	PI
Entre 1200 et 1400 mm	PI x 0.70	PI x 0.90	PI x 1.10
Entre 1200 et 1400 mm	* PI x 0.54	* PI x 0.73	* PI

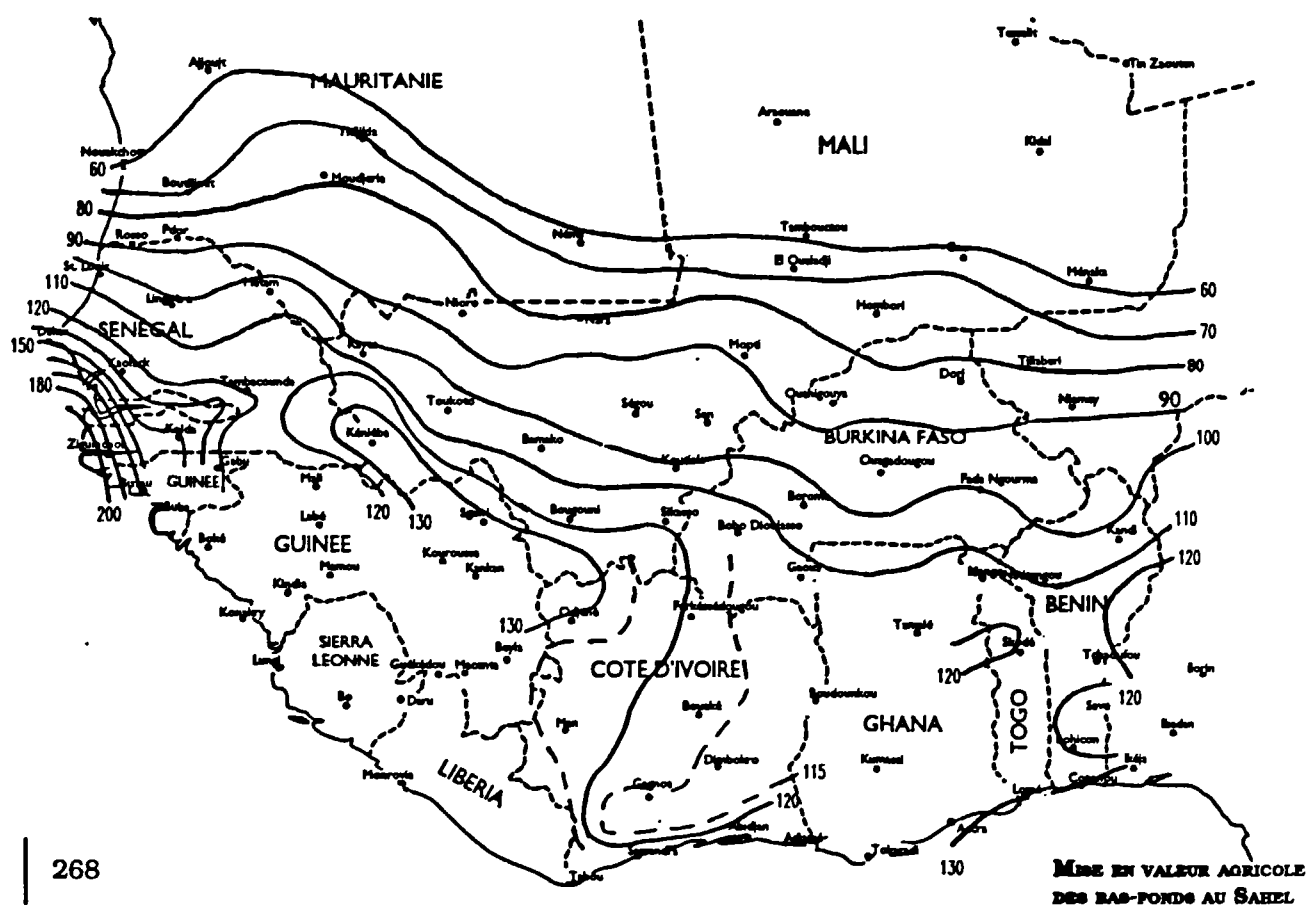
* pour les stations côtières (Sénégal et Guinée Bissau)

PI est la pluviométrie extrapolée linéairement entre deux isohyètes de la carte de LEROUX

LA PLUIE JOURNALIERE MAXIMALE DE FREQUENCE DECENNALE

Une carte des précipitations journalières maximales de récurrence 10 ans a été dressée en 1985 par le CIEH pour l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest (figure 94). L'une des conclusions du colloque CIEH-OMM sur la révision des normes hydrologiques utilisées en Afrique Sub-saharienne, suite aux épisodes de sécheresse, a été que l'occurrence des pluies exceptionnelles n'a pas été affectée par les accidents climatiques de ces deux dernières décennies (ALBERGEL, 1986). Le travail plus ancien de BRUNET-MORET (1963-68) peut également être utilisé; il s'agit d'un rapport par pays membre du CIEH et d'une synthèse sur les averses exceptionnelles en Afrique de l'Ouest.

**Figure 94 : Pluie journalière maximale de fréquence décennale en Afrique de l'Ouest
(CIEH, 1985)**



L'ÉVAPO-TRANSPIRATION POTENTIELLE

AGRHYMET propose des cartes mensuelles de l'ETP Penman calculée sur la période 1951-1986 pour toute l'Afrique de l'Ouest. Nous reproduisons ici la carte du mois de Septembre, mois le plus sensible pour la fin des cycles végétatifs des cultures et donnons, dans le tableau CIII, les valeurs de l'ETP Penman des autres mois de la saison des pluies, qui sont associées à celles du mois de Septembre.

Figure 95 : ETP Penman du mois de Septembre en Afrique de l'Ouest (AGRHYMET, 1990)

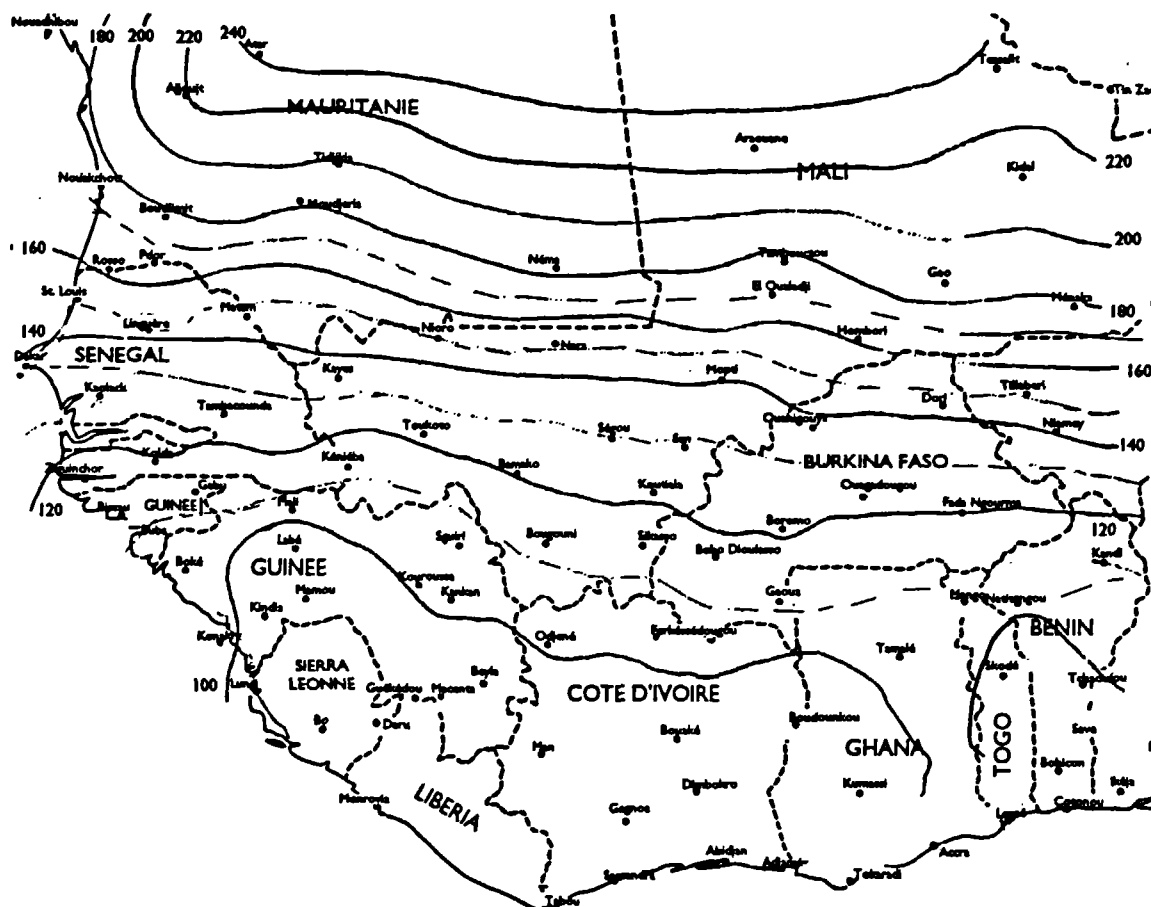


Tableau CIII : ETP Penman des mois de juin, juillet, août et octobre associées aux valeurs du mois de septembre (période 1951-1986)

septembre mm	juin mm	juillet mm	août mm	octobre mm
200	210	180	170	260
180	190	160	150	240
160	180	140	130	220
140	150	120	110	200
120	100	90	95	160
100	75	75	80	140

LES PARAMETRES HYDROLOGIQUES REGIONAUX

Quand on veut étendre les résultats caractérisant le régime hydrologique d'un bassin versant aux bassins voisins d'une même région, l'imprécision s'accroît avec l'influence des facteurs physiques propres à chaque bassin (forme, pente, végétation, perméabilité des sols, réseau hydrographique, degré de mise en culture, etc).

Pour dimensionner un aménagement de bas-fond, il faut pouvoir donner une estimation de l'écoulement en années moyenne, forte et faible, prédéterminer les paramètres de la crue d'étude, et, en zone influencée par la marée, fournir les amplitudes maximales de celle-ci.

L'aménageur qui ne peut pas réaliser d'étude hydrologique faute de temps, de moyens, ou tout simplement parce que l'aménagement projeté ne nécessite pas une connaissance précise des paramètres de la ressource en eau, peut soit utiliser des méthodes générales de prédétermination, soit tirer profit des études hydrologiques régionales.

En Afrique de l'Ouest deux méthodes de prédétermination de la crue d'étude et deux méthodes de prédétermination de l'écoulement annuel sont largement utilisées par les concepteurs d'aménagements :

- Méthodes de prédétermination de la crue d'étude

- La méthode de RODIER & AUVRAY (1965) permet de déterminer les paramètres de la crue de récurrence décennale sur un petit bassin versant tropical, de superficie comprise entre 10 et 200 km², en comparant ses caractéristiques physiographiques à celles de bassins étudiés. La clef de cette méthode est une typologie des petits bassins versants intertropicaux qui conduit l'utilisateur à des abaques donnant le volume de la crue, ses temps caractéristiques et son débit de pointe.

- La méthode CIEH (PUECH & CHABI GONNI, 1984) est basée sur une approche probabiliste. Des formules résultant de régressions multiples permettent de prédéterminer les paramètres de la crue décennale à partir de la surface, de l'indice de pente du bassin et de la pluviométrie inter-annuelle. Cette méthode calée essentiellement sur des bassins versants du domaine cristallin, exclut tous les bassins de la façade atlantique.

- Méthodes de prédétermination de l'écoulement annuel

Le module annuel n'est pas une caractéristique très significative étant donné sa grande variabilité interannuelle dans la zone étudiée, mais sa connaissance, liée à quelques notions sur sa distribution statistique, est nécessaire pour l'étude des conditions de remplissage des réservoirs.

- La méthode RODIER (1975). L'auteur a effectué une synthèse sur les données de l'écoulement annuel des bassins versants de la zone entre les pluviosités interannuelles 300 et 800 mm. Trois paramètres ont été retenus pour la régionalisation: la surface du bassin, la pluie annuelle et le paysage correspondant au bassin, c'est à dire l'ensemble des états de surface des sols et des facteurs caractérisant la pente. Chaque paysage correspond à un bassin type. On peut interpoler les résultats entre deux bassins types s'ils comportent les mêmes composantes en proportion variables.

- La méthode DUBREUIL ET VUILLAUME (1975). A partir d'une zonation climatique des bassins versants de l'Afrique de l'Ouest, ces auteurs présentent des formules de type régression linéaire donnant l'écoulement moyen interannuel d'un petit bassin versant en fonction des variables suivantes : la pluie annuelle, l'évaporation sur bac, le pourcentage de cultures, le pourcentage de surface occupée par des formations perméables (grès ou sable) et un indice représentant la surface et la dégradation hydrographique du bassin.

Dans cette synthèse, nous avons appliqué la méthode de prédétermination des crues d'étude de RODIER & AUVRAY (1965) sur tous les bassins étudiés, et comparé les estimations avec les valeurs déduites de l'étude hydrologique. Nous proposons une modification de la méthode pour la prédétermination des temps caractéristiques de la crue décennale, pour l'adapter aux bassins dont les exutoires sont des bas-fonds.

Les exemples des projets pilotes Mali-Sud et Casamance illustrent comment il est possible de mettre au point des méthodes simples de prédétermination des principaux paramètres hydrologiques nécessaires à la définition des aménagements de bas-fonds. Au Mali-Sud, ces paramètres sont: la crue décennale prise comme crue d'étude et l'écoulement moyen interannuel. En Casamance, il faut y ajouter ceux relatifs à la marée.

LA PREDETERMINATION DES CRUES

La méthode de RODIER & AUVRAY

RODIER & AUVRAY ont proposé en 1965 une méthode d'estimation des débits de crues décennales pour les bassins versants de superficie comprise entre 10 et 200 km² en Afrique occidentale. Cette méthode est basée sur les résultats des études hydrologiques de 60 bassins versants répartis en Afrique au sud du Sahara et à l'ouest du Congo. La démarche consiste à classer le bassin étudié dans un groupe de bassins dont les caractéristiques physiographiques sont proches et de définir par abaqes les paramètres de la crue décennale.

La mise en oeuvre de cette méthode passe par 5 étapes :

- estimation de la hauteur de l'averse décennale moyenne sur le bassin,
- classification du bassin suivant ses caractéristiques,
- étude du coefficient de ruissellement,
- détermination du temps de ruissellement et du temps de montée,
- détermination de la forme de la crue décennale.

Pluies moyennes de fréquence décennale sur les bassins versants

Au nord d'une ligne oblique, qui part de la latitude 8 à 9° en Côte d'Ivoire pour arriver à la latitude 4° en République Centrafricaine, les fortes averses sont généralement constituées par des tornades, averses orageuses présentant un corps de courte durée et à forte intensité. On peut également considérer que, dans le cas le plus courant, il n'y a qu'une averse par 24 heures, de sorte que l'étude statistique des tornades se ramène à l'étude des pluies journalières. La hauteur de la précipitation journalière décennale est en rapport assez étroit avec le type de régime pluviométrique. RODIER & AUVRAY établissent un premier abaque donnant la hauteur de pluie décennale en fonction de la pluie interannuelle. Il est également possible d'estimer la pluie décennale ponctuelle à partir de la figure 94 donnée dans le paragraphe précédent. La méthode d'abattement de la pluie décennale au Sahel proposée par VUILLAUME (1974) et exposée dans le chapitre concernant l'hydrologie, permet le passage de la pluie ponctuelle à la pluie moyenne sur le bassin. Le tableau CIV compare les résultats de cette estimation aux valeurs trouvées par l'étude hydrologique. Les différences sont acceptables, seuls les bassins de Casamance présentant une différence supérieure à 10% qui s'explique par la proximité de l'océan.

Classification du bassin suivant ses caractéristiques

Les critères de classification de la méthode ont été définis dans le chapitre: "une hydrographie diversifiée sur un vieux socle pénéplané". Le tableau CV rappelle les principaux paramètres.

Tableau CIV : Estimation de la pluie décennale moyenne sur les bassins

Bassin	Station climatique de référence		Pluie journalière décennale moyenne sur le bassin en mm	
	Pluie annuelle mm	Pluie jour. décennale mm	Méthode RODIER & AUVRAY	Déterminée par l'étude
Gourga Tilli	540	93	88.35	78
Roulgou Toega	540	93	83.7	73
Améné	540	93	74.4	
Ndiba	635	96	96	97
Keur S. Diama	635	96	86.4	87
Kawara	982	114	102.6	93
Damana	982	114	96.9	
Moadougou	982	114	96.9	92
Kambo amont	1067	116	116	105
Kambo barrage	1067	116	116	100
Le Brusq	1173	118	118	154
Djiguinoun	1173	118	118	138
Djilakoun	1173	118	118	136

Tableau CV : Classification des bassins versants du projet

Bassin	Surface Km²	Régime	Classe de relief	Classe de perméabilité
Gourga Tilli	45	Sahélien	R2+	P3
Roulgou Toega	95	Sahélien	R3-	P3
Améné	157	Sahélien	R2+	P3
Ndiba	16.2	Sahélien	R2-R3	P3
Keur S. Diama	75.6	Sahélien	R3	P3
Kawara	99.8	Tropical	R4	P4
Damana	104	Tropical	R3	P4
Moadougou	112	Tropical	R3	P4
Kambo amont	4.7	Tropical	R2-R4	P4
Kambo barrage	10	Tropical	R2-R4	P4
Le Brusq	2.56	Tropical	R2-R4	P5
Djiguinoun	16.8	Tropical	R2-R3	P5
Djilakoun	24.2	Tropical	R2-R3	P5

Paramètres caractéristiques des crues

Les coefficients de ruissellement

Des abaques, sous forme de graphiques en coordonnées semi-logarithmiques, donnent le coefficient de ruissellement en fonction du type de bassin. Le volume de la crue se calcule ensuite à partir de ce coefficient et de la pluie décennale moyenne sur le bassin. Le tableau CVI compare les coefficients de ruissellement et les volumes de la crue décennale estimés par la méthode RODIER & AUVRAY et ceux déterminés dans l'étude hydrologique. Les estimations restent convenables, les erreurs relatives ne dépassent pas 30% sauf pour les bas-fonds de Casamance où la retenue du barrage de Djilakoun perturbe l'estimation des ruissellements, même à la station de Djigounoum sous influence de la retenue.

Tableau CVI : Coefficients de ruissellement et volumes de la crue décennale

Bassin	Méthode RODIER & AUVRAY		Déterminés dans l'étude		Erreur relative sur les volumes %
	Coef de ruissellement %	Volume ruisselé 1000 m3	Coef de ruissellement %	Volume ruisselé 1000 m3	
Gourga Tilli	19	755	20	702	+8
Roulgou Toega	12	954	16	1110	-14
Améné	10	1168			
Ndiba	22	342	22	346	-1
Keur S. Diama	21	1372	26	1710	-20
Kawara	18	1843	15	1392	+32
Damana	18	1814			
Moadougou	18	1954	20	2061	-5
Kambo barrage	11	128	10	100	+28
Le Brusq	12	36	9	35	+2
Djigounoum	7	139	4	93	+50
Djilakoun	5	143	7	230	-38

Les temps de base et de montée

La détermination des temps de base et des temps de montée se fait sur des abaques à partir de trois critères physiographiques : la zone climatique d'appartenance, la classe de relief et le type de sol. Le tableau CVII compare les estimations aux valeurs déterminées dans l'étude hydrologique. Cette comparaison montre une surestimation importante des temps de montée et des temps de base pour tous les bassins dont le réseau hydrographique présente des parties dendritiques bien hiérarchisées avec une tendance radiale en amont et un réseau en arête en aval. Il apparaît que la forme du réseau doit être prise en compte pour la prédétermination des temps caractéristiques de crue. En entrant, dans les abaques de RODIER & AUVRAY, la surface du bassin drainée par les parties radiales des réseaux à la place de la surface totale, les estimations sont nettement améliorées (tableau CVII) et il est possible de passer à la dernière étape de la mise en oeuvre de la méthode : estimer les débits de pointe qui intéressent, en premier lieu, la sécurité des aménagements.

Tableau CVII : Temps caractéristiques de la crue décennale

Bassin	Estimation RODIER & AUVRAY						Déterminée par l'étude hydrologique	
	Surface km²	Temps de montée h	Temps de base h	Surface corrigée km²	Temps de montée h	Temps de base h	Temps de montée h	Temps de base h
Gourga Tilli	45	9	30	25	5	15	2.5	9
Roulgou Toega	95	13	28	30	4	15	3	22
Améné	157	15	47	65	8	25		
Ndiba	16.2	3.5	12	3	1	4	1	3
Keur S. Diama	75.6	5.5	25	14	2.4	8	3	6
Kawara	99.8	3.3	18	99	3.3	18	3	16
Damana	104	6.2	34	104	6.2	34		
Moadougou	112	6.3	35	75	5.5	31	3	16
Kambo amont	4.7	3.3	12	4.7	3.3	12	3.5	8
Kambo barrage	10	4.7	20	10	4.7	20	7	24
Le Brusq	2.56	0.8	5	2.56	0.8	5	1.25	4
Djigounoum	16.8	5.7	25	16.8	5.7	25	5	30
Djilakoun	24.2	7	30	24.2	7	30	10	37

La forme de la crue décennale

Le débit moyen (Q_m) de la crue s'obtient en divisant le volume ruisselé par le temps de base. Le débit de pointe (Q_{max}) est ensuite déduit par la relation $Q_{max} = K Q_m$ où K , coefficient de forme, est donné en fonction des caractéristiques géomorphologiques. Le tableau CVIII compare les débits de pointe estimés et ceux déterminés par l'étude hydrologique.

Tableau CVIII : Forme de la crue décennale

Bassin	Estimation méthode RODIER & AUVRAY				Détermination par l'étude hydrologique
	Surface km²	Q_m m³/s	Coef de forme	Q_{max} m³/s	$Q_{max} E$ m³/s
Gourga Tilli	45	14	3	42	48
Roulgou Toega	95	18	3.1	56	40
Améné	157	13	3.1	40	
Ndiba	16.2	24	2.6	62	60
Keur S. Diama	75.6	48	3	144	160
Kawara	99.8	28	3	84	36
Damana	104	15	3.1	47	
Moadougou	112	18	3.1	56	59
Kambo amont	4.7	1.51	2.6	3.94	1.7
Kambo barrage	10	1.77	2.6	4.61	2.3
Le Brusq	2.56	2.01	2.6	5.24	7.2
Djigounoum	16.8	1.54	2.6	4.01	1.9
Djilakoun	24.2	1.32	2.6	3.44	4.3

Conclusion

Pour utiliser la méthode de régionalisation des crues décennales proposée par RODIER & AUVRAY sur des bassins versants comprenant à la fois une partie du réseau bien hiérarchisé de forme radiale et une partie en bas-fond longiforme, il faut faire attention à la détermination des temps caractéristiques de la crue. Cette étude a permis d'utiliser les abaques permettant de déterminer les temps de base de la crue de projet, en remplaçant la surface du bassin par celle drainée uniquement par le réseau hiérarchisé, et en supprimant les zones endoréiques du bassin pour le calcul du volume ruisselé.

Au Sud du Mali

Les bassins étudiés dans la région de Sikasso ont été recensés (tableau CIX) et classés selon la typologie de RODIER & AUVRAY. Ils appartiennent tous au climat tropical de transition. Les paramètres de la crue d'étude déterminés à partir des observations hydrologiques ont été mis en relation avec la surface des bassins. On obtient ainsi un abaque (figure 96) permettant de prédéterminer dans cette région le temps de base, le volume ruisselé et les débits maximaux.

Tableau CIX : Bassins versants étudiés dans le Sud du Mali et le Nord de la Côte d'Ivoire

BASSIN	Pan. mm	Rivière	Surface Km ²	KC	IG	IG25	Classe de relief	Classe deperméabilité
KAMBO	110	KADO	10	1.42	2.8	1.9	R2-R4	P3-P4
LOULOUNI	110	KOBAFINI	800	1.23	9.3	37.2	R4-R5	P3
BANANKORO	110	FARAKO	68	1.25	10.6	14.8	R4	P3
FLAKOHO	130	BANDAMA	30	1.17	8.7	8.7	R3	P3
WOROSSANTIAK	130	BANDAMA	12	1.21	6.9	5.2	R3	P3-P4
NAMBONKAHA	130	BANDAMA	47.6	1.38	5.3	6.4	R3	P3-P4
ZANIENA	120	DEKOROBO	764	1.27	7.3	29.6	R5	P3-P4
BOWARA	120	KOBI	270	1.48	9.1	27.3	R3-R5	P3-P4
LOBOUALA	120	DIAN	155	1.35	12	24	R3-R5	P3-P4
KRINA	120	BARARO	251	1.15	13.4	37.1	R5	P3-P4
TENAYA	120	BARARO	39	1.1	7.4	7.4	R2-R3	P3-P4
MADINA	120	DJITIKO	103	1.19	16.7	33.4	R5	P3-P4

Pan = Pluie moyenne annuelle à un poste de référence

KC = indice de Compacité

IG = Indice globale de pente en m/km

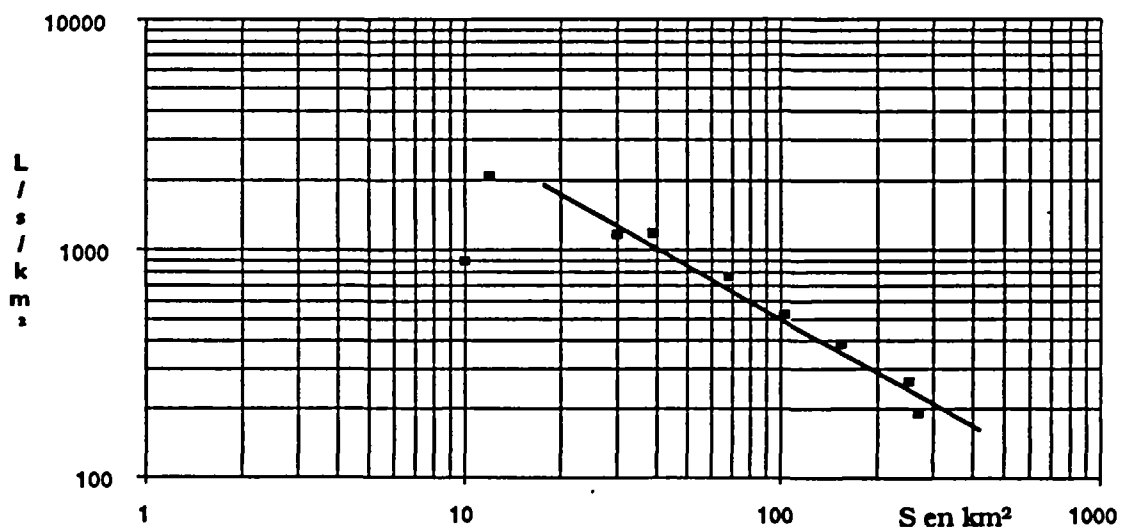
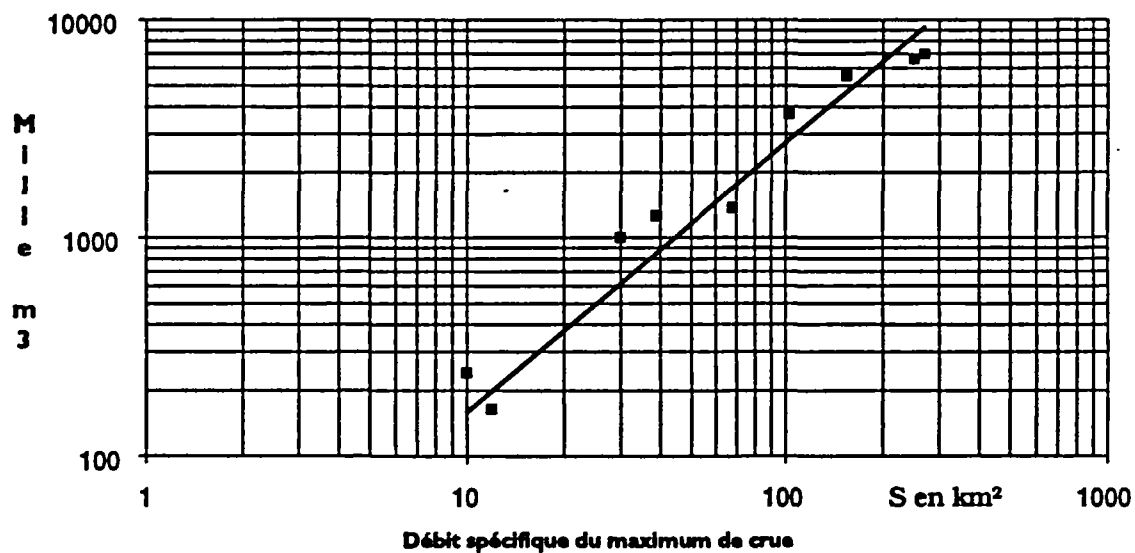
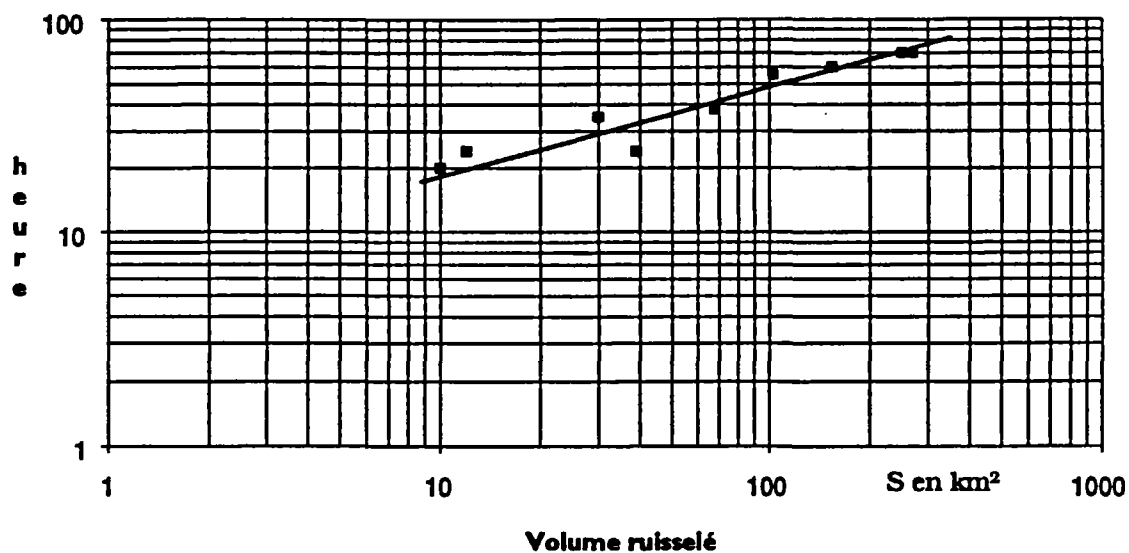
IG25 = Indice globale de pente en m/km rapporté à un bassin de 25 km

Les classes de relief et de perméabilité suivent la typologie des bassins selon RODIER & AUVRAY

Kambo est le bassin étudié dans ce projet. Loulouni, Banakoro et Flakoho ont été étudiés une première fois par BRUNET-MORET et DUBREUIL en 1959 et ils ont été repris dans une étude plus récente de LAMAGAT (1979). Les études des bassins de Flakoho, Worossantiaka & Nambonkaha ont été publiées par DUBREUIL en 1960. Les autres bassins de la région de Sikasso ont été suivis par le service Hydrologique du Mali, dont une synthèse des observations a été publiée par LAMAGAT en 1979.

Figure 96 : Caractéristiques de la crue d'étude dans la région de Sikasso

Temps de base



En Casamance

La méthode d'estimation des crues décennales de RODIER & AUVRAY (1965) est couramment utilisée pour la prédétermination des crues dans les projets de faisabilité des barrages anti-sel. Elle a été validée par rapport aux observations sur les bassins de Sindian et de Sandougou, par OLIVRY et CHOURET (1981), sur le bassin de Toukara par GALLAIRE (1980). Elle a été utilisée de façon satisfaisante par ALBERGEL (1987) sur 11 sites de barrages anti-sel. Pour l'ensemble des petits bassins de Casamance, les clefs d'entrée pour cette méthodes sont les suivantes :

- On choisit les abaques correspondant au climat : "régimes tropicaux et tropicaux de transition"
- Les classes de reliefs sont à choisir entre R2 et R3 en fonction des pentes des inter-fluves (R2 pour des pentes inférieures à 0.5% et R3 pour des pentes comprises entre 0.5 et 1%).
- Les classes de perméabilité sont à choisir entre P3 et P4 (P3, si les plateaux sont plutôt cultivés ou si les parties basses dépassent 10% de la surface totale du bassin, P4 si les inter-fluves sont plutôt boisés ou si les parties basses représentent moins de 10% de la surface totale du bassin.
- La valeur de la pluie décennale est celle calculée à Ziguinchor (158.8mm), elle est multipliée par un coefficient d'abattement qui est fonction de la surface du bassin

L'application de cette méthode donne les résultats consignés dans les tableaux CIV à CVIII. Une comparaison avec les résultats observés montre une bonne adéquation de la méthode pour le bassin continental de la vallée Le Brusq. Par contre la crue de projet estimée pour les bassins maritimes, ne correspond pas au débit à évacuer par l'ouvrage dans la mesure où l'ancien bief soumis à marée en amont du barrage va jouer le rôle de réservoir amortisseur; elle en est tout au plus la limite supérieure (pour l'événement décennal). L'évacuation des crues devient un problème de gestion en fonction des niveaux maximaux que l'on se fixe en amont (cultures) et des niveaux à l'aval de l'ouvrage (marée haute ou basse).

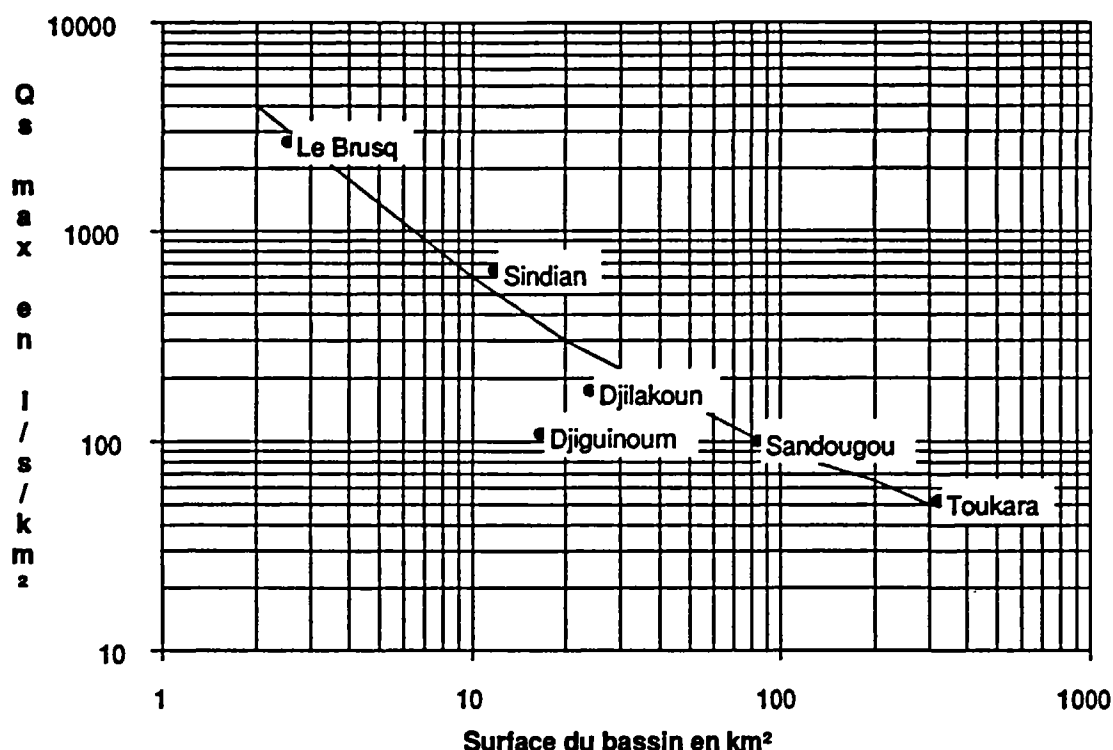
Le tableau CX donne les caractéristiques de la crue d'étude pour tous les bassins où celle-ci a pu être déterminée à partir d'observations (méthode de l'hydrogramme unitaire ou adoption d'une crue observée comme crue d'étude). A partir de ce tableau il a été possible de proposer un abaque pour l'estimation des débits spécifiques maximums pour les petits bassins de Casamance (figure 97).

Tableau CX : Crues d'étude, caractéristiques observées

Bassin	Surface Km ²	SBF Km ²	Volume m ³	T.M heure	T. base heure	Q. max m ³ /s	Q.s max l/s/Km ²	Ke %
Toukara	324	0	2494800	20h	84h	16.8	52	8
Sindian	11.9	0	206600	4h30	24h	7.65	640	14
Sandougou	85.7	0	720000	11h	70h	8.3	100	8
Djilakoun	25.2	1.55	210000	10h	36h30	5.22	174	6.9
Djiguitnoum	16.78	0.67	50000	5h	30h	1.9	108	2.4
Le Brusq	2.56	0	36000	0h45	3h55	7.2	2667	11.2

SBF = surface en bas-fond; T.M = temps de montée; Q. max et Q.s max = débits et débits spécifiques maximums.
Ke = Coefficient d'écoulement

Figure 97 : Abaque de prédétermination des débits spécifiques en Casamance



PREDETERMINATION DE LA RESSOURCE EN EAU

Au sud du Mali

La détermination des apports annuels que l'on peut espérer d'un bassin dépend de la hauteur annuelle des précipitations, de la part reprise par l'évaporation et du stockage inter-annuel dans les réserves aquifères. Une première tentative par analyse de régressions multiples entre la pluie annuelle, l'ETP et les écoulements observés sur l'ensemble des bassins n'a pas abouti à des résultats très satisfaisants. Dans son étude des bassins de Sikasso, LAMAGAT devait exclure l'année 1959 pour obtenir une régression acceptable entre la pluie moyenne et la lame écoulée. Les observations actuelles ne concordent pas avec cette dernière régression.

La régression obtenue sur des observations des années 70 par LAMAGAT sur l'ensemble des bassins suivis dans la région a pour expression :

$$Lr = 0.24 \times (P_{moy} - 625)$$

Lr = lame écoulée en mm

P_{moy} = Pluie moyenne annuelle en mm

A partir de cette régression on obtiendrait pour Kambo une lame de 149 mm en 1988 (contre 63mm observés) , de 71 mm en 1989 (contre 33 mm observés) et de 115 mm en 1990 (contre 35 mm observés).

La seconde tentative a consisté à appliquer la méthode d'estimation de l'écoulement moyen annuel proposée par DUBREUIL et VUILLAUME en 1975 à cet échantillon de bassins versants et de comparer cette estimation à celle obtenue à partir des observations.

A partir d'un échantillon de 52 bassins répartis entre de nombreux pays : Mali, Cote D'Ivoire, Burkina Faso, Togo, Bénin, Cameroun, Centrafrique, Madagascar et Rwanda, DUBREUIL & VUILLAUME proposent l'équation d'estimation suivante pour les bassins de savane boisée avec une pluviosité moyenne comprise entre 900 et 1800 mm :

$$Ec = 0.47 Pr + 1.5 C + (a Ds + b) + A$$

- Ec: est l'écoulement annuel en mm du bassin
- Pr: représente la part disponible pour l'écoulement de l'apport pluvial, la part non disponible étant censée être représentée par l'évapotranspiration. $Pr = Pan - ETP / 3$: Pan étant la pluie annuelle en mm et ETP l'évapotranspiration potentielle en mm.
- C: est le pourcentage de sol cultivé dans le bassin. Lorsque l'information n'était pas donnée dans le rapport concernant le bassin, C a été estimé à partir des cartes au 1/200 000 de l'IGN qui s'appuient sur des photos aériennes des années 50. Ce terme permet une correction sur l'évaluation de l'évapotranspiration. Ici, un défrichage de 10 % de la superficie du bassin (suppression d'un couvert végétal dense pour le remplacer par des cultures temporaires peu couvrantes) augmente l'écoulement de 15 mm.
- Ds: est la dénivelée spécifique, produit de l'indice global de pente (m/km^2) par la racine carrée de la surface. Elle s'exprime en m.
- a et b sont des constantes d'ajustement
- A: est un terme correctif qui tient compte de la surface du bassin et de son aptitude à l'écoulement. Dans cette note, les auteurs donnent les valeurs suivantes : A = -75 mm pour les bassins dont la surface drainée est supérieure à 25 km^2 , A = 50 mm si la surface drainée est comprise entre 5 et 25 km^2 . Par essais successifs, nous avons cherché à caler au mieux ce terme et nous avons obtenu A = -75 mm pour les bassins dont la surface drainée est comprise entre 10 et 100 km^2 et A = -175 mm pour les plus grands.

Cette étude portait sur les bassins versants de 10 à 100 km^2 , mais de l'avis des auteurs, elle peut être étendue à l'intervalle 1 à 1000 km^2 . Le tableau CXI consigne les valeurs estimées par cette méthode pour les bassins choisis et compare ces estimations à celles qui sont obtenues à partir des observations (nous avons conservé celles des auteurs des études, régression linéaire entre pluie et lame écoulée à l'échelle annuelle, modèle de simulation à l'échelle journalière, ajustement statistique sur les lames écoulées ...).

On remarquera que ces estimations respectent l'ordre de grandeur et peuvent suffire à un avant projet de dimensionnement d'ouvrage.

Tableau CXI : Régionalisation du paramètre écoulement moyen annuel

	Pluvio mm	Super- ficie km ²	IG m/km	C %	Pr mm	Ds m	A mm	Ec mm	Ec obser mm
Kambo	1100	10	2.8	66	483.3	8.9	-75.0	87	84
Loulouni	1100	800	9.3	5	483.3	263.0	-175.0	200	112
Banakoro	1100	68	10.6	30	483.3	87.4	-75.0	127	114
Flakoho	1300	30	8.7	20	683.3	47.7	-75.0	158	129
Worossantiakaka	1300	12	6.9	11	683.3	23.9	-75.0	116	129
Nambonkaha	1300	47.6	5.3	6	683.3	36.6	-75.0	130	
Zaniena	1200	764	7.3	10	583.3	201.8	-175.0	181	159
Bowwara	1200	270	9.1	10	583.3	149.5	-175.0	119	138
Lobouala	1200	155	12.0	10	583.3	149.4	-175.0	118	138
Krina	1200	251	13.4	10	583.3	212.3	-175.0	194	97
Tenaya	1200	39	7.4	30	583.3	46.2	-75.0	125	129
Madina	1200	103	16.7	10	583.3	169.5	-175.0	143	142

IG = Indice global de pente, C = % de surface cultivée, Pr = Fraction pluviométrique utile à l'écoulement, Ds = Dénivelée spécifique, A = Aptitude du bassin à l'écoulement, Ec = lame écoulée calculée par la méthode DUBREUIL & VUILLAUME, Ec obser = lame écoulée estimée pour la pluviométrie de référence à partir des observations de débits

En Casamance

L'énorme succès qu'ont connu les petits aménagements anti-sel durant ces dernières années, que ce soit en Casamance, ou plus au sud dans les estuaires des fleuves de Guinée Bissau, nous a poussés à proposer des méthodes simples pour l'estimation des paramètres hydrologiques nécessaires à la conception de ces ouvrages (ALBERGEL, 1987 & 1990). Ces méthodes sont basées sur la régionalisation des paramètres observés.

Lors de la conception d'un ouvrage anti-sel, l'hydrologue devrait déterminer les paramètres suivants:

- Surface des zones contributives au ruissellement. L'hydrologue doit commencer par délimiter le bassin versant contrôlé par l'aménagement projeté et réaliser une cartographie des zones basses à fort coefficient de ruissellement.
- Ressource pluviométrique. Des statistiques des pluies à l'échelle annuelle et à l'échelle journalière sur un poste de longue durée proche du site à aménager donnent les paramètres d'entrée aux méthodes de prédétermination de la ressource en eau.
- Ressource annuelle en eau. La détermination du coefficient annuel d'écoulement est suffisante pour estimer les surfaces possibles à mettre en culture en admettant que 80% de la ressource sera évacuée pour dessaler les terres.
- Crue d'étude. La prédétermination de la crue décennale permet de savoir si l'ouvrage d'évacuation des eaux est suffisamment dimensionné et si la construction d'un évacuateur de crue supplémentaire est nécessaire.

- Amplitudes extrêmes des marées. La prédétermination des amplitudes extrêmes des marées permet de définir la hauteur de l'ouvrage d'évacuation et la hauteur de la digue à protéger contre le battement de la marée.

- Fonctionnement de la nappe et qualité des eaux souterraines. Détermination des surfaces sous l'influence des résurgences de la nappe des plateaux.

Les études de bilan hydrologique, réalisées avant les observations de Djiguinoum, ont toutes eu pour objet des bassins versants continentaux. Toutes les tentatives de bilan hydrologique sur des petits bassins non barrés et influencés par la marée ont échoué, la précision des mesures de débits étant insuffisante pour déceler l'écoulement propre du bassin au cours d'un cycle de marée (études des bassins versants de Bignona par CHOURET et OLIVRY en 1981, de Baïla par GALLAIRE en 1981, de Koubalan par LAMAGAT & al (non publié)). Les études de régionalisation des paramètres de la ressource en eau ont donc été faites à partir des bassins continentaux et appliquées aux bassins maritimes en faisant les hypothèses suivantes :

- Dans le cas d'aménagement anti-sel, il n'y a plus influence de la marée et on en revient à un bassin continental.
- Les coefficients d'écoulement annuels sont équivalents dans les bassins continentaux et maritimes.
- La crue d'étude est calculée comme pour un bassin continental

Pour l'étude des amplitudes de marée, l'important réseau de marégraphes installé dans les années 60 par BRUNET MORET, et complété à l'occasion des études des marigots de Bignona et de Baïla, permet une détermination fiable de ces amplitudes en tout point de la Casamance et de ses affluents.

Les nombreuses mesures hydrogéologiques réalisées en Casamance dont une synthèse est en cours (thèse de doctorat de MALOU) confirment que le fonctionnement de la nappe observée à Djiguinoum est régional et s'applique à toutes les petites vallées étudiées.

Dans cette étude de régionalisation des paramètres hydrologiques, nous avons essayé de comparer les observations hydrologiques faites sur petits bassins versants en basse Casamance. Le tableau CXII donne la liste des bassins versants où le bilan hydrologique a été observé. De cette comparaison, il a été possible de proposer des méthodes simples de prédétermination des apports annuels, du débit maximal de la crue d'étude, des amplitudes extrêmes des marées et un schéma de fonctionnement des nappes de bas-fond qui permet de délimiter les zones où la riziculture en eau douce est possible.

Tableau CXII : Liste des bassins versants utilisés dans l'étude de régionalisation

Nom du bassin		Surface km ²	Période observée	Références
Djïnanoye	C	11	1966-67	BRUNET MORET (1970)
Tankoron	C	43	1966-67&70-71	BRUNET MORET (1970), OLIVRY & CHOURET (1981)
Django	C	135	1966-67&70-71	BRUNET MORET (1970) OLIVRY & CHOURET (1981)
Sindian	C	11.9	1970-71	OLIVRY & CHOURET (1981)
Sandougou	C	85.7	1970-71	OLIVRY & CHOURET (1981)
Toukara	C	324	1979-88	GALLAIRE (1980) OLIVRY & DACOSTA (1984), SAOS & al (1987)
Le Brusq	C	2.56	1989-90	MARIEU & al (1991)
Djiguinoum	M	16.8	1988-90	ALBERGEL & al (1990)
Djilakoun	M	25.2	1988-90	ALBERGEL & al (1990)

C = Bassin continental, M = Bassin maritime

L'étude statistique des lames écoulées sur les bassins versants strictement continentaux a montré que le coefficient d'écoulement annuel ne varie guère avec la surface du bassin (pour des bassins dont la superficie varie entre 10 et 1000 km²) (DACOSTA, 1989). Les valeurs retenues pour les coefficients d'écoulement sont les suivantes :

- Ke = 0.17% en année décennale sèche
- Ke = 6% en année médiane
- Ke = 10% en année décennale humide

Dans l'étude des bassins versants maritimes du marigot de Baïla, GALLAIRE (1980) propose d'exprimer l'écoulement annuel par la composition d'un coefficient d'écoulement sur les plateaux continentaux déterminé à partir de la station la plus en amont et non influencée par la marée (Toukara), et d'un coefficient d'écoulement moyen estimé pour toutes les zones basses à 80%. Dans une étude de synthèse sur l'écoulement des petits bassins maritimes de Basse Casamance, LAMAGAT et LOYER (1985 in USAID/SOMIVAC/ISRA,) écrivent que les apports en eau douce peuvent être estimés en année moyenne en adoptant un même coefficient d'écoulement de 80% pour les zones basses et de 5 à 6 % pour les zones de plateau. Pour évaluer la ressource en eau douce de ces bas-fonds, ALBERGEL (1987) applique à 11 sites faisant l'objet d'une étude de faisabilité d'un ouvrage anti-sel, la formule suivante :

- Le (décennale sèche) = $(0.002 \times Ps \times (Sb - Szi)/Sb) + (0.8 \times Ps \times Szi/Sb)$
- Le (médiane) = $(0.06 \times Pm \times (Sb - Szi)/Sb) + (0.8 \times Pm \times Szi/Sb)$
- Le (décennale humide) = $(0.1 \times Ph \times (Sb - Szi)/Sb) + (0.8 \times Ph \times Szi/Sb)$

Ps, Pm et Ph sont respectivement les pluviométries annuelles de fréquence 0.1, 0.5, et 0.9 (mm)

Sb est la surface du bassin (km²)

Szi est la surface inondable (km²)

L'application de cette méthode aux bassins versants de Djigoum et de Djilakoun donne les résultats suivants :

	Pluie	Djigoum	Djilakoun
- Le (décennale sèche)	1010 mm	35.2 mm	53.6 mm
- Le (médiane)	1437 mm	48.7 mm	76.3 mm
- Le (décennale humide)	1862 mm	63.1 mm	98.9 mm

On peut comparer ces résultats aux observations de 1989 (année de fréquence 0.2, 1145 mm de pluie) et de 1990 (année de fréquence 0.1, pluviométrie 1000 mm) sur nos bassins.

	Pluie	Djigoum	Pluie	Djilakoun
- 1989	1144 mm	61.1 mm	1148 mm	51.8 mm
- 1990	989 mm	27.3 mm	1008 mm	40.9 mm

Cette méthode donne une bonne approximation pour les années déficitaires. Des observations en année plus humide devraient permettre une vérification de la méthode.

REGIONALISATION DES PARAMETRES DE MAREE

Lors de la conception des ouvrages anti-sel, il est nécessaire de déterminer les niveaux d'eau dus aux marées d'amplitudes extrêmes. L'onde de marée qui se produit devant l'embouchure d'un fleuve donne naissance à une onde dérivée qui remonte le fleuve vers l'amont. Il s'agit d'un phénomène hydraulique beaucoup plus complexe que celui de la marée qui est à son origine, car le débit fluvial, la pente et la forme du lit interviennent.

En assimilant l'onde de marée pénétrant dans un fleuve à une onde de translation, sa vitesse de propagation est, dans une section donnée:

$$v = \sqrt{g(H + h)} - u$$

avec g : intensité de la pesanteur

H : profondeur moyenne dans la section pour $h=0$

h : hauteur de l'onde

u : vitesse moyenne dans la section du débit d'eau douce

On voit, d'après cette formule, que la propagation de l'onde de marée est maximale à marée haute et minimale à marée basse, d'où une déformation systématique de l'onde qui perd la forme quasi-sinusoidale qu'elle avait à l'embouchure. En principe, la durée du flot diminue, celle du jusant augmente.

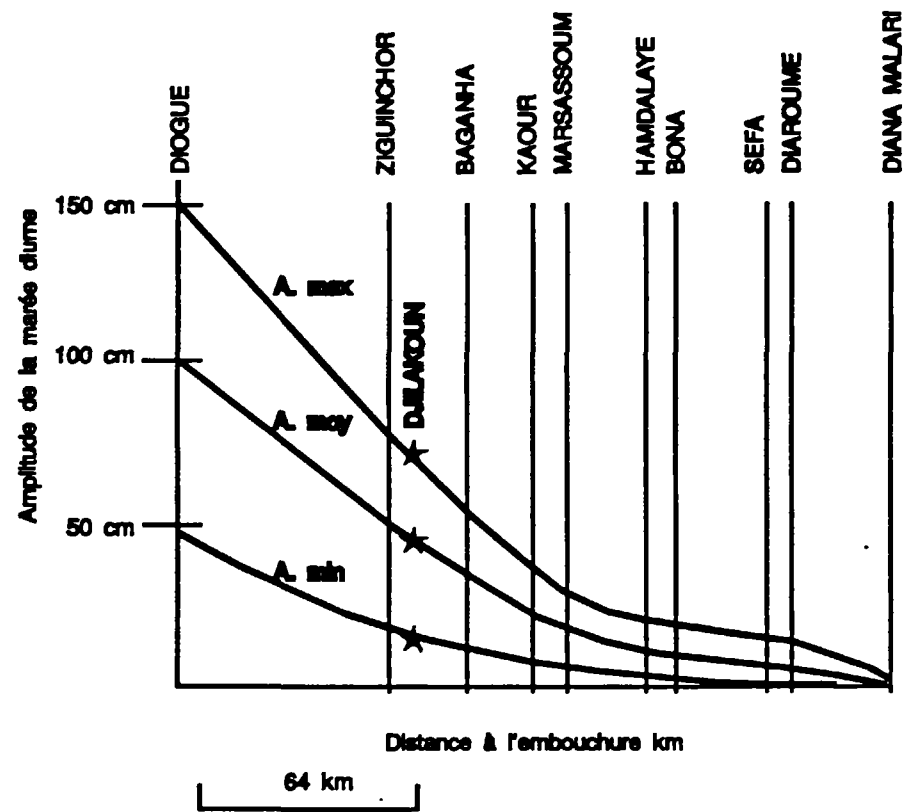
L'amplitude de la marée diminue lorsque l'onde remonte vers l'amont car cette amplitude est proportionnelle à la racine carrée de l'énergie que possède l'onde et qui diminue par frottement pendant sa translation. Cependant, un resserrement des rives peut provoquer localement des amplitudes de marées supérieures à celles qui sont observés dans le bassin élargi à l'aval.

La marée a été suivie durant les deux années 1989 et 1990 à l'aval du barrage de Djilakoun. La marée haute journalière la plus forte atteint la cote 72 cm IGN et la marée basse la plus faible la cote -5 cm IGN. La durée moyenne de la marée montante est de 6h30 et celle de la marée descendante est de 5h55. Les vitesses de translation sont plus rapides à marée basse qu'à marée haute, ce qui est en contradiction avec la formule de translation de l'onde dans l'embouchure d'un fleuve énoncée ci-dessus. Les frottements, diminuant l'énergie de l'onde de marée, et par suite, sa vitesse de translation, sont bien plus importants à marée haute, du fait des vastes zones envahies et occupées en partie par les palétuviers, qu'à marée basse où ces frottements se limitent aux berges du lit mineur du marigot. Ce coefficient de frottement ou de freinage à appliquer à la vitesse maximale possible de l'onde est plus déterminant que la variation de hauteur. En 1981, CHOURET & OLIVRY ont observé le même phénomène sur le marigot de Baïla où la vitesse de propagation de l'onde de marée est plus forte pendant le jusant (5.8 m/s) que pendant le flot (3.2 m/s) dans tout le bief médian.

Le décalage horaire moyen entre la marée à Diogué au bord de l'océan et la station de Djilakoun est de 4h10, ce qui correspond à une vitesse de propagation de l'onde de marée de 19.5 km/h (1600 km/h environ dans l'océan). Les amplitudes et la propagation des marées annuelles et semi-mensuelles n'ont pas été étudiées, (étant moins importantes dans l'étude et la conception des ouvrages anti-sel).

A partir du réseau de marégraphes du fleuve Casamance, les amplitudes maximales et minimales de la marée ont été mises en relation avec la distance depuis l'embouchure. Un aménageur peut déterminer les hauteurs des marées en tout point de la Casamance à partir de la figure 98.

Figure 98 : Abaque de prédétermination des amplitudes de marée en Casamance



Quels aménagements pour quels bas-fonds ?

A partir de la typologie des bas-fonds qui a été exposée plus haut, tant technique que socio-économique, on peut essayer d'esquisser quelques propositions d'aménagements hydro-agricoles afin de tirer un meilleur parti du potentiel des sols de bas-fonds.

Ces propositions seront d'abord fonction de la pluviométrie annuelle sur les sites. En effet, la période favorable aux cultures est de l'ordre de 90 jours dans le Yatenga et dans le Siné-Saloum. Même en supposant que, grâce à un stockage de l'eau, cette période soit prolongée de quelques semaines, le cycle végétatif du riz n'est pas entièrement assuré. En outre, bien que le test n'ait été mené que sur Kambo, des simulations dans les climats analogues à Djenné (FOREST, 1984, pluviométrie annuelle 600 mm) ou San. (pluviométrie annuelle 700 mm) montrent que l'irrégularité des pluies et donc des écoulements est trop grande au début de la saison des pluies. Cela entraîne des chutes de rendement trop importantes et la riziculture devient aléatoire.

Nous classerons donc les aménagements possibles en fonction de la pluviométrie annuelle du site et distinguerons sans que le chiffre de 1000 mm/an soit autre qu'un ordre de grandeur, correspondant à la limite théorique du riz pluvial :

- les zones où la pluviométrie est inférieure à 1000 mm/an
- les zones où elle est supérieure à 1000 mm/an.

Nous distinguerons par ailleurs, les aménagements dans les bas-fonds estuariens où l'interférence avec les eaux salées de la mer oblige à gérer les systèmes différemment.

DANS LES REGIONS OU LA PLUVIOMETRIE ANNUELLE EST INFÉRIEURE A 1000 MM

Dans les zones où la pluviométrie est inférieure à 1000 mm/an, les systèmes d'aménagement seront de deux types:

- * Ceux qui ont pour but de stocker l'eau pendant un temps assez long pour humidifier le sol sur une profondeur suffisante, mais pas trop long pour ne pas compromettre les rendements des cultures autres que le riz. Parmi les aménagements de ce type, les digues filtrantes sont à recommander.

- * Ceux qui ont pour but de stocker l'eau pendant un temps assez long, selon les quatre cas suivants:

- jouer le rôle de réserve d'eau pour abreuver les hommes et surtout les animaux,
- réalimenter les nappes phréatiques proches pour faciliter le puisage de l'eau destinée à l'abreuvement et au maraîchage,
- cultiver en décrue dans la retenue,
- stocker l'eau suffisamment longtemps pour rendre la culture quasi indépendante de la pluviométrie, y compris en contre-saison.

La base de ces aménagements est toujours un barrage étanche dont la hauteur varie avec la durée prévue pour le stockage de l'eau.

LES DIGUES FILTRANTES

Les digues filtrantes (figures 56 & 57 p.182) freinent l'eau dans sa course et étendent la nappe d'inondation sur une plus grande superficie cultivable. L'eau s'étale ainsi à la surface du sol quelques heures à quelques dizaines d'heures en fonction de la taille du bassin versant.

Les digues filtrantes sont réalisées uniquement en pierres sèches dans le cas de petits bassins versants dont la superficie est inférieure à 10 km², en gabions dès que le débit à évacuer devient trop important. Leur tracé suit des courbes de niveau pour mieux étaler l'eau, mais il est quelquefois rectifié. Elles sont décrites dans l'ouvrage : "Le point sur la maîtrise des crues dans les bas-fonds" (BERTON, 1988).

Le sorgho est une plante rustique à enracinement profond qui supporte une submersion de 2 à 3 jours. Aussi, c'est la spéculation recommandée derrière les digues filtrantes sur les sols profonds peu engorgés. Les riz nécessitent plus d'eau et sur un cycle plus long. Les digues filtrantes prolongent la saison végétative uniquement par l'humidité dite résiduelle dans le sol, c'est pourquoi les limitations de ce type d'aménagement sont d'abord liées à la pluviométrie.

En dessous de 600 mm/an, comme à Bidi, le sorgho et le riz sont très aléatoires. Il faut signaler que, aux environs de cette limite pluviométrique, les paysans associent riz et sorgho, minimisant les risques.

Les digues filtrantes ont surtout été vulgarisées au Burkina Faso, leur construction impliquant les populations (projets AFVP, PEDI). BRASSER & VLAAR (1990) ont noté que les sols des bas-fonds appartiennent souvent à des cultivateurs aisés et que les populations se découragent de travailler gratuitement pour eux. Ils ont recommandé une approche à un niveau social réduit: quartier ou individus susceptibles de rémunérer les travailleurs.

LES BARRAGES DE RETENUE

Contrairement à la zone plus au sud, la riziculture reste très aléatoire dans la cuvette d'un barrage de retenue. La pluviométrie est irrégulière au démarrage de la végétation et, en l'absence d'une gestion correcte du plan d'eau (difficile à vulgariser), les jeunes plants risquent d'être noyés si le remplissage du barrage est trop rapide. Si on cultive le riz dans la frange inondée la plus tardivement, c'est aussi celle qui est exondée le plus tôt et le riz s'assèche avant la récolte. Les barrages qui sont construits malgré tout ont alors d'autres buts:

- L'abreuvement du bétail (et parfois des humains malgré les risques sanitaires). En principe, ils ne devraient être réalisés que dans le cadre d'un programme cohérent de développement de l'économie pastorale, prenant en compte la valeur des pâturages, les circuits de transhumance.... Cela est malheureusement rarement le cas.
- La réalimentation des nappes phréatiques, comme à Bidi. Cela intéresse les villageois qui peuvent construire des puits moins profonds et mieux alimentés en eau. L'eau stockée dans la nappe permet aussi de réaliser des cultures maraîchères et fruitières. Il faut signaler que se posent des problèmes fonciers (à Bidi, les femmes des propriétaires Mossi ont découragé les femmes des autres ethnies qui voulaient pratiquer le maraîchage) et des problèmes de commercialisation des productions.
- La culture de décrue, surtout de sorgho, au fur et à mesure que l'eau se retire. En Mauritanie, on ouvre une vanne pour accélérer la vidange. Des cultures de décrues existent au Niger (Ader Douchi-Maggia), en Mauritanie et au Tchad (Ouaddaï). Les conditions de leur développement sont très mal connues. Signalons que l'on pourrait aussi planter un pâturage aquatique dans la retenue (*Echinochloa stagnina* ou *Bourgou*), mais que, là aussi, manquent des résultats de recherches.
- L'irrigation en aval, à partir d'un ou deux ouvrages de prise. Des canaux d'irrigation suivant le bord du bas-fond (parfois également les bourrelets de berge) irriguent le bas-fond à l'aval du barrage. Il s'agit d'une solution coûteuse, mais très habituelle au Burkina Faso. Suivant la hauteur d'eau stockée derrière le barrage et la durée du stockage, on peut cultiver du riz en double culture (gros besoins en eau jusqu'en avril-mai, exemple le barrage de Mogtedo), du riz en saison des pluies et du maraîchage en contre-saison (exemple barrage de Goinré), du riz en saison des pluies seulement. Mention doit être faite des systèmes où, au lieu d'irriguer gravitairement les terres à l'aval du barrage, on irrigue par pompage à l'amont de celui-ci (avec des calebasses en pays Dogon, avec des moto-pompes la plupart du temps).

Les principaux problèmes techniques posés par les barrages de retenue concernent d'abord l'évacuation des crues. Il faut des ouvrages évacuateurs correctement calculés (la présente synthèse cite les méthodes les plus adaptées); malgré tout, le passage des crues à travers le périmètre aval reste un problème: soit on endigue sur ses deux berges un chenal au milieu de la plaine, soit on abandonne la culture sur un côté de la plaine pour laisser passer les crues, soit on laisse les crues passer sur les cultures, mais les dégâts sont alors inévitables. Les autres problèmes des barrages sont d'ordre géotechnique: les sols d'assise sont parfois trop sableux ou de qualité médiocre, la stabilité des remblais et leur résistance aux infiltrations doivent être correctement calculées, les protections contre le battillage et l'érosion pluviale doivent être suffisantes.

D'autres problèmes socio-économiques se posent: fonciers (l'irrigation en aval est généralement couplée avec une redistribution des terres), de commercialisation des productions, pour assurer la rentabilité de l'aménagement (surtout maraîchères, mais également du riz dont le prix de revient est élevé) et d'économie du projet (un barrage de retenue revient à plusieurs millions de FCFA par hectare, le périmètre a un coût du même ordre).

LES SYSTEMES AMENAGES

D'autres types d'aménagements ont été proposés pour la zone à pluviométrie inférieure à 1000 mm/an et sont cités par ZEPPENFELDT & VLAAR 1990. OOSTERBAAN, GUNNEWEG & HUIZING (1987) proposent 4 systèmes d'aménagement. Parmi ceux-ci:

- Le système à collecteur central (figure 99) destiné à assécher le bas-fond est évidemment inadapté dans une zone où la pluviométrie naturelle est insuffisante pour assurer le développement végétatif normal des cultures. Il pourrait cependant permettre les cultures de sorgho dans une zone où la pluviométrie annuelle est de 700 mm, dans les zones naturellement engorgées. Il a été essayé en 1964 dans la plaine d'inondation du Goulbi de Maradi en aval de la ville du même nom au Niger (700mm/an). Il a d'ailleurs fonctionné correctement pour le sorgho. En revanche, les ouvrages de régulation prévus pour limiter les débits sur le collecteur ont été contournés et n'ont pas servi.

- Le système avec diguette d'épandage et de stockage et canaux d'irrigation (figure 100) s'apparente à celui qui a été décrit dans le paragraphe précédent comme barrage de retenue avec irrigation à l'aval. Il n'est pas recommandé pour une zone à faible pluviométrie puisqu'il ne prolonge pas assez la période de culture, mais convient bien dès que la pluviométrie est plus forte. Pour les mêmes raisons, le système avec diguettes suivant les courbes de niveau n'est adapté que si les diguettes sont filtrantes et favorisent la culture du sorgho.

Figure 99 : Aménagement avec collecteur central

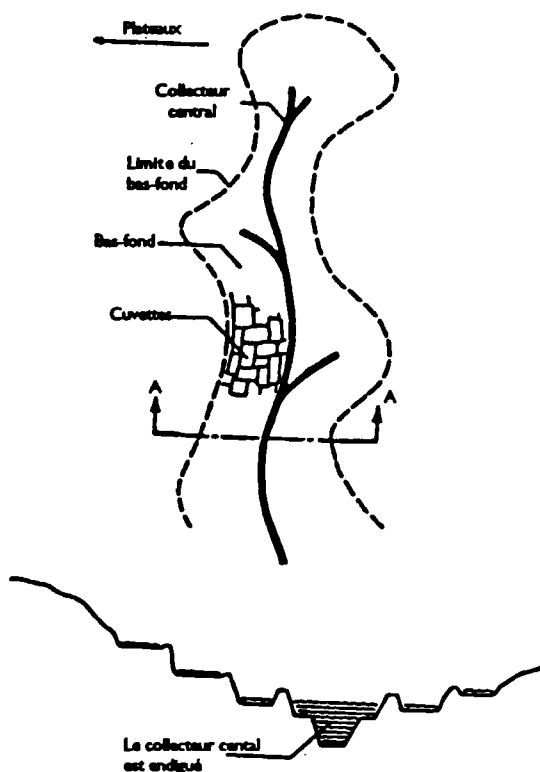
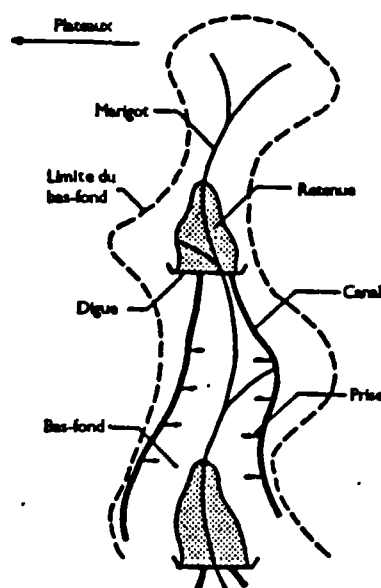


Figure 100 : Aménagement avec digue d'épandage/storage



- Le troisième système est constitué de digues en terre équipées de buses de vidange ou de déversoirs en pierres aménagées en type fermé (figure 101), en type ouvert simple (figure 102) ou en type ouvert avec canal d'écoulement. Ils s'apparentent aux systèmes avec diguettes suivant les courbes de niveau de OOSTERBAAN, GUNNEWEG & HUIZING. Pour les mêmes raisons, ils ne sont pas adaptés aux zones à faible pluviométrie annuelle. Très diffusés dans la décennie 1965-75, ces aménagements ont montré leurs faiblesses dès que la pluviométrie est devenue irrégulière et les milliers d'hectares ainsi aménagés au Burkina Faso sont presque abandonnés aujourd'hui.

- Le quatrième système (figure 103), aménagement avec petite retenue et dérivation, s'apparente au système avec diguette d'épandage et de stockage et canaux d'irrigation vu plus haut, sauf que le barrage ne traverse pas le lit mineur de la rivière, mais est rempli par un canal à partir de celui-ci. Un tel système appelé "tank" est très courant aux Indes. Il est assez coûteux, surtout s'il faut construire un ouvrage spécial pour rehausser le niveau de l'eau dans la rivière. A moins d'un très gros investissement en main d'oeuvre gratuite, il ne semble pas à préconiser et il n'a d'ailleurs jamais été appliqué en Afrique de l'Ouest.

Figure 101 : Aménagement de type fermé (CIEH, 1974)

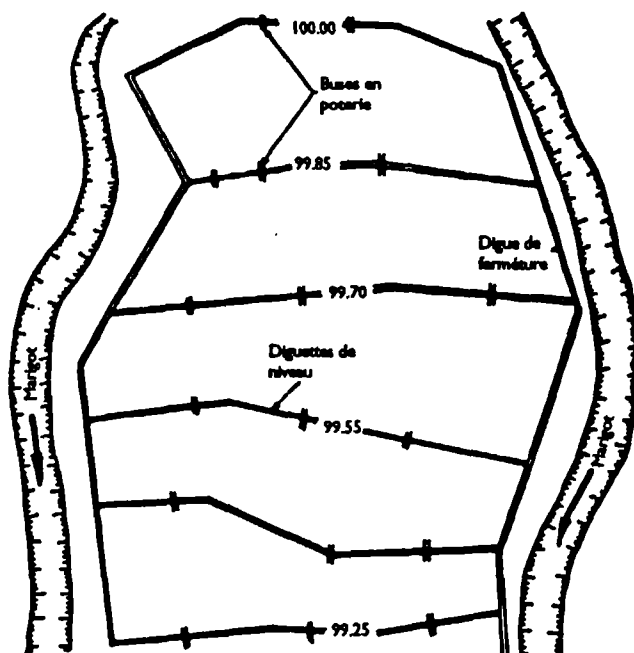


Figure 102 : Aménagement de type ouvert simple (CIEH, 1974)

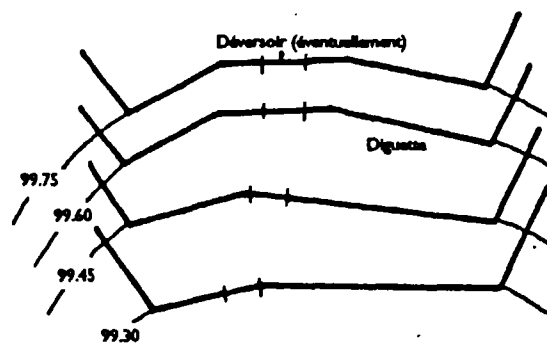
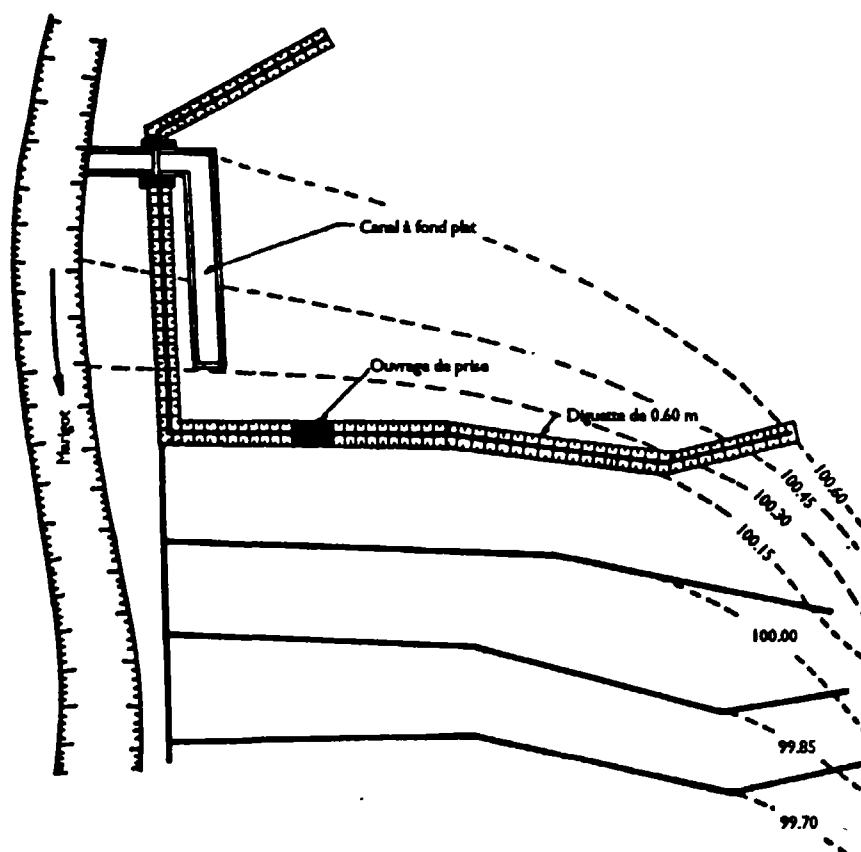


Figure 103 : Aménagement avec petite retenue et dérivation



LA PROTECTION DES BAS-FONDS

Bien que ce ne soit pas à proprement parler une "mise en valeur" d'un bas-fond, la lutte contre l'érosion du bassin versant est parfois nécessaire pour protéger le bas-fond contre l'envahissement par le sable. Cet envahissement ne concerne que les zones déboisées à sols légers et donc, principalement, les zones à faible pluviométrie annuelle. Dans les bas-fonds étudiés, il n'a touché que ceux du Siné-Saloum, et dans une moindre mesure, ceux de Bidi. Les mesures anti-érosives à préconiser sont classiques:

- Façons culturales d'abord: labours en billons cloisonnés suivant les courbes de niveau.
- Mesures agronomiques: plantation de haies herbues isohypses et maintien de bandes de végétation.
- Mesures correctives ensuite: confection de diguettes en pierres ou terre, traitement correctif des ravines...

On se reportera à des ouvrages spécialisés (CIEH, U.A. WAGENINGEN en cours de publication) pour le détail de ces mesures qui, bien que connues sur le plan théorique, ne sont pas toujours faciles à faire mettre en oeuvre par les populations.

AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES PRINCIPAUX TYPES D'AMENAGEMENTS

Dans les zones à faible pluviométrie annuelle ont été finalement retenus deux types d'aménagements:

- La digue filtrante pour améliorer les cultures de sorgho en amont de celle-ci avec plus de 600 mm/an pour obtenir un résultat pas trop aléatoire.
- Le barrage de retenue avec comme buts de complexité croissante:
 - *l'abreuvement direct du bétail,
 - *l'alimentation de la nappe phréatique pour l'abreuvement ou les jardins,
 - *la culture de décrue dans la retenue,
 - *l'irrigation à l'amont par pompage dans la retenue ou à l'aval par canaux gravitaires

Les principaux avantages et contraintes de ces solutions techniques sont répertoriés dans le tableau CXIII. On remarquera que, mis à part les digues filtrantes, la plupart de ces aménagements exigent des études approfondies et une bonne technicité dans leur réalisation. Leur gestion est complexe s'ils sont associés à des périmètres irrigués.

Tableau CXIII : Avantages et inconvénients des principaux aménagements de bas-fonds au Nord de l'isohyète 1000 mm

AVANTAGES	INCONVENIENTS
DIGUE FILTRANTE	
*Étalement des crues sur toute la largeur du bas-fond *Meilleure infiltration *Diminution de l'écoulement dans l'axe du bas-fond *Augmentation de la superficie cultivée *Rendements plus élevés *Aménagement simple à la portée des populations y compris son entretien	*Système inefficace en année sèche, d'où limitation pratique: **sorgho si pluie annuelle > 600 mm/an **riz si pluie annuelle > 1000 mm/an *Système n'intéressant qu'une minorité possédant les terres du bas-fond, d'où difficulté de mobiliser la population totale du village *Rendements potentiels assez faibles et augmentation peu marquée en cas de bonne pluviométrie
BARRAGE DE RETENUE pour hydraulique villageoise	
*Facilité d'abreuvement *Entretien peu coûteux	*Solution coûteuse à comparer avec forage, puits ou mare surcreusée *Médiocre utilisation de l'eau en raison de l'évaporation
BARRAGE DE RETENUE pour alimentation de la nappe phréatique	
*Facilité pour abreuver les hommes et les animaux en toute saison *Possibilité de pratiquer des cultures irriguées par pompage: maraîchage, arbres fruitiers *Entretien peu coûteux	*Nécessité de sols assez sableux pour permettre l'infiltration *Investissement coûteux *Obligation d'élever l'eau à la main ou avec un système d'exhaure *Problèmes fonciers possibles
BARRAGE DE RETENUE pour cultures de décrue	
*Culture de sorgho très aisée et connue traditionnellement *Entretien peu coûteux	*Conditions pédologiques mal connues *Nécessité d'études approfondies (hydrologie et géotechnique) *Rendements faibles
BARRAGE DE RETENUE pour irrigation	
*Maîtrise de l'eau pour toutes les cultures *Rendements potentiels élevés	*Aménagements très coûteux à l'investissement et à l'entretien *Nécessité d'études approfondies *Demande une technicité élevée de la part des agriculteurs *Problèmes fonciers dus à la nécessaire redistribution des terres

DANS LES REGIONS OU LA PLUVIOMETRIE ANNUELLE EST SUPERIEURE A 1000 MM

Dans la zone à pluviométrie supérieure à 1000 mm par an, la durée de la saison des pluies est, a priori, suffisante pour assurer le cycle végétatif de la plupart des cultures, en particulier du riz, plante tolérante aux inondations et convenant assez bien aux sols relativement lourds des bas-fonds. Les aménagements auront pour buts:

- de combler les trous de pluviométrie toujours fréquents,
- de prolonger de quelques jours le cycle végétatif du riz dans les zones où la pluviométrie naturelle est limitée, surtout les années de sécheresse,
- de lutter contre les crues trop fortes qui déracinent ou submergent les jeunes plants de riz.

Les buts cités plus haut pour la zone où la pluviométrie est inférieure à 1000 mm deviennent annexes: abreuvement, alimentation de la nappe phréatique, mais ils constituent néanmoins des facteurs importants pour la mise en valeur. En particulier, les cultures maraichères ou de tubercules se développent beaucoup dans les bas-fonds aménagés.

LE SYSTEME TRADITIONNEL

Dans le système traditionnel, les populations sèment le riz dans les zones basses et moyennes avec les premières pluies après un labour. Il pousse ensuite en étant plus ou moins fréquemment submergé avant d'être récolté en fin de saison des pluies. Outre la maîtrise de l'eau, l'enherbement est le principal facteur limitant. Dans les zones hautes et moyennes, une première amélioration consiste à entourer les champs par des diguettes et à repiquer le riz sur des buttes ou des billons surtout lorsque le semis est tardif. Le riz est repiqué âgé, mais la présence d'une nappe d'eau limite le développement de l'enherbement. Malgré tout, les riz employés doivent être très rustiques et supporter de grandes variations du plan d'eau au cours de la période de culture. Les rendements potentiels de cette culture traditionnelle sont faibles; les risques hydrauliques qui les limitent peuvent être classés sans ordre d'importance:

- Les premières pluies sont insuffisantes ou trop fortes pour permettre une préparation correcte avant le semis.
- Les crues précoces risquent de noyer les jeunes plants dans la première phase de végétation avant le tallage.
- La vitesse de l'eau est trop forte et déracine les jeunes plants.
- La crue est trop faible et le riz n'est pas submergé.
- La décrue est trop précoce et le riz se dessèche avant la récolte.
- La décrue est trop tardive et il faut récolter dans l'eau.

Bien évidemment, l'importance des risques dépend de la position topographique du champ dans le bas-fond, ainsi que de la taille et de la morphologie de celui-ci. Les aménagements ont pour but de réduire ces risques mais ne les suppriment généralement pas tous.

AMENAGEMENT AVEC COLLECTEUR CENTRAL

Le premier type d'aménagement est constitué par un collecteur central qui n'a qu'un seul but, à savoir évacuer plus rapidement les eaux du bas-fond. Ses dimensions sont calculées pour évacuer une crue décennale en 2 à 3 jours, celle-ci étant évaluée d'après les chapitres précédents.

La plupart des sols de bas-fond sont assez perméables et le collecteur sert aussi d'axe de drainage, asséchant très rapidement les sols. Un collecteur simple est donc incompatible avec la culture du riz, mais peut servir pour cultiver en maïs ou sorgho des plaines peu souvent inondées. A notre connaissance, il n'a jamais été essayé, mais mériterait d'être tenté dans les plaines près de Koutiala au Mali. Pour limiter le drainage dans les parcelles, on peut ainsi imaginer de relever le fond du collecteur et de l'endiguer pour laisser passer le débit nécessaire (figures 61 & 62 p. 189 pour le collecteur de Moadougou dans la Comoé).

Il devient alors difficile d'évacuer les eaux provenant des versants latéraux du bas-fond tant que le niveau de l'eau dans le collecteur central n'est pas suffisamment bas. Il y a un grand risque que les riz des parties basses soient noyés. Toujours pour limiter l'effet de drainage, on peut interposer des ouvrages à vannes ou batardeaux pour régler le niveau de l'eau dans le chenal évacuateur. Les vannes ou batardeaux doivent pouvoir être ouverts ou enlevés très rapidement en cas de forte crue, qui peut se produire la nuit (figure 63 p. 190). Les risques de contournement des ouvrages sont importants, si les vannes ne sont pas manipulées à temps.

AMENAGEMENT AVEC DIGUE DEVERSANTE ET BARRAGE SOUTERRAIN

C'est l'aménagement testé dans le projet pilote du Sud-Mali dans le bas-fond de Kambo (figures 68 & 69 p.195).

Dans ce type d'aménagement on barre le bas-fond par un barrage à demi-souterrain pour bloquer la nappe, à demi au-dessus du sol pour créer une petite retenue d'eau de hauteur maximale 1.00 m. Une vanne centrale permet de régler la mise en eau dans la retenue en début de culture pour éviter de noyer le riz. Pratiquement la plus grande partie du barrage sert de déversoir et est recouverte d'enrochements. Les dimensions et calculs des ouvrages sont donnés dans l'ouvrage "Le point sur la maîtrise des eaux dans les bas-fonds" (BERTON, 1988).

En amont de chaque ouvrage, sur quelques hectares, on peut cultiver du riz rustique, parfois du riz flottant là où la hauteur de l'eau dépasse 70 cm. A l'aval du barrage, l'amélioration de l'écoulement est minime puisqu'elle dépend des ouvertures de vannes et d'un meilleur étalement des crues sur la largeur du déversoir. Le blocage de la nappe phréatique par le barrage souterrain empêche le niveau de celle-ci de s'abaisser trop vite. Il favorise ainsi la fin du cycle du riz et les cultures maraîchères et fruitières irriguées par pompage dans les puits situés sur les bords de la retenue. De plus en plus, les zones hautes peu inondées sont cultivées en patates douces sur billons de manière qu'elles restent à sec en permanence.

Dans les plaines où les sols sont imperméables, le barrage souterrain ne s'impose pas. En 1968, à Samako (haute vallée du Niger au Mali) on a réalisé ainsi 5 barrages successifs, le premier le plus important servant à la fois de route et de barrage écreteur de crues. Le fonctionnement hydraulique de ce type d'ouvrage a été évalué par le projet Sol-Eau-Plante (Sol-Eau-Plante, 1989).

Période 1 (remplissage de la cuvette) :

- L'effet de la barrière étanche est bien mis en évidence par le niveau piézométrique élevé juste en amont de la digue.
- La zone amont est d'abord remplie à partir de l'eau stockée dans la cuvette, ensuite elle est remplie par des apports de la zone du bas-fond.

Période 2 (retenue pleine) :

- L'effet de la digue est très visible (résurgences à l'aval).
- La retenue est alimentée à partir de la zone amont.

Période 3 (vidange) :

- Il a été mis en évidence que pendant la période de vidange, la digue permet de diminuer de 30% la vitesse de descente de la nappe en amont de la digue.

Pour une année à pluviométrie déficitaire, le riz sèche dans le tiers amont de la retenue du bas-fond et les zones hautes du tiers médian. Dans les zones plus basses du tiers médian, le riz est exondé mais l'alimentation en eau est assurée jusqu'au 20 octobre. Dans le tiers aval (environ 3 ha à Kambo), la lame d'eau peut être maintenue dans les parcelles grâce à l'apparition d'un débit d'étiage (à partir de 8 à 10 km² de bassin versant), supérieur à celui d'infiltration jusqu'en début novembre.

Ce type d'aménagement n'est adapté que lorsqu'existe un écoulement de base à partir du mois d'août jusqu'à fin octobre-début novembre qui empêche le niveau de l'eau de baisser trop vite derrière la digue. Il convient très bien pour les bas-fonds allongés aux bassins versants de 5 à 50 km² (au delà, les crues deviennent trop fortes) dans la zone à 1000 mm/an de pluies. Son faible coût (600 000 à 800 000 FCFA/ha, tout compris), la participation active des paysans lors des travaux, en font le type d'aménagement à recommander en priorité. Plusieurs centaines d'aménagements de ce type sont d'ailleurs prévus dans la zone du Mali-Sud.

LES SYSTEMES AVEC CANAUX D'INTERCEPTION

Ces systèmes consistent au départ à capter l'eau des bassins versants latéraux par un fossé de garde et à la redistribuer au travers du bas-fond. Le schéma présenté en figure 100 p. 288, pour la zone au dessous de 1000 mm de pluie annuelle ne tient pas compte de la présence fréquente d'un bourrelet de berge de part et d'autre du chenal central qui rend difficile l'irrigation des zones proches de celui-ci. En outre, les ruissellements latéraux sont très irréguliers, nuls les années à faible pluviométrie, dévastateurs après une forte pluie. Cette technique ne convient évidemment qu'aux pentes très faibles pour que l'eau s'étale suffisamment derrière les diguettes et on se heurte à deux écueils:

- Si le bassin versant capté par une diguette est trop petit, les quantités d'eau retenues sont trop faibles. En y ajoutant l'infiltration, forte dans les zones hautes des bas-fonds, les riz n'arrivent pas à maturité comme cela se passe dans la zone à moins de 1000 mm/an de pluviométrie.
- Si le bassin versant capté est grand, il faut prévoir un coûteux système d'évacuation des crues sur chaque diguette.

Il est possible de pallier le premier écueil en construisant une digue amont qui retient les crues provenant du bassin versant latéral au périmètre. Un réseau de distribution permet d'amener l'eau aux parcelles entre les diguettes. On en revient au système de digue d'épandage / stockage, avec canaux d'irrigation décrit plus loin. Une pente de 1% pour le terrain entraîne la construction de diguettes de 50 à 55 cm de hauteur tous les 25 mètres, si on veut maintenir une hauteur d'eau entre 5 et 30 cm sur les rizières. On voit ainsi que la pente maximale aménageable rationnellement est d'environ 0.5%.

Le système a été employé sur la plaine de Gouéné au sud de Sikasso et a été abandonné car les quantités d'eau recueillies étaient insuffisantes pour garantir la maturité du riz. Il a été préconisé mais non réalisé sur les terrasses du Niger près de Siguiri en Guinée. Il pourrait convenir si la pluviométrie dépasse 1200 mm/an mais le riz pluvial est alors cultivable sans aménagement. Dans ce cas, les diguettes servent plutôt à la lutte contre l'érosion dans le bassin versant.

SYSTEME AVEC DIGUETTES DE NIVEAU

Dans ce type d'aménagement (figure 66 p. 193), les diguettes suivant les courbes de niveau ont pour but de laminer les crues et mieux répartir les eaux sur la plaine. Ce système améliore le régime hydrique lorsque les bas-fonds manquent d'eau ou que celle-ci est mal répartie. Lorsque le nivellement est bien exécuté le stockage d'eau entre les diguettes permet des rendements assez élevés.

Les diguettes sont en argile, avec une hauteur faible 0.25 à 0.55 m et une dénivellée entre elles de 0.05 à 0.30 m dépendant de la pente du terrain, voir tableau LXVI pour Kawara. Le terrain a été plané médiocrement à Kawara et il n'est pas évident que cette technique procure une augmentation de rendement avec une maîtrise de l'eau aussi faible. Cet aménagement est peu coûteux mais il implique:

- Des crues très régulières, d'où un bassin versant aux pentes faibles.
- Un entretien important des diguettes submergées chaque année.
- Des difficultés au repiquage du riz si les hauteurs d'eau sont trop élevées derrière les diguettes en début de saison des pluies.
- Une collaboration entre exploitants de parcelles voisines.

Cet aménagement, réalisé à Kawara dans la Comoé, est recommandé dans les nouvelles plaines de l'O.R.C.

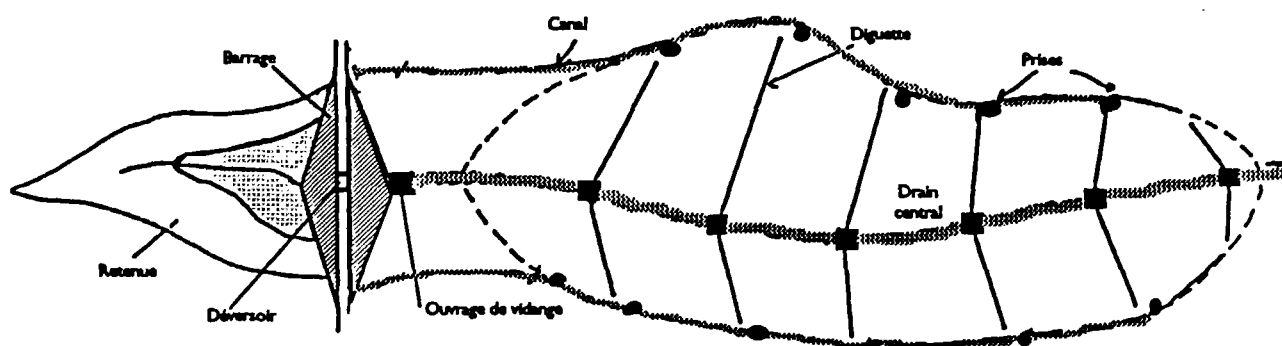
Une étude technico-économique (SENNEMA, 1983) a justifié l'absence de collecteur central avec petits ouvrages pour évacuer l'eau. Elle concluait à une augmentation potentielle de rendement de 8% seulement pour plus qu'un doublement du coût de l'aménagement (700 000 au lieu de 300 000 FCFA/ha.). Ses conclusions ont été contestées (FOKKER, WILLE, 1988), mais aucune expérience de terrain ne permet de trancher. Il faut signaler qu'en Haute Guinée, on a recommandé (GADELLE, 1989) un système analogue avec creusement d'un petit drain central et des ouvrages de régulation, mais sans planage (figure 99 p. 288). Ce dernier système est sans doute mieux adapté aux bas-fonds plus humides et gorgés d'eau du sud de Kankan où la pluviométrie est de l'ordre de 1500 mm.

SYSTEME AVEC DIGUETTES D'EPANDAGE/STOCKAGE ET CANAUX D'IRRIGATION

Dans ce type d'aménagement (figure 104), au lieu d'irriguer les parcelles en cascade, on les alimente à partir de canaux latéraux en terre. Ces canaux sont issus d'une ou deux prises dans une petite digue de retenue ou à partir d'un seuil sur la rivière. Les ouvrages de distribution sont en maçonnerie ou en béton voire même en bambou (cas des aménagements des bas-fonds de Guinée Forestière, SCHEEPERS, 1989). La digue de retenue sert à prolonger de quelques jours la période pendant laquelle on irrigue le riz et à stocker l'eau pour pallier les trous de pluviométrie. Son utilité décroît au fur et à mesure que la pluviométrie annuelle augmente. Vers 1000 mm/an un stockage de 15 jours, soit 1000 à 2000 m³/ha, est très utile. Un chenal central avec ouvrages est parfois nécessaire pour assurer une vidange plus rapide des parcelles. Là aussi les ouvrages peuvent être de type simplifié. La gestion des ouvrages de vidange est délicate, si les pluies surviennent la nuit ou inopinément.

Ce type d'aménagement existe sur un très petit bas-fond près de Kankan (propriété de M. Souro Sidibé) pour une plaine d'un hectare avec un bassin versant de 1km² seulement (GADELLE, 1988). C'était également le principe initial pour l'aménagement de Moadougou dans la Comoé étudié dans le cadre de la présente recherche. A Moadougou, ont été abandonnés les canaux en bordure de plaine qui étaient soumis à l'érosion provenant du ruissellement des bassins versants latéraux. Dans de plus grands bas-fonds, comme celui de Kléla dans le sud du Mali, on a évité ce problème en plaçant le canal sur le bourrelet de berge.

Figure 104 : Système avec diguettes d'épandage/stockage et canaux d'irrigation



Dans ce type d'aménagement, les crues traversent le périmètre. Si elles sont peu importantes (petit bassin versant ou pentes faibles de celui-ci), on ne prend aucune précaution. Si elles sont fortes, on doit prévoir un évacuateur central ou abandonner la moitié de la plaine (cas de Kargouan ou Kléla dans le sud du Mali). Le nombre de prises sur le canal principal, la taille des parcelles qu'elles irriguent, le planage éventuel des terres, font distinguer plusieurs types de systèmes:

- Secondaire, avec parcelles de 50 ha à 15 ha non planées avec une dénivelée interne aux parcelles variant de 0.60 à 0.20 mètre.
- Tertiaire, avec parcelles de 1 ha non planées puis planées, avec une dénivelée interne aux parcelles variant de 0.10 à 0.05 mètres.

Ce type d'aménagement est beaucoup plus complexe que les précédents, mais il permet d'espérer de biens meilleurs rendements potentiels, d'autant plus élevés que les parcelles sont petites. Il convient aux plaines de toute taille (la surface de Kléla dépasse 1000 hectares) mais:

- Le bas-fond ou la plaine doit être relativement large si l'on veut que la longueur des canaux ne soit pas trop importante par rapport à la surface irriguée, ceci pour limiter les coûts d'aménagement, qui restent cependant élevés.
- En sols relativement perméables comme dans beaucoup de bas-fonds, les pertes d'eau dans les canaux sont très fortes.
- Plus les sols sont perméables, plus l'aménagement doit être sommaire, pour à la fois diminuer le lessivage des engrais et simplifier la gestion de l'eau. En effet pour maintenir de faibles lames d'eau dans des rizières à sols perméables, on est obligé d'irriguer souvent et de prévoir des ouvrages de régulation sur le réseau d'assainissement pour que la nappe ne s'abaisse pas trop.

AVANTAGES ET INCONVENIENTS DES PRINCIPAUX TYPES D'AMENAGEMENTS

Dans les zones à pluviométrie annuelle supérieure ou égale à 1000 mm, on peut préconiser plusieurs types d'aménagements.

La digue déversante dont le prototype étudié ici est Kambo dans le sud du Mali. C'est certainement le système le plus rustique et le plus simple à réaliser. Il convient aux bas-fonds allongés et à faible pente ($1\text{ }^{\circ}/\infty$) pour obtenir un bon rapport longueur et coût de la digue/ surface inondée. La surface du bassin versant doit être comprise entre 5 et 50 km², suffisante pour avoir un écoulement permanent en saison des pluies, pas trop important pour absorber les crues sans problème majeur. En réalimentant la nappe phréatique, cet aménagement favorise la riziculture, mais aussi les cultures de tubercules, maraîchères et fruitières sur les franges de la retenue. Une recherche devrait être menée pour déterminer régionalement, en fonction des types de sols, les zones où un masque d'étanchéité sous la digue, toujours très coûteux, est absolument nécessaire. En attendant, comme au Mali-Sud, on le recommande dans tous les cas.

Le système avec diguettes suivant les courbes de niveau, dont le prototype est l'aménagement de Kawara dans la Comoé. Sa simplicité et son faible coût ont conduit à le préconiser dans le projet O.R.C. Ses résultats économiques sont cependant peu probants à Kawara où les rendements après aménagement sont peu différents de ceux observés à Damana, bas-fond aménagé de manière traditionnelle.

Le système avec diguettes d'épandage/stockage et canaux d'irrigation convient à toutes sortes de bas-fonds, du plus petit aux plus grandes plaines, avec des crues pas trop brutales et un écoulement de base bien établi. La perméabilité des sols est cependant une contrainte à la mise en valeur agricole des bas-fonds ainsi aménagés; les zones les plus perméables doivent être exclues de l'aménagement. Ce type d'aménagement peut être sommaire ou complexe suivant le linéaire des ouvrages par hectare et demande une bonne gestion de l'eau sur l'ensemble du périmètre. Il présente l'avantage de pouvoir être intensifié progressivement en fonction de la technicité et de la demande des populations. Ce type d'aménagement n'a pas été étudié spécifiquement par la présente recherche, mais se rencontre couramment au Mali-Sud et en Guinée. Là aussi, la remontée des nappes due aux digues et canaux favorise les cultures en contre-saison.

On ne s'étendra pas sur les systèmes avec collecteur éventuel pour drainer les sols, système qui, testé à Moadougou, n'a pas fait ses preuves. De même, les systèmes avec canaux d'interception n'ont pas fonctionné.

Enfin, signalons que la solution du grand barrage de retenue pour la double culture, déjà décrite plus haut, est toujours possible dans les plaines où la pluviométrie dépasse 1000 mm/an. Elle est cependant très coûteuse et ne devrait pas être une priorité.

Tableau CXIV : Avantages et inconvénients des principaux aménagements de bas-fonds au Sud de l'isohyète 1000 mm

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Systèmes traditionnels	
*Adaptés aux conditions locales	*Rendements bas dus à de nombreux aléas
Aménagements avec collecteur central	
*Champs dans le fond de la vallée subissent des inondations moins graves	*Difficiles à gérer *Difficiles à entretenir *Perte de surface cultivable à cause du collecteur *Surdrenage pendant les périodes sèches *Augmentation du risque d'inondation vers l'aval
Aménagements avec digue déversante	
*Garantie de surface et de rendement en amont de la digue *Possibilité de culture maraîchères et fruitières sur les franges de la retenue *Entretien peu coûteux *Gestion simple	*Amélioration des conditions naturelles à l'aval de la digue *Coût élevé à l'hectare si le bas-fond a une pente supérieure à 0.1% *Besoin d'un bassin versant entre 5 et 50 km ²
Canaux d'interception	
*Étalement des crues sur toute la largeur du bas-fond *Meilleure conservation des eaux *Diminution de l'écoulement dans l'axe du bas-fond *Extension de la superficie cultivable *Rendements plus élevés	*Système inefficace les années sèches (pas d'écoulement latéral) *Conservation des eaux pendant les années humides *Entretien des canaux indispensable *Le déversement des eaux vers l'intérieur demande une gestion avancée de l'eau *Perte de superficie à cause des canaux *Risque de glissement de terre le long du canal d'interception
Diguettes selon courbes de niveau	
*Conservation des eaux dans les terrasses qui permet aux plantes de survivre pendant les périodes sèches *Plus d'eau peut être dirigée vers les bords de la vallée *Étalement des crues *Planage mécanisé ou motorisé possible	*Redistribution des terres peut être nécessaire *Entretien des diguettes indispensable *Conflit sur les niveaux des déversoirs *Planage peut exposer des sols moins fertiles *Peu efficace globalement
Diguettes d'épandage/stockage avec canaux d'irrigation	
*Meilleure utilisation de l'eau *Diminution de l'écoulement dans l'axe du bas-fond *Extension de la surface cultivable *Possibilité d'aménagement progressif *Adaptable à tous types de bassins versants	*Système plus complexe à gérer et entretenir *Demande études approfondies si le bas-fond est grand *Maladies dues à l'eau

LES AMENAGEMENTS POUR BAS-FONDS ESTUARIENS

Dans les bas-fonds estuariens, les aménagements ont d'abord pour but de protéger les rizières contre la salinisation. Traditionnellement, les paysans construisaient des petites diguettes isolant les rizières des eaux marines. La pluie, combinée avec les ruissellements, suffisait à dessaler le sol et à permettre le repiquage du riz sur billons.

Tous les systèmes impliquant une irrigation intensive avec drainage ont été des échecs: dès que le sol est exondé, l'acidité se développe, engendrant des éléments toxiques (aluminium, fer) qui provoquent un déséquilibre dans l'alimentation minérale du riz.

L'aménagement type qui s'est montré performant consiste à construire une digue entre la rizière et la mer, résistant aux plus hautes marées. Un ouvrage bétonné, muni d'un dispositif d'ouverture de fond (vanne) permet le stockage des eaux de ruissellement et l'évacuation des eaux lessivant les sols salés au début de la saison des pluies (figures 72 & 73 p 199). Les règles de gestion de l'ouvrage sont simples:

- On limite la hauteur maximale de l'eau dans la rizière à moins de 50 cm, compatible avec le riz rustique.
- Les ruissellements remplissent la plaine en début de saison des pluies.
- Dès que le niveau dans la plaine atteint la cote maximale on ouvre les vannes de l'ouvrage au moment des marées basses. Pour être sûr que l'écoulement a bien lieu de la plaine vers la mer, on fait en sorte de n'ouvrir les vannes que lorsque le niveau de la mer est d'au moins 3 cm inférieur à celui dans la plaine. On arrête la vidange si le niveau a baissé de 5 cm dans la plaine.
- A partir d'août, les sols sont suffisamment dessalés pour permettre le repiquage du riz. Celui-ci est ensuite récolté dans l'eau en fin de saison des pluies.

Les principaux points sur lesquels il faut porter attention sont:

- La dimension des pertuis vannés qui doit être suffisamment grande pour évacuer rapidement les eaux excédentaires des crues (même si celles-ci sont très amorties en raison du peu de relief et de la largeur des bas-fonds). Une ouverture de 1.5 m² pour 10 km² de bassin versant semble un bon compromis.
- La gestion minutieuse et quasi-permanente de l'ouvrage durant la saison des pluies pour à la fois dessaler les sols et maintenir un niveau d'eau suffisant dans la rizière afin d'obtenir un bon rendement en riz. Cette gestion ne nécessite pas de connaissance technique mais impose une surveillance permanente; elle entraîne parfois des litiges entre cultivateurs des zones basses salées qui ont besoin de multiplier les lâchers et ceux des rizières d'eau douce qui peuvent avoir intérêt à retenir l'eau pour les périodes de sécheresse. Si on dispose de suffisamment d'eau de ruissellement, il est préférable de réaliser un aménagement de bas-fond salé tel que décrit précédemment, et un aménagement de régulation en amont en vue d'améliorer également la riziculture sur les terres hautes peu salées.
- La résistance aux eaux salées, du béton et des vannes des ouvrages. De grands progrès restent à faire dans ce domaine (aujourd'hui les enduits sont à reprendre tous les 5 ans).

Conclusion

Au terme de ce programme de recherche pour la mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest, financé par la CCE, il est possible de mieux connaître les atouts offerts par cette facette du paysage africain auquel on attribue à juste raison de riches potentialités. Il est aussi possible d'évaluer les contraintes au développement agricole des bas-fonds imposées par une nature aux caprices de laquelle l'homme doit s'adapter pour conquérir ses faveurs, endiguer ses fureurs et tirer le meilleur profit des ressources qu'elle distribue parfois avec parcimonie, parfois avec trop de générosité. Pour lever les contraintes au développement agricole des bas-fonds en Afrique de l'Ouest, plusieurs solutions sont proposées dans cet ouvrage, quelques unes ont été mises à l'épreuve par des chercheurs européens et africains qui se sont directement impliqués dans les travaux de mise en valeur agricole et de développement.

Les essais menés avec le barrage demi-souterrain dans le Sud du Mali et avec le barrage anti-sel en Casamance ont donné d'excellents résultats. Les essais menés au Yatenga, avec la digue filtrante et le micro-barrage, ont donné des résultats probants pour la recharge des nappes aquifères, plus ambigus sur la mise en valeur agricole des bas-fonds. L'évaluation menée sur les aménagements des plaines de Moadougou et de Kawara, dans la Comoé au sud du Burkina Faso, a donné elle aussi des résultats ambigus qui sont cependant intéressants à connaître et peuvent servir à guider les choix en matière d'aménagement hydro-agricole.

L'intérêt de cet ouvrage est de fournir, avec les études techniques nécessaires à la définition des projets d'aménagement, le point de vue des paysans africains et une identification imparfaite mais précieuse des problèmes auxquels ils sont confrontés. Les actions de développement s'adressent en effet à des individus qui se définissent par des contraintes ou des intérêts différents par rapport à l'aménagement. L'aménagement modèle à son tour de nouveaux réseaux de relations et d'influences, génère de nouvelles contraintes, mais ouvre aussi de nouveaux axes de négociation et d'entente qui se traduisent en Afrique de l'Ouest par une forte mobilité foncière même après une attribution nominative du parcellaire. L'aménagement hydro-agricole d'un bas-fond reste donc une aventure humaine dont le succès dépend du soin accordé à sa préparation et à sa réalisation, mais aussi des efforts quotidiens des paysans qui doivent pouvoir tirer profit de leur travail.

DE L'ANALYSE DES MILIEUX

Dans ce programme de recherche, chaque projet pilote a été une étude de cas sur lequel des équipes pluridisciplinaires ont cherché à établir des liaisons entre les variables descriptives des milieux et leur fonctionnement. La collaboration entre les différentes équipes s'est intensifiée avec la convergence des approches expérimentales, malgré les grandes différences des milieux étudiés. La coordination scientifique a encouragé l'utilisation de méthodologies communes pour l'inventaire des données des milieux naturel et humain comme pour l'analyse de leur fonctionnement. Elle a encouragé localement le développement d'actions spécifiques ou complémentaires. C'est ainsi que les rédacteurs de cette synthèse ont pu disposer d'un référentiel homogène de données de base et d'études spécialisées dans les trois domaines d'investigation suivants:

- les caractérisations physiographique, morpho-pédologique et topographique des bas-fonds et bassins versants en liaison avec les potentialités hydriques et agricoles des sols,
- l'estimation de la ressource en eau par le suivi des paramètres hydro-climatiques et l'analyse des impacts des aménagements sur la mise en valeur agricole,
- l'analyse des systèmes de production, des pratiques culturales et des contraintes sociales et économiques à la valorisation des bas-fonds.

DE LA TYPOLOGIE HYDRO-AGRICOLE DES BAS-FONDS

L'analyse des milieux naturels et humains a permis d'établir une typologie des bas-fonds en Afrique de l'Ouest dans une zone comprise entre les latitudes 15° Nord et 10° Nord, de l'océan Atlantique jusqu'au méridien de longitude 10° Est. Le croisement des données du référentiel d'études communes et la prise en compte des résultats des recherches plus spécifiques ont conduit à :

- la régionalisation des variables du fonctionnement hydrologique à partir des éléments descriptifs du milieu naturel,
- la prédétermination des crues de fréquence rare pour la protection des aménagements, la prédétermination de la ressource en eau pour simuler la valorisation agricole des bas-fonds,
- l'élaboration d'un outil basé sur la télédétection et adapté à la caractérisation des zones humides,
- l'analyse des impacts des aménagements tant sur les ressources naturelles que sur les avantages que peuvent en tirer les sociétés paysannes.

Une classification des aménagements hydrauliques, basée sur le niveau de la maîtrise des ressources en eau, décrit les ouvrages, leurs avantages et leurs inconvénients quant à leur utilisation pour sécuriser la production agricole. Le coût élevé des aménagements permettant une maîtrise totale de l'eau et la faible technicité hydraulique des paysans africains conduisent maints organismes de développement à préconiser des aménagements plus réduits et d'autant plus proches des pratiques agro-pastorales traditionnelles que les conditions sociales et économiques d'un changement dans la gestion de l'espace et des ressources ne sont pas réunies. La faible technicité hydraulique des paysans ouest-africains est confirmée par les observations effectuées sur les sites des cinq projets pilotes. Elle est compensée, dans la mise en valeur agricole traditionnelle des bas-fonds, par leur grande habileté à gérer les risques afin de minimiser les pertes occasionnées par les périodes de sécheresse et par les crues. Si les aménagements à maîtrise partielle de l'eau permettent tous une extension des cultures, ils augmentent faiblement le taux de sécurité de la production agricole et seuls les mieux conçus et les mieux gérés semblent capables de promouvoir l'intensification des cultures de bas-fonds.

La régionalisation des paramètres essentiels à la mise en valeur des bas-fonds montre que le maillage constitué par les cinq projets pilotes a permis une progression significative des connaissances des contraintes et des atouts des milieux naturels et humains. Les recherches ont conduit à la mise au point de nombreux outils de diagnostic et d'aide à la décision en matière de mise en valeur des bas-fonds. Leur transfert vers des organismes de développement a été assuré par le dialogue permanent entre chercheurs et décideurs lors des travaux sur le terrain ou à l'occasion de séminaires.

LA NECESSAIRE EXTENSION GEOGRAPHIQUE DU PROGRAMME

Confronté aux caractères régionaux de la zone étudiée, le maillage retenu pour ce programme de recherche montre des lacunes qui devraient être comblées par l'ouverture de nouveaux sites pilotes utilisant les mêmes méthodes de caractérisation et les mêmes outils de diagnostic et d'analyse.

Dans les régions humides de l'Ouest africain, entre 1000 et 1400 mm de pluie annuelle, les bas-fonds sur socle granito-gneissique ont été bien étudiés dans les projets Mali-Sud et Comoé avec un ensemble d'unités différentes par leur superficie, leur fonctionnement hydrologique, le type d'aménagements réalisés et le niveau d'encadrement des communautés rurales. Les bas-fonds sur formation sédimentaire gréseuse de l'antécambrien et les bas-fonds d'altitude, dans les reliefs guinéens, ont un mode de fonctionnement différent et nécessitent des études du même style.

Au Nord de l'isohyète 1000 mm, le maillage des projets pilotes mériterait d'être complété par des études de cas dans des climats plus arides où les bas-fonds ressemblent à des oasis et dans des domaines géologiques et pédologiques particuliers : vallées sèches des Dallols du Nord Niger, bas-fonds des mares sahéennes du Gourma et de l'Oudalan aux dimensions plus réduites que celles de la mare d'Oursi pour laquelle une étude très complète vient d'être publiée (CLAUDE, GROUZIS & MILLEVILLE, 1991).

D'autres cas plus spécifiques, mais dont l'intérêt économique est important, devrait faire l'objet d'une étude similaire : les bas-fonds liés aux affluents-défluent des grands fleuves sahéens comme le Sénégal ou le Niger, les bas-fonds insulaires des archipels du Cap-Vert, du Saloum ou des Bijagos, enfin les bas-fonds tourbeux interdunaires de la presqu'île du Cap-Vert, primordiaux dans l'économie agricole de l'agglomération dakaroise. La mise en valeur agricole des bas-fonds urbains et péri-urbains est un sujet de recherche original qui mériterait d'être développé. Sur le plan de la ressource naturelle s'y posent les problèmes de qualité des eaux avec une acuité toute particulière. L'occupation des sols de bas-fonds y est l'enjeu d'une concurrence entre l'habitat et l'agriculture. La présence de marchés importants pour des productions diversifiées (fruits, légumes, volailles, fleurs) modifie sensiblement les possibilités d'aménagement. Ces bas-fonds péri-urbains pourraient servir de laboratoire d'études sur les conditions d'intensification et de diversification des productions.

VERS L'INTENSIFICATION ET LA DIVERSIFICATION DES CULTURES DE BAS-FONDS

Cette synthèse a montré que la rentabilisation des aménagements nécessite à la fois une intensification et une diversification des productions de bas-fond. De nombreux bas-fonds ont été aménagés au cours des dernières décennies. Les décisions, plus politiques que techniques, ne se sont pas accompagnées d'une intensification des cultures qui nécessite des techniques culturales appropriées, vulgarisées par un encadrement efficace, et des conditions économiques favorables à la valorisation des productions. Actuellement, plus de la moitié des aménagements visités par les différentes équipes sont abandonnés ou revenus à une culture extensive.

Par ailleurs, la riziculture apparaît contraignante pour les agriculteurs africains. Elle est délaissée par les paysans soit en raison de la baisse du régime pluviométrique, soit en raison de la faible productivité du travail dans les rizières, même si les paysans disposent d'attelages ou de moyens de petite mécanisation. La concurrence du riz provenant des grands périmètres irrigués et du riz d'importation, dont le prix est très bas sur les marchés internationaux, est un handicap à l'intensification de cette culture. Lorsque les conditions topographiques et les ressources hydriques le permettent, les paysans africains préfèrent développer dans les bas-fonds des cultures commerciales à haut rendement en saison sèche : culture de tubercules et maraîchage. L'arboriculture fruitière, bananerales et manguerales, et le petit élevage, porcs et volailles, tendent également à se développer à proximité des bas-fonds.

Ce programme de recherche a identifié les contraintes et les risques liés à l'intensification des productions de bas-fonds. Les risques engendrés par le fonctionnement hydrologique du bassin versant ou par le fonctionnement hydrique des sols de bas-fonds peuvent être atténués par la réalisation d'aménagements, l'adoption d'itinéraires techniques appropriés et une gestion rationnelle de l'eau. Les contraintes de nature sociale et économique ont été identifiées et caractérisées. Les moyens pour les lever doivent être étudiés si l'on veut obtenir un développement harmonieux des sociétés rurales.

Les recherches menées devraient se poursuivre essentiellement dans deux voies. La première serait la mise en route de projets pilotes à identifier dans les régions pour lesquelles la typologie a montré un manque d'informations. Ces nouveaux projets pilotes bénéficieraient de l'expérience acquise et complèteraient le maillage de base de ce programme. La seconde voie de recherche s'attacherait à trouver des solutions pour lever les contraintes liées aux différentes utilisations des terres de bas-fonds, afin d'introduire une intensification agricole, seule susceptible à long terme d'assurer l'autosuffisance alimentaire des populations ouest-africaines. Dans les terroirs villageois, les bas-fonds constituent des lieux privilégiés pour l'innovation technique, et, bien que souvent marginaux dans les systèmes de production, ils peuvent devenir le moteur d'une révolution verte.

En Afrique intertropicale, les bas-fonds, "marigots" dans le Sahel francophone, "bolon" dans les mangroves de la façade atlantique, "fadama" au Nigéria, "mbuya" en Tanzanie, "dambo" en Afrique centrale et orientale, "matoro" au Zimbabwe, "boli" au Sierra Leone... occupent une superficie de 1.3 million de km² et connaissent déjà un essor agricole important. La stratégie paysanne de mise en culture extensive des terres hautes atteint une limite avec la dégradation physique et chimique des sols tropicaux consécutive à l'accroissement démographique des populations et à la péjoration climatique des vingt dernières années. L'aménagement des bas-fonds, terroirs encore peu touchés par cette dégradation apparaît comme l'un des moyens de créer des noyaux d'agriculture intensive. Les techniques d'intensification agricole pourraient diffuser des bas-fonds vers les versants avec la nécessité d'une conservation des sols et des eaux sur l'ensemble des terres cultivées. Connaître ces milieux et leurs potentialités, comprendre les logiques sociales et économiques qui président à leur mise en valeur, faire en sorte que le développement soit durable en protégeant l'environnement font partie des missions de la recherche africaine pour le XXI^{ème} siècle.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AFVP (1987). Programme de micro-réalisation, région de Kadiolo. Rapport technique de l'aménagement du bas-fond de Kambo. CEE CIRAD n°TS2A0017FCD. IER, CIRAD, ORSTOM R3S.
- AGNAME P. (1991). Diagnostic des désordres survenus aux barrages de Gourga et Amene, proposition de travaux de restauration. Mémoire de fin d'étude. E.I.E.R. 42p.
- AGRHYMET (1990). Cartes de l'ETP Penman mensuelle en Afrique de l'Ouest sur la période 1951-1986, AGRHYMET, Niamey
- AHMADIN., DEMAY G., TRAORE B., HUSSON O. (1991). Projet riz inondé IER/IRAT. Rapport analytique, hivernage 1990. Agronomie, système IER Mali. IRAT. 80p.
- ALBERGEL J. (1986). Evolution de la pluviométrie en Afrique soudano-sahélienne. Exemple du Burkina Faso, Col. international sur la révision des normes hydrologiques suite aux incidences de la sécheresse, CIEH, Ouagadougou, 17 p.
- ALBERGEL J. (1987). Genèse et prédétermination des crues au BURKINA FASO. Du m2 au km2, étude des paramètres hydrologiques et de leur évolution. Thèse de Doctorat es sciences de l'université PARIS VI, Col Etudes et Thèses de l'ORSTOM 336 p.
- ALBERGEL J. (1987). Expertise hydrologique sur 11 sites de basse et moyenne Casamance. ORSTOM/ Dakar, 24 p, in Southern Zone Water Management Project, USAID, 1988, Annex G. 1D.
- ALBERGEL J. (1988). Fonctionnement hydrologique des bas-fonds. Synthèse préliminaire. CEE / ORSTOM / ISRA / CIRAD / R3S, Dakar 27 p, in ZEPPENFELD & VLAAR, 1990 Mise en Valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest, Annexe 1.
- ALBERGEL J. (1988). Mission d'appui en hydrologie auprès du BSD Conakry du 20/01/88 au 3/02/88, 27 p.

ALBERGEL J., (1990). Une méthode "expert" pour la conception des barrages "anti-sel" dans des bas-fonds de basse et moyenne Casamance. Séminaire "Conservation et utilisation durable des ressources naturelles du bassin hydrographique de la Casamance", 22-26 Octobre 1990, Ziguinchor (Sénégal), 13 p.

ALBERGEL J. (1992). Programme bas-fond : Technologies appropriées pour un développement durable en zone semi-aride de l'Ouest Africain. Exemple du barrage souterrain de KAMBO au MALI. Séminaire de l'ICID International variation and sustainable development in semi-arid regions. Fortaleza, 27 janvier - 1er Février 1992.

ALBERGEL J., BERNARD A., BRUNET D., MONTOROI J.P. (1991). Projet pilote "Casamance". Bas-fond de Djigoum. Rapport de synthèse: morpho-pédologie. Multigr., ORSTOM/ISRA/R3S/IRAT, 27 p.

ALBERGEL J., BERNARD A., DACOSTA H., DUBEE G., PEPIN Y., SAOS J.L. (1991). Projet Pilote "Siné Saloum" Bas-fond de Thyse-Kaymor. Rapport de synthèse : Hydrologie-Hydrogéologie multigr., ORSTOM/ISRA/R3S/IRAT, 32 p.

ALBERGEL J., BERNARD A., DACOSTA H., PEREZ P., VALENTIN C. (1991). Projet pilote "Siné-Saloum". Bas-fond de Thyse Kaymor. Rapport de synthèse. Volet Morpho-pédologie. Programme CEE/CIRAD No TS2A 0017 F CD, ORSTOM Dakar.

ALBERGEL J., BERNARD A., RUELLE P., TOUMA J. (1989). Hydrodynamique des sols. Bassins versants expérimentaux de Thyse-Kaymor. Rapport de campagne des mesures février-avril 1988, Dakar.

ALBERGEL J., BRUNET D., DUBEE G., DUPREY J.L., MARIEU B., MONTOROI J.P., ZANTE P., (1990). Rapport hydrologique 1989. Vallée de Djigoum (Casamance). Multigr., ORSTOM/Dakar, 73 p.

ALBERGEL J., BRUNET D., DUBEE G., MARIEU B., MONTOROI J.P., PEPIN Y., ZANTE P. (1991). Projet pilote "Casamance". Bas-fond de Djigoum. Rapport de synthèse: hydrologie-hydrogéologie. Multigr., ORSTOM/ISRA/R3S/IRAT, 42 p.

ALBERGEL J., BRUNET D., DUBEE G., MONTOROI J.P., ZANTE P., (1991). Gestion d'un barrage anti-sel en basse Casamance (Sénégal). In A. KERGREIS et J. CLAUDE (réd.), "Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride", Ed. AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext, Paris, pp. 275-285.

ALBERGEL J., CLAUDE J. (1988). Fonctionnement hydrologique des bas-fonds en Afrique de l'Ouest, in Pr. of the Sahel Forum on The state-of-the-art of hydrology and hydrogeology in the arid and semi-arid areas of Africa. Unesco, ed. Misganaw Demissie and Glenn E. Stout : Int. Water. Res. As. Urbana, Illinois pp. 212-223.

ALBERGEL J., DIATTA M., JUNCKER E., PEREZ P., RUELLE P., SENE M. (1990). Méthodes pour améliorer l'infiltration et réduire le ruissellement. Présentation du cas du Siné Saloum . Réseau érosion, bulletin n°10., journées érosion de Montpellier 1989.

ALBERGEL J. & PEPIN Y. (1990). Etude d'évaluation et d'inventaire des ressources en eau de la Guinée Bissau, rapport de synthèse, Projet GBS/87/002, PNUD, DAKAR. 132p.

ALBERGEL J. & PEPIN Y. (1991). Etude des ressources en eau des îles du CAP VERT, Projet CVI/87/001/90, ORSTOM, PNUD, DAKAR.

ALBERGEL J. & PEREZ P. (1991). Fonctionnement hydrologique et problèmes d'aménagement des bas-fonds des formations sédimentaires du Continental terminal. Exemple du bassin arachidier du Sénégal. Com. Séminaire int. Bas-fonds et riziculture, Madagascar 1991, 12 p.

AUBREVILLE, (1949). Climats, forêts et désertification de l'Afrique tropicale. Soc. ed. géogr. mar. et col., Paris. 351p+figures et tableaux.

AUTISSIER V., MONIN L. (1987). Place et rôle du maraîchage dans les exploitations agricoles du Yatenga. Etude de cas. Rapport de stage. 250p+annexes.

BARRY B., BOIVIN P., BRUNET D., MONTOROI J.P., MOUGENOT B., TOUMA J., ZANTE P. (1989). Evolution des stratégies d'aménagement hydro-agricole des sols salés en basse Casamance. in actes des deuxièmes journées de l'eau au Sénégal, UCAD, Dakar. pp 104-117.

BERNARD A. (1991). Construction d'un simulateur de la seconde génération pour l'ISRA.

BERTON S. (1988). La maîtrise des crues dans les bas-fonds, petits et micro-barrages en Afrique de l'Ouest, dossier n°12. GRET. 474p.

BIDJOCKA J.P. (1990). Etude hydro-dynamique de la nappe aquifère du bas-fond de Gourga-Bidi, Yatenga. Mémoire de fin d'études E.I.E.R. 40p+figures.

BLANCHET F. (1992). Etude hydrologique et agronomique d'un bas-fond de la région de Sikasso. CNEARC - ETARC - CIRAD - CA.

BOIVIN P. (1991). Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (basse Casamance, Sénégal), Etudes de la variabilité spatiale et relation avec les caractéristiques pédologiques. Thèse ENSA de Paris Grignon. ORSTOM, collection Etudes et Thèses. 226p.

BOIVIN P., BRUNET D. (1990). Bilan de quatre années de suivi de la salure d'une vallée aménagée anti-sel par conductivimétrie électromagnétique et krigeage. Multigr. ORSTOM/Dakar/Bondy, 12p.

BOULET R., FAUCK R., KALOGA B., LEPRUN J.C., RIGUIER J., VIEILLEFON (1971). Atlas International de l'Ouest africain, Planche 9, pédologie. 1 carte au 1/500000 avec notice explicative. 23p.

BRASSER M, VLAAR J.C.J. (1990). Aménagement de conservation des eaux et des sols par digues filtrantes: expérimentations dans la région de Rissiam, Burkina Faso (1986-1989). Tome 1 CIEH/AFVP/UAW, Ouagadougou.

BRASSER M, VLAAR J.C.J. (1990). Aménagement de conservation des eaux et des sols par digues filtrantes: aspects socio-économiques. Tome 2: aspects socio-économiques CIEH/AFVP/UAW, Ouagadougou.

BRUNET D. (1990). Principales caractéristiques des eaux des nappes de la vallée de Djiguinoum (Basse Casamance). Bilan d'une année de suivi d'un réseau piézométrique (juin 1988 à juin 1989), multigr. ORSTOM/Dakar, 40 p.

BRUNET D., DOBOS A., FALL M., MONTOROI J.P., ZANTE P. (1991). Projet pilote "Casamance". Bas-fond de Djiguinoum. Rapport de synthèse : agronomie. Multigr., ORSTOM/ISRA/R3S/IRAT. 20p.

BRUNET-MORET, Y (1963). Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale; République de Haute Volta. ORSTOM PARIS 23 p.

BRUNET-MORET, Y (1963). Etude générale des averses exceptionnelles en Afrique occidentale; République du MALI. ORSTOM PARIS 23 p.

BRUNET-MORET, Y (1970). Etudes hydrologiques en Casamance, rapport définitif. 52p + figures & tableaux.

BUNASOLS (1990). Manuel pour l'évaluation des terres. Documentation technique n°6. 181p.

CARBONNEL J.P., HUBERT P. (1985). Sur la sécheresse au Sahel d'Afrique de l'Ouest. Une rupture climatique dans les séries pluviométriques du Burkina-Faso (ex Haute Volta) C.R. Acad. des Sciences tome 301 n°13 pp 941-944.

CARLIER P., FAVIN H., LEGER C. (1992). Etude de la recharge naturelle et artificielle des nappes du bas-fond de la région de Bidi, Yatenga, Burkina Faso. Rapport provisoire. BRGM-R34447-EAU-45-92.66p+annexes.

CASENAVE A et VALENTIN C. (1989). Les états de surface de la zone sahélienne. Ed. de l'ORSTOM, collection didactiques 227p.

CHEVALIER, (1938). Flore vivante de l'Afrique occidentale française. Muséum natio. hist. natur., Paris. 360p+fig+carte.

CHEVALLIER P. (1983). L'indice des précipitations antérieures, Evaluation de l'humectation des sols de bassins versants représentatifs. Cah ORSTOM, ser. Hydrologie, Vol XX n°3,4 pp 179-190.

CIEH (1974). Les aménagements de bas-fonds en Haute Volta. Bul. de liaison du CIEH, n° 18, Sept. 1974.

CIEH (1985). Etudes des pluies journalières de fréquence rare dans les états membres du CIEH. Rapport de synthèse. CIEH, Ouagadougou.

CIEH (1992). Programme de recherche en vue de la mise en valeur des bas-fonds au sahel. Projet pilote Comoé- volets morpho-pédologie, hydrologie et hydrogéologie.47p.

CLAUDE J., GROUZIS M., MILLEVILLE P. (1991). Un espace sahélien. La mare d'Oursi. Burkina-Faso. Ed. de l'ORSTOM. 241 p.

CLAUDE J., GUALDE R. (1980). Ecoulements de la Léraba Orientale dans la plaine de Douna-Goindougouba. ORSTOM, Ouagadougou.56p.

COULIBALY A. (1992). La réalimentation de la nappe aquifère du bas-fond de Gourga-Bidi, Yatenga. Mémoire de fin d'études d'ingénieur des sciences et techniques de l'eau. Université de Ouagadougou, Fa. S.T. 44p + annexes.

COURELM.F. (1984). Etude de l'évolution récente des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par les satellites. Thèse de doctorat d'état es lettres et sciences humaines. Université de Paris I, 407p.

DACOSTA H. (1989). Précipitations et écoulement sur le bassin de la Casamance. Thèse UCAD.

DACOSTA H. (1992). Economie de l'eau-DRS sur les bassins versants de Thyse Kaymor. Synthèse hydrologique 1983-1988, mult. ORSTOM, Dakar.

DUBREUIL, P. (1972). Recueil des données de base des bassins représentatifs et expérimentaux. Années 1951 - 1969. ORSTOM PARIS. 916 P.

DUBREUIL P. VUILLAUME G. (1975). Influence du milieu physico-climatique sur l'écoulement des petits bassins intertropicaux Symposium AISH Tokyo, Dec. 75, in Les caractéristiques des bassins fluviaux, publication AISH N° 117.

DUBREUIL P. & BRUNET MORETY. (1960). Aménagement de la plaine de Loulouni (Région de Sikasso). Etude Hydrologique du Kobafini. ORSTOM, Ministère de l'Agriculture, Service du Génie Rural.

EDIJATNO, MICHEL C. (1989). Un modèle pluie débit à trois paramètres. Houille blanche N°2, 1989, pp. 114-121.

ETTEN J. van (1992). Le changement du régime foncier par l'influence d'un aménagement dans la plaine de Kawara, Burkina Faso. CIEH/UAW, Ouagadougou.

- FABRE J. (1971). (Esquisse géologique de l'Afrique de l'Ouest).
- FABRE J. (1983). (Editeur). Afrique de l'Ouest. Introduction géologique et termes stratigraphiques. Lexique stratigraphique international. Nlle série 1. Pergamon Press.
- FAO (1977). Directive pour la classification des sols. 2ème édition.
- FARATS A. (1991). Place du riz dans les dynamiques de production et de commercialisation agricoles des cercles de Sikasso et Kadiolo, (Mali sud). CNEARC-ESAT/IRAT.
- FARINET J.L., PEREZ P., RUELLE P. (1991). Projet pilote "Siné-Saloum". Bas-fond de Thysses Kaymor. Rapport de synthèse. Volet Aménagement et Génie Rural. Programme CEE / CIRAD No TS2A 0017 F CD. ORSTOM Dakar.
- FOKKER R., WILLE M. (1988). La gestion de l'eau et l'exploitation des plaines rizicoles de Kawara et de Moadougou ; les conséquences d'une intervention pour les exploitantes. CIEH/UAW, Banfora. 102p.
- FOREST F. (1984). Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales, présentation et utilisation du logiciel BIP-IRAT-DEVE.
- FOREST F., REYNIERS F.N. (1985). Propositions en terme de bilan hydrique de situations agro-climatiques de riziculture pluviale. Communication à la conférence internationale de Djakarta, mars 1985. 17p.
- GADELLE F. (1989). Développement de la riziculture en haute Guinée. CEMAGREF. 82p+47p+33p.
- GALLAIRE R. (1980). Etude hydrologique du marigot de Baïla. Multigr ORSTOM, Dakar 104p.
- GIRARD G. (1982). Modélisation des écoulements de surface sur des bassins hydrologiques équipés de réservoirs - modèle MODLAC. Cah. ORSTOM, série Hydro., vol. XIX n°2, 1982, pp55-72.
- GIRARD M.C. & GIRARD C.M. (1989). Télédétection appliquée, zones tempérées et inter-tropicales. Ed. Masson.
- GUIGUEN N. (1991). Bassin versant de Kambo. Région de Kadiolo au Mali. Rapport de campagne 1990. Synthèse des observations 1988-1989-1990. ORSTOM / IER / CIRAD Bamako, 72 p. + annexes.
- HEBIE S. (1986). Rapport d'évaluation du projet 400-033-30-23 "développement de la riziculture dans l'ORD de la Comoé". Ministère de l'agriculture et de l'élevage, Banfora.
- HUSSON O. (1990). Mise en valeur des bas-fonds et plaines inondables, le projet riz inondé IER/IRAT Sikasso. Volet agronomie CNEARC/ESAT-IRAT 49p.
- ILACO (1967). Aménagements hydro-agricoles en Casamance. Rapport de gestion des castiers pilotes de Médina et Diéba, juillet 1965-juillet 1967. Ministère de l'économie rurale, Sénégal. 126p.
- IWACO & CIEH (1990). Etude des nappes du Yatenga pour la direction de la DEP du Ministère de l'Eau du Burkina Faso.
- JAEGER, (1968). Divisions phyto-écologiques de la zone soudanienne.
- JOFFRE G. (1990). Etude du stockage-déstockage d'un petit barrage. Réalisation d'un programme informatique. Rapport de stage de 2ème année de E.N.S.H.M.G (Grenoble). 69p.

JOLLY C.M., KAMUANGA M., SALL S., POSNER J.L. (1985). Situation céréalière en milieu paysan en basse Casamance: résultats d'une enquête de terrain. Multigr. ISRA/Djibelor.36p.

KILLIAN J. & TEISSIER J. (1973). Méthode d'investigation pour l'analyse et le classement des bas-fonds dans quelques régions de l'Afrique de l'Ouest. Proposition de classification d'aptitude des terres à la riziculture. Agro. Trop. pp 156-172.

KRIER D. (1991). Le fonctionnement hydraulique des bas-fonds au Mali (région Sud). Ministère de la Coopération, IRAT, IER, R3S.20p.

KRIER D., SIMPARA M. (1990). Résumé des résultats obtenus sur le fonctionnement hydrique des bas-fonds au Mali. IER/CIRAD, Bamako.

LAMACHERE J.M. (1987). Développement de la riziculture dans l'ORD de la Comoé, phase II, étude hydrologique. Burkina Faso, ORSTOM Ouagadougou.

LAMACHERE J.M. (1991). Aptitude au ruissellement et à l'infiltration d'un sol sableux fin après sarclage. Soil Water balance in the Sudano-Sahelian Zone. Proceedings of Niamey Workshop, February 1991. IAHS publ. n°199, pp109-119.

LAMACHERE J.M. (1992). Les états de surface des bassins de Thyssé-Kaymor, Siné-Saloum, Sénégal. Programme FAO/CIEH/ORSTOM/CEMAGREF pour la détermination des apports et des crues des pays bassins versants d'Afrique de l'Ouest.

LAMACHERE J.M., MAIZI P., SERPANTIE G., ZOMBRE P. (1991). Un petit bas-fond en zone tropicale sèche. Fonctionnement et aménagement (Bidi, Yatenga, Burkina Faso). Séminaire international Tananarive, 9-14 Décembre 1991, Bas-fond et Riziculture.24p.

LAMACHERE, J.M., SERPANTIE, G. (1991). Riziculture, hydrologie et aménagement d'un petit bas-fond sahélien en zone tropicale sèche (Burkina Faso, Yatenga, Région de Bidi). Séminaire international Bas-fond et riziculture.

LAMAGAT J.P. (1979). Région de Sikasso, Le Kobafini à Loulouni, débits journaliers, apports annuels, crue de projet, ORSTOM Bamako.

LAMAGAT J.P. (1980). Région Sud du Mali. Bilan des observations hydrologiques, débits spécifiques décennaux, le Dian à Lobouala, ORSTOM Bamako.

LAMAGAT J.P., LOYER J.Y. (1980). Aménagements des petits bas-fonds de Casamance. in Actes de la IIème Table ronde sur les barrages anti-sel, 12-15 juin, Ziguinchor.

LAMAGAT J.P., MONTOROI J.P., PERAUDEAU M., (1989). Traitement informatique des données limnimétriques et conductivimétriques d'une centrale «CHLOE» (ORSTOM-ELSYDE) à deux sondes SPI. Programme CHLODAK pour micro-ordinateur. Notice d'utilisation. Multigr., 16 p + annexes.

LE PLAIDEUR A., (1991). L'enjeu socio-économique de la dynamique rizicole des bas-fonds en Afrique de l'Ouest. Communication au séminaire international "bas-fond et riziculture", Madagascar, 9-14 déce. 1991.

LE PRIOLLE (1983). Synthèse hydro-géologique de la basse Casamance. Ministère de l'hydraulique, Dakar.

LEROUX M. (1983). Le Climat de l'Afrique Tropicale. Ed. Champion, PARIS, 633 p.

LIDON B. & SIMPARA M. (1987). Projet "Eau-Sol-Plante". Mise en valeur des bas-fonds, résultats de la campagne 1986-1987 et propositions de programme 1988. SRCVO / IER / Bamako, 40p.

LIDON B., SIMPARA M., COURTESSOLE P. (1989). Rapport de Campagne de mesures et d'expérimentations 1987-1988. Volet "Mise en valeur des bas-fonds". Projet Eau-Sol-Plante, IER/SRCVO.47p.

LIDON B., SIMPARA M., COURTESSOLE P. (1989). Rapport de Campagne de mesures et d'expérimentations 1988-1989. Volet "Mise en valeur des bas-fonds". Projet Eau-Sol-Plante, IER/SRCVO 1989.

MAIZI P. (1991). Etude sociologique d'un aménagement hydro-agricole à Gourga, Bidi, Nord Yatenga. ORSTOM Ouagadougou.48p.

MALOU R. (1992). Etude des aquifères superficiels en basse Casamance: bilan hydrique. Thèse UCAD, Dakar/ORSTOM.116p.

MARIEU B., DUBEE G., PEPIN Y. (1991). Bassin versant de la vallée «Le Brusq». Résultats de la campagne hydrologique 1990. Multigr., ORSTOM/Dakar.

MARIUS C. (1980). Les mangroves du Sénégal: écologie, pédologie et utilisation. Ed. ORSTOM, série travaux et documents n°193.

MOKADEM A.I., NONGUIERMA A. DAUTREBANDE S.(1991). L'imagerie satellitaire pour l'étude des bas-fonds en Afrique de l'Ouest. Sécheresse, n°3 vol. 2 Sept 1991, UREF, AUPELF, John Libbey Eurotext pp 195-198.

MOKADEM A.I., NONGUIERMA A. (1991). Critères d'utilisation de la télédétection pour la typologie des bas-fonds au Sahel. Rapport scientifique final, sous la direction du Pr. S. Dautrebande. Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux.150p+annexes.

MOKADEM A.I., NONGUIERMA A., (1992). Critères d'utilisation de la télédétection pour la typologie des bas-fonds du Sahel. Rapport de synthèse.

MONTOROI J.P., (1991). Programme MRES n°121: «Réhabilitation des sols salés et acides de basse Casamance». Rapport final. Multigr., 16 p. et annexes.

MUSY A., SOUTTER M. (1991). Physique des sols - 6. Collection gérer l'environnement. Presses polytechniques et universitaires romandes. Lausanne, suisse.331p.

NASH J.E., SUTCLIFFE J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models, 1 , A discussion of principles, J. Hydrol., 10 pp 282-290.

NJISSEN O. (1989). La riziculture féminine de bas-fond dans la région de Sikasso. IER/DRSPR.13p.

NUGTEREN H. (1991). Les systèmes de production à Konadougou et Damana, Burkina Faso : agriculture pluviale et riziculture de bas-fond. CIEH/UAW, Wageningen.

OLIVRY J.C. & CHOURET A. (1981). Etude hydrologique du marigot de Bignona, quelques aspects intéressants des mesures réalisées en 1970-1971.93p.

OLIVRY J.C., DACOSTA H. (1984). Le marigot de Baïla, bilan des apports hydriques et évolution de la salinité, campagnes 1980-1983.145p.

OOSTERBAAN R.J., GUNNEWEG H.A., HUIZING A. (1987). Water control for rice cultivation in small valleys of West-Africa. annual report, 1986. IIRI star in 31/102.

OUEDRAOGO E. (1990). Etude socio-économique concernant les exploitants touchés par le projet "Opération Riz Comoé". SNV, Ouagadougou.

OUEDRAOGO M. (1990). La dynamique des pouvoirs locaux au Yatenga (Burkina faso). Formation et évolution à Améné. Mémoire de maîtrise en sociologie et développement. Université de Provence. Aix-Marseille I. 130p.

OUEDRAOGO M. (1991). Mode d'appropriation, droits fonciers et organisation du parcellaire autour des bas-fonds de Bidi et Améné. Nord Yatenga, Burkina Faso. ORSTOM Ouagadougou. 45p.

PARIENTE P. (1990). BV de Kambo, synthèse des observations hydrologiques 88-90. Propositions d'une approche agro-hydraulique, Programme mise en valeur des bas-fonds, Réseau R3S ENGREF, IRAT-CIRAD, IER, DRA, SRCVO, 12/90. Mastère Spécialisé en maîtrise de l'eau pour le développement, Montpellier.

PELISSIER (1966). Les paysans du Sénégal. Imprimerie Fabrègue, St Yrieux.

PEPIN Y. (1989). Bassin versant de Kambo, région de Kadiolo (Mali). Synthèse des observations hydrologiques 1988 et 1989. Programme bas-fond ORSTOM, IER, CIRAD. Dakar. 24p.

PEREZ P., BERNARD A., ALBERGEL J. (1992). Suivi de l'infiltration d'une culture d'arachide en fonction de la couverture végétale au sol. Utilisation de la simulation de pluie ORSTOM / CIRAD / ISRA (à paraître).

PEREZ P., SARR P.S., SENE M., (1991). Projet pilote "Siné-Saloum". Bas-fond de Thyse Kaymor. Rapport de synthèse. Volet Agronomie. Programme CEE CIRAD No TS2A 0017 F CD ORSTOM Dakar.

PEREZ V. & SEGUIS L. (1991). Essai de caractérisation des bas-fonds par l'utilisation de la télédétection spatiale, Siné-Saloum, Sénégal, ISRA/ORSTOM. 24 p.

PLANCHON O., FRITSCH E., VALENTIN C. (1987). Rill development in wet savannah environment. Catena Supplement 8 Braunschweig, pp 55-70.

PRADE K. (1987). Einfluss der Nährstoffversorgung auf die Elzentoxizität bei Nassreis (*Oryza Sativa* L.) in der Basse Casamance/ Sénégal. Hochschulsammlung Wirtschaftswissenschaft Band 3.

PUECH C., CHABI GONNI D. (1984). Méthode de calcul des débits de crue décennale pour les petits et moyens bassins en Afrique de l'Ouest et Centrale. CIEH, OUAGADOUGOU. 91p.

RAN A-M. (1990). La gestion de l'eau pour la riziculture des bas-fonds dans la région de la Comoé, Burkina Faso. Etude de cas dans trois bas-fonds : Damana, Moadougou et Kawara. CIEH/ UAW, Wageningen.

RAUNET M. (1982) Les bas-fonds en Afrique et à Madagascar. Formation, caractères morphopédologiques, hydrologie, aptitudes agricoles. IRAT, service de Pédologie, Montpellier.

RAUNET M. (1985) Bas-fonds et riziculture en Afrique. Approche structurale comparative. Agronomie Tropicale 40-3, pp 181-200

RODIER J.A (1975). Evaluation de l'écoulement dans le Sahel tropical africain. Travaux et documents de l'ORSTOM, Paris. 121p.

RODIER J.A & AUVRAY C. (1965). Estimation des débits des crues décennales pour les bassins versants de superficie inférieure à 200 km² en Afrique occidentale; Paris, ORSTOM-CIEH 44 p.

RUELLE P., SENE M., JUNCKERE., DIATTAM., PEREZ P. (1990). Fiches techniques Défense et Restauration des Sols. ISRA/UNIVAL, Collection Fiches Techniques. 7 fiches + photos.

SALL S. (1990). Analyse des conditions socio-économiques de la riziculture dans la vallée de Djiguioum. Rapport d'avancement. Multigr., ISRA/Djibouti. 5p.

SALL S., DIOP O. (1991). Bas-fonds de Casamance. Aspects socio-économiques de l'exploitation de la vallée de Djiguioum : synthèse des résultats de la campagne agricole 1990/1991. Multigr., ISRA DSRA.12p.

SAOS J.L., DACOSTA H., LE TROQUER Y., OLIVRY J.C. (1987). Le marigot de Baïla (basse Casamance), pluviométries et écoulements (résultats des campagnes 1983-1986).49p.

SARR D. (1991). Projet pilote "Siné-Saloum". Bas-fond de Thyse Kaymor. Rapport de synthèse. Volet Socio-économie. Programme CEE / CIRAD No TS2A 0017 F CD / ORSTOM Dakar.

SAWADOGO G.P. (1990). Caractéristiques morpho-pédologiques et aménagement des bas-fonds dans la Comoé : cas des bas-fonds de Kawara et de Moadougou. CIEH, Ouagadougou.93p.

SCHEEPERS P. (1989). Rapport de stage du projet de Guéckédou, Guinée Conakry.

SENE M. (1991). Contribution à l'étude pédo-agronomique de la vallée de Djiguioum (Casamance).

SENNEMA B. (1983). Travaux d'aménagements, note sur le comportement hydraulique des plaines de Kawara et Badini. Ministère du développement rural, Banfora, Burkina Faso.

SERPANTIE G. (1988). Aménagements des petits bas-fonds soudano-sahéliens. Eléments pour le choix de priorités et de techniques. Séminaire sur les techniques d'aménagement des bas-fonds. Ouagadougou, 25-27 avril 1988.12p.

SERPANTIE, G. (1992). Les petits bas-fonds soudano-sahéliens ont ils un rôle dans une stratégie vivrière? Séminaire de l'ICID International variation and sustainable development in semi-arid regions. Fortaleza 27 janvier - 1er Février 1992.18p.

SERPANTIE G., MERSADIER G., TEZENAS DU MONTCEL L. (1985). Dynamique des rapports agriculture / élevage en zone soudano-sahélienne du Burkina Faso. Diminution des ressources, organisation collective et stratégies d'éleveurs paysans au nord du Yatenga. Cahiers de la recherche développement, n°9. jan 1986.

SERPANTIE G., MERSADIER G., TEZENAS DU MONTCEL L., MERSADIER Y. (1987). Transformation d'un système agro-pastoral soudano-sahélien (Bidi-Yatenga-Burkina Faso). Colloque "Dynamique des systèmes agraires" MRES. Paris 16-18 nov 1987.

SERPANTIE G., TEZENAS DU MONTCEL L., SABATIER S. (1991). Cartographie des ressources végétales au Nord Yatenga (Burkina Faso). Programme SALT: ORSTOM MAA/ENGREF, ORSTOM Montpellier.40p.

SERPANTIE G., TEZENAS DU MONTCEL L., VALENTIN C. (1992). La dynamique des états de surface d'un territoire agropastoral soudano-sahélien. L'aridité, une contrainte au développement. Coll. Didactiques, ORSTOM éditions. pp 420-447.

SIRCOULON J. (1985). La sécheresse en Afrique de l'Ouest. Comparaison des années 1982-1984 avec les années 1972-1973; Cah. ORSTOM, sér. hydro. vol XXI n° 4 pp 75-86.

SIRCOULON J. (1986). Contribution de l'ORSTOM à la connaissance des précipitations en Afrique de l'Ouest et Centrale . Hydrologie Continentale Vol1 n°2, pp 161-163.

SIRCOULON J. (1989). Bilan hydro-pluviométrique de la sécheresse 1968-1984 au Sahel et comparaison avec les sécheresses 1910 à 1916 et 1940 à 1949. in Les hommes face aux sécheresses, B. BRET, coord., EST IHEAL ed, pp 107-114.

SOMIVAC/USAID/ISRA (1985). Actes de la 2ème table ronde sur les barrages anti-sel, Ziguinchor, 12-15 juin 1985.

TEZENAS DU MONTCEL L.(1987). Utilisation pastorale d'un terroir villageois. Bidi- Nord Yatenga. Séminaire national sur les essences forestières locales. Ouagadougou, 6-10 juillet 1987.

TUINA J. (1992). Relation pluies-débits sur le bassin de Bidi-Gourga.Mémoire de fin d'études d'ingénieur des sciences et techniques. Université de Ouagadougou, Fa. S.T. 79p + annexes.

VACHAUD G., DANCETTE C., SONKO S., THONY J.L. (1978). Méthodes de caractérisation hydro-dynamique in situ d'un sol saturé. Application à deux types de sols du Sénégal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. Ann. Agron.29-1,pp1-36.

VAKSMAN M., (1990). Modèle de bilan hydrique BIPODE, IRAT / CIRAD Bamako, Logiciel & manuel d'utilisation.

VAN DRIEL W.F., RAN A-M., FRAVAL P. (1991). Risques et contraintes pour l'intensification de la riziculture dans deux bas-fonds aménagés de la province de la Comoé, Burkina Faso. Communication pour le Séminaire International Bas-fonds et Riziculture, Madagascar, 9-14 Décembre 1991. CIEH/UAW, Ouagadougou.

VAN DRIEL W.F., VLAAR J. (1991). Impact des digues filtrantes sur le bilan hydrique et sur les rendements agricoles dans la région de Risslam, Burkina Faso, IAHS publ. n° 199 (Atelier Bilan d'Eau au Sahel, Niamey, février 1991).

VIEILLEFON J. (1977). Les sols des mangroves et des tannes de basse Casamance. Mémoire ORSTOM n°83, PARIS 291 p. + cartes.

VLAAR J.C.J., WESSELINK (1990). Aménagement de conservation des eaux et des sols par digues filtrantes; expérimentations dans la région de Risslam, Burkina Faso (1986-1989). Tome 1: aspects techniques et agronomiques CIEH/AFVP/UAW, Ouagadougou.

VOLKERT P., WIT L. de (1991). La commercialisation des céréales à Konadougou. Etude pour la production, la consommation et la commercialisation des céréales au niveau des ménages et analyse du marché céréalier. CIEH/UAW, Ouagadougou.

VUILLAUME G. (1974). L'abatement des précipitations journalières en Afrique intertropicale, variabilité et précision du calcul. Cah. ORSTOM, ser hydro. vol XI n°3 pp 205-240.

ZEPPENFELDT T., VLAAR J.C.J. (1990). Mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest : synthèse préliminaire de l'état des connaissances. CIEH/UAW, Ouagadougou.

ZERBO L. (1991). Contribution à la caractérisation morpho-pédologique et structurale de trois bas-fonds de la province du Yatenga. Contraintes et aptitudes rizicoles. Mémoire de fin d'études I.S.N.- I.D.R. Université de Ouagadougou.132p.

ZIDA M. (1992). Conditions hydriques dans un bas-fond sahélien, incidences sur les cultures vivrières-Bidi-Yatenga. Mémoire de fin d'études d'ingénieur I.D.R. Université de Ouagadougou.107p.

ZOMBRE P. (1991). Caractérisation morphopédologique des bas-fonds dans la province du Yatenga. Rapports techniques 1 et 2. Rapport IDR-R3S-ORSTOM, Ouagadougou.

ZOMBRE P. (1992). Caractérisation morpho-pédologique des bas-fonds de la province du Yatenga. Rapport n°2. Monographie des sols de Bas-fonds.ORSTOM, Ouagadougou.176p + 10 cartes.

ANNEXE 1

LISTE DES PARTICIPANTS AU PROGRAMME "MISE EN VALEUR AGRICOLE DES BAS-FONDS AU SAHEL"

Le programme de recherche pour la mise en valeur des bas-fonds au Sahel a mobilisé pendant quatre ans, à temps plein ou temps partiel, un grand nombre des chercheurs, d'ingénieurs, de techniciens, d'étudiants et d'observateurs. La liste ci-dessous donne un aperçu des moyens humains mobilisés par chaque institut pour la réalisation du programme.

CIEH

- FRAVAL P., Ingénieur des Travaux Ruraux, VSN, 1991-1992, projet Comoé et synthèse.
- GADELLE F., Ingénieur en chef du Génie Rural, directeur technique du CIEH, 1992, synthèse.
- GEMIN V., Ingénieur hydrogéologue, VSN, 1991, projet Comoé.
- LERAT V., Ingénieur hydraulicien, VSN, 1991-1992, projet Comoé.

UAW

- VAN DRIEL W., Ingénieur du Génie Rural, coordonnateur du programme bas-fonds 1991-1992.
- VLAAR J.C.J., Ingénieur du Génie Rural, coordonnateur du programme bas-fond, 1988-1990.
- DE WIT L., Maîtrise de l'UAW, département commercial des produits et analyse des marchés, 1991, projet Comoé.
- FOKKERR., Maîtrise de l'UAW, département génie rural et irrigation, 1988, projet Comoé.
- NUGTEREN M., Maîtrise de l'UAW, département commercial des produits et analyse des marchés, 1989-1990, projet Comoé.
- RAN A.M., Maîtrise de l'UAW, département génie rural et irrigations, 1990-1992, projet Comoé et synthèse.
- TERWISSCHA VAN SCHELTINGA G., Maîtrise de l'UAW, département génie rural et irrigation, 1991, projet Comoé.
- VAN ETTEN J., Maîtrise de l'UAW, département génie rural et irrigation, 1990-1991, projet Comoé.
- VOLKERT P., Maîtrise de l'UAW, département commercial des produits et analyse des marchés, 1991, projet Comoé.
- WILLE M., Maîtrise de l'UAW, département génie rural et irrigation, 1988-1989, projet Comoé.
- ZEPPENFELDT T., Ingénieur du Génie rural, coordonnateur des recherches du projet Comoé, 1988-1989.

FSAGx

- DAUTREBANDE S., Professeur à la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Direction des études en télédétection. 1988-1991.
- MOKADEM A.I., Laboratoire de télédétection et d'agro-hydrologie du département Génie Rural, coordonnateur des recherches en télédétection, 1988-1991.
- NONGUIERMA A., Stagiaire au laboratoire de télédétection et agro-hydrologie, 1988-1991.

CIRAD

- AHMADI N., Ingénieur agronome, chef du projet riz inondé, Sikasso, 1989-1992.
- DOBOS A., Agronome, Casamance, 1991.
- FARINET J.L., Agronome, Siné-Saloum, 1990.
- JUNCKER F., Ingénieur agronome, Siné-Saloum, 1990.
- KRIER D., Ingénieur agronome hydraulicien, Mali-sud, 1989-1990.
- LIDON B., Ingénieur agronome hydraulicien, coordonnateur du projet Mali-sud, synthèse, 1988-1992.
- PARIENTE P., Stagiaire ENGREF/IRAT, Mali-sud, 1990.
- PEREZ P., Ingénieur agronome, Siné-Saloum, coordonnateur du programme Siné-Saloum 1989-1992.
- PEREZ V., Ingénieur agronome, télédétection Siné-Saloum, 1991.
- RAUTUREAU J., Agro-forestier, Siné-Saloum, 1989.
- RUELLE P., Physicien du sol, Siné Saloum, 1988-1989

ORSTOM

- ALBERGEL J., Directeur de recherche, hydrologue, projets Siné-Saloum, Casamance, Mali-Sud, coordonnateur des études hydrologiques, synthèse, 1988-1992.
- BERNARD A., Ingénieur d'étude, hydrologue, Casamance, Siné-Saloum 1988-1992.
- BLONDEAU E., Ingénieur hydraulicien, VSN, Yatenga, 1990-1991.
- BRUNET D., Assistant ingénieur, pédologue, Casamance, 1988-1991.
- BOIVIN P., Chargé de recherche, pédologue, Casamance, 1988.
- DELFIEU J.M., Technicien, hydrologue, Yatenga, 1988-1989.
- DUBEE G., Ingénieur d'étude, hydrologue, Casamance, Siné-Saloum 1988-1992.
- GUIGUEN N., Assistant ingénieur, hydrologue, Mali-sud, 1988-1991.
- LAMACHERE J.M., Chargé de recherche, hydrologue, coordonnateur du projet Yatenga, synthèse, 1988-1992.
- MAILHAC P., Technicien, hydrologue, Yatenga, 1989-1992.
- MAÏZI P., Allocataire de recherche, ethnologue, Yatenga, 1988-1990.
- MARIEU B., Hydrologue, VSN, Casamance, Siné-Saloum, 1989-1990.
- MARTINELLI B., Assistant à l'université d'Aix-Marseille, ethnologue, Yatenga 1988-1989.
- MERSADIER G., Allocataire de recherche, sociologue, Yatenga, 1988-1989.
- MONTOROI J.P., Chargé de recherche, pédologue, Casamance, coordonnateur du projet Casamance 1988-1992.
- OUEDRAOGO M., Allocataire de recherche, sociologue, Yatenga, 1988-1992.
- PEPIN Y., Technicien, hydrologue, Mali-sud, Siné-Saloum, 1988-1992.
- SAOS J.L, Chargé de recherche, hydrogéologue, 1989 - 1990, Sine-Saloum, Casamance.
- SEGUIS L., Chargé de recherche, hydrologue, télédétection Siné-Saloum, 1991.
- SERPANTIE G., Chargé de recherche, agronome, Yatenga, 1988-1992.
- ZANTE P., Assistant ingénieur, pédologue, Casamance 1989-1990.

PARTENAIRES AFRICAINS DES INSTITUTS NATIONAUX

BURKINA FASO - INERA

- NACRO S., Ingénieur agronome, Comoé, 1988-1992.
- OUATTARA M., Ingénieur agronome, Comoé, 1989-1992.
- SERE Y., Directeur du programme riz, Comoé, 1988-1992.
- SIE M., Ingénieur agronome, Comoé, 1989-1992.
- SOME J., Ingénieur agronome, Comoé, 1988-1992.

MALI - IER

- DOLO P., Chef de la section de recherche sur les cultures vivrières et oléagineux, Mali-sud, 1988-1992.
- DAMA D., Informaticien, Mali-sud, 1988-1992.
- SANOGO I., Technicien supérieur agricole, Mali-sud, 1988-1992.
- SIMPARA M., Ingénieur agricole, Mali-sud, 1988-1992.

SENEGAL - ISRA

- BARRY B., Hydraulicien, Casamance, 1989.
- DIATTA M., Ingénieur forestier, chercheur associé ORSTOM, Siné-Saloum, 1988-1992.
- DIOP O., Assistant de recherche, sociologue, Casamance, 1989-1992.
- FALL M., Pédologue, Casamance, 1989-1992.
- SAMBA SALL, Agro-économiste, Casamance, 1989-1992.
- SARR D., Sociologue, Siné-Saloum, 1989-1992.
- SARR P.S., Technicien agronome, 1988-1992.
- SENE M., Ingénieur physicien des sols, responsable du programme ISRA Gestion des Ressources Naturelles dans le Sine-Saloum chercheur associé ORSTOM, Siné-Saloum, 1988-1992.

INSTITUTS FRANCAIS ASSOCIES

BRGM

- CARLIER P., Hydrogéologue, Yatenga, 1990-1991.
- FAVIN M., Hydrogéologue, Yatenga, 1991.
- LEGER C., Hydrogéologue, Yatenga, 1990-1991.

AFVP

- POITEVIN B., Ingénieur agricole, Mali-sud 1988-1989.

CHERCHEURS AFRICAINS ASSOCIES

- BACYE B., Pédologue, allocataire de recherche ORSTOM, thèse à l'université d'Alx-Marseille, Yatenga, 1989-1992.
- BARRO E., Ingénieur agronome, pédologue du bureau national des sols du Burkina Faso, Thèse université d'Abidjan, Yatenga, chercheur associé ORSTOM 1989-1992.
- DACOSTA H., Assistant à l'université Cheikh Anta Diop de Dakar, chercheur associé ORSTOM, Siné-Saloum, Casamance 1988-1992.
- SANOU J., Ingénieur agronome, projet micro-réalisations, Mali-sud, 1989-1990.
- ZOMBRE P., Assistant à l'université de Ouagadougou, Institut du Développement Rural, chercheur associé ORSTOM, Yatenga, 1988-1992.

ANNEXE 2

PUBLICATIONS RELATIVES AUX PROJETS PILOTES

SENEGAL

1 - PROJET PILOTE SINE-SALOUM

Publications :

- ALBERGEL J., CLAUDE J. (1989). Fonctionnement hydrologique des bas-fonds en Afrique de l'Ouest : Etat des connaissances, recherches en cours. Proc. of the Sahel forum on The state-of-art of hydrology and hydrogeology in the arid and semi-arid areas of Africa, UNESCO Ouagadougou Nov. 1988.

- TOUMA J., ALBERGEL J. (1992). Determining soil hydrologic properties from rain simulator or double ring infiltrometer experiments : a comparison. Journal of Hydrology vol. 135 pp 73-86

Communications à des colloques et séminaires :

- ALBERGEL J., DIATTA M., JUNCKER E., PEREZ P., RUELLE P., SENE M. (1990). Méthodes pour améliorer l'infiltration et réduire le ruissellement. Présentation du cas du Siné-Saloum. Réseau érosion, bulletin No 10. Journées érosion de Montpellier 1989.

- ALBERGEL J., PEREZ P., VAKSMANN M. (1990). Gestion agricole des pluies au Sahel. Une méthode d'estimation du ruissellement dans le bilan hydrique des cultures. Journées hydrologiques de Montpellier 1990.

- ALBERGEL J., PEREZ P., VAKSMANN M. (1991). Amélioration des modèles du bilan hydrique sur parcelles par la prise en compte du ruissellement. Dans " Soil Water Balance in the Soudano Sahelien Zone". SIVAQUMAR M.V.K., WALLACE J.S., RENARD C., GIROUX C., éditeurs. IAHS publ No 199, Niamey proceedings of the International Workshop 18-23 Février 1991.

- RUELLE P., SENE M., VAUCLIN M. (1988). Bilan hydrique d'un micro-bassin versant cultivé. Aspects stationnel et spatial. Journées de l'ATP PIREN.

Rapports scientifiques :

- ALBERGEL J. (1988). Fonctionnement hydrologique des bas-fonds. Synthèse préliminaire. ORSTOM, ISRA Dakar in Mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest, ZEPPENFELDT & VLAAR CIEH 1990, An. 1, 28 p.

- ALBERGEL J., BERNARD A., DACOSTA H., DUBEE G., PEPIN. (1991). Projet pilote "Siné-Saloum". Bas-fond de Thyse Kaymor. Rapport de synthèse. Volet Hydrologie-Hydrogéologie. Programme CEE CIRAD No TS2A 0017 F CD. ORSTOM Dakar.

- ALBERGEL J., BERNARD A., DACOSTA H., GAC J.Y., RUELLE P. (1989). Campagne hydrologique 1988. Action de Recherche Economie de l'eau DRS Siné-Saloum. CEE DG12.

- ALBERGEL J., BERNARD A., DACOSTA H., PEPIN Y., (1990). Campagne hydrologique 1989. Action de Recherche : Economie de l'eau DRS, Sine Saloum. CEE DG12.

- ALBERGEL J., BERNARD A., DACOSTA H., PEPIN Y., (1992). Campagne hydrologique 1990. Action de Recherche : Economie de l'eau DRS, Sine Saloum. CEE DG12.

- ALBERGEL J., BERNARD A., DACOSTA H., PEREZ P., VALENTIN C. (1991). Projet pilote "Siné-Saloum". Bas-fond de Thyse Kaymor. Rapport de synthèse. Volet Morpho-pédologie. Programme CEE / CIRAD No TS2A 0017 F CD ORSTOM, Dakar.

- ALBERGEL J., BERNARD A., MARIEU B. (1990). Stimulation de pluie sur le bassin de Keur Dianko ORSTOM, ISRA R3S, programme CEE / CIRAD DG12 Contrat N° TS2A 0017 F CD, Dakar.

- ALBERGEL J., BERNARD A., RUELLE P., TOUMA J. (1989). Hydrodynamique des sols. Bassins versants expérimentaux de Thyse-Kaymor. Rapport de campagne des mesures Février-Avril 1988, Dakar.

- BERNARD A., MARIEU B. (1990). Stimulation de pluie sur le bas-fond de Keur Samba Diama du 06-03-90 au 16-03-90 ORSTOM, Dakar.

- DIATTA M. (1989). Caractérisation des faciès forestiers de la communauté rurale de Kaymor, mémoire de titularisation ISRA, Kaolak.

- FARINET J.L., PEREZ P., RUELLE P. (1991). Projet pilote "Siné-Saloum". Bas-fond de Thyse Kaymor. Rapport de synthèse. Volet Aménagement et Génie Rural. Programme CEE / CIRAD No TS2A 0017 F CD. ORSTOM Dakar.

- JUNCKER E., RAUTUREAU J. (1990). Programme Gestion des Ressources Naturelles. Enquête "rôles et usages de l'arbre". ISRA / IRAT.

- JUNCKER E., SENE M. (1990). Comparaison de plusieurs dents pour le travail du sol en sec en traction bovine. ISRA / IRAT.

- PEREZ P., RAUTUREAU J., SARR P.S. (1991). Programme : Gestion des Ressources Naturelles. Rapport d'activité "Economie de l'eau-DRS" année 1990. ISRA / IRAT.

- PEREZ P., SARR P.S. (1990). Programme Gestion des Ressources Naturelles. Rapport d'activité "Economie de l'eau - DRS" année 1989. ISRA/IRAT.

- PEREZ P., SARR P.S., SENE M. (1991). Projet pilote "Siné-Saloum". Bas-fond de Thyse Kaymor. Rapport de synthèse. Volet Agronomie. Programme CEE / CIRAD No TS2A 0017 F CD. ORSTOM, Dakar.
- PEREZ V., SEGUIS L. (1991). Essai de caractérisation des bas-fonds par l'utilisation de la télédétection spatiale. Siné-Saloum, Sénégal. ORSTOM, Dakar.
- RUELE P. (1989). Rapport d'activités 1988. Action de Recherche : Economie de l'eau DRS Siné-Saloum. CEE DG12.
- SARR D. (1991). Projet pilote "Siné-Saloum". Bas-fond de Thyse Kaymor. Rapport de synthèse. Volet Socio-économie. Programme CEE / CIRAD No TS2A 0017 F CD. ORSTOM Dakar.
- SENE M. (1989). Quelques caractéristiques de l'enracinement des principales cultures dans le sud et du bassin arachidier, secteur Centre-Sud Kaolak ISRA.
- SENE M., RUELE P., JUNCKER E. (1989). Rapport d'activité 1988. Recherches d'appui (510/01-02-03) ISRA Kaolak.
- VALENTIN C. (1990). Les états de surface des bassins versants de Thyse Kaymor (Sénégal). ORSTOM Dakar.

Thèses et rapports de stage :

- DIONE O. (1990). Etude hydrologique du bassin de Keur Samba Diama (rapport de stage).
- KAMARA Y., KEITA F. (1990). Contribution à l'étude des processus hydrologiques et érosifs dans les bassins versants expérimentaux de Thyse Kaymor.
- MARIEME S.B. (1991). Etude hydrologique du bassin de Ndianguene (rapport de stage).

2 - PROJET PILOTE CASAMANCE

Publications :

- ALBERGEL J., BRUNET D., DUBEE G., MONTOROI J.P., ZANTE P. (1991). Gestion d'un barrage anti-sel en basse Casamance (Sénégal). In KERGREIS A. et CLAUDE J. (réd.), "Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride". Ed. AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext, Paris. pp. 275-286
- BARRY B., BOIVIN P., BRUNET D., MONTOROI J.P., MOUGENOT B., TOUMA J., ZANTE P. (1989). Evolution des stratégies d'aménagement hydro-agricole des sols salés en basse Casamance. In "Actes des deuxièmes journées de l'eau au Sénégal", Université CAD, Dakar, pp. 104-117.
- BOIVIN P., BRUNET D., JOB J.O. (1988). Conductivimétrie électromagnétique et cartographie automatique des sols salés : une méthode rapide et fiable. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol XXIV, 1, pp. 39-48.
- GALLE C., MONTOROI J.P. (1992). High aluminium content in acidified estuarine waters and their ecological consequences : the case of lower Casamance (Senegal). Comparaison with the effects of acid rainfall (soumis à publication dans Acta Oecologica).
- LE BRUSQ J.Y., LOYER J.Y., MOUGENOT B., CARN M., (1987). Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium, et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. Science du Sol, 25(3), pp. 173-184.

- MOUGENOT B., ZANTE P., MONTOROI J.P. (1990). Détection et évolution saisonnière des sols salés et acidifiés du domaine fluvio- marin de basse Casamance au Sénégal, par imagerie satellitaire. In P. LAFRANCE et J.M. DUBOIS (réd.), "Apports de la télédétection à la lutte contre la sécheresse", Ed. AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext, Paris, pp.173-179.

Communications à des colloques et séminaires :

- ALBERGEL J. (1990). Une méthode "expert" pour la conception des barrages "anti-sel" dans des bas-fonds de basse et moyenne Casamance. Séminaire "Conservation et utilisation durable des ressources naturelles du bassin hydrographique de la Casamance", 22-26 Octobre 1990, Ziguinchor (Sénégal), 13 p.

- ALBERGEL J., BRUNET D., DUBEE G., MONTOROI J.P., ZANTE P. (1990). Gestion d'un barrage anti-sel en basse Casamance (Sénégal). Journées hydrologiques "Gestion agricole de l'eau", 11-12 Septembre 1990, Montpellier.

- ALBERGEL J., BRUNET D., DUBEE G., MONTOROI J.P., ZANTE P. (1990). Gestion d'un barrage anti-sel en basse Casamance (Sénégal). Séminaire "Conservation et utilisation durable des ressources naturelles du bassin hydrographique de la Casamance", 22-26 Octobre 1990, Ziguinchor (Sénégal).

- ALBERGEL J., BRUNET D., DOBOS A., FALL M., MONTOROI J.P., ZANTE P. (1991). Le site pilote de Djuiguinour (Casamance) : une expérimentation sur la mise en valeur de terres dégradées à transformer en un projet de développement. Séminaire atelier "Gestion des barrages anti-sel et aménagement des terres basses", 16-20 Décembre 1991, Ziguinchor (Sénégal).

- DOBOS A., FALL M., MONTOROI J.P. (1991). Amélioration de la fertilité des rizières de basse Casamance (Sénégal) en relation avec la gestion des eaux de ruissellement d'un bassin versant: premiers résultats et perspectives. Séminaire "Gestion agroclimatique des précipitations. Une voie de réduction du gap technologique de l'agriculture tropicale africaine", 9-13 Décembre 1991, Bamako (Mali), 13 p.

- MONTOROI J.P. (1989). L'intrusion marine et son impact sur l'écosystème casamançais. Com. réunion UICN/ORSTOM sur la «problématique de la langue salée». Multigr., 10 p.

- MONTOROI J.P. (1990). Présentation des programmes de recherche en cours au Sénégal et faisant intervenir l'étude de la solution du sol. Comm. à la 3ème réunion du groupe de réflexion sur l'étude de la solution du sol en relation avec l'alimentation des plantes (GRESSAP), 11 Septembre 1990, Montpellier.

- MONTOROI J.P. (1990). Les sols et l'agriculture dans le domaine estuarien de basse Casamance. Séminaire "Conservation et utilisation durable des ressources naturelles du bassin hydrographique de la Casamance", 22-26 Octobre 1990, Ziguinchor (Sénégal), 21 p.

- MONTOROI J.P. (1992). La mise en valeur rizicole des terres salées et acides de la vallée de Djuiguinour (Basse Casamance): relation avec la dynamique des sels et l'évolution géochimique du bassin versant. Comm. présentée à la journée de l'AFES sur "les méthodes d'étude des sols salés - des exemples d'aménagement de ces sols", 26 mai 1992, Paris.

- MONTOROI J.P., ALBERGEL J., DOBOS A., FALL M., SALL S., BERNARD A., BRUNET D., DUBEE G., ZANTE P. (1992). A suitable water management for the rehabilitation of rice culture in the acid sulphate soils of lower Casamance (Senegal): a successful two years experiment. Fourth international symposium on acid sulphate soils, 2-6 Mars 1992, Ho Chi Minh Ville (Viêt Nam), 11 p.

- MONTOROI J.P., ZANTE P. (1989). La mise en valeur des terres dégradées par la salinisation en basse Casamance (Sénégal). Com. séminaire: "Estudio de las relaciones agua-suelo-vegetacion y ganado en la zona arida del norte de Mexico. Orientado a la utilizacion racional de estos recursos", 23-27 octobre 1989, Instituto de Ecologia, Mexico, Multigr., 15 p.

Rapports scientifiques :

- ALBERGEL J., BERNARD A., BRUNET D., MONTOROI J.P. (1991). Projet pilote "Casamance". Bas-fond de Djiguinoum. Rapport de synthèse : morphopédologie. Multigr., ORSTOM/ISRA/R3S/IRAT. 27p.
- ALBERGEL J., BRUNET D., DOBOS., FALL M., MONTOROI J.P., ZANTE P. (1991). Projet pilote "Casamance". Bas-fond de Djiguinoum. Rapport de synthèse : aménagement -génie rural. Multigr., ORSTOM/ISRA/R3S/IRAT. 13p.
- ALBERGEL J., BRUNET D., DUBEE G., DUPREY J.L., MARIEU B., MONTOROI J.P., ZANTE P. (1990). Rapport hydrologique 1989. Vallée de Djiguinoum (Casamance). Multigr., ORSTOM Dakar, 73 p.
- ALBERGEL J., BRUNET D., DUBEE G., MARIEU B., MONTOROI J.P., PEPIN Y., ZANTE P. (1991). Projet pilote "Casamance". Bas-fond de Djiguinoum. Rapport de synthèse : hydrologie-hydrogéologie. Multigr., ORSTOM/ISRA/R3S/IRAT.42p.
- BOIVIN P., BRUNET D. (1990). Bilan de quatre années de suivi de la salure d'une vallée aménagée anti-sel par conductivimétrie électromagnétique et krigeage. Multigr., ORSTOM Dakar Bondy, 12 p.
- BRUNET D. (1988). Etude pédologique de la vallée de Djiguinoum (basse Casamance), Multigr., ORSTOM Dakar, 28 p.
- BRUNET D. (1989). Dessalement des terres dans la vallée de Djiguinoum. Bilan hydrique et salin de l'hivernage 88, Multigr., ORSTOM Dakar 7 p.
- BRUNET D. (1989). Evaluation des surfaces dégradées de la vallée de Djiguinoum (basse Casamance) en mars 1988 à l'aide de cartes monoparamétriques, Multigr., ORSTOM Dakar 6 p + cartes.
- BRUNET D. (1990). Principales caractéristiques des eaux de nappe de la vallée de Djiguinoum (basse Casamance). Bilan d'une année de suivi d'un réseau piézométrique (Juin 1988 à Juin 1989). Multigr., ORSTOM Dakar. 40p.
- BRUNET D., DOBOS A., FALL M., MONTOROI J.P., ZANTE P. (1991). Projet pilote "Casamance". Bas-fond de Djiguinoum. Rapport de synthèse : agronomie. Multigr., ORSTOM/ISRA/R3S/IRAT.20p.
- BRUNET D., ZANTE P. (1990). Essai rizicole de la vallée de Djiguinoum, basse Casamance. Rapport agro-pédologique. Multigr., ORSTOM Dakar, 42 p.
- BRUNET D., ZANTE P., DUPREY J.L. (1991). Essai rizicole en culture traditionnelle. Vallée de Djiguinoum (Basse Casamnce). Rapport agro-pédologique 1990. Multigr., ORSTOM Dakar, 66 p.
- DOBOS A. (1991). Essai de mise en valeur rizicole des sols salés et sulfatés acides. Multigr., ISRA Djiblor, 30p.
- FALL M. (1991). Volet pédologie et aménagements des bassins versants. Aménagement en microcuvettes sur billons. Multigr., ISRA Djiblor, 7p.
- LAMAGAT J.P., MONTOROI J.P., PERAUDEAU M. (1989). Traitement informatique des données limnimétriques et conductivimétriques d'une centrale "CHLOE" (ORSTOM-ELSYDE) à deux sondes SPI. Programme CHLODAK pour micro-ordinateur. Notice d'utilisation. Multigr.16p.

- MARIEU B., DUBEE G., PEPIN Y. (1991). Bassin versant de la vallée "Le Brusq". Résultats de la campagne hydrologique 1990. Multigr., ORSTOM Dakar.
- MONTOROI J.P. (1991). Aptitudes des sols en agro-foresterie de la zone d'intervention du Projet de Protection des Forêts Sud de Ziguinchor. Multigr., ORSTOM/PPFS Ziguinchor, 18p.
- MONTOROI J.P. (1991). Etude du comportement hydrique des sols rouge et beige du bassin versant de Djiguinoum (basse Casamance). Campagne de mesures 1990. Multigr., ORSTOM Dakar, 37 p.
- MONTOROI J.P. (1991). Programme MRES n° 121 : "Réhabilitation des sols salés et acides de basse Casamance". Rapport final. Multigr. 16p + annexes.
- MONTOROI J.P. (1992). Etude pédologique du bassin versant de Djiguinoum. Multigr., ORSTOM Dakar.
- SALL S. (1990). Analyse des conditions socio-économiques de la riziculture dans la vallée de Djiguinoum. Rapport d'avancement. Multigr., ISRA Djibélor. 5p.
- SALL S., DIOP O. (1991). Bas-fonds de Casamance. Aspects socio-économiques de l'exploitation de la vallée de Djiguinoum : synthèse des résultats de la campagne agricole 1990-1991. Multigr., ISRA DSRA. 12p.
- SALL S., DIOP O. (1991). Projet pilote "Casamance". Bas-fond de Djiguinoum. Rapport de synthèse : socio-économie. Multigr., ORSTOM/ISRA/R3S. 12p.
- SYLLAM., COLLY J.P., KOSSY B. (1987). Effets de trois formes de phosphates sur la production de riz sur sol acide présentant des teneurs toxiques en aluminium. Multigr., ISRA/DSRA.
- ZANTE P., LE BRUSQ J.Y., MONTOROI J.P. (1987). Mise en valeur des mangroves du Sénégal - Vallées des Kalounayes - Sites d'étude de Koubalan et de Djiguinoum. Rapport de campagne 1986. Multigr., ORSTOM Dakar, 38 p.

Thèses et rapport de stage :

- DIOP N. (1992). Synthèse géographique sur les aménagements en basse Casamance (mémoire de maîtrise).
- SENE N. (1991). Contribution à l'étude pédo-agronomique de la vallée de Djiguinoum (Casamance)(rapport de stage).

MALI

3 - PROJET PILOTE MALI-SUD

Communications à des colloques et séminaires :

- ALBERGEL J. (1992). Lowland programme: Suitable Technologies for Sustained Development in Semiarid Zone of West Africa. The Case of the Subterranean Dam of Kambo in Mali. Semi. of Fortaleza 27 jan.-1feb.1992 (Brasil) .14p.
- LIDON B. (1990). Aménagement des bas-fonds dans la zone Mali-Sud. Journées DRN/IRAT.
- LIDON B., SIMPARA M. (1991). Contraintes du milieu naturel et intérêt de l'aménagement des bas-fonds. Cas de la zone Mali-Sud. Séminaire International Bas-fonds et Riziculture, Tananarive 9-14 Décembre 1991.

Rapports scientifiques :

- AFVP. (1987). Programme de micro-réalisation, région de Kadiolo. Rapport technique de l'aménagement du bas-fond de Kambo. CEE / CIRAD n° TS2A0017FCD. IER/CIRAD/ORSTOM/R3S.
- AHMADI N., DEMAY G., DIABY M., HUSSON O., TRAORE B.(1990) Projet riz inondé IER/IRAT. Rapport d'activités, hivernage 1989. Commission technique SRCVO IER Mali. IRAT.53p.
- AHMADI N., DEMAY G., TRAORE B, HUSSON O.(1991) Projet riz inondé IER/IRAT. Rapport analytique, hivernage 1990. Agronomie, système IER Mali. IRAT.80p.
- AHMADI N., DIABY M.(1991) Projet riz inondé IER/IRAT. Rapport analytique, hivernage 1990. Amélioration variétale du riz. IER Mali. IRAT.28p.
- ALBERGEL J., GUIGUEN N., PARIENTE P., PEPIN Y. (1991). Projet pilote "Mali Sud", bas fond de Kambo, Rapport de synthèse hydrologie-hydrogéologie. Programme CEE / CIRAD n° TS2A0017FCD. IER/CIRAD/ORSTOM/R3S. 30p.
- BLANCHET F. (1992). Etude hydrologique et agronomique d'un bas-fond de la région de Sikasso. CNEARC - ETARC - CIRAD - CA.
- GADELLE F. (1989). Potentialités des aménagements hydro-agricoles pour la riziculture CMDT Mali. CEMAGREF. 29p.
- GUIGUEN N. (1990). Bassin versant de Kambo. Rapport de campagne 1990. Synthèse des observations 1988, 1989, 1990. ORSTOM/IER/CIRAD/R3S.
- HUSSON O. (1990). Mise en valeur des bas-fonds et plaines inondables, le projet riz inondé IER/IRAT Sikasso. Volet agronomie CNEARC/ESAT-IRAT.
- KRIER D. (1991). Le fonctionnement hydraulique des bas-fonds au Mali (région Sud). Ministère de la Coopération, IRAT/IER/R3S.
- KRIER D., SIMPARA M. (1990). Résumé des résultats obtenus sur le fonctionnement hydrique des bas-fonds au Mali.
- KRIER D., SIMPARA M. (1990). Rapport d'activités Mali IER. Projet relations Eau-Sol-Plante.
- LIDON B. (1987). Document 2, référentiel riziculture de bas-fond, Mali-sud. amélioration et extension du périmètre irrigué de Kléla. IRAT.59p.
- LIDON B.(1990). Aménagement des terres de bas-fonds dans la zone Mali-Sud. Journée DRN/IRAT. 18p.

- LIDON B., SIMPARA M., COURTESSOLE P. (1989). Rapport de Campagne des mesures et d'expérimentations 1988-1989. Volet "Mise en valeur des bas-fonds". Projet Eau-Sol-Plante, IER/SRCVO 1989.
- NJJSEN O. (1989). La riziculture féminine de bas-fond dans la région de Sikasso. IER/DRSPR.13p.
- PEPIN Y. (1989). Bassin versant de Kambo, région de Kadiolo (Mali). Synthèse des observations hydrologiques 1988 et 1989. Programme bas-fond ORSTOM/IER/CIRAD. Dakar.
- SANOU J. (1990). Rapport sur le suivi rizicole 1987-1989, projet Kadiolo. AFVP.
- SIMPARA M. (1991). Rapport d'activités Mali IER. Projet relation Eau-Sol-Plante.

Thèses et rapports de stage :

- FARATS A. (1991). Place du riz dans les dynamiques de production et de commercialisation agricoles des cercles de Sikasso et Kadiolo (Mali-Sud). CNEARC/ESAT-IRAT. Laboratoire agro-économie.
- PARIENTE P. (1990). BV de Kambo. Synthèse des observations hydrologiques 88-90. Propositions d'une approche agro-hydraulique. Programme de mise en valeur des bas-fonds. Réseau R3S, ENGREF, IRAT-CIRAD, IER, DRA, SRCVO. Mastère spécialisé en maîtrise de l'eau pour le développement. Montpellier.

BURKINA FASO

4 - PROJET PILOTE COMOÉ

Communications à des colloques et séminaires :

- VAN DRIEL W.F., RAN A-M., FRAVAL P. (1991). Risques et contraintes pour l'intensification de la riziculture dans deux bas-fonds aménagés de la province de la Comoé, Burkina Faso. Communication pour le Séminaire International Bas-fonds et Riziculture, Madagascar, 9-14 Décembre 1991. CIEH/UAW, Ouagadougou.

Rapports scientifiques :

- GEADAH A.S. (1989). Programme de recherche en vue de la mise en valeur des bas-fonds de la Comoé : bas-fond expérimental de Damana. Volet 3 : facteurs du régime hydrologique, hydraulique et hydrique. INERA, Bobo-Dioulasso.
- LAMACHERE J.M., SANGARE O. (1991). Programme de recherche en vue de la mise en valeur des bas-fonds au Sahel : campagne hydrologique sur les bassins-versants de Konadougou 1988 à 1990 Kounkara 1990 Moadougou 1990. ORSTOM, Ouagadougou.
- OUEDRAOGO E. (1990). Etude socio-économique concernant les exploitants touchés par le projet "Opération Riz Comoé". SNV, Ouagadougou.
- RAN A.M., VAN DRIEL, W.F., FRAVAL P. (1992) Mise en valeur agricole des bas-fonds de la Comoé. Typologie, fonctionnement hydrologique, potentialités agricoles, CIEH/UAW, Ouagadougou, (à paraître).
- SERE Y., SOME J. (1989). Programme de recherche en vue de la mise en valeur des bas-fonds : résultats de la campagne 1988. Volet agronomie. INERA, Bobo-Dioulasso.25p.
- SERE Y., SIE M., NACRO S., SOME J., OUATTARA M. (1992). Programme de recherche en vue de la mise en valeur des bas-fonds : résultats des campagnes 1989-1990 et 1990-1991. Volet agronomie. INERA, Bobo-Dioulasso.49p.

- SINARE Y.I. (1990). Etude de deux bas-fonds dans la Comoé (projet de recherche sur la mise en valeur des bas-fonds) : comportement de la nappe phréatique. IER/CIEH, Ouagadougou.
- ZEPPENFELDT T. (1989). Rapport de campagne 1988-1989, volet 3 (morpho-pédologie, hydrologie, hydraulique, interventions techniques d'aménagement). CIEH/UAW, Wageningen.
- ZEPPENFELDT T., VLAAR J.C.J. (1990). Mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest : synthèse préliminaire de l'état de connaissances. CIEH/UAW, Ouagadougou. 137p.

Thèses et rapports de stage :

- ETTEN J. van (1992). Le changement du régime foncier par l'influence d'un aménagement dans la plaine de Kawara, Burkina Faso. CIEH/UAW, Ouagadougou.
- FOKKER R., WILLE M. (1988). La gestion de l'eau et l'exploitation des plaines rizicoles de Kawara et de Moadougou ; les conséquences d'une intervention pour les exploitantes. CIEH/UAW, Banfora.
- NUGTEREN H. (1991). Les systèmes de production à Konadougou et Damana, Burkina Faso : agriculture pluviale et riziculture de bas-fond. CIEH/UAW, Wageningen.
- RAN A-M. (1990). La gestion de l'eau pour la riziculture des bas-fonds dans la région de la Comoé, Burkina Faso. Etude de cas dans trois bas-fonds : Damana, Moadougou et Kawara. CIEH/UAW, Wageningen.
- SANON L.A. (1990). Etudes physiques préliminaires à l'aménagement rizicole du bas-fond de Damana, province de la Comoé. CIEH/INERA, Ouagadougou.
- SAWADO G.P. (1990). Caractéristiques morpho-pédologiques et aménagement des bas-fonds dans la Comoé : cas des bas-fonds de Kawara et de Moadougou. CIEH, Ouagadougou.
- TERWISSCHA VAN SCHELTINGA C. (1991). L'inventaire et le début de l'analyse des données hydrologiques des bas-fonds de Damana, Kawara et Moadougou (Burkina Faso) 1988-1990. CIEH/UAW, Ouagadougou.
- TERWISSCHA VAN SCHELTINGA C. (1992). Modèle pluie-débit de deux réservoirs linéaires parallèles pour le bassin versant de Kawara, province de la Comoé, Burkina Faso. CIEH/UAW, Wageningen.
- VOLKERT P., WIT L. de (1991). La commercialisation des céréales à Konadougou. Etude pour la production, la consommation et la commercialisation des céréales au niveau des ménages et analyse du marché céréalier. CIEH/UAW, Ouagadougou.

5 - PROJET PILOTE YATENGA

Publications :

- MARTINELLI B., SERPANTIE G. (1987). Deux points de vue sur la confrontation paysans-aménageurs au Yatenga. In Cah. Rech. Dév. n°14-15.
- SERPANTIE G., MERSADIER G., TEZENAS DU MONTCEL L., MERSADIER Y. (1988). Dynamique du système agro-pastoral soudano-sahélien-Bidi-Yatenga, Burkina Faso. In Cah. Rech. Dév. n°18.
- SERPANTIE G., TEZENAS DU MONTCEL L., VALENTIN C. (1992). La dynamique des états de surface d'un terroir agro-pastoral soudano-sahélien. Conséquences et propositions. Dans "L'aridité, une contrainte au développement". Ed ORSTOM, coll. Didactiques, Paris, pp. 420-447.

Communications à des colloques et séminaires :

- LAMACHERE J.M., MAIZI P., SERPANTIE G., ZOMBRE P. (1991). Un petit bas-fond en zone tropicale sèche. Fonctionnement et aménagement-Burkina Faso-Yatenga-région de Bidi. Séminaire international Tananarive, 9-14 Décembre 1991, Bas-fond et Riziculture.24p.
- LAMACHERE J.M., SERPANTIE G. (1990). Valorisation agricole des eaux de ruissellement et lutte contre l'érosion sur champs cultivés en mil en zone soudano-sahélienne, Burkina Faso, province de Yatenga, région de Bidi. Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier 12-15 Septembre 1990. ORSTOM, Ouagadougou.
- MAIZI P., LAMACHERE J.M., SERPANTIE G., ZOMBRE P. (1992). Fonctionnement et aménagement d'un petit bas-fond soudano-sahélien (Bidi, Yatenga, Burkina Faso). Séminaire international Tananarive, 9-14 Décembre 1991, Bas-fond et Riziculture.18p.
- SERPANTIE G. (1988). Aménagements des petits bas-fonds soudano-sahéliens. Eléments pour le choix de priorités et de techniques. Séminaire sur les techniques d'aménagement des bas-fonds. Ouagadougou, 25-27 avril 1988.12p.
- SERPANTIE G. (1992). Les petits bas fonds soudano-sahéliens ont-ils un rôle dans la stratégie vivrière? Projet interdisciplinaire ORSTOM/R3S au Yatenga (Burkina Faso). Séminaire I.C.I.D. Fortaleza (Brésil), 27jan-1fév 1992.18p.

Rapports scientifiques :

- CARLIER P., FAVIN H., LEGER C. (1992). Etude de la recharge naturelle et artificielle des nappes de bas-fonds de la région de Bidi, Yatenga, Burkina Faso. Rapport provisoire. BRGM-R34447-EAU-45-92.66p.
- LAMACHERE J.M. (1991). Observations piézométriques, années 1987 à 1990, programme de recherche en vue de la mise en valeur des bas-fonds au Sahel. Projet Yatenga. ORSTOM Ouagadougou.94p.
- MAIZI P. (1991). Etude sociologique d'un aménagement hydro-agricole à Gourga, Bidi, Nord Yatenga. ORSTOM, Ouagadougou. 48p.
- OUEDRAOGO M. (1991). Mode d'appropriation, droits fonciers et organisation du parcellaire autour des bas-fonds de Bidi et Améné. Nord Yatenga, Burkina Faso. ORSTOM, Ouagadougou. 45p.
- SERPANTIE G., TEZENAS DU MONTCEL L., SABATIER S. (1991).Cartographie des ressources végétales au Nord Yatenga (Burkina Faso). Programme SALT-ORSTOM MAA/ENGREF. ORSTOM Montpellier.40p.

- ZOMBRE P. (1991). Caractérisation morphopédologique des bas-fonds dans la province du Yatenga. Rapports techniques 1 et 2. Rapport IDR/R3S/ORSTOM Ouagadougou.

- ZOMBRE P. (1992). Caractérisation morpho-pédologique des bas-fonds de la province du Yatenga. Rapport n°1. Monographie des sols de bas-fonds. ORSTOM Ouagadougou. 176p + 10cartes.

Thèses et rapports de stage :

- AGNAME P. (1991). Diagnostic des désordres survenus aux barrages de Gourga et Amene, proposition de travaux de restauration. Mémoire de fin d'étude. E.I.E.R. 42p

- AUTISSIER V., MONIN L. (1987). Place et rôle du maraîchage dans les exploitations agricoles du Yatenga. Etude de cas. Rapport de stage. 250p.

- BAIMEY A. (1991). Application du modèle GR3 à l'évaluation des ressources en eau de quelques bassins versants du Burkina Faso. Mémoire de recherche, cycle post-grade de l'école polytechnique fédérale de Lausanne. 62p.

- BLJOCKA J.P. (1990). Etude hydro-dynamique de la nappe aquifère du bas-fond de Gourga-Bidi, Yatenga. Mémoire de fin d'études E.I.E.R. 40p.

- COULIBALY A. (1992). La réalimentation de la nappe aquifère du bas-fond de Gourga-bidi, Yatenga. Mémoire de fin d'études d'ingénieur des sciences et techniques de l'eau. Université de Ouagadougou, Fa. S.T. 44p.

- DJOUKAM J. (1991). Relations pluies-débits sur le bassin de Gourga. Mémoire de fin d'études E.I.E.R. 42p.

- IBRAHIM T.A. (1992). Etude hydrologique du marigot Aoto à Roulgou Toega, Burkina Faso, Yatenga. Mémoire de fin d'études E.I.E.R. 43p.

- JOFFRE G. (1991). Etude du stockage-déstockage d'un petit barrage. Réalisation d'un programme informatique. Rapport de stage de 2ème année de E.N.S.H.M.G (Grenoble). 69p.

- N'DJAJA O.H. (1990). Essai d'application de la télédétection à l'étude et la cartographie des formations superficielles à Oursi et à Bidi (Burkina Faso). Mémoire de maîtrise en géographie, Université de Ouagadougou, institut des sciences humaines et sociales, centre ORSTOM, Ouagadougou. 129p.

- OUEDRAOGO M. (1990). La dynamique des pouvoirs locaux au Yatenga (Burkina faso). Formation et évolution à Améné. Mémoire de maîtrise en sociologie et développement. Université de Provence. Aix-Marseille I. 130p.

- POUSSI G. (1990). Etude des risques de sécheresse et d'inondation dans le bas-fond de Gourga-Bidi, Yatenga. Mémoire de fin d'études E.I.E.R. 40p.

- SAMA M.B. (1989). Etude géophysique et hydro-géologique du bas-fond de Gourga. Région de Bidi. Mémoire de fin d'études E.I.E.R. 127p.

- TUINA J. (1992). Relations pluies-débits sur le bassin de Bidi-Gourga. Mémoire de fin d'études d'ingénieur des sciences et techniques. Université de Ouagadougou, Fa. S.T. 79p .

- VISSERS M. (1988). Rôle des bas-fonds et de la riziculture dans les systèmes de production soudano-sahéliens. Cas du yatenga. ORSTOM Ouagadougou - Université de Wageningen. Rapport de stage. 68p.

- ZERBO L. (1991). Contribution à la caractérisation morpho-pédologique et structurale de trois bas-fonds de la province du Yatenga. Contraintes et aptitudes rizicoles. Mémoire de fin d'études I.S.N.- I.D.R. Université de Ouagadougou. 132p.

- ZIDA M. (1992). Conditions hydriques dans un bas-fond sahélien, incidences sur les cultures vivrières-Bidi -Yatenga. Mémoire de fin d'études d'ingénieur I.D.R. Université de Ouagadougou. 107p.

TELEDETECTION

6 - PROJETS MALI-SUD & COMOE

Publications :

- MOKADEM A.I., NONGUIERMA A., DAUTREBANDE S. (1991). Utilisation de l'imagerie satellitaire pour l'étude des bas-fonds au Sahel. Revue Sécheresse, vol. 2 no3, pp. 189-198.

Communications à des colloques et séminaires :

- MOKADEM A.I. (1991). Etude des bas-fonds rizicoles par l'imagerie Spot XS et Landsat TM. Communication au Séminaire International "Bas-fonds et riziculture : fonctionnement, agronomie aménagement", Tananarive (Madagascar) 9-14 Décembre 1991.

- MOKADEM A.I. (1991). Application de la télédétection aux zones humides. Col. Inter. "Journées Scientifiques de l'UREF", Montréal 20-24 Octobre 1991.

- MOKADEM A.I., DAUTREBANDE S. (1990). Apport de la télédétection à l'aménagement hydro-agricole : cas d'étude en Afrique de l'Ouest et en Belgique. Colloque sur l'application de la télédétection à la gestion et au contrôle des grands périmètres irrigués, Kenitra 19-23 novembre 1990, CEMAGREF/ORMVAG.

- NONGUIERMA A., MOKADEM A.I. (1991). Apport de la télédétection pour la caractérisation des bas-fonds et de leur bassin versant. Séminaire International "Gestion agro-climatique des précipitations : une voie de réduction du GAP technologique de l'agriculture tropicale africaine". Bamako, 9-13 Décembre 1991.

- NONGUIERMA A., MOKADEM A.I., DAUTREBANDE S. (1991). Critères d'utilisation de la télédétection en vue de la mise en valeur des bas-fonds au Sahel : recherche-développement et transfert de technologie. Communication au Workshop "Land cover and land use planning. Methodology and requirements for projects success". Madrid (Espagne 25-26 Octobre 1991).

Rapports scientifiques :

- MOKADEM A.I., NONGUIERMA A. (1991). Critères d'utilisation de la télédétection pour la typologie des bas-fonds au Sahel. Rapport scientifique final, sous la direction du Pr. S. Dautrebande. Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux.

- MOKADEM A.I., NONGUIERMA A. (1992). Critères d'utilisation de la télédétection pour la typologie des bas-fonds au Sahel. Rapport de synthèse. Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux.

- NONGUIERMA A., MOKADEM A.I. (1989). Synthèse sectorielle de la Télédétection appliquée à l'Afrique de l'Ouest. UER Hydroaulique Agricole, Faculté des Sciences Agronomiques, Gembloux.

Thèses et rapports de stage :

- DEWEZ A. (1990). Apport de la télédétection satellitaire dans la typologie des zones de bas-fonds en région soudano-guinéenne. Unité d'Hydraulique Agricole, Faculté des Sciences Agronomiques, Gembloux.

- MAHAMAN M. (1991). Application de la télédétection aux bas-fonds rizicoles.

- **NONGUIERMA A. (1991). Critères d'utilisation de la télédétection pour la mise en valeur des bas-fonds et la caractérisation de leurs bassins versants. Applications à la région de la Comoé au Burkina Faso et à la région de Sikasso au Mali. UER Hydraulique Agricole (FSAGx), Gembloux.**

TABLE DES MATIERES

Sommaire	4
Liste des sigles utilisés	6
Avant-propos	8
Résumé	10
Introduction	17
Le programme de recherche	18
Objectifs et méthodologie générale	18
Les projets pilotes	19
Les outils et les méthodes	20
Moyens mis en oeuvre	23
Valorisation du programme de recherche	24
Transfert des résultats de la recherche vers le développement	24
Formation par la recherche de chercheurs et cadres du développement	27
Valorisation scientifique de la recherche	28

Première partie : Les milieux naturels : ressources et contraintes

L'Afrique de l'Ouest du 10ème au 15ème Parallèle	31
La situation géographique	31
Le contexte géologique	32
Le contexte climatique	33
La circulation atmosphérique	33
Les climats	34
Les sols	35
La végétation naturelle	39
La zone sahélienne	39
La zone soudanaise	40
La zone guinéenne	40
La mise en valeur agricole et pastorale	41
Représentativité des projets pilotes en Afrique de l'Ouest	42

Un climat tranché	43
Les températures	44
Les vents	44
L'humidité relative	46
La pluviométrie	46
La pluviométrie annuelle et ses fluctuations	46
Les pluviométries maximales	48
La pluviométrie et l'évapo-transpiration	49
Une hydrographie diversifiée sur un vieux socle pénéplané	53
Les caractéristiques physiques des bassins versants	53
Les réseaux hydrographiques	56
Les caractéristiques physiographiques	58
Cartographie des unités paysagiques	59
Aptitude au ruissellement des unités paysagiques	59
Des réserves en eaux souterraines inégalement réparties	63
Le domaine granitique	63
Les aquifères de la zone sahélienne	64
Les aquifères dans la zone soudanienne	66
Le domaine sédimentaire	68
Hydrologie des aquifères	69
Qualité chimique des aquifères	72
Des régimes hydrologiques capricieux	75
Les équipements hydrométriques	75
Les ressources en eaux superficielles	78
Apports annuels	78
Reconstitution d'apports au pas de temps journalier.	82
Les crues	86
Qualité des eaux de surface	88
Chimie des eaux en Casamance	88
Transports solides dans le Siné-Saloum	91
Des sols à faible potentiel agronomique	93
Morpho-pédologie	93
Morpho-pédologie longitudinale	93
Morpho-pédologie transversale	97
Caractéristiques physiques des sols	100
Granulométrie	100
Structure des sols de bas-fonds	103
Caractéristiques hydriques des sols	104
La teneur en eau et le potentiel de pression	105
La circulation de l'eau dans les sols	108
Caractéristiques chimiques des sols de bas-fonds	110
Les analyses chimiques	110
Interprétation des analyses chimiques	111
Les sols sulfatés acides de Basse Casamance	111
Atouts et contraintes des milieux naturels pour la mise en valeur agricole des bas-fonds	113
Atouts et contraintes liés au climat et à la ressource en eau	113
Atouts et contraintes liés à la nature des sols	116

Deuxième partie : L'homme et les bas-fonds en Afrique de l'Ouest

Une population jeune et mobile	121
Répartition de la population	121
Densité	121
Ethnies	122
Démographie et mise en valeur agricole	123
Le phénomène migratoire	123
L'extension des cultures dans les bas-fonds	124
Des systèmes de production dominés par les cultures de subsistance	127
Accès à la terre	127
Le régime foncier traditionnel	127
Le bas-fond, objet de convoitise	128
Les systèmes de production	129
Activités en milieu rural	129
Place des bas-fonds	131
Les aménagements : espoirs et désillusions	139
La mise en place des aménagements	139
Demande et participation paysanne	140
Réorganisation sociale	141
Réorganisation foncière	142
L'exploitation des aménagements	144
Gestion et entretien des aménagements : un problème social ?	144
L'intensification des cultures de bas-fonds : un problème économique ?	145
Conditions sociales et économiques du développement et de l'intensification des cultures des bas-fonds	151

Troisième partie : La mise en valeur des bas-fonds en Afrique de l'Ouest

La mise en valeur agricole traditionnelle: fruit d'une longue expérience dans la gestion des risques	155
Les cultures dans les bas-fonds	155
Superficies	155
Types de cultures	156
Les pratiques culturelles traditionnelles	157
En zone soudano - sahélienne: risques importants, pratiques minimales	157
En zone soudanienne : une maîtrise partielle des risques	159
En zone guinéenne: risques faibles, haute technicité	164
Les contraintes au développement des cultures de bas-fonds	166
Contraintes climatiques	166
Les temps de travaux : une contrainte économique	171
L'aménagement des bas-fonds : un pas vers l'intensification	173
Les aménagements	173
Principaux types régionaux	173
Problèmes de gestion et de mise en valeur agricole	177
Les projets pilotes et la problématique d'aménagement	179

Les projets pilotes et leurs aménagements: description	180
Le site pilote de Bidi au Yatenga	180
La digue filtrante	181
Le micro-barrage de Gourga	184
Les aménagements de la Comoé	188
L'aménagement avec collecteur central de Moadougou	188
L'aménagement en courbes de niveau de Kawara	191
Le site pilote de Kambo au sud du Mali	193
Le barrage demi-souterrain	193
Le site pilote de Djiguinoum en Casamance	198
Le barrage anti-sel	198
Comparaison entre aménagements	201
Les coûts	201
Les objectifs de production	202
La maîtrise de l'eau et son impact sur la production agricole	205
En zone sahélienne au Yatenga	205
Aménagement de type digue filtrante	205
Aménagement de type micro-barrage	207
En zone soudanienne	210
Aménagement de type diguettes suivant les courbes de niveau : plaine de Kawara	210
Aménagement avec collecteur central : le bas-fond de Moadougou	211
Aménagement de type barrage demi-souterrain: site de Kambo	213
En zone guinéenne estuarienne	215
Aménagement de type barrage anti-sel en Casamance	215
Comparaison entre aménagements	220
 L'intensification des cultures de bas-fonds : un pari difficile à tenir	 223
La valorisation du temps de travail: principale contrainte à l'intensification	223
Les innovations techniques et variétales augmentent-elles la productivité ?	226
La modélisation du fonctionnement d'un aménagement: une aide à la décision	228
 Planches photographiques	 230-231

Quatrième partie : Les bas-fonds en Afrique de l'Ouest

Typologie	233
Les typologies usuelles	233
Caractérisations géologique et climatique Albergel & Claude	233
Caractérisations climatique et géomorphologique de Raunet	234
Caractérisation morphologique et phytoécologique de Killian & Teissier	234
Critères typologiques pour une mise en valeur agricole	235
Critères régionaux	236
La zonation climatique et ses conséquences	236
La zonation géologique et ses conséquences	239
La densité de population	241
Le degré d'intégration à l'économie de marché	241
Critères locaux	242
La taille des bassins versants et ses conséquences	242
Les organisations sociales et foncières	243
La technicité des populations vis à vis de la maîtrise de l'eau	243
Les possibilités d'accès aux sources de financement	243
La typologie hydro-agricole	244
Caractères du milieu naturel	244
Caractères du milieu humain	245
Synthèse	247

Régionalisation	249
L'imagerie satellitaire dans les bas-fonds	249
Au Siné-Saloum	250
Région de Thyssé Kaymor	250
Région de Birkélane	252
Conclusion	253
Au sud du Mali et dans la Comoé	257
Mise en évidence des zones humides	257
Les principales unités agro-écologiques des zones humides	260
Dynamiques de l'eau et radiométrie satellitaire	261
Utilisation des images satellitaires pour la mise en valeur agricole des bas-fonds	263
Les paramètres climatiques régionaux	267
La pluviométrie annuelle	267
La pluie journalière maximale de fréquence décennale	268
L'évapo-transpiration potentielle	269
Les paramètres hydrologiques régionaux	270
La prédétermination des crues	271
La méthode de Rodier & Auvray	271
Conclusion	275
Au Sud du Mali	275
En Casamance	277
Prédétermination de la ressource en eau	278
Au sud du Mali	278
En Casamance	280
Régionalisation des paramètres de marée	283
Quels aménagements pour quels bas-fonds?	285
Dans les régions où la pluviométrie annuelle est inférieure à 1000 mm	286
Les digues filtrantes	286
Les barrages de retenue	287
Les systèmes aménagés	288
La protection des bas-fonds	290
Avantages et inconvénients des principaux types d'aménagements	291
Dans les régions où la pluviométrie annuelle est supérieure à 1000 mm	292
Le système traditionnel	292
Aménagement avec collecteur central	292
Aménagement avec digue déversante et barrage souterrain	293
Les systèmes avec canaux d'interception	294
Système avec diguettes de niveau	294
Système avec diguettes d'épandage/stockage et canaux d'irrigation	295
Avantages et inconvénients des principaux types d'aménagements	296
Les aménagements pour bas-fonds estuariens	298
Conclusion	299
De l'analyse des milieux	300
Pour une typologie hydro-agricole des bas-fonds	300
La nécessaire extension géographique du programme	301
Vers l'intensification et la diversification des cultures de bas-fonds	301
Références bibliographiques	303
Annexe 1 : Listes des participants au programme "Mise en valeur agricole des bas-fonds au Sahel"	313
Annexe 2 : Publications relatives aux projets pilotes	317
Table des matières	331

La Goutte d'Encre .

ATELIER DE REPROGRAPHIE

67.65.30.96



INERA

I E R

ORSTOM



UNIVERSITE AGRONOMIQUE
DE WAGENINGEN, PAYS BAS



FSAGx

MISE EN VALEUR DES BAS-FONDS AU SAHEL

Typologie

Fonctionnement hydrologique

Potentialités agricoles

La sécheresse, la dégradation de certains sols et la pression démographique ont amené les paysans du Sahel à chercher de nouvelles terres à mettre en culture. Les bas-fonds, zones temporairement inondées, font ainsi l'objet d'une exploitation croissante. La qualité chimique des sols y est bonne et l'eau disponible. Ils représentent une alternative économique intéressante pour les paysans sahéliens qui peuvent y développer une production de sécurité ou de rente en saison des pluies (sorgho, maïs, riz). En saison sèche, c'est une zone de pâturage, qui offre aussi d'intéressantes possibilités de maraîchage, d'arboriculture et de cultures de contre-saison.

La mise en valeur agricole de ces zones constitue l'une des réponses possibles à la crise actuelle des systèmes traditionnels de production. L'utilisation efficace des bas-fonds implique néanmoins d'installer des ouvrages hydrauliques pour mettre les terres à l'abri des crues, stocker et distribuer l'eau d'irrigation. Les aménagements doivent être techniquement fiables et gérables par les populations concernées. En effet, les bas-fonds constituent des écosystèmes fragiles, facilement dégradables.

Le CIEH a coordonné un programme de recherche localisé sur cinq sites représentatifs au Sahel afin de mieux connaître le fonctionnement naturel d'un bas-fond, les difficultés actuellement rencontrées pour leur mise en valeur, et d'expérimenter des aménagements et des techniques appropriées. Les sites choisis se situent dans le Yatenga et la Comoé au Burkina Faso, dans la région de Sikasso au Mali, dans le Siné-Saloum et la Casamance au Sénégal.

La recherche s'est inscrite dans le cadre du réseau R3S de la CORAF. Elle a associé plusieurs partenaires du Nord et du Sud qui ont élaboré ensemble des méthodes et des outils de recherche. Une analyse du bilan hydrologique et des crues ainsi qu'un suivi des nappes ont été réalisés sur plusieurs bassins versants de chaque site pilote. Ont été aussi étudiés la qualité chimique des eaux, les transports solides, les potentialités agronomiques des sols, les structures foncières, les systèmes de production et les itinéraires techniques des paysans. Parallèlement, des expérimentations agronomiques en station et en milieu paysan ont permis de connaître les possibilités d'intensifier et de diversifier les productions agricoles des bas-fonds.

Cette recherche a été l'occasion de concevoir, mettre au point et tester de nouveaux appareils de mesure, des outils de diagnostic et des méthodes de gestion de l'eau. Une typologie des bas-fonds, débouchant sur une analyse des différentes possibilités d'aménagement hydro-agricole, a été réalisée.

Les résultats de cette recherche concernant la conservation des eaux et des sols, l'amélioration de la fertilité et le contrôle de l'alimentation en eau des plantes cultivées permettent d'envisager, dans les régions étudiées, le passage d'une phase pilote à un projet de développement sur des surfaces plus importantes. Les dynamiques sociales et économiques seront alors des éléments déterminants du succès de ces initiatives.